

การศึกษาผลกระทบของแรงกดและความถี่เชิงกลที่มีต่อ
การเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพโซอิเล็กทริก



นางสาวกิ่งกาญจน์ สระบัว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

**A STUDY OF EFFECT OF MECHANICAL
COMPRESSIVE FORCE AND FREQUENCY ON
ENERGY HARVESTING BY PIEZOELECTRIC
MATERIAL**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2013**

การศึกษาผลกระทบของแรงกดและความถี่เชิงกลที่มีต่อ
การเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.สุดเชตต์ พจน์ประไพ)

กรรมการ

(ผศ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กึ่งกาญจน์ สระบัว : การศึกษาผลกระทบของแรงกดและความถี่เชิงกลที่มีต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพโซอิเล็กทริก (A STUDY OF EFFECT OF MECHANICAL COMPRESSIVE FORCE AND FREQUENCY ON ENERGY HARVESTING BY PIEZOELECTRIC MATERIAL) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันท์ อุ่นศิริไธย์, 130 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอการศึกษาผลกระทบของแรงกดและความถี่เชิงกลที่มีต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพโซอิเล็กทริก โดยทำการสร้างชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกลที่สามารถให้แรงกดเชิงกล 50-400 N และความถี่เชิงกลในช่วง 0.017-5 Hz จากนั้นวัสดุไพโซอิเล็กทริกถูกทดสอบภายใต้แรงเชิงกลดังกล่าว และทำการศึกษาผลกระทบของแรงกดและความถี่เชิงกลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อวัสดุไพโซอิเล็กทริกได้รับแรงกดเชิงกลและความถี่เชิงกลเพิ่มขึ้น แรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น และการเพิ่มจำนวนแผ่นวัสดุมีผลทำให้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น จากการทดลองพบว่าสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากชุดทดสอบได้ 33.47 μW ณ ความต้านทานภายนอก 1 $\text{M}\Omega$ ค่ากระแสไฟฟ้า 5.85 μA และแรงดันไฟฟ้า 5.72 V และนอกจากนั้นเราได้สาธิตการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าโดยการประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

KINGKAN SRABUA : A STUDY OF EFFECT OF MECHANICAL
COMPRESSIVE FORCE AND FREQUENCY ON ENERGY
HARVESTING BY PIEZOELECTRIC MATERIAL. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. ANANT OONSIVILAI, Ph.D., 130 PP.

ENERGY HARVESTING/PZT

This thesis presents the effects of mechanical compressive force and frequency on energy harvesting by employing piezoelectric ceramics. The mechanical vibration machine was built for energy harvesting test. The machine can generate compressive force and frequency in the range of 50-400 N and 0.017-5 Hz, respectively. Piezoelectric samples were subjected to vibration loads generated by the machine. The effects of loading amplitude and frequency on output voltage were investigated. The results showed that the output voltage obtained from piezoelectric ceramics increased with higher loading amplitude and frequency. Moreover, when the number of piezoelectric samples increased, the electrical power increased. The maximum power of 33.47 μ W was obtained at 1 M Ω of an external resistor, 5.85 μ A of current and 5.72 V of voltage. In addition to amplitude and frequency effect, we demonstrated battery charging by using the energy harvesting machine.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และแนะนำความรู้ทางวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอดระยะเวลาที่ผู้วิจัยได้ศึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุคนธ์ พจน์ประไพ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความสะดวกเรื่องเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างชิ้นงานตลอดจนให้กำลังใจในการทำงานแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบคุณ คุณอัญชลี รักด่านกลาง และคุณภัทรวรรณ เคนพะนาน เลขานุการสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ดูแลประสานงานเรื่องเอกสาร

ขอขอบคุณ คุณชนพัฒน์ สระบัว พี่สาวผู้ที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ดูแล และอยู่เคียงข้างผู้วิจัยมาโดยตลอด

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสรายุทธ และคุณแม่พรทิพย์ สระบัว และครอบครัว ทิพย์กุล ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดี จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

กิ่งกาญจน์ สระบัว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ณ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 สมมติฐาน	4
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	5
2 ปรัชสน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.2 สรุป.....	18
3 ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง	19
3.1 วัสดุไฟอิชอเล็กทริก	20
3.1.1 ประวัติและความเป็นมาของวัสดุไฟอิชอเล็กทริก	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.2 หลักการและพฤติกรรมของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก.....	21
3.1.3 การทำโพลิงวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก.....	23
3.2 ประเภทของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก	27
3.3 การนำไปใช้งานของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก	29
3.4 การวัดสมบัติไพโอโซอิเล็กทริกของวัสดุ.....	30
3.4.1 ค่าคงที่ไพโอโซอิเล็กทริก	30
3.5 แบบจำลองวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก	38
3.6 แบบจำลองวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกทางไฟฟ้ากล	39
3.7 วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานไพโอโซอิเล็กทริก.....	41
3.7.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์.....	41
3.7.2 วงจร Synchronized Switch Harvesting on Inductor (SSHI).....	44
3.7.3 วงจร Hybrid Synchronized Switch Harvesting on Inductor (Hybrid SSHI).....	45
3.7.4 วงจร Synchronized Switching and Discharging to a storage Capacitor through an Inductor (SSDCI)	46
3.7.5 วงจร Active energy harvesting scheme	46
3.7.6 วงจรจัดการพลังงาน	47
3.8 การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	48
3.9 แบตเตอรี่สำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก	50
3.9.1 แบตเตอรี่	50
3.9.2 แรงดันไฟฟ้ากับความต้านทานของแบตเตอรี่	51
3.10 สรุป.....	53
4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	54
4.1 วัสดุและสารเคมี	54
4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือการทดสอบ	54

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3	วิธีการวิจัย.....	55
4.3.1	ออกแบบและสร้างชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล	56
4.3.2	วัสดุที่แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า	66
4.3.3	การเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก.....	71
4.4	สรุป.....	78
5	ผลการทดสอบและอภิปรายผล	79
5.1	ผลการทดสอบประสิทธิภาพชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล	80
5.1.1	การกำหนดแรงกดเชิงกล.....	80
5.1.2	การกำหนดความถี่เชิงกล.....	82
5.2	สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก	84
5.3	ผลของแรงกดและความถี่เชิงกลที่มีต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้า ของวัสดุไพโซอิเล็กทริก 1 แผ่น.....	85
5.4	การเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก	92
5.4.1	ผลของความต้านทานภายนอกที่มีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้า	92
5.4.2	ผลของความต้านทานภายนอกที่มีผลต่อการจ่ายโวลต์ไฟฟ้าสูงสุด.....	98
5.4.3	ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก (I-V curve)	104
5.4.4	ผลของวงจรที่ใช้ในแรงดันไฟฟ้าต่ำและการประจุแบตเตอรี่	106
5.5	สรุป.....	110
6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	112
6.1	สรุปผลการวิจัย.....	112
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	114
	รายการอ้างอิง	115

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. คู่มือการใช้งานชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล.....	117
ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	124
ประวัติผู้เขียน	130



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างของโทรศัพท์มือถือและประเภทของแบตเตอรี่ที่ใช้พลังงานไฟฟ้า และร้อยละของมวลรวมที่ใช้โดยแบตเตอรี่แบบพกพา	2
2.1 บริษัทที่ผลิตงานเกี่ยวกับพื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน ถนนเก็บเกี่ยวพลังงาน และรางรถไฟเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า	16
3.1 เปรียบเทียบสมบัติของ soft ceramics และ hard ceramics	28
3.2 สมบัติของเซรามิก PZT ที่ขายในท้องตลาด	29
3.3 วัสดุไพโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับสนามไฟฟ้ากระแสสลับ มีโหมดการสั่น 5 แบบ เกิดสมการที่ใช้ในการหาสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้า - กล ด้วยวิธีเรโซแนนซ์	34
4.1 คุณสมบัติของวัสดุไพโซอิเล็กทริกจากแหล่งผลิต	66
5.1 ผลเปรียบเทียบการคำนวณค่าแรงกดเชิงกลจากปลายกระบอกสูบนิวเมติกส์ กับผลของการวัดค่าแรงกดเชิงกลด้วยโหลดเซลล์ (Load cell)	80
5.2 การปรับระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ 1 (S_1) และเซ็นเซอร์ 2 (S_2) เพื่อควบคุมความถี่เชิงกล	83
5.3 สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริกจากแหล่งผลิตและวัดได้จริง	84
5.4 ผลของแรงกดเชิงกลที่มีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก	90

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ความหนาแน่นของพลังงานเทียบกับแรงดันไฟฟ้า เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งจ่ายไฟ ลิเทียม/ลิเทียมไอออน	3
2.1 รองเท้าเก็บเกี่ยวพลังงาน	8
2.2 quick pack	10
2.3 การติดตั้ง quick pack กับอุปกรณ์จ่ายแรงดัน	10
2.4 ภาพตัดขวางของ macro-fiber composite (MFC)	11
2.5 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ก) Lead-Zirconate-Titanate (PZT) ข) Macro Fiber Composite (MFC) ค) Bimorph Quick Pack (QP) Actuator	12
2.6 การต่อ Macro Fiber Composite (MFC) และ Lead-Zirconate-Titanate (PZT) กับชุดทดสอบการสั่น	12
2.7 วงจรการประจุแบตเตอรี่	13
2.8 การประจุแบตเตอรี่ 300 mAh (ก) PZT material (ข) Bimorph Quick pack	13
2.9 ชุดทดสอบ piezoelectric pulse generator (PPG)	14
2.10 ผลของแรงดันไฟฟ้าที่เทียบกับแรงกด	15
2.11 เซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นแบบไร้สาย โดยใช้ไฟโอโซอิเล็กทริกเป็นตัวขับเคลื่อนการทำงาน	15
2.12 แผ่น IPEG PADs กำลังถูกติดตั้งบนรางรถไฟ	17
3.1 การจัดแบ่งกลุ่มของวัสดุพอลิเมอร์โครเซรามิกส์ด้วยการใช้สมมาตรของวัสดุ	21
3.2 (ก) direct effect (ข) converse effect (I) วัสดุหดตัว (II) วัสดุขยายตัว เส้นประแสดงขนาดเริ่มต้น	22
3.3 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีทิศทางการจัดเรียงตัวของโพลาริเซชัน ก่อนและหลังการโพล	24
3.4 กระบวนการโพลิงแบบร้อน	25
3.5 กระบวนการโพลิงแบบคอนเวนชันนอล	25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6	การโคโรนาโพลิง26
3.7	ชุดทดสอบค่าคงที่ไพโอโซอิเล็กทริกด้วยวิธี Static test 31
3.8	ชุดทดสอบค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกด้วยวิธี Quasi static 32
3.9	การสั่นของอะตอมเมื่อได้รับพลังงาน.....38
3.10	วงจรสมมูลของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก (ก) วงจรสมมูลที่ความถี่เรโซแนนซ์ (ข) วงจรสมมูลเมื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ39
3.11	แบบจำลองไฟฟ้าทางกล.....40
3.12	วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์41
3.13	D_1 และ D_2 ได้รับไบอัสตรง.....42
3.14	D_3 และ D_4 ได้รับไบอัสตรง42
3.15	รูปคลื่น V_{out} จากวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์.....43
3.16	รูปคลื่นแรงดันไฟตรงเมื่อใช้ตัวเก็บประจุกรองแรงดัน43
3.17	วงจร Synchronized Switch Harvesting on Inductor (SSHI).....44
3.18	วงจร Hybrid Synchronized Switch Harvesting on Inductor (Hybrid SSHI)45
3.19	วงจร Synchronized Switching and Discharging to a storage Capacitor through an Inductor (SSDCI).....45
3.20	วงจร Active energy harvesting scheme46
3.21	วงจรสมมูลแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขณะมีโหลด.....48
3.22	วงจรเทียบเท่าของแบตเตอรี่51
4.1	ชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนทางกล.....56
4.2	ส่วนประกอบหลักของระบบนิวเมติกส์.....57
4.3	เกจรับความดันแก๊สในโตรเจนในระบบนิวเมติกส์58
4.4	กระบอกสูบนิวเมติกส์ (ก) ส่วนประกอบกระบอกสูบนิวเมติกส์ (ข) ไดอะแกรมแสดงโครงสร้างภายในของกระบอกสูบนิวเมติกส์60
4.5	เซ็นเซอร์กระบอกสูบนิวเมติกส์61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.6	ปุ่มแสดงระบบควบคุมคำสั่งของชุดกำเนิดแรงดันสะพานเชิงกล ①เปิด – ปิดการทำงาน ②OPEN AUTO ③ START MANUAL ④START AUTO ⑤RESET TIMER ⑥COUNTER ⑦ TIMER RELAY.....	62
4.7	โครงสร้างแท่นวางวัสดุไฟโโซอิเล็กทริก (ก) การวางแท่นวางวัสดุ (ข) รูปแท่นวางวัสดุ (ค) ไดอะแกรมแท่นวางวัสดุ.....	64
4.8	แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไฟโโซอิเล็กทริก	65
4.9	วัสดุไฟโโซอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบ	66
4.10	LCR Meter	67
4.11	d_{33} Meter	68
4.12	แผ่นทองแดงเชื่อมสายไฟ.....	69
4.13	การวางแผ่นทองแดงกับวัสดุไฟโโซอิเล็กทริก.....	70
4.14	การวางวัสดุไฟโโซอิเล็กทริก จำนวน 9 แผ่นวางซ้อนกัน	70
4.15	ขั้นตอนการเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุไฟโโซอิเล็กทริก	71
4.16	การต่อวงจรเพื่อหาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า ของวัสดุไฟโโซอิเล็กทริก (I-V curve).....	73
4.17	ส่วนประกอบของวงจร LTC3588 และการเชื่อมต่อแบตเตอรี่ (ก) การต่อวงจร (ข) รูปวงจร LTC3588 (ค) แบตเตอรี่	74
4.18	ส่วนประกอบของวงจรวงจรเอสซีอาร์ (SCR) และการเชื่อมต่อแบตเตอรี่ (ก) การต่อวงจร (ข) รูปวงจร SCR (ค) แบตเตอรี่	75
4.19	การต่อวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (ก) การต่อวงจร (ข) แบตเตอรี่.....	76
4.20	การต่อวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ต่อขนานกับความต้านทาน $1\text{ M}\Omega$	77
5.1	ค่าแรงกดที่ได้จากการคำนวณและค่าแรงกดที่วัดได้จริงจากโหลดเซลล์.....	81
5.2	ตำแหน่งเซ็นเซอร์ 1 (S_1) และเซ็นเซอร์ 2 (S_2)	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากแรงกดเชิงกล 75 N และความถี่เชิงกลค่าต่างๆ (ก) 2 Hz (ข) 3 Hz (ค) 4 Hz และ (ง) 5 Hz	85
5.4 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากแรงกดเชิงกล 150 N และความถี่เชิงกลค่าต่างๆ (ก) 2 Hz (ข) 3 Hz (ค) 4 Hz และ (ง) 5 Hz	86
5.5 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากแรงกดเชิงกล 225 N และความถี่เชิงกลค่าต่างๆ (ก) 2 Hz (ข) 3 Hz (ค) 4 Hz และ (ง) 5 Hz	87
5.6 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากแรงกดเชิงกล 300 N และความถี่เชิงกลค่าต่างๆ (ก) 2 Hz (ข) 3 Hz (ค) 4 Hz และ (ง) 5 Hz	88
5.7 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากแรงกดเชิงกล 375 N และความถี่เชิงกลค่าต่างๆ (ก) 2 Hz (ข) 3 Hz (ค) 4 Hz และ (ง) 5 Hz	89
5.8 ผลของแรงกดเชิงกลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก 1 แผ่น	91
5.9 ความต้านทานภายนอกที่มีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก (1) วัสดุไพโซอิเล็กทริก 1 แผ่น (2) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน (3) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน (4) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน (5) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน (6) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน (7) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน (8) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน (9) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน.....	96
5.10 เปรียบเทียบความต้านทานภายนอกที่มีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้า ของวัสดุไพโซอิเล็กทริกจำนวน 1 แผ่น - จำนวน 9 แผ่นวางซ้อนกัน	97

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

5.11	ความต้านทานภายนอกที่มีผลต่อการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด	
	(1) วัสดุโพธิโซอิเล็กทริก 1 แผ่น	
	(2) วัสดุโพธิโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน	
	(3) วัสดุโพธิโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน	
	(4) วัสดุโพธิโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน	
	(5) วัสดุโพธิโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน	
	(6) วัสดุโพธิโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน	
	(7) วัสดุโพธิโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน	
	(8) วัสดุโพธิโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน	
	(9) วัสดุโพธิโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน.....	102
5.12	การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของวัสดุโพธิโซอิเล็กทริก	
	จำนวน 1 แผ่น - จำนวน 9 แผ่นวางซ้อนกัน	103
5.13	กราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าเทียบกับแรงดันไฟฟ้า	
	ของวัสดุโพธิโซอิเล็กทริกวางเรียงซ้อนกัน 8 ชั้น.....	104
5.14	กราฟความสัมพันธ์ของความต้านทานและกำลังไฟฟ้าเทียบกับแรงดันไฟฟ้า	
	ของวัสดุโพธิโซอิเล็กทริกวางเรียงซ้อนกัน 8 ชั้น	105
5.15	แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจร LTC3588	106
5.16	การประจุแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ NiMH 1.2V 300 mAh	
	ด้วยวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์	107
5.17	การประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ NiMH 1.2V 300 mAh	
	ด้วย Bridge Rectifier และ Bridge Rectifier 1 MΩ	108

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

D	=	การกระจัดทางไฟฟ้า
T	=	ความถี่
ϵ_0	=	สภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของสุญญากาศ มีค่า 8.854×10^{-12} F/m
ϵ'	=	สภาพยอมรับได้ของวัสดุ
d, g	=	สัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริก
C	=	ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ
F	=	แรงเชิงกล
L	=	ความหนา
V	=	แรงดันไฟฟ้า
P	=	กำลังไฟฟ้า
k^2	=	สัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้า - กล
A	=	พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ
Y	=	มอดคูลัสของยัง
Q	=	ประจุไฟฟ้า
T	=	แรงเค้น
C	=	ความเก็บประจุ
R_L	=	ความต้านทาน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กก็มีความจำเป็นในการใช้งานเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและมีการแข่งขันกันมากขึ้น เพื่อสร้างความพึงพอใจให้แก่ผู้บริโภคสินค้า จึงมีการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กกะทัดรัดและสามารถพกพาได้สะดวกและมีคุณภาพสูง ยกตัวอย่างเช่น คอมพิวเตอร์แบบพกพา โทรศัพท์มือถือ เครื่องเล่นเพลงแบบพกพา เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ทำงานได้ด้วยการใช้แบตเตอรี่ประจุดังแสดงในตารางที่ 1.1 เมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลง จึงต้องมีการพัฒนาชิ้นส่วนที่ใช้สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีขนาดเล็กลงตามไปด้วย เพื่อให้เกิดความสะดวกสบายในการใช้งาน อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ประจุมีช่วงอายุและระยะเวลาในการใช้งานที่จำกัด จำเป็นต้องนำไปประจุไฟฟ้าบ่อยๆ หากนำไปใช้ในพื้นที่ที่ยังไม่มีไฟฟ้าใช้ก็ไม่สามารถประจุไฟฟ้าใส่แบตเตอรี่ได้

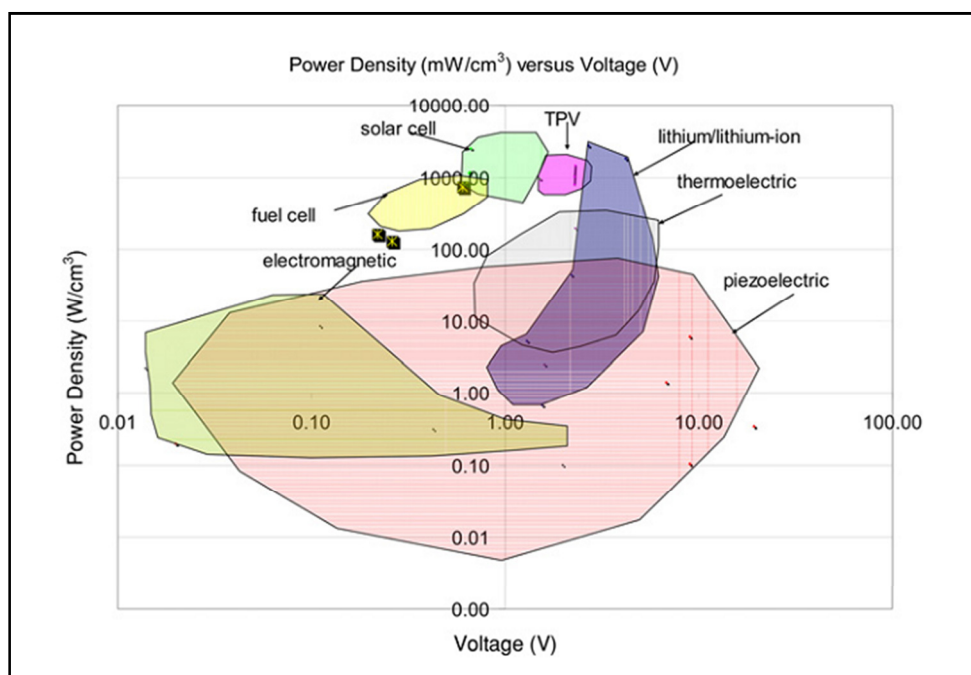
ในกรณีของเซ็นเซอร์ไร้สายจำเป็นต้องใช้แบตเตอรี่ในการทำงานเช่นกัน แต่แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่จำกัด จำเป็นต้องเปลี่ยนเมื่อครบอายุการใช้งาน หากนำเซ็นเซอร์ไปใช้ในสถานที่ที่ห่างไกลมีแสงแดดน้อยและยากต่อการเปลี่ยนแบตเตอรี่ ทำให้เซ็นเซอร์ที่นำไปใช้มีลักษณะใช้แล้วทิ้ง มีงานวิจัยที่มีการหาพลังงานทดแทนมาใช้ในการประจุแบตเตอรี่ และนำแบตเตอรี่กลับมาใช้ใหม่ได้ เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของเซ็นเซอร์ให้สามารถทำงานได้นานขึ้น โดยไม่ต้องเปลี่ยนแบตเตอรี่เมื่อครบอายุการใช้งาน พลังงานส่วนมากที่มีการวิจัย เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อน เป็นต้น พลังงานที่กล่าวมานี้จำเป็นต้องใช้แสงแดดและความร้อนจากดวงอาทิตย์ แต่ในบางพื้นที่ที่ห่างไกลก็ไม่สามารถใช้พลังงานดังที่กล่าวมาได้ เนื่องจากมีแสงแดดเข้าถึงยาก ไม่มีพลังงานความร้อนที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ จึงมีแนวคิดของการเก็บเกี่ยวพลังงานที่ได้จากการสั่นสะเทือนโดยใช้วัสดุไพโซอิเล็กทริก

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างของโทรศัพท์มือถือและประเภทของแบตเตอรี่ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าและร้อยละของมวลรวมที่ใช้โดยแบตเตอรี่แบบพกพา (K A Cook-Chennault, 2008)

อุปกรณ์	คุณสมบัติของแบตเตอรี่
Motorola, V180 	ประเภทแบตเตอรี่: ลิเทียมไอออน(Li-Ion) แรงดัน: 3.6 V มวลของอุปกรณ์ที่: 70 กรัม มวลของแบตเตอรี่: 25 กรัม ร้อยละของมวลรวม: 36%
Blackberry 	ประเภทแบตเตอรี่: ลิเทียมไอออน(Li-Ion) แรงดัน: 3.7 V มวลของอุปกรณ์: 120 กรัม มวลของแบตเตอรี่: 20 กรัม ร้อยละของมวลรวม: 17%
Dell Laptop 	ประเภทแบตเตอรี่: ลิเทียมไอออน(Li-Ion) แรงดัน: 11.1 V มวลของอุปกรณ์: 2,435 กิโลกรัม มวลของแบตเตอรี่: 315 กรัม ร้อยละของมวลรวม: 13%

ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญในการหาพลังงานขนาดเล็กที่สามารถสร้างพลังงานได้เอง โดยไม่จำกัดเวลาและสถานที่ แม้ในขณะที่กำลังเดินทางในป่าหรืออยู่ในพื้นที่ที่ยังไม่เจริญไม่มีแดด พื้นที่ที่ไม่สามารถสร้างพลังงานหมุนเวียน ด้วยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์หรือโซลาร์เซลล์ แต่สามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าได้ตลอดเวลาและนำกลับเข้าไปประจุในแบตเตอรี่ได้ โดยผู้วิจัยได้ศึกษาวัสดุไพโซอิเล็กทริก เป็นวัสดุที่สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าค่าสูงเหมาะสำหรับใช้เป็นตัวส่งสัญญาณหรือประจุไฟให้กับอุปกรณ์ขนาดเล็กได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 วัสดุไพโซอิเล็กทริกนี้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ เมื่อได้รับแรงทางกลมากระทำกับวัสดุ โดยอาศัยแรงทางกลจากสิ่งแวดล้อม อาศัยพลังงานกล ซึ่งพลังงานกลที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันมีมากมาย เช่น พลังงานจากการสั่นของอุปกรณ์เครื่องจักร พลังงานกลจากการกระแทกของส้นเท้าบนพื้นเมื่อเดินหรือวิ่ง พลังงานกลจากการวิ่งของรถบนพื้นถนน พลังงานกลจากการเคลื่อนไหวของอวัยวะต่าง ๆ จากระบบการทำงานในร่างกาย (Fletscher, R. 1996) และในกิจกรรมต่างๆ ซึ่งอาจเก็บเกี่ยวพลังงานกลดังกล่าวไว้ในรูปของพลังงานไฟฟ้าได้โดยใช้วัสดุที่มีสมบัติเป็นไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric)

ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือในทางกลับกันสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลได้



รูปที่ 1.2 ความหนาแน่นของพลังงานเทียบกับแรงดันไฟฟ้า
เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งจ่ายไฟ ลิเทียม/ลิเทียมไอออน
(K A Cook-Chennault, 2008)

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาผลกระทบของแรงกดและความถี่เชิงกลที่มีต่อวัสดุเก็บเกี่ยวพลังงานไพโซอิเล็กทริก โดยจะมุ่งเน้นให้ความสนใจเกี่ยวกับแรงกดและความถี่เชิงกล เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแรงกดและความถี่ของการกดต่อพลังงานไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้ โดยทำการออกแบบสร้างชุดทดสอบที่สามารถสร้างแรงกดในช่วง 50 - 400 N กับความถี่ในช่วง 1-300 ครั้งต่อวินาที และพัฒนางจรการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพโซอิเล็กทริก เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานกลสูญเสียเปล่า

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ออกแบบและสร้างชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล ที่สามารถให้แรงกดเชิงกลและความถี่ในการกดเชิงกล เพื่อศึกษาการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก
2. ศึกษาผลกระทบการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก ที่เกิดจากแรงกดเชิงกลและความถี่ในการกดเชิงกลที่ค่าต่างๆ
3. ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากวัสดุไพโซอิเล็กทริกด้วยวงจรแบบต่างๆ

1.3 สมมติฐาน

1. ถ้าเพิ่มแรงกดเชิงกลและความถี่ในการกดเชิงกลแก่วัสดุไพโซอิเล็กทริกแล้ว จะทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น
2. การเพิ่มจำนวนแผ่นวัสดุไพโซอิเล็กทริกด้วยการวางเรียงซ้อนกันเป็นชั้น มีผลทำให้กำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น และสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าเพื่อประจุในแบตเตอรี่ได้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. สร้างชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล ซึ่งสามารถให้แรงกดเชิงกลในช่วง 50 - 400 N และความถี่ในการกดเชิงกลในช่วง 1-300 ครั้ง/นาที
2. ศึกษาผลของแรงกดเชิงกลในช่วง 50 - 400 N ที่มีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก
3. ศึกษาผลของความถี่ในการกดเชิงกลในช่วง 1 – 300 ครั้ง/นาที ที่มีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก
4. ศึกษาวงจรที่ช่วยในการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก

1.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

- ชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล หมายถึง ชุดตรวจสอบการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก ที่มีแรงกดเชิงกลในช่วง 50 - 400 N และความถี่ในการกดเชิงกลในช่วง 0.017 – 5 Hz โดยใช้ระบบนิวเมติกส์
- แรงกดเชิงกล หมายถึง แรงกดที่กระทำในแนวตั้งฉากกับระนาบของวัตถุที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงความถี่ต่างๆ
- ความถี่เชิงกล หมายถึง จำนวนรอบในการเกิดแรงกดเชิงกลที่เกิดขึ้นในเวลา 1 วินาที ในที่นี้ความถี่เชิงกลใช้เป็นจำนวนรอบ/วินาที

- **เฮิร์ต (Hz)** หมายถึง หน่วยของความถี่เชิงกลที่เกิดขึ้นใน 1 วินาที ซึ่งในการทดสอบชุดสั้นสะเทือนทางกล สามารถให้ความถี่ในการกดเชิงกลในช่วง 1 - 300 ครั้ง/นาที หรือ 0.017 - 5 ครั้ง/วินาที (0.017 - 5 Hz)

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกลที่สามารถให้แรงกดเชิงกลในช่วง 50 - 400 N และความถี่ในการกดเชิงกลในช่วง 0.0167 - 5 Hz
2. ได้ทราบถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพโซอิเล็กทริก
3. ได้ทราบถึงวิธีการเก็บเกี่ยวพลังงานกลที่สูญเสียไป
4. สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากวัสดุไพโซอิเล็กทริกได้

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท และ 2 ภาคผนวก มีดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงที่มา และความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน รวมทั้งประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อธิบายความเป็นมาและการนำเสนองานวิจัยที่ผ่านมา

บทที่ 3 กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของวัสดุไพโซอิเล็กทริก ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก และการนำวัสดุไพโซอิเล็กทริกไปใช้งาน หลักการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด การศึกษาวงจรที่ช่วยในการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบและสร้างชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล ที่ให้แรงกดเชิงกลในช่วง 50 - 400 N และความถี่เชิงกลในช่วง 1 - 300 ครั้ง/นาที (0.016 - 5 Hz) การทดลองเปรียบเทียบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริกจากแหล่งผลิต และจากการคำนวณที่ได้วัดค่าจริงในห้องปฏิบัติการ แล้วนำไปทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล ทั้งนี้ได้กำหนดค่าต่างๆ ของแรงกดเชิงกลคือ 75N 150N 225N 300N และ 375N ความถี่ในการกดเชิงกลคือ 2Hz 3Hz 4Hz และ 5Hz เพื่อใช้ทดสอบกับวัสดุไพโซอิเล็กทริก ที่มีการจัดวางเรียงซ้อนกันตั้งแต่ 1 - 9 ชั้น ทดสอบวงจรที่ช่วยในการประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ ด้วยชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกลที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้น

บทที่ 5 กล่าวถึงผลจากการทดสอบวัสดุไฟโโซอิเล็กทริก และวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ทำให้วัสดุไฟโโซอิเล็กทริกเกิดแรงดันไฟฟ้า และแสดงผลของวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานที่เหมาะสมสำหรับการประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุป และข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนางจรการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้วัสดุไฟโโซอิเล็กทริก เพื่อให้สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานกลสูญเสียได้ดียิ่งขึ้น และนำไปเป็นพลังงานทางเลือกในอนาคต

ภาคผนวก ก. คู่มือการใช้งานชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล

ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา



บทที่ 2

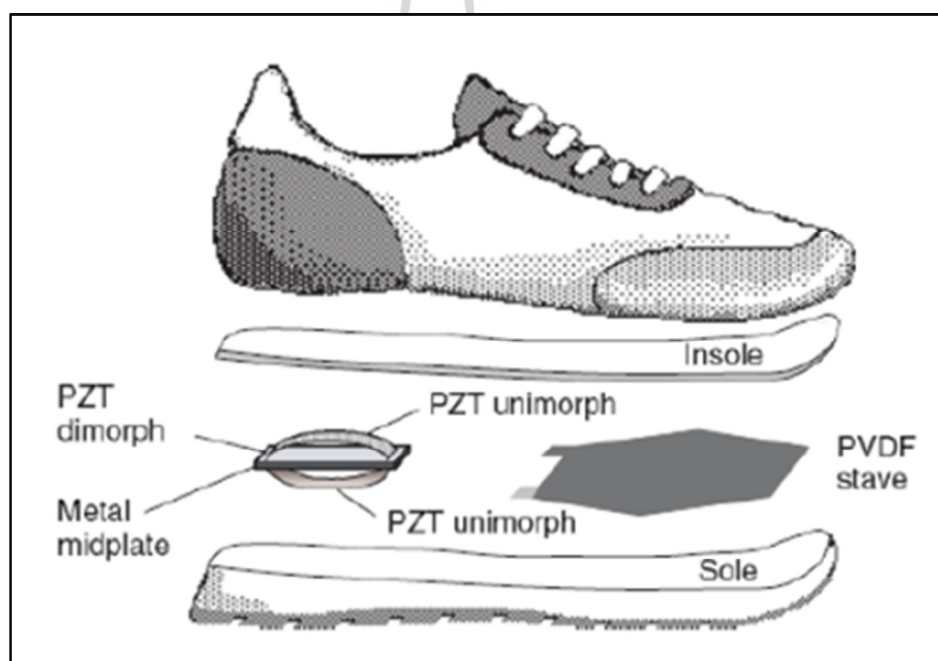
ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ว่าวัสดุไพโซอิเล็กทริกได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์เชิงอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่างๆ อย่างแพร่หลาย โดยถูกนำมาพัฒนาทางอิเล็กทรอนิกส์ อาทิเช่น อุปกรณ์อัลตราโซนิกที่ใช้ในทางการแพทย์ (Medical ultrasonic composites) การประยุกต์ใช้งานในวงจรไฟฟ้าขนาดเล็ก (Integrated-circuit applications) และนำมาเป็นวัสดุต้นกำเนิดพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าได้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาผลกระทบของแรงกดและความถี่ในการกดเชิงกล ที่มีต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก โดยจะมุ่งเน้นให้ความสนใจเกี่ยวกับแรงกดและความถี่ในการกดเชิงกล เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแรงกดและความถี่ในการกดเชิงกล ที่มีผลต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปรัทัศนัวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณณักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัย และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอันได้แก่ฐานข้อมูลจาก (i) IEEE (ii) American institute of physics และ (iii) Science Direct เป็นต้น

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงปี ค.ศ. 2001 – 2012 มีความตื่นตัวในการศึกษาค้นคว้าหาพลังงานทางเลือกเป็นอย่างมาก จากการค้นคว้าพบว่ามีนักวิจัยหลายกลุ่มที่ศึกษาการเกิดพลังงานจากวัสดุไพโซอิเล็กทริกชนิดต่างๆ ปัจจัยที่มีผลต่อการเก็บเกี่ยวพลังงาน และการนำวัสดุไปประยุกต์เพื่อใช้งาน มีรายละเอียดดังนี้

Shenck และ Paradiso (2001) จาก MIT Media Lab ได้นำเสนองานวิจัยการเก็บเกี่ยวพลังงานที่สูญเสียในระหว่างการกระแทกส้นเท้า ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยใช้ PVDF ผังลงในด้านหน้าของรองเท้ากีฬา เนื่องจากนี้เท้ามีความยืดหยุ่น ต่อ PVDF คร่อมกับโหลด $250\text{ k}\Omega$ วัดแรงดันไฟฟ้าในการเดินแต่ละครั้งได้ 1.3 mW มีการใช้วัสดุไพโซอิเล็กทริกที่เรียกว่า unimorph PZT ผังลงที่บริเวณส้นเท้าสามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าได้ 8.4 mW ที่ค่าความต้านทาน $500\text{ k}\Omega$



รูปที่ 2.1 รองเท้าเก็บเกี่ยวพลังงาน

Mohammadi และคณะ (2003) ศึกษาและพัฒนาวัสดุชื่อว่า piezofiber เกิดจากการนำเส้นใยไพโซอิเล็กทริกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15, 45, 120, 280 μm ตามลำดับ นำมาเคลือบด้วย Epoxy ทำให้องค์ประกอบของ piezofiber มี Epoxy 60% และเส้นใย 40% จากนั้นนำ piezofiber มาตัดให้มีขนาดกว้างยาว 34 mm x 14 mm และมีความหนา 1.2 – 5.8 mm ทำการทดสอบโดยใช้

ลูกเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm มีมวล 33.5 g ปล่อยจากความสูง 10 cm ตกกระแทกกับ piezofiber ที่ความหนาต่างๆ กัน พบว่าแรงดันไฟฟ้ามีค่ามากที่สุด 120 mV เมื่อปล่อยลูกเหล็กตกกระแทกกับ piezofiber หนา 5.35 mm ภายในมีเส้นใยโพซิโพลิเอทรีกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 μm จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการเก็บเกี่ยว piezofiber สามารถอธิบายได้ว่าแผ่น piezofiber วัสดุที่ยังหาซึ่งมีความสามารถในการสร้างแรงดันไฟฟ้าได้มาก

Sodano และคณะ (2003) ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุโพซิโพลิเอทรีกจากการสั่นของเครื่องยนต์ และเปรียบเทียบการเก็บพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุกับแบตเตอรี่ไฮโดรเจน ทำจากโลหะนิเกิล (nickel metal hydride battery : NiMH) พบว่าการเก็บพลังงานในตัวเก็บประจุนั้น PZT ต้องให้พลังงานไฟฟ้าที่คงที่จึงจะทำงานได้สมบูรณ์ และใช้เวลาในการปล่อยพลังงานช้ากว่าแบตเตอรี่ ทำให้วงจรของตัวเก็บประจุต้องมีสวิตช์เปิดและปิดในขณะบรรจุและปล่อยพลังงาน สำหรับพลังงานที่ประจุในแบตเตอรี่สามารถเก็บไว้ใช้ได้เมื่อไม่มีการสั่นและพบว่าการประจุพลังงานในแบตเตอรี่ขนาด 40 mAh ที่ความถี่เรโซแนนซ์ใช้เวลาในการประจุไฟน้อยกว่าการประจุพลังงานที่ความถี่แบบสุ่ม (1-1000 Hz) โดยการเก็บเกี่ยวพลังงานในตัวเก็บประจุได้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.17 mW ซึ่งให้กำลังไฟฟ้าที่ต่ำ แต่ถ้าใช้แบตเตอรี่ก็สามารถบรรจุพลังงานที่สูงขึ้นไว้สำหรับใช้งานได้

Churchill และคณะ (2003) ศึกษาและพัฒนาวัสดุเก็บเกี่ยวพลังงานที่เรียกว่า piezofiber โดยการฝังเส้นใยโพซิโพลิเอทรีกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 μm ในเรซิน (resin คือ สารสังเคราะห์ที่มีคุณสมบัติเหมือนยางไม้) ให้มีขนาดความกว้าง 13 mm ยาว 130 mm หนา 0.38 mm ทำการทดสอบโดยให้ความถี่ต่างๆ กัน พบว่า เมื่อให้ความถี่ในการสั่น 180 Hz มีผลทำให้ Piezofiber เกิดความเครียด 300 $\mu\epsilon$ และสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้ประมาณ 7.5 mW ของพลังงานทั้งหมด จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเส้นใยโพซิโพลิเอทรีกขนาดเล็ก สามารถสร้างพลังงานที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของสิ่งแวดล้อมทั่วไปได้

Sodano และคณะ (2004a) ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจาก PZT เพื่อหาความถี่และแอมพลิจูดที่เหมาะสมในการผลิตพลังงาน ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ quick pack คือ วัสดุที่ผลิตด้วยวิธีการวางวัสดุโพซิโพลิเอทรีกซ้อนเป็นชั้นฝังใน kapton และ epoxy matrix ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ติดตั้งกับอุปกรณ์จ่ายแรงสั่นและวัดพลังงานไฟฟ้าที่ได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 พบว่าการใช้ความต้านทานทางไฟฟ้าที่เหมาะสมกับอิมพีแดนซ์ของ PZT จะทำให้ได้ประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานสูงสุด ดังนั้นการใช้ flyback converter หรือวงจรอื่น ในการปรับ load resistance จึงมีความจำเป็นเพื่อให้ได้พลังงานที่มีค่าสูงสุด



Device size (mm): 100.6 x 25.4 x 0.762

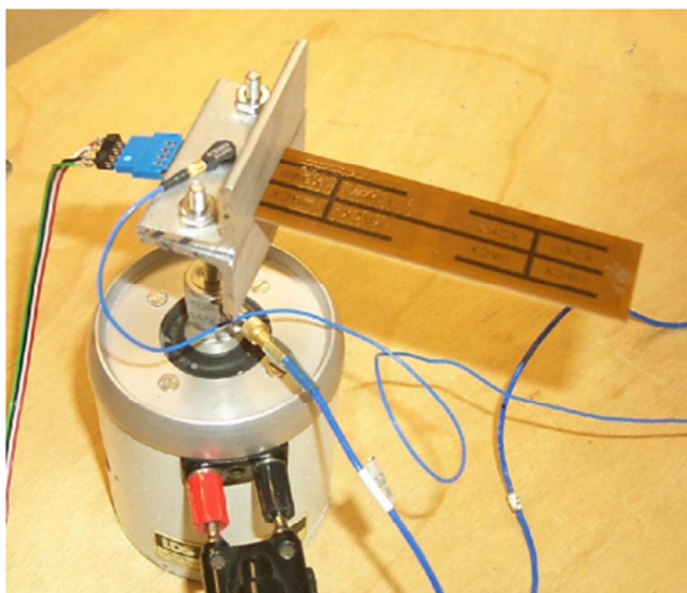
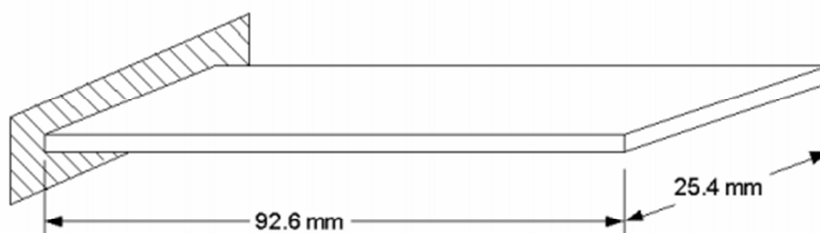
Device weight (g): 9.52

Active elements: 2 stacks of 2 piezos

Piezo wafer size (mm): 45.974 x 20.574 x 0.254

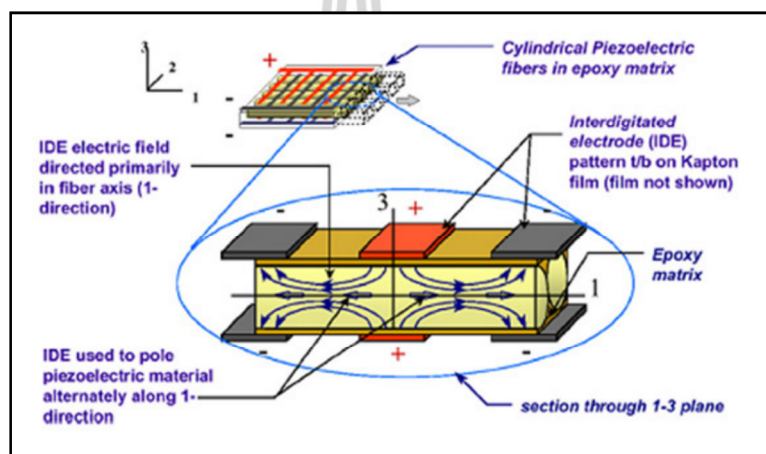
Full scale voltage range (V): ± 200

รูปที่ 2.2 quick pack



รูปที่ 2.3 การติดตั้ง quick pack กับอุปกรณ์จ่ายแรงดัน

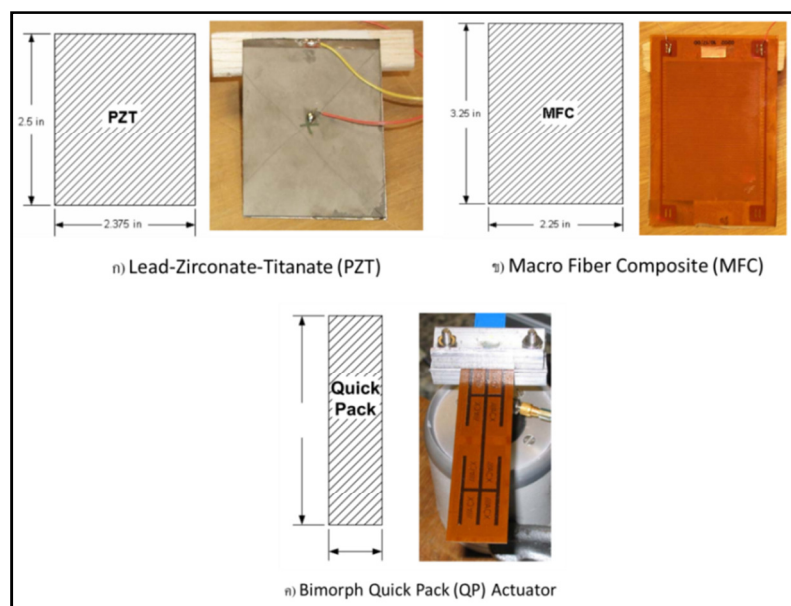
Sodano และคณะ (2004b) ศึกษาและทดสอบหาความสามารถในการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานไพโซอิเล็กทริกที่ใช้ในเซ็นเซอร์ (sensor) 3 แบบ ได้แก่ macro-fiber composite (MFC) เป็นวัสดุที่เกิดจากการนำ piezo fiber ผึ่งใน epoxy matrix แสดงภาพตัดขวางของ MFC ในรูปที่ 2.4 ข้อดีของ MFC คือทำให้วัสดุมีความยืดหยุ่นสูงมากและค่า d_{33} มากตามไปด้วย quick pack IDE (model QP10ni) และ the quick pack model (QP10n) เป็นวัสดุเซรามิกขนาดใหญ่ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า interdigitated นำมาทดสอบโดยใช้รูปแบบการติดบีมที่ปลายคานทดสอบและให้แรงด้วยการสั่นสะเทือน 12 รูปแบบ พบว่า ในทุกการสั่นสะเทือน the quick pack model มีประสิทธิภาพในการสร้างแรงดันได้มากที่สุด ส่วน MFC และ quick pack IDE ให้แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำมากมีข้อจำกัดในการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวางของ macro-fiber composite (MFC)

Sodano และคณะ (2005a) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไพโซอิเล็กทริก 3 แบบอีกครั้ง โดยในครั้งนี้ทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานและประสิทธิภาพการประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่ที่มีขนาดต่าง ๆ โดยใช้ Lead-Zirconate-Titanate (PZT), Macro Fiber Composite (MFC) และ Bimorph Quick Pack (QP) Actuator แสดงในรูปที่ 2.5 นำอุปกรณ์ไพโซอิเล็กทริกทั้ง 3 แบบ ต่อกับชุดทดสอบการสั่น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ให้แรงสั่นสะเทือนแก่วัสดุและบันทึกค่า พบว่า PZT มีประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานดีที่สุดทั้งในสถานะความถี่เรโซแนนซ์และความถี่แบบสุ่ม (0 - 500 Hz) ซึ่งมากกว่า QP และ MFC ทดสอบการประจุไฟฟ้าโดยนำ PZT และ QP ต่อกับวงจรที่ใช้ประจุแบตเตอรี่โดยวงจรที่ใช้เป็นวงจรเรียงกระแสต่อกับแบตเตอรี่ไฮโดรเจนทำจากโลหะนิเกิล (nickel metal hydride battery : NiMH) แสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อทดสอบการประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่

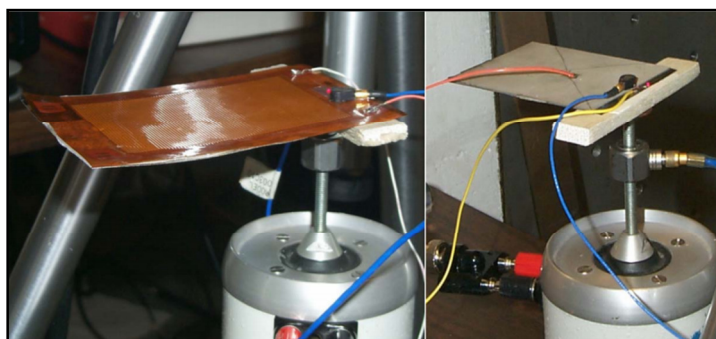
ที่มีขนาดต่าง ๆ พบว่า PZT มีประสิทธิภาพดีกว่า QP คือ เมื่อขนาดของแบตเตอรี่ใหญ่ขึ้น PZT ใช้เวลาในการประจุไฟฟ้าน้อยกว่า QP ทั้งในสภาวะเรโซแนนซ์และไม่ใช้เรโซแนนซ์ ซึ่งที่ความถี่เรโซแนนซ์จะใช้เวลาในการประจุไฟฟ้าน้อยกว่าที่ไม่ใช่ความถี่เรโซแนนซ์ ดังแสดงกราฟในรูปที่ 2.8 สำหรับ MFC ไม่เหมาะในการประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่เนื่องจากให้กระแสไฟฟ้าที่ต่ำ



รูปที่ 2.5 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ก) Lead-Zirconate-Titanate (PZT)

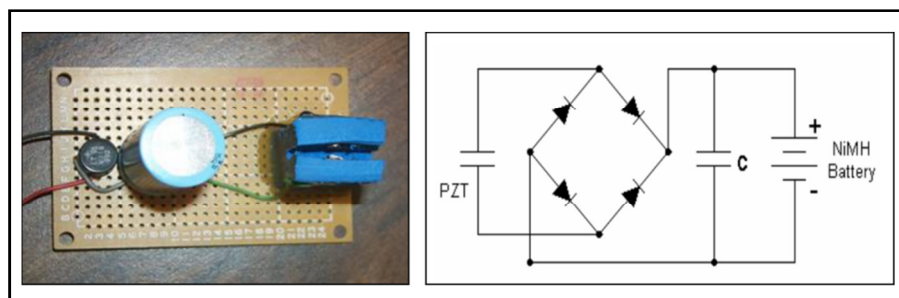
ข) Macro Fiber Composite (MFC)

ค) Bimorph Quick Pack (QP) Actuator

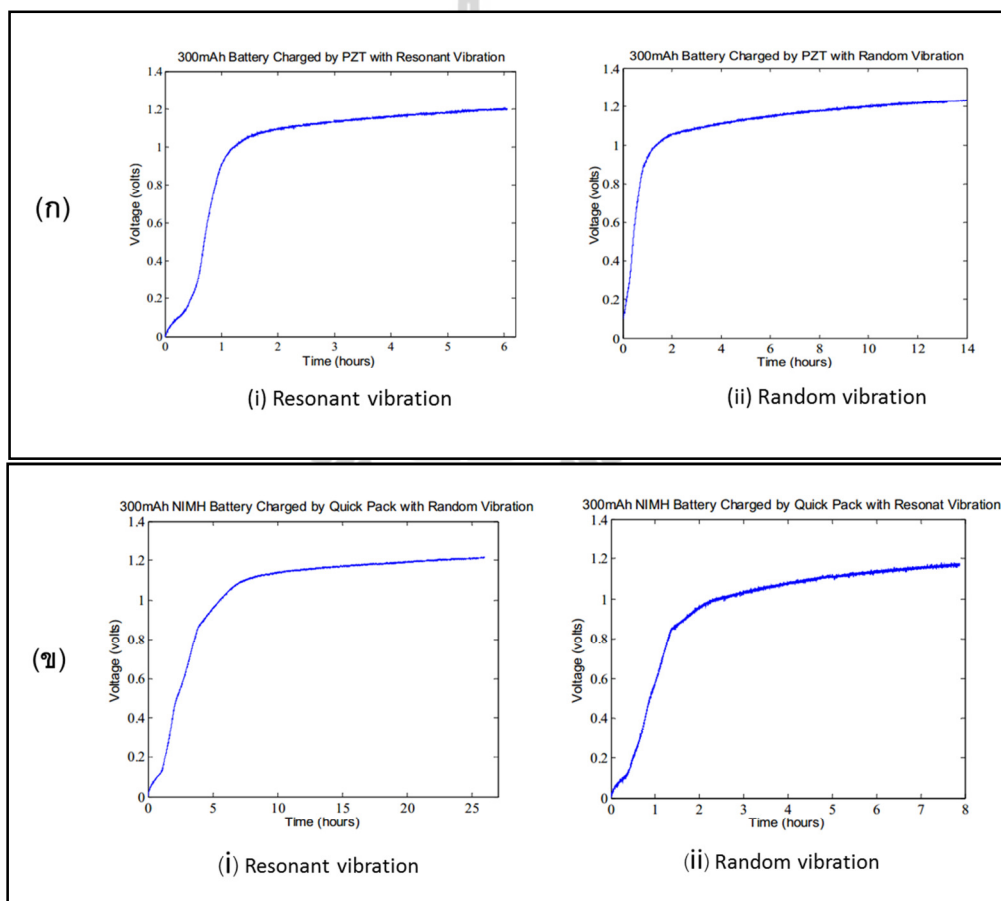


รูปที่ 2.6 การต่อ Macro Fiber Composite (MFC) และ Lead-Zirconate-Titanate (PZT)

กับชุดทดสอบการสั่น



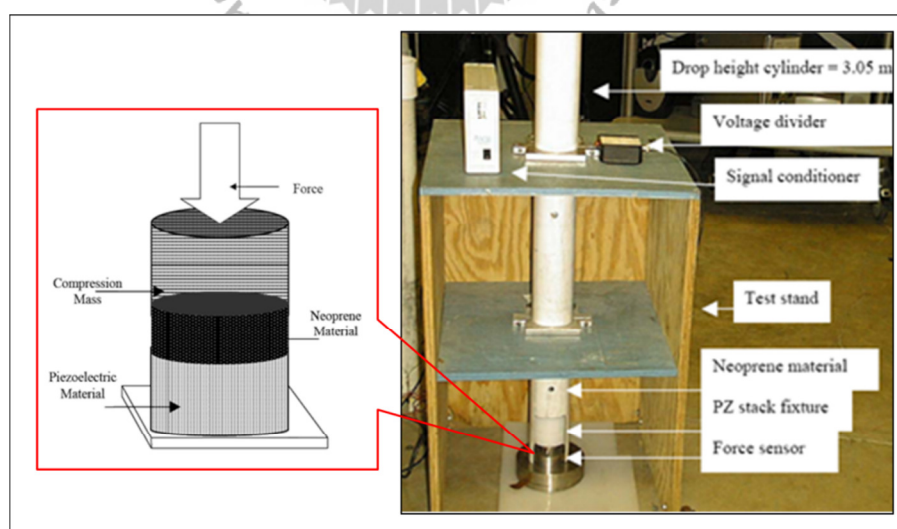
รูปที่ 2.7 วงจรการประจุแบตเตอรี่



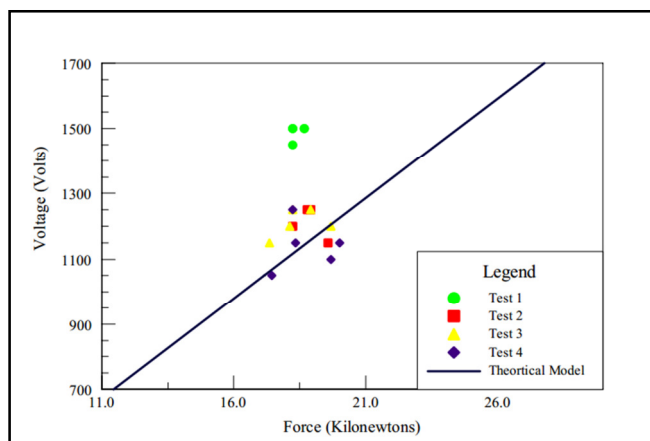
รูปที่ 2.8 การประจุแบตเตอรี่ 300 mAh (ก) PZT material (ข) Bimorph Quick pack

Sodano และคณะ (2005b) ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้าระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitor) และแบตเตอรี่ไฮโดรเจนทำจากโลหะนิเกิล (nickel metal hydride battery : NiMH) ทดสอบโดยให้แรงสั่นซึ่งเป็นการสั่นที่พบในเครื่องอัดอากาศรถยนต์ ให้การสั่นแบบสุ่มแก่วัสดุโพซิโวลีเอตริก (PZT) เพื่อนำมาประจุเข้าในแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุไฟฟ้า ระดับของการสั่นแบบสุ่มจาก 0 – 1000 Hz ใช้วงจรพื้นฐานในการประจุแบตเตอรี่คือ วงจรเรียงกระแส (full bridge rectifier) และตัวเก็บประจุ (filter capacitor) ผลการทดลองเมื่อ PZT เกิดการสั่นที่มีความถี่สูง วงจรตัวเก็บประจุสามารถประจุไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว แต่ก็ปล่อยพลังงานไฟฟ้าในตัวของมันเองได้เร็วเช่นกัน ต่างจากแบตเตอรี่ใช้เวลาในการประจุไฟฟ้านานกว่าตัวเก็บประจุ แต่สามารถนำแรงดันไฟฟ้าที่เก็บไว้ภายในแบตเตอรี่ นำไปใช้งานในภายหลังได้

Pinkston (2005) ศึกษาการเกิดแรงดันไฟฟ้าด้วย piezoelectric pulse generator (PPG) รูปที่ 2.9 แสดงชุดทดสอบทั้งหมด ภายในห้องมีโครงสร้างแบ่งออกเป็น 3 ชั้น ได้แก่ แท่งกดมีมวล 11.8 kg วัสดุยางเทียมและวัสดุโพซิโวลีเอตริกที่มีมวล 0.031 kg การทดสอบจะวางวัสดุยางเทียมไว้ตรงกลางระหว่างวัสดุโพซิโวลีเอตริก และแท่งเหล็กกด ยางเทียมช่วยลดความเร็วในการกดของแรงกดซึ่งอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 5 ms จากนั้นทำการปล่อยแท่งเหล็กมวล ที่ความสูงต่างๆ กัน 1.219 เมตร ถึง 3.048 เมตร ตกกระทบกับ PZ Stack ทำการทดลองทั้งหมด 4 ชุด ชุดละ 4 ครั้ง พบว่าแรงดันที่ได้มีค่าแปรผันตามกับแรงกด ค่าสูงสุดของแรงดันที่วัดได้มีค่า 1588V ที่แรงกด 18 kN ค่าเฉลี่ยแรงดันทั้งหมดมีค่า 1500 V แสดงในรูปที่ 2.10

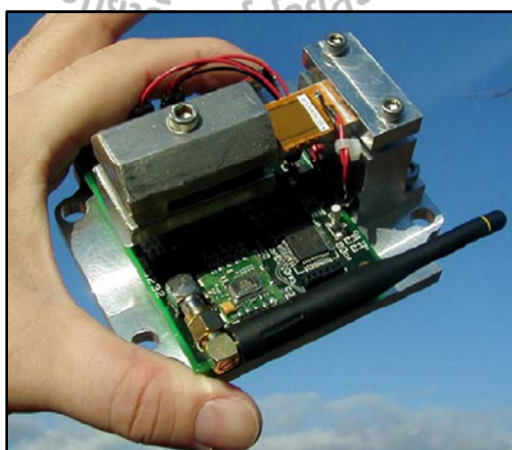


รูปที่ 2.9 ชุดทดสอบ piezoelectric pulse generator (PPG)



รูปที่ 2.10 ผลของแรงดันไฟฟ้าที่เทียบกับแรงกด

Arms และคณะ (2005) มุ่งเน้นไปที่การออกแบบและการผลิตเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นแบบไร้สาย โดยใช้ไพโซอิเล็กทริกเป็นตัวขับเคลื่อนการทำงาน วัสดุไพโซอิเล็กทริกแบบบีบถูกใช้ในการเก็บเกี่ยวการสั่นสะเทือนโดยรอบ เพื่อสร้างพลังงานที่สามารถนำไปใช้กับเซ็นเซอร์ไร้สายได้ รูปที่ แสดงให้เห็นภาพของเซ็นเซอร์ไร้สายและตัวขับเคลื่อนพลังงานไฟฟ้าด้วยวัสดุไพโซอิเล็กทริก การวิจัยแสดงให้เห็นว่าภายใต้การสั่นสะเทือนขั้นต่ำที่ 1 ms^{-2} และมีระดับความเครียดเล็กน้อยประมาณ $200 \text{ } \mu\text{E}$ ก็สามารถที่จะทำให้บีบสั่นและสร้างพลังงานไฟฟ้าเพื่อส่งพลังงานให้เซ็นเซอร์ไร้สายทำงานได้อย่างต่อเนื่อง แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นแบบไร้สายโดยใช้ไพโซอิเล็กทริกเป็นตัวขับเคลื่อนการทำงาน

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยเชิงพาณิชย์ในการสร้างพื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน ถนนเก็บเกี่ยวพลังงาน และรางรถไฟเก็บเกี่ยวพลังงาน ชื่อของบริษัทที่ผลิตงานเหล่านี้ ซึ่งได้รวบรวมและแสดงข้อมูล ผลการเก็บเกี่ยวที่ได้ไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 บริษัทที่ผลิตงานเกี่ยวกับพื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน ถนนเก็บเกี่ยวพลังงาน และรางรถไฟเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า

Company/Organization	Product/Service	Output energy	Establish	
	Innowattech	Smart road , energy harvesting road/ pedestrian	0.4 Megawatts/4 lanes wide, 1 km and trafficked by about 1,000 vehicles/hr	2007
	PowerLeap	Pavement , floor titles	10 Watts/m ² /hr (cost =\$ 50-100 per square foot)	2008
	Pavegen Systems (UK)	Pavement , floor titles	2.1 Watt –hr, 4 – 8 Watt /step (300 - 400 USD/floor)	2009
	TreeVolt	Smart road , energy harvesting road/ pedestrian	400-600 kWh/km for an estimated of 200 to 400 vehicles in 16 hrs of traffic.	Recently

Kim และคณะ (2007) ศึกษาความต้านทานที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า พบว่าการให้ load resistance เหมาะสม การให้แรงกับความถี่ให้กับวัสดุมีผลต่อแรงดันและกำลังไฟฟ้าที่ได้ ซึ่งวัสดุที่มีค่า piezoelectric voltage constant (g) ที่สูงจะให้แรงดันและกำลังไฟฟ้ามากที่สุด แทรนส์ดิวเซอร์ที่มีรูปร่างแบบ cymbal มี effective strain coefficient มากกว่าไพโซอิเล็กทริก 40 เท่า โดยเมื่อให้แรง 70 N ที่ความถี่ 100 Hz กำลังไฟฟ้าที่ได้คือ 53 mW และพบว่าการนำแผ่นไพโซอิเล็กทริกวางซ้อนกันเป็นชั้นๆ จำนวน 10 ชั้นเทียบกับชั้นเดียวทำให้ได้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 2 เท่า และใช้ load resistance ต่ำลง 40 เท่าเนื่องจากมีกระแสที่สูงขึ้น 10 เท่า

Swallow และคณะ(2008) ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจาก piezoelectric fiber composite ถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและความหนาของวัสดุ พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น และความถี่ในการทำงานที่เหมาะสมทำให้วัสดุกำเนิดแรงดันไฟฟ้ามากขึ้น และพบว่าความหนาของชั้นไพโซอิเล็กทริกที่มากขึ้นทำให้กำลังไฟฟ้าคู่ควบทางกล มากขึ้น

บริษัท Innowattech (2012) ประเทศอิสราเอลได้แสดงการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นของรางรถไฟ โดย Innowattech ได้ประดิษฐ์ IPEG PADs ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งสร้างจากวัสดุไพโซอิเล็กทริกและประกบเข้ากับหมอนรองรถไฟ และได้รายงานว่าสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ที่ขนาด 120 kW/h สำหรับทางรถไฟยาว 1 กิโลเมตร จากรายงานผลการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าของ Innowattech แสดงถึงความเป็นไปได้ค่อนข้างสูงในการนำพลังงานที่ผลิตได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริกมาใช้ในการประจุแบตเตอรี่ เพื่อใช้กับระบบสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุเพื่อติดตามขบวนรถไฟในสถานที่ห่างไกล



รูปที่ 2.12 แผ่น IPEG PADs กำลังถูกติดตั้งบนรางรถไฟ

Ahmad (2011) ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริก โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน เริ่มจากการศึกษาวงจรที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า พบว่าวงจรของ Ottoman สามารถนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้ดีที่สุด หลังจากนั้นจึงเริ่มศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการสั่นสะเทือนวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่ความถี่ 10 - 100 Hz พบว่าที่ความถี่ 80 Hz ให้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 0.475 mW ใช้ความถี่ 80 Hz ทำการทดสอบวัสดุไพโซอิเล็กทริกและเก็บเกี่ยวพลังงานในแบตเตอรี่ 1.2 V 40 mAh ใช้เวลา 250 วินาที ในการประจุไฟฟ้าจนเต็ม จากนั้น

ได้มีการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานไพโซอิเล็กทริกที่ได้จากการเคลื่อนไหวของมนุษย์ การเดินการวิ่ง ในช่วง 2 - 8 km/h พบว่าที่การเดินช่วง 5 km/h เกิดพลังงานไฟฟ้ามากที่สุด และสามารถประจุแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ 1.2 V 40 mAh จนเต็ม โดยใช้เวลาในการประจุ 3750 วินาที

Putson (2012) ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานการสั่นด้วยพอลิเมอร์อิเล็กทรอสตริกทีฟโดยพอลิเมอร์จะถูกติดบนคานเหล็กถูกสั่นด้วยสนามแม่เหล็กจากขดลวดเหนี่ยวนำ ขณะเดียวกันป้อนสนามไฟฟ้ากระแสตรงให้กับพอลิเมอร์ เมื่อคานสั่นเกิดความเค้นบนพอลิเมอร์ เกิดกระแสไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์กระแสสลับบนตัวต้านทานดัดคร่อม กำลังไฟฟ้าสามารถหาได้จากความต่างศักย์ดัดคร่อม $P = I^2 R$ ที่ความถี่ของการสั่น 100 Hz และสนามไฟฟ้ากระแสตรง 10 V/ μ m จากกราฟพบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเข้าใกล้ 7 μ W ที่ความต้านทานเหมาะสม 2.5 M Ω แม้ว่าการเก็บเกี่ยวพลังงานของพอลิเมอร์อิเล็กทรอสตริกทีฟจำเป็นต้องอาศัยพลังงานภายนอก แต่สามารถปรับปรุงโดยให้พอลิเมอร์มีความเครียดบนพอลิเมอร์สูงขึ้นเพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากพอลิเมอร์มากกว่าสนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอกมีค่าสูงขึ้นและในขณะเดียวกันสามารถพัฒนาความสัมพันธ์การแปลงพลังงานของพอลิเมอร์โดยการเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กทริกให้สูงยิ่งขึ้นเป็นอีกทางหนึ่งในเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานจากพอลิเมอร์ชนิดนี้ให้มากยิ่งขึ้น

2.2 สรุป

จากองค์ความรู้ที่ได้จากการปรัสนวัตกรรมที่เกี่ยข้องของการศึกษาและวิจัยรูปแบบการเกิดพลังงานไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริกในแบบต่างๆ ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาผลกระทบของแรงกดและความถี่เชิงกลที่มีต่อวัสดุเก็บเกี่ยวพลังงานไพโซอิเล็กทริก โดยจะมุ่งเน้นให้ความสนใจเกี่ยวกับแรงกดและความถี่เชิงกล เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแรงกดและความถี่ในการกดเชิงกล ที่มีผลต่อการเกิดพลังงานไฟฟ้า โดยทำการออกแบบสร้างชุดทดสอบที่สามารถสร้างแรงกดเชิงกลในช่วง 50 - 400 N และความถี่ในการกดเชิงกลในช่วง 1 - 300 ครั้ง/นาที และอาศัยข้อมูลจากรายงานการวิจัยเบื้องต้นที่ผ่านมาแล้ว ทำการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพโซอิเล็กทริก นำต้นแบบวงจรที่มีอยู่มาทดสอบเพื่อช่วยให้การเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากขึ้น

บทที่ 3

ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

วัสดุเซรามิกเป็นออกไซด์ของโลหะ เช่น ออกไซด์ของอะลูมิเนียม (aluminum oxide, Al_2O_3) หรืออีกชื่อหนึ่งว่าอะลูมินา (alumina) ผลึกอะลูมินาที่มีในธรรมชาติคือแร่คอร์ันดัม (corundum) สำหรับเลเซอร์โคเนดไททานต เป็นเซรามิกส์สังเคราะห์ที่มีผลึกประกอบและมีสูตรโมเลกุล $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ เขียนย่อว่า PZT หรือพีแซดที ซึ่งเลเซอร์โคเนดไททานตจะเกิดปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก หมายถึงการเกิดกระแสไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการที่วัสดุได้รับแรงกดทำให้เกิดการจัดระเบียบตัวไปในทิศเดียวกันของขั้วไฟฟ้าเรียกว่าการโพลาไรเซชัน (polarization) โดยปริมาณและเครื่องหมายของขั้วไฟฟ้าจะแปรผันตามแรงกดที่ได้รับและในทางตรงข้ามเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่ผลึกก็จะเกิดการยืดหรือหดตัวของผลึกซึ่งทำให้เกิดแรง สาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เช่นนี้เนื่องจากการไม่มีสมมาตรของประจุในศูนย์กลางผลึกทำให้ผลรวมของการเคลื่อนที่ของประจุบวกและลบสามารถสร้างไดโพลขึ้นมานั่นเอง

การศึกษาและเข้าใจถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย มีความสำคัญ และเป็นประโยชน์อย่างมากในการดำเนินงาน ทั้งนี้เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้ และความเข้าใจในงาน สำหรับนำไปเป็นแหล่งอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัย ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์หรือถูกกล่าวอ้างถึงต่อการดำเนินงานวิทยานิพนธ์นี้ ทั้งนี้เพื่อให้เนื้อหามีความกระชับและชัดเจนยิ่งขึ้น

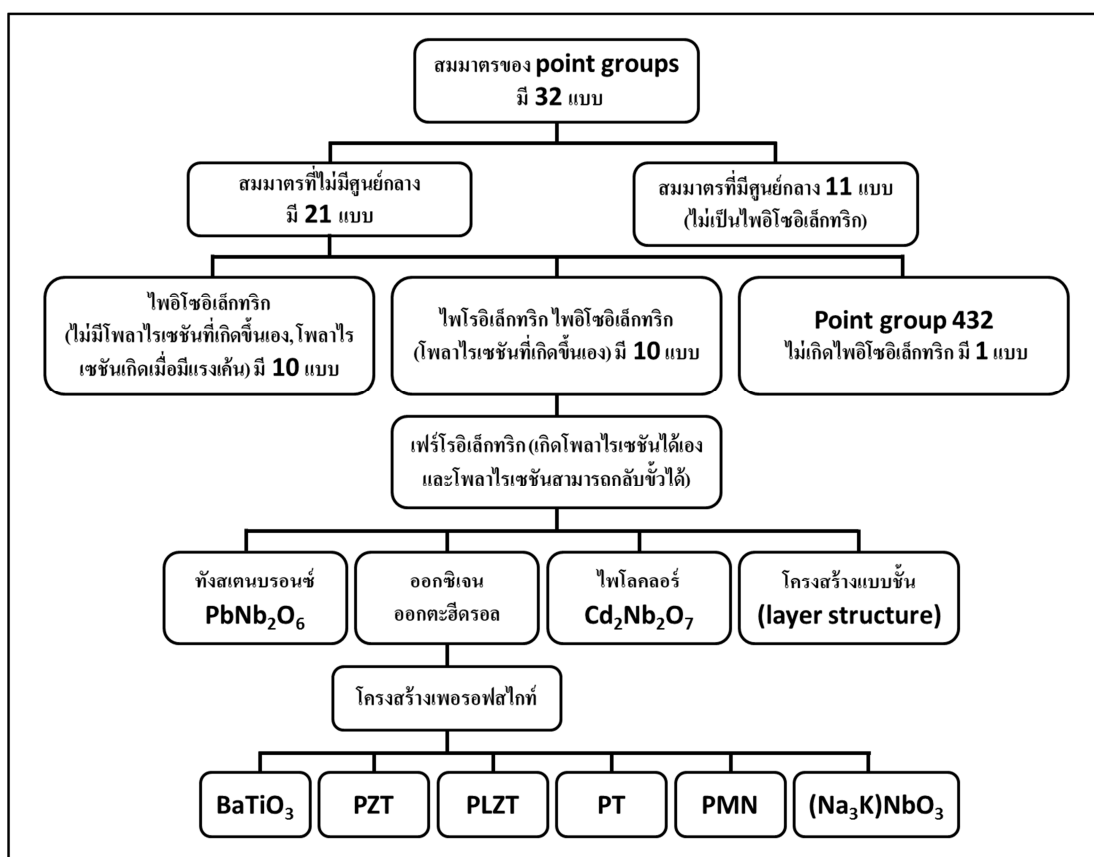
3.1 วัสดุไพโซอิเล็กทริก

3.1.1 ประวัติและความเป็นมาของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1880 โดยพี่น้องปีแอร์ (Pierre) และ แจ็ก คูรี (Jacques Curie) ค้นพบลักษณะที่ผิดปกติในแร่ธาตุบางอย่าง โดยเมื่อให้แรงทางกลแก่ผลึกควอตซ์ส่งผลให้เกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวของวัสดุ ซึ่งปริมาณของประจุที่เกิดขึ้นนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงกดหรือแรงอัดที่กระทำต่อผลึกนั้น และเมื่อไม่ให้แรงกดหรือแรงอัดแก่ผลึก ประจุที่บริเวณผิวหน้าทั้งสองจะหายไป ซึ่งต่อมาปรากฏการณ์ดังกล่าวถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct piezoelectric effect) โดยคำว่า “Piezo” มาจากภาษากรีก หมายถึง “Press” จึงนำคำว่า “Piezo” มาใช้กับคำว่า “Electric” จึงทำให้เกิดคำว่า “Piezoelectric” ซึ่งเป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงไฟฟ้า แต่ปีแอร์และแจ็ก คูรี ไม่ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติไพโซอิเล็กทริกแบบผกผันในเวลานั้น สมบัติดังกล่าวได้จากการเขียนสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์เบื้องต้น โดยลิปแมนน์ (Lippmann) ในปี ค.ศ.1881 ซึ่งได้ใช้ทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ ทำนายว่า มีปรากฏการณ์แบบผกผันในวัสดุดังกล่าวเช่นกัน ในระยะต่อมาได้มีการศึกษาเพื่อวางรากฐานทางด้านไพโซอิเล็กทริก ซึ่งมีนักวิจัยและนักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มเข้ามามีส่วนร่วมในการวิจัยและพัฒนาปรับปรุงวางกฎเกณฑ์และทฤษฎีต่างๆ เช่น ลอร์ดเควิน (Lord Kelvin) โวลต์มาร์ วอยท์ (Woldemar Voigt) ร่วมกันคิดและตั้งกฎและทฤษฎีเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก

การศึกษาสมบัติอิเล็กโตรเซรามิกส์นั้นก่อนอื่นต้องเข้าใจระบบผลึก ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่กล่าวมาแล้ว จากรูปที่ 3.1 ผลึกของวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พวกที่มีสมมาตรศูนย์กลาง (Centro-symmetric) และพวกที่ไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง (Non Centro-symmetric) จะเห็นได้ว่าสมมาตรของผลึกที่มีสมมาตรที่ไม่มีศูนย์กลางมีอยู่ทั้งหมด 21 สมมาตร จาก 32 สมมาตร ถึงแม้ว่า 21 สมมาตรดังกล่าวอยู่ในเงื่อนไขที่สามารถแสดงคุณสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ แต่มีอยู่หนึ่งสมมาตรคือ point group 432 ที่ไม่สามารถแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ ดังนั้นจึงเหลือสมมาตรที่ไม่มีศูนย์กลางอยู่เพียง 20 แบบ เท่านั้นที่สามารถแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ และภายใน 20 แบบนี้มี 10 แบบไม่มีโพลาไรเซชันแบบถาวรหรือโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเอง (Spontaneous polarization) ที่เหลืออีก 10 แบบ เป็นสมมาตรที่มีโพลาไรเซชันแบบถาวรหรือโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเอง (Spontaneous polarization) โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเองนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเฟสของผลึก เมื่ออุณหภูมิลดลงผ่านอุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) ดังนั้นผลึกที่มีสมมาตรในกลุ่มนี้สามารถแสดงคุณสมบัติไพโซอิเล็กทริกไพโรอิเล็กทริก นอกจากนั้นโพลาไรเซชันของผลึกบางตัวในกลุ่มนี้สามารถกลับทิศทางได้โดยป้อน

สนามไฟฟ้าให้กับผลึกซึ่งโดยผลึกที่มีคุณสมบัติดังที่กล่าวดังกล่าวกลุ่มสุดท้ายนี้เรียกว่า ผลึกที่มีคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric crystal)

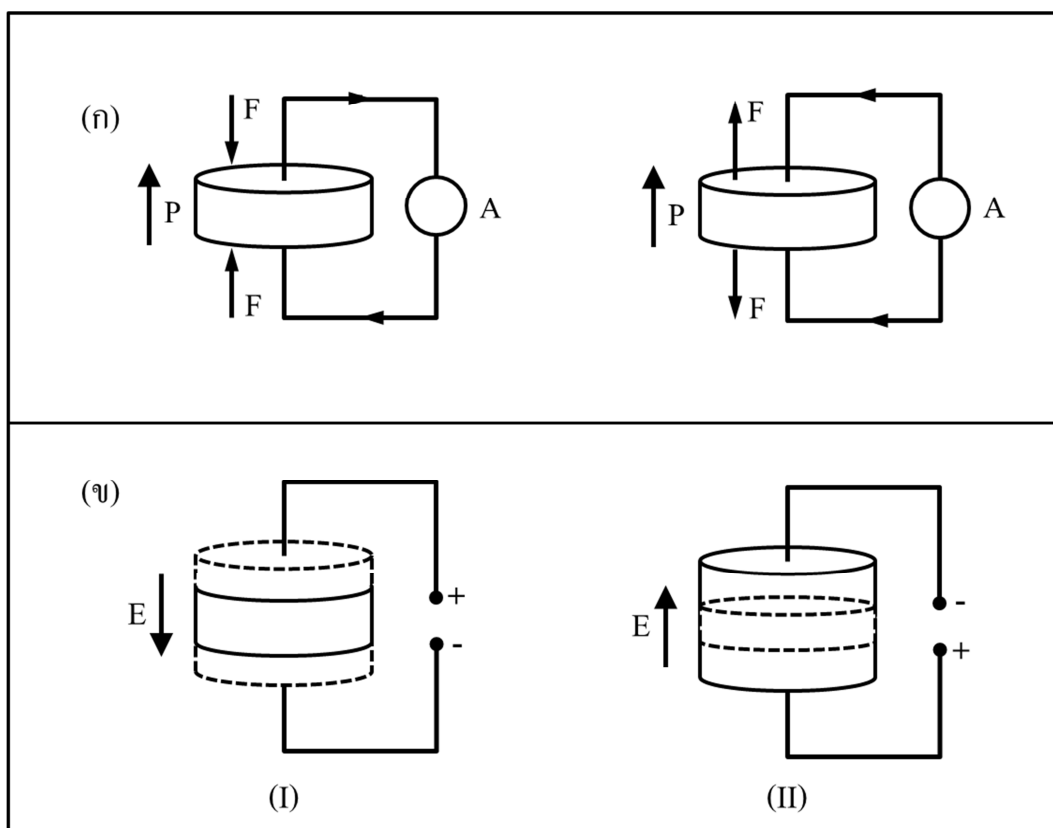


รูปที่ 3.1 การจัดแบ่งกลุ่มของวัสดุพวกอิเล็กโตรเซรามิกด้วยการใช้สมมาตรของวัสดุ
(ดัดแปลงมาจาก Haertling, 1999; Kao, 2004)

3.1.2 หลักการและพฤติกรรมของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลและสมบัติทางไฟฟ้าการ กล่าวคือ เมื่อวัสดุได้รับแรงเชิงกลสามารถเปลี่ยนแรงเชิงกล (mechanical force) ให้เป็นกระแสไฟฟ้าออกมาได้ ดังแสดงในรูป 3.2 (ก) ซึ่งการแปลงพลังงานดังกล่าว เรียกว่า direct effect ในทางตรงกันข้ามเมื่อได้รับพลังงานไฟฟ้าวัสดุก็สามารถเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (mechanical deformation) ได้ดังรูปที่ 3.2 (ข) เรียกการเปลี่ยนแปลงแบบนี้ว่า Converse effect โดยปกติแล้ววัสดุไพโซอิเล็กทริกตามธรรมชาติทิศทางของการโพลาไรเซชัน (polarization) หรือคู่ประจุไฟฟ้าที่เป็นประจุ

ลบและบวกที่มีอยู่ในวัสดุนั้นไม่ได้เรียงตัวในทิศทางเดียวกัน ซึ่งแตกต่างจากวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก ดังนั้นเพื่อให้วัสดุมีคุณสมบัติไพโซอิเล็กทริกจะต้องผ่านกระบวนการโพลลิง (poling process) เพื่อให้คู่ประจุไฟฟ้าที่เป็นประจุลบและบวกเรียงไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 3.2 (ก) direct effect (ข) converse effect (I) วัสดุหดตัว (II) วัสดุขยายตัว
เส้นประแสดงขนาดเริ่มต้น (Moulson and Herbert, 2003)

พฤติกรรมของวัสดุไพโซอิเล็กทริกสามารถอธิบายด้วยสมการ (3.1) และ (3.2) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางกลของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (3.1)$$

$$S = s^E T + dE \quad (3.2)$$

โดยที่ D	คือ การกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement) มีหน่วยเป็น C/m^2 (มีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามไฟฟ้า (E) โพลาริเซชัน (P) ของวัสดุ โดย $D = \epsilon E + P$ เมื่อ ϵ คือสภาพการยอมรับได้ทางไฟฟ้าของตัวเอง)
T	คือ ความเค้นทางกล (Mechanical Stress) มีหน่วยเป็น N/m^2
d	คือ ค่าคงที่ของไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant) มีหน่วยเป็น C/N
E	คือ สนามไฟฟ้า (Electric field) มีหน่วยเป็น V/m
S	คือ ความเครียดทางกล (Mechanical strain)
s^E	คือ ความยืดหยุ่น (Electric compliance) ภายใต้สนามไฟฟ้าคงที่ มีหน่วยเป็น m/N^2
ϵ^T	คือ สภาพการยอมรับได้ทางไฟฟ้าของตัวกลาง (Permittivity) ภายใต้ความเค้นคงที่ มีหน่วยเป็น F/m

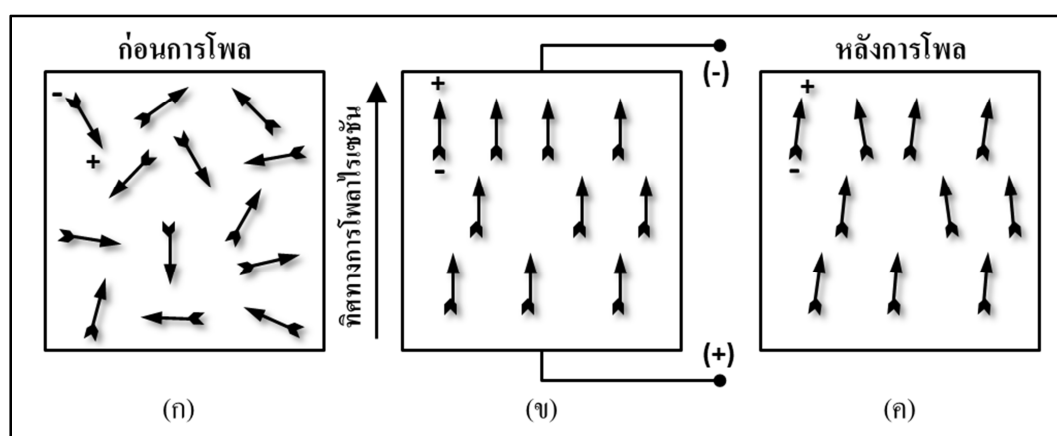
3.1.3 การทำโพลิงวัสดุไพโซอิเล็กทริก

การทำโพลิงแก่วัสดุไพโซอิเล็กทริกเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่จะทำให้วัสดุมีคุณสมบัติความเป็นไพโซอิเล็กทริก ในการทำโพลิงแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการฉาบอิเล็กโทรดและขั้นตอนกระบวนการโพลิง

3.1.3.1 กระบวนการโพลิง (Poling process)

ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกในวัสดุเซรามิกจะเกิดขึ้นได้นั้น วัสดุต้องผ่านกระบวนการโพล ก่อนนำมาใช้งาน การให้กระแสไฟฟ้าเพื่อทำการโพลเซรามิกเพอร์โรอิเล็กทริก (ที่เป็นพหุผลึก) ทำให้เกิดการจัดเรียงไดโพลของผลึกหรือโดเมนภายในเซรามิก และทำให้มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับผลึกเชิงเดี่ยว ดังนั้นกระบวนการโพลเป็นกระบวนการสำคัญที่จะทำให้เกิดสภาพ ไพโซอิเล็กทริกในวัสดุเซรามิก หากไม่มีการโพลเซรามิกจะไม่เปลี่ยนสภาพ แม้ว่าแต่ละผลึกจะเป็นไพโซอิเล็กทริกอยู่แล้วก็ตามเนื่องจากโพลาริเซชันจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแบบสุ่มซึ่งทำให้โพลาริเซชันรวมมีค่าเป็นศูนย์ สำหรับการโพลสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเซรามิกเพอร์โรอิเล็กทริกจะต้องมากกว่าค่าสนามไฟฟ้าลบด้าง (Coercive field) ซึ่งเป็นค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้โพลาริเซชันมีการเปลี่ยนทิศทาง โดยปรกติการโพลจะทำภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิสูงแต่ไม่เกินอุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) เช่น โพลที่ 120°C สำหรับเซรามิก PZT สนามไฟฟ้าจะ

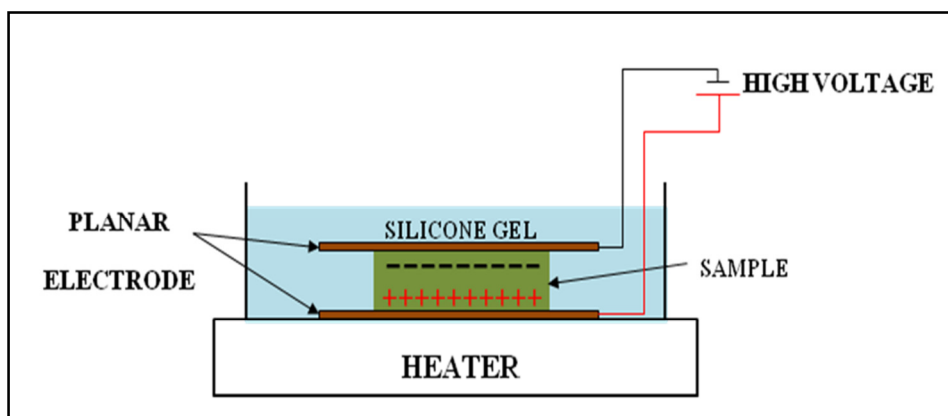
ถูกป้อนค่าแรงดันและอุณหภูมิคงที่เป็นเวลาประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นจึงทำการลดอุณหภูมิจนถึงหรือใกล้เคียงอุณหภูมิห้องแล้วจึงลดค่าแรงดันไฟฟ้าจนเป็นศูนย์ หลังจากการโพลถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามไฟฟ้าแล้วก็ตามแต่โพลาริเซชันภายในเซรามิกส่วนใหญ่ยังคงเรียงตัวในทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ได้ทำการโพล โพลาริเซชันเหล่านี้เรียกว่า โพลาริเซชันคงค้าง ภาพไดอะแกรมที่แสดงทิศทางของโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีทิศทางการจัดเรียงตัวของโพลาริเซชัน
ก่อนและหลังการโพล (APC International, 2002)

3.1.3.2 กระบวนการโพลิงแบบร้อน (Hot poling)

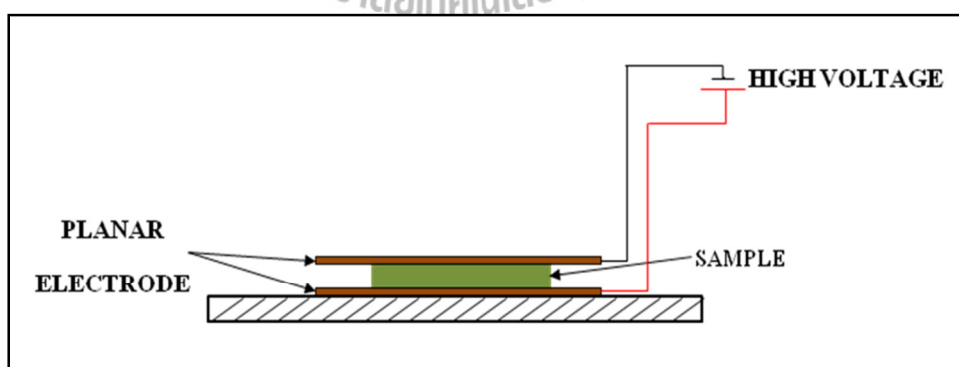
กระบวนการนี้เป็นการนำวัสดุไว้ภายใต้สนามไฟฟ้าบริเวณที่มีความเข้มข้นสนามไฟฟ้าสูง โดยทำการแช่วัสดุไว้ในของเหลวที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งส่วนมากจะนิยมแช่ไว้ในซิลิโคนเหลวหรือสารละลายเอทิลเอทิลีนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) หรือใช้ตัวต้านทานสูงๆ ต่ออนุกรมกับสารตัวอย่างเพื่อทำให้ความต้านทานรวมมีค่าสูง ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดประกายไฟจากสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นสูงขณะทำการโพลิง ดังแสดงในรูป 3.4 แต่วิธีการโพลิงแบบร้อนนี้เป็นการใช้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นต่ำกว่ากระบวนการโพลิงวิธีอื่น เนื่องจากทิศทางของโดเมนนั้นสามารถปรับได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง วิธีนี้นิยมใช้กับสารตัวอย่างที่มีความหนาตั้งแต่ไมโครเมตรถึงมิลลิเมตร โดยให้สนามไฟฟ้า 30 – 600 MV/m ในทิศทางตามขวางของสารตัวอย่างที่อุณหภูมิไม่เกิน 150 °C โดยใช้เวลาไม่กี่นาทีไปจนถึงเป็นวัน



รูปที่ 3.4 กระบวนการโพลิงแบบร้อน

3.1.3.3 กระบวนการโพลิงที่อุณหภูมิห้อง (Room temperature poling)

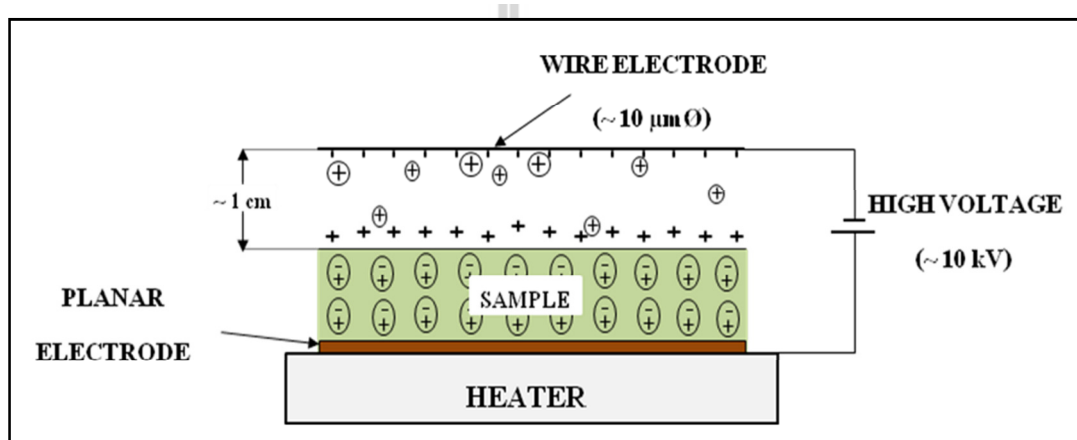
กระบวนการโพลิงวิธีนี้เป็นการให้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงโดยจ่ายสนามไฟฟ้าที่มากกว่า 10 MV/m จ่ายโดยตรงกับวัสดุแต่ส่วนใหญ่นิยมจ่ายสนามไฟฟ้าให้แก่วัสดุมากกว่าสนามไฟฟ้าบังคับประมาณ 50 MV/m ผ่านวัสดุที่มีแผ่นอิเล็กโทรดประกบอยู่ทั้งสองด้าน เพื่อให้ทิศทางของโดเมนเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน โดยจะกระทำที่อุณหภูมิห้อง การโพลิงด้วยวิธีนี้มักใช้กับเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead zirconate titanate) ดังแสดงในรูป 3.5 ส่วนการโพลิงแบบร้อนไม่เหมาะกับสารนี้ เพราะการให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิคูรีทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของสารลดลงส่งผลให้ความเป็นฉนวนไฟฟ้าต่ำลง



รูปที่ 3.5 กระบวนการโพลิงแบบคอนเวนชันนอล

3.1.3.4 กระบวนการโคโรนาโพลิง (Corona poling)

กระบวนการนี้เป็นการให้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงโดยผ่านทางเข็มโลหะปลายแหลมไปยังวัสดุ โดยที่ปลายเข็มจะอยู่ห่างจากวัสดุที่ทำการโพลิงประมาณ 1 เซนติเมตร สนามไฟฟ้าความเข้มสูงจะวิ่งจากปลายเข็มผ่านวัสดุไปสู่อิเล็กโทรดอีกด้านที่มีการให้ความร้อน ผลของการเหนี่ยวนำ ทำให้ทิศทางของโดเมนเกิดการเรียงตัวกันตามสนามไฟฟ้าที่ได้รับ กระบวนการนี้เหมาะสมกับวัสดุผสม และกระบวนการนี้สามารถใช้กับวัสดุที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นต่ำได้ ดังแสดงในรูป 3.6



รูปที่ 3.6 การโคโรนาโพลิง

3.1.4 การฉาบอิเล็กโทรด (Electroding)

กระบวนการทำให้ทิศโดเมนของวัสดุเรียงตัวกันในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าความเข้มสูงที่ให้แก่วัสดุ ซึ่งกระทำภายในซิลิโคนเหลวดังกล่าวมาในหัวข้อ 3.1.3 ดังนั้นเพื่อให้สนามไฟฟ้าความเข้มสูง สามารถไหลผ่านสารได้ พื้นผิวของสารจึงต้องมีการฉาบอิเล็กโทรด เพื่อเป็นตัวนำในการส่งผ่านสนามไฟฟ้าให้วัสดุจากผิวด้านหนึ่งไปยังผิวด้านหนึ่ง วัสดุที่นำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดควรมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี ซึ่งในงานวิจัยและโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กโทรดที่นิยมใช้ ทอง เงิน หรือแพลตินัม เพราะนอกจากนำไฟฟ้าได้ดีแล้ว ยังไม่เกิดสนิมอีกด้วยเนื่องจากโลหะเหล่านี้ไม่ทำปฏิกิริยาความชื้นในอากาศ ในการทำขั้วหรือทำอิเล็กโทรด สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

3.1.4.1 การฉาบอิเล็กโทรดด้วยการทา (Electrode painting)

วิธีการฉาบอิเล็กโทรดด้วยวิธีการนี้เป็นวิธีที่สะดวกและง่าย โดยการนำวัสดุทดสอบมาขัดให้เรียบ หลังจากนั้นทาดำนำไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของสารละลายที่ผสมสารตัวนำลงไปในพื้นที่ที่ต้องการแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง หรือนำไปย่างใน Hot plate จนแห้ง หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิสูงประมาณ $600 - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้สารละลายตัวนำติดกับชิ้นงานลงทนมากขึ้น อีกทั้งยังเป็นการไล่ฟองอากาศออกจากรอยต่อระหว่างผิวชิ้นงานกับชั้นอิเล็กโทรด

3.1.4.2 การฉาบอิเล็กโทรดด้วยวิธีการสปัตเตอริง (Sputtering process)

วิธีการฉาบอิเล็กโทรดด้วยวิธีการสปัตเตอริง เป็นการใช้อุณหภูมิพลังงานสูง วัสดุตัวนำที่ต้องการฉาบให้หลุดออกมาในรูปของไอพุ่งเข้าจับชิ้นงานเป็นชั้นของฟิล์มบาง ซึ่งเกิดขึ้นภายใต้สภาวะสุญญากาศ อาศัยหลักการดิสชาร์จไฟฟ้าแล้วทำให้สปัตเตอแก๊สหรือแก๊สอาร์กอนแตกตัวเป็นไอออน และถูกเร่งให้เข้าชนแผ่นเป้าสารเคลือบ ซึ่งต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้อนุภาคของเป้าสารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของแก๊สอาร์กอน หลุดและวิ่งด้วยความเร็วสูงเข้าชนและเคลือบบนผิววัสดุรองรับ (Substrate) ในทุกทิศทาง เนื่องจากพลังงานของอนุภาคสารเคลือบสูงมาก เมื่อตกกระทบผิววัสดุรองรับก็จะฝังตัวลงในเนื้อวัสดุรองรับทำให้การยึดเกาะดีมาก

3.2 ประเภทของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

วัสดุไพโซอิเล็กทริกเซรามิกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ soft และ hard เซรามิก soft เซรามิก เกิดจากการแทนที่อะตอมบางอะตอมในสารไพโซอิเล็กทริกเซรามิก ด้วยอะตอมจำพวกที่ให้ (donor) ส่วน hard เซรามิกเกิดจากการแทนที่อะตอมในสารตั้งต้นด้วยอะตอมจำพวกที่รับ (acceptor) เช่น การแทนที่อะตอมของ Zr^{4+} หรือ Ti^{4+} ใน $\text{Pb}(\text{Zr}^{4+} \text{Ti}^{4+})\text{O}_3$ ด้วย Nb^{5+} จะได้ soft ไพโซอิเล็กทริกเซรามิกหรือการแทนที่อะตอม อะตอม Zr^{4+} หรือ Ti^{4+} ใน $\text{Pb}(\text{Zr}^{4+} \text{Ti}^{4+})\text{O}_3$ ด้วย Mn^{2+} จะได้ hard ไพโซอิเล็กทริกเซรามิก

การเติม donor dope ลงใน PZT ทำให้เกิดสภาวะที่มีประจุบวกเกินทำให้วัสดุมักจะเกิดสมดุลประจุโดยการเกิด metal vacancy จึงทำให้โดเมนเกิดการจัดเรียงตัวได้ดียิ่งขึ้นเมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ดังนั้น soft PZT จึงมักจะมี k_p (electromechanical coupling factor), d_{33} (piezoelectric charge constant) ϵ' (permittivity ของวัสดุ) $\tan \delta$ (dielectric dissipation factor) ที่มีค่าสูง Q_c (quality factors) ต่ำ ๆ และมี linearity ต่ำ ดังแสดงในตาราง 3.1 (APC International, 2002) วัสดุพวกนี้มักจะถูกทำลายด้วยไฟฟ้า (depole) ได้ง่ายและมี hysteresis loop

ใหญ่เนื่องจาก soft PZT มี ϵ' และ $\tan \delta$ ที่สูงจึงไม่ค่อยถูกนำไปใช้งานที่ต้องใช้ความถี่สูง ๆ หรืองานที่ต้องใช้สนามไฟฟ้ามาก ๆ เพราะจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานและมีความร้อนสูง ดังนั้น soft PZT จึงมักนำไปใช้งานเป็น sensor

การเติม acceptor dope เข้าไปใน PZT ทำให้เกิดสภาพขาดบวกดังนั้นจึงต้องสมดุลประจุ โดยเกิด oxygen vacancy ได้ hard PZT ซึ่งมีสมบัติ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 จะเห็นว่า hard PZT มีสมบัติที่ตรงข้ามกับ soft PZT กล่าวคือถูก pole และถูก depole ได้ยากกว่าแต่จะมี k_p , d_{33} , ϵ' ต่ำกว่าและมีค่า mechanical quality factors (Q_m) สูงกว่า soft PZT ส่วนใหญ่แล้วพวก hard PZT ถูกนำไปใช้งานในด้านที่ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าและแรงทางกลที่สูง

จากการศึกษาผลของ PZT ได้มีการนำสมบัติของเซรามิก PZT มาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่าง PZT ที่ขายในท้องตลาด ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบสมบัติของ soft ceramics และ hard ceramics (APC International, 2002)

Characteristic	Soft Ceramic	Hard Ceramic
Piezoelectric Constants (d_{33})	ใหญ่	เล็ก
Permittivity (ϵ')	สูง	ต่ำ
Dielectric Constants (K')	ใหญ่	เล็ก
Dielectric Losses (D หรือ $\tan \delta$)	สูง	ต่ำ
Electromechanical Coupling Factors (K_p)	ใหญ่	เล็ก
Electrical Resistivity (ρ)	สูงมาก	ต่ำ
Mechanical Quality Factors (Q_m)	ต่ำ	สูง
Coercive Field (E_c)	ต่ำ	สูง
Linearity	ต่ำ	สูง
Polarization / Depolarization	ง่าย	ยากมาก

ตารางที่ 3.2 สมบัติของเซรามิก PZT ที่ขายในท้องตลาด (เชดส์คี้ แซลลี่, 2007)

คุณสมบัติ	PZT-5H (Soft)	PZT-4 (Hard)
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r)	3400	1300
ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$)	0.02	0.004
อุณหภูมิคูรี (T_c)	193	328
ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก (pC / N)		
d_{33}	593	289
d_{31}	-274	-123
แฟกเตอร์คู่ความแข็งกลไฟฟ้า (k_p)		
k_{33}	0.752	0.70
k_{31}	-0.388	-0.334

3.3 การนำไปใช้งานของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

สารเซรามิกมีคุณสมบัติทางไพโซอิเล็กทริกที่สามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า และในทางกลับกันสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ทำให้มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น ผลิตเป็นชิ้นส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สามารถ แบ่งการนำวัสดุไพโซอิเล็กทริกไปใช้งานได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้

1. แทรนสดิวเซอร์ (transducer) ใช้สำหรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานการสั่นเชิงกล ซึ่งมักอยู่ในรูปของเสียง เช่น buzzer หรือ ultrasound เช่น ultrasonic cleaner, sonar เป็นต้น
2. ตัวรับรู้ (sensor) ใช้สำหรับแปลงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น ใช้เป็น Ultrasonic sensors โดยติดแผ่นวัสดุเซรามิกทำขั้วรอยนต์เมื่อรถเกิดการถอยหลังจะมีค่าแรงดันเกิดขึ้นทำให้มีแผ่นเซรามิกเกิดการสั่นและจะส่งคลื่นเหนือเสียงออกไป เมื่อวิ่งไปกระทบวัตถุด้านหลังรอยนต์ คลื่นจะสะท้อนกลับและส่งสัญญาณบอกเป็นเสียงวีเสียงเตือน
3. แอคชูเอเตอร์ (actuator) ใช้สำหรับแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดที่มีความแม่นยำสูงใช้สำหรับปรับเครื่องมือกล กระบอก เลนส์ ควบคุมวาล์วไฮดรอลิก
4. ตัวผลิตกระแสไฟฟ้า (generator) ใช้ในการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการ spark

นอกจากนี้ได้มีการประยุกต์ใช้วัสดุไฟอโซอิเล็กทริกในอุปกรณ์กีฬา เช่น ไม้เบสบอล กระดานสกี เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้เมื่อใช้งานจะเกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการควบคุมอุปกรณ์ของผู้เล่นลดลง จึงได้มีการนำวัสดุไฟอโซอิเล็กทริกมาช่วยลดการสั่นสะเทือน โดยวัสดุไฟอโซอิเล็กทริกจะทำงานแบบซีฟ โดยไม่มีการป้อนพลังงานเข้าไป แต่อาศัยหลักการที่ว่า เมื่อเกิดการตัดตัวจากความสั่นสะเทือนในโครงสร้าง ทำให้มีแรงดันไฟฟ้าออกมาจากวัสดุไฟอโซอิเล็กทริก แรงดันไฟฟ้านี้จะถูกปล่อยทิ้ง โดยใช้วงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ความต้านทานและเหนี่ยวนำที่ทำให้วัสดุไฟอโซอิเล็กทริกคืนรูปเดิม นั่นคือไปต้านทานการเคลื่อนที่ๆ เกิดขึ้น อีกหนึ่งตัวอย่างคือการใช้วัสดุไฟอโซอิเล็กทริกเป็นวาล์วควบคุมในอุปกรณ์ damper ของจักรยาน สามารถปรับสภาพความแข็ง อ่อน ของ damper ได้ตามสภาพภูมิประเทศ ที่ขี่ขี่ โดย damper จะมีชุดวัดสัญญาณความเร็วและการเคลื่อนที่ของการกระแทกที่ damper อยู่และสัญญาณที่ออกจากชุดวัดจะส่งไปยังชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสั่งการด้วยการส่งแรงดันไฟฟ้าไปยังวัสดุไฟอโซอิเล็กทริก ให้วาล์วทำการปรับการไหลของน้ำมันในกระบอก damper

3.4 การวัดสมบัติไฟอโซอิเล็กทริกของวัสดุ

3.4.1 ค่าคงที่ไฟอโซอิเล็กทริก

ค่าคงที่ไฟอโซอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของผลึก ค่าคงที่ไฟอโซอิเล็กทริกมีหลายค่า ซึ่งกำหนดด้วยการระบุตัวอักษร d, e, g, h เป็นสัญลักษณ์แทนค่าคงที่ไฟอโซอิเล็กทริกเพื่อให้ง่ายต่อการอธิบาย

ค่าคงที่ไฟอโซอิเล็กทริกที่มีความสำคัญคือ ค่า d ซึ่งเป็นค่าที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชันกับค่าความเค้นที่เกิดขึ้นและยังแสดงถึงค่าความเครียด ที่เป็นผลมาจากการเกิดสนามไฟฟ้าตามกฎของการอนุรักษ์พลังงาน โดยทั่วไปนิยมเขียนสัญลักษณ์เป็น d_{ij}

เมื่อ i คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า

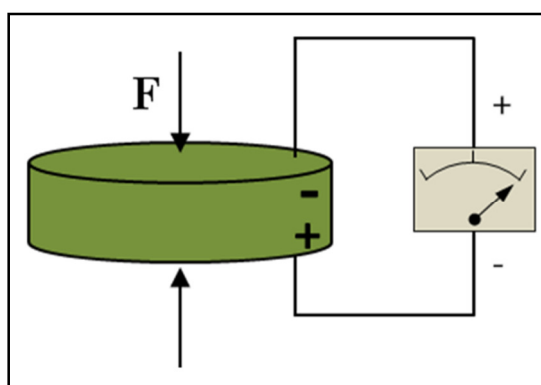
j คือ ทิศทางการเปลี่ยนรูปร่างของสาร

ตัวอย่างเช่น d_{33} หมายถึง การเกิดโพลาไรเซชันในแนวแกน Z เนื่องจากการป้อนสนามไฟฟ้าทำให้เกิดความเค้นในแนวแกน X

ค่าคงที่ไฟอโซอิเล็กทริกเป็นค่าที่วัดได้ง่าย สามารถใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกล ซึ่งมีการวัดหลายหลายวิธี ได้แก่

3.4.1.1 วิธี Static test และวิธี Quasi-static

วิธี Static test เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็วที่สุด โดยใช้หลักการของการใช้แรงทางกลกระทำต่อผลึกหรือสารที่ต้องการวัด ซึ่งทำให้เปิดประจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวของอิเล็กโทรด ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณแรงทางกลที่กระทำต่อสารทดสอบ ดังแสดงในรูป 3.7

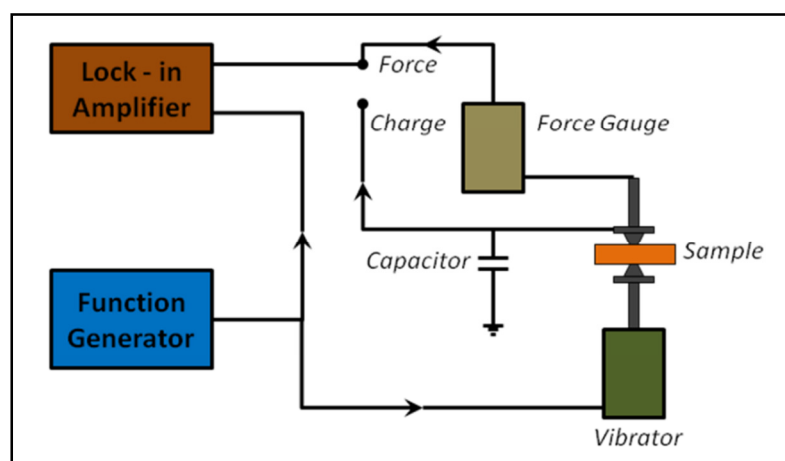


รูปที่ 3.7 ชุดทดสอบค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกด้วยวิธี Static test

แต่เนื่องจากประจุที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยและอาจเกิดการสูญเสียก่อนที่จะทำการวัด ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงแรงทางกลที่กระทำต่อสารในรูปแบบของฟังก์ชันไซน์ และวัดค่าประจุไฟฟ้า (Q) ที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าผ่านตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C) ที่ต่อขนานกับสารที่ต้องการวัด เรียกวิธีนี้ว่า วิธี Quasi-static ดังแสดงในรูป 3.8 ซึ่งค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก (d_{33}) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$d_{33} = d_{33} = \frac{D_3}{\sigma_3} = \frac{Q}{F} = \frac{CV}{F} \quad (3.4)$$

โดยที่	Q	คือ ค่าของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้น
	V	คือ ศักย์ไฟฟ้า
	F	คือ แรงทางกลที่กระทำต่อสาร
	C	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.8 ชุดทดสอบค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกด้วยวิธี Quasi static (Taunamang, 1994)

3.4.1.2 การคู่ควบ โหมดการสั่น

การแปลงพลังงานเชิงกลเป็นไฟฟ้า ค่าที่บอกถึงความสามารถของวัสดุ วิเคราะห์ได้ในพจน์ของ สัมประสิทธิ์ คู่ควบไฟฟ้า – กล (electromechanical coupling coefficient) มีนิยามคือ อัตราส่วนของพลังงานที่ก่อให้เกิดต่อพลังงานที่ได้รับ (k^2) สำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานมีค่าดังนี้

$$k^2 = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก}}{\text{พลังงานกลที่ป้อนให้กับวัสดุ}}$$

ค่า k^2 ของวัสดุ จะต้องรู้ค่าความถี่ที่วัสดุไพโซอิเล็กทริกดูดกลืนพลังงานสูงสุด ซึ่งจะทำให้ได้พลังงานออกมามากที่สุดเช่นกัน ในห้องปฏิบัติการนิยามค่าความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์ หรือสั่นพ้องด้วยวิธีของแมสัน โดยการป้อนสนามไฟฟ้าให้แก่วัสดุ และสังเกตความถี่ที่วัสดุให้ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะสอดคล้องกับความต้านทานของวัสดุดำสุด ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุมากที่สุด การสั่นพ้องขึ้นกับโหมดการสั่น (mode of vibration) และรูปร่าง (shape) ของชิ้นงาน แบ่งออกเป็น 5 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ค่า k^2 ที่คำนวณได้จากตาราง สามารถนำไปวิเคราะห์ได้ดังสมการต่อไปนี้

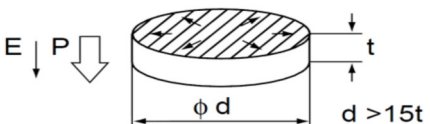
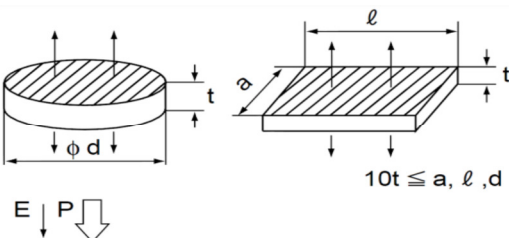
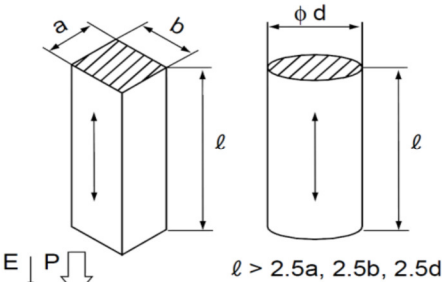
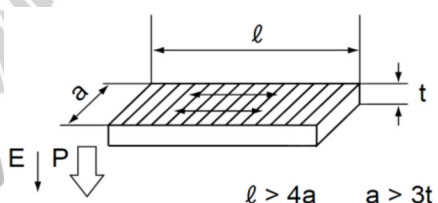
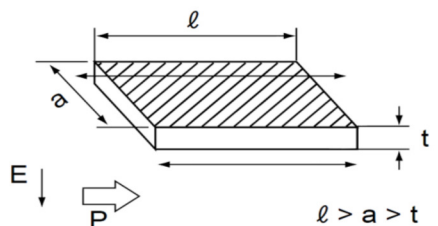
$$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{\epsilon_{33}^T s_{11}^E} \quad (3.5)$$

$$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{\epsilon_{33}^T s_{33}^E} \quad (3.6)$$

โดยที่ k_{31}^2 และ k_{33}^2 คือ สัมประสิทธิ์คู่ควบตามขวางและตามยาวตามลำดับ
 d_{31} และ d_{33} คือ สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกประจุวัดตั้งฉากและขนานกับ
 สนามไฟฟ้าตามลำดับ
 s_{31}^E และ s_{33}^E คือ ค่าความยืดหยุ่นตามยาวเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าคงที่



ตารางที่ 3.3 วัสดุไพโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับสนามไฟฟ้ากระแสสลับ มีโหมดการสั่น 5 แบบ
 เกิดสมการที่ใช้ในการหาสัมประสิทธิ์คูกวบไฟฟ้า - กล ด้วยวิธีเรโซแนนซ์
 (Murata manufacturing Co.Ltd., 2008)

โหมดการสั่น	สัมประสิทธิ์คูกวบไฟฟ้า - กล	รูปแบบวัสดุ
รัศมี	$k_p^2 \cong 2.529 \cdot \frac{f_a - f_r}{f_r}$	
ความหนา	$k_t^2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right)$	
ความยาวตามสูง	$k_{33}^2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right)$	
ความยาวตามขวาง	$\frac{k_{31}^2}{1 - k_{31}^2} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_a}{f_r} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_a}{f_r}\right)$	
แนวเฉือน	$k_{15}^2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right)$	

⇒ ทิศทางโพลาริเซชัน, → ทิศทางความเครียดภายในวัสดุ

--> ทิศทางของสนามไฟฟ้า, f_r ความถี่เรโซแนนซ์, f_a ความถี่แอนติเรโซแนนซ์

3.4.1.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)

Relative dielectric constant (K') สัดส่วนระหว่างประจุที่เก็บกักไว้บนผิวของวัสดุ ที่ความต่างศักย์ 1 V ต่อประจุที่เก็บกักไว้บนผิวของ electrode ในสุญญากาศที่ความต่างศักย์ 1 V ซึ่งสามารถหา K' ของวัสดุใด ๆ จากสมการ

$$K' = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} \quad (3.7)$$

โดยที่ ϵ' คือ ค่าสภาพยอมรับได้ของวัสดุ
 ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (8.854×10^{-12} F/m)

โดยทั่วไปวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าจะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วคู่และเกิดการกระจัดทางไฟฟ้า เรียกว่า ไดอิเล็กทริก ซึ่งวัสดุโพไซไดอิเล็กทริกที่ดีสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดโพลาไรเซชันได้ แต่ความสามารถในการเกิดโพลาไรเซชันอาจแตกต่างกัน ขึ้นกับค่าสภาพยอมรับได้ของวัสดุ เกิดจากความสัมพันธ์ ดังนี้ $D' = P + \epsilon_0 E$ หรือ $D' = \epsilon' E = \epsilon_0 K' E$ เมื่อ P คือ ค่าโพลาไรเซชันของวัสดุ E คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าผ่านวัสดุ K' คือ สภาพยอมสัมพัทธ์หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ_0 คือ สภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (8.854×10^{-12} F/m) และ ϵ' คือ ค่าสภาพยอมรับได้ของวัสดุ สามารถนำมาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้ดังนี้

$$K' = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} = \frac{C_p L}{\epsilon_0 A} \quad (3.8)$$

โดยที่ L คือ ความหนาของวัสดุ (m)
 C คือ ความเก็บประจุ (F)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (m^2) หรือ $A = \pi \left(\frac{d_A}{2} \right)^2$;
 d_A คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ (m)

วัสดุที่มีการให้สนามไฟฟ้า อาจมีการสูญเสียค่าไดอิเล็กทริกส่วนหนึ่ง เรียกว่า ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก (D' : dielectric loss) สามารถวัดได้โดยตรงพร้อมกันกับการวัดค่าความจุไฟฟ้า

3.4.1.4 Young's modulus

หาก apply stress ใส่บนของแข็งทั่วไปจะเกิด strain เพียงอย่างเดียว ความสัมพันธ์ระหว่าง stress (T) กับ strain (S) คือ

$$T = YS \quad (3.9)$$

โดยที่ Y คือ ค่ายังมอดุลัส (Young's modulus) มีหน่วยเหมือน stress แต่ถ้า applied stress ลงบนของแข็งที่เป็นวัสดุโพธิ์อิเล็กทริก จะเกิดทั้ง strain และประจุไฟฟ้า

3.4.1.5 Piezoelectric Charge Constant

ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุมีความสัมพันธ์กับ stress ที่ apply ดังสมการ (3.9)

$$D = \frac{Q}{A} = dT \quad (3.10)$$

โดยที่	Q	คือ ประจุไฟฟ้าที่สะสม
	A	คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)
	T	คือ stress (N/m^2)
	d	คือ piezoelectric strain constants (C/N)
	D	คือ dielectric displacement (C/m^2)

ในทางตรงกันข้ามถ้าให้สนามไฟฟ้าใส่บนวัสดุจะเกิด strain ทำให้วัสดุเกิดการขยายและหดตัวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าซึ่ง strain ที่เกิดจะแปรตามขนาดของสนามไฟฟ้างดังสมการ (3.11)

$$S = dE \quad (3.11)$$

โดยที่ S คือ strain
 E คือ Electric field strength (V/m)
 D คือ Piezoelectric strain constant (meters/volt)

ดังนั้น d มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.12)

$$d = \frac{D}{T} = \frac{S}{E} \quad (3.12)$$

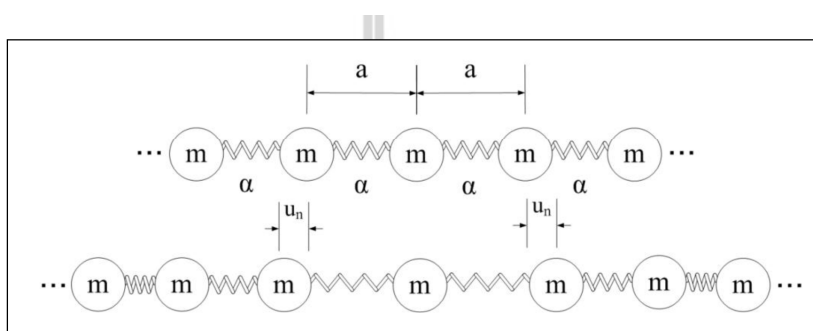
วัสดุไพโซอิเล็กทริกที่ใช้ทำเครื่องมือที่ต้องสั่นตัวมากหรือขยับตัวมาก เช่น sonar ultrasonic cleaner และหม้อแปลงจะต้องมีค่า d มากๆ นอกจากนี้ยังมี piezoelectric constant อีกตัวหนึ่ง คือ piezoelectric voltage constant (g) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ d ดังสมการที่ (3.13)

$$g = \frac{d}{\epsilon'} = \frac{d}{K' \epsilon_0} \quad (3.13)$$

โดยที่ g มีหน่วยเป็น $\frac{\text{volt} / \text{meter}}{\text{newton} / \text{meter}^2} = \frac{\text{meter} \times \text{volt}}{\text{newton}}$

3.5 แบบจำลองวัสดุไพโซอิเล็กทริก

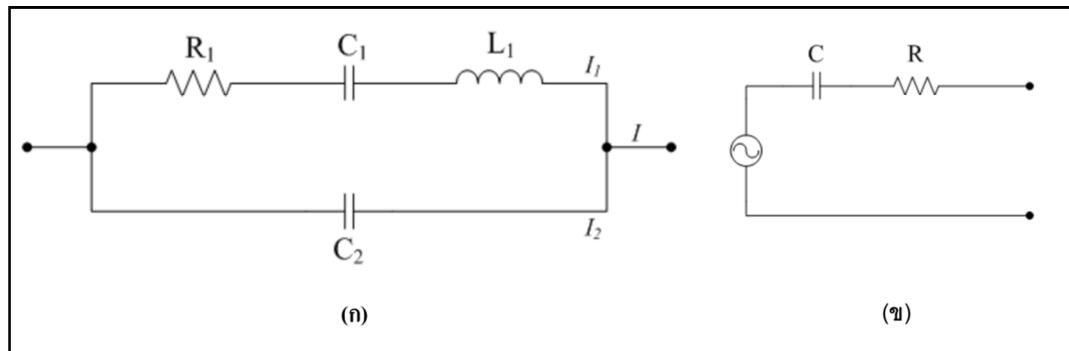
วัสดุไพโซอิเล็กทริกประกอบด้วยอะตอมจำนวนอนันต์มีมวล m อยู่ห่างกันเป็นระยะ a ให้ U_n คือระยะทางที่เลื่อนจากตำแหน่งสมดุล เมื่ออะตอมแต่ละตัวถูกดึงด้วยแรงของสปริง (Hooke's law : ในช่วงของความยืดหยุ่น ความเค้นจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเครียดตามสมการ $F=-kx$ เมื่อ F คือแรงสปริง k คือค่าคงที่ของสปริง และ x คือระยะการกระจัดจากจุดสมดุลเมื่อออกแรงสปริง) และเป็นแรงที่มีผลกับอะตอมข้างเคียงที่อยู่ใกล้กันที่สุด ให้ α เป็นค่าคงที่แรง ดังแสดงในรูป 3.9



รูปที่ 3.9 การสั่นของอะตอมเมื่อได้รับพลังงาน

เมื่อคลื่นเดินทางผ่านตัวกลางในของแข็งซึ่งเป็นตัวกลางที่มีเนื้อวัสดุต่อเนื่อง ขณะเดียวกันอะตอมแต่ละตัวก็มีแรงกระทำซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดการบังคับให้อยู่ในตำแหน่งที่สมดุล ดังนั้นพลังงานที่อะตอมได้รับจึงทำให้เกิดการสั่นรอบๆ ตำแหน่งสมดุลเรียกว่า การสั่นของโครงผลึก (lattice vibration) การสั่นของโครงผลึกวัสดุไพโซอิเล็กทริกจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้ากระแสสลับ (ac signal) เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ที่ความถี่เรโซแนนซ์ของโครงสร้างผลึก พฤติกรรมของผลึกไพโซอิเล็กทริกเป็นเสมือนวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน R ขดลวด L และตัวเก็บประจุ C ดังแสดงในรูปที่ 3.10(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 เสมือนรวมกันหรือไม่มีความต่างศักย์ (shorted circuit) ดังนั้นที่ความถี่นี้จึงมีกระแสไหลผ่านในวงจรน้อยที่สุด เรียกว่า ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ ขณะเกิดเรโซแนนซ์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในวงจรได้สูงสุดสามารถตัดองค์ประกอบเชิงซ้อนของอุปกรณ์เหลือเพียงตัวต้านทาน ด้วยเหตุผลนี้จึงนำไปหาค่า

กำลังไฟฟ้าสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ข) คือกรณีของแบบจำลองทางฟิสิกส์ของวัสดุโพสิโวลิกที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของวัสดุโพสิโวลิก (ก) วงจรสมมูลที่ความถี่เรโซแนนซ์
(ข) วงจรสมมูลเมื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

3.6 แบบจำลองวัสดุโพสิโวลิกทางไฟฟ้ากล

พฤติกรรมของวัสดุโพสิโวลิกแสดงแบบจำลองไฟฟ้าทางกลในรูป 3.11 จำลองหลักการด้วยการให้มวล M เคลื่อนที่ด้วยแรง F เคลื่อนที่เป็นระยะการกระจัด u โดยมีแรง F_p เป็นแรงที่กระทำกับวัสดุโพสิโวลิกที่ความแข็งดึงของสปริง K_E และตัวหน่วงการสั่นสะเทือน C เมื่อวัสดุโพสิโวลิกได้รับแรงกด จะเกิดกระแส I และความต่างศักย์ V จากวัสดุจากสมการ $F_p = K_{PE}u + \alpha_p V$ และ $I = \alpha u + C_o V$ เมื่อ α คือแฟกเตอร์ของแรง C_o คือความจุไฟฟ้าของวัสดุโพสิโวลิก K_E คือค่าความดึงของระบบเป็นผลรวมของความแข็งดึงของวัสดุ K_{PE} กับความแข็งดึงของบีม K_S ดังสมการ $K_E = K_{PE} + K_S$ จากผลของการเคลื่อนที่ที่สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

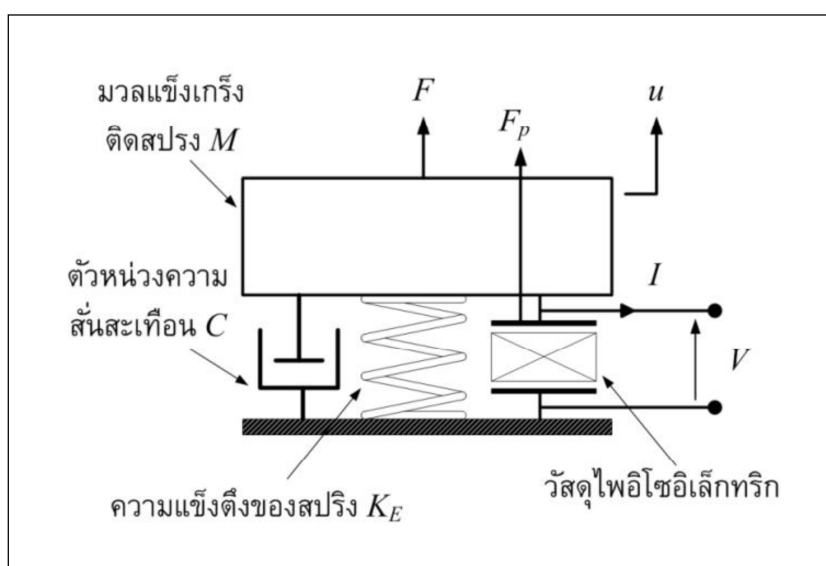
$$Mu + Cu + K_E u = F - \alpha V \quad (3.14)$$

$$I = \alpha u + C_o V \quad (3.15)$$

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ $\omega = \sqrt{K_E/M}$ ในที่นี้สมการพลังงานของระบบ คือ

$$\int F u dt = \frac{1}{2} M u^2 + \frac{1}{2} K_E u^2 + \int C u^2 dt + \int \alpha V u dt \quad (3.16)$$

พจน์ซ้ายมือคือพลังงานกลที่ระบบได้รับ พจน์ทางขวาของสมการ คือ พลังงานจลน์ พลังงานศักย์ยืดหยุ่น ความสูญเสียทางกล และพลังงานเปลี่ยนรูปตามลำดับ พลังงานเปลี่ยนรูปเป็นส่วนหนึ่งของพลังงานถ่ายโอนเชิงกลในรูปแบบทางไฟฟ้าจึงเป็นพจน์สำคัญในการเก็บเกี่ยวพลังงาน สามารถเขียนสมการโดยย่อได้ดังนี้



รูปที่ 3.11 แบบจำลองไฟฟ้าทางกล

$$\int \alpha V u dt = \frac{1}{2} C_o V^2 + \int V I dt \quad (3.17)$$

พจน์แรกขวามือของสมการคือพลังงานไฟฟ้าสถิต ที่สะสมในวัสดุ ส่วนอีกพจน์ที่เหลือคือพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ เพื่อนำไปใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์วัสดุต้องทำขั้วไฟฟ้าและต่อดัวยลวดตัวนำที่มีความต้านทานต่ำ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้ด้วยวิธีการเชื่อมต่อแบบมาตรฐาน (standard interface) เมื่อมีการสั้นอย่างต่อเนื่องครบ 1 รอบ สามารถเขียนให้การเกิดไฟฟ้ากระแสตรงให้อยู่ในรูปของศักย์ไฟฟ้าได้ดังนี้

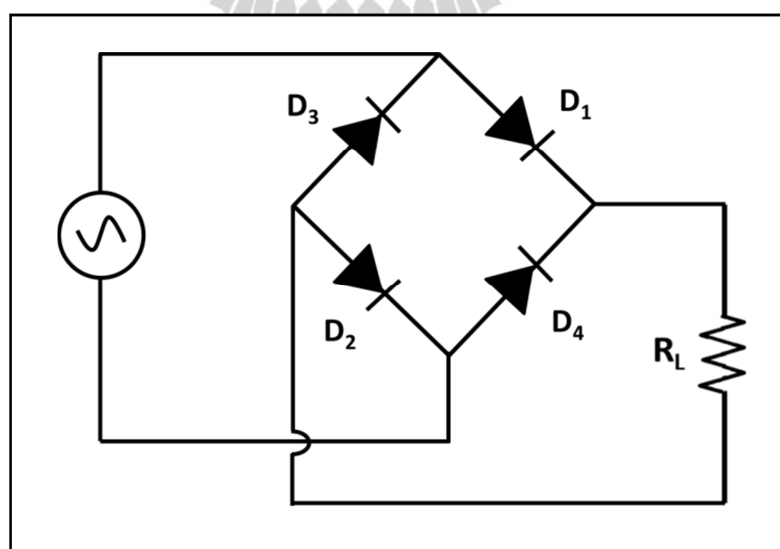
$$E_{\text{stand}} = \int_{t_1}^{t_2} V_{DC} I dt$$

3.7 วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานไพโซอิเล็กทริก

วัสดุไพโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับแรงทางกลจะเปลี่ยนรูปจากพลังงานทางกลเป็นพลังงานไฟฟ้าอยู่ในรูปของกระแสสลับ พลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก มีแรงดันไฟฟ้าสูงแต่กระแสไฟฟ้าต่ำ (K A Cook-Chennault, 2008) จำเป็นต้องแปลงเป็นกระแสตรงก่อนนำไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การเลือกวงจรไฟฟ้าให้เหมาะสมมีส่วนช่วยให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริกมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

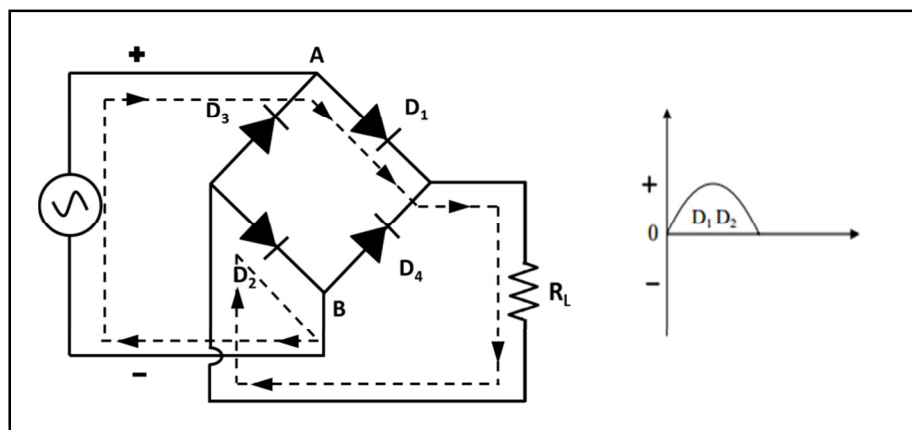
3.7.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า บริดจ์เรกติไฟเออร์ มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงหรือยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งได้ อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการแปลงสัญญาณ คือ ไดโอด (diode) วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ประกอบด้วยไดโอด 4 ตัว ต่อกันในลักษณะบริดจ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ขณะไบแอสตรงจะมีความต่างศักย์คร่อมไดโอด ในกรณีไดโอดชนิดเจอร์เมเนียมมีค่าประมาณ 0.2 - 0.3 V และไดโอดชนิดซิลิกอนมีค่าประมาณ 0.6 - 0.7 V แรงดันที่ถูกจัดเรียงให้อยู่ในทางเดียวจะสูญเสียไปส่วนหนึ่ง โดยประมาณ 0.6 V หรือ 1.4 V (ในทางทฤษฎี) กรณีเป็นไดโอดแบบเจอร์เมเนียมและซิลิกอน ตามลำดับ สัญญาณที่หายไปดังกล่าวทำให้กำลังไฟลดลง



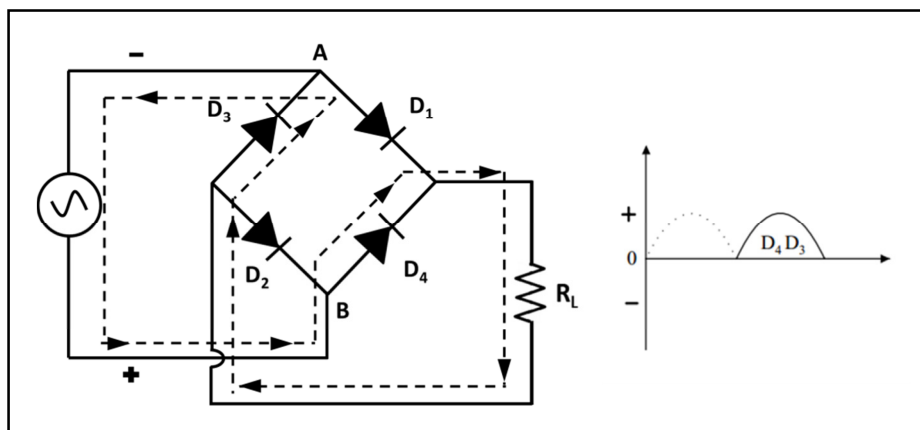
รูปที่ 3.12 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

การทำงานของวงจร ไดโอดจะผลัดกันนำกระแสครึ่งละ 2 ตัว โดยเมื่อไซเคิลบวกของแรงดันกระแสลับอยู่ที่จุด A ไซเคิลลบอยู่ที่จุด B จะทำให้ไดโอด D_1 และ D_2 ได้รับไบอัสตรง จะมีกระแสไหลผ่านไดโอด D_1 ผ่านโหลด RL ผ่านไดโอด D_2 ครอบคลุมวงจรที่จุด B เกิดแรงดันตกคร่อมโหลด RL ด้านบนเป็นบวกด้านล่างเป็นลบ ได้แรงดันไฟเอาต์พุตเป็นช่วงบวกดังรูปที่ 3.13

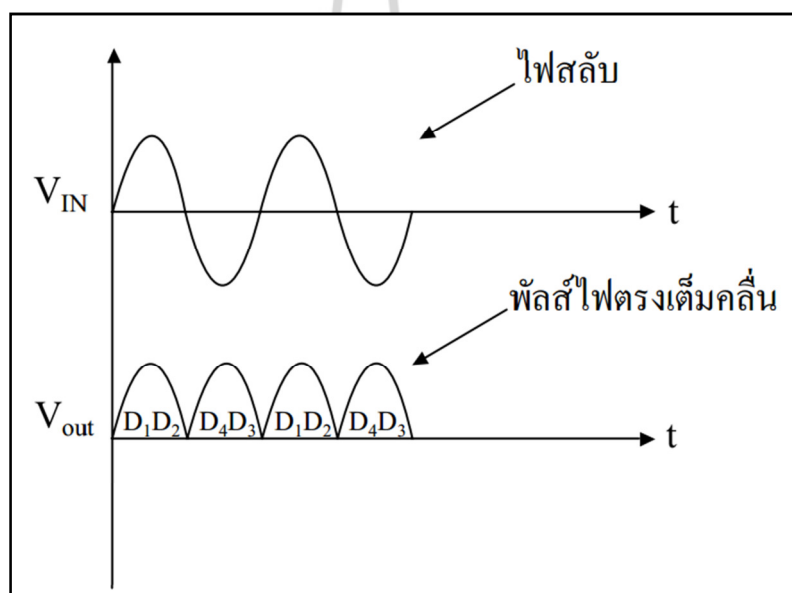


รูปที่ 3.13 D_1 และ D_2 ได้รับไบอัสตรง

ในช่วงเวลาต่อมาไซเคิลลบของแรงดันกระแสลับอยู่ที่จุด B ไซเคิลบวกอยู่ที่จุด A ในช่วงเวลานี้ไดโอด D_3 และ D_4 จะได้รับไบอัสตรงทำให้มีกระแสไหลผ่านไดโอด D_4 ผ่านโหลด RL และผ่านไดโอด D_3 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 เมื่อครบวงจรได้แรงดันไฟช่วงบวกออกทางเอาต์พุต ทำให้ได้คลื่นแรงดันกระแสตรงรวมกันเต็มคลื่นดังแสดงในรูปที่ 3.15

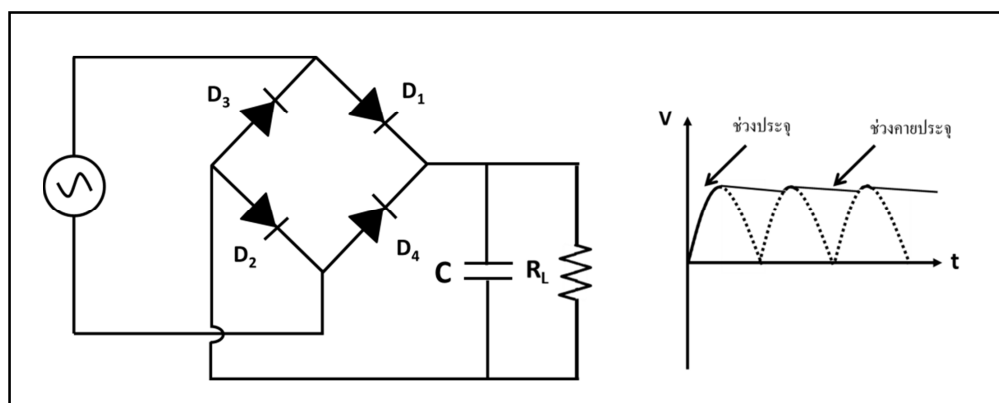


รูปที่ 3.14 D_3 และ D_4 ได้รับไบอัสตรง



รูปที่ 3.15 รูปคลื่น V_{out} จากวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

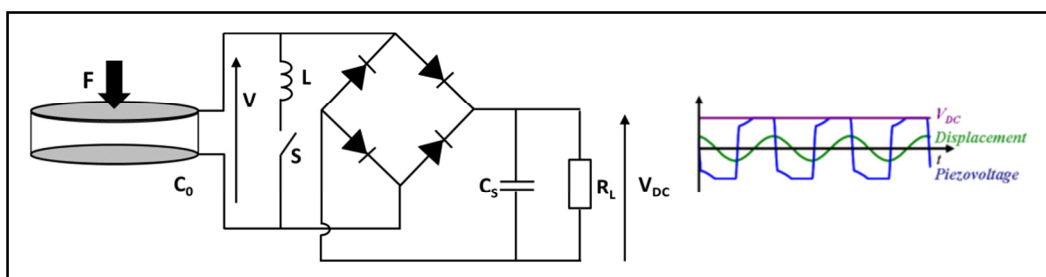
สัญญาณสัญญาณที่ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นไม่เรียบพอ เกิดระลอกของแรงดัน (ripple voltage) ไม่สามารถนำไปจ่ายให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการไฟตรงได้ จึงมีการต่อตัวเก็บประจุขนานกับวงจรเรียงกระแส เพื่อทำหน้าที่กรองสัญญาณไฟตรงแบบเต็มคลื่นให้เรียบยิ่งขึ้นหรือทำให้เกิดระลอกของแรงดันน้อยที่สุดดังแสดงในรูปที่ 3.16



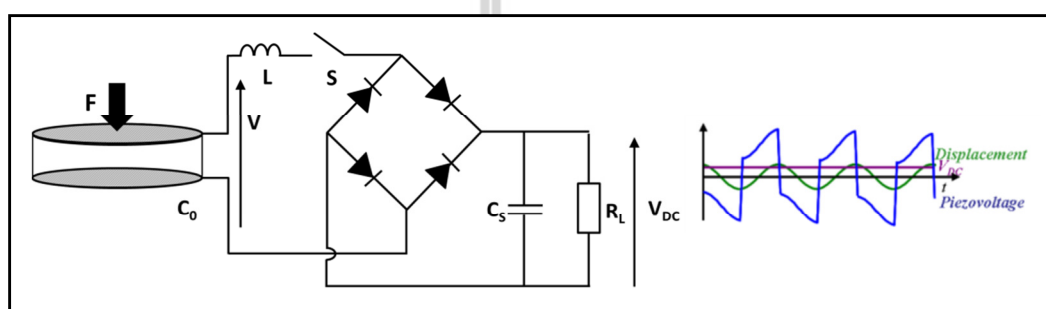
รูปที่ 3.16 รูปคลื่นแรงดันไฟตรงเมื่อใช้ตัวเก็บประจุกรองแรงดัน

3.7.2 วงจร Synchronized Switch Harvesting on Inductor (SSHI)

วงจร SSHI เป็นวงจรที่ใช้เก็บเกี่ยวพลังงาน จากการสั่นของวัสดุไพโซอิเล็กทริก ใช้เทคนิคการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำเข้ามาช่วยในวงจร โดยการเพิ่มกลไกเปิดปิดสวิตช์ (switch) ที่นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าที่คร่อมโหลด (load) หรือเรียกว่า Synchronized Switch Harvesting on Inductor (SSHI) หรือ เอสเอสเอชไอ ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการประมวลผลของเทคนิคไม่เชิงเส้น (nonlinear technique) ประกอบด้วยสวิตช์ที่ถูกควบคุมโดยไฟเลี้ยงวงจรให้ทำงานที่ตำแหน่งสูงสุดและต่ำสุดของการกระจัดของการสั่น เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากวัสดุไพโซอิเล็กทริกมีค่ามากที่สุดสวิตช์จะถูกปิด และเกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังตัวเก็บประจุหรือแบตเตอรี่ และเมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยลงสวิตช์จะถูกเปิด เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ วิธีนี้พบว่าช่วยยกระดับกำลังไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคมาตรฐาน (ในที่นี้หมายถึงวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์) (Guyomar et al., 2005; Lefeuvre et al., 2006 and Badel et al., 2007) ต่อมาได้มีการศึกษาเพิ่มเติม โดยการจัดวางตำแหน่งการต่อสวิตช์และตัวเหนี่ยวนำ (inductor) ด้วยการต่อขนานเข้ากับวงจร เรียกว่า Parallel SSHI และต่ออนุกรมเข้ากับวงจร เรียกว่า Series SSHI แสดงในรูป 3.17



(ก) Parallel SSHI

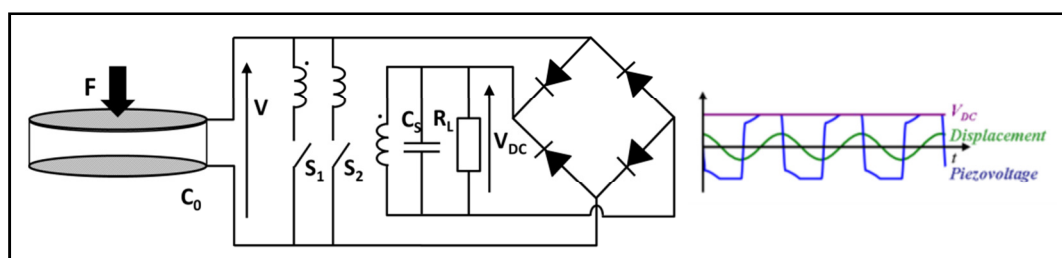


(ข) Series SSHI

รูปที่ 3.17 วงจร Synchronized Switch Harvesting on Inductor (SSHI)

3.7.3 วงจร Hybrid Synchronized Switch Harvesting on Inductor (Hybrid SSHI)

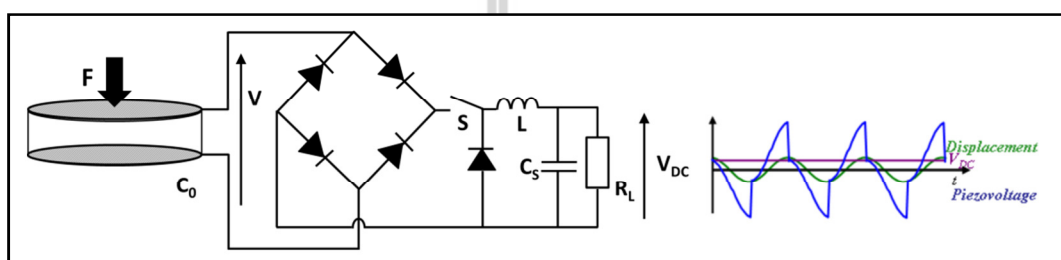
วงจร Hybrid SSHI คือวงจรที่ดัดแปลงโดยการรวมวงจร SSHI-MR (Series SSHI ต่อเข้ากับ magnetic rectifier) ต่อเข้ากับ Parallel SSHI ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 วงจร Hybrid Synchronized Switch Harvesting on Inductor (Hybrid SSHI)

3.7.4 วงจร Synchronized Switching and Discharging to a storage Capacitor through an Inductor (SSDCI)

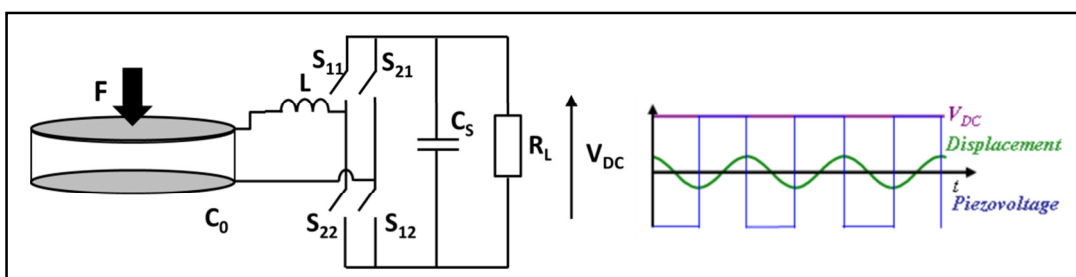
วงจร Series SSHI ดัดแปลงวงจรโดยปรับเปลี่ยนการวางสวิตช์ควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3.19 เรียกวงจรนี้ว่า Synchronized Switching and Discharging to a storage Capacitor through an Inductor (SSDCI) เป็นวงจรที่ใช้ถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริกผ่านตัวเหนี่ยวนำ เมื่อแรงดันไฟฟ้าจากวัสดุไพโซอิเล็กทริกโดยตรงมีค่าเท่ากับศูนย์ ไดโอดในวงจรเรียกกระแสะจะหยุดการทำงาน และเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าก่อนหน้าไปเก็บยังตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.19 วงจร Synchronized Switching and Discharging to a storage Capacitor through an Inductor (SSDCI)

3.7.5 วงจร Active energy harvesting scheme

วงจรที่มีกระบวนการสวิตช์โดยใช้อินเวอร์เตอร์ในการปรับความกว้างพัลส์ (pulse-width modulation : PWM) เรียกว่า Active energy harvesting scheme (มีส่วนประกอบของวัฏจักรอีริกสัน(Ericsson cycle))



รูปที่ 3.20 วงจร Active energy harvesting scheme

วงจรที่กล่าวมาข้างต้นมีการเชื่อมวงจรต่อโดยตรงกับวัสดุไพโซอิเล็กทริก เพื่อส่งไปยังตัวจัดเก็บพลังงาน อาจถูกดึงพลังงานระหว่างทางเนื่องจากแหล่งพลังงานและตัวจัดเก็บพลังงานอยู่ใกล้กันเกินไปจึงมีการปรับปรุงวงจรเพื่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด โดยใช้แนวคิดการคิดสวิตช์ในทางที่แตกต่างกันเล็กน้อย เทคนิคของการเหนี่ยวนำถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบในการจัดเก็บพลังงาน กระบวนการเก็บเกี่ยวพลังงานจึงดำเนินการอยู่ในขั้นตอนที่สอง ขั้นแรกให้พลังงานส่งไปยังตัวเหนี่ยวนำ จากนั้นวัสดุไพโซอิเล็กทริกจะถูกตัดการเชื่อมต่อจากวงจร ขั้นที่สองพลังงานที่เก็บไว้ในตัวเหนี่ยวนำจะถูกถ่ายโอนไปยังตัวเก็บประจุ วิธีนี้ป้องกันการสูญเสียพลังงานของวัสดุไพโซอิเล็กทริกได้

3.7.6 วงจรจัดการพลังงาน

นอกจากวงจรที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.7.1 - 3.7.5 แล้ว ยังมีวงจรจัดการพลังงานที่ออกแบบและสร้างมาเพื่อทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ และสามารถนำไปใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า mW หรือสามารถนำไปประจุเข้าแบตเตอรี่ได้ วงจรเหล่านี้มีข้อมูลเบื้องต้นที่อธิบายถึงการทำงานดังนี้

LTC3588

จากบริษัท Linear Technology Corporation ชื่อทางการค้าคือ LTC3588 - 1 Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply เป็นไอซีที่ทำหน้าที่เรียงกระแสและควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริก โดยใช้หลักการสวิตช์ซิงในการควบคุมแรงดันสามารถกำหนดแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ 4 ระดับ คือ 1.8V 2.5V 3.3V และ 3.6 V ตามลำดับ และรองรับกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 100 mA กำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.36 mW โดยไอซีจะทำหน้าที่เมื่อระบบได้รับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก 2.7 – 20 V และจะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันได้ดีก็ต่อเมื่อวัสดุไพโซอิเล็กทริกให้กระแสแบบคงที่ที่มีค่าต่ำสุด 950 nA

CBC915

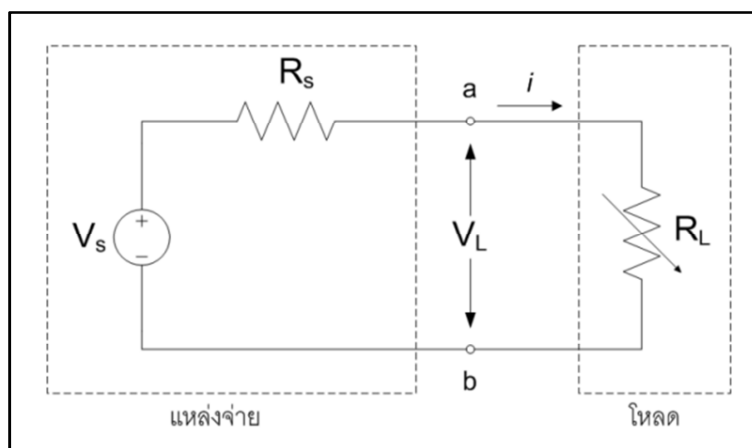
จากบริษัท Cymbet™ Corporation ชื่อทางการค้าคือ CBC915 Enerchip™ EP Energy Processor ไอซีที่ทำหน้าที่เรียงกระแสและควบคุมแรงดันไฟฟ้า มีหน้าที่การทำงานเช่นเดียวกับ LTC3588 โดยจะทำงานเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก สามารถให้แรงดันไฟฟ้าขาออกได้

วงจรรีโอสตาร์ (SCR)

เรโอสตาร์ (SCR) ชื่อเต็มคือ ซิลิคอน คอนโทรล เร็คติไฟร์เออร์ (silicon control Rectifier) เป็นอุปกรณ์โซลิดสเตต (solid-state) ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด - ปิดวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง มีโครงสร้างประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด P และชนิด N ต่อชนกันทั้งหมด 4 ตอน เป็นสารชนิด P 2 ตอน และสารชนิด N 2 ตอน โดยเรียงสลับกัน มีขาต่อออกมาใช้งาน 3 ขา คือ ขาแอนอด (ANODE) ขาคาทอด (CATHODE) และขาเกต (GATE) เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่าน SCR ขาเกตของ SCR จะตอบสนองสัญญาณหรือเรียกว่า จุดชนวนเกตหรือสัญญาณทริกเกอร์ (Triggered) และกระตุ้นให้ SCR นำกระแส วงจร SCR ถูกนำไปใช้มากในงานจ่ายไฟกำลัง เช่น วงจรควบคุมความสว่าง วงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ วงจรควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ ระบบควบคุมอุณหภูมิ และวงจรรักษาระดับกำลัง เป็นต้น คุณสมบัติของ SCR นั้น จะนำกระแสในทิศทางตรงเท่านั้น (Forward Direction) ด้วยเหตุผลนี้จึงจัดให้ SCR เป็นอุปกรณ์จ่ายไฟ นำกระแสในทิศทางเดียว (Unidirectional Device) SCR จะหยุดทำงานเมื่อค่ากระแสที่ไหลผ่านแอนอดมีค่าลดลง จนต่ำกว่าค่าแรงดันไฟสลัปที่ให้ออกกับจุดที่เรียกว่า "จุดตัดศูนย์" (Zero-crossing point)

3.8 การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด

การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Transfer) เป็นหลักการที่จะทำให้การเชื่อมโยงวงจรแต่ละส่วนให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดนำไปใช้กันมากในต่อเชื่อมวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ หลักการถ่ายโอนกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด คือการทำให้ความต้านทานของโหลดมีค่าเท่ากับ ความต้านทานภายในของต้นกำเนิดสัญญาณ ซึ่งจะเป็นผลให้โหลดได้รับกำลังงานไฟฟ้าสูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 วงจรสมมูลแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขณะมีโหลด

จากวงจรรูปที่ 3.26 เมื่อพิจารณากระแสที่ไหลในวงจรมีค่าดังนี้ $I = \frac{V_s}{R_s + R_L}$ และกำลังงานที่โหลด R_L ได้รับคือ $P_L = \frac{V_s^2 R_L}{(R_s + R_L)^2}$ ทำการแปลงรูปแบบสมการเพื่อพิจารณาเงื่อนไขที่โหลดจะได้รับกำลังงานสูงสุดได้

$$P_L = \frac{V_s^2}{4R_s} \left[1 - \left(\frac{R_s - R_L}{R_s + R_L} \right)^2 \right] \quad (3.18)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.18) จะเห็นได้ว่า ค่ากำลังงานไฟฟ้า P_L จะมีค่าสูงสุดก็ต่อเมื่อค่าในวงเล็บมีค่าเป็น 1 แสดงว่า

$$\left(\frac{R_s - R_L}{R_s + R_L} \right)^2 = 0$$

จะได้ว่า $R_s - R_L = 0$

ดังนั้น $R_s = R_L \quad (3.19)$

กำลังงานสูงสุดที่ได้รับ คือ

$$\begin{aligned}
 P_{\max} &= \frac{V_s^2 - R_s}{(R_s + R_s)^2} = 0 \\
 &= \frac{V_s^2 R_s}{(2R_s)^2} \\
 &= \frac{V_s^2 R_s}{4R_s^2}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$P_{\max} = \frac{V_s^2}{4R_s} \quad (3.20)$$

3.9 แบตเตอรี่สำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก

พลังงานที่เกิดจากวัสดุไพโซอิเล็กทริกเป็นพลังงานที่ไม่สูงมากนัก จึงจำเป็นต้องหาแบตเตอรี่ที่เหมาะสมเพื่อบรรจุแรงดันไฟฟ้า และนำไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.9.1 แบตเตอรี่

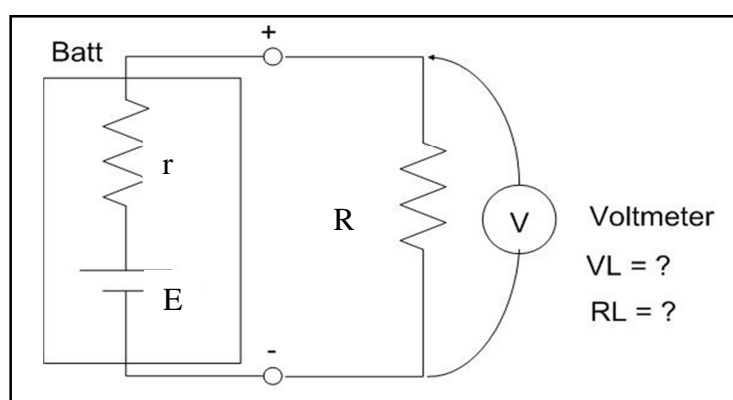
ความจุของแบตเตอรี่แบบกลุ่มนี้ระบุข้างผลิตภัณฑ์ มีหน่วยเป็นแอมป์ชั่วโมง (Ampère hours : Ah) หรือมิลลิแอมป์ชั่วโมง (milli-Ampère hours : mAh) ถ้าแบตเตอรี่มีความจุ 100 mAh (เมื่อไม่คิดถึงค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่) สามารถอธิบายได้ว่า แบตเตอรี่นี้สามารถจ่ายกระแสได้ 100 มิลลิแอมป์เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง หรือจ่ายกระแสได้ 10 มิลลิแอมป์เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เนื่องจากแบตเตอรี่แต่ละก้อนมีความจุที่แตกต่างกัน ในการใช้งานได้มีการกำหนดอัตราการประจุและคายประจุ โดยใช้สัญลักษณ์ C เรียกว่า อัตรา-ซี หรือ C-rate ถ้าแบตเตอรี่มีความจุ 100 mAh อธิบายได้ว่า อัตราประจุและคายประจุ 1 C เท่ากับ 100 mA และ 0.1C เท่ากับ 10 mA สามารถคำนวณหาเวลาการประจุและปล่อยประจุได้ดังนี้

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

ถ้าให้ความจุของแบตเตอรี่เท่ากับ 100 mAh อัตราการประจุ 0.1 C มีค่าเท่ากับ 10 mA การประจุแบตเตอรี่เริ่มจากสถานะปราศจากประจุอย่างสมบูรณ์ จนประจุเต็มอย่างสมบูรณ์ และกระแสคงที่ตลอดกระบวนการจะใช้เวลาประมาณ 10 ชั่วโมง แต่ในทางปฏิบัติจริงใช้เวลาถึง 14 - 16 ชั่วโมง ในกรณีของการคายประจุถ้าแบตเตอรี่ที่ใช้มีขนาด 200 mAh กระแสในที่สูงในวงจรคงที่ที่ 40 mA คิดเป็น 0.2 C ของแบตเตอรี่ก้อนนี้ ดังนั้นเมื่อคายประจุ จะคายประจุหมดอย่างสมบูรณ์ คือประมาณ 5 ชั่วโมง ดังนั้น ข้อควรพิจารณาสำหรับการประจุแบตเตอรี่ในระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่ให้กำลังไฟฟ้าระดับต่ำ เมื่อความจุของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นอัตราการประจุก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทำให้การนำแบตเตอรี่มาใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานในการทดสอบ ไม่ควรมีขนาดความจุมากนัก หรือจำเป็นต้องออกแบบให้เข้ากับระบบโดยเฉพาะ

3.9.2 แรงดันไฟฟ้ากับความต้านทานของแบตเตอรี่

ความต่างศักย์ภายนอกของแบตเตอรี่ เรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force : EMF) ค่าแรงดันที่แน่นอนนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุที่นำมาเป็นอานอด คาโอด (โดยปกติจะอยู่ที่ 1.5 โวลต์) และสารอิเล็กโทรไลต์ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอายุของแบตเตอรี่ หากเป็นแบตเตอรี่ใหม่แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงเล็กน้อยประมาณ 1.6 โวลต์ และจะตกลงมาเป็นค่าต่ำประมาณ 1.2 โวลต์ เมื่อแบตเตอรี่เก่าคายประจุหมด การเปลี่ยนไปของแบตเตอรี่แม้ว่าจะเป็นสิ่งสำคัญแต่ก็ไม่เจาะจงนัก เนื่องจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลายชนิดไม่ต้องการแรงดันไฟฟ้าที่คงที่สม่ำเสมอในการทำงาน อย่างไรก็ตามมีสิ่งหนึ่งที่สำคัญนั่นคือ ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ เกิดจากโครงสร้างของสารที่ใช้ทำตัวแบตเตอรี่ ค่าความต้านทานภายในนี้ มีค่าไม่มากนักขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่ แต่ไม่สามารถละทิ้งได้ รูปที่ 3.22 แสดงวงจรเทียบเท่าของแบตเตอรี่



รูปที่ 3.22 วงจรเทียบเท่าของแบตเตอรี่

จากสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้า (E : Electromotive force “e.m.f”)

$$E = I(R + r) \quad (3.21)$$

โดยที่ E คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าในแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็น Volt
 r คือ ความต้านทานภายในของเซลล์ไฟฟ้าในแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็น โอห์ม
 R คือ ความต้านทานภายนอกที่ต่อกับเซลล์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็น โอห์มและกฎของโอห์ม

$$V = IR \quad (3.22)$$

เมื่อ V คือ แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น Volt
 R คือ ความต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โอห์ม
 I คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น I

แทน (2) ใน (1)

$$\frac{E}{V} = \frac{(R+r)}{R} \rightarrow \frac{E}{V} = 1 + \frac{r}{R}$$

ดังนั้น
$$r = \left(\frac{E}{V} - 1 \right) R \quad (3.23)$$

3.10 สรุป

บทที่ 3 นี้ได้นำเสนอทฤษฎีและสมมติฐานของวัสดุไพโซอิเล็กทริก กล่าวถึงประวัติความเป็นมา รวมไปถึงคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น การค้นพบปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก หลักการและพฤติกรรมของวัสดุไพโซอิเล็กทริก การทำโพลิงวัสดุไพโซอิเล็กทริก การวัดสมบัติของวัสดุไพโซอิเล็กทริก ประเภทของวัสดุไพโซอิเล็กทริก รวมไปถึงการนำวัสดุไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุที่น่าสนใจคือ เมื่อให้แรงทางกลแก่วัสดุไพโซอิเล็กทริก วัสดุจะเกิดความเครียด เกิดโพลาไรเซชันทางไฟฟ้าและเกิดสนามไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ผู้จัดทำสร้างชุดทดสอบเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) ที่ปรับความถี่และแรงกดสำหรับศึกษาการเกิดประจุไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก เพื่อศึกษาแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการให้แรงทางกลแก่วัสดุไพโซอิเล็กทริก โดยจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4



บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัย

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 วัสดุโพซิโออิเล็กทรอนิกส์เมื่อได้รับแรงทางกลจะเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า จากปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงมีการออกแบบและสร้างชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล ที่ให้แรงกดและความถี่เชิงกลแก่วัสดุโพซิโออิเล็กทรอนิกส์ เพื่อศึกษาการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุที่เกิดจากแรงกดและความถี่เชิงกล การอธิบายส่วนประกอบของชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล การใช้งานเบื้องต้น ทำการทดลองสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุโพซิโออิเล็กทรอนิกส์จากแหล่งผลิต และเปรียบเทียบจากการคำนวณที่ได้วัดค่าจริงในห้องปฏิบัติการ จากนั้นนำไปทดลองวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ด้วยชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกลเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าโดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

4.1 วัสดุและสารเคมี

- 4.1.1 วัสดุโพซิโออิเล็กทรอนิกส์ PZT-sunnytec S-53 ของบริษัท Sunnytec
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 mm และมีความหนา 1 mm
- 4.1.2 แผ่นทองแดง (copper sheet) ความหนาประมาณ 0.1 mm
- 4.1.3 อะคริลิก (Acrylic) ใช้วางวัสดุเซรามิก กว้าง 8 ยาว 8 cm หนา 2 cm
เจาะรูตรงกลาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34.5 mm
- 4.1.4 ถังบรรจุแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gas cylinders)
- 4.1.5 ตะกั่วบัดกรี (soldering wire)
- 4.1.6 แผ่นวงจรพิมพ์อเนกประสงค์ (universal print circuit board)
- 4.1.7 สายไฟหนา 1 มิลลิเมตร (electric wire)
- 4.1.8 ไม้เนื้อแข็ง
- 4.1.9 ลูกบอลพลาสติก (plastic ball) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm

4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือการทดลอง

- 4.2.1 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Pico scope 2203 PC Oscilloscope, Picotech Corp.)
- 4.2.2 เครื่องวัดค่า d_{33} (S5865 d_{33} meter APC 90-2030, APC International, Ltd.)
- 4.2.3 มิเตอร์แอลซีเอ (Instek LCR meter LCR-821, Instek Corp.)

- 4.2.4 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Metrix MX 23 Digital multimeter, Metrix Corp.)
- 4.2.5 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Picotest Digital multimeter M5300A, Picotest Corp.)
- 4.2.6 กระบอกสูบนิวเมติกส์ (SMC cylinder CDQ2KB32-100 DM max.press 1 MPa, SMC Corp.)
- 4.2.7 เกจปรับแรงดันแก๊ส (Chiyoda regulator gauge 0-25 kg/cm², Chiyoda Corp.)
- 4.2.8 รีเลย์จับเวลา (Single-rang time WT-33, WIP Corp.)
- 4.2.9 แหล่งจ่ายไฟตรง 24V (PM-024 24/500mA Switching power supply, Primus Corp.)
- 4.2.10 อุปกรณ์นับจำนวนรอบ (Omron H7EC Counter, Omron Corp.)
- 4.2.11 โหลดเซลล์ (Load cell, CM-K100 100 kgf, Dacell Corp.)
- 4.2.12 หัวแร้งบัดกรี (Hakko-980 Soldering Iron, Hakko Corp.)
- 4.2.13 เครื่องคิดเลข (Casio fx-350 Calculator, Casio Computer co., Ltd)
- 4.2.14 ท่อลมสำหรับแก๊สไนโตรเจน
- 4.2.15 ไชควง
- 4.2.16 ปากคีบจับชิ้นงาน

4.3 วิธีการวิจัย

การศึกษาผลกระทบของแรงกดและความถี่เชิงกล ที่มีต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

- การออกแบบและสร้างชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล
- การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก ที่สามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้
- การเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก

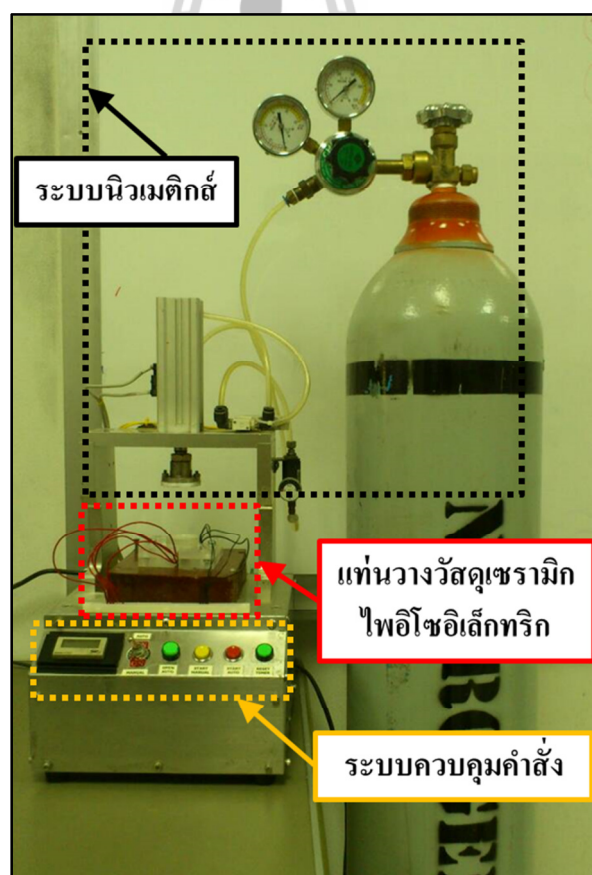
รายละเอียดการออกแบบ ทดลองและวิเคราะห์ผลในแต่ละส่วนมีดังนี้

4.3.1 ออกแบบและสร้างชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล

การออกแบบชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล คำนึงถึงแหล่งพลังงานเชิงกลสูญเสียเปล่าที่มีมากในสิ่งแวดล้อม เป็นพลังงานที่มีแรงกดและความถี่เชิงกลไม่สูงมากนัก โดยผู้วิจัยได้ทำการออกแบบชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล ที่สามารถให้แรงกดเชิงกลในช่วง 50 – 400 N และมีความถี่เชิงกลในช่วง 1 – 300 ครั้ง/นาที่ หรือ 0.017 – 5 Hz วัสดุอุปกรณ์ที่นำมาสร้างแรงเชิงกลในรูปแบบการกดให้แก่วัสดุไพโซโซอิเล็กทริก ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ

- ระบบนิวเมติกส์
- ระบบควบคุมคำสั่ง
- แท่นวางวัสดุไพโซโซอิเล็กทริก

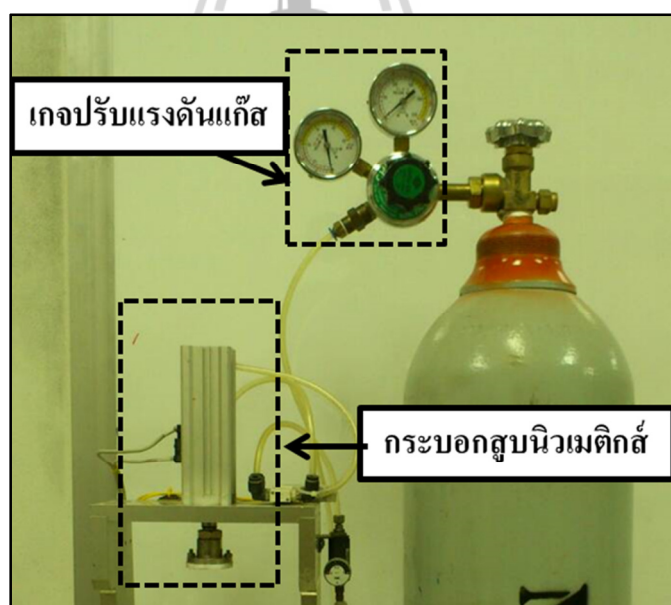
รายละเอียดและส่วนประกอบต่างๆ อธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 ชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนทางกล

4.3.1.1 ระบบนิวเมติกส์

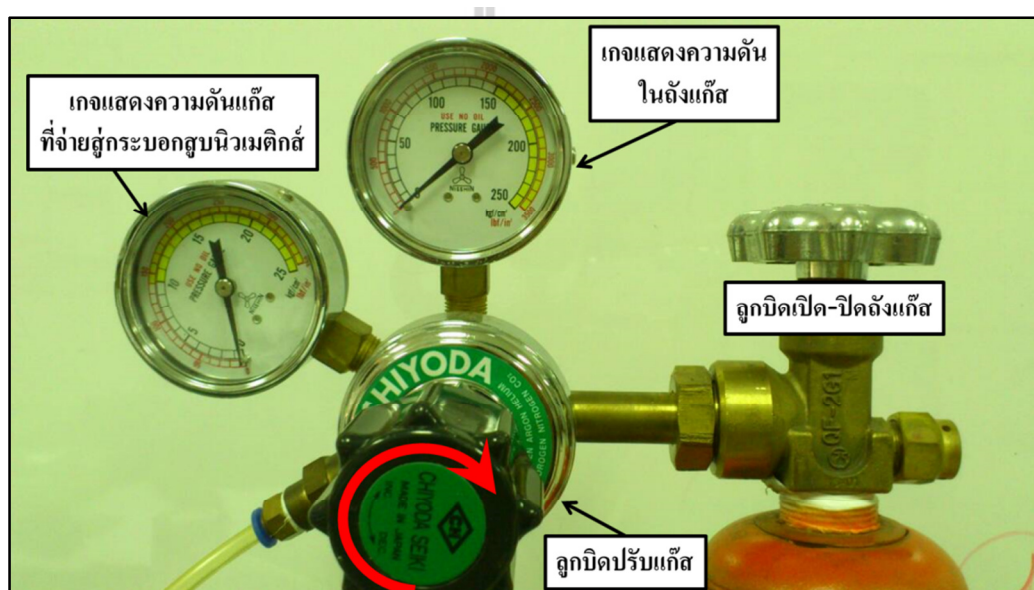
ระบบนิวเมติกส์คือระบบการส่งกำลังจากต้นทางไปยังปลายทาง โดยอาศัยลมเป็นสื่อกลางในการส่งกำลัง และมีการทำงานด้วยระบบลมขับเคลื่อนอุปกรณ์ทำงานของเครื่องจักรต่างๆ เช่น กระบอกสูบนิวเมติกส์หรือมอเตอร์ลม เป็นต้น ระบบนิวเมติกส์สามารถควบคุมแรงในการกดให้มีค่าน้อยได้ตามต้องการ โดยการใช้อุปกรณ์ควบคุมความดัน และปรับความเร็วในการทำงานด้วยการปรับระยะชักของก้านสูบ ในการสร้างชุดกำเนิดแรงต้นสะเทือนเชิงกล ผู้วิจัยใช้แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen : N_2) ที่มีความดันแก๊สในถังถึง 150 kgf/cm^2 เป็นตัวต้นกำลังในการขับเคลื่อนกระบอกสูบ เนื่องจากแก๊สไนโตรเจนมีมากถึง 78% ในบรรยากาศ มีคุณสมบัติเป็นแก๊สเฉื่อยไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยา ไม่ติดไฟและมีน้ำหนักเบากว่าอากาศเล็กน้อย สามารถปล่อยสู่บรรยากาศได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ไฟฟ้าของวัสดุโพธิโซอิเล็กทริก ดังนั้นจึงนำแก๊สไนโตรเจนมาใช้ในระบบนิวเมติกส์ เพื่อทดลองวัสดุโพธิโซอิเล็กทริก ในที่นี้จะอธิบายหลักการทำงานและส่วนประกอบหลักที่ใช้ในระบบนิวเมติกส์ ได้แก่ เกจปรับความดันแก๊สไนโตรเจนและกระบอกสูบนิวเมติกส์ ดังแสดงในรูป 4.2



รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบหลักของระบบนิวเมติกส์

- เกจปรับความดันแก๊สในโตรเจน

เกจปรับความดันแก๊ส คือ อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับถังแก๊ส ประกอบด้วยเกจแสดงความดันในถังแก๊ส ลูกบิดปรับแก๊ส และเกจแสดงความดันที่จ่ายสู่กระบอกสูบนิวเมติกส์ โดยวิธีการใช้งานเริ่มจากการเปิดแก๊สในถังในโตรเจนความดันในถังแก๊สจะไหลเข้าสู่เกจ เกจจะแสดงความดันที่มีในถังแก๊สทั้งหมด 150 kgf/cm² จากนั้นทำการบิดลูกบิดปรับแก๊ส เพื่อจ่ายความดันแก๊สเข้าสู่กระบอกสูบนิวเมติกส์ รายละเอียดของแรงกดเชิงกลที่เกิดจากปลายกระบอกสูบนิวเมติกส์อธิบายในส่วนของกระบอกสูบนิวเมติกส์ต่อไป



รูปที่ 4.3 เกจปรับความดันแก๊สในโตรเจนในระบบนิวเมติกส์

- กระบอกสูบนิวเมติกส์

กระบอกสูบนิวเมติกส์ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนความดันแก๊ส ให้เป็นแรงกดเชิงกล มีการเคลื่อนที่ขึ้นลงแบบเส้นตรง ให้แรงในแนวตั้งฉากกับแนวระนาบของวัตถุ ดังรูปที่ 4.4 ค่าของแรงกดเชิงกลสามารถวัดได้ด้วยโหลดเซลล์ (Load cell) และสามารถคำนวณแรงกดเชิงกลด้วยการพิจารณาแรงที่เกิดจากปลายกระบอกสูบนิวเมติกส์ สามารถคำนวณได้จากทฤษฎีของปาสคาล (Pascal's Law) สมการ (4.1)

$$P_A = \frac{F}{A} \quad (\text{Pascal's Law}) \quad (4.1)$$

โดยที่ P_A คือ แรงดันแก๊ส (Gas pressure) มีหน่วยเป็น kgf/cm^2

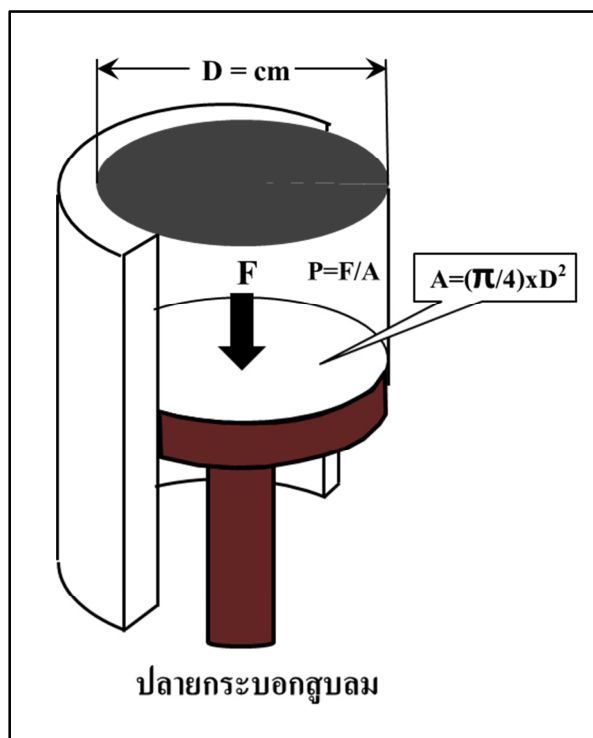
F คือ แรงกดเชิงกลที่ได้จากก้านสูบของกระบอกสูบนิวเมติกส์ (Mechanical compressive force) มีหน่วยเป็น N

A คือ พื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบหรือ $A = \left(\frac{\pi}{4}\right) \times D^2$ มีหน่วยเป็น cm^2

โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ มีหน่วยเป็น cm



(ก) ส่วนประกอบกระบอกสูบนิวเมติกส์



(ข) ไดอะแกรมแสดงโครงสร้างภายในของกระบอกสูบนิวเมติกส์

รูปที่ 4.4 กระบอกสูบนิวเมติกส์ (ก) ส่วนประกอบกระบอกสูบนิวเมติกส์

(ข) ไดอะแกรมแสดงโครงสร้างภายในของกระบอกสูบนิวเมติกส์

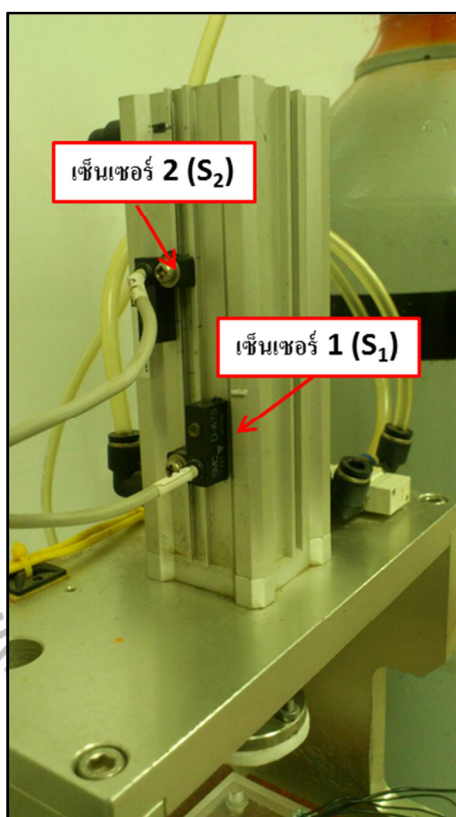
ยกตัวอย่างการคำนวณหาแรงกดเชิงกลของปลายกระบอกสูบนิวเมติกส์

เนื่องจากกระบอกสูบนิวเมติกส์ที่ใช้ทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 3.09$ cm กำหนดแรงดันลมที่ใช้ในระบบทดลอง โดยการปรับเกจวัดความดันให้มีค่า $P_A = 5 \text{ kgf/cm}^2$ สามารถคำนวณแรงที่เกิดขึ้นจากกระบอกสูบนิวเมติกส์ดังนี้

$$\begin{aligned}
 F &= P_A A \\
 &= 5 \text{ kgf/cm}^2 \times \left[\left(\frac{\pi}{4} \right) \times (3.09 \text{ cm})^2 \right] \\
 &= 37.5 \text{ kgf หรือ } 375 \text{ N}
 \end{aligned}$$

- การปรับความถี่เชิงกล

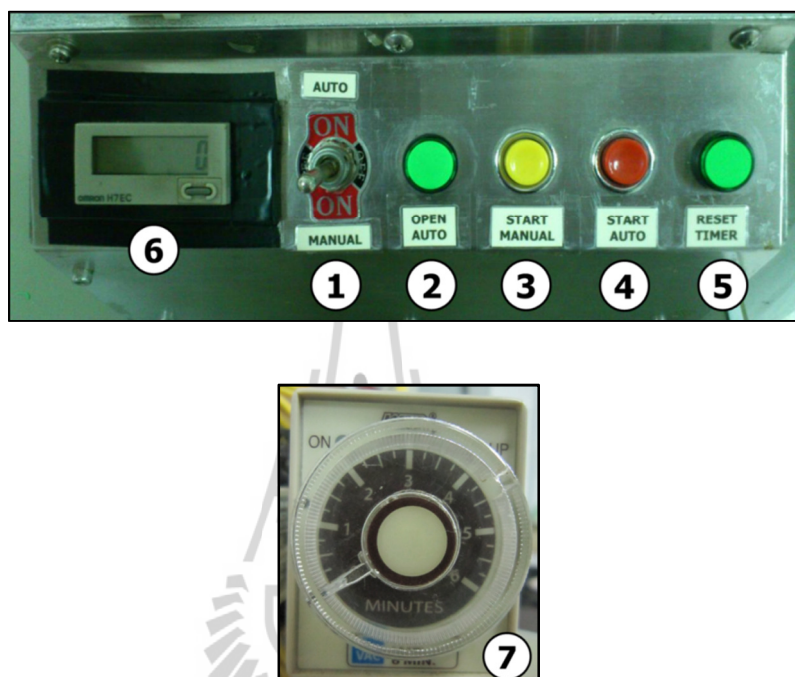
การปรับความถี่เชิงกลสามารถกำหนดได้จากการปรับระยะห่างของเซ็นเซอร์ 1 (S_1) และเซ็นเซอร์ 2 (S_2) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยกำหนดให้เซ็นเซอร์ 1 (S_1) เลื่อนลงมาระยะต่ำสุดที่ปลายกระบอกสูบให้แรงกดไปยังแท่นวางวัสดุ และกำหนดให้เป็นจุดคงที่ ปรับระยะเซ็นเซอร์ 2 (S_2) ให้ห่างจากเซ็นเซอร์ 1 (S_1) จากนั้นทำการทดสอบความถี่เชิงกลด้วยการใช้อุปกรณ์นับจำนวนรอบ (counter) นับจำนวนรอบในการกดของกระบอกสูบนิวเมติกส์ในเวลา 1 นาที ด้วยรีเลย์จับเวลา



รูปที่ 4.5 เซ็นเซอร์กระบอกสูบนิวเมติกส์

4.3.1.2 ระบบควบคุมคำสั่ง

ส่วนที่สำคัญอีกหนึ่งส่วนคือระบบควบคุมคำสั่ง เป็นระบบที่สามารถสั่งให้ชุดกำเนิดแรงดันสะท้อนเชิงกลทำงานตามคำสั่งในแบบต่างๆ ปุ่มแสดงระบบควบคุมในรูปแบบที่ 4.6 (อธิบายการทำงานในภาคผนวก ก)



รูปที่ 4.6 ปุ่มแสดงระบบควบคุมคำสั่งของชุดกำเนิดแรงดันสะท้อนเชิงกล

- ①เปิด - ปิดการทำงาน ② OPEN AUTO ③ START MANUAL
④ START AUTO ⑤ RESET TIMER ⑥ COUNTER
⑦ TIMER RELAY

ระบบควบคุมคำสั่งมีปุ่มสำคัญที่ใช้ในการกำหนดคำสั่ง ดังนี้

- ① ปุ่มเลือกเปิด - ปิดการทำงาน เป็นปุ่มโยก ON เพื่อเลือกเปิดการทำงานแบบ AUTO หรือแบบ MANUAL และ โยก OFF เพื่อปิดการทำงาน
- ② ปุ่ม OPEN AUTO เป็นสวิตช์ปุ่มกดแบบปกติปิด กดสวิตช์นี้เมื่อต้องการทดลองในโหมดการทำงานแบบ AUTO
- ③ ปุ่ม START MANUAL เป็นสวิตช์กดติดปล่อยดับ สวิตช์นี้สามารถทำงานได้ ก็ต่อเมื่อ ON ปุ่มโยกไปที่คำสั่งแบบ MANUAL

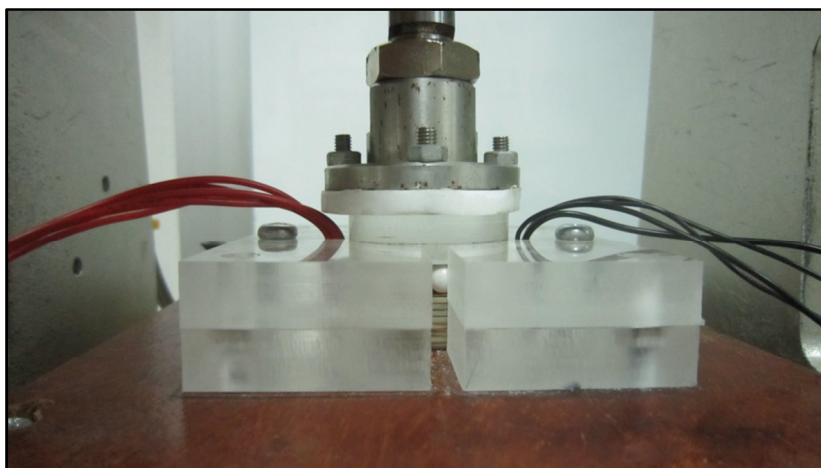
- ④ ปุ่ม START AUTO เป็นสวิตช์กดติดปล่อยดับ สวิตช์นี้สามารถทำงานได้ก็ต่อเมื่อ ON ปุ่มโยกไปที่คำสั่งแบบ AUTO
- ⑤ ปุ่ม RESET TIMER เป็นสวิตช์ปุ่มกดแบบปกติปิด กดสวิตช์นี้เมื่อต้องการตั้งค่าการจับเวลาใหม่
- ⑥ อุปกรณ์นับจำนวนรอบ (COUNTER) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้นับจำนวนรอบในการกวัดวัสดุโพธิโซอิเล็กทริกเป็นแบบนับอย่างเดียว สามารถกดปุ่ม reset ตรงหน้าจอตัวนับจำนวนรอบเพื่อเริ่มนับรอบใหม่ได้
- ⑦ รีเลย์จับเวลา (TIMER RELAY) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้จับเวลาในการทดลอง โดยใช้ร่วมกับอุปกรณ์นับจำนวนรอบ (COUNTER) สามารถกำหนดระยะเวลาได้

4.3.1.3 แท่นวางวัสดุโพธิโซอิเล็กทริก

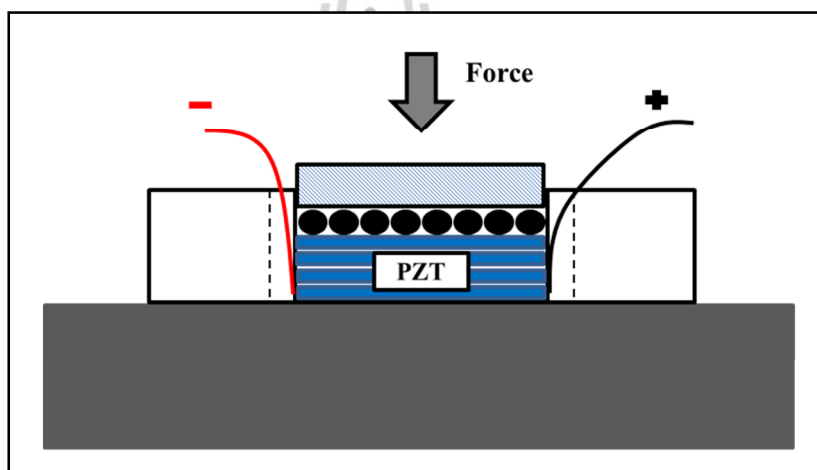
แท่นวางวัสดุโพธิโซอิเล็กทริก เป็นไม้เนื้อแข็งที่มีขนาดกว้าง 150 mm ยาว 150 mm และสูง 30 mm ยึดติดกับชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล เพื่อเป็นฉนวนป้องกันไม่ให้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากวัสดุโพธิโซอิเล็กทริก สัมผัสกับพื้นผิวของชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกลที่ทำจากสแตนเลส ส่วนตำแหน่งที่วางวัสดุโพธิโซอิเล็กทริก เป็นอะคริลิกขนาดกว้าง 80 mm ยาว 80 mm และหนา 20 mm เจาะเป็นรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34.5 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ก)



(ก) การวางแท่นวางวัสดุโพธิโซอิเล็กทริก



(ข) รูปแท่นวางวัสดุไพโซอิเล็กทริก



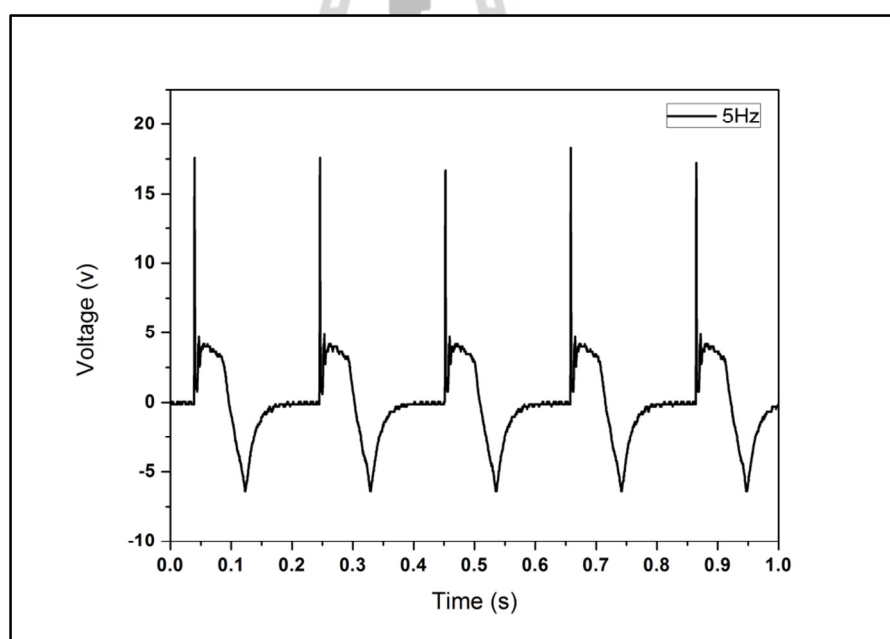
(ค) ไลอะแกรมแท่นวางวัสดุไพโซอิเล็กทริก

รูปที่ 4.7 โครงสร้างแท่นวางวัสดุไพโซอิเล็กทริก (ก) การวางแท่นวางวัสดุ

(ข) รูปแท่นวางวัสดุ (ค) ไลอะแกรมแท่นวางวัสดุ

ขั้นตอนการทำงานของชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนทางกล เริ่มต้นด้วยการนำวัสดุไพโซอิเล็กทริกวางในแท่นวางวัสดุของชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนทางกล ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข) แท่นวางวัสดุไพโซอิเล็กทริกถูกออกแบบมาเพื่อทดลองการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก โดยการให้แรงในแนวตั้งฉากกับแนวระนาบของวัสดุ ซึ่งสามารถเพิ่มจำนวนแผ่นวัสดุ

ไพโซโซอิเล็กทริกได้ จากนั้นวางแผ่นทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 มิลลิเมตร ความหนา โดยประมาณ 0.1 มิลลิเมตร มีการเชื่อมสายไฟเพื่อเป็นตัวนำไฟฟ้า นำแผ่นวัสดุไพโซโซอิเล็กทริกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 มิลลิเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตรวางซ้อนทับ จากนั้นนำลูกบอลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร วางให้เต็มพื้นที่เพื่อสร้างแรงดันให้แก่แผ่นวัสดุไพโซอิเล็กทริก (เนื่องจากความเค้นเกิดจากแรงที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ($\sigma = F/A$) การวางลูกบอลให้เต็มพื้นที่ทำให้เกิดการกระจายแรง และเกิดแรงดันที่มีค่าสูงกว่าการวางแผ่นอะคริลิก ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับวัสดุทดลองไพโซโซอิเล็กทริก) และนำแผ่นอะคริลิกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 มิลลิเมตร ความหนา 15 มิลลิเมตร วางทับลูกบอล ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ค) หลังจากนั้นทำการทดลองโดยสุ่มให้แรงกดเชิงกลแก่วัสดุไพโซโซอิเล็กทริก 375 N โดยแรงกดเชิงกลจะถูกควบคุมและรักษาระดับของแรงดันให้คงที่ สำหรับการทดลองด้วยการปรับเกจวัดความดัน และทดลองโดยการสุ่มให้แรงกดและความถี่เชิงกลแก่วัสดุไพโซอิเล็กทริก วัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Picoscope, 2203) แสดงผลการทดลองในกราฟในรูปที่ 4.8

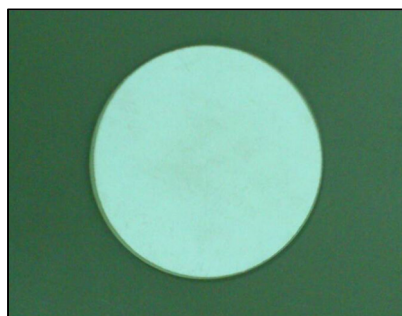


รูปที่ 4.8 แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพโซโซอิเล็กทริก

จากผลการทดลองสุ่มให้แรงกดและความถี่เชิงกลแก่วัสดุไพโซโซอิเล็กทริก พบว่าวัสดุสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ ดังนั้น ชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนทางกลที่สร้างขึ้น สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานกลในการทดลองได้

4.3.2 วัสดุที่แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า

วัสดุที่ใช้ในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า คือ วัสดุไพโซอิเล็กทริก รุ่น PZT Sunnytec S - 53 ของบริษัท Sunnytec ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าที่วัดได้จากแหล่งผลิต มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 mm และมีความหนา 1 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 วัสดุไพโซอิเล็กทริกที่นำมาทดลอง

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของวัสดุไพโซอิเล็กทริกจากแหล่งผลิต (ข้อมูลจาก sunny tec)

สมบัติทางไฟฟ้า	sunnytec S-53		
	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่ามาตรฐาน
Piezoelectric charge constant	d_{33}	10^{-12} C/N	469
	d_{31}	10^{-12} C/N	-280
Piezoelectric voltage constant	g_{33}	10^{-3} Vm/N	22.6
	g_{31}	10^{-3} Vm/N	-10.8
Dielectric loss factor	$\tan \delta$	-	0.018
Dielectric constant	ϵ_{33}^T	-	3200
Coupling factor	k_t	-	0.52
	k_p	-	0.81
	k_{31}	-	0.44
Compliance	s_{11}^E	10^{-12} m ² /N	17
Mechanical Quality factor	Q_m	-	65
Density	-	kg/m ³	7560
Curie temperature	-	°C	250

4.3.2.1 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

ตรวจสอบค่าทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก การหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (K') การหาค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (d_{33}) และการคำนวณหาค่า piezoelectric voltage constant (g_{33}) เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างสมบัติทางไฟฟ้าจากแหล่งผลิตกับเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ มีรายละเอียดดังนี้

- การหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (K')

การหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชั้นเซรามิก PZT ได้จากการวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุของชิ้นสารด้วยเครื่อง LCR meter (Instek LCR-821) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งในการวัดค่านี้จะจ่ายแรงดันไฟฟ้า 1 V ที่วัสดุ และใช้ความถี่ 1 kHz จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้จากความสัมพันธ์ตามสมการ (4.2)

$$K' = \frac{C_p L}{\epsilon_0 A} \quad (4.2)$$

โดยที่ C_p คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ (F)

L คือ ความหนาของวัสดุไพโซอิเล็กทริก (m)

ϵ_0 คือ สภาพยอมทางไดอิเล็กทริกของสุญญากาศมีค่า 8.854×10^{-12} (F/m)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุไพโซอิเล็กทริก (m^2)



รูปที่ 4.10 LCR Meter (Instek LCR-821)

- การหาค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (d_{33})

วิธีการวัดค่า d_{33} ของวัสดุเซรามิกไพโซอิเล็กทริก โดยนำวัสดุเซรามิกไพโซอิเล็กทริกมาวัดค่า d_{33} ด้วยเครื่อง d_{33} Meter (รุ่น International Ltd., APC 90-2030) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ค่าที่ได้จากการวัดจะมีหน่วยเป็น 10^{-12} C/N



รูปที่ 4.11 d_{33} Meter

- การคำนวณหาค่า piezoelectric voltage constant (g_{33})

เมื่อทำการวัดค่า d_{33} ของวัสดุเซรามิกไพโซอิเล็กทริกด้วยเครื่อง d_{33} Meter (รุ่น International Ltd., APC 90-2030) สามารถนำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาค่า piezoelectric voltage constant (g_{33}) ได้จากสมการที่ (4.3)

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon'} = \frac{d_{33}}{K' \epsilon_0} \quad (4.3)$$

โดยที่ ϵ' คือ ค่าสภาพยอมได้ของวัสดุ

K' คือ relative dielectric constant หรือ $K' = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0}$

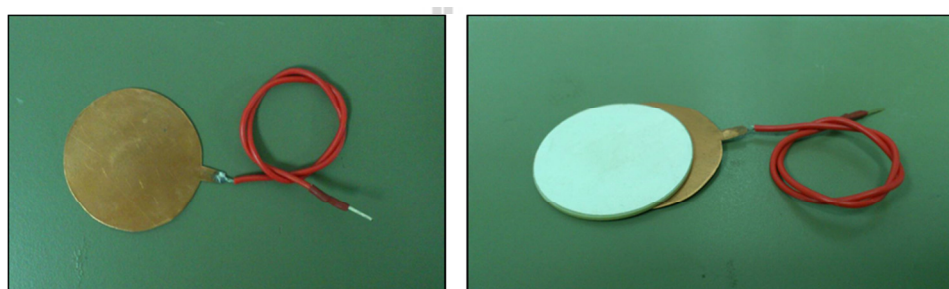
d_{33} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ϵ_0 คือ สภาพยอมทางไดอิเล็กทริกของสุญญากาศมีค่า 8.854×10^{-12} (F/m)

4.3.2.2 การจัดวางเรียงวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก

- การเตรียมแผ่นทองแดงและสายไฟ

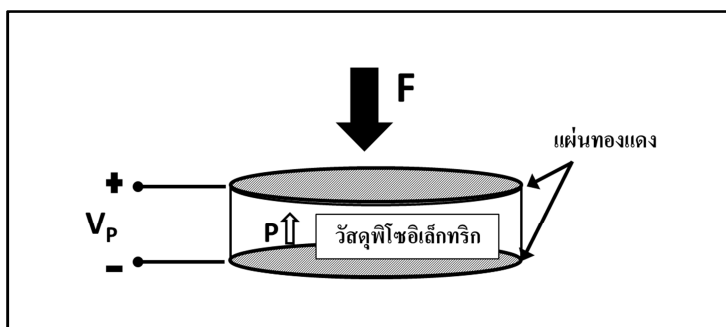
การนำไฟฟ้าจำเป็นต้องมีฉนวนที่สามารถนำไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี ซึ่งทองแดงสามารถนำไฟฟ้าได้ 100% จึงใช้แผ่นทองแดงนำไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก โดยนำแผ่นทองแดงที่มีความหนาประมาณ 0.1 mm ตัดเป็นวงกลมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 mm ซึ่งมีขนาดเท่ากับชิ้นงาน จากนั้นนำแผ่นทองแดงที่เตรียมไว้ไปบัดกรีเชื่อมต่อกับสายไฟขนาด 1 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.12



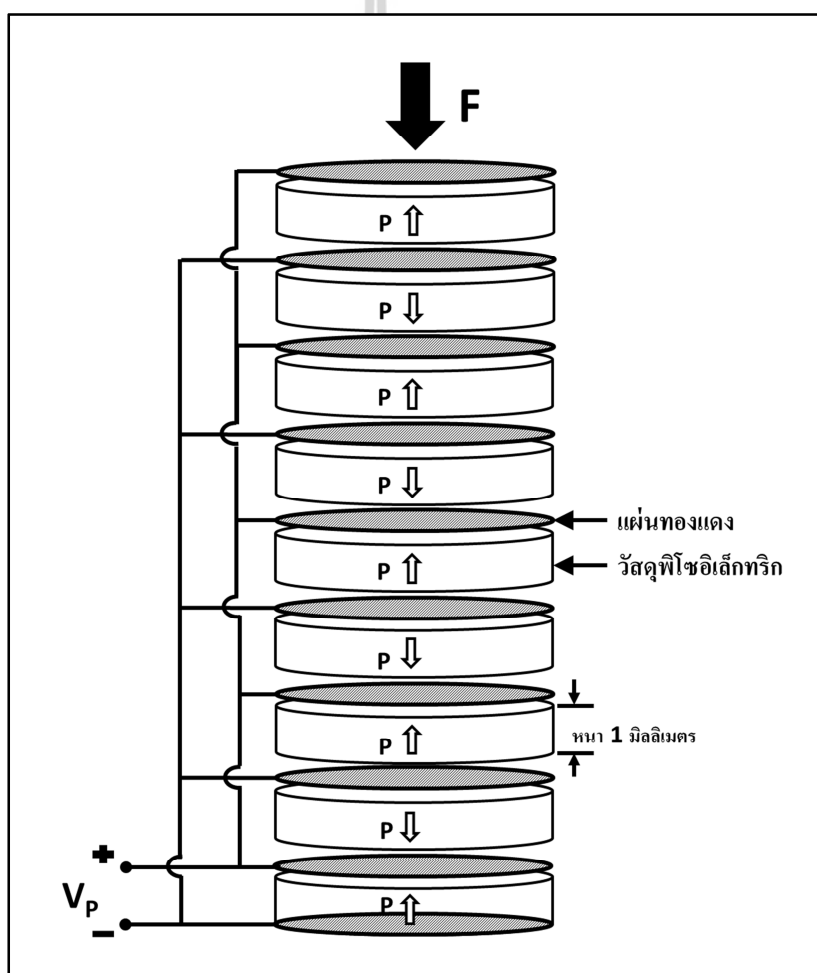
รูปที่ 4.12 แผ่นทองแดงเชื่อมสายไฟ

- การจัดวางวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกเรียงซ้อนกันหลายชั้น (multilayer)

นำวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกมาเชื่อมต่อกับแผ่นทองแดงที่มีการบัดกรีสายไฟแล้วดังแสดงในรูปที่ 4.13 และนำมาวางซ้อนกันเพิ่มขึ้นไปจนถึง 9 แผ่น ในแบบขนานดังรูปที่ 4.14 โดยหันขั้วไฟฟ้าที่เหมือนกันเข้าหากันและระหว่างชั้นของชั้นตัวอย่างใช้แผ่นตัวนำทองแดงที่บัดกรีสายไฟเรียบร้อยแล้ววางคั่นระหว่างวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก เพื่อทำหน้าที่เชื่อมขั้วไฟฟ้าของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก ทำการจัดวางวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกที่ใช้ทดลองไว้ในแท่นวางวัสดุของชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.13 การวางแผ่นทองแดงกับวัสดุไพโซอิเล็กทริก



รูปที่ 4.14 การวางวัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 9 แผ่นวางซ้อนกัน

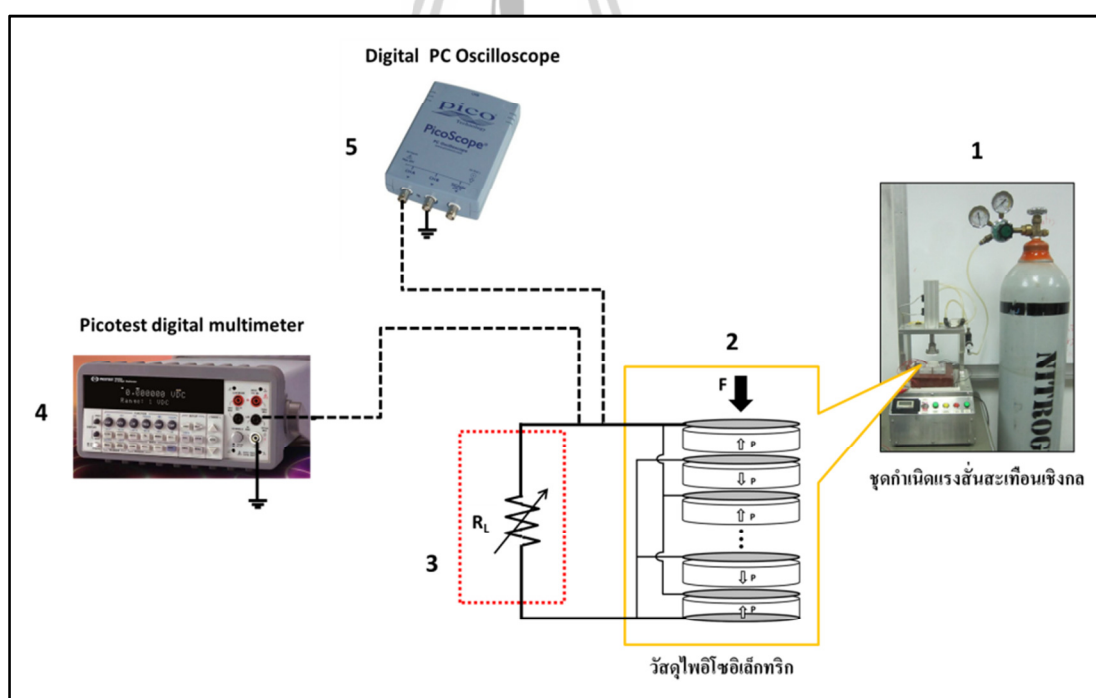
4.3.2.3 การปรับเปลี่ยนแรงกดและความถี่เชิงกล

ทดลองโดยให้แรงกดเชิงกลกระทำกับวัสดุไพโซอิเล็กทริก 1 แผ่น ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร มีพื้นที่หน้าตัด $A = 0.908 \times 10^{-3}$ ตารางมิลลิเมตร โดยแรงที่ให้คือ 75 N 150 N 225 N 300 N และ 375 N ตามลำดับ และความถี่ในการกดที่ 2 Hz 3 Hz 4 Hz และ 5 Hz ตามลำดับ ทำการทดลองและวัดค่าแรงดันไฟฟ้า จากนั้นนำมาวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

4.3.3 การเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก

4.3.3.1 การหาค่าความต้านทานภายนอกที่มีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าในวัสดุไพโซอิเล็กทริก

ระบบที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก มีส่วนประกอบและอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูป 4.15



รูปที่ 4.15 ขั้นตอนการเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก

จากไดอะแกรมรูปที่ 4.15 แสดงระบบที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานไพโซอิเล็กทริก สามารถอธิบายขั้นตอนในการทดลอง การเกิดแรงดันไฟฟ้าจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก ดังนี้

(1) นำวัสดุไพโซอิเล็กทริก 1 แผ่น ต่อตามรูปที่ 4.13 นำไปวางในแท่นวางวัสดุไพโซอิเล็กทริก จากนั้นกำหนดให้ชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล ให้แรงกดจากปลายกระบอกลูบนิวเมติกส์ในทิศทางขึ้นลงตั้งฉากกับวัสดุไพโซอิเล็กทริก ด้วยขนาดของแรงกดเชิงกล 375 N ความถี่เชิงกล 5 Hz

(2) เมื่อวัสดุได้รับแรงกดจะแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า สัญญาณที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

(3) แรงดันไฟฟ้าถูกส่งผ่านค่าความต้านทานภายนอกที่ปรับค่าได้ (R_L) ในการทดลองนี้ค่าความต้านทานภายในอยู่ในช่วง 0 – 20 M Ω

(4) อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Picotest Digital multimeter ,M5300A)

(5) บันทึกผลการทดลองด้วยดิจิตอลออสซิลอโคป (Pico scope, 2203)

คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด พิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่เกิดจากการปรับค่าความต้านทานภายนอก จากสมการ (4.4)

$$P = \frac{V^2}{R_L} \quad (4.4)$$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น W

V คือ แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V

R_L คือ ความต้านทานภายนอก มีหน่วยเป็น Ω

ทำการทดลองซ้ำในหัวข้อที่ 4.3.31 แต่ออกแบบการจัดวางซ้อนแผ่นไพโซอิเล็กทริกตั้งแต่ จำนวน 2 แผ่นวางซ้อน - 9 แผ่นวางซ้อนกัน นำผลการทดลองเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปทดลองเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ต่อไป

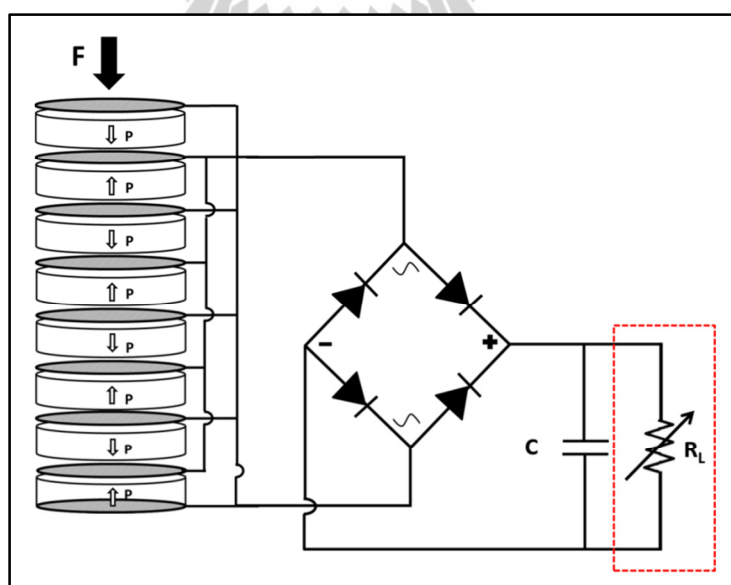
4.3.3.2 การหาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก (I-V curve)

จากหัวข้อที่ 4.4.3.1 เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก จึงนำวัสดุไพโซอิเล็กทริกวางเรียงซ้อนกัน 8 ชั้น ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์และต่อขานานความต้านทานภายนอกที่มีค่า $0 - 3 \text{ M}\Omega$ แสดงการต่อวงจรดังรูปที่ 4.16 กำหนดใช้เงื่อนไขการทดลองด้วยชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.4.3.1 แต่เพิ่มการวัดกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่อง ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Picotest Digital multimeter, M5300A) ทำการทดลองและบันทึกผลการทดลอง

คำนวณหาการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการปรับค่าความต้านทานภายนอกจากสมการ (4.5)

$$P = VI \quad (4.5)$$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น W
 V คือ แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V
 I คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น A



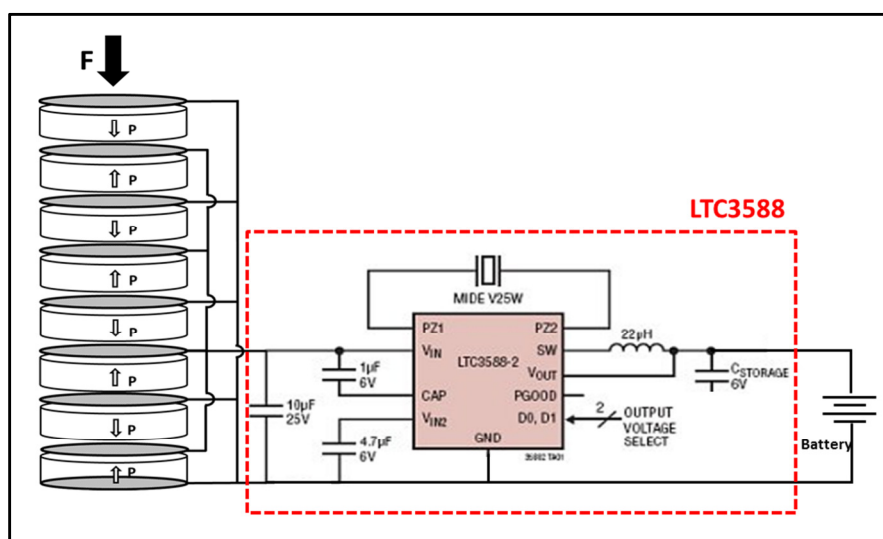
รูปที่ 4.16 การต่อวงจรเพื่อหาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก (I-V curve)

4.3.3.3 การทดลองวงจรที่ใช้ในแรงดันไฟฟ้าต่ำและการประจุแบตเตอรี่

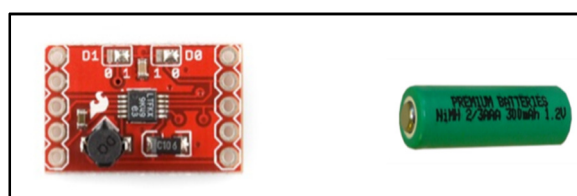
วัสดุไพโซอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่สร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีค่าสูง แต่กระแสไฟฟ้าต่ำ จึงมีการนำวงจรมาช่วยแปลงแรงดันจากกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง พร้อมทั้งควบคุมแรงดันให้มีค่าคงที่เพื่อประจุในแบตเตอรี่ ทดลองด้วยวงจร LTC3588 วงจร SCR และ วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์มีรายละเอียดดังนี้

- วงจร LTC3588

นำวัสดุไพโซอิเล็กทริกวางเรียงซ้อนกัน 8 ชั้นต่อเข้ากับวงจร LTC3588 และเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลเมทัลไฮไดร (NiMH) 1.2 V 300 mAh ดังแสดงในรูปที่ 4.17 กำหนดให้แรงกดเชิงกลแก่วัสดุ 375 N ความถี่ 5 Hz วัดค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรด้วย ดิจิตอลออสซิลอโคป



(ก)



(ข)

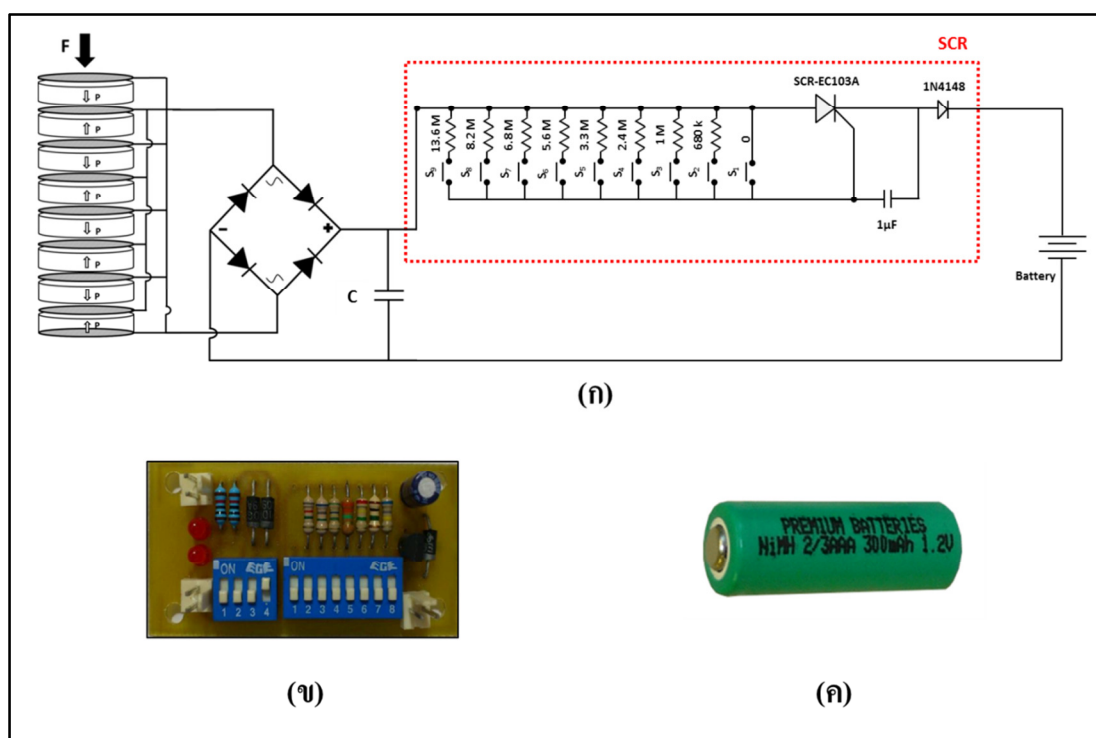
(ค)

รูปที่ 4.17 ส่วนประกอบของวงจร LTC3588 และการเชื่อมต่อแบตเตอรี่

(ก) การต่อวงจร (ข) รูปวงจร LTC3588 (ค) แบตเตอรี่

- วงจรเอสซีอาร์ (SCR)

นำวงจร SCR ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ต่อเข้ากับวัสดุไพโซอิเล็กทริกวางเรียงซ้อนกัน 8 ชั้น และเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลเมทัลไฮไดร (NiMH) 1.2 V 300 mAh เลือกตัวต้านทานในวงจร SCR ด้วยการสวิตช์ $S_1 - S_8$ ทำการทดลองกำหนดให้แรงกดเชิงกลแก่วัสดุ 375 N ความถี่เชิงกล 5 Hz วัดค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรด้วยดิจิตอลออสซิลอโคป

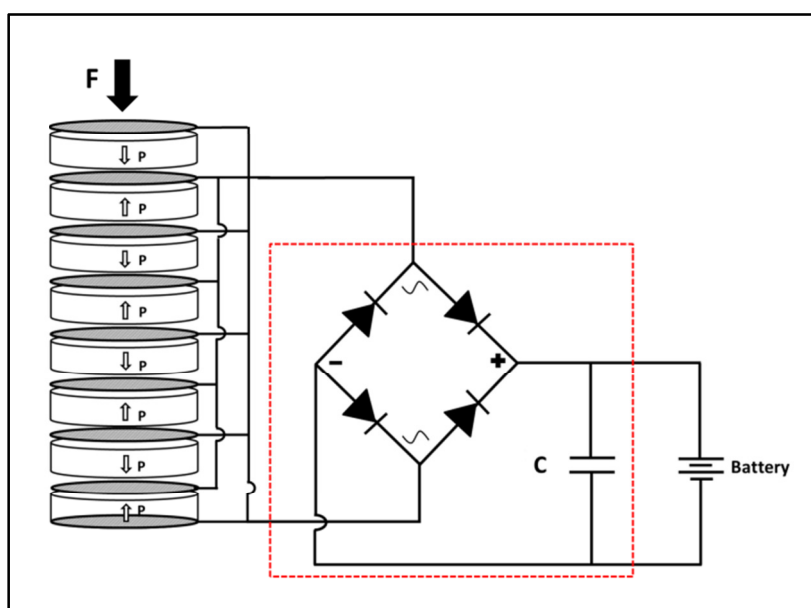


รูปที่ 4.18 ส่วนประกอบของวงจรวงจรเอสซีอาร์ (SCR) และการเชื่อมต่อแบตเตอรี่

(ก) การต่อวงจร (ข) รูปวงจร SCR (ค) แบตเตอรี่

- วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

นำวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ต่อเข้ากับวัสดุไพโซอิเล็กทริกวางเรียงซ้อนกัน 8 ชั้น และเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ชนิดนิเกิลเมทัลไฮไดร 1.2 V 300 mAh ดังแสดงในรูปที่ 4.19 จากนั้นให้แรงกดเชิงกลแก่วัสดุ 375 N ความถี่เชิงกล 5 Hz ทำการทดลองและวัดค่าด้วยดิจิตอลออสซิลอ스코ป



(ก)

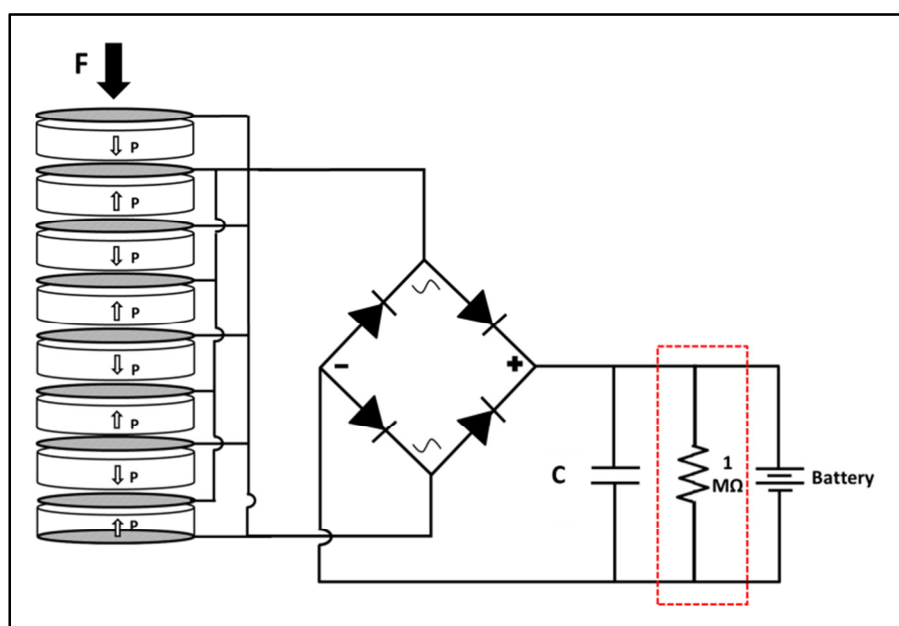


(ข)

รูปที่ 4.19 การต่อวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

(ก) การต่อวงจร (ข) แบตเตอรี่

- วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ต่อขนานกับความต้านทาน $1\text{ M}\Omega$
 นำวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ต่อขนานกับความต้านทาน $1\text{ M}\Omega$
 ต่อเข้ากับวัสดุไพโซอิเล็กทริกวางเรียงซ้อนกัน 8 ชั้น และเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลเมทัล
 ไฮไดร 1.2 V 300 mAh ดังแสดงในรูปที่ 4.20 จากนั้นให้แรงกดเชิงกลแก่วัสดุ 375 N ความถี่เชิงกล
 5 Hz ทำการทดลองและวัดค่าด้วยดิจิตอลออสซิลอ스코ป



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.20 การต่อวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ต่อขนานกับความต้านทาน $1\text{ M}\Omega$

(ก) การต่อวงจร (ข) แบตเตอรี่

4.4 สรุป

ในบทที่ 4 ได้ทำการอธิบายส่วนประกอบของชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล การใช้งานเบื้องต้น โดยชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล สามารถให้แรงกดเชิงกลในช่วง 50 – 400 N และความถี่เชิงกลในช่วง 1 – 300 ครั้ง/นาที (0.017 – 5 Hz) ทำการทดลองสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริกจากแหล่งผลิต และเปรียบเทียบจากการคำนวณที่ได้วัดค่าจริงในห้องปฏิบัติการ จากนั้นนำไปทดลองวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ด้วยชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล ทั้งนี้ได้กำหนดค่าต่างๆ ของแรงกดเชิงกลคือ 75 N 150 N 225 N 300 N และ 375 N ความถี่เชิงกลคือ 2 Hz 3 Hz 4 Hz และ 5 Hz และนำวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่มีการจัดวางเรียงซ้อนกัน ตั้งแต่ 1 – 9 ชั้น ทดลองวงจรที่ช่วยในการประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ ด้วยชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกลที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้น



บทที่ 5

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้จะเป็นส่วนของการวิเคราะห์และสรุปผล การทดสอบประสิทธิภาพของชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกลที่สร้างขึ้น พบว่าชุดทดสอบสามารถให้แรงกดเชิงกล 75 N 125 N 225 N 300 N และ 375 N และให้ความถี่เชิงกล 2 Hz 3 Hz 4 Hz และ 5 Hz จากนั้นนำชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกลที่สร้างขึ้น ให้แรงกดและความถี่เชิงกลแก่วัสดุไพโซอิเล็กทริก เพื่อศึกษาผลกระทบของการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก สามารถวิเคราะห์ผลได้จากการศึกษาขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป จากการทดลองพบว่าในทุกแรงกดเชิงกลและทุกความถี่เชิงกล วัสดุไพโซอิเล็กทริกสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ เมื่อแรงกดและความถี่เชิงกลเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดแรงดันไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อออกแบบการจัดวางเรียงวัสดุไพโซอิเล็กทริก โดยเพิ่มจำนวนแผ่นวัสดุมาซ้อนกันแบบขนาน พบว่าเมื่อจำนวนแผ่นไพโซอิเล็กทริกวางซ้อนกันเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นด้วย อาจเกิดจากวัสดุเมื่อนำมาซ้อนกันแบบขนาน ทำให้ค่าความต้านทานภายในของวัสดุมีค่าลดลง กำลังไฟฟ้าจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น จากนั้นนำวัสดุไพโซอิเล็กทริกไปเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ พบว่า สามารถประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ NIMH 1.2V 300 mAh ได้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพชุดกำเนิดแรงดันสะท้อนเชิงกล

5.1.1 การกำหนดแรงกดเชิงกล

ชุดกำเนิดแรงดันสะท้อนเชิงกล ใช้ระบบนิวเมติกส์ควบคุมการให้แรงกดเชิงกล ด้วยวิธีการกำหนดแรงดันแก๊สที่จ่ายไปยังกระบอกสูบ (Gas pressure) โดยการปรับเกจปรับแรงดันแก๊ส และคำนวณแรงกดเชิงกลที่ปลายกระบอกสูบนิวเมติกส์ ด้วยทฤษฎีของปาสคาล (Pascal's Law) สามารถคำนวณได้จาก สมการ (4.1) ในบทที่ 4

$$F = P_A A \quad (\text{Pascal's Law})$$

โดยที่ F คือ แรงกดเชิงกลที่ได้จากก้านสูบของกระบอกสูบ
(Mechanical compressive force) มีหน่วยเป็น N

P_A คือ แรงดันแก๊ส (Gas pressure) มีหน่วยเป็น kgf/cm^2

A คือ พื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบหรือ $A = \left(\frac{\pi}{4}\right) x D^2$ มีหน่วยเป็น cm^2

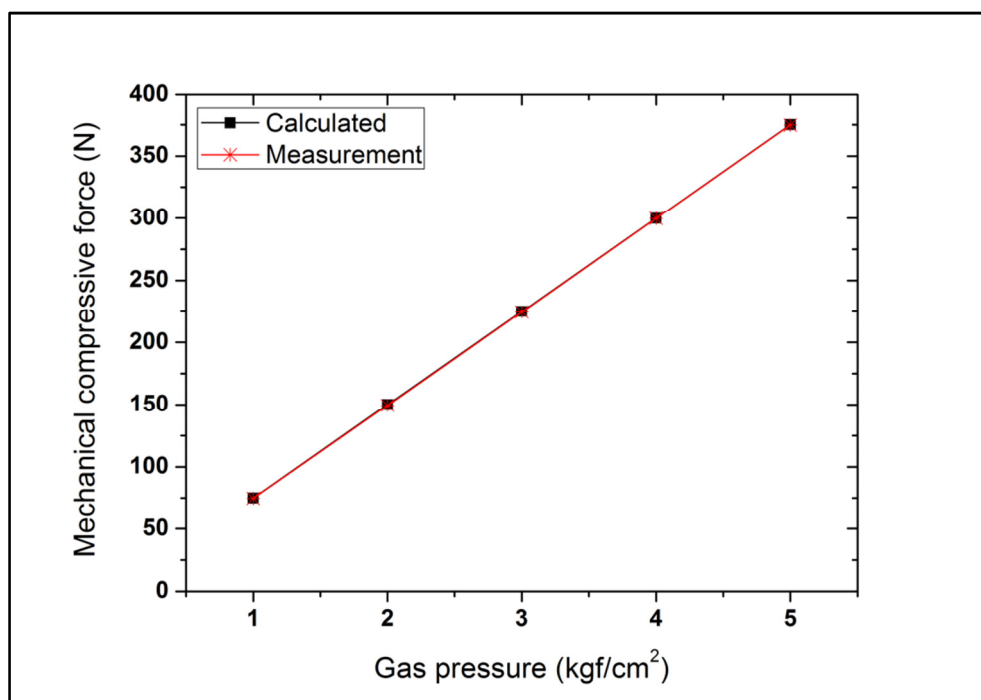
โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ มีหน่วยเป็น cm

เปรียบเทียบค่าแรงกดที่ได้จากการคำนวณกับผลของการวัดค่าแรงกดเชิงกลด้วย โหลดเซลล์ (Load cell) ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลเปรียบเทียบการคำนวณค่าแรงกดเชิงกลจากปลายกระบอกสูบนิวเมติกส์ กับผลของการวัดค่าแรงกดเชิงกลด้วยโหลดเซลล์ (Load cell)

แรงดันแก๊ส Gas pressure (P_A) (kgf/cm^2)	แรงกดเชิงกล Mechanical compressive force (N)		
	จากการคำนวณ ด้วยทฤษฎีของปาสคาล (Calculated)	จากการวัด ด้วยโหลดเซลล์ (Measurement)	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	75	74.80	0.26
2	150	149.40	0.40
3	225	224.50	0.22
4	300	299.80	0.06
5	375	374.70	0.08

จากตารางที่ 5.1 เป็นผลการทดลองเปรียบเทียบค่าแรงกดที่ได้จากการคำนวณและค่าแรงกดที่วัดได้จริงจากโหลดเซลล์ พบว่าค่าแรงกดเชิงกลมีค่าใกล้เคียงกัน นำมาสร้างกราฟเพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ชัดเจนยิ่งขึ้น สามารถแสดงกราฟเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 5.1

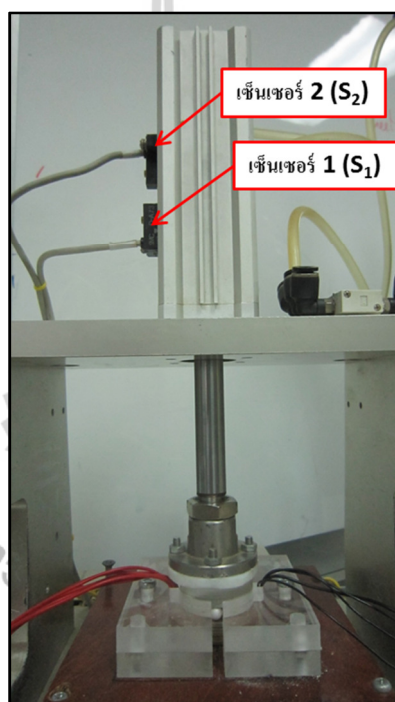


รูปที่ 5.1 ค่าแรงกดที่ได้จากการคำนวณและค่าแรงกดที่วัดได้จริงจากโหลดเซลล์

จากรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่าสามารถปรับแรงกดเชิงกลได้ด้วยการปรับแรงดันแก๊ส นั่นคือ เมื่อปรับแรงดันแก๊ส 1 kgf/cm² 2 kgf/cm² 3 kgf/cm² 4 kgf/cm² และ 5 kgf/cm² แรงกดเชิงกลที่ได้จากปลายกระบอกสูบนิวเมติกส์จะมีค่าประมาณ 75 N 150 N 225 N 300 N และ 375 N ตามลำดับ ดังนั้นจึงกำหนดใช้เป็นค่าแรงกดเชิงกล ของชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกลที่ให้แก่วัสดุพอลิเอทิลีน

5.1.2 การกำหนดความถี่เชิงกล

ขอบเขตของการวิจัยได้กำหนดการศึกษาค้นคว้าความถี่เชิงกลในช่วง 1 - 300 ครั้ง/นาที หรือ 0.017 Hz – 5 Hz ซึ่งการกำหนดความถี่สามารถกำหนดได้จากการปรับระยะห่างของเซ็นเซอร์ 1 (S_1) และเซ็นเซอร์ 2 (S_2) ดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดยกำหนดให้เซ็นเซอร์ 1 (S_1) เลื่อนลงมาระยะต่ำสุดที่ปลายกระบอกสูบให้แรงกดไปยังแท่นวางวัสดุ และกำหนดให้เป็นจุดคงที่ ปรับระยะเซ็นเซอร์ 2 (S_2) ให้ห่างจากเซ็นเซอร์ 1 (S_1) จากนั้นทำการทดสอบความถี่เชิงกลด้วยการใช้อุปกรณ์นับจำนวนรอบ (counter) นับจำนวนรอบในการกดของกระบอกสูบนิวเมติกส์ในเวลา 1 นาที ด้วยตัวจับเวลา (timer relay) ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ตำแหน่งเซ็นเซอร์ 1 (S_1) และเซ็นเซอร์ 2 (S_2)

ตารางที่ 5.2 การปรับระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ 1 (S_1) และเซ็นเซอร์ 2 (S_2) เพื่อควบคุมความถี่เชิงกล

ระยะห่าง $S_1 - S_2$ (mm)	ความถี่เชิงกล						จำนวนรอบ/ วินาที หรือ ความถี่(Hz)
	การทดลองครั้งที่ (จำนวนรอบ/นาที)						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	
90	121	123	122	119	117	120.4	2
63	182	181	181	184	183	182.2	3
45	240	238	243	241	243	241	4
33	305	297	302	308	298	302	5

จากตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดสอบนับจำนวนรอบในการกดด้วยอุปกรณ์นับจำนวนรอบ (counter) สรุปได้ว่า เซ็นเซอร์ 1 (S_1) ห่างจากเซ็นเซอร์ 2 (S_2) 90 mm 63 mm 45 mm และ 33 mm จะทำให้กระบอกสูบนิวเมติกส์กดวัสดุโฟมโพลียูรีเทน ทรักด้วยความถี่เฉลี่ย 120.4 ครั้ง/นาที 180.2 ครั้ง/นาที 241 ครั้ง/นาที และ 302 ครั้ง/นาที ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบเป็นความถี่ โดยคิดเป็นจำนวนรอบ/วินาที ความถี่เชิงกลมีค่าประมาณ 2 Hz 3 Hz 4 Hz และ 5 Hz ตามลำดับ

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล พบว่า สามารถสร้างแรงกดเชิงกล 75 N 150 N 225 N 300 N และ 375 N และความถี่เชิงกล 2 Hz 3 Hz 4 Hz และ 5 Hz ได้ ซึ่งค่านี้จะถูกกำหนดแทนค่าพลังงานกลในสิ่งแวดล้อม เพื่อทดสอบการสร้างแรงดันไฟฟ้าของวัสดุโฟมโพลียูรีเทนทรัก ในลำดับต่อไป

5.2 สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

วัสดุไพโซอิเล็กทริกที่นำมาทดลองคือ PZT Sunnytec S - 53 ของบริษัท Sunnytec จากหัวข้อที่ 4.3.2 แสดงผลการทดลองการวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก จากแหล่งผลิตเปรียบเทียบกับผลของการวัดค่าทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริกไฟฟ้าที่วัดได้จริงในห้องปฏิบัติการ มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 5.3 สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริกจากแหล่งผลิตและวัดได้จริง

สมบัติทางไฟฟ้า	หน่วย	ข้อมูลจากแหล่งผลิต ¹	ข้อมูลที่วัดได้จริง
Relative dielectric constant (K')	-	3200	1535
Piezoelectric charge constant (d_{33})	10^{-12} C/N	640	488
Piezoelectric Voltage Constant (g_{33})	10^{-3} Vm/N	22.60	35.91
Figure of merits ($d_{33} \cdot g_{33}$)	10^{-12} m ² /N	14.46	17.52

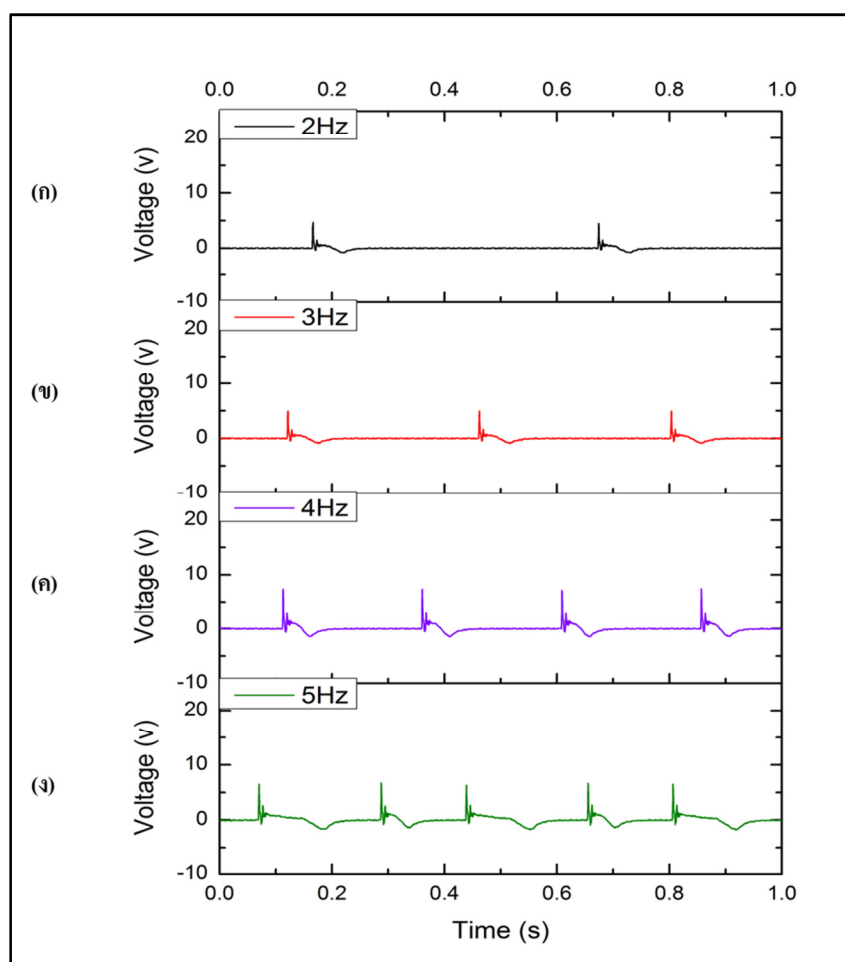
หมายเหตุ: ¹ Properties of Sunnytec PZT Powder Materials (ภาคผนวก ก)

จากตารางที่ 5.3 พบว่า การแสดงสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่วัดได้จริงจากห้องปฏิบัติการ มีความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลที่ได้จากแหล่งผลิต อาจมีสาเหตุมาจาก แหล่งผลิตอาจจะมีจำนวนชุดการผลิตหลายครั้ง ซึ่งการผลิตในแต่ละครั้งอาจมีค่าสมบัติทางไฟฟ้าคลาดเคลื่อนไปจากการผลิตครั้งแรก และอาจจะใช้สถิติในการวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างจาก สถิติที่ผู้วิจัยใช้วัดค่าสมบัติทางไฟฟ้า

จากสาเหตุดังกล่าว อาจจะมีผลทำให้ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริกมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ข้อมูลที่วัดได้จากอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ มาใช้ในการคำนวณการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก เพื่อเปรียบเทียบกับผลการเกิดแรงดันไฟฟ้า ที่ได้จากชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกลที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น

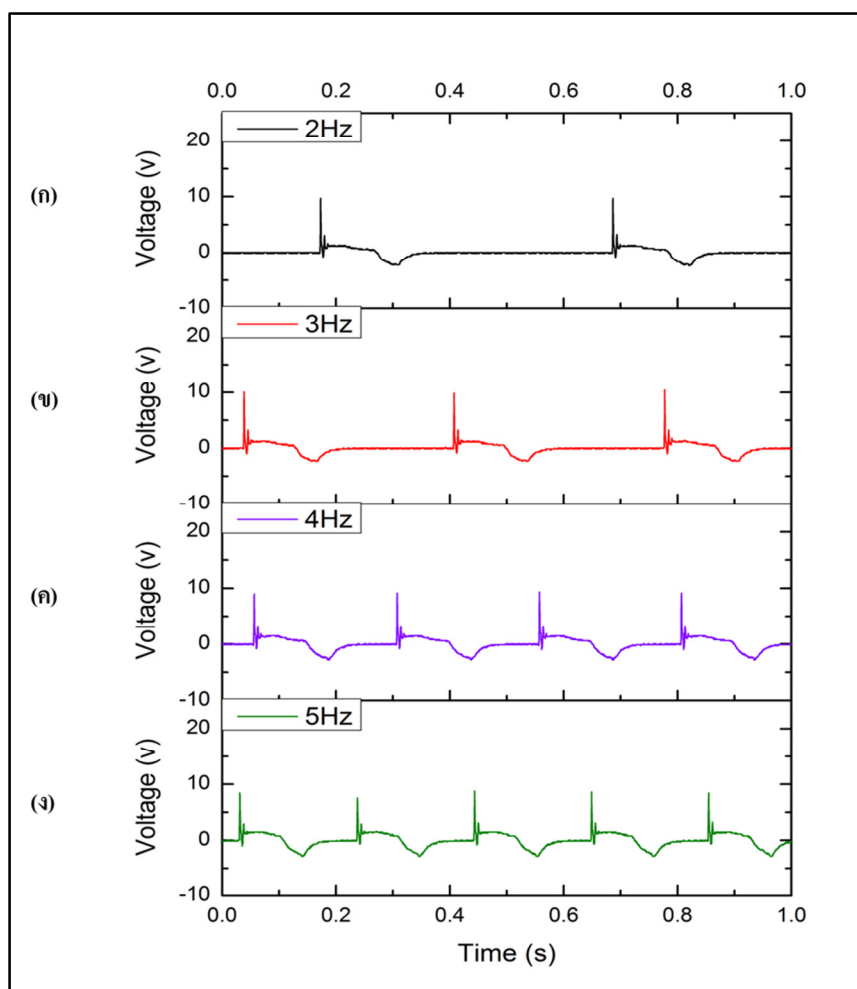
5.3 ผลของแรงกดและความถี่เชิงกลที่มีต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก 1 แผ่น

วัสดุไพโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับแรงกดเชิงกล จะสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งการเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับทำให้แรงกดและความถี่เชิงกลแก่วัสดุไพโซอิเล็กทริก เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงแรงกดและความถี่เชิงกล ด้วยชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล จึงทำการทดลองโดยให้ความถี่เชิงกลแก่วัสดุ 1 แผ่น กำหนดให้แรงกดเชิงกล 75 N 150 N 225 N 300 N และ 375 N และความถี่เชิงกลคือ 2 Hz 3 Hz 4 Hz และ 5 Hz ตามลำดับ วัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Picoscope, 2203) ผลของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีดังนี้



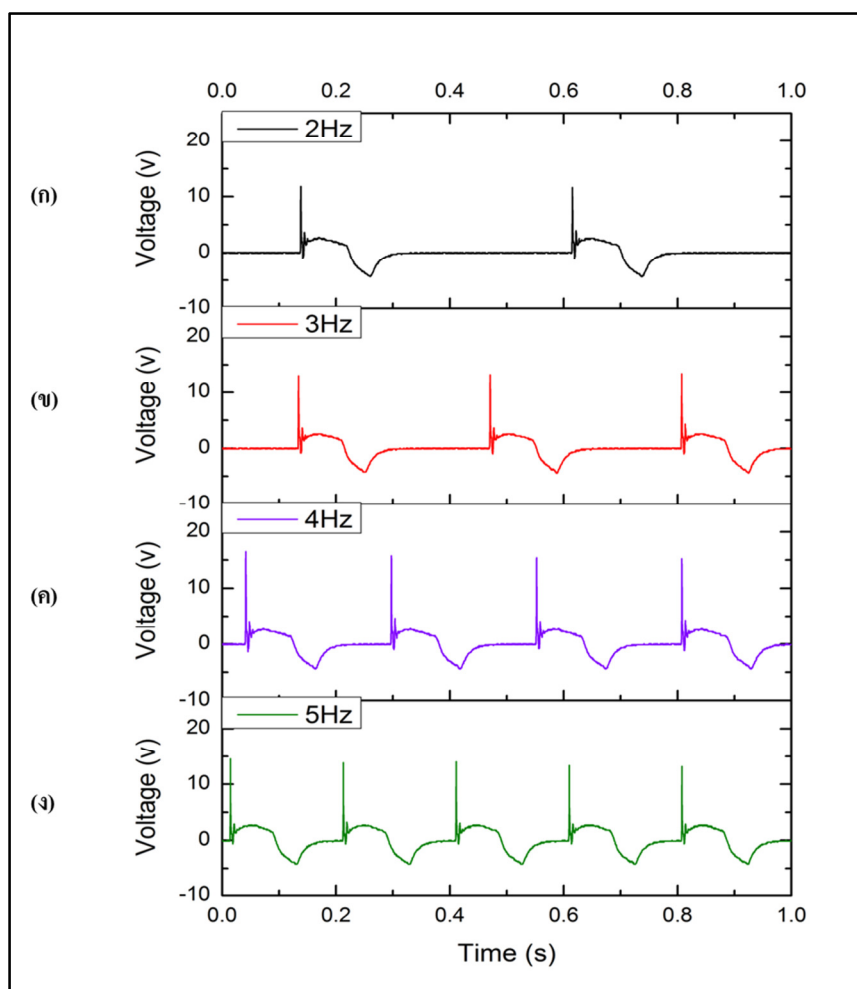
รูปที่ 5.3 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากแรงกดเชิงกล 75 N และความถี่เชิงกลค่าต่างๆ

(ก) 2 Hz (ข) 3 Hz (ค) 4 Hz และ (ง) 5 Hz



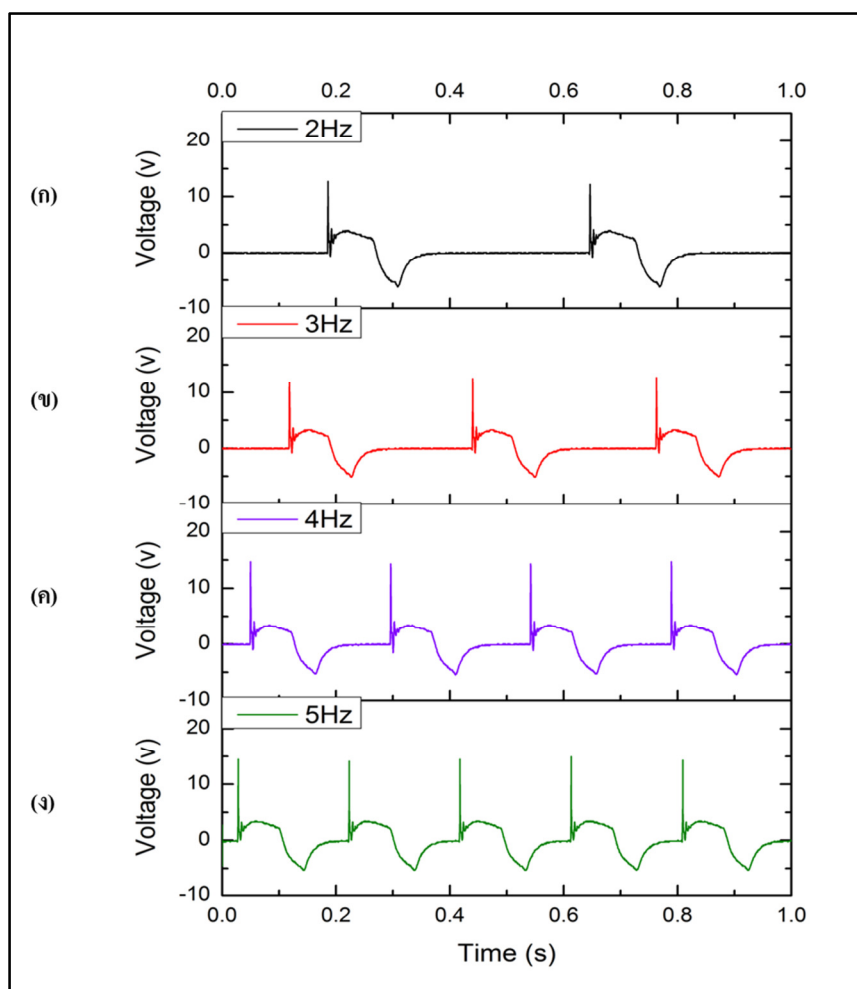
รูปที่ 5.4 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากแรงกดเชิงกล 150 N และความถี่เชิงกลค่าต่างๆ

(ก) 2 Hz (ข) 3 Hz (ค) 4 Hz และ (ง) 5 Hz



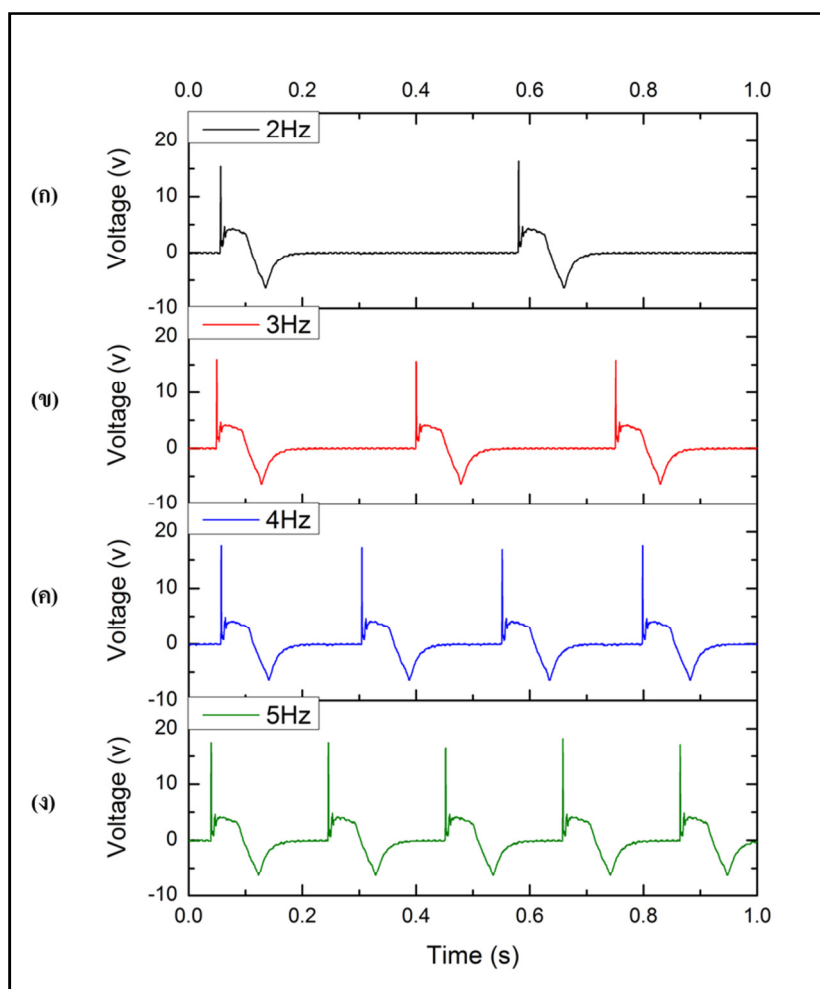
รูปที่ 5.5 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากแรงกดเชิงกล 225 N และความถี่เชิงกลค่าต่างๆ

(ก) 2 Hz (ข) 3 Hz (ค) 4 Hz และ (ง) 5 Hz



รูปที่ 5.6 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากแรงกดเชิงกล 300 N และความถี่เชิงกลค่าต่างๆ

(ก) 2 Hz (ข) 3 Hz (ค) 4 Hz และ (ง) 5 Hz



รูปที่ 5.7 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากแรงกดเชิงกล 375 N และความถี่เชิงกลค่าต่างๆ

(ก) 2 Hz (ข) 3 Hz (ค) 4 Hz และ (ง) 5 Hz

ผลการทดลองในรูปที่ 5.3 – 5.7 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากวัสดุโพิโซอิเล็กทริก เมื่อวัสดุโพิโซอิเล็กทริก 1 แผ่นได้รับแรงกดเชิงกล 75 N 150 N 225 N 300 N และ 375 N ตามลำดับ วัสดุจะสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าแรงดันสูงสุดวัดได้ประมาณ 2.52 V 5.32 V 8.10 V 10.80 V และ 13.70 V ตามลำดับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุโพิโซอิเล็กทริก สามารถคำนวณได้จากสมการการเกิดแรงดันไฟฟ้าจากสมการ (5.1)

$$V = \frac{d_{33}LF}{\epsilon_0 K' A} \quad (5.1)$$

โดยที่ V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V

d_{33} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็น 10^{-12} C/N

L คือ ความหนาของวัสดุไพโซอิเล็กทริก มีหน่วยเป็น m

F คือ แรงกดเชิงกล มีหน่วยเป็น N

ϵ_0 คือ สภาพยอมทางไดอิเล็กทริกของสุญญากาศมีค่า 8.854×10^{-12} F/m

K' คือ relative dielectric constant

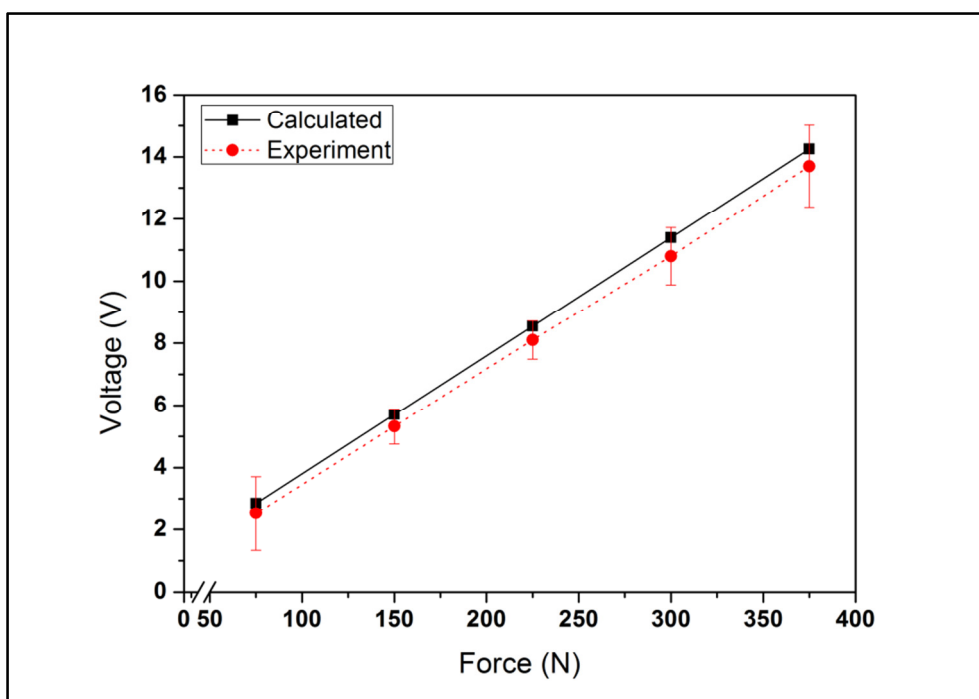
A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ มีหน่วยเป็น m^2

จากสมการข้างต้นเมื่อนำมาคำนวณและเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลอง
แสดงผลในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลของแรงกดเชิงกลที่มีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

แรงกดเชิงกล Force (N)	แรงดันไฟฟ้า Voltage (V)	
	ผลคำนวณ (Calculate)	ผลการทดลอง (Experiment)
75	2.85	2.52
150	5.70	5.32
225	8.55	8.10
300	11.40	10.80
375	14.25	13.70

จากตารางที่ 5.4 พบว่า เมื่อเพิ่มแรงกดเชิงกลให้กับวัสดุไพโซอิเล็กทริก ค่าแรงดันไฟฟ้าจะสูงขึ้น ซึ่งได้นำข้อมูลสร้างกราฟให้เห็นความแตกต่างของค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ได้จากการคำนวณและการทดลองในห้องปฏิบัติการดังแสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ผลของแรงกดเชิงกลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซโซลิดเทรค 1 แผ่น

จากกราฟรูปที่ 5.8 เมื่อให้แรงกดเชิงกลแก่วัสดุไพโซโซลิดเทรค 75 N 150 N 225 N 300 N และ 375 N ตามลำดับ พบว่า เมื่อให้แรงกดเชิงกลเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จะเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณในสมการการเกิดแรงดันไฟฟ้า แต่อาจมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการคำนวณ ทั้งนี้อาจเกิดจากการสูญเสียแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ทำการทดลอง แต่ผลของการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซโซลิดเทรค ที่วัดได้จากการทดลองเป็นไปในทางเดียวกันกับสมการที่ (5.2) จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า การให้แรงกดเชิงกลแก่วัสดุที่แรงกด 375 N สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับค่าสูงที่สุดคือ 13.70 V

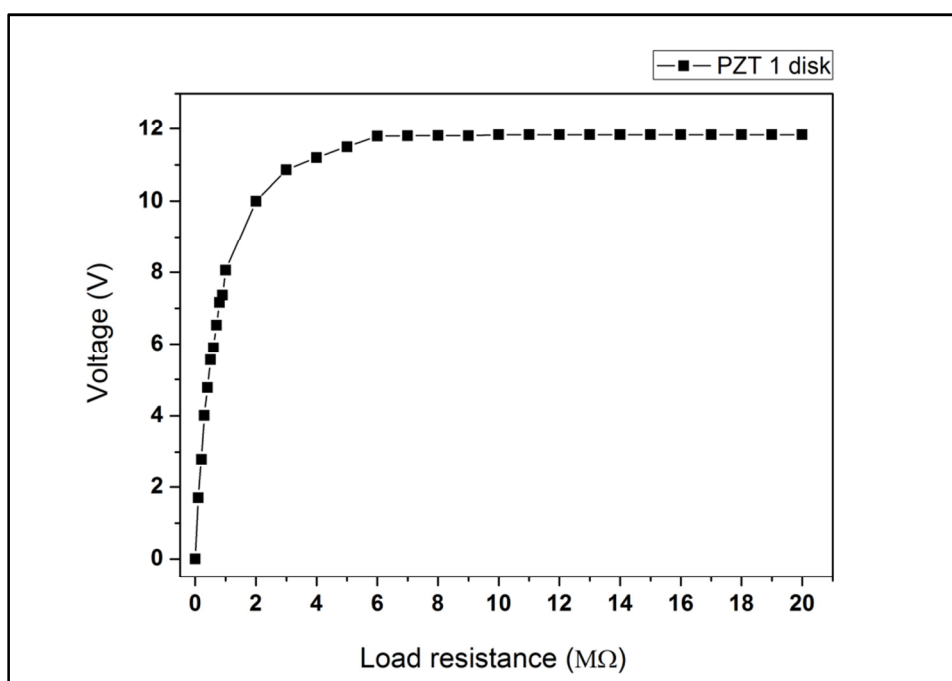
เมื่อพิจารณาผลจากการให้ความถี่เชิงกลแก่วัสดุไพโซโซลิดเทรคในรูปที่ 5.3 – 5.7 พบว่าเมื่อเพิ่มความถี่เชิงกล 2 Hz 3 Hz 4 Hz และ 5 Hz ตามลำดับ ทำให้ปริมาณแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ที่ความถี่ 5 Hz สามารถทำให้วัสดุไพโซโซลิดเทรคสร้างจำนวนแรงดันไฟฟ้าได้มากที่สุดเมื่อเทียบที่เวลาเท่ากัน

5.4 การเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก

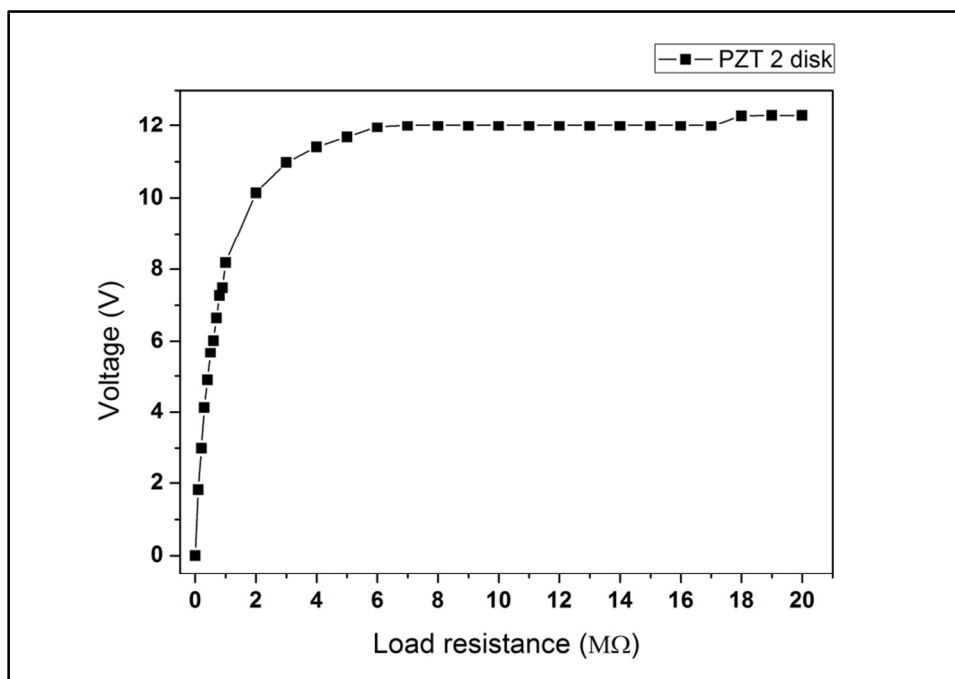
การทดลองนี้เป็นการออกแบบและทดลอง เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก ที่วางซ้อนกันตั้งแต่จำนวน 1 แผ่น - จำนวน 9 แผ่นวางซ้อนกัน

5.4.1 ผลของความต้านทานภายนอกที่มีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้า

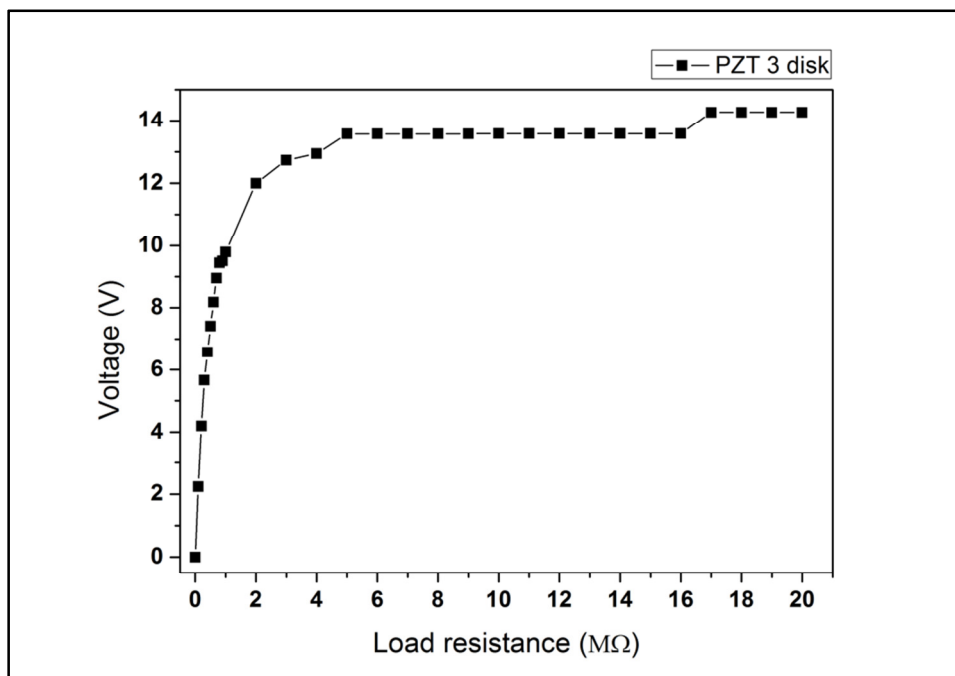
การทดลองนี้ให้แรงกดเชิงกล 375 N และความถี่เชิงกล 5 Hz แก่วสดุไพโซอิเล็กทริก โดยทดลองปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานภายนอก (Load resistance) ให้มีค่าต่างๆ กัน ตั้งแต่ 0 – 20 M Ω แล้ววัดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.3.3.1 ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.9 (1) - (9) ผลการทดลองมีรายละเอียดดังนี้



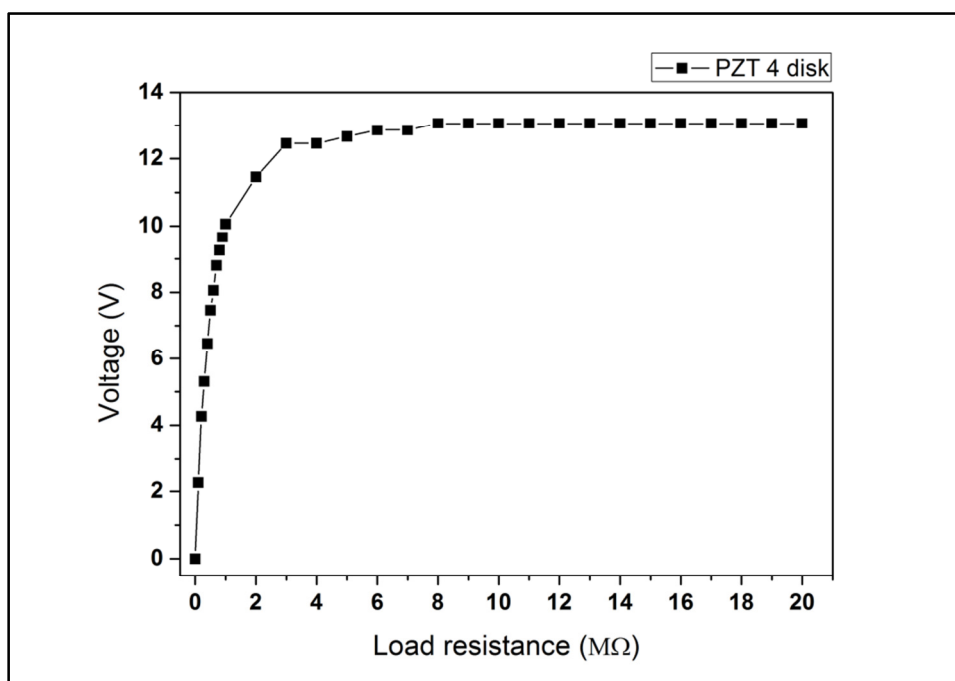
(1) วัสดุไพโซอิเล็กทริก 1 แผ่น



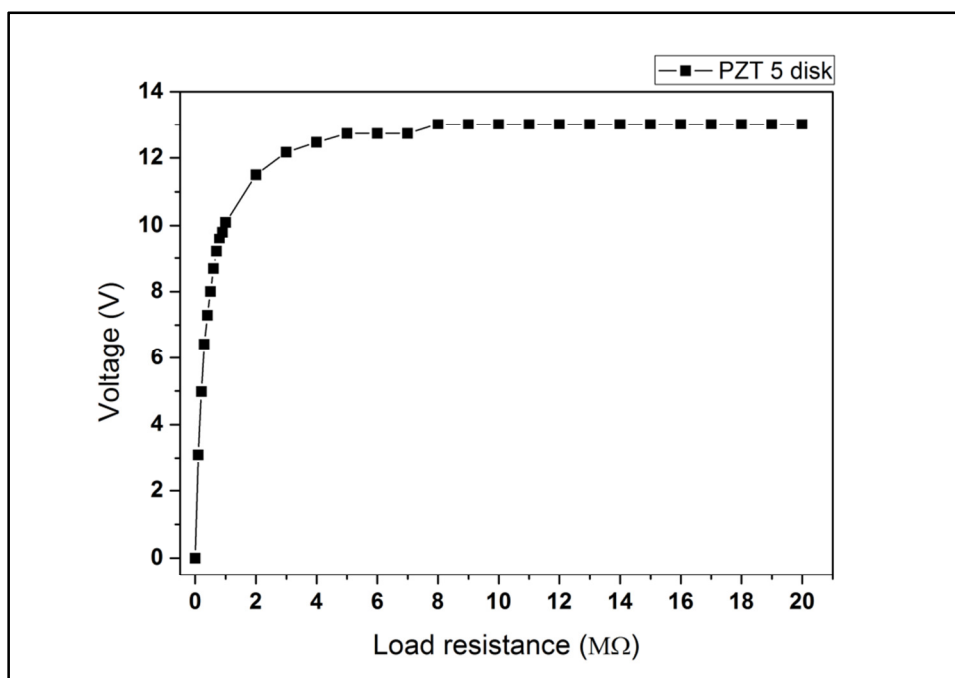
(2) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 2 แผ่นวางซ้อนกัน



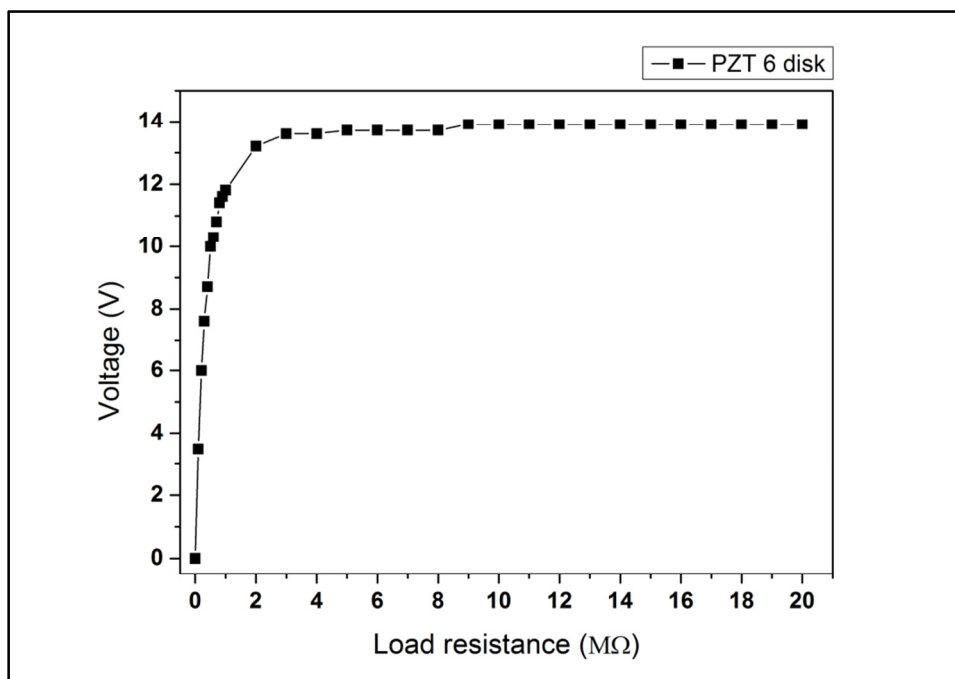
(3) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 3 แผ่นวางซ้อนกัน



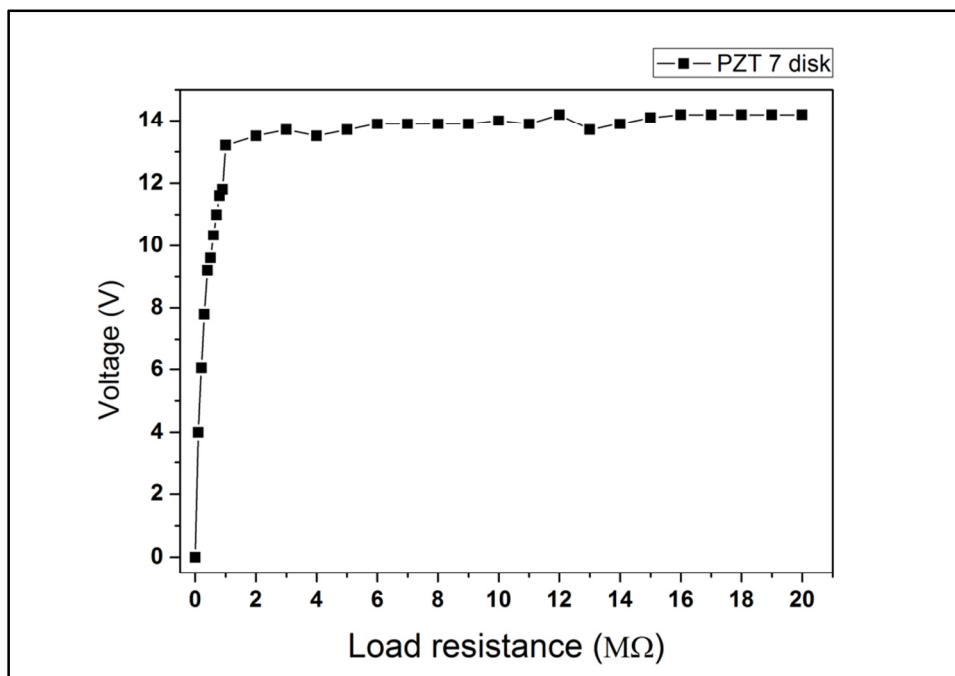
(4) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 4 แผ่นวางซ้อนกัน



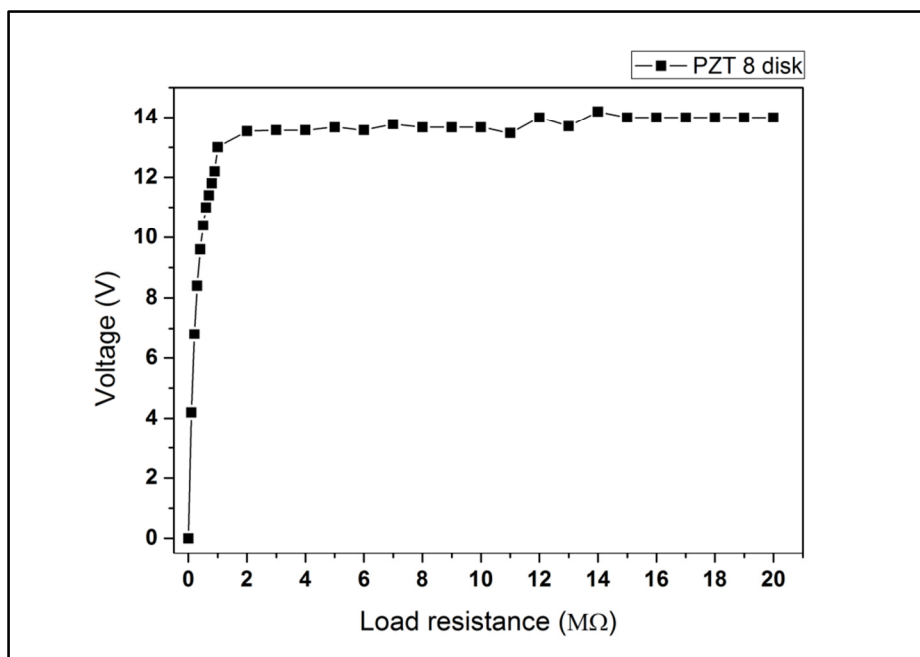
(5) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 5 แผ่นวางซ้อนกัน



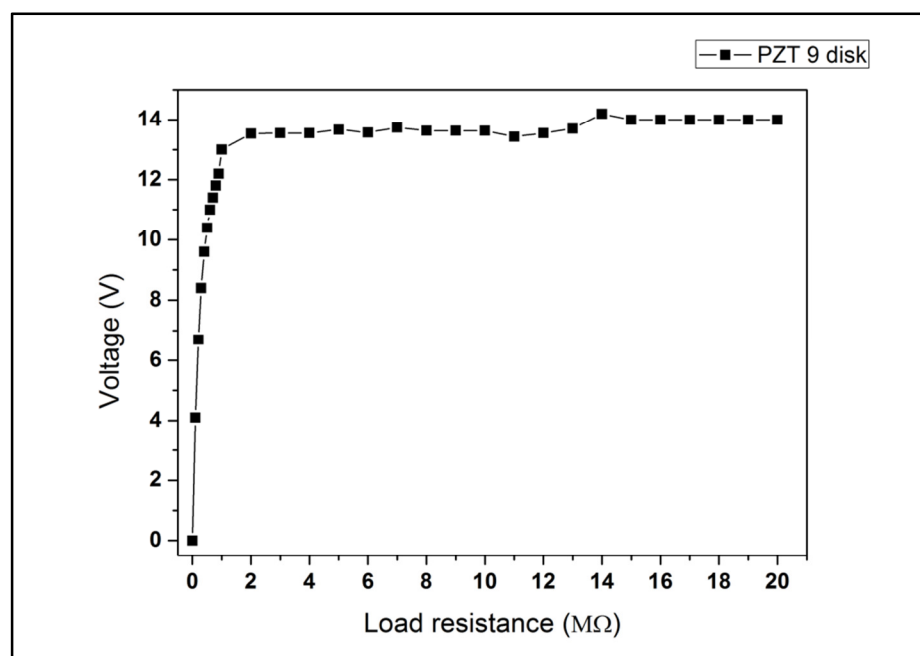
(6) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 6 แผ่นวางซ้อนกัน



(7) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 7 แผ่นวางซ้อนกัน



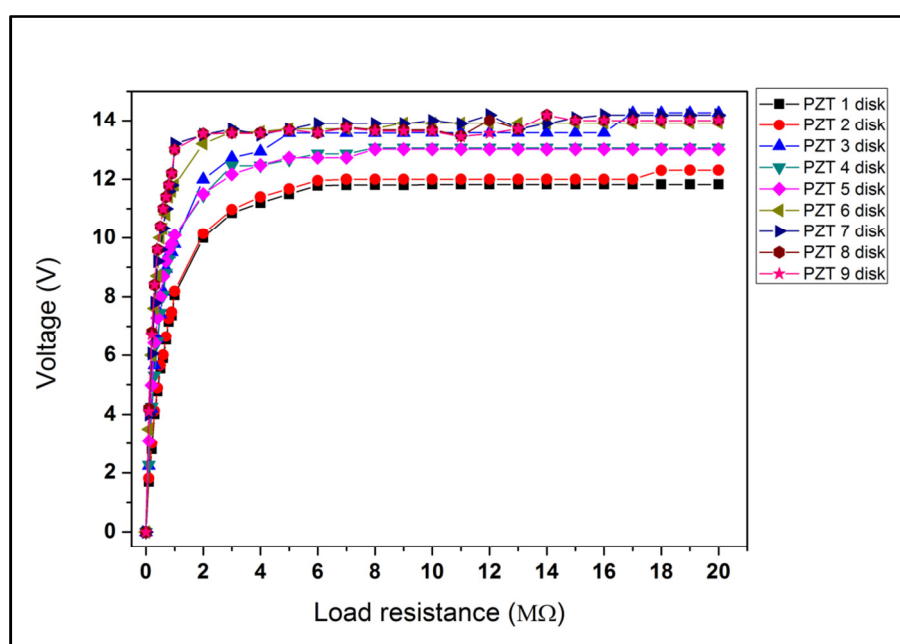
(8) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน



(9) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 9 แผ่นวางซ้อนกัน

รูปที่ 5.9 ความต้านทานภายนอกที่มีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

จากกราฟในรูปที่ 5. 9 (1) – (9) พบว่า ทุกๆ การวางซ้อนกันของวัสดุโพซิโออิเล็กทรอนิกส์จำนวน 1 แผ่น - จำนวน 9 แผ่นวางซ้อนกัน ค่าแรงดันไฟฟ้าจะแปรผันกับค่าความต้านทานภายนอกที่เปลี่ยนไป เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า กับค่าความต้านทานภายนอกได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงนำผลจากกราฟในรูปที่ 5.9 (1) – (9) มาเปรียบเทียบกับนำเสนอข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 5.10



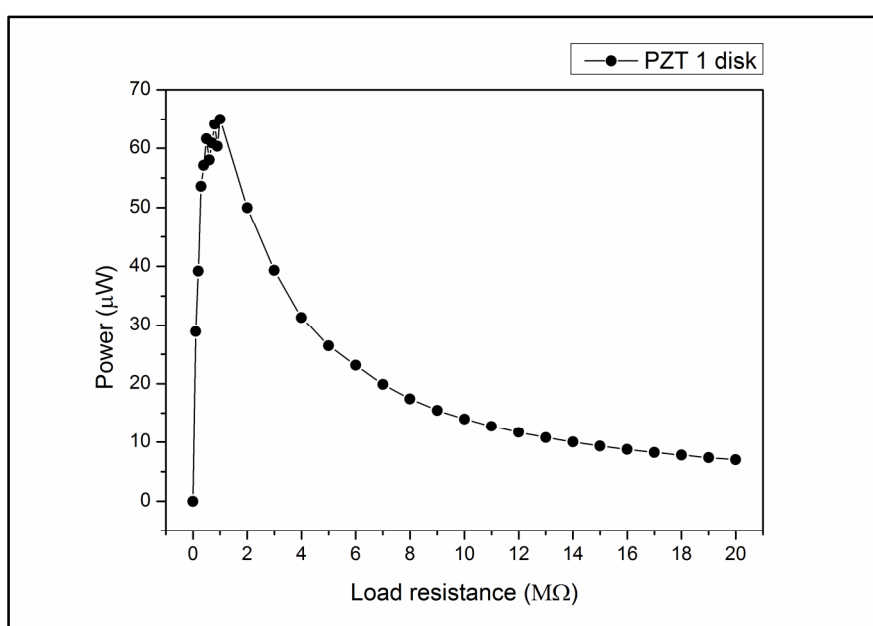
รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบความต้านทานภายนอกที่มีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้า
ของวัสดุโพซิโออิเล็กทรอนิกส์จำนวน 1 แผ่น - จำนวน 9 แผ่นวางซ้อนกัน

เมื่อนำมาพิจารณาในกราฟในรูปที่ 5.10 พบว่า เมื่อปรับค่าความต้านตั้งแต่ 0 – 20 $M\Omega$ แรงดันไฟฟ้าของวัสดุโพซิโออิเล็กทรอนิกส์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0 – 1 $M\Omega$ และเริ่มอิ่มตัวที่ค่าความต้านทานประมาณ 5 $M\Omega$ ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกๆ การวางซ้อนกันของวัสดุโพซิโออิเล็กทรอนิกส์ตั้งแต่จำนวน 1 แผ่น - จำนวน 9 แผ่นวางซ้อนกัน จากรูปที่ 5.9 (1) - (9) จะเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงกดเชิงกล 375 N และความถี่เชิงกล 5 Hz แก่วัสดุโพซิโออิเล็กทรอนิกส์ที่วางซ้อนกันจำนวน 1 แผ่น - จำนวน 9 แผ่นวางซ้อนกัน ที่ค่าความต้านทานภายนอก 1 $M\Omega$ ได้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 8.06 V 8.19 V 9.79 V 10.06 V 10.09 V 11.81 V 12.9 V 13 V และ 13 V ตาม ลำดับ จากผลของค่าแรงดันไฟฟ้าจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มจำนวนการวางซ้อนกันของวัสดุโพซิโออิเล็กทรอนิกส์ ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเป็นผลมาจากแรงกดและความถี่เชิงกลที่ให้แก่วัสดุมีค่าคงที่

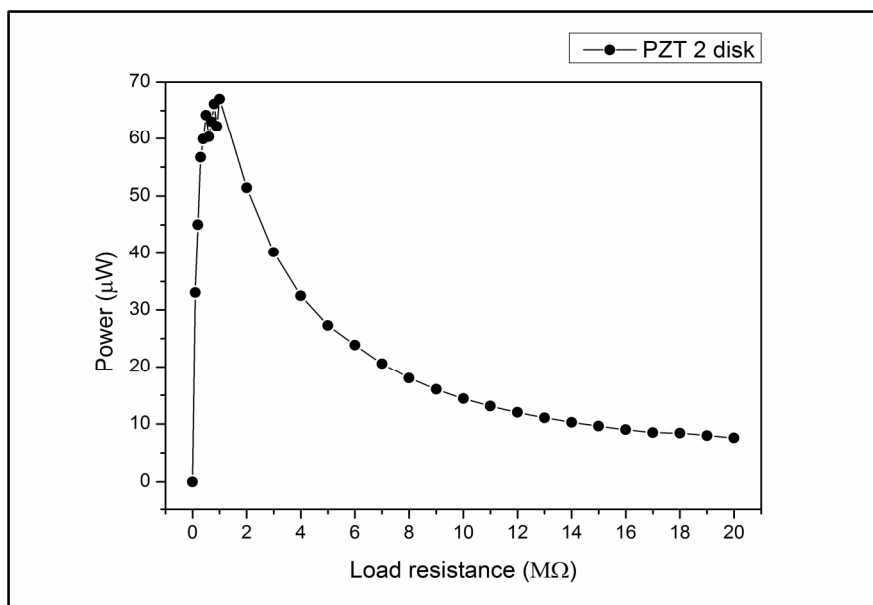
คือ 375 N และ 5 Hz ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทาน 1 M Ω มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริก ที่มีต่อค่าความต้านทานภายนอกต่างกันชัดเจนขึ้น จึงนำข้อมูลชุดเดียวกันคำนวณหา กำลังไฟฟ้าในหัวข้อที่ 5.4.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.4.2 ผลของความต้านทานภายนอกที่มีผลต่อการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด

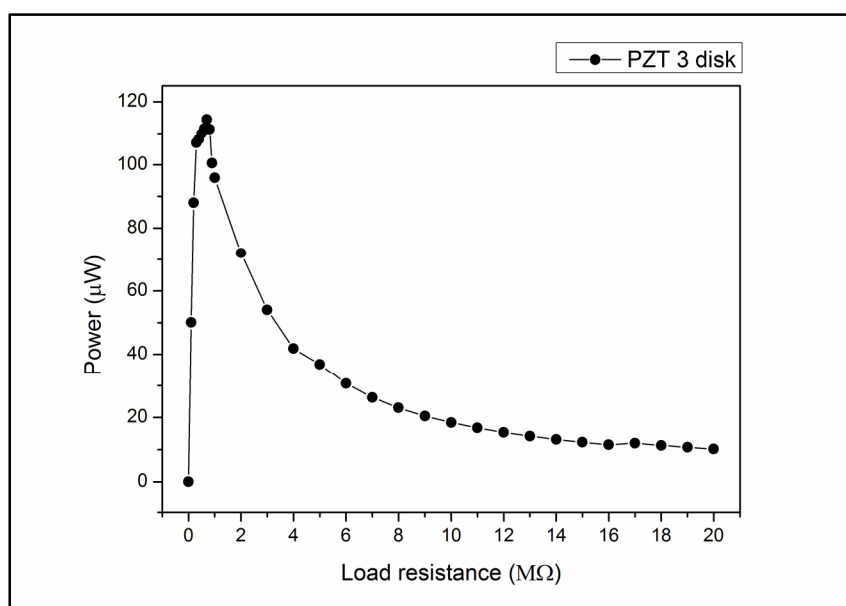
นำข้อมูลจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.5.1 คำนวณกำลังไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่วางซ้อนกัน จำนวน 1 แผ่น - จำนวน 9 แผ่นวางซ้อนกัน จากสมการ $P = \frac{V^2}{R_L}$ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.11 ซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.3.3.1



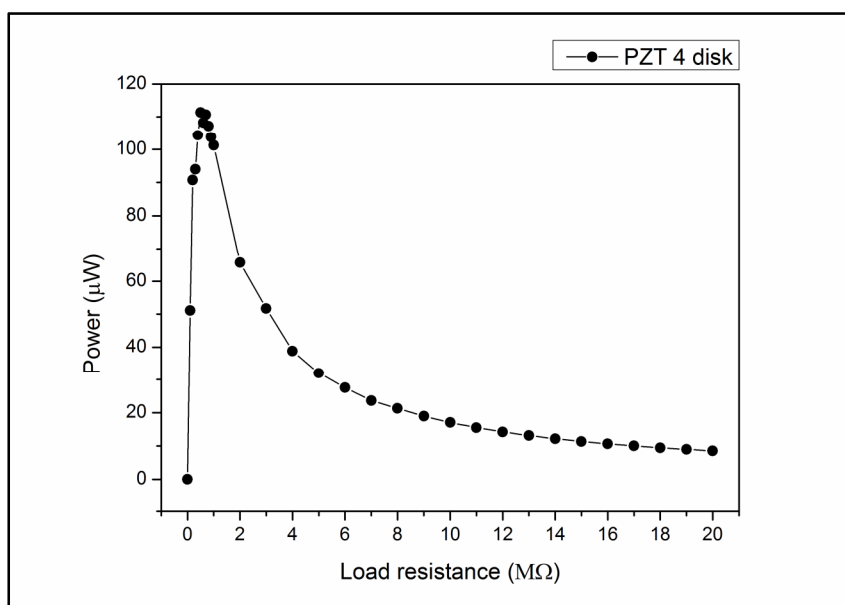
(1) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 1 แผ่นวางซ้อนกัน



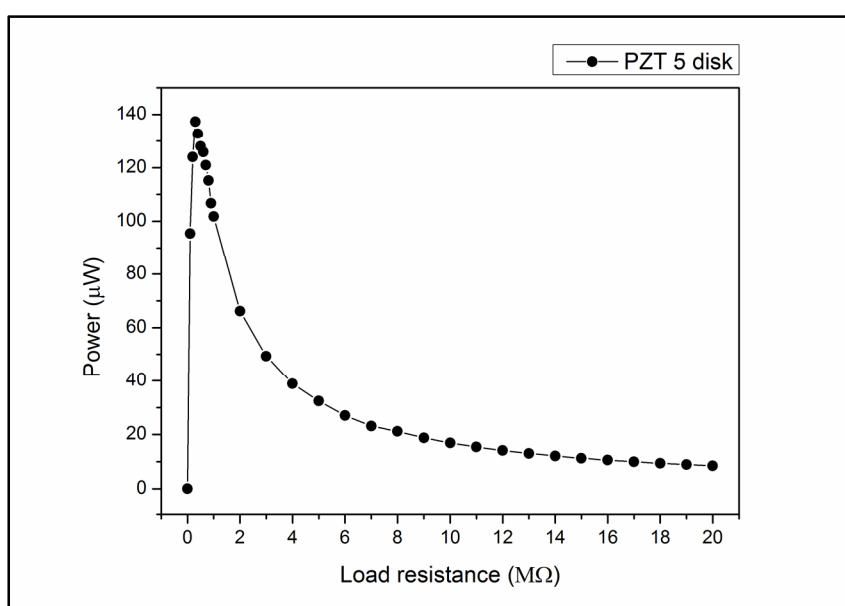
(2) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 2 แผ่นวางซ้อนกัน



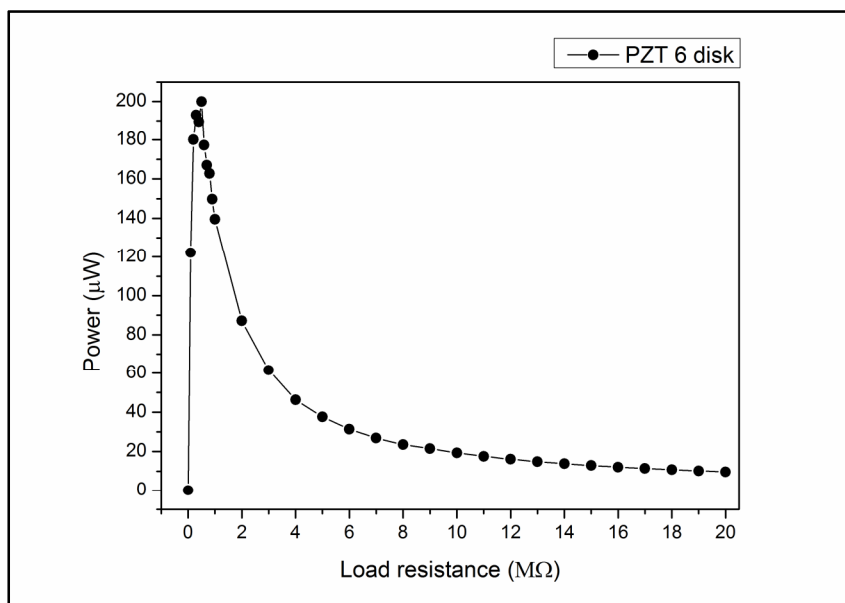
(3) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 3 แผ่นวางซ้อนกัน



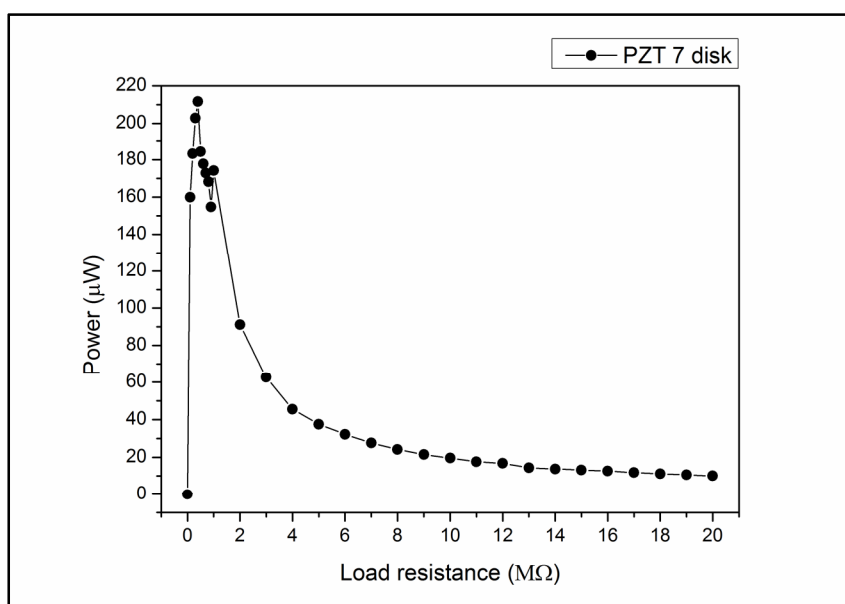
(4) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 4 แผ่นวางซ้อนกัน



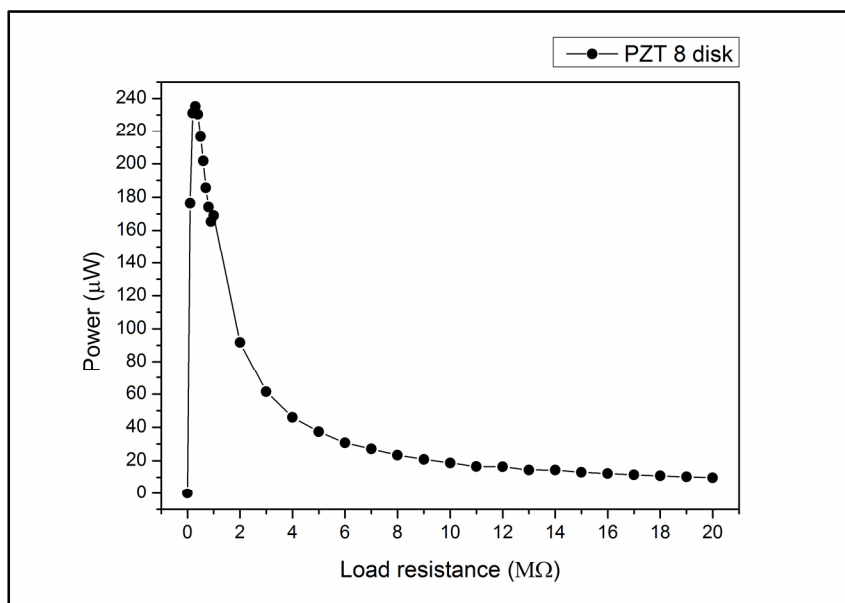
(5) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 5 แผ่นวางซ้อนกัน



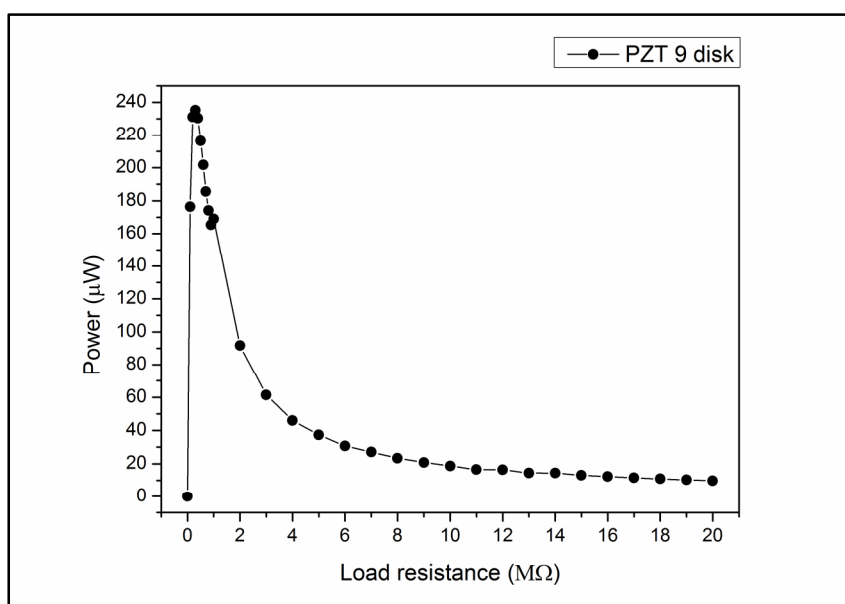
(6) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 6 แผ่นวางซ้อนกัน



(7) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 7 แผ่นวางซ้อนกัน



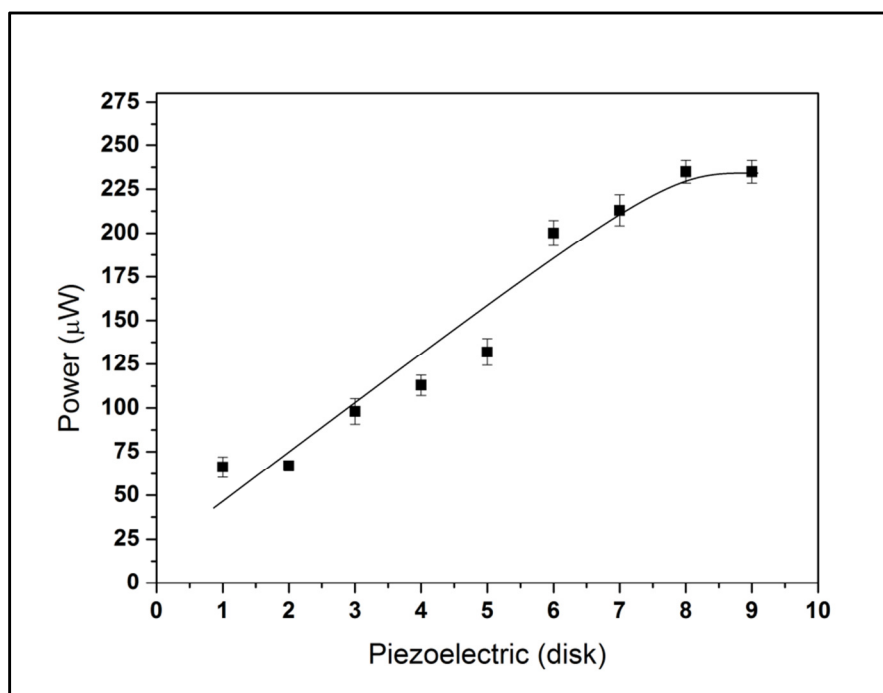
(8) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน



(9) วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 9 แผ่นวางซ้อนกัน

รูปที่ 5.11 ความต้านทานภายนอกที่มีผลต่อการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด

จากกราฟรูปที่ 5.11 (1) – (9) พบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริก เมื่อให้แรงกดเชิงกล 375 N และความถี่เชิงกล 5 Hz จะมีค่าสูงสุดเมื่อค่าความต้านทานภายนอก เท่ากับค่าความต้านทานภายในของวัสดุไพโซอิเล็กทริก ซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อที่ 3.8 และค่า กำลังไฟฟ้าจะมีค่าลงเรื่อยๆ เมื่อค่าความต้านทานภายนอกมีค่าสูงกว่าความต้านทานของวัสดุ พิจารณาผลการทดลองการวางเรียงซ้อนกันของวัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 1 แผ่น - จำนวน 9 แผ่นวางซ้อนกัน จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุดคือ 22.61 μW 67.01 μW 98 μW 110 μW 132 μW 200 μW 213 μW 235 μW และ 235 μW ตามลำดับ และที่ความต้านทานที่ทำให้เกิดการ ถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ 1 M 1 M 0.8 M 0.7 M 0.5 M 0.4 M 0.3 M และ 0.3 M Ω ตามลำดับ จากการคำนวณ พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นไพโซอิเล็กทริก ด้วยการวางเรียงซ้อนเป็นชั้น มีผลทำ ให้ความต้านทานภายในวัสดุมีค่าลดลง กำลังไฟฟ้าจึงมีค่าเพิ่มขึ้น นำค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จาก การคำนวณ ไปสร้างกราฟในรูปที่ 5.12 เพื่อเปรียบเทียบผลของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด จากการจัดวาง วัสดุไพโซอิเล็กทริก จำนวน 1 แผ่น - จำนวน 9 แผ่นวางซ้อนกัน

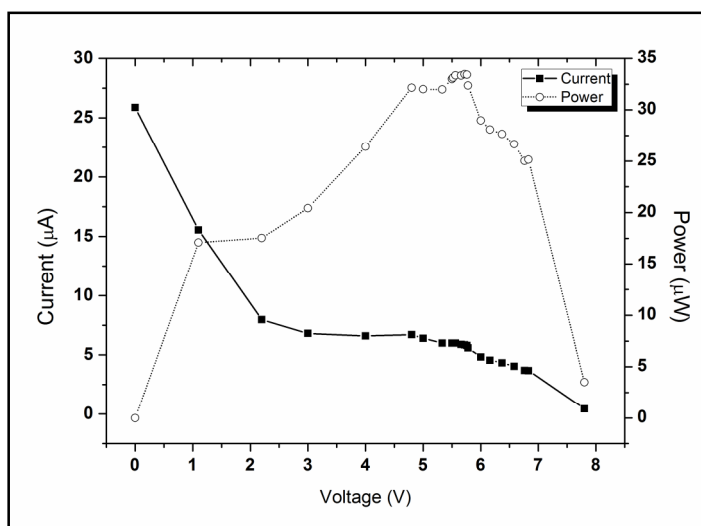


รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของวัสดุไพโซอิเล็กทริก
จำนวน 1 แผ่น - จำนวน 9 แผ่นวางซ้อนกัน

จากกราฟในรูปที่ 5.12 พบว่า กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนแผ่นวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลจากการเชื่อมต่อวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกในแบบขนาน มีผลทำให้ความต้านทานภายในวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกมีค่าลดลง กำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองและสอดคล้องกับสมการ (4.5) ที่วัสดุไพโอโซอิเล็กทริกวางซ้อนกัน 8 ชั้นกำลังไฟฟ้าจะเริ่มคงที่ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล มีขีดความสามารถในการให้แรงกดเชิงกล ซึ่งในขั้นนี้แรงกดเชิงกลมากที่สุดคือ 375 N ดังนั้นเมื่อเพิ่มจำนวนวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกมากกว่า 8 ชั้น อาจมีผลทำให้วัสดุไพโอโซอิเล็กทริกได้รับแรงกดลดลงและทำให้สร้างแรงดันไฟฟ้าได้น้อยลง ดังนั้น วัสดุไพโอโซอิเล็กทริกที่วางซ้อนกัน 8 ชั้น มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ 235 μW ที่ค่าความต้านทานภายนอก 300 $\text{k}\Omega$

5.4.3 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก (I-V curve)

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.4.2 พบว่า วัสดุไพโอโซอิเล็กทริกวางเรียงซ้อนกัน 8 ชั้น สามารถให้ค่ากำลังไฟฟ้าได้สูงสุด จึงจัดวางเรียงวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก 8 ชั้น ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์เพื่อเรียงกระแสให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และต่อขนานกับตัวต้านทานภายนอกที่มีค่าต่างตั้งแต่ 0 – 3 $\text{M}\Omega$ ให้แรงกดเชิงกล 375 N ความถี่เชิงกล 5 Hz เพื่อหาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.13 ซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.3.3.2

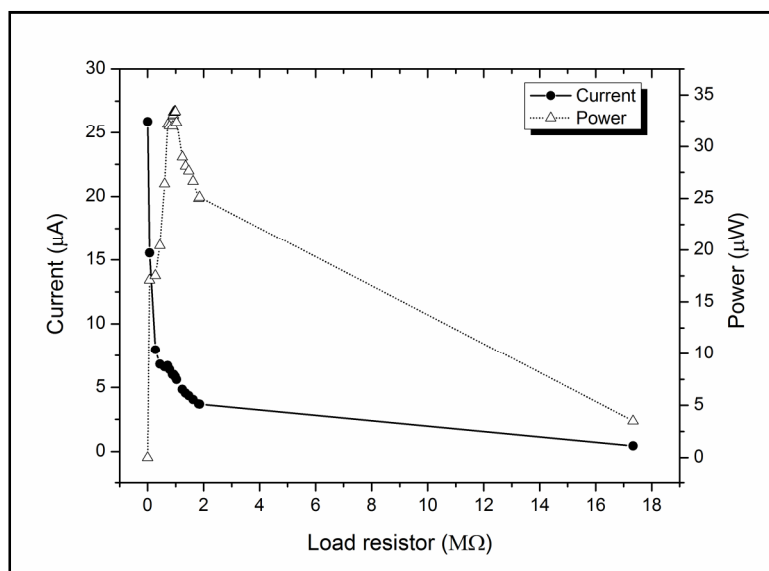


รูปที่ 5.13 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าเทียบกับแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกวางเรียงซ้อนกัน 8 ชั้น

จากรูปที่ 5.13 เมื่อต่อวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกกับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ผ่านวงจรบริดจ์ถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อปรับความต้านทาน $0\ \Omega$ มีผลทำให้ลัดวงจร (short circuit) กระแสไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดคือ $25.88\ \mu\text{A}$ และแรงดันไฟฟ้ามีค่า $0\ \text{V}$ เมื่อเพิ่มความต้านทานจะเห็นได้ว่า กระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง ในขณะที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อนำความต้านทานออกจากวงจร มีผลทำให้วงจรเปิด (open circuit) กระแสไฟฟ้ามีค่า $0\ \text{A}$ และแรงดันไฟฟ้ามีค่า $7.8\ \text{V}$ คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด พบว่า ที่ค่ากระแสไฟฟ้า $5.85\ \mu\text{A}$ และแรงดันไฟฟ้า $5.72\ \text{V}$ กำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ $33.47\ \mu\text{W}$

พิจารณาค่าความต้านทานภายนอกที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด จากสมการ

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{สอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.3.3.2) แสดงผลในรูปที่ 5.14}$$

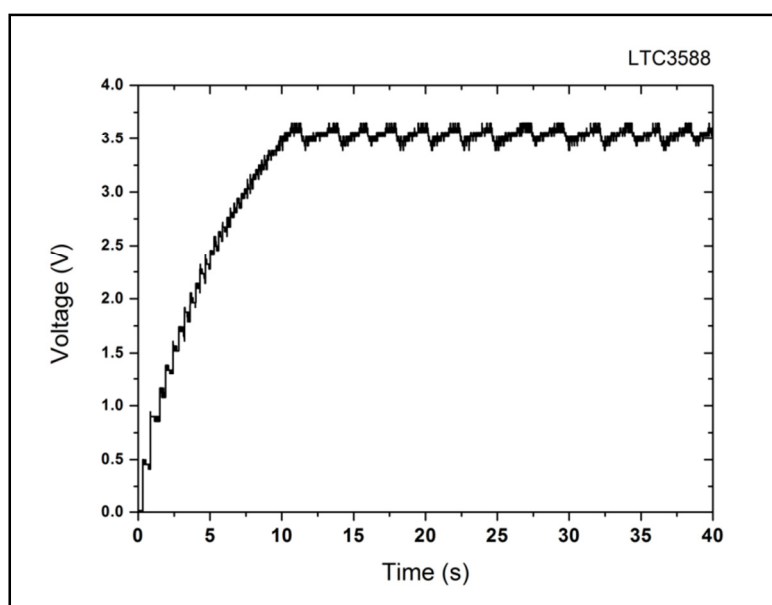


รูปที่ 5.14 กราฟความสัมพันธ์ของความต้านทานและกำลังไฟฟ้าเทียบกับกระแสไฟฟ้าของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกวางเรียงซ้อนกัน 8 ชั้น

จากรูปที่ 5.14 จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า วัสดุไพโอโซอิเล็กทริกที่วางเรียงซ้อนกัน 8 ชั้น สามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้ดีที่สุด เมื่อความต้านทานภายนอกมีค่า $1\ \text{M}\Omega$ โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้คือ $5.72\ \text{V}$ และค่ากระแสไฟฟ้าคือ $5.85\ \mu\text{A}$ ซึ่งบริเวณนี้เป็นช่วงที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ $33.47\ \mu\text{W}$ ภายใต้เงื่อนไขการให้แรงกดเชิงกล ด้วยชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนทางกล ที่มีค่าแรงกดเชิงกล $375\ \text{N}$ และความถี่เชิงกล $5\ \text{Hz}$

5.4.4 ผลของวงจรที่ใช้ในแรงดันไฟฟ้าต่ำและการประจุแบตเตอรี่

- วงจร LTC3588



รูปที่ 5.15 แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจร LTC3588

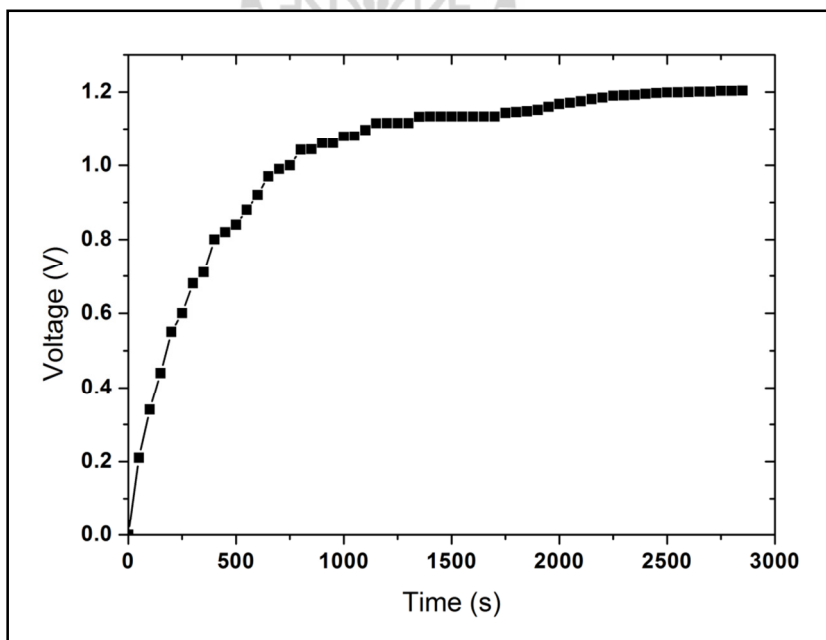
จากกราฟรูปที่ 5.15 เมื่อให้แรงกดเชิงกล 375N และความถี่เชิงกล 5 Hz แก้ววัสดุไพโซอิเล็กทริกที่เรียกซ้อนกัน 8 ชั้น พบว่า แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากวัสดุไพโซอิเล็กทริกถูกส่งไปยังวงจร LTC3588 วงจรจะใช้เวลา 10 วินาที ในการประจุไฟฟ้าจาก 0 V จนถึง 3.5 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าไว้ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจร LTC3588 เกิดระลอกของแรงดันไฟฟ้า (ripple voltage) เมื่อนำไปต่อขนานกับแบตเตอรี่รีซินดิกเกิลเมททัลไฮไดร (NiMH) 1.2 V 300 mAh เพื่อประจุไฟฟ้า พบว่า ไม่สามารถประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ได้ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ได้จากวงจร LTC3588 มีค่าต่ำมาก จึงไม่สามารถประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ได้

- วงจรเอสซีอาร์ (SCR)

จากการทดลองนำวงจร SCR ต่อเข้ากับวัสดุไพโซอิเล็กทริกวางเรียงซ้อนกัน 8 ชั้น เลือกตัวต้านทานด้วยการสวิตช์ $S_1 - S_8$ จากนั้นให้แรงกดเชิงกลแก่วัสดุ 375 N ความถี่ 5 Hz วงจร SCR จะรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก จากนั้นแรงดันจะถูกส่งเข้าที่ขาเกตและกระตุ้นให้ SCR ทำงาน วัดค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรด้วยคิจิตอลมัลติมิเตอร์พบว่า แรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าน้อยมาก เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากไพโซอิเล็กทริกมีค่าต่ำ จึงไม่สามารถทำให้วงจร SCR ทำงานได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อต่อแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลเมทัลไฮไดร (NiMH) 1.2 V 300 mAh จึงไม่สามารถประจุเข้าแบตเตอรี่ได้

- วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

ผลการทดลองเป็นการนำวัสดุไพโซอิเล็กทริกวางเรียงซ้อนกัน 8 ชั้น ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ เพื่อประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลเมทัลไฮไดร (NiMH) 1.2 V 300 mAh ให้แรงกดเชิงกลแก่วัสดุ 375 N ความถี่ 5 Hz แสดงผลการประจุแบตเตอรี่ในรูปที่ 5.16



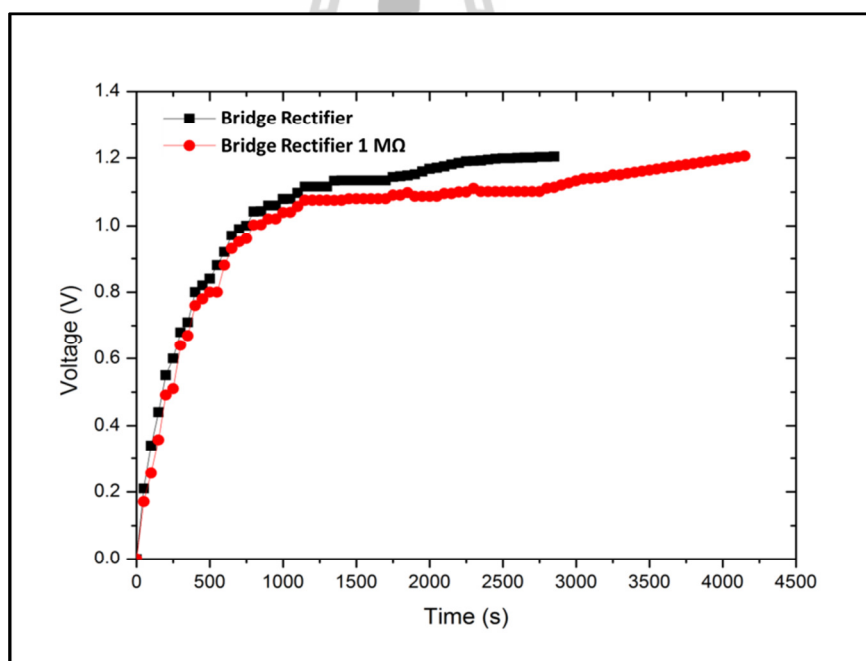
รูปที่ 5.16 การประจุแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ NiMH 1.2V 300 mAh
ด้วยวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

จากกราฟรูปที่ 5.16 แสดงแรงดันไฟฟ้าเทียบกับระยะเวลาในการประจุเข้า แบตเตอรี่พบว่า สามารถประจุไฟฟ้าเข้าภายในแบตเตอรี่ NiMH 1.2 V 300 mAh ได้จนเต็ม ซึ่งใช้เวลาในการประจุไฟฟ้าประมาณ 2700 วินาทีหรือประมาณ 45 นาที

- วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ต่อขนานกับความต้านทาน 1 M Ω

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.4.3 พบว่า ความต้านทาน 1 M Ω มีผลทำให้วัสดุมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด จึงนำความต้านทาน 1 M Ω ต่อขนานกับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ และนำไปทดลองประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่

เปรียบเทียบการประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ NiMH 1.2V 300 mAh ด้วยวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (กำหนดให้เรียกว่า Bridge Rectifier) และวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ต่อขนานกับความต้านทาน 1 M Ω (กำหนดให้เรียกว่า Bridge Rectifier 1 M Ω) ผลการเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 การประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ NiMH 1.2V 300 mAh
ด้วย Bridge Rectifier และ Bridge Rectifier 1 M Ω

จากผลการทดลองประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ NiMH 1.2V 300 mAh ด้วย Bridge Rectifier และ Bridge Rectifier 1 M Ω พบว่า การประจุแรงดันไฟฟ้าด้วย Bridge Rectifier ใช้เวลาในการประจุไฟฟ้าจนเต็ม ประมาณ 2700 วินาทีหรือประมาณ 45 นาที ซึ่งน้อยกว่า Bridge Rectifier 1 M Ω ซึ่งใช้เวลาในการประจุไฟฟ้าจนเต็ม ประมาณ 4300 วินาทีหรือประมาณ 70 นาที การที่ Bridge Rectifier 1 M Ω ประจุไฟฟ้าได้น้อยกว่า Bridge Rectifier อาจมีสาเหตุมาจากการปรับค่าความต้านทานภายนอกในหัวข้อที่ 5.4.3 มีความละเอียดของตัวต้านทานน้อยเกินไป จึงไม่สามารถหาความต้านทานภายนอกที่เหมาะสม ที่ทำให้วัสดุโพสิโออิเล็กทรอนิกส์ถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด เมื่อนำมาประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่จึงใช้เวลานาน ดังนั้นวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier) เหมาะสมสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ ในการประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่

เมื่อนำแบตเตอรี่ NiMH 1.2V 300 mAh จำนวน 1 ก้อน ที่ประจุไฟฟ้าจนเต็ม ถ่ายประจุไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีแรงดันไม่เกิน 1.2V ซึ่งได้ทดลองกับเครื่องคิดเลข และนาฬิกาข้อมือ พบว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถทำงานได้



5.5 สรุป

ในบทนี้ได้สร้างชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล ที่ให้แรงกดเชิงกลได้ในช่วง 50 – 400 N และให้ความถี่เชิงกลได้ในช่วง 0.017 – 5 Hz สามารถกำหนดค่าแรงกดเชิงกล ด้วยวิธีการกำหนดแรงดันแก๊สที่จ่ายไปยังกระบอกสูบ (Gas pressure) โดยการปรับเกจปรับแรงดันแก๊ส และคำนวณแรงกดเชิงกลที่ปลายกระบอกสูบนิวเมติกส์ ด้วยทฤษฎีของปาสคาล (Pascal's Law) พบว่า สามารถกำหนดแรงกดเชิงกลเพื่อส่งไปยังปลายกระบอกสูบที่ค่า 75 N 125 N 225 N 300 N และ 375 N ตามลำดับ และกำหนดค่าความถี่เชิงกลได้จากการปรับระยะห่างของเซ็นเซอร์ 1 (S_1) และเซ็นเซอร์ 2 (S_2) โดยกำหนดให้เซ็นเซอร์ 1 (S_1) เป็นจุดคงที่ แล้วปรับระยะเซ็นเซอร์ 2 (S_2) ให้ห่างจากเซ็นเซอร์ 1 (S_1) พบว่าเมื่อ S_1 และ S_2 มีระยะห่างกัน 90 mm 63 mm 45 mm และ 33 mm สามารถให้ความถี่เชิงกล 2 Hz 3 Hz 4 Hz และ 5 Hz ตามลำดับ เมื่อนำชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกลไปทดสอบให้แรงกดและความถี่เชิงกล กับวัสดุโพธิโซอิเล็กทริก 1 แผ่น พบว่าเมื่อให้แรงกดเชิงกล 75 N 125 N 225 N 300 N และ 375 N และความถี่เชิงกล 2Hz 3Hz 4Hz และ 5Hz แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของวัสดุโพธิโซอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่ม เมื่อแรงกดและความถี่เชิงกลเพิ่มขึ้นตามลำดับ และที่ค่าแรงกดเชิงกล 375 N และความถี่เชิงกล 5 Hz วัสดุโพธิโซอิเล็กทริกจะสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีค่าสูงสุด คือ 13.70 V ซึ่งการทดสอบนี้สอดคล้องกับสมการการเกิดแรงดันไฟฟ้า และปริมาณแรงดันไฟฟ้ามีจำนวนมากที่สุดเมื่อความถี่เชิงกลมีค่า 5 Hz ซึ่งชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกลที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น มีความถี่เชิงกลสูงสุด 5 Hz เท่านั้นไม่สามารถเพิ่มความถี่เชิงกลแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวัสดุโพธิโซอิเล็กทริกได้อีก จากนั้นจึงทำการทดลองเพิ่มจำนวนวัสดุโพธิโซอิเล็กทริก ด้วยการวางซ้อนกันหลายชั้นในแบบขนาน ตั้งแต่จำนวน 2 แผ่น - จำนวน 9 แผ่นวางซ้อนกัน ให้แรงกดเชิงกล 375 N และความถี่เชิงกล 5 Hz พบว่า จำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน จะเกิดกำลังไฟฟ้ามากที่สุด เนื่องจากการเพิ่มจำนวนแผ่นวางซ้อนกันในแบบขนาน มีผลทำให้ความต้านทานภายในวัสดุโพธิโซอิเล็กทริกมีค่าลดลง กำลังไฟฟ้าจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้สามารถเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าได้โดยที่แรงกดและความถี่เชิงกลมีค่าคงที่ จากนั้นนำวัสดุโพธิโซอิเล็กทริกจำนวน 8 แผ่นวางซ้อนกัน ต่อกับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ ซึ่งต่อกับความต้านทานภายนอก ให้แรงกดเชิงกล 375 N ความถี่เชิงกล 5 Hz วัสดุจะสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับส่งไปยังวงจรและถูกเรียงกระแสให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและผ่านความต้านทานภายนอก พบว่าวัสดุโพธิโซอิเล็กทริกสามารถให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความต้านทานภายนอก 1 $M\Omega$ ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 5.72 V ค่ากระแสไฟฟ้าสลับ 5.85 μA และกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ 33.47 μW เมื่อนำไปเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าด้วยวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ เพื่อประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลเมทัลไฮไดร 1.2 V 300 mAh ด้วยวงจร LTC3588 วงจรSRC และวงจรเรียงกระแสเต็ม

คลื่นแบบบริดจ์ พบว่า วงจรที่สามารถประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ได้ คือวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ ซึ่งใช้เวลาในการประจุแบตเตอรี่ NiMH 1.2 V 300 mAh จำนวน 1 ก้อน จนเต็มใช้เวลาประมาณ 45 นาที เมื่อนำไปใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก พบว่าสามารถทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานได้



บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาแรงกดและความถี่เชิงกลที่มีค่าไม่สูงมากนัก เป็นแหล่งพลังงานเชิงกลสูญเสียที่มีในสิ่งแวดล้อมทั่วไป ทำการจำลองแรงกดและความถี่เชิงกล โดยออกแบบและสร้างชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล ที่สามารถให้แรงกดในช่วง 50 – 400 N และให้ความถี่เชิงกลในช่วง 0.017 – 5 Hz จากนั้นทำการทดลองศึกษาผลกระทบของแรงกดและความถี่เชิงกลที่ค่าต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก ทำการทดลองหาความต้านทานภายในของวัสดุไพโซอิเล็กทริก ออกแบบการจัดวางวัสดุเพื่อนำไปเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ ซึ่งการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าว สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปรายละเอียดต่อไปนี้

ในส่วนการออกแบบและสร้างชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล ให้แรงกดเชิงกลได้ในช่วง 50 – 400 N และให้ความถี่เชิงกลได้ในช่วง 0.017 – 5 Hz นั้น สามารถกำหนดค่าแรงกดเชิงกลด้วยวิธีการกำหนดแรงดันแก๊สที่จ่ายไปยังกระบอกสูบ (Gas pressure) โดยการปรับเกจปรับแรงดันแก๊ส และคำนวณแรงกดเชิงกลที่ปลายกระบอกสูบนิวเมติกส์ ด้วยทฤษฎีของปาสคาล (Pascal's Law) พบว่า สามารถกำหนดแรงกดเชิงกลเพื่อส่งไปยังปลายกระบอกสูบที่ค่า 75 N 125 N 225 N 300 N และ 375 N ตามลำดับ และกำหนดค่าความถี่เชิงกลได้จากการปรับระยะห่างของเซ็นเซอร์ 1 (S_1) และเซ็นเซอร์ 2 (S_2) โดยกำหนดให้เซ็นเซอร์ 1 (S_1) เป็นจุดคงที่ แล้วปรับระยะเซ็นเซอร์ 2 (S_2) ให้ห่างจากเซ็นเซอร์ 1 (S_1) พบว่าเมื่อ S_1 และ S_2 มีระยะห่างกัน 90 mm 63 mm 45 mm และ 33 mm สามารถให้ความถี่เชิงกล 2 Hz 3 Hz 4 Hz และ 5 Hz ตามลำดับ และได้นำชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกลไปทดสอบให้แรงกดและความถี่เชิงกลแก่วัสดุไพโซอิเล็กทริก พบว่าสามารถตอบโจทย์สมมติฐานได้ดังนี้

1. ถ้าเพิ่มแรงกดเชิงกลและความถี่ในการกดเชิงกลแก่วัสดุไพโซอิเล็กทริกแล้ว จะทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อให้แรงกดเชิงกล 75 N 125 N 225 N 300 N และ 375 N และความถี่เชิงกล 2 Hz 3 Hz 4 Hz และ 5 Hz แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของวัสดุไพโซอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่ม เมื่อแรงกดและความถี่เชิงกลเพิ่มขึ้นตามลำดับ และที่ค่าแรงกดเชิงกล 375 N และความถี่เชิงกล 5 Hz วัสดุไพโซอิเล็กทริกจะสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีค่าสูงสุด คือ 13.70 V

ซึ่งการทดสอบนี้สอดคล้องกับสมการการเกิดแรงดันไฟฟ้า และปริมาณแรงดันไฟฟ้ามีจำนวนมากที่สุดเมื่อความถี่เชิงกลมีค่า 5 Hz

2. การเพิ่มจำนวนแผ่นวัสดุโพซิโอดีเล็กทรอนิกส์ด้วยการวางเรียงซ้อนกันเป็นชั้น มีผลทำให้กำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นและสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าเพื่อประจุในแบตเตอรี่ได้ ในการทดลองนี้ใช้ชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกลในการทดลอง โดยเพิ่มจำนวนวัสดุโพซิโอดีเล็กทรอนิกส์ด้วยการวางซ้อนกันหลายชั้นในแบบขนาน ให้แรงกดเชิงกล 375 N และความถี่เชิงกล 5 Hz คงที่ จากการทดลองพบว่า ที่ขีดจำกัดของชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล วัสดุโพซิโอดีเล็กทรอนิกส์จำนวน 8 แผ่นที่วางซ้อนกัน จะเกิดกำลังไฟฟ้ามากที่สุด เนื่องจากการเพิ่มจำนวนแผ่นวางซ้อนกันในแบบขนาน มีผลทำให้ความต้านทานภายในวัสดุโพซิโอดีเล็กทรอนิกส์มีค่าลดลง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นและพื้นที่ผิว (A) ในการเกิดประจุไฟฟ้ามีจำนวนเพิ่มขึ้นจึงทำให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้นสามารถอธิบายจากสมการ $I = \int Q dt$ โดยที่ $Q = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A V}{d}$ เมื่อ A คือพื้นที่ผิวในการเกิดประจุไฟฟ้า Q คือประจุไฟฟ้า และเมื่อนำไปต่อกับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ ที่ต่อกับความต้านทานภายนอก ให้แรงกดเชิงกล 375 N ความถี่เชิงกล 5 Hz วัสดุจะสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับส่งไปยังวงจรและถูกเรียงกระแสให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและผ่านความต้านทานภายนอก พบว่าวัสดุโพซิโอดีเล็กทรอนิกส์สามารถให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความต้านทานภายนอก $1 \text{ M}\Omega$ ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 5.72 V ค่ากระแสไฟฟ้าสลับ $5.85 \mu\text{A}$ และกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ $33.47 \mu\text{W}$ เมื่อนำไปเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า เพื่อประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลเมทัลไฮไดร 1.2 V 300 mAh ใช้เวลาในการประจุแบตเตอรี่จนเต็มประมาณ 45 นาที นำแบตเตอรี่ที่ประจุไฟฟ้าจนเต็ม ไปใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีแรงดันไม่เกิน 1.2 V พบว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถทำงานได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ชุดกำเนิดแรงดันสะท้อนเชิงกลที่ให้แรงกดและความถี่เชิงกลที่สร้างขึ้นนี้ สามารถนำไปใช้ตรวจสอบคุณสมบัติการเกิดแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่ผลิตขึ้นใหม่ได้เป็นอย่างดี
2. ออกแบบและพัฒนาการจัดวางเรียงวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่เหมาะสม จะช่วยเพิ่มพลังงานไฟฟ้าในการเก็บเกี่ยวได้
3. พัฒนาวงจรไฟฟ้าที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยวพลังงาน จะทำให้ประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ได้ดีขึ้นและมีการสูญเสียของพลังงานน้อยลง



รายการอ้างอิง

- Ahmad, R., Hashim, M.H. (2011). **Development of energy harvesting device using piezoelectric material**. IEEE Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2011 4th International Conference on, 19-21 April 2011, Kuala Lumpur.
- Arms, S.W., Townsend, C.P., Churchill, D.L., Galbreath, J.H. and Mundell, S.W. (2005). **Power management for energy harvesting wireless sensors**. Proc. Smart Structures and Materials Conf.; Proc. SPIE5763267-75
- Churchill, D.L., Hame, I. M.J., Townsend, C.P. and Arms, S.W. (2003). **Strain energy harvesting for wireless sensor networks**. Proc. Smart Struct. and Mater. Conf. Proc. SPIE5055319-27
- Mohammadi, F., Khan, A. and Cass, R.B. (2003). **Power generation from piezoelectric leadzirconate titanate fiber composites**. Proc. Materials Research Symp.p 736
- Pinkston, C.S. (2005). **Investigation and characterization of a high energy piezoelectric pulse generator**. IEEE Pulsed Power Conference.
- Shenck, N.S., and Paradiso, J.A. (2001). **Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics**. IEEE Micro2130-42.
- Sodano, H.A., Park, G. and Inman, D.J. (2004a). **Estimation of Electric charge output for piezoelectric energy harvesting**. Blackwell Publishing, 40:49-58
- Sodano, H.A., Lloyd, J. and Inman, D.J. (2004b). **An experimental comparison between several active composite actuators for power generation**. Proc. Smart Structures and Materials Conf.; Proc. SPIE5390370-8
- Sodano, H.A., Magliula, E.A., Park, G., Inman, D.J.(2003). **Electric power generation using piezoelectric devices**. Thirteenth International Conference on Adaptive Structures and Technologies.
- Sodano, H.A., Inman, D.J. and Park, G. (2005a). **Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries**. J. Intell. Mater. Syst. Struct. 16799-807

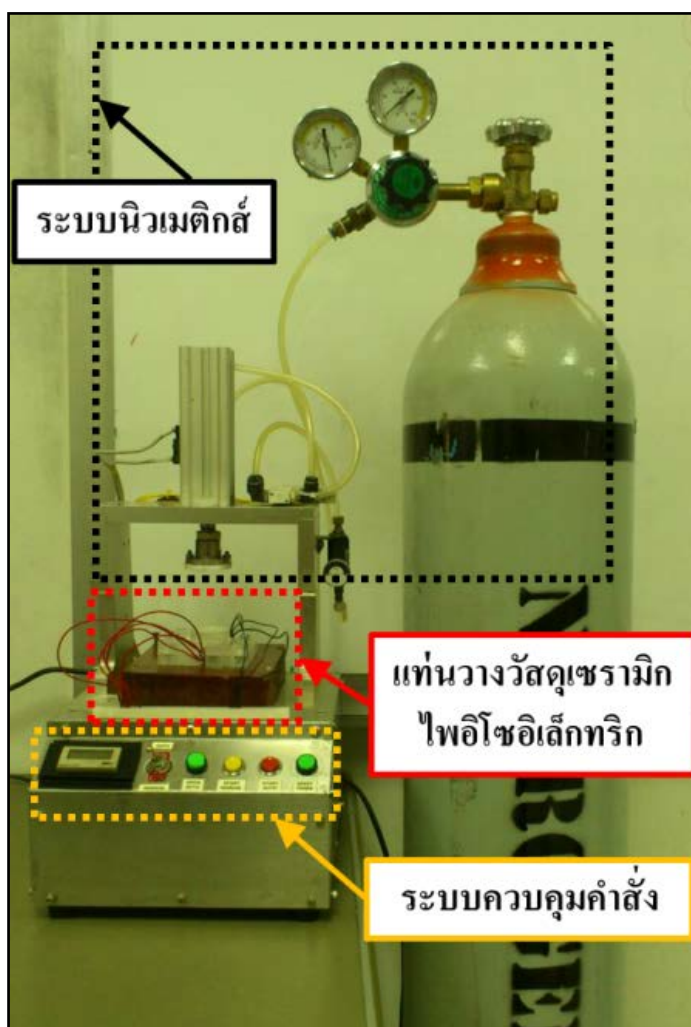
- Sodano, H.A., Inman, D.J. and Park, G. (2005b). **Generation and storage of electricity from power harvesting devices**. J. Intell. Mater. Syst. Struct. 1667–75
- Taunaumang, H. and Guy. I.L., (1994). **Electromechanical properties of 1-3 piezoelectric ceramic/piezoelectric polymer composite**. J.Appl Phys., Vol. 76, pp.484-489”
- Wu, W.J., Wickenheiser, A.M., Reissman, T., Garcia, E. (2008). **Modeling and experimental verification of synchronized discharging techniques for boosting power harvesting from piezoelectric transducers**. Smart Mater. Struct. 18, 055012.



ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้งานชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 1 ชุดกำเนิดแรงดันสะท้อนเชิงกล

ส่วนประกอบของชุดกำเนิดแรงดันสะท้อนเชิงกล

1. ระบบนิวเมติกส์ ทำหน้าที่ ควบคุมแรงในการกดเชิงกล
2. ระบบควบคุมกำลัง ทำหน้าที่ ควบคุมการทำงานมีระบบการทำงาน 2 แบบ คือ
 - ระบบการทำงานแบบ AUTO
 - ระบบการทำงานแบบ MANUAL
3. แผ่นวางวัสดุเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกใช้ทดลองกับวัสดุที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 mm หนา 1 mm (แผ่นวางสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามรูปทรงของวัสดุไฟโอโซอิเล็กทริก)

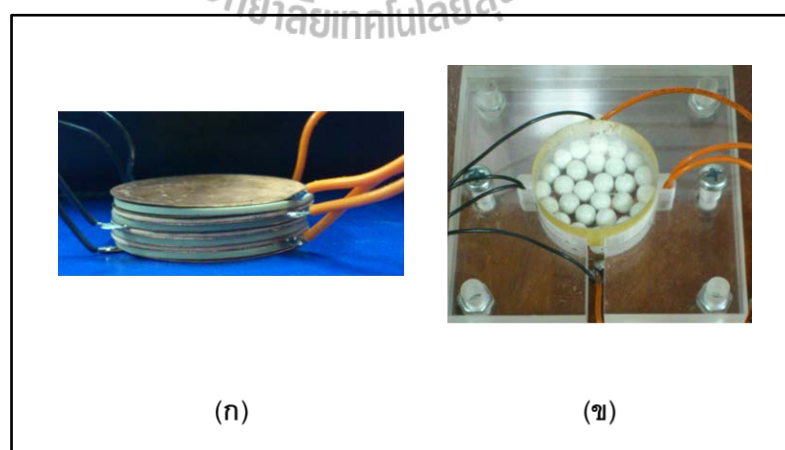
วิธีการใช้งาน

การเตรียมอุปกรณ์

1. วัสดุไพโอโซอิเล็กทริกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 mm หนา 1 mm จำนวนตามต้องการ
2. แผ่นทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 mm หนาประมาณ 0.1mm บัดกรีสายไฟ
ดังรูปที่ 2 (ก)
3. ลูกบอลพลาสติกทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm จำนวน 27 ลูก
4. แผ่นอะคริลิกทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 mm หนา 15 mm จำนวน 1 แผ่น
5. ถังแก๊สไนโตรเจน ขนาดบรรจุ 150 kgf/cm² จำนวน 1 ถัง

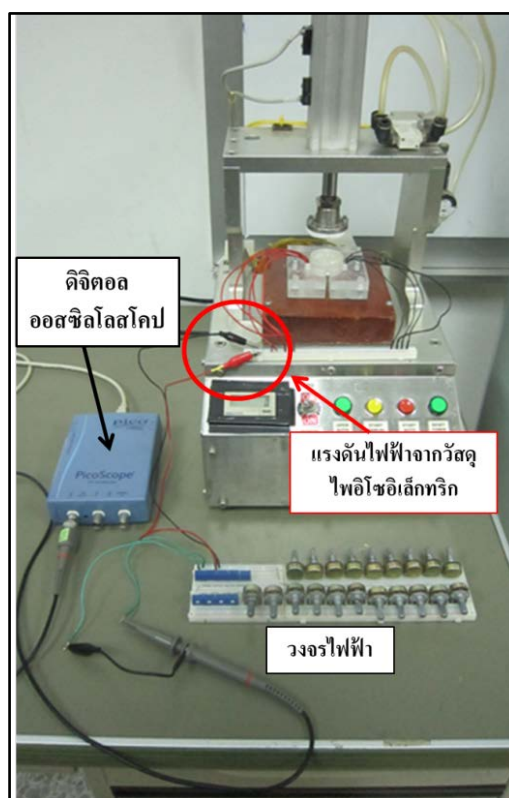
วิธีทดลอง (ระบบการทำงานแบบ AUTO)

1. นำวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 mm หนา 1 mm วางบนแผ่นทองแดงที่บัดกรีสายไฟแล้วให้ับเป็นจำนวน 1 แผ่น (ถ้าต้องการเพิ่มจำนวนแผ่น ให้นำวัสดุที่วางบนแผ่นทองแดงที่บัดกรีสายไฟแล้ว เช่นเดิมจำนวนตามต้องการ วางซ้อนกัน เป็นการต่อแบบขนาน) ดังรูปที่ 2 (ก)
2. นำแผ่นวัสดุ ในข้อ 1. วางในแท่นวางวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก แล้วนำสายไฟเชื่อมต่อกับดิจิตอลอสซิลโลสโคปเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจากวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 การจัดวางวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก (ก) การวางซ้อนกัน (ข) การวางลูกบอลทรงกลม

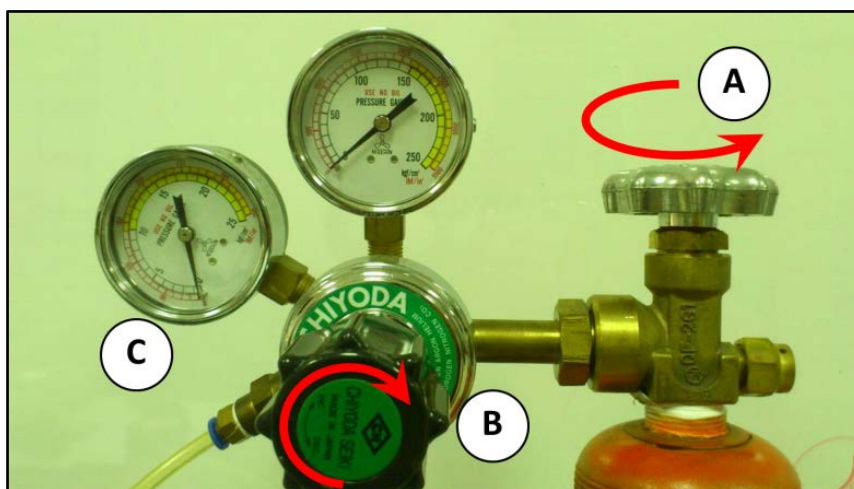
3. นำลูกบอลพลาสติกทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm วางให้เต็มแทนวาง และนำแผ่นอะคริลิกทรงกลมวางทับเป็นลำดับสุดท้ายดังรูปที่ 2 (ข)



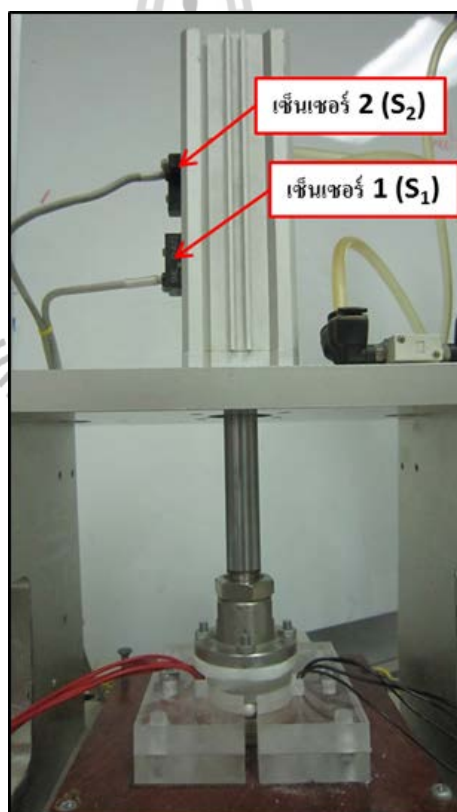
รูปที่ 3 การวัดแรงดันไฟฟ้าจากวัสดุไพโซอิเล็กทริก

4. กำหนดแรงกดเชิงกลให้แก่วัสดุไพโซอิเล็กทริก โดยปรับความดันแก๊สดังรูปที่ 3 หมุน A เพื่อจ่ายแก๊สจากถังแก๊สเข้าสู่เกจวัดความดัน จากนั้นหมุน B และดูเกจความดันที่ C สามารถปรับความดันได้ 5 ค่า ซึ่งการปรับความดันในแต่ละค่ามีผลทำให้เกิดแรงกดเชิงกล ดังนี้

- 4.1 แรงกดเชิงกล มีค่า 75 N ปรับเกจวัดแรงดัน อ่านค่าที่ C มีค่า 1 kgf/cm²
- 4.2 แรงกดเชิงกล มีค่า 150 N ปรับเกจวัดแรงดัน อ่านค่าที่ C มีค่า 2 kgf/cm²
- 4.3 แรงกดเชิงกล มีค่า 225 N ปรับเกจวัดแรงดัน อ่านค่าที่ C มีค่า 3 kgf/cm²
- 4.4 แรงกดเชิงกล มีค่า 300 N ปรับเกจวัดแรงดัน อ่านค่าที่ C มีค่า 4 kgf/cm²
- 4.5 แรงกดเชิงกล มีค่า 375 N ปรับเกจวัดแรงดัน อ่านค่าที่ C มีค่า 5 kgf/cm²



รูปที่ 4 การปรับแรงดันแก๊ส



รูปที่ 5 ตำแหน่งเซ็นเซอร์ 1 (S_1) และเซ็นเซอร์ 2 (S_2)

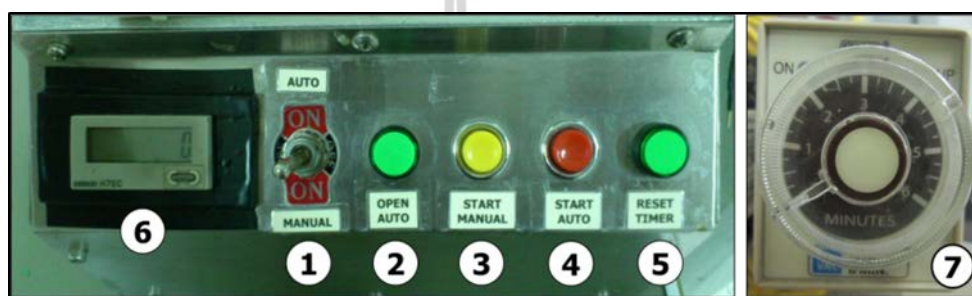
5. กำหนดความถี่เชิงกลได้จากการปรับระยะห่างของเซ็นเซอร์ 1 (S_1) และเซ็นเซอร์ 2 (S_2) ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยกำหนดให้เซ็นเซอร์ 1 (S_1) เคลื่อนลงมาระยะต่ำสุดที่ปลายกระบอกสูบให้แรงกดไปยังแท่นวางวัสดุ และกำหนดให้เป็นจุดคงที่ ปรับระยะเซ็นเซอร์ 2 (S_2) ให้ห่างจากเซ็นเซอร์ 1 (S_1) มีระยะการปรับดังนี้

5.1 ความถี่เชิงกล 120 รอบ/นาทิจ (2 Hz) ระยะห่าง $S_1 - S_2$ คือ 90 mm

5.2 ความถี่เชิงกล 180 รอบ/นาทิจ (3 Hz) ระยะห่าง $S_1 - S_2$ คือ 63 mm

5.3 ความถี่เชิงกล 240 รอบ/นาทิจ (4 Hz) ระยะห่าง $S_1 - S_2$ คือ 45 mm

5.4 ความถี่เชิงกล 302 รอบ/นาทิจ (5 Hz) ระยะห่าง $S_1 - S_2$ คือ 33 mm



รูปที่ 6 ปุ่มควบคุมการทำงาน ①เปิด - ปิดการทำงาน ②OPEN AUTO ③ START MANUAL ④START AUTO ⑤RESET TIMER ⑥COUNTER ⑦ TIMER RELAY

6. โยกสวิตช์ ① เปิดการทำงานระบบ AUTO และเลือกระบบการทำงานของชุดกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเชิงกล โดยกดปุ่ม ② เพื่อสวิตช์การทำงานในแบบ OPEN AUTO อีกครั้ง

7. กดปุ่ม ⑥ เพื่อตั้งค่าเริ่มต้นการนับจำนวนรอบในการกดของCOUNTER ให้มีค่าเป็น 0

8. กำหนดเวลาในการทำงานของ COUNTER โดยการหมุน ⑦ TIMER RELAY ให้เข็มชี้ไปที่เลข 1 นั่นคือ TIMER RELAY จะจับเวลาการทำงานใน 1 นาที

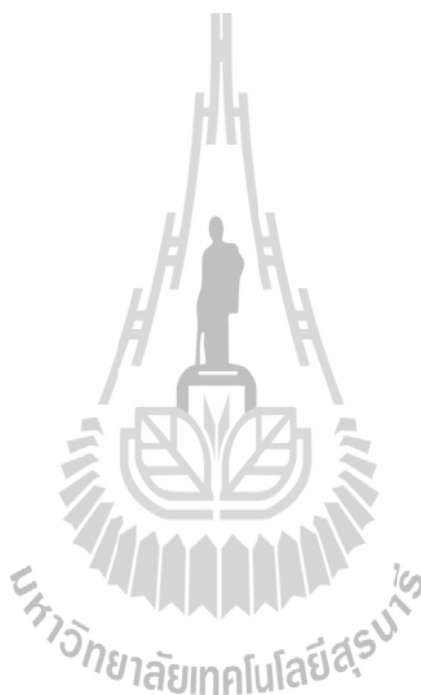
9. เริ่มการทำงานของระบบ AUTO กดปุ่ม ④ START AUTO กระบอกสูบจะเคลื่อนที่ลงมาหาตำแหน่งของเซ็นเซอร์ 1 (S_1) จากนั้นกระบอกสูบจะเคลื่อนที่ขึ้นไปยังตำแหน่งของเซ็นเซอร์ 2 (S_2) และเคลื่อนที่ขึ้นลงเองอัตโนมัติที่แรงกดและความถี่เชิงกลคงที่

10. กดสวิตช์ ② เมื่อเสียง Alarm ดังขึ้นแสดงว่าครบเวลาที่กำหนดไว้ (1 นาที) ตามข้อ 8 COUNTER จะหยุดนับและแสดงจำนวนรอบ/นาทิจ

11. กดสวิตช์ ⑤ RESET TIMER เพื่อเริ่มการทำงานของ Timer ใหม่อีกครั้ง

ข้อควรระวัง

1. ควรจัดวางวัสดุไฟอโซอิเล็กทรอนิกส์ให้ตั้งฉากกับปลายกระบอสูบเสมอ เพื่อไม่ให้วัสดุเกิดความเสียหายขณะทำการทดลอง
2. ห้ามสอดนิ้วมือหรือวัสดุใดๆ เข้าใกล้บริเวณทดสอบ ในขณะที่ทำการทดลอง
3. ห้ามปรับแรงดันเกิน 7 kgf/cm^2 เนื่องจากกระบอสูบนิวเมติกส์ มีขีดจำกัดในการรับแรงอัดอาจทำให้ชุดทดสอบเสียหายได้
4. การทดลองใช้ระบบการทำงานแบบอัตโนมัติ (AUTO) เท่านั้น



ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Srabua K, Pojprapai S, and Oonsivilai A (2011). **A Study of Effect of Mechanical Compressive Force and Frequency on Piezoelectric Energy Harvesting Material**. Proc. Of World Academy of Science, Engineering and Technology. 60: 1100-1103.



A STUDY OF EFFECT OF MECHANICAL COMPRESSIVE FORCE AND FREQUENCY ON PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING MATERIAL

K. Srabua, S. Pojprapai and A. Oonsivilai

Abstract - Lead Zirconate Titanate (PZT) has qualifications piezoelectric. Has been used to convert mechanical energy into electricity on the contrary used to convert electricity to mechanical energy. From the research we apply to used for waste mechanical energy harvesting. It has occurred in everyday life such as mechanical from traffic, mechanical from foot power, etc. This power energy can be keep into capacitor or battery and be use to emergency generator. In this research interest in mechanical compressive force and frequency. For study and analyze the relation of mechanical compressive force and frequency with energy harvesting. Therefore we build testing system to apply compressive force 100-300 N and frequency 1-200 times/min and develop energy harvesting circuit of PZT.

Keyword - Energy harvesting, Piezoelectricity, PZT

I. INTRODUCTION

The piezoelectric effect converts mechanical compression force in to electrical voltage[1-3]. This paper is study effect from frequency mechanical compression force. For development various application relationships energy harvesting from piezoelectric material in the future. Example in year 2008 Elsevier Ltd [4]. The company has study energy harvesting technology, together with innovative mechanical coupling designs, can form the basis for harvesting energy from mechanical motion. Piezoelectric energy can be harvested to convert walking motion from the human body into electrical power. Recently four proof-of-concept Heel Strike Units were developed where each unit is essentially a small electric generator that utilizes piezoelectric elements to

convert mechanical motion into electrical power in the form factor of the heel of a boot. The results of the testing and evaluation and the performance of this small electric generator are presented. The generator's conversion of mechanical motion into electrical power, the processes it goes through to produce useable power and commercial applications of the Heel Strike electric generator are discussed.

II. PIEZOELECTRIC

A. Piezoelectric effect

Mechanical compression or tension on a poled piezoelectric ceramic element changes the dipole moment, creating a voltage. Compression of the element changes the dipole moment, creating a voltage. Compression of the element along the direction of polarization, or tension perpendicular to the direction of polarization, generates voltage of the same polarity as the poling voltage. If tension is applied along the direction of polarization, or the element is compressed perpendicular to the direction of polarization, the polarity of the voltage is opposite that of the poling voltage (Fig 1a). If a voltage of the same polarity as the poling voltage is applied to a piezoelectric element, parallel to the direction of the poling voltage, the element will lengthen and its diameter will become smaller. If a voltage of polarity opposite that of the poling voltage is applied, the element will become shorter and broader (Fig 1b)[5-8].

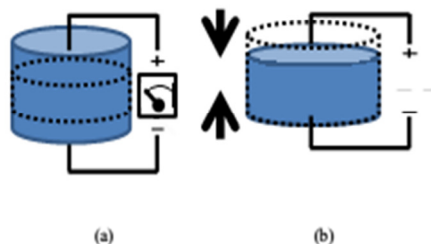


Fig. 1 Generator and motor action of a piezoelectric element

K. Srabua, A. Oonsivilai was with the Smart Materials, Health Sciences and Energy Research Center and the Alternative and Sustainable Energy Research Unit, School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. (email: k_srabua@hotmail.com).

S. Pojprapai School of Ceramic Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. (e-mail: soodkhet@gsut.ac.th)

A. Oonsivilai, corresponding author, is with Center of Excellence in Electric Energy, Smart Materials, and Health Science, Postharvest Technology Research Center, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand. (phone: 66-81-548-7728, fax: 66-44-224601; e-mail: anant@sut.ac.th)

If an alternative voltage is applied, the disk will lengthen and shorten cyclically at the frequency of the applied voltage. This is motor action - electrical energy is converted into mechanical energy. The principle is adapted to piezoelectric motors, sound or ultrasound generating devices, and many other products. Fig. 2 shows that values for compressive stress and the voltage (or field strength) generated by applying stress to a piezoelectric ceramic element are linearly proportional up to a material-specific stress. The same is true for applied voltage and generated strain.

$$P = D - \epsilon^T E \quad (1)$$

Where P is polarization, D is electric displacement, ϵ^T is permittivity of ceramic at constant stress, E is electric field.

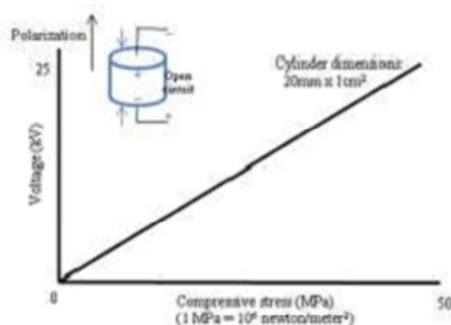


Fig. 2 Linear relationship between applied stress and generated voltage

B. Soft and Hard ceramics

A piezoelectric ceramic is categorized as a soft material or a hard material according to the nature bestowed on it by its composition (Table 1).

TABLE 1
CHARACTERISTICS OF
PIEZOELECTRIC CERAMICS COMPARED [9]

Characteristic	Soft Ceramic	Hard Ceramic
Piezoelectric Constants (d_{33})	larger	smaller
Permittivity (ϵ')	higher	lower
Dielectric Constants (K')	larger	smaller
Dielectric Losses (D vs $\tan \delta$)	higher	lower
Electromechanical Coupling Factors (k_p)	larger	smaller
Electrical Resistivity (ρ)	very high	lower
Mechanical Quality Factors (Q_m)	low	high
Coercive Field (E_c)	low	higher
Linearity	Poor	better
Polarization / Depolarization	easier	more difficult

C. Polarizing

The dipole moments are oriented differently among different ceramic grains, or even among different regions within a single grain. Regions of like-oriented dipole moments are referred to as domain, and each domain carries a net dipole

moment. However, because the dipoles are randomly oriented in the ceramic element, as manufactured, the domains are randomly oriented and the element has no overall polarization (Fig. 3a). The ceramic element is polarized (poled) by exposing it to a strong, direct current (DC) electric field, usually, but not exclusively, at a temperature slightly below the Curie point (Fig. 3b). Through this polarizing (poling) treatment, domains most nearly aligned with the electric field expand at the expense of the domains that are not aligned with the field, and the ceramic lengthens in direction of the field. When the electric field is removed most of the dipoles are locked into this configuration of near alignment (Fig. 3c).

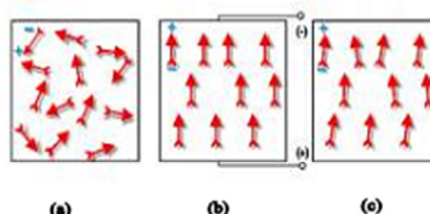


Fig. 3 (a) random orientation of polar domains prior to polarization
(b) polarization in DC electric field
(c) remanent polarization after electric field removed [9]

III. DIELECTRIC PROPERTIES

A dc voltage (V) is applied across a capacitor, one plate become positively charged. Corresponding to the applied electric field the capacitance (C) is defined as charge stored per applied electric voltage is given by

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2)$$

Where V is the applied voltage across the capacitor in volts, Q is charge in Coulombs and C is capacitance in Farads or Coulombs per volt.

Parallel plate capacitor equation with free space as an insulator is given by

$$C_o = \epsilon_o \frac{A}{d} \quad (3)$$

Where ϵ_o is permittivity of vacuum ($\epsilon_o = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$), A is the plate area and d is distance between parallel plates. When dielectric material is added between parallel plates is defined by

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (4)$$

When ϵ is the permittivity of dielectric material

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_o} = k \epsilon \quad (5)$$

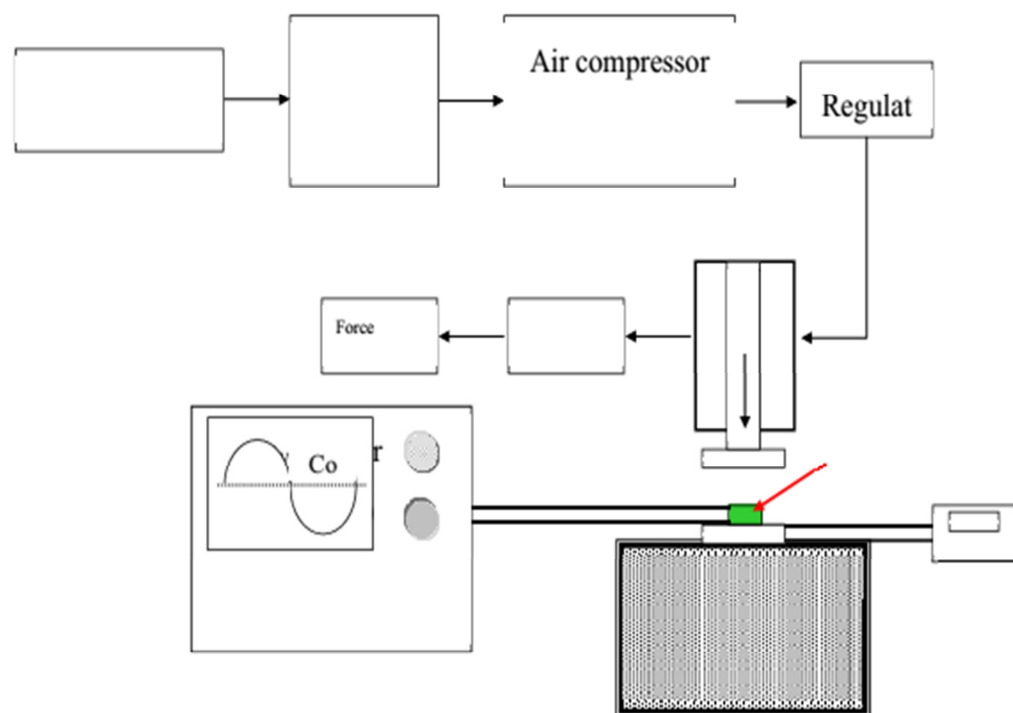


Fig. 4 Designed testing system.

Substituting equation (4) into (3)

$$C = \frac{e_0 k \phi}{d} \quad (6)$$

IV. EXPERIMENT

A. Experimental

Experiment uses Lead Zirconate Titanate (PZT-K350). Cross-sectional area $36.1034 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ and thickness 6.65 mm piezoelectric materials to transform mechanical energy into electrical energy. The input mechanical compressive force is transformed into electrical energy (PZT-K350). Given compressive force from testing system (Fig. 3) to apply compressive force by nitrogen gas at pressure 0.1-0.5 MPa into pneumatic cylinder generated compressive force 100-300 N. The electrical energy output parallel resistor and measured by oscilloscope (Fig. 5).

The effect of amplitude and frequency of loading has been studied. The voltage change occurs during a change in amplitude and frequency. When there is a lot of pressure and frequency of occurrence of Piezoelectric. *Experimental result*

Resistive loads of 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400, 2600, 2800, 3000, 4000, 5000 and 6000 W were applied to testing system under compressive of 300 N. Voltage compare to Resistive load. When the more resistance the voltage was increased (Fig. 6).

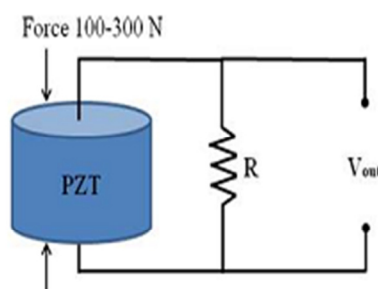


Fig. 5 PZT circuit measurements.

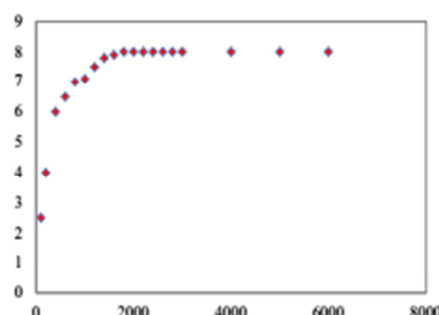


Fig. 6 Voltage compare to Resistor load.

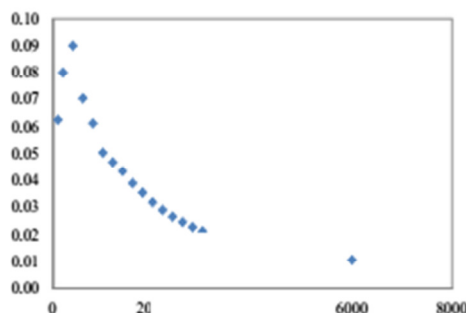


Fig. 7 Average power compare to Resistor load.

Fig. 7 shows average power compare to Resistive load. From equation $P=V^2/R$. When P is the average power, V is voltage output and R is resistive load.

V. CONCLUSION

The effect of amplitude and frequency of loading to voltage, that occurs when a change in amplitude and frequency changes, has been studied. When there is sufficient pressure and frequency, occurrence of piezoelectric charge increases. In our experiments we increased the resistance. From increased resistance, pressure was found to be higher and therefore decrease in power.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by Research and Development Institute Funds, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

REFERENCES

- [1] H. A. Sodano, G. Park and D. J. Inman, "Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting", Blackwell Publishing, 40:49-58, 2004.

- [2] J. Qui, H. Jiang, H. Ji, K. Zhu, "Comparison between four piezoelectric energy harvesting Circuits", *Fornt. Mech. Eng. China* 2009, 4(2): 153-159
- [3] H. Sodano, E. A. Magliola, G. Park, D. J. Inman, "Electric Power Generation using Piezoelectric Devices", Thirteenth International Conference on Adaptive Structures and Technologies, 2003.
- [4] Christopher A Howells, "Piezoelectric energy harvesting", *Energy Conversion and Management*, 1847-1850, 50(2009)
- [5] C. S. Pinkston, "Investigation and characterization of a high energy piezoelectric pulse generator", *IEEE Pulsed Power Conference*, 2005.
- [6] J. B. Yuan, T. Xie, W. S. Chen, "Energy Harvesting with piezoelectric cantilever", *IEEE International Ultrasonic*, 2008.
- [7] H. A. Sodano, G. Park and D. J. Inman, "Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting", Blackwell Publishing, 40:49-58, 2004.
- [8] H. A. Sodano, D. J. Inman and G. Park, "A Review of Power Harvesting from Vibration using Piezoelectric Materials", *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 36, No. 3, May 2004 197-205
- [9] APC International (2002). "Piezoelectric ceramic: Principles and applications", APC International, Ltd., 7-22

BIOGRAPHY



Kingkan Srabua, was born in Udon thani Province, Thailand, in 1986. She received B. Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand (2008). Kingkan is currently graduate student in Master of Engineer at school of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. Her interested are Piezoelectric Material, Energy harvesting, electrical power system, stability.



Soodkhet Pojprapai, In 1997. He received his B. Eng. from Chulalongkorn University, M. Eng. from Chulalongkorn University, and PhD. from University of New South Wales, Australia.



Anant Oonsivilai, was born in Khon Kaen Province, Thailand in 1963. He received his B. Eng. from Khon Kaen University, M. Eng. from King Mongkut Institute of Technology North Bangkok, Thailand and PhD. from Dalhousie University DalTech, Canada, all in Electrical Engineering, in 1986, 1992 and 2000, respectively. Dr. Oonsivilai is currently an Assistant Professor at school of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. His areas of interest are electrical power system, stability, control technology, advance alternative, and sustainable energy.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวกึ่งกาญจน์ สระบัว เกิดเมื่อวันที่ 14 มีนาคม พ.ศ. 2529 ที่อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี เริ่มการศึกษาระดับอนุบาลถึงประถมศึกษาที่โรงเรียนโกมลพิทยาคาร อำเภอท่าบ่อ จังหวัดหนองคาย และสำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนท่าบ่อ อำเภอท่าบ่อ จังหวัดหนองคาย ในปี พ.ศ. 2547 ในภายหลังได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2552 หลังจากนั้นสมัครเข้าศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษาในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี โดยระหว่าง ศึกษาในระดับปริญญาโทมีประสบการณ์สอนเป็นผู้สอนปฏิบัติ การของสาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ (2) ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม (3) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 (4) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 และ (5) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านพลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทน ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยได้นำความรู้และประสบการณ์จากการเป็นผู้ช่วยสอน มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยได้เป็นอย่างดี โดยมีผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์โดยมีรายละเอียดปรากฏในภาคผนวก ข.