

การพัฒนาการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวิธีการทางไพโซอิเล็กทริก
Developments of Energy Harvesting Using the Piezoelectric Methods

ภาณุ ไทยนิรมิตร
Panu Thainiramit

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Physics
Prince of Songkla University
2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวิธีการทางไฟอโซอิเล็กทริก
 ผู้เขียน นายภาณุ ไทยนิรมิตร
 สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.นันทกาญจน์ มุรคิต)

.....ประธานกรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.นันทกาญจน์ มุรคิต)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ชิตณรงค์ ศิริสถิตย์กุล)

.....กรรมการ
 (ดร.สวัสดิ์ ยอดขยัน)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้
 เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วน
เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ _____

(รองศาสตราจารย์ ดร.นันทกาญจน์ มุรติต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ _____

(นายภาณุ ไทยนิรมิตร)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ _____

(นายภาณุ ไทโยนิมิตร)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวิธีการทางไพโซอิเล็กทริก
ผู้เขียน	นายภาณุ ไทยนิรมิตร
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับ การเก็บเกี่ยวพลังงานกลเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ด้วยวัสดุไพโซเซรามิกทางการค้าชนิดพีแซดทีที่นำมาติดตั้งสองด้านของคานาติลเลอร์หรือ บีมด้านละชุดทำให้ได้โครงสร้างเก็บเกี่ยวพลังงานกลที่เรียกว่าไบมอพชาน ในการทดลองให้พลังงานสั้นแก่บีมลักษณะดังกล่าวมีการกำหนดให้ความถี่ของการสั่นของบีมอยู่ในช่วงต่ำกว่า 100 เฮิร์ตซ์มากๆ (17-18 เฮิร์ตซ์) ที่ขนาดของการกระจัดของปลายบีมคงที่ค่าหนึ่งๆ มีวงจรเรียงกระแสเชื่อมต่อแบบขนานกับวัสดุไพโซอิเล็กทริกบนบีม ในขณะที่บีมกำลังสั่นมีกระแสไฟฟ้าไพโซอิเล็กทริกไหลในวงจรทำให้เกิดความต่างศักย์สูงสุดไม่เกิน 5 โวลต์ ครอบโหนดซึ่งต่อขนานกับวงจรเรียงกระแส นำมาคำนวณกำลังไฟฟ้าได้ 400-500 ไมโครวัตต์ มีการทดลองเปลี่ยนแปลงความถี่ของการสั่นของบีมพบว่าความยาวของบีมมีผลต่อความถี่ของการสั่นมากกว่าการเลื่อนจุดศูนย์กลางมวลและเปลี่ยนน้ำหนักรวมของระบบบีม การนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้ไปใช้ประโยชน์จำเป็นต้องมีวงจรเชื่อมต่อเพิ่มเติมนอกเหนือจากวงจรเรียงกระแส นั่นคือมีวงจรควบคุมแรงดันต่อขนานกับวงจรเรียงกระแสทั้งนี้เพื่อป้องกันการใช้ไฟเกินในวงจร อิเล็กทรอนิกส์ภายนอกซึ่งมีค่าโหลดแตกต่างกันไป จากนั้นเลือกใช้แหล่งกำเนิดพลังงานกล ที่มาจากการเคลื่อนที่ในแนวนอนที่มีในนาฬิกาข้อมือ นำระบบบีมที่ออกแบบและเชื่อมต่อวงจรต่างๆอย่างเรียบร้อยไปติดตั้งกับจักรยานออกกำลังกายชนิดปั่นกับที่ พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้เพียงพอให้อุปกรณ์พกพาสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า 1 มิลลิวัตต์ ลงไปทำงานได้ เช่น ตัวควบคุมการปิดเปิดระยะไกล เครื่องคิดเลข ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานมีค่าเท่ากับร้อยละ 9.6 สำหรับจักรยานที่ประกอบด้วยชุดเก็บเกี่ยวพลังงานเพียงบีมเดียว ต่อมาได้เพิ่มจำนวนบีมเป็น 2 บีมในระบบที่ติดตั้งกับจักรยานทั่วไปและปั่นอย่างต่อเนื่องทำให้ได้กระแสไฟฟ้าไปประจุให้กับแบตเตอรี่ทุติยภูมิขนาด 150 mAh พบว่าสามารถใช้แบตเตอรี่ดังกล่าวเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสำรองให้แก่โทรศัพท์เคลื่อนที่ชนิดต่างๆทดแทนแบตเตอรี่ขนาด 3.7 โวลต์ของโทรศัพท์ที่ได้เป็นอย่างดี การประยุกต์ใช้ชุดเก็บเกี่ยวพลังงานสั้นด้วยวิธีการทางไพโซอิเล็กทริกที่พัฒนาในงานวิจัยนี้เป็นทั้งเทคนิคผลิตพลังงานทดแทนรูปแบบใหม่และส่งเสริมการออกกำลังกายด้วยจักรยาน

Thesis Title	Developments of Energy Harvesting Using the Piezoelectric Methods.
Author	Mr. Panu Thainiramit
Major Program	Physics
Academic Year	2012

ABSTRACT

This work involved with the energy harvesting via converting a mechanical energy into an electrical energy by using piezoelectric ceramics of commercial PZT. The ceramics were rigidly glued onto both sides of a cantilever beam, leading to a so-called parallel bimorph harvesting structure. A vibration condition of the beam was at frequencies much below 100 Hz (17-18 Hz) and at a constant displacement of a beam tip. There was a rectifying circuit interconnected parallelly with the piezoelectric material on the beam. While being vibrating, the piezoelectric current flows in the circuit generating a voltage of 5 volts at maximum caused by a load which was parallelly connected with the rectifying circuit. The obtained power was 400-500 microwatts. There were the experiments changing the vibrating frequency of the beam, the beam length was found to affect most on the frequency when compared to changes in its center of mass and total mass. In real implementations, there was one more necessary circuit, i.e., a voltage regulator parallelly connected with the rectifier in order to prevent an overload through an outside electronics of different loads. In selection of mechanical energy source, it was demonstrated by a circular movement, hence, produced by a bicycle. With the designed beam system and interfacing circuits demonstrated by riding the stationary exercise bicycle, the generated power was enough to feed the portable devices of energy consumption of 1 mW and below such as calculator, remote controller. This method has a calculated efficiency of 9.6% for the a one-beam bicycle. After that the two-beam bicycle of general type was demonstrated and the obtained electrical energy was stored in a 150 mAh-rechargeable battery. Such the battery was used as a power supply spared for a mobile phone of general types as a replacement of its own battery of 3.7 volts. The energy harvesting using the piezoelectric method developed in this work is not only a technique for renewable energy of a new type but also a promotion for bicycling exercise.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากบุคคลหลายท่านและจากหลายหน่วยงาน ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ ดังนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. นันทกาญจน์ มุรติต ที่ให้โอกาสสนับสนุนด้านการศึกษาวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เล็ก สีคง รองศาสตราจารย์ ดร. ชิตณรงค์ ศิริสถิตย์กุล และ ดร. สวัสดิ์ ยอดขยัน ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านและเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนเงินอุดหนุนการวิจัยเชื่อมโยงกับบัณฑิตศึกษา จากเงินรายได้มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ทำการวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัว

ภาณุ ไทยนิรมิตร

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(15)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	2
1.3 วัตถุประสงค์	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 หลักการเก็บเกี่ยวพลังงาน	5
2.2 ทฤษฎีทางไพโซอิเล็กทริก	6
2.2.1 ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก และสมบัติที่เกี่ยวข้อง	6
2.2.2 การคำนวณ โหมดการสั่น ค่าคุณภาพการใช้งาน	8
2.2.3 แบบจำลองทางไพโซอิเล็กทริก	12
2.3 การเก็บเกี่ยวพลังงานสั่น	13
2.3.1 หลักการบีบคานติลเวอร์	13
2.3.2 แบบจำลองทางไฟฟ้ากล	15
2.3.3 บีบโมโนมอฟและไบมอฟ	18
2.4 แบนด์วิดท์และเรโซแนนซ์	19
2.4.1 การเลือกแบนด์วิดท์	19
2.4.2 การปรับความถี่เรโซแนนซ์	21
2.4.3 การเพิ่มช่วงความกว้างแบนด์วิดท์	22
2.5 การเชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดการสั่นกับวัสดุไพโซอิเล็กทริกและอุปกรณ์	23
2.5.1 หลักการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด	23
2.5.2 วงจรเรียงกระแส	25
2.5.3 วงจรควบคุมแรงดัน	27
2.5.4 แบตเตอรี่ทุติยภูมิแบบต่างๆ ในระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.5 วงจรรวมและอุปกรณ์ขนาดเล็ก	37
2.6 จักรยาน	41
2.7 วัสดุไฟอ์โซอิเล็ทริกที่เป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้า	44
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	48
3.1 วัสดุ	48
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	48
3.3 วิธีการวิจัย	50
3.3.1 บีมและส่วนที่เกี่ยวข้อง	51
3.3.2 การเก็บเกี่ยวพลังงานและวงจรเชื่อมต่อ	59
3.3.3 การเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากการหมุนในแนวรัศมี	63
3.3.4 ประสิทธิภาพของระบบเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุไฟอ์โซอิเล็ทริก	67
3.3.5 ค่าขีดจำกัดของพารามิเตอร์	67
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผล	69
4.1 การทดสอบใบมอฟ	69
4.1.1 แรงดันไฟฟ้ากับการกระจัดปลายบีม	69
4.1.2 แรงดันไฟฟ้ากับการกระจัดใกล้จุดยึดที่ความถี่ทำงาน	70
4.1.3 การเลื่อนตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล	71
4.1.4 การเปลี่ยนน้ำหนักรวมของระบบ	72
4.2 กำลังไฟฟ้า	73
4.2.1 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากจากใบมอฟ	73
4.2.2 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากจากใบมอฟผ่านวงจรควบคุมแรงดัน	74
4.2.3 กำลังไฟฟ้าจากบีมความยาวต่างกัน	75
4.2.4 การประจุแบตเตอรี่	76
4.2.5 การเลื่อนตำแหน่งมวลถ่วงและผลทางไฟฟ้า	77
4.3 การเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากการหมุนในแนวรัศมี	78
4.3.1 กำลังไฟฟ้าที่ได้ จากจักรยานแบบที่ 1	78
4.3.2 กำลังไฟฟ้าที่ได้ จากจักรยานแบบที่ 2	79
4.3.3 กำลังไฟฟ้าสูงสุดกับการเปลี่ยนความเร็ว	80
4.3.4 ประสิทธิภาพที่ได้จากระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน	81

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	82
5.1 สรุปผลการทดลอง	82
5.2 ข้อเสนอแนะ	83
บรรณานุกรม	84
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก	91
ประวัติผู้เขียน	104

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	โหมตการสันหลัก 5 แบบของวัสดุไพอโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า กระแสสลับ และสมการที่ใช้หาสัมประสิทธิ์คัปเปิลไฟฟ้า-กลจากวิธีเรโซแนนซ์	10
2.2	ค่าคงที่ α_i ของโหมตการสันของบีม	14
2.3	ตารางข้อมูลแบตเตอรีทุติยภูมิแบบต่าง ๆ	36
2.4	ตารางเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างแบตเตอรีทุติยภูมิกับตัวเก็บประจุ	36
2.5	ข้อมูลทางการค้าของเซรามิกสังเคราะห์ที่ทำปัสเซอร์	47
3.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นบนบีม	52
3.2	ขนาดของการกระจัดปลายบีมและแรงที่แปรผันตาม	56
4.1	ความเร็วขั้นต่ำที่ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	79

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบหลักของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน	5
2.2 ปรัชญาการณไฟโไซอิเล็กทริกแบบ (ก) ตรง และ (ข) ผันกลับ	7
2.3 การวิเคราะห์แบนด์วิดท์จากศักย์ไฟฟ้าและความถี่	11
2.4 การสั่นของโครงผลึกเมื่อได้รับพลังงาน	12
2.5 วงจรสมมูล (equivalent circuit) ของวัสดุไฟโไซอิเล็กทริก (ก) ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (ข) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ	13
2.6 โครงสร้างบีม	14
2.7 รูปแบบการสั่นของบีม 5 โหมด	15
2.8 แบบจำลองทางไฟฟ้ากลของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่มีวัสดุไฟโไซอิเล็กทริก	16
2.9 โครงสร้างบีม (ก) โมโนมอฟ (ข) ไบมอฟอนุกรม (ค) ไบมอฟขนาน (ลูกศรแทน ทิศทางของโพลาริเซชัน)	18
2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับกำลังไฟฟ้า	20
2.11 สเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากขบวนการของบีมหลายอันในระบบ	22
2.12 วงจรสมมูลแหล่งจ่ายแรงดันต่อโหลดปรับค่าได้ในวงจรไฟตรง	24
2.13 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ ที่เงื่อนไข $R_{in} = R_L$ ขนาด $10\text{ k}\Omega$	24
2.14 (ก) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (กรอบเส้นประ) ในแบบวงจรมาตรฐาน (ข) สัญญาณรูปไซน์ก่อนเข้าวงจรเรียงกระแส (ค) สัญญาณหลังจากออกจากวงจรเรียงกระแสที่ยังไม่กรองโดยตัวเก็บประจุ	26
2.15 วงจรควบคุมแรงดันโดยใช้ซีเนอร์ไดโอด	28
2.16 วงจรควบคุมแรงดันโดยใช้ทรานซิสเตอร์	28
2.17 (ก) องค์ประกอบทางไฟฟ้าอย่างง่ายของวงควบคุมแรงดัน (ข) วงจรสมมูลส่วนของการสวิตซ์ซิ่ง (ค) แรงดันขาออก	30
2.18 การปรับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรง (ก) การต่ออนุกรมแบบขั้วไฟฟ้าทิศทางเดียวกัน (ข) การต่ออนุกรมแบบขั้วไฟฟ้าต่างทิศทาง	32
2.19 การเพิ่มกระแสของแหล่งจ่ายไฟตรงด้วยวิธีการต่อแบบขนาน (ก) การเพิ่มกระแสไฟฟ้าในวงจรด้วยการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟตรงแบบขนาน (ข) แหล่งจ่ายไฟตรงที่แรงดันไม่เท่ากันและทิศทางการไหลของกระแส	34
2.20 ขั้นตอนการจัดเก็บสะสมพลังงาน	40

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
2.21 แสดงแรงกระทำในแต่ละส่วนของจักรยานก่อนเคลื่อนที่	41
2.22 แสดงจุดศูนย์กลางมวล (G) ของระบบจักรยานและคน (M)	42
2.23 ผลิตรากศัพท์ไอโซอิเล็กทริกทางการค้าแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ (ก) ตัวกระตุ้น (ข) ตัวกำเนิดสัญญาณ	45
2.24 (ก) ลำโพงบัสเซอร์ (ข) แผ่นเซรามิกไอโซอิเล็กทริกที่อยู่ภายในลำโพง	46
3.1 ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวิธีทางไอโซอิเล็กทริกทิศของลูกศรแทนทิศทาง ของพลังงานที่ส่งผ่านในระบบ	50
3.2 (ก) ชั้นหน่วยย่อยของบีมเป็นแบบจำลองเพื่อศึกษาการสั่นตามขวาง (ข) โหมดการสั่นที่ได้จากชั้นหน่วยย่อย 25 ชั้น	51
3.3 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ ของบีม ในโหมดการสั่นที่ 1 เส้นประ สีเหลี่ยมเป็นบริเวณที่ติดแทรนส์ดีวเซอร์	52
3.4 (ก) ภาพแสดงตำแหน่งที่ติดแทรนส์ดีวเซอร์บนบีม (ข) ภาพถ่ายบีมไบมอर्फที่ใช้ทดสอบ	53
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ทำงานกับความยาว	54
3.6 ชุดการทดลองแรงดันไฟฟ้าจากแทรนส์ดีวเซอร์ที่ความถี่ทำงานต่างกัน	55
3.7 ชุดการทดลองแรงดันจากแทรนส์ดีวเซอร์กับการกระจัดปลายบีม	57
3.8 การปรับเปลี่ยนความถี่ทำงานของบีมด้วยวิธีการ เปลี่ยนจุดศูนย์กลางถ่วง และการเพิ่มมวลบีม	59
3.9 (ก) ส่วนประกอบของชุดการทดลอง จำลองการเก็บเกี่ยวพลังงานสั่น และ แปลงพลังงานที่ได้เป็นไฟฟ้า (ข) อุปกรณ์การทดลองในห้องปฏิบัติการ	59-60
3.10 วงจรเรียงกระแส (ก) ต่อกับแทรนส์ดีวเซอร์และตัวต้านทาน และ (ข) รูปของ วงจร	61
3.11 (ก) ส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรควบคุมแรงดันเมื่อเชื่อมต่อแบตเตอรี่ (ข) ภาพถ่ายวงจรและ (ค) แบตเตอรี่	62
3.12 จักรยานแบบที่ 1 พร้อมอุปกรณ์ทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงาน ประกอบด้วย (ก) เครื่องคิดเลข (ข) เครื่องควบคุมระยะไกล และ (ค) แท่งพลาสติก	64
3.13 จักรยานแบบที่ 2 (ก) วงจรประจุแบตเตอรี่ (ข) แบตเตอรี่ทุติยภูมิ และ (ค) แท่งพลาสติก	66

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.1 แรงดันไฟฟ้าจากแทรนส์ดีวเซอร์กับแรงกระทำที่ปลายบีมเป็นฟังก์ชันกับการกระจัดปลายบีม	69
4.2 แรงดันไฟฟ้าจากแทรนส์ดีวเซอร์และระยะกระจัดใกล้จุดยึดบีมที่ตำแหน่ง 1.25 cm จากจุดยึดเป็นฟังก์ชันกับความถี่ทำงาน	70
4.3 แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแทรนส์ดีวเซอร์เป็นฟังก์ชันกับความถี่ที่เปลี่ยนตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล	71
4.4 ความถี่ทำงานเป็นฟังก์ชันกับตำแหน่งติดมวลถ่วงวัดระยะจากจุดตรึงบีมถึงตำแหน่งวางมวล ที่จำนวนมวลต่างกัน 1, 2 และ 3 ค่า	72
4.5 กำลังไฟฟ้าจากวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกของบีมไบมอर्फเป็นฟังก์ชันกับค่าความต้านทานที่การกระจัดของปลายบีมขนาดต่างกัน	73
4.6 กำลังไฟฟ้าจากวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกของบีมไบมอर्फที่ผ่านวงจรควบคุมแรงดัน เป็นฟังก์ชันกับค่าความต้านทาน ที่การกระจัดของปลายบีมขนาดต่างกัน	74
4.7 กำลังไฟฟ้าจากวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกของบีมไบมอर्फ ความยาวต่างกันเป็นฟังก์ชันกับค่าความต้านทาน ที่การกระจัดของปลายบีมขนาดเท่ากับ 1.5 cm	75
4.8 การประจุแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ทุติยภูมิ	76
4.9 ค่าความต้านทานที่เหมาะสมของระบบ เป็นฟังก์ชันกับความถี่ทำงาน	77
4.10 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการปั่นจักรยานแบบปั่นกับที่ที่มีความเร็วต่างกัน เป็นฟังก์ชันกับความต้านทาน	78
4.11 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการปั่นจักรยานที่มีความเร็วต่างกัน เป็นฟังก์ชันกับความต้านทาน	79
4.12 กำลังไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันกับความเร็วของจักรยาน	80
ก-1 เอกสารแสดงการได้รับหมายเลขอนุสิทธิบัตรและรับการคุ้มครองตามกฎหมาย	91

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

D	การกระจัดทางไฟฟ้า
T	ความเค้น
E	สนามไฟฟ้า
S	ความเครียด
d, g	สัมประสิทธิ์เพอโซอิเล็กทริก
s	ความหยุ่น
\mathcal{E}	ค่าสภาพยอม
t	ความหนา
A	พื้นที่หน้าตัด
FoM	ค่าคุณภาพ
Q	แฟกเตอร์คุณภาพ
f_r	ความถี่เรโซแนนซ์
f_g	ความถี่แอนติเรโซแนนซ์
Δf	ผลต่างระหว่าง f_1 และ f_2
F	แรง
Y	มอดูลัสของยัง
w	ความกว้างของบีม
L	ความยาวของบีม
P	กำลังไฟฟ้า
R_L	ค่าความต้านทาน
V	ความต่างศักย์
C	ความเก็บประจุ
m	น้ำหนักมวลถ่วง
m_c	น้ำหนักบีม
r	รัศมี
η	ประสิทธิภาพ
k^2	สัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้า-กล
ζ	อัตราส่วนความหน่วง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ในเวลา 20-30 ปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำได้พัฒนาอย่างรวดเร็ว ผลของการพัฒนาทำให้วงจรรวมหรือไอซี (IC : integrated circuit) มีขนาดเล็กลง มีความสามารถในการทำงานที่สูงขึ้นและใช้พลังงานน้อยลง พบได้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถทำงานได้เองแบบอัตโนมัติที่เรียกว่าระบบฝังตัว (embedded system) เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ ตัวตรวจจับสัญญาณแบบไร้สาย เครื่องเล่นวิทยุแบบพกพา เครื่องวัดการเต้นของชีพจรสำหรับผู้ป่วยเป็นต้น อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีดังกล่าวก็ยังคงต้องพึ่งพาแหล่งจ่ายพลังงาน การเสาะแสวงหาพลังงานรูปแบบใหม่ๆและเลือกใช้เทคนิคที่เอื้อต่อการนำพลังงานในสิ่งแวดล้อมมาใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสมจึงเป็นสิ่งที่ควรได้รับการพัฒนา หลักการหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมศึกษาวิจัยในปัจจุบันคือการประยุกต์ใช้วัสดุบางชนิดเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานขนาดเล็ก โดยอาศัยกลไกแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ประเด็นที่น่าสนใจคือทำอย่างไรจึงจะมีพลังงานกลต่อเนื่องเป็นเวลานานพอที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้ กระบวนการที่เริ่มต้นจากการใช้วัสดุแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจนกระทั่งถึงขั้นตอนนำพลังงานที่แปลงได้มาใช้ประโยชน์เรียกว่า การเก็บเกี่ยวพลังงาน (energy harvesting) วัสดุไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric material) เป็นวัสดุที่มีบทบาทมากในการแปลงพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่ง ซึ่งถ้าหากมีการจัดการพลังงานที่เหมาะสมสามารถนำไปสู่การลดการใช้เชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมตลอดจนลดจำนวนแหล่งกำเนิดไฟฟ้าชนิดแบตเตอรี่ (battery) ได้หลายล้านก้อน นอกจากนั้นประเด็นที่น่าสนใจอีกประเด็นหนึ่งคือโครงสร้างทางวิศวกรรมที่มีวัสดุไพโซอิเล็กทริก ติดอยู่ ส่วนใหญ่การเก็บเกี่ยวพลังงานมักติดตั้งวัสดุลงบนโครงสร้างที่เรียกว่าบีมคานติลิวเวอร์ (cantilever beam) กระตุ้นให้เกิดการสั่นที่ความถี่ในระดับต่ำๆ สัญญาณไฟฟ้าที่ได้เป็นสัญญาณรูปไซน์ (sinusoidal signal) ซึ่งเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ การนำสัญญาณจากการสั่นดังกล่าวไปใช้ประโยชน์จึงอาจจำเป็นต้องแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงหรืออาจหาแนวทางนำสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับไปใช้โดยตรงขึ้นกับชนิดของอุปกรณ์

การนำพลังงานไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้ไปใช้ประโยชน์อีกแนวทางหนึ่งคือประจุให้แบตเตอรี่ขนาดเล็ก สำหรับการจัดเก็บพลังงานเพื่อนำไปใช้ในโอกาสต่างๆ การนำเทคนิคของการควบคุมแรงดันจึงเป็นเรื่องจำเป็นนอกเหนือจากการแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรง ทั้งนี้

เพื่อป้องกันการเสียหายของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อันเนื่องมาจากแรงดันสูงเกินไปจนทำให้วงจรเสียหาย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานทางกลของระบบที่มีความถี่ทำงานในช่วงความถี่ต่ำกว่า 100 Hz โดยใช้วัสดุไพโซอิเล็กทริกทางการค้าเป็นตัวแปลงพลังงาน และเลือกใช้หลักการทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงและจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุอย่างมีประสิทธิภาพพอเพียงทั้งกรณีที่น่าไปใช้งานโดยตรงและกรณีจัดเก็บในแบตเตอรี่

1.2 การตรวจเอกสาร

การเก็บเกี่ยวพลังงานเป็นเทคนิคที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากสิ่งแวดล้อมไปเป็นพลังงานที่ใช้งานในระบบ ดังนั้นส่วนประกอบหลักสำคัญคือ ระบบที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงพลังงาน และเทคนิคที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานสูงสุด แหล่งพลังงานที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อม เช่น แสงสว่าง ความร้อน กระแสลม และการสั่นของสิ่งต่างๆ เป็นต้น สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานอีกรูปหนึ่งได้โดยที่ระดับพลังงานของแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อม การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่น (vibration energy harvesting) เป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีข้อได้เปรียบที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานกลในรูปแบบอื่นๆ ทั้งนี้เพราะเป็นแหล่งพลังงานที่พบเห็นง่าย วัสดุที่มีประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานคือวัสดุไพโซอิเล็กทริก เนื่องจากให้ความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าต่อมวลหรือต่อปริมาตรสูงและคงที่ตลอดอายุการใช้งาน

การศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นในห้องปฏิบัติการโดยการเลียนแบบการสั่นในสิ่งแวดล้อมสามารถทำได้หลายแนวทางการหนึ่งคือ ให้แรงกลกับวัสดุไพโซอิเล็กทริก ที่ได้รับพลังงานสั่นด้วยวิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้า นั่นคือจ่ายสัญญาณให้กับขดลวดเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ส่งแรงดูดและผลักกันกับแม่เหล็กที่ติดอยู่บนคานติลเวอร์ สามารถควบคุมความถี่และความแรงของการสั่นได้ในช่วงการทำงานที่ต้องการ (Roundy et al., 2005; Beeby, Tudor and White, 2006) ได้มีการศึกษาลักษณะการสั่นของคานในสั่นย่านความถี่ต่ำและการกระตุ้นน้อยๆที่น่าไปประยุกต์ใช้ในเมมส์ หรือ MEMS (มาจาก microelectromechanical system) รูปแบบของคาน ขนาดมวล การกระตุ้นของคาน แรงกระทำ และความเร่ง ล้วนมีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเก็บเกี่ยวพลังงานสั่น (Roundy et al., 2005)

ในการนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริกมาใช้งานนั้นสามารถทำได้โดยการนำวงจรเรียงกระแสต่อขนานกับวัสดุทำให้แรงดันและกระแสไฟฟ้าถูกแปลงให้ไหลทางเดียวและจากนั้นมีการทำให้แรงดันเรียบด้วยตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับวงจร

เรียงกระแสต่อขนานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป วิธีการข้างต้นเรียกว่าเทคนิคมาตรฐาน (standard technique) เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือเครื่องมือที่ทำงานโดยอาศัยไฟฟ้า กระแสตรงนั้นมีความต้องการกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนั้นหากระบบต้องการแรงดันและ กระแสในวงจรเพิ่มขึ้นจึงต้องมีการปรับปรุงวงจรกับวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกให้ทำหน้าที่เป็น แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรดังกล่าวไปด้วย เทคนิคหนึ่งที่ใช้คือการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับ วัสดุไพโอโซอิเล็กทริกเพื่อลดค่าความเหนี่ยวนำเชิงซ้อน (complex inductance) การเลือกใช้ ค่าที่เหมาะสมอาจทำได้โดยอาศัยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (computer simulation) ในเวลา เดียวกันเมื่อคำนึงถึงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า วัสดุชนิดเซรามิกที่มีสมบัติไพโอโซอิเล็กทริก มักให้ความหนาแน่นพลังงานสูงกว่าชนิดพอลิเมอร์ (Roundy, Wright and Rabaey, 2003) ค่า ดังกล่าวมีผลต่อจุดเริ่มต้นทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หากต้องการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ได้ จากวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกจะต้องมีการพัฒนาองค์ประกอบอื่นๆควบคู่ไปกับการคัดเลือกวัสดุซึ่ง ไม่ว่าจะเป็เซรามิกหรือพอลิเมอร์ก็ตาม แนวทางหนึ่งที่มีการรายงานคือการพัฒนาวงจร อิเล็กทรอนิกส์เชื่อมต่อกับวัสดุ โดยการเพิ่มกลไกเปิดปิดสวิตช์ (switch) ที่นำไปสู่การเพิ่มขึ้น ของกำลังไฟฟ้าคร่อมโหลด (load) เทคนิคที่รายงานเทคนิคหนึ่งคือเทคนิคไม่เชิงเส้น (non-linear technique) ชื่อเรียกเฉพาะ(ภาษาอังกฤษ) ว่า synchronous switch harvesting on inductor (SSHI) หรือ เอสเอสเอสไอ ประกอบด้วยสวิตช์ที่ถูกควบคุมโดยไฟเลี้ยงวงจรให้ ทำงานที่ตำแหน่งสูงสุดและต่ำสุดของการกระจัดของการสั่น วิธีนี้พบว่าช่วยยกระดับกำลังไฟฟ้า สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคมาตรฐาน (Guyomar et al., 2005; Lefeuvre et al., 2006 and Badel et al., 2007)

การใช้พอลิเมอร์ไพโอโซอิเล็กทริกบางชนิดในการเก็บเกี่ยวพลังงาน ในช่วงเวลา ที่ผ่านมามีการวิจัยพัฒนาอย่างรวดเร็ว (Lang and Muensit, 2006) การประยุกต์ใช้ที่ น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง ได้แก่ แผ่นรองในรองเท้า (shoe-mount insert) ทำด้วยพอลิไวนิลลิดีน-ฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride, PVDF) หรือ พีวีดีเอฟ ประกอบด้วยแผ่นพีวีดีเอฟความ หนา 28 μm เรียงซ้อนกันหลายชั้น เมื่อเดินย่ำด้วยความเร็วปกติได้กำลังไฟฟ้าประมาณ 1.3 mW (Beeby, Tudor and White, 2006)

การประยุกต์ที่น่าทึ่งเป็นอย่างยิ่งอีกตัวอย่างหนึ่งก็คือต้นไม้ไพโอโซอิเล็กทริก (<http://www.energyharvestingjournal.com>) มีใบทำด้วยพีวีดีเอฟแปลงพลังงานลมที่มากกระทบ ใบพีวีดีเอฟเป็นพลังงานไฟฟ้า ได้กำลังไฟฟ้าประมาณ 100 pW (Henderson, 2011) ซึ่งเป็น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ค่อนข้างต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงลมน้อยๆทำให้ใบไม้ประดิษฐ์ได้รับแรง กระทำไม่มากนัก จึงต้องการการพัฒนาทางเทคนิคต่อไป การประยุกต์ใช้งานอีกลักษณะหนึ่งคือ การให้พลังงานไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่อง (burst mode) เป็นเทคนิคให้กำลังไฟฟ้าแก่อุปกรณ์ไร้สาย ให้ส่งชุดคำสั่งข้อมูลด้วยการกดสวิตช์เพียงหนึ่งครั้งโดยอาศัยวงจรจัดการการปล่อยกำลังไฟฟ้า (Tan, Hoe and Panda, 2006)

1.3 วัตถุประสงค์

- 1.3.1 เพื่อศึกษากระบวนการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยวิธีการทางไพโซอิเล็กทริกตลอดทั้งกระบวนการโดยอาศัยโครงสร้างเก็บเกี่ยวพลังงานแบบมีมคานติลิวอร์
- 1.3.2 พัฒนาและสาธิตการนำพลังงานไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวด้วยวัสดุไพโซอิเล็กทริกมาเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานขนาดเล็ก ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้พลังงานต่ำหรือจัดเก็บในแบตเตอรี่ทุติยภูมิ

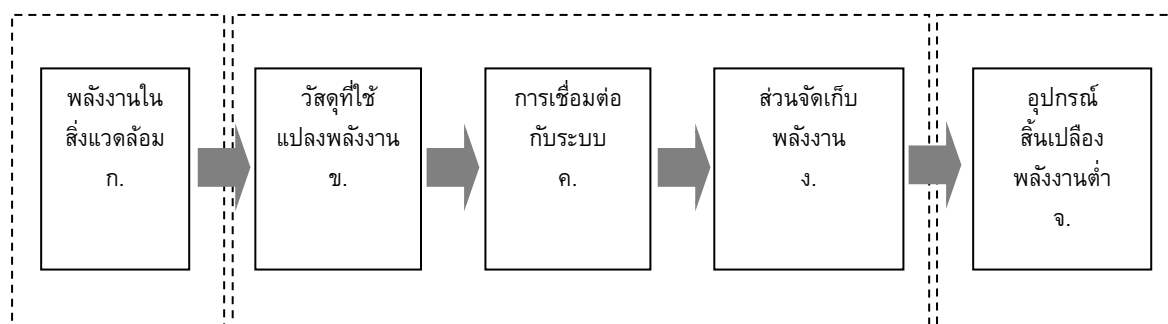
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเก็บเกี่ยวพลังงานกลด้วยวิธีทางไพโซอิเล็กทริก โดยเริ่มจากหัวข้อหลักการเก็บเกี่ยวพลังงาน วัสดุไพโซอิเล็กทริก โครงสร้างคานติลิวเวอร์ที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานกล การเลือกแบนด์วิดท์ (bandwidth) การวิเคราะห์ความถี่เรโซแนนซ์ (resonance) ของระบบ อุปกรณ์และวงจรเชื่อมต่อที่เกี่ยวข้อง แต่ละหัวข้อมีรายละเอียดดังนี้

2.1 หลักการเก็บเกี่ยวพลังงาน

การเก็บเกี่ยวพลังงาน (energy harvesting, energy scavenging) คือ กระบวนการนำพลังงานที่ปรากฏในสิ่งแวดล้อมมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถจัดเก็บหรือป้อนให้แก่อุปกรณ์พกพาและอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในระดับน้อยกว่า 1 วัตต์ลงไป มี 5 องค์ประกอบหลักดังภาพประกอบที่ 2.1



ภาพประกอบที่ 2.1 องค์ประกอบหลักของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน

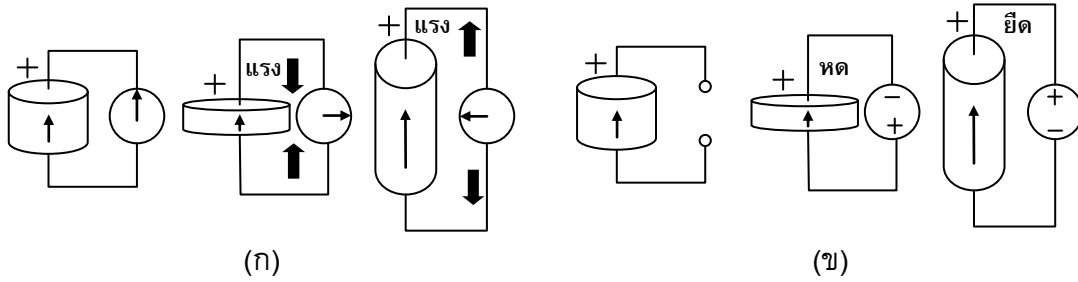
จากภาพประกอบที่ 2.1

- ก. พลังงานในสิ่งแวดล้อมที่ต้องการเก็บเกี่ยว เช่น การสั่นจากเครื่องจักรที่กำลังทำงาน ลมพัด เป็นต้น
- ข. วัสดุที่ทำหน้าที่เป็นทรานสดิวเซอร์ (transducer) ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์แปลงพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่ง ในที่นี้ใช้วัสดุไพโซอิเล็กทริกแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาจนำไปเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างลักษณะอื่นๆ
- ค. การเชื่อมต่อระหว่างวัสดุไพโซอิเล็กทริกและแหล่งกักเก็บหรือเชื่อมต่อกับวงจรภายนอกของอุปกรณ์ วงจรที่นิยมใช้ในการเชื่อมต่อ เช่น วงจรเรียงกระแส วงจรควบคุมแรงดัน เป็นต้น
- ง. ส่วนจัดเก็บพลังงานที่แปลงได้ เช่น ตัวเก็บประจุ แบตเตอรี่ เป็นต้น
- จ. ความต้านทานภายนอกซึ่งอาจเป็นอุปกรณ์พกพา อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ไร้สาย เช่น เซนเซอร์(ตัวตรวจรู้)ไร้สาย (wireless sensor) ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) เป็นต้น

2.2 ทฤษฎีทางไพโซอิเล็กทริก

2.2.1 ปฏิกิริยาไพโซอิเล็กทริก สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก และสมบัติที่เกี่ยวข้อง

คำว่า piezo ในภาษาอังกฤษ มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก ซึ่งหมายถึง to press นำมารวมกับคำว่า electric ซึ่งหมายถึง ไฟฟ้า เป็นคำว่า piezoelectric หรือ ไพโซอิเล็กทริก หมายถึง ไฟฟ้าที่เกิดจากความดัน เกี่ยวข้องกับสมบัติทางกลและสมบัติทางไฟฟ้า นั่นคือเมื่อออกแรงหรือมีความเค้น (stress) มากกระทำกับวัสดุจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณประจุที่ผิวของวัสดุ ก่อให้เกิดการกระจัดทางไฟฟ้าหรือความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (electric flux density) โดยศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับแรงที่กระทำ เรียกว่า ปฏิกิริยาไพโซอิเล็กทริกแบบตรง (direct piezoelectric effect) ดังภาพประกอบที่ 2.2 (ก) ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1880 โดย ปีแอร์ คิวรี (Pierre Curie) และ ฌาคส์ คิวรี (Jacques Curie) ในทางกลับกันเมื่อให้สนามไฟฟ้าผ่านวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปทางกลหรือเกิดความเครียด (strain) ในวัสดุ ด้วยขนาดการเปลี่ยนแปลงที่แปรผันตามความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ได้รับ เรียกว่า ปฏิกิริยาไพโซอิเล็กทริกแบบผกผัน (converse piezoelectric effect) ดังภาพประกอบที่ 2.2 (ข)



ภาพประกอบที่ 2.2 ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบ (ก) ตรง และ (ข) ผันกลับ

สมการทางไพโซอิเล็กทริก (IEEE Standard on Piezoelectricity, 1987):

$$D = dT + \mathcal{E}^T E \quad (2.1)$$

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

D คือ การกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement) หน่วย C/m^2

T คือ ความเค้น (mechanical stress) หน่วย N/m^2

E คือ สนามไฟฟ้า (mechanical strain) หน่วย V/m

S คือ ความเครียด (mechanical strain)

d คือ สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient) หน่วย m/V
หรือ C/N

s^E คือ ความหยุ่น (elastic compliance) วัดที่สนามไฟฟ้าคงที่ หน่วย m^2/N

\mathcal{E}^T คือ ค่าสภาพยอม (permittivity) วัดที่ความเค้นคงที่ หน่วย F/m

การเก็บเกี่ยวพลังงานมีสมการหลักคือ (2.1) สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกที่สนใจคือ d มีชื่อเรียกเฉพาะว่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกประจุ (piezoelectric charge coefficient) การรายงานสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกของวัสดุ จะมีการอ้างอิงพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate) โดยกำหนดให้ตัวเลขกำกับแกน X, Y และ Z มีทิศทางเป็น 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ส่วนเลข 4, 5 และ 6 แสดงทิศทางแนวการเฉือน (shear axis) รอบแกน X, Y และ Z ตามลำดับ ในกรณีของปรากฏการณ์ ตัวเลขตัวแรกหมายถึง ทิศทางของความเค้นที่ให้แก่วัสดุ ตัวเลขที่สองหมายถึงทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัสดุ

โดยทั่วไปวัสดุที่มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าอาจถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วคู่ (dipole) และเกิดการกระจัดทางไฟฟ้าได้ เรียกฉนวนนี้ว่า ไดอิเล็กทริก (dielectric) วัสดุโพซิโวลีติกส่วนใหญ่เป็นไดอิเล็กทริกที่ดี จำนวนขั้วคู่ต่อปริมาตรนิยามว่าเป็นโพลาริเซชัน (polarization) ความสามารถในการถูกเหนี่ยวนำหรือเกิดโพลาริเซชันของวัสดุแตกต่างกัน ขึ้นกับสภาพยอมของวัสดุ โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้ $D = P + \epsilon_0 E$ หรือ $D = \epsilon_r \epsilon_0 E = \epsilon E$ เมื่อ P คือ โพลาริเซชันของวัสดุ E คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ผ่านวัสดุ ϵ คือ สภาพยอมของไดอิเล็กทริก ϵ_0 คือ สภาพยอมของสุญญากาศ (vacuum permittivity = 8.854×10^{-12} F/m) ϵ_r คือ สภาพยอมสัมพัทธ์หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ในทางปฏิบัติหาค่าได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าและนำมาคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกดังสมการ

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{tC}{\epsilon_0 A} \quad (2.3)$$

t คือ ความหนาของวัสดุ หน่วย m

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ หน่วย m^2

C คือ ความเก็บประจุ หน่วย F

วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีการให้สนามไฟฟ้า ย่อมมีการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งไปในเนื้อสาร จึงมีการวิเคราะห์ในพจน์ของ D เรียกว่า ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss, dissipation factor) สามารถวัดได้โดยตรงพร้อมกันกับการวัดค่าความจุไฟฟ้า

2.2.2 การคู่ควบ โหมดการสั่น ค่าคุณภาพการใช้งาน

การแปลงพลังงานเชิงกลเป็นไฟฟ้าค่าที่บอกถึงความสามารถของวัสดุวิเคราะห์ได้ในพจน์ของ สัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้า – กล (electromechanical coupling coefficient) มีนิยามว่า คือ อัตราส่วนของพลังงานที่ก่อให้เกิดต่อพลังงานที่ได้รับ เขียนแทนด้วย k^2 สำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานมีค่าดังนี้

$$k^2 = \text{พลังงานไฟฟ้าจากวัสดุโพซิโวลีติก} / \text{พลังงานกลที่ป้อนให้กับวัสดุ}$$

ในการหาค่า k^2 ของวัสดุ จะต้องรู้ค่าความถี่ที่วัสดุโพซิโวลีติกดูดกลืนพลังงานสูงสุดซึ่งจะทำให้ได้พลังงานออกมามากที่สุดเช่นกัน ในห้องปฏิบัติการนิยามหา

ค่าความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์หรือสั่นพ้อง ด้วยวิธีของเมสัน (Mason, 1954) โดยการป้อน สนามไฟฟ้าให้แก่สารและสังเกตความถี่ที่สารให้ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะสอดคล้องกับความต้านทานของสารต่ำสุดทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารมากที่สุด การสั่นพ้องขึ้นกับ โหมดการสั่น (mode of vibration) และรูปร่าง (shape) ของชิ้นงาน แบ่งออกเป็น 5 แบบ ดังตารางที่ 2.1 k^2 ที่คำนวณได้จากตารางนำไปวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ต่างๆ ได้ดังสมการต่อไปนี้ (Ikeda, 1990)

$$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{\epsilon_{33}^T s_{11}^E} \quad (2.4)$$

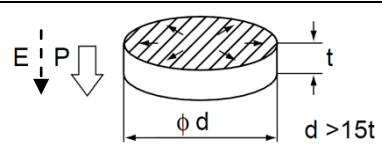
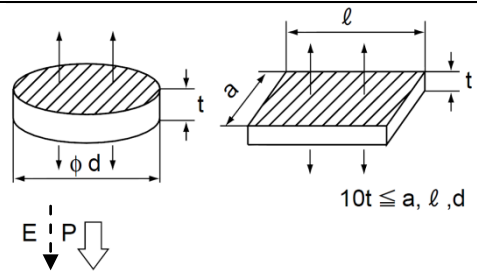
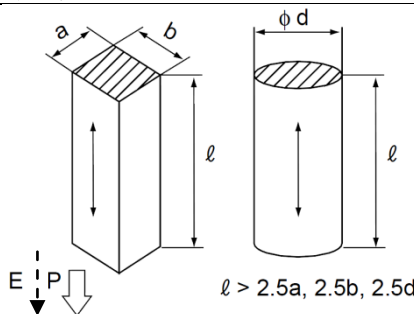
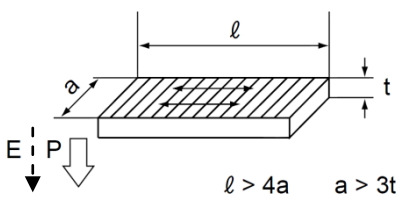
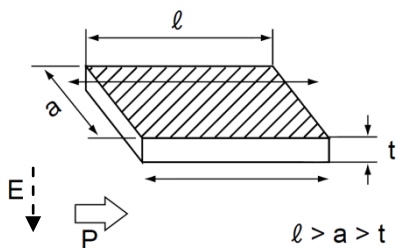
$$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{\epsilon_{33}^T s_{33}^E} \quad (2.5)$$

k_{31}^2 และ k_{33}^2 สัมประสิทธิ์คู่ควบตามขวาง และตามยาว ตามลำดับ

d_{31} และ d_{33} สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกประจุวัดตั้งฉากและขนานกับ สนามไฟฟ้าตามลำดับ

s_{31}^E และ s_{33}^E ต่างเป็นค่าความหยุ่นตามยาวเมื่อสนามไฟฟ้าคงที่

ตารางที่ 2.1 โหมดการสั่นหลัก 5 แบบของวัสดุไพโซอิเล็กทริก เมื่อได้รับสนามไฟฟ้า กระแสสลับ และสมการที่ใช้หาสัมประสิทธิ์คู้ควมไฟฟ้า - กล จากวิธีเรโซแนนซ์ (Murata Manufacturing Co. Ltd., 2008)

โหมดการสั่น	รูปร่างของวัสดุ	สัมประสิทธิ์คู้ควมไฟฟ้า - กล
แนวรัศมี		$k_p^2 \cong 2.529 \cdot \frac{f_a - f_r}{f_r}$
แนวความหนา		$k_t^2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right)$
แนวความยาวตามความสูง		$k_{33}^2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right)$
แนวความยาวตามขวาง		$\frac{k_{31}^2}{1 - k_{31}^2} = -\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_a}{f_r} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_a}{f_r}\right)$
แนวเฉียง		$k_{15}^2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right)$

⇨ : ทิศทางของโพลาริเซชัน --▶ : ทิศทางของสนามไฟฟ้า

→ : ทิศทางความเครียดภายในวัสดุ f_r : ความถี่เรโซแนนซ์ f_a : ความถี่แอนติเรโซแนนซ์

ในระบบเก็บเกี่ยวพลังงานค่าที่บอกถึงคุณภาพของระบบที่นำไปใช้งานคือ ค่าคุณภาพ หรือ Figure of Merit (FoM) ซึ่งเป็นผลคูณระหว่าง สัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้า – กลของวัสดุไพโซอิเล็กทริกกับแฟกเตอร์คุณภาพ (quality factor หรือ Q factor) ของวัสดุตั้งสมการ

$$FoM = k^2 Q \quad (2.6)$$

$$Q = f_r / \Delta f \quad (2.7)$$

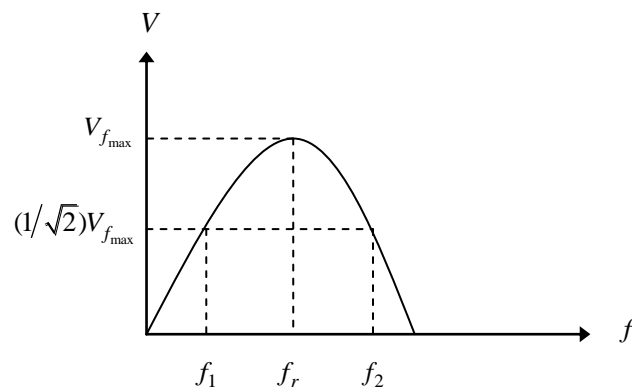
Q ที่ได้คือ แฟกเตอร์คุณภาพ (quality factor)

f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์

f_0 คือ ความถี่แอนติเรโซแนนซ์

Δf คือ ผลต่างระหว่าง f_1 และ f_2

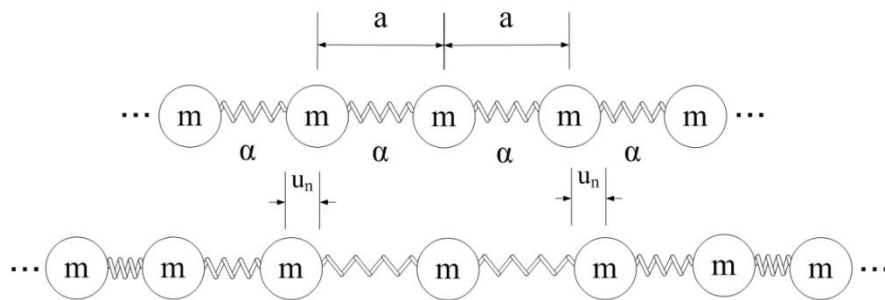
ถ้ากำหนดให้ $V_{f_{\max}}$ คือ แรงดันที่วัดได้ที่ความถี่เรโซแนนซ์ จะได้ว่า $V_{\Delta f} = (1/\sqrt{2})V_{f_{\max}}$ แบนด์วิดท์และค่าต่างๆของระบบ แสดงดังภาพประกอบที่ 2.3



ภาพประกอบที่ 2.3 การวิเคราะห์แบนด์วิดท์จากศักย์ไฟฟ้าและความถี่

2.2.3 แบบจำลองทางฟิสิกส์ของไอโซอิเล็กทริก

วัสดุประกอบด้วยอะตอมจำนวนอนันต์ที่มีมวลแต่ละ m เรียงตัวกันเป็นเส้นตรง ด้วยระยะห่าง a (lattice constant) ให้ u_n เป็นระยะทางที่เลื่อนจากตำแหน่งสมดุล ถ้าอะตอมแต่ละตัวถูกดึงกันด้วยแรงของสปริง¹ และเป็นแรงที่มีผลกับอะตอมข้างเคียงที่อยู่ใกล้กันที่สุด ให้ α เป็นค่าคงที่แรง (force constant) ดังภาพประกอบที่ 2.4



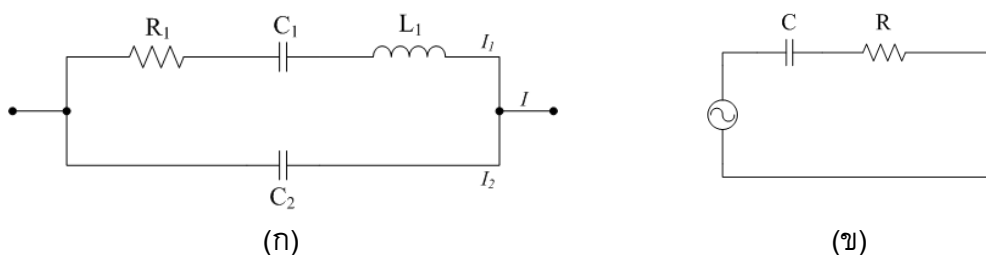
ภาพประกอบที่ 2.4 การสั่นของโครงผลึกเมื่อได้รับพลังงาน

เมื่อคลื่นเดินทางผ่านตัวกลางในของแข็งซึ่งเป็นตัวกลางที่มีเนื้อวัสดุต่อเนื่อง ในขณะที่เดียวกันอะตอมแต่ละตัวก็มีแรงกระทำซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดการบังคับให้อยู่ในตำแหน่งที่สมดุล ดังนั้นพลังงานที่อะตอมได้รับจึงทำให้เกิดการสั่นรอบ ๆ ตำแหน่งสมดุลเรียกว่า การสั่นของโครงผลึก (lattice vibration)

การสั่นของโครงผลึกวัสดุไอโซอิเล็กทริกจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้ากระแสสลับ (ac signal) เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นพลาสมาไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง (Cady, 1946) ที่ความถี่เรโซแนนซ์ของโครงสร้างผลึก พฤติกรรมของผลึกไอโซอิเล็กทริกเป็นเสมือนวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน R ขดลวด L และตัวเก็บประจุ C ดังภาพประกอบที่ 2.5 (ก) ประกอบด้วยวงจรสองแขนง (branch) เรโซแนนซ์อนุกรมจะเกิดจาก L_1 และ C_1 ส่วน C_2 จะเสมือนไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล (open circuit) ความถี่นี้จึงมีกระแสไหลผ่านในวงจรมากที่สุด เรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์ สำหรับเรโซแนนซ์แบบขนานจะเกิดจาก L_1 และ C_2 ส่วน C_1 และ C_2 เสมือนรวมกันหรือไม่มีค่าต่างศักย์ (shorted circuit) ดังนั้นที่ความถี่นี้จึงมีกระแสไหล

¹ กฎของฮุก (Hooke's law) กล่าวว่า ในช่วงของความยืดหยุ่น (elastic) ความเค้นจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเครียดนั้น สัมพันธ์กับมวลติดสปริงตามสมการ $F = -kx$ เมื่อ F แรงเนื่องจากสปริง k ค่าคงที่สปริง x ระยะกระจัดจากจุดสมดุลเมื่อออกแรงดึงสปริง

ผ่านในวงจรน้อยที่สุดเรียกว่า ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ ขณะเกิดเรโซแนนซ์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในวงจรได้สูงสุด สามารถตัดองค์ประกอบเชิงซ้อนของอุปกรณ์เหลือเพียงตัวต้านทาน ด้วยเหตุผลนี้จึงนำไปหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ภาพประกอบที่ 2.5 (ข) คือกรณีของแบบจำลองทางไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ



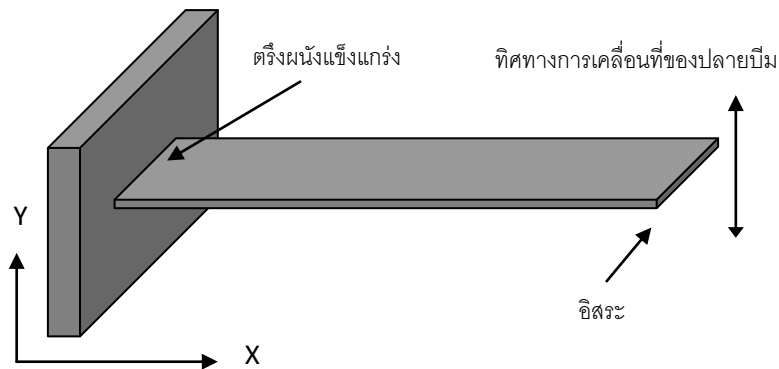
ภาพประกอบที่ 2.5 วงจรสมมูล (equivalent circuit) ของวัสดุไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ (ก) ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (ข) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

2.3 การเก็บเกี่ยวพลังงานสั่น

โครงสร้างแบบบีมคานติลิวเวอร์เป็นโครงสร้างที่นิยมแพร่หลายในการเก็บเกี่ยวพลังงานเรียกโดยย่อว่าบีม สำหรับบีมที่มีการติดวัสดุไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ไว้ด้วยกันจะได้รับแรงกระทำทางกลไปพร้อมๆกัน มีหลักการที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.3.1 หลักการของบีมคานติลิวเวอร์

โครงสร้างบีมมีความยาวมากกว่าความกว้างและความหนา ปลายบีมด้านหนึ่งยึดติดกับผนังแข็งแรงและปลายอีกด้านหนึ่งเคลื่อนที่อย่างอิสระ ดังภาพประกอบที่ 2.6



ภาพประกอบที่ 2.6 โครงสร้างบีม

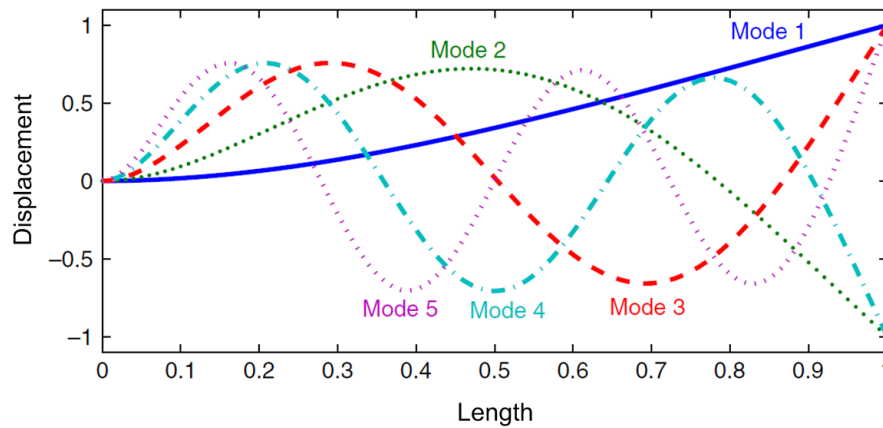
การสั่นของบีม ทำได้ 2 แบบคือ

- กรณีพลวัต (dynamic case) เป็นการสั่นที่ความถี่เรโซแนนซ์
- กรณีกึ่งสถิตศาสตร์ (quasistatic case) สั่นที่ความถี่ต่ำหรือสูงกว่าเรโซแนนซ์

กรณีแรกคือกรณีที่สนใจ ภาพประกอบที่ 2.7 เป็นตัวอย่างของการสั่นของบีมตามสมการเคลื่อนที่ $1 + \cosh(\alpha L) \cos(\alpha L) = 0$ มีโหมดการสั่นดังตารางที่ 2.2 โหมดที่ 1 เป็นการสั่นที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ต่ำ จึงมักเป็นโหมดที่ได้รับความสนใจ

ตารางที่ 2.2 ค่าคง α_i ที่ของโหมดการสั่นของบีม

โหมดการสั่นที่ i	α_i
1	1.87510407
2	4.69409113
3	7.85475744
4	10.99554073
5	14.13716839



ภาพประกอบที่ 2.7 รูปแบบการสั่นของบีม 5 โหมด (Wang and Yuan, 2008)

$$f_i = \frac{\alpha_i^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{YI}{\rho A}} \quad (2.8)$$

f_i คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของบีม หน่วย Hz

α_i คือ โหมดการสั่นที่ i

L คือ ความยาวบีม หน่วย m

Y คือ โมดูลัสของยัง หน่วย Pa

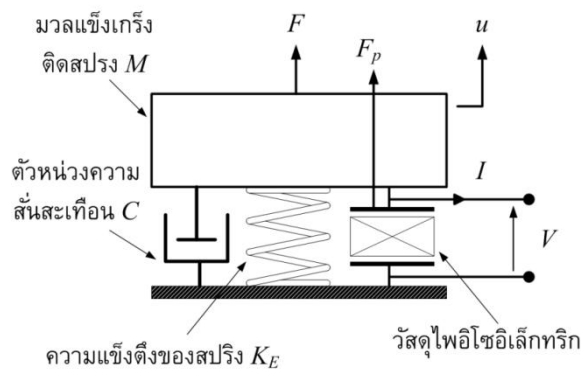
I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของบีม หน่วย m^4

ρ คือ ความหนาแน่นของเหล็ก หน่วย kg / m^3

A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของความยาวบีม หน่วย m^2

2.3.2 แบบจำลองทางไฟฟ้ากล (electromechanical model)

แบบจำลองที่แสดงพฤติกรรมของวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่อยู่ในโครงสร้างทางวิศวกรรมของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน แสดงดังภาพประกอบที่ 2.8 ประกอบด้วย มวล M เคลื่อนที่ด้วยแรง F มีทิศทางเคลื่อนที่เป็นระยะกระจัด u แรงที่กระทำกับวัสดุไพโซอิเล็กทริก F_p ความแข็งตึงของสปริง K_E และตัวหน่วงการสั่นสะท้อน (damper) C ดังภาพประกอบที่ 2.8



ภาพประกอบที่ 2.8 แบบจำลองทางไฟฟ้ากลของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่มีวัสดุไพโซอิเล็กทริก

เมื่อวัสดุไพโซอิเล็กทริกติดบนมีมที่กำลังสั่น เกิดกระแส I และความต่างศักย์ V จากวัสดุ สมการทางกลของระบบที่มีแบบจำลองดังภาพประกอบที่ 2.8 $F_p = K_{PE} u + \alpha V$ และ $I = \alpha \dot{u} + C_0 \dot{V}$ เมื่อ α คือแฟกเตอร์ของแรง (force factor) (Lefevre et al., 2006) C_0 คือความจุไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก ค่าความแข็งตึงของระบบ K_E เป็นผลรวมของความแข็งตึงของวัสดุ K_{PE} กับความแข็งตึงของมีม K_S ดังสมการ $K_E = K_{PE} + K_S$ จากกรณีพลวัตวัตถุ M เคลื่อนที่ด้วยระยะกระจัด u ดังสมการ (Badel et al., 2007)

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + K_E u = F - \alpha V \quad (2.9)$$

$$I = \alpha \dot{u} + C_0 \dot{V} \quad (2.10)$$

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ได้พลังงานของระบบ คือ

$$\int F \dot{u} dt = \frac{1}{2} M \dot{u}^2 + \frac{1}{2} K_E \dot{u}^2 + \int C \dot{u}^2 dt + \int \alpha V \dot{u} dt \quad (2.11)$$

พจน์ซ้ายมือคือพลังงานกลที่ระบบได้รับ (input energy) พจน์ทางขวาของสมการ คือ พลังงานจลน์ (kinetic energy) พลังงานศักย์ยืดหยุ่น (potential elastic energy) ความสูญเสียทางกล (mechanical loss) และพลังงานเปลี่ยนรูป (converted energy) ตามลำดับ พลังงานเปลี่ยนรูปเป็นส่วนหนึ่งของพลังงานถ่ายโอนเชิงกลในรูปแบบทางไฟฟ้าจึงเป็นพจน์ที่

ต้องการมากที่สุดในการเก็บเกี่ยวพลังงาน สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของพลังงานย่อย 2 ชนิด ดังสมการ

$$\int \alpha V \dot{v} dt = \frac{1}{2} C_0 V^2 + \int V i dt \quad (2.12)$$

พจน์แรกขวามือของสมการคือพลังงานไฟฟ้าสถิต (electrostatic energy) ที่สะสมในตัววัสดุ ส่วนอีกพจน์ที่เหลือคือพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ (harvested energy)

เพื่อนำไปใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้องทำขั้วไฟฟ้าและต่อดัวยลวดตัวนำที่มีความต้านทานต่ำ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เรียกการเชื่อมต่อแบบนี้ว่า การเชื่อมต่อแบบมาตรฐาน (standard interface) เมื่อการสั่นต่อเนื่องครบ 1 รอบ กระแสไฟฟ้าตรงที่ได้ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของศักย์ไฟฟ้าคือ

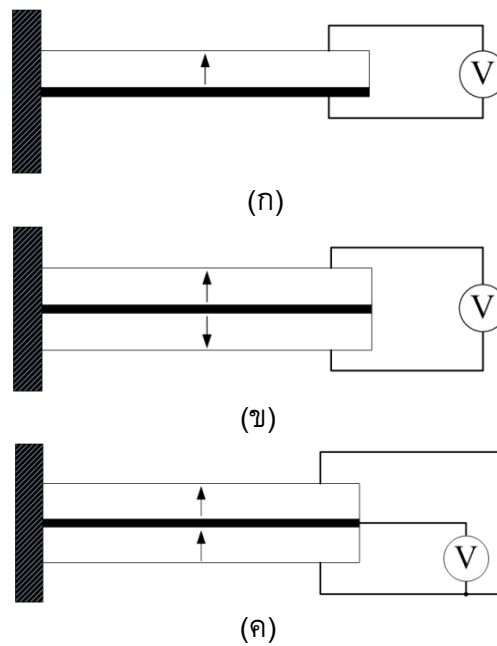
$$E_{stand} = \int_{t_1}^{t_2} V_{DC} i dt$$

เนื่องจากการหน่วงของบีมมีผลกับแรงดันและกระแสที่ได้จึงต้องกำหนดเงื่อนไขคือ ขนาดของระยะกระจัดและขนาดของแรงภายนอกคงที่ ขณะที่ความถี่เรโซแนนซ์ได้สมการกำลังไฟฟ้าของวงจรมาตรฐาน ดังนี้

$$P_{stand} = \frac{16f_0^2 \alpha^2 R_L}{(1 + 4f_0 R_L C_0)^2} \times \left[\frac{F_M}{2\pi C f_0 + \left(16f_0^2 \alpha^2 R_L / \pi (1 + 4f_0 R_L C_0)^2\right)} \right]^2 \quad (2.13)$$

2.3.3 บีมโมนิโม่ฟและไบโม่ฟ

โครงสร้างบีมโมนิโม่ฟและไบโม่ฟ (monomorph / bimorph) เป็นรูปแบบพื้นฐาน ในการวางวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกบนตัวบีม ดังภาพประกอบที่ 2.9



ภาพประกอบที่ 2.9 โครงสร้างบีม (ก) โม่โมนิโม่ฟ (ข) ไบโม่ฟอนุกรม (ค) ไบโม่ฟขนาน (ลูกศร แทน ทิศทางของโพลาริเซชัน)

มีความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I แรงดัน V และกำลังไฟฟ้า P ดังสมการ (Meiling et al., 2009)

$$\begin{aligned}
 V_{R \rightarrow \text{series}} &\approx 2V_{R \rightarrow \text{parallel}}, \\
 I_{R \rightarrow \text{series}} &\approx \frac{1}{2}V_{R \rightarrow \text{parallel}}, \\
 P_{R \rightarrow \text{series}} &\approx P_{R \rightarrow \text{parallel}}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

เมื่อ V_R , I_R และ P_R คือ แรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้าที่วัดคร่อมตัวต้านทานตามลำดับ

2.4 แบนด์วิดท์และเรโซแนนซ์

การเพิ่มช่วงความกว้างของแบนด์วิดท์และการปรับความถี่เรโซแนนซ์ของบีมเป็นวิธีจัดการกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเก็บเกี่ยวให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด กล่าวดังหัวข้อต่อไป

2.4.1 การเลือกแบนด์วิดท์

แบนด์วิดท์เป็นคุณสมบัติหนึ่งที่ใช้พิจารณาเพื่อคัดเลือกและออกแบบระบบที่จะนำมาเป็นส่วนช่วยดักจับพลังงานในสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปมักนิยมใช้โครงสร้างแบบบีมเป็นตัวเก็บเกี่ยวแรงสั่น (Beeby et al., 2006) พลังงานสูงสุดที่จะได้จากระบบเก็บเกี่ยวพลังงานกลส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ความถี่เรโซแนนซ์ $\omega = \omega_r$ กล่าวคือ ความถี่ที่ป้อนให้ระบบเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ และเรียกว่าความถี่ทำงาน (operating frequency)

$$P = \frac{mY^2 \omega_r^3}{4\zeta_T} \quad (2.15)$$

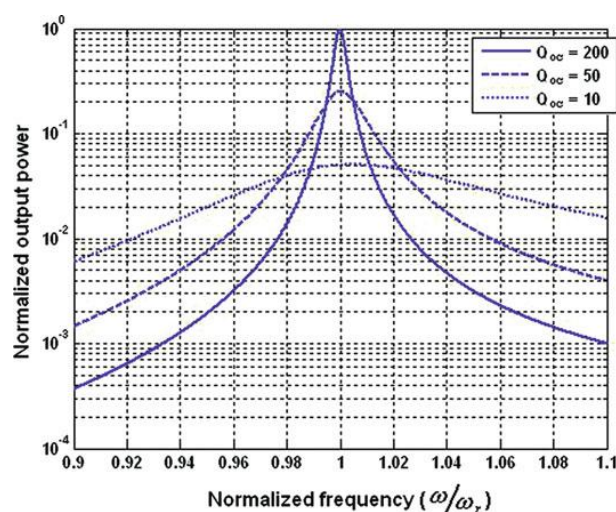
เมื่อ P คือ พลังงานที่ได้จากระบบ m คือ มวลคานสั่น ω_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ และ ζ_T คือ แฟกเตอร์การหน่วงรวม (total damping factor) หรือ $\zeta_T = \zeta_e + \zeta_m$ (Shearwood and Yates, 1997, Williams et al., 2001)

จากสมการ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากระบบเก็บเกี่ยวพลังงานกลแปรผกผันกับแฟกเตอร์การหน่วงรวม เขียนสมการใหม่ได้ดังสมการ

$$P = \frac{ma^2}{8\omega_r} \cdot Q \quad (2.16)$$

เมื่อ $Q = 1/(2\zeta)$ ถ้าบีมมีค่าคุณภาพสูง ค่าความหน่วงจะน้อยได้กำลังไฟฟ้าสูงแต่แบนด์วิดท์แคบ นั่นคือเก็บเกี่ยวได้ดีที่ความถี่เรโซแนนซ์เท่านั้น ถ้าระบบมีค่าคุณภาพต่ำ

เนื่องจากความหน่วงมีค่ามาก เป็นผลให้แบนด์วิดท์กว้าง เก็บเกี่ยวได้ในช่วงความถี่ที่กว้างกว่ากรณีก่อนหน้าแต่กำลังไฟฟ้าต่ำกว่า ดังภาพประกอบที่ 2.10 ลักษณะแบนด์วิดท์ของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานกลด้วยบีบอัดที่ความถี่เรโซแนนซ์ 50 Hz เขียนกราฟระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความถี่เรโซแนนซ์ นอกจากนี้ ความถี่เรโซแนนซ์ที่ทำให้การสั่นของคานควรเป็นความถี่ต่ำ และในส่วนของมวลที่ติดบนคาน (tip mass) ควรเป็นมวลที่มีค่ามากพอที่จะทำให้ระบบคานสั่นตามเงื่อนไขที่ได้ออกแบบไว้ซึ่งทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Kazmierski and Beeby, 2011)



ภาพประกอบที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับกำลังไฟฟ้า

(Kazmierski and Beeby, 2011)

จากการที่ความถี่เรโซแนนซ์ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดแต่แบนด์วิดท์แคบ ดังนั้นหากระบบเก็บเกี่ยวพลังงานอยู่ในสภาพแวดล้อมที่สั่นนอกความถี่เรโซแนนซ์จะเป็นผลให้กำลังไฟฟ้าลดต่ำลงอย่างมาก ปกติโครงสร้างคานแบบใดแบบหนึ่งที่เก็บเกี่ยวพลังงานกลทำงานได้ที่ความถี่เรโซแนนซ์เพียงค่าเดียว (Beeby, Tudor, and White, 2006) ซึ่งการนำไปประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อมทั่วไปความถี่ที่ได้จะขึ้นกับกิจกรรมและสถานที่ ดังนั้นการทำให้อุปกรณ์หรือระบบที่ใช้เก็บเกี่ยวพลังงานสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพทุกสภาพแวดล้อมจึงเป็นสิ่งที่ต้องการ แนวทางที่ใช้คือปรับความถี่เรโซแนนซ์ให้ตรงกับความถี่ของสถานที่ที่ไปติดตั้งหรือเพิ่มช่วงความกว้างของแบนด์วิดท์ จะทำให้การเก็บเกี่ยวแรงสั่นรองรับได้หลายความถี่หรือมีช่วงทำงานที่กว้างขึ้น

2.4.2 การปรับความถี่เรโซแนนซ์

การปรับความถี่เรโซแนนซ์ทำได้สองวิธี คือ การปรับทางกลซึ่งเป็นการเปลี่ยนทางโครงสร้างของบีม และการปรับทางไฟฟ้าซึ่งใช้วิธีการเปลี่ยนโหลด²ทางไฟฟ้า (electrical load) ภายในวัสดุไพโซอิเล็กทริก

- การปรับทางกล

วิธีเปลี่ยนความถี่ของระบบเชิงกลอาศัยสมการ

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.17)$$

เมื่อ f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ k คือ ค่าคงที่สปริง m คือ มวลติดสปริง

จากสมการแสดงให้เห็นว่าความถี่กำลังสองแปรผันตรงกับค่าคงที่สปริงของบีม ชนิดของวัสดุ เช่น พลาสติก หรือเหล็ก และแปรผกผันกับมวลของบีม ขนาดหรือรูปแบบของบีม การเปลี่ยนความถี่เรโซแนนซ์ทำได้หลายวิธี เช่น เปลี่ยนความยาวคาน (Gieras et al., 2007) การเลื่อนมวลสั้น (Roylance and Angell, 1979; Wu et al., 2008) เปลี่ยนวัสดุซึ่งจะเท่ากับ เปลี่ยนความแข็งดิ่งของคาน (Lee et al., 2008; Piazza et al., 2004) และเปลี่ยนโครงสร้างของคาน (Mukherjee, 2007; Hu et al., 2007)

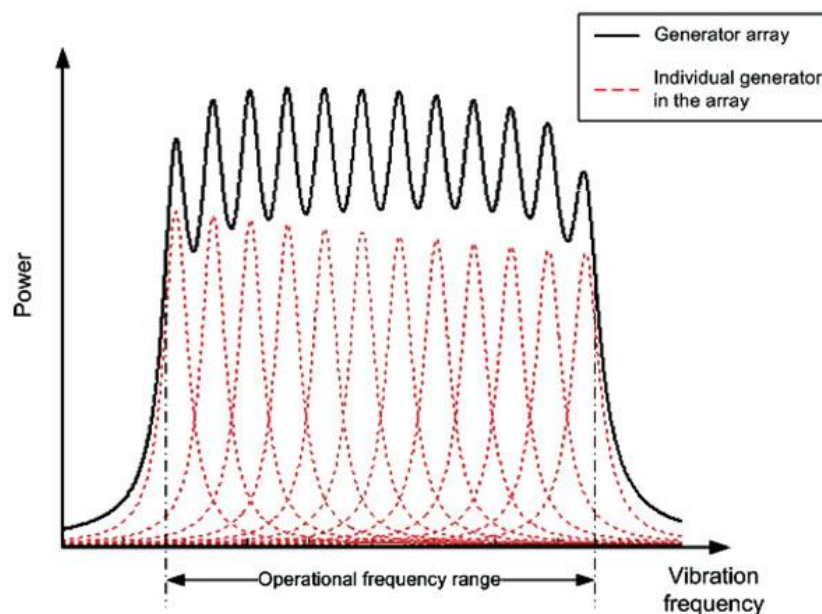
- การปรับแรงดันทางไฟฟ้า

การปรับความถี่เรโซแนนซ์ด้วยวิธีการปรับทางไฟฟ้าใช้วิธีเปลี่ยนการหน่วงทางไฟฟ้า (electrical damping) ซึ่งเป็นวิธีการที่มักใช้ในงานทางไพโซอิเล็กทริก (Wu et al., 2006) เพราะมีผลต่อกำลังไฟฟ้าของระบบ จึงมักเลือกโครงสร้างแบบไบมอर्फ เพื่อคงกำลังไฟฟ้าที่ต้องการของวัสดุไพโซอิเล็กทริกไว้ในชั้นของวัสดุชั้นใดชั้นหนึ่ง และปรับความถี่เนื่องจากโหลดที่เปลี่ยนไปในชั้นวัสดุอีกชั้น (Cammarano et al., 2010; Charnegie, 2007)

² โหลด (load) คือ ความต้านทาน ที่ต่อขนานกับวงจรไฟกระแสตรงหรือสลับเพื่อใช้ หรือควบคุมกระแสไฟที่ไหลในวงจร ไม่เพียงแต่ค่าความต้านทานเท่านั้น ยังมีโหลดความเก็บประจุ และโหลดความเหนี่ยวนำได้เช่นกัน ในกรณีที่เป็นการใช้งานทั่วไปจะหมายถึง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือเครื่องใช้ไฟฟ้า

2.4.3 การเพิ่มช่วงความกว้างแบนด์วิดท์

การเพิ่มช่วงความถี่ของระบบรับพลังงานกล เป็นวิธีเพิ่มแบนด์วิดท์ของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานซึ่งประกอบด้วยบีมหลายอันในหนึ่งระบบ ดังนั้นการเพิ่มช่วงการทำงานในวิธีนี้จำเป็นต้องประกอบด้วยบีมหลายอันและมวลติดคานที่มีหลายขนาดในแต่ละรูปแบบบีม เพื่อรองรับการสั่นที่ต่างความถี่เรโซแนนซ์กัน ดังภาพประกอบที่ 2.11 แสดงให้เห็นถึงสเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการสั่นของขบวนของบีมที่ติดตั้งในระบบ ประกอบด้วย 12 บีม สั่นที่เรโซแนนซ์ต่างกัน สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานกลได้หลายความถี่ในระบบเดียว ทำให้แบนด์วิดท์การทำงานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีอีกหลายหลักการที่สามารถเพิ่มความกว้างแบนด์วิดท์ และสามารถผนวกเข้ากับวิธีนี้ได้ คือ หลักการจำกัดแอมพลิจูด (Guo-Hua and Jin-Chao, 2007) หลักการกวัดแกว่งคู่ควบ (Ferrari et al., 2008) ความไม่เชิงเส้นของแหล่งกำเนิด (Sari et al., 2007) และสองความเสถียรของแหล่งกำเนิด (Lin et al., 2009)



ภาพประกอบที่ 2.11 สเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากบีมหลายอันในระบบ

(Huan et al., 2008)

2.5 การเชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดการสั่นกับวัสดุไพโซอิเล็กทริกและอุปกรณ์

หัวข้อนี้กล่าวถึงการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างวัสดุไพโซอิเล็กทริกกับโหลด ความต้านทาน พลังงานที่ถูกเปลี่ยนรูปจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าอยู่ในรูปแบบของ กระแสสลับ การนำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้องเปลี่ยนเป็นกระแสตรง (dc signal) มักทำ วงจรควบคุมแรงดันรวมมาในไอซีที่สลับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าต่ำสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน โดยเฉพาะ อย่างไรก็ตามส่วนสำคัญที่ทำให้ระบบจัดการพลังงานสมบูรณ์และทำงานได้อย่างเต็ม ประสิทธิภาพคือการเก็บกระแสไฟฟ้าในตัวเก็บประจุหรือแบตเตอรี่ที่หุติยภูมิ (rechargeable battery) (Li, 2008) สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคืออุปกรณ์จะสามารถทำงานได้ดีต้องถูกออกแบบ มาเพื่อใช้กำลังไฟฟ้าระดับต่ำ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ มีหัวข้อที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.5.1 หลักการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

โหลดได้รับกำลังไฟฟ้าสูงสุดในวงจรเชิงเส้นแบบกระแสตรง เมื่อผลรวมของค่า ความต้านทานรวมของแหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานรวมของโหลด กำลังไฟฟ้าที่ ได้รับ คือกำลังไฟฟ้าที่คร่อมโหลดดังสมการ

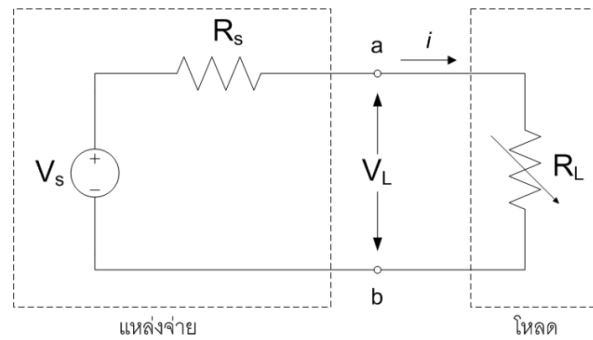
$$P_L = \frac{V_L^2}{R_L} = \frac{V_s^2 R_L}{(R_s + R_L)^2} \quad (2.18)$$

ได้ว่า R_L ที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด คือ

$$\begin{aligned} \frac{dP_L}{dR_L} &= V_s^2 \left[\frac{(R_s + R_L)^2 - 2R_L(R_s + R_L)}{(R_s + R_L)^4} \right] \\ &= V_s^2 \left[\frac{R_s - R_L}{(R_s + R_L)^3} \right] = 0 \text{ เมื่อ } R_s = R_L \\ R_s &= R_L \end{aligned} \quad (2.19)$$

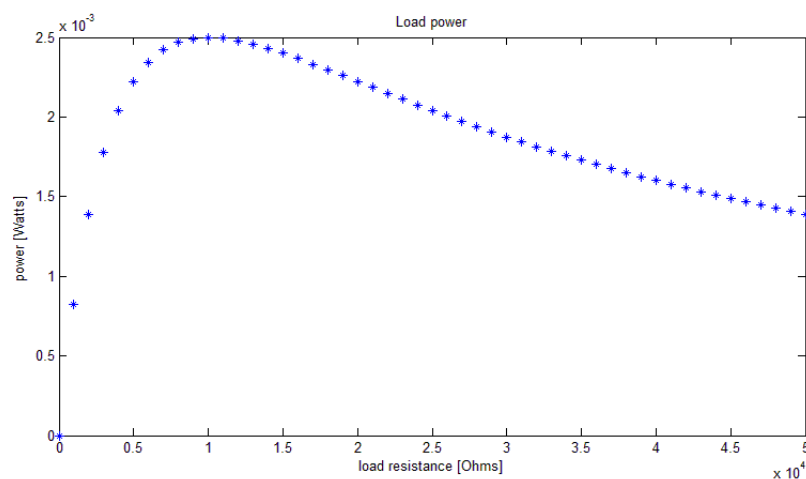
ภาพประกอบที่ 2.12 แสดงแหล่งจ่ายไฟอุดมคติ ประกอบด้วย ตัวแหล่งจ่าย แรงดัน V_s และความต้านทานภายในของแหล่งจ่าย R_s เป็นค่าอ้างอิง (Alexander and

Sadiku, 2006) แรงแดันที่คงที่สามารถพบได้ เช่น แบตเตอรี่ (แตกต่างจากแหล่งจ่ายกระแสที่ไม่สามารถทำให้คงที่ได้ เพราะกระแสในวงจรขึ้นอยู่กับโหลด) (Boylestad, 2010)



ภาพประกอบที่ 2.12 วงจรสมมูลแหล่งจ่ายแรงดันต่อโหลดปรับค่าได้ในวงจรไฟตรง

ในการออกแบบแหล่งจ่ายสิ่งที่ต้องพิจารณาคือความสามารถที่ใช้ในการส่งผ่านกำลังไฟไปยังอุปกรณ์หรือขนาดของกำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์ต้องการ จากภาพประกอบที่ 2.13 แสดงแนวโน้มของกราฟที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในบริเวณที่มีค่าโหลดต่ำกว่าค่ากำลังสูงสุด ซึ่งเป็นช่วงที่ความต้านทานเปลี่ยนแปลงได้น้อยกว่าช่วงที่ค่าความต้านทานสูงกว่า



ภาพประกอบที่ 2.13 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับที่เงื่อนไข $R_{th} = R_L$ ขนาด $10 \text{ k}\Omega$

2.5.2 วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแส คือวงจรแปลงสัญญาณไฟสลับเป็นไฟตรง (ac-to-dc converter) ประกอบด้วยไดโอดเรกติไฟเออร์ (diode rectifier) 4 ตัว ต่อกันแบบวงจรบริดจ์ ป้อนสัญญาณไฟฟ้าสลับ 1 รอบ ก่อนเข้าวงจร เมื่อผ่านวงจรดังกล่าวสัญญาณก็ยังคงครบ 1 รอบ แต่ถูกเรียงให้อยู่ในทางเดียวกันเป็นสัญญาณบวกทำให้ได้ไฟตรง เรียกว่า วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (full-wave rectifier)

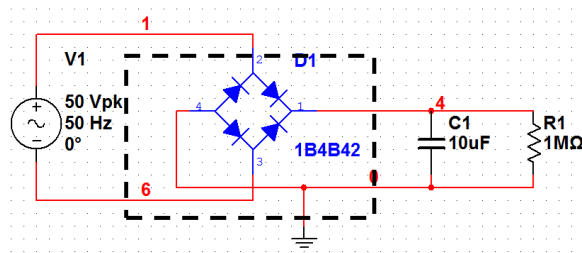
แรงดันที่ถูกจัดเรียงให้อยู่ในทางเดียวจะสูญเสียไปส่วนหนึ่ง โดยประมาณ 0.6 V หรือ 1.4 V (ในทางทฤษฎี) กรณีเป็นไดโอดแบบ เจอร์มาเนียมและซิลิคอน ตามลำดับ สัญญาณที่หายไปดังกล่าวทำให้กำลังไฟลดลง อีกทั้งยังเป็นผลมาจากการรั่วของกระแสที่ไดโอดอีกตัวหนึ่ง (ตัวที่ไม่นำกระแส) หรือเรียกว่า กระแสรั่วไหล (leakage current หรือ reverse current) จึงมีการเลือกใช้ไดโอดชนิดรอยต่อแบบชอทท์กี (Schottky barrier diode) ซึ่งสามารถนำกระแสได้โดยที่มีแรงดันประมาณ 0.15 V ทำให้แรงดันสูญเสียไปประมาณ 0.3 V (สำหรับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ทางทฤษฎี) และควรเลือกชอทท์กีไดโอดแบบที่มีกระแสรั่วไหลต่ำ (Lefeuvre et al., 2007) (ศึกษาจากแผ่นข้อมูล (data sheet)) และมีสมบัติแบบฟาสสวิตซ์ ซึ่งไดโอด (fast-switching diode) คือมีการเปลี่ยนสถานะเปิด-ปิดได้เร็ว (Davis, 2011; Wu, 2010) เหมาะกับการประยุกต์ใช้กับวัสดุโพสิโวลติกที่ความถี่สูงและแรงดันต่ำ

สัญญาณที่ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นไม่เรียบพอเรียกว่ามีระลอกของแรงดัน³ (ripple voltage) นำไปจ่ายให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการไฟตรงไม่ได้ ต้องมีตัวเก็บประจุต่อขนานกับวงจรเรียงกระแส ทำหน้าที่กรองสัญญาณไฟตรงแบบเต็มคลื่นให้เรียบหรือเกิดระลอกของแรงดันน้อยที่สุด สามารถหาค่าความจุที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันไฟสลับจากวัสดุโพสิโวลติก ความถี่ที่ทำให้บีมสั้นหรือความถี่เรโซแนนซ์ของบีมเป็นตัวกำหนดค่าความเก็บประจุ และไม่ควรมีค่าที่ต่ำกว่าที่คำนวณได้ ภาพประกอบที่ 2.14 แสดงรูปคลื่นแบบเต็มคลื่น

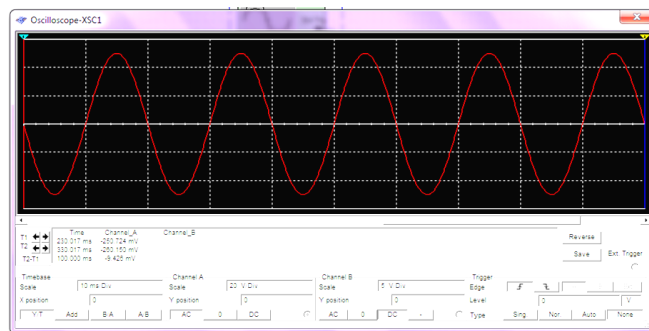
³ ระลอกของแรงดัน เกิดจากการไม่เรียบของสัญญาณที่ออกจากตัวเก็บประจุที่ใช้กรองสัญญาณที่มีขนาดไม่เหมาะสม ทำให้อุปกรณ์ชนิดรับไฟตรงไม่สามารถทำงานได้ โดยดูข้อมูลจากเอกสารอธิบายคุณสมบัติของอุปกรณ์ หรือแผ่นข้อมูล ซึ่งจะบอกถึงเปอร์เซ็นต์สัญญาณของระลอกของแรงดันที่อุปกรณ์สามารถรับได้ เป็นประโยชน์ในการออกแบบแหล่งจ่าย และเลือกใช้อุปกรณ์ในงานการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า

$$C \approx \frac{1}{2f_r R (\Delta V_o / V_m)} \quad (2.20)$$

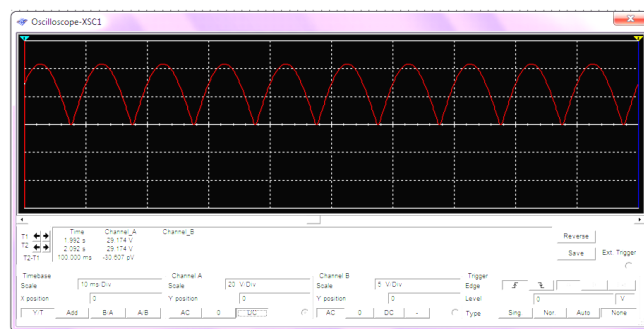
เมื่อ $\Delta V_o / V_m$ คือ เปอร์เซ็นต์ของระลอกของแรงดัน f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของปี่ม R คือ ความต้านทานที่เหมาะสม



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบที่ 2.14 (ก) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (กรอบเส้นประ) ในแบบวงจรมาตรฐาน (ข) สัญญาณรูปไซน์ก่อนเข้าวงจรเรียงกระแส (ค) สัญญาณหลังจากออกจากวงจรเรียงกระแสที่ยังไม่กรองโดยตัวเก็บประจุ

อย่างไรก็ตามโหลดแต่ละค่าไม่สามารถใช้ได้กับความเก็บประจุค่าใดก็ได้ (กรณีไม่ให้เกิดระลอกของแรงดัน) ดังนั้นการเลือกโหลดที่เหมาะสม (optimum load หรือ optimum resistance) ที่ต่อขนานกับวงจรไฟกระแสตรง ในวงจรมาตรฐานนั้นต้องมีค่าความต้านทานที่มีค่าเท่ากับความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายไฟไอซีอิเล็กทรอนิกส์ สามารถคำนวณค่าความต้านทานของวัสดุไอซีอิเล็กทรอนิกส์เพื่อเลือกโหลดที่เหมาะสมได้จาก

$$Z = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.21)$$

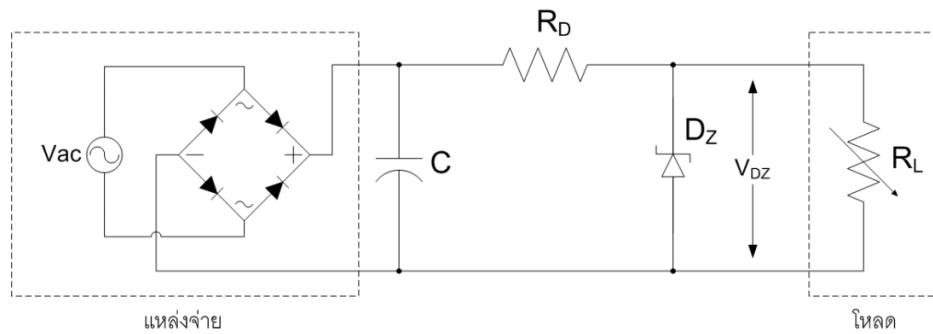
เมื่อ Z คือ ความต้านทานของวัสดุไอซีอิเล็กทรอนิกส์ f คือ ความถี่เรโซแนนซ์ C คือ ความเก็บประจุของวัสดุไอซีอิเล็กทรอนิกส์จากสมการ นอกจากค่าความต้านทานที่สามารถหาได้จากความเก็บประจุแล้วยังแสดงให้เห็นว่าความต้านทานแปรผกผันกับความถี่ของระบบซึ่งหากใช้งานในระบบความถี่ต่ำค่าความต้านทานที่เหมาะสมจะมีค่าสูงขึ้นไปด้วย

2.5.3 วงจรควบคุมแรงดัน

วงจรควบคุมแรงดัน (voltage regulator) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันฝั่งขาออก ต่ออยู่ระหว่างแหล่งจ่ายไฟตรงแรงดันไม่คงที่ ซึ่งเป็นสัญญาณที่ได้หลังจากผ่านวงจรเรียงกระแส และผ่านตัวเก็บประจุ สัญญาณดังกล่าวสามารถเกิด ระลอกของแรงดันได้ เนื่องจากการเปลี่ยนค่าโหลดจึงทำให้กระแสที่ไหลในวงจรเปลี่ยน วงจรสามารถทำให้แรงดันที่ได้เรียบเกือบ 100% นำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และการประจุกระแสใหม่ให้กับแบตเตอรี่ทุกชนิดได้ วงจรควบคุมแรงดันสามารถทำได้หลายวิธีซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์แบบไม่เชิงเส้น (non-linear) คือใช้ซีเนอร์ไดโอด (zener diode) ทรานซิสเตอร์ (transistor) ไอซี และหลักการสวิตซ์ซิง (switching)

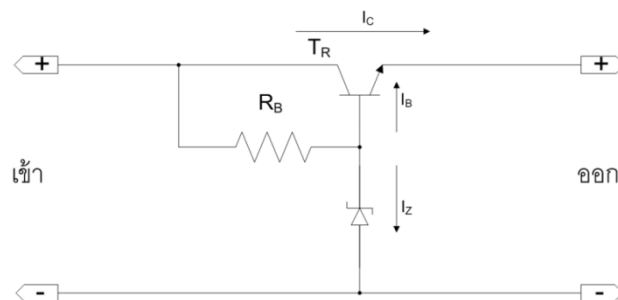
- วงจรควบคุมแรงดันโดยใช้ซีเนอร์ไดโอด ทรานซิสเตอร์

ซีเนอร์ไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาให้ทำงานได้สองหน้าที่ กล่าวคือ เมื่อทำการไบแอสแบบตรง (forward bias) ตัวอุปกรณ์จะทำหน้าที่เป็นไดโอดเรียงกระแส แต่เมื่อไบแอสแบบกลับ (reverse bias) ตัวไดโอดจะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันที่ตกคร่อมให้อยู่ในช่วงที่ออกแบบไว้จากโรงงานผู้ผลิต จากหลักการดังกล่าวสามารถควบคุมแรงดันขาออกด้วยซีเนอร์ไดโอดได้ โดยการต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน ดังภาพประกอบที่ 2.15



ภาพประกอบที่ 2.15 วงจรควบคุมแรงดันโดยใช้ซีเนอร์ไดโอด

เนื่องจากการทำงานในลักษณะการไบแอสกลับ ดังนั้นกระแสที่ผ่านตัวไดโอดจึงต้องจำกัดค่า (ขึ้นอยู่กับเบอร์ และบริษัทผู้ผลิต ศึกษาจากแผ่นข้อมูล) โดยการต่อตัวต้านทานอนุกรมกับซีเนอร์ไดโอด เมื่อนำวงจรควบคุมแรงดันชนิดนี้ไปใช้กับโหลดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทำให้กระแสในวงจรเปลี่ยน แรงดันตกคร่อมตัวซีเนอร์ไดโอดเปลี่ยนแปลงทำให้ไม่สามารถรักษาระดับแรงดันได้ จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงแก้ไขโดยการต่อทรานซิสเตอร์ร่วมกับซีเนอร์ไดโอด ดังภาพประกอบที่ 2.16



ภาพประกอบที่ 2.16 วงจรควบคุมแรงดันโดยใช้ทรานซิสเตอร์

ฝั่งขาเข้าคือแรงดันที่ยังไม่นิ่ง หรือยังไม่ถูกรักษาระดับให้คงที่ ขาออกเป็นแรงดันที่ถูกทำให้คงที่หรือเป็นแรงดันที่ให้กับโหลด หลักการของวิธีการนี้คือใช้ทรานซิสเตอร์เป็นตัวควบคุมกระแสที่ไหลไปยังโหลดออกจากขาอีมิเตอร์ (emitter) โดยที่ใช้ซีเนอร์ไดโอดเป็นตัวควบคุมแรงดันให้กับขาเบส (base) ของทรานซิสเตอร์

- วงจรควบคุมแรงดันโดยใช้หลักการสวิตซ์ชิ่ง

การรักษาระดับแรงดันด้วยหลักการสลับมีการใช้ทรานซิสเตอร์เพื่อทำหน้าที่เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ เปิดและปิดวงจร จากภาพประกอบที่ 2.17 ถ้าให้ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่เป็นสวิตซ์ สวิตซ์จะอยู่ในสถานะไม่มีความต่างศักย์ ดังภาพประกอบที่ 2.17 (ก) และสวิตซ์อยู่ในสถานะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล ดังภาพประกอบที่ 2.17 (ข) โดยมองคาบการเปิดปิดของสวิตซ์เป็นพัลส์กระแสตรงได้สัญญาณกระแสตรงเฉลี่ยหรือองค์ประกอบไปตรงของสัญญาณขาออก (V_o)

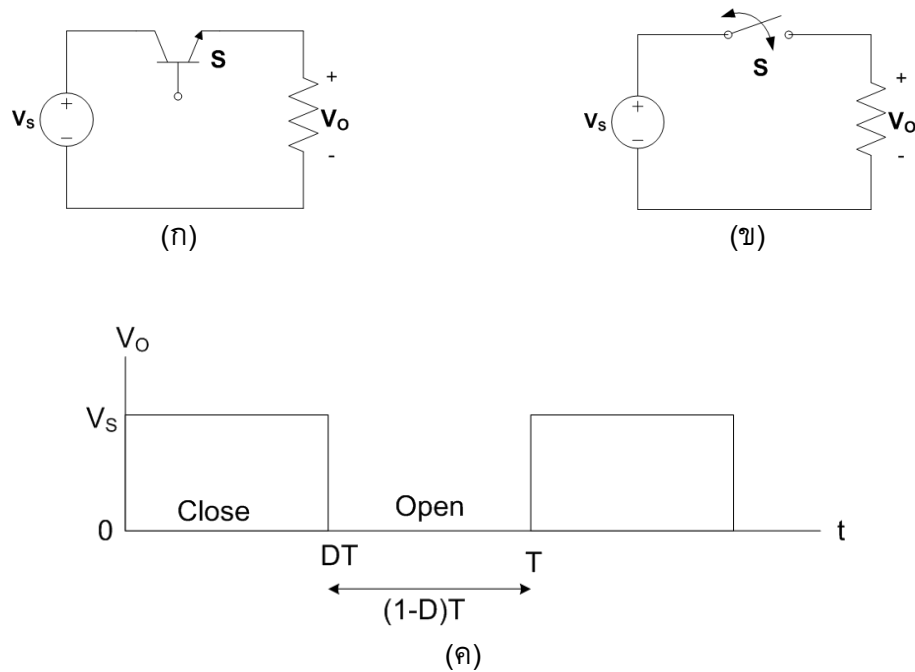
$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T V_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt = V_s D \quad (2.22)$$

D คือ รอบการทำงาน (duty cycle) ของสัญญาณซึ่งแรงดันขาออกจะขึ้นกับการควบคุมรอบการทำงาน ในขณะที่สวิตซ์ปิดดังนี้

$$D \equiv \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} f \quad (2.23)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ของการเปิดปิดของสวิตซ์ซึ่งองค์ประกอบกระแสตรงของแรงดันขาออกจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันขาเข้า

กำลังไฟฟ้าที่ผ่านสวิตซ์มีค่าเป็นศูนย์ทั้งขณะสถานะเปิดและปิดวงจร เนื่องจากขณะที่สวิตซ์เปิดวงจรกระแสไม่ไหลผ่าน และเมื่อขณะสวิตซ์ปิดวงจรแรงดันคร่อมกลายเป็นศูนย์ ทำให้กำลังไฟฟ้าในวงจรถูกส่งผ่านไปยังโหลด 100% จึงได้นำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้กับวัสดุไฟอ็อกไซด์อิเล็กทริกเพื่อประจุกระแสไฟฟ้าเข้าไปในแบตเตอรี่ทุติยภูมิ (rechargeable battery) จากการศึกษาพบว่าสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าเพียงพอต่อขั้นตอนการประจุเข้าไปในแบตเตอรี่ชนิดนี้ได้เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมต่อแบบตรง (จากวงจรเรียงกระแสต่อขนานกับแบตเตอรี่ทุติยภูมิ) (Ottman, Hofmann, Bhatt, et al., 2002; Ottman, Hofmann, and Lesieutre, 2002)



ภาพประกอบที่ 2.17 (ก) วงจรประกอบทางไฟฟ้าอย่างง่ายของวงควบคุมแรงดัน
(ข) วงจรสมมูลส่วนของการสวิตช์ซึ่ง (ค) แรงดันขาออก

2.5.4 แบตเตอรี่ทุติยภูมิแบบต่าง ๆ ในระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน

พลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ด้วยวิธีทางไพโซโซอิลิกทริกได้ความหนาแน่นพลังงานในช่วง $50\text{-}250 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (Roundy et al., 2003) เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ใช้กำลังไฟฟ้าไม่สูงมาก อีกทั้งอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ยังต้องการความต่อเนื่องของการให้พลังงาน การนำพลังงานไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนรูปมาใช้จึงมีความจำเป็นต้องมีอุปกรณ์จัดเก็บสะสมพลังงานเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในยามต้องการต่อไป (Li, 2008)

- พื้นฐานแบตเตอรี่ทุติยภูมิ

แบตเตอรี่ทุติยภูมิได้ให้คำจำกัดความของความจุเขียนแทนด้วย C โดยจึงพบว่าความจุของแบตเตอรี่แบบกลุ่มนี้ระบุข้างผลิตภัณฑ์ มีหน่วย Ah^4 หรือ mAh (Ampère hours หรือ milli-Ampère hours ตามลำดับ) ในการใช้งานจึงได้กำหนดอัตราการประจุ (charge)

⁴ 1 ampère hour มีค่าเท่ากับ 3600 coulombs (ampère second)

และคายประจุ (discharge) ใช้สัญลักษณ์ C เรียกว่า อัตรา-ซี หรือ C-rate (เนื่องจากแบตเตอรี่แต่ละก้อนมีขนาดความจุที่แตกต่างกัน) ถ้าแบตเตอรี่ทุติยภูมิมีความจุ 100mAh จะได้ว่า อัตราการประจุและปล่อยประจุ 1C เท่ากับ 100mA และ 0.1C เท่ากับ 10mA

สามารถหาเวลาการ ประจุ/ปล่อยประจุ ดังนี้

$$\text{เวลาประจุ/ปล่อยประจุ (ชั่วโมง)} = \frac{\text{ความจุของแบตเตอรี่ (Ah หรือ mAh)}}{\text{ประจุที่รับ/คาย (Ah หรือ mA)}} \quad (2.24)$$

ถ้าให้ความจุของแบตเตอรี่เท่ากับ 100 mAh อัตราการประจุ 0.1C (เป็นอัตราการประจุแบบปกติที่เหมาะสมกับแบตเตอรี่ทุติยภูมิในความจุต่างๆ) มีค่าเท่ากับ 10mA การประจุแบตเตอรี่เริ่มจากสถานะปราศจากประจุอย่างสมบูรณ์ จนประจุเต็มอย่างสมบูรณ์และกระแสคงที่ตลอดกระบวนการดังกล่าว จะใช้เวลาโดยประมาณ 10 ชั่วโมง แต่ในทางปฏิบัติใช้เวลา 14 – 16 ชั่วโมง ในกรณีของการคายประจุถ้าแบตเตอรี่ที่ใช้มีขนาด 200 mAh กระแสในที่ไหลในวงจรอยู่ที่ 40 mA คิดเป็น 0.2C ของแบตเตอรี่ก้อนนี้ ดังนั้นเวลาคายประจุหมดอย่างสมบูรณ์คือประมาณ 5 ชั่วโมง ข้อมูลและสมบัติต่างๆของแบตเตอรี่ทุติยภูมิแต่ละชนิดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตควรศึกษาจากแผ่นข้อมูล

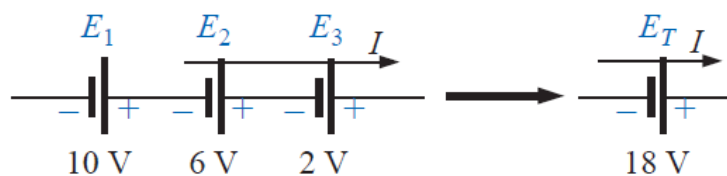
วิธีการประจุสามารถทำได้ 3 วิธี แบ่งตามกระแสและแรงดันที่ให้แก่แบตเตอรี่ นิยมใช้วิธีประจุแบบ แฟกเตอร์กำลัง⁵ (power factor) เพราะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งแรงดันและกระแส (Wehrle, 1987) อัตราการประจุแบ่งออกเป็น (1) การประจุแบบช้า (slow charge) ประจุแบบปกติ (normal charge) ด้วยอัตรา 0.1C ใช้เวลาประมาณ 14-16 ชั่วโมง และประจุแบบกระแสน้อย หรือเรียกว่า trickle charge เป็นการประจุที่ต้องใช้กระแสคงที่และต่ำสุด เป็นการประจุที่ชดเชยการปล่อยประจุในตัวเอง (self-discharge) อีกทั้งยังไม่ทำความเสียหายกับแบตเตอรี่ในกรณีที่ประจุเกินเวลาหรือประจุขณะที่แบตเตอรี่เต็มแล้ว (Cope and Podrazhansky, 1999) ใช้อัตราการประจุ 0.01-0.03C ดังนั้น ข้อควรพิจารณาสำหรับการประจุในระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่ให้กำลังไฟฟ้าระดับต่ำ ความจุของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นอัตราการประจุก็เพิ่มขึ้นตาม ทำให้การนำแบตเตอรี่แบบทุติยภูมิมาใช้ในงานเก็บเกี่ยวพลังงานไม่ควรมีความจุมากนัก หรือจำเป็นต้องออกแบบให้เข้ากับระบบโดยเฉพาะ ตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่แบบฟิล์มบางของ NanoEnergy® และ Thinerger® เป็นต้น (2) การประจุแบบเร็ว (quick charge) เป็นการประจุที่ใช้กระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นเพื่อลดเวลาการประจุ อัตราการประจุจะอยู่ในช่วง 0.2C และ 0.5C ใช้เวลาประมาณ 7-8 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ อีกทั้งยังไม่ทำความเสียหาย

⁵ การประจุแบตเตอรี่สามารถทำได้ 3 แบบ คือ แบบแฟกเตอร์กำลัง แรงดันและกระแสที่เข้าแบตเตอรี่มีการเปลี่ยนแปลง แบบแฟกเตอร์แรงดัน กระแสเปลี่ยนแปลงแรงดันคงที่ และแบบสุดท้ายปัจจัยกระแส กระแสคงที่แรงดันเปลี่ยนแปลง

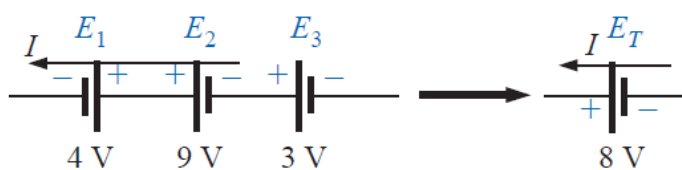
แก่แบตเตอรี่ แต่ไม่ควรให้กระแสขนาดนี้ในขณะที่แบตเตอรี่เต็ม (Buchmann, 2000) และ การประจุแบบเร็วมาก (fast charge) เป็นการประจุที่ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง เพราะใช้อัตราที่ใช้ในการประจุ 1C ในงานเก็บเกี่ยวพลังงาน สามารถทำได้ในกรณีของแบตเตอรี่แบบฟิล์มบาง โดยใช้ในระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่สามารถให้กระแสเพียงพอและคงที่ ข้อควรระวัง การเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเคมีภายในแบตเตอรี่ในอัตรานี้ สามารถทำให้เกิดความร้อนขึ้น เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานและความจุลดลง หรือเสียหายได้ (Cope and Podrazhansky, 1999; Buchmann, 1999)

- การเชื่อมต่อแหล่งจ่ายอนุกรม และขนาน (Alexander and Sadiku 2006; Boylestad 2010)

การต่อแหล่งจ่ายแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มหรือลดแรงดัน แรงดันดังภาพประกอบที่ 2.18 (ก) แรงดันรวมของสามารถหาได้จาก ผลรวมของแหล่งจ่ายที่มีขั้วไฟฟ้าทิศเดียวกัน หักล้างกับแหล่งจ่ายทิศกลับขั้ว ทิศทางการไหลของกระแสขึ้นกับผลรวมของแหล่งจ่ายที่มีค่ามากดังภาพประกอบที่ 2.18 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 2.18 การปรับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรง (ก) การต่ออนุกรมแบบขั้วไฟฟ้าทิศทางเดียวกัน (ข) การต่ออนุกรมแบบขั้วไฟฟ้าต่างทิศกัน (Boylestad, 2010)

ในกรณีการต่อแบบขนานแรงดันของแบตเตอรี่ต้องมีค่าเท่ากัน การต่อแบบนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือเพื่อการเพิ่มกระแสไฟฟ้า ดังภาพประกอบที่ 2.19 ได้ว่ากระแสรวมมีค่าเท่ากับ กระแสจากแบตเตอรี่แต่ละเซลล์มารวมกัน (ขั้วไฟฟ้าทิศทางเดียวกัน)

ให้แรงดันของแบตเตอรี่สองเซลล์มีขนาดต่างกัน แบตเตอรี่ที่มีแรงดันสูงกว่าจะพยายามลดลงให้เท่ากับแรงดันก่อนที่ต่ำกว่าอย่างรวดเร็ว กระแสที่ไหลสามารถหาได้ดังนี้

$$-E_1 + IR_{int1} + IR_{int2} + E_2 = 0 \quad \text{โดยที่ } I = I_s$$

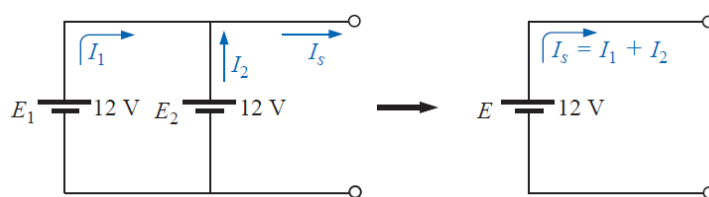
$$I_s = \frac{E_1 - E_2}{R_{int1} + R_{int2}}$$

ได้ว่า

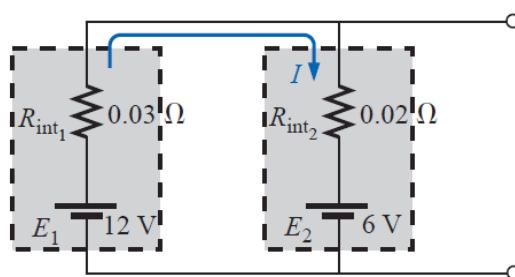
$$I_s = \frac{E_1 - E_2}{R_{int1} + R_{int2}} = \frac{12V - 6V}{0.03\Omega + 0.02\Omega} = 120A$$

กระแสที่ไหลในวงจรมีค่าสูงมาก อัตราการปล่อยประจุของ E_1 ทำให้แหล่งจ่ายที่มีค่าแรงดันต่ำกว่าเสียหายได้

ในทางปฏิบัติมักจะเลือกแหล่งจ่ายที่มีค่ากระแสสูง แทนการเชื่อมต่อแบบขนาน แต่จะมีการประยุกต์ใช้ในลักษณะการเพิ่มแรงดันโดยการเชื่อมต่อแบบอนุกรม สามารถพบได้ในแบตเตอรี่แบบกลุ่มก้อน (battery pack) ที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ วิทย์ไร้สาย เป็นต้น



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 2.19 การเพิ่มกระแสของแหล่งจ่ายไฟตรงด้วยวิธีการต่อแบบขนาน (ก) การเพิ่มกระแสไฟฟ้าในวงจรด้วยการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟตรงแบบขนาน (ข) แหล่งจ่ายไฟตรงที่แรงดันไม่เท่ากันและทิศทางกระแส (Boylestad, 2010)

แบตเตอรี่ทุติยภูมิหรือหน่วยจัดเก็บพลังงานแต่ละชนิดที่สามารถนำมาใช้ในทางด้านเก็บเกี่ยวพลังงาน

- แบตเตอรี่ทุติยภูมิชนิดนิกเกิลแคดเมียม (Nickel cadmium rechargeable battery : NiCd)

เป็นแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่ผลิตขึ้นในยุคแรก มีความหนาแน่นด้านพลังงานต่ำ ดังตารางที่ 2.3 มีข้อจำกัดด้านการใช้งาน ต้องปล่อยประจุให้แรงดันลดต่ำกว่าค่าแรงดันปกติก่อนประจุเข้าไปใหม่อีกครั้ง ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ จะหยุดการทำงานก่อนถึงค่าแรงดันดังกล่าว หรือแบตเตอรี่อยู่สถานะไม่ได้รับประจุเป็นเวลานาน ทำให้ความจุลดลง เรียกว่า เมมโมรี่เอฟเฟ็ค (memory effect) อีกทั้งยังมีส่วนผสมของโลหะที่เป็นพิษ แต่ก็ยังคงมีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันเนื่องจากมีจุดเด่นราคาไม่แพง

- **แบตเตอรี่ทุติยภูมิชนิดนิกเกิลเมทัลไฮไดร (Nickel-metal hydride rechargeable battery : NiMH)**

เป็นแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นด้านพลังงานสูงกว่าแบตเตอรี่แบบ NiCd มีอายุการใช้งานยาวนานกว่า ไม่มีส่วนผสมของโลหะที่เป็นพิษ สามารถประจุได้ตลอดเวลาไม่เกิดเมมโมรีเอฟเฟ็ค มีหลายขนาดความจุและการใช้งานหลากหลาย

- **แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead acid battery)**

รู้จักกันในนามแบตเตอรี่รถยนต์มีหลายขนาดความจุมักพบได้ในงานด้านเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์ ต้องใช้แผงเซลล์สุริยะจำนวนมาก เนื่องจากมีความหนาแน่นด้านพลังงานที่น้อยกว่าแบตเตอรี่แบบ NiCd ทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้มีขนาดใหญ่ ใช้ในงานที่ไม่สนใจขนาดและน้ำหนัก

- **แบตเตอรี่ทุติยภูมิในกลุ่มลิเทียม (Lithium based rechargeable battery : Li-ion)**

ลิเทียมไอออน หรือ ลิเทียมไอออน-พอลิเมอร์ มีค่าความหนาแน่นของพลังงานและราคาสูงสุดในกลุ่มของแบตเตอรี่ทุติยภูมิ แต่มีอายุการใช้งานเพียง 2-3 ปีนับจากวันผลิตแบตเตอรี่ (ถ้าผลิตออกมาแล้วไม่ได้ใช้งานก็จะเสื่อมสภาพในตัวเอง) และไม่มีเมมโมรีเอฟเฟ็ค ทั้งคู่ ข้อแตกต่างระหว่างแบตเตอรี่สองชนิดนี้ คือ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนต้องมีวงจรป้องกันกระแสและแรงดันเกิน รวมไปถึงอุณหภูมิที่ต้องควบคุมขณะประจุ เพื่อป้องกันการลุกไหม้ของอิเล็กโทรไลต์ แตกต่างจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน-พอลิเมอร์ ที่ไม่จำเป็นต้องมีวงจรดังกล่าว และยังมีจุดเด่นด้านขนาด จึงพัฒนาต่อเป็นแบตเตอรี่แบบฟิล์มบางได้

- **แบตเตอรี่ทุติยภูมิในกลุ่มฟิล์มบาง (Thin-film battery)**

จากชื่อทางการค้า NanoEnergy® และ Thinerger® ของบริษัท Front Edge Technology และ Infinite Power Solution ตามลำดับ ได้พัฒนาแบตเตอรี่แบบฟิล์มบาง โดยใช้สารในกลุ่มลิเทียม ขั้วบวกเป็นโลหะลิเทียม ขั้วลบเป็นลิเทียมโคบอลต์ไดออกไซด์ (LiCoO₂) มีลิเทียมฟอสฟอรัสออกไซด์ไนไตร (LiPON) เป็นชั้นของอิเล็กโทรไลต์ ทำให้มีอัตราการปล่อยประจุในตัวเองต่ำ มีการนำไปใช้ในงานเก็บเกี่ยวพลังงาน (Anton et al., 2010) ด้วยจุดเด่นด้านความหนาแน่นด้านพลังงาน และเพื่อการรองรับได้หลากหลายการประยุกต์ใช้ บริษัท Cymbet ได้

ผลิตแบตเตอรี่แบบฟิล์มบางที่อยู่ในไอซี พร้อมวงจรควบคุมและจัดการพลังงาน (ศึกษาเพิ่มเติมจากเว็บไซต์ผู้ผลิต) สามารถติดตั้งบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ต้องการแหล่งพลังงานเลี้ยงอุปกรณ์ขนาดเล็ก เช่น หน่วยความจำแบบชั่วคราว (RAM) ไอซีสร้างฐานเวลาจริง (real time clock) และไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เปิดการทำงานในโหมดรอรับคำสั่ง (standby mode) เป็นต้น แบตเตอรี่ทุติยภูมิในกลุ่มนี้ได้มีการออกแบบให้ใช้งานในระบบเก็บเกี่ยวพลังงานโดยเฉพาะ (Grady, 2011; Cantrell, 2009)

- **ตัวเก็บประจุ**

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ที่กักเก็บพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง ให้กำลังไฟฟ้าสูงในเวลาสั้น และแรงดันลดลงอย่างรวดเร็ว ขณะที่แบตเตอรี่ให้กำลังไฟฟ้าที่ต่ำกว่า แต่มีแรงดันคงที่และระยะเวลาใช้งานยาวกว่า (Li, 2008) ดังตารางที่ 2.4 ด้วยเงื่อนไขการประจุแบตเตอรี่ที่ซับซ้อนการเลือกใช้ตัวเก็บประจุแบบความจุสูง (supercapacitor) จึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ

ตารางที่ 2.3 ตารางข้อมูลแบตเตอรี่ทุติยภูมิแบบต่างๆ (Li, 2008)

ชนิด	ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (W/kg)	รอบการทำงาน (รอบ)	อายุการใช้งาน (ปี)
นิกเกิลแคดเมียม	160	1500	15
นิกเกิลเมทัลไฮไดร	175	500	15
ตะกั่วกรด	200	500-800	8-10
ลิเทียมไอออน	1800	1000	2-3

ตารางที่ 2.4 ตารางเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างแบตเตอรี่ทุติยภูมิกับตัวเก็บประจุ (Li, 2008)

อุปกรณ์	ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (W/L)	รอบการทำงาน (รอบ)	เวลาที่ใช้ประจุ (วินาที)
แบตเตอรี่ทุติยภูมิ	150	$1 - 10^3$	>1000
ตัวเก็บประจุ	$10^5 - 10^8$	$10^5 - 10^6$	<1

2.5.5 วงจรรวมและอุปกรณ์ขนาดเล็ก

วงจรรวมที่ออกแบบและนำมาใช้ในลักษณะของวงจรที่ช่วยจัดการพลังงาน เช่น การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้อุปกรณ์ หรือประจุกระแสไฟให้แบตเตอรี่แบบฟิล์มบาง เป็นต้น เทคนิคที่ใช้เป็นหลักการแบบสลัป ตัวอุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแส และควบคุมแรงดันในตัวเอง ด้วยขนาดที่เล็กทำให้กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในวงจรต่ำมากและการออกแบบที่เน้นไปในการทำงานทางด้านนี้โดยตรง นอกจากอุปกรณ์กลุ่มนี้แล้วอุปกรณ์ควบคุมแบบทำงานตามโปรแกรมก็ยังคงมีความจำเป็น ดังนั้น ไอซีที่สามารถกระทำการตามโปรแกรมคำสั่ง (เขียน หรือ บันทึกคำสั่ง) ที่เป็นลักษณะของโค้ด (code) ซึ่งถูกแปลงเป็นภาษาเครื่องโดยคอมไพเลอร์ (compiler) ลงไปยังหน่วยความจำแบบชั่วคราว ให้ทำงานตามหน้าที่ก็ต้องคำนึงถึงความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าที่จะสูญเสียไปในระหว่างเก็บเกี่ยวพลังงานเช่นกัน

2.5.5.1 วงจรรวมในกลุ่มจัดการพลังงาน

วงจรรวมในกลุ่มนี้ออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรควบคุมแรงดัน ที่สามารถทำให้แรงดันไฟฟ้าคงที่ และสามารถประจุแบตเตอรี่แบบฟิล์มบาง หรือให้กระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์ที่ใช้กำลังไฟฟ้าระดับต่ำกว่า mW

ตัวเลขที่ใช้อ้างอิงจากแผ่นข้อมูลของแต่ละผลิตภัณฑ์ แรงดันและกระแสทดสอบแบบไม่มีความต่างศักย์

- **LTC3588**

เป็นไอซีที่ทำหน้าที่เรียงกระแสและควบคุมแรงดัน จากบริษัท Linear Technology Corporation ภายใต้ชื่อทางการค้า LTC3588-1 Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply สามารถกำหนดแรงดันขาออกได้ 4 ระดับ 1.8, 2.5, 3.3 และ 3.6 V สามารถรองรับกระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุดได้ 100 mA หรือกำลังไฟฟ้สูงสุด 0.36 W (ด้วยกระบวนการยกระดับและควบคุมแรงดันแล้ว) ใช้หลักการสวิทช์ซึ่งในการควบคุมแรงดัน ต้องมีช่วงแรงดันขาเข้าจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก 2.7 - 20 V ระบบจะสามารถให้แรงดันคงที่ได้ก็ต่อเมื่อวัสดุให้กระแสแบบคงที่ต่ำสุด 950 nA

- **MAX17710**

เป็นไอซีที่ทำหน้าที่ควบคุมแรงดัน จากบริษัท Maxim Integrated Product ชื่อสินค้า MAX17710 Energy-Harvesting Charger and Protector สามารถกำหนดแรงดันขาออกได้สองหน้าที่ คือ ให้แรงดันกับอุปกรณ์ต่อพ่วง ได้ 3 ระดับ 1.8, 2.3 และ 3.3 V และ ประจุแบตเตอรี่แบบฟิล์มบาง หน้าที่แรก รองรับการให้กระแสขาออกได้สูงสุด 75 mA หรือให้กำลังไฟฟ้า 0.247 W (ด้วยกระบวนการยกระดับแรงดัน แบบโหมดกระแสสูง) ใช้หลักการสลับในการควบคุมแรงดัน ต้องการกระแสเข้าคงที่ต่ำสุด 625 - 1300 nA ระบบการจัดการพลังงานจึงจะทำงาน อุปกรณ์ชิ้นนี้ได้ออกแบบให้รองรับการทำงานได้หลายรูปแบบการเก็บเกี่ยวพลังงาน ดังนั้นแรงดันขาเข้า จึงอยู่ในช่วง 4.8 – 5.7V จำเป็นต้องมีวงจรป้องกันแรงดันเกินและมีวงจรเรียงกระแสหากเป็นสัญญาณกระแสสลับ อีกหน้าที่การทำงานคือประจุแบตเตอรี่แบบฟิล์มบาง แรงดันขาออกสูงสุดเพียงพอประจุแบตเตอรี่ ขนาดแรงดันมีค่าเท่ากับ 4.16V กระแส 165 – 1650nA

เวลาทดสอบการทำงานของไอซีจัดการพลังงาน จะใช้กระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ทุติยภูมิ (แบบฟิล์มบาง) เชื่อมต่อโดยตรง เมื่อแบตเตอรี่หมด ระบบต้องประจุกระแสเข้าไปยังแบตเตอรี่ก่อนจนเต็ม จึงจะสามารถจ่ายแรงดันออกมาสู่อุปกรณ์เชื่อมต่อภายนอกผ่านทางช่องทาง (port) เชื่อมต่อที่เตรียมไว้ได้อีกครั้ง โดยชุดพัฒนาแสดงให้เห็นว่าสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้ตลอดเวลาจากแหล่งต่าง ๆ เช่น ช่องทางเซลล์สุริยะ ช่องทางวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกและเทอร์โมอิเล็กทริก นำพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่เก็บเกี่ยวได้มาใช้ในการยวมต้องการ ถ้าไม่มีพลังงานเก็บไว้ในแบตเตอรี่ระบบจะไม่ทำงาน

- **CBC915**

มีชื่อทางการค้าว่า CBC915 Enerchip™ EP Energy Processor จากบริษัท Cymbet™ Corporation มีหน้าที่การทำงานหลักเช่นเดียวกับ MAX17710 และ LTC3588 รวมกัน ไอซีสามารถให้แรงดันขาออกได้ ขณะที่ต่อกับแหล่งจ่าย (จากระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน) แต่ต้องมีกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะขับเคลื่อนการทำงาน สามารถแสดงสถานะของแบตเตอรี่ และการทำงานของระบบ เช่น สถานะของประจุแบตเตอรี่ รูปแบบแหล่งจ่ายเก็บเกี่ยวพลังงาน เป็นต้น ผ่านช่องทางสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมตามมาตรฐานการส่งข้อมูล RS-232 มีแบตเตอรี่แบบทุติยภูมิเพื่อใช้งานในกรณีที่ไม่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้

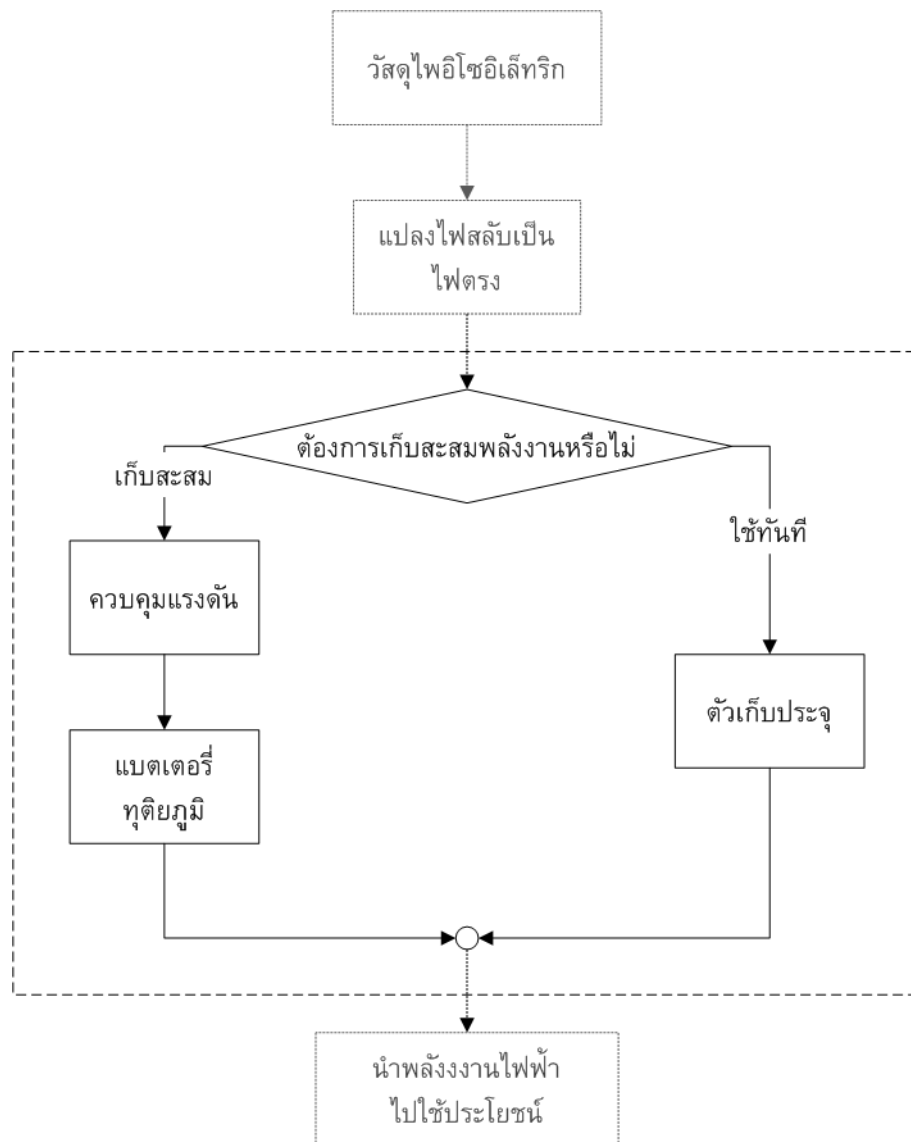
2.5.5.2 วงจรรวมชิปในกลุ่มบันทึกคำสั่ง

วงจรรวมในกลุ่มนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ มีหน่วยความจำโปรแกรมและข้อมูลภายใน สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลกับอุปกรณ์ต่อพ่วงและทำงานได้ตามคำสั่งที่บันทึกไว้ อีกทั้งยังใช้กระแสไฟฟ้าในระดับต่ำกว่า $250\mu\text{A}$ (ขณะทำงานไม่มีอุปกรณ์ต่อพ่วง)

หน้าที่หลักของไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือ ตัวควบคุมขนาดเล็ก คือ การทำงานตามคำสั่งที่ได้บันทึกไว้ สามารถคำนวณ และโต้ตอบ กับอุปกรณ์ภายนอกได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด หรือ ตามความสามารถของหน้าที่การทำงานภายในของตัวควบคุม ด้วยเหตุผลดังกล่าว อุปกรณ์ต่อพ่วงจึงมีผลกับการใช้พลังงานไฟฟ้า กล่าวคือ ไม่เพียงแต่ส่วนควบคุมเท่านั้นที่ต้องออกแบบให้รองรับการประยุกต์ใช้ในด้านเก็บเกี่ยวพลังงาน อุปกรณ์ต่อพ่วงก็เช่นเดียวกันที่ต้องพิจารณาด้านการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า ยกตัวอย่างไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ออกแบบให้รองรับการประยุกต์ใช้งานทั่วไป (multipurpose microcontroller) เบอร์ PIC24F16KA102 จากบริษัท Microchip Technology Inc. ในโหมดการทำงานปกติใช้กระแส $8\mu\text{A}$ มีโหมดดีปสลีป (deep sleep) ซึ่งใช้กระแสเพียง 20nA ซึ่งมีเป็นจุดเด่นในการทำงานแบบรอคำสั่ง หรือการปลุก (ระบบภายในตัวควบคุม) ให้ตื่นโดยที่ไม่ต้องตั้งค่าเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง อีกหนึ่งตัวอย่างคือ MSP430 ใช้กระแสในโหมดทำงานปกติ $200\mu\text{A}$ โหมดประหยัดพลังงาน $0.1\mu\text{A}$ ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว จึงได้มีการนำเทคโนโลยีและตัวควบคุม ไปใช้กับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแบบที่ต้องทำให้เกิดผล (implement) และใช้กำลังไฟฟ้าต่ำกว่า 1mW

2.5.5.3 สรุปขั้นตอนส่วนเก็บสะสมพลังงาน

การเก็บสะสมพลังงานสามารถสรุปดังภาพประกอบที่ 2.20



ภาพประกอบที่ 2.20 ขั้นตอนการเก็บสะสมพลังงาน

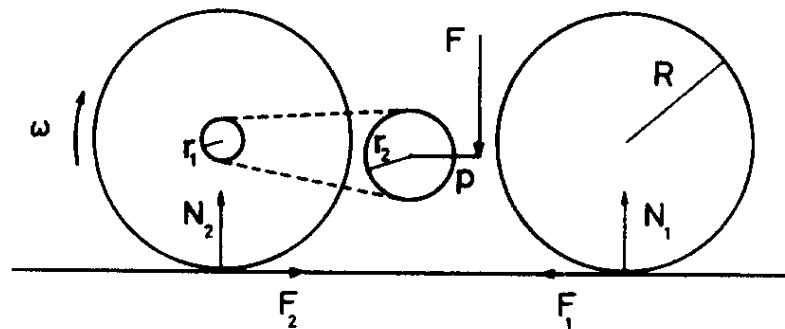
ขั้นตอนการทำงานเริ่มจากวิธีที่ใช้เก็บเกี่ยวด้วยวิธีทางไพโซอิเล็กทริกได้ กระแสไฟฟ้าสลับ ซึ่งจะนำไปผ่านวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง ขั้นตอนต่อไป

เป็นการนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้ไปใช้ประโยชน์ มีทางเลือกคืออาจเก็บสะสมพลังงานไว้ใช้หรือใช้ทันที (ต้องการเก็บสะสมพลังงานหรือไม่) ถ้าเก็บพลังงาน ต้องผ่านขั้นตอนการจัดการด้านกำลังไฟฟ้า (ควบคุมแรงดัน) นำกระแสไฟฟ้าไปประจุไว้ในส่วนกักเก็บพลังงาน (แบตเตอรี่ทุกชนิด) จากนั้นนำพลังงานที่ได้ไปใช้ประโยชน์ เป็นการสิ้นสุดขั้นตอน

2.6 จักรยาน

หัวข้อนี้สาธิตการเสาะหาแหล่งพลังงานกลให้แก่ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานโดยอาศัยการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีของล้อจักรยาน มีรายละเอียดดังนี้ (Liesegang and Lee, 1978)

- สมการการเคลื่อนที่



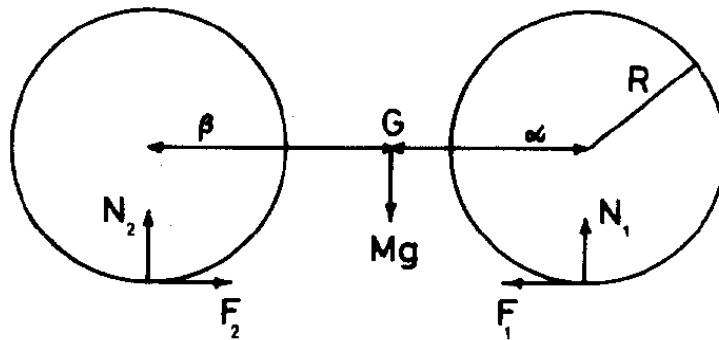
ภาพประกอบที่ 2.21 แสดงแรงกระทำในแต่ละส่วนของจักรยานก่อนเคลื่อนที่

ก่อนจักรยานเคลื่อนที่ แรงที่กระทำในแต่ละส่วนของจักรยาน สามารถอธิบายได้ตามภาพประกอบที่ 2.21 จากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้ทราบความเร่ง และแรงที่มากระทำกับคันเหยียบ กำหนดให้ M เป็นมวลรวมของจักรยานกับคนขับ R คือ รัศมีของล้อจักรยาน I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของล้อ $\dot{\omega}$ คือ ความเร่งเชิงมุมของล้อหลัง และ \dot{v}_p ความเร่งเชิงเส้นของจักรยาน r_1 เส้นผ่านศูนย์กลางเฟืองโซ่ล้อหลัง r_2 เส้นผ่านศูนย์กลางเฟืองโซ่คันเหยียบ p ความยาวของคันเหยียบ

เมื่อออกแรงดันให้กับคันเหยียบ จะเกิดแรงบิด (torque) $F \cdot p$ ทำให้เฟืองโซ่ ล้อหน้าเคลื่อนที่ และทำให้เกิดแรงบิดที่ล้อหลังเช่นกัน เป็นสัดส่วนรัศมีของโซ่ $Fp(r_1/r_2)$ เมื่อพิจารณาล้อหลังของจักรยาน ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงเทียบกับความเร่งเชิงมุม $F_p(r_1/r_2) = \dot{\omega}[2I + MR^2]$ เนื่องจาก $\dot{v} \equiv R\dot{\omega}$ จึงได้ความเร่งของจักรยาน ดังสมการ

$$\dot{v}_b = \frac{RFp(r_1/r_2)}{2I + MR^2} \quad (2.25)$$

- ประสิทธิภาพเชิงกล



ภาพประกอบที่ 2.22 แสดงจุดศูนย์กลางมวล (G) ของระบบจักรยานและคน (M)

กำหนดให้ความเร่งเชิงมุมของเฟืองโซ่ล้อหลัง คือ $\omega_1 \equiv \omega$ และเฟืองโซ่คันเหยียบ คือ ω_2 ดังนั้น ความเร็วที่เท้าให้กับคันเหยียบ $v_{app} \equiv p\omega_2$ ได้ว่า $v_b/v_{app} = r_2R/r_2p$ สามารถหาประสิทธิภาพของกำลังที่ส่งผ่านจักรยาน ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\frac{P_{out}}{P_{in}} &= \frac{F_{out} v_{out}}{F_{in} v_{in}} \\
&= \frac{M \dot{v}_b v_b}{v_{app}} \\
&= \frac{1}{[1 + 2I / MR^2]^{-1}} \\
&\approx 1
\end{aligned}$$

การได้เปรียบเชิงกลสามารถอธิบายในพจน์ของแรงที่ให้กับคันเหยียบได้ คือ

$$F_{out} / F_{in} = pr_1 / Rr_2$$

- การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างพื้นถนนกับล้อ

การศึกษาประสิทธิภาพขณะที่จักรยานกำลังเคลื่อนที่ พิจารณาจากแรงกระทำในแนวตั้งเพื่อหาสมการ ด้วยหลักการสมดุลของแรงบิด และแรงที่กระทำในทิศทางของแรงโน้มถ่วง กำหนดให้ผิวถนนซึ่งล้อจักรยานสามารถเคลื่อนที่ได้แบบไม่ไถล และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน คือ μ แรงกระทำที่เกิดขึ้นที่ล้อหลัง $N_2 = MR^2 \dot{\omega} + Mg\alpha / (\alpha + \beta)$ ได้ว่า เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นน้ำหนักจะเพิ่มขึ้นตาม มีขนาดไปทางล้อหลัง ทำให้การบังคับล้อหน้าเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะปั่น

จากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน กับความเร่ง สมการที่ใช้คือ $\dot{\omega}(MR + I/R) \leq \mu(MR^2 \dot{\omega} + Mg\alpha) / (\alpha + \beta)$ ซึ่งช่วยในการออกแบบจักรยานแบบแข่งทางตรง ในกรณีนี้ยังไม่พิจารณาการไหลของอากาศผ่านระบบ

- การปั่นจักรยาน

เมื่อจักรยานเคลื่อนที่ แรงปั่นแต่ละตำแหน่งของวงปั่นมีขนาดไม่เท่ากัน การพิจารณาแรงที่กระทำกับคันเหยียบ เมื่อให้แรงปั่น F มีทิศทางตามแรง F_1 (ที่ตำแหน่งต่ำสุดของคันเหยียบ) จัดรูปสมการ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่ใช้ปั่น กับภาระของล้อหน้า

$$\frac{F_1}{F} = \frac{(pr_1/r_2 - R)}{2R + MR^2/I} \quad (2.26)$$

แบ่งออกเป็นสามรูปแบบหลัก แบบแรก คือ ออกแรงปั่นคันเหยียบหมุนไปข้างหน้า (บนลงล่าง) ทิศทาง F ไปทางเดียวกับ F_2 เมื่อ $(pr_1/r_2 - R) > 0$ แบบที่สอง ออกแรงปั่นคันเหยียบหมุนไปข้างหลัง (ล่างขึ้นบน) เมื่อ $(pr_1/r_2 - R) < 0$ แบบสุดท้ายคันเหยียบอยู่ตำแหน่งสูงสุด $(pr_1/r_2 - R) = 0$ จะได้ $F_1 = 0$ และ $\dot{\omega} = 0$ แต่ถ้าให้ $F = F_2$ ที่ตำแหน่งดังกล่าวของคันเหยียบแล้วเคลื่อนต่อไปข้างหน้า จักรยานจะสามารถเคลื่อนที่ไปได้

ผลของการปั่นที่เกิดขึ้นกับล้อหลัง คือ จักรยานเคลื่อนไปข้างหน้า $F_2 > F$ และข้างหลัง $F_2 < F$ ตามลำดับ อีกกรณีที่ $F_2 = F$ คือ $\dot{\omega} = 0$ ที่ตำแหน่งสูงสุดของคันเหยียบเช่นกัน

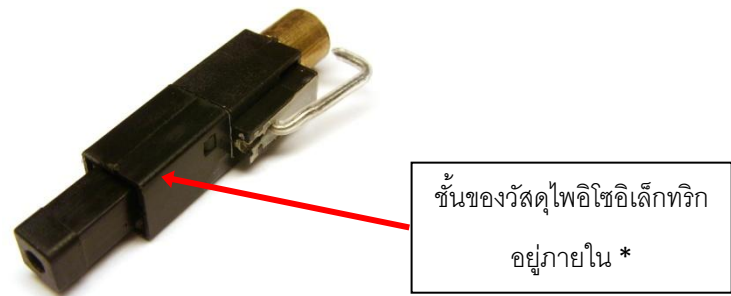
$$F_2 - F = \dot{\omega}(I/R + MR) \quad (2.27)$$

- กำลังที่ใช้ในการปั่น

การปั่นจักรยานเมื่อความเร็วคงที่บนพื้นถนนเรียบ ปราศจากความชันและแรงต้านอากาศ เป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ

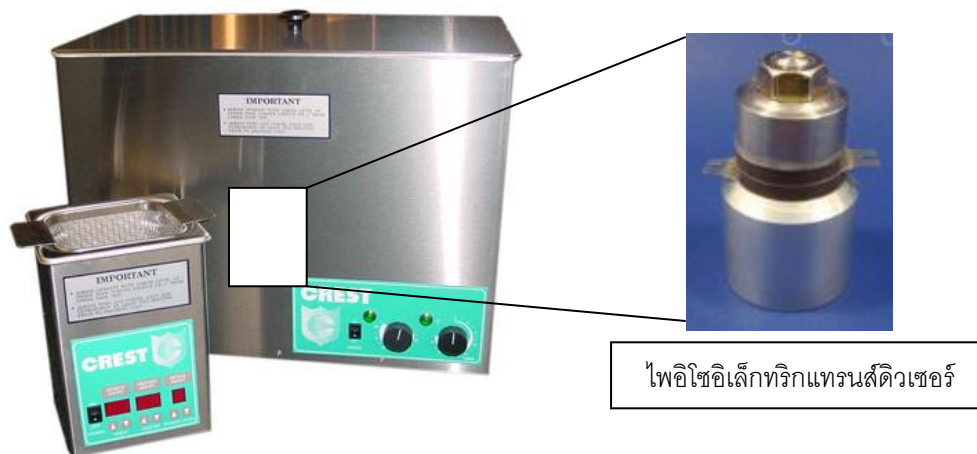
2.7 วัสดุไพโซอิเล็กทริกที่เป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้า

ในทางการค้ามีผลิตภัณฑ์ไพโซอิเล็กทริกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือตัวกระตุ้น (actuator หรือ sensor) เมื่อได้รับแรงกระทำได้พลังงานไฟฟ้า ดังภาพประกอบที่ 2.21 (ก) และตัวกำเนิดสัญญาณ เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าได้พลังงานกล ตัวอย่างอุปกรณ์ดังกล่าวแสดงในภาพประกอบที่ 2.21 (ข)



(ก)

[ที่มา : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ac/Piezo_igniter.jpg และ
* ; <http://www.americanpiezo.com/standard-products/piezo-ignitors/ignitors.html>]



(ข)

[ที่มา : http://www.cchydrosonics.com/trusweep_web.jpg และ
<http://www.americanpiezo.com/standard-products/ultrasonic-cleaning-transducers.html>]

ภาพประกอบที่ 2.23 ผลิตภัณฑ์ไพเอโซอิเล็กทริกทางการค้าแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ
(ก) ตัวกระตุ้น (ข) ตัวกำเนิดสัญญาณ

การมีพฤติกรรมได้ทั้งสองแบบเป็นจุดเด่นของวัสดุไพโซอิเล็กทริก โดยเฉพาะสินค้าในกลุ่มตัวแปลงสัญญาณที่เป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้าทั่วไปที่เรียกว่าบัสเซอร์ (buzzer) เป็นส่วนประกอบที่อยู่ในอุปกรณ์อื่นๆหลายชนิด เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ เครื่องใช้ไฟฟ้าในครัว ไมโครเวฟ เป็นต้น สามารถควบคุมการทำงานได้โดยตรงด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เพียงส่งสัญญาณ 0 และ 1 ประกอบด้วยแผ่นไพโซอิเล็กทริกฉาบขั้วไฟฟ้าตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัด ติดแน่นบนแผ่นตัวนำโลหะเช่นทองเหลือง หรืออลูมิเนียม ดังภาพประกอบที่ 2.22



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 2.24 (ก) ลำโพงบัสเซอร์ (ข) แผ่นเซรามิกไพโซอิเล็กทริกที่อยู่ภายในลำโพง

วัสดุที่ไพโซอิเล็กทริกทางการค้าที่ใช้อยู่ในกลุ่ม เลดเซอร์โคเนตไททาเนท หรือพีแซดที (lead zirconate titanate, PZT) เป็นวัสดุชนิดเซรามิกสังเคราะห์ที่มีอัตราของส่วนที่แตกต่างกันขึ้นกับบริษัทที่ผลิตรวมไปถึงการใช้ชื่อหรือรหัสทางการค้า ดังนั้นค่าตัวแปรต่างๆของวัสดุจึงอ้างอิงตามตารางที่ 2.5 เป็นตารางที่แสดงค่าเฉลี่ยที่รวบรวมค่าของวัสดุไพโซอิเล็กทริกจากหลายบริษัทในสินค้ากลุ่มลำโพงบัสเซอร์

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลทางการค้าของเซรามิกสังเคราะห์ที่ทำบัทเซอร์
(Boston Piezo-Optics Inc., 2011)

	PZT-5H
k_{33}	0.75
k_{31}	0.39
d_{33} ($\times 10^{-12}$ m/V)	585
d_{31} ($\times 10^{-12}$ m/V)	-265
g_{33} ($\times 10^{-3}$ Vm/V)	19.7
g_{31} ($\times 10^{-3}$ Vm/V)	-8.5
s_{33} ($\times 10^{-12}$ m ² /N)	20
\mathcal{E}_{33}^T	3400
$\tan \delta$	0.02
Q	65
ρ (kg/m ³)	7500
T_c (°C)	195

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

ระบบรับแรงกลที่ติดตั้งวัสดุแปลงพลังงาน จะเปลี่ยนรูปพลังงานขณะที่เกิดการสั่นทำให้ได้พลังงานไฟฟ้า เรียกขั้นตอนนี้ว่า การเก็บเกี่ยวพลังงาน มีวิธีการศึกษาดังนี้

3.1 วัสดุ

- 3.1.1 ไพโซเซรามิก นำมาจากบริษัทเซออร์ (piezo speaker, Kingstate Electronic Corp.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm ความหนา 0.1 mm ติดแน่นบนแผ่นทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 cm ความหนา 0.12 mm
- 3.1.2 กาวนำไฟฟ้า (conductive epoxy, Chemtronics Inc.)
- 3.1.3 แผ่นเหล็กสปริง (steel sheet)
- 3.1.4 แผ่นวงจรพิมพ์อเนกประสงค์ (universal print circuit board)
- 3.1.5 ตะกั่วบัดกรี (soldering wire)

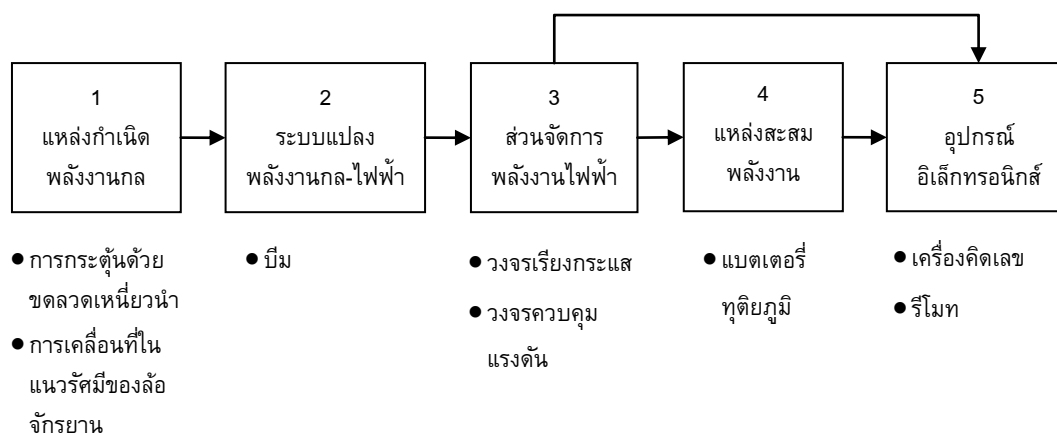
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.2.1 ออสซิลโลสโคป (Tektronix TDS 420A Digital Oscilloscope, Tektronix Inc.)
- 3.2.2 เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Stanford Research System DS 345 Function Generator 30 MHz, Stanford Research System Inc.)
- 3.2.3 โฟโตนิกเซนเซอร์ หรือเครื่องวัดการกระจัด (MTI-2100 Photonic Sensor, MTI Instrument Inc.)
- 3.2.4 มัลติมิเตอร์ (FLUKE 45 Digital Multimeter, Fluke Corp.)
- 3.2.5 หัวแร้งบัดกรี (HAKKO-981 Soldering Iron, Hakko Corp.)
- 3.2.6 มิเตอร์แอลซีเอ (Agilent Precision LCR Meter 4285A, Agilent Technologies Inc.)
- 3.2.7 แหล่งจ่ายไฟตรง 30 V_{dc}
- 3.2.8 เครื่องขยายสัญญาณ (FK-60 : 15Watt Power Amplifier, Futurekit marketing Co, Ltd.)

- 3.2.9 เครื่องคิดเลข (DJ-120D Calculator, Casio Computer co., LTD)
- 3.2.10 เครื่องควบคุมระยะไกล หรือรีโมท (remote control) (FK-410 : IR Transmitter / Receiver Remote Control, Futurekit marketing Co, Ltd.)
- 3.2.11 ขดลวดเหนี่ยวนำ ประกอบด้วยแกนเหล็ก 2 x 2 cm พันด้วยลวดตัวนำเบอร์ 35 จำนวน 800 รอบ
- 3.2.12 แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.0 cm ความสูง 2.0 mm น้ำหนัก 1.68 g
- 3.2.13 หม้อแปลงไฟกระแสตรง 16 V (DC Adapter 16V/850mA, ETT Co, Ltd.)
- 3.2.14 จักรยานแบบที่ 1 หรือจักรยานออกกำลังกายแบบปั่นอยู่กับที่ (stationary exercise bicycle) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงล้อ 46 cm
- 3.2.15 จักรยานแบบที่ 2 หรือจักรยาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงล้อ 60 cm
- 3.2.16 แท่งพลาสติก ยึดติดกับล้อจักรยานออกกำลังกายแบบที่ 1 และแบบที่ 2
- 3.2.17 โปรแกรม COMSOL Multiphysics, version 4.2.0.150, COMSOL, Inc.
- 3.2.18 โปรแกรม MATLAB 2011b, version 7.13.0.564, The MathWorks, Inc.
- 3.2.19 คีมตัดและตัดชิ้นงาน
- 3.2.20 ปากคีบจับชิ้นงาน

3.3 วิธีการวิจัย

ภาพประกอบที่ 3.1 คือ ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบที่ปรากฏในการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับหลักการเก็บเกี่ยวพลังงานในหัวข้อที่ 2.1



ภาพประกอบที่ 3.1 ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวิธีทางไพโซโซอิเล็กทริกทิกซ์ของลูกศรแทนทิศทางของพลังงานที่ส่งผ่านในระบบ

ส่วนประกอบหลัก คือ ไพโซโซเซรามิกทำหน้าที่เป็นทรานส์ดีวเซอร์ ติดแน่นบนแผ่นทองเหลืองทำหน้าที่เป็นที่ยึดจับและเป็นขั้วไฟฟ้า

แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน

- ส่วนที่เกี่ยวข้องกับบีม ได้แก่ ทรานส์ดีวเซอร์ 2 อัน และคานเหล็ก ทั้งสองส่วนประกอบกัน เป็นโมดูลแบบขนาน มีน้ำหนักรวมเท่ากับ 27.31 g
- ส่วนทดสอบในห้องปฏิบัติการ การทดสอบเก็บเกี่ยวพลังงาน ได้แก่ ชุดทดสอบเก็บเกี่ยวพลังงาน และวงจรที่เกี่ยวข้อง
- ส่วนทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีของจักรยาน และอุปกรณ์ที่ประยุกต์ใช้งานซึ่งเป็นอุปกรณ์พกพา เช่น เครื่องคิดเลข และเครื่องควบคุมระยะไกล

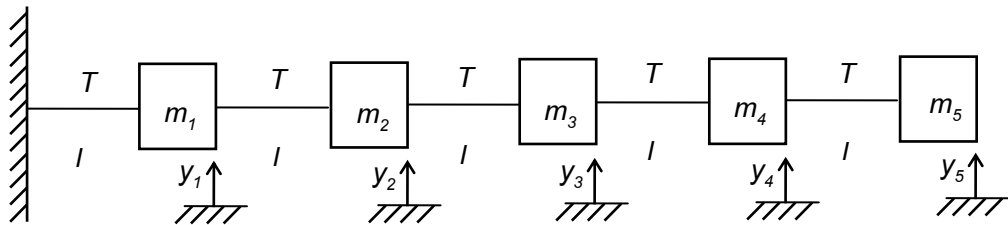
รายละเอียดการวิเคราะห์และออกแบบในแต่ละส่วน มีดังนี้

3.3.1 บีมและส่วนที่เกี่ยวข้อง

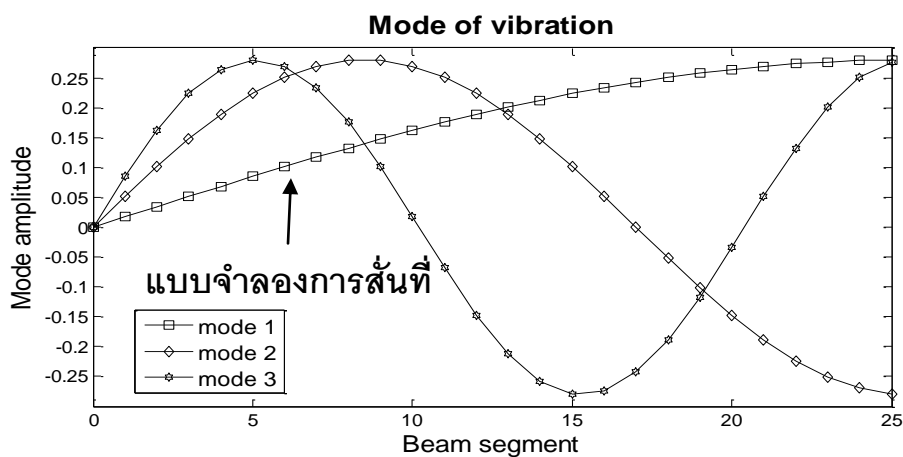
1) โหมดการสั่น

การเลือกโหมดการสั่นสำหรับบีม ต้องรู้ถึงรูปแบบการสั่นที่สามารถเกิดขึ้น ทำได้โดยวิธีการแบ่งเป็นออกเป็นชิ้นหน่วยย่อยมีขนาดมวล m เท่ากัน เชื่อมต่อกันด้วยเชือกความตึง T และขนาดระยะห่างระหว่างอนุภาค l เนื่องจากบีมสั่นขึ้นลงในแนวแกน y จึงมีรูปแบบการสั่นตามขวาง กำหนดให้อนุภาคปลายสุดฝั่งหนึ่งยึดติดผนังแข็ง และอีกฝั่งปล่อยอิสระ สอดคล้องรูปแบบบีมที่เลือกใช้ ดังภาพประกอบที่ 3.2 (ก)

รูปแบบการสั่นที่สนใจ คือ โหมดการสั่นที่ 1 เนื่องจากโหมดดังกล่าวเป็นรูปแบบการสั่นที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไปและพบได้ที่มีความถี่ต่ำ ดังภาพประกอบที่ 3.2 (ข)



(ก)



(ข)

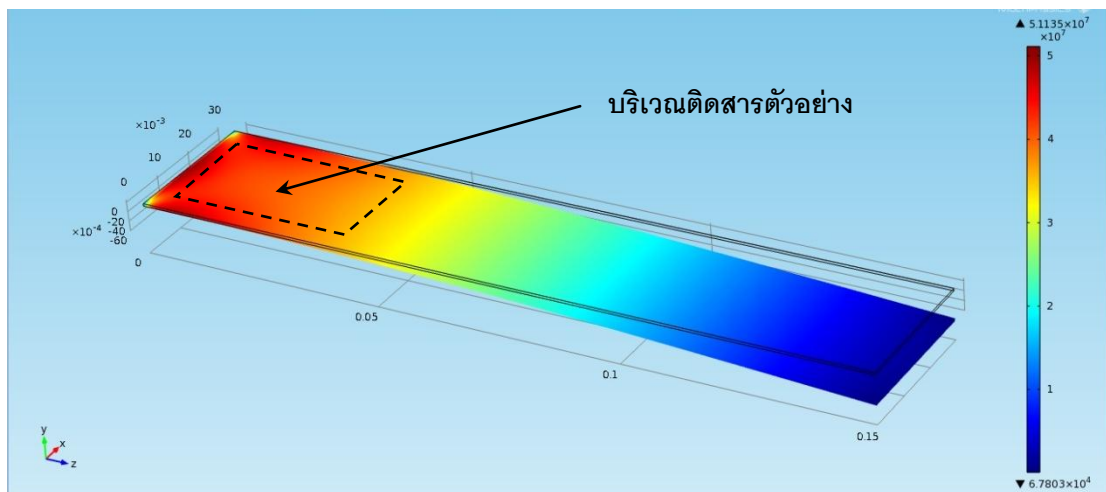
ภาพประกอบที่ 3.2 (ก) ชิ้นหน่วยย่อยของบีมเป็นแบบจำลองเพื่อศึกษาการสั่นตามขวาง
(ข) โหมดการสั่นที่ได้จากชิ้นหน่วยย่อย 25 ชิ้น

2) ตำแหน่งติดแทรกนส์ติวเซอร์

กำลังไฟฟ้าจากแทรกนส์ติวเซอร์แปรผันตามความเค้นกล ดังนั้น ตำแหน่งที่มีค่าความเค้นมากจึงเป็นบริเวณใกล้จุดตรึงบีบ วิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) ด้วยโปรแกรม COMSOL โดยใช้พารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นบนบีบ

พารามิเตอร์ของบีบ	ค่า
ขนาด	$3 \times 15 \times 0.05 \text{ cm}^3$
มอดูลัสของยัง	210 GPa
อัตราส่วนของปัวซอง	0.28
ความหนาแน่น	7850 kg/m^3



ภาพประกอบที่ 3.3 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ ของบีบ ในโหมดการสั่นที่ 1 ซึ่งเส้นประสีเหลี่ยมเป็นบริเวณที่ติดแทรกนส์ติวเซอร์

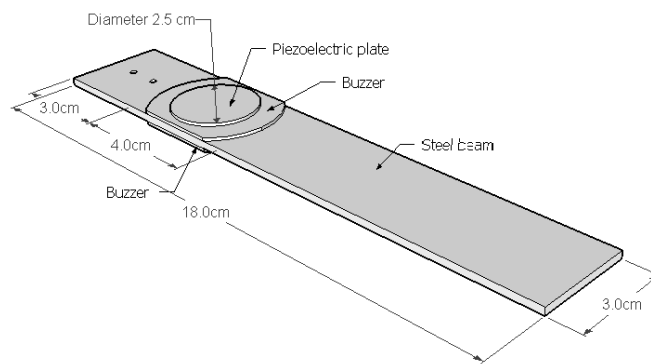
ภาพประกอบที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในบีบขณะโค้งงอ แยกค่าความเค้นด้วยสีที่แตกต่างกัน สีแดงมีค่าความเค้นมากกว่าสีน้ำเงินซึ่งพบได้ ในบริเวณใกล้จุด

ตรง และมีค่าลดลงเมื่อเข้าใกล้ปลายบีม ดังนั้น พื้นที่ดังกล่าวจึงเหมาะสำหรับการติดตั้งตัวเซ็นเซอร์

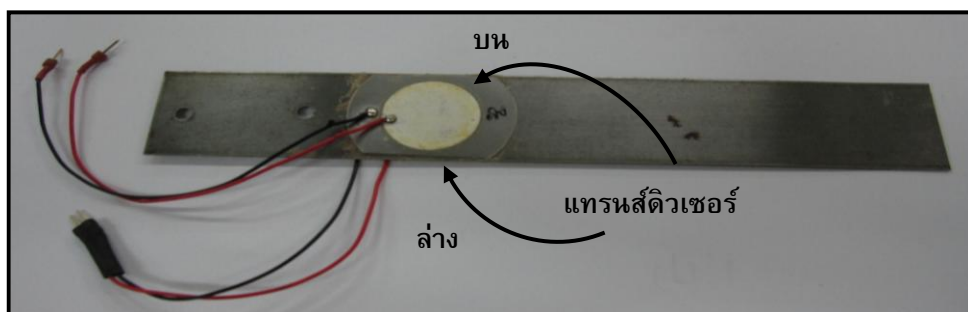
ถ้าความเค้นในบีมเปลี่ยนแปลงตามเวลา t นั่นคือ ขณะบีมได้รับพลังงานสั่น จะทำให้การกระจัดทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง $D(t)$ เกิดกระแสไฟฟ้า $I(t)$ เมื่อ A แทนพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า

$$I(t) = \int_A \frac{\partial D(t)}{\partial t} dA \quad (3.1)$$

การทำไบมอฟ คือ การติดตั้งตัวเซ็นเซอร์ 2 ชิ้น ด้วยกาวนำไฟฟ้า ซึ่งติดอยู่ใกล้จุดตรึง ดังภาพประกอบที่ 3.4 (ก) และภาพถ่ายบีมที่ใช้ทดลอง (ข)



(ก)



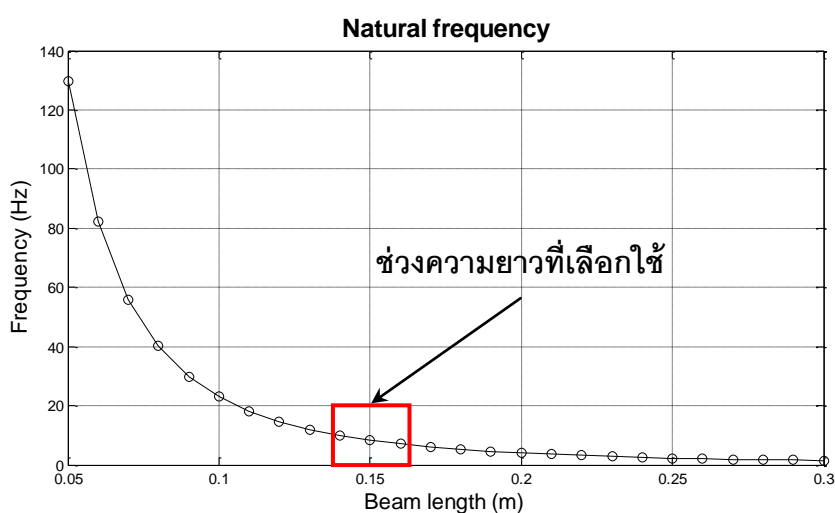
(ข)

ภาพประกอบที่ 3.4 (ก) ภาพแสดงตำแหน่งที่ติดตั้งตัวเซ็นเซอร์บนบีม

(ข) ภาพถ่ายบีมไบมอฟที่ใช้ทดสอบ

3) ความถี่ทำงาน (operating frequency)

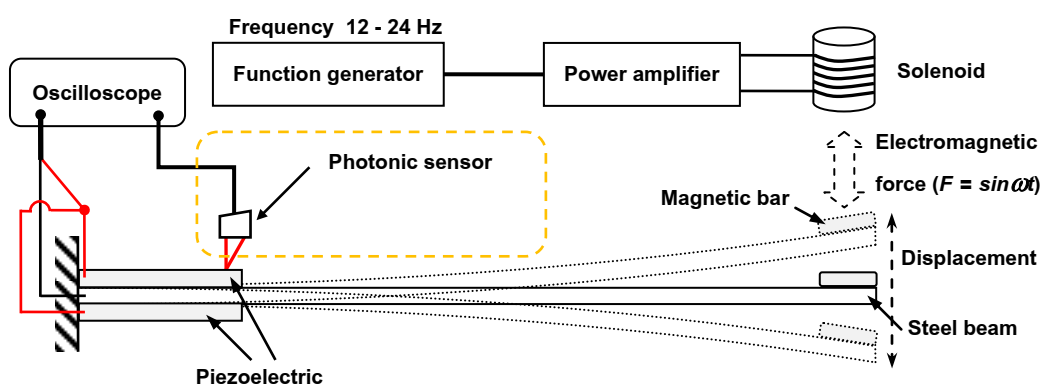
ความถี่ทำงาน คือ ความถี่เรโซแนนซ์พื้นฐานซึ่งสั้นในโหมดที่ 1 บีมที่ใช้มีค่าความถี่ทำงาน ต่ำกว่า 20 Hz คาดว่าเป็นช่วงความถี่ที่พบเห็นได้ง่ายที่สุดในสิ่งแวดล้อม และสอดคล้องกับบีมความยาว 15 ± 0.5 cm (เมื่อน้ำหนักรวมของบีมคงที่) ดังภาพประกอบที่ 3.6 แสดงความถี่ทำงานที่เปลี่ยนแปลงความยาวซึ่งคำนวณด้วยสมการ 2.8



ภาพประกอบที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ทำงานกับความยาว

ทุกการทดลองในห้องปฏิบัติการ การกระตุ้นหรือให้พลังงานสั้นแก่บีม ใช้หลักการขดลวดเหนี่ยวนำ ด้วยสัญญาณรูปไซน์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ไม่เกิน 50 Hz ผ่านเครื่องขยายสัญญาณเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก แรงแม่เหล็กผลักและดึงแท่งแม่เหล็ก ซึ่งทำหน้าที่เป็นกอน้ำหนักหรือมวลถ่วงที่ปลายบีม

การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ให้กับระบบเป็นฟังก์ชันกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากทรานส์ดิวเซอร์และการกระตุ้นที่บริเวณใกล้จุดตรึง กำหนดช่วงค่าความถี่กระตุ้นบีม ตั้งแต่ 12 ถึง 24 Hz บีมที่ทดสอบติดก่อนมวลถ่วงที่ปลายบีม 1 ก้อน สร้างแหล่งพลังงานสั่นโดยใช้หลักการขดลวดเหนี่ยวนำ ระยะใกล้จุดตรึง 1.5 cm เป็นตำแหน่งวัดการกระตุ้นของบีมด้วยเครื่องโฟโตนิคเซนเซอร์ อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าที่มาจากผลของปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (ที่วัดคร่อมทรานส์ดิวเซอร์) จากออสซิลโลสโคป และอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องโฟโตนิคเซนเซอร์ เพื่อหาการกระตุ้นด้วยสมการ $1\text{mm} / 0.35\text{V}$ ส่วนประกอบชุดการทดลอง ดังภาพประกอบที่ 3.6



ภาพประกอบที่ 3.6 ชุดการทดลองแรงดันไฟฟ้าจากทรานส์ดิวเซอร์ที่ความถี่ทำงานต่างกัน

4) การกระจัดปลายบีม

การกระจัดปลายบีมแปรผันตามแรงกระทำ ดังสมการ

$$F = \left(\frac{Ywh^3}{4L^3} \right) d \quad (3.2)$$

$$k = \frac{Ywh^3}{4L^3} \quad (3.3)$$

- เมื่อ F คือ แรงกระทำปลายบีม หน่วย N
 Y คือ โมดูลัสของยัง หน่วย N/m^2
 w คือ ความกว้างของบีม หน่วย m
 h คือ ความหนาของบีม หน่วย m
 L คือ ความยาวของบีม หน่วย m
 k คือ ค่าคงที่สปริงของบีม หน่วย N/m ในกรณีนี้มีค่า 58.33 N/m
 d คือ การกระจัดปลายบีม หน่วย m

แรงที่แปรผันตามการกระจัดปลายบีมซึ่งเป็นไปตามสมการ 3.2 และได้ผลการคำนวณตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ขนาดของการกระจัดปลายบีมและแรงที่แปรผันตาม

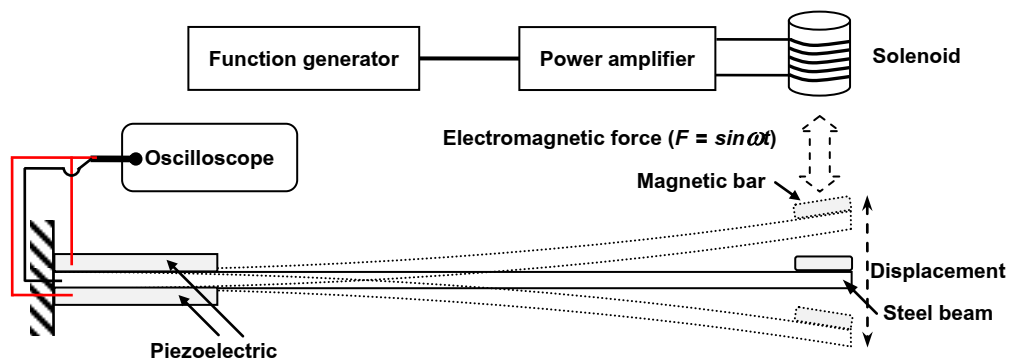
การกระจัดปลายบีม (m)	แรงกด (N)
0.005	0.292
0.010	0.583
0.015	0.875
0.020	1.167
0.025	1.458
0.030	1.750

แรงดันไฟฟ้าของแทรนส์ดิวเซอร์แปรผันตามความเค้น ดังสมการ

$$V = gTt \quad (3.4)$$

เมื่อ V คือ ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าของแทรนส์ดิวเซอร์ หน่วย V
 g คือ สัมประสิทธิ์ไพเอโซอิเล็กทริกศักย์ไฟฟ้า หน่วย Vm/N
 T คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในแผ่นไพเอโซอิเล็กทริก หน่วย N/m^2
 t คือ ความหนาแผ่นไพเอโซอิเล็กทริก หน่วย m

การทดลองเพื่อหาขนาดของการกระจัดที่เป็นฟังก์ชันกับแรงกระทำปลายบีม และแรงดันไฟฟ้าจากแทรนส์ดิวเซอร์ กำหนดให้การกระจัดปลายบีมมีขนาดต่างกัน เพิ่มขึ้นตามขั้น ขั้นละ 5.0 mm และมีขนาดสูงสุด 3.0 cm บีมที่ทดสอบติดก่อนมวลถ่วงที่ปลายบีม 1 ก่อนกระตุ้นที่ความถี่ทำงานของบีม สร้างแหล่งพลังงานสั่นโดยใช้หลักการขดลวดเหนี่ยวนำ อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าไพเอโซอิเล็กทริก จากออสซิลโลสโคป ส่วนประกอบชุดการทดลอง ดังภาพประกอบที่ 3.5



ภาพประกอบที่ 3.7 ชุดการทดลองแรงดันจากแทรนส์ดิวเซอร์กับการกระจัดปลายบีม

5) การปรับเปลี่ยนความถี่ทำงาน

การปรับความถี่ทำงาน เป็นการเพิ่มความสามารถการแปลงพลังงาน และรองรับความถี่ในสภาพแวดล้อม

แบ่งออกเป็น 3 การทดลอง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การเปลี่ยนความยาวบีม คือ เปรียบเทียบระหว่างบีมสองความยาว
- การเลื่อนจุดศูนย์กลางมวลบีม คือ เปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง
- การเปลี่ยนน้ำหนักมวลบีม คือ เพิ่มก้อนน้ำหนักที่ตำแหน่งติดตั้ง

บีมที่ใช้ทดสอบเป็นบีมแบบมีมวลถ่วงติดตั้งที่ตำแหน่งปลายบีม ค่าความถี่ทำงานของบีมที่สามารถหาได้ เป็นดังสมการ (Erturk and Inman 2009)

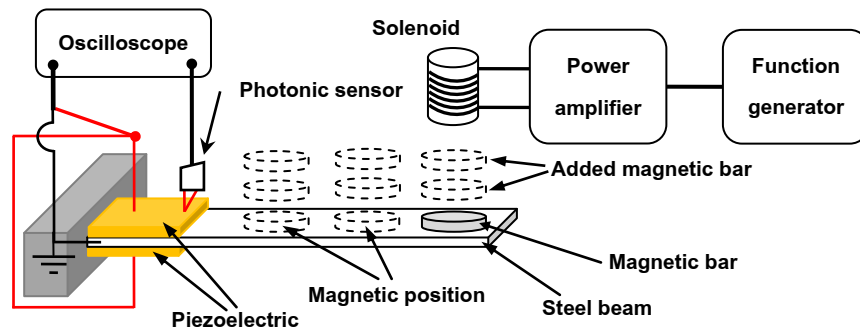
$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Ywh^3}{4L^3(m + 0.24m_c)}} \quad (3.5)$$

เมื่อ f_r คือ ความถี่ทำงานของบีม หน่วย Hz
 m คือ น้ำหนักมวลถ่วง หน่วย kg
 m_c คือ น้ำหนักบีม หน่วย kg

- การทดลองการเปลี่ยนความยาวของบีม กำหนดให้บีมมีความยาว 10 และ 15 cm สร้างแหล่งพลังงานสั้นโดยใช้หลักการขดลวดเหนี่ยวนำ กระตุ้นที่ความถี่ทำงานของแต่ละบีม คือ 33.3 และ 17.28 Hz ตามลำดับความยาวบีม การกระตุ้นปลายบีมขณะสั้นต่อเนื่องมีขนาด 1.5 cm คงที่ตลอดการทดลองทั้งบีมสองความยาว วัดกำลังไฟฟ้าเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่แตรนส์ดีวเซอร์ได้รับ (วงจรที่ใช้ทดสอบจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป)

- การทดลองการเลื่อนจุดศูนย์กลางมวลบีม กำหนดให้ตำแหน่งวางมวลถ่วงบีมเป็น 3 ระยะ คือ 5, 10 และ 15 cm วัดจากจุดตรึงถึงตำแหน่งวางมวล ให้การกระตุ้นปลายบีมมีขนาด 1.3 cm เท่ากันทุกตำแหน่งวางมวล กระตุ้นด้วยความถี่ที่มีค่าน้อยไปมาก อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าไพโอโซอิเล็กทริกจากออสซิลโลสโคป ได้ค่าความถี่ทำงานของบีม

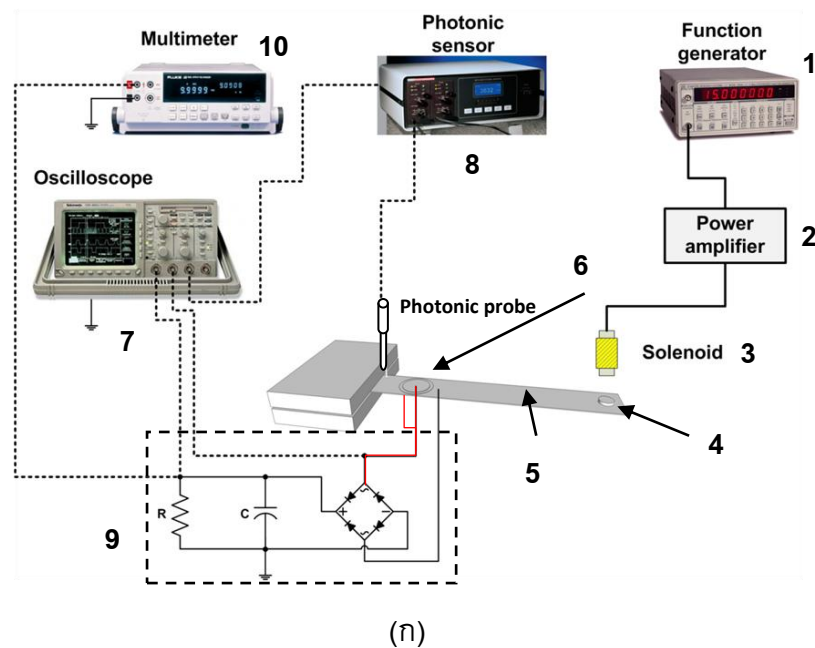
- การทดลองการเปลี่ยนน้ำหนักมวลถ่วง ใช้เงื่อนไขเดียวกับการทดลองเลื่อนจุดศูนย์กลางมวลบีม แต่เพิ่มแท่งแม่เหล็กที่ติดแต่ละตำแหน่งโดยมีจำนวนมวลถ่วง 1, 2 และ 3 อัน ตามลำดับ การทดลองส่วนนี้แสดงดังภาพประกอบที่ 3.8

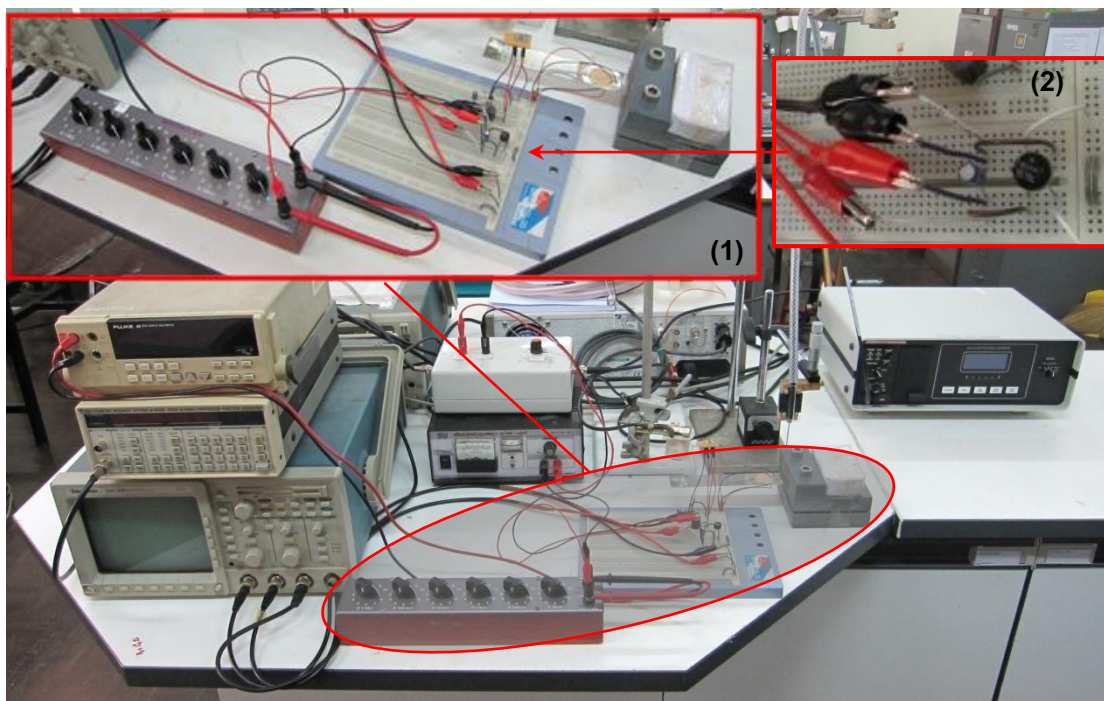


ภาพประกอบที่ 3.8 การปรับเปลี่ยนความถี่ทำงานของบีมด้วยวิธีการเปลี่ยนจุดศูนย์ถ่วง และการเพิ่มมวลบีม

3.3.2 การเก็บเกี่ยวพลังงาน และวงจรเชื่อมต่อ

ส่วนประกอบและอุปกรณ์ทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงาน มีรายละเอียดดังนี้





(ข)

ภาพประกอบที่ 3.9 (ก) ส่วนประกอบของชุดการทดลอง จำลองการเก็บเกี่ยวพลังงานสั้น และแปลงพลังงานที่ได้เป็นไฟฟ้า (ข) อุปกรณ์การทดลองในห้องปฏิบัติการ

ภาพประกอบที่ 3.9 (ก) ชุดการทดลองประกอบด้วย ส่วนกำเนิดพลังงานสั้น ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (1) สร้างสัญญาณรูปไซน์ตามความถี่ทำงาน ส่งผ่านเครื่องขยายสัญญาณ (2) ไปที่ขดลวดเหนี่ยวนำ (3) เกิดสนามแม่เหล็ก ผลักและดึงแท่งแม่เหล็ก (4) ทำให้ปลายบีบ (5) เกิดการเคลื่อนที่ในทิศขึ้นลง เมื่อเกิดพลังงานสั้นทรานส์ดิวเซอร์ (6) จะแปลงพลังงานกลเป็นไฟฟ้า อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ผ่านทางออสซิลโลสโคป (7) และอ่านค่าการกระจัดได้จากโฟโตนิคเซนเซอร์ (8) สัญญาณที่ได้เป็นไฟสลับแล้ว แปลงเป็นไฟตรงที่โดยส่วนจัดการพลังงาน (9) ซึ่งค่าแรงดันไฟตรงอ่านได้จากมัลติมิเตอร์ (10) ค่าความต้านทาน (R) ที่เปลี่ยนแปลง คำนวณหาค่าพลังงานที่ได้จากการเก็บเกี่ยวพลังงาน ดังสมการ

$$P = V^2/R_L \quad (3.6)$$

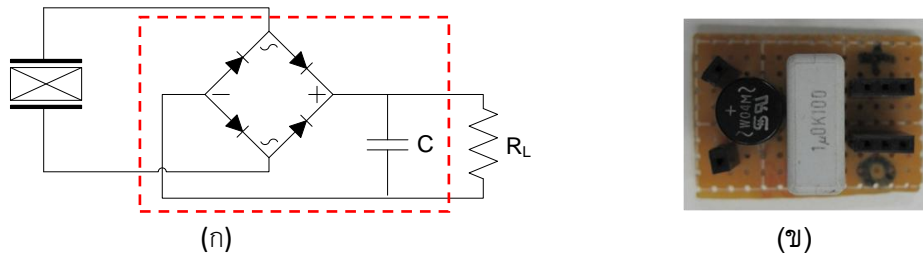
เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า หน่วย W

V คือ แรงดันไฟฟ้า หน่วย V

R_L คือ ค่าความต้านทาน หน่วย Ω

ส่วนจัดการพลังงาน ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส และวงจรควบคุมแรงดัน มีรายละเอียดการทดลองดังนี้

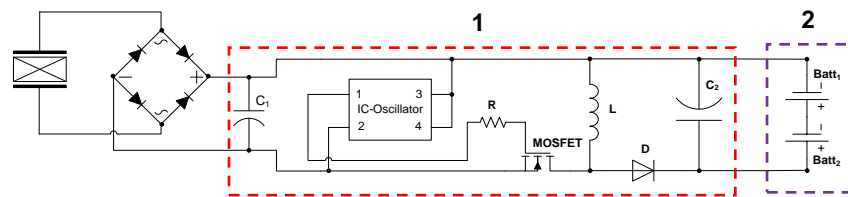
1) กำลังไฟฟ้าของทรานส์ดิวเซอร์



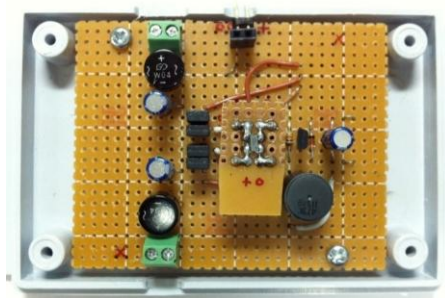
ภาพประกอบที่ 3.10 วงจรเรียงกระแส (ก) ต่อกับทรานส์ดิวเซอร์และตัวต้านทาน และ (ข) รูปของวงจร

การทดลองนี้เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจากทรานส์ดิวเซอร์ เป็นฟังก์ชันกับการกระจัดปลายบีม เชื่อมต่อวงจรดังภาพประกอบที่ 3.10 โดยสร้างแหล่งกำเนิดพลังงานสั่นโดยหลักการขดลวดเหนี่ยวนำ มวลถ่วงติดที่ปลายบีม 1 อัน กระตุ้นการสั่น ด้วยความถี่ทำงาน 16.58 Hz ให้การกระจัดมี 3 ขนาด 1.5, 2 และ 3 cm วัดค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานปรับค่าได้ R_L ช่วง 10k - 10M Ω คำนวณกำลังไฟฟ้าด้วยสมการ 3.6

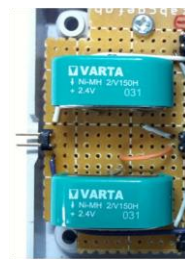
2) การประจุแบตเตอรี่ทุติยภูมิ



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบที่ 3.11 (ก) ส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรควบคุมแรงดันเมื่อเชื่อมต่อแบตเตอรี่

(ข) ภาพถ่ายวงจรและ (ค) แบตเตอรี่

การทดลองนี้เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า จากทรานส์ติวเซอร์ ที่ผ่านวงจรควบคุมแรงดันเป็นฟังก์ชันกับการกระจัดปลายบีม เชื่อมต่อวงจรดังภาพประกอบที่ 3.11 (ก) ใช้เงื่อนไขการทดลองเดียวกับการทดลองกำลังไฟฟ้าของทรานส์ติวเซอร์ แต่ให้การกระจัดปลายบีมมี 2 ขนาด 2 และ 3 cm วัดค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานปรับค่าได้ช่วง 10k - 10MΩ คำนวณกำลังไฟฟ้า

แบตเตอรี่ทุติยภูมิในภาพประกอบที่ 3.11 (ค) เป็นแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดสอบการประจุโดยใช้วงจรในภาพประกอบที่ 3.11 (ก) เงื่อนไขที่ใช้ทดสอบการประจุ กำหนดให้บีมสั้นที่การกระจัดปลายบีม มีขนาด 3 cm ความถี่ทำงาน 16.58 Hz มีมวลถ่วงปลายบีม 1 อัน บันทึกเวลาที่ใช้ทดสอบ ควบคุมกับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแบตเตอรี่ 2 ก่อนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในวงจร คาดว่า แต่ใช้เวลาที่มากกว่า 35 ชั่วโมง (คำนวณโดยใช้สมการที่ 2.24)

3.3.3 การเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากการหมุนในแวนรศมี

การทดลองในหัวข้อนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ใช้ปั่นจักรยาน (km/h) กับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเปลี่ยนรูปพลังงานจากแทรนส์ดีวเซอร์ โดยใช้เงื่อนไขของความเร็วต่างกัน ดังนั้น ที่ความเร็วต่างๆ แรงที่มาดกกระทบบที่ปลายบีมต้องมีค่าต่างกัน ดังสมการ

$$F = mr\alpha \quad (3.7)$$

เมื่อ F คือ แรงที่ได้จากการหมุนในแวนรศมี หน่วย N

m คือ มวลของระบบประกอบด้วยวงล้อ และมวลกระทบบ หน่วย kg

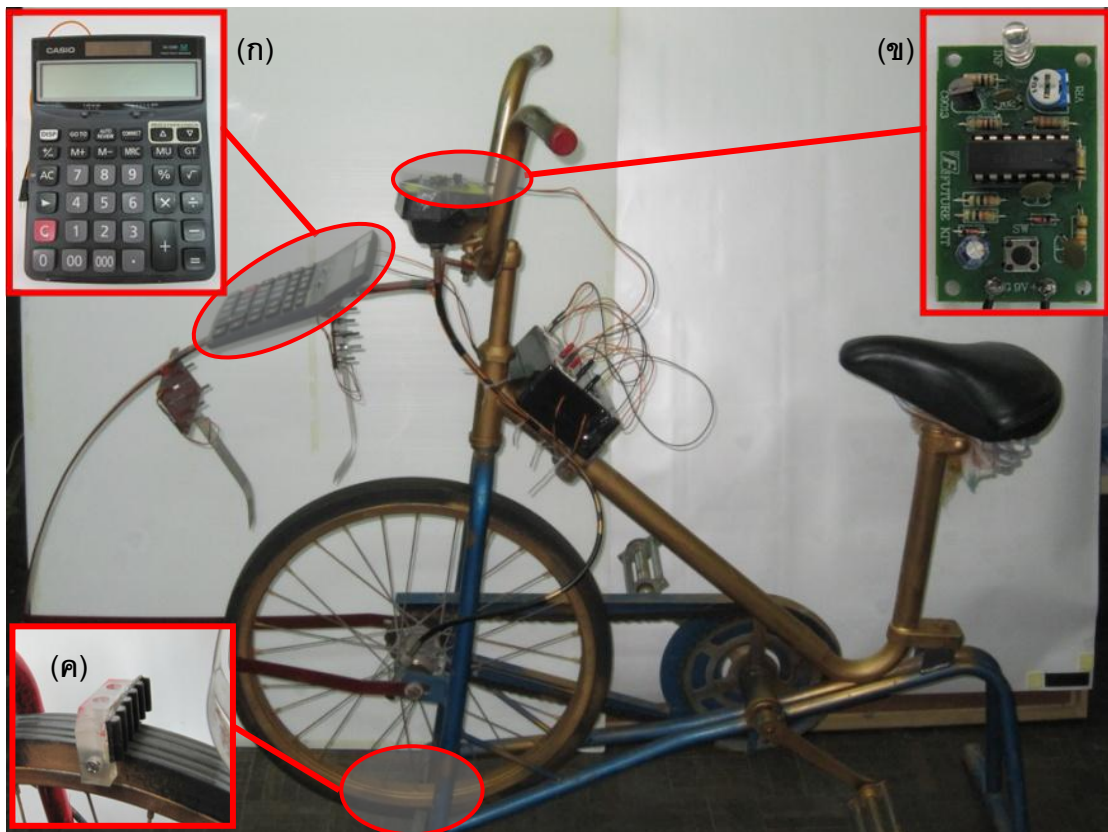
r คือ รัศมีวงล้อวัดจากจุดกึ่งกลางถึงตำแหน่งมวลกระทบบ หน่วย m

α คือ ความเร่งเชิงมุมของวงล้อ หน่วย m/s^2

จากสมการ คาดว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากแทรนส์ดีวเซอร์จะแปรผันตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น

1) การประยุกต์ใช้งานแบบต่อเนื่อง

จักรยานแบบที่ 1 ได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานเก็บเกี่ยวพลังงาน โดยทำโครงสร้างสำหรับยึดจับป้อนที่มีความยาวตามที่ได้ออกแบบ



ภาพประกอบที่ 3.12 จักรยานแบบที่ 1 พร้อมอุปกรณ์ทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงาน ประกอบด้วย (ก) เครื่องคิดเลข (ข) เครื่องควบคุมระยะไกล และ (ค) แท่งพลาสติก

การประยุกต์ใช้ส่วนนี้ คือ การนำเสนอในลักษณะการนำพลังงานที่ได้ไปใช้งานทันที หรือใช้งานแบบต่อเนื่อง ดังองค์ประกอบหนึ่งในภาพประกอบที่ 3.1 ลำดับที่ 5 นั่นคือ อุปกรณ์ทดสอบสามารถทำงานได้ขณะที่เกิดการปั่นจักรยานเท่านั้น จากหลักการที่ว่าพลังงานไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนรูปโดยทรานส์ดิวเซอร์ สามารถจ่ายให้กับกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กได้ โดยใช้ร่วมกับวงจรควบคุมแรงดันที่ประกอบด้วย ซีเนอร์ไดโอด (ภาคผนวก ก.) เนื่องจากแรงดันที่ได้จากการปั่นจักรยานมีค่าสูงเกินกว่า ที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะสามารถรองรับได้

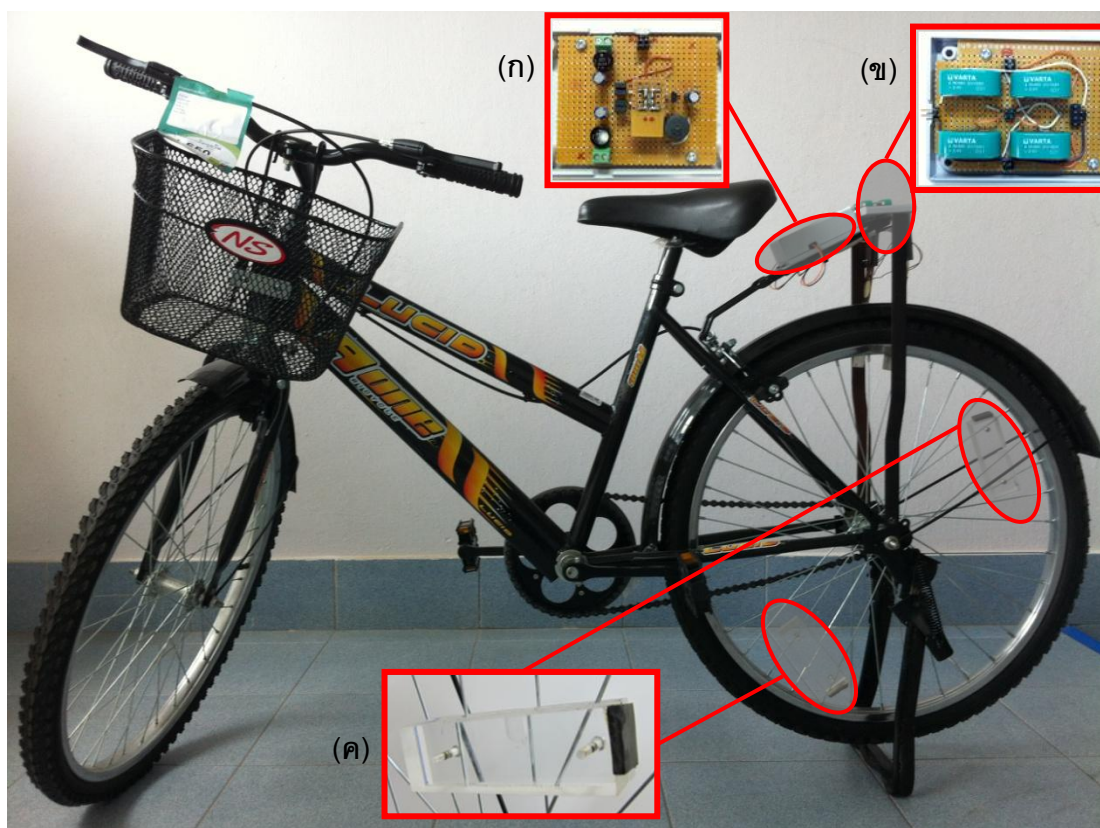
จำเป็นต้องมีวงจรป้องกัน และได้ทดสอบร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในระดับต่ำ (ต่ำกว่า 1 mW) ได้แก่ อุปกรณ์ในภาพประกอบที่ 3.11 (ก) เครื่องคิดเลข และ (ข) เครื่องควบคุมระยะไกลแบบอินฟราเรดภาคส่ง ทั้งสองวงจรปลดแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงออกทั้ง แบตเตอรี่ และแผงเซลล์สุริยะ

การทดสอบเลือกใช้ยูนิมอฟร่วมกับวงจรเรียงกระแสเชื่อมต่อกับภาพประกอบที่ 3.9 (ก) ใช้แหล่งกำเนิดการสั่นจากการกระทบของแท่งพลาสติกติดล้อ 1 อัน (หนัก 31.55 g) บีมจะถูกกระทบด้วยการหมุนล้อจักรยาน ใช้ความเร็วการปั่นที่ 6, 7 และ 8 km/h วัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานปรับค่าได้ช่วง 1k - 10M Ω คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า

การทดสอบร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการกำลังไฟฟ้าต่ำ และพลังงานที่ได้จากยูนิมอฟก็อยู่ในระดับต่ำ จึงทำให้ที่ความเร็วต่างๆ กำลังที่ได้ย่อมต่างกันด้วย ดังนั้น ความเร็วเริ่มต้นที่ทำให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้ จะบอกให้ทราบถึงกำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่อุปกรณ์ต้องการ

2) การประยุกต์ใช้งานแบบไม่ต่อเนื่อง

จักรยานแบบที่ 2 นำมาประยุกต์ใช้กับการเก็บเกี่ยวพลังงาน แบบไม่ต่อเนื่อง นั่นคือ นำกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเปลี่ยนรูปพลังงานไปประจุให้แก่แบตเตอรี่ทุติยภูมิ แล้วนำไปใช้ในกรณีจำเป็น หรือไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่ต้องการไฟเลี้ยงระดับ 5 V หรือต่ำกว่า



ภาพประกอบที่ 3.13 จักรยานแบบที่ 2 (ก) วงจรประจุแบตเตอรี่ (ข) แบตเตอรี่ทุติยภูมิ และ (ค) แท่งพลาสติก

การทดลองส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าระบบเก็บเกี่ยวพลังงานโดยไบโมอฟที่ใช้ร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อประจุกระแสให้แก่แบตเตอรี่ทุติยภูมิ สามารถทำได้ โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วจักรยาน เพื่อตรวจสอบว่า บีมไบโมอฟ 1 บีม สามารถให้กำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่วงจรควบคุมแรงดันต้องการได้ วงจรดังกล่าวสามารถประจุแบตเตอรี่ทุติยภูมิได้ และเป็นวงจรที่ออกแบบสำหรับการประจุแบตเตอรี่โดยใช้วัสดุไพโซอิเล็กทริก ซึ่งได้ทดลองมาแล้วในหัวข้อที่ 3.3.2 เพื่อหาเงื่อนไขเริ่มต้นที่วงจรต้องการ ดังนั้น

กำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม ที่ได้จากไบมอฟซึ่งทดสอบในห้องปฏิบัติการ แล้วทำให้วงจรทำงานได้
 ควรมากกว่า $60 \mu\text{W}$ ซึ่งมีการกระจายปลายมีมากกว่า 2 cm และคาดว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากผล
 การทดลอง จะมีค่ามากกว่าค่ากำลังไฟฟ้าเริ่มต้นที่วงจรต้องการ ณ ความเร็วเริ่มค่าหนึ่งซึ่งได้
 จากการปั่นจักรยาน ขั้นตอนการทดลองในส่วนนี้เหมือนกับการทดลองในส่วนการประยุกต์ใช้
 งานแบบต่อเนื่อง และศึกษาจากเงื่อนไขการทดลองเดียวกัน

3.3.4 ประสิทธิภาพของระบบเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุไพโซอิเล็กทริก

ประสิทธิภาพของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานแสดงถึงความสามารถการแปลง
 พลังงานกลเป็นไฟฟ้าของระบบบีมคานติลิวอร์ (Shu and Lien, 2006) ดังสมการ

$$\eta = \frac{\frac{k_t^2}{\zeta}}{2\pi + \frac{k_t^2}{\zeta}} \quad (3.8)$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของบีม
 k_t^2 คือ สัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้า-กลของแทรนส์ดีวเซอร์
 ζ คือ อัตราส่วนความหน่วงของบีมหรือ $1/(2Q)$

3.3.5 ค่าขีดจำกัดของพารามิเตอร์

ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยบีมคานติลิวอร์กระบวนการแปลงพลังงานจะ
 เกิดขึ้นได้เมื่อระบบได้รับพลังงานสั้น การหาขีดจำกัดของระบบจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขดังนี้
 แรงกระทำปลายบีม และความถี่ทำงานคงที่ ดังนั้นการทดสอบระบบในห้องปฏิบัติการจึงกระทำ
 ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว ความถี่ทำงานของบีมสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (3.5)

จากแบบจำลองทางไฟฟ้ากลในหัวข้อที่ 2.3.2 ค่าความต้านทานที่เหมาะสม
 โดยประมาณของการเชื่อมต่อแบบมาตรฐานที่ความถี่ทำงาน ดังสมการ

$$R_{opt} = \pi / (2C_0 \omega) \quad (3.9)$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าความเก็บประจุของทรานส์ดิวเซอร์ และ ω คือ ความถี่เชิงมุมของระบบ ค่าความต้านทานที่เหมาะสมนี้ได้ว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่เดียวกัน และแรงกระทำปลายบีบ F_m ดังสมการ

$$P_{max} = \frac{\alpha^2 F_m^2}{2\pi C_0 \omega C^2} \quad (3.10)$$

แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบเก็บเกี่ยวพลังงานของการเชื่อมต่อแบบมาตรฐานจะขึ้นกับแรงกระทำที่ปลายบีบ

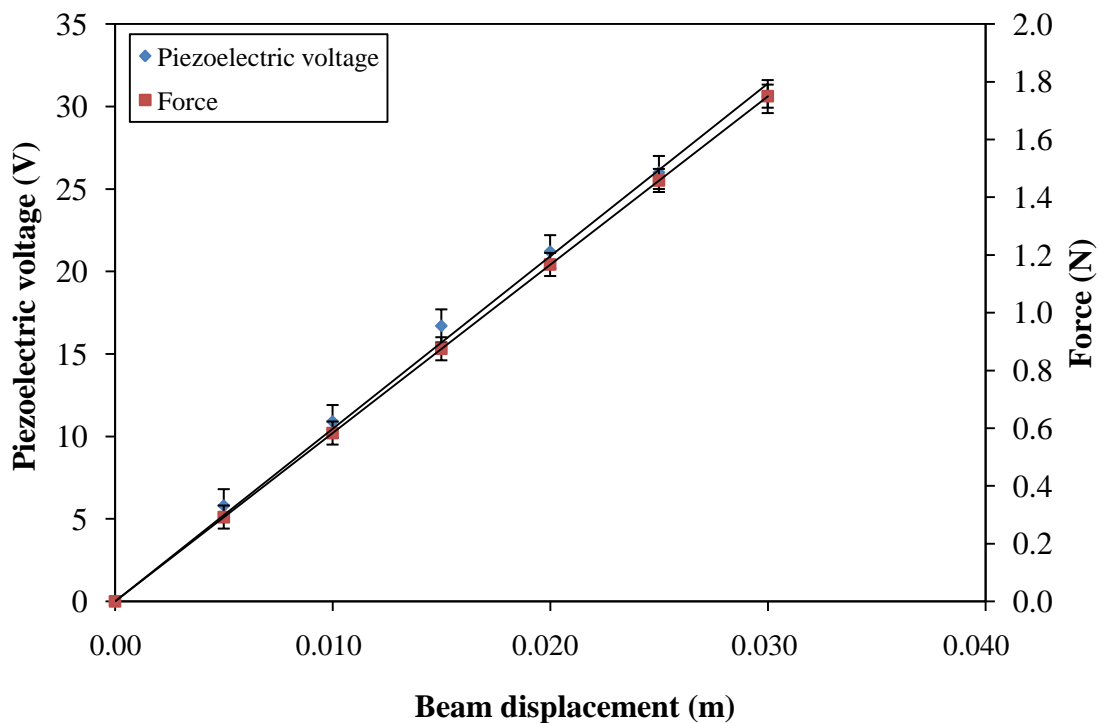
บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

4.1 การทดสอบไบมอฟ

4.1.1 แรงดันไฟฟ้ากับการกระจัดปลายบีม

ผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า ระยะกระจัดและแรงดันไฟฟ้าจากทรานส์ดิวเซอร์แปรผันตามแรงที่กระทำบริเวณปลายบีม ซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อที่ 3.3.1 มีรายละเอียดดังนี้

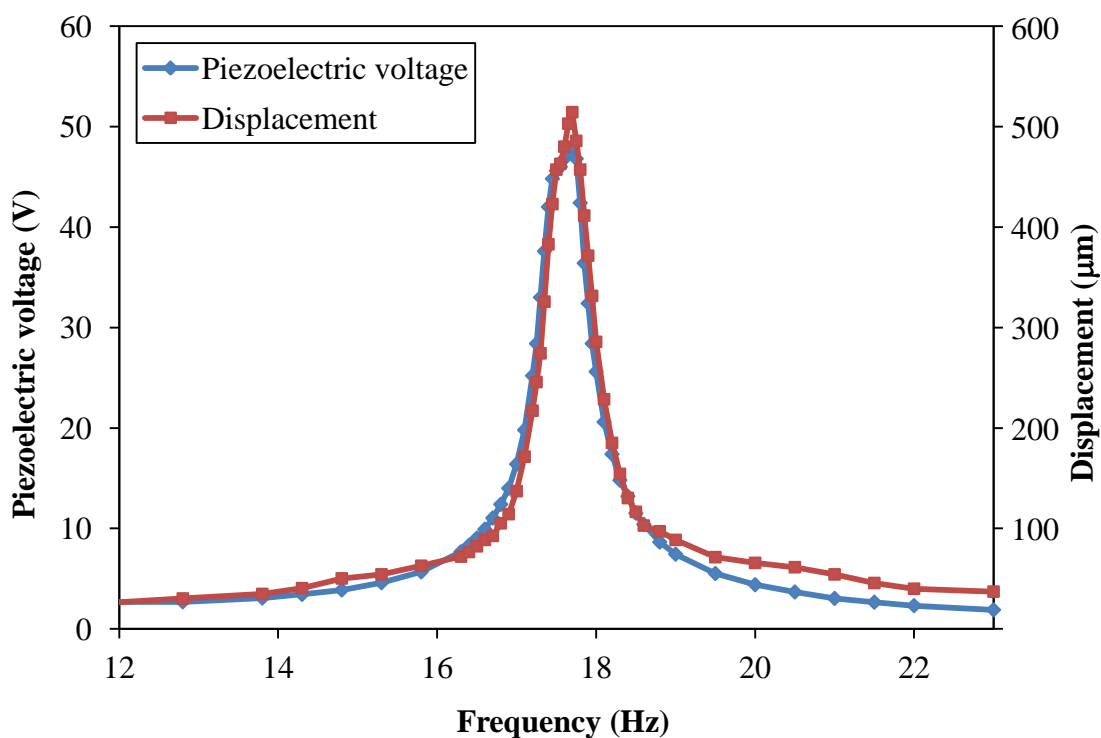


ภาพประกอบที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้าจากทรานส์ดิวเซอร์กับแรงกระทำที่ปลายบีมเป็นฟังก์ชันกับการกระจัดปลายบีม

เมื่อกำหนดให้การกระจัดปลายบีบ มีขนาดเพิ่มขึ้นทุกๆ 0.5 cm ส่งผลให้ปลายบีบอิสระที่ได้รับแรงกระทำ จะเกิดแรงต้านตามขนาดของระยะกระจัดที่เปลี่ยน ทำให้บริเวณใกล้จุดยึดบีบเกิดการยืดหรือหดตัวมากขึ้น แทรนส์ดิวเซอร์ซึ่งยึดติดไว้ที่บริเวณดังกล่าว ยืดหรือหดตัวมากเช่นกัน แรงดันไฟฟ้าที่ได้จึงเพิ่มขึ้นแปรผันตามแรงกระทำบริเวณปลายบีบ

4.1.2 แรงดันไฟฟ้ากับการกระจัดใกล้จุดยึดที่ความถี่ทำงาน

ผลการทดลองในภาพประกอบที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า แรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก แทรนส์ดิวเซอร์ และระยะกระจัดใกล้จุดยึดบีบ จะมีค่าสูงสุดที่ความถี่ทำงาน มีรายละเอียดดังนี้



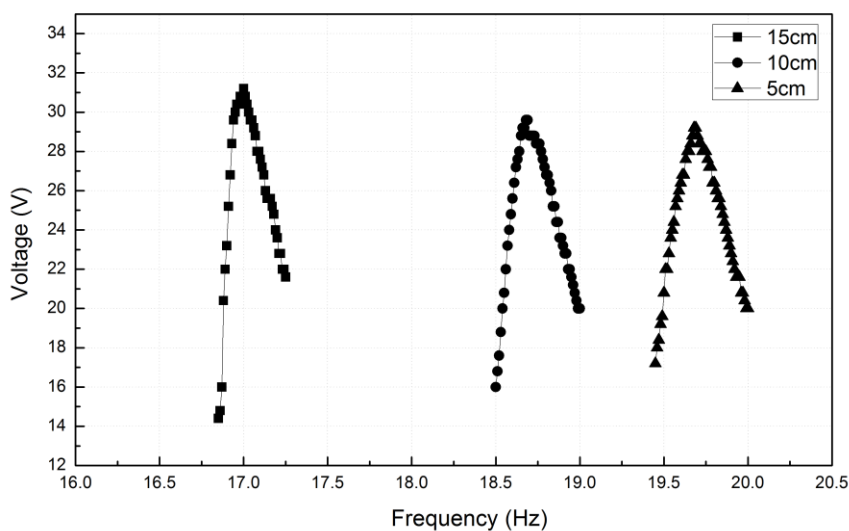
ภาพประกอบที่ 4.2 แรงดันไฟฟ้าจากทรานส์ดิวเซอร์และระยะกระจัดใกล้จุดยึดบีบ ที่ตำแหน่ง 1.25 cm จากจุดยึดเป็นฟังก์ชันกับความถี่ทำงาน

จากทดลองพบว่า เมื่อให้แรงเชิงกลในรูปแบบการสั่นด้วยช่วงความถี่ 12 - 24 Hz แก่บีบ พบว่า ค่าระยะกระจัดใกล้จุดยึดบีบ และแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก แทรนส์ดิวเซอร์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าสูงสุดเมื่อสั่นด้วยความถี่ 17.7 Hz อีกทั้ง

ยังพบว่าค่าทั้งสองดังกล่าวจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระบบได้รับความถี่ที่มีค่ามากขึ้น เนื่องจากความถี่ 17.7 Hz เป็นความถี่เฉพาะของระบบที่ทดสอบ เมื่อระบบมีความถี่จากภายนอกมากระตุ้น ซึ่งเป็นค่าเดียวกับความถี่เฉพาะ แรงดันไฟฟ้าและระยะกระจัดจะมีค่ามากที่สุด อีกทั้งยังพบว่าเมื่อบีบสั้นอย่างอิสระ ค่าความถี่ที่วัดได้คือ 17.7 Hz เช่นกัน หมายความว่าความถี่ค่านี้คือ ความถี่ทำงานของระบบ มีค่าแรงดันไฟฟ้าจากทรานส์ดิวเซอร์ และมีค่าความเค้นใกล้จุดยึดบีบสูงสุด

4.1.3 การเลื่อนตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล

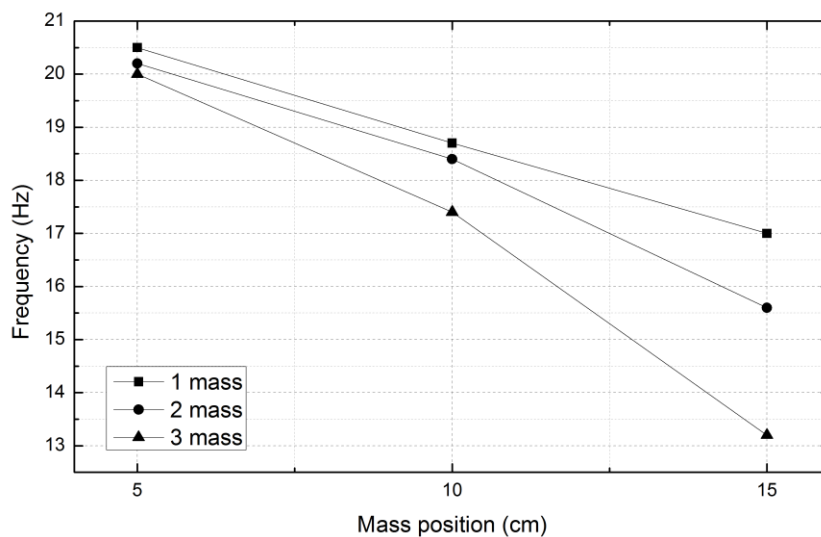
ผลการทดลองในภาพประกอบที่ 4.3 นี้ สอดคล้องกับหัวข้อที่ 3.3.1 ดังนี้



ภาพประกอบที่ 4.3 แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากทรานส์ดิวเซอร์เป็นฟังก์ชันกับความถี่ที่เปลี่ยนตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล

ภาพประกอบที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ความถี่ทำงานเปลี่ยนเมื่อบีบเปลี่ยนตำแหน่งจุดศูนย์กลางของระบบ โดยการวางก้อนน้ำหนักบนบีบที่ระยะต่างกันโดยวัดจากจุดยึดบีบออกมาถึงก้อนน้ำหนักที่ระยะ 5, 10 และ 15 cm ทุกระบบใช้มวลถ่วง 1 อัน และกำหนดให้การกระจัดของปลายบีบในแต่ละระบบมีขนาด 1.3 cm เท่ากัน การเลื่อนตำแหน่งมวลถ่วงเข้าใกล้จุดยึดบีบเป็นผลให้ระบบมีความถี่ทำงานเพิ่มขึ้น

4.1.4 การเปลี่ยนน้ำหนักรวมของระบบ



ภาพประกอบที่ 4.4 ความถี่ทำงานเป็นฟังก์ชันกับตำแหน่งติดมวลถ่วงวัดระยะจากจุดตั้งปี่ม ถึงตำแหน่งวางมวล ที่จำนวนมวลต่างกัน 1, 2 และ 3 ค่า

ภาพประกอบที่ 4.4 เป็นกราฟที่แสดงถึงแนวโน้มของความถี่ทำงานที่เปลี่ยนไป เมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งวางก้อนน้ำหนักที่ระยะ 5, 10 และ 15 cm จากจุดตั้งปี่ม ตามลำดับ เป็นฟังก์ชันกับจำนวนก้อนน้ำหนักในแต่ละตำแหน่งใช้ก้อนน้ำหนัก 1, 2 และ 3 อัน (มวลก้อนละ 1.66 g)

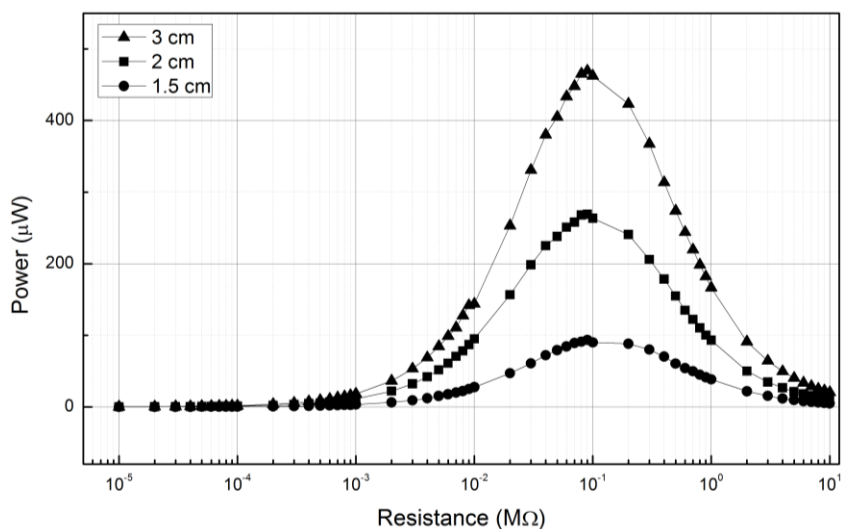
ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อก่อนหน้า และจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มมวลของก้อนน้ำหนักทำให้ความถี่ทำงานลดลงต่ำกว่าค่าความถี่เดิม ดังนั้น ความถี่ทำงานมีผลมาจากมวลของก้อนน้ำหนัก มากกว่าตำแหน่งวางก้อนน้ำหนัก

4.2 กำลังไฟฟ้า

4.2.1 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากจากไบมอฟ

จากผลการทดลองก่อนหน้า กำลังไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก แปรผันตามแรงที่กระทำบริเวณปลายบีม และที่ความถี่ทำงานของบีมจะให้ค่าแรงดันไฟฟ้า และระยะกระจัดสูงสุด อีกทั้งยังเป็นความถี่ที่บีมสั่นอย่างอิสระ เมื่อได้รับแรงกระทำ

ดังนั้น ผลการทดลองในภาพประกอบที่ 4.1 ซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อที่ 3.3.1 และ 3.3.2 ดังได้กล่าวมา มีรายละเอียดดังนี้



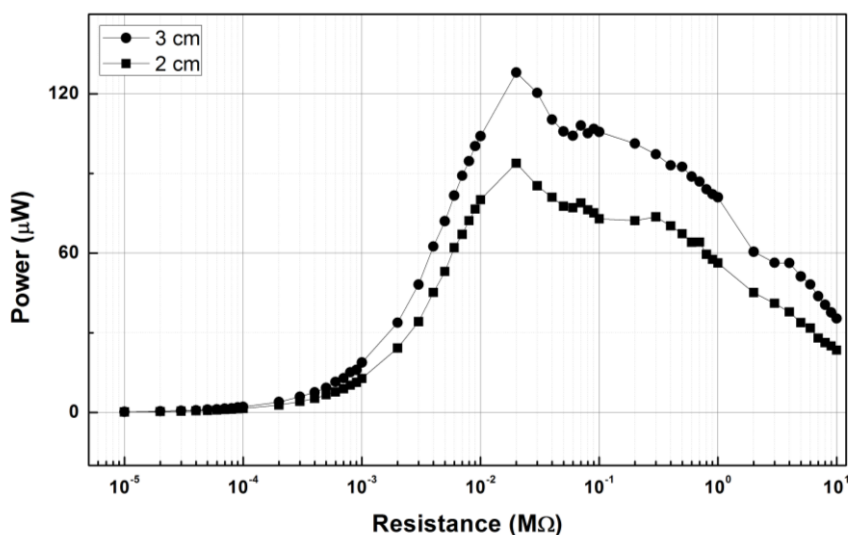
ภาพประกอบที่ 4.5 กำลังไฟฟ้าจากวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกของบีมไบมอฟเป็นฟังก์ชันกับค่าความต้านทานที่การกระจัดของปลายบีมขนาดต่างกัน

จากผลการทดลองพบว่า ที่ความถี่ทำงานของระบบเท่ากับ 16.58 Hz ค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่การกระจัดของปลายบีม 1.5 cm มีค่า 90 kΩ ได้กำลังไฟฟ้า 93.44 μW เมื่อเพิ่มระยะของปลายบีมเป็น 2 และ 3 cm พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้เพิ่มขึ้นตามไปด้วยเป็น 268.96 และ 469.44 μW ตามลำดับ ทั้งนี้มาจากการได้รับแรงกระทำมากขึ้น แต่ไม่ทำให้ความถี่ทำงานของระบบเปลี่ยนแปลง มีผลโดยตรง

กับความแรงของการสั่นเท่านั้น และเป็นผลให้ค่าความต้านทานที่เหมาะสมไม่เปลี่ยนแปลง เช่นกัน

4.2.2 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากจากไบมอर्फผ่านวงจรควบคุมแรงดัน

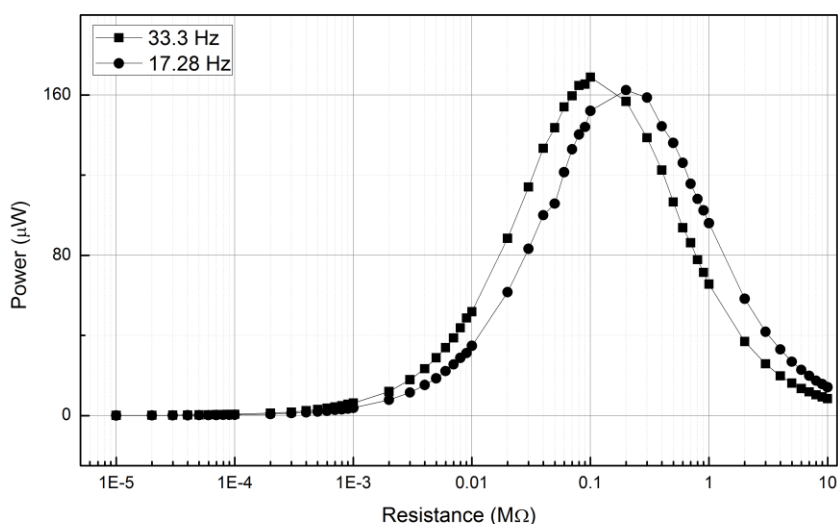
ผลการทดลองในภาพประกอบที่ 4.6 นี้ ซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อที่ 3.3.2 มีรายละเอียดดังนี้



ภาพประกอบที่ 4.6 กำลังไฟฟ้าจากวัสดุไพโซอิเล็กทริกของบีมไบมอर्फที่ผ่านวงจรควบคุมแรงดัน เป็นฟังก์ชันกับค่าความต้านทาน ที่การกระตุ้นของปลายบีมขนาดต่างกัน

จากผลการทดลองก่อนหน้าพบว่า ที่ความถี่ทำงาน 16.58 Hz การกระตุ้นของปลายบีม 1.5 cm ได้กำลังไฟฟ้าต่ำมากเมื่อเทียบกับระยะกระตุ้น 2 และ 3 cm จึงไม่นำมาใช้ในการทดลองต่อมา ผลของการต่อระบบกับวงจรควบคุมแรงดัน คือ กำลังไฟฟ้านลดลงประมาณ 4.4 เท่า นั่นคือวงจรดังกล่าวต้องการพลังงานที่มีค่าประมาณ 128 µW แสดงว่ามีการสูญเสียพลังงานร้อยละ 77 โดยประมาณ

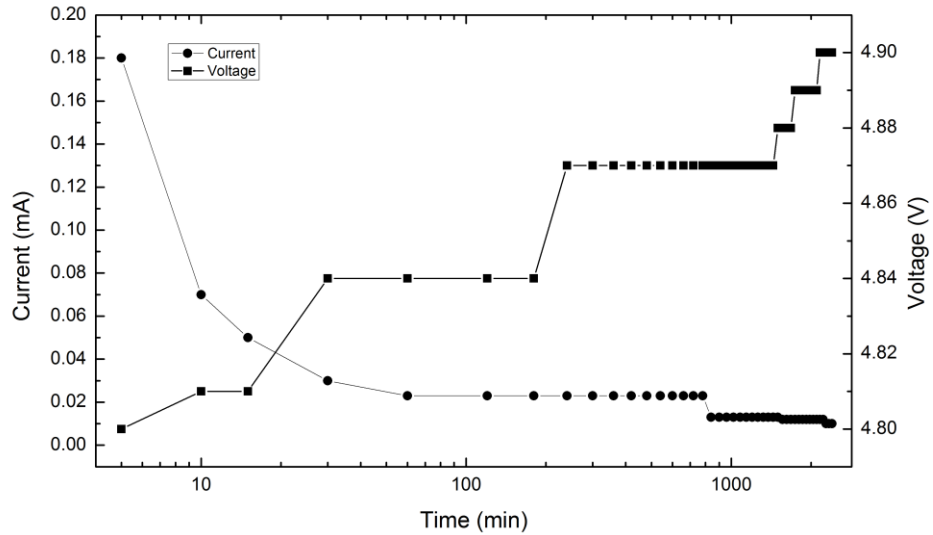
4.2.3 กำลังไฟฟ้าจากบีมความยาวต่างกัน



ภาพประกอบที่ 4.7 กำลังไฟฟ้าจากวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกของบีมไบมอฟ ความยาวต่างกันเป็นฟังก์ชันกับค่าความต้านทาน ที่การกระจัดของปลายบีมขนาดเท่ากับ 1.5 cm

ภาพประกอบที่ 4.3 เป็น กำลังไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกชิ้นเดียวกัน เมื่อบีมมีความยาว 10 และ 15 cm โดยที่บีมยังสั้น ความถี่ทำงานของระบบยังมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดลองพบว่า ความยาวบีม 10 cm จะมีความถี่ทำงาน 33.3 Hz มีค่าความต้านทานที่เหมาะสม 100 kΩ ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 168.92 μW และ ความยาวบีม 15 cm จะมีความถี่ทำงาน 17.28 Hz มีค่าความต้านทานที่เหมาะสม 200 kΩ ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 162.45 μW บีมที่มีความยาวสั้นกว่าต้องใช้แรงในการกระทำที่สูงกว่าบีมยาว จึงจะทำให้ปลายบีมมีการกระจัดเท่ากัน

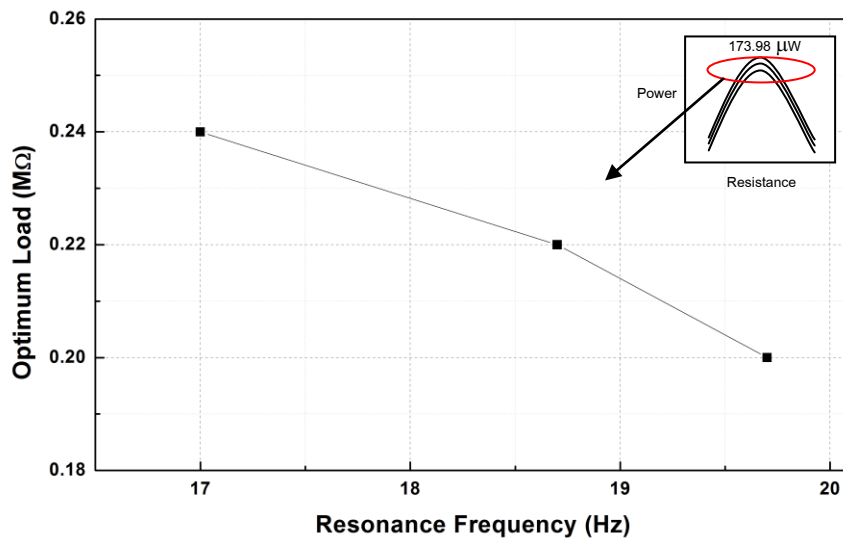
4.2.4 การประจุแบตเตอรี่



ภาพประกอบที่ 4.8 การประจุแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ทุติยภูมิ

ภาพประกอบที่ 4.8 สอดคล้องกับหลักการในหัวข้อที่ 3.3.2 ดังนั้น การประจุแบตเตอรี่ทุติยภูมิด้วยวงจรควบคุมแรงดันนี้ สามารถส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่ทุติยภูมิด้วยวิธีการประจุแบบกระแสแน่นอนเท่านั้น ในกรณีนี้แบตเตอรี่มีความจุ 150 mAh จำนวน 2 ก้อนอนุกรม จะต้องใช้เวลาในการประจุ ประมาณ 40 ชั่วโมง และสามารถนำแบตเตอรี่ที่ประจุจนเต็มไปถ่ายประจุต่อยังโทรศัพท์ Nokia รุ่น 3110c ขณะที่โทรออกได้ประมาณ 2 นาที

4.2.5 การเลื่อนตำแหน่งมวลถ่วงและผลทางไฟฟ้า



ภาพประกอบที่ 4.9 ค่าความต้านทานที่เหมาะสมของระบบ เป็นฟังก์ชันกับความถี่ทำงาน

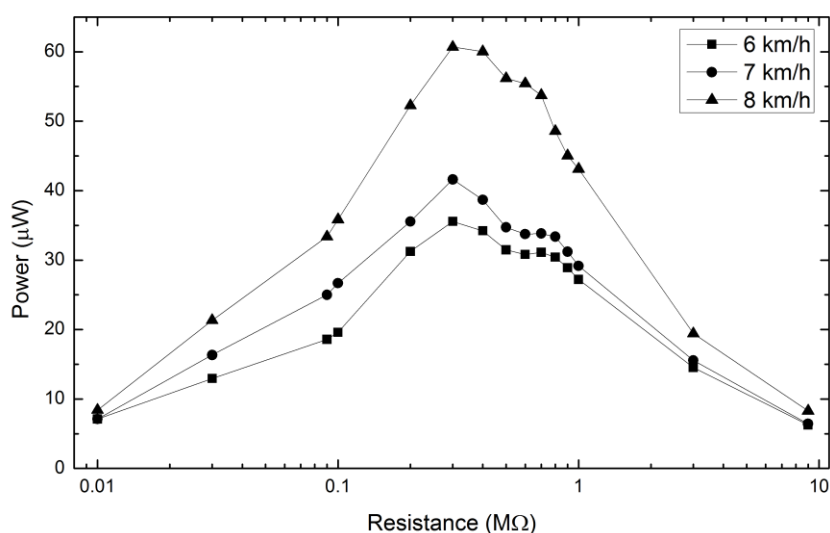
ภาพประกอบที่ 4.9 เป็นกราฟที่แสดงถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานสูงสุดของระบบ เมื่อระบบเปลี่ยนความถี่ทำงาน

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความต้านทานที่เหมาะสมที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด จะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ทำงานลดลง ในขณะที่เดียวกันกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ยังคงเดิมทุกความถี่ ในการทดลองนี้มีค่าโดยประมาณ 173.98 μW ภายใต้เงื่อนไขการกระจัดปลายปี่มดงที่

4.3 การเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากการหมุนในแนวรัศมี

4.3.1 กำลังไฟฟ้าที่ได้ จากจักรยานแบบที่ 1

ผลการทดลองในภาพประกอบที่ 4.10 เป็นกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการปั่นจักรยานแบบปั่นกับที่ที่มีความเร็วต่างกัน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพประกอบที่ 4.10 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการปั่นจักรยานแบบปั่นกับที่ที่มีความเร็วต่างกัน เป็นฟังก์ชันกับความต้านทาน

จากผลการทดลองแสดงให้เห็น กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเก็บเกี่ยวพลังงานในการทดลองนี้เป็นการติดแทรนส์ดีวเซอร์บนระบบบีบซึ่งมีความถี่ 16 Hz ทำให้เกิดการสั่นด้วยการกระทบที่เกิดจากการหมุนในแนวรัศมี ที่ความเร็วต่างกัน 6, 7 และ 8 km/h จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าสูงสุดคือ 35.57, 41.61 และ 60.68 μW ที่ความต้านทาน 300 $\text{k}\Omega$ กำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น เนื่องจาก แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแทรนส์ดีวเซอร์เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ความถี่ทำงานของระบบมีค่าเดียวทำให้ค่าความต้านที่เหมาะสมมีค่าเดียวเช่นกัน

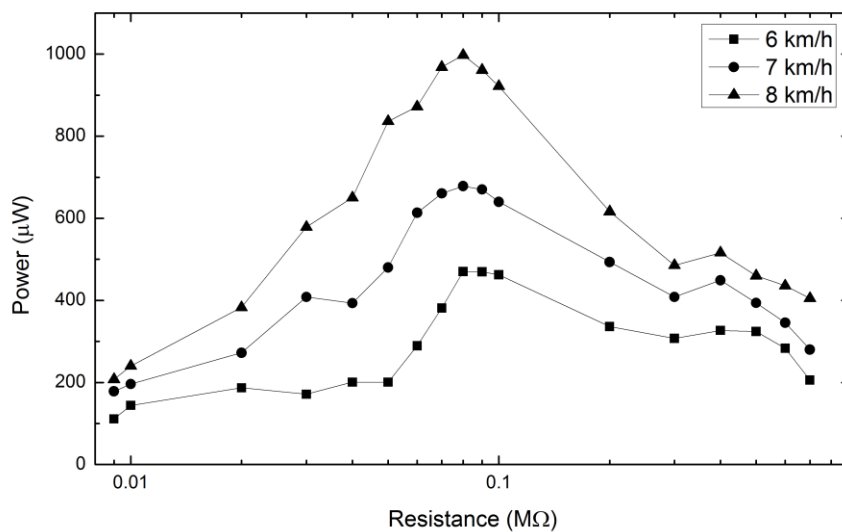
ความเร็วขั้นต่ำสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดสอบ คือ เครื่องคิดเลข และเครื่องควบคุมระยะไกลแบบอินฟราเรดภาคส่ง ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความเร็วขั้นต่ำที่ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

อุปกรณ์	ผลการทดสอบ	ความเร็วขั้นต่ำ
เครื่องคิดเลข	★ ★ ★	12 km/h
รีโมทควบคุมระยะไกล	★ ★ ☆	13.5 km/h

- ★ ★ ★ อุปกรณ์ทำงานได้ปกติเมื่อป้อนด้วยความเร็วเริ่มต้นคงที่
 ★ ★ ☆ อุปกรณ์ทำงานได้ปกติเมื่อป้อนด้วยความเร็วเริ่มต้นคงที่ แต่การใช้งานไม่ต่อเนื่องต้องคงความเร็วไว้ประมาณ 2-3 วินาที เพื่อลดการแกว่งของแรงดัน

4.3.2 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากจักษยานแบบที่ 2

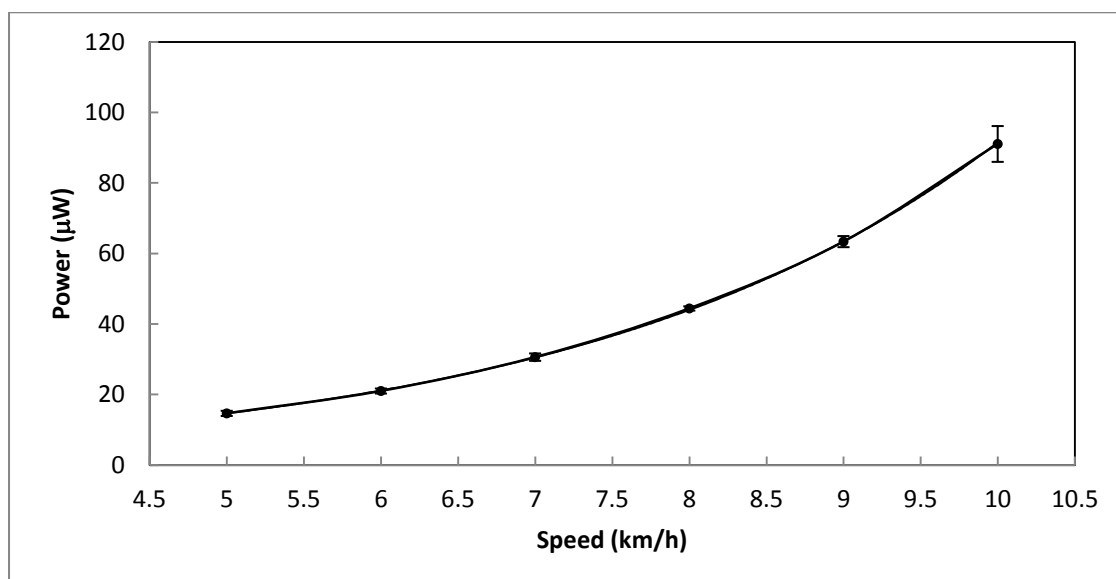


ภาพประกอบที่ 4.11 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการป้อนจักษยานที่มีความเร็วต่างกันเป็นฟังก์ชันกับความต้านทาน

ผลการทดลองในภาพประกอบที่ 4.11 เป็นกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเก็บเกี่ยวพลังงาน ทดสอบเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้า แต่ใช้บีมที่มีความถี่ 16.95 Hz มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ 470.22, 678.35 และ 997.56 μW ที่ความต้านทาน 80 $\text{k}\Omega$ เนื่องจากเป็นบีมคนละระบบ ทำให้ได้กำลังไฟฟ้ามากกว่าผลการทดลองก่อนหน้า อย่างไรก็ตามทั้งสองการทดลองควรปั่นจักรยานด้วยความเร็วคงที่

ในการทดลองจริงแสดงให้เห็นว่าบีมไปมอฟเหมาะสมกับการเลี้ยงวงจรควบคุมแรงดัน เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการปั่นจักรยาน เพียงพอสำหรับวงจรดังกล่าว

4.3.3 กำลังไฟฟ้าสูงสุดกับการเปลี่ยนความเร็ว



ภาพประกอบที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันกับความเร็วของจักรยาน

การทดลองในภาพประกอบที่ 4.12 เมื่อได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วในการปั่น กล่าวคือ ความเร็วเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าที่ได้เพิ่มขึ้นตาม ดังนั้น จึงกำหนดให้ค่าความต้านทานที่เหมาะสมมีค่า 300 $\text{k}\Omega$ วัดค่ากำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อเพิ่มความเร็ว โดยที่ ความเร็วจะเพิ่มขึ้นทุก 1 km/h จาก 5 ถึง 10 km/h จะได้ว่า เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าที่ได้จะเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันเลขยกกำลัง

4.3.4 ประสิทธิภาพที่ได้จากระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน

จากสมการ (3.8) นำมาคำนวณประสิทธิภาพการแปลงพลังงานกลเป็นไฟฟ้าของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวิธีทางไพโซอิเล็กทริกได้ร้อยละ 9.6 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการสั่นต่อเนื่องที่มีความถี่ต่ำประมาณ 17Hz ของบีมเพียงอันเดียวประกอบอยู่กับจักรยานที่มีการปั่นด้วยความเร็วคงที่ ถ้าหากมีบีมหลายอันประกอบกับจักรยาน คาดว่าประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานจะมากกว่านี้เพราะแต่ละบีมจะต่างมีกลไกแปลงพลังงานอย่างอิสระต่อกันและพลังงานไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปผ่านวงจรเรียงกระแสที่เชื่อมต่อกับบีมแต่ละอัน จากนั้นพลังงานรวมที่ได้ทั้งหมดจะถูกนำไปประจุแบตเตอรี่ ในทางปฏิบัติงานวิจัยจึงใช้บีมอย่างน้อย 2 ชุด สาธิตการใช้ประโยชน์เก็บเกี่ยวพลังงานสั่นอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ครบรอบในแนวนอน (ภาคผนวก ก)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. การเก็บเกี่ยวพลังงานสั่นด้วยบีมคานติลเวอ์ ปลายด้านหนึ่งยึดติดผนัง แข็ง ปลายอีกด้านหนึ่งเป็นอิสระ วัสดุแปลงพลังงานคือเซรามิกไพโซอิเล็กทริกชนิดพีแชนด์ที่ทางการค้า ลักษณะของโครงสร้างคือมีเซรามิกติดแน่นทั้งด้านบนและด้านล่างบีมเชื่อมต่อสายไฟฟ้าระหว่างเซรามิกแต่ละคู่แบบขนานทำให้ได้ไบมอพขนาน นำมาทดลองในห้องปฏิบัติการโดยอาศัยเครื่องกำเนิดสัญญาณรูปไซน์บ่อนพลังงานสั่นแก่บีมและเซรามิกไปพร้อมๆกัน พบว่าความถี่ทำงานของบีมอยู่ระหว่าง 16-18 Hz การกระจัดของปลายบีม 3 cm ได้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 29 V เป็นกระแสไฟฟ้าสลับ นำไปผ่านวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าตรง คำนวณกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้ในช่วง 10k-10 M Ω แรงดันไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 5 V กำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่า 400-500 μ W พลังงานไฟฟ้าที่ได้ทำให้อุปกรณ์ เช่น เครื่องควบคุมการเปิดปิดโทรทัศน์ เครื่องคิดเลข สามารถทำงานได้ กำลังไฟฟ้าแปรผันตามแรงสั่นที่ปลายบีมได้รับ พบว่าความถี่ทำงานของบีมขึ้นกับความยาวบีม ตำแหน่งศูนย์กลาง น้ำหนักมวลรวม

2. การนำสัญญาณที่ได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริกไปใช้งาน อาศัยส่วนประกอบหลักคือวงจรเรียงกระแสและวงจรควบคุมแรงดัน ทำหน้าที่แปลงไฟสลับเป็นไฟตรงและควบคุมปรับลดแรงดันไม่ให้เกินค่าสูงสุดที่อุปกรณ์ทนได้ แหล่งกำเนิดพลังงานสั่นที่ให้กับระบบบีมอาจมาจากการจำลองในห้องปฏิบัติการหรือมาจากแหล่งกำเนิดการสั่นลักษณะอื่นๆ ในงานวิจัยนี้อาศัยการเคลื่อนที่ของล้อจักรยาน พบว่ามีการพัฒนาการใช้พลังงานไฟฟ้าสองลักษณะคือ

2.1 การบ่อนพลังงานไฟฟ้าแก่อุปกรณ์ ใช้วงจรควบคุมแรงดันแบบที่มีซีเนอร์ไดโอด จัดเป็นวงจรควบคุมแรงดันอย่างง่ายที่เหมาะสมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า 1 mW วงจรดังกล่าวมีการสูญเสียพลังงานภายในวงจรต่ำพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการปั่นจักรยานเพียงพอสำหรับอุปกรณ์ปลายทาง คือ เครื่องควบคุมระยะไกลและเครื่องคิดเลข ประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานโดยอาศัยระบบเก็บเกี่ยวพลังงานในงานวิจัยนี้และแหล่งกำเนิดพลังงานกลลักษณะนี้มีค่าประมาณร้อยละ 9.6

2.2 การประจุให้กับแบตเตอรี่ทุติยภูมิเพื่อใช้เป็นแบตเตอรี่สำรอง ในลักษณะนี้มีหลักการที่เกี่ยวข้องคือวงจรควบคุมแรงดันแบบสวิตซ์ซึ่งเป็นกลไกนำส่งพลังงานไฟฟ้าจากวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกไปยังแบตเตอรี่ทุติยภูมิ ในที่นี้มีขนาดของความจุไม่เกิน 150 mAh นำมาต่ออนุกรมกัน 2 ก้อนอนุกรมกัน ถ้าหากปั่นจักรยานด้วยความเร็ว 6-7 km/h นานประมาณ 40 ชั่วโมงจะสามารถประจุแบตเตอรี่เต็ม ใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่ต้องการแรงดันไม่เกิน 5 V กระแสไฟฟ้าไม่เกิน 300 mA เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ จากการทดลองใช้งานโทรศัพท์ที่ได้นาน 2-3 นาที เหมาะสมสำหรับใช้งานยามฉุกเฉิน

การเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยหลักการทางไพโอโซอิเล็กทริกนั้น เป็นพลังงานทางเลือกอีกรูปแบบหนึ่ง สามารถเพิ่มความสามารถด้วยการออกแบบโครงสร้างการเก็บเกี่ยวพลังงาน เลือกแหล่งพลังงานกล เลือกออกแบบวงจรไฟฟ้าที่เหมาะสม ประกอบกัน จะทำให้มีประสิทธิภาพและความสามารถในการดึงพลังงานกลมาใช้งานได้เพิ่มขึ้น การประยุกต์ในงานวิจัยและที่พบได้ทั่วไป จะเป็นการใช้งานในลักษณะของการขับเคลื่อนด้วยแรงดัน (voltage driven) เป็นส่วนใหญ่

5.2 ข้อเสนอนี้

แนวทางการพัฒนาทางด้านนี้ ได้แก่ การใช้งานในลักษณะการขับเคลื่อนด้วยกระแส (current driven) ซึ่งต้องการกระแสใช้งานเป็นหลัก ตัวอย่างเช่น การกระตุ้นการเจริญเติบโตของเซลล์บางชนิด (Arinzeh, Collins, and Lee 2010) หรือเป็นแหล่งพลังงานให้อุปกรณ์รับรู้ที่ฝังตัวในร่างกาย (Ramsay and Clarrk 2001) ดังมีรายงานว่าใช้กระแสไฟฟ้าระดับนาโนแอมแปร์ เป็นต้น

ในกรณีที่มีแหล่งแปลงพลังงานหลายชุด หรือมีหลายอัน สิ่งสำคัญที่ระบบต้องการ คือ วงจรที่สามารถรวมพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่มีเฟสต่างกัน ก่อนแปลงเป็นไฟตรง เนื่องจาก วิธีดังกล่าวจะช่วยลดจำนวนวงจรเรียงกระแสได้

บรรณานุกรม

- Alexander, C K., and Matthew N. O. Sadiku. 2006. Fundamentals of Electric Circuits. 3rd ed: McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- Anton, S. R., A. Erturk, and D. J. Inman. 2010. Multifunctional self-charging structures using piezoceramics and thin-film batteries. Smart Materials and Structures. 19 (11): 115021.
- Arinzeh, T., G. Collins and Y. Lee,. 2010. System and method for a piezoelectric scaffold for nerve growth and repair. USA. US Patent US 2010/0324697 A1. 12 March.asp. [accessed : Oct 2011].
- Badel, A., M. Lagache, D. Guyomar, E. Lefevre, and C. Richard. 2007. Finite element and simple lumped modeling for flexural nonlinear semi-passive damping. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 18 (7): 727-742.
- Beeby, S. P., M. J. Tudor, and N. M. White. 2006. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. Measurement Science and Technology. 17 (12): R175-R195.
- Boston Piezo-Optics Inc. 2011. Ceramic Materials General characteristics. Available from <http://bostonpiezooptics.com/?D=25>. [accessed : Feb 2012].
- Boylestad, R. L. 2010. Introductory Circuit Analysis. Edited by 12. New York: Prentice Hall.
- Buchmann, I. 1999. Understanding your batteries in a portable world. Article on battery choice and how to maximize service life. Paper read at Battery Conference on Applications and Advances, 1999. The Fourteenth Annual, 1999.

- Buchmann, I. 2000. Batteries in a Portable World : A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-engineers: Cadex Electronics.
- Cady, W. G. 1946. Piezoelectricity I. New York: Dover Publications, Inc.
- Cammarano, A., S. G. Burrow, D. A. W. Barton, A. Carrella, and L. R. Clare. 2010. Tuning a resonant energy harvester using a generalized electrical load. *Smart Materials and Structures*. 19 (5): 1-7.
- Cantrell, T. 2009. LiOn King: A Look at "Battery-in-a-Chip" Technology. Circuit Cellar. Available from <http://www.cymbet.com/pdfs/CC-article.pdf>. [accessed : Feb 2011].
- Charnegie, D. 2007. Frequency tuning concepts for piezoelectric cantilever beams and plates for energy harvesting, School of Engineering, University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA.
- Cope, R. C., and Y. Podrazhansky. 1999. The art of battery charging. Paper read at Battery Conference on Applications and Advances, 1999. The Fourteenth Annual, 1999.
- Davis, S. 2011. Schottky Diodes: the Old Ones Are Good, the New Ones Are Better. Available from <http://powerelectronics.com/images/SchottkyDiodes.pdf>. [accessed : Jan 2011].
- Erturk, A. and D. J. Inman. 2009. Electromechanical Modeling of Cantilevered Piezoelectric Energy Harvesters for Persistent Base Motions. In *Energy Harvesting Technologies*, edited by Priya, S. and Inman, D. J. New York: Springer.
- Ferrari, M., V. Ferrari, M. Guizzetti, D. Marioli, and A. Taroni. 2008. Piezoelectric multifrequency energy converter for power harvesting in autonomous microsystems. *Sensors and Actuators A: Physical*. 142 (1): 329-335.

- Gieras, J. F., J-H. Oh, M. Huzmezan, and H. S. Sane. 2011. Electromechanical energy harvesting system. USA. US Patent US 8,030,807 B2. 4 October.
- Grady, S. 2011. Millimeter Scale Energy Harvesting Based Seneors. Available from <http://www.cymbet.com/pdfs/eeweb-article.pdf>. [accessed : Sep 2011].
- Guo-Hua, F., and H. Jin-Chao. 2007. Optimal FOM Designed Piezoelectric Microgenerator with Energy Harvesting in a Wide Vibration Bandwidth. Paper read at Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2007. NEMS '07. 2nd IEEE International Conference on, 16-19 Jan. 2007.
- Guyomar, D., A. Badel, E. Lefeuvre, and C. Richard. 2005. Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 52 (4): 584-594.
- Henderson, T. 2011. Vibration harvesting. Available from <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/vibration-harvesting00002391>. [accessed : Jan 2013].
- Hu, Y., H. Xue, and H. Hu. 2007. A piezoelectric power harvester with adjustable frequency through axial preloads. *Smart Materials and Structures*. 16 (5): 1961-1966.
- Ikeda, T. 1990. *Fundamentals of Piezoelectricity*. Oxford: Oxford University Press.
- Kazmierski, T J., and S. Beeby. 2011. *Energy Harvesting Systems : Principles, Modeling and Applications*. New York: Springer.
- Lang, S. B., and S. Muensit. 2006. Review of some lesser-known applications of piezoelectric and pyroelectric polymers. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 85 (2): 125-134-134.

- Lee, K. B., L. Lin, and Y. H. Cho. 2008. A closed-form approach for frequency tunable comb resonators with curved finger contour. *Sensors and Actuators, A: Physical*. 141 (2): 523-529.
- Lefeuvre, E., A. Badel, C. Richard, L. Petit, and D. Guyomar. 2006. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems. *Sensors and Actuators, A: Physical*. 126 (2): 405-416.
- Lefeuvre, E., D. Audigier, C. Richard, and D. Guyomar. 2007. Buck-boost converter for sensorless power optimization of piezoelectric energy harvester. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 22 (5): 2018-2025.
- Li, P. 2008. Energy storage is the core of renewable energy technologies. *IEEE Nanotechnology Magazine*. 2 (4) : 13-18.
- Liesegang, J., and A. R. Lee. 1978. Dynamics of abicycle : Non-gyroscopic aspects. *American Association of Physics Teachers*. 46 (2): 130-132.
- Lin, S. C., B. S. Lee, W. J. Wu, and C. K. Lee. 2009. Multi-cantilever piezoelectric MEMS generator in energy harvesting. Paper read at Ultrasonics Symposium (IUS), 2009 IEEE International, 20-23 Sept. 2009.
- Mason, W. P. 1954. *Physical Acoustic*. New York : Academic Press.
- Meiling, Z., E. Worthington, and J. Njuguna. 2009. Analyses of power output of piezoelectric energy-harvesting devices directly connected to a load resistor using a coupled piezoelectric-circuit finite element method. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on Power Electronics*. 56 (7): 1309-1317.
- Mukherjee, R. 2007. MEMS resonator using frequency tuning. USA. US Patent US 2007/0214890 A1. 20 September.

- Murata Manufacturing Co., Ltd. 2008. Piezoelectric Ceramics (PIEZOTITE) sensors. Kyoto.
- Ottman, G. K., H. F. Hofmann, A. C. Bhatt, and G. A. Lesieutre. 2002. Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 17 (5): 669-676.
- Ottman, G. K., H. F. Hofmann, and G. A. Lesieutre. 2002. Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 18 (2) : 696-703.
- Piazza, G., R. Abdolvand, G. K. Ho, and F. Ayazi. 2004. Voltage-tunable piezoelectrically-transduced single-crystal silicon micromechanical resonators. *Sensors and Actuators, A: Physical*. 111 (1): 71-78.
- Ramsay, M. J. and W. C. William. 2001. Piezoelectric energy harvesting for bio-MEMS applications. *Proc SPIE Smart Structures and Materials*. 4332: 429-438.
- Roundy, S., E. S. Leland, J. Baker, E. Carleton, E. Reilly, E. Lai, B. Otis, J. M. Rabaey, P. K. Wright, and V. Sundararajan. 2005. Improving power output for vibration-based energy scavengers. *IEEE Pervasive Computing*. 4 (1): 28-36.
- Roundy, S., P. K. Wright, and J. Rabaey. 2003. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer Communications*. 26 (11): 1131-1144.
- Roylance, L. M., and J. B. Angell. 1979. A batch-fabricated silicon accelerometer. *Electron Devices, IEEE Transactions on Electron Devices*. 26 (12): 1911-1917.
- Sari, I., T. Balkan, and H. Kulah. 2007. A Wideband Electromagnetic Micro Power Generator for Wireless Microsystems. Paper read at Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2007. *TRANSDUCERS 2007. International*, 10-14 June 2007.

- Shearwood, C., and R. B. Yates. 1997. Development of an electromagnetic microgenerator. *Electronics Letters*. 33 (22): 1883-1884.
- Shu, Y. C. and I.C. Lien. 2006. Efficiency of energy conversion for a piezoelectric power harvesting system. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 11(16): 2429-2438.
- Tan, Y. K., K. Y. Hoe, and S. K. Panda. 2006. Energy Harvesting using Piezoelectric Igniter for Self-Powered Radio Frequency (RF) Wireless Sensors. Paper read at Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on, 15-17 Dec. 2006.
- Wang, L., and F. G. Yuan. 2008. Vibration energy harvesting by magnetostrictive material. *Smart Materials and Structures*. 17 (4): 1-14.
- Wehrle, E. 1987. Charging Method and Technologies : General Demand and Direction for selection of Charger. In *Battery Technology Handbook*, edited by H. A. Kiehne. New York: Marcel Dekker Inc.
- Williams, C. B., and R. B. Yates. 1996. Analysis of a micro-electric generator for microsystems. *Sensors and Actuators, A: Physical*. 52 (1-3): 8-11.
- Wu, K. 2010. Introduction to Schottky Rectifier and Application Guidelines. Taiwan: Taiwan Semiconductor Inc.
- Wu, X., J. Lin, S. Kato, K. Zhang, T. Ren, and L. Liu,. 2008. A frequency adjustable vibration energy harvester. Paper read at PowerMEMS 2008+MicroEMS2008, at Sendai, Japan. International Conference on, 9-12 Nov 2008.
- www.energyharvestingjournal.com. 2009 [online: 28 Oct 2009]. Flapping leaf generator for wind energy harvesting. Available from <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/flapping-leaf-generator-for-wind-energy-harvesting-00001791.asp> [accessed : Feb 2013].

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

อนุสิทธิบัตร เรื่อง ชุดเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากการหมุนในแวนด์สมีด้วยวิธีทางไฟอโซอิเล็กทริก วันขอรับอนุสิทธิบัตร 15 สิงหาคม 2554 หมายเลขคำขอ 1003001245



เลขที่อนุสิทธิบัตร 7269 อสป/200 - ข

อนุสิทธิบัตร

อาศัยอำนาจตามความในพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522
แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2542
ที่กระทรวงพาณิชย์ลงนามออกอนุสิทธิบัตรฉบับนี้ให้แก่

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

สำหรับการประดิษฐ์ตามรายละเอียดการประดิษฐ์ ข้อถือสิทธิ และรูปเขียน (ถ้ามี)
ที่ปรากฏในอนุสิทธิบัตร

เลขที่คำขอ 1103001245
วันขอรับอนุสิทธิบัตร 15 สิงหาคม 2554
ผู้ประดิษฐ์ นางนันทกาญจน์ มุรทิต และคณะ

ข้อที่แสดงถึงการประดิษฐ์ ชุดเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากการหมุนในแวนด์สมีด้วยวิธีทางไฟอโซอิเล็กทริก

ให้ผู้ที่สนใจมีสิทธิหน้าที่ตามกฎหมายว่าด้วยสิทธิบัตรทุกประการ

ออกให้	26	เดือน	มิถุนายน	พ.ศ. 2555
หมดอายุ	14	เดือน	สิงหาคม	พ.ศ. 2560

(ลงชื่อ) 
นางสังศุติ พันธะกุล
รองอธิบดีปฏิบัติการพิเศษ
อธิบดีกรมทรัพย์สินทางปัญญา
ผู้อำนวยการกองสิทธิบัตร

พนักงานเจ้าหน้าที่

หมายเหตุ 1. ผู้ทรงอนุสิทธิบัตรต้องชำระค่าธรรมเนียมรายปีเริ่มแต่ปีที่ 5 ของอายุสิทธิบัตร มิฉะนั้น อนุสิทธิบัตรจะสิ้นอายุ
2. ผู้ทรงอนุสิทธิบัตรจะขอชำระค่าธรรมเนียมรายปีล่วงหน้าโดยชำระทั้งหมดในคราวเดียวก็ได้
3. ภายใน 90 วันก่อนวันสิ้นอายุอนุสิทธิบัตร ผู้ทรงสิทธิบัตรมีสิทธิขอต่ออายุอนุสิทธิบัตรได้ 2 ครั้ง
มีกำหนดคราวละ 2 ปี โดยยื่นคำขอต่ออายุ
4. การอนุญาตให้ใช้สิทธิตามอนุสิทธิบัตรและการโอนอนุสิทธิบัตรต้องทำเป็นหนังสือและจดทะเบียนต่อพนักงานเจ้าหน้าที่

013289

ภาพประกอบที่ ก-1 เอกสารแสดงการได้รับหมายเลขอนุสิทธิบัตรและรับการคุ้มครอง
ตามกฎหมาย

รายละเอียดการประดิษฐ์

ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์

- 5 ชุดเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากการหมุนในแนวรัศมีด้วยวิธีทางไพโซโซอิเล็คทริก

สาขาวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์

- 10 วิศวกรรมไฟฟ้าในส่วนที่เกี่ยวข้องกับชุดเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีทางไพโซโซอิเล็คทริก

ภูมิหลังของศิลปะหรือวิทยาการที่เกี่ยวข้อง

- 15 เดิมนั้นคำว่า เก็บเกี่ยว หรือ harvest มีความหมายตามพจนานุกรมว่าการเก็บ รวบรวมพืชผักผลไม้จากพื้นที่เพาะปลูก เมื่อมีการนำคำนี้มาใช้กับพลังงานกล หมายความว่า การนำพลังงานกล (mechanical energy) จากแหล่งกำเนิดการสั่นที่มีอยู่แล้ว (ambient energy source) รวมทั้งการเคลื่อนไหวร่างกาย (body movement) และการเคลื่อนที่ของวัตถุ (object movement) มาแปลง (convert) เป็นพลังงานไฟฟ้า (electrical energy) จัดเก็บไว้ในวงจรไฟฟ้าที่มีตัวจัดเก็บพลังงานเช่นตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitor) หรือ ในแบตเตอรี่ และนำไปป้อน ให้แก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าให้ทำงานได้ในยามต้องการ ช่วยให้เรามีความสะดวกในการใช้ชีวิตมากขึ้น ลด
- 20 จำนวนครั้งหรือลดขนาดของแบตเตอรี่ หรือแม้แต่ทดแทนการใช้แบตเตอรี่อย่างสิ้นเชิงทำให้เป็นอุปกรณ์ทำงานได้ด้วยตัวเอง (self-powered device) แม้อยู่ในสถานที่ห่างไกล ไม่มีคนควบคุม (unmanned) โดยในกระบวนการเก็บเกี่ยวพลังงานกลปราศจากการเผาไหม้และไม่มีการคายแก๊สชนิดใดจึงจัดเป็นพลังงานสะอาด (clean energy) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่กล่าวถึง เช่น โทรศัพท์มือถือ เครื่องอ่านบัตรประจำตัว เครื่องมือและระบบสื่อสารไร้สาย ตัว
- 25 ควบคุมระยะไกลของวิทยุ-โทรทัศน์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) สำหรับควบคุมการปิดเปิดหลอดไฟหรือประตู หน้าต่าง เครื่องปรับอากาศหรือสิ่งอื่น ๆ กลไกการแปลงพลังงานคือวิธีการไพโซโซอิเล็คทริก (piezoelectric method) ซึ่งประกอบด้วย วัสดุไพโซโซอิเล็คทริกชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิด รูปร่างต่างๆเช่น เม็ดกลม(disk) แผ่นแบน (plate) เส้น (fiber) เป็นต้น การเชื่อมต่อกับส่วนที่จัดเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพโซโซอิเล็คทริก อย่างเหมาะสมต่อการ

นำไปใช้งาน โดยหลักการวัสดุไพโซอิเล็กทริกคือวัสดุที่มีความสามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือในทางกลับกันแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้ การประดิษฐ์นี้มุ่งเน้นกลไกการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า

- วิธีการไพโซอิเล็กทริกที่มุ่งเน้นแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า มีข้อดีคือ (ก) ไม่มีแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าภายนอกเกี่ยวข้องกับตลอดกระบวนการ ในขณะที่การแปลงด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์ (electrostatic method) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการแปรเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้า ต้องมีแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าตลอดเวลา (ข) ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการแปลงด้วยวิธีนี้มีค่า 3-8 โวลต์ ในขณะที่การแปลงด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ (electromagnetic method) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของขดลวดในสนามแม่เหล็ก ให้พลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 1 โวลต์ (ค) ให้ค่าความหนาแน่นพลังงานคงที่ตลอดอายุการใช้งาน ในขณะที่เครื่องยนต์ความร้อน (heat engine) ที่ใช้ไฮโดรคาร์บอนเป็นเชื้อเพลิงตลอดจนแบตเตอรี่ชนิดต่างๆมีค่าความหนาแน่นพลังงานลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

- แหล่งกำเนิดพลังงานกลในสภาพแวดล้อมที่เก็บเกี่ยวมาใช้ประโยชน์ ได้แก่ การเคลื่อนไหวร่างกาย เช่น เดิน วิ่ง กระโดด ใช้มือหมุนวัตถุ ตลอดจนการเคลื่อนไหวของวัตถุอื่น เช่น รถยนต์วิ่ง สะพานแกว่ง สายพานเลื่อน กังหัน ใบพัด ระหัดวิดน้ำ ฯลฯ วิทยาการและเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานกลด้วยวิธีการไพโซอิเล็กทริกเริ่มเป็นที่สนใจกันทั่วกันแพร่หลายไม่นานมานี้ มีการประดิษฐ์คิดค้นและจดสิทธิบัตร ได้แก่ สิทธิบัตร US 2006/0021261 A1 นำวัสดุไพโซอิเล็กทริกชนิดหนึ่งใส่ไว้ใต้พื้นรองเท้าเพื่อรับแรงกด ขณะที่กำลังเดินและเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร เชื่อมต่อนำไปใช้งาน สิทธิบัตร US 2007/0257634 A1 ใส่ไฟเบอร์ของวัสดุไพโซอิเล็กทริกในโครงสร้างกลางของจักรยาน ไม่สามารถมองเห็นจากภายนอก และไม่ได้อาศัยการสั่นวัสดุไพโซอิเล็กทริกในระหว่างการเคลื่อนที่แนวรัศมีดังการประดิษฐ์นี้ เมื่อปั่นจักรยาน ทำให้เกิดความเค้น (stress) ในไฟเบอร์และผลิตกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่ทำงาน

ลักษณะและความมุ่งหมายของการประดิษฐ์

- การประดิษฐ์นี้เกี่ยวข้องกับชุดเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากการหมุนในแนวรัศมีด้วยวิธีทางไพโซอิเล็กทริก ประกอบด้วยโครงโลหะ สำหรับยึดบนวัตถุที่มีส่วนประกอบที่เคลื่อนที่ในแนวรัศมี ทำขึ้นเพื่อใช้เป็นที่ยึดแผ่นโลหะตรงใกล้บริเวณที่มีวัสดุไพโซอิเล็กทริกติดอยู่ ปลายอีกด้านหนึ่งของแผ่นโลหะคดโค้งเล็กน้อย ปล่อยเป็นอิสระในอากาศ เพื่อให้ไปกระทบกับตัวกระทบ ที่ติดตั้งอยู่ในแนวรัศมีของวัตถุ หลังจากการกระทบ แผ่นโลหะสั้นและ

วัสดุไพโอโซอิเล็กทริกสันผลิตกระแสไฟฟ้าผ่านวงจรเชื่อมต่อที่ประกอบด้วยส่วนแปลงไฟสลับจากวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกเป็นไฟตรง ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน และตัวควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้มีค่าสูงสุดไม่เกินค่าที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ขนาดเล็กเสียหายและอุปกรณ์ทำงาน

- 5 ความมุ่งหมายของสิ่งประดิษฐ์คือ การจัดให้มีกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวจากพลังงานกลที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ในแนวรัศมี กระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่ได้พอเพียงให้อุปกรณ์ขนาดเล็กทำงาน

คำอธิบายรูปเขียนโดยย่อ

10

รูปที่ 1 แสดงภาพตัดขวางด้านข้างของชั้นต่างๆของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกและขั้วไฟฟ้า

รูปที่ 2 แสดงภาพตัดขวางด้านข้างของโครงโลหะเหล็กและลักษณะการยึดแผ่นหรือคานอะลูมิเนียม

15

รูปที่ 3 แสดงภาพตัดขวางด้านข้างของล้อ และตำแหน่งที่มีการสันพลาสติกแข็งรองรับการกระทบกับแผ่น

หรือคานอะลูมิเนียม

รูปที่ 4 ไดอะแกรมอย่างง่ายแสดงส่วนประกอบของวงจรเชื่อมต่อที่ใช้ในกระบวนการเก็บเกี่ยวพลังงานกล

การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

20

การประดิษฐ์นี้เกี่ยวข้องกับชุดเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากการหมุนในแนวรัศมีด้วยวิธีทางไพโอโซอิเล็กทริก ประกอบด้วย 4 ส่วนหลักคือ วัสดุไพโอโซอิเล็กทริกและขั้วไฟฟ้า โครงโลหะเหล็กและคานอะลูมิเนียม ส่วนวัสดุรองรับการกระทบกับคานอะลูมิเนียม และส่วนแปลงกระแสไฟฟ้าสลับจากวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกเป็นไฟตรง

25

วัสดุไพโอโซอิเล็กทริกและขั้วไฟฟ้าตามรูปที่ 1 แสดงภาพตัดขวางด้านข้างชั้นต่างๆของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกและขั้วไฟฟ้า

ประกอบด้วย

- สายไฟฟ้า (1) และ (2) สายไฟฟ้านี้จะอยู่ที่ด้านบนและด้านล่างแผ่นไพโอโซอิเล็กทริก เพื่อช่วยในการนำกระแสไฟฟ้าจากวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกที่กำลังสั่นมายังวงจรเชื่อมต่อ
 - ตะกั่วบัดกรี (3) ยึดสายไฟฟ้า (1) กับแผ่นกอลมบางทำด้วยโลหะทองเหลือง ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าที่หนึ่ง (6) และเป็นฐานยึด (base) ทำหน้าที่ยึดวัสดุไพโออิเล็กทริก (7)
- 5
- ตะกั่วบัดกรี (4) ยึดสายไฟฟ้า (2) กับชั้นโลหะเงิน ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าที่สอง (5) ของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก (7)
 - วัสดุไพโอโซอิเล็กทริก (7) ประเภทอิเล็กโตรเซรามิก (electroceramic) เคลือบทับชั้นขั้วไฟฟ้าที่หนึ่ง (6)
- 10
- ฐานยึดวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการประดิษฐ์นี้ ได้แก่ ทองเหลือง เหล็กหรือโลหะอื่นที่พึงประสงค์คือทองเหลือง
- ขั้วไฟฟ้าที่สองที่ใช้ในการประดิษฐ์นี้ ได้แก่ ทอง เงิน อะลูมิเนียม หรือโลหะอื่น ที่พึงประสงค์คือเงิน
- วัสดุไพโอโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการประดิษฐ์นี้ ได้แก่ พอลิเมอร์บางชนิด อิเล็กโตรเซรามิก ที่
- 15
- พึงประสงค์คือ อิเล็กโตรเซรามิก ไพโอโซอิเล็กทริกที่ทำจากพอลิเมอร์
- โครงโลหะเหล็กและคานอะลูมิเนียม ตามรูปที่ 2 แสดงภาพตัดขวางด้านข้างของโครงโลหะเหล็กและลักษณะการยึดคานอะลูมิเนียม
- ประกอบด้วย
- 20
- โครงเหล็ก (8) ยึดกับจักรยานให้มีตำแหน่งสูงจากล้อประมาณ 6 นิ้ว ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงและเป็นที่ยึดคานอะลูมิเนียม
 - น็อต (9), (11), (14) และ (16) สำหรับยึดคานอะลูมิเนียม (17) ที่ปลายด้านหนึ่งไว้กับแผ่นเหล็ก (10), (15)
 - แผ่นเหล็ก (10), (15) ประกบบนและล่าง คานอะลูมิเนียม (17)
- 25
- แผ่นยาง (12), (13) คั่นระหว่าง แผ่นเหล็ก (10), (15) กับ คานอะลูมิเนียม (17)
 - คานอะลูมิเนียม (17) ความยาวไม่เกิน 6 นิ้ว ปลายด้านหนึ่งตัดโค้ง บนผิวหน้าปลายอีกด้านหนึ่งใช้เป็นฐานยึดขั้วไฟฟ้าที่หนึ่ง (6) ของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก (7) อาจมีการติดตั้งคานอะลูมิเนียมมากกว่า 1 แผ่นเป็นระยะๆบน โครงเหล็กที่กล่าวมาแล้ว

โครงที่ยึดกับจักรยาน ที่ใช้ในการประดิษฐ์นี้ ได้แก่ ทองเหลือง เหล็ก เหล็กสแตนเลส ที่ฟัง
 ประสงค์คือเหล็กแผ่นโลหะที่ปลายด้านหนึ่งตัดโค้งที่ใช้ในการประดิษฐ์นี้ ได้แก่ พลาสติก
 ทองเหลือง เหล็ก อะลูมิเนียม ที่ฟังประสงค์คืออะลูมิเนียม

ส่วนวัสดุรับการกระทบกับคานอะลูมิเนียม ตามรูปที่ 3 แสดงภาพตัดขวางด้านข้างของ
 5 ล้อ ตรงตำแหน่งที่มีการติดสันพลาสติกแข็งรับการกระทบกับคานอะลูมิเนียม

- ยางลดแรงกระแทก (18) แนบระหว่างสันพลาสติกแข็ง (19) กับวงล้อ (20) ทำหน้าที่
 ลดความรุนแรงของการกระเทือนระหว่างการปั่นจักรยาน
- สันพลาสติกแข็ง (19) สูงประมาณ 1 เซนติเมตร ยึดไว้ในแนวรัศมีล้อ รอรับการ
 10 กระทบกับปลายคานอะลูมิเนียม (17) ด้านที่ถูกตัดโค้งไปทางทิศเดียวกับที่ล้อหมุน
 ตลอดเวลาที่ล้อหมุน ขั้วไฟฟ้าที่หนึ่ง (6) พร้อมวัสดุไฟอ์โซอิเล็กทริก (7) สัน อาจมี
 สันพลาสติกแข็ง มากกว่า 1 อัน
- วงล้อ (20)

ส่วนแปลงไฟสลับจากวัสดุไฟอ์โซอิเล็กทริกเป็นไฟตรง การจัดทำมีวงจรไฟฟ้าเชื่อมต่อ ที่
 15 มีส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์ ที่เหมาะสมต่อการนำแรงดันไฟฟ้าไปใช้ในอุปกรณ์โดยไม่ทำ
 ให้อุปกรณ์นั้นเสียหายและทำงานได้ตามปกติแม้ไม่ใส่แบตเตอรี่หรือต่อกับไฟบ้าน ตามรูปที่ 4
 ไดอะแกรมอย่างง่ายแสดงส่วนประกอบของวงจรเชื่อมต่อที่ใช้ในกระบวนการเก็บเกี่ยวพลังงานกล
 ประกอบด้วย

- วัสดุไฟอ์โซอิเล็กทริก (7)
- 20 - วงจรเรียงกระแส (21) (rectifier bridge circuit) ต่อขนานกับวงจรควบคุมแรงดัน (22)
 ประกอบด้วยไดโอด 4 ตัว ต่อกันแบบวงจรบริดจ์ ทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าสลับ
 จาก วัสดุไฟอ์โซอิเล็กทริก (7) เป็นกระแสไฟฟ้าตรง และตัวเก็บประจุ C
- วงจรควบคุมแรงดัน (22) (voltage regulator circuit) ต่อขนานกับวงจรเรียงกระแส
 (21) ประกอบด้วยตัวต้านทาน ต่ออนุกรมกับซันเนอร์ไดโอด (Zener diode) ทำหน้าที่
 25 ควบคุมให้แรงดันคงที่ก่อนออกไปที่วงจรอุปกรณ์ (23)
- วงจรของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (23)

วัสดุไพอโซอิเล็กทริกและวงจรทั้ง 3 ส่วนนี้เชื่อมต่อกันดังนี้คือ วัสดุไพอโซอิเล็กทริกต่อขนานกับวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสไฟตรงก่อนเข้าวงจรควบคุมแรงดันที่ต่อขนานกับวงจรเรียงกระแส ในเวลาเดียวกันวงจรควบคุมเรียงดันต่อแบบไบแอสกลับกับวงจรอุปกรณ์ทำหน้าที่ควบคุมให้แรงดันคงที่ก่อนออกไปที่วงจรอุปกรณ์

5

วิธีการในการประดิษฐ์ที่ดีที่สุด

เหมือนกับที่บรรยายมาแล้วในหัวข้อ การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

ข้อถือสิทธิ

1. ชุดเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากการหมุนในแนวรัศมีด้วยวิธีทางไพโรโซอิเล็คทริก ที่ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือวัสดุไพโรโซอิเล็คทริกและขั้วไฟฟ้า โครงโลหะเหล็กและคานอะลูมิเนียม ส่วนวัสดุรองรับการกระทบกับคานอะลูมิเนียม และส่วนแปลงกระแสไฟฟ้าสลับ
5 จากวัสดุไพโรโซอิเล็คทริกเป็นไฟตรง

โดยที่ขั้วไฟฟ้าประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่หนึ่ง (6) มีลักษณะเป็นแผ่นกลมบางทำหน้าที่เป็นฐานยึด (base) วัสดุไพโรโซอิเล็คทริก (7) ที่มีขั้วไฟฟ้าที่สอง (5) ประกอบอยู่ด้านบนวัสดุไพโรโซอิเล็คทริก (7)

และวัสดุไพโรโซอิเล็คทริก (7) พร้อมขั้วไฟฟ้า ต่ออยู่กับส่วนแปลงกระแสไฟฟ้าสลับจาก
10 วัสดุไพโรโซอิเล็คทริก เป็นกระแสไฟฟ้าตรง ที่ประกอบด้วยวงจรรีจกกระแส (21) และวงจรมอบคุมแรงดัน (22) อยู่ภายใน

ที่มีลักษณะเฉพาะคือ

- วัสดุไพโรโซอิเล็คทริกและขั้วไฟฟ้าติดตั้งอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของ คานอะลูมิเนียม (17) ที่คัดโค้งปล่อยเป็นอิสระในอากาศ และปลายคานอะลูมิเนียม (17) อีกด้านหนึ่งยึดกับ โครง
15 โลหะ (8) ที่ยึดอยู่กับวัตถุที่มีส่วนประกอบเคลื่อนที่ในแนวรัศมี และวัตถุที่มีส่วนประกอบเคลื่อนที่ในแนวรัศมี (19) จะมีการติดวัสดุรองรับการกระทบกับคานอะลูมิเนียม (18) ไว้

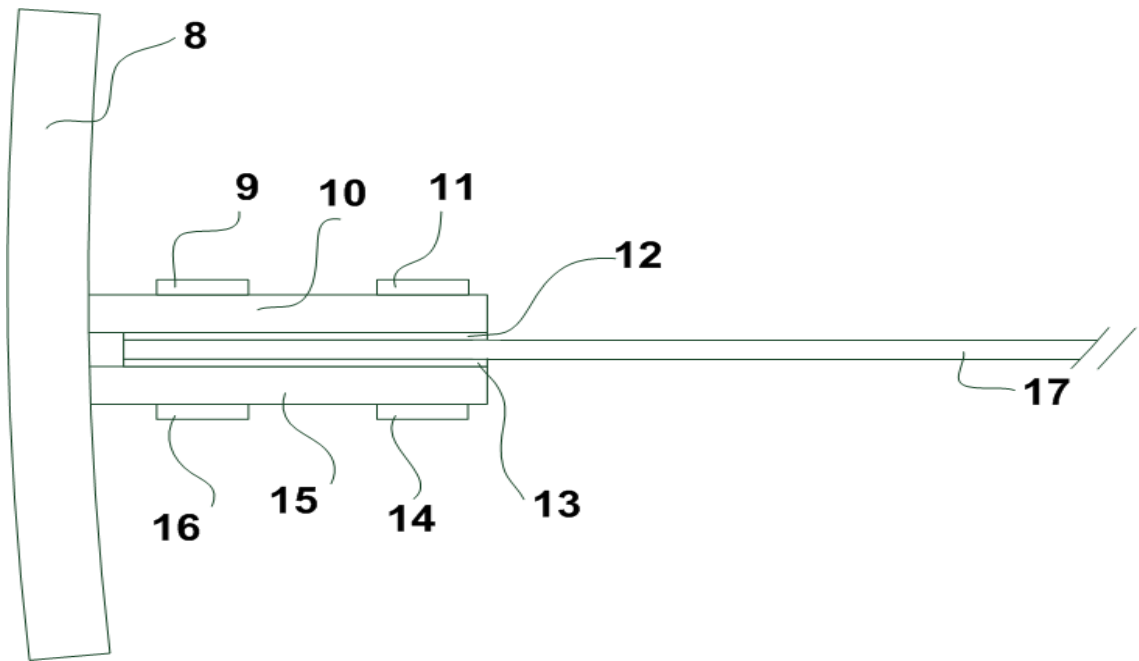
2. ชุดเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากการหมุนในแนวรัศมี ตามข้อถือสิทธิที่ 1
20 ที่ซึ่ง วัสดุไพโรโซอิเล็คทริก คือ อิเล็กโตรเซรามิก หรือ ไพโรโซอิเล็คทริกที่ทำจากพอลิเมอร์

3. ชุดเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากการหมุนในแนวรัศมี ตามข้อถือสิทธิที่ 1
หรือ 2 ที่ซึ่ง วัตถุที่มีส่วนประกอบเคลื่อนที่ในแนวรัศมี คือ วงล้อ หรือใบพัด

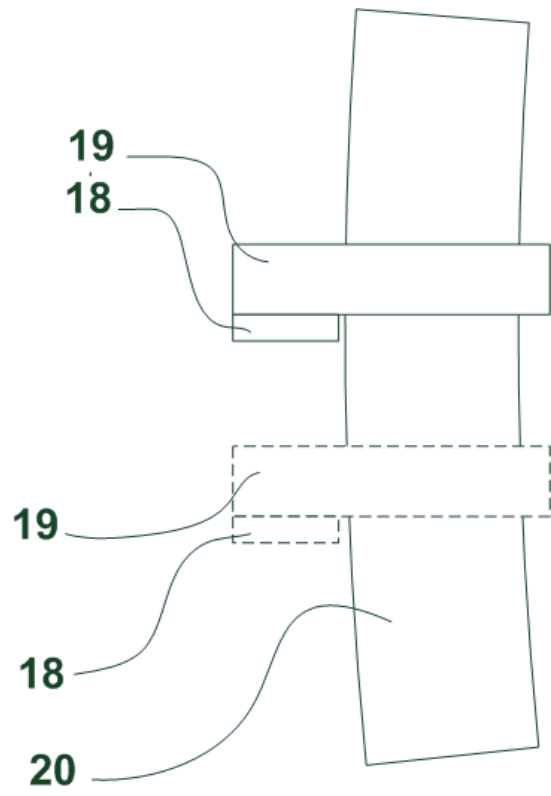
4. ชุดเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากการหมุนในแนวรัศมี ตามข้อถือสิทธิที่ 1 -
25 3 ข้อใดข้อหนึ่งที่ซึ่ง ปลายคานอะลูมิเนียม (17) ด้านใดด้านหนึ่ง ถูกคัดโค้งไปทางทิศเดียวกับแนวการหมุน



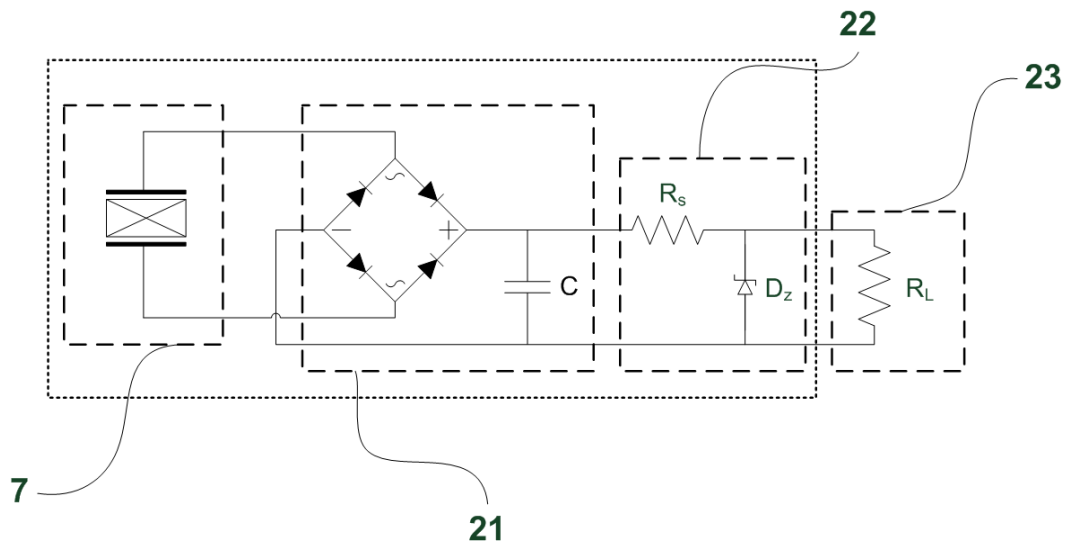
รูปที่ 1



รูปที่ 2.



รูปที่ 3



รูปที่ 4

บทสรุปการประดิษฐ์

การประดิษฐ์นี้เกี่ยวข้องกับชุดเก็บเกี่ยวพลังงานกลมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยที่แหล่งกำเนิดของพลังงานกล เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แนวรัศมีวงกลมของวัตถุต่างๆ ที่เคลื่อนที่โดยอาศัยพลังงานชนิดอื่นหรือการเคลื่อนไหวย่างกาย โดยชุดเก็บเกี่ยวประกอบด้วย โครงโลหะสำหรับยึดบนวัตถุที่มีส่วนประกอบที่เคลื่อนที่ในแนวรัศมี ทำขึ้นเพื่อใช้เป็นที่ยึดแผ่นโลหะตรงใกล้บริเวณที่มีวัสดุไพโรโซอิเล็กทริกติดอยู่ ปลายอีกด้านหนึ่งของแผ่นโลหะตัดโค้งเล็กน้อย ปล่อยให้ปลายเป็นอิสระในอากาศ เพื่อให้ไปกระทบกับตัวกระทบ ที่ติดตั้งอยู่ในแนวรัศมีของวัตถุ หลังจากการกระทบ แผ่นโลหะสั้นและวัสดุไพโรโซอิเล็กทริกสั้น ผลิตระแสไฟฟ้าผ่านวงจรเชื่อมต่อที่ประกอบด้วยส่วนแปลงไฟสลับจากวัสดุไพโรโซอิเล็กทริกเป็นไฟตรง ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน และตัวควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้มีค่าสูงสุดไม่เกินค่าที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ขนาดเล็กเสียหายและอุปกรณ์ทำงาน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายภาณุ ไทโยนิรมิตร
รหัสประจำตัวนักศึกษา 5310220051

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วศ.บ. (คอมพิวเตอร์)	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์	2551

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Conference's proceeding

Muensit, N., N. Binhayeeniyi, P. Thainirarnit and K. Pooplub, From Piezoelectric Microcantilever Beam to Piezoelectric Energy Harvester. The 8th Asian Meeting on Ferroelectrics (AMF-8), December 9-14, 2012, Amari Orchid Hotel, Pattaya, Thailand.

Muensit, N., P. Thainirarnit and P. Rakbumrung,. Mechanical-to-Electrical Energy Harvested with Polyvinylidene Fluoride. Proceeding of The 6th Siam Physics Congress SPC2011, Pattaya, Chonburi, Thailand., March 23-26, 2011. 258-259.

Muensit, N., Wadeng, I. and Thainirarnit, P. Mechanical System Integrated with Energy Harvesting Technique and Charging Rechargeable Battery. 38th Congress on Science and Technology of Thailand (STT38), Chiang Mai, Thailand, October 17 – 19, 2012.

Muensit, S., P. Thainirarnit, P. Sukwisut and D. Guyomar,. Effects of Dopants on Lead Zirconate Titanate Ceramics Observed by an Atomic Force Microscope. Proceeding of The 3rd Thailand Nanotechnology Conference 2009, Nanomaterials for Health, Energy and Environment, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand. December 21-22, 2009. 54-55.

Rakbumrung, P., P. Thainirarnit and N. Muensit. Comparison Energy Harvesting Performance of PZT Stack and PVDF Stave in Series and Parallel Coupled Through Standard Approach. MSAT 7th International Conference on Material Science and Technology, Bangkok, Thailand. June 7-8, 2012.

Thainirarnit, P. and Muensit, N. Frequency Tuning for Cantilever Beam with Bonded Piezoceramics. MSAT 7th International Conference on Material Science and Technology, Bangkok, Thailand. June 7-8, 2012.

อนุสิทธิบัตร

นันทกาญจน์ มุรติต ชัชชัย พุทซ้อน และภาณุ ไทยนิรมิตร อนุสิทธิบัตร เรื่องชุดเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากการหมุนในแนวรัศมีด้วยวิธีทางไพเอโซอิเล็กทริก วันขอรับอนุสิทธิบัตร 15 สิงหาคม 2554 หมายเลขคำขอ 1003001245 ผู้รับโอนสิทธิบัตร คือ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

นันทกาญจน์ มุรติต และภาณุ ไทยนิรมิตร สิทธิบัตร เรื่องวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีทางไพเอโซอิเล็กทริกที่สามารถอัดประจุให้แบตเตอรี่ชนิดประจุซ้ำได้ วันที่ยื่นขอจดอนุสิทธิบัตร 9 มกราคม 2556 (อยู่ในระหว่างดำเนินการ)