

ผลของสมบัติวัสดุ PZTs ต่อการเก็บเกี่ยวพลังงาน

นายนิธิพนธ์ พุทธงชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2552

**EFFECT OF PIEZOELECTRIC PROPERTIES OF PZTs
ON ENERGY HARVESTING**

Nitipot Putthongchai

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Ceramic Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2009

ผลของสมบัติวัสดุ PZTs ต่อการเก็บเกี่ยวพลังงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.สุเกษม กิ่งวานตระกูล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.สุธรรม ศรีห่มสีก)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.ธนาชัย กุลสุวรรณิชพงษ์)

กรรมการ

(ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นิพนธ์ พุทธงชัย : ผลของสมบัติวัสดุ PZTs ต่อการเก็บเกี่ยวพลังงาน (EFFECT OF
PIEZOELECTRIC PROPERTIES OF PZTs ON ENERGY HARVESTING)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ศรีหล่มสัก, 151 หน้า

วัสดุไพโซอิเล็กทริกสามารถนำมาใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานกลจากสิ่งแวดล้อมให้มาอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าได้ซึ่งสามารถนำพลังงานที่ได้มาเก็บไว้ในตัวเก็บประจุหรือแบตเตอรี่เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีกำลังไฟฟ้าไม่สูงมาก งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุไพโซอิเล็กทริกพีซีทีที่มีรูปทรงแบบ bulk เพื่อศึกษาผลของสมบัติของวัสดุ PZTs ต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานกล เมื่อวัสดุ PZT ได้รับแรงทางกล 100-500 N ความถี่ทางกลต่ำ ๆ (0.5-0.8 Hz) พร้อมทั้งศึกษาวงจรไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุไพโซอิเล็กทริกชนิดนี้และสร้างอุปกรณ์ต้นแบบในการเก็บเกี่ยวพลังงาน

ผลการศึกษาพบว่าค่า figure of merits (d_{33}, g_{33}) ของวัสดุไพโซอิเล็กทริก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นวัสดุมีผลต่อพลังงานไฟฟ้าที่วัสดุ PZTs เก็บเกี่ยวได้โดยที่ PZT ชนิด Pz29 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ที่ต่อกับความต้านทานภายนอก 25 M Ω สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าได้ 2.53 μ W แรงทางกล 500 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz และยังพบว่าชิ้นงานที่เรียงซ้อนกันหลายชั้นสามารถให้กำลังไฟฟ้ามากกว่าแบบชั้นเดียว

สาขาวิชา วิศวกรรมเซรามิก

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

NITIPOT PUTTHONGCHAI : EFFECT OF PIEZOELECTRIC

PROPERTIES OF PZTs ON ENERGY HARVESTING. THESIS ADVISOR :

ASST. PROF. SUTHAM SRILOMSAK, Ph.D., 151 PP.

ENERGY HARESTING/PZT TRANSDUCERS/PIEZOELECTRIC

Piezoelectric material could be applied in harvesting mechanical energy from its surroundings into an electrical form. The acquired energy can then be stored in capacitors or batteries, which in turns serve as the energy supplies for low wattage electronic equipments. This research studied the energy harvesting from PZT piezoelectric of bulk shape for its effect on mechanical energy acquisition when the PZT material is subjected to a mechanical force of 100-500 N with low mechanical frequency (within the range of 0.5-0.8 Hz). The research included studying of different electrical circuits adopted in energy harvesting from the piezoelectric material and also implementing a prototype used for the task.

The studied results showed, on the figure of merits (d_{33} , g_{33}) of the piezoelectric material, that the substance diameter determines the electrical energy that the PZT material may acquire. Specifically, the PZT of type Pz29 having the diameter of 8 mm and connected to an external 25 M Ω resistor can acquire 2.53 μ W electrical energy, when applied with 500 N and 0.5-0.8 Hz mechanical force and frequency, respectively. It has also been found that a multiple-layer substance yield more electrical energy than those of a single layer.

School of Ceramic Engineering

Academic Year 2009

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ศรีหล่มสัก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในสิ่งที่ประ โยชน์แก่ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัชชัย กุลรวรานิชพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในสิ่งที่ประ โยชน์แก่ผู้วิจัย

ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในสิ่งที่ประ โยชน์แก่ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกกร ยิ้มนิรัญ ผู้ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ ที่เป็นประ โยชน์แก่ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งนภา ทิพากรฐิติกุล ผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ฝังตัวอย่าง undoped PZT ที่ใช้ในการศึกษา

อาจารย์ ดร.วิระยุทธ ลอประยูร และรองศาสตราจารย์ ดร.จรัสศรี ลอประยูร ผู้ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษา ที่เป็นประ โยชน์แก่ผู้วิจัยทั้งเรื่องทางวิชาการและการดำเนินชีวิต

รองศาสตราจารย์ ดร.สุทิน กุหาเรืองรอง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตนจันทร์ ผู้ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการที่เป็นประ โยชน์แก่ผู้วิจัย

คุณพันทิพา นำสว่างรุ่งเรือง ผู้ที่คอยให้การช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านงานเอกสารแก่ผู้วิจัย

คุณชาติรี ชวนะนรเศรษฐ์ คุณพรทิพย์ เชื้อมชัยตระกูล คุณณรงค์ พิมพ์ปรุ และคุณสุชาติ พันธุ์ไพศาล ผู้ที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาในด้าน ไฟฟ้าแก่ผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ยกเว้นค่าลงทะเบียนเรียนระดับบัณฑิตศึกษา

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อจำลอง คุณแม่สายสุณีย์ พุทธงษ์ชัย ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดี จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

นิธิพนธ์ พุทธงษ์ชัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 วัสดุไพโซอิเล็กทริก.....	6
2.2 ประเภทของวัสดุไพโซอิเล็กทริก.....	6
2.3 วัสดุไพโซอิเล็กทริกทางการค้าที่สำคัญ.....	8
2.3.1 แบเรียมไททานेट.....	8
2.3.2 Lead Zirconate Titanate (PZT).....	8
2.3.3 Relaxor – PbTiO ₃ system.....	11
2.3.4 Tungsten Bronze Structure Compound.....	11
2.3.5 Polyvinylidene difluoride (PVDF).....	13
2.4 Piezoelectric action in piezoelectric ceramic.....	16
2.5 ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant).....	19
2.5.1 Electromechanical coupling factor (k).....	20
2.5.2 Electric quality factor (Q _c).....	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.3	Dielectric constant	22
2.5.4	Young's Modulus	23
2.5.5	Piezoelectric Charge Constant	23
2.6	Dynamic Behavior (High Frequency Input).....	24
2.7	การนำไปใช้งานของวัสดุไพโซอิเล็กทริก.....	29
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3.1	วัสดุและสารเคมี.....	33
3.2	อุปกรณ์การทดลอง	34
3.3	วิธีการทดลอง.....	34
3.3.1	การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น	36
3.3.1.1	การตรวจสอบวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบ ทางเฟส(Phase analysis)	36
3.3.1.2	การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี.....	37
3.3.2	การเตรียมตัวช่วยประสาน (binder).....	37
3.3.3	การผสมสารละลาย PVA ลงในผง PZT.....	37
3.3.4	การเตรียมผง $PbZrO_3$	38
3.3.5	การขึ้นรูปด้วยวิธีอัดแห้ง (Dry press).....	39
3.3.6	การเตรียมตัวอย่างสำหรับเผาผนึก (Sintering).....	40
3.3.7	การขัดชิ้นงาน	42
3.3.8	การตรวจสอบสมบัติหลังการเผาผนึกของชิ้นงาน	42
3.3.8.1	การตรวจสอบความหนาแน่นและปริมาณ ความพรุนตัวของชิ้นงาน	42
3.3.8.2	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	43
3.3.8.3	การวัดขนาดเกรน	43
3.3.9	การทำขั้วไฟฟ้า.....	44
3.3.10	การเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้า (Pole).....	44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.11	ตรวจสอบสมบัติไพโซอิเล็กทริก.....	45
3.3.11.1	ตรวจสอบค่า Piezoelectric strain constant (d_{33}).....	45
3.3.11.2	ตรวจสอบค่า Capacitance และค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss)	46
3.3.11.3	ตรวจสอบค่าแฟกเตอร์การคู่ควบ (Coupling factor)	47
3.3.12	คิดแผ่นโลหะและเชื่อมสายไฟ.....	47
3.3.12.1	การคิดแผ่นทองแดงกับชั้นตัวอย่างแบบชั้นเดียว.....	47
3.3.12.2	การเรียงชั้นตัวอย่างซ้อนกันหลายชั้น (multilayer).....	48
3.3.13	การวัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริก.....	49
3.3.14	สร้างวงจรเกี่ยวกับพลังงานไฟฟ้า.....	51
3.3.15	สร้างพื้นเกี่ยวกับพลังงานไฟฟ้า.....	51
4	ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	53
4.1	การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและเฟสของผงตัวอย่างเริ่มต้น	53
4.1.1	การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผงตัวอย่าง.....	53
4.1.2	การศึกษาวัฏภาคของวัสดุไพโซอิเล็กทริก	54
4.2	การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุไพโซอิเล็กทริก	55
4.3	การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก	57
4.3.1	การศึกษาความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุไพโซอิเล็กทริก	59
4.3.2	การศึกษาค่า figure of merit (d_{33}, g_{33}) ของวัสดุไพโซอิเล็กทริก.....	65
4.4	การศึกษาปัจจัยภายนอกที่มีต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของวัสดุ	66
4.4.1	ผลของแรงกระทำ (force) ต่อแรงดันไฟฟ้า (output voltage) ของวัสดุไพโซอิเล็กทริก	66
4.4.2	ผลของแรงกระทำต่อแรงดันไฟฟ้าของชั้นตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ	68
4.4.3	ผลของความต้านทานภายนอก (load resistance) ต่อแรงดันไฟฟ้า (output voltage) ของวัสดุไพโซอิเล็กทริก	71

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.4	ผลของความต้านทานภายนอกต่อกำลังไฟฟ้า (power output) ของวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก	76
4.4.5	ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นตัวอย่างต่อกำลังไฟฟ้า	78
4.4.6	ผลของแรงต่อแรงดันไฟฟ้าของชั้นตัวอย่างแบบซ้อนกัน 3 ชั้น และแบบชั้นเดี่ยว	81
4.4.7	ผลของความต้านทานภายนอกต่อแรงดันไฟฟ้าของชั้นตัวอย่างที่วางเรียงซ้อนกัน 3 ชั้น (triple layer)	83
4.4.8	ผลของความต้านทานภายนอกต่อกำลังไฟฟ้าของชั้นตัวอย่างที่เรียงซ้อนกัน 3 ชั้น	84
4.4.9	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของชั้นตัวอย่าง	88
4.4.10	การศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากพื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน	88
4.4.10.1	พื้นเก็บเกี่ยวพลังงานที่ทำจากแผ่นอะคริลิก	88
4.4.10.2	พื้นเก็บเกี่ยวพลังงานแผ่นกระเบื้องยาง	91
4.4.11	การศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากชั้นวัสดุที่เรียงซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น	92
4.4.11.1	ศึกษาการชาร์จแบตเตอรี่	93
4.4.11.2	การคำนวณอัตราการชาร์จแบตเตอรี่ที่ใช้วัสดุเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน	98
4.4.11.3	วงจรชาร์จพลังงานอื่น ๆ ที่ความสามารถทำงานได้ที่ความถี่ต่ำ	99
4.4.11.4	วงจรที่ไม่สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าได้	101
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	102
5.1	สรุปผลการวิจัย	102
5.2	ข้อเสนอแนะ	103
	รายการอ้างอิง	104

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.	กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของวัสดุโพธิโซอิเล็กทริก ชนิดต่าง ๆ ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นตัวอย่าง แรงกระทำ และความต้านทานภายนอกต่าง ๆ	108
ภาคผนวก ข.	บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	147
ประวัติผู้เขียน		151

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ราคาต่ำสุดและสูงสุดของน้ำมันแต่ละประเภท..... 1
1.2	ปริมาณการใช้ น้ำมันของประเทศไทย 2
2.1	การเปรียบเทียบสมบัติของ soft ceramics และ hard ceramic 7
2.2	สมบัติไพโซโซอิเล็คทริกของ relaxor based ที่มีองค์ประกอบทางเคมี ใกล้เคียงกับ MPB 11
2.3	สมบัติไพโซโซอิเล็คทริกของ PVDF เทียบกับ PZT และ BaTiO ₃ ที่อุณหภูมิ 20°C 13
2.4	สมบัติของวัสดุไพโซโซอิเล็คทริกบางชนิด..... 15
2.5	ค่า k ² ของวัสดุไพโซโซอิเล็คทริกชนิดต่าง ๆ 21
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... 33
3.2	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 34
3.3	น้ำหนักผงตัวอย่าง PZT แรงกดอัดที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปขึ้นตัวอย่าง ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ 40
4.1	ส่วนประกอบทางเคมีของ PZT ชนิดต่าง ๆ 54
4.2	สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซโซอิเล็คทริกจากแหล่งผลิต 57
4.3	สมบัติทางไฟฟ้าของขึ้นตัวอย่างที่มีองค์ประกอบทางเคมี และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ 58
4.4	ค่าความถี่ที่ความนำเชิงซ้อนสูงสุด (f _m) และค่าความถี่ที่ความนำเชิงซ้อนต่ำสุด (f _n) ของตัวอย่าง APC 840 APC 850 Pz29 และ undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 13 และ 29 มิลลิเมตร 64

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	สัดส่วนการใช้ก๊าซธรรมชาติของประเทศไทย 3
1.2	โครงสร้างการใช้พลังงานในภาคของประเทศไทย..... 3
1.3	การพัฒนาเทคโนโลยีวางคัก (laptop) ในปี ค.ศ. 1990-2001 4
2.1	(ก) direct effect (ข) indirect effect (i) วัสดุหดตัว (ii) วัสดุขยายตัว โดยเส้นประเป็นขนาดเริ่มต้นของวัสดุ..... 6
2.2	โครงสร้างผลึกของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก (ก) อุณหภูมิสูงกว่า Curie point (T_c) (ข) อุณหภูมิต่ำกว่า Curie point 8
2.3	วัฏภาคที่เสถียรของ $Pb(Ti_{1-x}Zr_x)O_3$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 9
2.4	Relative permittivity ของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกบริเวณ morphotropic phase boundary (MPB) 10
2.5	โครงสร้างผลึกของ Tungsten bronze 12
2.6	โครงสร้างของ PVDF..... 13
2.7	คอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์กับเซรามิก (ก) แบบ 0-3 คอมโพสิต (ข) แบบ 1-3 คอมโพสิต (ค) มุมมองด้านบนแบบ 1-3 คอมโพสิต 14
2.8	(ก) การจัด electric dipole อย่างไม่เป็นระเบียบก่อน apply สนามไฟฟ้า (ข) การจัดเรียง electric dipole เป็นระเบียบ 100% ขณะ apply สนามไฟฟ้า (ค) การจัดเรียง electric dipole หลังจากหยุด apply สนามไฟฟ้า..... 16
2.9	การเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุขณะเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้า (ก) ก่อน apply สนามไฟฟ้า (ข) ขณะ apply สนามไฟฟ้า (ค) หยุด apply สนามไฟฟ้า..... 16
2.10	การเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกขณะ apply สนามไฟฟ้า 17
2.11	ทิศกระแสไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อ apply แรงกด 17
2.12	ทิศกระแสไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อ apply แรงดึง..... 18
2.13	(ก) กราฟ hysteresis ของ polarizaton (ข) ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลง ขนาดวัสดุ (strain, S) ในทิศการ polarization 19

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.14 ทิศทางของแรงกระทำที่มีผลต่อวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก	20
2.15 การสั่นตัวในแนวรัศมีของแผ่นไพโอโซอิเล็กทริก.....	21
2.16 วงจรไฟฟ้าสมมูลการสั่นของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก.....	25
2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า ให้แก่วัสดุไพโอโซอิเล็กทริก	26
2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ในการสั่น ของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก	26
2.19 ระบบการหาค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุด (minimum impedance) และค่าอิมพีแดนซ์ สูงสุด (maximum impedance) ของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกเซรามิก.....	27
2.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง planar coupling factor (k_p) ของวัสดุไพโอโซอิเล็กทริก รูปทรงแบน ๆ กับ $\Delta f/f_s$	28
3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นตัวอย่างและการวิเคราะห์สมบัติทางไพโอโซอิเล็กทริก.....	35
3.2 แผนภาพวัฏภาคของ PbO กับ ZrO ₂	39
3.3 เครื่องอัดไฮดรอลิก (hydraulic press).....	40
3.4 เบ้าอะลูมินาวางซ้อนกันสองอันสำหรับใช้ในการเผาไล่ตัวประสาน และการเผาผนึกโดย specimen pellets และ sacrificial pellets ใช้ผงที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกัน	41
3.5 ขั้นตอนเผาไล่ตัวช่วยประสานและการเผาผนึกชิ้นตัวอย่าง	41
3.6 ชิ้นตัวอย่างหลังทำอิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 13 และ 29 มิลลิเมตร	44
3.7 เครื่องเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้า	45
3.8 เครื่อง d ₃₃ meter	46
3.9 เครื่อง Precision LCR meter.....	47
3.10 เครื่อง Impedance/gain-phase analyzer	47
3.11 ชิ้นตัวอย่างที่ติดแผ่นทองแดงพร้อมบัดกรีสายไฟที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 13 และ 29 มิลลิเมตร	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 การเรียงชั้นตัวอย่างซ้อนกัน 3 ชั้น	48
3.13 เครื่อง LF Plus universal test machine รุ่น (LF PLUS)	49
3.14 เครื่อง Tektronix digital oscilloscope (รุ่น TDS 420A).....	50
3.15 วงจรไฟฟ้าสำหรับวัดแรงดันไฟฟ้า เมื่อ R คือความต้านทานภายนอก (load resistance) ที่ต่อขนานกับชั้นตัวอย่าง.....	50
3.16 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้า.....	51
3.17 ภาพเขียนแบบพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้โปรแกรม solid work	52
4.1 ผลการวิเคราะห์เฟสวัญภาค	55
4.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) APC 840 (ข) APC 850 (ค) Pz29 (ง) undope PZT	56
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ของตัวอย่าง Pz29 ที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร	60
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ของตัวอย่าง APC 850 ที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร	61
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ของตัวอย่าง APC 840 ที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร	62
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ของตัวอย่าง undope PZT ที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร	63
4.7 กราฟเปรียบเทียบค่า figure of merit ของชั้นตัวอย่างชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร	65
4.8 แรงดันไฟฟ้าของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรงในช่วง 100-500 N โดยต่อกับความต้านทานภายนอก 25 MΩ.....	67
4.9 แรงดันไฟฟ้าของชั้นตัวอย่างที่ apply แรงกระทำ 100-500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ของตัวอย่าง (ก) Pz29 (ข) APC 850 (ค) APC 840 (ง) undope PZT ที่ความต้านทานภายนอก 25 MΩ.....	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ผลของค่าความต้านทานภายนอกต่อการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าของชั้นตัวอย่าง ชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร โดย apply แรงกระทำ 500 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz.....	72
4.11 ผลของค่าความต้านทานต่อแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่าง (ก) Pz29 (ข) APC 850 (ค) APC 840 (ง) undope PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ โดย apply แรงกระทำ 500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz	74
4.12 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรง 500 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz.....	77
4.13 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของชั้นตัวอย่าง (ก) Pz29 (ข) APC 850 (ค) APC 840 (ง) undope PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เมื่อ apply แรงทางกล 500 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz	79
4.14 แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชั้นตัวอย่าง (ก) Pz29 (ข) APC 850 (ค) APC 840 (ง) undope PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร แบบ 3 ชั้น และแบบชั้นเดียวที่ต่อกับความต้านทานภายนอก 25 MΩ เมื่อ apply แรงขนาดต่าง ๆ ที่ความถี่ 0.5-0.8 Hz	81
4.15 แรงดันไฟฟ้าของชั้นงานที่เรียงซ้อนกัน 3 ชั้นของตัวอย่างทุกชนิดที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ความต้านทานภายนอกต่าง ๆ แรงกระทำ 500 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz.....	84
4.16 กำลังไฟฟ้าของชั้นตัวอย่างที่ความต้านทานภายนอกต่าง ๆ ของตัวอย่าง ที่เรียงซ้อนกัน 3 ชั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรง 500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz	85
4.17 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากชั้นตัวอย่างชนิด (ก) Pz29 (ข) APC 850 (ค) APC 840 (ง) undope PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตรแบบซ้อนกัน 3 ชั้น กับชั้นเดียวที่ต่อกับความต้านทานภายนอก 25 MΩ เมื่อ apply แรง 500 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz	86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริกชนิดพีซีที ที่เรียงซ้อนกัน 3 ชั้น กับแบบขึ้นเดียวของตัวอย่าง Pz29 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร 88
4.19	พื้นเก็บพลังงานที่เป็นแผ่นอะคริลิก..... 89
4.20	ผังการเรียงชั้นตัวอย่างในพื้นที่เก็บเกี่ยวพลังงาน 89
4.21	การติดตั้งทดสอบพื้นเก็บพลังงาน..... 90
4.22	วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์..... 90
4.23	ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานจากพื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน 91
4.24	รูปพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานที่เป็นแผ่นกระเบื้องยาง..... 92
4.25	การเรียงทิส polarization ของชั้นตัวอย่างซ้อนกัน 8 ชั้น 93
4.26	วงจร full bridge rectifiers แบบมีตัวกรอง..... 94
4.27	วงจรทวิแรงดัน 2 เท่า 95
4.28	วงจร half-wave rectifiers แบบมีตัวกรอง 96
4.29	ตัวอย่างลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุ 97
4.30	ตัวอย่างสัญญาณไฟฟ้าแบบ half-wave rectifiers แบบมีตัวกรอง..... 97
4.31	กราฟแรงดันไฟฟ้าและกระแสในการชาร์จแบตเตอรี่..... 98
4.32	วงจรเพิ่มแรงดันออกเอาต์พุต 2 เท่า..... 99
4.33	วงจร full bridge rectifiers แบบมีตัวกรอง..... 100
4.34	วงจร op-amp 101
ก.1	แรงดันไฟฟ้าของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรงในช่วง 100-500 N โดยต่อกับความต้านทานภายนอก (ก) 1 M Ω (ข) 50 M Ω (ค) 75 M Ω 109
ก.2	แรงดันไฟฟ้าของชั้นตัวอย่างที่ apply แรงกระทำ 100-500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ของตัวอย่าง Pz29 ที่ความต้านทานภายนอก (ก) 1 M Ω (ข) 50 M Ω (ค) 75 M Ω 111

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.3 แรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่างที่ apply แรงกระทำ 100-500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ของตัวอย่าง APC 850 ที่ความต้านทานภายนอก (ก) 1 M Ω (ข) 50 M Ω (ค) 75 M Ω	113
ก.4 แรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่างที่ apply แรงกระทำ 100-500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ของตัวอย่าง APC 840 ที่ความต้านทานภายนอก (ก) 1 M Ω (ข) 50 M Ω (ค) 75 M Ω	115
ก.5 แรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่างที่ apply แรงกระทำ 100-500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ของตัวอย่าง undoped PZT ที่ความต้านทานภายนอก (ก) 1 M Ω (ข) 50 M Ω (ค) 75 M Ω	117
ก.6 ผลของค่าความต้านทานภายนอกที่มีต่อการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่าง ชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz.....	119
ก.7 ผลของค่าความต้านทานภายนอกที่มีต่อการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่าง ชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz.....	121
ก.8 ผลของค่าความต้านทานภายนอกที่มีต่อการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่าง ชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz.....	123
ก.9 ผลของค่าความต้านทานต่อแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่าง Pz29 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz.....	125
ก.10 ผลของค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่าง APC 850 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz.....	127
ก.11 ผลของค่าความต้านทานต่อแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่าง APC 840 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz.....	129

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.12 ผลของค่าความต้านทานต่อแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่าง undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ โดย apply แรงกระทำ (ก)100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz.....	131
ก.13 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรง (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz.....	133
ก.14 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรง (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz.....	135
ก.15 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรง (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz.....	137
ก.16 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของชิ้นตัวอย่าง Pz29 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เมื่อ apply แรงทางกล (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz.....	139
ก.17 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของชิ้นตัวอย่าง APC 850 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เมื่อ apply แรงทางกล (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz.....	141
ก.18 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของชิ้นตัวอย่าง APC 840 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เมื่อ apply แรงทางกล (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz.....	143
ก.19 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของชิ้นตัวอย่าง undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เมื่อ apply แรงทางกล (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz.....	145

บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญในการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ในปัจจุบันและต่อ ๆ ไปในอนาคต ประชากรโลกได้ตระหนักถึงความสำคัญของพลังงานและการใช้พลังงานอย่างประหยัด พลังงานจากน้ำมันถือเป็นปัญหาในระดับโลกคาดกันว่าจะหมดไปจากโลกในเวลาอีกไม่เกิน 50 ปี และมีราคาแพงขึ้นทุกวันดังแสดงในตารางที่ 1.1 (หนังสือพิมพ์โพสต์ทูเดย์, 2552) และแสดงปริมาณการใช้น้ำมันของประเทศไทยในตารางที่ 1.2 จะเห็นว่าประเทศไทยมีปริมาณการใช้น้ำมันที่ลดลง และมีปริมาณการใช้พลังงานจากก๊าซธรรมชาติมากขึ้น เนื่องจากน้ำมันมีราคาสูงขึ้น ซึ่งจากสถิติดังกล่าวบ่งชี้ว่าประชากรเริ่มตระหนักถึงปัญหาของพลังงานมากขึ้นและหันมาใช้พลังงานทางเลือกแบบอื่นที่มีราคาถูกกว่า แทนการใช้พลังงานจากน้ำมันเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 1.1 ราคาต่ำสุดและสูงสุดของน้ำมันแต่ละประเภท (หนังสือพิมพ์โพสต์ทูเดย์, 2552)

ชนิดของน้ำมัน	พ.ศ. 2549		พ.ศ. 2550		พ.ศ. 2551		พ.ศ. 2552 (ถึงวันที่ 1 มีนาคม)	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
เบนซิน 91	24.59	29.39	24.39	31.59	20.79	42.79	21.39	26.74
เบนซิน 95	25.29	30.19	25.19	32.89	32.79	43.89	-	-
แก๊สโซฮอล์ 91	-	-	24.09	28.09	15.49	38.39	16.09	22.14
แก๊สโซฮอล์ 95	23.79	28.69	23.69	28.89	16.29	39.19	16.89	22.94
E20	-	-	-	-	14.99	37.89	15.59	21.14
E85	-	-	-	-	18.29	20.19	14.29	18.29
ดีเซล	23.34	27.94	22.54	29.34	18.34	44.24	18.34	20.59
ดีเซล B5	-	-	-	-	16.84	43.54	16.84	18.49
NGV	8.5 บาท/กก.							

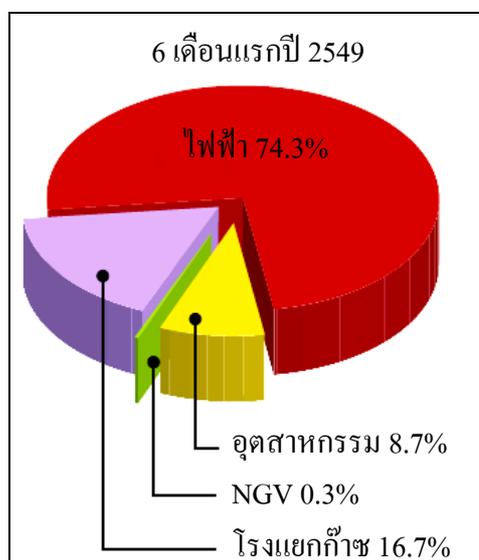
ตารางที่ 1.2 ปริมาณการใช้น้ำมันของประเทศไทย (หนังสือพิมพ์โพสต์ทูเดย์, 2552)

ปี พ.ศ.	2548	2549	2550	2551
เบนซิน 91 (ล้านลิตร/วัน)	11.884	12.229	12.238	9.33
เบนซิน 95 (ล้านลิตร/วัน)	6.153	4.034	3.037	0.932
แก๊สโซฮอล์ 91 (ล้านลิตร/วัน)	0.08	0.259	0.66	2.515
แก๊สโซฮอล์ 95 (ล้านลิตร/วัน)	1.762	3.246	4.09	6.623
ดีเซลหมุนเร็ว (ล้านลิตร/วัน)	53.452	50.074	50.975	48.212
ดีเซลหมุนเร็ว B5 (ล้านลิตร/วัน)	0.015	0.117	1.685	10.302
ก๊าซธรรมชาติในภาคคมนาคม (ล้านลูกบาศก์ฟุต/วัน)	5.57	9.36	18.61	77.27

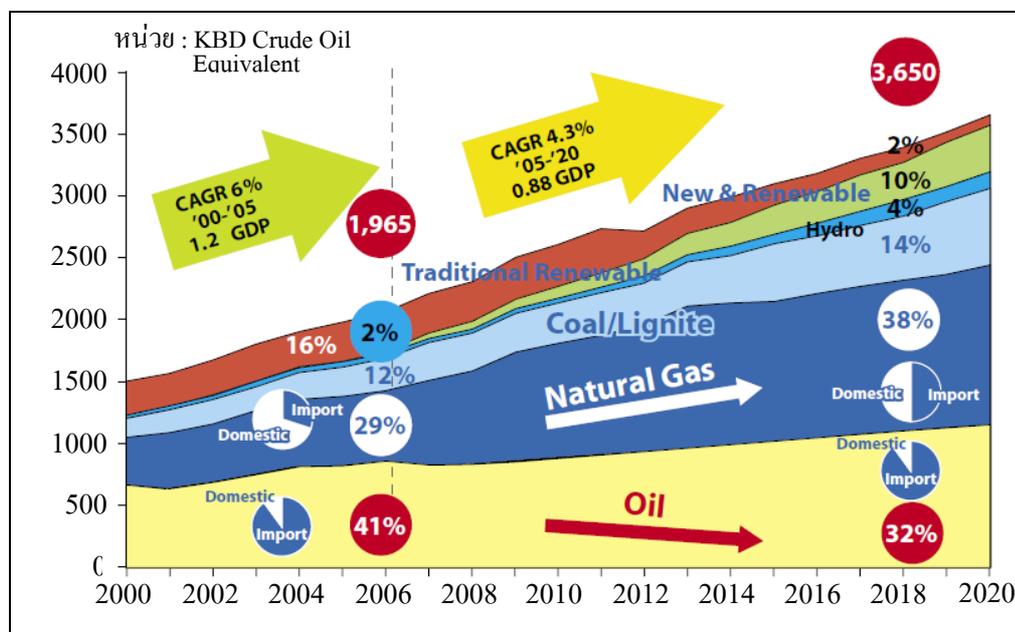
ในปัจจุบันประเทศไทยต้องนำเข้าพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ มากมายไม่ว่าจะเป็นน้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่นำเข้ามาจากประเทศพม่าเพื่อนำไปใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า อุตสาหกรรม NGV และ โรงแยกก๊าซ (กระทรวงพลังงาน, 2550) ซึ่งแสดงอัตราส่วนการนำเข้าใช้ของก๊าซธรรมชาติดังรูป 1.1 ทำให้ประเทศต้องขาดดุลการค้าเป็นจำนวนมาก (หนังสือพิมพ์เชียงใหม่นิวส์, 2547) และประเทศไทยมีแนวโน้มการใช้พลังงานที่มากขึ้น (กระทรวงพลังงาน, 2550) ดังแสดงในรูป 1.2 จึงมีงานวิจัยต่าง ๆ เพื่อจะหาแหล่งพลังงานทดแทนหรือมาตรการประหยัดพลังงานให้แก่ประเทศ ซึ่งรูปแบบของพลังงานทดแทนในปัจจุบันมีมากมาย เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานขยะ พลังงานถ่านหินสะอาด พลังงานเคมีจากไฮโดรเจน พลังงานชีวมวล พลังงานชีวภาพ พลังงานไบโอดีเซล พลังงานนิวเคลียร์ พลังงานเอทานอล แก๊สโซฮอล์ ฯลฯ ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับพลังงานดังกล่าว

การเก็บเกี่ยวพลังงาน (energy harvesting) จากพลังงานที่สูญเปล่าเป็นมาตรการหนึ่ง ที่ช่วยประหยัดพลังงานและลดการนำเข้าพลังงานได้ อย่างไรก็ตามการเก็บเกี่ยวพลังงานอีกรูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การเก็บเกี่ยวพลังงานกล ซึ่งพลังงานกลที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันมีมากมายตลอดเวลาและไม่หมดอย่างแน่นอน เช่น พลังงานกลจากการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ พลังงานกลจากการกระแทกของเท้าบนพื้นเมื่อเดินหรือวิ่ง พลังงานกลจากการวิ่งของรถบนพื้นถนน พลังงานกลจากการไหลของน้ำ พลังงานกลจากแผ่นดินไหว พลังงานกลจากการเคลื่อนไหวของอวัยวะต่าง ๆ จากระบบการทำงานในร่างกาย (Fletscher, R. 1996) และในกิจกรรมต่าง ๆ ซึ่งอาจเก็บเกี่ยวพลังงานกลดังกล่าวไว้ในรูปของพลังงานไฟฟ้าได้โดยใช้วัสดุที่มีสมบัติเป็น

วัสดุไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือในทางกลับกันสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลได้

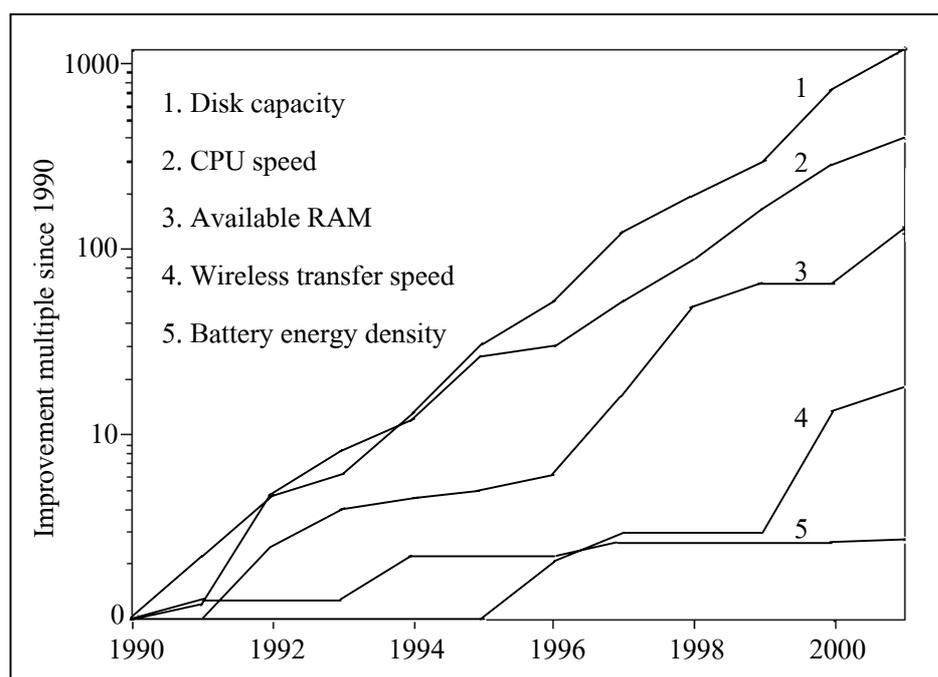


รูปที่ 1.1 สัดส่วนการใช้ก๊าซธรรมชาติของประเทศไทย (กระทรวงพลังงาน, 2550)



รูปที่ 1.2 โครงสร้างการใช้พลังงานในอนาคตของประเทศไทย (กระทรวงพลังงาน, 2550)

ปัจจุบันเทคโนโลยีไร้สายและระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Microelectromechanical Systems) นั้นทำให้สามารถที่จะทำงานในที่ต่าง ๆ ได้ โดยธรรมชาติของอุปกรณ์ไร้สายจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้แบตเตอรี่แบบธรรมดาเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน แต่แบตเตอรี่ต้องการบรรจุไฟฟ้าบ่อย ๆ และมีช่วงอายุการใช้งานที่จำกัด อีกทั้งแบตเตอรี่ยังมีข้อจำกัดในด้านของการออกแบบอุปกรณ์เคลื่อนที่ต่าง ๆ ในเรื่องของขนาด น้ำหนักและราคา ในปัจจุบันเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์มีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 1.3 อย่างไรก็ตามสำหรับอุปกรณ์ที่ทำจากวัสดุไพโซอิเล็กทริกนี้ สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าได้จากแหล่งต่าง ๆ โดยไม่จำกัดสถานที่และเวลาโดยเฉพาะในพื้นที่ที่ยังไม่เจริญหรือไม่มีกระแสไฟฟ้าใช้งานโดยอาศัยแรงทางกลจากสิ่งแวดล้อมมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งวัสดุชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายพลังงานของตัวเองสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้สามารถนำไปบรรจุในตัวเก็บประจุหรือแบตเตอรี่ก็ได้และสามารถนำไปชาร์จอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีกำลังไฟฟ้าที่ไม่สูงหรืออุปกรณ์รับรู้ (Sensor) และสำหรับนำไปใช้ในกรณีฉุกเฉินในพื้นที่ที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าได้



รูปที่ 1.3 การพัฒนาเทคโนโลยีวงตัก (laptop) ในปี ค.ศ. 1990-2001 (Saez, 2004)

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุ PZT ชนิดต่าง ๆ ที่มีค่า figure of merit ($d_{33} \cdot g_{33}$) ต่างกัน
2. ศึกษาถึงผลของขนาดชิ้นงานที่มีต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า
3. ศึกษาถึงผลของแรงกระทำต่อชิ้นงานที่มีผลต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า
4. ศึกษาความถี่และ load resistance ที่เหมาะในการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า
5. สร้างวงจรไฟฟ้าที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยวพลังงาน
6. สร้างอุปกรณ์ต้นแบบในการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า โดยจะนำชิ้นโพธิโซอิเล็กทริก เซรามิกใส่ที่พื้นของกระเบื้องปูพื้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาผลของค่า figure of merit ($d_{33} \cdot g_{33}$) ของวัสดุ PZT ชนิด APC 840 (Sr^{2+} dope) APC 850 (Nb^{5+} dope) Pz29 (Nb^{5+} - Sr^{2+} - Sb^{3+} dope) และ undoped PZT ที่มีต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า
2. ศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร 13 มิลลิเมตรและ 29 มิลลิเมตร ที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้
3. ศึกษาผลของแรงกระทำต่อชิ้นงานในช่วง 100 N ถึง 700 N ที่มีต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า
4. ศึกษาผลของความถี่และ load resistance ที่มีต่อระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

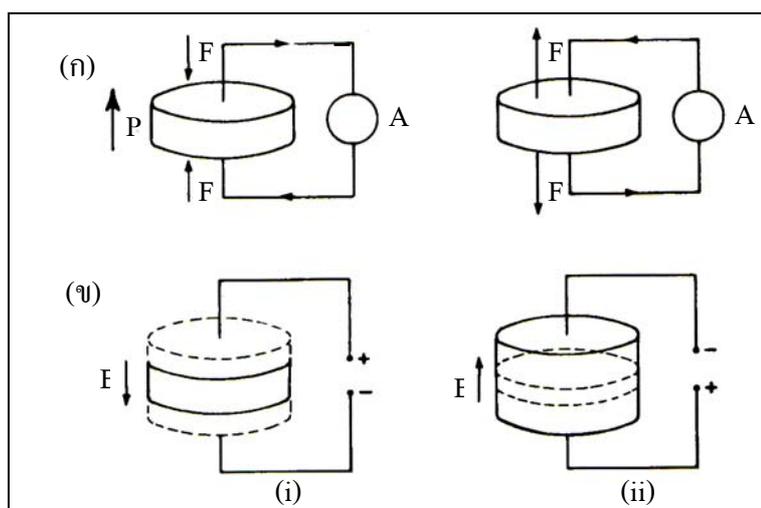
1. ได้ทราบถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุโพธิโซอิเล็กทริก
2. ได้ทราบพื้นฐานความรู้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานกลที่สูญเสียเปล่า
3. ได้อุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า
4. สามารถสร้างแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ได้

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุไพโซอิเล็กทริก

ไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) คือ การที่วัสดุสามารถเปลี่ยนแรงเชิงกล (mechanical force) ที่ apply บนตัววัตถุให้เป็นกระแสไฟฟ้าออกมดั่งภาพ 2.1 (ก) ซึ่งการแปลงพลังงานดังกล่าวเรียกว่า direct effect ในทางตรงกันข้ามเมื่อได้รับพลังงานไฟฟ้าวัตถุก็สามารถเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (mechanical deformation) ได้ ดังภาพที่ 2.1 (ข) เรียกการเปลี่ยนแปลงแบบนี้ว่า indirect effect



รูปที่ 2.1 (ก) direct effect (ข) indirect effect (i) วัสดุหดตัว (ii) วัสดุขยายตัว เส้นประแสดงขนาดเริ่มต้น (Moulson and Herbert, 2003)

2.2 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 $Pb(Zr^{4+} Ti^{4+})O_3$ ด้วย Nb^{5+} จะได้ soft

ไพโอโซอิเล็กทริกเซรามิกหรือการแทนที่อะตอม อะตอม Zr^{4+} หรือ Ti^{4+} ใน $Pb(Zr^{4+} Ti^{4+})O_3$ ด้วย Mn^{2+} จะได้ hard ไพโอโซอิเล็กทริกเซรามิก

การเติม donor dope ลงใน PZT ทำให้เกิดสถานะที่มีประจุบวกเกินทำให้วัสดุมักจะเกิดสมดุลประจุโดยการเกิด 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 2.1 (APC International, 2002) วัสดุพวกนี้มักจะถูกทำลายขั้วไฟฟ้า (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 ทำให้เกิดสภาพขาดบวก ดังนั้นจึงต้องสมดุลประจุโดยเกิด oxygen vacancy ได้ hard PZT ซึ่งมีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1 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

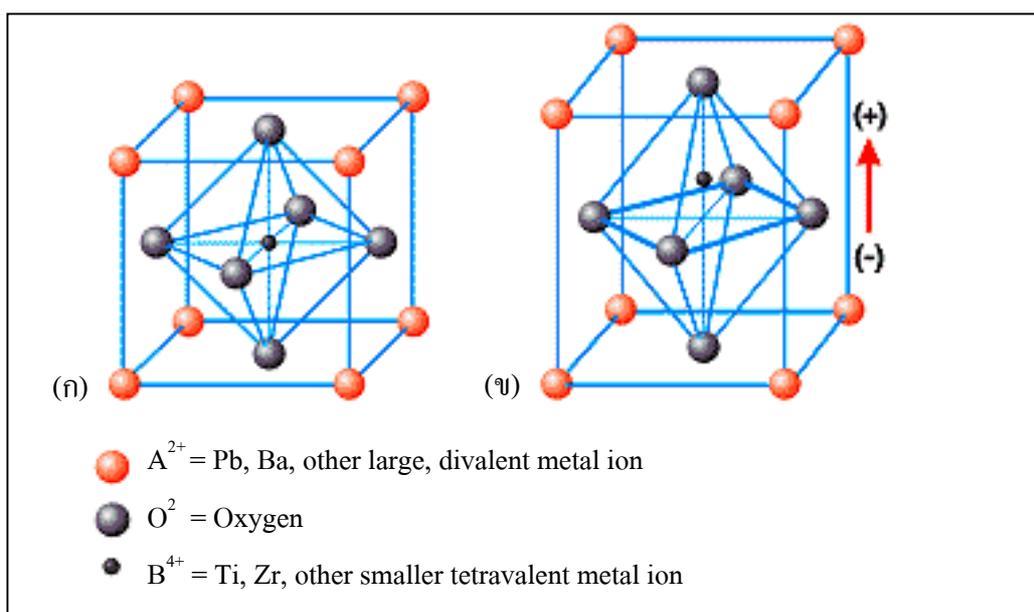
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติของ soft ceramics และ hard ceramics (APC International, 2002)

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

2.3 วัสดุไพโซอิเล็กทริกทางการค้าที่สำคัญ

2.3.1 แบเรียมไททานเตต

มีสูตรทางเคมีว่า BaTiO_3 เป็นไพโซอิเล็กทริกเซรามิกตัวแรกที่ทำออกมาขาย และใช้กันอย่างแพร่หลาย BaTiO_3 มีโครงสร้างแบบ perovskite ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งพบในสารประกอบหลาย ๆ ชนิดที่มีสูตรเคมีเป็น ABO_3



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของวัสดุไพโซอิเล็กทริก (ก) อุณหภูมิสูงกว่า Curie point (T_c)

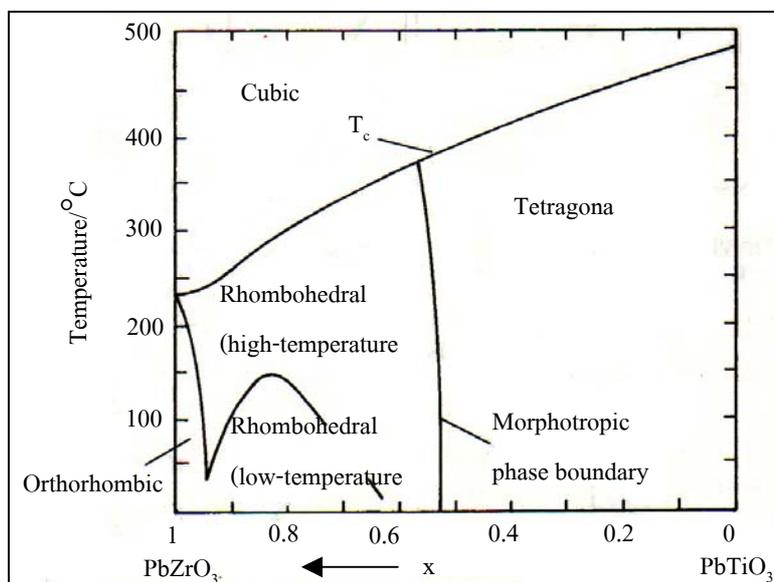
(ข) อุณหภูมิต่ำกว่า Curie point (APC International, 2002)

2.3.2 Lead zirconate titanate (PZT)

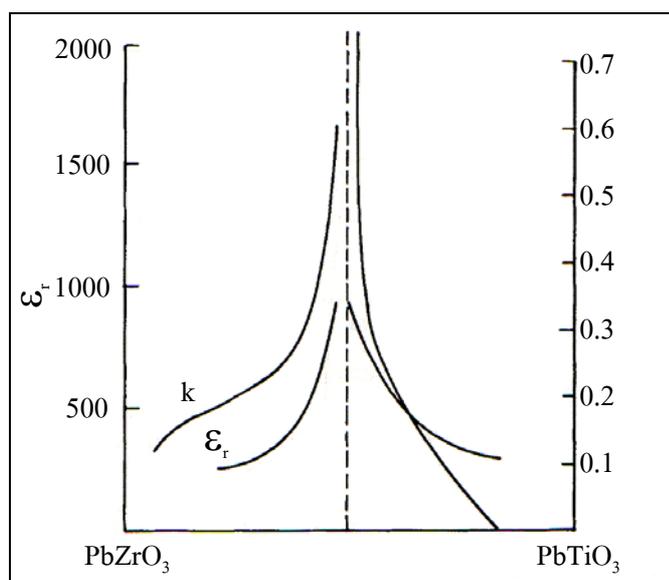
เกิดจากการนำ PbTiO_3 ($T_c = 475^\circ\text{C}$) กับ PbZrO_3 ($T_c = 234^\circ\text{C}$) มาผสมกัน เมื่อ PbTiO_3 เย็นตัวผ่าน T_c แล้ว PbTiO_3 จะเปลี่ยนโครงสร้างจาก cubic ไปเป็น tetragonal ที่มีความยาวด้านแกน z ยาวกว่าแกน x และ y ถึง 6% การแตกต่างดังกล่าวส่งผลให้มี internal stress ในชิ้นงานสูงมาก ชิ้น PbTiO_3 บริสุทธิ์ที่เย็นตัวผ่าน T_c ลงมากมักจะแตกร้าวแต่เมื่อ PbZrO_3 เย็นตัวผ่าน T_c จะทำให้ PbZrO_3 เปลี่ยนโครงสร้างจาก cubic ไปเป็น orthorhombic ที่มีสมบัติแบบ antiferroelectric เพราะโพลาไรเซชันที่เกิดจากการหนีศูนย์กลางของ Zr^{2+} จะหันทิศสลับกันจนหักล้างกันไปหมด

เมื่อนำ PbTiO_3 กับ PbZrO_3 มารวมกันในสัดส่วนต่าง ๆ จะได้ $\text{Pb}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ ที่มีวัฏภาคดังแสดงในรูปที่ 2.3 ตรงกลาง ๆ ของรูปบริเวณ x มีค่าประมาณ 0.52 เป็นบริเวณที่มีความ

พิเศษเพราะเป็นบริเวณที่ $\text{Pb}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ จะเปลี่ยนจาก tetragonal เป็น orthorhombic โดยที่ขอบเขตของวัฏภาค (phase boundary) บริเวณนี้เกือบจะเป็นเส้นตรงที่ตั้งฉากกับแกน x แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคข้างต้นนี้เกิดขึ้นได้ทุกช่วงอุณหภูมิ เรียกช่วงบริเวณนี้ว่า morphotropic phase boundary (MPB) เป็นช่วงที่ PZT เปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ที่ช่วงบริเวณนี้ PZT จะมีสมบัติไพโซอิเล็กทริกสูงสุดดังแสดงในภาพ 2.4 นักวิจัยเชื่อว่าสาเหตุที่ PZT มีสมบัติไพโซอิเล็กทริกสูงสุดในช่วง MPB เพราะในช่วงนี้ PZT เกิดอยู่ในรูป 2 วัฏภาค คือ tetragonal กับ rhombohedral ซึ่งมีโพลาไรเซชัน 6 และ 8 ทิศทางตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำไป pole จึงจัดเรียงโดเมนตามทิศที่ pole ได้มากจึงแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้มากขึ้น PZT ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมักจะมีส่วนประกอบทางเคมีที่ MPB คือ $\text{Pb}(\text{Ti}_{0.48}\text{Zr}_{0.52})\text{O}_3$ เขียนแทนด้วย PZT



รูปที่ 2.3 วัฏภาคที่เสถียรของ $\text{Pb}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Jaffe et al., 1971)



รูปที่ 2.4 Relative permittivity ของวัสดุโพซิโคโนลิติกบริเวณ morphotropic phase boundary (MPB) (Moulson and Herbert, 2003)

วัสดุโพซิโคโนลิติกชนิด PZT ที่นิยมใช้ในเชิงการค้าและอุตสาหกรรม

1. PZT-4 มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า hard PZT เป็น PZT ที่ทำขึ้น โดยการ dope PZT ด้วย Sr มีสูตรเคมีว่า $(\text{Pb}_{0.94} \text{Sr}_{0.06})(\text{Zr}_{0.53} \text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ PZT ชนิดนี้มี dielectric loss ต่ำและทนทานต่อการ depole ได้สูงถึงแม้จะถูกกระทำด้วยแรงทางกลสูงก็ไม่ depole ดังนั้นจึงมักจะนำ PZT ชนิดนี้ไปใช้ทำ acoustic แทรนส์ดิวเซอร์สำหรับเรือดำน้ำที่อยู่ใต้น้ำลึก ๆ และใช้ทำเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า เช่น ที่จุดเตาแก๊ส

2. PZT-5A มีสูตรทางเคมี $(\text{Pb}_{0.988} (\text{Ti}_{0.48} \text{Zr}_{0.52})_{0.976} \text{Nb}_{0.024}) \text{O}_3$ มีคุณสมบัติที่ดี คือ

- high sensitivity คือ สภาพไวสูง
- high time stability คือ คุณสมบัติไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตามเวลา (aging ต่ำ)
- electrical resistivity คือ มีสภาพต้านทานไฟฟ้า ดังนั้นจึงมักถูกใช้ทำ

hydrophone

3. PZT-5H มี sensitivity และ dielectric constant สูงกว่า PZT-5A มี T_c ต่ำจึงถูกใช้งานที่อุณหภูมิไม่สูงและไม่ค่อยทนอุณหภูมิสูง

4. PZT-8 มีคุณสมบัติคล้าย ๆ PZT-4 แต่มี dielectric loss ต่ำกว่ามากและทนทานต่อการ depolarization มากกว่านอกจากนี้ PZT-8 ยังมี dielectric constant (K') และ coupling factor (k) ที่ต่ำกว่า PZT-4

2.3.3 Relaxor – PbTiO₃ system

เป็นวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับ MPB ที่ถูก dope ด้วยไอออนชนิดต่าง ๆ ถูกนำไปใช้เป็นวัสดุไพโซอิเล็กทริกหลายปีจนกระทั่งประมาณ 10 ที่ผ่านมานักวิทยาศาสตร์พบว่าวัสดุผสมระหว่าง electrostrictive หรือ relaxor กับ PbTiO₃ (PT) มีสมบัติหลายอย่างที่เหนือกว่า PZT ดังแสดงในตาราง 2.2 วัสดุ relaxor ในที่นี้ได้แก่พวก Pb(B₁,B₂)O₃ เมื่อ B₁ คือ Zn²⁺ Mg²⁺ Sc³⁺ ฯลฯ และ B₂ คือ Nb³⁺ Ta⁵⁺ ฯลฯ เช่น PMN หรือ Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ PZN หรือ Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃ PST หรือ Pb(Sc_{1/2}Ta_{1/2})O₃ เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 สมบัติไพโซอิเล็กทริกของ relaxor based ที่มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับ MPB

(Moulson and Herbert, 2003)

Composition	x at MPB(II)	k ₃₃	d ₃₃ /pC N ⁻¹	ε _r ^x /10 ³	T _c /°C
(1-x) PMN-xPT	0.33	0.73	690	5	160
(1-x) PST-xPT	0.45	0.73	655	4	205
(1-x) PSN-xPT	0.43	0.76	504	2.5	248
0.5 PNN-0.345 PT-0.155PZ	0.4	0.8	900	7	(~90)
(1-x) PZ-xPT	0.48 MPB (I)	0.64-0.75	220-600	1-3.4	195-365

หมายเหตุ : PMN = Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃; PST = Pb(Sc_{1/2}Ta_{1/2})O₃; PSN = Pb(Sc_{1/2}Nb_{1/2})O₃;

PNN = Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃; PZ = PbZrO₃; PT = PbTiO₃

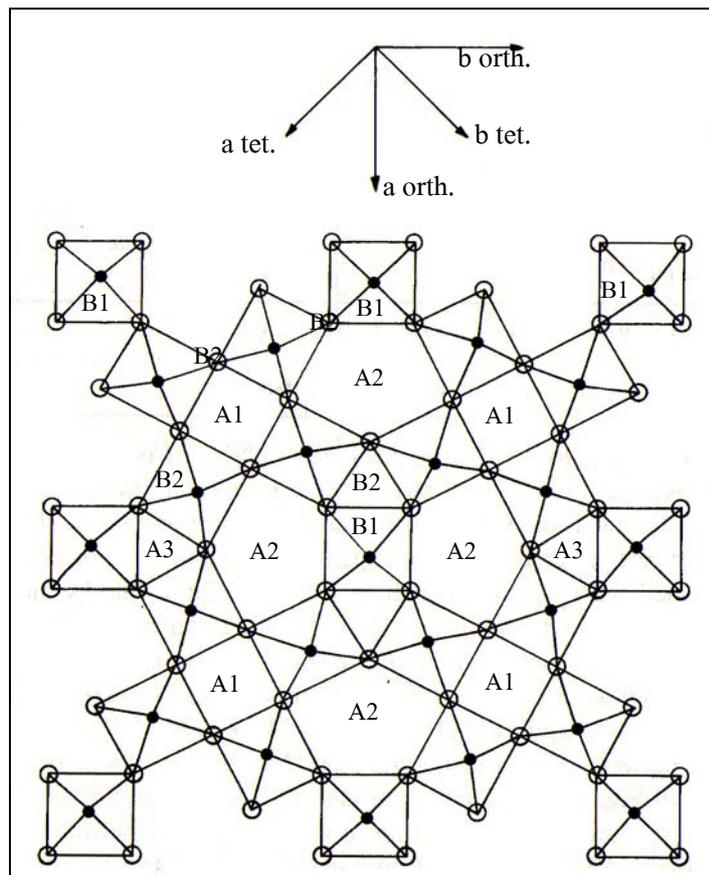
2.3.4 Tungsten Bronze Structure Compound

เป็นสารประกอบที่มีสูตร [(A1)₂(A2)₄A3][(B1)₂(B2)₈]O₃₀ เมื่อ A เป็นธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนต่ำ เช่น Pb²⁺ ส่วน B เป็นธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนสูง เช่น W⁴⁺ Ta⁴⁺ Nb⁵⁺ Ti⁴⁺ ตัวอย่างสารประกอบพวกนี้ เช่น PbNb₂O₆ โดยทั่วไปสารประกอบพวกนี้มีโครงสร้างผลึกแบบ Tungsten Bronze Structure ซึ่งเป็นโครงสร้างของสารประกอบระหว่างโลหะแอลคาไลน์ (alkaline metal) กับ tungsten oxide เช่น K_{5.7}W₁₀O₃₀ ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.5 จากรูปจะเห็นว่า B ไอออนจะจับกับออกซิเจนเป็น octahedron ซึ่งมี 2 ชนิด คือ octahedron ของ B₁ กับ octahedron ของ B₂ ต่อจากนั้น octahedron จะจับต่อกันเป็นโครงสร้างที่มีช่องว่างเป็นทางยาว (tunnels) 3 แบบ คือแบบ A1 มี O²⁻ ไอออนล้อมรอบ 4 ตัว แบบ A2 เป็นช่องใหญ่สุดมี O²⁻ ล้อมรอบ 5 ตัว และแบบ A3 เป็นช่องเล็กที่สุดมี O²⁻ ล้อมรอบ 3 ตัว ปกติช่อง A3 ไม่มีไอออนไปอยู่กเว้นแต่สารประกอบ

มีไอออนขนาดเล็กมาก ๆ เช่น Li^+ หรือ Mg^{2+} อยู่ด้วย อาจเขียนสูตรทั่วไปของสารประกอบพวกนี้ได้เป็น AB_2O_6

ข้อเสียของวัสดุไพโซอิเล็กทริกชนิดนี้ คือ สัณฐานทำให้มีความพรุนตัวน้อยกว่า 7% ได้ยาก ส่วนข้อดีของวัสดุไพโซอิเล็กทริกชนิดนี้ มีดังนี้

1. มี Q_m สูง ทำให้ถูกนำไปใช้งานด้าน board-band
2. มี T_c สูง บางตัวยังมีโพลาไรเซชันสูงทั้ง ๆ ที่ถูกให้ความร้อนขึ้นไปถึง 500°C
4. เตรียมได้ง่ายเพราะระหว่างเผาผนึก Pb มักไม่ค่อยระเหยออกไป
5. อาจแทนที่ Pb^{2+} บางส่วนใน PbNb_2O_6 ด้วย Ba^{2+} ทำให้ได้ solid solution ของ $\text{Pb}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$ ซึ่งมี MPB เหมือน ๆ PZT โดยที่ MPB อยู่ใกล้ ๆ กับจุด $\text{Pb}_{1/2}\text{Ba}_{1/2}\text{Nb}_2\text{O}_6$ ซึ่งมี $d_{33} \approx 220 \text{ pC/N}$ $Q_m \approx 300$ $T_c \approx 250^\circ\text{C}$

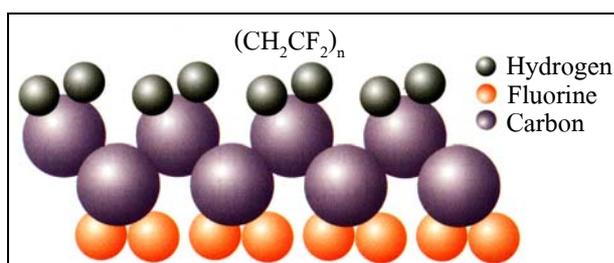


รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของ Tungsten bronze (Moulson and Herbert, 2003)

2.3.5 Polyvinylidene difluoride (PVDF)

เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งมีสูตรเคมีว่า $(\text{CH}_2\text{-CF}_2)_n$ และมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.6 ซึ่งมีสมบัติไพโซอิเล็กทริกสูงพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ดังตารางที่ 2.3 จะเห็นว่า PVDF มีค่า K' , k_p และ d_{33} ที่ต่ำกว่า PZT มากแต่ PVDF ก็มีข้อดีหลายอย่างที่ PZT ไม่มี เช่น

1. มีค่า piezoelectric voltage constant (g) สูงจึงเหมาะสำหรับนำไปทำ sensor
2. ยืดได้มากกว่า PZT
3. ทนต่อการ depole ได้สูงกว่า
4. มี dielectric strength สูงกว่า PZT
5. มี acoustic impedance ที่เข้าได้กับน้ำและร่างกายคนมากกว่า PZT จึงถูกนำไปใช้ทำทรานสดิวเซอร์ในเครื่อง sonar และ ultrasound



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ PVDF (APC International, 2002)

ตารางที่ 2.3 สมบัติไพโซอิเล็กทริกของ PVDF เทียบกับ PZT และ BaTiO_3 ที่อุณหภูมิ 20°C

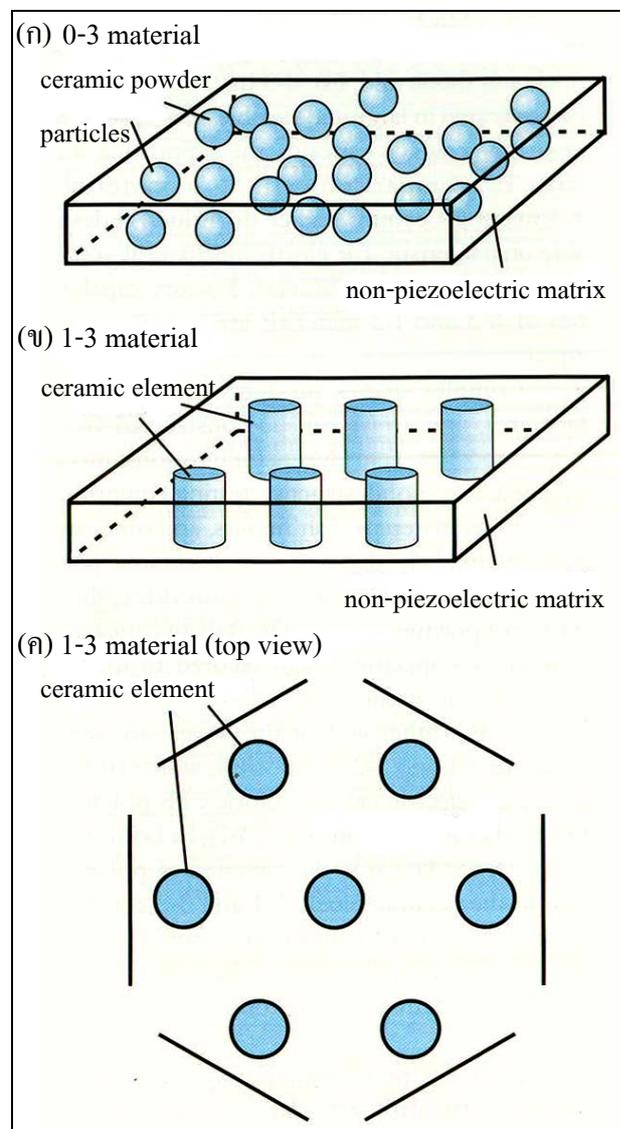
(APC International, 2002)

Property	Unit	PVDF	BaTiO3	PZT
Dielectric Constant	-	12	600-1200	<1000-4000
Piezoelectric Charge Constant	pC/N	$d_{31} = 20$	-30 - -60	$\sim -100 - > -600$
		$d_{33} = -30$	<100-150	$\sim -200 - > 600$
Electromechanical Coupling Factor	%	11	21	30-75
Young's Modulus	10^{10} N/m^2	0.3	11-12	6- 9
Acoustic Impedance	$10^6 \text{ kg/(m}^2\text{s)}^*$	2.3	25	30
Density	kg/m^3	1780	5300-5700	7500 -7700

หมายเหตุ : * MRa (megarayleigh) ($1\text{Ra} = 1 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$)

PVDF อาจนำไปใช้ในรูปคอมโพสิตกับเซรามิก การนำไปทำคอมโพสิตจะทำให้วัสดุผสมมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นเพราะนำข้อดีของวัสดุมารวมกัน การทำคอมโพสิตที่นิยมจะมี 2 แบบ คือ แบบ 0-3 และแบบ 1-3 คอมโพสิต สำหรับแบบ 0-3 คอมโพสิต คือ คอมโพสิตที่มีเซรามิกเป็น active phase มี connectivity 0 ทิศทางและพอลิเมอร์เป็น passive phase มี connectivity 3 ทิศทาง ส่วนแบบ 1-3 คอมโพสิตเป็นคอมโพสิตที่เซรามิกเป็น active phase มี connectivity 1 ทิศทางและพอลิเมอร์ที่เป็น passive phase มี connectivity 3 ทิศทางดังแสดงในรูปที่ 2.7

จากวัสดุไพโซอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ ที่กล่าวในเบื้องต้นและได้รวบรวมสมบัติวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่สำคัญของ single-phase piezoelectric ในบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.7 คอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์กับเซรามิก (ก) แบบ 0-3 คอมโพสิต (ข)-(ค) แบบ 1-3 คอมโพสิต

ตารางที่ 2.4 สมบัติของวัสดุไพโซอิเล็กทริกบางชนิด (Moulson and Herbert, 2003)

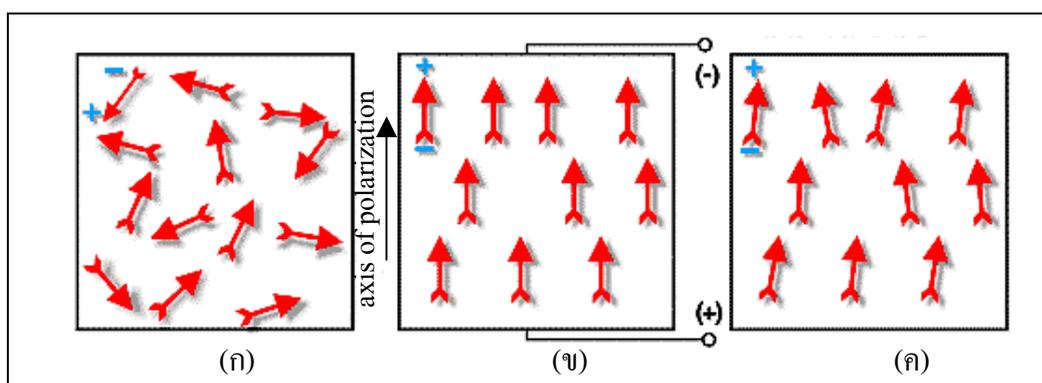
Property	Unit	BaTiO ₃	PZT A ^b	PZT B ^b	PbNb ₂ O ₆	Na _{1/2} K _{1/2} NbO ₃	LiNbO ₃ ^a	LiTaO ₃ ^a	PbTiO ₃ ^c
density	Mg m ⁻³	5.7	7.9	7.7	5.9	4.5	4.64	7.46	7.12
T _c	°C	130	315	220	560	420 ^d	1210	665	494
ϵ_{r33}^x		1900	1200	2800	225	400	29	43	203
ϵ_{r11}^x		1600	1130	-	-	600	85	53	-
tan δ	10 ⁻³	7	3	16	10	10	-	-	22
k _p		0.38	0.56	0.66	0.07	0.45	0.035	0.1	-
k ₃₁		0.21	0.33	0.39	0.045	0.27	0.02	0.07	0.052
k ₃₃		0.49	0.68	0.72	0.38	0.53	0.17	0.14	0.35
k ₁₅		0.44	0.66	0.65	-	-	0.61	-	0.36
d ₃₁	pC N ⁻¹	-79	-119	-234	-11	-50	-0.85	-3.0	-7.4
d ₃₃	pC N ⁻¹	190	268	480	80	160	6	5.7	47
d ₁₅	pC N ⁻¹	270	335	-	-	-	69	26	-
Q _m		500	1000	50	11	240	-	-	326
S ₁₁ ^E		8.6	12.2	14.5	29	9.6	5.8	4.9	11
S ₁₂ ^E	μm ² N ⁻¹	-2.6	-4.1	-5.0	-	-	-1.2	-0.52	-
S ₁₃ ^E		-2.9	-5.8	-6.7	-5 to -8	-	-1.42	-1.28	-
S ₃₃ ^E		9.1	14.6	17.8	25	10	5.0	4.3	11

หมายเหตุ : ^aSingle crystals; ^bPZT A and PZT B are two typical PZT materials illustrating, in particular, the wide range of achievable Q_m values; ^c+5 mol% Bi_{2/3}Zn_{1/3}Nb_{2/3}O₃;

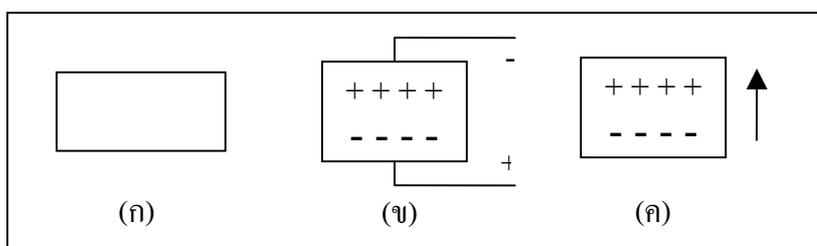
^dDepoles above 180°C

2.4 Piezoelectric action in piezoelectric ceramic

การจะทำให้วัสดุที่มีสมบัติไพโซอิเล็กทริกต้องมีการเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้า (pole) ของวัสดุ ก่อนนำไปใช้งาน โดยการ apply สนามไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงใส่วัสดุไพโซอิเล็กทริกดังแสดง ในรูปที่ 2.8 จากรูปที่ 2.8 (ก) จะเห็นว่าก่อน apply สนามไฟฟ้า electric dipole เรียงตัวอย่างไม่เป็น ระเบียบ ทำให้ผลรวมของโพลาริเซชันมีค่าเป็นศูนย์ แต่เมื่อ apply สนามไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ใส่วัสดุจึงทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของ electric dipole ดังรูปที่ 2.8 (ข) และเมื่อนำสนามไฟฟ้าออก ทำให้ทิศทางของ electric dipole นั้นเรียงตัวเอียงจากทิศทางขณะ apply สนามไฟฟ้าเล็กน้อยเรียก โพลาริเซชันที่เหลือว่า remanent polarization ดังรูปที่ 2.8 (ค) อนึ่งการเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้าจะทำให้ วัสดุไพโซอิเล็กทริกขยายขนาดขึ้นในทิศทางกับสนามไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำและหดตัวในทิศที่เหลือ อย่างถาวรดังแสดงในรูปที่ 2.9

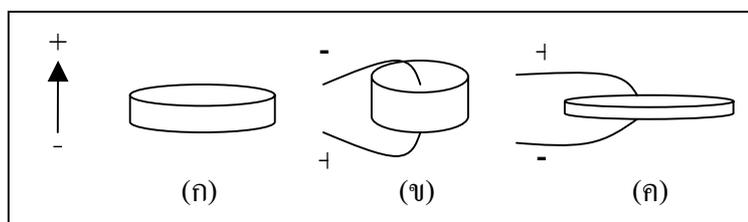


รูปที่ 2.8 (ก) การจัด electric dipole อย่างไม่เป็นระเบียบก่อน apply สนามไฟฟ้า (ข) การจัดเรียง electric dipole เป็นระเบียบ 100% ขณะ apply สนามไฟฟ้า (ค) การจัดเรียง electric dipole หลังจากหยุด apply สนามไฟฟ้า (APC International, 2002)



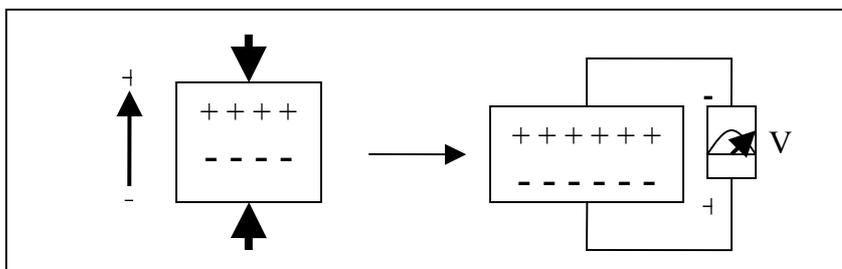
รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุขณะเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้า (ก) ก่อน apply สนามไฟฟ้า (ข) ขณะ apply สนามไฟฟ้า (ค) หยุด apply สนามไฟฟ้า (สุธรรม ศรีหล่มสัก, 2551)

เมื่อนำชิ้น โพธิโซอิเล็กทริกที่ทำขั้วไฟฟ้าแล้วไปใช้งานหาก apply ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดกลาง ๆ ในทิศทางเดียวกับทิศทางที่เหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้าในวัสดุโพธิโซอิเล็กทริก ชิ้นวัสดุจะขยายตัวอย่างชั่วคราวในทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าที่ apply และหดตัวในทิศที่เหลือ ดังภาพ 2.10 (ข) แต่ถ้า apply สนามไฟฟ้าขนาดกลาง ๆ ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางที่เหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้าในชิ้นงาน ชิ้นวัสดุโพธิโซอิเล็กทริกจะหดตัวในทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำและขยายตัวในทิศที่เหลือ ดังรูปที่ 2.10 (ค) เมื่อหยุดเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าข้างต้น ชิ้นวัสดุจะมีขนาดกลับเท่าเดิมดังภาพ 2.10 (ก) เรียกการเปลี่ยนแปลงของวัสดุโพธิโซอิเล็กทริกในทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าว่า thickness effect ส่วนการเปลี่ยนแปลงในทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า เรียกว่า transverse effect

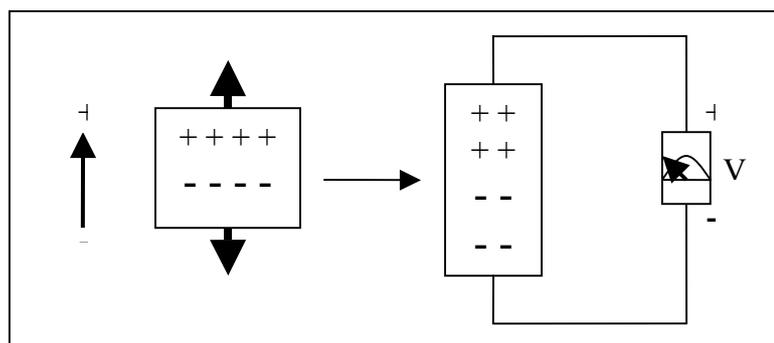


รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุโพธิโซอิเล็กทริกขณะ apply สนามไฟฟ้า

ต่อมาหากออกแรงกด (compressive) ลงบนชิ้นวัสดุโพธิโซอิเล็กทริกในทิศขนานกับทิศทางที่เหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้า ชิ้นวัสดุจะปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.11 สังเกตว่ารูปที่ 2.11 เป็น reversible process ของรูปที่ 2.9 ในทางตรงกันข้ามหากออกแรงดึงในทิศขนานกับทิศสนามไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำ ชิ้นวัสดุจะปลดปล่อยไฟฟ้าในทิศตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.12

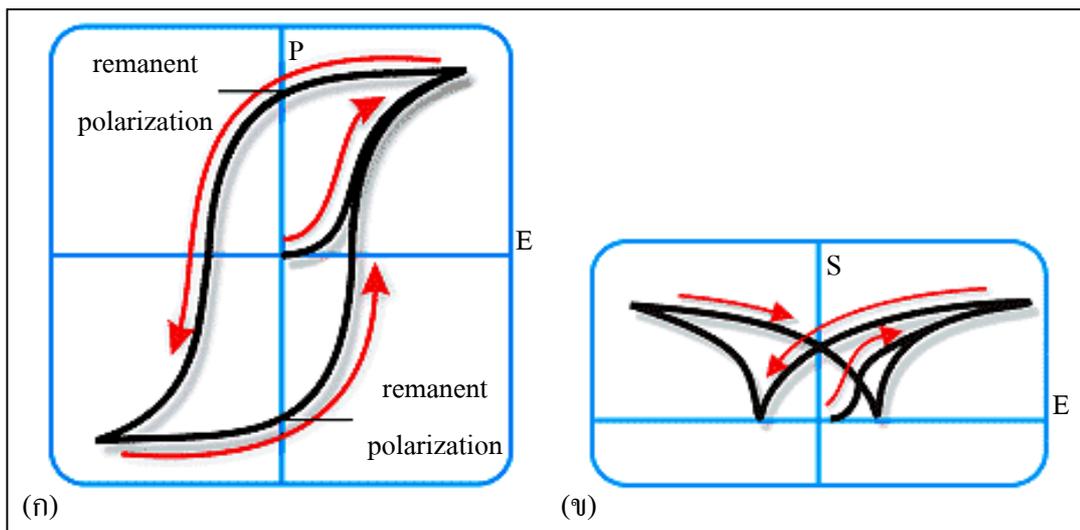


รูปที่ 2.11 ทิศกระแสไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อ apply แรงกด (สุธรรม ศรีหล่มสัก, 2551)



รูปที่ 2.12 ทิศกระแสไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อ apply แรงดึง (สุธรรม ศรีหล่มสัก, 2551)

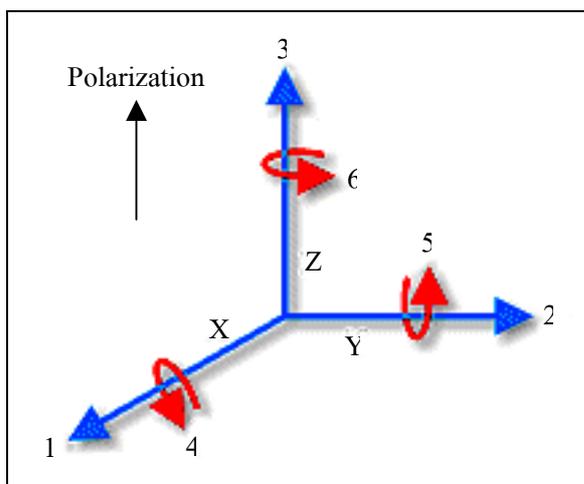
การ apply สนามไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์สูง ๆ ใ่วัสดุจะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันและขนาด (dimension) กลับไปกลับมา หากนำการเปลี่ยนแปลงไปเขียนกราฟ จะได้กราฟ hysteresis loops ดังรูปที่ 2.13 จากรูปที่ 2.13 (ก) จากกราฟ hysteresis ที่เกิดจากการ apply สนามไฟฟ้าด้านบวกใ่วัสดุจะมีโพลาไรเซชันสูงสุดในด้านบวก เมื่อค่อย ๆ ลดสนามไฟฟ้าจนกระทั่งเป็นศูนย์วัสดุจะเหลือโพลาไรเซชันค่าหนึ่งเรียกว่า remanent polarization เมื่อ apply สนามไฟฟ้าขั้วลบทำให้โพลาไรเซชันจะมีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ แต่ในทิศทางที่เป็นลบจนกระทั่งอิ่มตัว และเมื่อลดสนามไฟฟ้าในด้านลบลงจนเป็นศูนย์จะได้ remanent polarization ที่เป็นลบ หาก apply สนามไฟฟ้าที่เป็นบวกโพลาไรเซชันจึงจะมีค่าเป็นบวกเหมือนเดิม ดังแสดงทิศทางที่เกิด polarization ตามลูกศรในรูปที่ 2.13 (ก) และในขณะเดียวกันการ apply ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงพอจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุไพโซอิเล็กทริกในทิศเดียวกับการโพลาไรเซชันซึ่งจะแปรผันตรงกับสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 2.13 (ข)



รูปที่ 2.13 (ก) กราฟ hysteresis ของ polarizaton (ข) ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาดวัสดุ (strain, S) ในทิศการ polarization (APC International, 2002)

2.5 ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant)

เครื่องหมายแสดงสมบัติของวัสดุไพโซอิเล็กทริกมักจะมีตัวเลข 2 ตัวห้อยข้างหลังดังแสดงในตารางที่ 2.4 ตัวเลขที่ห้อยตัวหน้าบอกทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ apply เข้าไปในวัสดุหรือที่วัสดุจ่ายออกมาเมื่อถูกแรงทางกลกระทำ ส่วนตัวเลขห้อยตัวหลังแสดงทิศทางที่วัสดุไพโซอิเล็กทริกยืดหรือหดเมื่อถูกสนามไฟฟ้าภายนอกกระทำหรือทิศทางที่ apply แรงทางกลกระทำต่อวัสดุไพโซอิเล็กทริก หมายเลขถูกกำหนดโดยอ้างอิงกับทิศทาง polarization ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จากรูปจะเห็นว่าทิศทางหมายเลข 3 เป็นแกน z ของผลึกซึ่งขนานกับทิศที่เหนี่ยวนำ (pole) ให้เกิดขั้วไฟฟ้าในวัสดุ แกนของผลึกที่เหลือคือ x และแกน y แทนด้วยทิศหมายเลข 1 และ 2 ตามลำดับดังรูปที่ 2.14 ส่วนหมายเลข 4 5 และ 6 หมายถึงแรงเฉือนรอบ ๆ แกน x y และ z ตามลำดับ



รูปที่ 2.14 ทิศทางของแรงกระทำที่มีผลต่อวัสดุไพโซอิเล็กทริก (APC International, 2002)

2.5.1 Electromechanical coupling factor (k)

เป็นสมบัติของวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่เป็นตัวชี้บอก (indicator) ความสามารถในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ค่าจำกัดความของ k ในรูปสมการคือ

$$k^2 = \frac{\text{mechanical energy convert to electrical energy}}{\text{input mechanical energy}} \quad (2.1)$$

หรือ

$$k^2 = \frac{\text{electrical energy convert to mechanical energy}}{\text{input electrical energy}} \quad (2.2)$$

วัสดุไพโซอิเล็กทริกต่างชนิดกันมี k^2 ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.5 (Jaffe, Cook, and Jaffe, 1971) วัสดุที่มี k มากจะมีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานจากรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่งได้มาก แต่ค่าของ k ไม่ใช่ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานเพราะสมการคำนวณ k ไม่ได้คำนึงถึงพลังงานที่สูญเสียเมื่อเปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่ง ถ้าจะหาประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานต้องหาจากสมการต่อไปนี้ (Jaffe et al., 1971)

$$\text{ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงาน} = \frac{k^2}{(k^2 + D)} \quad (2.3)$$

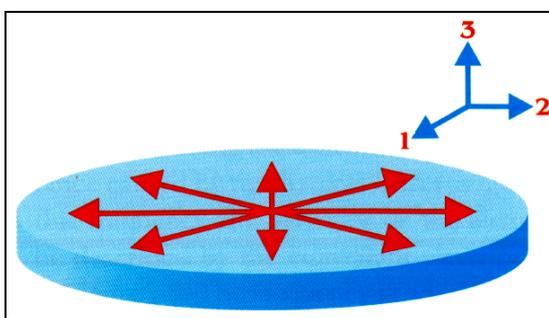
เมื่อ D คือ dissipation factor ด้าน input

ค่า k ของวัสดุใด ๆ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุนั้น ๆ เพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นอยู่กับ การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้า (poling) และทิศทางของแรงเชิงกลหรือกระแสไฟฟ้าด้วย ดังนั้น นักเซรามิกจึงแสดง k ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น k_{15} k_{33} k_{31}

ตารางที่ 2.5 ค่า k^2 ของวัสดุไพโซอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ (Jaffe et al., 1971)

วัสดุ	k^2
Quartz	0.1
BaTiO ₃	0.4
Pb(Ti,Zr)O ₃	0.5-0.7
Rochelle salt	0.9 (ที่ 24°C)

อนึ่งสำหรับวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่มีรูปทรงแบนเหมือนเหรียญที่ถูก pole ตามความหนา (ขนานกับแกน z) และเมื่อนำไปจ่ายกระแสไฟฟ้าขนานกับแกน z แล้วเกิดการยืดหรือหดตัวตามแนวรัศมีในแกน x และแกน y ดังรูปที่ 2.15 นิยมแสดง k ในรูปของ planar electromechanical coupling factor หรือบางที่เรียกย่อ ๆ ว่า planar coupling factor (k_p) ซึ่ง Institute of Radio Engineer (IRE) ได้กำหนดวิธีหาค่า k_p ใน IRE Standards on Piezoelectric Crystals, (1957; 1961)



รูปที่ 2.15 การสั่นตัวในแนวรัศมีของแผ่นไพโซอิเล็กทริก (APC International, 2002)

2.5.2 Electric quality factor (Q_e)

ค่า Electric quality factor Q_e หาได้จากสมการที่ 2.4

$$Q_e = \frac{1}{\tan \delta} \quad (2.4)$$

เมื่อ $\tan \delta$ คือ dielectric dissipation factor หรือ dielectric loss (D)

คู่ของ Q_e คือ mechanical quality factor Q_m ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.5

$$Q_m = \frac{f_n^2}{(2\pi f_m C_0 Z_m)(f_n^2 - f_m^2)} \quad (2.5)$$

Q_m มีความสัมพันธ์กับ mechanical loss ในลักษณะคล้าย ๆ กับความสัมพันธ์ระหว่าง Q_e กับ dielectric loss ดังสมการที่ 2.6

$$Q_m = \frac{1}{\tan \delta_m} \quad (2.6)$$

เมื่อ $\tan \delta_m$ คือ mechanical loss

วัสดุไพโซอิเล็กทริกที่มี Q_m สูงจะเหมาะในการนำไปใช้งานที่ต้องการ displacement สูง ๆ และ generate heat ออกมาน้อย เช่น ใช้ทำไพโซอิเล็กทริกมอเตอร์ (APC International, 2002)

2.5.3 Dielectric constant

Relative dielectric constant (K') สัดส่วนระหว่างประจุที่เก็บกักไว้บนผิวของวัสดุ ที่ความต่างศักย์ 1 V ต่อประจุที่เก็บกักไว้บนผิวของ electrode ในสุญญากาศที่ความต่างศักย์ 1 V ซึ่งสามารถหา K' ของวัสดุใด ๆ จากสมการที่ 2.7

$$K' = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} \quad (2.7)$$

เมื่อ ϵ' = permittivity ของวัสดุ

ϵ_0 = permittivity ของสุญญากาศ (8.85×10^{-12}) F/m

2.5.4 Young's modulus

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

$$T = YS \quad (2.8)$$

เมื่อ Y คือ Young's modulus มีหน่วยเหมือน stress แต่ถ้า applied stress ลงบนของแข็งที่เป็นวัสดุไพโซอิเล็กทริกจะเกิดทั้ง strain และประจุไฟฟ้า

2.5.5 Piezoelectric Charge Constant

ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุมีความสัมพันธ์กับ stress ที่ apply ดังสมการที่ 2.9

$$D = \frac{Q}{A} = dT \quad (2.9)$$

เมื่อ Q = ประจุไฟฟ้าที่สะสม

A = พื้นที่หน้าตัด (m^2)

T = stress (N/m^2)

d = piezoelectric strain constants (C/N)

D = dielectric displacement (C/m^2)

ในทางตรงกันข้ามถ้า apply สนามไฟฟ้าใสบนวัสดุจะเกิด strain ทำให้วัสดุเกิดการขยายและหดตัวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าซึ่ง strain ที่เกิดจะแปรตามขนาดของสนามไฟฟ้างสมการความสัมพันธ์ 2.10

$$S = dE \quad (2.10)$$

เมื่อ S = strain

E = Electric field strength (V/m)

d = Piezoelectric strain constant (meters/volt)

ดังนั้น d มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.11

$$d = \frac{D}{T} = \frac{S}{E} \quad (2.11)$$

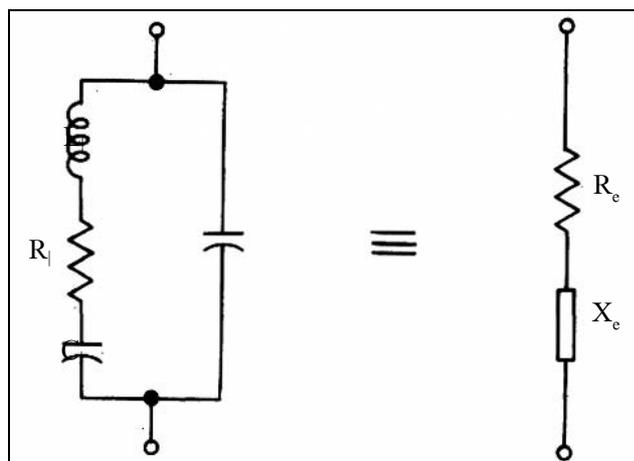
วัสดุไพโซอิเล็กทริกที่ใช้ทำเครื่องมือที่ต้องสั่นตัวมากหรือขยับตัวมาก เช่น sonar ultrasonic cleaner และหม้อแปลงจะต้องมีค่า d มาก ๆ นอกจากนี้ยังมี piezoelectric constant อีกตัวหนึ่ง คือ piezoelectric voltage constant (g) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ d ดังสมการที่ 2.12

$$g = \frac{d}{\epsilon'} = \frac{d}{K'\epsilon_0} \quad (2.12)$$

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

2.6 Dynamic Behavior (High Frequency Input)

IRE Standards (1957; 1961) กำหนดให้แทนวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่สั่นตัวเมื่อได้รับไฟฟ้า กระแสสลับด้วยวงจรสมมูล (equivalent circuit) ที่ประกอบด้วย L_1 , R_1 , C_1 และ C_0 ดังรูปที่ 2.16 จากรูปจะเห็นว่า เป็นวงจรที่มีตัวเก็บประจุ (C_1) ตัวเหนี่ยวนำ (L_1) และตัวต้านทาน (R_1) ต่ออนุกรมกันอยู่จากนั้นนำทั้งชุดไปต่อขนานกับตัวเก็บประจุ (C_0) เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับ วัสดุไพโซอิเล็กทริก วัสดุจะยืดและหดตัวไปตามความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำให้วัสดุยืดและหดตัวได้ดีที่สุดเรียกว่าความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency (f)) ที่ความถี่นี้วัสดุไพโซอิเล็กทริกสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปเป็นพลังงานกลได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด (APC International, 2002) อาจกล่าวอีกอย่างว่า ที่ความถี่นี้วัสดุไพโซอิเล็กทริกจะสั่นตัวรุนแรงสูงสุดและสูญเสียการสั่นสะเทือนน้อยสุด (lowest mechanical damping) (IRE Standard, 1957; 1961)



รูปที่ 2.16 วงจรไฟฟ้าสมมูลการสั่นของวัสดุไพโซอิเล็กทริก (IRE Standard, 1957)

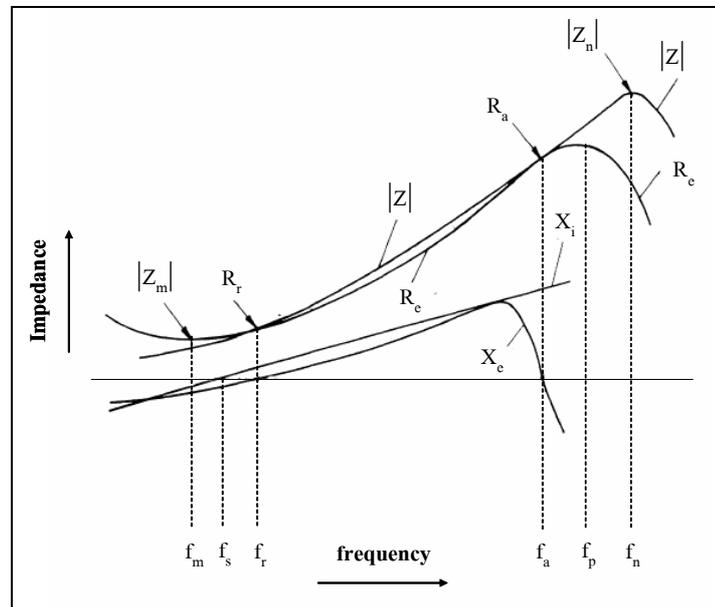
ความถี่เรโซแนนซ์ ของวัสดุไพโซอิเล็กทริกหนึ่ง ๆ จะแปรตามองค์ประกอบทางเคมี และรูปทรงของวัสดุไพโซอิเล็กทริกนั้น ๆ โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่มีความหนามากจะมีความถี่เรโซแนนซ์ต่ำกว่าวัสดุบาง (APC International, 2002) ซึ่งสามารถหาความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุไพโซอิเล็กทริกได้โดยวัดอิมพีแดนซ์ของวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่ความถี่ต่าง ๆ รูปที่ 2.17 และ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของวัสดุไพโซอิเล็กทริก จากรูปที่ 2.17 จะเห็นว่าความถี่ f_m คือความถี่ที่ความนำเชิงซ้อนสูงสุด (frequency at maximum admittance) หรืออิมพีแดนซ์ต่ำสุด (minimum impedance) f_s คือ series resonance frequency f_r คือความถี่เรโซแนนซ์ f_a คือความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (antiresonance frequency) f_p คือ parallel resonance frequency และ f_n คือความถี่ที่ความนำเชิงซ้อนต่ำสุด (frequency at minimum admittance) หรืออิมพีแดนซ์สูงสุด (maximum impedance) จากรูปที่ 2.18 จะเห็นว่า f_m มีค่าประมาณเท่า ๆ กับ f_s และ f_p มีค่าประมาณเท่า ๆ กับ f_n เนื่องจาก f_s เป็นความถี่ที่อิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลมีค่าต่ำสุดและความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสียเชิงกล (resistance caused by mechanical loss) มีค่าน้อยมากดังนี้

$$n \quad |Z_{L_1}| = |Z_{C_1}|$$

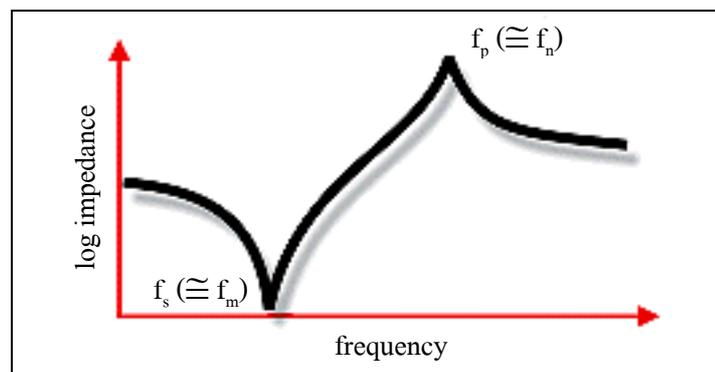
จึงเขียนความสัมพันธ์เป็นสมการได้ว่า $2\pi_s L_1 = \frac{1}{2\pi_s C_1}$ จัดรูปสมการใหม่ได้ตามสมการ

ที่ 2.13 (Schulze, 2001)

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับวัสดุไพโซอิเล็กทริก (IRE Standards, 1957)

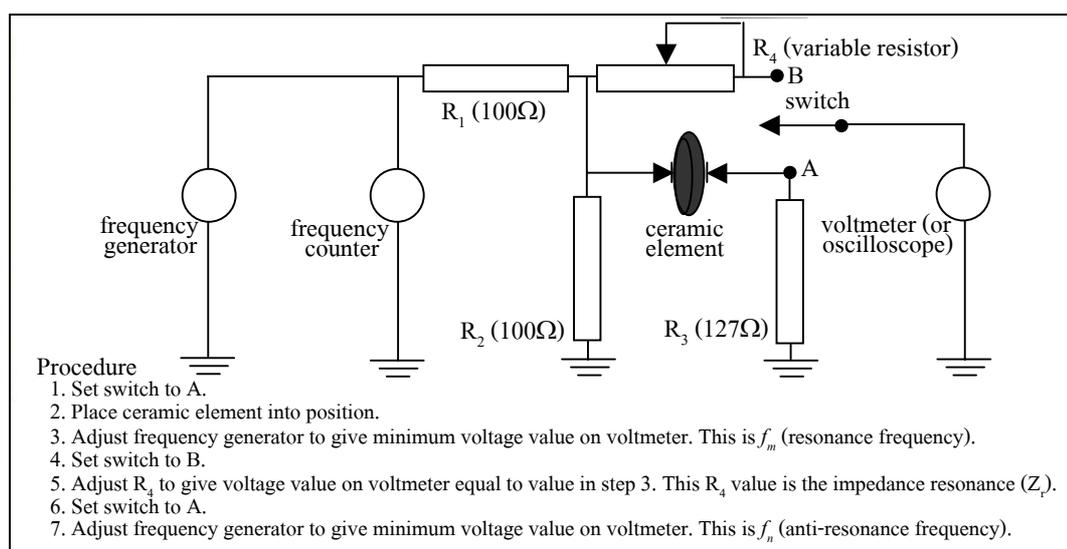


รูปที่ 2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ในการสั้นของวัสดุไพโซอิเล็กทริก (APC International, 2002)

เมื่อเพิ่มความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับวัสดุไพโซอิเล็กทริกจะทำให้อิมพีแดนซ์ของวัสดุไพโซอิเล็กทริกมีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่ f_n ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ f_s และ f_p โดยที่ f_p หาได้จากสมการที่ 2.14 (IRE Standard, 1957)

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \left[\sqrt{\frac{1}{L_1 C_1} \left(1 + \frac{C_1}{C_0} \right)} \right] \quad (2.14)$$

ที่ความถี่น้อยกว่า f_m และความถี่มากกว่า f_n วัสดุไพโซอิเล็กทริกแสดงพฤติกรรมหลักในการเก็บประจุไฟฟ้า (capacitive) แต่ที่ความถี่ระหว่าง f_m ถึง f_n วัสดุแสดงพฤติกรรมหลักในการเหนี่ยวนำ (inductive) f_m และ f_n ของวัสดุไพโซอิเล็กทริกใด ๆ อาจหาได้โดยต่อวงจรและทำตามกระบวนการในรูปที่ 2.19 (APC International, 2002)



รูปที่ 2.19 ระบบในการหาค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุด (minimum impedance) และค่าอิมพีแดนซ์สูงสุด (maximum impedance) ของวัสดุไพโซอิเล็กทริกเซรามิก (APC International, 2002)

วัสดุไพโซอิเล็กทริกทั่วไป $(f_n - f_m) > (f_p - f_s) > (f_a - f_r)$ แต่สำหรับวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่มี coupling factor (k) สูง ๆ ทั้ง 3 จะมีค่าใกล้เคียงกันไม่สามารถหา $f_p - f_s$ ได้โดยตรงแต่จะหาได้ในรูปของ $(f_n - f_m)$ ตามสมการ 2.15 (IRE Standard, 1961)

$$\Delta f = f_p - f_s \cong \frac{f_n - f_m}{\sqrt{1 + \frac{4}{M^2}}} \quad (2.15)$$

เมื่อ M = figure of merit ซึ่งหาได้จาก

$$M = \frac{1}{2\pi f_s R_1 C_0} \cong \frac{1}{2\pi f_m (C_0 + C_1) |Z|_{\min}} \quad (2.16)$$

เมื่อ f_m = frequency at minimum impedance

f_s = series resonance frequency

f_p = parallel resonance frequency

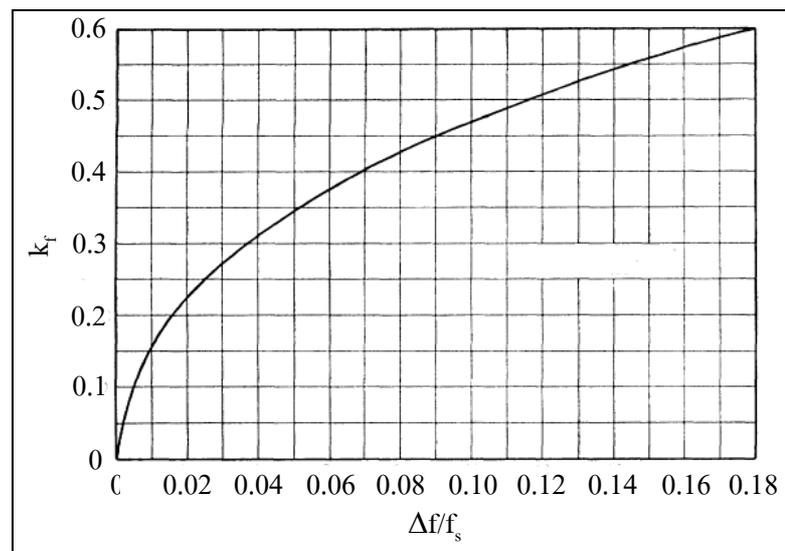
Z = impedance ของตัวอย่าง

R_1 , C_1 และ C_0 คือ ค่า resistance และ capacitance ของชิ้นส่วนใน equivalent circuit

$C_1 + C_0$ คือ ค่าความเก็บประจุของชิ้นตัวอย่างที่ความถี่ต่ำ (1 kHz)

C_0 คือ ค่าความเก็บประจุที่ความถี่สูง ๆ เช่น 800 kHz-1000 kHz

Planar coupling factor (k_p) ของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกที่มีรูปทรงแบน ๆ ที่ถูก poled ในทิศขนานกับแกน Z มีความสัมพันธ์กับ $\Delta f/f_s$ ตามรูปที่ 2.20 (IRE Standard, 1961)



รูปที่ 2.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง planar coupling factor (k_p) ของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก
รูปทรงแบน ๆ กับ $\Delta f/f_s$ (IRE Standard, 1961)

2.7 การนำไปใช้งานของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก

แบ่งการนำวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกไปใช้งานได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้

1. ตัวผลิตกระแสไฟฟ้า (generator) ใช้ในการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการ spark
2. ตัวรับรู้ (sensor) ใช้สำหรับแปลงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น ความเร่งหรือความดันเป็นสัญญาณไฟฟ้า
3. แอคชูเอเตอร์ (actuator) ใช้สำหรับเปลี่ยนแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดที่มีความแม่นยำสูงใช้สำหรับปรับเครื่องมือกล กระจก เลนส์ ควบคุมวาล์วไฮดรอลิก
4. แทรนสดิวเซอร์ (transducer) ใช้สำหรับแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานการสั่นเชิงกลซึ่งมักอยู่ในรูปของเสียง เช่น buzzer หรือ ultrasound เช่น ultrasonic cleaner, sonar เป็นต้น

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้าพบว่ามีนักวิจัยหลายกลุ่มที่ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะแสดงปัจจัยที่มีผลต่อการเก็บเกี่ยวพลังงาน ปริมาณพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้รวมทั้งการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ มีดังนี้

Kymissis et al. (1998) ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากรองเท้ากีฬาโดยจะใช้ PVDF และ Thunder unimorph วางที่ปลายเท้าและสันเท้าตามลำดับ พบว่า PVDF กับ Thunder unimorph สามารถผลิตแรงดันได้ ± 60 V และ 150 V โดยทำงานที่ load resistance 250 k Ω ความถี่ 1 Hz และได้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 1.1 mW และ 1.8 mW ตามลำดับ แต่พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ส่งผ่านจริงเท่ากับ 1 mJ/Step และ 2 mJ/Step และยังพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มกำลังไฟฟ้าถ้าออกแบบโดยใช้ unimorphs มาเรียงซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น

Mossi et al. (2001) ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจาก piezoelectric actuators โดยใช้ Thunder เก็บเกี่ยวพลังงาน ศึกษาชนิดโลหะที่ใช้ติดกับแผ่นเซรามิกและการ displacement ของวัสดุพบว่าความสูงของโดม การขยับตัวของ Thunder มีผลต่อพลังงานที่ผลิตได้และพบว่ากาวที่ใช้ติดแผ่นโลหะกับแผ่นเซรามิกมีผลต่อพลังงานไฟฟ้าที่ได้และการไม่มีแผ่นโลหะติดอยู่ที่ด้านบน Thunder ทำให้วัสดุมีการเคลื่อนตัวที่ดีจึงให้พลังงานสูงขึ้น

Sodano et al. (2003) ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกที่ได้จากการสั่นของเครื่องยนต์และเปรียบเทียบการเก็บพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุกับ nickel metal hydride battery พบว่าการเก็บพลังงานในตัวเก็บประจุจำเป็นต้องมีสวิตช์เปิดและปิดในขณะบรรจุ

และปล่อยพลังงานเนื่องจากตัวเก็บประจุมีการบรรจุและการคายพลังงานที่เร็วซึ่งได้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเพียง 0.17 mW แต่ถ้าใช้แบตเตอรี่ก็สามารถบรรจุพลังงานได้มากและพบว่าการบรรจุพลังงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ใช้เวลาน้อยกว่าการบรรจุพลังงานที่ความถี่แบบสุ่ม (1-1000 Hz)

Sodano et al. (2004) ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจาก PZT เพื่อหาความถี่และแอมพลิจูดที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยวพลังงาน โดยทดลองติดตั้ง Quick Pack กับอุปกรณ์จ่ายแรงดันและวัดพลังงานไฟฟ้าที่ได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้น พบว่าการใช้ electrical load resistance ที่เหมาะกับอิมพีแดนซ์ของ PZT จะทำให้ได้ประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานสูงสุดจึงจำเป็นต้องปรับ load resistance ในวงจรเพื่อให้เก็บเกี่ยวพลังงานได้มากที่สุด

Sodano et al. (2005) ศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไพโซอิเล็กทริกในการเก็บเกี่ยวพลังงานและประสิทธิภาพการบรรจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่ที่มีขนาดต่าง ๆ โดยใช้ Monolithic Lead-Zirconate-Titanate (PZT) Bimorph Quick Pack (QP) Actuator และ Macro Fiber Composite (MFC) พบว่า Monolithic PZT มีประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานดีที่สุดทั้งในสภาวะความถี่เรโซแนนซ์และความถี่แบบสุ่ม (0-500 Hz) ผลทดสอบการบรรจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่ที่มีขนาดต่าง ๆ พบว่าเมื่อขนาดของแบตเตอรี่ใหญ่ขึ้น Monolithic PZT ใช้เวลาในการบรรจุไฟฟ้าน้อยกว่า QP และพบว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์จะใช้เวลาในการบรรจุไฟฟ้าน้อยกว่าที่ไม่ใช่ความถี่เรโซแนนซ์ สำหรับ MFC ไม่เหมาะในการบรรจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่เนื่องจากให้กระแสไฟฟ้าที่ต่ำ

Kim et al. (2005) ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงาน โดยใช้ cymbal แทรนส์ดีวเซอร์ พบว่าความหนาของชั้นไพโซอิเล็กทริกเซรามิกมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าและพบว่าชั้น PZT เซรามิกที่มีรูปร่างเป็นวงแหวนซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 mm และ 18 mm หนา 1 mm มีฝาครอบเหล็กกล้า (steel cap) หนา 0.4 mm ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 52 mW แรงดันไฟฟ้าประมาณ 250 V เมื่อ apply แรง 70 N บนชั้น PZT ความถี่ทางกล 100 Hz ที่ต่อกับความต้านทานภายนอก 400 k Ω

Chern et al. (2006) ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจาก piezoelectric bimorph actuator โดยอาศัยพลังงานลมทำให้เกิดการหมุนของใบพัดเพื่อทำให้ bimorph สั่นพบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จะขึ้นกับค่า figure of merit ($d \cdot g$) ของวัสดุ เมื่อ d คือ piezoelectric strain constant และ g คือ piezoelectric voltage constant นอกจากนี้ยังพบว่าแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้ขึ้นกับ load resistance ของวงจรและกำลังไฟฟ้าจะมากขึ้นเมื่อ bimorph ถูกทำให้สั่นที่ความถี่สูงขึ้น ซึ่งจากการศึกษาได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.2 mW ที่ความถี่ 12 Hz โดยใช้ load resistance 1.7 k Ω พลังงานที่ได้สามารถเก็บในตัวเก็บประจุหรือ miniaturized Li-battery

Islamand Priya (2006) ศึกษาความหนาแน่นของพลังงานจาก piezoelectric polycrystalline ceramic พบว่าวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่มี piezoelectric voltage constant (g) และ piezoelectric strain

constant (d) สูง ๆ จะให้พลังงานออกมาสูงกว่าวัสดุที่มี g และ d ต่ำ ๆ

Ochoa et al. (2006) ศึกษาถึงข้อดีและข้อจำกัดของ cymbals สำหรับใช้ในอุปกรณ์รับรู้ และ actuator พบว่า cymbal มีข้อดีคือทำให้ค่า displacement ค่า piezoelectric coefficients และค่า hydrophone figure of merit มีค่าที่สูงแต่มีข้อเสียคือ ถ้า cymbal มีน้ำหนัก รูปร่างไม่เท่ากัน และมีการเชื่อมติดของ end cap ทั้งสองด้านที่ต่างกันจะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์สองความถี่ พลังงานที่ได้จึงอยู่ระหว่างสองความถี่นี้ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการและยังมีผลต่อการกระจายตัวของความถี่เรโซแนนซ์

Kim et al. (2007) ศึกษาอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุไพโซอิเล็กทริกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเลือกใช้วัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ พบว่าแรงที่ให้กับวัสดุ load resistance และความถี่มีผลต่อแรงดันและกำลังไฟฟ้าที่ได้ ซึ่งวัสดุที่มีค่า piezoelectric voltage constant (g) ที่สูงจะให้แรงดันและกำลังไฟฟ้ามากที่สุดและพบว่าทรานส์ดิวเซอร์ที่มีรูปร่างแบบ cymbal มี effective strain coefficient มากกว่าไพโซอิเล็กทริกเซรามิก 40 เท่า โดยเมื่อให้แรง 70 N ที่ความถี่ 100 Hz ทำให้ได้กำลังไฟฟ้า 53 mW และพบว่าการนำแผ่นไพโซอิเล็กทริกเซรามิกวางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ จำนวน 10 ชั้นเทียบกับชั้นเดียวทำให้ได้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 2 เท่าและใช้ load resistance ต่ำลง 40 เท่าเนื่องจากมีกระแสที่สูงขึ้น 10 เท่า

Priya (2007) สรุปถึงการพัฒนารูปแบบการเก็บเกี่ยวพลังงานจากไพโซอิเล็กทริก โดยใช้ Low Profile Transducer และการเลือกใช้ประโยชน์จากวัสดุไพโซอิเล็กทริกในสภาวะการทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์และไม่ใช่วัดความถี่เรโซแนนซ์ พบว่ากำลังไฟฟ้าขึ้นกับความถี่และมีค่าสูงสุดเมื่อทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ของไพโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์นั้นขึ้นอยู่กับรูปร่าง ขนาดและแรงกระทำ ในสภาวะเรโซแนนซ์ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานขึ้นกับ coupling coefficient และ mechanical quality factor ของวัสดุแต่สภาวะการทำงานที่ไม่ใช่ความถี่เรโซแนนซ์พลังงานที่เก็บได้จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่า $d \cdot g$

Feenstra et al. (2008) ศึกษาถึงการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากกระเปาะสะพายหลัง พบว่ากำลังที่ได้ขึ้นขึ้นกับ load impedance ความถี่และแอมพลิจูดของการสั่นซึ่งกระเปาะมีแรงดึงประมาณ 220 N ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.4 mW

Swallow et al. (2008) ทำการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจาก piezoelectric fiber composite ถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและความหนาของวัสดุ พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นและความถี่ในการทำงานที่เหมาะสมทำให้วัสดุกำเนิดแรงดันไฟฟ้ามากขึ้น และพบว่าความหนาของชั้นไพโซอิเล็กทริกที่มากขึ้นทำให้ electromechanical coupling มากขึ้น

ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้ามากขึ้นและกำลังไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ load resistance ที่เหมาะสมกับวัสดุ

Guillot et al. (2008) ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเส้นใยโพลิไพโซอิเล็กทริกโดยทำเป็นลักษณะ ceramic/polymer composites ซึ่งช่วยทำให้วัสดุมีการส่งผ่านพลังงานและมีความยืดหยุ่นทางกลที่ดีขึ้น ทำการทดลองโดยนำวัสดุติดกับคานอะลูมิเนียมพร้อมให้แรงสั่นความถี่ 4.6 Hz พบว่า composite sensor ให้แรงดันไฟฟ้ามากกว่าเส้นใย PZT ถึง 7 เท่าและเส้นใย PZT ให้แรงดันไฟฟ้ามากกว่า polymer sensor 7 เท่า

Howells (2008) ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากรองเท้า combat ของทหารโดยใช้ piezoelectric bimorph 4 อันติดตั้งในรองเท้าและเปรียบเทียบขนาดแรงกดบน piezoelectric bimorph ร้อยละ 25 50 และ 75 ของแรงกดทั้งหมดที่มีต่อพลังงานไฟฟ้า พบว่าแรงกดร้อยละ 25 มีค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.0903 W และ load resistance ที่ใช้มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ได้ สำหรับแรงกด 100% ถ้าคนมีน้ำหนักเฉลี่ย 80.68 kg จะได้พลังงาน 7.9 J ดังนั้นระบบจะมีประสิทธิภาพประมาณ ร้อยละหนึ่ง การได้พลังงานที่น้อยเนื่องจากการสั่นตัวที่ไม่สมบูรณ์ของ Bimorph Crystal Stacks และจากความแข็งของ Bimorph ที่ไม่สม่ำเสมอ แก้ไขโดยลดความแข็ง Bimorph ลงก็จะช่วยลดความต้านทานต่อแรงกดและทำให้มีความแข็งสม่ำเสมอเพื่อเพิ่มการดัดโค้ง (deflection) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ดีขึ้น

Wischke et al. (2007) ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานของ piezoelectric disc benders ซึ่งเป็นแบบ PZT- steel composites พบว่าเมื่อให้แรงกระทำแก่วัสดุมากขึ้นทำให้วัสดุเกิดการโค้งงอพร้อมกับให้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นซึ่งสามารถให้กำลังไฟฟ้าประมาณ 6.5 mW ที่แรงกระทำ 36 N

Minazara et al. (n.d.) ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากวัสดุโพลิไพโซอิเล็กทริกที่มีรูปร่างแบบ MFC (Micro Fibre Composite) โดยอาศัยพลังงานการสั่นของรถจักรยานขณะวิ่ง พบว่าที่ความเร็ว 5 m/s ความถี่ 12.5 Hz ความต้านทาน 100 k Ω สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 3.5 mW ซึ่งพลังงานดังกล่าวสามารถจุดหลอด LED ติดและเพียงพอต่อการชาร์จแบตเตอรี่หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อการค้า	ความบริสุทธิ์	ชนิด	ผู้ผลิต
APC 840	-	hard PZT	APC International Ltd.
APC 850	-	soft PZT	APC International Ltd.
Pz29	-	soft PZT	Ferroperm Piezoceramics
undope PZT	-	undope PZT	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
Lead oxide	99.7%	-	ACROS ORGENICS
Zirconium dioxide	98.5%	-	ACROS ORGENICS
Polyvinyl alcohol (PVA)	-	-	CARLO ERBA
Acetone (C ₃ H ₆ O)	-	-	CARLO ERBA
Isopropyl alcohol (C ₃ H ₈ O)	-	-	CARLO ERBA
Oleic acid [CH ₃ (CH ₂) ₇ CH :CH(CH ₂) ₇ COOH]	-	-	CARLO ERBA
Epoxy steel filler	-	-	-
Silver-Palladium	-	Dupont 7095 Ag/Pd-paste	-
Deionised water	-	-	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2 อุปกรณ์การทดลอง

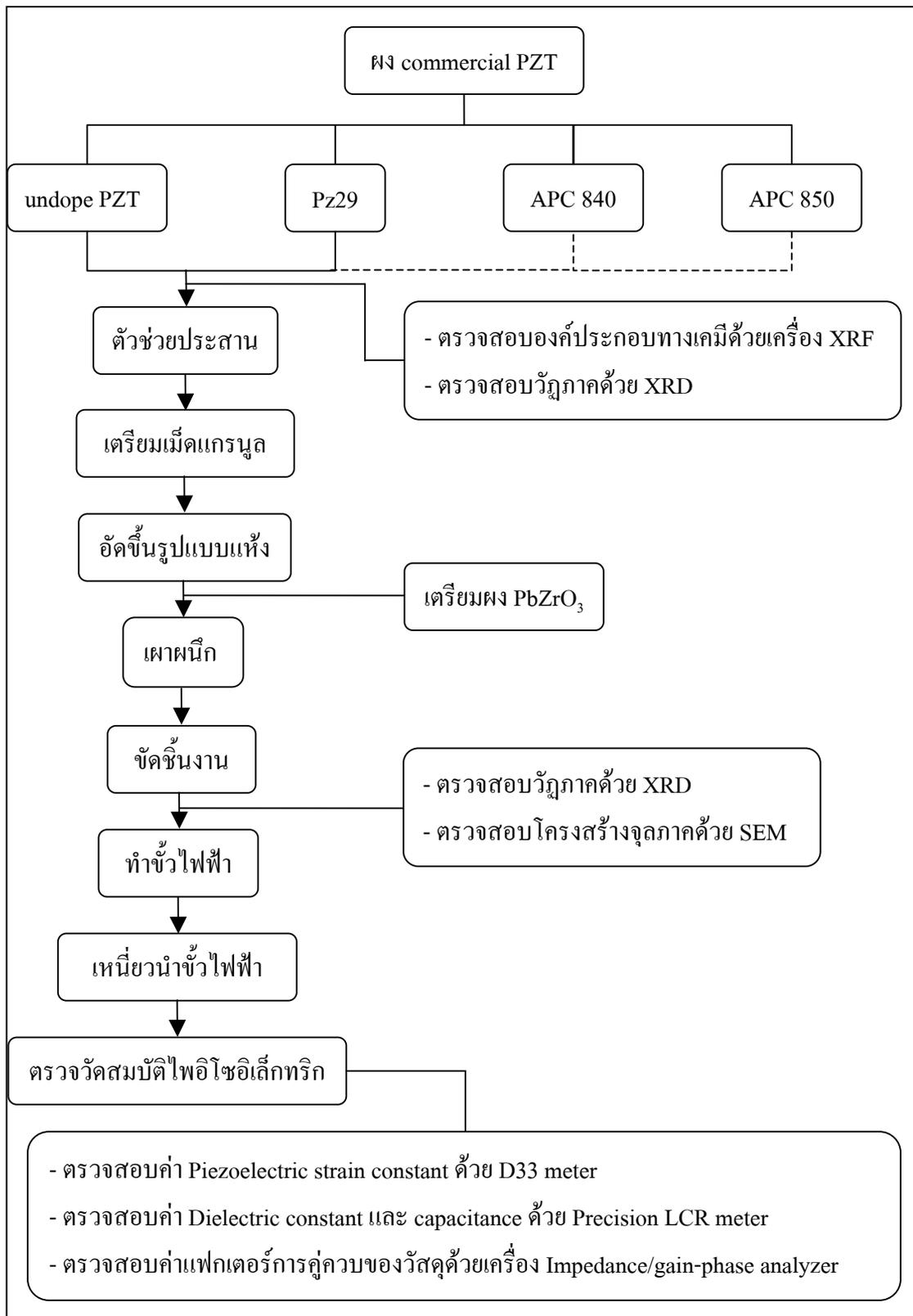
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง วิเคราะห์และทดสอบแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

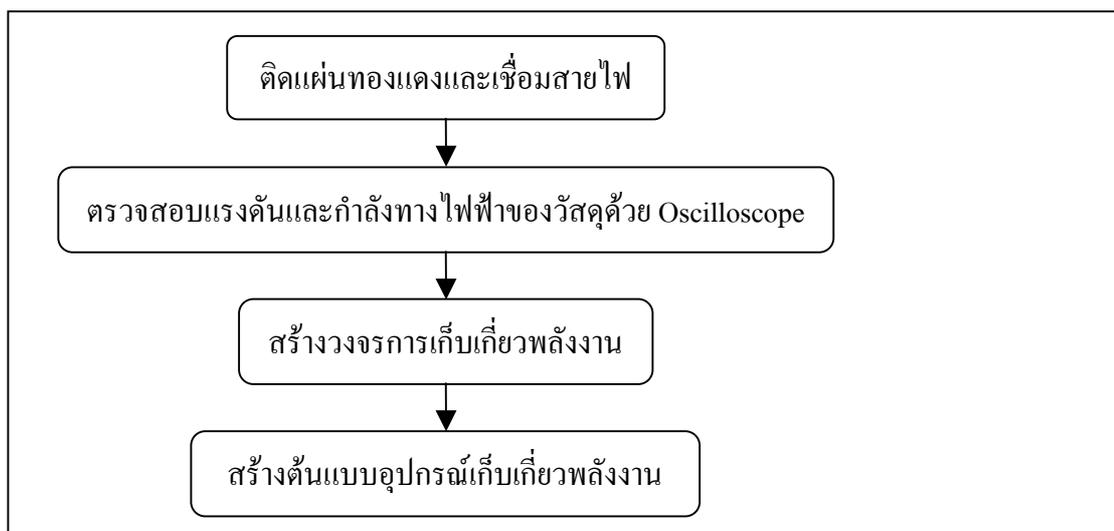
อุปกรณ์	ผู้ผลิต	แบบ/รุ่น
Scanning electron microscope (SEM)	JEOL	JSM-6400
X-ray diffractometer (XRD)	Bruker	D5005
เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)	Bruker	S8 TIGER
Precision LCR Meter	HEWLETT PACKARD	4284A
Lloyd LF Plus Universal Testing Machine	AMETEK, Inc.	LF PLUS
D ₃₃ Meter	APC International Ltd.	APC 90-2030
Oscilloscope	Tektronix digital oscilloscope	TDS 420A
Impedance Analyzer	Scribner Associates, Inc.	Solartron/ SI 1260
เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง	Denver Instrument Company	TC-254
เตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง (1500°C)	CARBOLITE	RHF 15/35
เครื่องอัดไฮดรอลิก	CARVER, Inc.	3620
เครื่องทำความร้อนในอ่าง pole	Huber	Polystat cc1
Digital Multimeter	WAVETEK	37XR
ตะแกรงผ้า	-	-

3.3 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนและวิธีการทดลองแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมขึ้นตัวอย่างและการวิเคราะห์สมบัติไพโซอิเล็กทริก



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นตัวอย่างและการวิเคราะห์สมบัติไฟออิเล็กทริก (ต่อ)

แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานในรูป 3.1 สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนและวิธีการทดลองโดยละเอียดดังนี้

3.3.1 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น

3.3.1.1 การตรวจสอบวิเคราะห์ห้วงองค์ประกอบทางเฟส (Phase analysis)

การตรวจวิเคราะห์ โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction : XRD) ซึ่งผลึกของสารชนิดนั้น ๆ จะให้การเลี้ยวเบนเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิดตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) โดยใช้เครื่อง XRD ของบริษัท Bruker ใช้ $\text{CuK}\alpha$ เป็นแหล่งกำเนิดรังสี
 ภาวะที่ใช้ในการทดสอบดังนี้

- Generate voltage = 40 KV
- Generate current = 40 mA
- Div. slit = 1
- Antis Slit = 1
- Rotation = 15 rpm
- Start angle = 20°
- End angle = 70°
- Scan speed = 0.02 sec/step
- Increment = 0.02 step/size

3.3.1.2 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี

โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง (ส่งผงตัวอย่าง PZT ชนิดต่าง ๆ ไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ)

หลักการและวิธีการวิเคราะห์ เมื่อรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray photon) จากหลอดรังสีเอ็กซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่างจะเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในสารตัวอย่างหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้น ซึ่งที่สภาวะนี้อะตอมจะไม่เสถียร อะตอมจะกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-ray photon) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่าฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) พลังงานของรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมาจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับความแตกต่างของระดับพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนวงนอกที่เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานกับระดับพลังงานของช่องว่างที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ รังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟลูออเรสเซนซ์จะเป็นรังสีเอ็กซ์ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ดังนั้นเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบของสารตัวอย่าง

การศึกษานี้ใช้ผง PZT ทั้งหมด 4 ชนิด ที่จำหน่ายทางการ คือ Pz29 จากบริษัท Ferroperm Piezoceramics APC 850 กับ APC 840 จากบริษัท APC International Ltd. และ undoped PZT ได้จากการสังเคราะห์จากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

3.3.2 การเตรียมตัวช่วยประสาน (binder)

สำหรับเติมลงในผงตัวอย่างเพื่อให้ขึ้นตัวอย่างที่อัดขึ้นรูปมีการยึดเกาะตัวดีและไม่เกิดการร้าวหรือแตกในระหว่างขั้นตอนการอัดขึ้นรูป ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวประสานเป็นสารละลาย Polyvinyl alcohol (PVA) ซึ่งเตรียมโดยชั่งส่วนผสม PVA 1 กรัม ต่อน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ต้มน้ำกลั่นให้ร้อนใช้อุณหภูมิไม่เกิน 80°C เพื่อไม่ให้เกิดการทำลายพันธะทางเคมีของพอลิเมอร์ซึ่งจะทำให้ความเหนียวของ PVA ลดลง จากนั้นค่อย ๆ เติมเม็ด PVA ลงไปที่ละน้อย พร้อมกับใช้ magnetic stirrer คนเพื่อให้เม็ด PVA ละลายจนหมดแล้วจึงเติมน้ำกลั่นลงไปชดเชยส่วนที่ระเหยไปขณะต้มก่อนนี้ให้ครบ 100 มิลลิลิตร เเท่าเดิมแล้วต้มต่ออีก 2-3 นาที เพื่อให้ น้ำกลั่นเข้ากันกับส่วนผสมเดิมได้สารละลาย PVA ที่มีความเข้มข้น 1%

3.3.3 การผสมสารละลาย PVA ลงในผง PZT

ขั้นตอนการผสมสารละลาย PVA ลงไปกวนผสมกับผง PZT นี้จะใช้เฉพาะผง PZT บางชนิดที่มีปัญหาการแตกร้าวจากการอัดขึ้นรูปเนื่องจากผง PZT ดังกล่าวมีความเหนียว

ไม่เพียงพอต่อการอัดขึ้นรูปที่แรงดันหนึ่ง ๆ จึงต้องเติม PVA เพื่อช่วยให้อนุภาคสามารถยึดเกาะกันได้ดีขึ้นแต่ถ้าเติมในปริมาณมากเกินไปจะส่งผลต่อปริมาณของรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นตัวอย่าง

1. เทสารละลาย PVA ความเข้มข้นร้อยละ 1 ลงไปกวนผสมกับผง PZT ชนิด Pz29 และชนิด undoped PZT ให้เข้ากัน (ชนิด APC 840 และชนิด APC 850 สามารถอัดขึ้นรูปได้โดยไม่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแหล่งผลิตผสมตัวช่วยประสานแล้วจึงไม่ต้องเติม PVA อีก) โดยใช้สารละลาย PVA ปริมาณ 0.8 มิลลิลิตร ต่อผง PZT 1 กรัมและนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C จนแห้ง

2. นำผง PZT ที่อบจนแห้งแล้ว มาบดให้ละเอียดโดยใช้โกร่ง zirconia จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงผ้า (ตะแกรงโลหะอาจได้รับสิ่งแปลกปลอมจากการหลุดร่อนของเศษโลหะได้) ที่มีขนาดรูเปิด 100 mesh ก็จะได้เม็ดแกรนูล

3. นำแกรนูลของ PZT ชนิดต่าง ๆ ที่เติม PVA แล้วมาอัดขึ้นรูป

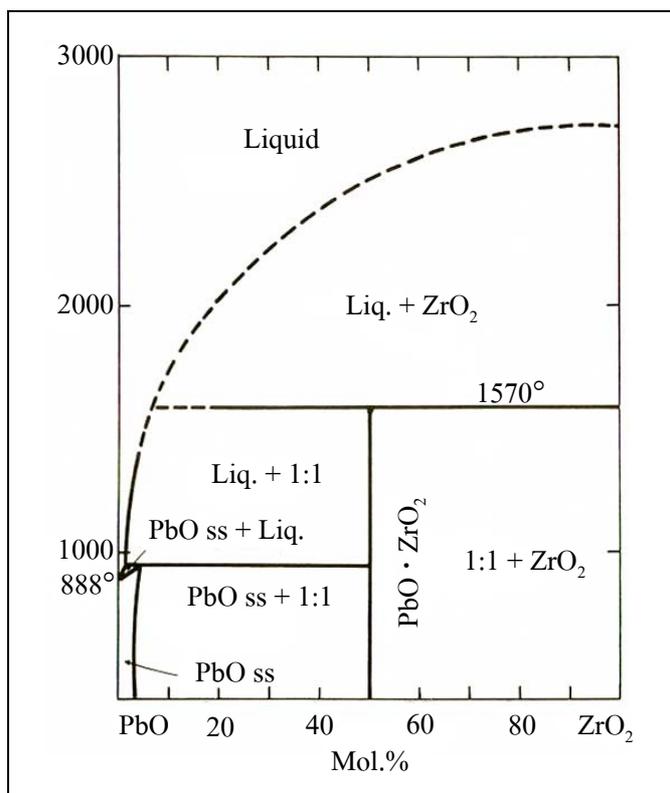
3.3.4 การเตรียมผง $PbZrO_3$

เตรียมผง $PbZrO_3$ สำหรับใช้ในขั้นตอนการเผาเพนิกเพื่อเป็นตัวปล่อยไอระเหยของตะกั่วให้อิ่มตัวในหีบรองเผา (sagger) ซึ่งจะทำให้ Pb ไม่ระเหยออกไปจากชิ้นตัวอย่างตามวิธีการดังนี้

1. เตรียม $PbZrO_3$ ด้วยวิธี solid state reaction โดยบดผสม PbO กับ ZrO_2 ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โมล ครั้งละ 200 กรัมในขวดพลาสติก (Nalgene™ bottles) ซึ่งใช้ลูกบิด yttrium stabilized zirconia ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร บดผสมกับ Isopropyl alcohol (C_3H_8O) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก็จะได้ slurry จากนั้นนำไปต้มไล่ Isopropyl alcohol ออกโดยใช้ hot plate ซึ่งทำในตู้ดูดควันเพื่อป้องกันไอระเหยของสารเคมี ในระหว่างการต้มจะใช้ magnetic stirrer คนเพื่อป้องกันการเกาะตัวกันของสารในระหว่างการต้มจนกว่าจะแห้งและใช้แท่งแก้วกวดเบา ๆ ให้ก้อนของผสม PbO กับ ZrO_2 ให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ

2. นำผงของผสมระหว่าง PbO กับ ZrO_2 ที่ได้จากข้อ 1 ไป calcined ที่อุณหภูมิ 800°C (อ้างอิงจากแผนภาพวัฏภาคของ PbO กับ ZrO_2 ดังรูปที่ 3.2) เผาแช่ไว้ 60 นาที โดยใช้อัตราการเพิ่มและอัตราการลดอุณหภูมิ 10°C/นาที ซึ่งในระหว่างการ calcined ต้องปิดฝาภาชนะเพื่อป้องกันการระเหยของ PbO จากนั้นนำผงที่ได้มาบดให้ละเอียดแล้วนำไปวิเคราะห์เฟสโดยใช้ X-ray diffraction จะได้วัฏภาคของ $PbZrO_3$

3. กวนผสม $PbZrO_3$ กับ PVA ที่มีความเข้มข้น 1% อบจนแห้ง บดให้ละเอียดด้วยโกร่ง zirconia แล้วนำไปอัดขึ้นรูป



รูปที่ 3.2 แผนภาพวัฏภาคของ PbO กับ ZrO₂ (Fushimi and Ikeda, 1967)

3.3.5 การขึ้นรูปด้วยวิธีอัดแห้ง (Dry press)

อัดอนุภาคที่ทำเป็น granule แล้วให้เป็นเม็ด (pellet) รูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 16 และ 34 มิลลิเมตรด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (hydraulic press) ดังรูป 3.3 ใช้น้ำหนัก granule และแรงอัดดังแสดงในตาราง 3.3 อนึ่งแรงกดที่ใช้แปลงเป็นความดันได้ 180 MPa หรือเท่ากับ 1,835 kg/cm²



รูปที่ 3.3 เครื่องอัดไฮดรอลิก (hydraulic press)

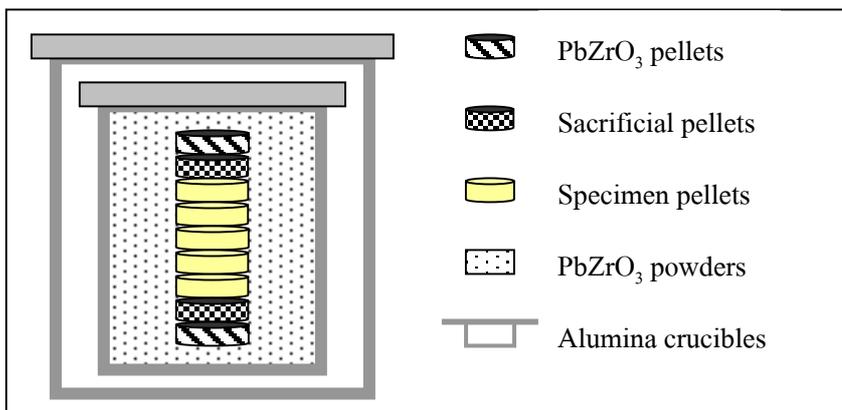
ตารางที่ 3.3 น้ำหนักผงตัวอย่าง PZT แรงกดอัดที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน (mm)	น้ำหนักผง (g)	แรงอัด (Pound)
10	1	1968
16	1.98	8000
34	8.64	23432

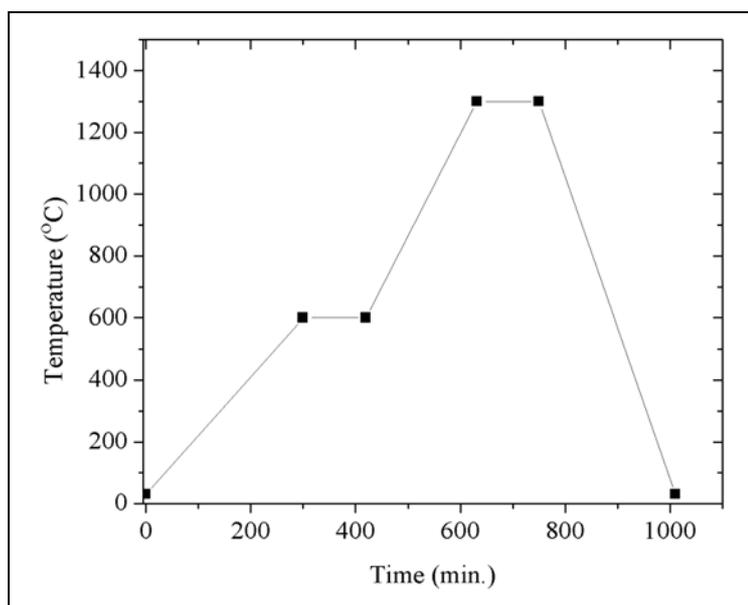
หลังจากอัดแล้วได้ชิ้นวัสดุเป็นแผ่นวงกลมแบนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับแบบอัดและพร้อมที่จะนำไปเผาผลึกในขั้นตอนต่อไป

3.3.6 การเตรียมตัวอย่างสำหรับเผาผลึก (sintering)

การเตรียมตัวอย่างก่อนการเผาไล่ตัวช่วยประสานและการเผาผลึก ซึ่งจะนำชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปมาวางเรียงซ้อนกันดังรูปที่ 3.4 ซึ่งในขณะที่จะวางซ้อนขึ้นตัวอย่างในละชั้นจะโรยด้วยผงที่มีส่วนผสมเดียวกับชิ้นตัวอย่าง เพื่อป้องกันการติดกันของชิ้นงานและเมื่อเรียงเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงพลิกกลับขึ้นตัวอย่าง ด้วยผง $PbZrO_3$ ให้ปกคลุมชิ้นตัวอย่างจนหมดและปิดฝาและวางซ้อนด้วยเบ้าอะลูมิเนียมพร้อมกับปิดฝ้อีกชั้น เพื่อทำให้ไอระเหยของตะกั่วจาก $PbZrO_3$ ที่ระเหยที่อุณหภูมิประมาณ $790^{\circ}C$ อบอวนอยู่ในเบ้าอะลูมิเนียมจึงไม่ทำให้ดึงเอาตะกั่วที่มีอยู่ในส่วนผสมของชิ้นตัวอย่างออกมา จึงไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก



รูปที่ 3.4 เป้าอะลูมินาวางซ้อนกันสองอันสำหรับการเผาไล่ตัวประสานและการเผาผนึกโดย specimen pellets และ sacrificial pellets ใช้ผงที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกัน (สุธรรม ศรีหล่มสัก, 2547)



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนเผาไล่ตัวช่วยประสานและการเผาผนึกขึ้นตัวอย่าง

จากรูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการเผาไล่ตัวช่วยประสานและการเผาผนึกขึ้นตัวอย่าง โดยช่วงที่ 1 เผาจากอุณหภูมิห้องขึ้นไปถึง 600°C โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 2°C/นาที ช่วงที่ 2 ยืนไฟเป็นเวลา 120 นาที เพื่อไล่ตัวช่วยประสานออกจากชิ้นงาน ช่วงที่ 3 เผาขึ้นไปถึงอุณหภูมิ 1300°C โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3.3°C/นาที ช่วงที่ 4 ยืนไฟที่อุณหภูมิ 1300°C เป็นเวลา

120 นาที เพื่อให้อนุภาคประสานตัวกันแน่นและลดรูพรุนในโครงสร้างจากนั้นช่วงที่ 5 ลดอุณหภูมิมาถึงอุณหภูมิห้องด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 5°C/นาที

3.3.7 การขัดชิ้นงาน

นำชิ้นงานที่ได้จากการเผาผนึกซึ่งจะเรียงติดกันลักษณะเหมือนตอนที่เรียงใส่ใน crucible แยกออกจากกันเป็นชิ้น ๆ โดยใช้มีดคัดเตอร์แซะออกและชุดผงวัสดุที่เกิดจากการฝังกลบชิ้นงานออกจากวัสดุ จากนั้นนำชิ้นงานมาขัดผิวหน้าให้เรียบสม่ำเสมอด้วยกระดาษทรายเบอร์ 200 600 800 และ 1000 ตามลำดับ ให้มีความหนา 1.5 มิลลิเมตรและขัดผิวด้านข้างชิ้นงานออกด้วยเช่นกันเนื่องจากขณะเผาผนึกจะมี $PbZrO_3$ มาเกาะที่ผิวด้านข้างของวัสดุเพราะไม่มีชิ้นงานปิดผิวด้านข้างเหมือนกับผิวด้านหน้าในระหว่างการเผาผนึก โดยในระหว่างขัดจะใช้ Isopropyl alcohol (C_3H_8O) เป็นตัวหล่อลื่นแทนการใช้น้ำเพราะ Isopropyl alcohol (C_3H_8O) สามารถระเหยได้ง่ายกว่าและเมื่อซึมเข้าเนื้อวัสดุก็สามารถที่จะระเหยออกได้ง่ายกว่าและช่วยลดฝุ่นละอองที่เกิดจากการขัดชิ้นวัสดุ

3.3.8 การตรวจสอบสมบัติหลังการเผาผนึกของชิ้นงาน

3.3.8.1 การตรวจสอบความหนาแน่นและปริมาณความพรุนตัวของชิ้นงาน

การทดสอบความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของตัวอย่างดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C373 (1994)

วิธีทดสอบความหนาแน่นและปริมาณความพรุนตัว

- นำชิ้นงานไปต้มในน้ำกลั่น โดยให้น้ำกลั่นท่วมชิ้นงานตลอดเวลาเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วจึงแช่ตัวอย่างไว้ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- หลังจากครบ 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักแขวนลอยในน้ำ (W_{ss}) ด้วยชุดทดลอง Archimedes method บันทึกค่าน้ำหนักที่อ่านได้
- นำชิ้นตัวอย่างที่ชั่งน้ำหนักแขวนลอยในน้ำมาเช็ดน้ำส่วนเกินที่ผิวออกแล้วจึงทำการชั่งน้ำหนักอิมมิดด้วยน้ำ (W_s) บันทึกค่าน้ำหนักที่อ่านได้
- นำชิ้นงานไปอบที่ 150°C จนแห้งจากนั้นนำไปพักให้เย็นในภาชนะแล้วนำไปชั่งน้ำหนักแห้ง (W_D)
- นำค่าน้ำหนักที่อ่านได้ไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นและปริมาณความพรุนตัวโดยใช้สูตรต่อไปนี้
 - ปริมาตรของตัวอย่าง (V) = $W_s - W_{ss}$
 - ความหนาแน่นของตัวอย่าง (Bulk density) = W_D/V
 - ปริมาณรูพรุน (Apparent porosity) = $[(W_s - W_D)/V] \times 100$
 - ปริมาณการดูดซึมน้ำ (Water absorption) = $[(W_s - W_D)/ W_D] \times 100$

3.3.8.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคทั่วไปของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope : SEM) ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างมีดังนี้

1. นำชิ้นงานที่ได้จากการเผาผนึกมาขัดผิวหน้าให้เรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 200 500 700 1000 และ 1200 ตามลำดับ จากนั้นนำไปขัดด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้อะลูมินาสลิปที่มีขนาดอนุภาค 0.3 ไมครอน

2. นำชิ้นตัวอย่างไปกัดผิวหน้าด้วยความร้อน (Thermal etching) ที่อุณหภูมิ 1250°C เผาแช่ 15 นาที โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10°C/นาที และอัตราการเย็นตัว 5°C/นาที

3. นำชิ้นงานไปทำความสะอาดโดยใช้เครื่อง ultrasonic cleaner เพื่อกำจัดผงหรือฝุ่นออกแล้วล้างอีกครั้งด้วยแอลกอฮอล์และทำให้แห้งโดยให้แสงความร้อน

4. นำชิ้นตัวอย่างทาด้วย silver แล้วติดลงบนสตัป (stub) แล้วจึงฉาบด้วยทองเพื่อให้ชิ้นตัวอย่างมีการนำไฟฟ้าที่ดี ที่กระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์เป็นเวลา 5 นาที

5. นำตัวอย่างไปถ่ายภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.3.8.3 การวัดขนาดเกรน

หาขนาดเกรนด้วยวิธี mean intercept length (สุทิน คูหาเรืองรอง, 2551) โดยมีวิธีการวัด ดังนี้

1. เตรียมภาพถ่าย SEM จำนวน 3 ภาพที่ถ่ายภาพในพื้นที่ต่างกันของตัวอย่างแต่ละชนิด

2. ลากเส้นตรงผ่านเกรนมากกว่า 20 เกรนมีความยาวมากกว่า 75 มิลลิเมตร อย่างน้อย 5 เส้นในตำแหน่งต่าง ๆ ของภาพ

3. ให้มีความยาวของเส้นรวมมากกว่า 375 มิลลิเมตรตัดผ่านเกรนอย่างน้อย 100 เกรน

4. คำนวณขนาดเกรนจากสมการ

$$G \text{ mean intercept length} = \frac{(l_t - l_p)(10^3)}{n_i m}$$

เมื่อ l_t = ความยาวเส้นทั้งหมด (มิลลิเมตร)

l_p = ความยาวเส้นที่ลากผ่าน pore ขนาดใหญ่ (มิลลิเมตร)

n_i = จำนวนจุดตัดที่เส้นลากผ่านขอบเกรน นับ 1.5 เมื่อตัดจุด triple points นับ 1 เมื่อเส้นผ่านรูพรุนขนาดใหญ่หรือลากเส้นตามขอบเกรน

m = กำลังขยายของภาพ

3.3.9 การทำขั้วไฟฟ้า

นำชิ้นตัวอย่างที่เผาผนึกแล้วขัดผิวหน้าและผิวด้านข้างให้เรียบสม่ำเสมอ มีความหนา 1.60 มิลลิเมตร โดยใช้กระดาษทรายเบอร์ประมาณ 180 ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตน จากนั้นใช้ฟู่กันจุ่ม Silver-Palladium Dupont 7095 ทาผิวหน้าชิ้นงานทั้ง 2 ด้านเพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าของชิ้นงานและทำความสะอาดผิวด้านข้างชิ้นงานให้สะอาดด้วยอะซิโตนอีกครั้ง จากนั้นอบให้แห้ง แล้วจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550°C เผาแช่ไว้ 15 นาที โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10°C/นาที และอัตราการเย็นตัว 5°C/นาที นำชิ้นงานที่ได้หลังจากเผาทำอิเล็กโทรดมาลบบอกไซด์ที่ผิวหน้าชิ้นงานออกโดยใช้ยางลบหมึกที่ผิวชิ้นงานจนขาวสะอาดและขัดผิวด้านข้างเพื่อลบบิเล็กโทรดที่ยังเหลืออยู่ด้วยกระดาษทรายอีกครั้งก่อนนำไปเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้าเพื่อป้องกันการกระโดดของกระแสไฟฟ้าจากขั้วหนึ่งไปอีกขั้วหนึ่ง



รูปที่ 3.6 ชิ้นตัวอย่างหลังทำอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 13 และ 29 มิลลิเมตร

3.3.10 การเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้า (Pole)

นำชิ้นงานที่ทำด้วยอิเล็กโทรดแล้วไปเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้าด้วยเครื่อง poling ซึ่งจะนำชิ้นตัวอย่างใส่ในแท่นใส่ตัวอย่างสำหรับการ pole โดยด้านบนของ sample holder (เป็นเนื้อทองเหลือง) จะต่อเข้ากับขั้วบวกส่วนด้านล่างจะต่อเข้ากับขั้วลบของสายไฟ จากนั้นนำไปใส่ในอ่างน้ำมันพืชที่จะใช้ในการเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้าซึ่งน้ำมันพืชจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางเนื่องจากมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าเพราะในขณะที่เหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้าต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูง จากนั้นให้ความร้อนน้ำมันไปที่อุณหภูมิ 100°C เมื่อได้อุณหภูมิดังกล่าวจึงเปิดเครื่องขยายแรงดันไฟฟ้าแล้วปรับให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงานเพียงเล็กน้อยเพื่อให้ง่ายต่อการ pole โดยจะยอมให้กระแสไฟ

ฟ้าผ่านชิ้นงานไม่เกิน 0.4 มิลลิแอมแปร์ เนื่องจากถ้ากระแสให้ไหลผ่านชิ้นตัวอย่างมากเกินไปจะทำให้ชิ้นตัวอย่างร้อนและแตก จากนั้นจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นตัวอย่าง โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 2.5 kV ต่อความหนา 1 มิลลิเมตร เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าได้ตามต้องการจับเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวของขั้วไฟฟ้า เมื่อครบเวลาดังกล่าวจึงลดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ให้กับวัสดุตามลำดับ แล้วปิดเครื่องทำความร้อน รอจนกระทั่งสนามไฟฟ้าที่ตกค้างมีค่าเป็นศูนย์ก่อนแล้วจึงนำแท่นใส่ตัวอย่างออกจากอ่างน้ำมันแล้วล้างทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตนพร้อมกับมาร์คขั้วไฟฟ้าลงบนผิววัสดุด้วยปากกาเคมี



รูปที่ 3.7 เครื่องเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้า

3.3.11 ตรวจสอบสมบัติไพโซอิเล็กทริก

3.3.11.1 ตรวจสอบค่า Piezoelectric Strain Constant (d_{33})

ตรวจสอบค่า piezoelectric strain constant (d_{33}) ของ PZT ชนิดต่าง ๆ โดยนำชิ้นตัวอย่างที่ pole แล้วปล่อยให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จึงนำมาวัดค่า d_{33} ด้วยเครื่อง D_{33} Meter (บริษัท APC International Ltd. รุ่น APC 90-2030) และนำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาค่า piezoelectric voltage constant (g_{33}) ได้จากสมการที่ 3.1

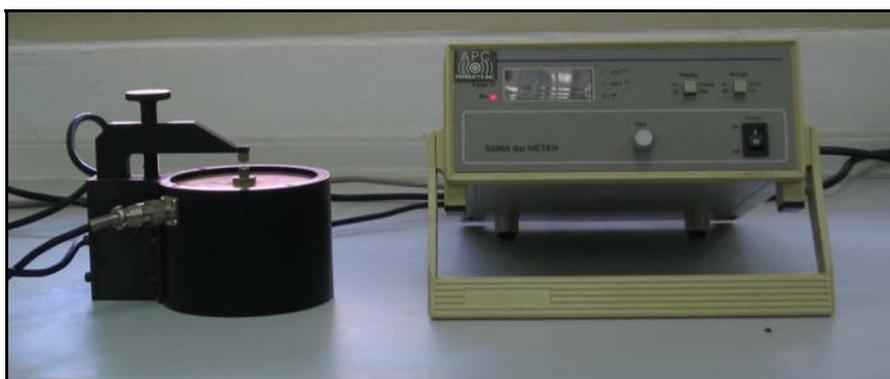
$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon'} = \frac{d_{33}}{K' \epsilon_0} \quad (3.1)$$

เมื่อ ϵ' คือ permittivity ของวัสดุ

ϵ_0 คือ permittivity ของอากาศ มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} F/m

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

d_{33} คือ piezoelectric strain constant



รูปที่ 3.8 เครื่อง d_{33} meter

3.3.11.2 ตรวจสอบค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance) และค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss)

ตรวจสอบค่าความเก็บประจุไฟฟ้าและค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุด้วยเครื่อง Precision LCR Meter (บริษัท HEWLETT PACKARD รุ่น 4284A) ซึ่งในการวัดค่าความเก็บประจุไฟฟ้านั้นจะจ่ายแรงดันไฟฟ้า 1 V ที่วัสดุและใช้ความถี่ 1 kHz จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า Relative dielectric constant ได้ดังสมการที่ 3.2

$$K' = \frac{Cd}{\epsilon_0 A} \quad (3.2)$$

เมื่อ C คือ ความเก็บประจุ (Capacitance) (F)

d คือ ความหนาของชิ้นวัสดุ (m)

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมทางไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ 8.85×10^{-12} (F/m)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นวัสดุ หน่วยเป็น (m²)



รูปที่ 3.9 เครื่อง Precision LCR Meter

3.3.11.3 ตรวจสอบค่าแฟกเตอร์การคู่ควบ (Coupling factor)

ตรวจสอบค่าแฟกเตอร์การคู่ควบของวัสดุด้วยเครื่อง Impedance/gain-phase analyzer (บริษัท Scribner Associates, Inc. ยี่ห้อ Solartron รุ่น SI 1260) ดังรูปที่ 3.10

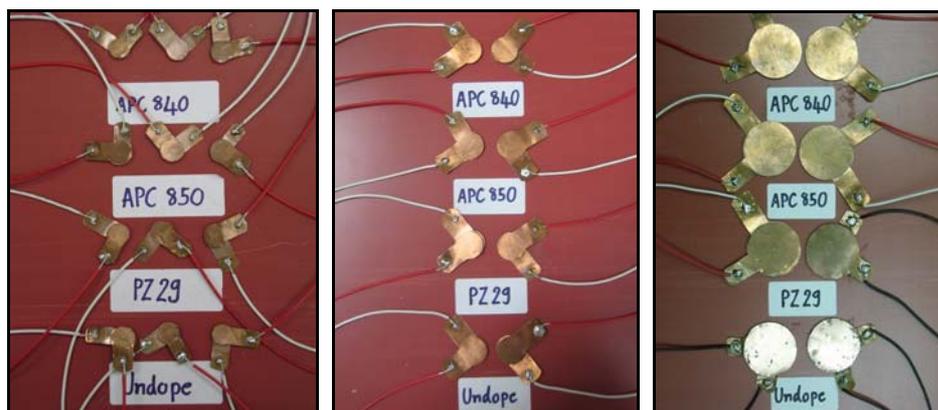


รูปที่ 3.10 เครื่อง Impedance/gain-phase analyzer

3.3.12 ติดแผ่นโลหะและเชื่อมสายไฟ

3.3.12.1 การติดแผ่นทองแดงกับชิ้นตัวอย่างแบบชั้นเดียว

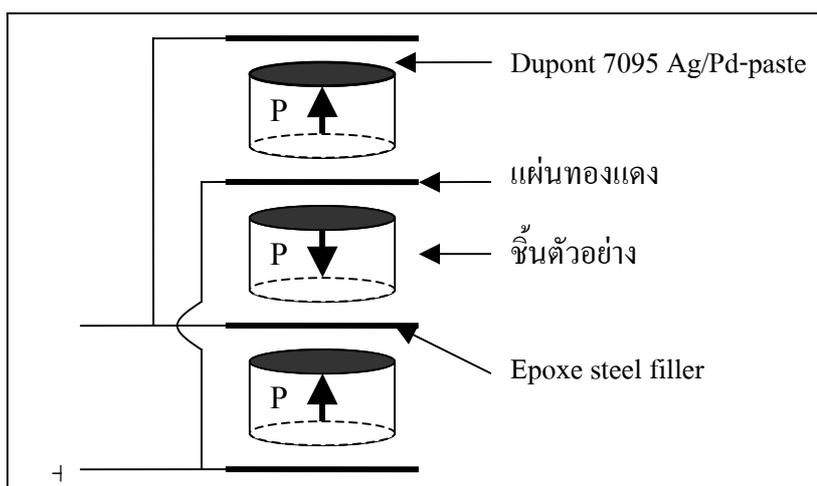
นำแผ่นทองแดงที่มีความหนาประมาณ 0.1 มิลลิเมตร มาตัดเป็นแผ่นวงกลมให้มีขนาดเท่ากับชิ้นงานจากนั้นนำแผ่นทองแดงที่ได้ไปบัดกรีติดกับสายไฟที่เตรียมไว้ จากนั้นนำไปติดกับชิ้นงานทั้งสองด้านด้วยกาว epoxe steel filler ดังแสดงในรูป 3.11 รอจนแห้งจึงนำไปทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงาน



รูปที่ 3.11 ชั้นตัวอย่างที่ติดแผ่นทองแดงพร้อมบัดกรีสายไฟที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 13 และ 29 มิลลิเมตร

3.3.12.2 การเรียงชั้นตัวอย่างซ้อนกันหลายชั้น (multilayer)

งานวิจัยนี้นำชั้น PZT มาเรียงซ้อนกัน 3 ชั้นดังรูปที่ 3.12 โดยผิวด้านหน้าชั้นตัวอย่างถูกทาด้วย Dupont 7095 Ag/Pd-paste แล้วประกบชั้นตัวอย่างอีกชั้นโดยหันขั้วไฟฟ้าที่เหมือนกันเข้าหากันและระหว่างชั้นของชั้นตัวอย่างใช้แผ่นตัวนำทองแดง เพื่อทำหน้าที่เชื่อมขั้วไฟฟ้าของชั้นตัวอย่างโดยใช้กาว epoxe steel filler เป็นตัวประสาน บัดกรีสายไฟติดที่แผ่นทองแดงแล้วนำไปทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงาน



รูปที่ 3.12 การเรียงชั้นตัวอย่างซ้อนกัน 3 ชั้น (ดัดแปลงจาก Moulson and Herbert, 2003)

3.3.13 การวัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริก

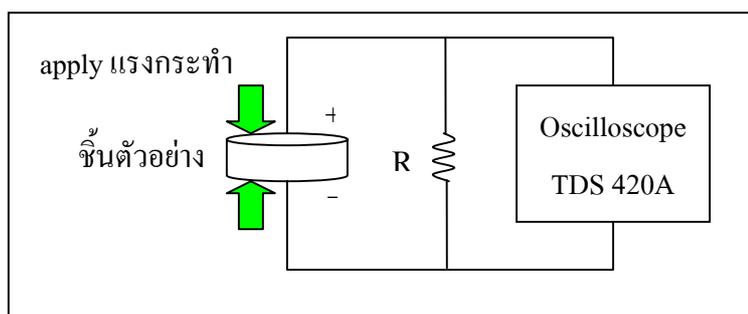
นำวัสดุที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.12 มา apply แรงกด 100 N 200 N 300 N 400 N และ 500 N (ซึ่งขอบเขตการศึกษาของงานวิจัยนี้ได้ apply แรงกระทำทางกลถึง 700 N แต่ผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าเมื่อให้แรงกระทำหลาย ๆ ครั้งวัสดุที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรเกิดการแตกร้าว ดังนั้นจึงศึกษาแรงกระทำทางกลไม่เกิน 500 N เพื่อจะได้เปรียบเทียบความแตกต่างของปัจจัยต่าง ๆ ได้ชัดเจนขึ้น) ด้วยเครื่อง LF Plus Universal Test Machine (AMETEK, Inc. รุ่น LF PLUS) ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ที่ load resistance ต่าง ๆ โดยความถี่ทางกลในการเคาะอยู่ในช่วง 0.5-0.8 Hz (เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือจึงไม่สามารถปรับความถี่ในการทดสอบได้) แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริกในแต่ละชนิดที่แรงกดขนาดต่าง ๆ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 13 และ 29 มิลลิเมตร ด้วยเครื่อง Tektronix digital oscilloscope (รุ่น TDS 420A) ดังแสดงในรูป 3.14 และหลังจากวัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุในแต่ละครั้งต้อง short วัสดุทุกครั้งโดยนำสายไฟขั้วบวกและขั้วลบสายไฟขั้วลบสักระยะหนึ่งเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกค้างในวัสดุลดลงได้เร็วขึ้นหรือไม่ก็ปล่อยให้ทิ้งไว้ระยะหนึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ตกค้างก็จะลดลงเช่นกันทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดเป็นค่าแท้จริง ดังแสดงวงจรการวัดแรงดันไฟฟ้าและการติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับ



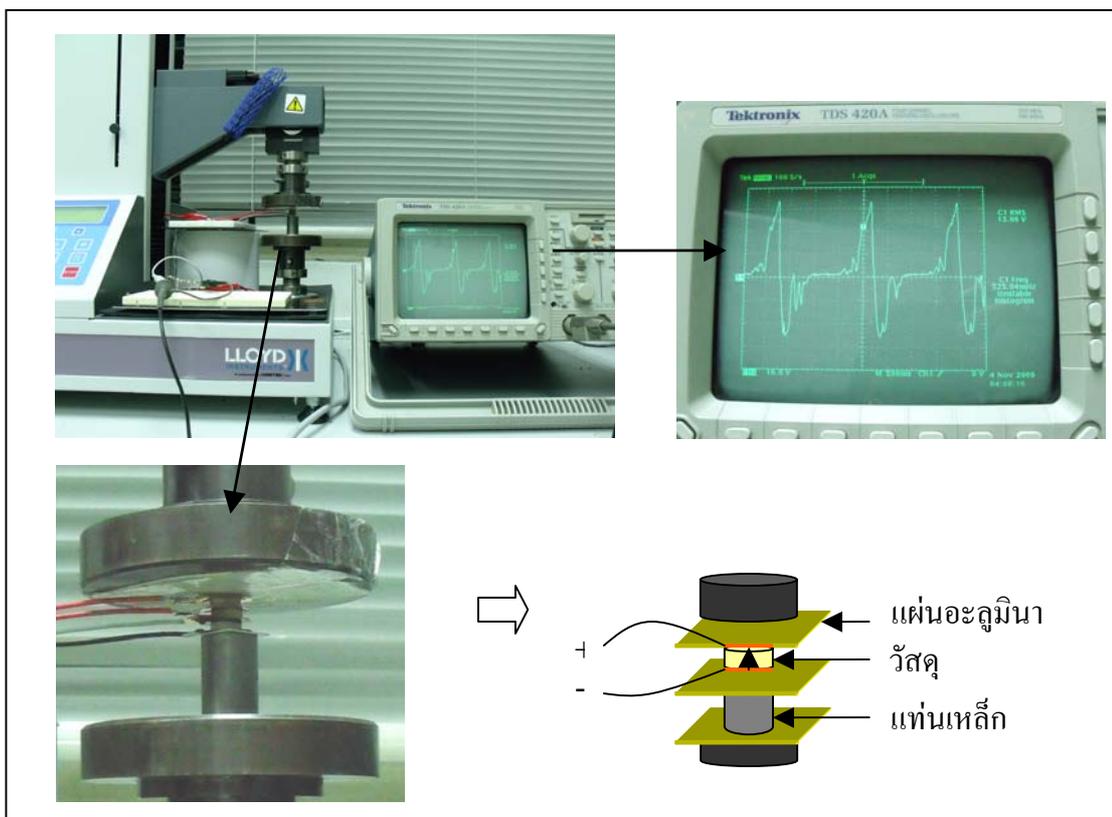
รูปที่ 3.13 เครื่อง LF Plus Universal Test Machine (รุ่น LF PLUS)



รูปที่ 3.14 เครื่อง Tektronix digital oscilloscope (รุ่น TDS 420A)



รูปที่ 3.15 วงจรไฟฟ้าสำหรับวัดแรงดันไฟฟ้า เมื่อ R คือความต้านทานภายนอก (load resistance) ที่ต่อขนานกับขึ้นตัวอย่าง



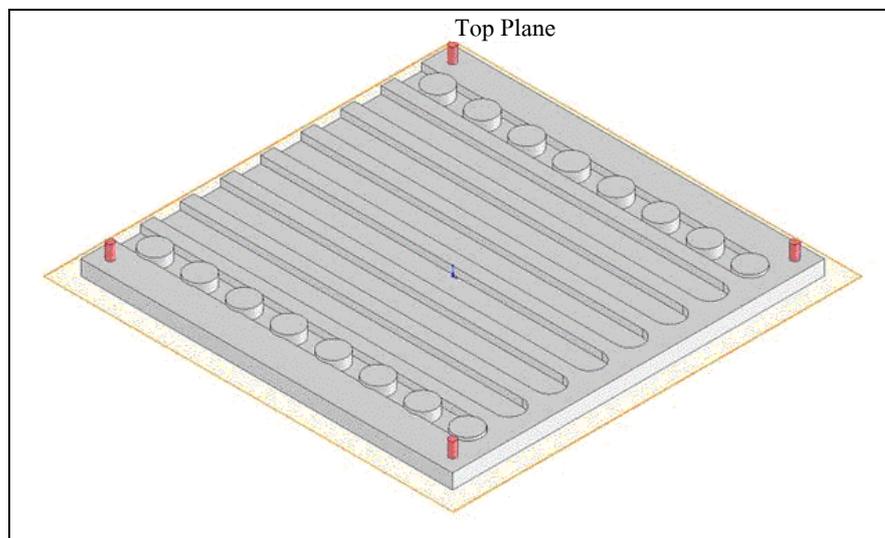
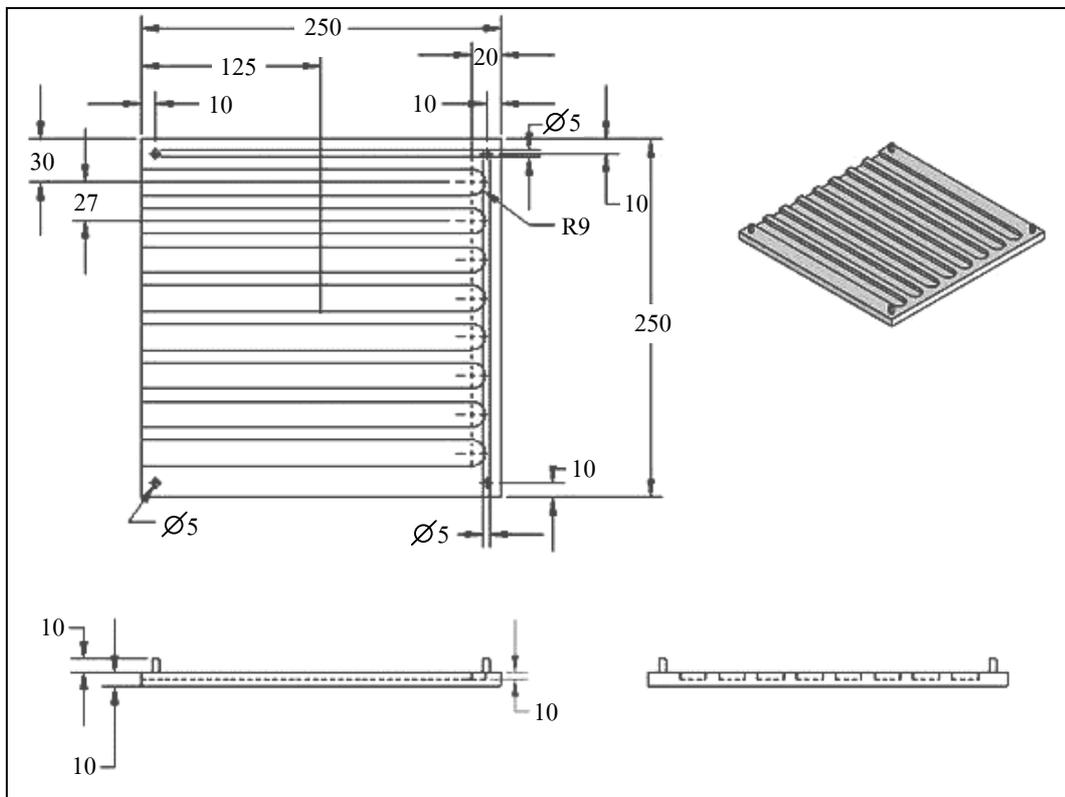
รูปที่ 3.16 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้า

3.3.14 สร้างวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า

ศึกษาวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า ที่เหมาะกับวัสดุมีแรงดันไฟฟ้าเพียงพอต่อการชาร์จแบตเตอรี่สามารถทำงานและเก็บเกี่ยวพลังงานได้ที่ความถี่ต่ำ (0.5-0.8 Hz)

3.3.15 สร้างพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า

พื้นเก็บเกี่ยวพลังงานสร้างจากแผ่นอะคริลิกหนา 1 เซนติเมตรขนาดกว้าง×ยาว เท่ากับ 12×12 นิ้วจำนวน 2 แผ่นจากนั้นเจาะแผ่นให้เป็นร่องยาวลึก 5 มิลลิเมตรจำนวน 1 แผ่น เพื่อวางชิ้นตัวอย่างจากนั้นเจาะน็อต เพื่อเป็นแกนบังคับไม่ให้แผ่นนั้นเลื่อนตำแหน่งที่แผ่นล่างดังรูปที่ 3.17 สำหรับแผ่นบนเจาะรูที่มุมทั้ง 4 เพื่อวางประกบกับแผ่นล่างตรงตำแหน่งที่เจาะน็อตไว้ จากนั้นตัดแผ่นทองแดงเป็นเส้นยาวสำหรับทำอิเล็กโทรดและเพื่อให้ง่ายต่อการเดินสายไฟจากนั้นติดชิ้นตัวอย่างกับแผ่นทองแดงและนำไปวางเรียงในร่องแผ่นอะคริลิกที่เตรียมไว้แล้วบัดกรีสายไฟเชื่อมต่อในทุกเซลล์ของตัวอย่าง



รูปที่ 3.17 ภาพเขียนแบบพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้โปรแกรม solid work

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและเฟสของผงตัวอย่างเริ่มต้น

4.1.1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผงตัวอย่าง

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงตัวอย่างชนิดต่าง ๆ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าผงตัวอย่าง PZT ในทุกชนิดที่ศึกษานั้น มีองค์ประกอบหลักคือ Pb Zr และ Ti จากตารางจะเห็นว่ามี HfO_2 ใน PZT ทุกชนิด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ HfO_2 เป็นสารที่มักปนมากับ ZrO_2 ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป (สุธรรม ศรีหล่มสัก, 2551) ทั้งนี้ยืนยันได้จากตัวอย่าง undoped PZT ที่ไม่ได้ dope สารเคมีชนิดใดเข้าไปใน โครงสร้างมี HfO_2 ในปริมาณที่เท่า ๆ กับตัวอย่าง APC 840 APC 850 และ Pz29

ตัวอย่าง PZT ที่มีชื่อทางการค้าว่า APC 840 มี dopant หลักเป็น Sr^{2+} ดังนั้นจึงน่าจะแสดงสมบัติแบบ hard PZT คล้ายกับ PZT-4 ($\text{Pb}_{0.94} \text{Sr}_{0.06}$)($\text{Zr}_{0.53} \text{Ti}_{0.47}$) O_3 (Clevite corporation, 1965)

ตัวอย่าง PZT ที่มีชื่อทางการค้าว่า APC 850 มี dopant 2 ชนิดคือ Ba^{2+} ซึ่งเป็น Isovalent dope และ Nb^{5+} ซึ่งเป็น donor dope ปกติแล้ว BaO ไม่มีผลต่อความเป็น hard หรือ soft ดังนั้น PZT ชนิดนี้น่าจะแสดงสมบัติแบบ soft PZT ซึ่งเกิดจาก donor dope คล้าย ๆ กับ PZT-5A ($\text{Pb}_{0.988} (\text{Ti}_{0.48} \text{Zr}_{0.52})_{0.976} \text{Nb}_{0.024}$) O_3 (Clevite corporation, 1965)

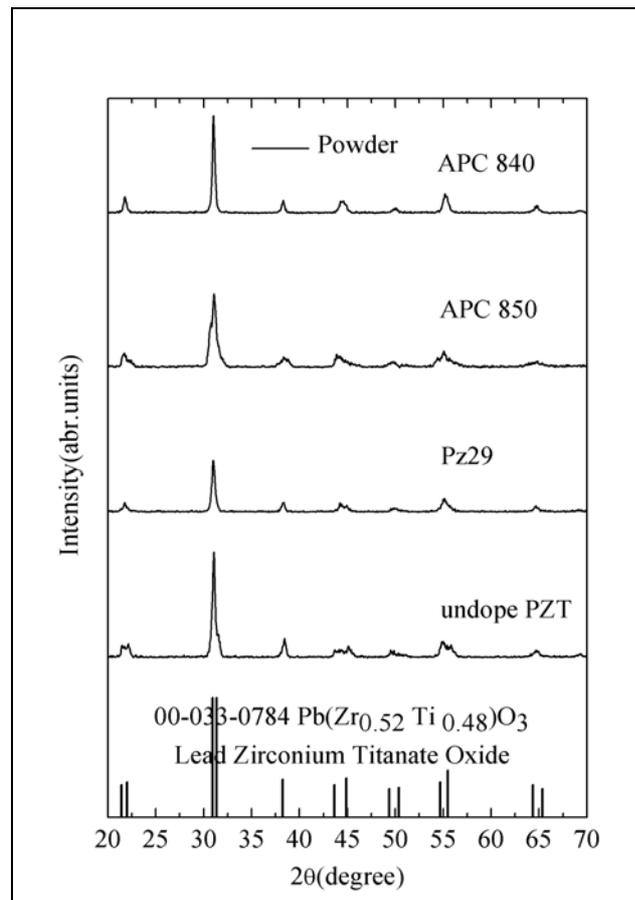
ตัวอย่าง PZT ชื่อทางการค้าว่า Pz29 มีทั้ง donor dope (Nb^{5+}) และ Sr^{2+} กับ Sb^{3+} dope จึงยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่า PZT ชนิดนี้แสดงสมบัติแบบใด

ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของ PZT ชนิดต่าง ๆ

องค์ประกอบทางเคมี	ชนิดของสารเคมี (wt%)			
	APC 840	APC 850	Pz29	undope PZT
Lead oxide (PbO)	65.6	59.6	63.2	68.3
Zirconium dioxide (ZrO ₂)	21.0	18.9	21.4	19.8
Titanium dioxide (TiO ₂)	10.7	15.6	10.5	11.1
Barium oxide (BaO)	-	3.04	-	-
Niobium Pentoxide (Nb ₂ O ₅)	-	0.93	0.42	-
Hafnium dioxide (HfO ₂)	0.45	0.43	0.45	0.44
Alumina (Al ₂ O ₃)	-	0.21	-	-
Strontium oxide (SrO)	1.78	-	3.09	-
Antimony trioxide (Sb ₂ O ₃)	-	-	0.50	-

4.1.2 การศึกษาวัฏภาคของวัสดุโพซิโคโนลิทริก

แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของผงตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดที่ใช้ในการทดลองพบว่ามี diffraction pattern ใกล้เคียงกับ PZT หมายเลข JCPDS 00-033-0784 Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃-lead zirconium titanate oxide แสดงว่า APC 840 APC 850 Pz29 และ undope PZT มีองค์ประกอบหลักเป็น PZT



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์เฟสวัฏภาค

4.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

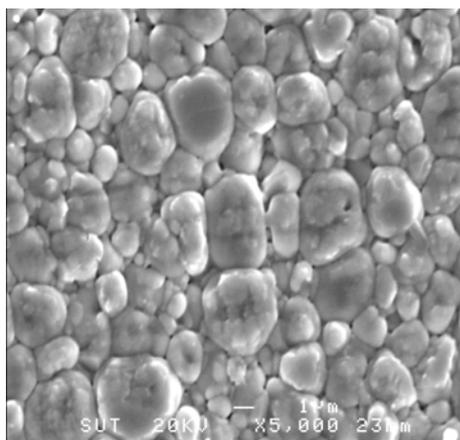
ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นตัวอย่างหลังจากเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300°C ด้วยวิธีการกัดผิวหน้าชิ้นตัวอย่างด้วยความร้อน (Thermal etching) ที่อุณหภูมิ 1250°C เป็นเวลา 15 นาที แสดงดังรูปที่ 4.2 (ก)-(ง) ซึ่งหาขนาดเกรนด้วยวิธี mean intercept length (สุทิน คูหาเรืองรอง, 2551) พบว่าตัวอย่าง APC 840 APC 850 Pz29 และ undoped PZT มีขนาดเกรนเฉลี่ย 2.32 μm 3.67 μm 3.83 μm และ 3.18 μm ตามลำดับ และวัดความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่าง PZT ทุกชนิดได้มากกว่า 90% ของความหนาแน่น $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$

จากรูปที่ 4.2 (ก) แสดงรูปถ่ายชิ้นตัวอย่าง APC 840 จะเห็นว่าลักษณะเกรนมีรูปร่างเป็นทรงกลม (spherical) และมีรูพรุนเล็กน้อย

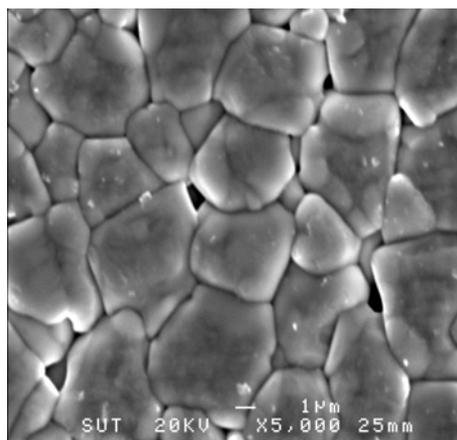
จากรูปที่ 4.2 (ข) แสดงรูปถ่ายชิ้นตัวอย่าง APC 850 จะเห็นว่าลักษณะเกรนมีรูปร่างเป็นเหลี่ยม (angular) และมีรูพรุนเล็กน้อย

จากรูปที่ 4.2 (ค) แสดงรูปถ่ายชิ้นตัวอย่าง Pz29 จะเห็นว่าลักษณะเกรนมีรูปร่างคล้ายเหลี่ยม (angular) และมีรูพรุนเล็กน้อย

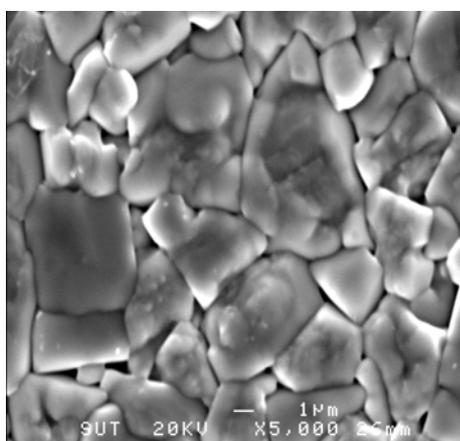
จากรูปที่ 4.2 (ง) แสดงรูปถ่ายชิ้นตัวอย่าง undope PZT จะเห็นว่าลักษณะเกรนมีรูปร่างคล้ายแผ่น (flaky) และมีรูพรุนเล็กน้อย



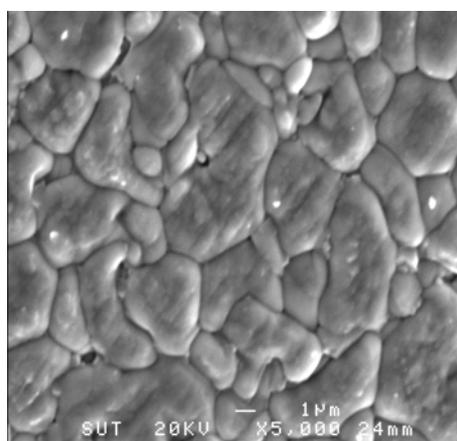
(ค)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นตัวอย่าง (กำลังขยาย 5000 เท่า) (ก) APC 840 (ข) APC 850 (ค) Pz29 (ง) undope PZT

4.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริก APC 840 APC 850 Pz29 และ undoped PZT ที่ใช้อ้างอิงในการศึกษา

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริกจากแหล่งผลิต

สมบัติทางไฟฟ้า	หน่วย	ค่ามาตรฐาน			
		APC 840 ¹	APC 850 ¹	Pz29 ²	undoped PZT ³
Relative Dielectric constant (K)	-	1250	1750	2870	1180
Dielectric Loss (tan δ)	-	0.004	0.014	0.016	0.004
Electromechanical Coupling factor (k_p)	-	0.59	0.63	0.643	0.52
Piezoelectric Voltage Constant (g_{33})	10^{-3} Vm/N	26.5	26	22.6	34.5
Piezoelectric Charge Constant (d_{33})	10^{-12} C/N	290	400	574	223
Figure of merits ($d_{33} \cdot g_{33}$)	10^{-12} m ² /N	7.68	10.40	12.97	7.69

หมายเหตุ : ¹(APC International, 2002); ²(Ferropem Piezoceramics, 2003);

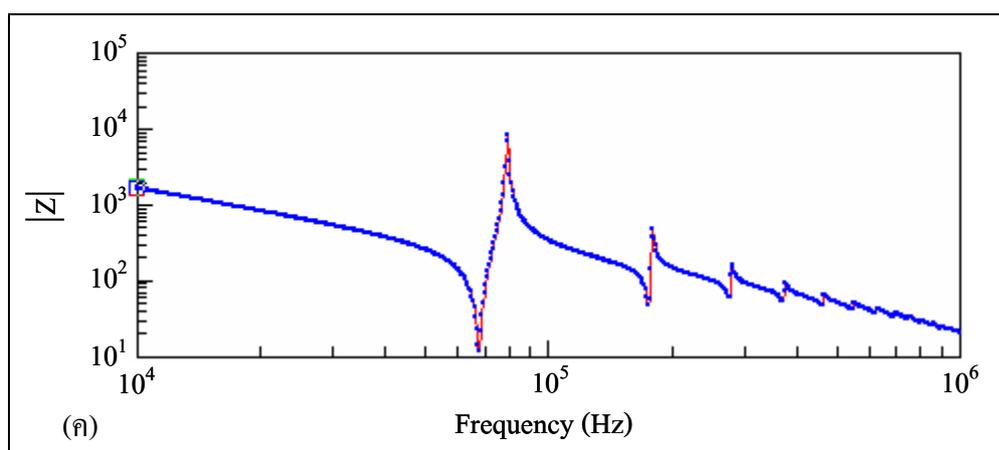
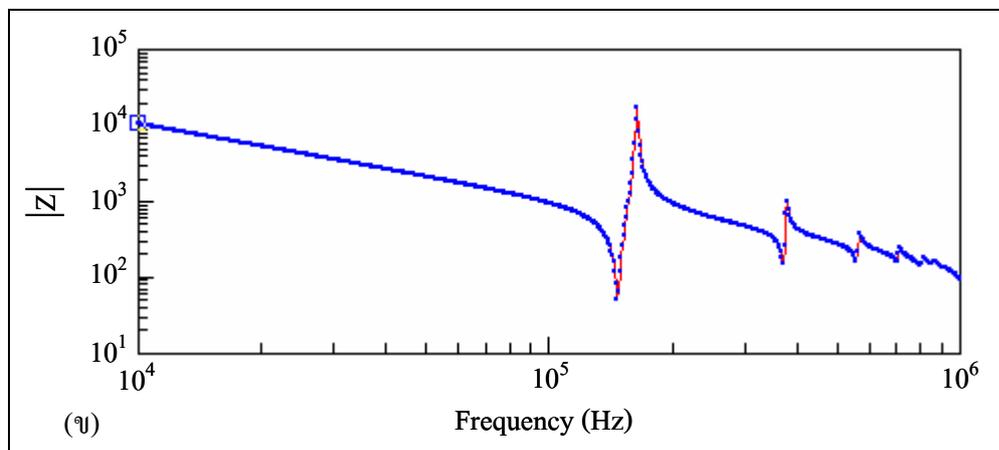
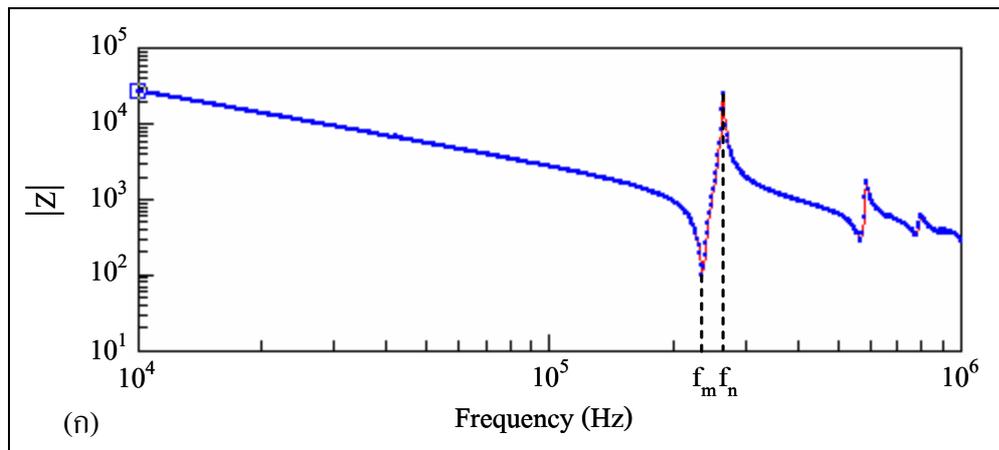
³(Jaffe, Cook, and Jaffe, 1971)

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางไฟฟ้าของชั้นตัวอย่างที่มีองค์ประกอบทางเคมีและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ

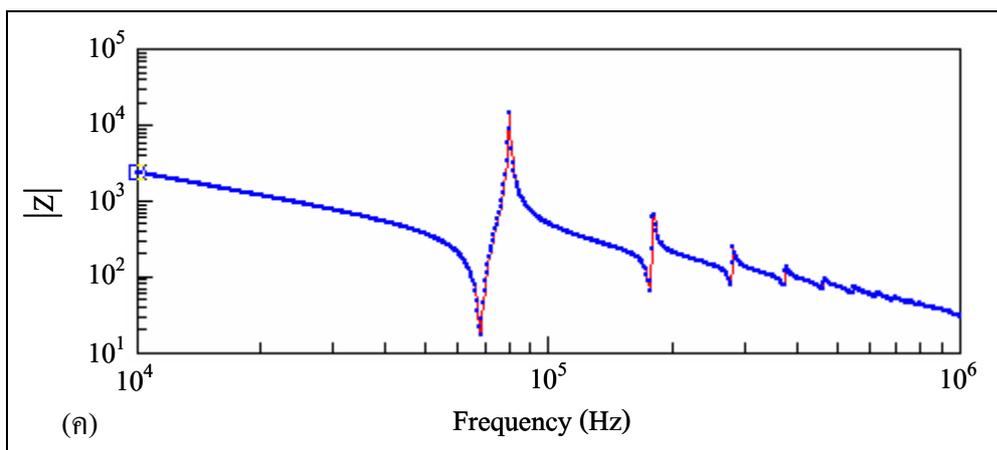
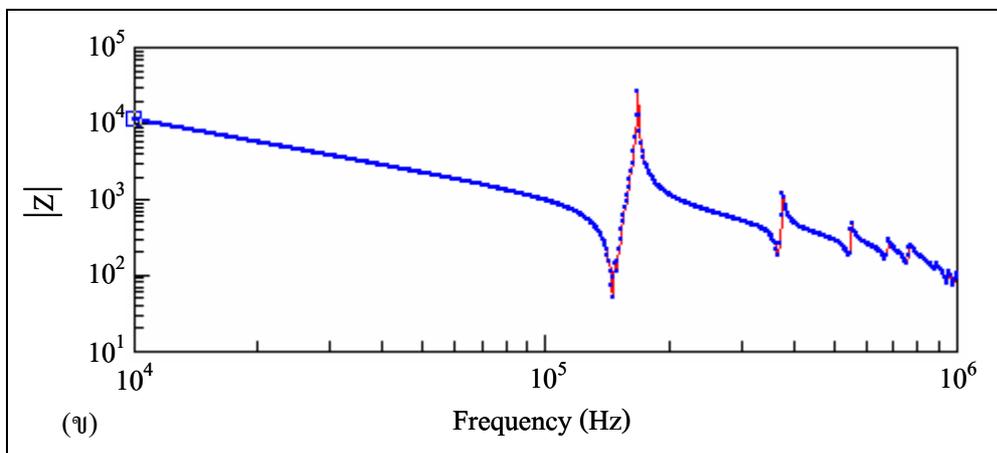
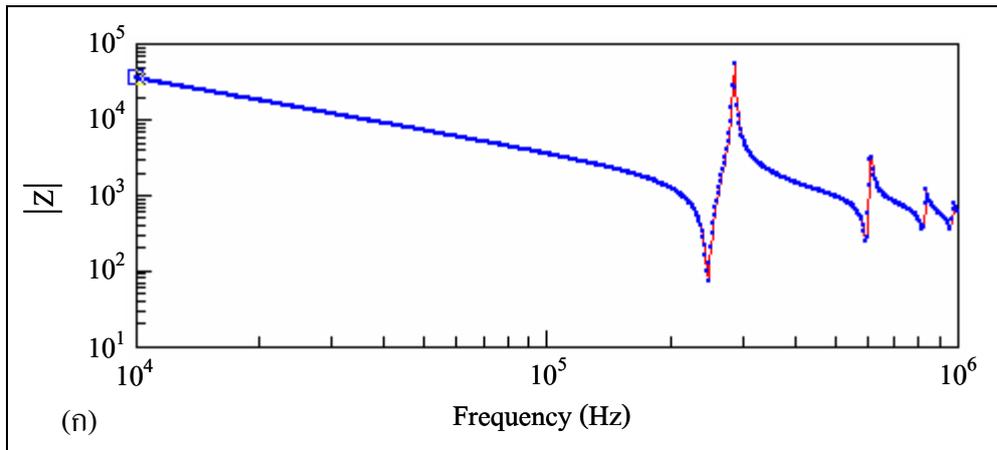
สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ	หน่วย	APC 840			APC 850			Pz29			undope PZT		
		เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นตัวอย่าง			เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นตัวอย่าง			เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นตัวอย่าง			เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นตัวอย่าง		
		8 mm	13 mm	29 mm	8 mm	13 mm	29 mm	8 mm	13 mm	29 mm	8 mm	13 mm	29 mm
K'	-	791	905	1018	1323	1532	1857	1866	1980	2382	937	990	963
$\tan \delta$	-	0.009	0.010	0.004	0.030	0.028	0.005	0.029	0.025	0.005	0.010	0.008	0.003
k_p	-	0.53	0.50	0.49	0.56	0.58	0.59	0.53	0.54	0.59	0.42	0.40	0.30
g_{33}	$(\times 10^{-3})\text{Vm/N}$	36.7	32.4	28.8	31.2	31.2	28.7	27.9	28.6	26.4	23.9	22.2	30.4
d_{33}	$(\times 10^{-12})\text{C/N}$	257	259	261	365	423	488	460	500	554	198	194	259
$d_{33} \cdot g_{33}$	$(\times 10^{-12})\text{m}^2/\text{N}$	9.42	8.39	7.52	11.39	13.20	14.01	12.83	14.30	14.63	4.73	4.31	7.90

4.3.1 การศึกษาความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

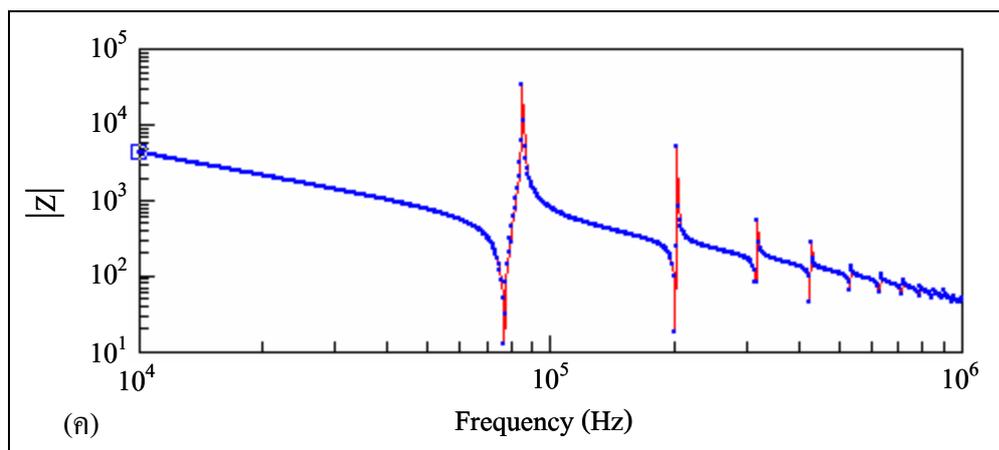
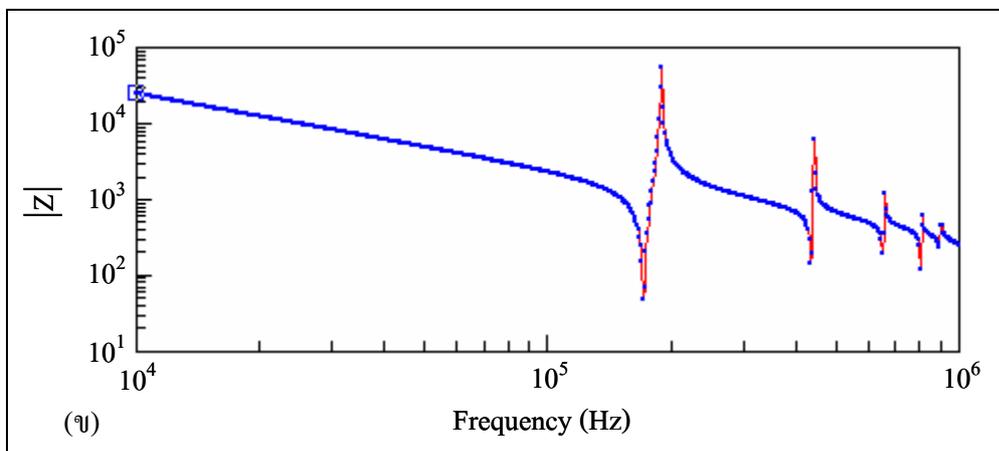
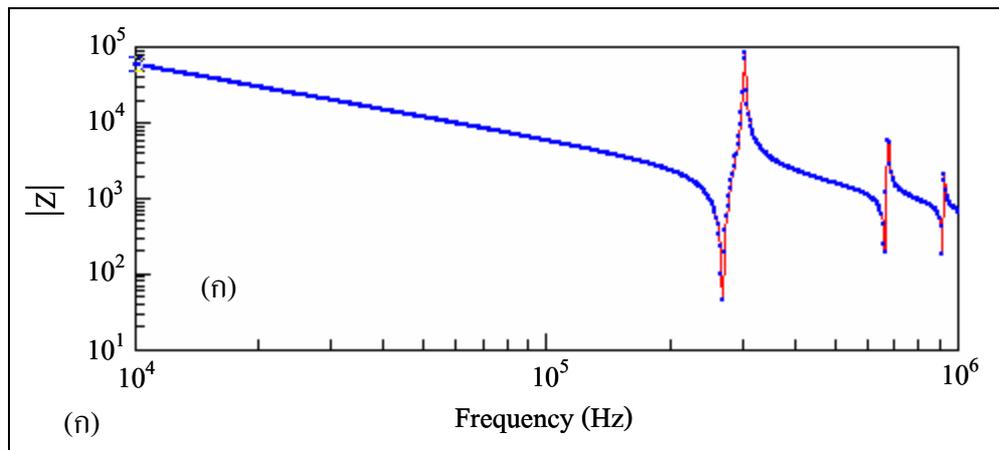
จากรูปที่ 4.3 ถึง รูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับอิมพีแดนซ์ของชิ้นตัวอย่างไพโซอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ กัน จากกราฟจะเห็นว่าวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่จะเกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำกว่าวัสดุที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับ Priya (2007) ที่กล่าวว่า ความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุไพโซอิเล็กทริกแทรนส์ควเซอร์นั้นจะขึ้นกับรูปร่างและขนาดของวัสดุ ทั้งนี้เนื่องจากความถี่เรโซแนนซ์มีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุตามสมการ $f_m = \frac{N}{D\phi}$ เมื่อ N คือ ค่าความถี่คงที่ (Hz.m) $D\phi$ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นวัสดุ (m) (APC International, 2002) และจากตารางที่ 4.4 สังเกตว่าความถี่เรโซแนนซ์และอิมพีแดนซ์ของชิ้นตัวอย่างมีค่าแตกต่างกันพอสมควรและมีแนวโน้มของข้อมูลที่คล้ายกันในทุกตัวอย่าง PZT ที่ศึกษา จึงอาจกล่าวได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุไพโซอิเล็กทริกนั้นขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณที่ dope เข้าไปในโครงสร้าง ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวอาจสอดคล้องกับ APC International (2002) ที่กล่าวว่า ความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุไพโซอิเล็กทริกหนึ่ง ๆ แปรตามองค์ประกอบทางเคมี



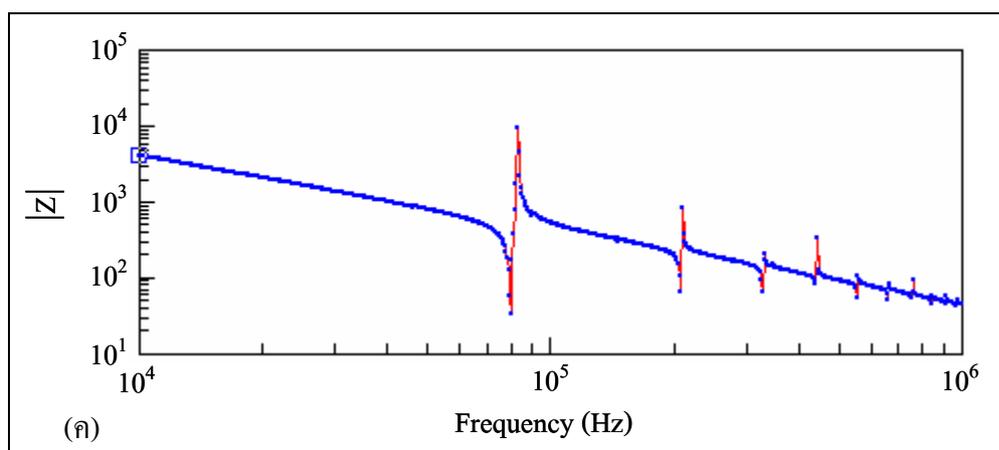
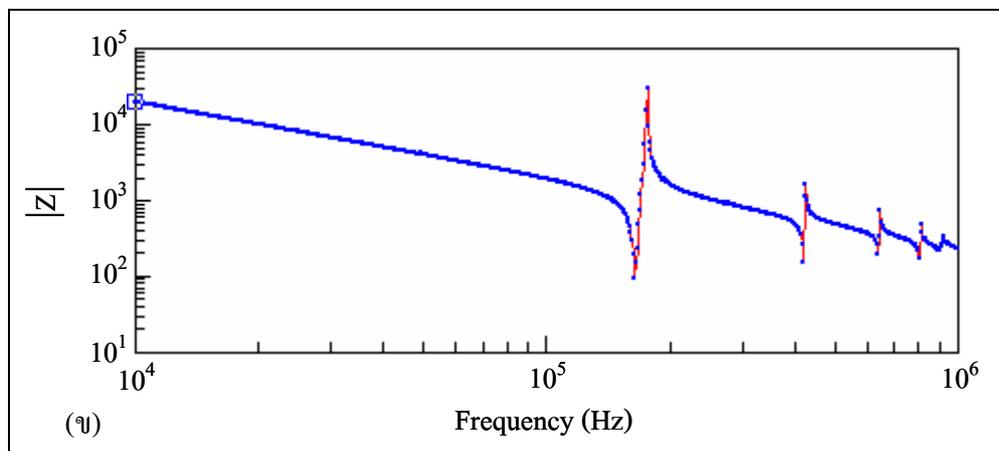
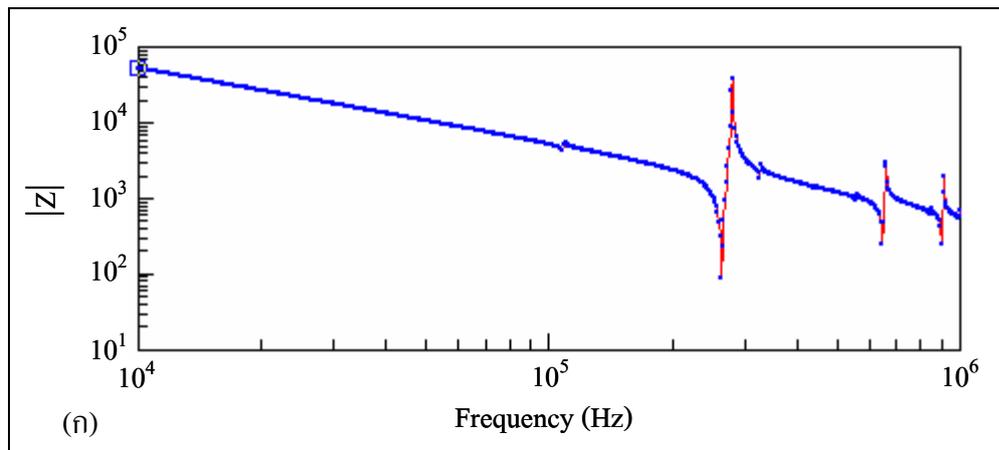
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ของตัวอย่าง Pz29 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ของตัวอย่าง APC 850 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ของตัวอย่าง APC 840 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร



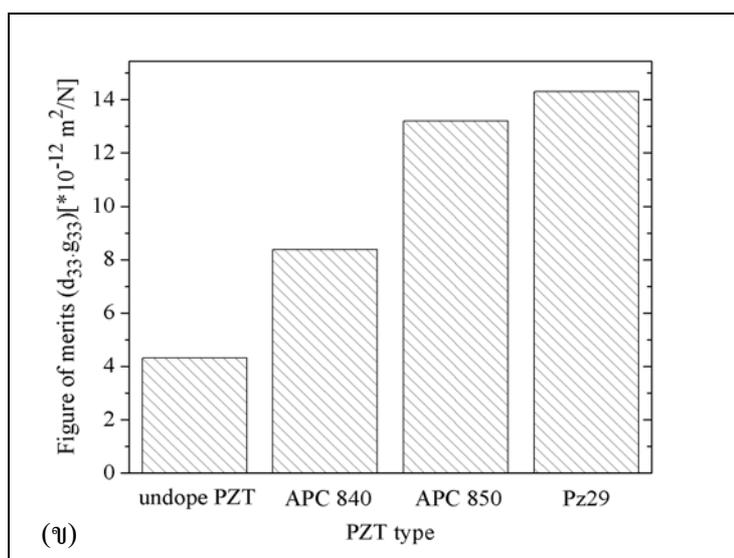
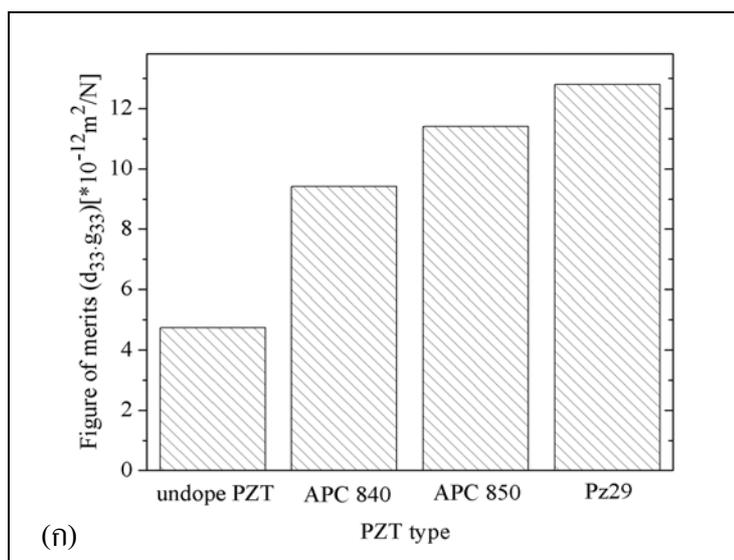
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ของตัวอย่าง undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.4 ค่าความถี่ที่ความนำเชิงซ้อนสูงสุด (f_m) และค่าความถี่ที่ความนำเชิงซ้อนต่ำสุด (f_n) ของตัวอย่าง APC 840 APC 850 PZ29 และ undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 13 และ 29 มิลลิเมตร

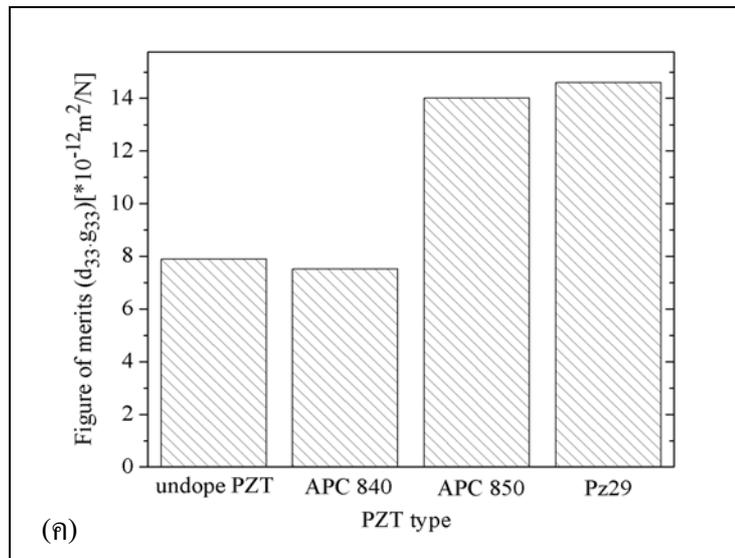
ข้อมูล	หน่วย	APC 840			APC 850			PZ29			undoped PZT		
		เส้นผ่านศูนย์กลาง			เส้นผ่านศูนย์กลาง			เส้นผ่านศูนย์กลาง			เส้นผ่านศูนย์กลาง		
		ของชิ้นตัวอย่าง			ของชิ้นตัวอย่าง			ของชิ้นตัวอย่าง			ของชิ้นตัวอย่าง		
		8 mm	13 mm	29 mm	8 mm	13 mm	29 mm	8 mm	13 mm	29 mm	8 mm	13 mm	29 mm
f_m	Hz	267380	167370	77106	246390	153120	68299	235370	144450	67780	263160	167120	80047
$ Z _{\min}$		23	17	4	71	41	16	100	41	11	51	21	14
f_n	Hz	302290	187650	85496	285190	178600	80326	264430	164550	79384	278550	176770	83215
$ Z _{\max}$		304000	150250	107020	56487	33500	15979	24968	21518	10248	101730	88717	54460

4.3.2 การศึกษาค่า figure of merit (d_{33}, g_{33}) ของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

รูปที่ 4.7 (ก)-(ค) แสดง figure of merit ของ PZT ชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 13 และ 29 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่า Pz29 มีค่า figure of merit สูงที่สุดตามด้วย APC 850 APC 840 และ undope PZT ตามลำดับ แต่ในชั้นตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร ตัวอย่าง undope PZT มีค่า figure of merit มากกว่า APC 840 ดังรูปที่ 4.7 (ค)



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบค่า figure of merit ของชั้นตัวอย่างชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบค่า figure of merit ของชิ้นตัวอย่างชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร (ต่อ)

4.4 การศึกษาปัจจัยภายนอกที่มีต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของวัสดุ

การศึกษปัจจัยภายนอกที่มีต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของวัสดุ โดยการ apply แรงกระทำในช่วง 100-500 N ด้วยความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ซึ่งได้แสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์การวัดแรงดันไฟฟ้าจากวัสดุไพโซอิเล็กทริกในรูปที่ 3.16 และแสดงวงจรการวัดแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 3.15

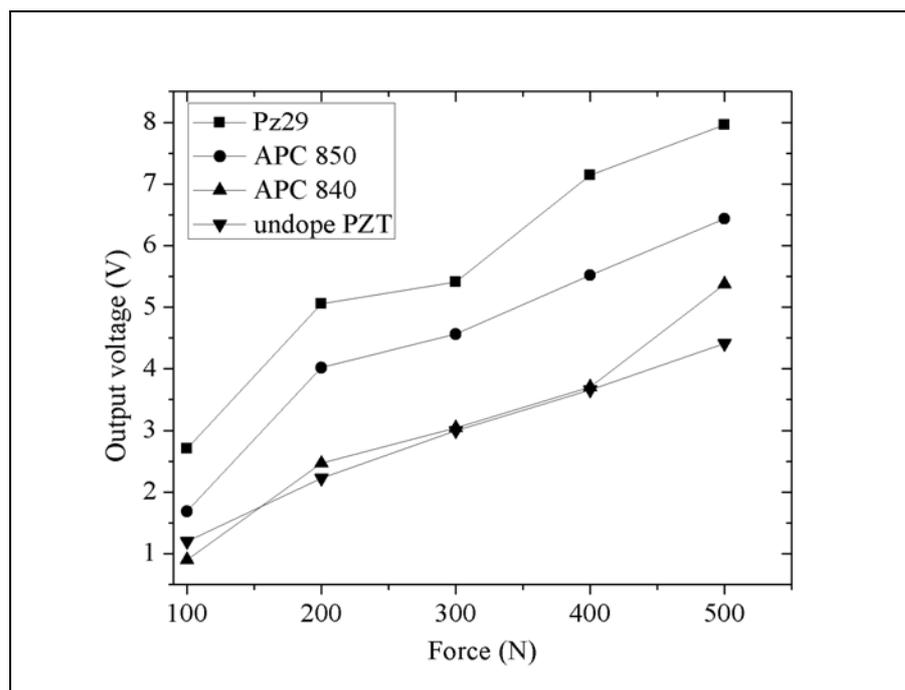
4.4.1 ผลของแรงกระทำ (force) ต่อแรงดันไฟฟ้า (output voltage) ของวัสดุ

ไพโซอิเล็กทริก

งานวิจัยนี้ apply แรงขนาด 100-500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ลงบนชิ้นตัวอย่าง PZT ชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ดังแสดงวงจรการวัดในรูปที่ 3.15 ที่ต่อกับค่าความต้านทาน 25 M Ω แล้ววัดแรงดันไฟฟ้านำไปเขียนกราฟได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากรูปจะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าของ PZT ทุกชนิดแปรตรงตามแรงที่ apply ซึ่งสอดคล้องกับ Kim, Priya, Stephanou, and Uchino (2007) ที่พบว่าพลังงานที่ได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริกขึ้นกับแรงและความเร่งในการ apply วัสดุ (APC International, 2002; Wischke, Goldschmidtboeing, and Woias, 2007) ทั้งนี้เนื่องจาก polarization ของวัสดุไพโซอิเล็กทริกมีความสัมพันธ์กับ compressive stress ตามสมการ $P = -dT$ (APC International, 2002) และ polarization มีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่กำเนิดออกมาจากวัสดุ จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าชิ้นตัวอย่าง Pz29 ให้ค่าแรงดันไฟฟ้ามากที่สุด

รองลงมาคือ APC 850 APC 840 และ undope PZT และสังเกตว่าการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่างนั้น ขึ้นกับค่า figure of merit ($d_{33} \cdot g_{33}$) ที่วัดได้จากชิ้นตัวอย่างดังแสดงแล้วในรูปที่ 4.7 (ก) โดยวัสดุที่มีค่า figure of merit มากก็จะให้แรงดันไฟฟ้าที่มากตามไปด้วยซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Islam and Priya (2006) ที่พบว่าวัสดุที่มี piezoelectric voltage constant (g) และ piezoelectric strain constant (d) สูง ๆ จะให้พลังงานมากกว่าวัสดุที่มี g และ d ต่ำ ๆ และยังมีงานวิจัยของ Chern, Islam, and Priya (2006); Priya (2007) พบว่าพลังงานที่วัสดุผลิตได้จะขึ้นกับค่าของ figure of merit และงานวิจัยของ Kim et al. (2007) พบว่าวัสดุที่มีค่า piezoelectric voltage constant (g) สูงจะให้แรงดันไฟฟ้าที่มาก

ได้ทำการทดลองในลักษณะเดียวกันกับข้างต้น โดยใช้ค่าความต้านทานภายนอก $1 \text{ M}\Omega$ $50 \text{ M}\Omega$ และ $75 \text{ M}\Omega$ ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นไปในแนวเดียวกับผลการทดลองที่ใช้ความต้านทานภายนอก $25 \text{ M}\Omega$ ดังแสดงในภาคผนวก ก.

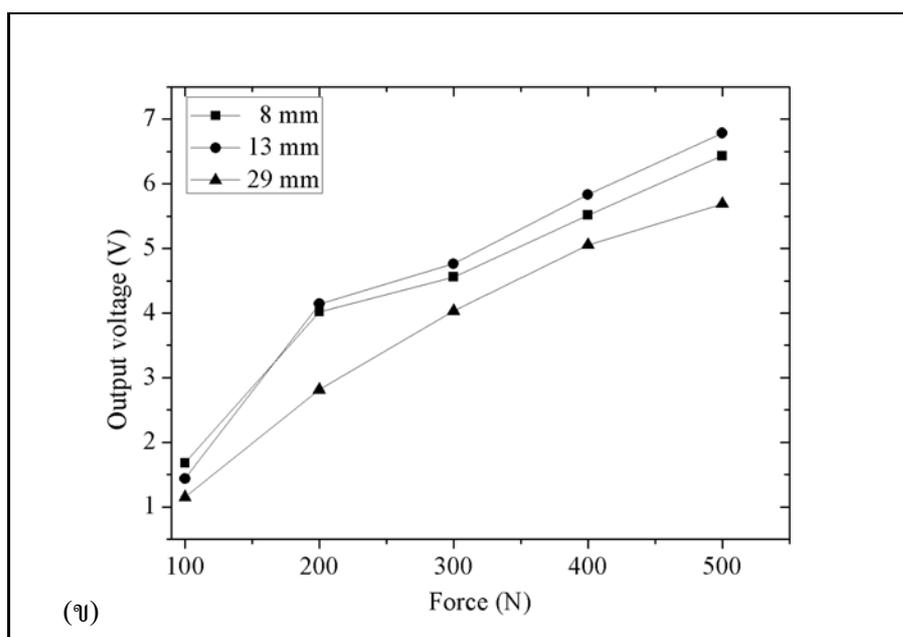
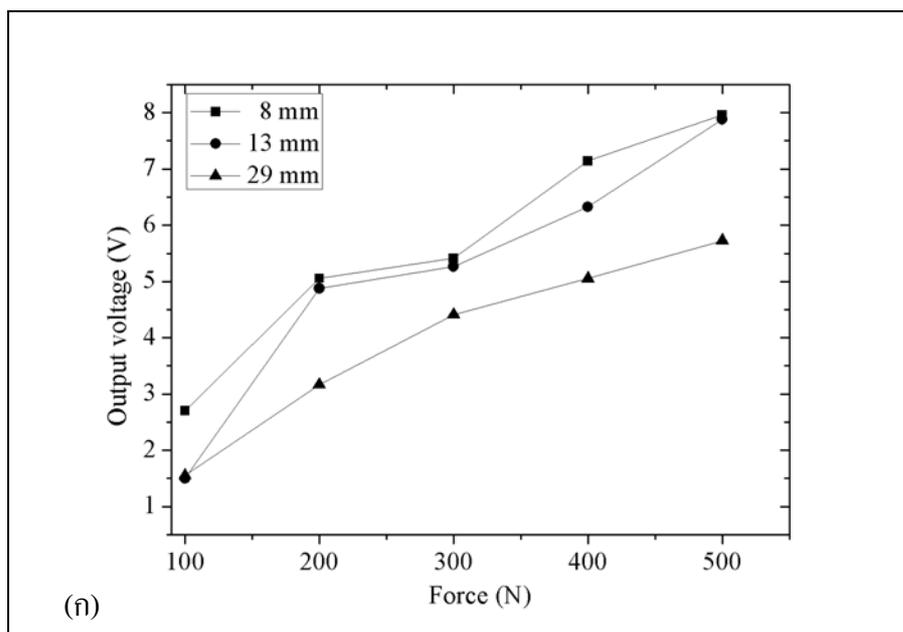


รูปที่ 4.8 แรงดันไฟฟ้าของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรเมื่อ apply แรงในช่วง 100-500 N โดยต่อกับความต้านทานภายนอก $25 \text{ M}\Omega$

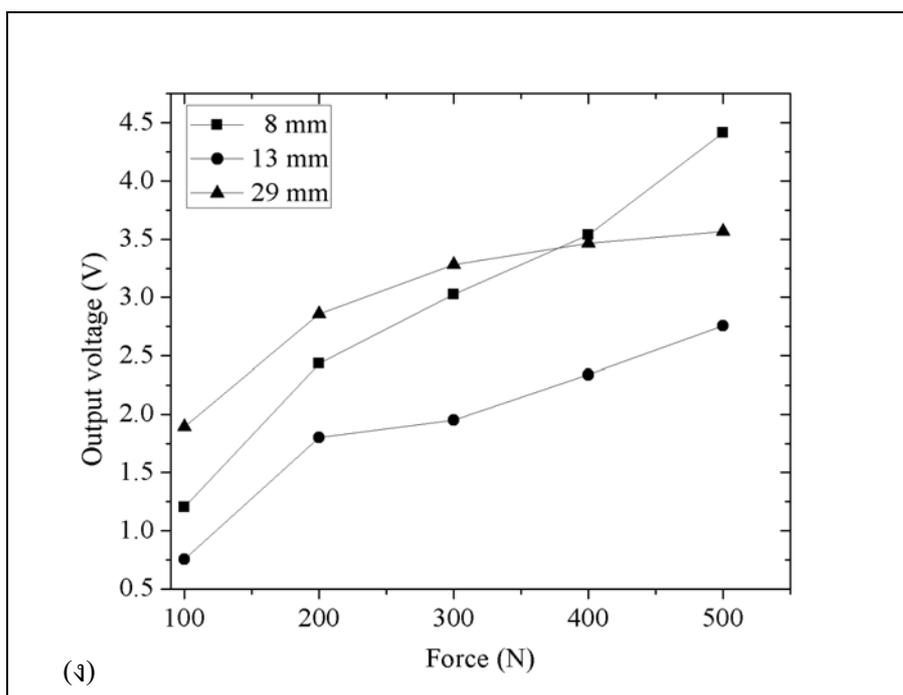
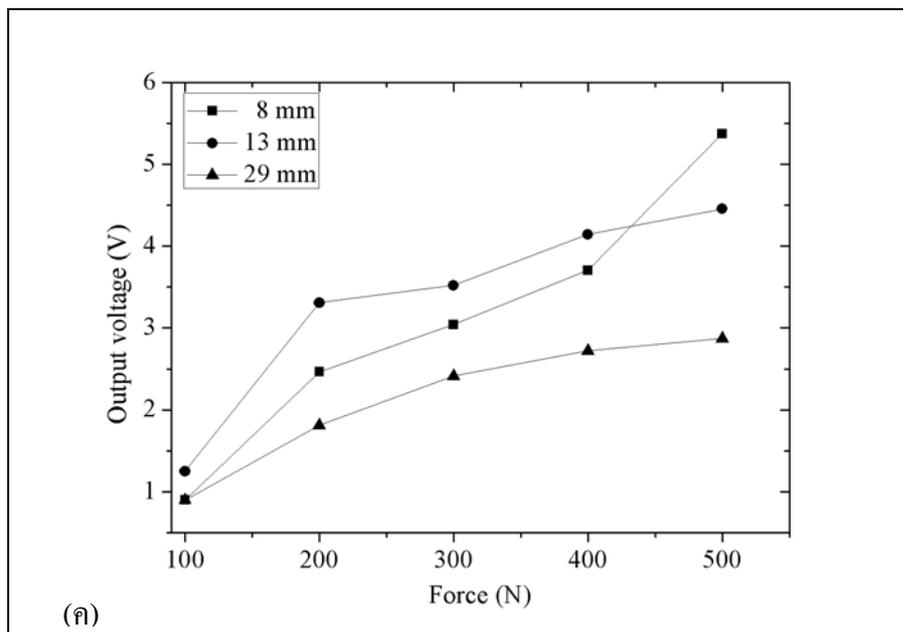
4.4.2 ผลของแรงกระทำที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่าง ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ

การศึกษานี้ apply แรงกระทำในช่วง 100-500 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz บนชิ้นตัวอย่าง PZT ชนิดต่าง ๆ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 13 และ 29 มิลลิเมตร แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้นำไปเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.9 (ก)-(ง) จากรูปจะเห็นว่าส่วนใหญ่แล้วตัวอย่าง Pz29 APC 850 APC 840 และ undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 และ 13 มิลลิเมตรสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้สูงกว่าชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ compressive stress แปรผันตรงกับ dielectric displacement (ตามสมการ 2.9) และ dielectric displacement แปรตามความต่างศักย์ที่วัสดุปล่อยออกมา นอกจากนี้ stress แปรผกผันกับพื้นที่ของชิ้นตัวอย่าง ($\text{stress} = \frac{\text{force}}{\text{area}}$) ดังนั้น ชิ้นตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าจึงมี stress มากกว่า ชิ้นตัวอย่างดังกล่าวจึงผลิตแรงดันไฟฟ้าออกมามากกว่าเมื่อถูกแรงกลภายนอกกระทำ ซึ่งผลการศึกษามีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Wischke, Goldschmidtboeing, and Woias 2007; Chen, Jia, Zhang, Wang, and Liu 2009) จากรูปที่ 4.9 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่าง Pz29 จะเห็นว่า ชิ้นตัวอย่างขนาด 8 มิลลิเมตรให้แรงดันไฟฟ้ามากกว่า 13 และ 29 มิลลิเมตรซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.95 V 7.88 V และ 5.73 V ตามลำดับ ทดสอบที่ความต้านทานภายนอก 25 M Ω แรงกระทำ 500 N รูปที่ 4.6 (ข) จะเห็นว่าชิ้นตัวอย่าง 13 มิลลิเมตรมีแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 8 มิลลิเมตรเล็กน้อยแต่ทั้งคู่ก็ยิ่งให้แรงดันไฟฟ้าที่มากกว่าชิ้นตัวอย่างขนาด 29 มิลลิเมตร จากรูปที่ 4.9 (ค)-(ง) จะเห็นว่าที่แรง 100-300 N ค่าแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่าง 8 13 และ 29 มิลลิเมตรมีค่าที่ใกล้เคียงกันแต่เมื่อแรงกระทำสูงกว่า 300 N จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรมากกว่า 13 และ 29 มิลลิเมตร ตามลำดับ

การทดลองในลักษณะเดียวกันกับข้างต้นโดยใช้ค่าความต้านทานภายนอก 1 M Ω 50 M Ω และ 75 M Ω ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นไปในแนวเดียวกับผลการทดลองที่ใช้ความต้านทานภายนอก 25 M Ω ดังแสดงในภาคผนวก ก.



รูปที่ 4.9 แรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่างที่ apply แรงกระทำ 100-500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ของตัวอย่าง (ก) Pz29 (ข) APC 850 (ค) APC 840 (ง) undoped PZT ที่ความต้านทานภายนอก 25 M Ω



รูปที่ 4.9 แรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่างที่ apply แรงกระทำ 100-500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ของตัวอย่าง (ก) Pz29 (ข) APC 850 (ค) APC 840 (ง) undoped PZT ที่ความต้านทานภายนอก 25 M Ω (ต่อ)

4.4.3 ผลของความต้านทานภายนอก (load resistance) ต่อแรงดันไฟฟ้า (output voltage) ของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก

การศึกษานี้ apply แรงขนาด 500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ลงบนชิ้นตัวอย่าง PZT ชนิดและขนาดต่าง ๆ ในวงจรไฟฟ้าในรูปที่ 3.15 โดยทดลองปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานภายนอก (R) ให้มีค่าต่าง ๆ กันแล้ววัดแรงดันไฟฟ้า ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก)-(ค) พบว่าแรงดันไฟฟ้าแปรตามค่าความต้านทานภายนอก ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sodano, Park, and Inman, (2004); Kim, Priya, Uchino, and Newnham, (2005); Chern, Islam, and Priya, (2006); Kim et al., (2007); Swallow, Luo, Siores, Patel, and Dodds, (2008); Howells, (2008) เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าแปรผันตรงกับค่าความต้านทาน ภายนอกซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของโอห์ม $V = IR$ และแรงดันไฟฟ้าขึ้นกับขนาดอัตราส่วนของ R_{load} ต่อความต้านทานรวมของระบบ ดังสมการในงานวิจัยของ Priya (2005) ดังสมการที่ 4.1

$$V_{load} = V_{oc} \left| \frac{R_{load}}{R_{load} + \frac{1}{j\omega C} + R_s} \right| \quad (4.1)$$

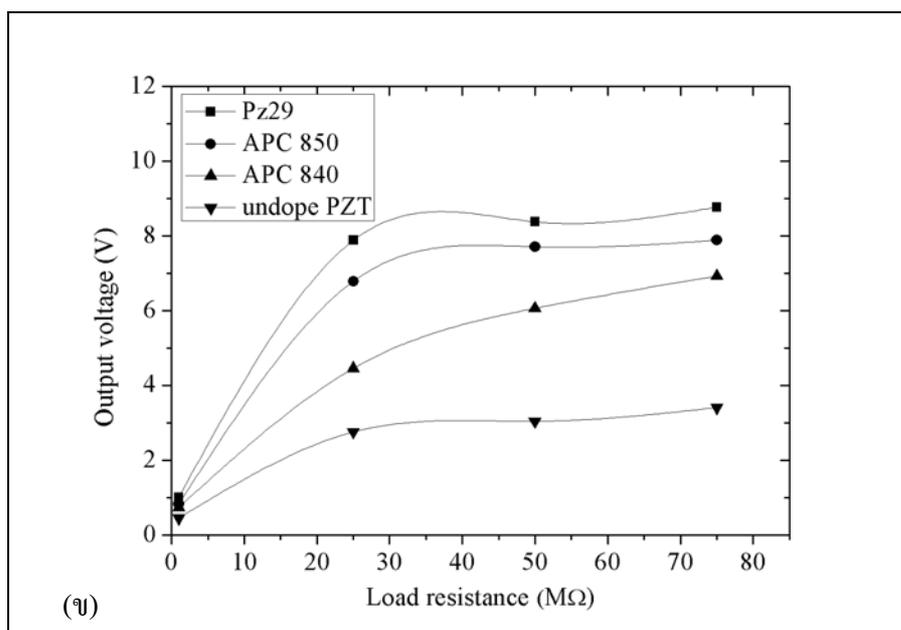
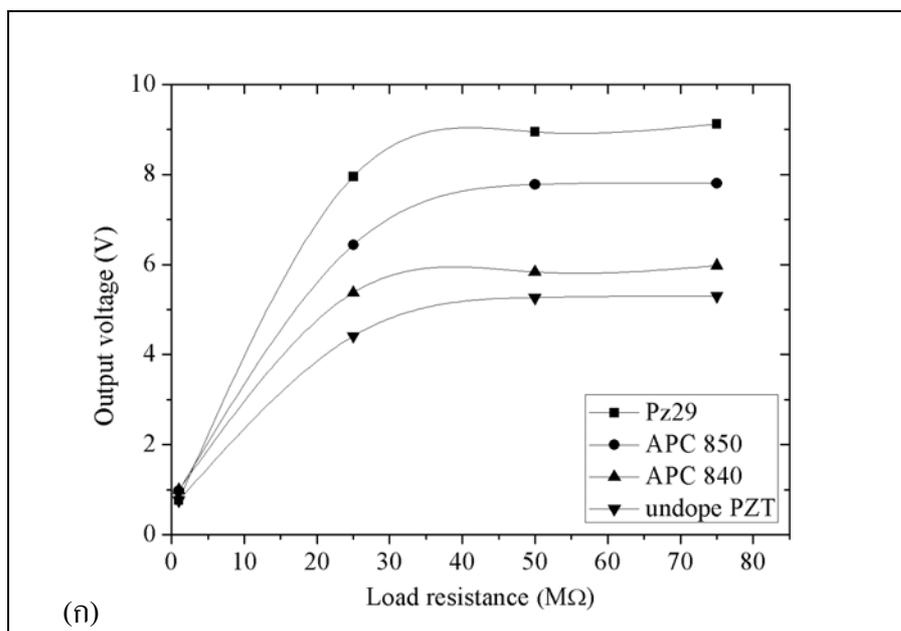
เมื่อ V_{load} คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออกมา

V_{oc} คือ แรงดันไฟฟ้าของวัสดุที่ open circuit

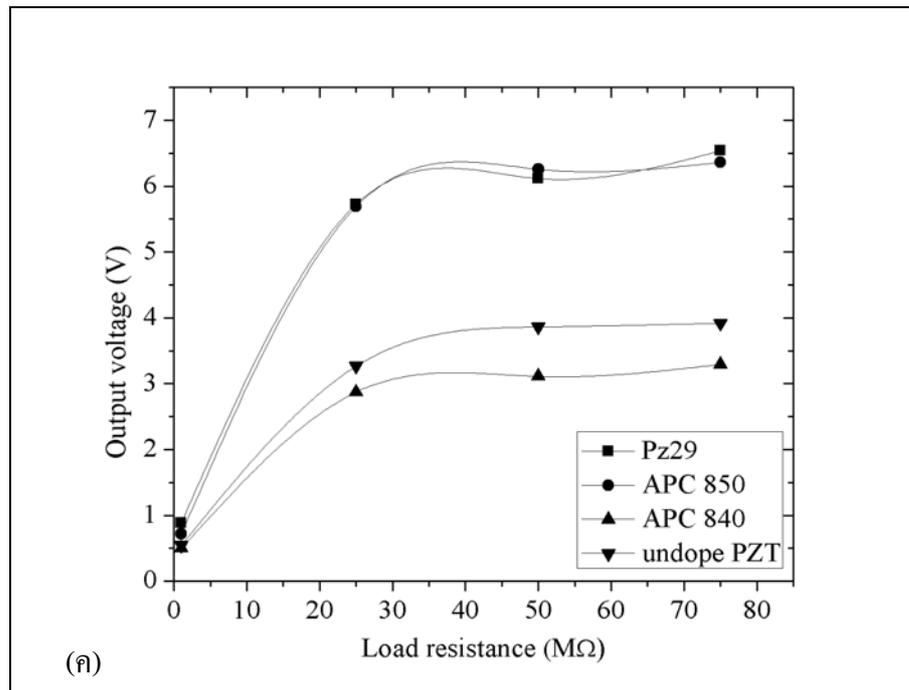
R_{load} คือ ความต้านทานภายนอก

R_s คือ ค่าความต้านทานของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก

จากรูปที่ 4.10 (ก)-(ค) ตั้งเกตว่าที่ค่าความต้านทานภายนอกประมาณ 25 MΩ แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเริ่มอิ่มตัวที่ค่าความต้านทานประมาณ 40 MΩ ในทุกชนิดของชิ้นตัวอย่าง ชิ้นตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรให้แรงดันไฟฟ้ามากกว่าชิ้นตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 และ 29 มิลลิเมตรของทุกชนิดชิ้นตัวอย่างที่ศึกษา ตัวอย่าง Pz29 ให้แรงดันไฟฟ้ามากที่สุดรองลงมาคือ APC 850 APC 840 และ undoped PZT ตามลำดับ จากรูปที่ 4.10 (ก) จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้เมื่อ apply แรง 500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ลงบนชิ้นตัวอย่าง Pz29 APC 850 APC 840 และ undoped PZT ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ที่มีต่อความต้านทานภายนอก 25 MΩ ได้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 7.95 V 6.43 V 5.37 V และ 4.41 V ตามลำดับ การทดลองในลักษณะเดียวกันกับข้างต้น โดย apply แรง 100- 500 N ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นไปในแนวเดียวกับผลการทดลองที่ apply แรง 500 N ดังแสดงในภาคผนวก ก.

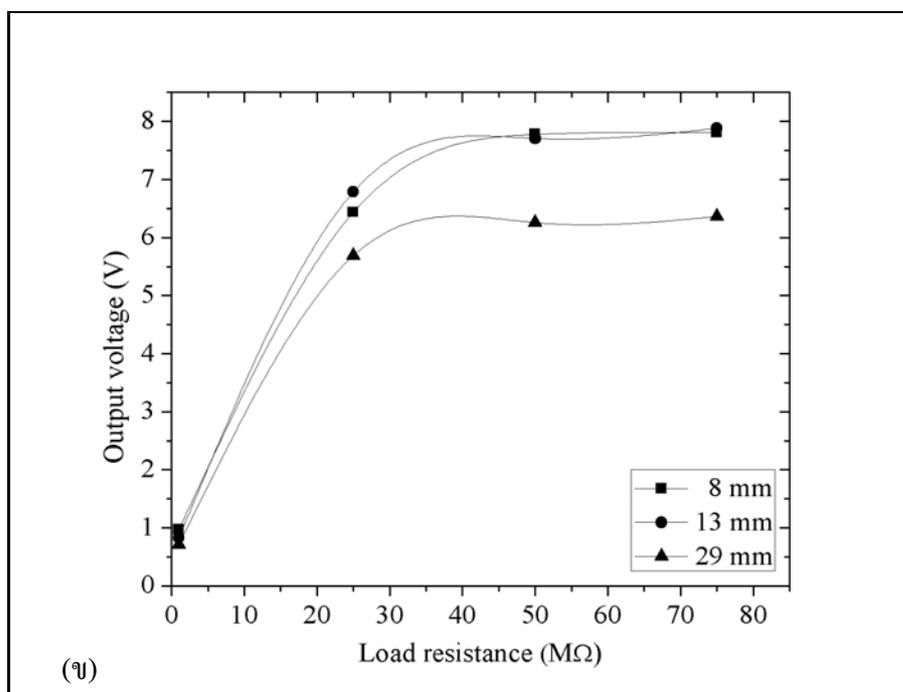
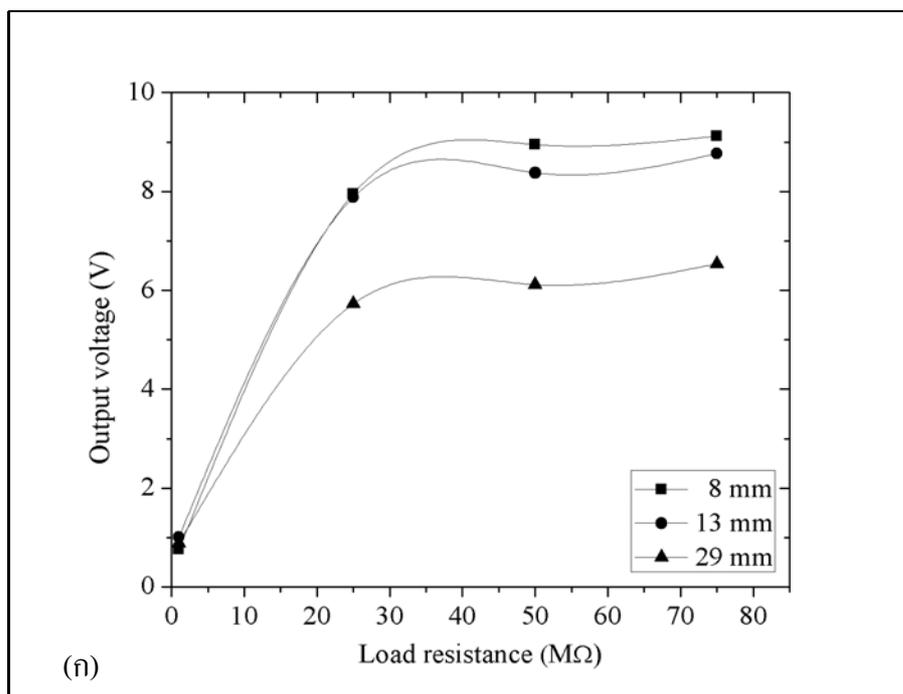


รูปที่ 4.10 ผลของค่าความต้านทานภายนอกที่มีต่อการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่าง ชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร โดย apply แรงกระทำ 500 N ความถี่ทางกล ในช่วง 0.5-0.8 Hz

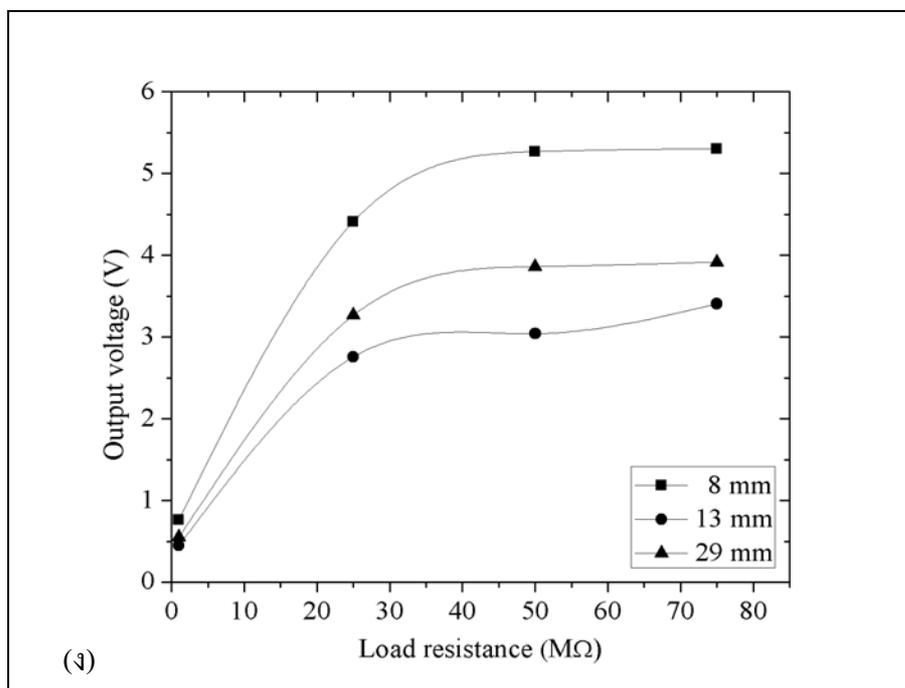
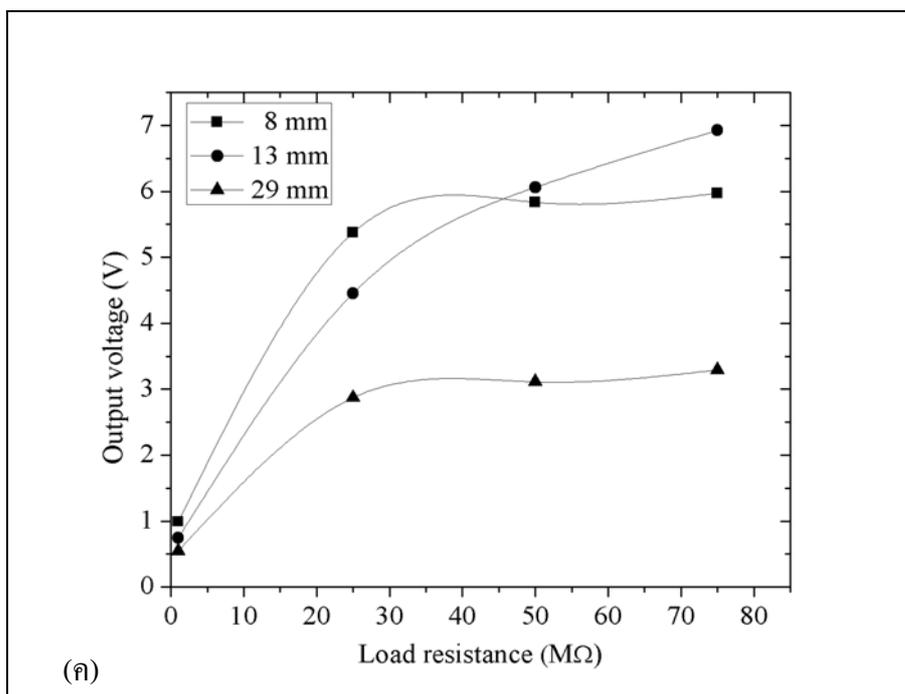


รูปที่ 4.10 ผลของค่าความต้านทานภายนอกที่มีต่อการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่าง ชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร โดย apply แรงกระทำ 500 N ความถี่ทางกล ในช่วง 0.5-0.8 Hz (ต่อ)

เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก PZT ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ กันในวงจรที่มีความต้านทานภายนอกต่างกันชัดเจนขึ้น จึงได้นำข้อมูลชุดเดียวกันไปเขียนกราฟแสดงผลของความต้านทานต่อแรงดันไฟฟ้างดังรูป 4.11 (ก)-(ค) จากรูปจะเห็นว่าชิ้นตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กให้กำลังไฟฟ้าออกมามากกว่าชิ้นตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่



รูปที่ 4.11 ผลของค่าความต้านทานต่อแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่าง (ก) Pz29 (ข) APC 850 (ค) APC 840 (ง) undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ โดย apply แรงกระทำ 500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz



รูปที่ 4.11 ผลของค่าความต้านทานต่อแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่าง (ก) Pz29 (ข) APC 850 (ค) APC 840 (ง) undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ โดย apply แรงกระทำ 500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz (ต่อ)

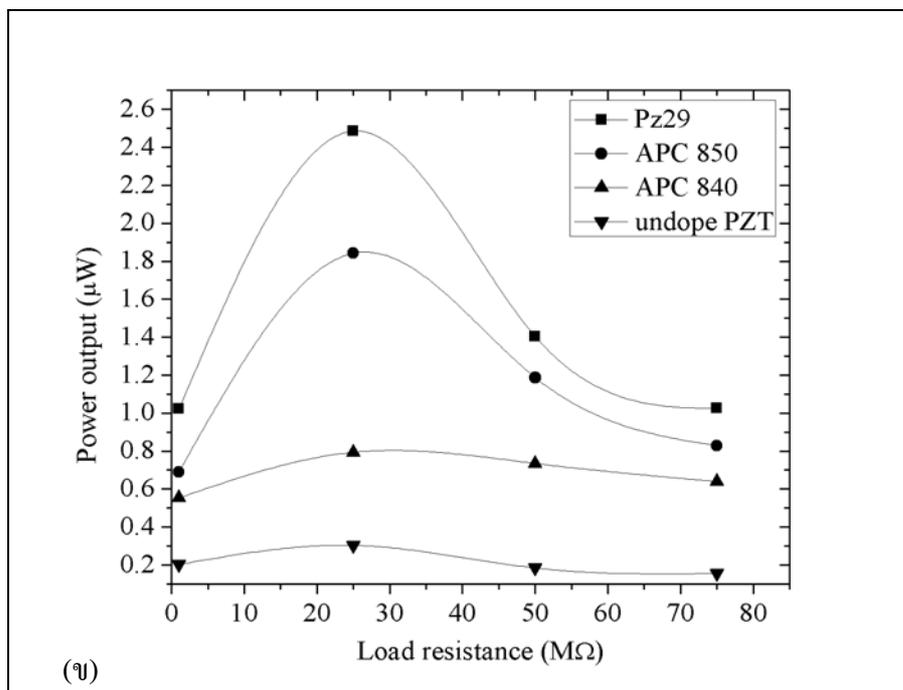
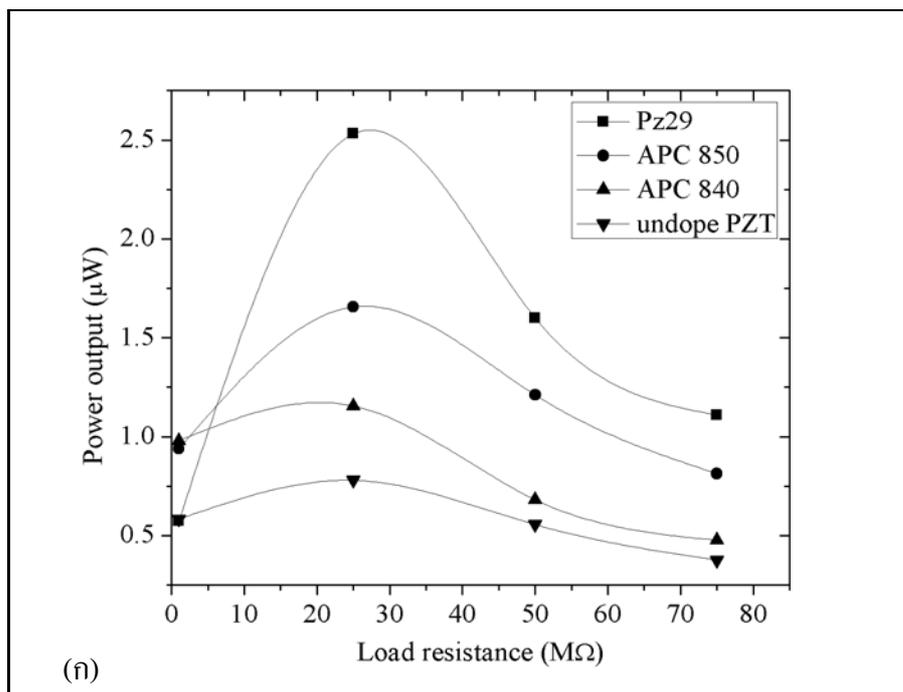
4.4.4 ผลของความต้านทานภายนอก (load resistance) ต่อกำลังไฟฟ้า (power output) ของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

นำแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.4.3 ไปคำนวณกำลังไฟฟ้าจากสูตร

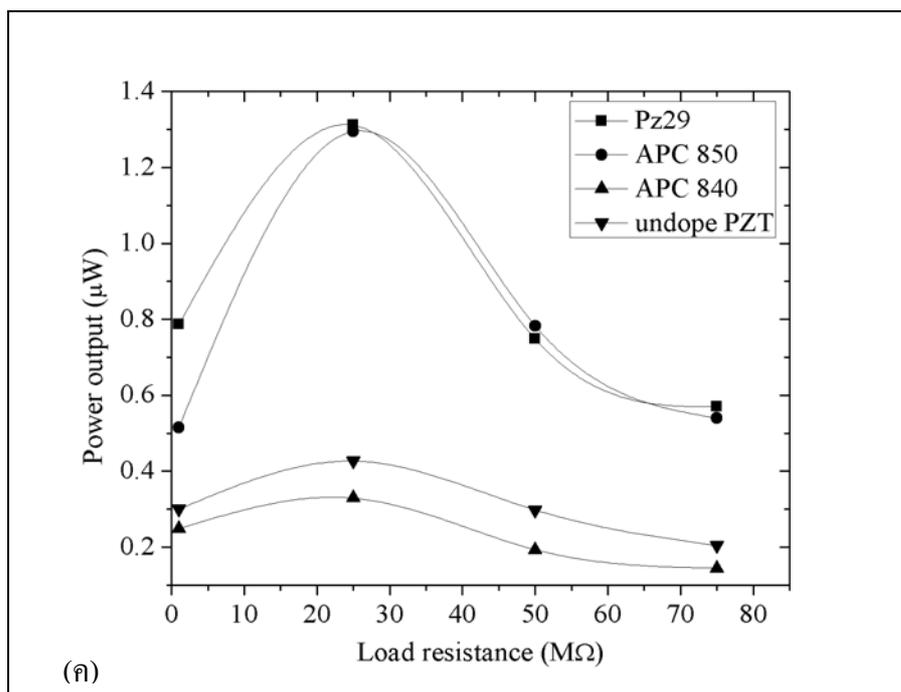
$$P = VI = \frac{V^2}{R}$$

เมื่อ V คือแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ R คือ ความต้านทานไฟฟ้าภายนอกที่ต่อเข้าไป

ในวงจรแล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริก ต่อความต้านทานภายนอกได้ดังรูปที่ 4.12 (ก)-(ค) จากรูปจะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตจาก PZT ทั้ง 4 ชนิดเมื่อ apply แรง 500 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความต้านทานภายนอกมีค่าสูงขึ้น และกำลังไฟฟ้ามียุคสูงสุดที่ความต้านทานภายนอก 25 MΩ จากนั้นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มค่าความต้านทานภายนอกสูงขึ้นเป็น 50 และ 75 MΩ ทั้งนี้ optimum load (R_{Load}^{opt}) มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานของวัสดุไพโซอิเล็กทริก (R_s) ดังสมการความสัมพันธ์ในงานวิจัยของ Priya (2005) ที่พบว่า $R_{Load}^{opt} = \left| R_s + \frac{1}{j\omega C} \right|$ ซึ่งในงานวิจัยนี้อาจเป็นเพราะใช้ค่าความต้านทานภายนอกในช่วงที่กว้างเกินไปทำให้เห็นว่า วัสดุไพโซอิเล็กทริกทุกชนิดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อต่อกับค่าความต้านทานภายนอก (R_{load}) 25 MΩ และพบว่าชิ้น PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรผลิตกำลังไฟฟ้ามากกว่า 13 และ 29 มิลลิเมตรตามลำดับ ในบรรดาชิ้นตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ตัวอย่าง Pz29 ให้กำลังไฟฟ้ามากที่สุดคือ 2.53 μW รองลงมาคือ ชนิด APC 850 APC 840 และ undoped PZT ให้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1.66 μW 1.16 μW และ 0.78 μW ตามลำดับดังรูปที่ 4.12 (ก) ที่ความต้านทานภายนอก 25 MΩ เมื่อถูก apply แรงทางกล 500 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz ผลการทดลองในลักษณะเดียวกันที่ทดสอบด้วยแรง 100-400 N ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นไปในแนวเดียวกับผลการทดลองที่ใช้แรงกระทำ 500 N แสดงในภาคผนวก ก.



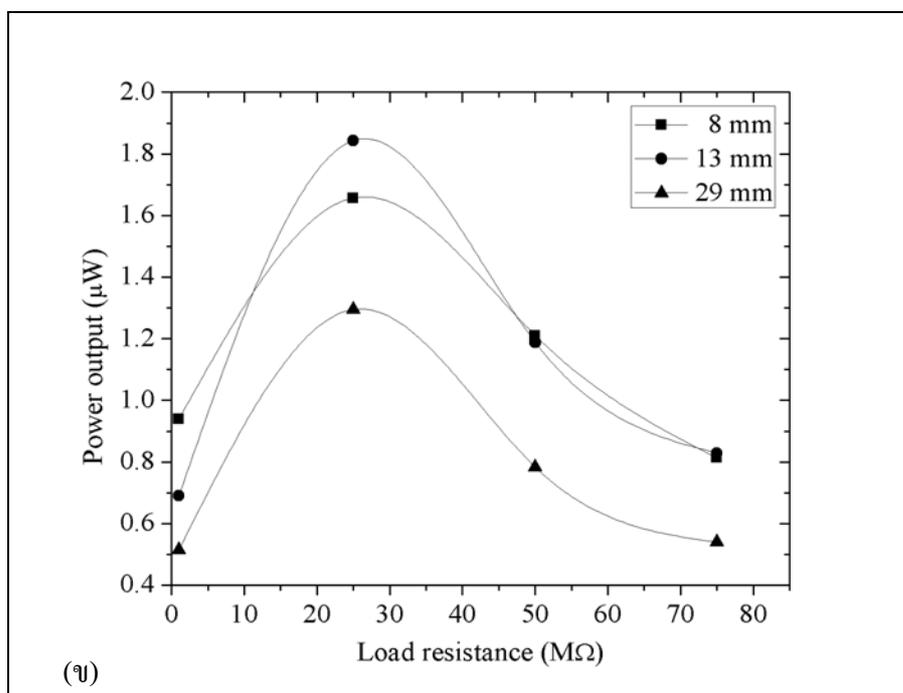
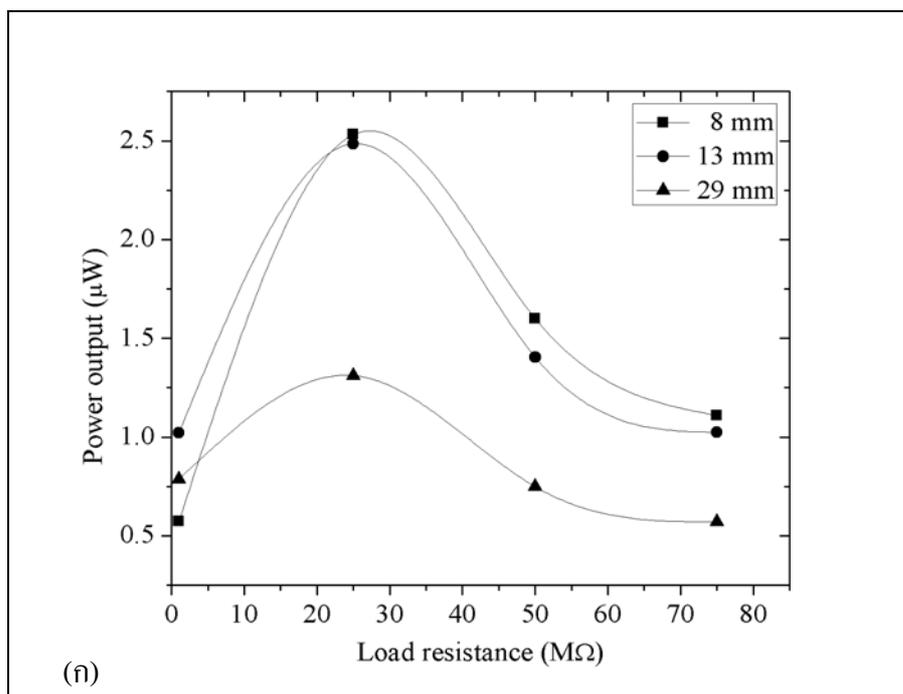
รูปที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
 (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรง 500 N
 ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz



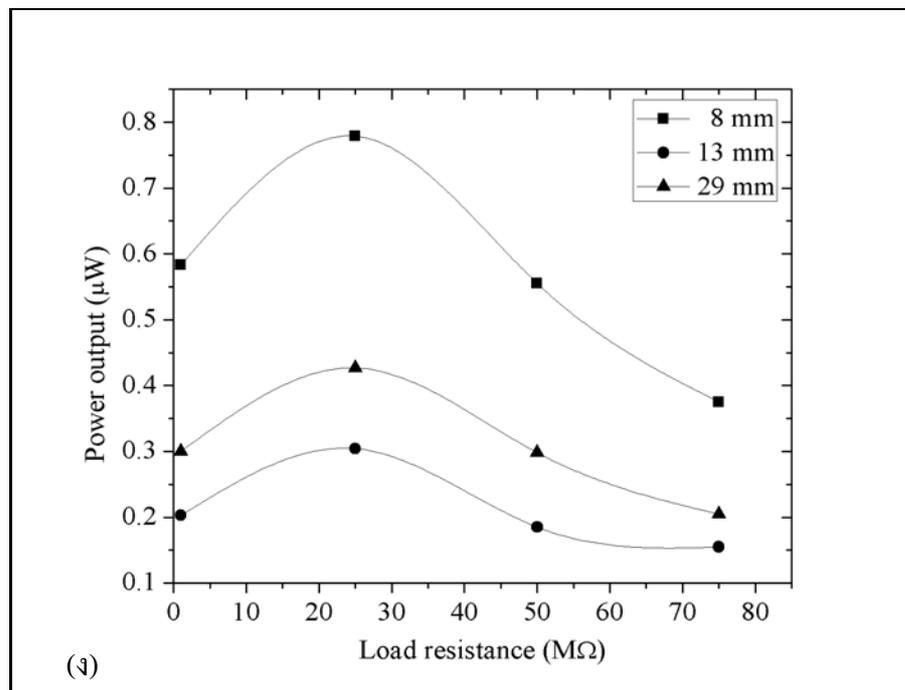
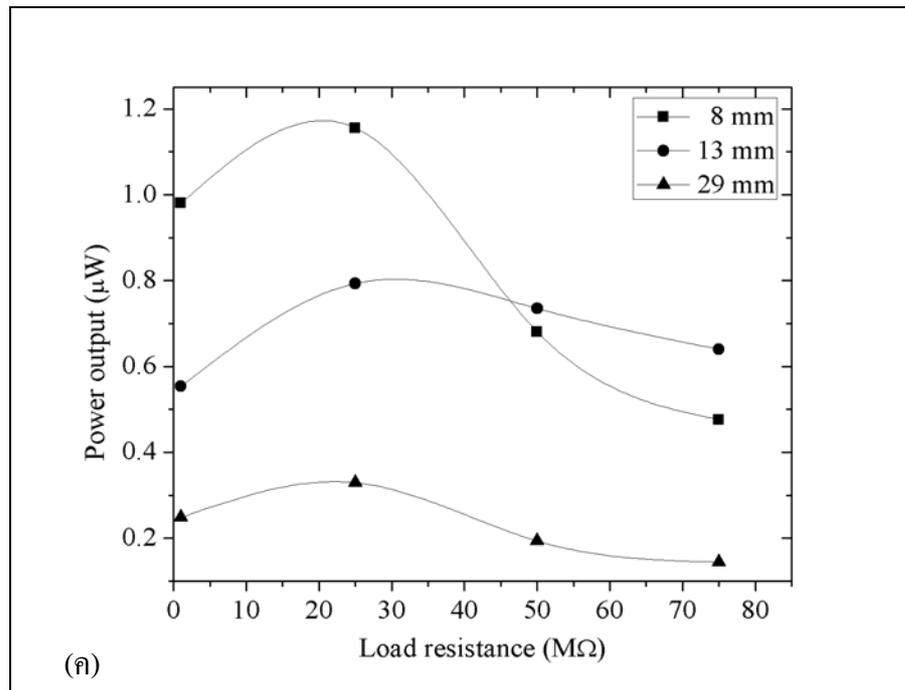
รูปที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 8 มิลลิเมตร (ข) 13 มิลลิเมตร (ค) 29 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรง 500 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz (ต่อ)

4.4.5 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นตัวอย่างต่อกำลังไฟฟ้า

จากรูปจะเห็นว่าตัวอย่างชนิด Pz29 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 13 และ 29 มิลลิเมตร สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าตัวอย่าง APC 850 APC 840 และ undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน เมื่อพิจารณาเฉพาะชิ้นตัวอย่าง Pz29 อย่างเดียวจะเห็นว่าชิ้นตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 13 และ 29 มิลลิเมตรสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 2.53 μW 2.48 μW และ 1.31 μW ตามลำดับ ที่ความต้านทานภายนอก 25 M Ω ดังรูปที่ 4.13 (ก) เมื่อ apply แรงทางกล 500 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz ผลการทดลองในลักษณะเดียวกันที่แรงทางกล 100-400 N ซึ่งได้ผลการทดลองในลักษณะเดียวกันกับที่แรงทางกล 500 N ดังแสดงในภาคผนวก ก.



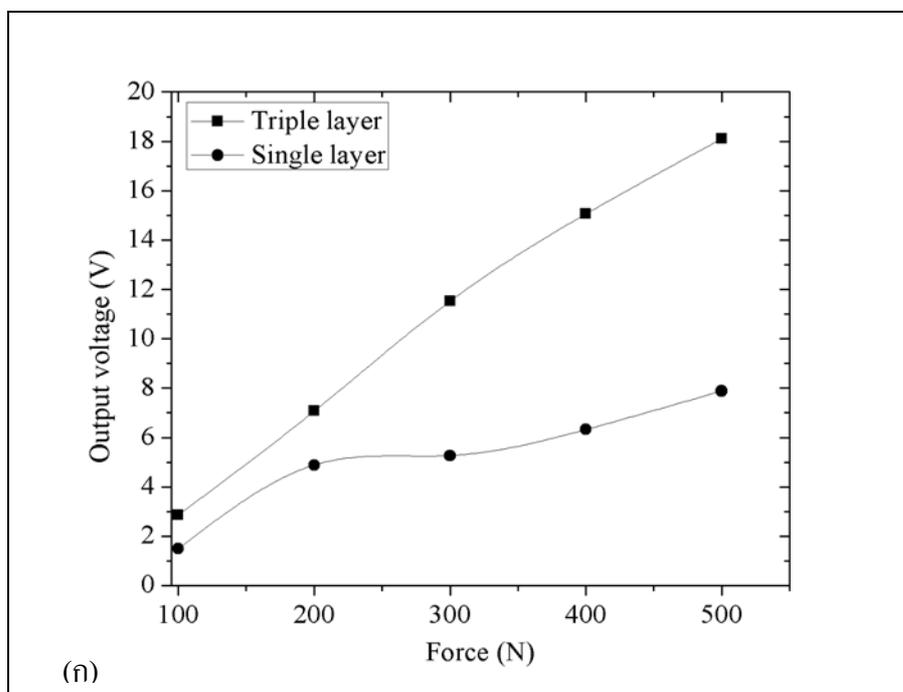
รูปที่ 4.13 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของชิ้นตัวอย่าง (ก) Pz29 (ข) APC 850 (ค) APC 840 (ง) undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เมื่อ apply แรงทางกล 500 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz



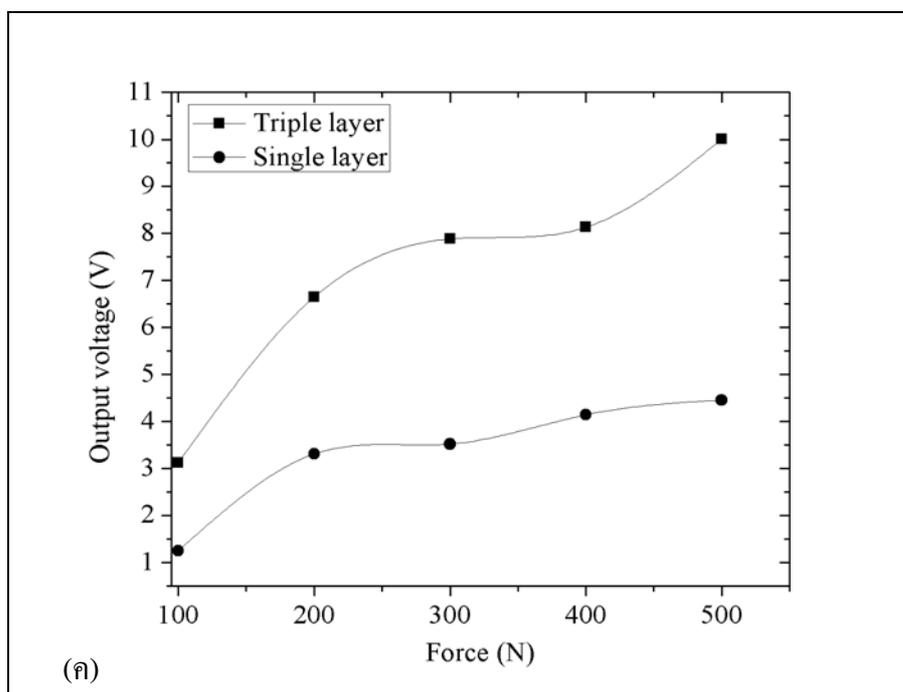
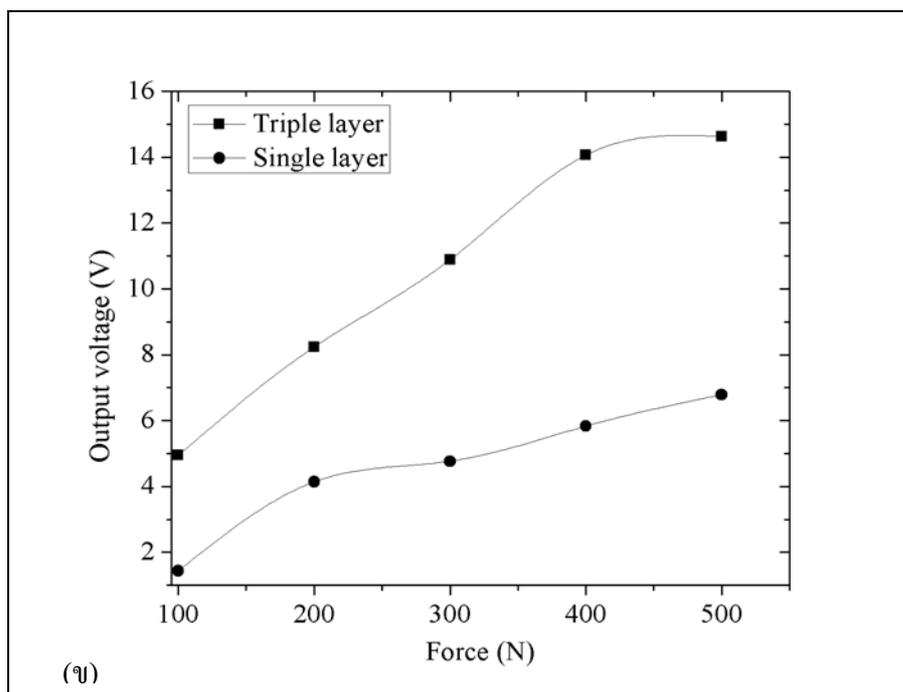
รูปที่ 4.13 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของชิ้นตัวอย่าง (ก) Pz29 (ข) APC 850 (ค) APC 840 (ง) undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เมื่อ apply แรงทางกล 500 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz (ต่อ)

4.4.6 ผลของแรงต่อแรงดันไฟฟ้าของชั้นตัวอย่างแบบซ้อนกัน 3 ชั้นและแบบชั้นเดียว

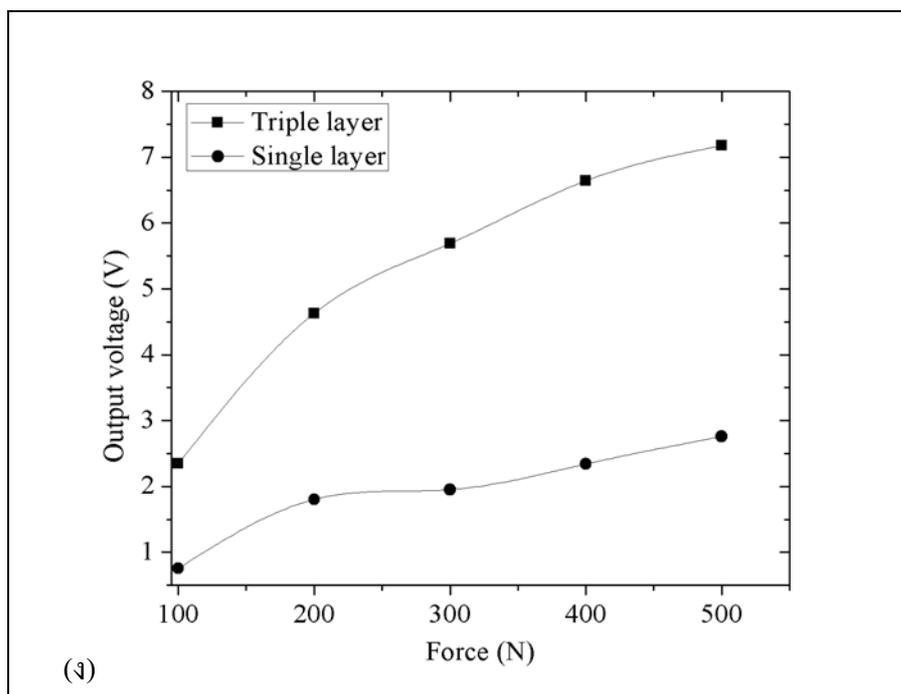
รูปที่ 4.14 (ก)-(ง) แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชั้นตัวอย่างแบบ 3 ชั้นกับแบบชั้นเดียวเมื่อ apply แรงในช่วง 100-500 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz บนชั้นตัวอย่าง PZT เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 13 มิลลิเมตร ชนิดต่าง ๆ ที่ต่อกับความต้านทานภายนอก $25 \text{ M}\Omega$ สังเกตว่าชั้นตัวอย่างแบบเรียงซ้อนกัน 3 ชั้น ให้แรงดันไฟฟ้ามากกว่าแบบชั้นเดียวประมาณ 2-3 เท่า ตามหลักแล้วแรงดันไฟฟ้าควรจะเพิ่มขึ้น 3 เท่าเพราะชั้นตัวอย่าง 3 ชั้นทำขึ้นในลักษณะให้แรงดันไฟฟ้าเสริมกันดังกล่าวแล้วในหัวข้อ 3.3.12.3 อย่างไรก็ตามสาเหตุที่ผลการทดลองบางส่วนที่พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไม่ถึง 3 เท่า ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการที่มีอากาศหรือโพรงแทรกอยู่ที่รอยติดกาวทำให้การประสานระหว่างแผ่นทองแดงกับชั้นตัวอย่างไม่ดีพอเป็นผลให้การส่งผ่านพลังงานของวัสดุไม่ดี



รูปที่ 4.14 แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชั้นตัวอย่าง (ก) Pz29 (ข) APC 850 (ค) APC 840 (ง) undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร แบบ 3 ชั้น และแบบชั้นเดียว ที่ต่อกับความต้านทานภายนอก $25 \text{ M}\Omega$ เมื่อ apply แรงขนาดต่าง ๆ ที่ความถี่ 0.5-0.8 Hz



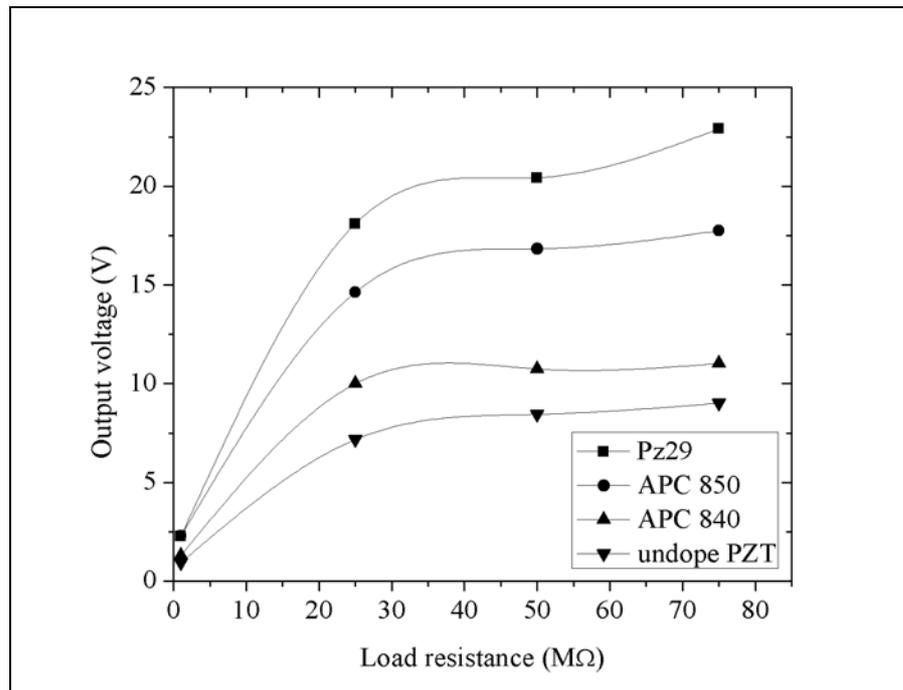
รูปที่ 4.14 แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชิ้นตัวอย่าง (ก) Pz29 (ข) APC 850 (ค) APC 840 (ง) undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร แบบ 3 ชั้น และแบบชั้นเดียว ที่ต่อกับความต้านทานภายนอก 25 MΩ เมื่อ apply แรงขนาดต่าง ๆ ที่ความถี่ 0.5-0.8 Hz (ต่อ)



รูปที่ 4.14 แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชิ้นตัวอย่าง (ก) Pz29 (ข) APC 850 (ค) APC 840 (ง) undope PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร แบบ 3 ชั้น และแบบชั้นเดียว ที่ต่อกับความต้านทานภายนอก 25 MΩ เมื่อ apply แรงขนาดต่าง ๆ ที่ความถี่ 0.5-0.8 Hz (ต่อ)

4.4.7 ผลของความต้านทานภายนอกต่อแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่าง ที่วางเรียงซ้อนกัน 3 ชั้น (triple layer)

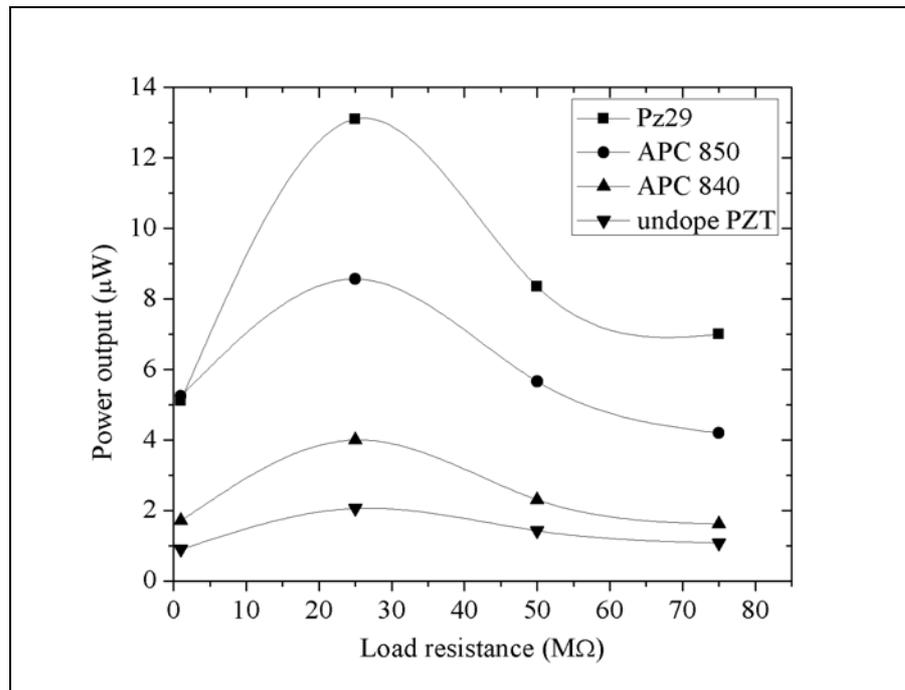
รูปที่ 4.15 แสดงความต้านทานภายนอกต่อแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชิ้นตัวอย่าง PZT ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตรชนิดต่าง ๆ ที่เรียงซ้อนกัน 3 ชั้นเมื่อ apply แรง 500 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าชิ้นตัวอย่างที่เรียงซ้อนกัน 3 ชั้นสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ามากกว่าชิ้นตัวอย่างที่เป็นแบบชั้นเดียว (single layer) ดังรูปที่ 4.10 (ข) ประมาณ 2-3 เท่า นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าของ PZT ชนิดต่าง ๆ ขึ้นกับค่า figure of merit ของชิ้นตัวอย่าง โดยที่ตัวอย่าง Pz29 ให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดตามด้วย APC 850 APC 840 และ undope PZT ตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก PZT ชนิด Pz29 APC 850 APC 840 และ undope PZT ที่ต่อกับค่าความต้านทานภายนอก 25 MΩ มีค่าเท่ากับ 18.10 V 14.63 V 10.00 V และ 7.17 V ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 แรงดันไฟฟ้าของชิ้นงานที่เรียงซ้อนกัน 3 ชั้นของตัวอย่างทุกชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ความต้านทานภายนอกต่าง ๆ แรงกระทำ 500 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz

4.4.8 ผลของความต้านทานภายนอกต่อกำลังไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่างที่เรียงซ้อนกัน 3 ชั้น

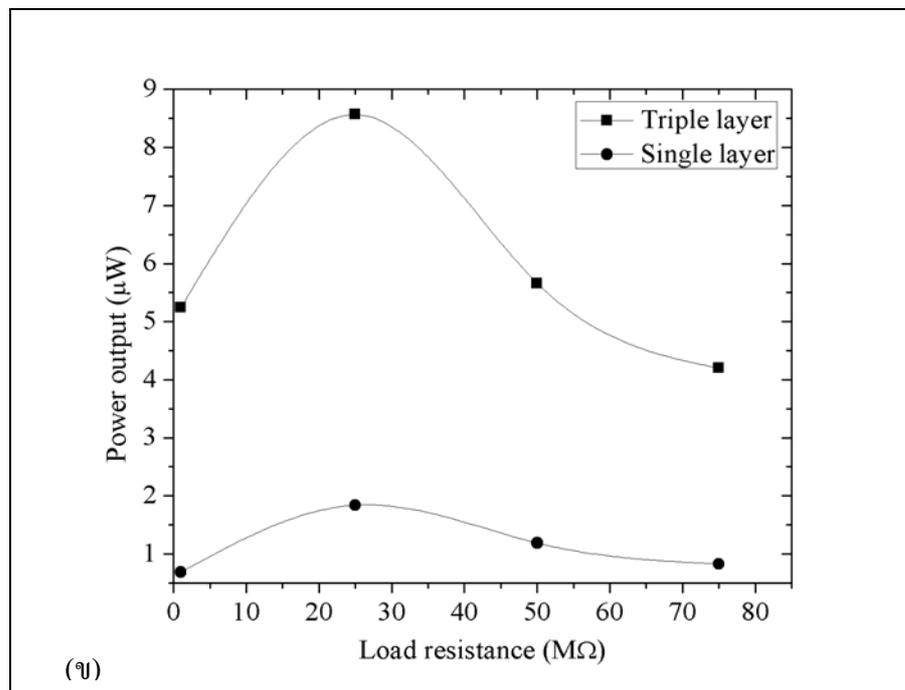
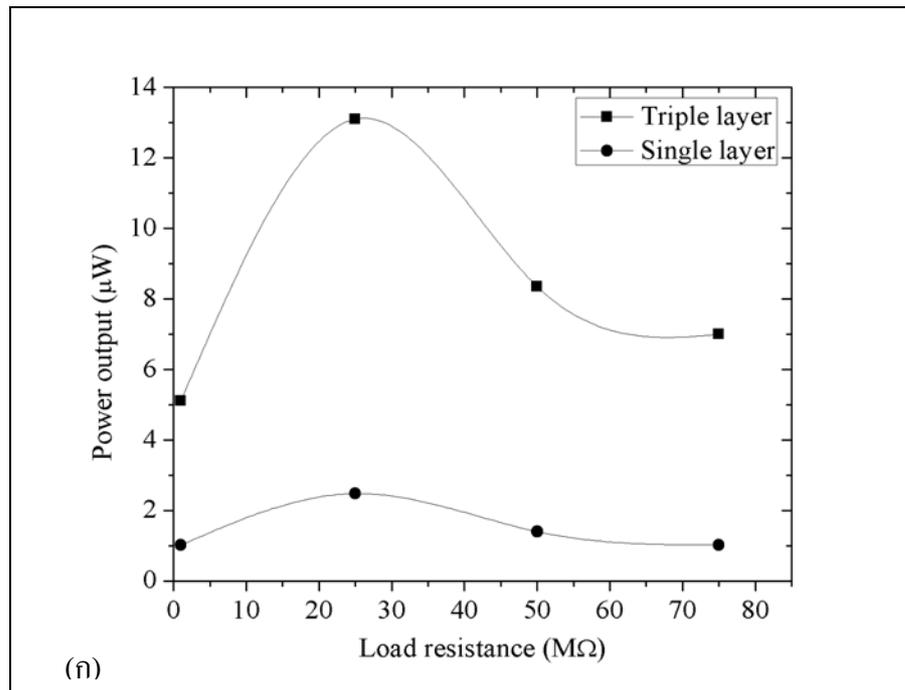
นำข้อมูลจาก 4.4.7 ไปคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก PZT ชนิดต่าง ๆ ที่เรียงซ้อนกัน 3 ชั้นได้รูปที่ 4.16 เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.16 กับรูปที่ 4.12 (ข) จะเห็นว่าชิ้นตัวอย่างที่เรียงซ้อนกัน 3 ชั้น ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงกว่าชิ้นตัวอย่างแบบชั้นเดียวหลายเท่า และยังพบว่าเมื่อต่อความต้านทานภายนอก 25 MΩ ตัวอย่าง PZT ทุกชนิดผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่าง Pz29 ให้กำลังไฟฟ้ามามากสุดตามด้วย APC 850 APC 840 และ undope PZT จากรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าเมื่อ apply แรง 500 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz บนชิ้นตัวอย่าง Pz29 APC 850 APC 840 และ undope PZT ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ที่ต่อกับความต้านทานภายนอก 25 MΩ ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 13.10 μ W 8.56 μ W 4.00 μ W และ 2.05 μ W ตามลำดับ ผลการศึกษาข้างต้นสอดคล้องกับการศึกษาของ Kim, Priya, Stephanou, and Uchino (2007) ที่พบว่าแผ่นไพโซอิเล็กทริกเซรามิกที่วางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ จะให้กำลังไฟฟ้ามากกว่าแบบชั้นเดียว



รูปที่ 4.16 กำลังไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่างที่ความต้านทานภายนอกต่าง ๆ ของตัวอย่างที่เรียงซ้อนกัน 3 ชั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร apply แรง 500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz

เพื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากชิ้นตัวอย่างที่เรียงซ้อนกัน 3 ชั้นกับชิ้นตัวอย่างแบบชั้นเดียวให้เห็นชัดเจนขึ้นจึงเขียนกราฟรูปที่ 4.17 (ก)-(ง) แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากชิ้นตัวอย่าง PZT ชนิดต่าง ๆ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตรที่ต่อกับความต้านทานภายนอกขนาดต่าง ๆ เมื่อ apply แรง 500 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz

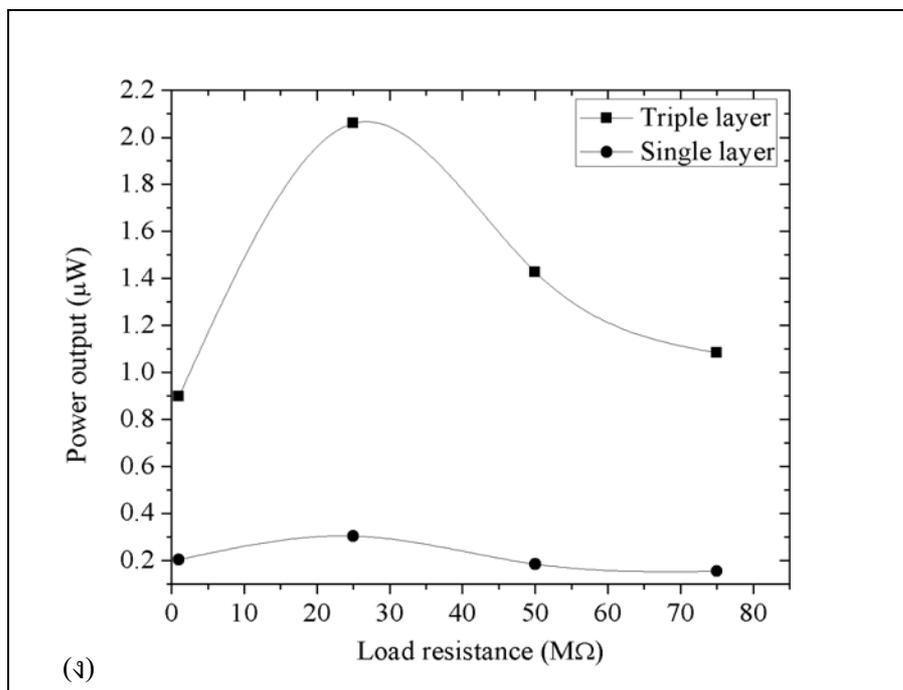
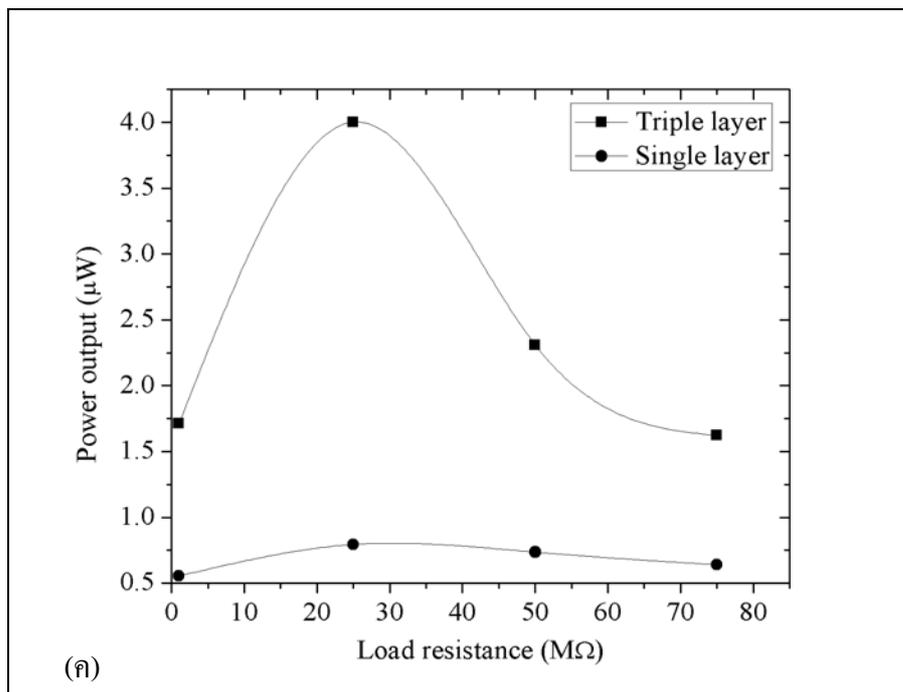
จากรูปที่ 4.17 (ก)-(ง) จะเห็นว่าชิ้นตัวอย่างแบบเรียงซ้อนกัน 3 ชั้นให้กำลังไฟฟ้ามากกว่าแบบชั้นเดียวประมาณ 4-6 เท่า ซึ่งอาจเป็นเพราะชิ้นตัวอย่างแบบ 3 ชั้นเรียงต่อกันแบบที่ให้แรงดันไฟฟ้าเสริมกันและเนื่องจากการเชื่อมต่อกันแบบขนานจึงทำให้ได้กระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้ได้กำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นตามแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเพราะ $P = VI$ นี้ อาจเป็นสาเหตุทำให้จำนวนเท่าของกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากกว่าจำนวนเท่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ผลการทดลองในส่วนนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kim et al. (2007) ที่พบว่า การนำแผ่นไพโซอิเล็กทริกเซรามิกวางซ้อนกันหลาย ๆ ชั้นได้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าในวงจรเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.17 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากชั้นตัวอย่างชนิด (ก) Pz29 (ข) APC 850 (ค) APC 840

(ง) undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตรแบบซ้อนกัน 3 ชั้นกับชั้นเดียวที่ต่อกับความต้านทานภายนอก 25 MΩ

เมื่อ apply แรง 500 N ความถี่ 0.5- 0.8 Hz



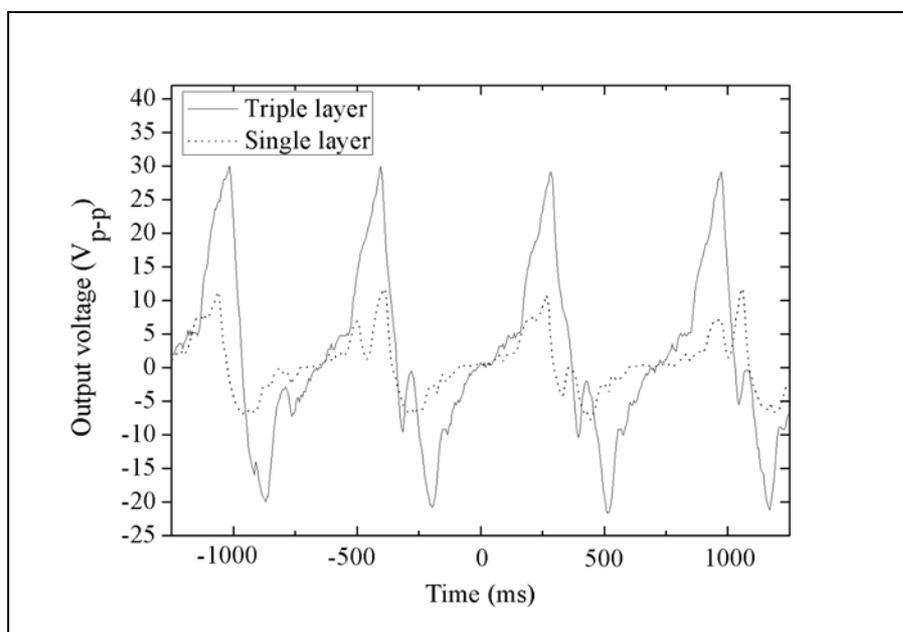
รูปที่ 4.17 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากชั้นตัวอย่างชนิด (ก) Pz29 (ข) APC 850 (ค) APC 840

(ง) undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตรแบบซ้อนกัน 3 ชั้นกับชั้นเดียวที่ต่อกับความต้านทานภายนอก 25 MΩ

เมื่อ apply แรง 500 N ความถี่ 0.5- 0.8 Hz (ต่อ)

4.4.9 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของชั้นตัวอย่าง

รูปที่ 4.18 แสดงสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการ apply แรง 500 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz บนชั้นตัวอย่าง Pz29 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร แบบเรียงซ้อนกัน 3 ชั้น และแบบชั้นเดียวที่ต่อกับความต้านทานภายนอก 25 M Ω จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าชั้นตัวอย่างที่ซ้อนกัน 3 ชั้น ให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าประมาณ 50 volt peak to peak ขณะที่ชั้นตัวอย่างชั้นเดียวให้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 20 volt peak to peak

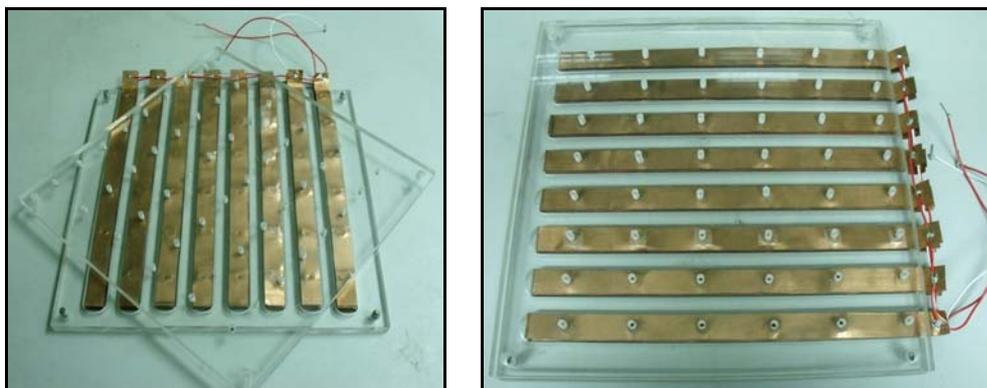


รูปที่ 4.18 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของวัสดุโพซิโตรีกชนิด PZT ที่เรียงซ้อนกัน 3 ชั้น กับแบบชั้นเดียวของตัวอย่าง Pz29 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร

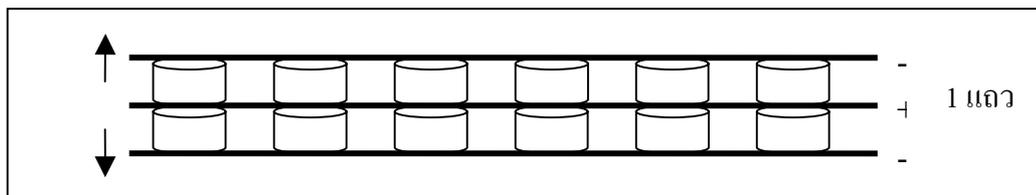
4.4.10 การศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากพื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน

4.4.10.1 พื้นเก็บเกี่ยวพลังงานที่ทำจากแผ่นอะคริลิก

รูปที่ 4.19 แสดงพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานที่ทำจากแผ่นอะคริลิกโดยใช้ตัวอย่าง Pz29 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรวางเรียงซ้อนกัน 2 ชั้น ดังแสดงผังการวางชั้นตัวอย่างแต่ละแถวดังรูปที่ 4.20 แล้วนำขั้วในแต่ละแถวที่เหมือนกันเชื่อมต่อกัน

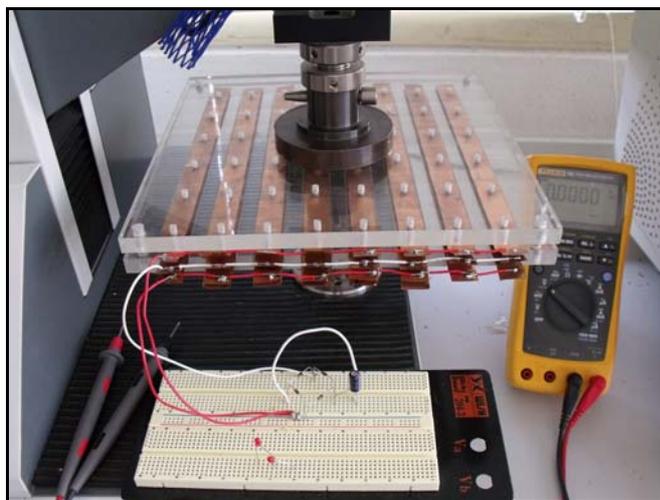


รูปที่ 4.19 พื้นเก็บพลังงานที่เป็นแผ่นอะคริลิก



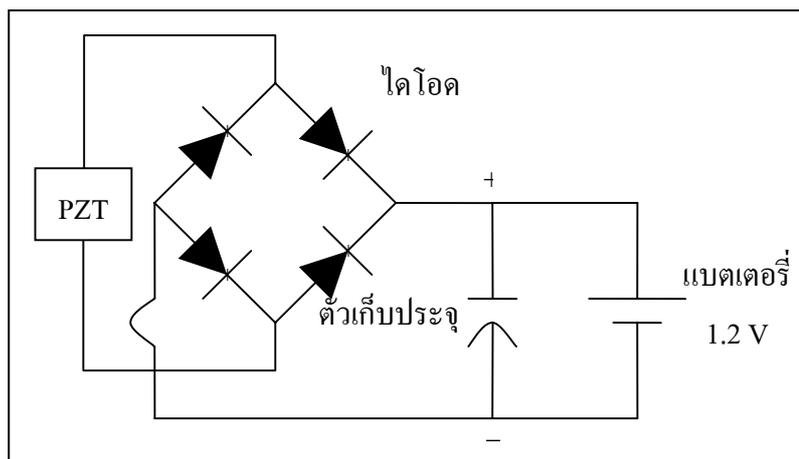
รูปที่ 4.20 ผังการเรียงชิ้นตัวอย่างในพื้นที่เกี่ยวพลังงาน

รูปที่ 4.21 แสดงการติดตั้งการทดสอบพื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน ไฟฟ้า โดย apply แรง 500 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz โดยใช้วงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 4.22 พบว่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุมากขึ้นเมื่อ apply แรงในจำนวนครั้ง (number) ที่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อยๆ และยังพบว่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุที่มากกว่า 1.5 V สามารถจุดหลอด LED (Light-Emitting Diode) ที่นำมาต่อขนานกับตัวเก็บประจุให้สว่างจ้าขึ้นมาแล้วดับลงไป เพราะหลอด LED จะทำงานเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมหลอด LED อย่างน้อย 1.5 V แต่อย่างไรก็ตามอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุนั้นค่อนข้างช้าและมีแรงดันไฟฟ้าที่ไม่มากจึงไม่เหมาะต่อการชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 1.2 V ได้

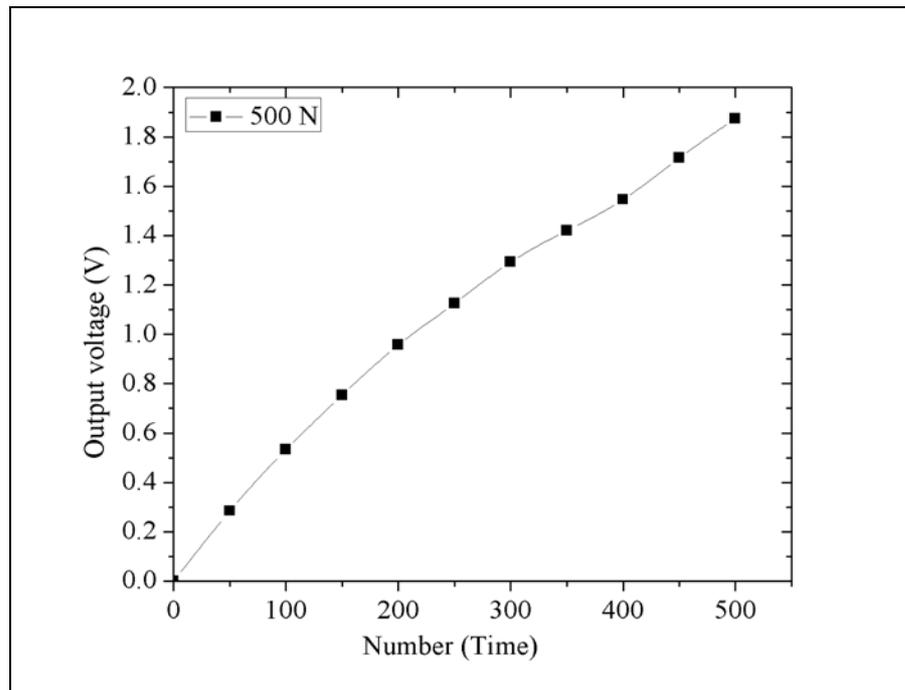


รูปที่ 4.21 การติดตั้งการทดสอบพื้นที่เก็บพลังงาน

หลักการทำงานของวงจรเก็บพลังงานในรูปที่ 4.22 พลังงานที่ได้จากวัสดุจะถูกจัดเรียงขั้วด้วยไดโอดจำนวน 4 ตัวที่ต่อกันแบบ full bridge ชนิด 1N60 (เจอร์มาเนียม) จากนั้นพลังงานถูกนำไปเก็บในตัวเก็บประจุขนาด $100\ \mu\text{F}$ ที่ต่อขนานกับวัสดุและเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุมากกว่า $1.2\ \text{V}$ และมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรพลังงานดังกล่าวจึงถูกส่งไปบรรจุในแบตเตอรี่ขนาด $1.2\ \text{V}$



รูปที่ 4.22 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์

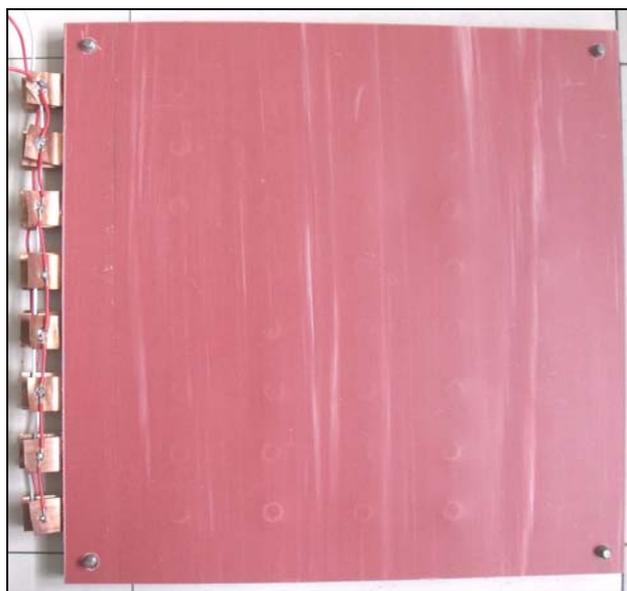


รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานจากพื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน

ข้อจำกัดของพื้นเก็บพลังงาน คือ กลไกการส่งแรงไปยังชิ้นตัวอย่างไม่มากพอและไม่สม่ำเสมอเนื่องจากการควบคุมความสูงของชิ้นตัวอย่างให้เท่ากันนั้นทำได้ยาก เพราะถ้าชิ้นตัวอย่างมีความสูงต่างกันเพียงนิดเดียวจะทำให้แรงที่ apply ไม่สามารถที่จะส่งผ่านไปยังชิ้นตัวอย่างได้และเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของแผ่นอะคริลิก (acrylic sheet) ทำให้แรงกระทำไม่สามารถส่งไปยังวัสดุได้มากพอสำหรับการกำเนิดพลังงาน

4.4.10.2 พื้นเก็บเกี่ยวพลังงานแผ่นกระเบื้องยาง

จากข้อจำกัดของพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานที่ใช้แผ่นอะคริลิก ผู้ศึกษาจึงเปลี่ยนพื้นเก็บพลังงานแผ่นบนเป็นกระเบื้องยางดังแสดงในรูปที่ 4.24 แล้วทดสอบโดยการขึ้นไป ย่ำบนพื้นเก็บพลังงานแทนการใช้เครื่อง เนื่องจากกระเบื้องยางมีความยืดหยุ่นจึงไม่สามารถ apply แรงได้ทั่วถึงทั้งแผ่นกระเบื้องยาง ผลการศึกษาพบว่าวัสดุสามารถให้พลังงานในทุก ๆ จุดที่ apply แรงกระทำลงบนวัสดุเพราะกระเบื้องยางมีความยืดหยุ่นจึงทำให้แรงกระทำส่งไปยังวัสดุได้ถึงแม้ว่า ชิ้นตัวอย่างจะสูงไม่เท่ากันก็ตามแต่แผ่นยางอาจมีผลทำให้แรงกระทำที่ apply ต่ำลงและพบว่า พื้นเก็บพลังงานที่เป็นแผ่นยางมีอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าในตัวเก็บประจุที่ต่ำเมื่อทดสอบกับวงจรในรูปที่ 4.22

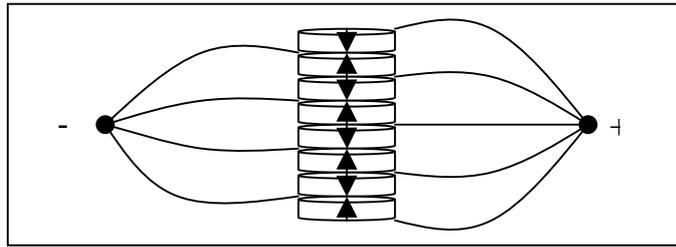


รูปที่ 4.24 พื้นเก็บเกี่ยวพลังงานที่เป็นแผ่นกระเบื้องยาง

จากผลการทดสอบพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานทั้ง 2 อย่าง พบว่าสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานเข้าตัวเก็บประจุได้ แต่อย่างไรก็ตามพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานทั้งสองยังมีข้อจำกัดคือ มีอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าที่น้อยจึงต้องใช้เวลาพอสมควรในการบรรจุพลังงาน

4.4.11 การศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากอินฟราเรดที่เรียงซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น

เนื่องด้วยพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานไม่สามารถส่งแรงกระทำไปยังวัสดุได้อย่างเต็มที่ และสม่ำเสมอ สังเกตได้จากอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าไม่คงที่ ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้ไม่สูงพอต่อการชาร์จแบตเตอรี่และอาจเกิดจากการมีจำนวนชั้นตัวอย่างที่มากในพื้นที่เก็บเกี่ยวพลังงานทำให้แรงกระทำที่ apply ให้กับชั้นตัวอย่างนั้นไม่มากพอ เนื่องจากชั้นตัวอย่างจะช่วยกันแบ่งแรงกระทำที่ apply จึงอาจเป็นสาเหตุทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่น้อย ดังนั้นจึงนำชั้นตัวอย่างวางเรียงซ้อนกันหลาย ๆ ชั้นเพื่อขจัดปัญหาความสูงของชั้นตัวอย่างที่ไม่เท่ากันและต้องการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่วัสดุผลิตได้ ดังผลการศึกษาที่แสดงในหัวข้อที่ 4.4.6 ในการศึกษาครั้งนี้จึงนำชั้นตัวอย่างเรียงซ้อนกันจำนวน 8 ชั้น ของตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 การเรียงทิส polarization ของชั้นตัวอย่างซ้อนกัน 8 ชั้น

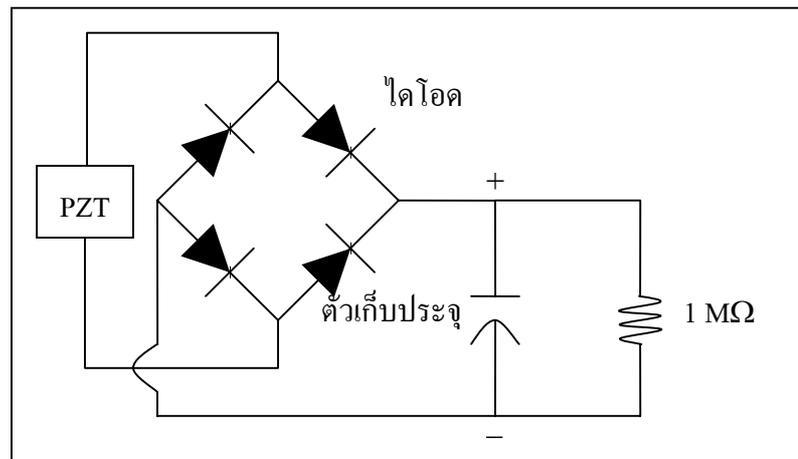
เมื่อทดลองนำชั้นตัวอย่างที่เรียงซ้อนกัน 8 ชั้นต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 4.22 พร้อมกับ apply แรงกระทำ 500 N ให้กับชั้นตัวอย่างพบว่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ มีอัตราการเพิ่มขึ้นที่เร็วกว่าพื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน ดังนั้นจึงนำตัวอย่างที่เรียงซ้อนกัน 8 ชั้นนี้ไปศึกษา วงจรไฟฟ้าสำหรับบรรจุพลังงานในแบตเตอรี่ต่อไป

4.4.11.1 ศึกษาการชาร์จแบตเตอรี่

เพื่อเป็นการทดสอบชิ้นงานที่สร้างขึ้นจึงได้ประยุกต์ใช้งานเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเพื่อชาร์จพลังงานสู่แบตเตอรี่ แนวทางการดำเนินงานเริ่มต้นจากศึกษาวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมที่สามารถสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นทดสอบวงจร โดยมีเครื่องกำเนิดสัญญาณ (function generator) เป็นแหล่งจ่ายกำลังงานในเบื้องต้น จากนั้นเปลี่ยนแหล่งจ่ายพลังงานเป็นชิ้นงานที่สร้างขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นให้พลังงานไฟฟ้าต่ำและมีความถี่ของสัญญาณประมาณ 0.6 Hz (เท่ากับความถี่ของแรงทางกลที่กระทำต่อวัตถุ) ดังนั้นจึงใช้ชิ้นงานเรียงซ้อนกันทั้งสิ้น 8 ชั้น (stack) เพื่อให้ได้พลังงานที่เพียงพอ

การคัดเลือกวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมสำหรับสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่ออัดประจุให้กับแบตเตอรี่ เป็นดังนี้

1) วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์ (Full Bridge Rectifier) แสดงในรูปที่ 4.26 การทดสอบวงจรเบื้องต้นโดยเครื่องกำเนิดสัญญาณเป็นแหล่งจ่ายิตพุตสัญญาณไซน์ ความถี่ 0.6 เฮิร์ตซ์ พบว่า แรงดันเอาต์พุตจากวงจรเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง มีแรงดันพริ้ว (Ripple Voltage) ขึ้นกับขนาดตัวเก็บประจุที่อยู่ด้านเอาต์พุต และเมื่อนำแบตเตอรี่ต่อเป็นโหลดสังเกตได้ว่าแรงดันไฟฟ้าในแบตเตอรี่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าวงจรนี้ตอบสนองต่อสัญญาณความถี่ต่ำ (0.6 เฮิร์ตซ์) ซึ่งสร้างจากเครื่องกำเนิดแรงทางกล Lloyd LF Plus Universal Testing Machine



รูปที่ 4.26 วงจร full bridge rectifiers แบบมีตัวกรอง

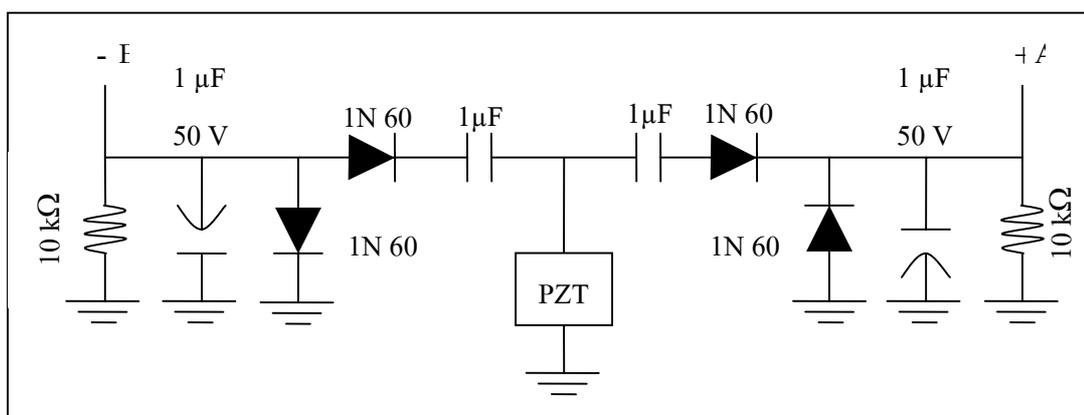
จากนั้นเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นสัญญาณจากวัสดุที่ได้จากการ apply แรงกระทำทางกล 500 N บนชิ้น PZT พบว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตจากวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์มีแอมพลิจูดประมาณ 1.2 Vp-p ซึ่งไม่เพียงพอต่อการชาร์จพลังงานให้แบตเตอรี่

เมื่อทดลองเพิ่มแรงกระทำทางกลเป็น 800 N ให้แก่วัสดุเพื่อเพิ่มความสามารถในการส่งพลังงานให้กับวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ได้มากขึ้น ผลการทดลองพบว่า แรงดันเอาต์พุตมีแอมพลิจูดประมาณ 1.8 Vp-p ซึ่งยังไม่เพียงพอต่อการชาร์จประจุให้แบตเตอรี่ขนาด 1.2 V แต่เนื่องจากอุปกรณ์สร้างแรงกระทำทางกลในห้องปฏิบัติการ มีขีดจำกัดแรงกระทำทางกลสูงสุดเพียง 1000 N ประกอบกับความสามารถในการรับแรงกระทำของวัสดุมีจำกัดเช่นกัน จึงไม่สามารถป้อนแรงกระทำทางกลในการทดลองได้เกิน 800 N ทั้งนี้เพื่อป้องกันการแตกหักของวัสดุ

เมื่อวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ พบว่าอุปกรณ์แต่ละชิ้นในวงจรดูดซับพลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะสังเกตได้ว่าไดโอดในวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์จะทำงานพร้อมกันทีละหนึ่งคู่ ซึ่งไดโอดแต่ละตัวมีแรงดัน Threshold โดยจะต้องป้อนแรงดันให้เกิดระดับ Threshold ก่อน จากนั้นไดโอดจึงจะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจากด้านแอโนดไปด้านแคโทด แม้ว่าการทดลองจะเลือกใช้ไดโอดที่มีวัสดุเป็นสารเจอมาเนียมแรงดัน Threshold ต่ำกว่าแบบซิลิกอนแล้วก็ตาม แต่ทว่าวงจรก็ยังไม่สามารถสร้างแรงดันเอาต์พุตได้เพียงพอต่อการชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 1.2 โวลต์ จึงต้องเปลี่ยนวงจรใหม่ให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

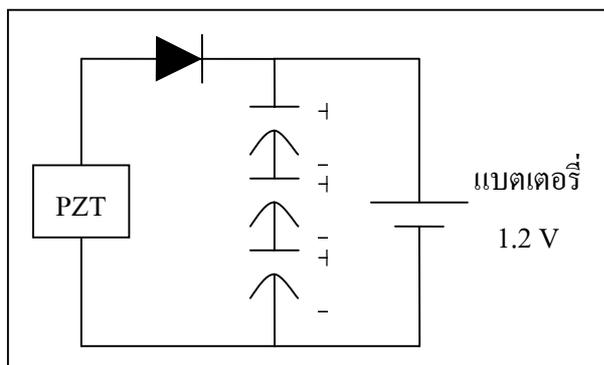
2) วงจรทวีแรงดัน แสดงดังรูปที่ 4.27 ผลการทดลองพบว่าเมื่อวัดแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุต ด้านบวกและด้านลบเทียบกับจุดกราวด์ พบว่ามีแอมพลิจูดประมาณ 2 Vp (ที่แรง

กระทำทางกลประมาณ 800 N) และเมื่อนำแรงดันเอาต์พุตที่ได้นี้ ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์อีกครั้ง เพื่อกลับให้เฟสของวงจรมีเพียงด้านบวก พบว่าสัญญาณเอาต์พุตมีแอมพลิจูดประมาณ 1.9 Vp-p ไม่เพียงพอต่อการนำสัญญาณที่ได้ ไปชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 1.2 V จากการทดลองนี้สังเกตได้ว่า เมื่ออุปกรณ์ในวงจรเพิ่มขึ้น จะมีพลังงานสูญเสียมากขึ้น เป็นผลให้แหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งในที่นี้ได้แก่วัสดุที่รับแรงกระทำทางกล ไม่สามารถส่งพลังงานได้เพียงพอแก่โหลด จึงนำไปสู่การค้นหาวงจรใหม่ต่อไป



รูปที่ 4.27 วงจรทวีแรงดัน 2 เท่า

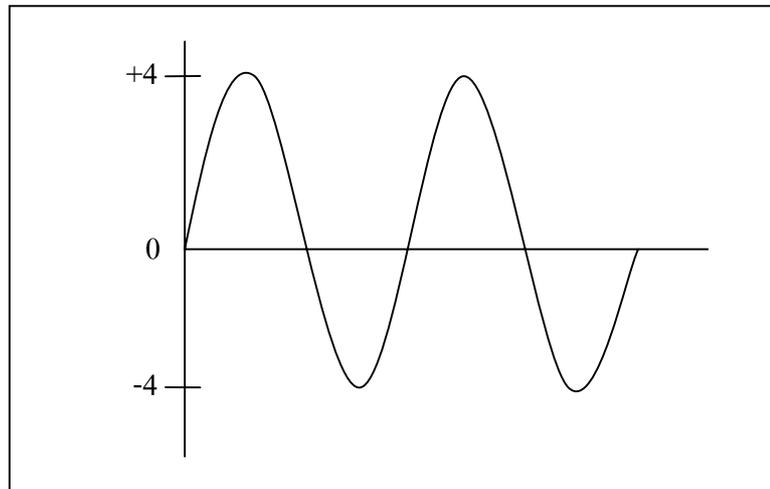
3) วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคาบ แสดงดังรูปที่ 4.28 ซึ่งใช้ไดโอดเบอร์ 1N 60 ทำจากสารเจอมาเนียมและมีตัวเก็บประจุขนาด 1 μ F ต่ออนุกรมกัน 3 ตัว เพื่อทำหน้าที่คงค่าแรงดันให้เหมาะสมและให้แรงดันเอาต์พุตประมาณ 1.2 V ขึ้นไป เมื่อดำเนินการทดลอง โดยให้แรงกระทำทางกลขนาด 800 N แก้ววัสดุโพโซอิเล็กทริกชนิด PZT พบว่าแรงดันไฟฟ้าออกจากวัสดุมีแอมพลิจูดประมาณ 2.3-2.4 Vp-p ดังแสดงตัวอย่างกราฟในรูปที่ 4.29 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคาบให้แรงดันเอาต์พุตได้สูงกว่าวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคาบหรือบริดจ์



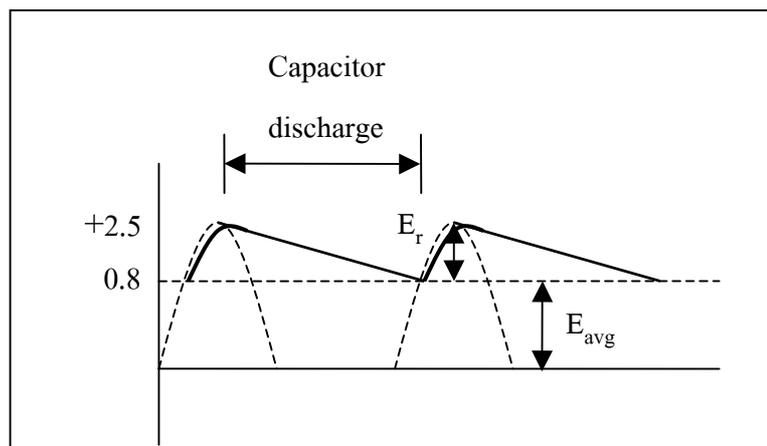
รูปที่ 4.28 วงจรชาร์จพลังงาน Half-Wave Rectifiers แบบมีตัวกรอง

เมื่อทดลองนำแบตเตอรี่มาต่อเป็น โหลดให้กับวงจรเรียงกระแสแบบ ครึ่งคาบที่มีแรงกระทำ 800 N กับวัสดุที่สร้างแรงดันอินพุตให้วงจร พบว่า วงจรสามารถชาร์จ แบตเตอรี่ได้ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ โดยสังเกตจากมิเตอร์กระแสไฟฟ้าแบบเข็ม ที่เข็มของมิเตอร์ เบนไปทางแบตเตอรี่ อ่านค่าได้ประมาณ 5-6 μA และมีบางช่วงเวลาที่สัญญาณแรงดันเอาต์พุต แอมป์ริจูดต่ำกว่า 1.2 V ซึ่งจะเป็นช่วงที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุลดลงและกำลังประจุไฟฟ้า กักเก็บพลังงานคู่ตนเองซึ่งสังเกตได้จากทิศของเข็มมิเตอร์กระแสไฟฟ้าแบบเข็มเบนไปทางวงจร แสดงสัญญาณดังรูปที่ 4.30

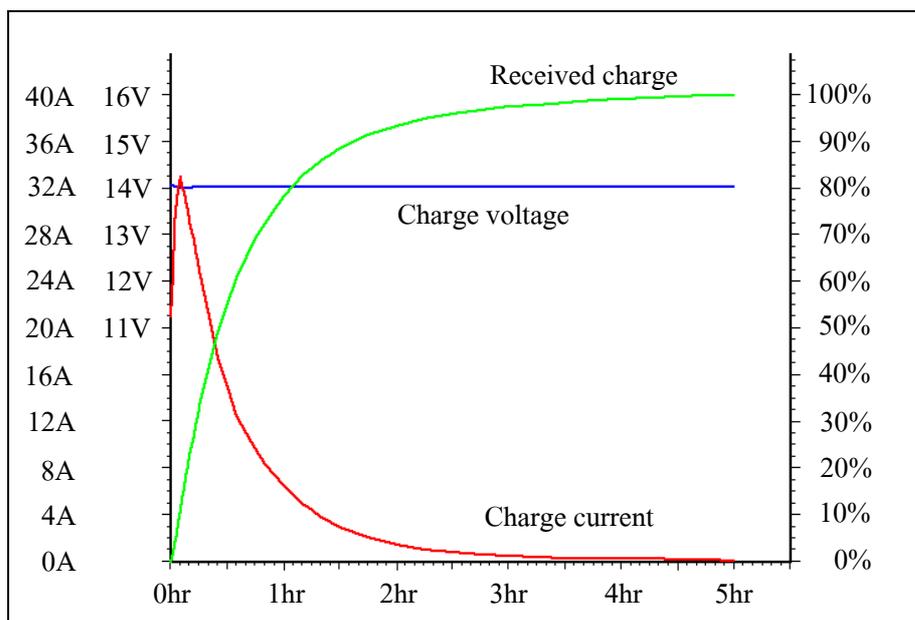
จากการทดลอง สรุปได้ว่าเนื่องจากปริมาณกระแส (ประมาณ 5-6 μA) และแรงดันไฟฟ้า (ประมาณ 2.4 Vp-p) ที่วัสดุผลิตได้มีแอมป์ริจูดค่อนข้างต่ำ เนื่องมาจากปัจจัย ตั้งต้น ได้แก่ จิตความสามารถในการรับแรงกระทำของวัสดุที่ผลิตมีจำกัด และอุปกรณ์สร้าง แรงกระทำทางกลมีพิสัยของแรงจำกัด (1000 N) จึงส่งผลให้การทดลองประยุกต์นำวัสดุไปใช้งาน ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า โดยการทดลองเป็นแหล่งจ่ายพลังงานแก่วงจรชาร์จแบตเตอรี่ ยังไม่สามารถแสดงผลที่ชัดเจนในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามถ้าสามารถลดข้อจำกัดตามที่กล่าวมาได้ ก็เป็นไปได้มากที่จะสามารถวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่เมื่อให้เวลาการชาร์จเพิ่มขึ้น และจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า ได้ดังรูปที่ 4.31 โดยจากกราฟพบว่าในช่วงแรกกราฟแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและค่อยช้าลงเรื่อย ๆ จนเข้าใกล้จุดสูงสุด ซึ่งเป็นทำนองเดียวกับกราฟของกระแส คือ ช่วงแรกแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ มีค่าจึงทำให้กระแสไหลได้มาก เมื่อเวลาผ่านไปแรงดันไฟฟ้ามากขึ้น อัตราการไหลของกระแส จะลดลงซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของโอห์ม ($V=IR$)



รูปที่ 4.29 ตัวอย่างลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุ



รูปที่ 4.30 ตัวอย่างสัญญาณไฟฟ้าแบบ Half-Wave Rectifiers มีตัวกรอง



รูปที่ 4.31 กราฟแรงดันไฟฟ้าและกระแสในการชาร์จแบตเตอรี่

(<http://homepage.ntlworld.com>)

4.4.11.2 การคำนวณอัตราการชาร์จแบตเตอรี่ที่ใช้วัสดุเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน

เนื่องด้วยพลังงานที่ได้จากวัสดุที่น้อยมากจึงไม่สามารถพล็อตกราฟหาอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันและกระแสไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไปได้อย่างชัดเจน จึงอาจคำนวณหาอัตราการชาร์จพลังงานได้ดังนี้

ในการทดลองพบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด $0.33 \mu\text{F}$ ประมาณ 2.5 V เมื่อให้แรงกระทำทางกลมีขนาด 800 N จำนวน 1 ครั้ง พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ คำนวณได้จากสมการที่ 4.2

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad (4.2)$$

เมื่อ W คือ พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ (J)

C คือ ขนาดความจุของตัวเก็บประจุ (F)

V คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V)

ดังนั้นพลังงานในตัวเก็บประจุ = $\frac{1}{2} (0.33 \times 10^{-6})(2.5^2) = 1.03 \mu\text{J}$

พลังงานที่สะสมในแบตเตอรี่คำนวณได้จากสมการที่ 4.3

$$W = Vah \quad \text{หรือ} \quad W/h = P \quad (4.3)$$

เมื่อ W คือ พลังงาน (J)

V คือ แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (V)

A คือ กระแสไฟฟ้า (A)

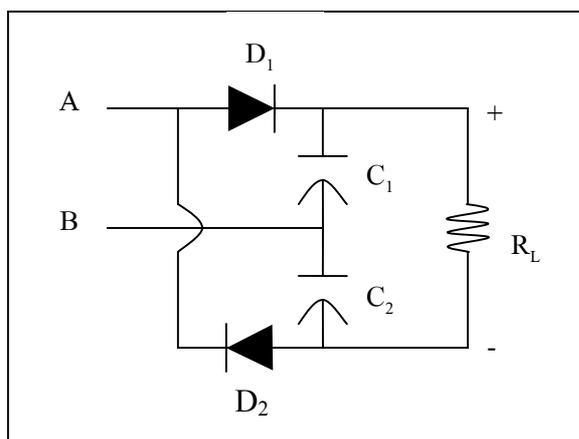
H คือ เวลา (s)

P คือ กำลังงาน (W)

ดังนั้น จะได้ $1.03 \mu\text{J} = 1.2 \times (160 \times 10^{-3}) \times h = 192 \text{ h } \mu\text{J}$

แสดงให้เห็นว่า เมื่อการประจุ 192 วินาที จะได้พลังงาน 1.03 ไมโครจูล (คำนวณในกรณีที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานในระบบ)

4.4.11.3 วงจรชาร์จพลังงานอื่นๆ ที่ศึกษาซึ่งสามารถทำงานได้ที่ความถี่ต่ำ



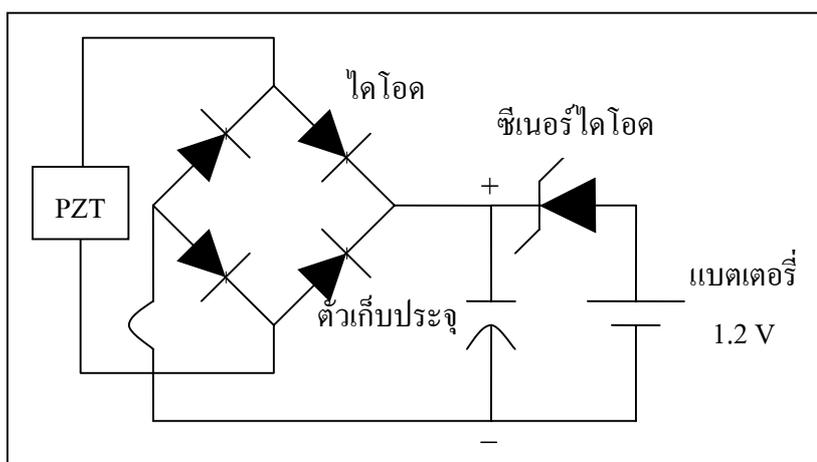
รูปที่ 4.32 วงจรเพิ่มแรงดันออกเอาต์พุต 2 เท่า

หลักการทำงานของวงจร เมื่อแรงดันไฟฟ้าขั้วบวกป้อนที่จุด A ไดโอด D_1 (เบอร์ 1N60) จะนำกระแสจ่ายแรงดันไปประจุที่ตัวเก็บประจุ C_1 (1 μF) มีแรงดันตกคร่อมเป็น V_p และเมื่อแรงดันขั้วลบป้อนให้ขั้ว A ไดโอด D_2 (เบอร์ 1N60) จะนำกระแสจ่ายแรงดันไป

ประจุที่ตัวเก็บประจุ C_2 (1 μF) มีแรงดันตกคร่อมเป็น V_p แรงดันที่ประจุอยู่ในตัวเก็บประจุ C_1 C_2 มีขั้วเสริมกันและต่ออันดับกันแรงดันที่จ่ายตกคร่อมโหลด (R_L) จึงมีค่า $2 V_p$

การทดสอบกับเครื่องกำเนิดสัญญาณพบว่าเครื่องกำเนิดสัญญาณต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอย่างน้อย 1 V จึงจะสามารถชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 1.2 V ได้แรงดันไฟฟ้าทวีเป็น 1.2283 V กระแสตรง วัดกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 0.017 mA ถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มากขึ้นแรงดันที่ได้จะทวีสูงขึ้น กรณีที่แรงดันไฟฟ้าเพิ่มไม่ถึง 2 เท่า เนื่องจากการสูญเสียแรงดันไฟฟ้าให้กับไดโอด ดังนั้นแสดงว่าวงจรนี้ตอบสนองต่อการทำงานที่ความถี่ต่ำ (0.6 Hz)

การทดสอบกับชิ้นตัวอย่าง เมื่อ apply แรงกระทำ 500 N ความถี่ทางกล $0.5\text{-}0.8 \text{ Hz}$ ลงบนชิ้น PZT พบว่าชิ้นตัวอย่างให้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 1.2 V และเปลี่ยนค่าความต้านทาน $1\text{M}\Omega$ (R_L) ในวงจรเป็นแบตเตอรี่ 1.2 V ขนาดความจุ 600 mA พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแบตเตอรี่มีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยและกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นน้อย (ระดับ μA) จึงทำให้บรรจุพลังงานได้น้อยและต้องใช้เวลานาน



รูปที่ 4.33 วงจร full bridge rectifiers แบบมีตัวกรอง

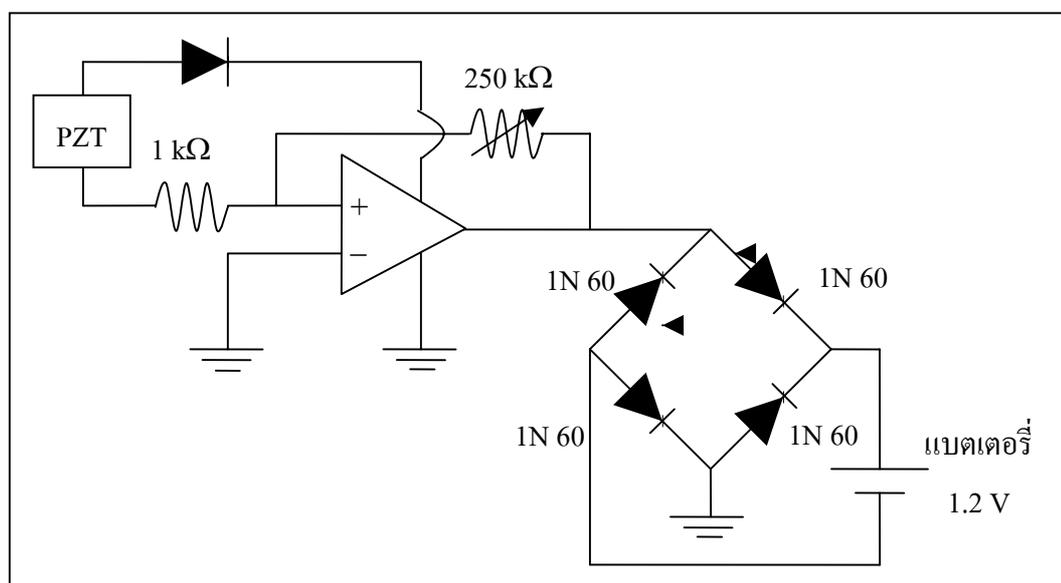
หลักการทำงานของวงจร แรงดันไฟฟ้าจะถูกเรียงกระแสด้วยไดโอดเบอร์ 1N 60 ที่ต่อแบบ full bridge แล้วนำไปเก็บสะสมในตัวเก็บประจุขนาด $100 \mu\text{F}$ 50 V และมีซีเนอร์ไดโอดขนาด 3.6 V เพื่อทำหน้าที่รักษาแรงดันไฟฟ้าให้คงที่และปล่อยกระแสไหลผ่านแต่ต้องมีค่าไม่เกินค่าพิคสูงสุดเมื่อแรงดันมากกว่า 3.6 V ก็จะปล่อยพลังงานไปชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 1.2 V ที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ

การทดสอบกับเครื่องกำเนิดสัญญาณพบว่าวงจรดังกล่าวสามารถชาร์จพลังงานเข้าแบตเตอรี่ได้ที่ความถี่ 0.6 Hz ซึ่งเท่ากับความถี่ทางกลที่ apply แรงกระทำ แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่สามารถบรรจุพลังงานเข้าแบตเตอรี่ได้ประมาณ 2.25 V กระแสสลับ กระแส 0.04 mA วัดแรงดันไฟฟ้าตกตัวเก็บประจุได้ 3.6 V และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแบตเตอรี่มีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ อย่างชัดเจน แสดงว่าวงจรดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานที่ความถี่ต่ำ (0.6 Hz)

การทดสอบกับชิ้นตัวอย่างเมื่อ apply แรงกระทำ 500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz บนชิ้น PZT ที่เรียงซ้อนกัน 8 ชั้น พบว่าชิ้น PZT ให้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 1.5 V กระแสไฟฟ้าประมาณ 5 μ A เมื่อ apply แรงกระทำไปเรื่อย ๆ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่ประมาณ 2 V แต่พลังงานดังกล่าวยังไม่ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแบตเตอรี่มีค่าเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด หากพิจารณาวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานนี้ตามทฤษฎีแล้วมีกระแสไหลผ่านและมีแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 1.2 V ซึ่งน่าจะชาร์จแบตเตอรี่ได้แต่ต้องใช้เวลาในการบรรจุพลังงานนาน เนื่องจากมีปริมาณของกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางกลที่ต่ำ

4.4.11.4 วงจรที่ศึกษาที่ไม่สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าได้

ผลการศึกษา พบว่าวงจรดังกล่าวไม่สามารถชาร์จพลังงานเข้าแบตเตอรี่ได้ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำ



รูปที่ 4.35 วงจร op-amp

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมี ลักษณะทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุโพอิโซอิเล็กทริกชนิด PZT ที่จะมีผลต่อการกำเนิดพลังงานและศึกษาวงจรไฟฟ้าที่จะใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบในการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

1. องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุโพอิโซอิเล็กทริกชนิด PZT ที่ dope ด้วย Nb^{5+} ซึ่งเป็น donor dope จัดเป็นพวก soft PZT สามารถให้สมบัติโพอิโซอิเล็กทริกที่สูงกว่าวัสดุโพอิโซอิเล็กทริก PZT ที่ dope ด้วย Sr^{2+} ซึ่งเป็น Isovalent dope แต่มักจะแสดงสมบัติเป็น hard PZT และมีสมบัติโพอิโซอิเล็กทริกสูงกว่าวัสดุโพอิโซอิเล็กทริกชนิด PZT ที่ไม่ได้ dope ออกไซด์ชนิดใดเลย

2. ผลการศึกษาความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุโพอิโซอิเล็กทริกชนิด PZT พบว่าชิ้นตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่จะเกิดความถี่เรโซแนนซ์ต่ำกว่าชิ้นตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กและพบว่าชิ้นตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ยังค่านิมิตีแคว้นต่ำสุดและค่านิมิตีแคว้นสูงสุดที่น้อยกว่าชิ้นตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก

3. วัสดุโพอิโซอิเล็กทริกที่มีค่า figure of merits ($d_{33} \cdot g_{33}$) สูงจะให้แรงดันไฟฟ้ามากกว่าวัสดุที่มีค่า figure of merits ต่ำ ซึ่งค่าดังกล่าวจะแปรเปลี่ยนตามชนิดขององค์ประกอบทางเคมีที่ dope เข้าไปในโครงสร้างของวัสดุโพอิโซอิเล็กทริกชนิด PZT และปริมาณที่ใช้ พบว่าตัวอย่าง Pz29 ให้ค่า figure of merit มากที่สุด รองลงมาคือ APC 850 APC 840 และ undope PZT ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นตัวอย่างที่เท่ากัน

4. วัสดุโพอิโซอิเล็กทริกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสามารถให้แรงดันไฟฟ้ามากกว่าวัสดุที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ เพราะแรงดันไฟฟ้านั้นแปรผันตรงกับ compressive stress (APC International, 2002) ซึ่ง stress นั้นจะแปรผันตรงกับแรงและแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นตัวอย่าง ($stress = force/area$) ดังนั้นชิ้นตัวอย่างขนาดเล็กจึงเกิด stress มากกว่าชิ้นตัวอย่างขนาดใหญ่

5. ค่าความต้านทานภายนอกมีผลต่อแรงดันและกำลังไฟฟ้าของวัสดุโพอิโซอิเล็กทริกพบว่าการต่อความต้านทานภายนอกประมาณ $25 M\Omega$ เข้าไปในวงจรจึงได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

6. แรงกระทำที่ให้กับวัสดุนั้นแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่วัสดุไพโซอิเล็กทริกผลิตได้ กำลังไฟฟ้าที่ได้จะมากขึ้นเมื่อ apply แรงทางกลใส่วัสดุไพโซอิเล็กทริกสูงขึ้น แต่การ apply แรงทางกลที่สูงเกินไปจะทำให้ชิ้น PZT แตกเสียหายได้

7. วัสดุไพโซอิเล็กทริกชนิด PZT ที่เรียงซ้อนกัน 3 ชั้นสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ามากกว่าวัสดุแบบชั้นเดียว

8. พื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน มีความสามารถในการเก็บเกี่ยวพลังงานไปยังตัวเก็บประจุ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่เหมาะต่อการชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 1.2 V เนื่องจากกลไกทางกลในการ apply แรงกระทำยังไม่ดีจึงทำให้มีอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าที่สะสมในตัวเก็บประจุที่ช้าและไม่มากพอต่อการชาร์จแบตเตอรี่

9. วงจรชาร์จพลังงานแบบ half-wave rectifiers แบบมีตัวกรองมีความเหมาะสมต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุไพโซอิเล็กทริกในสภาวะการทำงานที่ความถี่ต่ำ (น้อยกว่า 1 Hz) เนื่องจากมีการสูญเสียของพลังงานในวงจรที่น้อยจึงมีแรงดันไฟฟ้าเพียงพอในการจ่ายให้แบตเตอรี่ขนาด 1.2 V

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษาพบว่าแรงดันไฟฟ้านั้นแปรผันตรงกับ compressive stress ดังนั้นหากมีกลไกทางกลที่ดีที่ช่วยในการถ่ายโอนแรงกระทำไปยังวัสดุไพโซอิเล็กทริกได้มากขึ้น จะทำให้วัสดุสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้สูงขึ้นส่งผลให้มีพลังงานไฟฟ้าที่เก็บสะสมในตัวเก็บประจุมากขึ้นและมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่มากกว่าเดิมและเพียงพอต่อการจ่ายพลังงานไปยังแบตเตอรี่จึงจะทำให้มีการชาร์จพลังงานที่เร็วขึ้น เช่น สร้างกลไกของสปริงในการดีดวัสดุไพโซอิเล็กทริก

2. พัฒนาวงจรไฟฟ้าที่มีค่าอิมพีแดนซ์ของวัสดุไพโซอิเล็กทริกเหมาะสมกับวงจรไฟฟ้าที่ใช้เก็บเกี่ยวพลังงานจึงจะทำให้การชาร์จพลังงานไฟฟ้าดีขึ้นและมีการสูญเสียของพลังงานที่น้อยลง

รายการอ้างอิง

- กระทรวงพลังงาน (2550). แหล่งพลังงานของประเทศ การวางตำแหน่งเชิงยุทธศาสตร์เพื่ออนาคต [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.energy.go.th/moen/Index.aspx?MenuID=25>
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2549). สถานการณ์พลังงานไทยปี 2548 และแนวโน้มปี 2549 [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.energy.go.th/moen/Index.aspx?MenuID=31>
- หนังสือพิมพ์เชียงใหม่นิวส์. (2547). รัฐแบกรับน้ำมันแพงวอนประชาชนช่วยประหยัด [ออนไลน์]. ได้จาก: http://www.ist.cmu.ac.th/riseat/teenet/emac/emacnews_newspaper_details.php?id=10
- หนังสือพิมพ์โพสต์ทูเดย์ (2552). อนาคตพลังงานทดแทน [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.thaienv.com/content/view/885/40/>
- สุธรรม ศรีหล่มสัก. (2551). เอกสารประกอบการสอนรายวิชา **Introduction to Piezoelectric Ceramics**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา.
- สุทิน คุณหาเรื่องรอง. (2551). เอกสารประกอบการสอนรายวิชา **Characterization in Materials Engineering: Microscopic Characterization Part**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา.
- American Society for Testing and Material (ASTM). (1994). Standard test method for water Absorption , Bulk Density, Apparent Porosity, and Specific Gravity for Fired Whiteware Product. **ASTM C373-88**. New York:ASTM.
- APC International (2002). **Piezoelectric ceramic: Principles and applications**, APC International, Ltd.
- Buchanan, R.C., (1991). **Ceramic materials for electronics** (2nd ed.). University of Illinois at Urbana-Champaign Urbana, Illinois.
- Chen, H., Jia, C., Zhang, C., Wang, Z., and Liu, C. (2009). **Power harvesting with PZT ceramics**. **IEEE International Symposium on Circuits and Systems**. 557-560.

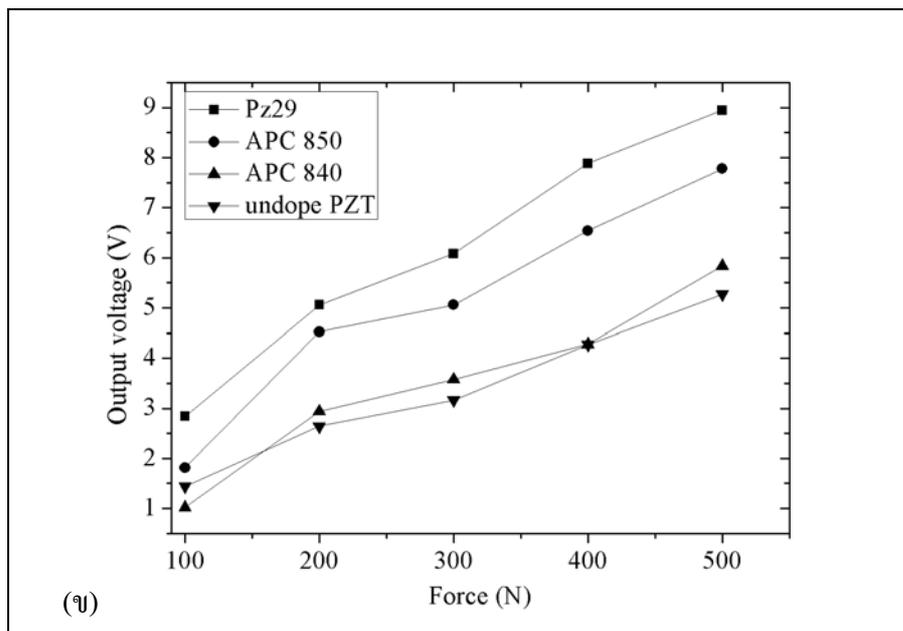
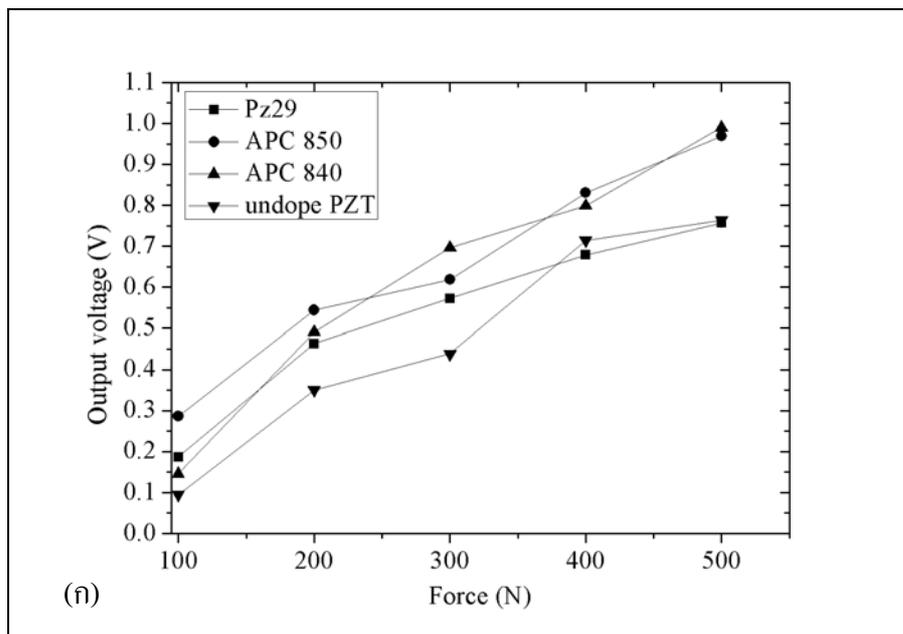
- Chen, C., Islam, R.A., and Priya, S. (2006). Electric energy generator. **IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control**. 53(3): 656-661.
- Clevite Corporation. (1965). **Piezoelectric technology data for designers**. Bedford, OH, The Corporation: 30-34.
- Feenstra, J., Granstrom, J., and Sodano, H. (2008). Energy harvesting through a backpack employing a mechanically amplified piezoelectric stack. **Mechanical Systems and Signal Processing**. 22: 721-734.
- Ferroperm Piezoceramics A/S. (2003). **Ferroperm Piezoceramics Catalogue** [on-line]. Available: <http://www.ferroperm-piezo.com/>
- Fletscher, R. (1996). Force transduction materials for human- technology interfaces. **IBM Systems Journal**. 35: 630-638.
- Fushimi, S., and Ikeda T. (1967). **J. Am. Ceram. Soc.**, 50(3): 131
- Gonzalez, J.L., Rubio, A., and Moll, F. (1991). **Human powered Piezoelectric Batteries to supply Power to Wearable Electronic Devices**.
- Guillot, F.M., Beckham, H.W., and Leisen, J. (2008). Piezoelectric fabrics for energy harvesting. **National Textile Center Research Briefs**. F06-GT05.
- Howells, C.A. (2008). Piezoelectric energy for soldier system. **US Army CERDE. IEEE International Symposium on Circuits and Systems**. 557-560.
- IRE Standard (1961). IRE standards on Piezoelectric crystals: measurements of piezoelectric ceramics. **Proceeding of the IRE**. 1161-1169.
- IRE Standard (1957). IRE standards on piezoelectric crystals-The piezoelectric vibrator: definitions and methods of measurement. **Proceeding of the IRE**. 353-358.
- Islam R.A., and Priya, S. (2006). Realization of high-energy density polycrystalline piezoelectric ceramics. **Applied Physics Letters**. 88: 032903
- Jaffe, B., Cook, W.R., and Jaffe, H. (1971). **Piezoelectric ceramics**. New York: Academic Press Limited.
- Kymissis, J., Kendall, C., Paradiso, J., and Gershenfeld, N. (1998). Parasitic power harvesting in Shoes. **Proceedings of the 2nd IEEE International Symposium on Wearable Computers**. pp. 132-139. Pittsburg, PA.

- Kim, H.W., Priya, S., Stephanou, H., and Uchino, K. (2007). Consideration of impedance matching techniques for efficient piezoelectric energy harvesting. **IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control**. 54(9): 1851-1859.
- Kim, H.W., Priya, S., Uchino, K., and Newnham, R. (2005). Piezoelectric energy harvesting under high pre-stress cyclic vibration. **Journal of Electroceramic**. 15: 27-34
- Minazara, E., Vasic, D., and Costa, F. (n.d.). Piezoelectric Generator Harvesting Bike Vibrations Energy to Supply Portable Devices. SATIE (CNRS UMR 8029), PRES UNIVERSUD, Cachan, France.
- Mossi, K., Ounaies, Z., and Oakley, S. (2001). Optimizing energy harvesting of a composite unimorph pre-stressed bender. **American Society for Composites Sixteenth Technical Conference**. Blacksburg-Virginia, USA.
- Moulson, A.J., and Herbert, J.M. (2003). **Electronicceramics: materials, properties, applications** (2nd ed.). Wiley.
- Ochoa, P., Pons, J.L., Villegas, M., Fernandez, J.F. (2006). Advantages and Limitations of Cymbals for Sensor and Actuator Applications. **Sensors and Actuators**. A 132: 63-69.
- Priya, S. (2005). Modeling of electric energy harvesting using piezoelectric windmill. **Applied Physics Letters**. 87: 184-101.
- Priya, S. (2007). Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers. **J Electroceram**. 19: 165-182.
- Saez, M.L.M. (2004). **Energy Harvesting from Passive Human Power**. Ph.D. Dissertation, UPC- Barcelona Tech University, Spain.
- Sodano, H., Magliula, E.A., Park, G., and Inman, D.J. (2003). Electric power generation using piezoelectric devices. **Thirteenth International Conference on Adaptive Structures and Technologies**. Berlin, Germany.
- Sodano, H.A., Park, G., and Inman, D.J. (2004). Estimation of electric charge output for piezoelectric energy Harvesting. **Strain Journal**. 40: 49-58
- Sodano, H., Inman, D., and Park, G. (2005). Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. 16: 799-877.

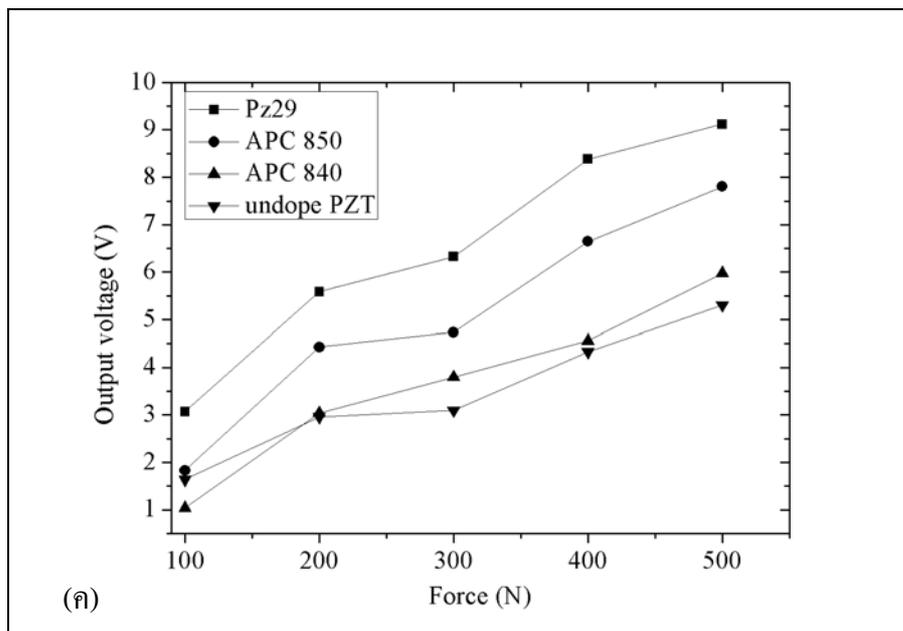
- Swallow, L.M., Luo, J.K., Siores, E., Patel, I. and Dodds, D. (2008). A piezoelectric fiber composite based energy harvesting device for potential wearable applications. **Smart Materials and Structures**.17: 1-7.
- Wischke, M., Goldschmidtboeing, F., and Woias, P. (2007). A low cost generator concept for energy harvesting application. **The 14th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems** (pp 875-878). Lyon, France.

ภาคผนวก ก

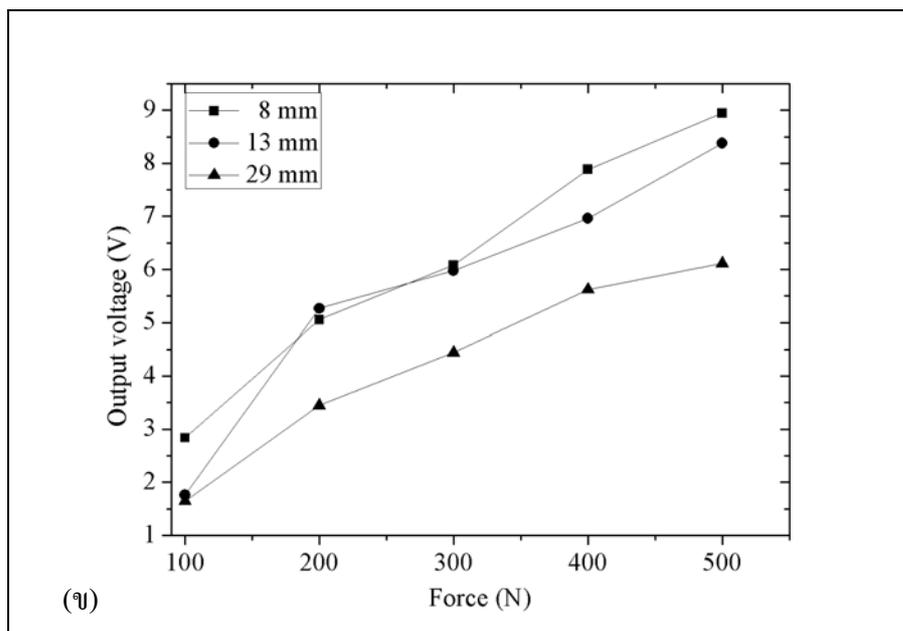
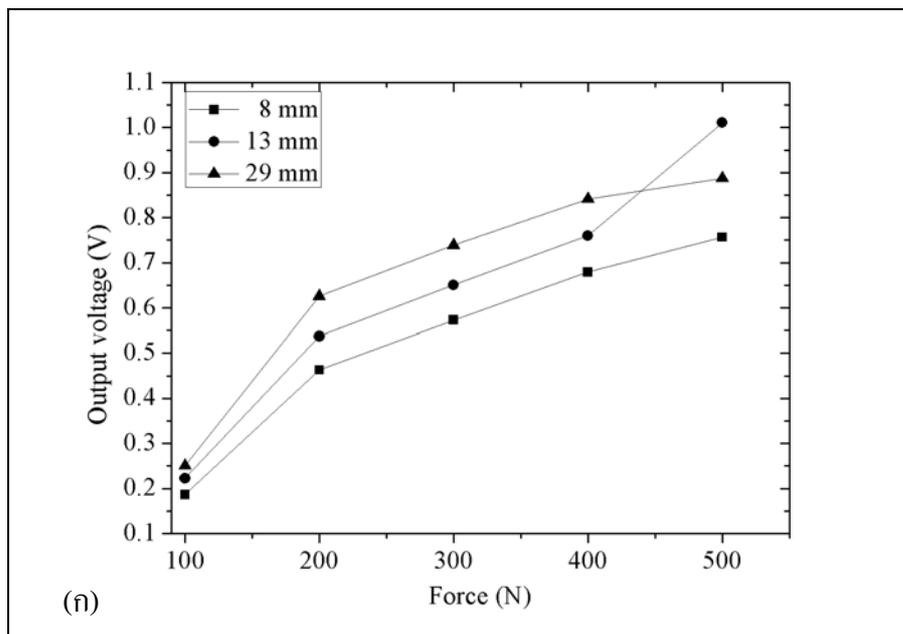
กราฟแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของวัสดุโพสิโชนิกชนิดต่าง ๆ
ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นตัวอย่าง แรงกระทำ
และความต้านทานภายนอกต่าง ๆ



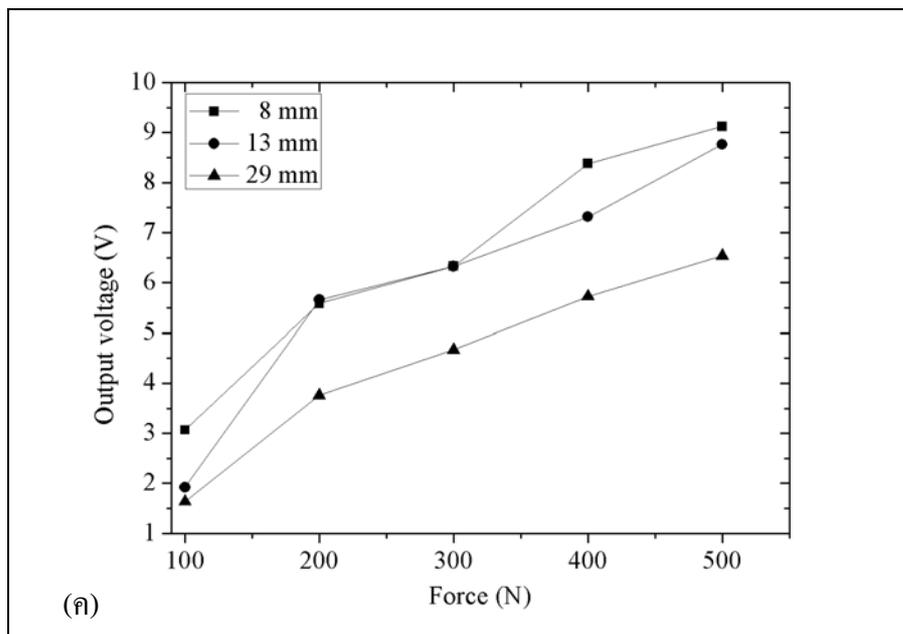
รูปที่ ก.1 แรงดันไฟฟ้าของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรงในช่วง 100-500 N โดยต่อกับความต้านทานภายนอก (ก) 1 M Ω (ข) 50 M Ω (ค) 75 M Ω



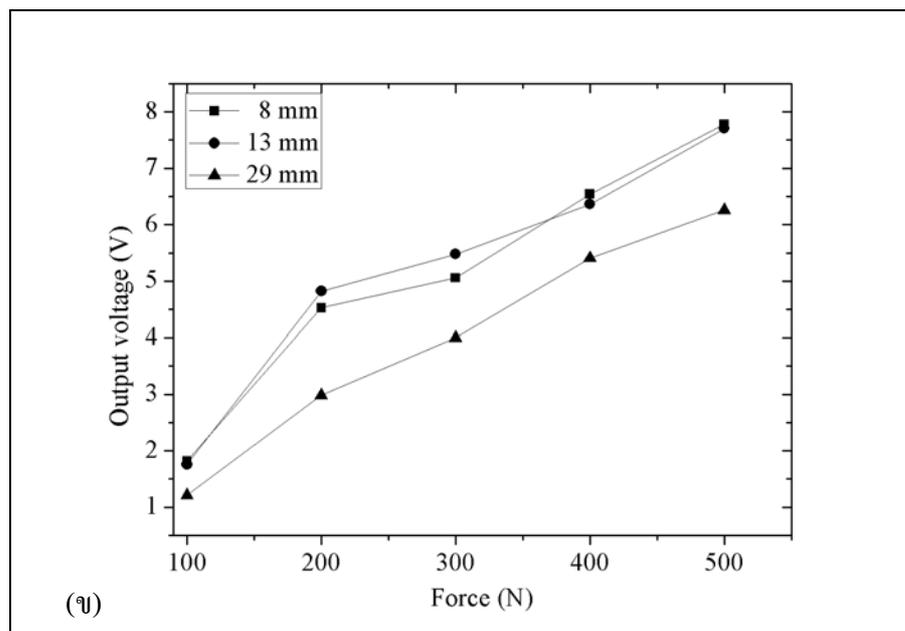
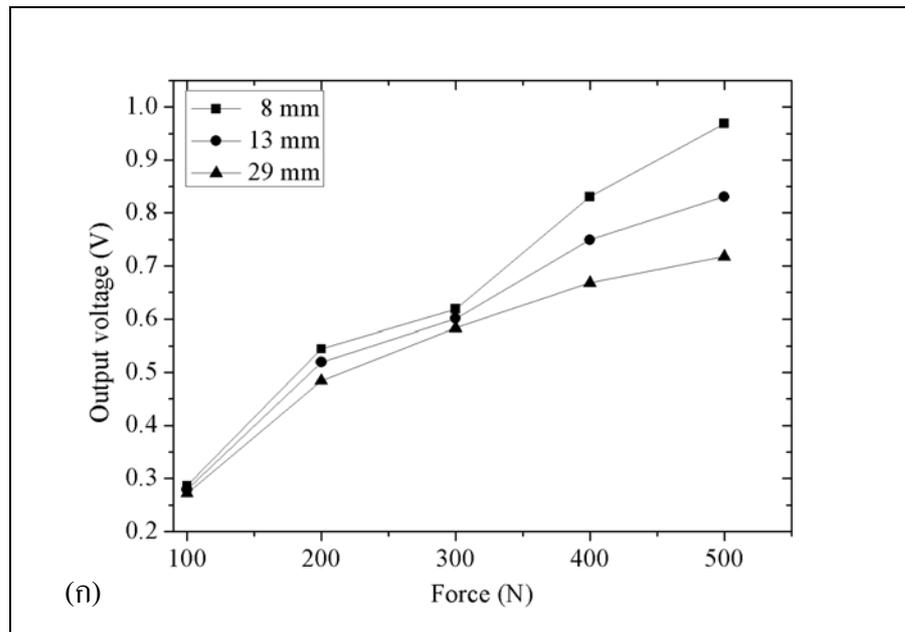
รูปที่ ก.1 แรงดันไฟฟ้าของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรงในช่วง 100-500 N โดยต่อกับความต้านทานภายนอก (ก) 1 M Ω (ข) 50 M Ω (ค) 75 M Ω (ต่อ)



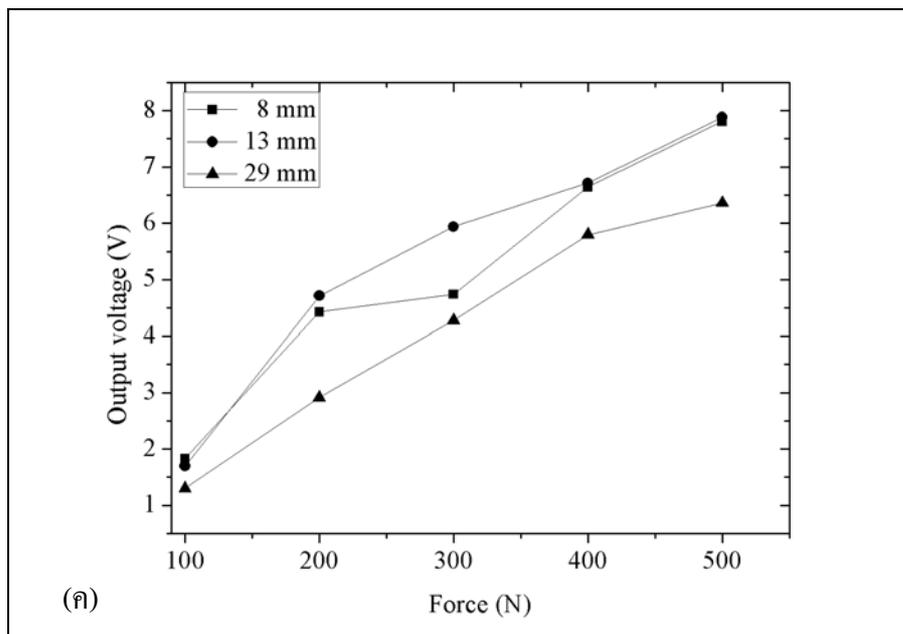
รูปที่ ก.2 แรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่างที่ apply แรงกระทำ 100-500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ของตัวอย่าง Pz29 ที่ความต้านทานภายนอก (ก) 1 MΩ (ข) 50 MΩ (ค) 75 MΩ



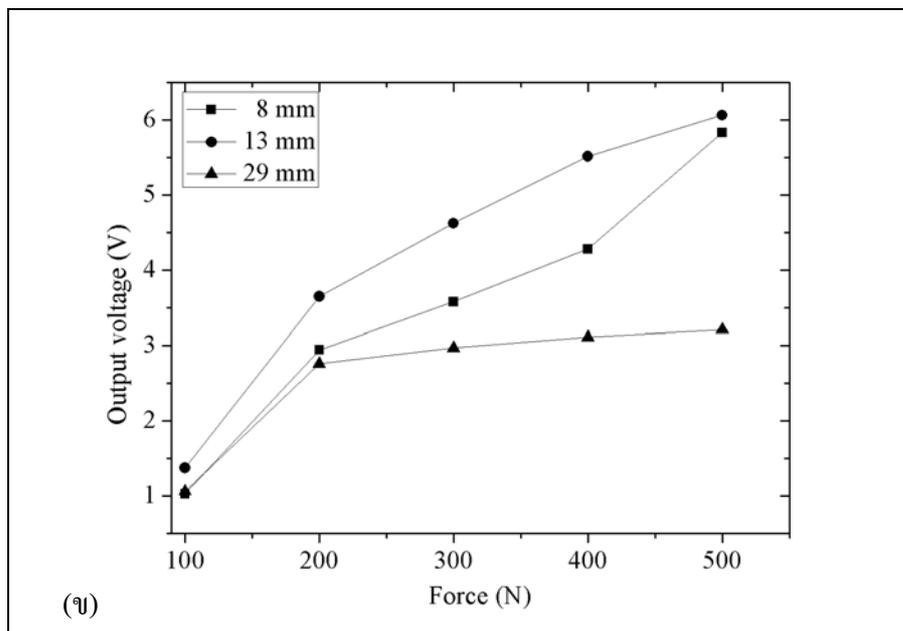
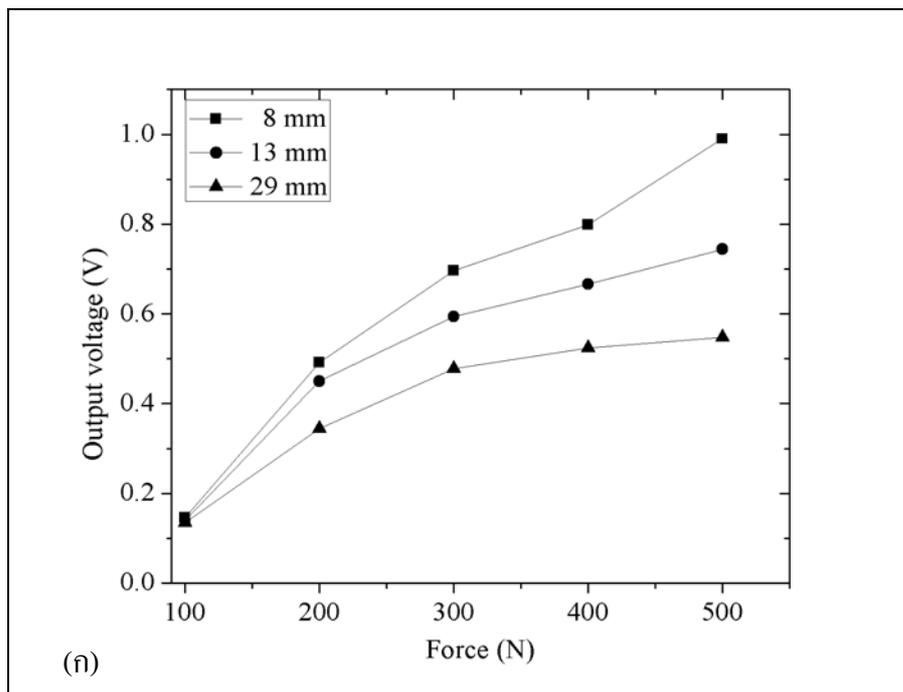
รูปที่ ก.2 แรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ตัวอย่างที่ apply แรงกระทำ 100-500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ของตัวอย่าง Pz29 ที่ความต้านทานภายนอก (ก) 1 M Ω (ข) 50 M Ω (ค) 75 M Ω (ต่อ)



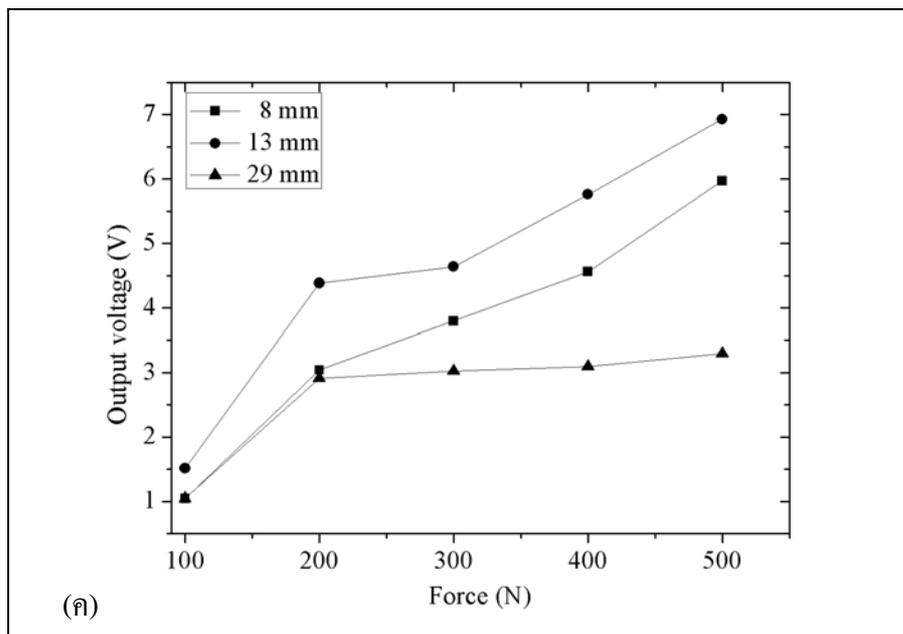
รูปที่ ก.3 แรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ตัวอย่างที่ apply แรงกระทำ 100-500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ของตัวอย่าง APC 850 ที่ความต้านทานภายนอก (ก) 1 M Ω (ข) 50 M Ω (ค) 75 M Ω



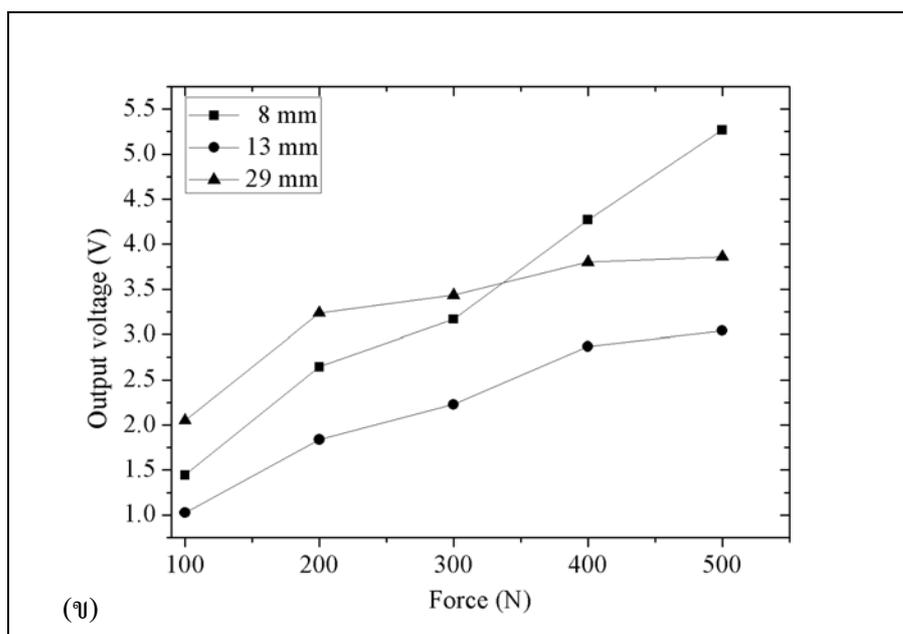
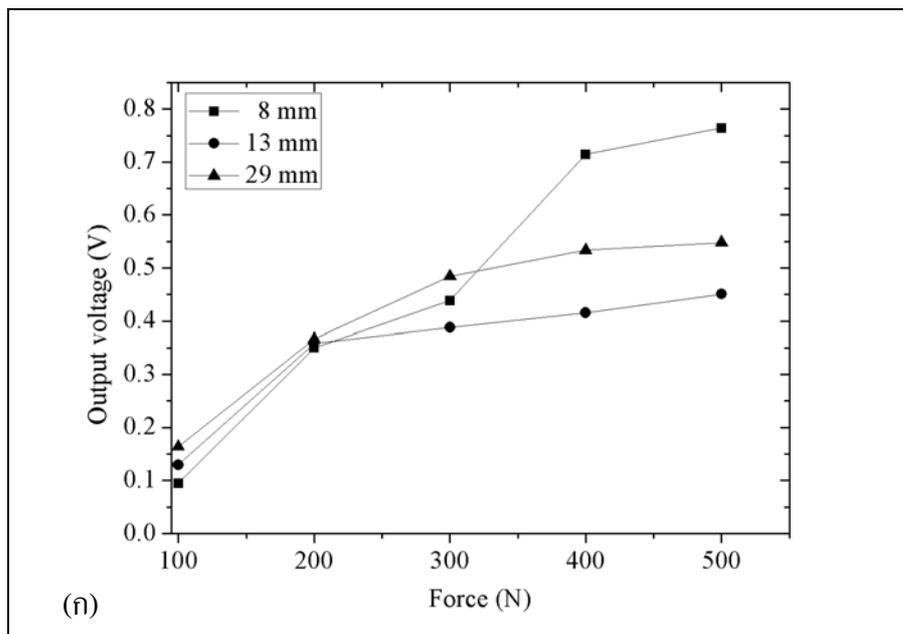
รูปที่ ก.3 แรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่างที่ apply แรงกระทำ 100-500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ของตัวอย่าง APC 850 ที่ความต้านทานภายนอก (ก) 1 M Ω (ข) 50 M Ω (ค) 75 M Ω (ต่อ)



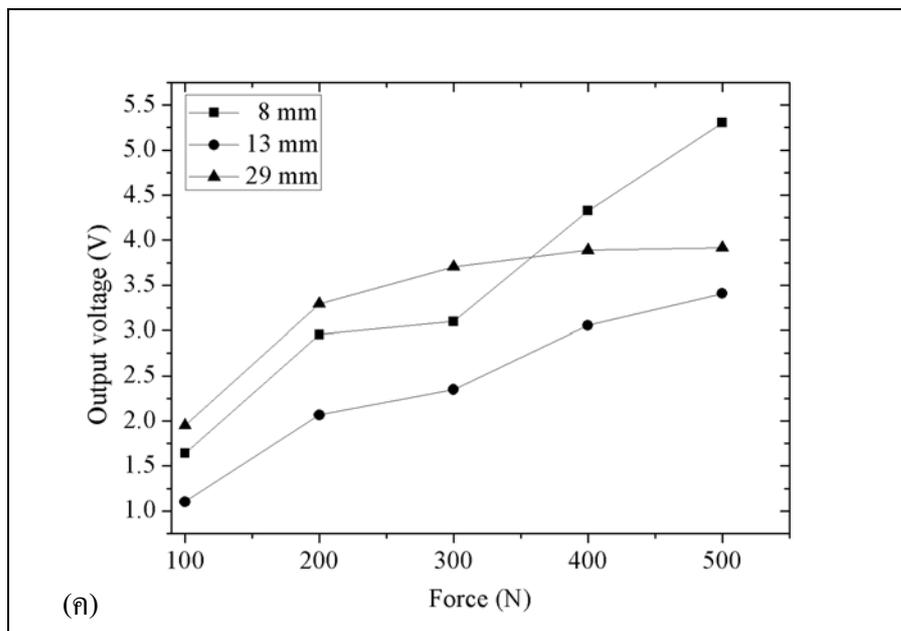
รูปที่ ก.4 แรงดันไฟฟ้าของจิ้นตัวอย่างที่ apply แรงกระทำ 100-500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ของตัวอย่าง APC 840 ที่ความต้านทานภายนอก (ก) 1 M Ω (ข) 50 M Ω (ค) 75 M Ω



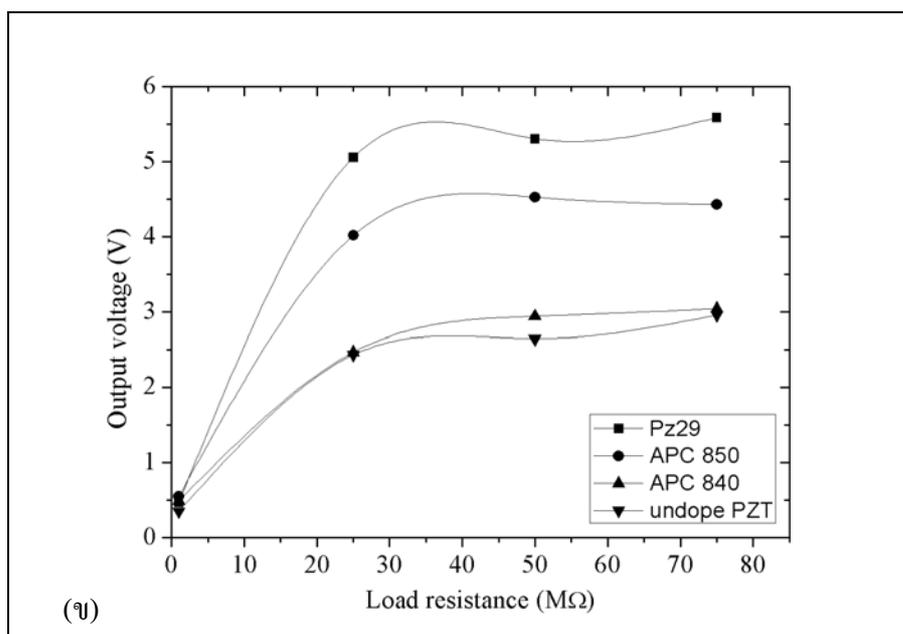
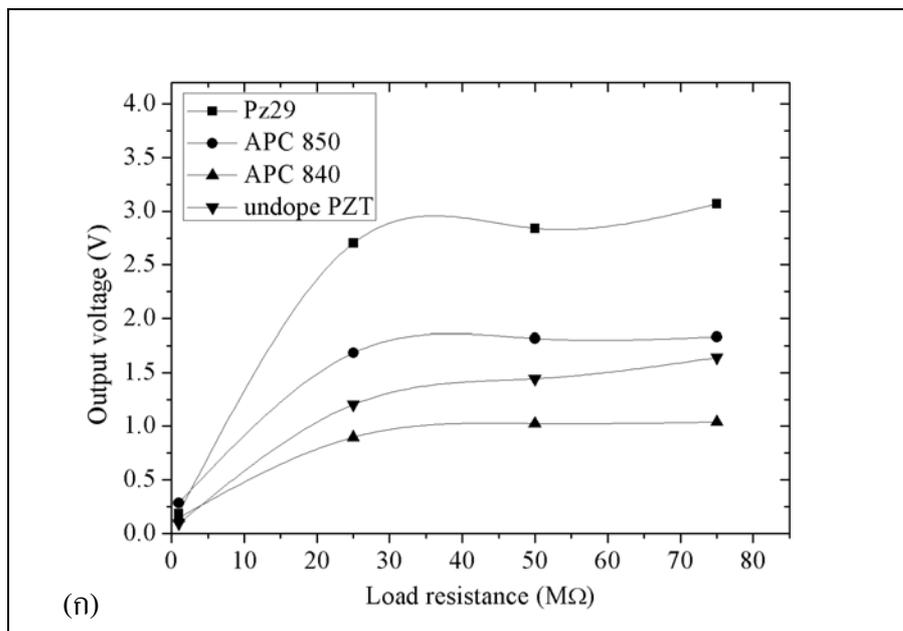
รูปที่ ก.4 แรงดันไฟฟ้าของขั้วขึ้นตัวอย่างที่ apply แรงกระทำ 100-500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ของตัวอย่าง APC 840 ที่ความต้านทานภายนอก (ก) 1 M Ω (ข) 50 M Ω (ค) 75 M Ω (ต่อ)



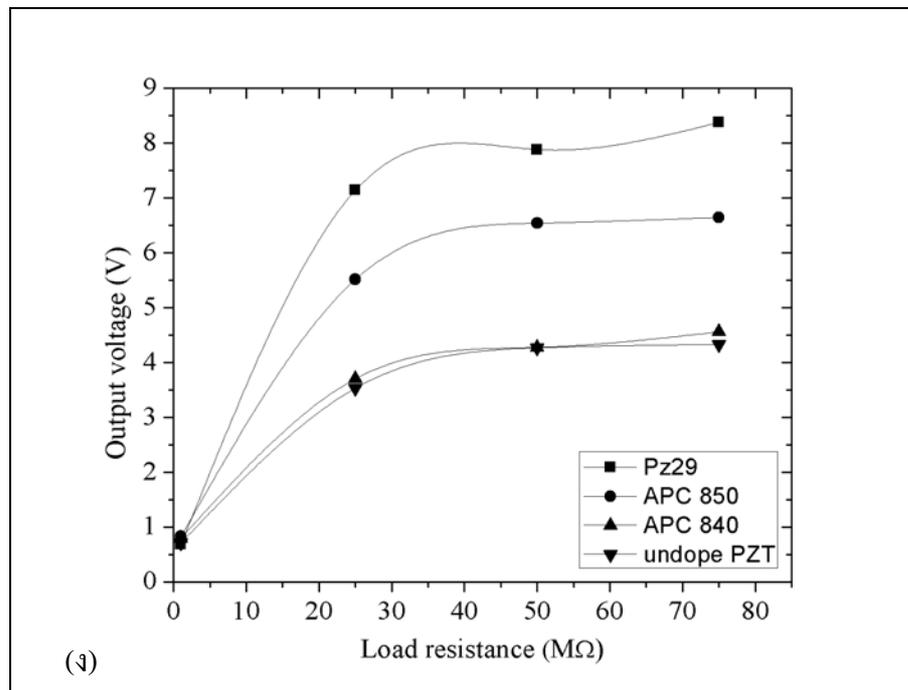
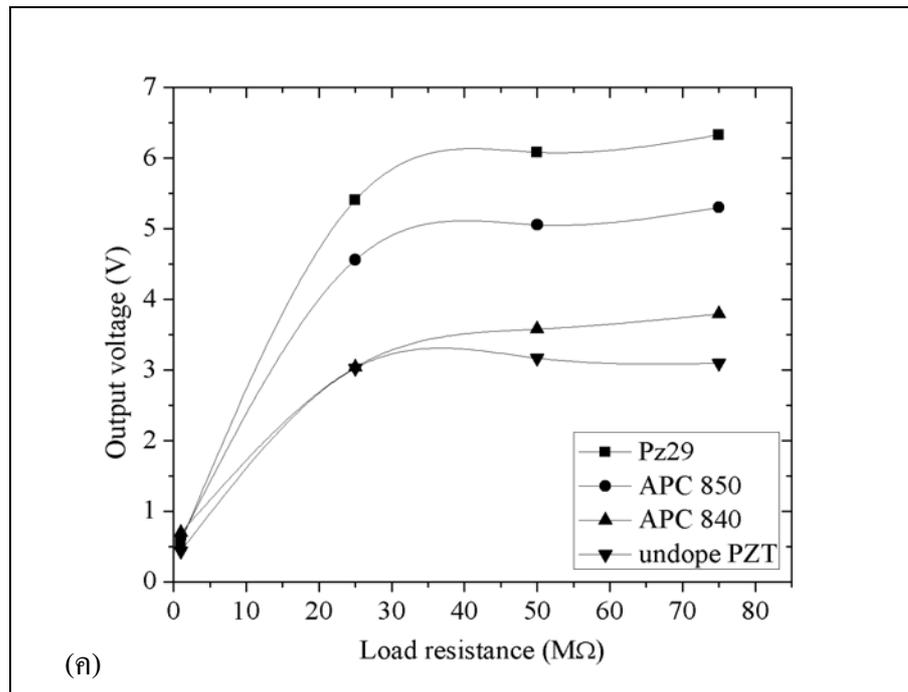
รูปที่ ก.5 แรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่างที่ apply แรงกระทำ 100-500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ของตัวอย่าง undoped PZT ที่ความต้านทานภายนอก (ก) 1 M Ω (ข) 50 M Ω (ค) 75 M Ω



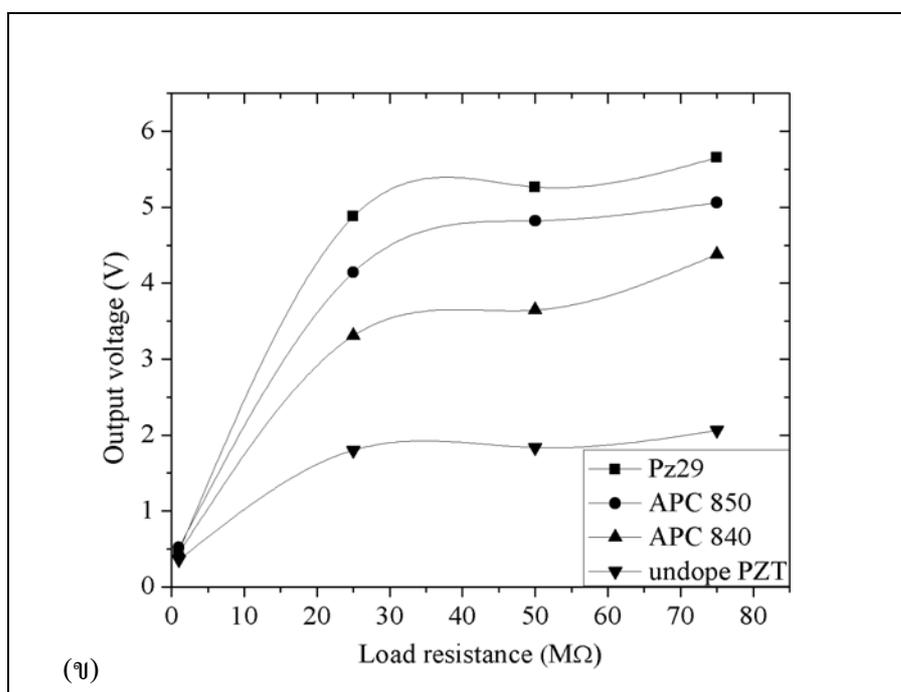
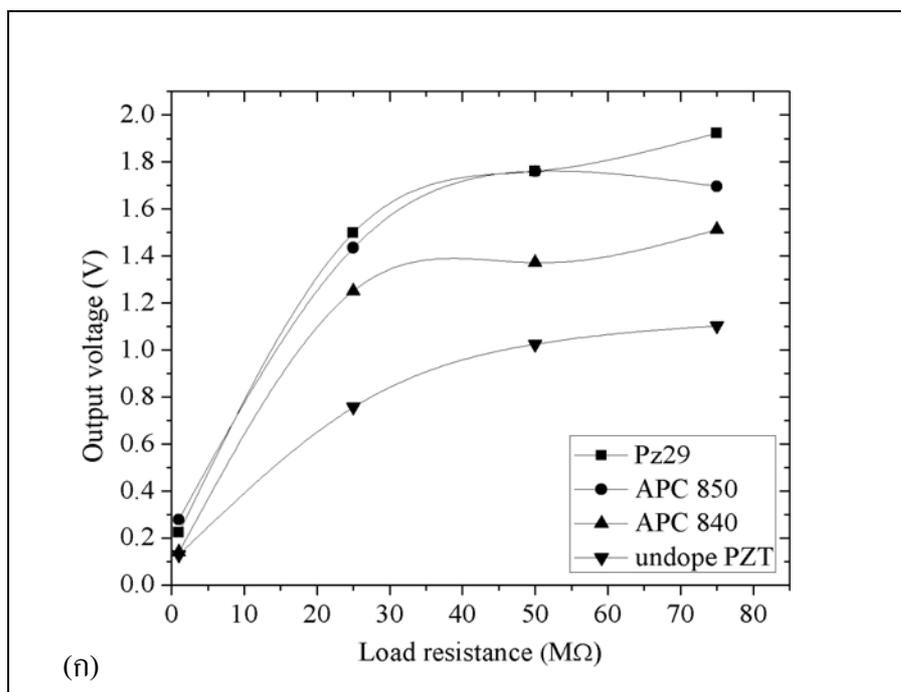
รูปที่ ก.5 แรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ตัวอย่างที่ apply แรงกระทำ 100-500 N ความถี่ทางกล 0.5-0.8 Hz ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ของตัวอย่าง undoped PZT ที่ความต้านทานภายนอก (ก) 1 M Ω (ข) 50 M Ω (ค) 75 M Ω (ต่อ)



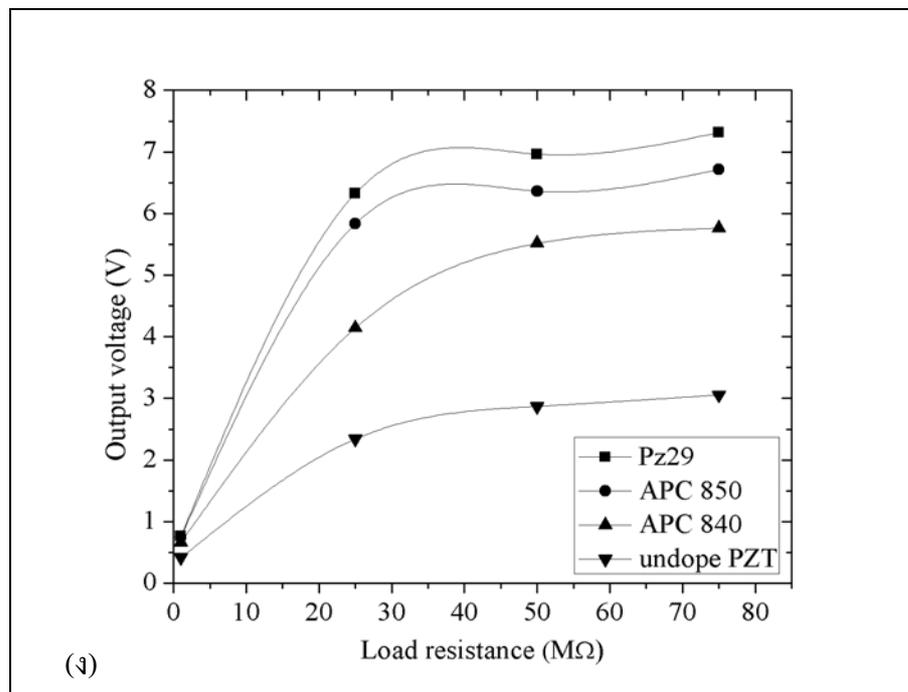
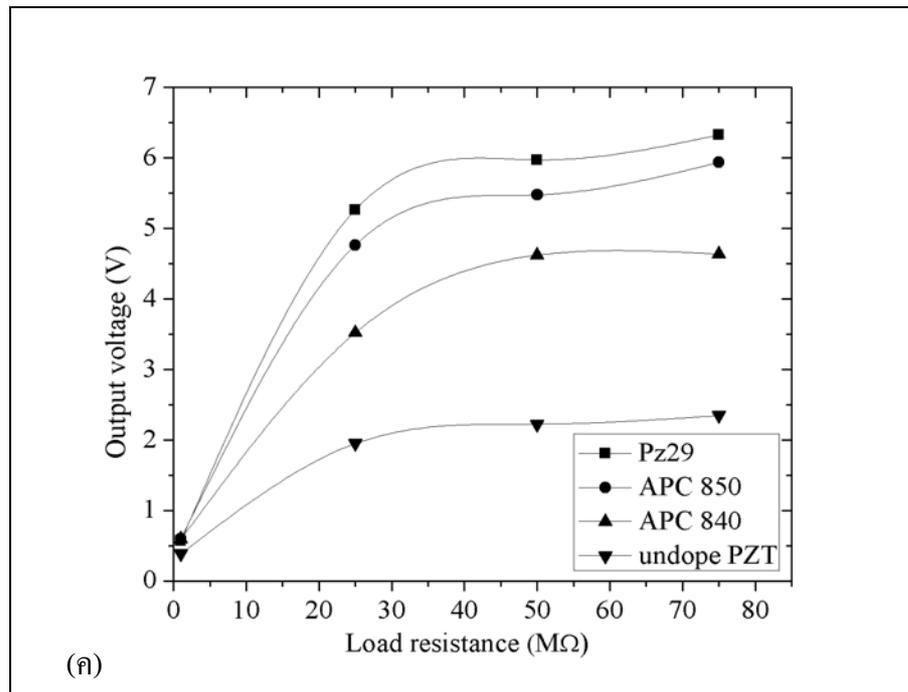
รูปที่ ก.6 ผลของค่าความต้านทานภายนอกที่มีต่อการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่าง ชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 (ข) 200 (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz



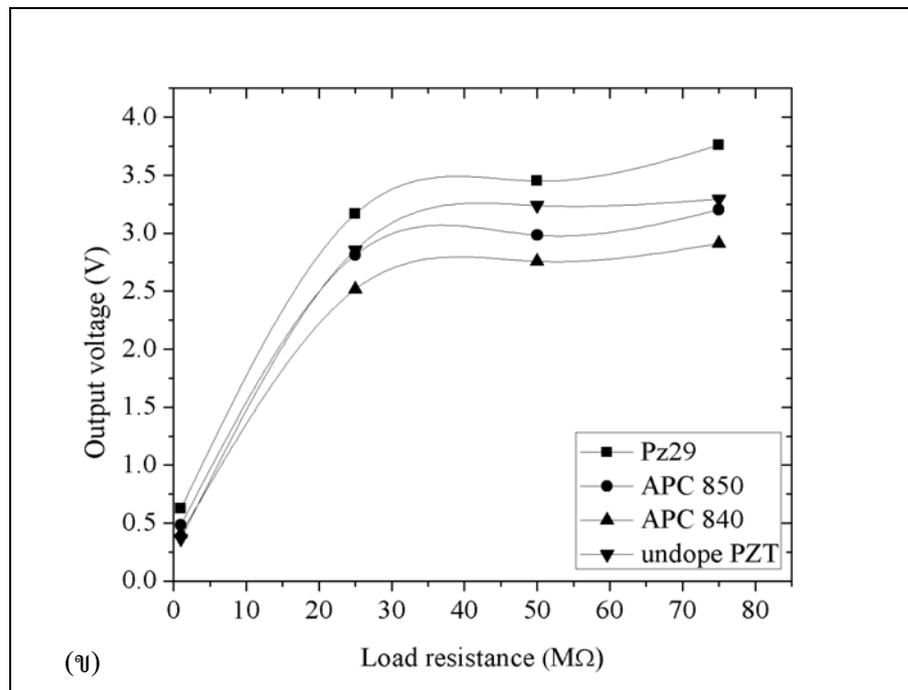
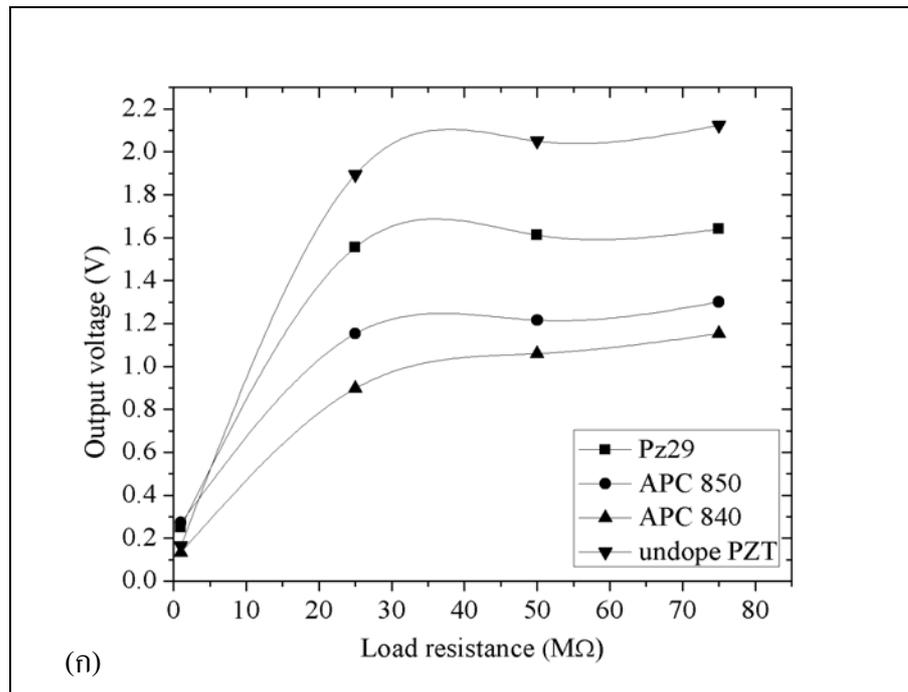
รูปที่ ก.6 ผลของค่าความต้านทานภายนอกที่มีต่อการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่าง ชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 (ข) 200 (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz (ต่อ)



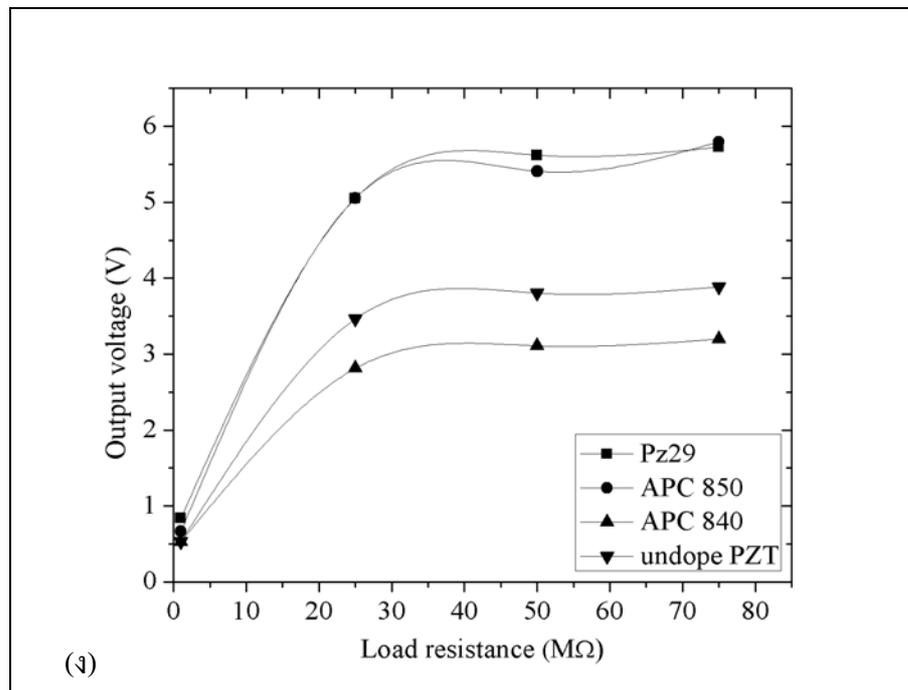
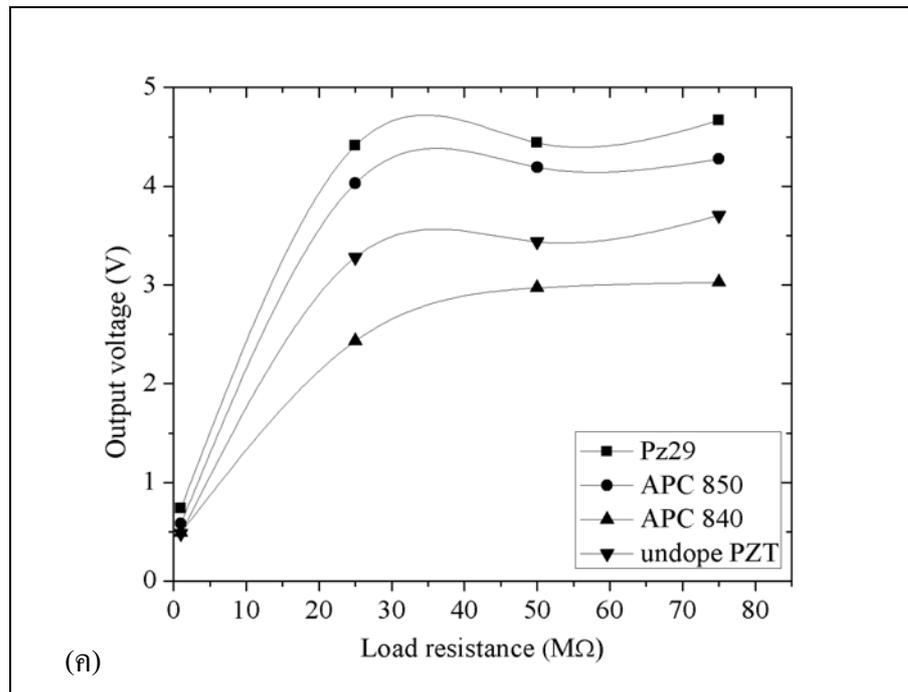
รูปที่ ก.7 ผลของค่าความต้านทานภายนอกที่มีต่อการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่าง
ชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร โดย apply แรงกระทำ
(ก) 100 (ข) 200 (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz



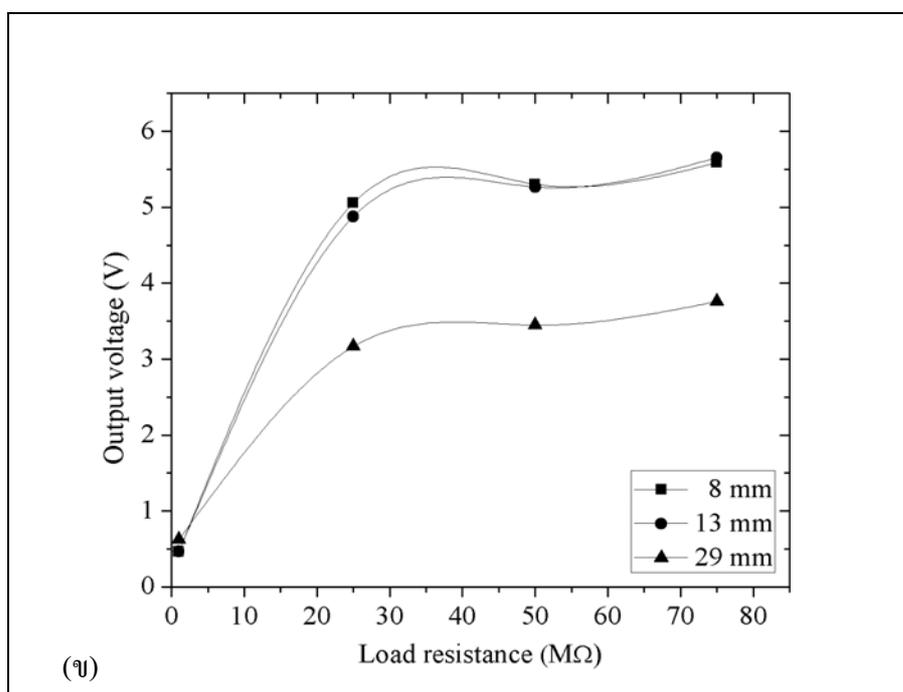
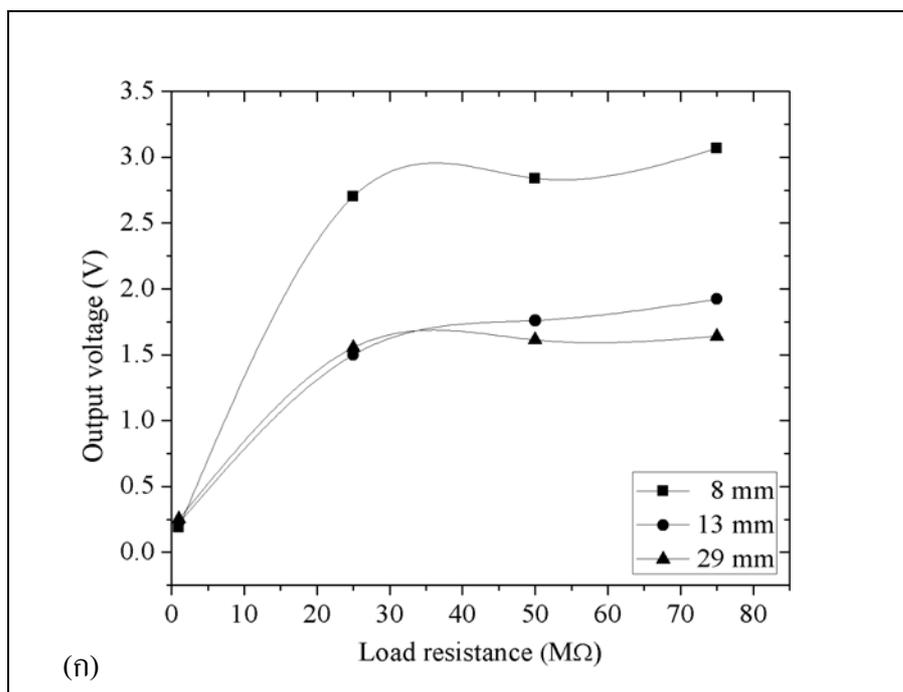
รูปที่ ก.7 ผลของค่าความต้านทานภายนอกที่มีต่อการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่าง ชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 (ข) 200 (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz (ต่อ)



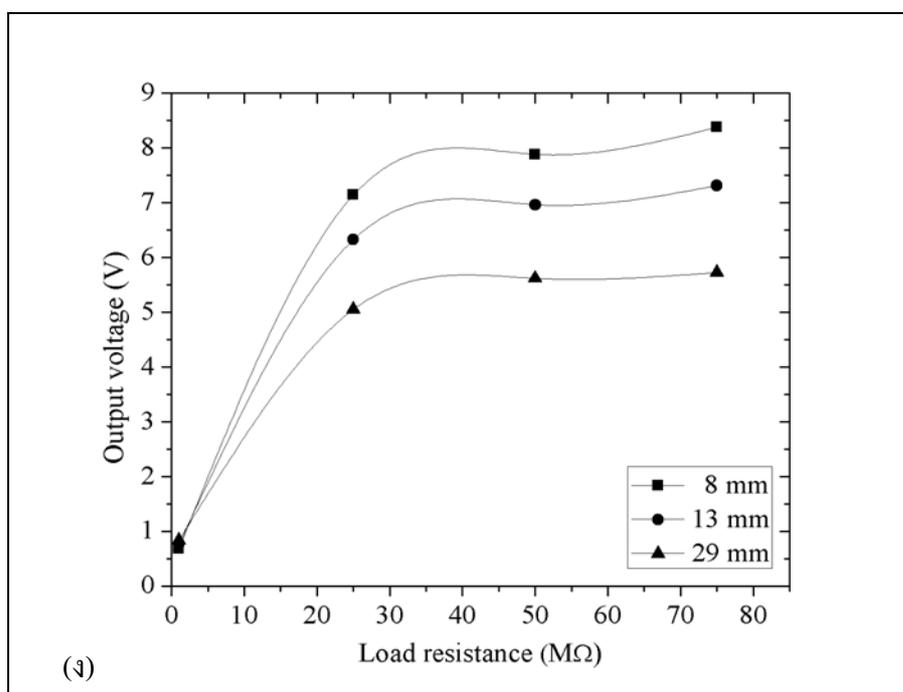
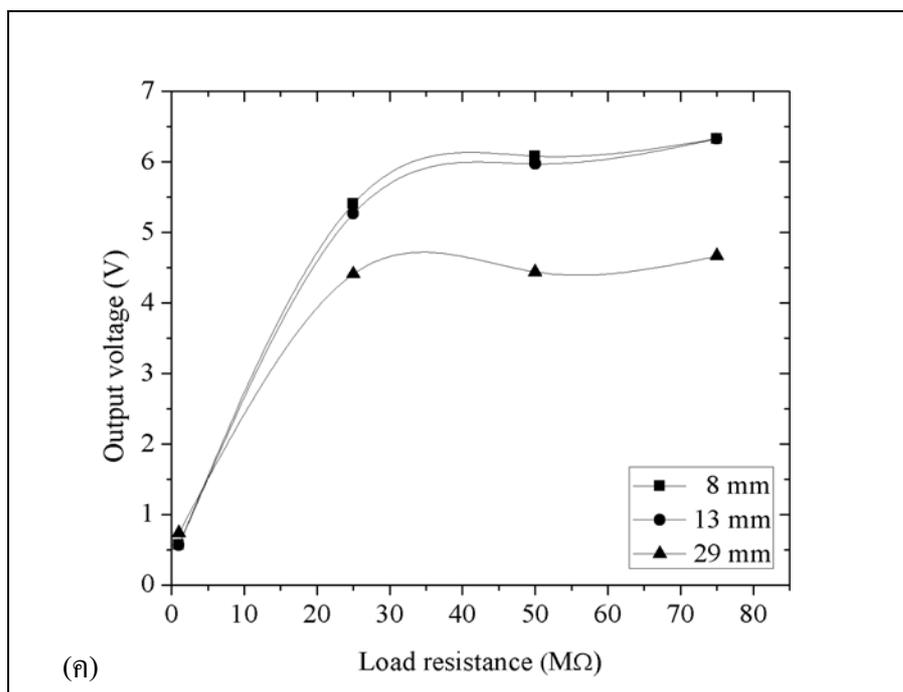
รูปที่ 8.8 ผลของค่าความต้านทานภายนอกที่มีต่อการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่าง ชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 (ข) 200 (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz



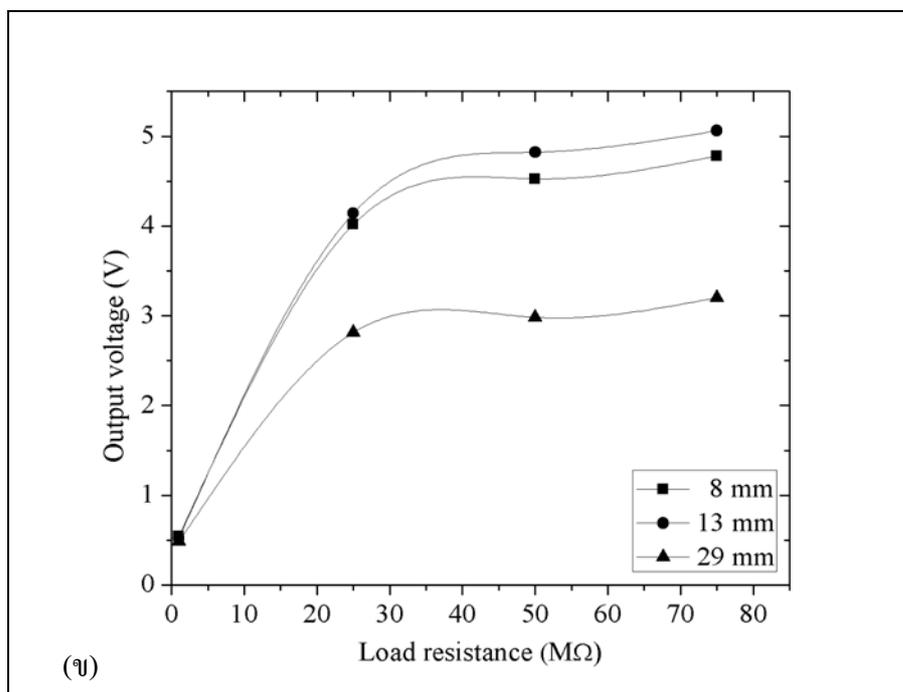
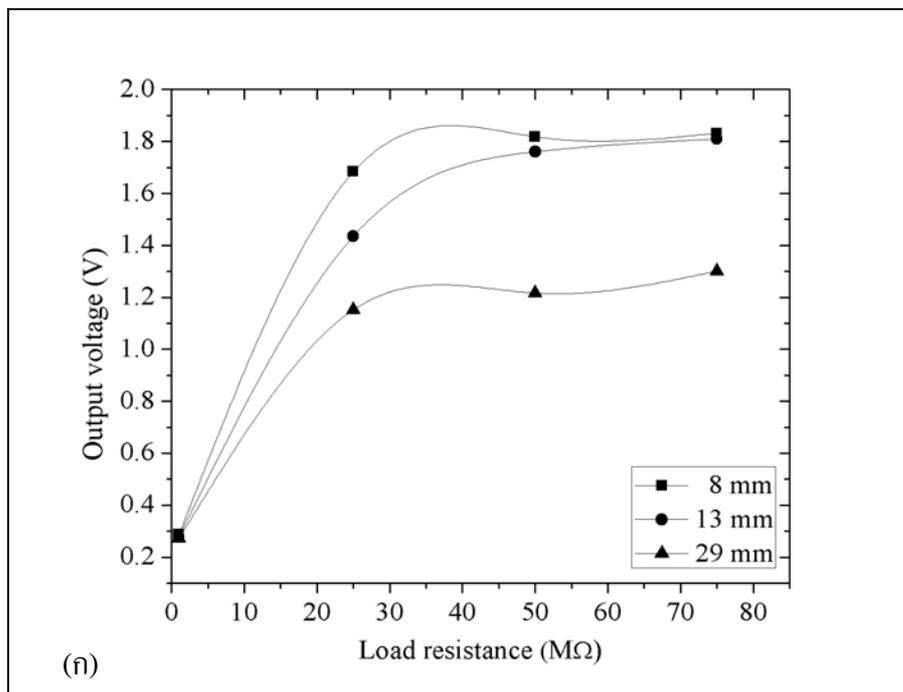
รูปที่ ก.8 ผลของค่าความต้านทานภายนอกที่มีต่อการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่าง ชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 (ข) 200 (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz (ต่อ)



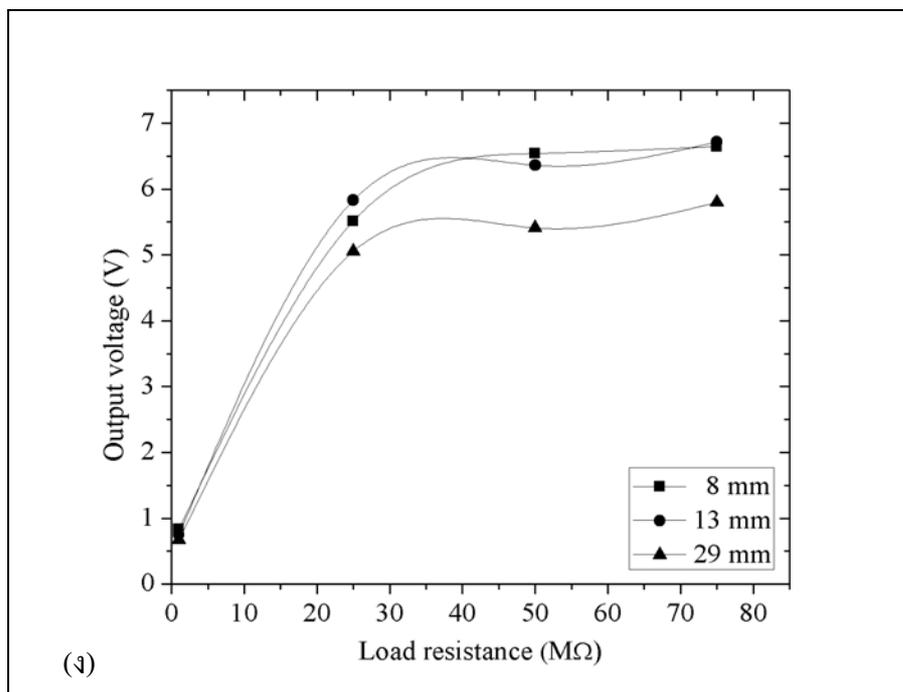
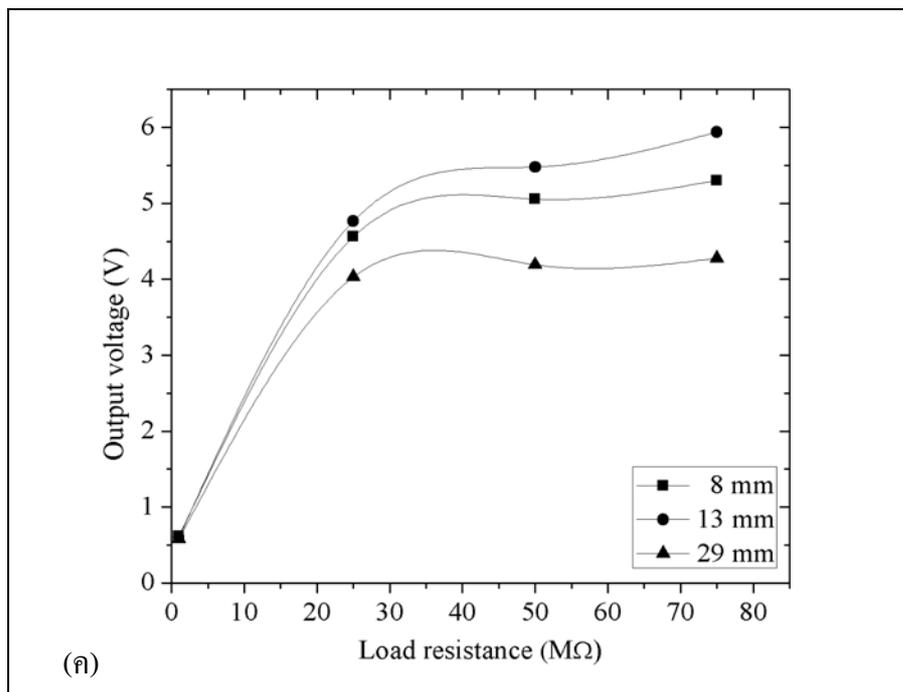
รูปที่ ก.9 ผลของค่าความต้านทานต่อแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่าง Pz29 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz



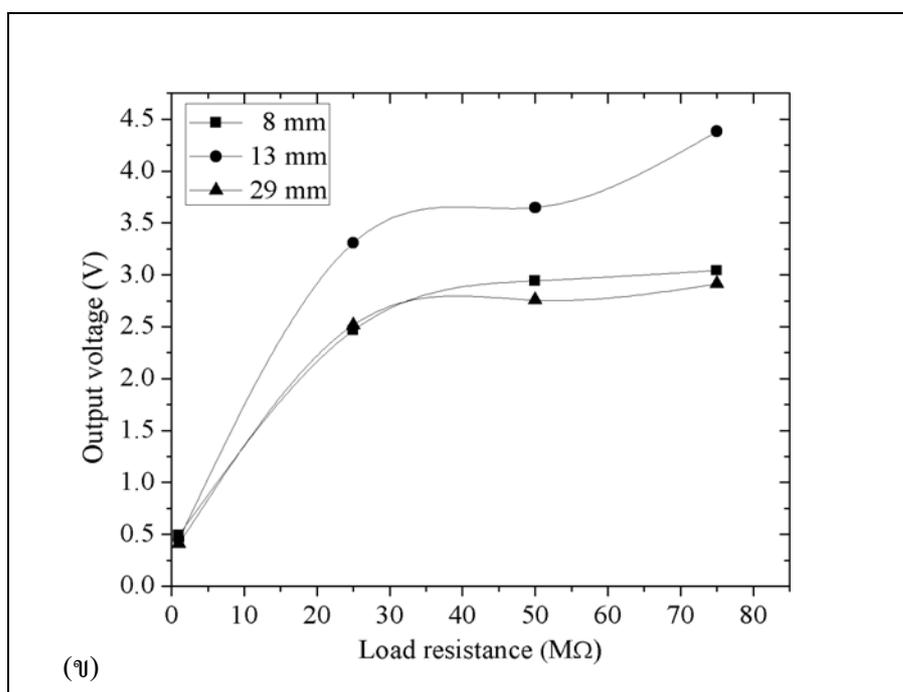
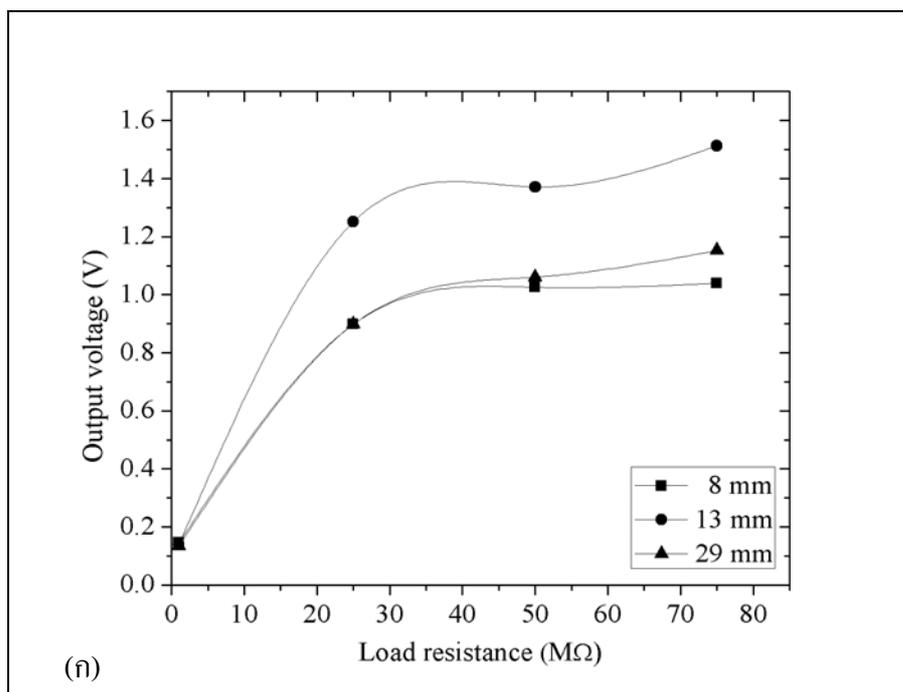
รูปที่ ก.9 ผลของค่าความต้านทานต่อแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่าง Pz29 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz (ต่อ)



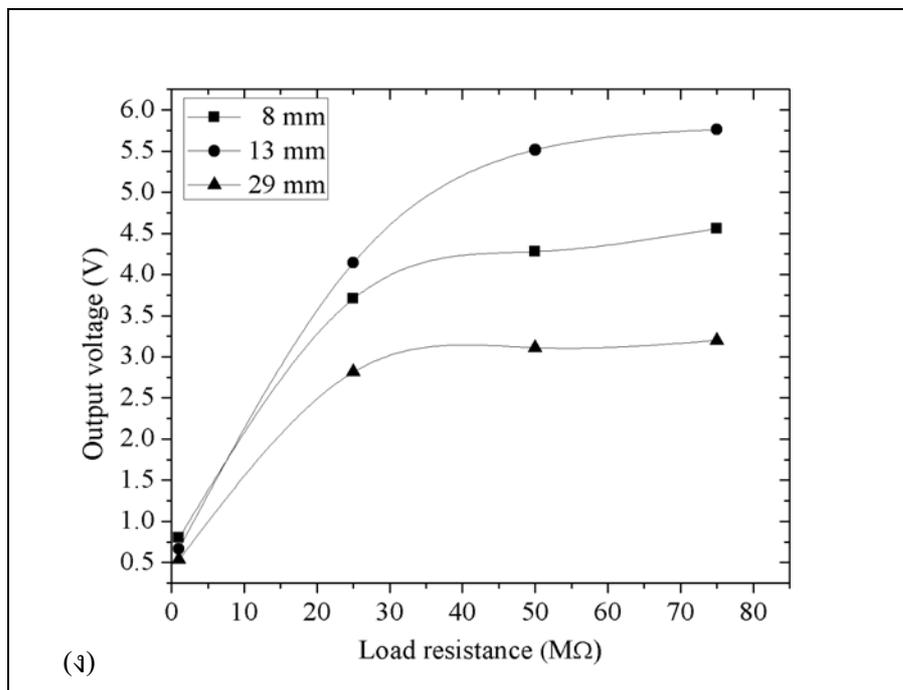
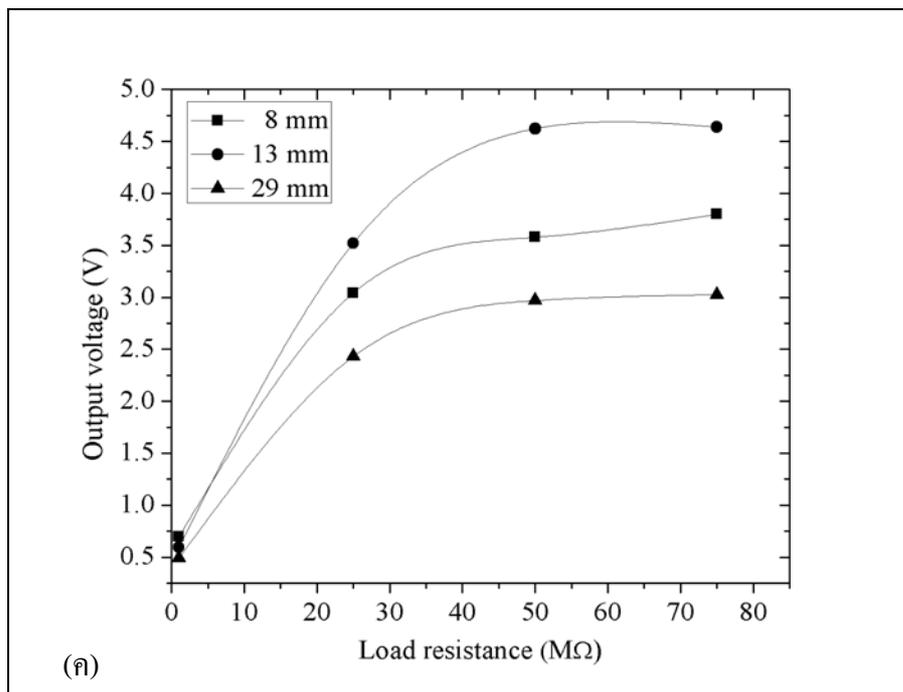
รูปที่ ก.10 ผลของค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่าง APC 850 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz



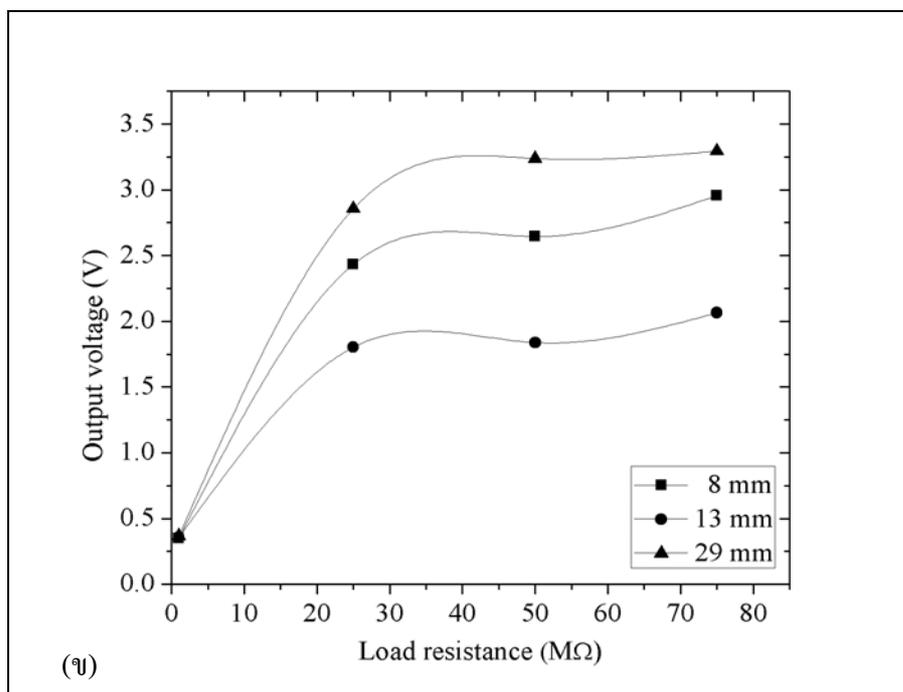
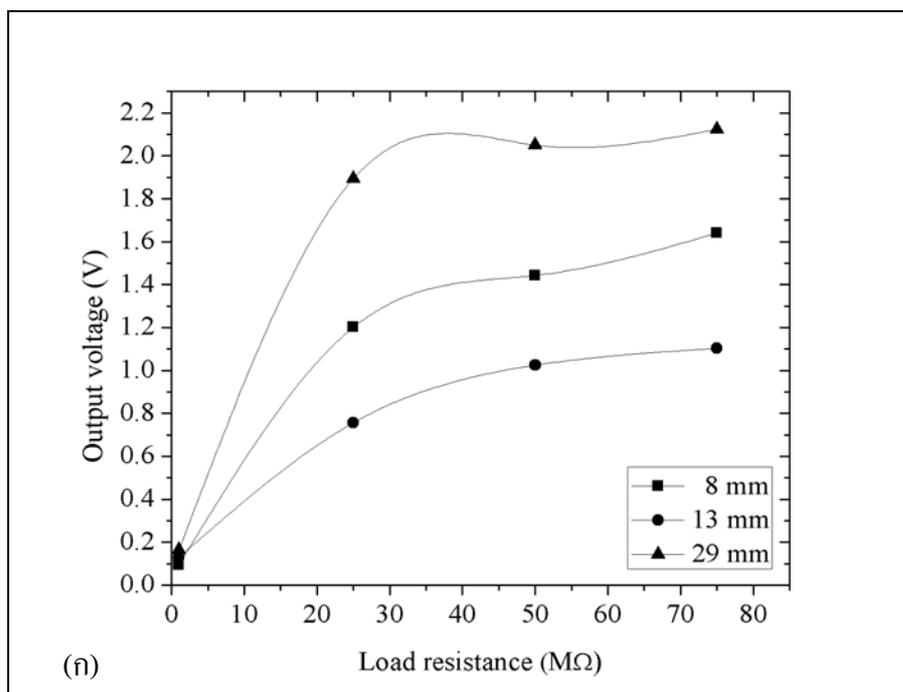
รูปที่ ก.10 ผลของค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่าง APC 850 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz (ต่อ)



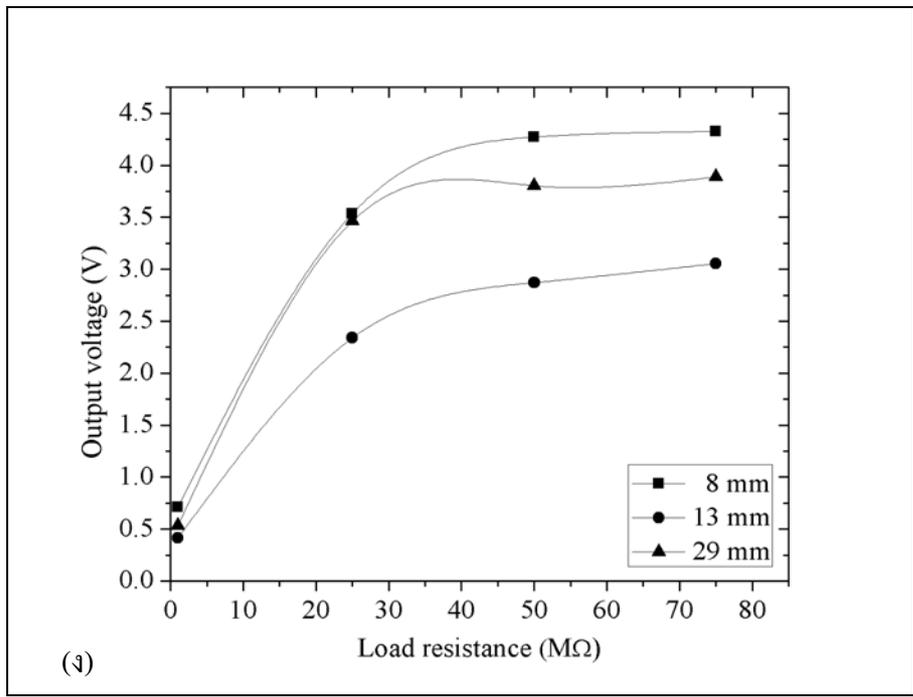
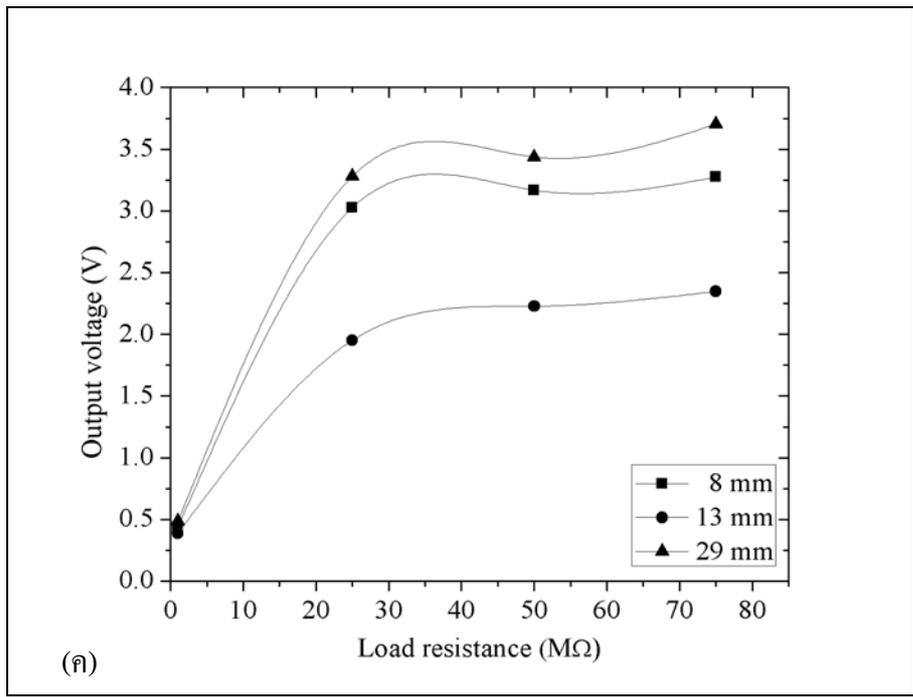
รูปที่ ก.11 ผลของค่าความต้านทานต่อแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่าง APC 840 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz



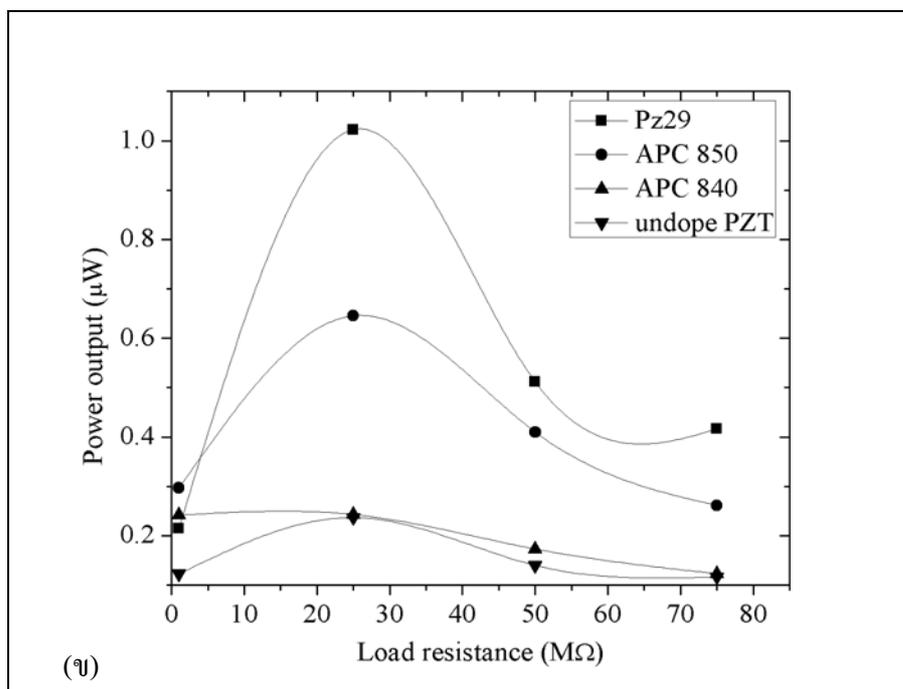
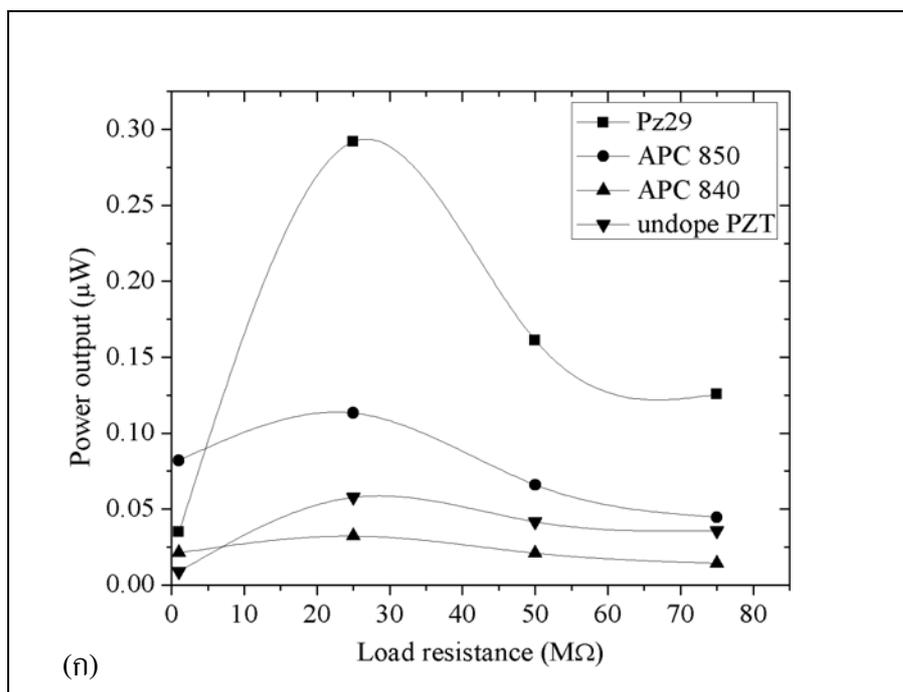
รูปที่ ก.11 ผลของค่าความต้านทานต่อแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่าง APC 840 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz (ต่อ)



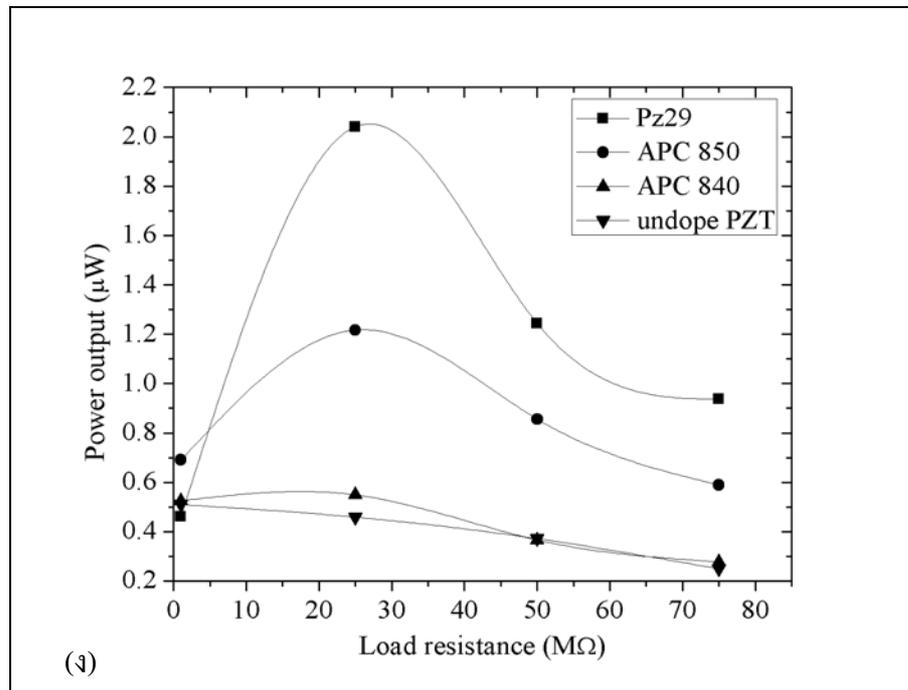
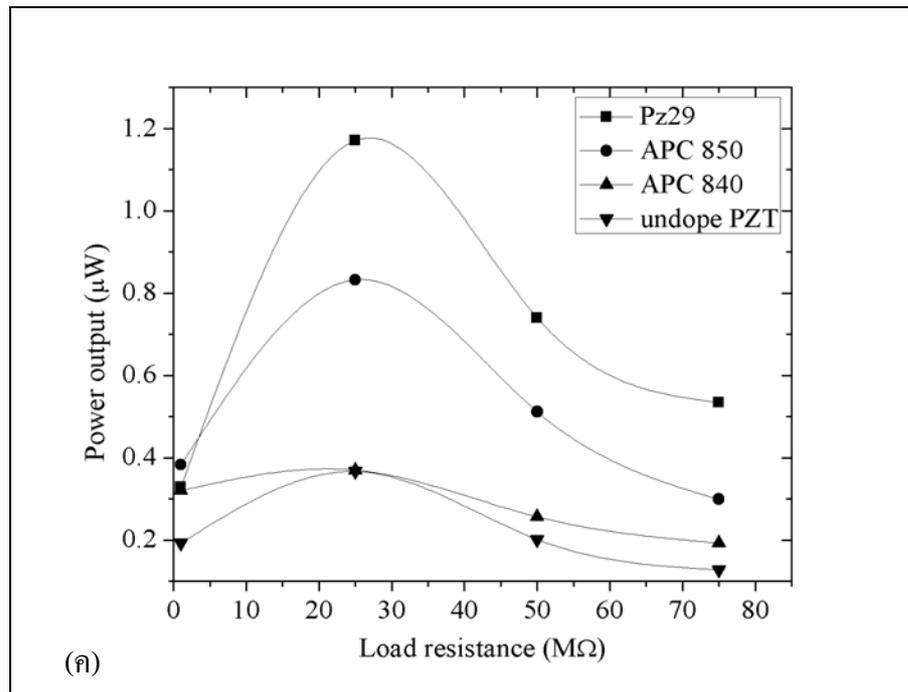
รูปที่ ก.12 ผลของค่าความต้านทานต่อแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่าง undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz



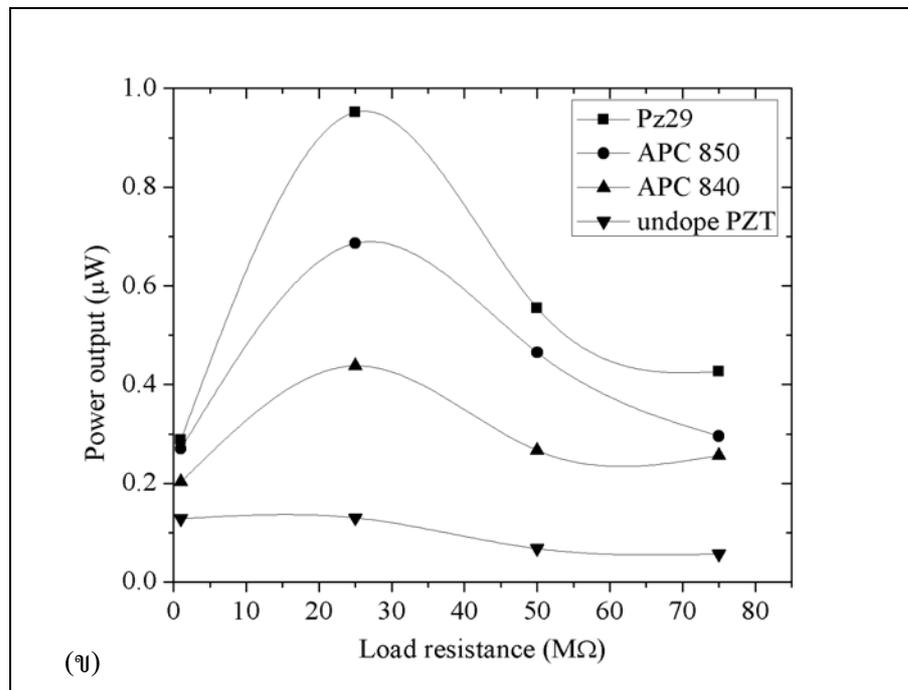
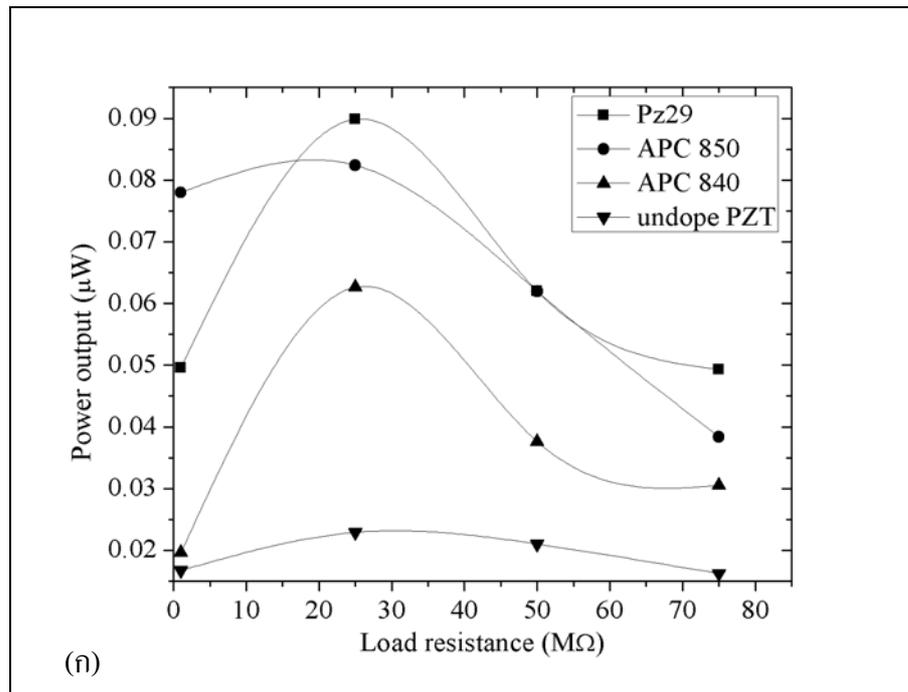
รูปที่ ก.12 ผลของค่าความต้านทานต่อแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่าง undoped PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ โดย apply แรงกระทำ (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz (ต่อ)



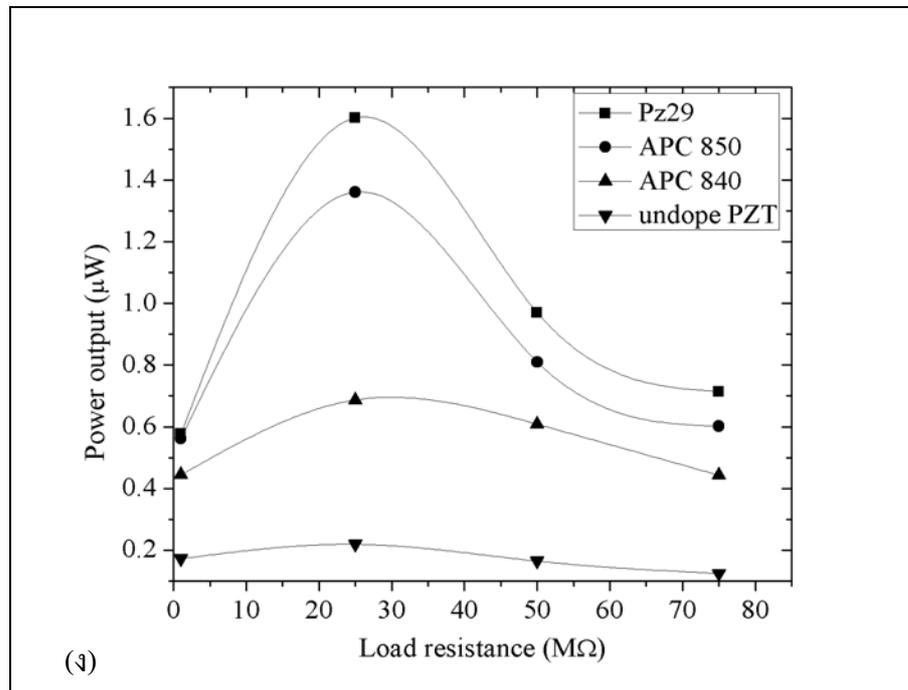
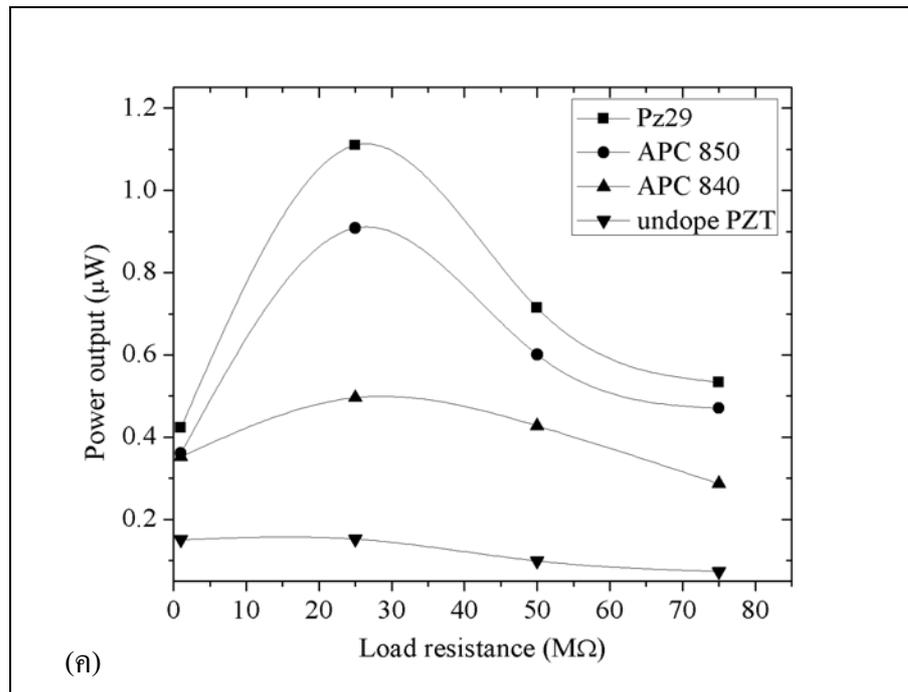
รูปที่ ก.13 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรง (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz



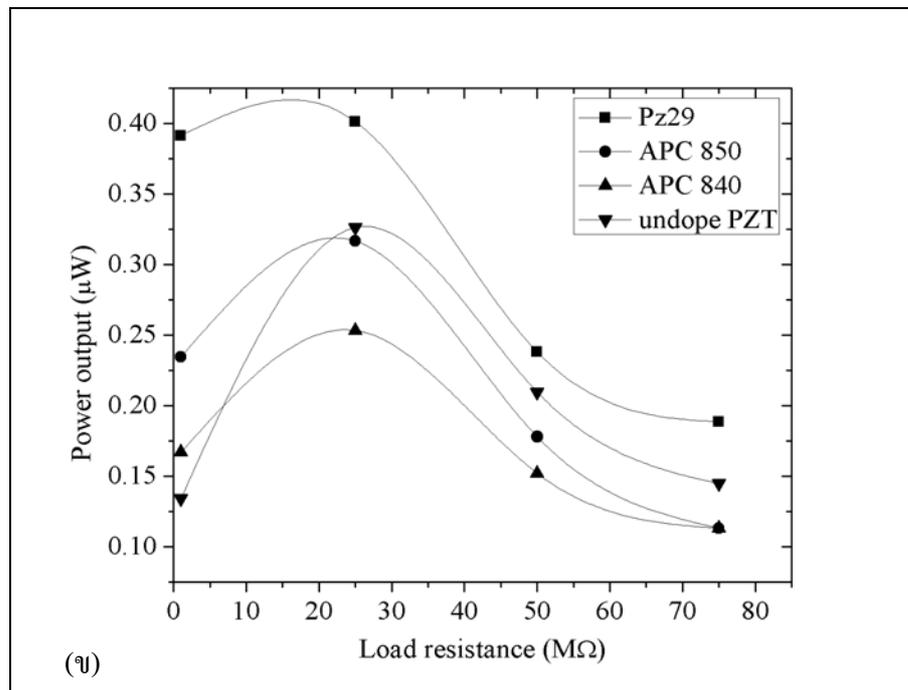
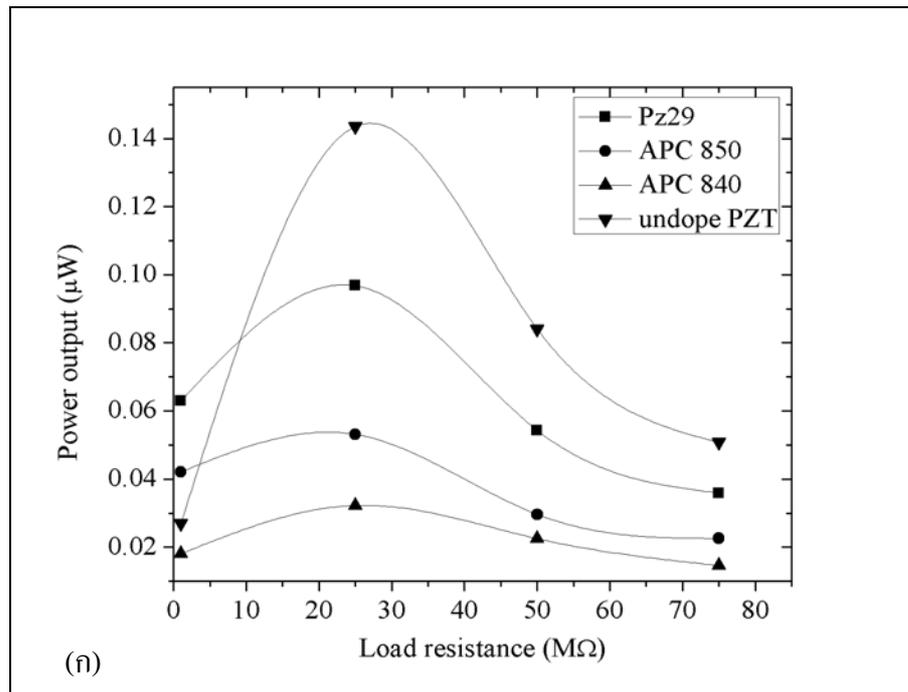
รูปที่ ก.13 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรง (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz (ต่อ)



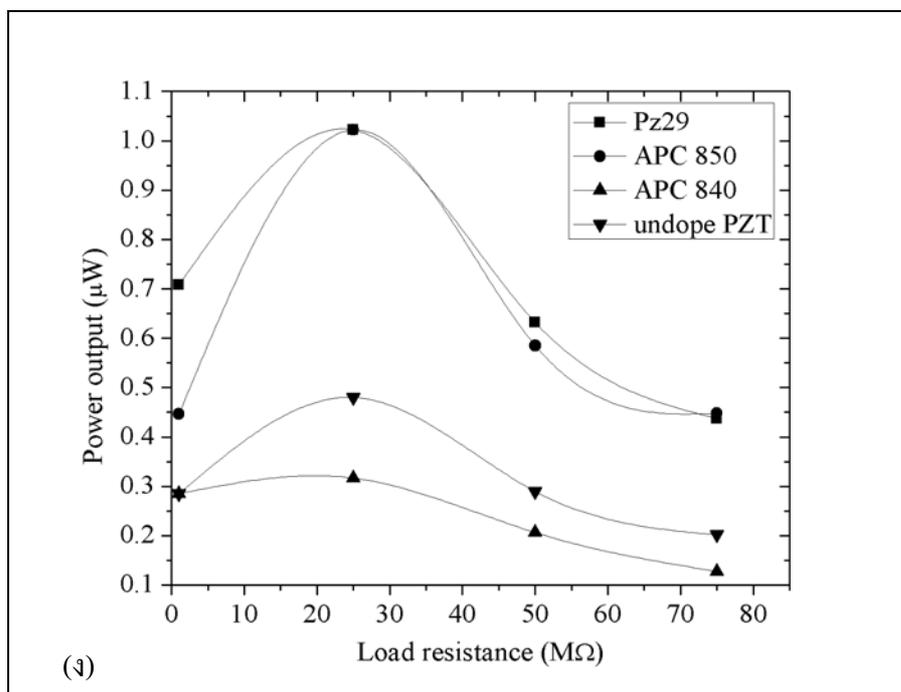
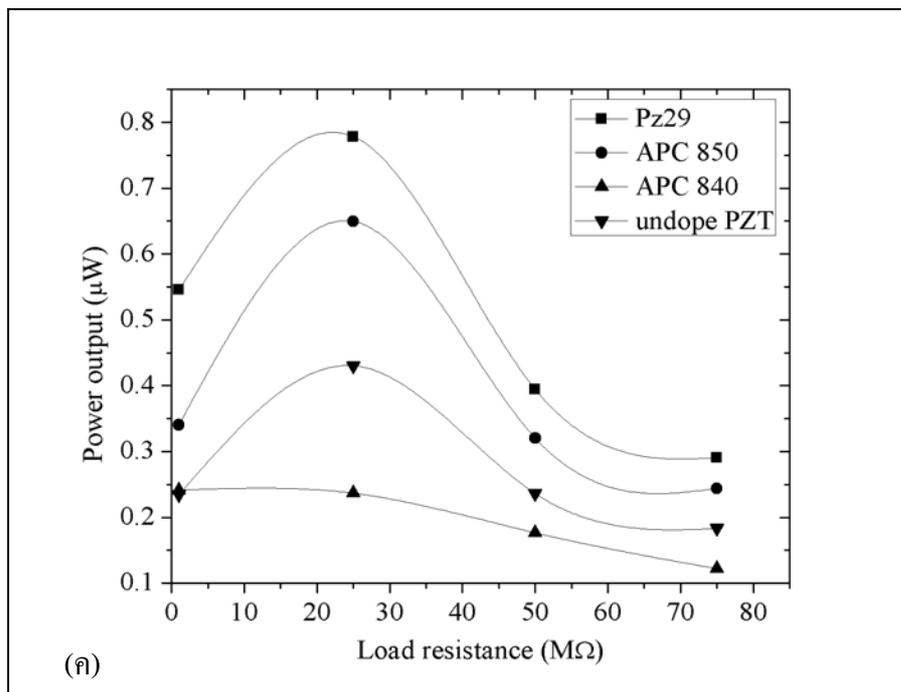
รูปที่ ก.14 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรง (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz



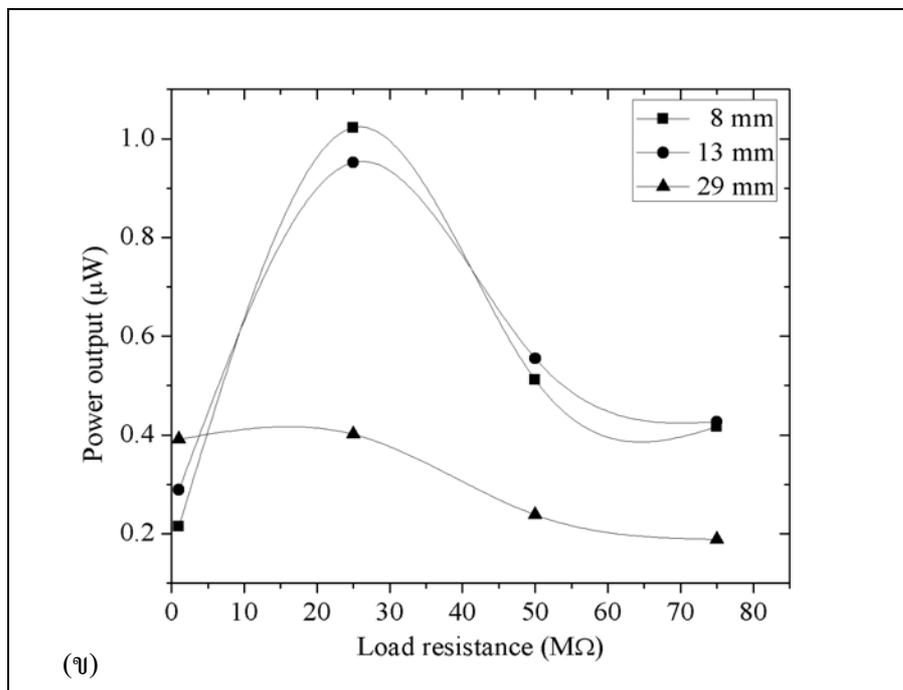
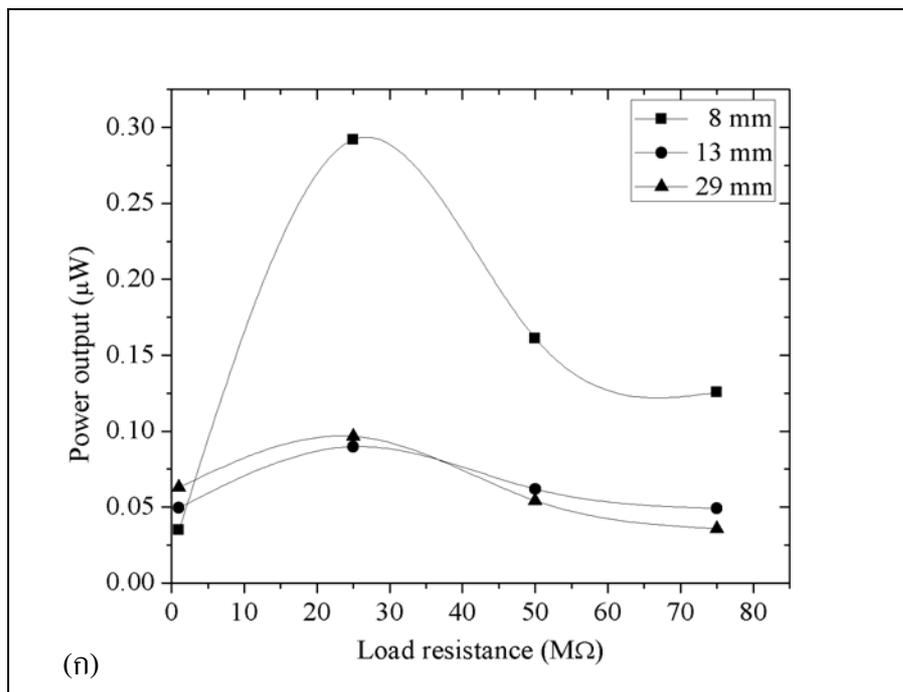
รูปที่ ก.14 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรง (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz (ต่อ)



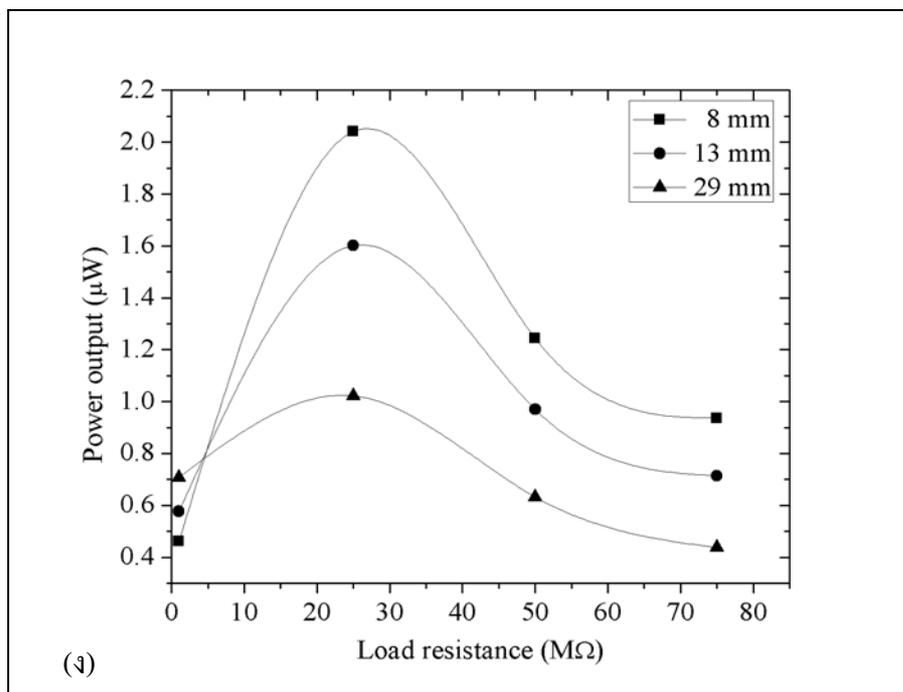
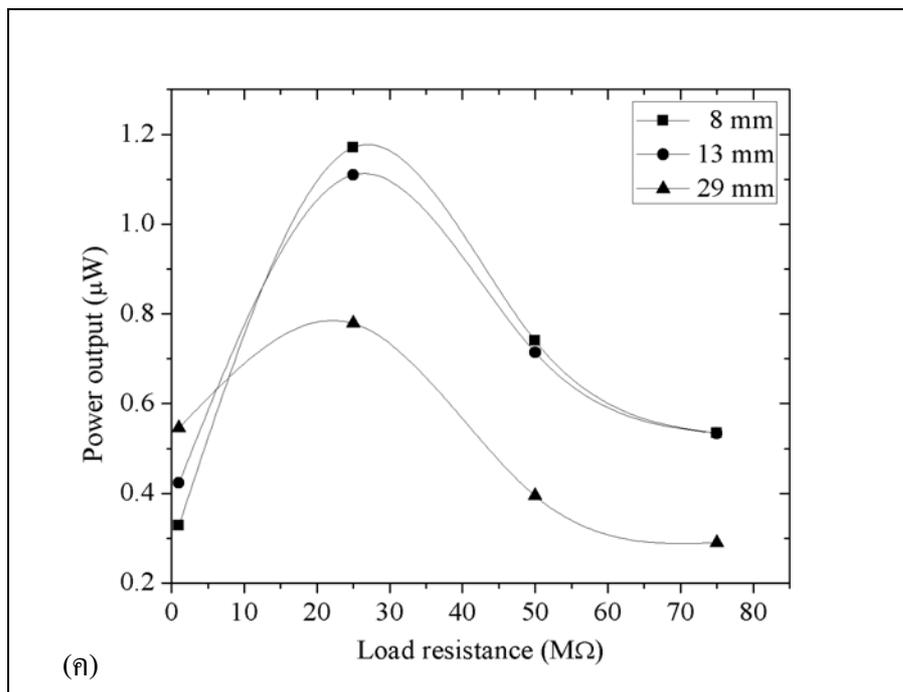
รูปที่ ก.15 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรง (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz



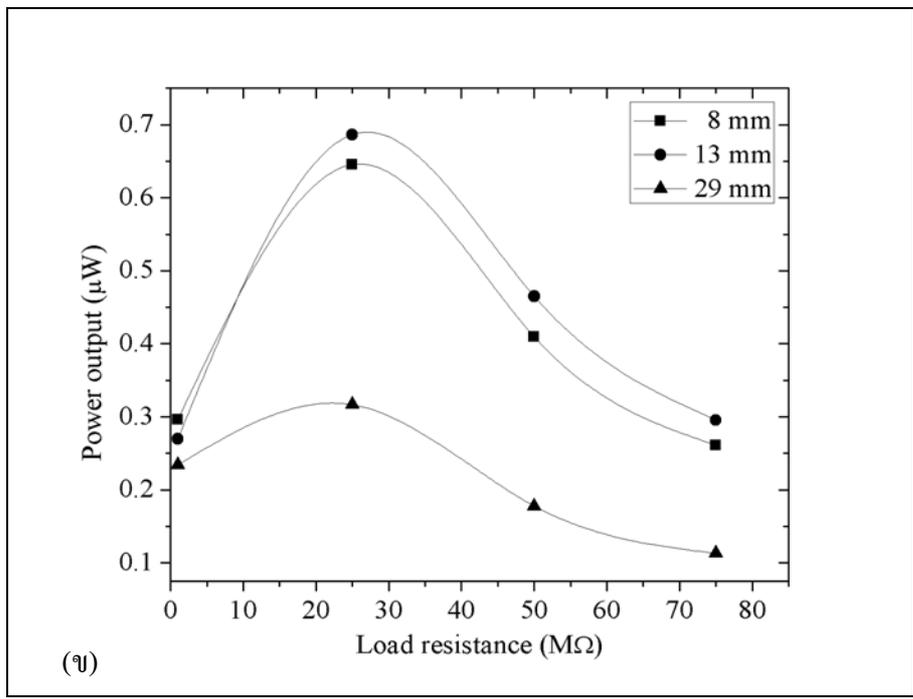
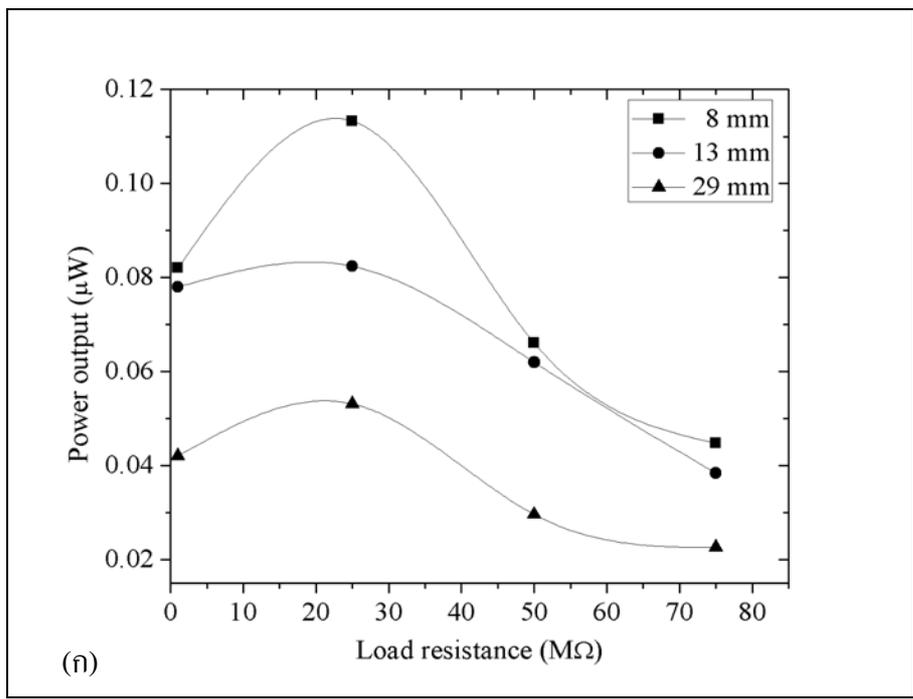
รูปที่ ก.15 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของ PZT ทั้ง 4 ชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร เมื่อ apply แรง (ก) 100 N (ข) 200 N (ค) 300 N (ง) 400 N ความถี่ทางกลในช่วง 0.5-0.8 Hz (ต่อ)



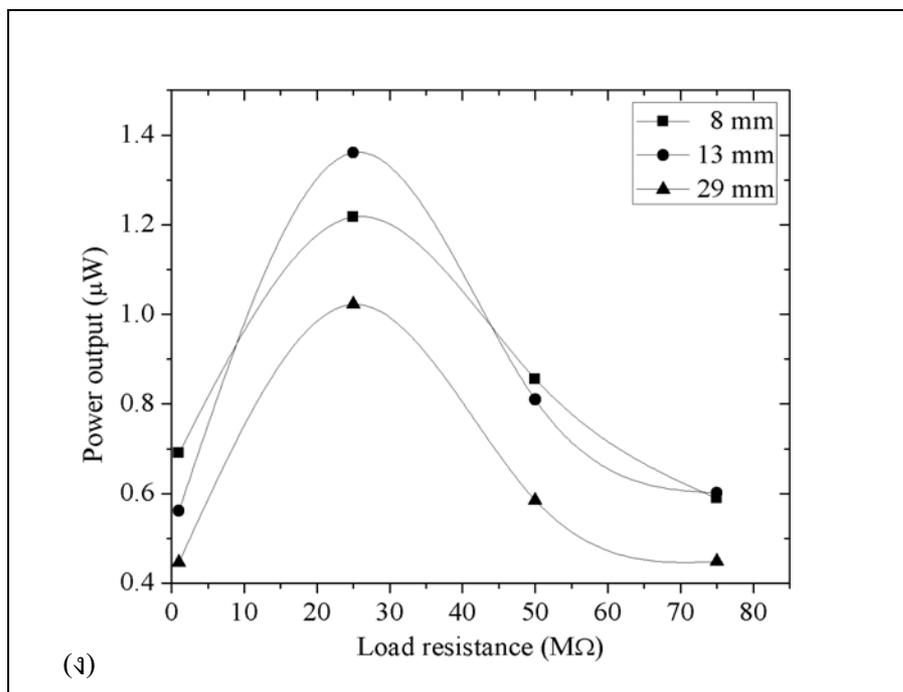
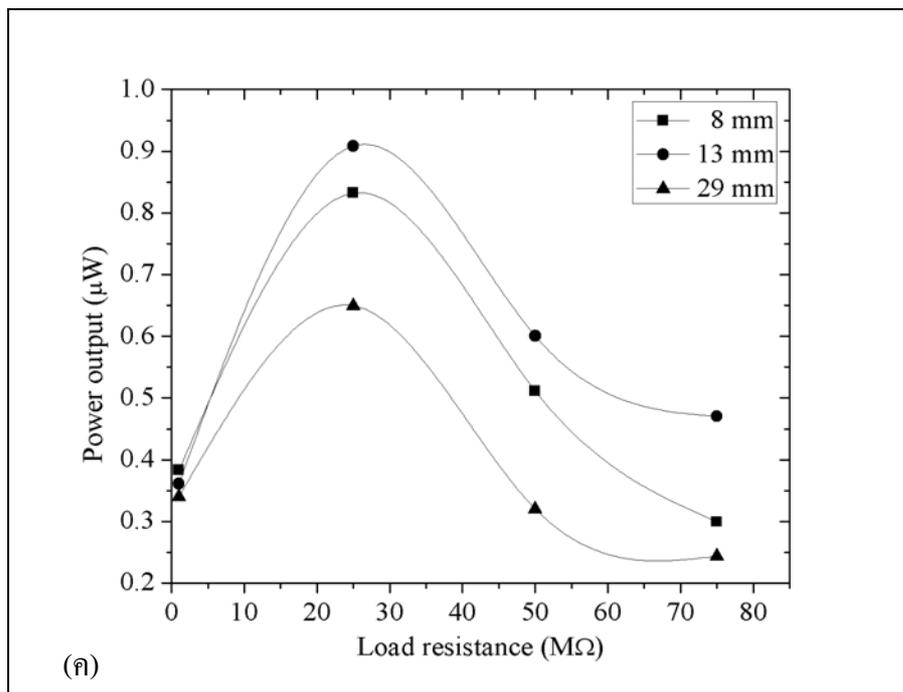
รูปที่ ก.16 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของชิ้นตัวอย่าง Pz29 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เมื่อ apply แรงทางกล (ก) 100 (ข) 200 (ค) 300 (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz



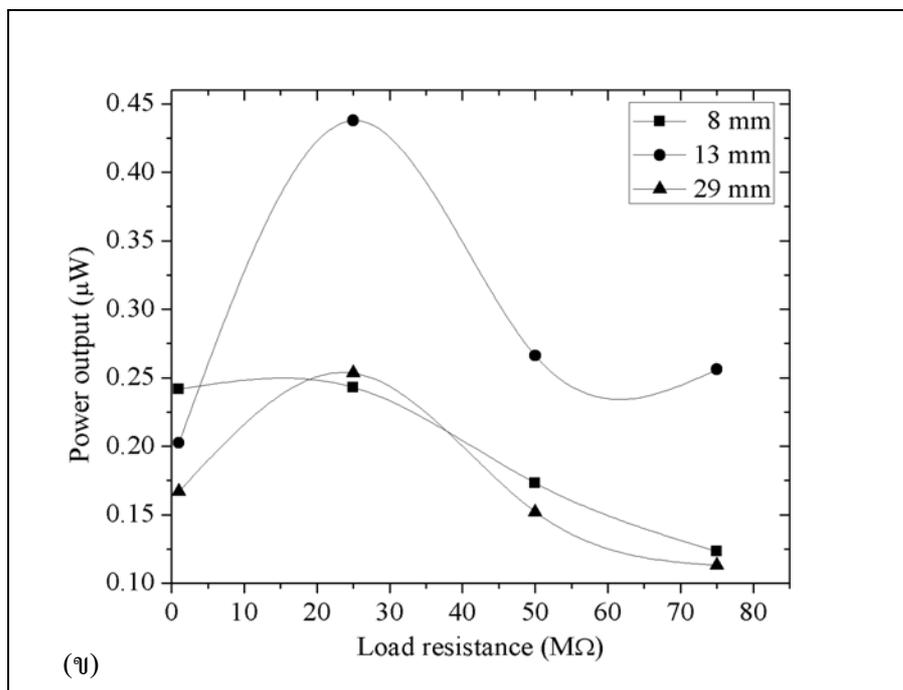
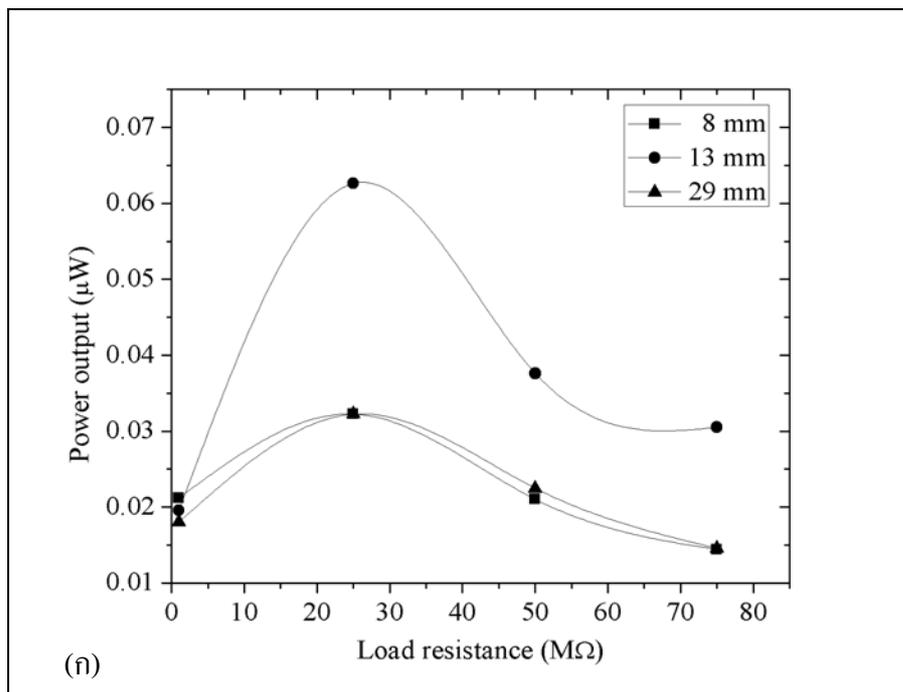
รูปที่ ก.16 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของชิ้นตัวอย่าง Pz29 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เมื่อ apply แรงทางกล (ก) 100 (ข) 200 (ค) 300 (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz (ต่อ)



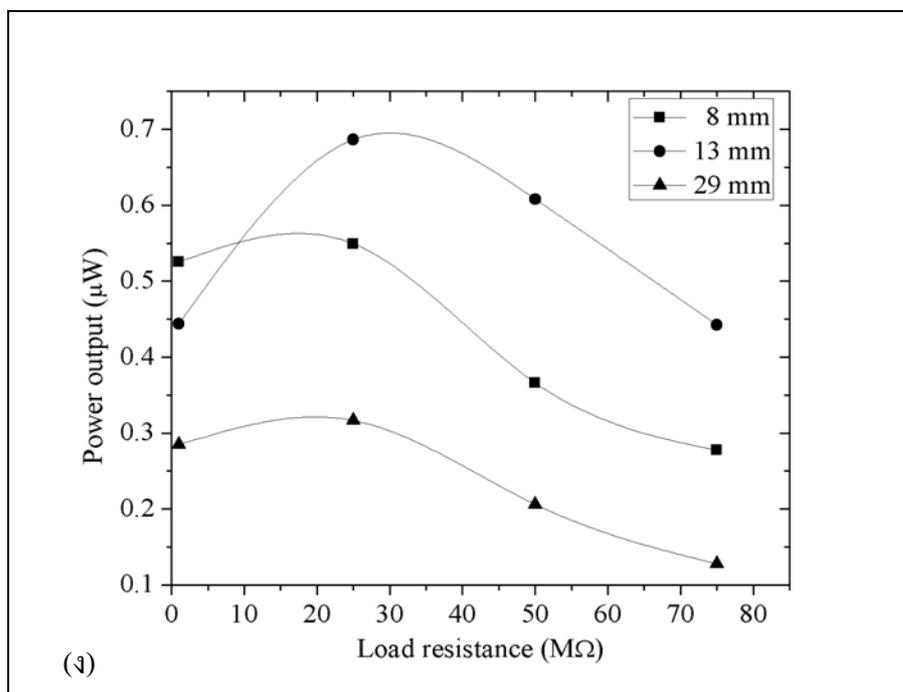
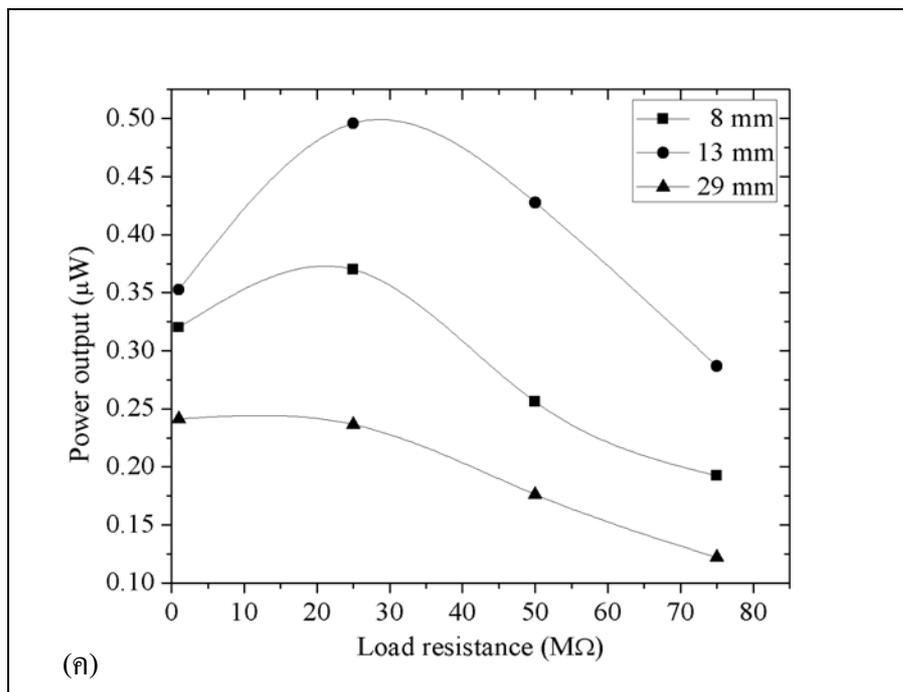
รูปที่ ก.17 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของชิ้นตัวอย่าง APC 850 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เมื่อ apply แรงทางกล (ก) 100 (ข) 200 (ค) 300 (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz



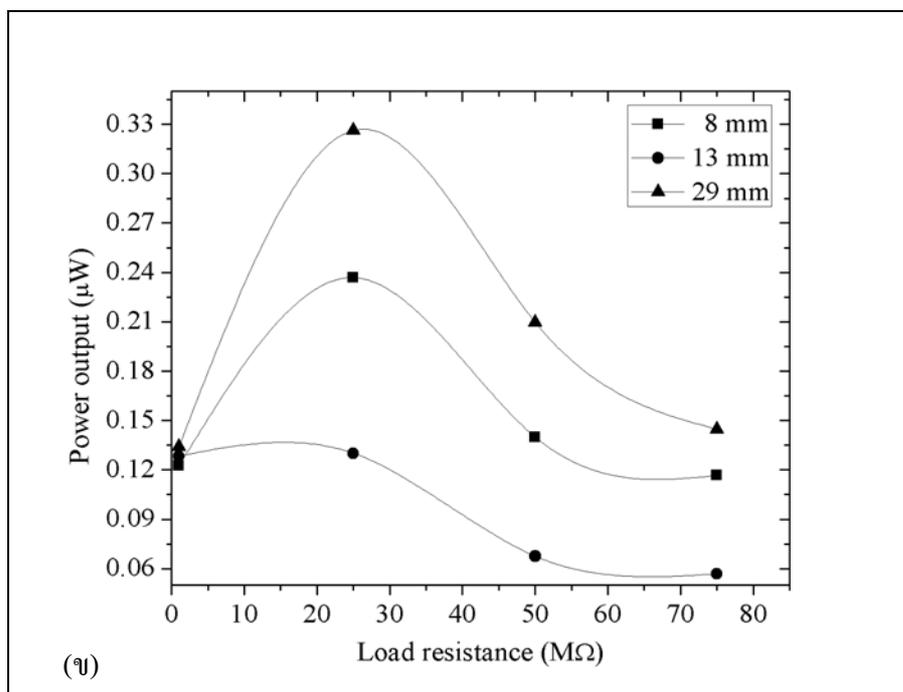
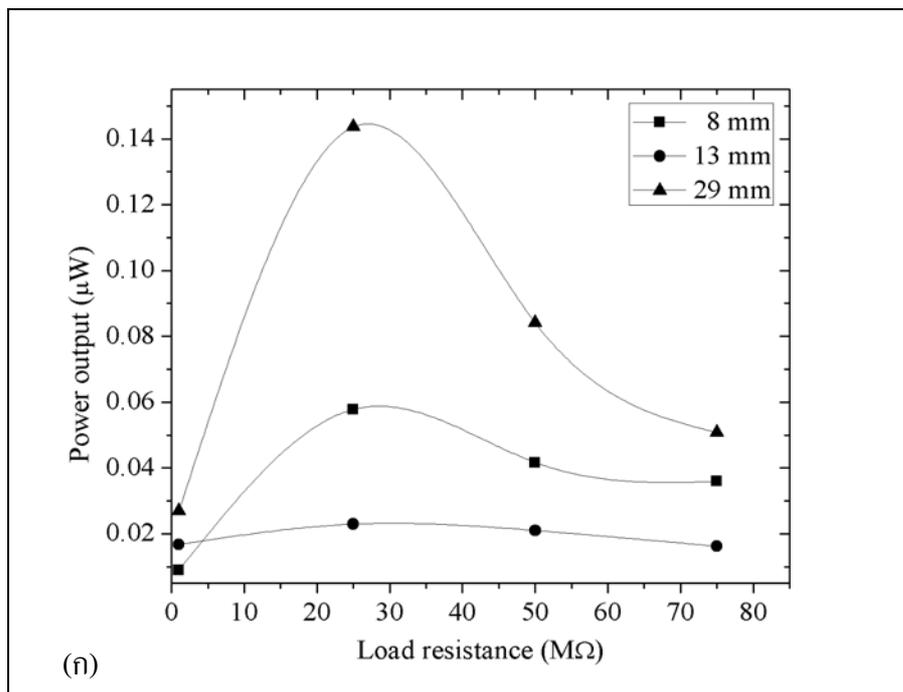
รูปที่ ก.17 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของชิ้นตัวอย่าง APC 850 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เมื่อ apply แรงทางกล (ก) 100 (ข) 200 (ค) 300 (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz (ต่อ)



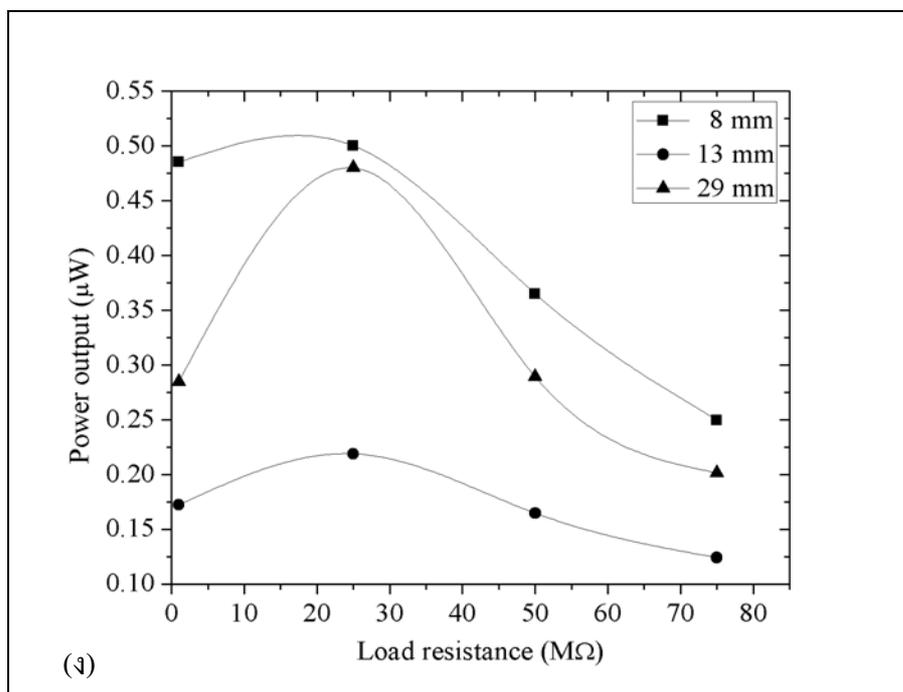
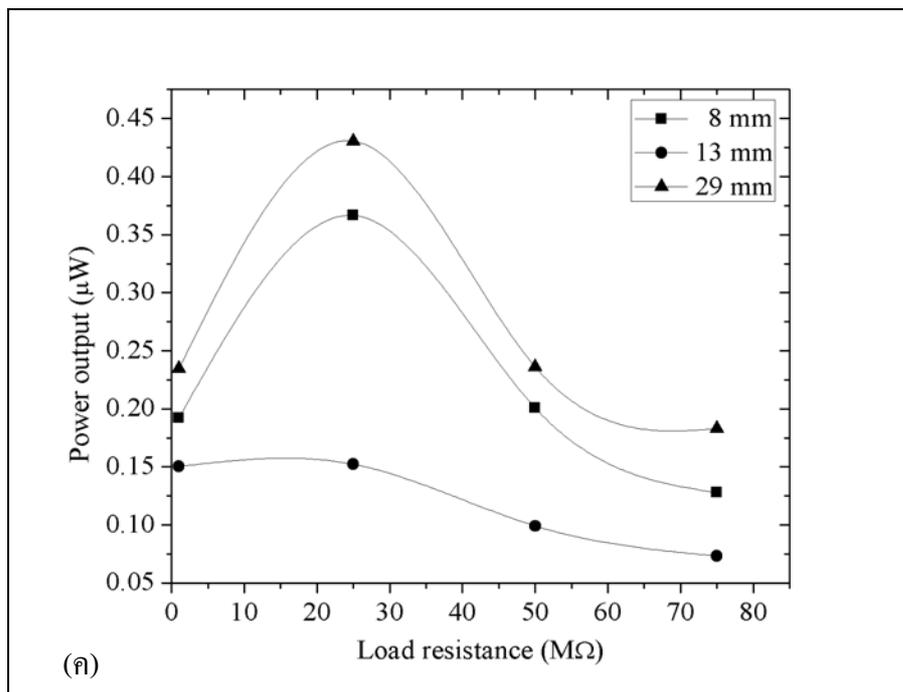
รูปที่ ก.18 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของชิ้นตัวอย่าง APC 840 ที่มีขนาด
เส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เมื่อ apply แรงทางกล (ก) 100 (ข) 200
(ค) 300 (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz



รูปที่ ก.18 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของชิ้นตัวอย่าง APC 840 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เมื่อ apply แรงทางกล (ก) 100 (ข) 200 (ค) 300 (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz (ต่อ)



รูปที่ ก.19 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของชิ้นตัวอย่าง undoped PZT ที่มีขนาด
เส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เมื่อ apply แรงทางกล (ก) 100 (ข) 200
(ค) 300 (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz



รูปที่ ก.19 กำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานภายนอกของชิ้นตัวอย่าง undoped PZT ที่มีขนาด
เส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เมื่อ apply แรงทางกล (ก) 100 (ข) 200
(ค) 300 (ง) 400 N ความถี่ 0.5-0.8 Hz (ต่อ)

ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

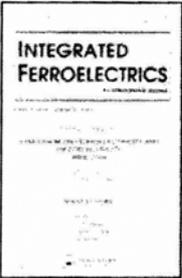
รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา

Putthongchai, N., Kulworawanichpong, T., Laoratanakul, P., and Srilomsak, S. (2010). **Effects of Composition and Diameter of PZT Transducers on Energy Harvesting**. Integrated Ferroelectrics Journal. 488604 (FC-052).

นิธิพนัน พุทธงชัย และ สุธรรม ศรีห่มสีก. (2553). การหาค่าแฟกเตอร์การคู่ความเชิงระนาบของวัสดุไพโซอิเล็กทริก. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 38(2): 271-288.



Manuscript Details

Title:	Effects of Composition and Diameter of PZT Transducers	
Journal:	Integrated Ferroelectrics	
Article ID:	488604 (FC-052)	
Lead Author:	Putthongchai	
Corresponding Author:	Putthongchai	
Status:	In Production (What's this?)	
Production Editor:	Kerry Stanley (Contact Production Editor)	

Manuscript Checklist



Copyright

A copyright agreement licensing us to publish this article has been received and accepted.



Proofreading

This article is not yet ready for Proofreading. Please check back **08 Jun 2010**

Manuscript Options

Funding Source 

Provide information on a funding source for this article

[Manuscripts List](#)



Central Article Tracking System

Trouble with this page? Contact CatsHelpDesk (catshelpdesk@informa.com)

[View the Taylor & Francis Author Services website](#)

Effects of Composition and Diameter of PZT Transducers on Energy Harvesting**Putthongchai N¹, Kulworawanichpong T², Laoratanakul P³ and Srilomsak S^{1*}**

¹School of Ceramic Engineering, Suranaree U. of Technology, Muang,
Nakhon Ratchasima 30000 Thailand.

²School of Electrical Engineering, Suranaree U. of Technology, Muang,
Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

³National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development
Agency, Thailand Science Park, Phatumthani 12120, Thailand.

*Corresponding author. E-mail address: sriloms@hotmail.com

ABSTRACT

Energy harvesting from wasted energy is a brilliant idea suitable for the world energy crisis. Piezoelectric materials such as Lead Zirconate Titanate (PZT) can be used to transform unused mechanical energy to electrical energy that can be stored and used to power electrical devices. Four types of PZT transducer with three different diameters were investigated in this work. The results indicated that the output voltage significantly varies with chemical composition, dimension and figure of merits (d_{33} , g_{33}) of PZT transducers.

Keywords: Energy harvesting, PZT transducers, Piezoelectric

ประวัติผู้เขียน

นายนิธิพนธ์ พุทธงชัย เกิดเมื่อวันที่ 4 มกราคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เริ่มการศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนจิระศาสตร์วิทยา ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนอยุธยาวิทยาลัย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2549 หลังจากนั้นสมัครเข้าศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษาในสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก ในปี การศึกษา 2550 ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน โดยใน ขณะศึกษาได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการรายวิชาปฏิบัติการวัดและทดสอบวัสดุเซรามิก และเป็นผู้ช่วยวิจัยของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ จำนวน 2 โครงการ ดังนี้ (1) ตัวทำ ความร้อนเซรามิกสำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน และ (2) แบตเตอรี่ไฟออิโซอิเล็กทริก สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ มีผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์โดยมีรายละเอียดปรากฏในภาค ผผนวก ข.