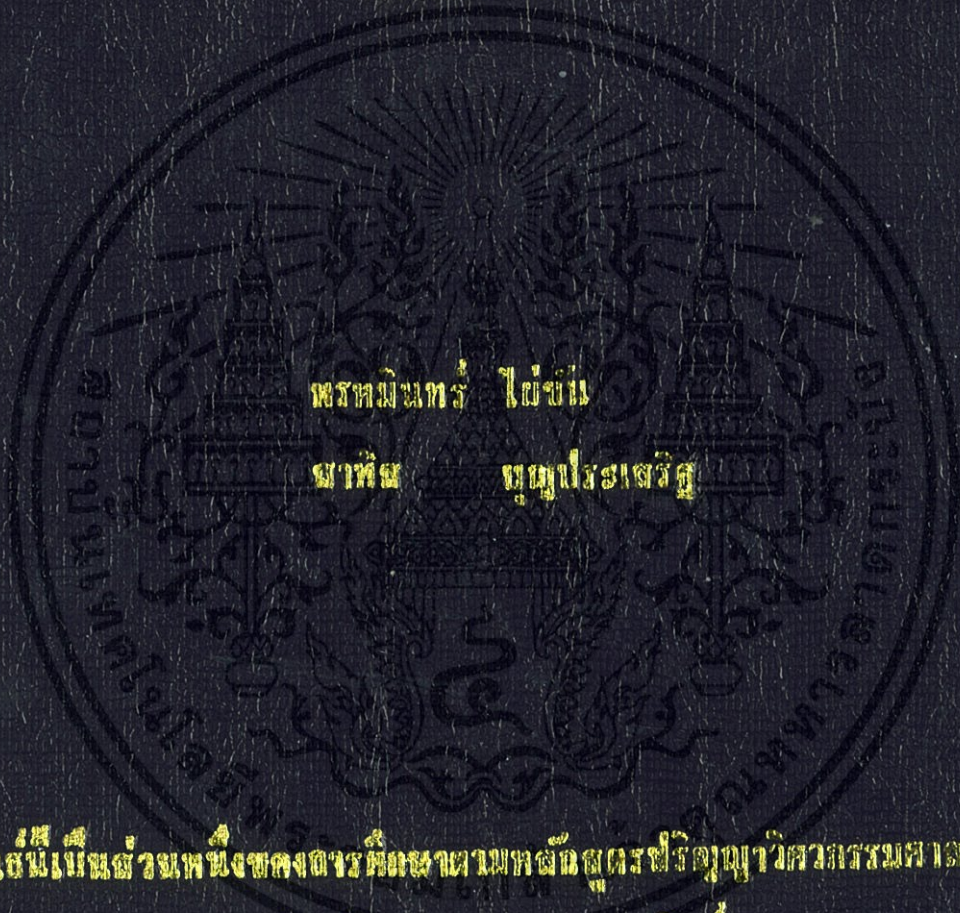


เครื่องกำเนิดพลังงานเพียโซอิเล็กทริกหมุนแบบหมุนสำหรับเก็บเกี่ยว

พลังงานลม

ROTARY PIEZOELECTRIC GENERATOR FOR WIND ENERGY HARVESTING



พรหมินทร์ ไชยอิน

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปริญญาโท เป็นส่วนหนึ่งของโครงการพัฒนาระบบผลิตพลังงานหมุนเวียนด้วย

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เครื่องกำเนิดพลังงานเพียโซอิเล็กทริกแบบหมุนสำหรับการเก็บเกี่ยว

พลังงานจากลม

ROTARY PIEZOELECTRIC GENERATOR FOR WIND ENERGY

HARVESTING



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงนี้ ปีการศึกษา 2556 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ROTARY PIEZOELECTRIC GENERATOR FOR WIND ENERGY  
HARVESTING



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2013

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องกำเนิดพลังงานเพียโซอิเล็กทริกแบบหมุนสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานจากลม

ROTARY PIEZOELECTRIC GENERATOR FOR WIND ENERGY HARVESTING

ผู้จัดทำ นายพรหมมินทร์ ไฝขัน 53011064

นายสาทิส บุญประเสริฐ 53011663

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

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์สองเมือง นันทขว้าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เครื่องกำเนิดพลังงานเพียโซอิเล็กทริกแบบหมุนสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานจากลม

โดย

นายพรหมมินทร์ ไผ่ชัน 53011064

นายสาทิส บุญประเสริฐ 53011663

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ดอน อิศรากร

อาจารย์สองเมือง นันทขว้าง

ปีการศึกษา 2556

## บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าและกังหันลมแนวตั้ง สำหรับใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานลม จุดประสงค์เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบกังหันลมแนวตั้งและการออกแบบอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้า โดยใช้เพียโซอิเล็กทริกให้มีประสิทธิภาพ จนกระทั่งสามารถนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้ไปเก็บในวงจรจัดเก็บพลังงานหรือใช้กับวงจรขนาดเล็กได้ ขั้นตอนดำเนินการ เริ่มจากการออกแบบและจำลองการเคลื่อนที่ของอากาศจากตัวโครงสร้างกังหันลมแนวตั้งต้นแบบ เพื่อนำมาพิจารณาหาจำนวนใบพัดและความกว้างที่เหมาะสมของใบพัด จากนั้นออกแบบอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้า โดยใช้เพียโซอิเล็กทริกโดยการทดลองจากตัวต้นแบบเพื่อหาค่าระยะห่างระหว่างแม่เหล็กที่เหมาะสมและพลังงานจากการหมุนในความเร็วรอบที่ต่างกันได้ หลังจากนั้นนำทั้งสองส่วนมาประกอบเพื่อทำการทดลองกับพลังงานลมในความเร็วต่างๆ และหาพลังงานที่ได้จากระบบทั้งหมดและท้ายที่สุดคือการทดลองกับวงจรจัดเก็บพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ROTARY PIEZOELECTRIC GENERATOR FOR WIND ENERGY

## HARVESTING

By

Mr. Promin Faikhan 53011064

Mr. Satis Boonprasert 53011663

Advisors

Dr. Don Isarakorn

Mr. Songmoung Nundrakwang

Academic Year 2013

### ABSTRACT

This thesis is represented the design of the harvesting piezoelectric device and the vertical axis turbine for the efficacious wind energy harvesting. This research has processes start with the flow simulation design of the vertical axis turbine to consider the number and width of blades. Next, design a structure which transducers energy from wave to piezoelectric generator with test equipment, then design a storage circuit that using energy from piezoelectric generator.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปฏิญานិพนธ์ฉบับนี้ จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้หากปราศจากคำแนะนำจาก ดร. ดอน อิศรากร และอาจารย์สองเมือง นันทขว้าง ที่ได้สละเวลาอันมีค่า ให้คำปรึกษา ดูแลอย่างใกล้ชิด มาโดยตลอด อีกทั้งยังเอื้อเพื่ออุปกรณ์ในยามจำเป็น อาจารย์ทั้งสองท่านเปรียบเสมือนแนวทาง และ แรงบันดาลใจในการพัฒนาผลงานชิ้นนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ได้ ผู้จัดทำมีความซาบซึ้ง และขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านทั้งสองให้คำปรึกษาที่ดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คณาจารย์ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่คอยประสาทวิชาต่างๆ ตลอดสี่ปีใน ร่วมหาวิทยาลัยแห่งนี้ จนทางผู้จัดทำสามารถผลิตผลงานชิ้นนี้ออกมาสำเร็จได้ ทั้งทางตรงและ ทางอ้อม

ขอขอบคุณบิดา และมารดาที่คอยสนับสนุน อบรมสั่งสอน และส่งเสียจนจบการศึกษาใน ระดับปริญญาตรีนี้ ถ้าไม่ได้พวกท่านก็คงไม่สามารถมีวันนี้ได้

ขอขอบคุณ คุณธำปรัตน์ สุธาวิยางกูร ที่คอยตอบคำถามผู้จัดทำในทุกๆ เรื่อง และเป็นรุ่นพี่ ตัวอย่างที่ดีในการทำกรวิจัยชิ้นนี้

ขอขอบคุณ คุณกฤษตินท์ กมลพัฒนะ และคุณศุภวัฒน์ ชัยสวัสดิ์ ที่คอยช่วยเหลือและให้ ความเห็นกับงานวิจัยชิ้นนี้มาโดยตลอด

คณะผู้จัดทำ

นายพรหมมินทร์ ไผ่ชัน

นายสาทิส

บุญประเสริฐ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการศึกษา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	3
1.6 รายละเอียดของปริญญานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พลังงานลม	4
2.1.1 ประเภทของลม	4
2.1.2 รูปแบบของกังหันลม	7
2.1.3 ความเร็วลมและประสิทธิภาพของกังหันลม	8
2.2 เพียโซอิเล็กทริก	10
2.3 สนามแม่เหล็ก	13
2.3.1 เส้นแรงแม่เหล็ก	14
บทที่ 3 หลักการออกแบบระบบ	15
3.1 การออกแบบต้นแบบใบพัดแนวตั้งชุดที่หนึ่ง	16
3.2 การออกแบบต้นแบบใบพัดแนวตั้งชุดที่สอง	19
3.3 การออกแบบอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก	21
3.4 ไดโอด	23
3.5 วงจรจัดการพลังงาน	23
3.6 ตัวเก็บประจุ	24
3.7 อุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก	25
3.8 ฐานชุดทดลอง	25
3.9 มอเตอร์เกียร์กระแสตรง	26
3.10 ตัวต้านทาน	26
3.11 ออสซิลโลสโคป	27
3.12 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	27
3.13 อุโมงค์ลม	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อย่างไรก็ตามมีเหตุผลบางประการ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเอกสารไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.14 เครื่องวัดความเร็วรอบ (Digital Tachometer)	28
3.15 เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer)	29
<b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง</b>	<b>30</b>
4.1 การทดลองอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเพียโซอิเล็กทริก	30
4.1.1 การทดลองเพื่อหาระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างแม่เหล็กที่ติดบนเพียโซอิเล็กทริกกับแม่เหล็กบนแผ่นโรเตอร์	30
4.1.2 การทดลองเพื่อหาจำนวนแม่เหล็กและระยะห่างเชิงมุมของแม่เหล็กแต่ละตัวบนโรเตอร์	31
4.1.3 การทดลองเพื่อหาวิธีการต่อวงจรระหว่างแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแต่ละตัว	32
4.1.4 การทดลองเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าจากอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกที่ค่าความต้านทานต่างๆ	34
4.2 การทดลองชุดอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า	36
4.2.1 การทดลองชุดอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยส่วนที่เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกลใช้กังหันลมชุดที่ 1	36
4.2.1.1 การทดลองหาค่าความเร็วลมเข้า	36
4.2.2 การทดลองชุดอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยส่วนที่เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกลใช้กังหันลมชุดที่ 2	37
4.2.2.1 การทดลองหาค่าความเร็วลมเข้า	37
4.2.2.2 การทดลองเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและความเร็วรอบกังหันลม	38
4.2.2.3 การทดลองหาค่าประสิทธิภาพของกังหันลมในการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกล	39
4.2.2.4 การทดลองหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า	40
4.2.2.5 การทดลองหาค่าความต่างศักย์ที่ได้จากการชาร์จประจุกับตัวเก็บประจุ	43
4.2.2.6 การทดลองต่ออุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกับวงจรจัดเก็บพลังงาน	44
<b>บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป</b>	<b>47</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง	47
5.2 ปัญหาที่พบและวิธีแก้ไข	47
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก	50
ภาคผนวก ก โปรแกรมออกแบบและการจำลองจากโปรแกรม	51
ภาคผนวก ข เอกสารคู่มืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	55
ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการทดลอง	83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลมมรสุมฤดูหนาว	5
2.2 ลมมรสุมฤดูร้อน	6
2.3 ลมบกและลมทะเล	6
2.4 ลมภูเขาและลมหุบเขา	7
2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_p$ กับค่า Tip Speed Ratio ( $\lambda$ )	9
2.6 ปรากฏการณ์ Piezoelectricity	10
2.7 การ Poling ของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	11
2.8 เส้นแรงแม่เหล็ก	14
3.1 แผนผังภาพรวมของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานลมโดยเพียโซอิเล็กทริก	15
3.2 ใบพัดแนวตั้งแบบสองใบ	16
3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของใบพัดและแรงบิด	17
3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของใบพัดและแรงบิด	17
3.5 กังหันลมต้นแบบชุดที่หนึ่ง	18
3.6 ตัวอย่างการตั้งค่าและวิเคราะห์แบบจำลองแบบสองและสามใบพัด	19
3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมรับลมกับแรงบิดของใบพัดสองและสามใบ	19
3.8 ขั้นตอนการทาสารพีวีเอ	20
3.9 ขั้นตอนการไล้ฟองอากาศ	20
3.10 กังหันลมต้นแบบชุดที่สอง	21
3.11 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ติดแม่เหล็กตรงบริเวณขอบของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก	21
3.12 ฐานยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกและการติดฐานยึดเพียโซอิเล็กทริกกับสเตเตอร์	22
3.13 แผ่นโรเตอร์ที่ติดแม่เหล็กด้านบนของแผ่น	22
3.14 ชุดทดลองที่ทำการติดสเตเตอร์โรเตอร์และมอเตอร์	22
3.15 ไดโอด รุ่น BAT-46	23
3.16 แผงวงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1	23
3.17 วงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1	24
3.18 ตัวเก็บประจุ	24
3.19 อุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก	25
3.20 ฐานชุดทดลอง	25
3.21 มอเตอร์เกียร์กระแสตรง	26
3.22 ชุดตัวต้านทาน	26
3.23 ออสซิลโลสโคปที่ใช้ในการทดลอง	27
3.24 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดลอง	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25 เครื่องเป่าลม Deton PVT-30	28
3.26 เครื่องวัดความเร็วรอบ	28
3.27 เครื่องวัดความเร็วลม	29
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้า	30
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการหมุนของโรเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสอง	31
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	32
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	33
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	33
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	34
4.7 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าแบบหมุนโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกที่ได้	35
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วลมเข้ากับระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก	36
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วลมเข้ากับระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก	38
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วลม	38
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด	39
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	40
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	41
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	42
4.15 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป	43
4.16 กราฟแสดงระยะเวลาที่ใช้ในการชาร์ต	45
4.17 กราฟแสดงระยะเวลาที่ใช้ในการทำงาน	45
ก.1 แบบจำลองใบพัดอย่างง่ายหนึ่ง	51
ก.2 แบบจำลองใบพัดอย่างง่ายสอง	52
ก.3 การจำลองแรงดันจากแรงลมของใบพัดที่หนึ่ง	52
ก.4 การจำลองแรงดันจากแรงลมของใบพัดที่สอง	53
ก.5 การจำลองทิศทางจากแรงลมของใบพัดที่หนึ่ง	53
ก.6 การจำลองทิศทางจากแรงลมของใบพัดที่สอง	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่

4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัวเก็บประจุและค่าความต้านทานกับเวลา

หน้า

44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการศึกษา

ปัจจุบันมีการนำพลังงานหมุนเวียนจากธรรมชาติมาใช้งานมากขึ้น เนื่องจากมนุษย์มีความต้องการในการใช้พลังงานที่มากขึ้น และพลังงานหมุนเวียนจากธรรมชาติเป็นพลังงานที่สะอาด ต่อเนื่องและไม่มีวันหมดไป ซึ่งสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ พลังงานลมก็เป็นพลังงานธรรมชาติทางเลือกหนึ่งที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ความกดดันของบรรยากาศ และแรงจากการหมุนของโลก ทำให้เกิดเป็นกำลังลมและความเร็วลมซึ่งเป็นปัจจัยที่นำมาใช้ในการศึกษาและวิจัย เพื่อให้สามารถนำมาใช้ได้จริง ในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากลมนั้นสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานทางกลหรือพลังงานไฟฟ้า และนำพลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานลมนั้นไปประยุกต์ใช้

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า พลังงานลมในประเทศไทยนั้นมีค่าเฉลี่ยความเร็วลมอยู่ในระดับที่ต่ำ ผู้วิจัยจึงใช้ข้อมูลนี้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อใช้ในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากลม ซึ่งผู้วิจัยมีความสนใจในเรื่องการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนพลังงานลมมาเป็นพลังงานไฟฟ้านั้น สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกลโดยใช้กังหันลม และเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเพียโซอิเล็กทริก และใช้กังหันลมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสกัดกันพลังงานจลน์จากลมเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานกล กังหันลมโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท โดยแบ่งประเภทจากลักษณะแกนหมุนของกังหันลม คือแบบแนวนอน และแบบแนวตั้ง ซึ่งกังหันลมแบบแนวนอนเป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนของกังหันขนานกับทิศทางของกระแสลมในแนวราบและมีใบพัดเป็นฉากสำหรับรับลม มีอุปกรณ์ในการปรับหน้าใบพัดรับลมให้อยู่ในทิศทางที่กระแสลมพัดมาที่เรียกว่า หางเสือ กังหันลมแบบแนวนอนเป็นกังหันลมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีผลการศึกษาวิจัยมากมาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบแนวตั้ง ในทางกลับกัน กังหันลมแบบแนวตั้ง เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของกระแสลมในแนวราบ ซึ่งทางผู้จัดทำมีความสนใจที่จะปรับปรุงและออกแบบกังหันลมแนวตั้งเนื่องจากสามารถรับแรงลมได้ทุกทิศทาง โดยออกแบบให้มีขนาดเหมาะสมและมีประสิทธิภาพเพื่อใช้ในพื้นที่ที่มีความเร็วลมต่ำ และสามารถนำมาใช้กับอุปกรณ์ในการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กได้ และอุปกรณ์ในการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้านั้น ผู้วิจัยเลือกใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก ซึ่งเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงกลจะทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้า ในการออกแบบนั้นผู้วิจัยได้ใช้แรงจากแม่เหล็กในการส่งผ่านแรงกระทำบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้แรงกระทำที่แผ่นโดยตรง เนื่องจากจะทำให้พื้นผิวของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเกิดความเสียหายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษา การออกแบบ อุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยแบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกล และส่วนที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ให้มีประสิทธิภาพและสามารถใช้งานได้ภายใต้ข้อจำกัดในเรื่องของขนาดของอุปกรณ์และความเร็วของกระแสลม โดยมีวัตถุประสงค์ในการวิจัยดังนี้

1. เพื่อออกแบบอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก
2. เพื่อออกแบบกังหันลมซึ่งเป็นส่วนที่เปลี่ยนพลังงานจลน์จากกระแสลมเป็นพลังงานกล ที่สามารถทำงานได้ในความเร็วลมต่ำ
3. เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนพลังงานจลน์จากกระแสลมเป็นพลังงานไฟฟ้า

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากการศึกษาการนำพลังงานลมมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในประเทศไทยพบว่า มีการทดลองติดตั้งอุปกรณ์การเปลี่ยนพลังงานลมขึ้น ซึ่งผลเป็นที่น่าพอใจแต่ประสบปัญหาในด้านพลังงานไฟฟ้าที่ได้นั้นไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมที่ไม่แน่นอน และอุปกรณ์ดังกล่าว นั้นสามารถใช้งานได้ในพื้นที่บางแห่งของประเทศซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความเร็วเฉลี่ยอยู่ในระดับสูงสุดของประเทศ เช่น บริเวณชายฝั่งอ่าวไทยและเกาะต่างๆ ซึ่งความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่อื่นๆ ของประเทศไทย นั้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำ เพื่อที่จะใช้ประโยชน์จากพลังงานลมในพื้นที่ทั่วไปนั้น ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบกังหันลมที่สามารถเปลี่ยนพลังงานลมที่มีความเร็วลมต่ำให้เป็นพลังงานกล และเพื่อศึกษาการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริกผู้วิจัยจึงได้ออกแบบอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก และศึกษาการนำมาอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้ร่วมกัน

## 1.4 ขอบเขตการศึกษา

ในการออกแบบและศึกษาอุปกรณ์เกี่ยวกับพลังงานจากลมของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ มีจุดมุ่งหมายเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบกังหันลมแนวตั้ง การออกแบบอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก และสามารถนำกังหันลมกับอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานลมมาใช้ร่วมกันได้โดยวิเคราะห์ตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อการใช้งานร่วมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเชิงปริมาณเน้นการปฏิบัติการ โดยเริ่มจากการสืบค้นข้อมูลการวิจัยและบทความต่างๆ ทางวิชาการทางด้านพลังงาน โดยมุ่งเน้นไปทางการเก็บเกี่ยวพลังงานจากลมโดยใช้กังหันลมแนวตั้ง เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการศึกษา วิจัย ออกแบบ และพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากลม ทำการออกแบบและจำลองการเคลื่อนที่ของอากาศจากตัวโครงสร้างกังหันลมแนวตั้งต้นแบบ เพื่อนำมาพิจารณาหาจำนวนใบพัด และความกว้างที่เหมาะสมของใบพัด จากนั้นออกแบบอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกโดยการทดลองจากตัวต้นแบบเพื่อหาค่าระยะห่างระหว่างแม่เหล็กที่เหมาะสม และพลังงานจากการหมุนในความเร็วรอบที่ต่างกันได้ จากนั้นนำทั้งสองส่วนมาประกอบและทำการทดลองกับกระแสลมในความเร็วลมต่างๆ เพื่อปรับปรุงทั้งสองส่วนให้สามารถใช้ร่วมกันได้ภายใต้ข้อจำกัดในด้านต่างๆ และเพื่อนำค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลองดังกล่าวมาวิเคราะห์เพื่อดูความสัมพันธ์

## 1.6 รายละเอียดของปริญญานิพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย

บทที่ 1 บทนำ กล่าวนำถึงความจำเป็นมา หลักการ วัตถุประสงค์ สมมติฐาน ขอบเขต ขั้นตอนการศึกษา และการจัดทำรายงาน พร้อมทั้งรายละเอียดของปริญญานิพนธ์แต่ละบท

บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณหาค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานลมเป็นพลังงานกล การออกแบบกังหันลมแนวตั้ง ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

บทที่ 3 หลักการออกแบบ นำเสนอวิธีการออกแบบกังหันลมในแนวตั้ง และอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริก

บทที่ 4 การทดลอง นำเสนอผลการทดลอง การวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่ได้จากผลการทดลอง

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป สรุปผลการทดลองและความรู้ที่ได้จากการทดลอง ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบกังหันลมแนวตั้งเพื่อเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกล และอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริก จำเป็นต้องศึกษาหลักการ ทฤษฎี และองค์ประกอบต่างๆ ดังนั้นในบทนี้ จะศึกษาทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.1 พลังงานจากลม

ลม เกิดจากการแผ่รังสีความร้อนของดวงอาทิตย์มายังโลก ซึ่งแต่ละพื้นที่ของโลกจะได้รับความร้อนที่ไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิและความกดอากาศไม่เท่ากัน บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงหรือความกดอากาศต่ำอากาศในบริเวณนั้น จะเกิดการขยายตัวทำให้ความหนาแน่นน้อยลง เป็นผลทำให้ความกดอากาศลดลงทำให้มวลอากาศลอยตัวขึ้นสูง อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าหรือมีความกดอากาศสูงกว่าจะไหลเข้ามาแทนที่ การเคลื่อนของมวลอากาศจากปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงเกิดเป็นกระแสลม

#### 2.1.1 ประเภทของลม

**ลมประจำปี (Prevailing Wind)** เป็นลมที่พัดตลอดทั้งปีในสวนต่างๆ ของโลก แตกต่างกันไปในแต่ละเขตละติจูดของโลก ประเทศไทยอยู่ในบริเวณเขตเส้นศูนย์สูตร อิทธิพลของลมประจำปีจึงไม่มีประโยชน์ในการนำมาใช้

**ลมประจำฤดู (Seasonal Wind)** เป็นลมที่เกิดขึ้นเฉพาะท้องถิ่นหนึ่งๆ มีบริเวณและเป็นลมที่พัดเป็นเวลานานตลอดฤดูกาลในแต่ละปี เรียกว่าลมมรสุม เกิดจากความแตกต่างของภูมิภาคและความต่างของความกดอากาศเหนือพื้นดินและพื้นน้ำเป็นประการสำคัญ ลมมรสุม มาจากคำในภาษาอาหรับว่า Mausim แปลว่าฤดู ดังนั้นลมมรสุมจึงหมายถึงลมที่พัดเปลี่ยนทิศทางการเปลี่ยนฤดูคือ ฤดูร้อนจะพัดในทิศทางหนึ่ง และจะพัดเปลี่ยนทิศทางในทางตรงกันข้ามในฤดูหนาว ในครั้งแรกใช้เรียกลมนี้ในบริเวณทะเลอาหรับซึ่งพัดอยู่ในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือเป็นระยะเวลา 6 เดือน และพัดอยู่ในทิศทางตะวันตกเฉียงใต้เป็นระยะเวลา 6 เดือน แต่อยู่ในส่วนอื่นๆ ของโลก ลมมรสุมที่เห็นชัดเจนที่สุดคือ ลมมรสุมที่เกิดขึ้นในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ลักษณะการเกิดลมมรสุมเป็นทำนองเดียวกับการเกิดลมบกลมทะเล ในฤดูหนาวอากาศภายในภาคพื้นทวีปเย็นกว่าอากาศในมหาสมุทรที่อยู่ใกล้เคียง ทำให้ภาคพื้นทวีปบริเวณไซบีเรียเป็นเขตความกดอากาศสูง ส่วนบริเวณมหาสมุทรอินเดียเป็นเขตความกดอากาศต่ำ อากาศเหนือมหาสมุทรอินเดียซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณไซบีเรียจะลอยตัวสูงขึ้น และอากาศบริเวณไซบีเรียจะไหลเข้าไปแทนที่ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาอากาศที่ไหลออกจากบริเวณความกดอากาศสูงไซบีเรียเป็นอากาศที่ไหลจมลง และทิศทางลมจะเบนไปทางขวากลายเป็นลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือผ่านเข้าไปยังเอเชียตะวันออกเฉียงและเอเชียใต้โดยทั่วไปไม่มีลักษณะอากาศดี และเป็นฤดูที่มีอากาศแห้ง ดังนั้นลมมรสุมฤดูหนาวลักษณะท้องฟ้าแจ่มใส เป็นลมที่พัดจากฝั่งออกสู่ทะเลซึ่งมีทิศทางดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในฤดูร้อนลมจะพัดเปลี่ยนในทิศทางตรงกันข้าม อากาศภาคพื้นทวีปอุ่นกว่าพื้นน้ำ ซึ่งทำให้ภาคพื้นทวีปเป็นเขตความกดอากาศต่ำพื้นน้ำเป็นเขตความกดอากาศสูง เกิดลมพัดจากพื้นน้ำที่เป็นเขตความกดอากาศสูงเข้าสู่พื้นดินที่เป็น

เขตความกดอากาศต่ำ ในทิศทวนเข็มนาฬิกากลายเป็นมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ลมที่พัดจากพื้นน้ำเข้ามา นำเอาความชื้นมาด้วย เป็นลมที่พัดจากทะเลเข้าหาฝั่ง มรสุมที่มีกำลังแรงจัดที่สุดเกิดขึ้นในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และเอเชียใต้ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้แก่ ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ไต้หวัน ญี่ปุ่น และสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนเกาหลี ลมมรสุมที่เกิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จะแตกต่างจากเอเชียใต้คือ ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ลมมรสุมฤดูหนาวมีกำลังแรงกว่า และมีทิศทางที่คงที่กว่ามรสุมฤดูร้อน ความเร็วลมตามชายฝั่งในเดือนมกราคมจะมีมากกว่าเดือนกรกฎาคมหลายเท่า ส่วนลมมรสุมในเอเชียใต้รวมทั้งประเทศอินเดีย ปากีสถาน และประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ลมมรสุมฤดูหนาวไม่สามารถแผ่เข้าไปถึงดินแดนเหล่านี้ได้ เพราะมีเทือกเขาหิมาลัยขวางกั้นอยู่



ดังนั้นเอเชียใต้จึงได้รับมรสุมโดยตรงเฉพาะในช่วงฤดูร้อนเท่านั้นซึ่งมีทิศทางของลมดังแสดงในรูปที่ 2.2 และลมจะมีกำลังแรงในฤดูร้อนแม้แต่ในมหาสมุทรคือ ฤดูร้อนลมมีความเร็วเฉลี่ย 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ส่วนฤดูหนาวลมมีกำลังอ่อนมีความเร็วน้อยกว่า 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บริเวณที่มีฝนตกหนักเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมฤดูร้อนคือ เมืองเซอร่าบันจิ ทางภาคตะวันออกของประเทศอินเดีย มีปริมาณฝนตกในแต่ละปีประมาณ 10,800 มิลลิเมตร ส่วนใหญ่จะมีฝนตกในช่วงเดือนเมษายนถึงตุลาคม ฝนที่ตกมีประโยชน์ทางการเกษตรทำให้พืชผลเจริญเติบโต

เนื่องจากบริเวณที่มีฝนอากาศแห้งแต่ฝนที่ตกลงมา มีข้อเสีย เนื่องจากช่วงเวลาที่มีฝนตกจะมีความไม่แน่นอนรวมทั้งความแรงของฝน สำหรับประเทศไทยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมทั้งสองฤดู คือ ในช่วงฤดูฝนประมาณต้นเดือนพฤษภาคมจนถึงเดือนต้นเดือนตุลาคม ได้รับลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และต่อมาในช่วงฤดูหนาว ประมาณปลายเดือนตุลาคมจนถึงปลายเดือนกุมภาพันธ์ ลมจะเปลี่ยนทิศเป็นลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

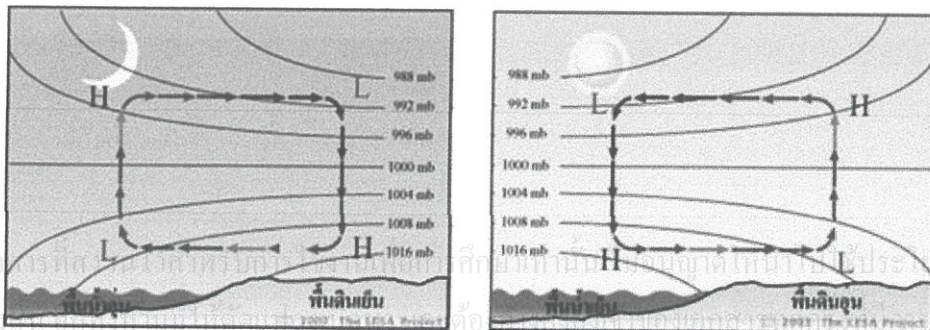
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ลมมรสุมฤดูร้อน

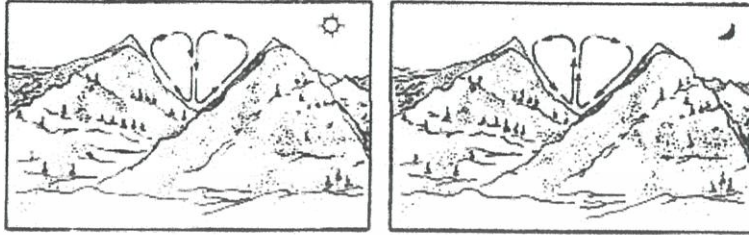
นอกจากลมมรสุมที่เกิดขึ้นทวีปเอเชียแล้ว ยังมีลมมรสุมที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนอื่นของโลก เช่น ทางภาคเหนือของประเทศออสเตรเลีย เมื่อลมมรสุมพัดข้ามศูนย์สูตรจะเปลี่ยนทิศทางเป็นลมมรสุม ตะวันตกเฉียงเหนือพัดเข้าสู่ทางภาคเหนือของประเทศออสเตรเลีย ซึ่งมีแนวเขตลมค้าเบียดตัวเข้าหากันพัดผ่านอยู่ เป็นแนวแบ่งเขตระหว่างลมค้าตะวันออกเฉียงเหนือของซีกโลกเหนือกับลมค้า ตะวันออกเฉียงใต้ของซีกโลกใต้ รวมทั้งมีลมมรสุมเกิดขึ้นในอ่าวกินีของแอฟริกาตะวันตกบางส่วนของ ทวีปอเมริกาเหนือ และบางส่วนของทวีปอเมริกาใต้

**ลมประจำเวลา (Diurnal Wind)** เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความกดอากาศระหว่างพื้นที่ 2 พื้นที่ในช่วงเวลาสั้นๆ ได้แก่ ลมบก ลมทะเล ลมภูเขา และลมหุบเขา ลมบกและลมทะเล เกิดจาก ความร้อนซึ่งแตกต่างกันระหว่างบริเวณทะเลและพื้นดินตามชายฝั่งในตอนเช้าและตอนบ่าย เวลา กลางวันผืนแผ่นดินตามชายฝั่งได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์ ทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณทะเล ดังนั้น อากาศในบริเวณแผ่นดินจึงมีความแน่นน้อยกว่า และความกดก็ลดลงด้วยจึงลอยตัวขึ้น ดังนั้นอากาศ เย็นตามบริเวณทะเลจะพัดเข้ามาแทนที่ ลมซึ่งพัดจากทะเลนี้เรียกว่า ลมทะเล (Sea Breeze) ซึ่ง เกิดขึ้นในตอนบ่ายและเย็น นอกจากตามชายฝั่งทะเลแล้ว ลักษณะคล้ายลมทะเลนี้อาจจะเกิดขึ้นตาม ทะเลสาบใหญ่ๆ ก็ได้ ส่วนมากลมบก (Land Breeze) นั้น เกิดขึ้นในทิศตรงกันข้ามกับทะเล และมี กำลังแรงน้อยกว่า กล่าวคือในตอนกลางคืนพื้นน้ำมีอุณหภูมิสูงกว่าผืนแผ่นดิน ดังนั้นอากาศในบริเวณ ทะเลซึ่งมีความแน่นน้อยกว่าจะลอยตัวขึ้น อากาศเย็นในบริเวณแผ่นดินจะพัดออกไปแทนที่ ซึ่งรูปที่ 2.3 แสดงทิศทางของกระแสลมบก และลมทะเล



รูปที่ 2.3 ลมบกและลมทะเล

**ลมภูเขาและลมหุบเขา** เกิดขึ้นในเวลากลางวัน อากาศตามภูเขาและลาดเขาร้อน เพราะได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์เต็มที่ ส่วนอากาศที่หุบเขาเบื้องล่างมีความเย็นกว่าจึงไหลเข้าแทนที่ทำให้มีลมเย็นจากหุบเขาเบื้องล่างพัดไปตามลาดเขาขึ้นสู่เบื้องบน เรียกว่า ลมหุบเขา ซึ่งมีทิศทางของกระแสลมดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลมภูเขาและลมหุบเขา

ลมเป็นพลังงานสะอาดที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่มีวันหมด และในปัจจุบันได้มีการใช้ประโยชน์จากพลังงานลมเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยการแปรเปลี่ยนพลังงานจากพลังงานจลน์ของกระแสลมเป็นพลังงานกลโดย “กังหันลม” เมื่อมีลมพัดผ่านใบกังหันลม พลังงานจลน์ที่เกิดจากลมจะทำให้ใบพัดของกังหันเกิดการหมุนและได้เป็นพลังงานกลออกมา พลังงานกลจากแกนหมุนของกังหันลมจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบต่อไป โดยปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของลมความยาวของใบพัดและสถานที่ตั้ง ปัจจุบันมีการนำมาใช้งานทั้งกังหันลมขนาดเล็กและขนาดใหญ่

### 2.1.2 รูปแบบของกังหันลม

กังหันลมโดยทั่วไปจะมีรูปแบบพื้นฐานหลัก คล้ายๆ กัน แต่อาจแตกต่างกันในบางส่วนของรายละเอียด ดังนั้นการแบ่งประเภทของกังหันลมมักจะยึดเอาลักษณะการวางตัวของแกนเพลลาของกังหันเป็นหลัก ซึ่งประเภทหลักๆ ของกังหันลมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวนอน และกังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวตั้ง

**กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine)** เป็นกังหันลมที่มีทิศทางของแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ ทำให้สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง และสามารถติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ระดับพื้นด้านล่างได้ กังหันลมแบบแกนตั้งมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานต่ำ มีข้อจำกัดในการขยายให้มีขนาดใหญ่และการยกชุดใบพัดเพื่อรับแรงลม ปัจจุบันมีการใช้งานกังหันลมแบบนี้้น้อยมาก

**กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine)** เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของลม โดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากรับแรงลมมีอุปกรณ์ควบคุมกังหันให้หันไปตามทิศทางของกระแสลม เรียกว่าหางเสือ และมีอุปกรณ์ป้องกันกังหันชำรุดเสียหายขณะเกิดลมพัดแรง เช่น ลมพายุและตั้งอยู่บนเสาที่แข็งแรงกังหันลมแบบแกนนอน ได้แก่ กังหันลมวินด์มิลล์ (Windmills) กังหันลมใบเสื่อลำแพนนิยมใช้กับเครื่องดูดน้ำกังหันลมแบบกัล้อจักษ์ยานกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้าแบบพรอปเพลลอร์ (Propeller)

จำนวนใบพัด โดยทั่วไป กฎของการหาจำนวนใบพัดที่เหมาะสมสำหรับกังหันลมขึ้นอยู่กับตัวแปรต่อไปนี้คือ ถ้าต้องการผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วรอบสูงแรงบิดต่ำกังหัน จะต้องการจำนวนใบพัดที่น้อย แต่ถ้าเป็นกังหันลมซึ่งประยุกต์ใช้เพื่อการสูบน้ำหรือสีข้าว กังหันชนิดนี้ต้องการแรงบิดสูงที่ความเร็วรอบต่ำ ดังนั้นกังหันชนิดนี้ต้องการจำนวนใบพัดมาก จำนวนใบพัดต่ำสุดที่ควรจะมีของกังหันลมคือ หนึ่งใบซึ่งมีข้อดีคือ ลดน้ำหนักของใบพัดลง อย่างไรก็ตามการหมุนของกังหันแบบใบเดียวไม่ดีเท่าที่ควร กังหันลมแบบสองใบเป็นแบบหนึ่งที่ยอมรับใช้กัน แต่การหมุนก็ยังไม่ราบรื่นนักกังหันลมแบบสามใบให้การหมุนของแกนกังหันที่ราบรื่น แต่ก็มีน้ำหนักมากทำให้ต้องการโครงสร้างรองรับที่แข็งแรง ซึ่งส่งผลถึงงบประมาณการลงทุน อย่างไรก็ตามปัจจุบันกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบสามใบพัดเป็นที่นิยมและมีส่วนแบ่งทางการตลาดสูงกว่า นอกจากนี้ยังมีข้อดีมากกว่าแบบสองใบพัดอีก คือ ให้ความสวยงามมากกว่าในด้านของรูปลักษณ์และการมอง และมีเสียงดังรบกวนน้อยกว่า

### 2.1.3 ความเร็วลมและประสิทธิภาพของกังหันลม

ความเร็วลมจากธรรมชาติหน่วยที่ใช้วัดคือ ไมล์ต่อชั่วโมง (Mike/Hour) เมตรต่อวินาที (Meter/Second) ฟุตต่อวินาที (Foot/Minute) ความเร็วลมในระดับที่กังหันลมเริ่มหมุนออกตัวเรียกว่า ความเร็วลมเริ่มต้น (Starting Wind Speed) ความเร็วที่กังหันลมสามารถเริ่มต้นทำงานและผลิตไฟฟ้าได้เรียกว่า ความเร็วลมเข้า (Cut-in Wind Speed) ความเร็วที่ลมในระดับที่จ่ายกำลังได้เต็มพิกัดอย่างต่อเนื่อง เรียกว่า ความเร็วลมเต็มพิกัด (Rated Wind Speed) ความเร็วลมในระดับสูงที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายได้จำเป็นต้องหยุดการทำงาน เรียกว่า ความเร็วลมตัดออก (Cut-out Wind Speed )

ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลมนั้น ตัวแปรที่ต้องใช้ เรียกว่า  $C_p$  (Power Coefficient) โดยเป็นการเปรียบเทียบจากพลังงานที่กังหันลมสกัดได้จากพลังงานจลน์จากกระแสลมกับพลังงานจลน์จากกระแสลมอิสระ ซึ่งหมายถึงการวิเคราะห์ระหว่างพลังงานที่ผลิตได้ เทียบกับพลังงานที่จ่ายให้กับระบบ สามารถหาค่าประสิทธิภาพของกังหันลมได้จากสมการที่ (2.1)

$$C_p = \frac{\left(1 - \frac{v_d}{v_u}\right) \left(1 - \left(\frac{v_d}{v_u}\right)^2\right)}{2} \quad (2.1)$$

โดย  $v_u$  คือ ความเร็วลมหน้าใบพัด

$v_d$  คือ ความเร็วลมหลังใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

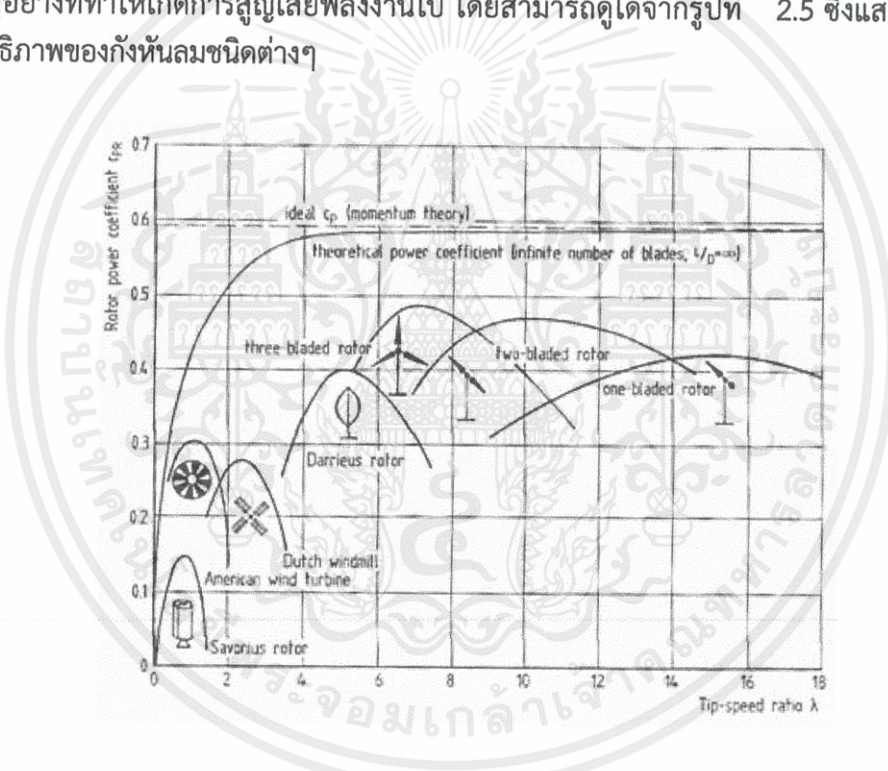
อัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด (Tip Speed Ratio,  $\lambda$ ) คือ อัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นของใบพัดตรงส่วนปลายใบพัด จากการหมุนกับความเร็วมหันหน้าใบพัดที่เข้าปะทะ สามารถหาค่าความอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัดจากสมการที่ (2.2)

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v_u} \quad (2.2)$$

โดย  $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุมของใบพัด

$R$  คือ รัศมีของใบพัดวัดจากแกนของใบพัดถึงปลายใบพัด

ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมนั้นจะมีค่าไม่เกิน 0.5926 นั่นคือถ้าลมให้พลังงานมา 100% กังหันที่ดีที่สุดจะทำการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานกลได้สูงสุดไม่เกิน 59.26% เนื่องด้วยปัจจัยหลายๆอย่างที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไป โดยสามารถดูได้จากรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_p$  กับค่า Tip Speed Ratio ( $\lambda$ )

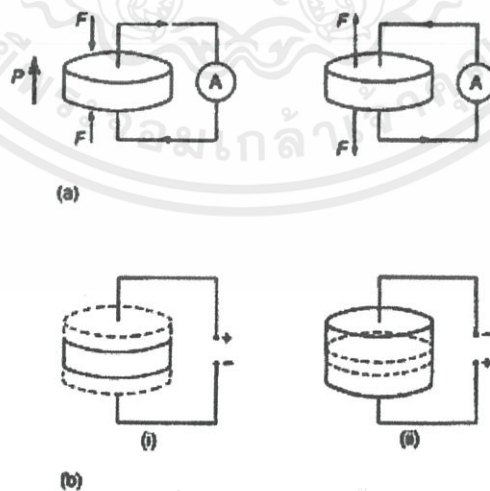
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 เพียโซอิเล็กทริก

ซองค์ และปีแอร์ คิวรี (Jacques and Pierre Curie) ได้ค้นพบปรากฏการณ์ที่ชื่อว่าเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) ในปี 1880 โดยค้นพบในผลึกของสารเชิงเดี่ยว (Single Crystal Compound) เช่น ควอตซ์ (Quartz), ซิงค์เบลน (Zincblende) และทัวร์มาลีน (Tourmaline)

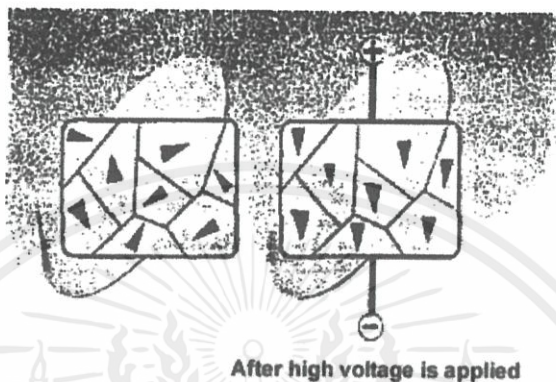
คำว่า“เพียโซอิเล็กทริก”มาจากภาษากรีกซึ่งแปลว่า กด ดังนั้นปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกจึงเป็นปรากฏการณ์ที่แสดงถึงการสร้างประจุไฟฟ้าให้เกิดขึ้น อันเป็นผลมาจากแรงกดอัดเชิงกล (Mechanical Force) หรืออีกหนึ่งคือ เป็นปรากฏการณ์ที่ใช้เรียกการเกิดกระบวนการแยกขั้วไฟฟ้า (Electric Polarization) ขึ้นในวัสดุเมื่อได้รับความเครียดเชิงกล (Mechanical Strain) ซึ่งการแยกขั้วไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นสัดส่วนกับความเครียดที่วัสดุนั้นได้รับ ไม่สามารถเกิดการโพลาริเซชันได้ด้วยตัวเอง เหมือนกับวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกและไพโรอิเล็กทริก สภาวะเพียโซอิเล็กทริกเกิดได้ 2 แบบ คือ ถูกแรงกลมากระทำให้เกิดความเค้น (Stress) ขึ้น เช่นแรงกดหรือแรงอัด จะส่งผลให้เกิดการแยกขั้วไฟฟ้า และเกิดการสะสมของประจุบวกและลบบนผิววัสดุ โดยเรียกปรากฏการณ์แบบนี้ว่าปรากฏการณ์ตรง (Direct Effect) ส่วนผิวด้านไหนของวัสดุจะมีประจุบวกหรือประจุลบ ขึ้นกับแรงเค้นที่ให้เข้าไปกับวัสดุว่าเป็นแบบแรงดึง (Tensile Stress) หรือ แรงกด (Compressive Stress) ในทำนองกลับกันเมื่อสารได้รับสนามไฟฟ้าทำให้เกิดการยึดตัวหดตัว คือปรากฏการณ์ย้อนกลับ (Converse Effect) หรือปรากฏการณ์มอเตอร์ (Motor Effect) พบว่าปริมาณของโพลาริเซชันจะขึ้นกับขนาดของความเค้นที่ให้กับสาร และประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของแรงที่กระทำ เช่น เป็นแรงกด หรือแรงดึง เป็นต้น

การประยุกต์ทางด้านเพียโซอิเล็กทริกได้เกิดขึ้นโดย European Scientific Community โดยทำการแบ่ง Crystal Classes ต่างๆ ออกเป็น 20 กลุ่มที่เกิดสมบัติเพียโซอิเล็กทริก จากกลุ่มผลึก 32 กลุ่ม สาเหตุเพราะความไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลางของ Unit Cell ดังนั้นเมื่อมีแรงกดจึงมี Dipole เกิดขึ้น และผลที่ตามมาจึงมีสนามไฟฟ้าคร่อมและ Effect นี้เกิดในทำนองกลับกัน ปรากฏการณ์ Piezoelectricity นี้แสดงในรูปที่ 2.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดรูปที่ 2.6 ปรากฏการณ์ Piezoelectricity ออกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่า เมื่อเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นบนเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ตัวเซรามิกจะหดและขยาย หรืออีกนัยหนึ่งสารจะเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล และในทำนองกลับกัน เพียโซอิเล็กทริกจะมี Polarization ตามธรรมชาติซึ่งแตกต่างจาก Ferroelectric สารเพียโซ หลังจากการ Sinter ใหม่ๆ Dipole ที่มีอยู่ใน Grains ต่างๆ นั้น ไม่ได้เรียงไปในแนวทางเดียว ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการ Poling เพื่อให้ Dipoles ต่างๆ เรียงไปในทิศทางเดียวกัน ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การ Poling ของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

หากปราศจากกระบวนการ Poling แล้ว สารเพียโซอิเล็กทริกจะไม่แสดงสมบัติพิเศษใดๆ เลย การ Poling มักจะกระทำที่อุณหภูมิคูรี สมการที่ (2.3) และ (2.4) อธิบายเกี่ยวกับ Effect ของ เพียโซอิเล็กทริก ได้ดังนี้

$$D = dE + \epsilon^T E \tag{2.3}$$

$$S = s^E T + dE \tag{2.4}$$

- เมื่อ D คือ Electric Displacement
- T คือ Stress
- S คือ Strain
- d คือ Piezoelectric Coefficient
- $\epsilon$  คือ Dielectric Constant
- s คือ Material Compliance (modulus of elasticity)

สำหรับค่า  $\epsilon^T$  หมายถึงค่า  $\epsilon$  เมื่อ Stress คงที่ หมายความว่าไม่มีแรงใดๆ บนสาร และ  $s^E$  ค่า Compliance ขณะที่มีสนามไฟฟ้าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกจะเกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงเค้น อาจเขียนในรูปของความต่างศักย์ หรือค่า  $g$  มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อนิวตันต่อตารางเมตร เทอมของ  $g$  อยู่ในรูปสมการที่ (2.5) ดังนี้

$$g = \frac{\text{open circuit electric field}}{\text{applied mechanical stress}} \quad (2.5)$$

ค่า  $g$  เป็นค่าคงที่ (กรณีวงจรเปิด) มีค่าเกี่ยวข้องกับ  $d$  ดังสมการที่ (2.6) คือ

$$g = \frac{d}{\epsilon} = \frac{d}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\epsilon$  คือ permittivity

$\epsilon_r$  คือ dielectric constant (relative permittivity)

$\epsilon_0$  คือ permittivity in free space (8.854 pF/m)

ดังนั้น ถ้า  $\epsilon_r$  ต่ำ  $g, d$  จะสูง ซึ่งมักจะเป็นเซรามิกที่ไม่ Switch Polarization ทันทันทันใด ทำให้ค่า  $\epsilon_r$  ต่ำ กลุ่มสารเหล่านี้ใช้ใน Gas Igniters หรือ Lighters

สัมประสิทธิ์อีกตัวหนึ่ง ที่ใช้ประเมินค่าความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หรือในทางกลับกัน ได้แก่ Piezoelectric Coupling Factor ค่า  $k$  นิยามเป็นสมการที่ (2.7) ได้ดังนี้

$$k = \sqrt{\frac{\text{Energy Output}}{\text{Total Mechanical Energy input}}} \quad (2.7)$$

สำหรับ Direct Effect และในทางกลับกันสำหรับ Converse Effect ทั้งสองกรณี  $k$  จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 สนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กนั้นถูกนิยามขึ้นตามแรงที่มันกระทำ เช่นเดียวกับในกรณีของสนามไฟฟ้าในระบบหน่วย SI แรงดังกล่าวนี้เป็นไปตามสมการที่ (2.8) ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.8)$$

- เมื่อ  $\mathbf{F}$  คือ แรงที่เกิดขึ้น วัดในหน่วยนิวตัน  
 $\times$  คือ สัญลักษณ์แสดง Cross Product ของเวกเตอร์  
 $q$  คือ ประจุไฟฟ้า วัดในหน่วยคูลอมบ์  
 $\mathbf{v}$  คือ ความเร็วของประจุไฟฟ้า  $q$  วัดในหน่วยเมตรต่อวินาที  
 $\mathbf{B}$  คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก วัดในหน่วยเทสลา

กฎด้านบนนี้มีชื่อเรียกว่า กฎแรงของลอเรนซ์ ถ้าประจุที่เคลื่อนที่นั้นเป็นส่วนหนึ่งของกระแสในเส้นลวด กฎด้านบนนี้สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ (2.9) ดังนี้

$$\frac{d\mathbf{F}}{dt} = \mathbf{i} \times \mathbf{B} \quad (2.9)$$

หรือพูดอีกอย่างคือ สมการนี้กล่าวว่าแรงที่กระทำต่อหน่วยกระแสไฟฟ้านั้นเท่ากับ Cross Product ระหว่างเวกเตอร์กระแสและสนามแม่เหล็ก ในสมการนี้เวกเตอร์กระแส  $\mathbf{i}$  มีขนาดเท่ากับค่าสเกลาร์ (Scalar) ของกระแสเช่นทั่วไป และมีทิศทางชี้ไปในทางที่กระแสไหล การเกิดขึ้นของสนามแม่เหล็กนั้น สามารถบรรยายได้จากสมการที่ (2.10) ดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.10)$$

ในกรณีที่เส้นสุญญากาศสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.11)

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.11)$$

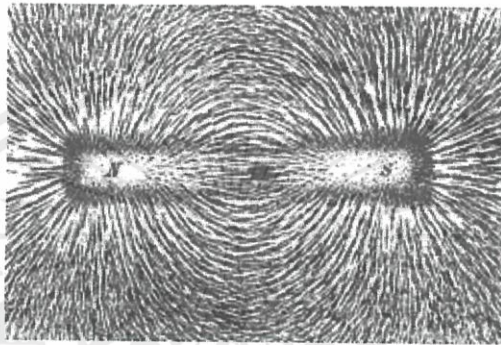
- เมื่อ  $\nabla \times$  คือ โอเปอเรเตอร์ เคิร์ล (Curl)  
 $\nabla \cdot$  คือ โอเปอเรเตอร์ ไดเวอร์เจนซ์ (Divergence)  
 $\mu_0$  คือ สภาพให้ซึมได้ของสุญญากาศ  
 $\mathbf{J}$  คือ ความหนาแน่นของกระแส  
 $\frac{\partial}{\partial t}$  คือ อนุพันธ์ย่อย  
 $\epsilon_0$  คือ สภาพยอมของสุญญากาศ  
 $\mathbf{E}$  คือ สนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีข้อบกพร่องข้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการแรกนั้นรู้จักกันในชื่อกฎของแอมแปร์ พจน์ที่สองของสมการนี้จะมีค่าเป็นศูนย์ในกรณี  
ที่ระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนสมการที่สองนั้นแสดงให้เห็นว่า Magnetic Monopole นั้นไม่มีอยู่  
ทั้งสองสมการนี้เป็นส่วนหนึ่งของชุดสมการของแมกซ์เวลล์

### 2.3.1 เส้นแรงแม่เหล็ก

ด้วยนิยามอย่างเป็นทางการแล้ว เส้นแรงแม่เหล็กไม่ได้เป็นปริมาณเวกเตอร์ แต่เป็นเวกเตอร์  
เสมือนเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 2.8 แม้ว่าภาพต่างๆ มักจะแสดงเส้นแรงแม่เหล็กด้วยลูกศร แต่เราไม่  
สามารถแปลความหมายลูกศรนั้น เป็นการเคลื่อนที่หรือการไหลของเส้นสนาม



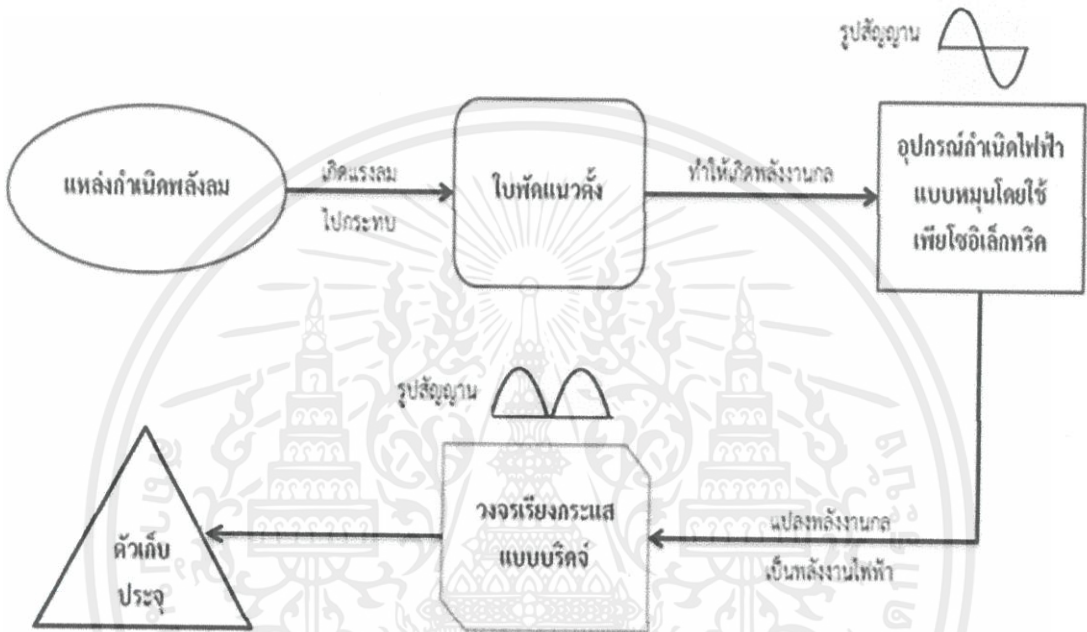
รูปที่ 2.8 เส้นแรงแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## หลักการออกแบบ

ในการออกแบบตัวต้นแบบกึ่งหั่นลมแนวตั้ง และอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกนั้น ต้องเข้าใจหลักการทำงานในภาพรวมของทั้งระบบก่อนว่า มีหลักการทำงานเป็นอย่างไร แล้วจึงพิจารณาในส่วนย่อยอื่นๆ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังภาพรวมของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานลมโดยเพียโซอิเล็กทริก

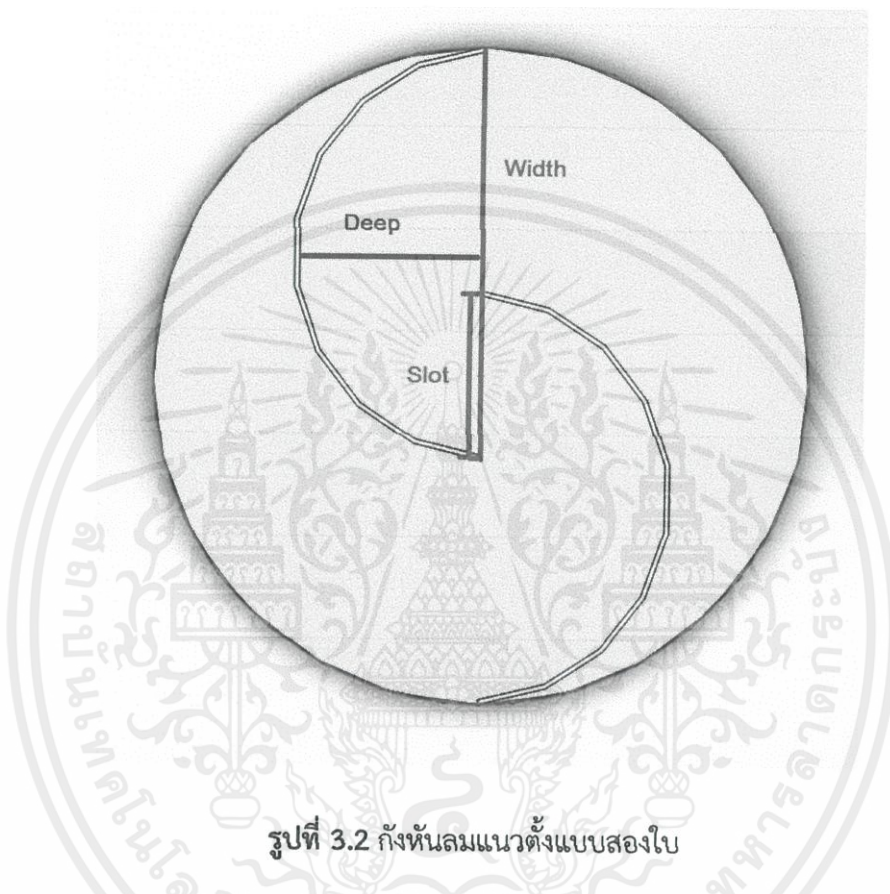
จาก รูปที่ 3.1 ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานลมโดยเพียโซอิเล็กทริกประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ ดังนี้

- แหล่งกำเนิดพลังงานลม
- โครงสร้างกึ่งหั่นลมแนวตั้ง
- การออกแบบอุปกรณ์เปลี่ยนกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก
- ระบบจัดเก็บพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 การออกแบบต้นแบบกังหันลมแนวตั้งชุดที่หนึ่ง

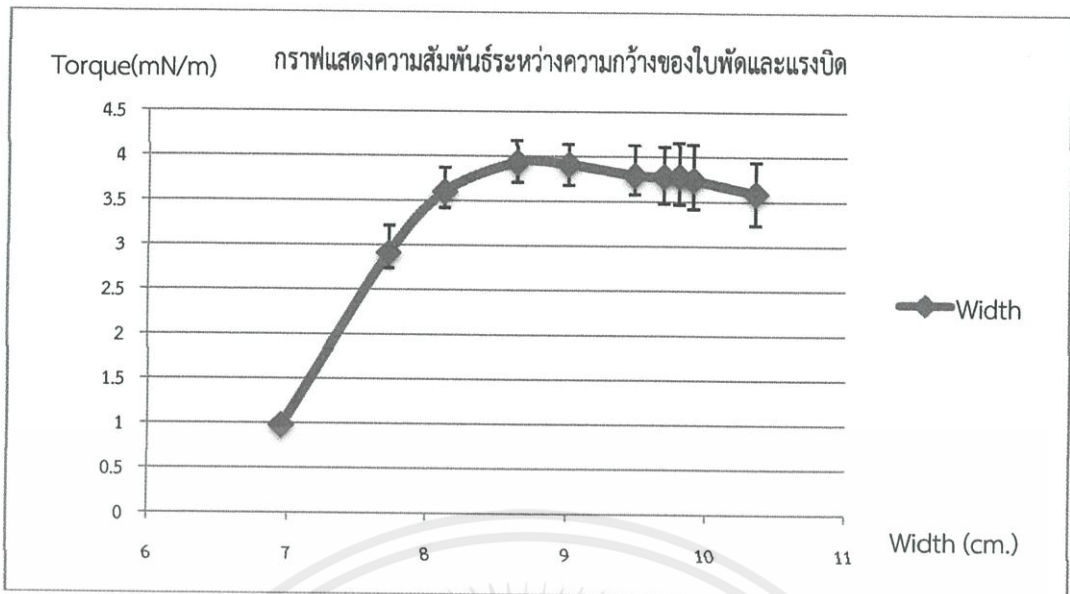
ในการออกแบบกังหันลมนั้น จำเป็นที่จะต้องพิจารณาการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านใบพัดของกังหันลม ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อทิศทาง และการเคลื่อนที่ของอากาศ เช่น ความกว้าง ความลึก จำนวนของใบพัด เป็นต้น จึงทำให้ต้องพิจารณาในหลายๆ กรณี ด้วยเหตุนี้จึงต้องใช้ในการจำลองของการไหล (Flow Simulation) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์



รูปที่ 3.2 กังหันลมแนวตั้งแบบสองใบ

1. ในเบื้องต้นของการหาขนาดของใบพัด จำเป็นที่จะต้องกำหนดขอบเขตของการจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยการกำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัดที่จะนำไปใช้งานเท่ากับ 15 เซนติเมตร เพื่อให้ใบพัดจะได้มีน้ำหนักเบาช่วยลดแรงที่กระทำต่อตัวอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้า ทำให้สามารถต่อได้โดยตรง พื้นที่ที่เสียไปจากการที่เลือกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กนั้น สามารถทดแทนได้ด้วยการเพิ่มความสูงของตัวใบพัดแทน
2. จากนั้นให้กำหนดความลึกของใบพัดแนวตั้ง ในที่นี้กำหนดให้ความลึกเท่ากับ 4 เซนติเมตร แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ในแบบจำลอง โดยการใส่ค่าความยาวที่ต่างกันออกไปในแต่ละครั้ง โดยในทุกๆ การวิเคราะห์จะใส่ความสูงของใบพัดเท่ากัน และใช้ความเร็วลมเท่ากับ 3 เมตรต่อวินาที

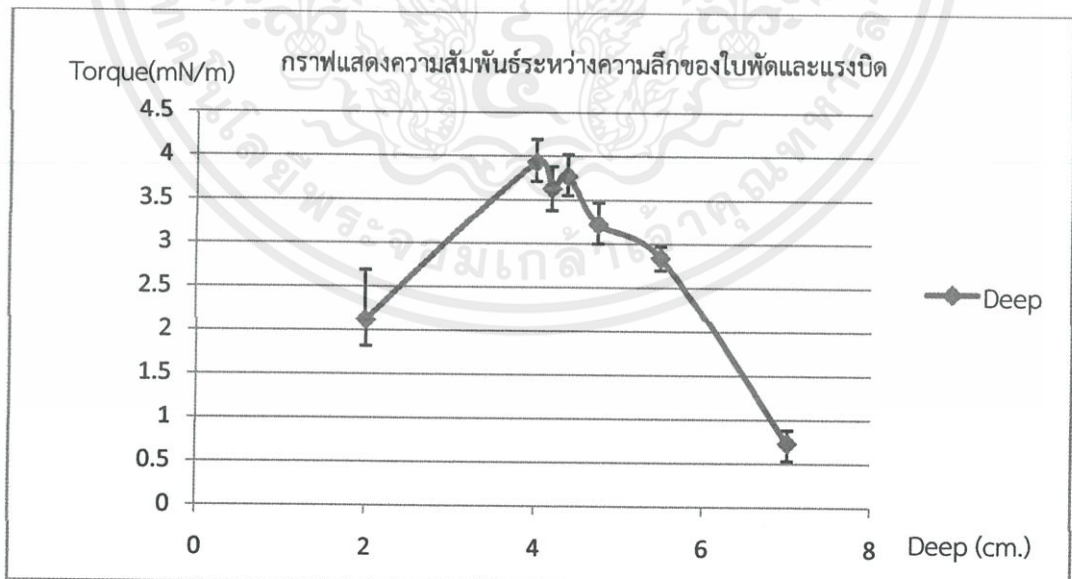
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของใบพัดและแรงบิด

3. จากรูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของใบพัดและแรงบิด จะเห็นได้ว่าเมื่อความกว้างของใบพัดมีขนาดมากกว่ารัศมีซึ่งมีขนาดเท่ากับ 8.6 เซนติเมตร จะทำให้ได้ค่าแรงบิดที่สูงที่สุด

4. โดยทำแบบข้อ 2 ซ้ำอีกครั้งแต่เปลี่ยนจากการกำหนดความลึก เป็นความยาวที่ได้จากการวิเคราะห์ในข้อ 3 ซึ่งเท่ากับ 8.6 เซนติเมตรแทน แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ที่ความลึกต่างกันโดยในทุกๆ การวิเคราะห์จะใช้ความสูงของใบพัดเท่ากัน และใช้ความเร็วลมเท่ากับ 3 เมตรต่อวินาทีเช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของใบพัดและแรงบิด

5. จากรูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของใบพัดและแรงบิดจะเห็นได้ว่า ความลึกเท่ากับ 4 เซนติเมตรจะได้แรงบิดมากที่สุด ซึ่งความลึก 4 เซนติเมตรเป็นความลึกที่กำหนดไว้ ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 แสดงให้เห็นว่า ค่าความลึกหนึ่งค่าก็จะมีค่าความยาวหนึ่งค่าเท่านั้นที่จะได้กำลังบิดมากที่สุด หรือจะกล่าวได้ว่า ค่าความกว้างหนึ่งค่าก็จะมีค่าความลึกหนึ่งค่าเท่านั้น ที่จะได้กำลังบิดมากที่สุดได้เช่นกัน

6. เมื่อได้ค่าขนาดทั้งความยาวและความลึกมาแล้ว จำเป็นที่จะต้องกั้นลมนิวตันแบบ เพราะเนื่องจากในการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลของอากาศนั้นไม่สามารถนำค่าแรงบิดที่ได้จากการวิเคราะห์ทางโปรแกรมมาใช้ในการคำนวณได้ ในที่นี้จึงใช้แค่เพียงการศึกษาแนวโน้มพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ เท่านั้น ในการทำตัวต้นแบบของกังหันลมวัสดุที่ใช้จะเลือกใช้ แผ่นอะลูมิเนียม และตัวฐานปิดจะทำด้วยแผ่นอะคริลิก เพราะมีน้ำหนักเบาราคาถูก และใช้เวลาในการขึ้นรูปน้อย ซึ่งเหมาะที่จะเป็นวัสดุในการทำตัวต้นแบบ ซึ่งในรูปที่ 3.5 เป็นรูปกังหันลมตัวต้นแบบ ชุดที่หนึ่ง



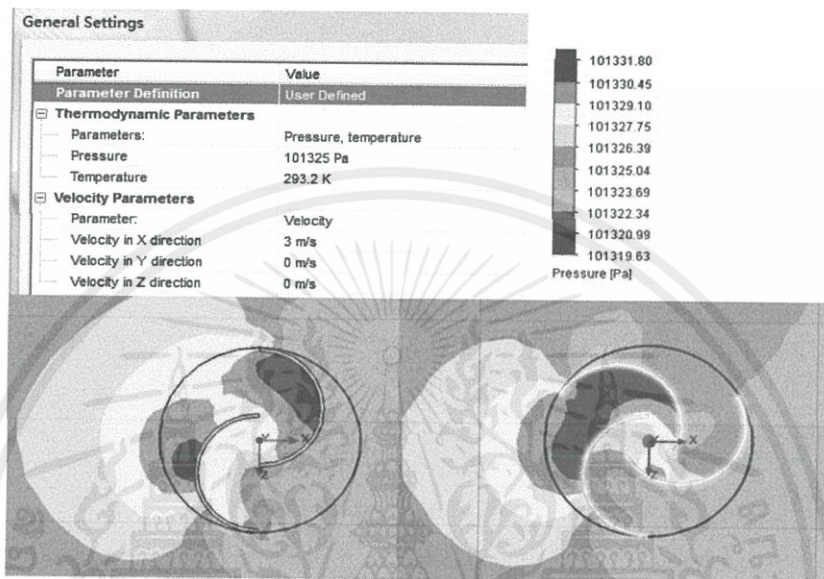
รูปที่ 3.5 กังหันลมต้นแบบชุดที่หนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

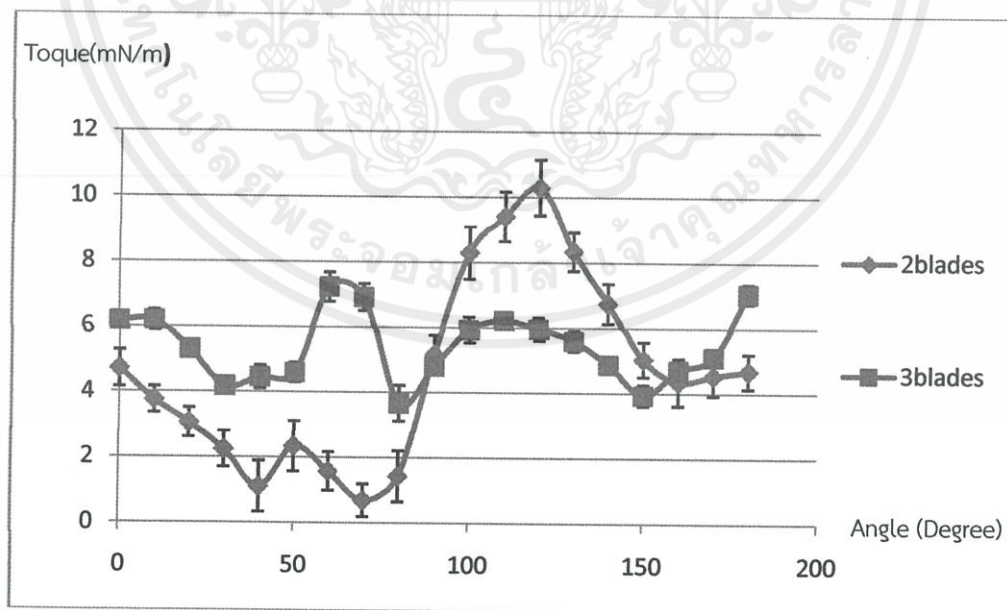
### 3.2 การออกแบบต้นแบบกังหันลมแนวตั้งชุดที่สอง

การออกแบบต้นแบบกังหันลมแนวตั้งชุดที่สองมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำค่าความยาวและความลึกที่ได้จากการวิเคราะห์กังหันลมต้นแบบตัวที่หนึ่ง มาสร้างเป็นแบบจำลอง 2 แบบ คือ แบบสองใบพัด และแบบสามใบพัด เพื่อที่จะดูแนวโน้มและพฤติกรรมทำให้แรงบิดของใบพัดที่มีมุมการรับลมต่างกันโดยการวิเคราะห์แบบจำลองและหมุนแบบจำลองไปเรื่อยๆที่ละ 10 องศาแสดงในรูปที่ 3.6



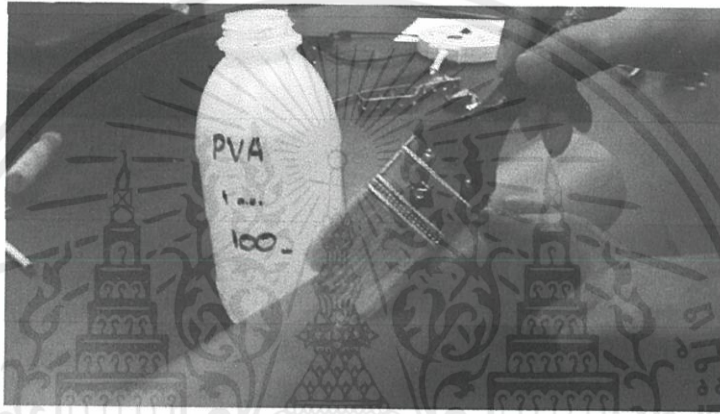
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการตั้งค่าและวิเคราะห์แบบจำลองแบบสองและสามใบพัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมรับลมกับแรงบิดของใบพัดสองและสามใบ

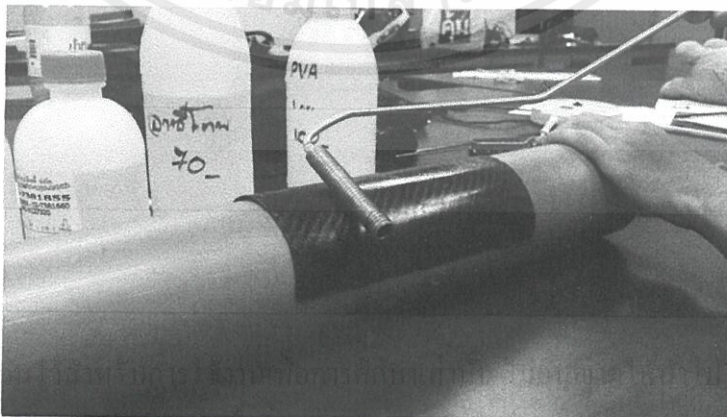
2. จากรูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมรับลมของใบพัดกับแรงบิดของแบบสองใบพัด และสามใบพัด จะเห็นได้ว่าแบบสามใบจะมีแรงบิดต่ำกว่าแบบสองใบในบางช่วงเท่านั้น ทำให้ในการทำตัวต้นแบบตัวที่สองจะใช้แบบสามใบพัด เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนและค่าลมต่ำสุดที่ใบพัดทำงาน

3. เลือกวัสดุที่ใช้ในการทำใบพัดเป็นแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ และใช้อีพ็อกซีเรซินเบอร์ 105 ในการทำให้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แข็งตัว ทาสารพีวีแอลบนท่อพีวีซีดังรูปที่ 3.8 จากนั้นการผสมอีพ็อกซีเรซิน 3 ส่วนต่อตัวทำแข็ง 1 ส่วน ในการผสมแต่ละครั้งต้องทำในปริมาณที่น้อยๆ ไม่เกิน 8 กรัม (อีพ็อกซีเรซิน 6 กรัม ตัวทำแข็ง 2 กรัม) เพราะอาจจะทำให้อีพ็อกซีเรซินแข็งตัวก่อนจะทาเสร็จได้ จากนั้นนำแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ตัดเตรียมไว้มาวางบนท่อพีวีซีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 8 เซนติเมตร ที่ทาสารพีวีแอลเคลือบผิวท่อไว้ก่อนแล้ว



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทาสารพีวีแอล

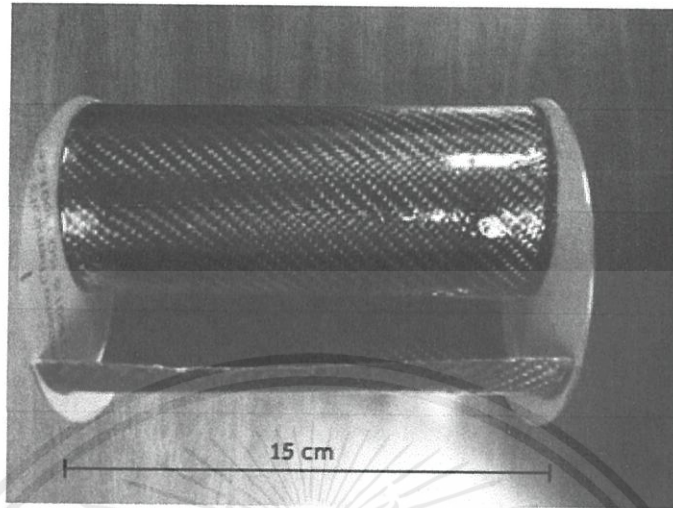
4. นำอีพ็อกซีเรซินที่ผสมแล้วมาทาลงบนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ให้ทั่วทั้งไว้สักพัก จากนั้นนำลูกกลิ้งมารีดเพื่อไล่ฟองอากาศออกดังแสดงในรูปที่ 3.9 แล้วทาล้ำอีกครั้งและนำแผ่นไมลาร์ฟิล์มมาปิดทั้งไว้สักพักแล้วรีบบอกอากาศออกอีกครั้ง แล้วทิ้งไว้ประมาณ 2-3 ชั่วโมงให้อีพ็อกซีเรซินแข็งตัว แล้วจึงนำมาตัดให้ได้ขนาดที่ต้องการ



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการไล่ฟองอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงนอกรายชื่อและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จากนั้นนำมาเสียบลงบนแผ่นอะคริลิกที่ทำรูปไว้ โดยเชื่อมทั้งสองด้วยอีพ็อกซีเรซินที่เหลว ก็จะได้กังหันลมต้นแบบชุดที่สองที่มีน้ำหนักเบาดังแสดงในรูป 3.10



รูปที่ 3.10 กังหันลมต้นแบบชุดที่ 2

### 3.3 การออกแบบอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก

การออกแบบอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกนั้น ต้องออกแบบตัวอุปกรณ์เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก โดยทำให้เกิดความเค้นบนหน้าของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก และทำเพียโซอิเล็กทริกเกิดการงอตัว ซึ่งเป็นการกำเนิดกระแสไฟฟ้า โดยใช้แรงจากการผลักกันระหว่างแม่เหล็กขั้วเดียวกันที่ติดบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ในการทำให้เกิดความเค้นบนหน้าของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

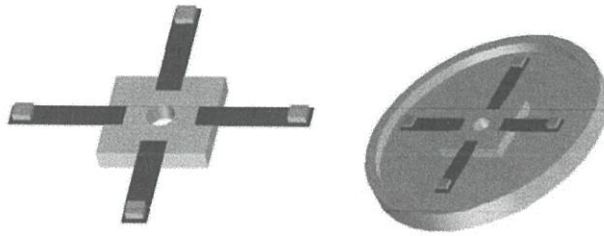
1. ออกแบบให้แม่เหล็กติดอยู่บนแผ่นเพียโซอิเล็กทริก โดยจะติดที่ตำแหน่งบริเวณขอบของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก เพื่อให้ตำแหน่งของแรงผลักระหว่างแม่เหล็กที่กระทำกับแผ่นเพียโซอิเล็กทริก อยู่ที่ตำแหน่งของขอบซึ่ง ณ ตำแหน่งนี้ ทำให้มีโมเมนต์มากที่สุด ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ติดแม่เหล็กตรงบริเวณขอบของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

2. ออกแบบฐานสี่เหลี่ยมยึดเพียโซอิเล็กทริกติดแม่เหล็ก 4 อันโดยจะยึดเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งที่แต่ละอันทำมุมกัน 90 องศา และความยาวของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ยึดกับฐานคือ 5 มิลลิเมตร ความยาววัดจากขอบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ติดแม่เหล็กไปยังเพียโซอิเล็กทริกที่ติดแม่เหล็กในฝั่งตรงกันข้าม คือ 90 มิลลิเมตร และทำการออกแบบแผ่นสเตเตอร์วงกลม ที่ต้องมีขนาดมากกว่า

90 มิลลิเมตร เพื่อยึดฐานที่ติดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเข้าด้วยกัน ซึ่งได้ออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 110 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางวงใน 100 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.12



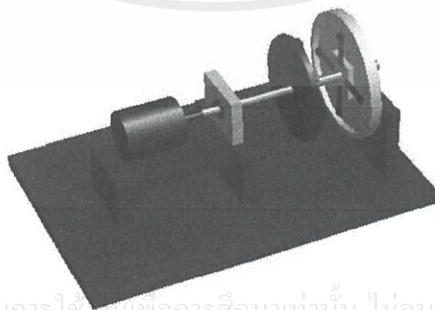
รูปที่ 3.12 ฐานยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกและการติดฐานยึดเพียโซอิเล็กทริกกับสเตเตอร์

3. ออกแบบโรเตอร์หรือชิ้นส่วนที่ใช้ในการติดแม่เหล็กเพื่อนำมาพลา๊กกับแม่เหล็กที่ติดอยู่บนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกขนาดของแผ่นชิ้นส่วนมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถติดแม่เหล็กได้มากที่สุด 8 ตัว และแม่เหล็กแต่ละตัวทำมุม 45 องศาต่อกัน ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แผ่นโรเตอร์ที่ติดแม่เหล็กด้านบนของแผ่น

4. ออกแบบชุดทดลองสำหรับทดลองเก็บค่าต่างๆ ของอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกโดยออกแบบให้สามารถปรับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กที่ติดอยู่บนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกและแม่เหล็กบนแผ่นโรเตอร์ และสามารถยึดหรือเปลี่ยนมอเตอร์ใช้สำหรับทดลองอุปกรณ์ดังกล่าว ดังรูปที่ 3.14

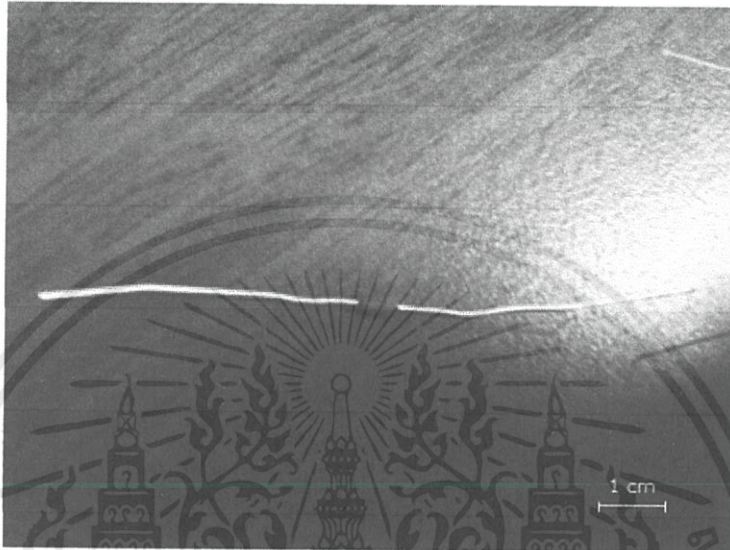


รูปที่ 3.14 ชุดทดลองที่ทำการติดสเตเตอร์โรเตอร์และมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ไดโอด

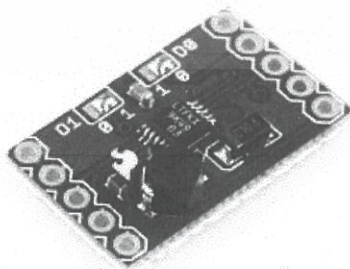
ในการทดลองจะเลือกใช้ไดโอดที่ค่าแรงดันทางตรงและกระแสทางตรงต่ำ เนื่องจากพลังงานที่เกิดจากวงจรเพียโซอิเล็กทริกจะสูญเสียในไดโอดน้อย ซึ่งได้เลือกใช้ไดโอดรุ่น BAT-46 ซึ่งเป็นไดโอดชนิดขอตัก โดยมีค่าเริ่มต้นการทำงานที่แรงดันทางตรง 450 มิลลิโวลต์ กระแสทางตรง 150 มิลลิแอมแปร์ และสามารถทนแรงดันย้อนกลับได้ 100 โวลต์



รูปที่ 3.15 ไดโอด รุ่น BAT-46

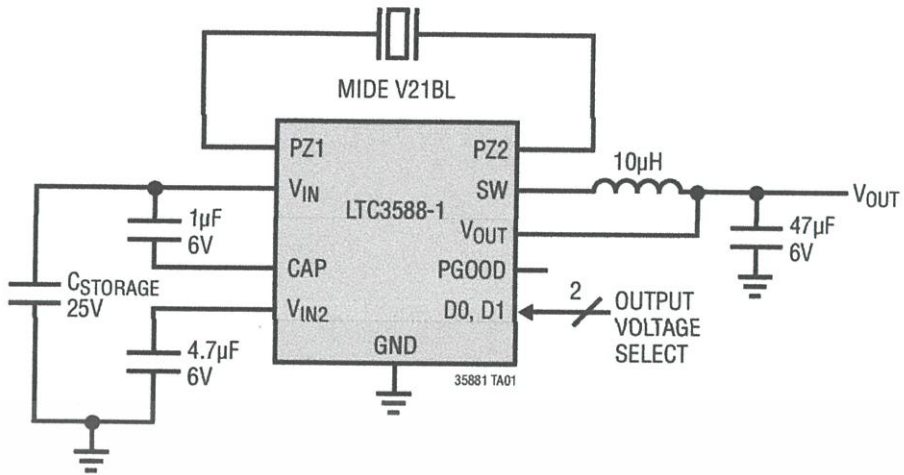
### 3.5 วงจรจัดการพลังงาน

ใช้ในการจัดเก็บพลังงานที่ได้จากวงจรเพียโซอิเล็กทริก เพื่อสะสมพลังงานและนำไปจ่ายให้กับอุปกรณ์ในส่วนที่จะใช้ต่อไป วงจรจัดเก็บพลังงานที่เลือกใช้คือ LTC3588-1 ซึ่งสามารถเลือกให้วงจรจ่ายแรงดันเอาต์พุตได้ที่ 1.8, 2.5, 3.3 และ 3.6 โวลต์ แรงดันที่ออกมานั้นจะมีค่าคงที่ และสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้



รูปที่ 3.16 แผงวงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 วงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1

### 3.6 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุใช้ในต่อกับวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ เพื่อวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริก และใช้ในการสะสมพลังงานไฟฟ้าในการทดลองร่วมกับวงจรจัดการพลังงาน ซึ่งตัวเก็บประจุที่เลือกใช้มีขนาด 22, 47 และ 220 ไมโครฟารัด

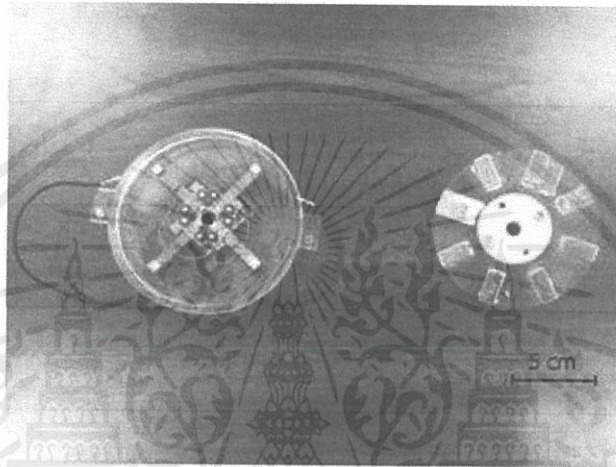


รูปที่ 3.18 ตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 อุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก

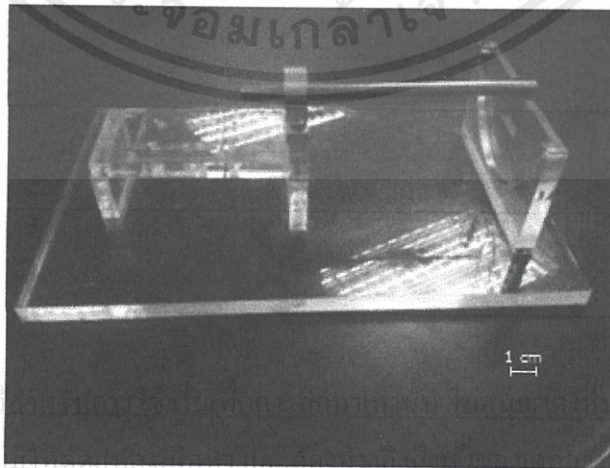
อุปกรณ์ดังกล่าว สามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ สเตเตอร์ ใช้โครงสร้างเป็นวัสดุอะคริลิกและนำแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแบบ PZT เบอร์ T220-A4-203X ขนาดความหนา 0.51 มิลลิเมตร กว้าง 6.4 มิลลิเมตร ยาว 31.8 มิลลิเมตร ที่ติดแม่เหล็กทั้ง 4 อัน มายึดติดกับส่วนฐานรองอะคริลิกที่สเตเตอร์ โดยส่วนของเพียโซอิเล็กทริกที่ยึดติดกับฐานรองมีความยาว 5 มิลลิเมตร ขนาดของสเตเตอร์โดยวัดจากขนาดวงกลมขอบนอกคือ 110 มิลลิเมตร และอีกส่วนคือ โรเตอร์ที่ทำจากวัสดุอะคริลิกแผ่นกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร ติดแม่เหล็ก 8 อัน ทำมุมกัน 45 องศา ซึ่งขนาดของอุปกรณ์มีขนาดตามที่ได้ออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 อุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก

### 3.8 ฐานชุดทดลอง

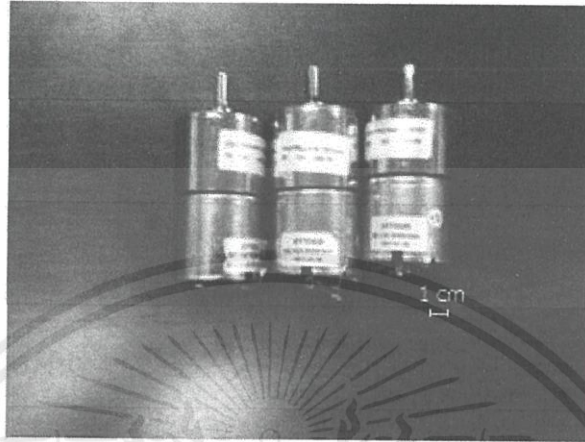
ใช้วัสดุคือ อะคริลิก ซึ่งมีความหนา 10 มิลลิเมตร เพื่อเป็นตัวยึดและรับน้ำหนักของมอเตอร์ และอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก และเพลานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ฐานชุดทดลอง

### 3.9 มอเตอร์เกียร์กระแสดตรง

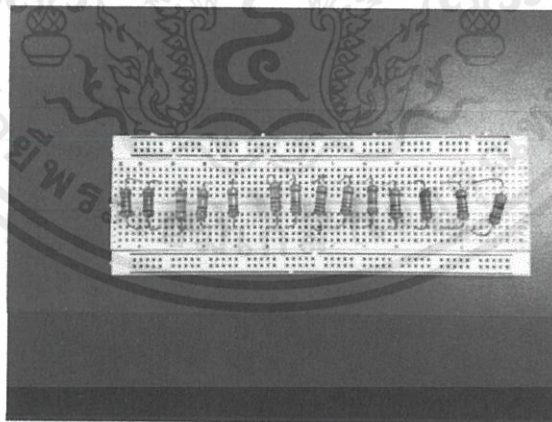
มอเตอร์กระแสดตรง ขนาด 12 โวลต์ ความเร็ว 10, 20, 30, 50, 100 รอบต่อนาที ซึ่งใช้ในการหมุนส่วนของโรเตอร์ในการทดลอง



รูปที่ 3.21 มอเตอร์เกียร์กระแสดตรง

### 3.10 ตัวต้านทาน

ตัวต้านทานค่าต่างๆ ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 50 กิโลโอห์มถึง 3.3 เมกะโอห์ม โดยเลือกสุ่มค่าตัวต้านทานมาทั้งหมด 15 ค่า



รูปที่ 3.22 ชุดตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.11 ออสซิลโลสโคป

ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DL-1520 8 bits 200 MS/s 150 MHz ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้า และ เฟสของสัญญาณไฟฟ้าจากการทดลอง



รูปที่ 3.23 ออสซิลโลสโคปที่ใช้ในการทดลอง

### 3.12 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

ใช้ในการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์

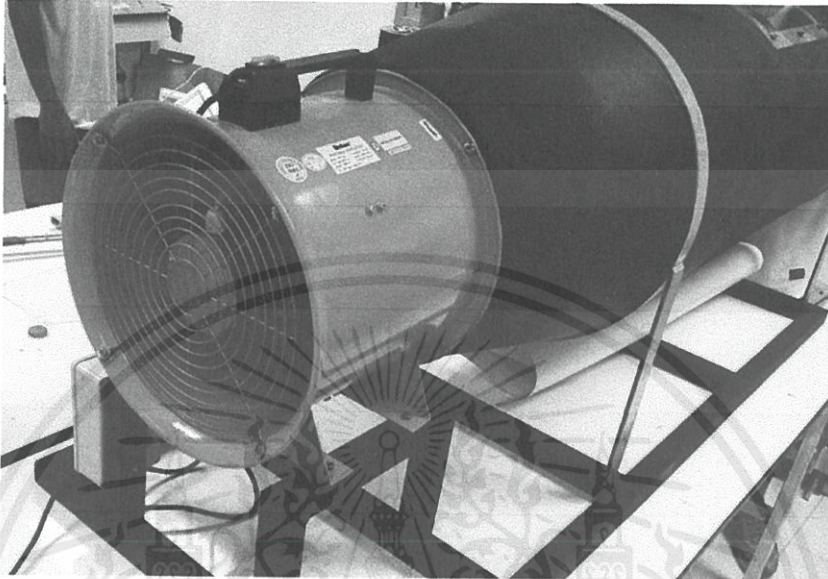


รูปที่ 3.24 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.13 อุโมงค์ลม

แหล่งกำเนิดพลังงานลมในที่นี้นำมาใช้เพื่อจำลองความแรงลมตามธรรมชาติ ในการทำการทดลองหาประสิทธิภาพของระบบในการเปลี่ยนแปลงพลังงาน คุณสมบัติของเครื่องเป่าลม ความเร็วรอบ 2800 rpm แรงดัน 225 Pa สามารถปรับค่าความเร็วลมได้ในช่วง 1-8 m/s



รูปที่ 3.25 เครื่องเป่าลม Deton PVT-30

### 3.14 เครื่องวัดความเร็วรอบ (Digital Tachometer)

ยี่ห้อ Digicon รุ่น DT-245P ใช้ในการวัดความเร็วรอบของใบพัดซึ่งแสดงค่าออกมาเป็นตัวเลขในหน่วย ความเร็วรอบต่อนาที (rpm)



รูปที่ 3.26 เครื่องวัดความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและเพื่อประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.15 เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer)

ยี่ห้อ Brannan ใช้ในการวัดความเร็วลมในอุโมงค์ ณ ตำแหน่งต่างๆ เช่น หน้ากังหันลม และ หลังกังหันลม



รูปที่ 3.27 เครื่องวัดความเร็วลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 การทดลองอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเพียโซอิเล็กทริก

##### 4.1.1 การทดลองเพื่อหาระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างแม่เหล็กที่ติดบนเพียโซอิเล็กทริกกับแม่เหล็กบนแผ่นโรเตอร์

ทำการทดลองโดยชุดทดลองด้วยการปรับระยะห่างโดยเริ่มต้นที่ 20 มิลลิเมตร ซึ่งทำการปรับค่าโดยเลื่อนระยะห่างเข้ามาครั้งละ 1 มิลลิเมตร จนถึงระยะห่างน้อยที่สุดคือ 5 มิลลิเมตร เนื่องจากที่ระยะห่างน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร อาจจะทำให้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกเกิดการเสียหายได้ และวัดผลการทดลองโดยวัดจากค่าแรงดันไฟฟ้าจากยอดถึงยอด (Peak to Peak Voltage) ในแต่ละระยะห่างซึ่งได้ผลตามกราฟในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.1 ทำให้ทราบว่าเมื่อปรับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กให้มีค่าลดลง จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการงอตัวของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น โดยระยะห่างระหว่างแม่เหล็กที่ต่ำ 10 มิลลิเมตรจะสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของค่าความต่างศักย์ที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ที่ระยะห่าง 5 มิลลิเมตร จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้มีค่า 5.712 โวลต์ ดังนั้นจึงทำเลือกใช้ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กที่ 5 มิลลิเมตร

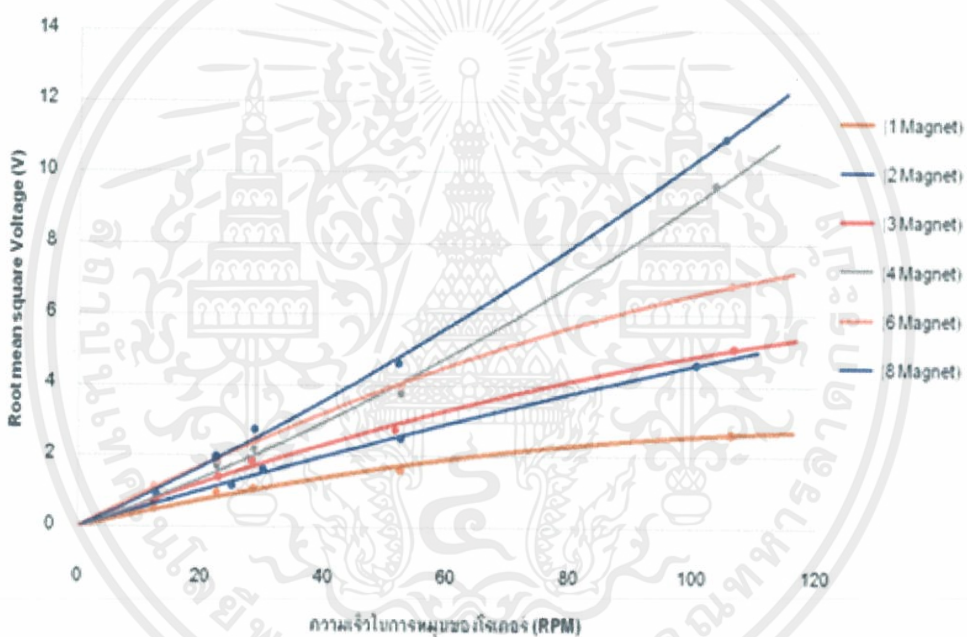
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 การทดลองเพื่อหาจำนวนแม่เหล็กและระยะห่างเชิงมุมของแม่เหล็กแต่ละตัวบนโรเตอร์

ทำการทดลองโดยการติดแม่เหล็กบนแผ่นโรเตอร์แบบสมมาตรดังต่อไปนี้

1. ติดแม่เหล็ก 1 ตัว
2. ติดแม่เหล็ก 2 ตัว ระยะห่างเชิงมุมระหว่างแม่เหล็กถึงแม่เหล็กตัวถัดไป คือ 180 องศา
3. ติดแม่เหล็ก 3 ตัว ระยะห่างเชิงมุมระหว่างแม่เหล็กถึงแม่เหล็กตัวถัดไป คือ 120 องศา
4. ติดแม่เหล็ก 4 ตัว ระยะห่างเชิงมุมระหว่างแม่เหล็กถึงแม่เหล็กตัวถัดไป คือ 90 องศา
5. ติดแม่เหล็ก 6 ตัว ระยะห่างเชิงมุมระหว่างแม่เหล็กถึงแม่เหล็กตัวถัดไป คือ 60 องศา
6. ติดแม่เหล็ก 8 ตัว ระยะห่างเชิงมุมระหว่างแม่เหล็กถึงแม่เหล็กตัวถัดไป คือ 45 องศา

ในการทดลองติดแม่เหล็กแต่ละครั้งจะทำการเปลี่ยนความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ในค่าต่างๆ ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 10 รอบต่อนาที ถึง 100 รอบต่อนาที ซึ่งผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการหมุนของโรเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสอง

จากรูปที่ 4.2 ทำให้ทราบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสองที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น พิจารณาจำนวนแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสองที่ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

1. ที่ความเร็วในการหมุนในรอบต่ำ เช่น 20 RPM เมื่อเปลี่ยนจำนวนแม่เหล็ก ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสองที่วัดได้นั้น มีค่าใกล้เคียงกันโดยอยู่ที่ 0.9-1.9 โวลต์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

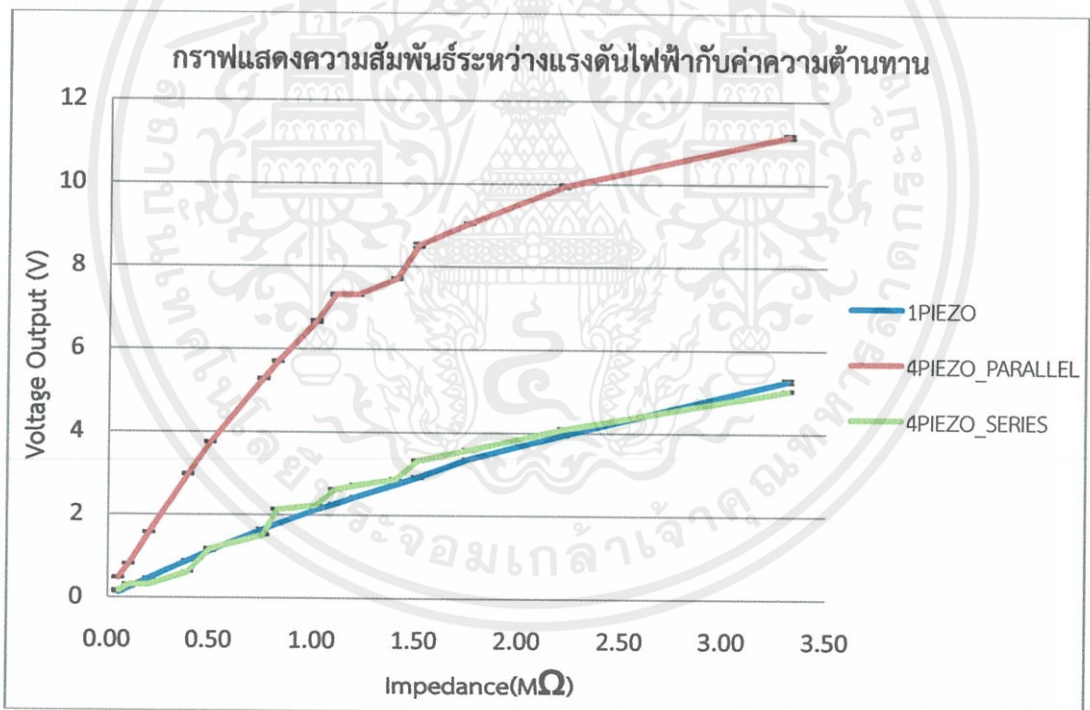
2. ที่ความเร็วในการหมุนในรอบสูง เช่น 100 RPM เมื่อเปลี่ยนจำนวนแม่เหล็ก ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสองที่วัดได้นั้น มีค่าต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เช่น ที่แม่เหล็ก 4 ตัว ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสองคือ 9.6425 โวลต์ และที่แม่เหล็ก 6 ตัว ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสองคือ 6.8585 โวลต์

3. ที่ความเร็วรอบต่างๆ นั้น จำนวนแม่เหล็กที่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสองมีค่ามากที่สุดจากการวัดคือ แม่เหล็ก 8 ตัว โดยค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสองที่วัดได้คือ 10.975 โวลต์

ดังนั้นจึงเลือกใช้แม่เหล็กจำนวน 8 ตัว เพื่อติดบนแผ่นโรเตอร์ โดยแม่เหล็กแต่ละตัววางห่างกันเป็นระยะห่างเชิงมุม 45 องศา

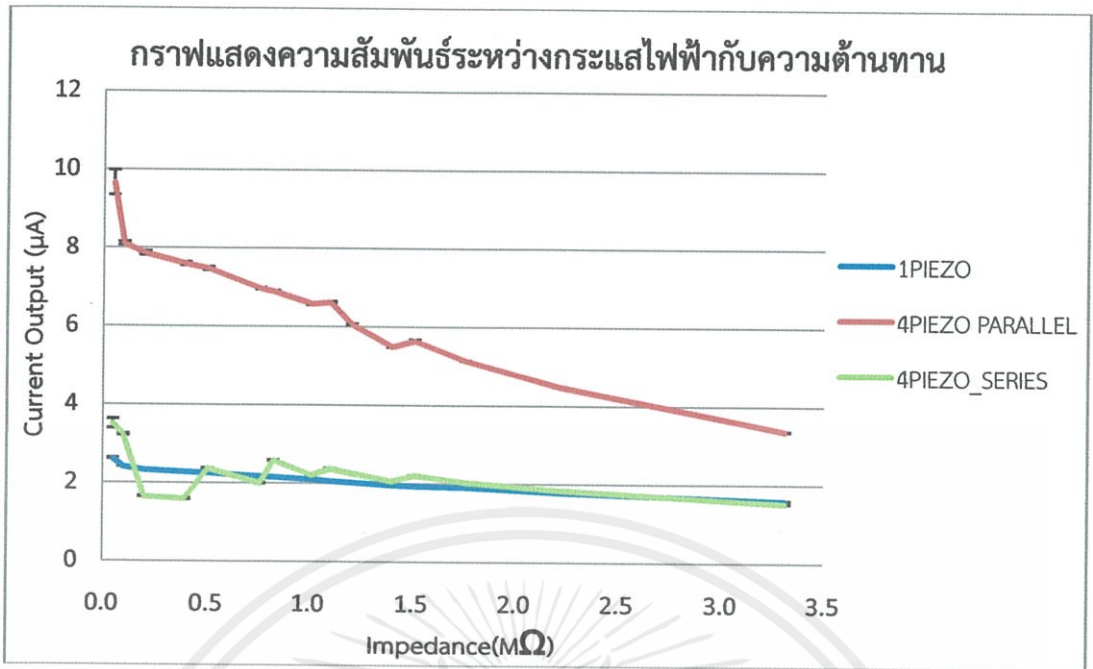
#### 4.1.3 การทดลองเพื่อหาวิธีการต่อวงจรระหว่างแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแต่ละตัว

ทำการทดลองโดยบัดกรีสายไฟสองขั้วบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแต่ละตัว และนำมาต่อกัน โดยมีลักษณะการต่อกันสองลักษณะคือ การต่อแบบอนุกรม การต่อแบบขนาน และการต่อแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่น จากนั้นนำไปต่อกับตัวต้านทานที่มีค่าต่างๆ ตั้งแต่ 50 กิโลโอห์ม ถึง 3.3 เมกะโอห์ม ทำการทดลองที่แม่เหล็กบนแผ่นโรเตอร์ 4 ตัว และความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ 30 รอบต่อนาที ซึ่งผลจากการทดลองที่ได้นั้นเป็นไปตามรูปที่ 4.3



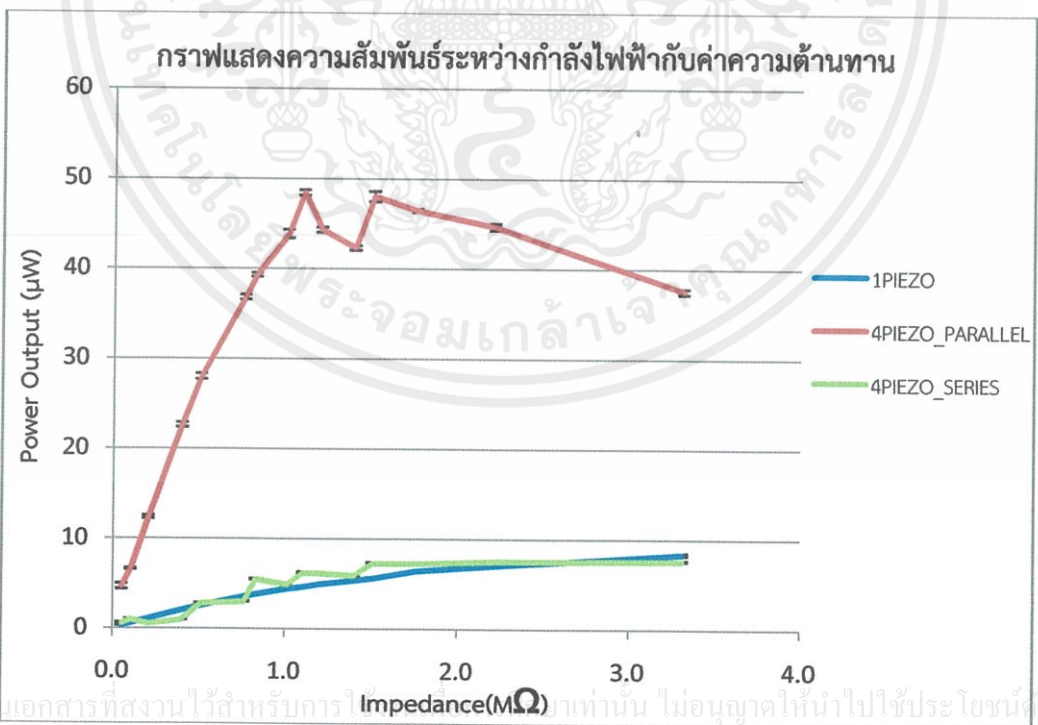
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.3 ทำให้ทราบว่า การต่อแบบขนานระหว่างเพียโซอิเล็กทริกแต่ละแผ่นนั้น จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้นั้นมีค่ามากกว่าการต่อแบบอนุกรม และการต่อแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่น



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.4 ทำให้ทราบว่า การต่อขนานระหว่างแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแต่ละแผ่นนั้น จะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้นั้นมีค่ามากกว่าการต่อแบบอนุกรม และการต่อแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

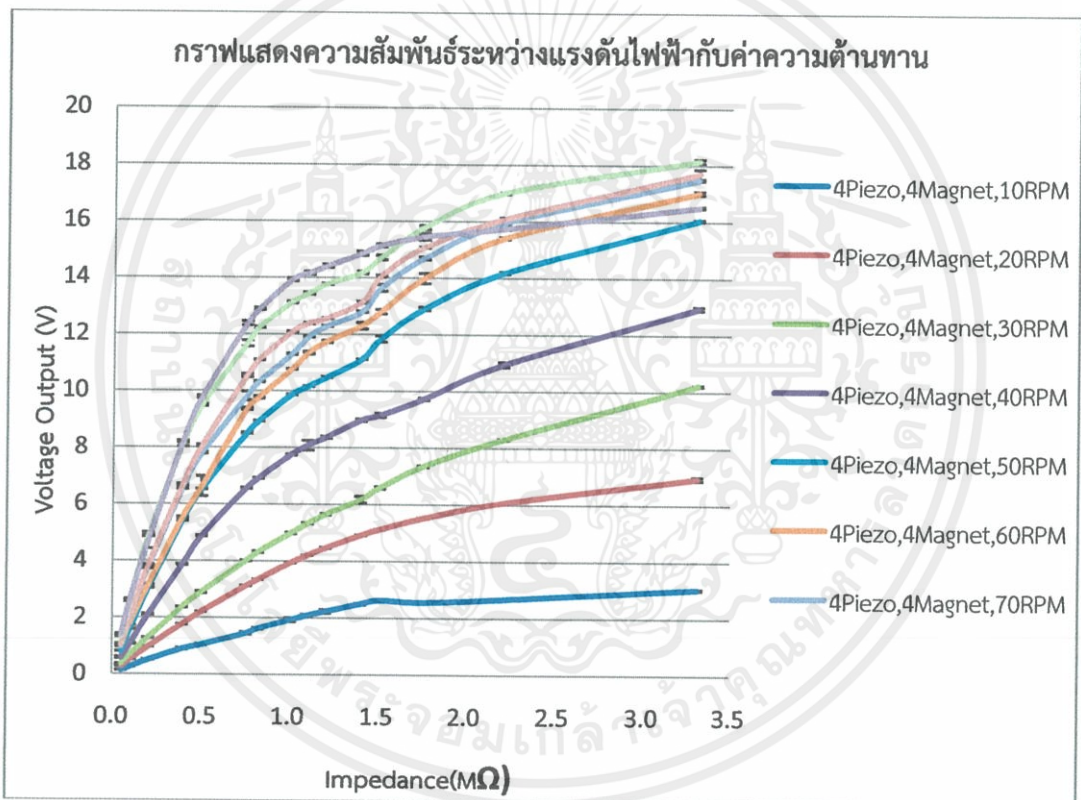
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

จากการทดลองในรูปที่ 4.5 ทำให้ทราบว่า การต่อแบบขนานระหว่างแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแต่ละแผ่นนั้น จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณจากสมการ  $P = \frac{v^2}{R}$  นั้น มีค่ามากกว่าการต่อแบบอนุกรม และการต่อแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่น

#### 4.1.4 การทดลองเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าจากอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกที่ค่าความต้านทานต่างๆ

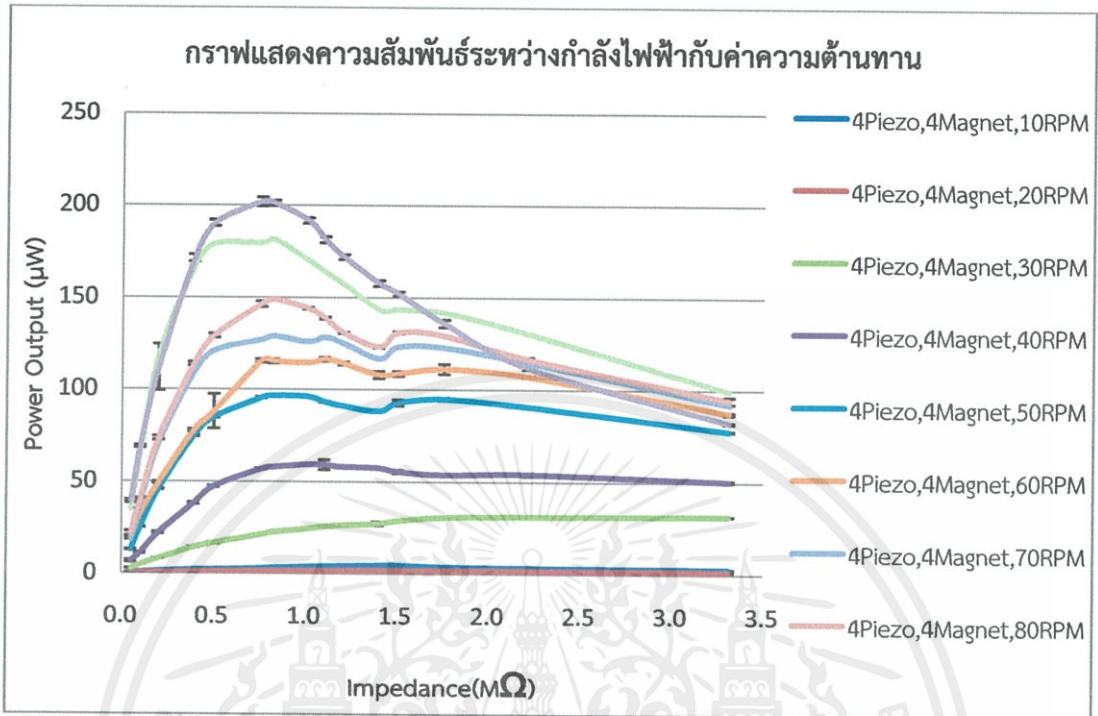
ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานในแต่ละครั้งการทดลองเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ซึ่งนำมาใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจากสมการ  $P = \frac{v^2}{R}$  ซึ่งทำการทดลองที่ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ต่างๆ เลือกใช้แม่เหล็ก 4 ตัวติดที่แผ่นโรเตอร์ ผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ในรูปที่ 4.6 นำมาคำนวณเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้า จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ความต้านทาน และความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ดังรูปที่ 4.7



จากรูปที่ 4.7 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าแบบหมุนโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกที่ได้

จากรูปที่ 4.7 ซึ่งคำนวณจากสมการ  $P = \frac{v^2}{R}$  โดยค่า  $V$  ได้จากการวัดในการทดลองที่ความต้านทานและความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ที่ค่าต่างๆ ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ได้สูงสุดที่ 202.0109 ไมโครวัตต์ ที่ค่าความต้านทานประมาณ 759 กิโลโอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

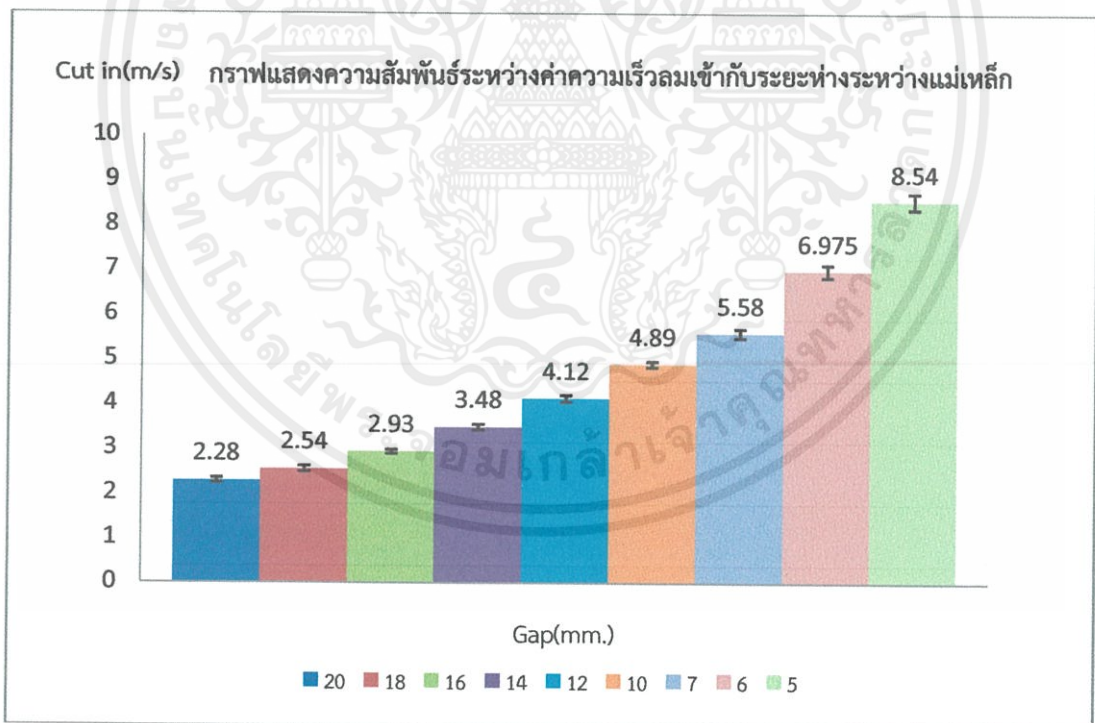
## 4.2 การทดลองชุดอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า

ชุดอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า ประกอบไปด้วยส่วนการทำงานสองส่วนคือ ส่วนที่เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกล และส่วนที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ส่วนที่เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกลนั้น คือกังหันลม ซึ่งเป็นกังหันลมแบบแกนแนวตั้งชนิด Savonius สามใบพัด และส่วนที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า การออกแบบและทดลองจะทำภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดความเร็วลมโดยอ้างอิงจากความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทยที่มีค่าประมาณ 3.6 m/s ดังนั้นผู้วิจัยจะต้องออกแบบ และทดลองเพื่อให้ชุดอุปกรณ์สามารถใช้งานได้ในความเร็วที่ต่ำกว่า หรือเท่ากับความเร็วลม 3.6 m/s

### 4.2.1 การทดลองชุดอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยส่วนที่เปลี่ยนพลังงานเป็นพลังงานกลใช้กังหันลมชุดที่ 1

#### 4.2.1.1 การทดลองหาค่าความเร็วลมเข้า (Cut-in Wind Speed)

ทำการทดลองเพื่อหาค่าความเร็วลมน้อยสุดที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน โดยต่อชุดอุปกรณ์ส่วนที่เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกลนั้นคือ กังหันลม กับอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเพียโซอิเล็กทริก ทดลองภายในอุโมงค์ลมโดยการปรับค่าความเร็วลมต่างๆ และทำการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแม่เหล็กในอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานโดยเพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วลมเข้ากับระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองโดยเริ่มต้นจากการเลือกระยะห่างระหว่างที่ 5 มิลลิเมตร ได้ผลการทดลองซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 พบว่าที่ระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก 5 มิลลิเมตร มีค่าความเร็วลมเข้าประมาณ 8.54 ซึ่งมีค่าความเร็วลมเข้าสูงเมียบเทียบกับค่าความเร็วลมเฉลี่ยของประเทศ ซึ่งมีค่าประมาณ 3.6 m/s จึงทำการทดลองโดยเลือกระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก 6 มิลลิเมตร และ 7 มิลลิเมตร จากรูปที่ 4.8 พบว่าค่าความเร็วลมขาเข้ามีค่า 6.975 และ 5.58 ซึ่งยังคงมีค่าสูงอยู่ และยังพบว่าที่ความเร็วประมาณ 5 m/s จะทำให้ชุดอุปกรณ์เกิดการสั่นสะเทือนมาก ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการเสียหายได้ ดังนั้นจึงทำการเพิ่มระยะห่างระหว่างแม่เหล็กเพื่อให้ค่าความเร็วลมขาเข้ามีค่าลดลง และทำการทดลองโดยใช้ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กที่ค่า 20, 18, 16, 14, 12 และ 10 มิลลิเมตร ซึ่งผลการทดลองในรูปที่ 4.8 พบว่าค่าความเร็วลมขาเข้ามีค่าอยู่ในช่วง 2.155 m/s ถึง 4.41 m/s ที่ระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก 10-20 มิลลิเมตร ซึ่งช่วงของค่าความเร็วลมขาเข้าใกล้เคียงกับค่าความเร็วลมเฉลี่ยของประเทศไทย แต่ที่ระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก 10 มิลลิเมตรนั้นมีค่าความเร็วลมเข้ามากกว่าค่าความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทย ในการเลือกค่าระยะห่างระหว่างแม่เหล็กนั้น จะพิจารณาจากค่าความเร็วลมเข้าที่ต่ำกว่าค่าความเร็วเฉลี่ยประเทศไทย ซึ่งเมื่อค่าความเร็วลมขาเข้ามีค่าน้อยจะทำให้ช่วงการทำงานของอุปกรณ์เพิ่มมากขึ้น เช่น เมื่อเลือกใช้ระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก 20 มิลลิเมตร อุปกรณ์จะทำงานได้ที่ความเร็วลม 2.155-5 m/s ซึ่งมีช่วงการทำงานกว้างกว่า การใช้ระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก 12 มิลลิเมตรที่มีช่วงการทำงานแค่ 3.615-5 m/s และที่ค่าความเร็วลม 5 m/s นั้นเป็นความเร็วลมที่ทำให้ชุดอุปกรณ์เกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งอาจจะเกิดความเสียหายได้ จึงจำกัดค่าความเร็วลมสูงสุดในการใช้งานที่ค่านี

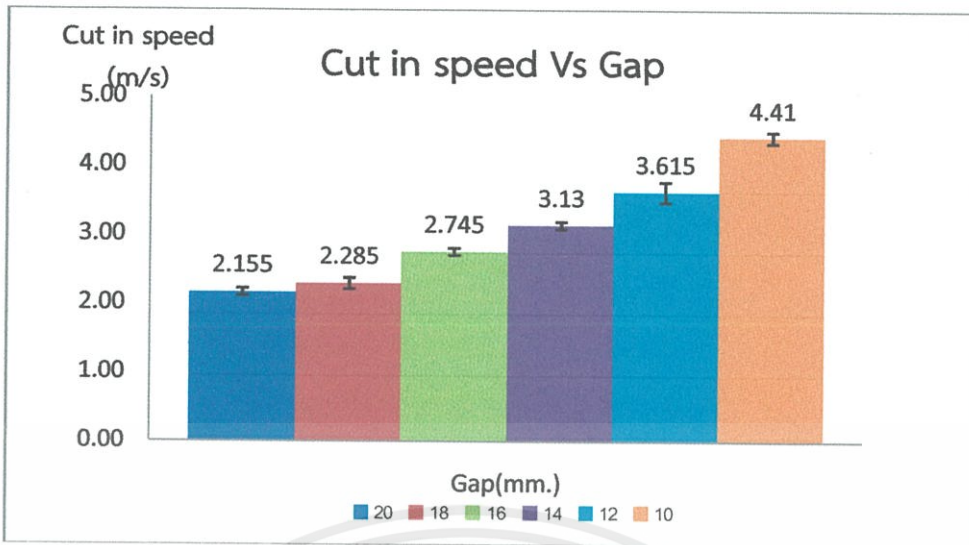
#### 4.2.2 การทดลองชุดอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยส่วนที่เปลี่ยนพลังงานเป็นพลังงานกลใช้กังหันลมชุดที่ 2

ผู้วิจัยเลือกช่วงในการทดลองความเร็วลมคือ ความเร็วลม 2 m/s - 4.5 m/s เนื่องจากที่ความเร็วลมประมาณ 2 m/s เป็นความเร็วลมที่ทำให้ส่วนของกังหันลมในชุดทดลองเริ่มหมุน และที่ความเร็วลม 4.5 m/s เป็นความเร็วลมที่ชุดทดลองเริ่มเกิดการสั่นสะเทือนมาก ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความเสียหายกับชุดทดลองได้ เนื่องจากเลือกค่าดังกล่าวเป็นค่าความเร็วลมสูงสุด ในการทดลองชุดอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า

##### 4.2.2.1 การทดลองหาค่าความเร็วลมเข้า (Cut-in Wind Speed)

ทดลองหาค่าความเร็วลมเข้า จากการประกอบกังหันลมกับอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทดลองภายในอุโมงค์ลม โดยการปรับเพิ่มค่าความเร็วลมขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดที่กังหันลมหมุน ทดลองที่ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กในอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกในค่าต่างๆ คือ ระยะ 20 mm, 18 mm, 16 mm, 14 mm, 12 mm, 10 mm วัดความเร็วลมที่ทำให้ใบพัดของกังหันลมเริ่มหมุน ความเร็วลมที่วัดได้นั้นคือค่าความเร็วลมเข้า ซึ่งสามารถแสดงได้จากกราฟในรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

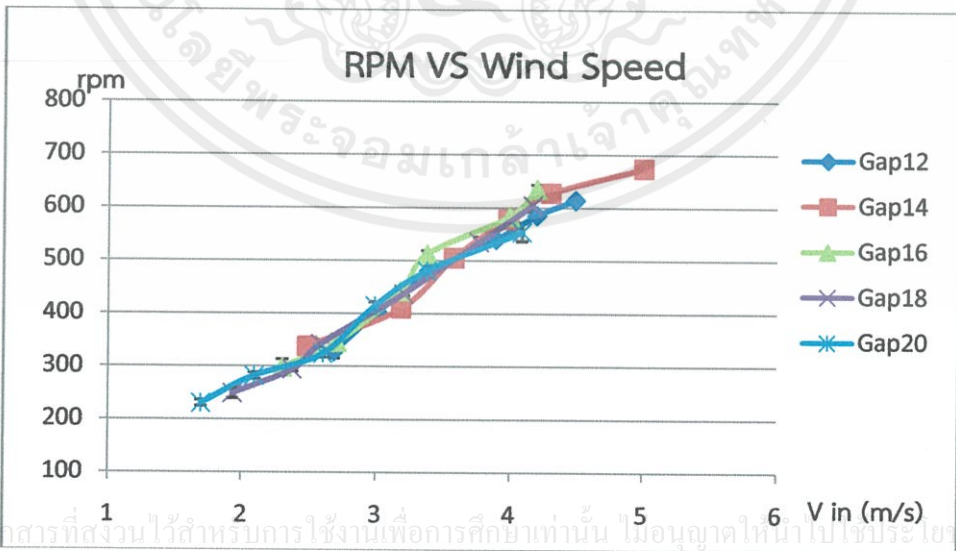


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วลมเข้ากับระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก

จากกราฟในรูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อลดระยะห่างระหว่างแม่เหล็กลง จะทำให้ความเร็วลมเข้ามีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งช่วงของค่าความเร็วลมเข้านั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทยที่ประมาณ 3.6 m/s และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเร็วลมเข้าของกังหันลมชุดที่ 1 กังหันลมชุดที่ 2 มีค่าความเร็วลมเข้าที่ต่ำกว่า ผู้วิจัยจึงเลือกใช้กังหันลมชุดที่ 2 ในการนำมาประกอบเป็นชุดอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า

4.2.2.2 การทดลองเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและความเร็วรอบกังหันลม

การทดลองทำโดยการนำชุดอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าติดตั้งในอุโมงค์ลม และปรับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กที่ค่าต่างๆ ทำการปรับค่าความเร็วลมและวัดความเร็วรอบของใบพัดที่ค่าความเร็วลมต่างๆ ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้จากกราฟดังรูปที่ 4.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วลม

จากการทดลองในรูปที่ 4.10 พบว่า เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วรอบของใบพัดเพิ่มขึ้นตาม และเมื่อปรับระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก จะทำให้ค่าความเร็วรอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าระยะห่างเดิม ซึ่งพบว่าระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก ไม่มีผลกับความเร็วรอบของการหมุนใบพัดที่เกิดจากความเร็วลมในการปะทะ เนื่องจากเมื่อกังหันเริ่มหมุนไปได้ระยะหนึ่งนั้น แรงเหวี่ยงของใบพัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นมาก จนทำให้แรงแม่เหล็กที่ต้านการหมุนไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของกังหันลม

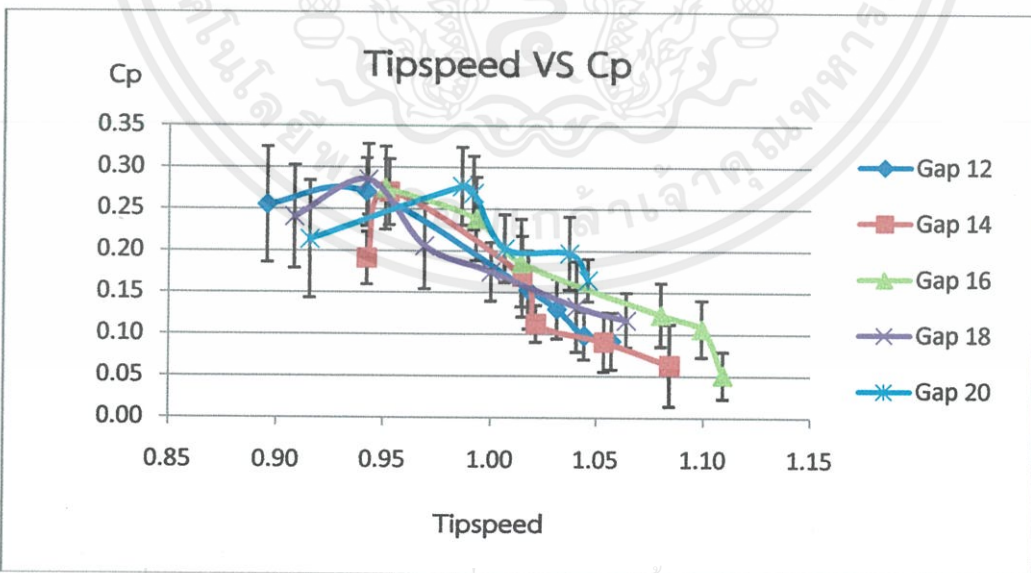
4.2.2.3 การทดลองหาค่าประสิทธิภาพของกังหันลมในการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกล

การทดลองหาประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์กังหันลมประกอบด้วยอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงาน ทำการทดลองในอุโมงค์โดยการปรับค่าความเร็วลม และทำการวัดความเร็วลมหน้ากังหันลม  $v_u$  ความเร็วลมหลังกังหันลม  $v_d$  และวัดค่าความเร็วรอบของใบพัดที่หมุนซึ่งค่าความเร็วรอบที่วัดได้จะอยู่ในหน่วยจำนวนรอบต่อวินาที (RPM) จะต้องนำค่าที่ได้เปลี่ยนให้อยู่ในหน่วยความเร็วเชิงหมุน  $\omega$  โดยการแทนค่าในสมการ  $\omega = \frac{2\pi.RPM}{60}$  นำค่าที่ได้มาคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพของกังหันลม  $C_p$  จากสมการที่ (4.1) และอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด  $\lambda$  จากสมการที่ (4.2)

$$C_p = \frac{(1 - \frac{v_d}{v_u})(1 - (\frac{v_d}{v_u})^2)}{2} \tag{4.1}$$

$$\lambda = \frac{\omega.R}{v_u} \tag{4.2}$$

ค่าที่คำนวณได้จากสมการดังกล่าวสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้จากกราฟในรูปที่ 4.11

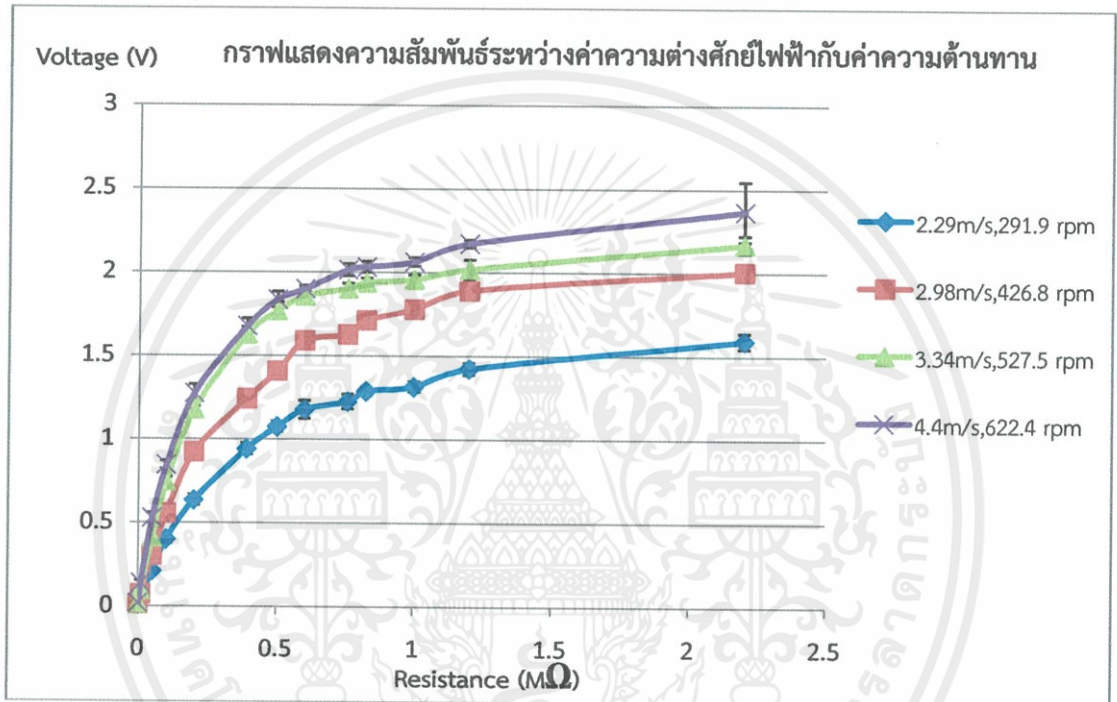


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด

จากการทดลองในรูปที่ 4.11 พบว่าชุดอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานได้ดี ในช่วงของค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด (Tip speed) 0.9-1 ซึ่งในช่วงดังกล่าว มีค่าความเร็วลมประมาณ 2.5-3 m/s

#### 4.2.2.4 การทดลองหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า

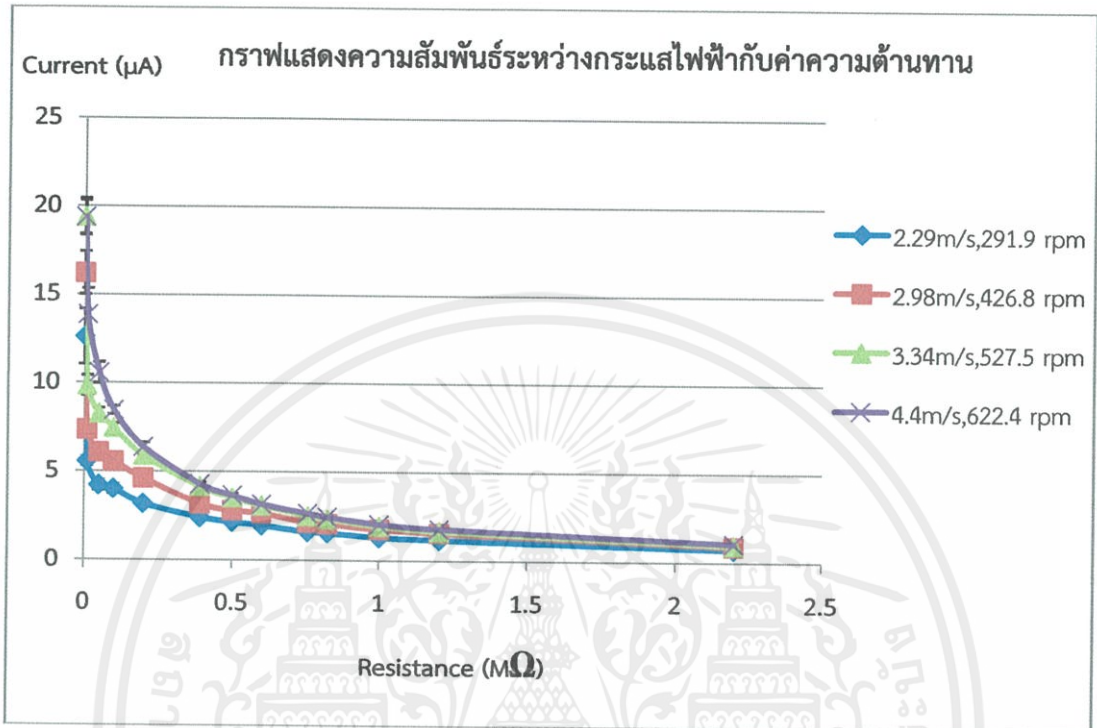
การทดลองชุดอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าในอุโมงค์ลมที่ปรับค่าความเร็วลมในค่าต่างๆ โดยใช้ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กในอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานที่ 18 มิลลิเมตร ทำการวัดค่าความต่างศักย์ของวงจรเพื่อใช้โอห์มมิเตอร์ที่ต่อแบบขนาน 4 แผ่น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์กับค่าความต้านทานได้จากกราฟในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

จากการทดลองในรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อค่าความต้านทานเพิ่มจะทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตาม และเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

จากการทดลองวัดค่าความต่างศักย์ที่ค่าความต้านทานต่างๆ นำค่าที่ได้มาคำนวณหากระแสไฟฟ้าได้จากสมการ  $i = \frac{v}{r}$  จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ค่าความต้านทานต่างๆ ได้จากกราฟในรูปที่ 4.13

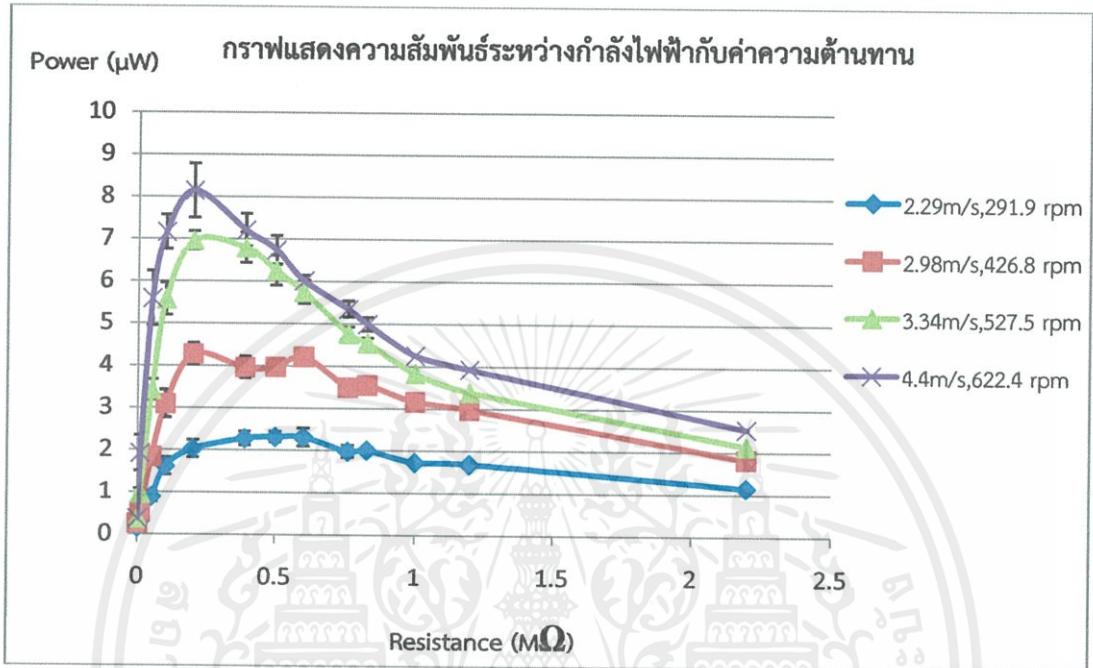


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

จากการทดลองในรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองวัดค่าความต่างศักย์จากการทดลองที่ค่าความต้านทานต่างๆ จะสามารถคำนวณเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริกได้จากสมการ  $P = \frac{V^2}{R}$  ซึ่งสามารถแสดงค่าที่คำนวณได้จากสมการดังกล่าว โดยแสดงได้จากกราฟในรูปที่ 4.14



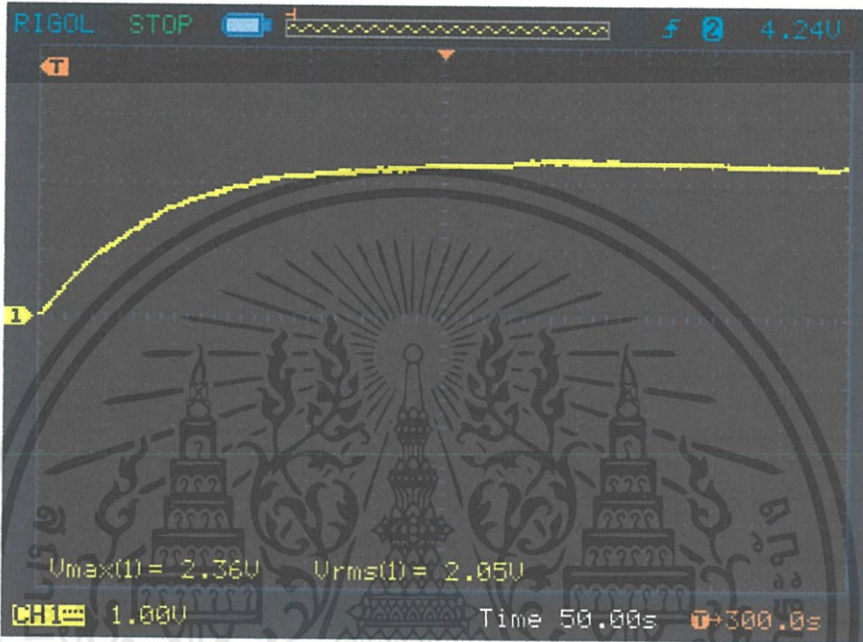
รูป 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

จากการทดลองในรูปที่ 4.14 พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าในช่วงความเร็วลมต่างๆ มีค่าสูงสุดในที่ค่าความต้านทานประมาณ 390 กิโลโอห์ม และเมื่อค่าความเร็วลมเพิ่มจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตาม โดยค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าประมาณ 8 ไมโครวัตต์ ที่ความเร็วลม 4.4 m/s ความเร็วรอบ 622 rpm ความต้านทาน 390 กิโลโอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.5 การทดลองหาค่าความต่างศักย์ที่ได้จากการชาร์จประจุกับตัวเก็บประจุ

ทำการทดลองโดยการติดตั้งอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าในอุโมงค์ลม โดยต่อวงจรเพียโซอิเล็กทริกกับวงจรเรียงกระแสและต่อกับตัวเก็บประจุขนาด 220 ไมโครฟารัด ที่ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กแต่ละค่า ทำการปรับค่าความเร็วลมและวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ ณ จุดที่มีค่าความต่างศักย์คงที่และมีค่าสูงสุด ซึ่งค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากเครื่องออสซิลโลสโคปมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป

จากการทดลองสามารถวัดค่าความต่างศักย์ได้ดังต่อไปนี้

1. ระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก 18 มิลลิเมตร
  - ความเร็วลม 2.416 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 1.32 โวลต์
  - ความเร็วลม 2.667 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 1.44 โวลต์
  - ความเร็วลม 3.016 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 1.56 โวลต์
  - ความเร็วลม 3.667 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 1.64 โวลต์
  - ความเร็วลม 4.067 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 1.80 โวลต์
2. ระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก 16 มิลลิเมตร
  - ความเร็วลม 2.683 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 1.68 โวลต์
  - ความเร็วลม 2.983 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 1.96 โวลต์
  - ความเร็วลม 3.616 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 1.80 โวลต์
  - ความเร็วลม 4.083 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 1.80 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก 14 มิลลิเมตร
  - ความเร็วลม 3.150 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 3.20 โวลต์
  - ความเร็วลม 3.750 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 3.94 โวลต์
  - ความเร็วลม 4.167 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 4.16 โวลต์
4. ระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก 12 มิลลิเมตร
  - ความเร็วลม 3.783 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 5.50 โวลต์
  - ความเร็วลม 4.266 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 5.72 โวลต์

จากการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตาม และเมื่อปรับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กให้ลดลง จะทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย และเนื่องจากวงจรจัดการพลังงานที่ใช้มีค่าแรงดันอินพุตประมาณ 5 โวลต์ ซึ่งสามารถใช้ได้โดยการเลือกระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก 12 มิลลิเมตร

#### 4.2.2.6 การทดลองต่ออุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกับวงจรจัดเก็บพลังงาน

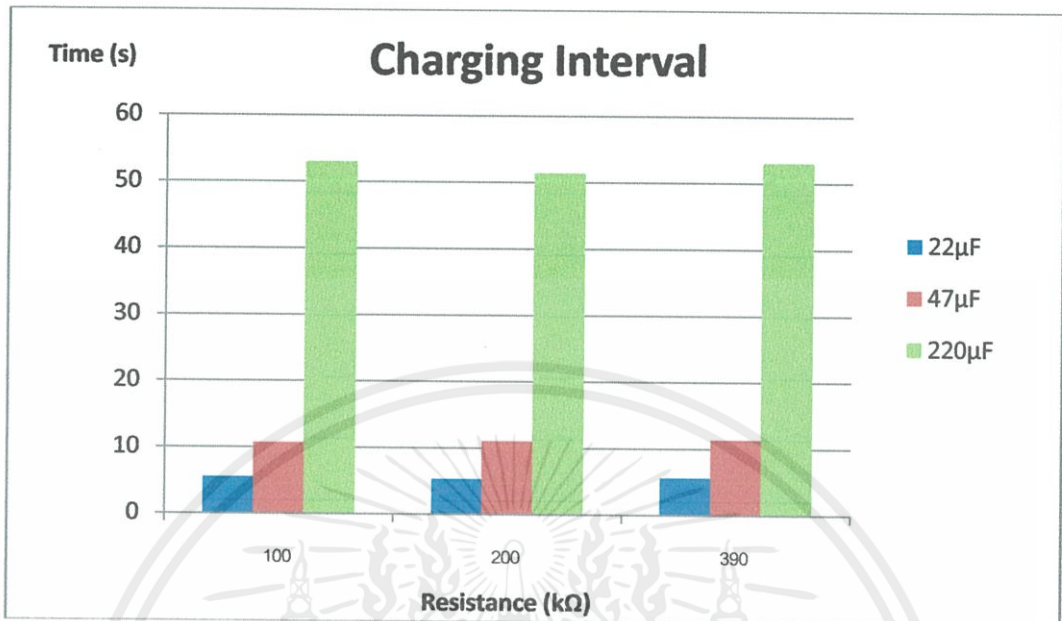
การทดลองใช้วงจรจัดการพลังงานที่มีค่าแรงดันเอาต์พุต 3.3 โวลต์ ซึ่งแรงดันอินพุตที่ได้จากวงจรเพียโซอิเล็กทริกนั้นต้องมีค่าประมาณ 5 โวลต์ ผู้วิจัยจึงเลือกระยะห่างระหว่างแม่เหล็กที่ 12 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองที่ 4.3.2.4 ประมาณ 5.50-5.72 โวลต์ ทำการติดตั้งอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าในอุโมงค์ และต่อวงจรจัดการพลังงานกับตัวเก็บประจุเข้ากับวงจรเพียโซอิเล็กทริกในชุดอุปกรณ์ ปรับค่าความเร็วลมที่ 3.64 ทำการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุและค่าความต้านทาน และทำการวัดระยะเวลาที่ใช้ในการชาร์จและระยะเวลาที่อุปกรณ์ทำงานซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัวเก็บประจุและค่าความต้านทานกับเวลา

C ( $\mu\text{F}$ )	R ( $\text{k}\Omega$ )	Operation Interval (ms)	Charging Interval (s)
22	100	2.28	5.56
	200	3.09	5.35
	390	0.94	5.64
47	100	1.07	10.68
	200	2.29	11.04
	390	6.40	7.31
220	100	9.59	53.01
	200	21.29	51.42
	390	51.76	53.04

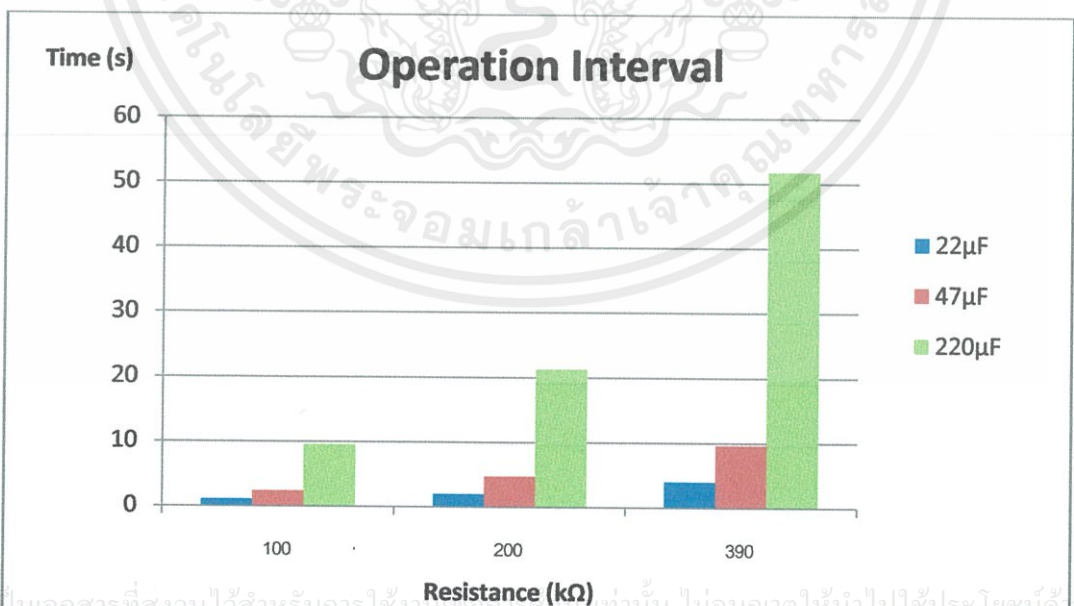
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษามอนอกราคาให้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำผลที่ได้จากตารางที่ 4.1 มาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการชาร์จกับค่าความต้านทานในแต่ละค่าของตัวเก็บประจุ แสดงได้จากกราฟในรูปที่ 4.16 และในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงระยะเวลาที่ใช้ในการชาร์จ

จากกราฟรูปที่ 4.16 พบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน จะทำให้ระยะเวลาในการชาร์จไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าหรือมีค่าคงที่ และเมื่อการเปลี่ยนแปลงโดยเพิ่มค่าตัวเก็บประจุจะทำให้ระยะเวลาในการชาร์จเพิ่มขึ้นตาม



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงระยะเวลาที่ใช้ในการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้แจ้งแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 4.17 พบว่า การทดลองที่ตัวเก็บประจุ 22 และ 47 ไมโครฟารัด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ระยะเวลาที่อุปกรณ์ทำงานมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่การทดลองที่ตัวเก็บประจุ 220 ไมโครฟารัดนั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโดยเพิ่มค่าความต้านทานระยะเวลาที่อุปกรณ์ทำงานมีค่าเพิ่มขึ้นตาม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# บทวิจารณ์และสรุป

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้านั้น ประกอบไปด้วยการทดลองในส่วนของการทดลองอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า และการทดลองต่อกังหันลมกับอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า สามารถสรุปผลการทดลองทั้งหมดได้ดังนี้

#### 5.1.1 การทดลองอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเพียโซอิเล็กทริก

1. ในการทดลองอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้านั้น สามารถเพิ่มพลังงานไฟฟ้าที่ได้โดยการลดระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกลาง

2. การเพิ่มจำนวนของแม่เหล็กในอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้านั้น จะทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น

#### 5.1.2 การทดลองอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า

1. ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กในอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้านั้น มีผลกับค่าความเร็วลมเข้าอย่างมาก ยิ่งระยะห่างระหว่างแม่เหล็กลดลงจะทำให้ค่าความเร็วลมเข้าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ช่วงความเร็วลมในการทำงานของอุปกรณ์นั้นแคบลง แต่จะไม่มีผลกับความเร็วรอบใบพัดของกังหันลม และระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก มีผลกับพลังงานไฟฟ้าที่ได้ ดังนั้นการเลือกใช้ระยะระหว่างแม่เหล็กนั้นควรเลือกที่เหมาะสมกับการใช้งาน

2. การเลือกใช้ตัวเก็บประจุในวงจรจัดเก็บพลังงานมีผลกับระยะเวลาในการชาร์จและระยะเวลาในใช้งาน ดังนั้นควรเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสมกับการใช้งานต่อไป

### 5.2 ปัญหาที่พบและวิธีแก้ไข

1. การยึดสเตเตอร์กับชุดทดลองเกิดการเอียง เนื่องจากความไม่เรียบของวัสดุอะคริลิกที่เกิดจากการตัดชิ้นงานชุดทดลอง ทำให้การวัดระยะห่างระหว่างแม่เหล็กที่ติดบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกกับแม่เหล็กที่ติดบนโรเตอร์เกิดความคลาดเคลื่อนไป จึงควรปรับสภาพผิวชุดทดลองเพื่อให้สามารถสเตเตอร์ไม่ให้เกิดการเอียงได้

2. การทดลองในอุโมงค์นั้น ความเร็วลมภายในอุโมงค์มีค่าไม่คงที่ทำให้ค่าความเร็วลมที่วัดได้มีความช่วงการเปลี่ยนแปลงที่กว้าง เมื่อนำค่าความเร็วลมที่ได้มาคำนวณจะได้ค่าที่มีความผิดพลาด จึงควรทำการทดลองในเชิงสถิติซ้ำๆ หลายครั้งเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำยิ่งขึ้น หรือปรับปรุงอุโมงค์ลมให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

3. ในส่วนของจุดเชื่อมต่อระหว่างแบริ่งในชุดอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้ากับกังหันลม มีปัญหาเนื่องจากความผิดเกิดขึ้น ซึ่งทำให้ค่าความเร็วลมเข้ามีค่าเพิ่มขึ้น สามารถลดความผิดโดยการใส่สปริงล้อเลื่อนหรือปรับปรุงผิวตรงจุดเชื่อมต่อซึ่งเมื่อลดความผิดจะทำให้ค่าความเร็วลมเข้าลดลงด้วย

### 5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา

ในการนำเอาแผ่นเพียโซอิเล็กทริกมาใช้ในการกำเนิดพลังงานไฟฟ้านั้น ควรศึกษาถึงระยะในการก่อตัวที่เหมาะสมของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกชนิดนั้น เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบตัวอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าให้มีการเคลื่อนที่ที่สอดคล้องกับระยะการงอแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานเพื่อให้ได้พลังงานมากยิ่งขึ้น ในส่วนของกังหันลมสามารถเลือกใช้วัสดุที่มีขนาดเบาและแข็งแรงเพื่อให้สามารถใช้งานได้ในช่วงความเร็วลมต่ำๆ และสามารถปรับปรุงเรื่องขนาดของอุปกรณ์ให้มีขนาดเล็กลงแต่ยังคงประสิทธิภาพเหมือนเดิมเพื่อสามารถนำไปใช้ได้หลากหลายยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี “พลังงานทดแทน” [Online]. Available:  
<http://th.wikipedia.org>. 5 กันยายน 2013.
- [2] Wikipedia the free encyclopedia. “Energy harvesting” [Online]. Available:  
<http://en.wikipedia.org>. 2013.
- [3] Fujitsu. “Fujitsu develops hybrid energy harvesting device for generating Electricity.” [Online]. Available: <http://www.fujitsu.com> 9 ธันวาคม 2010.
- [4] ชาณูณรงค์ น้อยบางยาง, ถาวร สุวรรณกิจ, “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกและการประยุกต์ใช้งาน.” THE JOURNAL OF APPLIED SCIENCE., vol. 8, no. 1. June 2009
- [5] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี “สนามแม่เหล็ก.” [Online]. Available:  
<http://th.wikipedia.org>. 5 กันยายน 2013.
- [6] Invensense “MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.2.” [Online]. Available: <http://www.invensense.com>. 16 November 2011.
- [7] DFrobot “Dreamer Nano V4.0” [Online]. Available:  
<http://www.dfrobot.com> 25 October 2012.
- [8] “เทคโนโลยีพลังงานลม.” [Online]. Available: <http://www.region1.energy.go.th>.
- [9] A. W. Manyonge, R. M. Ochieng, F. N. Onyango and J. M. Shichikha. “Mathematical Modelling of Wind Turbine in a Wind Energy Conversion System: Power Coefficient Analysis.” Applied Mathematical Sciences, Vol. 6, 2012, no. 91, 4527 – 4536.
- [10] “ลม” [online]. Available :  
[http://www.baanjomyut.com/library\\_2/extension-3/wind/01.html](http://www.baanjomyut.com/library_2/extension-3/wind/01.html).
- [11] ศาสตราจารย์ ดร.ทวี ตันขศิริ “Piezoelectric Ceramics.” [online]. Available :  
<http://www.rmutphysics.com/charud/invention/invention1/ultrasonic/piezo.htm>
- [12] “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก” [online]. Available : ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
[http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/ceramic\\_sensor/piezoelectric1.htm](http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/ceramic_sensor/piezoelectric1.htm)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### โปรแกรมออกแบบและการจำลองจากโปรแกรม

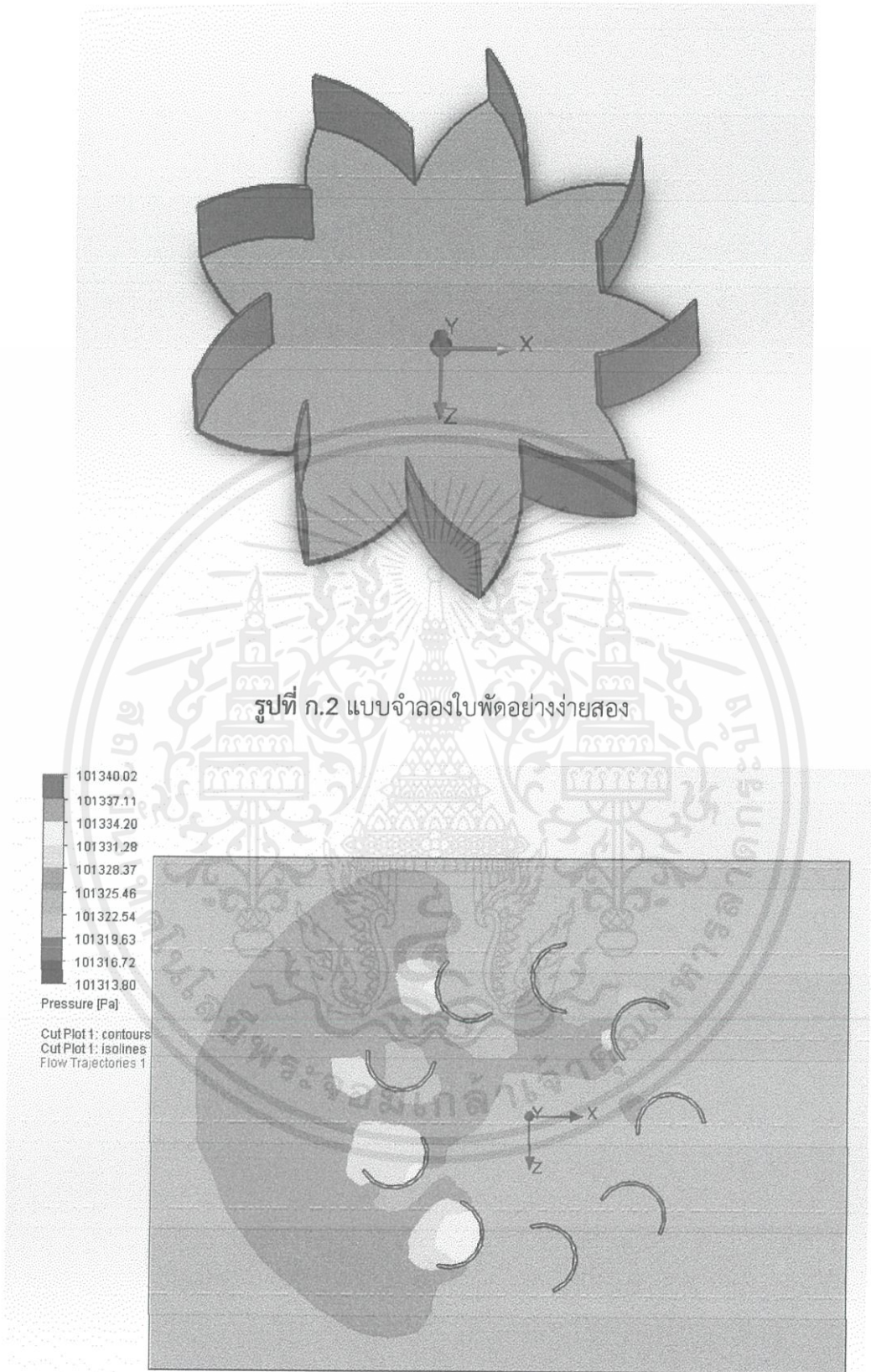
#### ก.1 โปรแกรม Solidworks

โปรแกรม Solidworks มีการใช้งานส่วนเพิ่มเติมคือ Flow Simulation มีระบบจำลองการไหลผ่านก๊าซและของเหลว ในกรณีที่มีแบบจำลองต่างๆ กันได้ จึงทำให้สามารถเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงลมของใบพัดชนิดต่างๆ ได้ โดยการจำลองจากแบบจำลองดังรูปที่มีขนาดรัศมีของใบพัดเท่ากัน เพื่อหาแนวโน้มและทิศทางในการออกแบบ

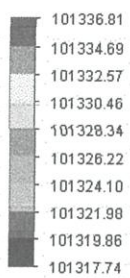


รูปที่ ก.1 แบบจำลองใบพัดอย่างง่ายหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ ก.3 การจำลองแรงดันจากแรงลมของใบพัดที่หนึ่ง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

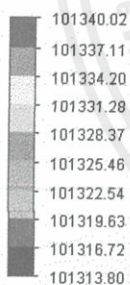


Pressure [Pa]

Cut Plot 1: contours  
Cut Plot 1: isolines  
Cut Plot 2: isolines  
Flow Trajectories 1

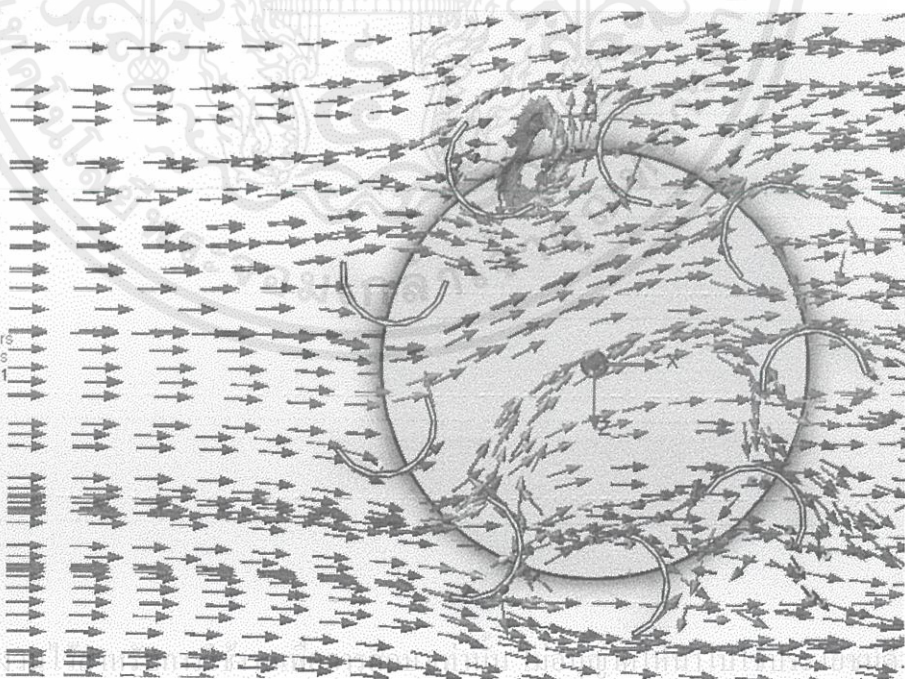


รูปที่ ก.4 การจำลองแรงดันจากแรงลมของไบพัดที่สอง



Pressure [Pa]

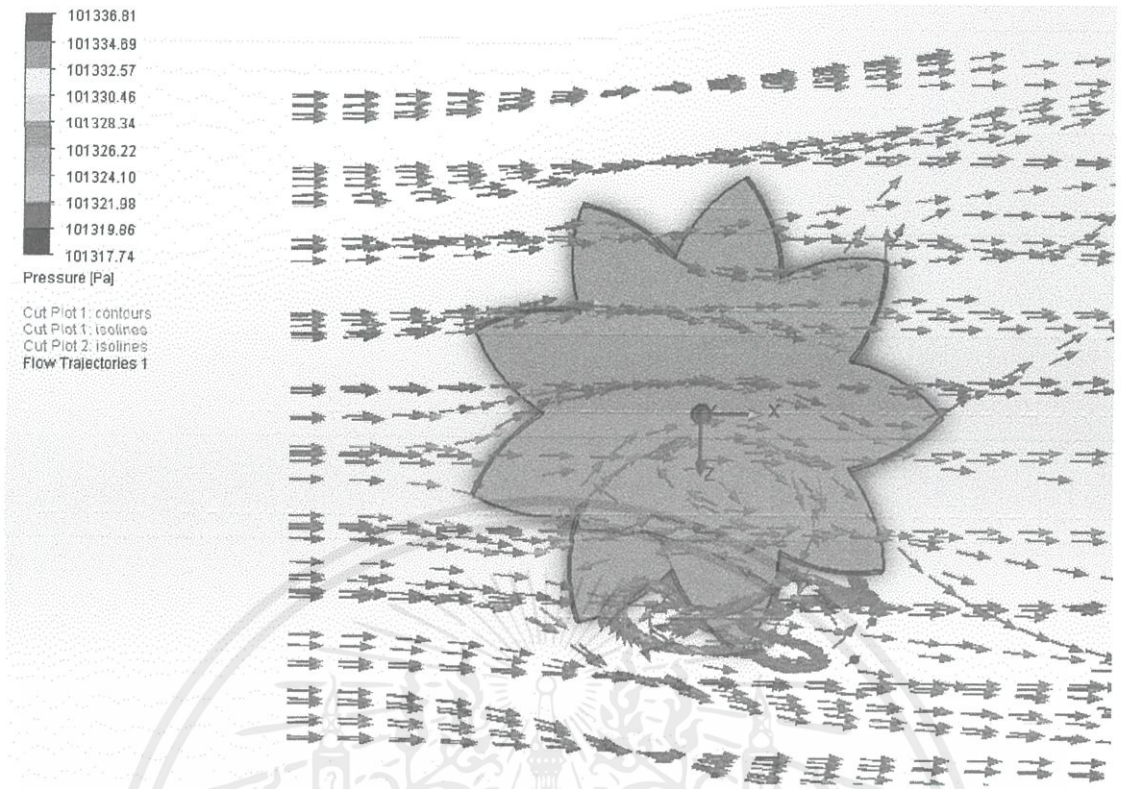
Cut Plot 1: contours  
Cut Plot 1: isolines  
Flow Trajectories 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.5 การจำลองทิศทางจากแรงลมของไบพัดที่หนึ่ง



รูปที่ ก.6 การจำลองทิศทางจากแรงลมของใบพัดที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### เอกสารคู่มืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

#### ข.1 เอกสารคู่มือการใช้งานวงจรจัดเก็บพลังงาน



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  $\times$  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

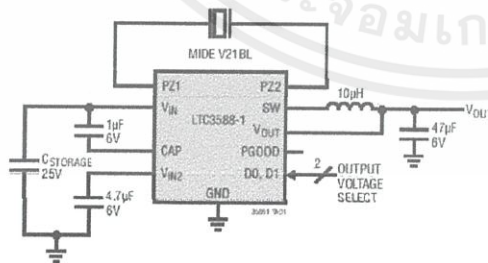
The LTC<sup>®</sup>3588-1 integrates a low-loss full-wave bridge rectifier with a high efficiency buck converter to form a complete energy harvesting solution optimized for high output impedance energy sources such as piezoelectric transducers. An ultralow quiescent current undervoltage lockout (UVLO) 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.

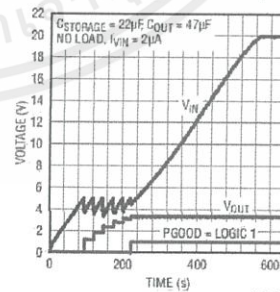
L<sup>T</sup>, LT, LTC, LTM, Linear Technology, the Linear logo and Burst Mode are registered trademarks of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

#### TYPICAL APPLICATION

100mA Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply



LTC3588-1 3.3V Regulator Start-Up Profile



35881fa

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## LTC3588-1

**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS** (Note 1)

$V_{IN}$	$V_{OUT}$ .....	-0.3V to Lesser of ( $V_{IN2} + 0.3V$ ) or 6V
Low Impedance Source .....	PGOOD.....	-0.3V to Lesser of ( $V_{OUT} + 0.3V$ ) or 6V
Current Fed, $I_{SW} = 0A$ .....	$I_{PZ1}, I_{PZ2}$ .....	$\pm 50mA$
PZ1, PZ2 .....	$I_{SW}$ .....	350mA
D0, D1 .....	Operating Junction Temperature Range	(Notes 2, 3).....
CAP .....	Storage Temperature Range.....	-40 to 125°C
$V_{IN2}$ .....	Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	-65 to 150°C
-0.3V to [Lesser of ( $V_{IN} + 0.3V$ ) or 6V]	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
LTC3588EDD-1#PBF	LTC3588EDD-1#TRPBF	LFKY	10-Lead (3mm x 3mm) Plastic DFN	-40°C to 125°C
LTC3588IDD-1#PBF	LTC3588IDD-1#TRPBF	LFKY	10-Lead (3mm x 3mm) Plastic DFN	-40°C to 125°C
LTC3588EMSE-1#PBF	LTC3588EMSE-1#TRPBF	LTFKX	10-Lead Plastic eMSOP	-40°C to 125°C
LTC3588IMSE-1#PBF	LTC3588IMSE-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/>

35881fa

2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 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	
$I_{VIN}$	$V_{IN}$ 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 $\mu\text{A}$ $\mu\text{A}$	
$V_{UVLO}$	$V_{IN}$ Undervoltage Lockout Threshold	$V_{IN}$ Rising 1.8V Output Selected; D1 = 0, D0 = 0 2.5V Output Selected; D1 = 0, D0 = 1 3.3V Output Selected; D1 = 1, D0 = 0 3.6V Output Selected; D1 = 1, D0 = 1  $V_{IN}$ Falling 1.8V Output Selected; D1 = 0, D0 = 0 2.5V Output Selected; D1 = 0, D0 = 1 3.3V Output Selected; D1 = 1, D0 = 0 3.6V Output Selected; D1 = 1, D0 = 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	$I_{VIN} = 1\text{mA}$		19.0 20.0	21.0	V	
$I_{SHUNT}$	Maximum Protective Shunt Current	1ms Duration		25		mA	
	Internal Bridge Rectifier Loss ( $V_{PZ1} - V_{PZ2} - V_{IN}$ )	$I_{BRIDGE} = 10\mu\text{A}$		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 1.710  2.512 2.488  3.312 3.201  3.612 3.492	1.890 1.788  2.575  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		$\Omega$	
$R_N$	Buck NMOS Switch On-Resistance			1.3		$\Omega$	
	Max Buck Duty Cycle		●	100		%	
$V_{IH(D0, D1)}$	D0/D1 Input High Voltage		●	1.2		V	
$V_{IL(D0, D1)}$	D0/D1 Input Low Voltage		●		0.4	V	
$I_{IH(D0, D1)}$	D0/D1 Input High Current				10	nA	
$I_{IL(D0, D1)}$	D0/D1 Input Low Current				10	nA	

35881fa



3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LTC3588-1

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

**Note 1:** Stresses beyond those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. Exposure to any Absolute Maximum Rating condition for extended periods may affect device reliability and lifetime.

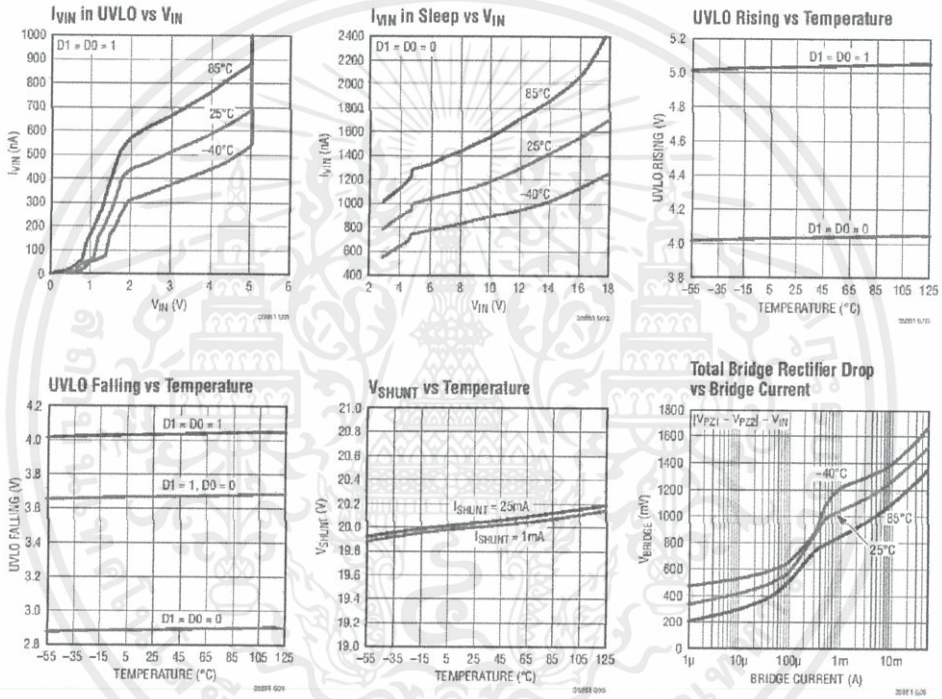
**Note 2:** The LTC3588-1 is tested under pulsed load conditions such that  $T_J = T_A$ . The LTC3588E-1 is guaranteed to meet specifications from 0°C to 85°C junction temperature. Specifications over the -40°C to 125°C operating junction temperature range are assured by design, characterization, and correlation with statistical process controls. The LTC3588-1 is guaranteed over the full -40°C to 125°C operating

junction temperature range. Note that the maximum ambient temperature consistent with these specifications is determined by specific operating conditions in conjunction with board layout, the rated package thermal impedance and other environmental factors.

**Note 3:** The junction temperature ( $T_J$ , in °C) is calculated from the ambient temperature ( $T_A$ , in °C) and power dissipation ( $P_D$ , in Watts) according to the formula:  $T_J = T_A + (P_D \cdot \theta_{JA})$ , where  $\theta_{JA}$  (in °C/W) is the package thermal impedance.

**Note 4:** Dynamic supply current is higher due to gate charge being delivered at the switching frequency.

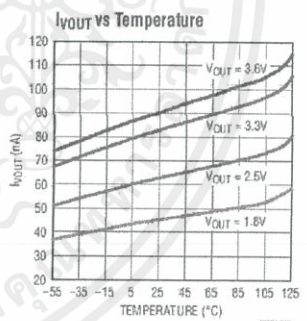
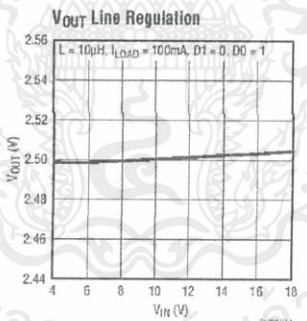
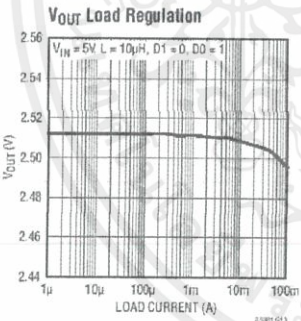
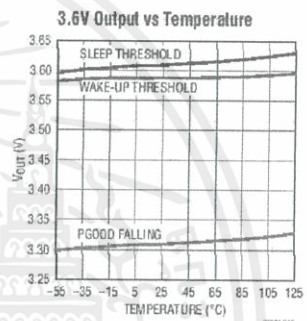
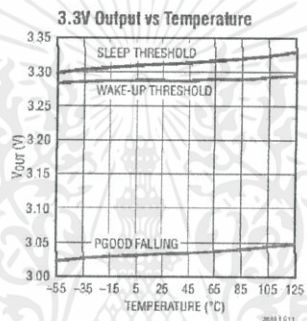
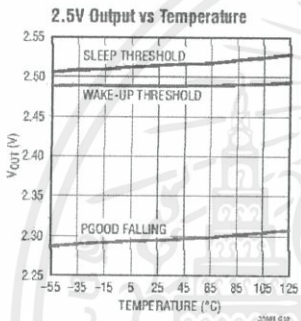
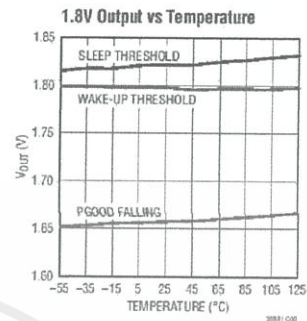
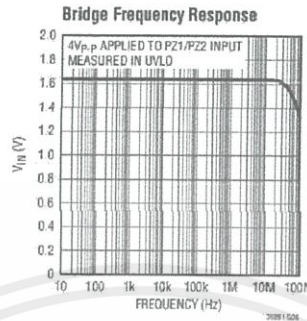
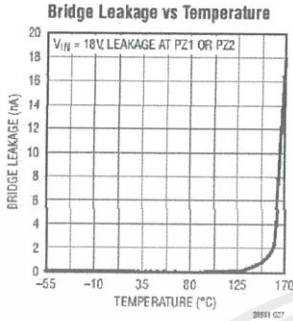
**TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS**



35881fa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

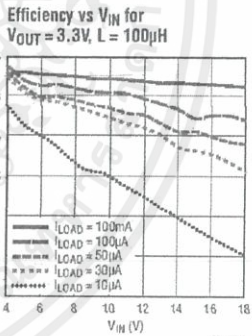
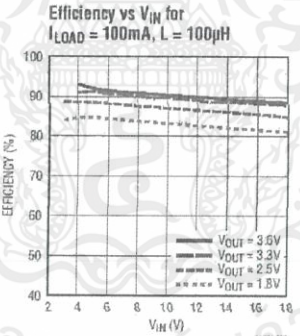
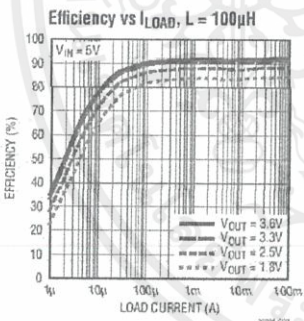
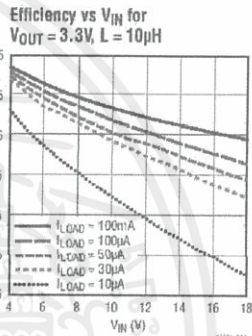
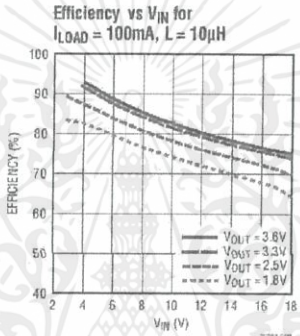
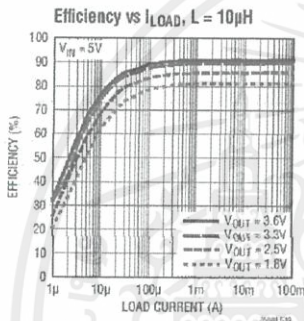
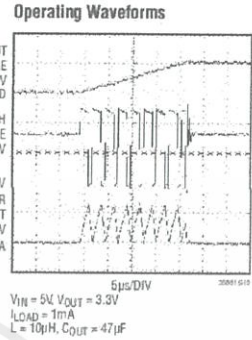
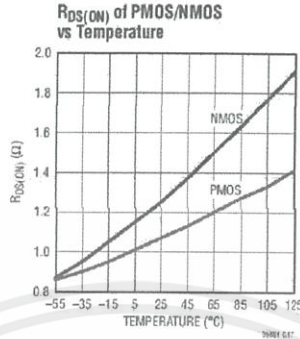
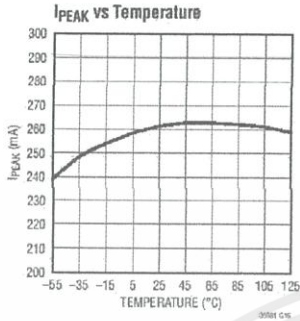


35891fa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LTC3588-1

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 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.

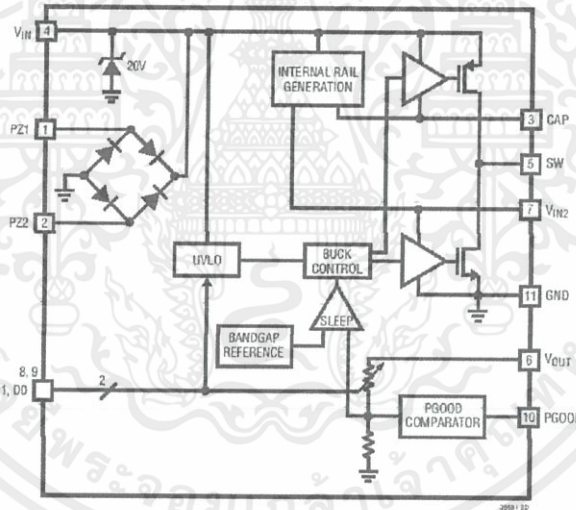
**D1 (Pin 8):** Output Voltage Select Bit. D1 should be tied high to  $V_{IN2}$  or low to GND to select desired  $V_{OUT}$  (see Table 1).

**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



## 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 $\mu$ 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.

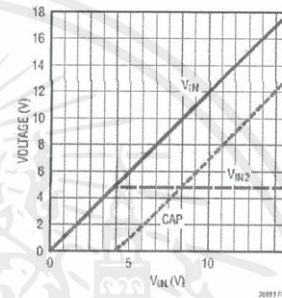


Figure 1. Ideal  $V_{IN}$ ,  $V_{IN2}$  and CAP Relationship

#### 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  $V_{IN2}$ . 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 ( $I_{VOUT}$ )
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  $t = 75s$   $V_{IN}$  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.

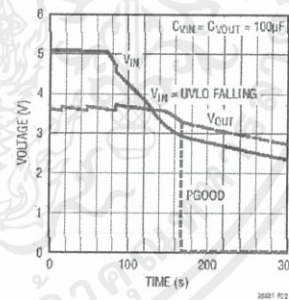


Figure 2. PGOOD Operation During Transition to UVLO

35881fa

## 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.

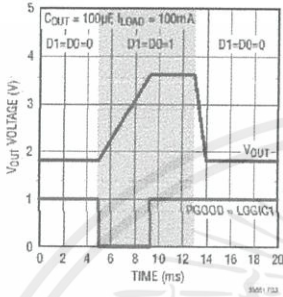


Figure 3. PGOOD Operation During D0/D1 Transition

## 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**

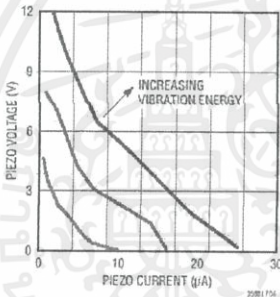
The LTC3588-1 harvests ambient vibrational energy through a piezoelectric element in its primary application. Common piezoelectric elements are PZT (lead zirconate titanate) ceramics, PVDF (polyvinylidene fluoride) polymers, or other composites. Ceramic piezoelectric elements exhibit a piezoelectric 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.

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	<a href="http://www.advancedcerametrics.com">www.advancedcerametrics.com</a>
Piezo Systems	<a href="http://www.piezo.com">www.piezo.com</a>
Measurement Specialties	<a href="http://www.meas-spec.com">www.meas-spec.com</a>
PI (Physik Instrumente)	<a href="http://www.pi-usa.us">www.pi-usa.us</a>
MIDE Technology Corporation	<a href="http://www.mide.com">www.mide.com</a>
Morgan Technical Ceramics	<a href="http://www.morganelectroceramics.com">www.morganelectroceramics.com</a>

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.



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

## LTC3588-1

## APPLICATIONS INFORMATION

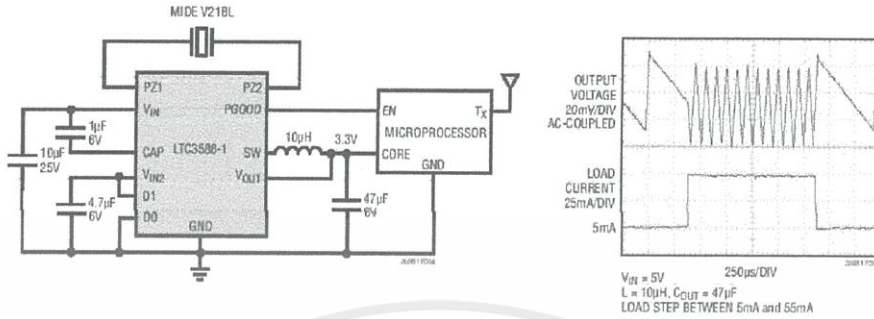


Figure 5. 3.3V Piezoelectric Energy Harvester Powering a Microprocessor with a Wireless Transmitter and 50mA Load Step Response

### 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:

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

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

The above equation can be used to size the input capacitor to meet the power requirements of the output for the desired duration. Here  $\eta$  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 100 $\mu$ F or larger, but as the output capacitor decreases towards 10 $\mu$ F delays in the internal sleep comparator along with the load current may result in the  $V_{OUT}$  voltage slewing past the  $\pm 12$ mV thresholds. This will lengthen the sleep time and increase  $V_{OUT}$  ripple. A capacitor less than 10 $\mu$ F 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  $V_{OUT}$ :

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

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 10 $\mu$ H to 22 $\mu$ H, although inductor values outside this range may yield benefits in some applications. For typical applications, a value of 10 $\mu$ H 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 ( $\mu$ H)	MAX $I_{DC}$ (mA)	MAX DCR ( $\Omega$ )	SIZE in mm (L x W x H)	MANUFACTURER
CDRH2D18/LDNP	10	430	0.180	3 x 3 x 2	Sumida
107AS-100M	10	650	0.145	2.8 x 3 x 1.8	Toko
EPL3015-103ML	10	350	0.301	2.8 x 3 x 1.5	Coilcraft
MLP3225s100L	10	1000	0.130	3.2 x 2.5 x 1.0	TDK
XLP2010-163ML	10	490	0.611	2.0 x 1.9 x 1.0	Coilcraft
SLF7045T	100	500	0.250	7.0 x 7.0 x 4.5	TDK

### $V_{IN2}$ and CAP Capacitors

A 1 $\mu$ F capacitor should be connected between  $V_{IN}$  and CAP and a 4.7 $\mu$ F 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.

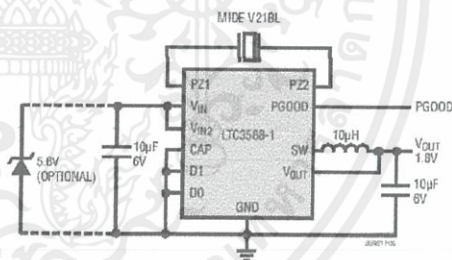


Figure 6. Smallest Solution Size 1.8V Low Voltage Input Piezoelectric Power Supply

35881fa

## 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 nanowatt buck converter. In this case the bridge is unused and the blocking diode is unnecessary.

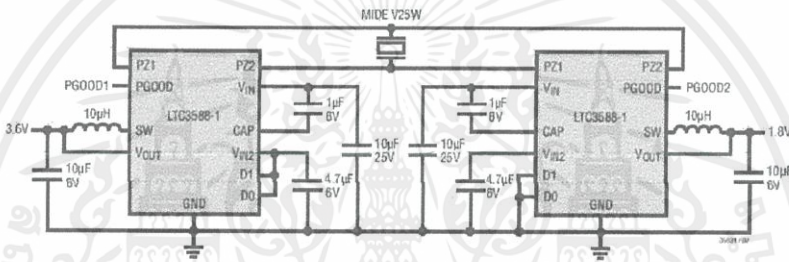


Figure 7. Dual Rail Power Supply with Single Piezo and Automatic Supply Sequencing

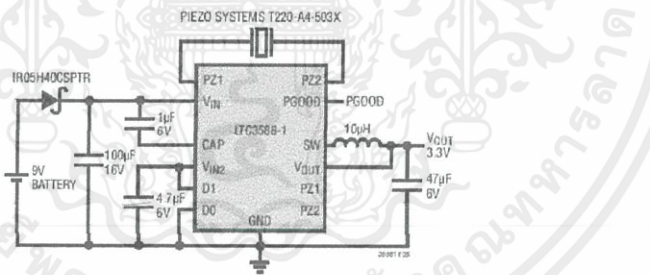
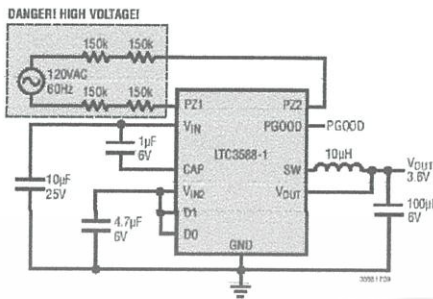


Figure 8. Piezo Energy Harvester with Battery Backup

35881fa

## 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

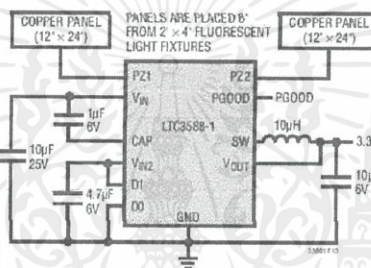


Figure 10. Electric Field Energy Harvester

### 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

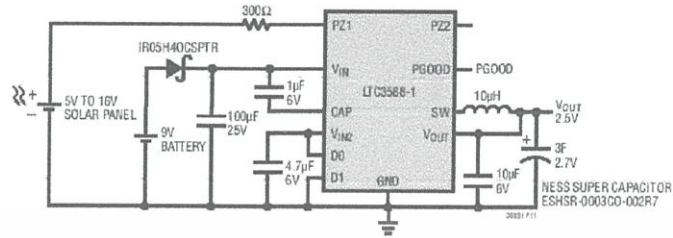


Figure 11. 5V to 16V Solar-Powered 2.5V Supply with Supercapacitor for Increased Output Energy Storage and Battery Backup

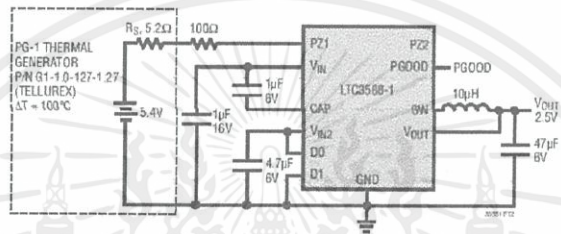


Figure 12. Thermoelectric Energy Harvester

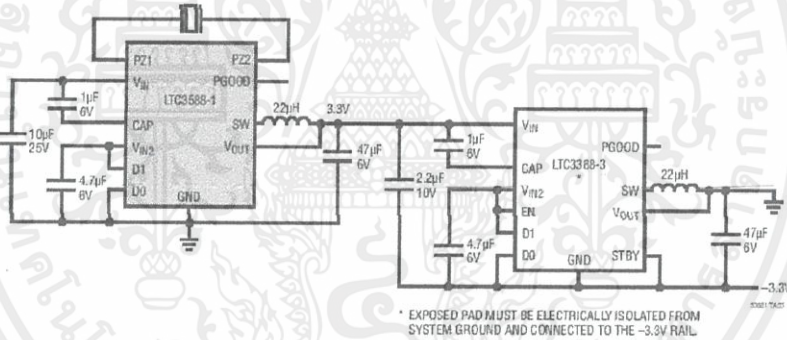
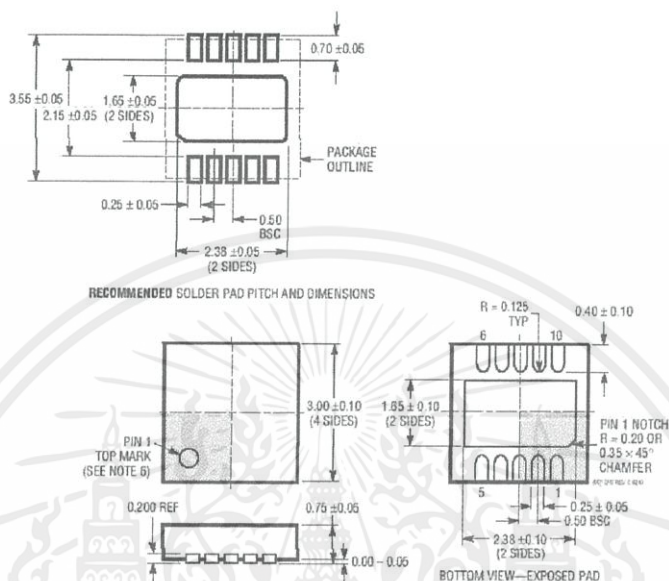


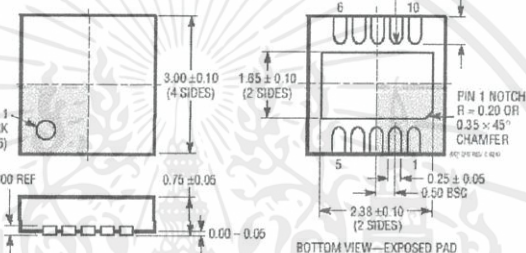
Figure 13. Piezoelectric Energy Harvester with  $\pm 3.3V$  Outputs

## PACKAGE DESCRIPTION

DD Package  
10-Lead Plastic DFN (3mm x 3mm)  
(Reference LTC DWG # 05-08-1699 Rev C)



### RECOMMENDED SOLDER PAD PITCH AND DIMENSIONS



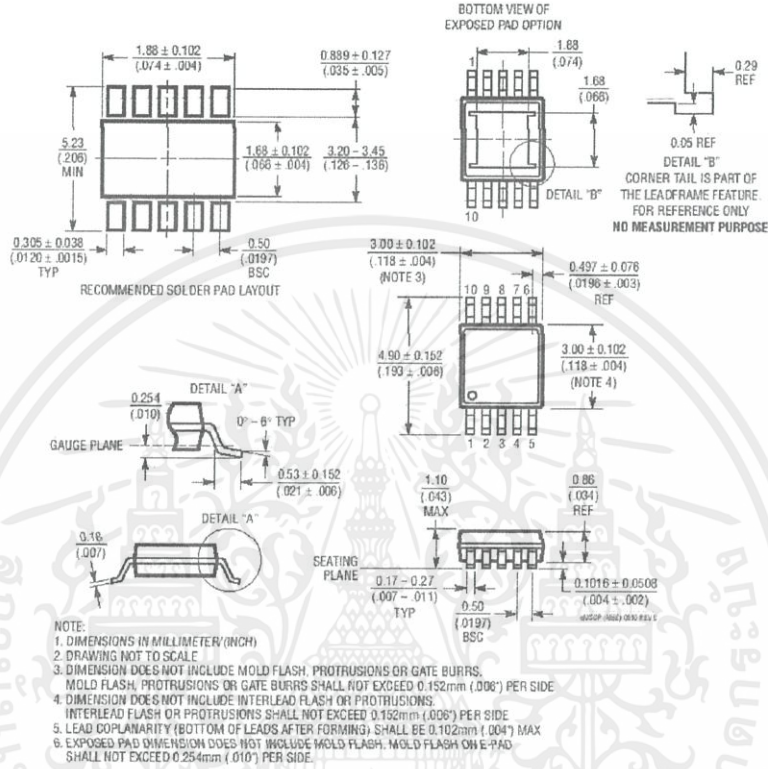
### NOTE:

1. DRAWING TO BE MADE A JEDEC PACKAGE OUTLINE MO-229 VARIATION OF (WEED-2). 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 0.15mm ON ANY SIDE
5. EXPOSED PAD SHALL BE SOLDER PLATED
6. SHADED AREA IS ONLY A REFERENCE FOR PIN 1 LOCATION ON THE TOP AND BOTTOM OF PACKAGE

LTC3588-1

PACKAGE DESCRIPTION

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## LTC3588-1

**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



Information furnished by Linear Technology Corporation is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed for its use. Linear Technology Corporation makes no representation that the interconnection of its circuits as described herein will not infringe on existing patent rights.

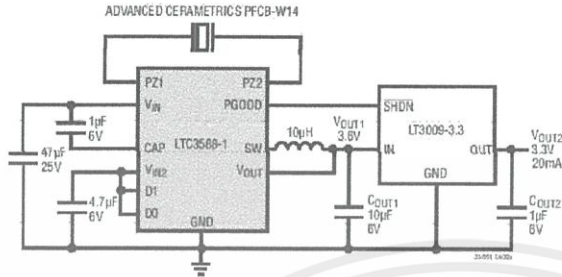
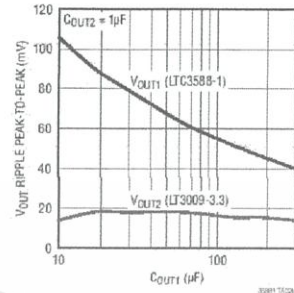
35881ta

19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## LTC3588-1

## TYPICAL APPLICATION

Piezoelectric 3.3V Power Supply with LDO  
Post Regulator for Reduced Output RipplePeak-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/4.095V
LTC1540	Nanopower Comparator with Reference	0.3 $\mu\text{A}$ $I_Q$ , Drives 0.01 $\mu\text{F}$ , Adjustable Hysteresis, 2V to 11V Input Range
LT3009	3 $\mu\text{A}$ $I_Q$ , 20mA Low Dropout Linear Regulator	Low 3 $\mu\text{A}$ $I_Q$ , 1.6V to 20V Range, 20mA Output Current
LTC3388-1/ LTC3388-3	20V High Efficiency Nanopower Step-Down Regulator	860nA $I_Q$ 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	<1 $\mu\text{A}$ $I_Q$ 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, 4.95V to 32V, Up to 2A Charge Current
LT3970	40V, 350mA Step-Down Regulator with 2.5 $\mu\text{A}$ $I_Q$	Integrated Boost and Catch Diodes, 4.2V to 40V Operating Range
LT3971	38V, 1.2A, 2MHz Step-Down Regulator with 2.8 $\mu\text{A}$ $I_Q$	4.3V to 38V Operating Range, Low Ripple Burst Mode <sup>®</sup> Operation
LT3991	55V, 1.2A 2MHz Step-Down Regulator with 2.8 $\mu\text{A}$ $I_Q$	4.3V to 55V Operating Range, Low Ripple Burst Mode Operation
LTC3631	45V, 100mA, Synchronous Step-Down Regulator with 12 $\mu\text{A}$ $I_Q$	4.5V to 45V Operating Range, Overvoltage Lockout Up to 60V
LTC3642	45V, 50mA, Synchronous Step-Down Regulator with 12 $\mu\text{A}$ $I_Q$	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

358817a  
LT 0910 REV/A - PRINTED IN USA  
**LINEAR**  
TECHNOLOGY  
© LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

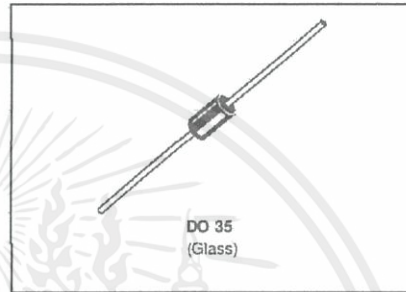
## ข.2 เอกสารคู่มือการใช้งานไดโอด BAT46


**BAT46**

### SMALL SIGNAL SCHOTTKY DIODE

**DESCRIPTION**

General purpose, metalto silicon diode featuring high breakdown voltage low turn-on voltage.


**ABSOLUTE RATINGS** (limiting values)

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_{RRM}$	Repetitive Peak Reverse Voltage	100	V
$I_F$	Forward Continuous Current*	$T_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$ 150	mA
$I_{FRM}$	Repetitive Peak Forward Current*	$t_p \leq 1\text{ s}$ $\delta \leq 0.5$ 350	mA
$I_{FSM}$	Surge non Repetitive Forward Current*	$t_p = 10\text{ ms}$ 750	mA
$P_{tot}$	Power Dissipation*	$T_I = 80\text{ }^\circ\text{C}$ 150	mW
$T_{stg}$ $T_J$	Storage and Junction Temperature Range	- 65 to + 150 - 65 to + 125	$^\circ\text{C}$
$T_L$	Maximum Temperature for Soldering during 10s at 4mm from Case	230	$^\circ\text{C}$

**THERMAL RESISTANCE**

Symbol	Test Conditions	Value	Unit
$R_{th(j-a)}$	Junction-ambient*	300	$^\circ\text{C/W}$

\* On infinite heatsink with 4mm lead length.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**BAT46****ELECTRICAL CHARACTERISTICS****STATIC CHARACTERISTICS**

Symbol	Test Conditions		Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{BR}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	$I_F = 10\mu\text{A}$	100			V
$V_F^*$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	$I_F = 0.1\text{mA}$			0.25	V
	$T_j = 25^\circ\text{C}$	$I_F = 10\text{mA}$			0.45	
	$T_j = 25^\circ\text{C}$	$I_F = 250\text{mA}$			1	
$I_R^*$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	$V_R = 1.5\text{V}$			0.5	$\mu\text{A}$
	$T_j = 60^\circ\text{C}$				5	
	$T_j = 25^\circ\text{C}$	$V_R = 10\text{V}$			0.8	
	$T_j = 60^\circ\text{C}$				7.5	
	$T_j = 25^\circ\text{C}$	$V_R = 50\text{V}$			2	
	$T_j = 60^\circ\text{C}$				15	
	$T_j = 25^\circ\text{C}$	$V_R = 75\text{V}$			5	
	$T_j = 60^\circ\text{C}$				20	

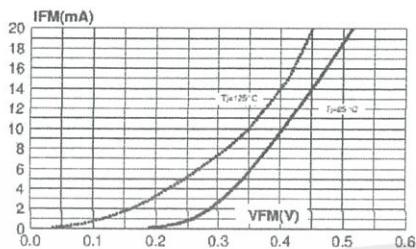
**DYNAMIC CHARACTERISTICS**

Symbol	Test Conditions		Min.	Typ.	Max.	Unit
C	$T_j = 25^\circ\text{C}$	$V_R = 0\text{V}$	f = 1Mhz	10		pF
	$T_j = 25^\circ\text{C}$	$V_R = 1\text{V}$				

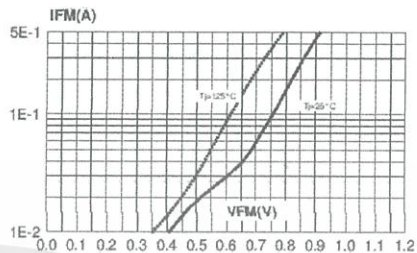
\* Pulse test:  $t_p \leq 300\mu\text{s}$   $\delta < 2\%$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

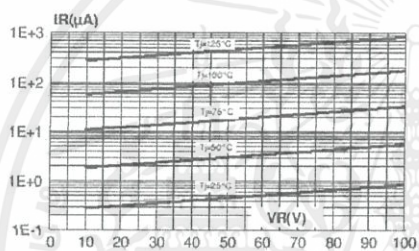
**Fig. 1-1:** Forward voltage drop versus forward current (low level, typical values)



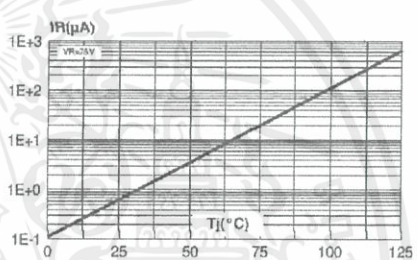
**Fig. 1-2:** Forward voltage drop versus forward current (high level, typical values)



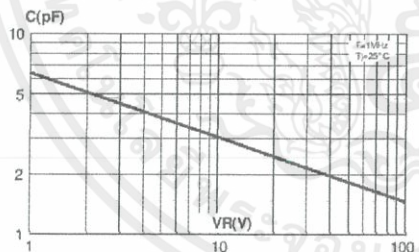
**Fig. 2:** Leakage current versus reverse voltage applied (typical values)



**Fig. 3:** Leakage current versus junction temperature (typical values)



**Fig. 4:** Junction capacitance versus reverse voltage applied (typical values)

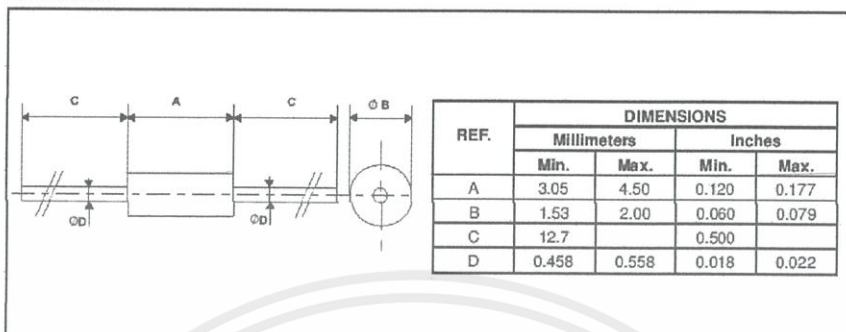


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## BAT46

## PACKAGE MECHANICAL DATA

DO 35 Glass



Cooling method : by convection and conduction  
 Marking: clear, ring at cathode end.  
 Weight: 0.15g

Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specifications mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics  
 © 1999 STMicroelectronics - Printed in Italy - All rights reserved.

STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES  
 Australia - Brazil - China - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Italy - Japan - Malaysia  
 Malta - Morocco - Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom - U.S.A.

<http://www.st.com>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.3 เอกสารคู่มือการใช้งานเปียโซ

**PIEZOCERAMIC APPLICATION DATA**

**PIEZO SYSTEMS, INC.**

65 Tower Office Park Woburn, MA 01801 • Tel: (781) 933-4850 • Fax: (781) 933-4743 • Web: www.piezo.com • E-mail: sales@piezo.com

## INTRODUCTION TO PIEZOELECTRICITY

When a piezoceramic element is stressed electrically by a voltage, its dimensions change. When it is stressed mechanically by a force, it generates an electric charge. If the electrodes are not short-circuited, a voltage associated with the charge appears.

A piezoceramic is therefore capable of acting as either a sensing or transmitting element, or both. Since piezoceramic elements are capable of generating very high voltages, they are compatible with today's generation of solid-state devices — rugged, compact, reliable, and efficient.

The following text describes the terminology of piezoceramics and the relationship among variables for functional applications.

### RELATIONSHIPS

Relationships between applied forces and the resultant responses depend upon: the piezoelectric properties of the ceramic; the size and shape of the piece; and the direction of the electrical and mechanical excitation.

To identify directions in a piezoceramic element, three axes are used. These axes, termed 1, 2 and 3, are analogous to X, Y and Z of the classical three dimensional orthogonal set of axes (Figure 1a)

The polar or 3 axis is taken parallel to the direction of polarization within the ceramic. This direction is established during manufacturing by a high DC voltage that is applied between a pair of electroded faces to activate the material. The polarization vector "P" is represented by an arrow pointing from the positive to the negative poling electrode. In shear operations, these poling electrodes are later removed and replaced by electrodes deposited on a second pair of faces. In this event, the 3 axis is not altered, but is then parallel to the electroded

faces found on the finished element (Figure 1b). When the mechanical stress or strain is shear, the subscript 5 is used in the second place.

Piezoelectric coefficients with double subscripts link electrical and mechanical quantities. The first subscript gives the direction of the electrical field associated with the voltage applied, or the charge produced. The second subscript gives the direction of the mechanical stress or strain.

Several piezoceramic material constants may be written with a "superscript" which specifies either a mechanical or electrical boundary condition. The superscripts are T, E, D and S, signifying:

- T = constant stress  
= mechanically free
- E = constant field = short circuit
- D = constant electrical displacement  
= open circuit
- S = constant strain  
= mechanically clamped

As an example,  $K^T_{33}$  expresses the relative dielectric constant (K), measured in the polar direction (3) with no mechanical clamping applied.

### "D" CONSTANT

The piezoelectric constants relating the mechanical strain produced by an applied electric field are termed the strain constants, or the "d" coefficients. The units may then be expressed as meters per meter, per volts per meter (meters per volt).

$$d = \frac{\text{strain developed}}{\text{applied electric field}}$$

It is useful to remember that large  $d_{ij}$  constants relate to large mechanical displacements which are usually sought in motional transducer devices. Conversely, the coefficient may be viewed as relating the charge collected on the electrodes, to the applied mechanical stress.  $d_{33}$  applies

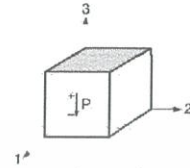


Figure - 1a

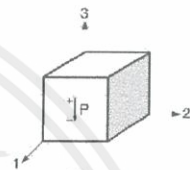


Figure - 1b

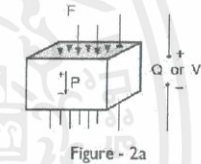


Figure - 2a

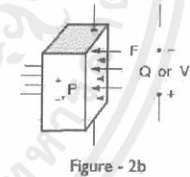


Figure - 2b

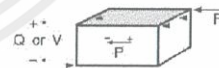


Figure - 2c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## PIEZOCERAMIC APPLICATION DATA

PIEZO SYSTEMS, INC.

65 Tower Office Park Woburn, MA 01801 • Tel: (781) 933-4850 • Fax: (781) 933-4743 • Web: www.piezo.com • E-mail: sales@piezo.com

when the force is in the 3 direction (along the polarization axis) and is impressed on the same surface on which the charge is collected (Figure 2a).  $d_{31}$  applies when the charge is collected on the same surface as before, but the force is applied at right angles to the polarization axis (Figure 2b).

The subscripts in  $d_{15}$  indicate that the charge is collected on electrodes which are at right angles to the original poling electrodes and that the applied mechanical stress is shear (Figure 2c).

The units for the  $d_{ij}$  coefficients are commonly expressed as coulombs/square meter per newton/square meter.

$$d = \frac{\text{short circuit charge density}}{\text{applied mechanical stress}}$$

When the force that is applied is distributed over an area which is fully covered by electrodes (even if that is only a portion of the total electrode) the units of area cancel from the equation and the coefficient may be expressed in terms of change per unit force, coulombs per newton. To view the  $d_{ij}$  coefficients in this manner is useful when charge generators are contemplated, e.g., accelerometers.

### "G" CONSTANT

The piezoelectric constants relating the electric field produced by a mechanical stress are termed the voltage constants, or the "g" coefficients. The units may then be expressed as volts/meter per newton/square meter.

$$g = \frac{\text{open circuit electric field}}{\text{applied mechanical stress}}$$

Output voltage is obtained by multiplying the calculated electric field by

the thickness of ceramic between electrodes. A "33" subscript indicates that the electric field and the mechanical stress are both along the polarization axis. (Figure 2a.) A "31" subscript signifies that the pressure is applied at right angles to the polarization axis, but the voltage appears on the same electrodes as in the "33" case. (Figure 2b.)

A "15" subscript implies that the applied stress is shear and that the resulting electric field is perpendicular to the polarization axis. (Figure 2c.)

High  $g_{ij}$  constants favor large voltage output, and are sought after for sensors.

Although the g coefficient are called voltage coefficients, it is also correct to say the  $g_{ij}$  is the ratio of strain developed over the applied charge density with units of meters per meter over coulombs per square meter.

$$g = \frac{\text{strain developed}}{\text{applied charge density}}$$

### DIELECTRIC CONSTANTS

The relative dielectric constant is the ratio of the permittivity of the material,  $\epsilon$ , to the permittivity of free space,  $\epsilon_0$ , in the unconstrained condition, i.e., well below the mechanical resonance of the part.

$$K = \frac{\text{permittivity of material}}{\text{permittivity of free space}} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

### CAPACITANCE

Whereas the relative dielectric constant is strictly a material property, the capacitance is a quantity dependent on the type of material and its dimensions. Capacitance is calculated by multiplying the relative dielectric constant by the permittivity of free space

( $\epsilon_0 = 8.9 \times 10^{-12}$  farads/meter) and electrode surface area, and then dividing by the thickness separating the electrodes. Units are expressed in farads.

$$C = \frac{K \epsilon_0 A}{t}$$

$K_3$  is related to the capacitance between the original poling electrodes.  $K_1$  is related to the capacitance between the second pair of electrodes applied after removal of the poling electrodes for the purposes of shear excitation.

At frequencies far below resonance, piezoelectric ceramic transducers are fundamentally capacitors. Consequently, the voltage coefficients  $g_{ij}$  are related to the charge coefficients  $d_{ij}$  by the dielectric constant  $K_i$  as, in a capacitor, the voltage  $V$  is related to the charge  $Q$  by the capacitance  $C$ . The equations are:

$$\begin{aligned} Q &= CV \\ d_{33} &= K_3^T \epsilon_0 g_{33} \\ d_{31} &= K_3^T \epsilon_0 g_{31} \\ d_{15} &= K_1^T \epsilon_0 g_{15} \end{aligned}$$

### COUPLING COEFFICIENTS

Electromechanical coupling  $k_{33}$ ,  $k_{31}$ ,  $k_p$ , and  $k_{15}$  describe the conversion of energy by the ceramic element from electrical to mechanical form or vice versa. The ratio of the stored converted energy of one kind (mechanical or electrical) to the input energy of the second kind (electrical or mechanical) is defined as the square of the coupling coefficient.

$$k = \sqrt{\frac{\text{mechanical energy stored}}{\text{electrical energy applied}}}$$

or

$$k = \sqrt{\frac{\text{electrical energy stored}}{\text{mechanical energy applied}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PIEZO SYSTEMS, INC.**

65 Tower Office Park Woburn, MA 01801 • Tel: (781) 933-4850 • Fax: (781) 933-4743 • Web: www.piezo.com • E-mail: sales@piezo.com

Subscripts denote the relative directions of electrical and mechanical quantities and the kind of motion involved. They can be associated with vibratory modes of certain simple transducer shapes;  $k_{33}$  is appropriate for a long thin bar, electroded on the ends, and polarized along the length, and vibrating in a simple length expansion and contraction.  $k_{31}$  relates to a long thin bar, electroded on a pair of long faces, polarized in thickness, and vibrating in simple length expansion and contraction.  $k_p$  signifies the coupling of electrical and mechanical energy in a thin round disc, polarized in thickness and vibrating in radial expansion and contraction.  $k_{15}$  describes the energy conversion in a thickness shear vibration. Since these coefficients are energy ratios, they are dimensionless.

**YOUNG'S MODULUS**

As with all solids, piezoelectric ceramics have mechanical stiffness properties described as Young's Modulus. Young's Modulus is the ratio of stress (force per unit area) to strain (change in length per unit length).

$$Y = \frac{\text{stress}}{\text{strain}}$$

Because mechanical stressing of the ceramic produces an electrical response which opposes the resultant strain, the effective Young's Modulus with electrodes short circuited is lower than with the electrodes open circuited. In addition, the stiffness is different in the 3 direction from that in the 1 or 2 direction. Therefore, in expressing such quantities both direction and electrical conditions must be specified.  $Y_{33}^E$  is the ratio of stress to strain in the 3 direction at constant field E (electrodes shorted).  $Y_{33}^D$  is the equivalent with the electrodes open circuited.  $Y_{11}^E$  and  $Y_{11}^D$  are the moduli in the 1 or 2 direction.  $Y_{55}^E$  and  $Y_{55}^D$  are the ratios of shear stress

to shear strain. Units are usually newtons/square meter.

It should be clearly understood that the piezoceramic properties described above are defined for ideal shapes measured under ideal mechanical and electrical boundary conditions. When put to use under practical device operating conditions, the predicted performance is approached but seldom realized. Non-ideal shapes and non-ideal boundary conditions contribute to transduction losses due to such things as standing waves, interfering vibrational modes, pseudo-clamping, stray electric and dielectric resistances. Since the possibilities are infinite, the designer must evaluate each component under the use conditions for which it is intended.

**DENSITY**

The ratio of the mass to volume in the material, expressed in kg/m<sup>3</sup>

$$\rho = \frac{\text{mass}}{\text{volume}}$$

**DISSIPATION FACTOR**

A measure of the dielectric losses in the material—defined as the tangent of the loss angle or the ratio of parallel resistance to the parallel reactance, expressed in percent.

**MECHANICAL (QM)**

The ratio of reactance to resistance in the equivalent series circuit representing the mechanical vibrating resonant system. The shape of the part affects the value.

**CURIE TEMPERATURE**

The temperature at which the crystal structure changes from a non-symmetrical (piezoelectric) to a symmetrical (non-piezoelectric) form, expressed in degrees Celsius.

**AGING RATE**

Aging is the attempt of the ceramic to change back to its original state prior to polarization. Aging of piezoelectric ceramics is a logarithmic function with time. The aging rate defines change in the material parameters per decade of time, i.e., 1-10 days, 5-50 days, etc.

**PYROELECTRICITY**

Piezoelectric materials are also pyroelectric. They produce electric charge as they undergo a temperature change. When their temperature is increased, a voltage develops having the same orientation as the polarization voltage. When their temperature is decreased, a voltage develops having an orientation opposite to the polarization voltage, creating a depolarizing field with the potential to degrade the state of polarization of the part.

The maximum electric field which arises due to a temperature shift is:

$$E(\text{pyro}) = \frac{\alpha (\Delta T)}{K_3 \epsilon_0}$$

where  $E(\text{pyro})$  is the induced electric field in volts/meter;  $\alpha$  is the pyroelectric coefficient in Coulomb/°C meter<sup>2</sup>,  $\Delta T$  is the temperature difference in °C,  $K_3$  is the dielectric constant, and  $\epsilon_0$  is the dielectric permittivity of free space. For PZT piezoceramic,  $\alpha$  is typically  $\sim 400 \times 10^{-6}$  coulomb/°C meter<sup>2</sup>.

**CRYOGENIC**

The piezoelectric strain coefficient decreases significantly at cryogenic temperatures, but does not vanish. At 77°K and 4.2°K the strain coefficient decreases to about 33% and 14% respectively, of its room temperature value. However, the coercive field increases, allowing the piezo to be driven harder.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2-PIEZO LAYER BENDING MOTORS  
STANDARD - BRASS REINFORCED

PART NUMBERS (BRASS REINFORCED BENDER)		WEIGHT (Grams)	STIFFNESS (N/m)	CAPACITANCE (nF) (Series Operation)	CAPACITANCE (nF) (Parallel Operation)	RATED VOLTAGE (Vp) (Series Operation)	RATED VOLTAGE (Vp) (Parallel Operation)	RESONANT FREQUENCY (Hz)	FREE DEFLECTION (µm)	BLOCKED FORCE (N)
X-poled for series bending operation (2 wire).	Y-poled for parallel bending operation (3 wire).									
<b>.015" (.38mm) THICK</b>										
T215-A4-103X	T215-A4-103Y	.30	1.3x10 <sup>2</sup>	5	20	± 120	± 60	270	± 300	± .04
T215-A4-203X	T215-A4-203Y	.60	2.7x10 <sup>2</sup>	10	40	± 120	± 60	270	± 300	± .08
T215-A4-303X	T215-A4-303Y	1.2	5.3x10 <sup>2</sup>	20	80	± 120	± 60	270	± 300	± .16
T215-A4-503X	T215-A4-503Y	6.0	1.6x10 <sup>3</sup>	100	400	± 120	± 60	67	± 1200	± .20
T215-H4-103X	T215-H4-103Y	.30	1.3x10 <sup>2</sup>	8	32	± 80	± 40	270	± 300	± .04
T215-H4-203X	T215-H4-203Y	.60	2.7x10 <sup>2</sup>	16	64	± 80	± 40	270	± 300	± .08
T215-H4-303X	T215-H4-303Y	1.2	5.3x10 <sup>2</sup>	32	128	± 80	± 40	270	± 300	± .16
T215-H4-503X	T215-H4-503Y	6.0	1.6x10 <sup>3</sup>	160	640	± 80	± 40	67	± 1200	± .20
<b>.020" (.51mm) THICK</b>										
T220-A4-103X	T220-A4-103Y	.40	2.8x10 <sup>2</sup>	3.5	14	± 180	± 90	350	± 250	± .07
T220-A4-203X	T220-A4-203Y	.80	5.6x10 <sup>2</sup>	7	29	± 180	± 90	350	± 250	± .14
T220-A4-303X	T220-A4-303Y	1.6	1.1x10 <sup>3</sup>	15	58	± 180	± 90	350	± 250	± .28
T220-A4-503X	T220-A4-503Y	8.0	3.5x10 <sup>3</sup>	73	292	± 180	± 90	88	± 1000	± .35
T220-H4-103X	T220-H4-103Y	.40	2.8x10 <sup>2</sup>	6	24	± 120	± 60	350	± 250	± .07
T220-H4-203X	T220-H4-203Y	.80	5.6x10 <sup>2</sup>	12	48	± 120	± 60	350	± 250	± .14
T220-H4-303X	T220-H4-303Y	1.6	1.1x10 <sup>3</sup>	24	96	± 120	± 60	350	± 250	± .28
T220-H4-503X	T220-H4-503Y	8.0	3.5x10 <sup>3</sup>	120	480	± 120	± 60	88	± 1000	± .35
<b>.026" (.66mm) THICK</b>										
T226-A4-103X	T226-A4-103Y	.51	0.7x10 <sup>3</sup>	2.5	10	± 250	± 125	440	± 175	± .13
T226-A4-203X	T226-A4-203Y	1.1	1.5x10 <sup>3</sup>	5	20	± 250	± 125	440	± 175	± .25
T226-A4-303X	T226-A4-303Y	2.1	3.0x10 <sup>3</sup>	10	40	± 250	± 125	440	± 175	± .50
T226-A4-503X	T226-A4-503Y	10.3	0.9x10 <sup>3</sup>	50	200	± 250	± 125	110	± 700	± .62
T226-H4-103X	T226-H4-103Y	.51	0.7x10 <sup>3</sup>	4	16	± 165	± 82	440	± 175	± .13
T226-H4-203X	T226-H4-203Y	1.1	1.5x10 <sup>3</sup>	8	32	± 165	± 82	440	± 175	± .25
T226-H4-303X	T226-H4-303Y	2.1	3.0x10 <sup>3</sup>	17	68	± 165	± 82	440	± 175	± .50
T226-H4-503X	T226-H4-503Y	10.3	0.9x10 <sup>3</sup>	85	340	± 165	± 82	110	± 700	± .62

① -103, -203, and -303 performance is based on a 1.0" bending length. -503 performance based on 2.0" bending length. Suitable for cryogenic use. ROHS: Compliant. Piezo exempt. PRICES: (See page 35)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### ข้อมูลผลการทดลอง

#### ค.1 ผลจากการจำลองโดยใช้โปรแกรม

##### ค.1.1. การจำลองเปลี่ยนแปลงความกว้างของใบพัด

ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงความกว้างของใบพัดจะได้ผลดังตารางที่ ค.1  
**ตารางที่ ค.1** ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงความกว้างของใบพัด

Width(cm.)	Deep(cm.)	Torque(N.m)			Thiness(cm.)	Hight(cm.)	Velocity(m/s)
		Min	Max	Avg			
6.95	4	0.00095	0.00101	0.00098	0.1	25	3
7.72	4	0.00274	0.00322	0.00291	0.1	25	3
8.12	4	0.00342	0.00387	0.0036	0.1	25	3
8.63	4	0.00371	0.00418	0.00393	0.1	25	3
9	4	0.00368	0.00414	0.00391	0.1	25	3
9.48	4	0.00358	0.00413	0.00379	0.1	25	3
9.69	4	0.00348	0.00411	0.00378	0.1	25	3
9.8	4	0.00347	0.00416	0.00378	0.1	25	3
9.9	4	0.00342	0.00414	0.00374	0.1	25	3
10.34	4	0.00324	0.00394	0.00359	0.1	25	3

##### ค.1.2. การจำลองเปลี่ยนแปลงความลึกของใบพัด

ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงความลึกของใบพัดจะได้ผลดังตารางที่ ค.2  
**ตารางที่ ค.2** ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงความลึกของใบพัด

Width(cm.)	Deep(cm.)	Torque(N.m)			Thiness(cm.)	Hight(cm.)	Velocity(m/s)
		Min	Max	Avg			
8.63	2	0.00182	0.00269	0.00212	0.1	25	3
8.63	4	0.00371	0.00419	0.00393	0.1	25	3
8.63	4.1875	0.00338	0.00388	0.00363	0.1	25	3
8.63	4.375	0.00355	0.00402	0.00377	0.1	25	3
8.63	4.75	0.003	0.00347	0.00322	0.1	25	3
8.63	5.5	0.0027	0.00297	0.00284	0.1	25	3
8.63	7	0.00053	0.00088	0.00073	0.1	25	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ค.1.3. การจำลองเปลี่ยนแปลงความสูงของใบพัด

ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงความสูงของใบพัดจะได้ผลดังตารางที่ ค.3

ตารางที่ ค.3 ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงความสูงของใบพัด

Width(cm.)	Deep(cm.)	Torque(N.m)	Thinness(cm.)	Hight(cm.)	Velocity(m/s)
9.69	4.1875	0.00053	0.1	5	3
9.69	4.1875	0.00184	0.1	15	3
9.69	4.1875	0.00294	0.1	20	3
9.69	4.1875	0.00388	0.1	25	3
9.69	4.1875	0.00527	0.1	37.5	3
9.69	4.1875	0.00727	0.1	50	3

### ค.1.4. การจำลองเปลี่ยนแปลงจำนวนของใบพัด

ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงจำนวนของใบพัดจะได้ผลดังตารางที่ ค.4

ตารางที่ ค.4 ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงจำนวนของใบพัด

จำนวนใบ/แรงบิดที่ห้องศก	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
2	0.00471	0.00376	0.00306	0.00225	0.00111	0.00234	0.00158	0.00069	0.00143	0.00517
3	0.00618	0.0062	0.00531	0.00419	0.00446	0.0046	0.00723	0.00692	0.00367	0.00481
จำนวนใบ/แรงบิดที่ห้องศก	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
2	0.00829	0.00941	0.0103	0.00834	0.00675	0.00504	0.00435	0.00454	0.00468	
3	0.00593	0.00622	0.00596	0.00559	0.00487	0.00394	0.0047	0.00511	0.00705	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค.2 ผลจากการทดลองโดยใช้อุโมงค์ลม

### ค.2.1. การทดลองหาค่าความเร็วลมต่ำสุดที่ใบพัดตัวที่หนึ่งทำงาน

ผลการทดลองหาค่าความเร็วลมต่ำสุดที่ใบพัดตัวที่หนึ่งทำงาน โดยการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างแม่เหล็กจะได้ผลดังตารางที่ ค.5

ตารางที่ ค.5 ผลการทดลองหาค่าความเร็วลมต่ำสุดที่ใบพัดตัวที่หนึ่งทำงาน

Gap	Cut In Speed			SD	Error
	min	max	mid		
10	4.6	5.1	4.85	0.065192	0.063887
	4.7	4.9	4.8		
	4.6	5.2	4.9		
	4.8	5.1	4.95		
	4.6	5.3	4.95		
	4.6	5.1	4.85		
	4.7	5.2	4.95		
	4.6	5.2	4.9		
	4.7	5.1	4.9		
AVG.	4.7	4.9	4.8		
12	3.9	4.2	4.05	0.075829	0.074311
	3.9	4.5	4.2		
	3.8	4.3	4.05		
	4	4.4	4.2		
	3.8	4.4	4.1		
	3.8	4.4	4.1		
	3.9	4.2	4.05		
	3.8	4	3.9		
	3.9	4.2	4.15		
AVG.	3.9	4.4	4.12		
14	3.4	3.7	3.55	0.067082	0.065739
	3.3	3.6	3.45		
	3.3	3.5	3.4		
	3.4	3.7	3.55		
	3.3	3.6	3.45		
	3.3	3.6	3.45		
	3.4	3.6	3.5		
	3.3	3.7	3.5		
	3.3	3.5	3.4		
AVG.	3.4	3.6	3.5		
16	2.8	3	2.9	0.044721	0.043826
	2.7	3.3	3		
	2.6	3.2	2.9		
	2.8	3.1	2.95		
	2.7	3.1	2.9		
	2.7	3	2.85		
	2.8	3.1	2.95		
	2.6	3.1	2.85		
	2.8	3.2	3		
AVG.	2.7	3.1	2.9		
18	2.4	2.8	2.6	0.065192	0.063887
	2.3	2.6	2.45		
	2.4	2.6	2.5		
	2.4	2.7	2.55		
	2.5	2.7	2.6		
	2.4	2.7	2.55		
	2.5	2.6	2.55		
	2.4	2.7	2.55		
	2.4	2.8	2.6		
AVG.	2.5	2.8	2.65		
20	2.1	2.5	2.3	0.057009	0.055868
	2	2.5	2.25		
	2.2	2.5	2.35		
	2.1	2.3	2.2		
	2.2	2.4	2.3		
	2.1	2.3	2.2		
	2	2.5	2.25		
	2.2	2.4	2.3		
	2.2	2.5	2.35		
AVG.	2.1	2.4	2.25		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่อนุญาตเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2.2. การทดลองหาค่าความเร็วลมต่ำสุดที่ใบพัดตัวที่สองทำงาน  
ผลการทดลองหาค่าความเร็วลมต่ำสุดที่ใบพัดตัวที่สองทำงาน โดยการเปลี่ยนแปลงค่า  
ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กจะได้ผลดังตารางที่ ค.6

ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองหาค่าความเร็วลมต่ำสุดที่ใบพัดตัวที่สองทำงาน

Gap	Cut in Speed			SD	Error
	min	max	mid		
20	1.8	2.6	2.2	0.055025	0.053924
	1.8	2.6	2.2		
	1.7	2.6	2.15		
	1.9	2.5	2.2		
	1.8	2.4	2.1		
	1.9	2.5	2.2		
	1.8	2.4	2.1		
	1.8	2.5	2.15		
	1.7	2.4	2.05		
AVG.			2.2		
18	2.1	2.6	2.35	0.08182	0.080182
	2.3	2.6	2.45		
	1.9	2.6	2.25		
	2.1	2.5	2.3		
	2	2.4	2.2		
	2	2.5	2.25		
	1.9	2.4	2.15		
	2.2	2.4	2.3		
	2.2	2.4	2.3		
AVG.			2.3		
16	2.6	2.9	2.75	0.055025	0.053924
	2.5	3	2.75		
	2.6	3.1	2.85		
	2.6	3	2.8		
	2.6	2.9	2.75		
	2.5	2.9	2.7		
	2.5	3	2.75		
	2.4	2.9	2.65		
	2.5	3	2.75		
AVG.			2.7		
14	3	3.4	3.2	0.053748	0.052672
	3	3.3	3.15		
	2.9	3.2	3.05		
	2.9	3.4	3.15		
	3	3.3	3.15		
	3	3.3	3.15		
	3	3.2	3.1		
	2.9	3.2	3.05		
	3	3.4	3.2		
AVG.			3.1		
12	3.6	4	3.8	0.152843	0.149784
	3.4	4.1	3.75		
	3.2	3.7	3.45		
	3.1	4	3.55		
	3.3	4	3.65		
	3.2	3.5	3.35		
	3.3	3.7	3.5		
	3.4	4	3.7		
	3.4	3.8	3.6		
AVG.			3.6		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่โรงเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหาในข้อนี้หรือข้อมูลใดๆที่ปรากฏในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ค.2.3. การทดลองหาค่าประสิทธิภาพและความเร็วปลายใบพัด

ผลการทดลองหาค่าประสิทธิภาพและความเร็วปลายใบพัด โดยการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างแม่เหล็กจะได้ผลดังตารางที่ ค.7

ตารางที่ ค.7 ผลการทดลองหาค่าประสิทธิภาพและความเร็วปลายใบพัด

Gap	V in(m/s)			V out(m/s)			RPM			W	Tip speed	Cp	SD	Error
	Min	Max	Mid	Min	Max	Mid	Min	Max	Mid					
18	1.7	2.1	1.90	1.3	1.7	1.50	200	246	223.00			0.3371	0.043307	0.04244
	1.6	2.2	1.90	1.3	1.8	1.55	237	264	250.50			0.3037		
	1.6	2.2	1.90	1.4	1.9	1.65	240	281	260.50			0.2297		
	1.7	2.2	1.95	1.5	1.9	1.70	215	279	247.00			0.2246		
	1.7	2.3	2.00	1.4	1.8	1.60	237	266	251.50			0.3240		
	1.7	2.2	1.95	1.4	1.8	1.60	230	263	246.50			0.2974		
	1.6	2.2	1.90	1.5	1.8	1.65	235	272	253.50			0.2297		
	1.7	2.3	2.00	1.4	1.8	1.60	234	263	248.50			0.3240		
	1.7	2.1	1.90	1.3	1.8	1.55	235	279	257.00			0.3037		
	1.7	2.2	1.95	1.4	1.9	1.65	228	273	250.50			0.2622		
Average			1.94			1.61			248.85	26.0595	2	0.9427		0.2854
	2.1	2.6	2.35	1.8	2.3	2.05	283	322	302.50			0.2238	0.063099	0.061836
	2.0	2.7	2.35	1.7	2.4	2.05	274	326	300.00			0.2238		
	2.1	3.0	2.55	1.7	2.3	2.00	277	307	292.00			0.3433		
	2.1	2.6	2.35	1.9	2.1	2.00	269	314	291.50			0.2552		
	2.1	2.5	2.30	1.9	2.4	2.15	265	317	291.00			0.1221		
	2.0	2.6	2.30	1.8	2.3	2.05	274	310	292.00			0.1944		
	2.1	2.6	2.35	1.9	2.3	2.10	265	323	294.00			0.1907		
	2.1	2.7	2.40	1.7	2.2	1.95	270	325	297.50			0.3080		
	2.2	2.5	2.35	1.7	2.4	2.05	275	310	292.50			0.2238		
	2.1	2.8	2.45	1.8	2.3	2.05	265	314	289.50			0.2754		
Average			2.38			2.05			294.25	30.8138	1	0.9082		0.2406
	2.1	2.9	2.50	2.0	2.7	2.35	322	390	356.00			0.1129	0.05277	0.051714
	2.3	3.0	2.65	1.9	2.5	2.20	324	362	343.00			0.2844		
	2.4	3.0	2.70	2.0	2.6	2.30	317	337	327.00			0.2540		
	2.4	2.6	2.50	1.9	2.4	2.15	327	345	336.00			0.2422		
	2.3	2.9	2.60	1.9	2.7	2.30	314	377	345.50			0.2049		
	2.3	2.8	2.55	1.9	2.7	2.30	325	349	337.00			0.1773		
	2.2	2.9	2.55	2.0	2.5	2.25	320	357	338.50			0.2084		
	2.3	2.9	2.60	2.0	2.7	2.35	328	362	345.00			0.1743		
	2.4	2.8	2.60	1.9	2.6	2.25	319	358	338.50			0.2342		
	2.3	2.9	2.60	2.1	2.7	2.40	330	372	351.00			0.1422		
Average			2.59			2.29			341.75	35.7880	3	0.9691		0.2060
	3.0	3.6	3.30	2.7	3.1	2.90	414	479	446.50			0.2139	0.035894	0.035175
	2.7	3.5	3.10	2.7	3	2.85	398	465	431.50			0.1485		
	2.8	3.6	3.20	2.6	3.3	2.95	410	457	433.50			0.1443		
	3.1	3.5	3.30	2.7	3.1	2.90	417	467	442.00			0.2139		
	2.8	3.5	3.15	2.6	3.2	2.90	412	470	441.00			0.1464		
	2.8	3.5	3.15	2.6	3.3	2.95	419	461	440.00			0.1190		
	3.0	3.6	3.30	2.7	3.2	2.95	408	463	435.50			0.1902		
	2.9	3.6	3.25	2.6	3.1	2.85	405	471	438.00			0.2168		
	2.8	3.4	3.10	2.6	3.1	2.85	409	466	437.50			0.1485		
	3.0	3.5	3.25	2.6	3.2	2.90	404	463	433.50			0.1928		
Average			3.21			2.90			437.90	45.8568	4	1.0000		0.1749
	3.3	4.2	3.75	3.0	3.4	3.20	508	565	536.50			0.2519	0.055288	0.054181
	3.5	4.1	3.80	3.1	3.8	3.45	531	579	555.00			0.1676		
	3.3	4.0	3.65	3.2	3.9	3.55	502	550	526.00			0.0533		
	3.5	4.2	3.85	3.3	4	3.65	496	549	522.50			0.0965		
	3.4	4.2	3.80	3.2	3.8	3.50	509	562	535.50			0.1457		
	3.4	4.1	3.75	3.2	3.8	3.50	506	569	537.50			0.1246		
	3.3	4.0	3.65	3.1	3.9	3.50	499	545	522.00			0.0788		
	3.5	4.2	3.85	3.3	4	3.65	508	570	539.00			0.0986		
	3.5	4.2	3.85	3.3	3.8	3.55	498	577	537.50			0.1439		
	3.4	4.1	3.75	3.2	3.7	3.45	506	573	539.50			0.1475		
Average			3.77			3.50			535.10	56.0355	5	1.0404		0.1332
	4.0	4.4	4.20	3.8	4	3.90	595	631	613.00			0.1328	0.033381	0.032712
	3.9	4.3	4.10	3.8	4.2	4.00	598	642	620.00			0.0476		
	4.0	4.5	4.25	3.7	4	3.85	589	633	611.00			0.1709		
	3.9	4.4	4.15	3.7	4.1	3.90	590	627	608.50			0.1133		
	3.9	4.4	4.15	3.8	4.1	3.95	590	639	614.50			0.0918		
	3.9	4.3	4.10	3.6	4	3.80	585	634	609.50			0.1358		
	3.9	4.4	4.15	3.7	4.1	3.90	550	640	595.00			0.1133		
	4.0	4.4	4.20	3.6	4.2	3.90	587	613	600.00			0.1328		
	4.0	4.5	4.25	3.7	4.2	3.95	559	608	583.50			0.1314		
	3.9	4.3	4.10	3.7	4.1	3.90	554	627	590.50			0.0929		
Average			4.17			3.91			604.55	63.3083	6	1.0640		0.1172

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.7 ผลการทดลองหาค่าประสิทธิภาพและความเร็วปลายใบพัด

Gap	V in(m/s)			V out(m/s)			RPM			W	Tip speed	Cp	SD	Error
	Min	Max	Mid	Min	Max	Mid	Min	Max	Mid					
12	2.3	3.0	2.65	2.1	2.5	2.30	281	322	301.50			0.2304	0.070691	0.069276
	2.4	3.0	2.70	1.9	2.4	2.15	298	352	325.00			0.3286		
	2.5	3.1	2.80	2.0	2.6	2.30	288	356	322.00			0.2962		
	2.1	2.8	2.45	2.1	2.6	2.35	323	372	347.50			0.0783		
	2.3	3.0	2.65	2.0	2.5	2.25	312	376	344.00			0.2580		
	2.3	2.9	2.60	2.1	2.5	2.30	306	366	336.00			0.2049		
	2.4	3.1	2.75	2.0	2.5	2.25	316	346	331.00			0.3005		
	2.5	3.1	2.80	2.1	2.5	2.30	294	370	332.00			0.2962		
	2.4	3.1	2.75	2.1	2.6	2.35	286	350	318.00			0.2501		
	2.4	3.0	2.70	2.1	2.5	2.30	288	358	323.00		1	0.2540		
Average			2.69			2.29			328.00	34.3481	0.6955	0.2552		
	2.9	3.4	3.15	2.6	3.1	2.85	383	457	420.00			0.1728	0.041386	0.040557
	2.6	3.4	3.00	2.5	2.9	2.70	375	452	413.50			0.1805		
	2.7	3.1	2.90	2.4	2.9	2.65	371	430	400.50			0.1579		
	2.9	3.3	3.10	2.4	3	2.70	364	414	389.00			0.2258		
	2.8	3.3	3.05	2.5	3	2.75	340	436	388.00			0.1778		
	2.8	3.3	3.05	2.4	2.9	2.65	364	450	407.00			0.2290		
	2.9	3.2	3.05	2.5	2.9	2.70	365	432	398.50			0.2039		
	2.8	3.2	3.00	2.4	2.8	2.60	354	452	403.00			0.2323		
	2.7	3.1	2.90	2.4	2.9	2.65	355	454	404.50			0.1579		
	2.7	3.1	2.90	2.5	3	2.75	358	438	398.00		2	0.0982		
Average			3.13			2.63			402.20	42.1183	0.9419	0.2705		
	2.9	3.5	3.20	2.7	3.4	3.05	449	505	477.00			0.0894	0.03669	0.035956
	3.0	3.6	3.30	2.7	3.2	2.95	441	512	476.50			0.1902		
	3.2	3.8	3.50	2.8	3.4	3.10	461	512	486.50			0.2032		
	3.1	3.7	3.40	2.8	3.6	3.20	463	532	497.50			0.1108		
	3.2	3.8	3.50	2.9	3.4	3.15	441	495	468.00			0.1805		
	3.2	3.7	3.45	2.9	3.4	3.15	466	509	487.50			0.1591		
	3.1	3.8	3.45	2.8	3.4	3.10	451	499	475.00			0.1828		
	3.2	3.6	3.40	2.8	3.4	3.10	446	505	475.50			0.1612		
	3.2	3.7	3.45	2.9	3.3	3.10	452	510	481.00			0.1828		
	3.0	3.7	3.35	2.8	3.4	3.10	459	514	486.50		4	0.1383		
Average			3.42			3.18			481.10	50.3807	1.0312	0.1307		
	3.3	4.1	3.70	3.0	3.7	3.35	504	569	536.50			0.1717	0.04793	0.046971
	3.7	4.3	4.00	3.4	4	3.70	508	577	542.50			0.1390		
	3.5	4.2	3.85	3.0	3.7	3.35	508	587	547.50			0.2271		
	3.5	4.1	3.80	3.3	4	3.65	511	566	538.50			0.0759		
	3.7	4.3	4.00	3.2	4	3.60	513	564	538.50			0.1805		
	3.8	4.3	4.05	3.4	3.7	3.55	501	585	543.00			0.2174		
	3.7	4.2	3.95	3.3	3.8	3.55	511	571	541.00			0.1825		
	3.7	4.1	3.90	3.3	3.7	3.50	505	565	535.00			0.1846		
	3.5	4.2	3.85	3.0	3.6	3.30	510	569	539.50			0.2464		
	3.5	4.2	3.85	3.2	3.7	3.45	516	574	545.00		3	0.1868		
Average			3.90			3.57			540.70	56.6220	1.0176	0.1532		
	3.9	4.6	4.25	3.8	4.4	4.10	566	611	588.50			0.0681	0.034707	0.034013
	4.0	4.4	4.20	3.8	4.2	4.00	550	637	593.50			0.0908		
	3.9	4.6	4.25	3.6	4.2	3.90	557	610	583.50			0.1514		
	4.1	4.4	4.25	3.8	4.3	4.05	542	615	578.50			0.0897		
	3.9	4.3	4.10	3.6	4.1	3.85	561	606	583.50			0.1146		
	4.1	4.5	4.30	3.8	4.3	4.05	558	599	578.50			0.1096		
	4.0	4.4	4.20	3.7	4.2	3.95	546	610	578.00			0.1121		
	3.9	4.4	4.15	3.6	4.2	3.90	552	625	588.50			0.1133		
	4.0	4.3	4.15	3.6	4.4	4.00	559	632	595.50			0.0697		
	3.9	4.3	4.10	3.8	4.3	4.05	548	626	587.00		6	0.0241		
Average			4.14			3.94			597.00	62.5177	1.0571	0.0920		
	4.2	4.8	4.50	4.1	4.6	4.35	600	633	616.50			0.0645	0.02917	0.028586
	4.3	4.8	4.55	3.9	4.6	4.25	592	638	615.00			0.1233		
	4.2	4.8	4.50	4.0	4.4	4.20	594	640	617.00			0.1246		
	4.1	4.8	4.45	4.0	4.5	4.25	584	633	608.50			0.0859		
	4.0	4.5	4.25	3.9	4.5	4.20	595	632	613.50			0.0233		
	4.1	4.8	4.45	4.0	4.5	4.25	586	641	613.50			0.0859		
	4.3	4.8	4.55	4.1	4.6	4.35	599	636	617.50			0.0841		
	4.3	4.7	4.50	4.1	4.5	4.30	580	639	609.50			0.0850		
	4.2	4.9	4.55	4.1	4.7	4.40	584	640	612.00			0.0638		
	4.3	4.8	4.55	4.1	4.6	4.35	594	642	618.00		5	0.0841		
Average			4.43			4.20			631.00	66.0782	1.0441	0.0985		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.7 ผลการทดลองหาค่าประสิทธิภาพและความเร็วปลายใบพัด

Gap	V in(m/s)			V out(m/s)			RPM			W	Tip speed	Cp	SD	Error
	Min	Max	Mid	Min	Max	Mid	Min	Max	Mid					
20	1.5	1.9	1.70	1.3	1.6	1.45	220	240	230.00			0.2525	0.044874	0.043976
	1.6	2.1	1.85	1.2	1.6	1.40	221	243	232.00			0.3753		
	1.4	1.9	1.65	1.2	1.5	1.35	221	238	229.50			0.3005		
	1.3	1.9	1.60	1.1	1.5	1.30	189	245	217.00			0.3080		
	1.5	2.0	1.75	1.2	1.6	1.40	223	260	241.50			0.3240		
	1.5	2.0	1.75	1.2	1.6	1.40	218	238	228.00			0.3240		
	1.4	1.9	1.65	1.3	1.5	1.40	222	239	230.50			0.2589		
	1.4	1.9	1.65	1.2	1.5	1.35	208	244	226.00			0.3005		
	1.5	2.0	1.75	1.3	1.6	1.45	218	248	233.00			0.2866		
	1.4	1.9	1.65	1.3	1.6	1.45	225	240	232.50			0.2139		
Average			1.70			1.43			230.00	24.0855	0.9918			
	2.0	2.4	2.20	1.4	1.9	1.65	253	285	269.00			0.3828	0.04766	0.046706
	1.8	2.3	2.05	1.5	1.9	1.70	266	295	280.50			0.2857		
	1.7	2.3	2.00	1.4	1.8	1.60	270	302	286.00			0.3240		
	1.9	2.2	2.05	1.5	1.8	1.65	251	315	283.00			0.3178		
	2.0	2.3	2.15	1.4	1.9	1.65	271	311	291.00			0.3632		
	2.0	2.3	2.15	1.5	1.9	1.70	261	298	279.50			0.3356		
	1.8	2.3	2.05	1.6	2.0	1.80	255	294	274.50			0.2151		
	1.8	2.4	2.10	1.5	1.9	1.70	268	297	282.50			0.3118		
	1.9	2.3	2.10	1.5	2.0	1.75	270	305	287.50			0.2801		
	1.9	2.3	2.10	1.5	2.0	1.75	259	312	285.50			0.2801		
Average			2.10			1.75			281.90	29.5205	0.9864			
	2.4	2.8	2.60	2.0	2.5	2.25	305	361	333.00			0.2342	0.071798	0.070361
	2.3	2.9	2.60	2.1	2.6	2.35	291	322	306.50			0.1743		
	2.3	2.9	2.60	2.0	2.5	2.25	313	349	331.00			0.2342		
	2.4	3.0	2.70	1.9	2.6	2.25	310	340	325.00			0.2801		
	2.5	2.8	2.65	1.7	2.6	2.15	318	399	328.50			0.3095		
	2.3	2.8	2.55	1.9	2.6	2.25	308	333	320.50			0.2084		
	2.4	2.8	2.60	2.0	2.5	2.25	312	348	330.00			0.2342		
	2.4	2.7	2.55	2.2	2.7	2.45	299	342	320.50			0.0754		
	2.3	2.8	2.55	2.1	2.7	2.40	313	348	330.50			0.1108		
	2.3	2.9	2.60	1.9	2.6	2.25	303	339	321.00			0.2342		
Average			2.60			2.29			324.65	33.9973	0.9153			
	3.0	3.5	3.25	2.8	3.3	3.05	440	507	473.50			0.1156	0.025932	0.025412
	3.3	3.8	3.55	2.8	3.6	3.20	464	489	476.50			0.1782		
	3.0	3.5	3.25	2.7	3.3	3.00	426	473	449.50			0.1422		
	3.1	3.7	3.40	2.8	3.3	3.05	493	537	515.00			0.1852		
	3.0	3.7	3.35	2.8	3.2	3.00	458	521	489.50			0.1877		
	3.1	3.6	3.35	2.8	3.2	3.00	459	516	487.50			0.1877		
	3.1	3.5	3.30	2.7	3.3	3.00	448	511	479.50			0.1657		
	3.2	3.7	3.45	2.8	3.5	3.15	440	520	480.00			0.1591		
	3.3	3.7	3.50	2.8	3.4	3.10	439	516	477.50			0.2032		
	3.1	3.8	3.45	2.8	3.4	3.10	433	526	479.50			0.1828		
Average			3.37			3.07			480.80	50.3493	1.0458			
	2.8	3.2	3.00	2.6	3	2.80	392	420	406.00			0.1246	0.044601	0.043708
	2.7	3.3	3.00	2.4	2.7	2.55	375	431	403.00			0.2567		
	2.7	3.4	3.05	2.3	2.8	2.55	392	456	424.00			0.2763		
	2.6	3.2	2.90	2.5	2.7	2.60	404	443	423.50			0.1860		
	2.8	3.2	3.00	2.4	2.9	2.65	390	442	416.00			0.2069		
	2.8	3.2	3.00	2.4	2.7	2.55	387	436	411.50			0.2567		
	2.7	3.3	3.00	2.4	2.7	2.55	377	443	410.00			0.2567		
	2.8	3.3	3.05	2.5	2.8	2.65	398	428	413.00			0.2290		
	2.7	3.2	2.95	2.4	2.8	2.60	400	449	424.50			0.2100		
	2.7	3.2	2.95	2.5	2.7	2.60	384	443	413.50			0.2100		
Average			2.99			2.66			423.00	44.2965	1.0370			
	3.8	4.4	4.10	3.4	4.2	3.80	501	556	528.50			0.1358	0.041418	0.040589
	3.7	4.3	4.00	3.6	4	3.80	571	592	581.50			0.0951		
	3.8	4.3	4.05	3.5	4.2	3.85	554	609	581.50			0.0939		
	3.8	4.4	4.10	3.5	4.1	3.80	519	560	539.50			0.1358		
	3.8	4.3	4.05	3.6	4	3.80	528	551	539.50			0.1160		
	3.8	4.4	4.10	3.6	4	3.80	538	560	549.00			0.1358		
	3.7	4.4	4.05	3.7	4.2	3.95	529	573	551.00			0.0482		
	3.9	4.5	4.20	3.5	4	3.75	540	593	566.50			0.1919		
	3.8	4.4	4.10	3.5	4.2	3.85	525	575	550.00			0.1146		
	3.7	4.5	4.10	3.4	4	3.70	529	579	554.00			0.1765		
Average			4.21			3.73			578.00	60.5280	1.0064			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ค.3 ผลจากการทดลองทางไฟฟ้า

#### ค.3.1. การทดลองหาค่าลิ่งไฟฟ้าสูงสุด

ผลการทดลองหาค่าลิ่งไฟฟ้าสูงสุด โดยการนำค่าความต้านทานหลายๆ ค่ามาต่อกับอุปกรณ์ จะได้ผลดังตารางที่ ค.8

ตารางที่ ค.8 การทดลองหาค่าลิ่งไฟฟ้าสูงสุด

ครั้งที่	Vrms												
	1kΩ	10kΩ	50kΩ	100kΩ	200kΩ	390kΩ	500kΩ	600kΩ	758kΩ	826kΩ	1000kΩ	1200kΩ	2200kΩ
1	0.0123	0.0513	0.225	0.378	0.609	0.912	1.11	1.15	1.2	1.31	1.28	1.45	1.6
	0.0128	0.0532	0.199	0.423	0.582	0.945	1.08	1.12	1.19	1.32	1.3	1.38	1.55
	0.0113	0.0547	0.199	0.401	0.62	0.942	1.08	1.27	1.21	1.28	1.33	1.46	1.52
	0.0127	0.0591	0.192	0.412	0.631	0.921	1.09	1.17	1.22	1.29	1.3	1.43	1.62
	0.0128	0.0581	0.209	0.366	0.697	0.957	1.08	1.27	1.23	1.24	1.35	1.43	1.62
	0.016	0.0558	0.205	0.359	0.676	0.99	1.05	1.13	1.32	1.33	1.33	1.39	1.63
	0.0113	0.0559	0.212	0.401	0.649	0.88	1.1	1.2	1.28	1.3	1.28	1.38	1.57
	0.0131	0.0589	0.205	0.433	0.632	0.986	1	1.14	1.2	1.27	1.3	1.39	1.68
	0.0137	0.054	0.23	0.43	0.636	0.923	1.07	1.19	1.17	1.26	1.3	1.46	1.59
	0.0101	0.0557	0.237	0.416	0.633	0.972	1.1	1.14	1.24	1.28	1.38	1.47	1.55
AVG.	0.01261	0.055667	0.2113	0.4019	0.6365	0.9428	1.076	1.178	1.226	1.288	1.315	1.424	1.593
2	0.0165	0.0773	0.295	0.527	0.923	1.2	1.4	1.59	1.61	1.66	1.72	1.84	2.01
	0.016	0.0769	0.31	0.541	0.904	1.27	1.43	1.58	1.59	1.72	1.71	1.9	1.98
	0.0188	0.0739	0.288	0.531	0.928	1.29	1.37	1.58	1.64	1.71	1.74	1.94	1.96
	0.0144	0.0728	0.309	0.553	0.928	1.3	1.37	1.61	1.73	1.67	1.81	1.98	1.98
	0.0165	0.0738	0.303	0.546	0.981	1.21	1.42	1.58	1.62	1.76	1.84	1.97	1.97
	0.0165	0.073	0.296	0.536	0.944	1.24	1.41	1.64	1.62	1.8	1.82	1.9	1.97
	0.016	0.0701	0.316	0.607	0.907	1.2	1.43	1.57	1.61	1.7	1.8	1.84	2.03
	0.0144	0.0733	0.302	0.551	0.912	1.29	1.41	1.56	1.61	1.73	1.79	1.86	2.05
	0.0165	0.0719	0.306	0.609	0.877	1.21	1.44	1.61	1.65	1.69	1.78	1.86	2.08
	0.0165	0.0723	0.311	0.56	0.943	1.22	1.41	1.59	1.6	1.69	1.78	1.83	2.03
AVG.	0.01621	0.07353	0.3036	0.5561	0.9247	1.243	1.409	1.591	1.628	1.713	1.779	1.892	2.006
3	0.0196	0.104	0.407	0.766	1.15	1.59	1.79	1.88	1.91	1.92	1.94	1.95	2.13
	0.0202	0.0962	0.397	0.729	1.17	1.65	1.7	1.85	1.88	1.93	1.94	2.04	2.14
	0.0188	0.0887	0.395	0.737	1.22	1.64	1.75	1.86	1.91	1.9	1.96	1.96	2.12
	0.0192	0.097	0.407	0.755	1.19	1.59	1.76	1.84	1.95	1.93	1.94	1.99	2.13
	0.02	0.0996	0.42	0.72	1.17	1.66	1.85	1.81	1.93	1.98	2.02	1.98	2.18
	0.02	0.108	0.435	0.72	1.19	1.7	1.69	1.91	1.87	1.93	1.95	2.03	2.19
	0.0188	0.102	0.439	0.796	1.19	1.61	1.78	1.95	1.85	1.96	1.93	2.07	2.3
	0.0196	0.101	0.408	0.737	1.17	1.68	1.81	1.82	1.93	1.97	1.94	2.1	2.2
	0.017	0.0915	0.41	0.73	1.18	1.58	1.82	1.85	1.91	1.95	1.99	2.1	2.14
	0.0208	0.0968	0.421	0.778	1.17	1.58	1.74	1.81	1.88	1.92	1.97	1.97	2.18
AVG.	0.0194	0.09848	0.4139	0.7468	1.18	1.628	1.769	1.858	1.902	1.939	1.958	2.019	2.171
4	0.0188	0.14	0.503	0.863	1.18	1.73	1.87	1.91	1.94	2.11	2.06	2.17	2.31
	0.0196	0.127	0.575	0.862	1.26	1.59	1.75	1.91	1.99	2.04	2.05	2.14	2.3
	0.0188	0.136	0.535	0.855	1.3	1.64	1.84	1.9	2.05	2.04	2.06	2.17	2.25
	0.0188	0.161	0.492	0.845	1.35	1.67	1.88	1.9	2.03	2.05	2.04	2.17	2.24
	0.0183	0.147	0.585	0.886	1.3	1.7	1.77	1.92	2.06	2.01	2.11	2.17	2.3
	0.0196	0.132	0.538	0.851	1.31	1.66	1.87	1.87	2.01	2	2.04	2.2	2.28
	0.0188	0.127	0.51	0.811	1.31	1.7	1.81	1.87	2.05	2.02	2.04	2.18	2.6
	0.0196	0.14	0.516	0.855	1.27	1.74	1.82	1.88	2.03	2	2.06	2.14	2.8
	0.0196	0.162	0.51	0.828	1.28	1.7	1.86	1.93	1.99	2.03	2.11	2.17	2.29
	0.0218	0.114	0.523	0.807	1.2	1.64	1.89	1.91	1.99	2.01	2.06	2.22	2.3
AVG.	0.01937	0.1386	0.5287	0.8463	1.276	1.677	1.836	1.9	2.014	2.031	2.063	2.173	2.367

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.3.2. การทดลองหาแนวโน้มของเวลาที่ชาร์จและเวลาที่ใช้ของตัวเก็บประจุ  
ผลการทดลองหาแนวโน้มของเวลาที่ชาร์จและเวลาที่ใช้ของตัวเก็บประจุ โดยการนำค่าความ  
ตัวเก็บประจุหลายค่ามาต่อกับอุปกรณ์ จะได้ผลดังตารางที่ ค.9  
ตารางที่ ค.9 การทดลองหาลำโพงกำลังไฟฟ้าสูง

C ( $\mu\text{F}$ )	R ( $\text{k}\Omega$ )	Optime (ms)	Cgtime (s)
22	100	0.8	7.56
		0.9	5.06
		1.2	5.296
		1.12	5.408
		1.32	5.904
		1.24	5.448
		0.78	5.432
		0.92	4.88
		1.42	5.492
		1.5	5.112
	200	1.12	5.5592
		2.14	5.358
		1.97	4.684
		2.23	5.268
		1.87	4.92
		2.21	5.72
		1.85	6.692
		1.95	5.784
		1.87	4.784
		2.1	4.996
	390	2.13	5.318
		2.032	5.3524
		4.1	5.192
		3.98	5.656
		4.13	5.692
		3.87	5.288
		4.15	5.9
		3.86	5.508
		4.16	5.332
		3.86	5.64
	4.24	6.192	
	3.78	5.96	
			4.013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C ( $\mu\text{F}$ )	R ( $\text{k}\Omega$ )	Optime (ms)	Cgtime (s)
47	100	2.31	10.58
		2.43	10.474
		2.35	10.66
		2.48	10.28
		2.62	11.384
		2.68	10.044
		2.32	9.98
		2.48	9.986
		2.32	10.866
		2.48	12.52
	2.447	10.6774	
	200	4.84	10.48
		4.48	10.8
		4.89	10.64
		4.98	10.8
		4.86	10.678
		4.96	10.4
		4.82	11.2
		4.721	11.44
		4.94	11.52
		4.01	12.41
	4.7501	11.0368	
	390	9.51	10.84
		9.208	10.64
		9.62	11.23
		9.85	10.89
		9.4	11.45
		9.67	12.02
		9.84	11.56
		9.68	10.98
		9.76	12.34
		9.81	11.89
			9.6348

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C ( $\mu\text{F}$ )	R ( $\text{k}\Omega$ )	Optime (ms)	Cgtime (s)	
220	100	9.56	49.84	
		9.8	52.56	
		9.52	55.2	
		9.76	56.68	
		9.24	50.68	
		9.76	52.52	
		9.64	51.44	
		9.72	49.6	
		9.4	59.2	
		9.48	52.36	
			9.588	53.008
		200	21.6	51
			22.32	51.52
			21.72	50.64
			21.2	50.6
			20.85	52
			21.6	51.6
			21.6	50.4
			20.8	52
			20.4	51.6
			20.8	52.8
			21.289	51.416
		390	52.8	53.6
			51.2	53.6
			51.2	52.8
			51.2	53.6
			52	52
			52	52.8
			51.2	52
			52.8	53.6
	51.2		53.6	
	52		52.8	
		51.76	53.04	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้