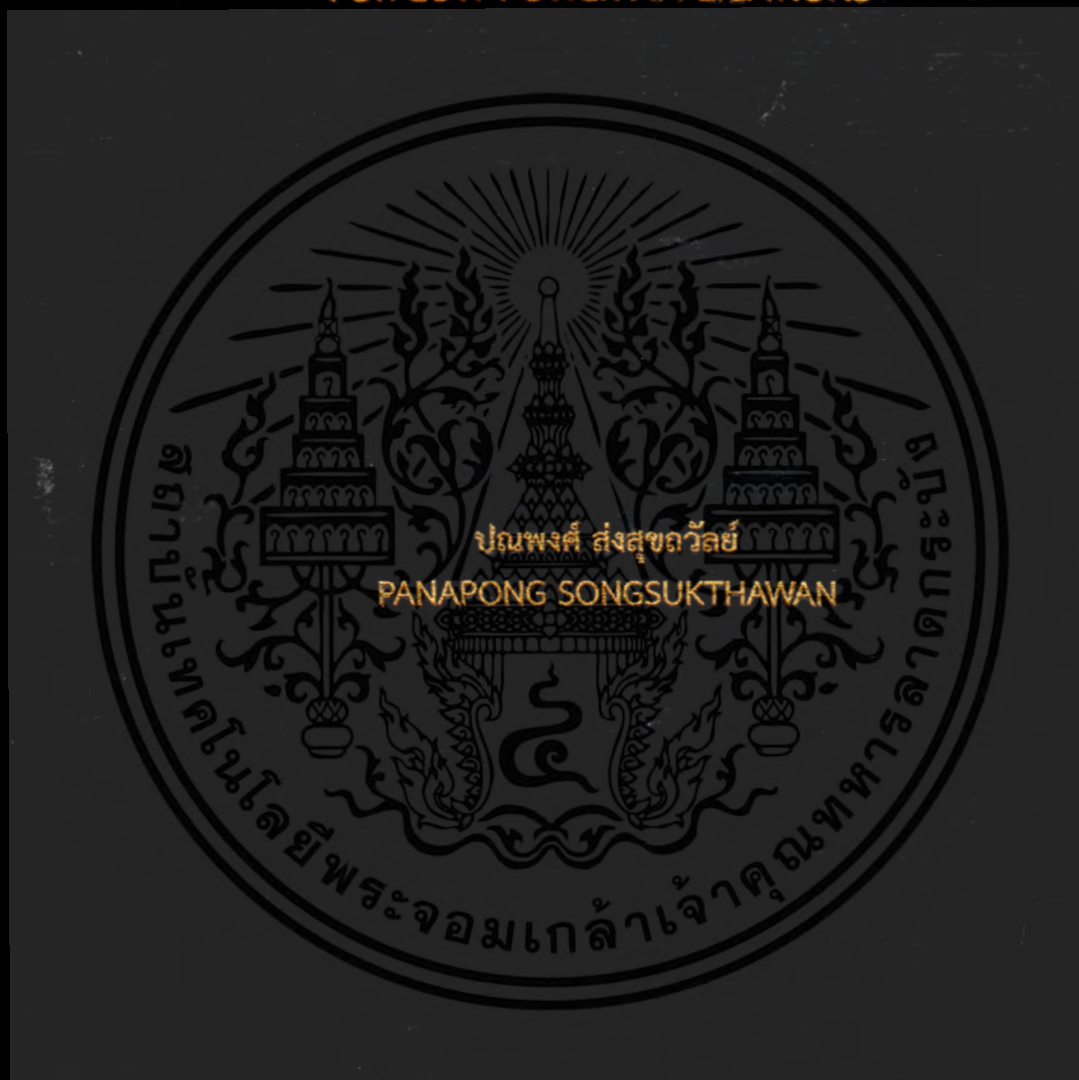


การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสำหรับ  
การประยุกต์ใช้งานกำลังไฟฟ้าต่ำ

ENERGY HARVESTING FROM PIEZOELECTRIC MATERIAL VIBRATION  
FOR LOW POWER APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-020-081

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสำหรับ  
การประยุกต์ใช้งานกำลังไฟฟ้าต่ำ

ENERGY HARVESTING FROM PIEZOELECTRIC MATERIAL VIBRATION  
FOR LOW POWER APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-020-081

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENERGY HARVESTING FROM PIEZOELECTRIC MATERIAL VIBRATION FOR  
LOW POWER APPLICATIONS

PANAPONG SONGSUKTHAWAN



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2018

KMITL-2018-EN-M-020-081

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสำหรับการประยุกต์ใช้งานกำลังไฟฟ้าต่ำ  
Thesis Title Energy Harvesting from Piezoelectric Material Vibration for Low Power Applications  
นักศึกษา นายปณพงค์ ส่งสุขถวัลย์  
รหัสประจำตัว 57601115  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-020-081

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ศุภี	บรรจงจิตร	
ผศ.ดร.นิรุช	จิรสวรรณกุล	
รศ.ดร.อรรถพล	เงาพิทักษ์กุล	
รศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
ผศ.ดร.ชัยยันต์	เจตนาเสน	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 11.15-13.15 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-303 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก สำหรับการประยุกต์ใช้งานกำลังไฟฟ้าต่ำ
นักศึกษา	นายปณพงค์ ส่งสุขถวัลย์
รหัสประจำตัว	57601115
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาระบบเก็บเกี่ยวพลังงานโดยอาศัยคุณสมบัติการแปลงพลังงานทางกลในรูปแบบการสั่นสะเทือนเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกเพื่อประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์กำลังไฟฟ้าต่ำ ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการเก็บสะสมพลังงานเพื่อใช้งานกับอุปกรณ์หรือระบบกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น โดยวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าและศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณกำลังไฟฟ้าที่สามารถเก็บเกี่ยวได้จากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนำไปสู่การเลือกชนิดของเพียโซอิเล็กทริกที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน จากผลการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าปรากฏว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกประเภทเลดเซอร์โคเนตไทเทนาต มีความเหมาะสมกับการใช้งานผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำ เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า ค่าความเก็บประจุ และความทนทานต่ออุณหภูมิที่สูง อีกทั้งมีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์เป็นพื้นกำเนิดพลังงานจากการสั่นสะเทือนเนื่องจากการก้าวเดินหรือการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ กล่าวคือมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอื่น ๆ ในระบบได้ง่าย การศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้วยแบบจำลองที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม OrCAD Pspice และ MATLAB Simulink อย่างไรก็ตามเนื่องจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่มีความคาบเกี่ยวระหว่างคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทำให้การวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณภาพสัญญาณทางไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อการออกแบบติดตั้งระบบที่มีประสิทธิภาพ จึงมีการนำระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์มาช่วยวิเคราะห์ผลตอบสนองทางกลเมื่อวัสดุได้รับแรงสั่นสะเทือน ไม่ว่าจะเป็นความถี่ธรรมชาติที่อาจเกิดขึ้นเมื่อติดตั้งวัสดุในลักษณะต่าง ๆ กัน โดยความถี่ธรรมชาติของวัสดุส่งผลอย่างมีนัยสำคัญกับพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ ความเค้นทางกลที่เกิดขึ้นในผิววัสดุซึ่งแปรผันโดยตรงกับพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับ แต่หากมีค่ามากเกินไปอาจทำให้วัสดุเกิดความเสียหายและสูญเสียคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางโครงสร้างนำเสนอด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench โดยแสดงผลในรูปแบบของคอนทัวร์แสดงถึงการกระจายตัวของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลตอบสนองทางกลและไฟฟ้าเนื่องจากแรงสั่นสะเทือน ผลการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้เพื่อการ  
ออกแบบพื้นกำเนิดพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพและไม่เกิดความเสียหายแก่  
เพียโซอิเล็กทริกที่ติดตั้งใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
||

<b>Thesis Title</b>	Energy Harvesting from Piezoelectric Material Vibration for Low Power Applications
<b>Student</b>	Mr. Panapong Songsukthawan
<b>Student ID.</b>	57601115
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2018
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Chaiyan Jettanasen

## ABSTRACT

This thesis presents a study of the energy harvesting system based on the piezoelectricity principle and energy conversion able to convert mechanical vibration energy into electrical form by piezoelectric material that can be applied to various low energy required applications or it can accumulate those amounts of energy in the energy storage device for higher power required systems. Analysis of electrical characteristics and study of the important parameters affecting the amount of power that can be harvested from the piezoelectric material are leading to the selection of the piezoelectric type. From the electrical analysis results, the piezoelectric device used as Lead Zirconate Titanate, which is suitable for electrical generation from low level energy vibration due to the high capacitance, mechanical-electrical conversion coefficient and temperature resistance along with their physical characteristics are suitable for the flooring application owing to their compact sizing and light weight and easy to be connected with other power electronics in the system. An electrical characteristic and model are developed by OrCAD PSpice and MATLAB Simulink program. However, since the piezoelectric material is that coupled between mechanical and electrical properties, the analysis of electrical characteristics and signal quality are not sufficient for efficient system design and installation. Finite element method is applied to analyze the structural response when the material is excited from vibration. For natural frequencies that can occur when different materials are installed, the natural frequency of the material significantly affects the energy that can

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ผู้ใช้เห็นชอบกับระเบียบข้อบังคับการนำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

be harvested. Mechanical stresses occur along the surface of the material, which are directly proportional with the harvested energy, but excessive amounts can damage the material and loses its properties. ANSYS Workbench presents the results in the form of contour demonstration of the distribution of mechanical and electrical response from vibration. Analytical results can be used to design efficiently power-generating floor with non-damaged piezoelectric materials.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ คำแนะนำปรึกษาตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัย ตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ และสถานที่ตลอดการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

สุดท้ายขอกราบเท้า คุณพ่อ วัลลภ ส่งสุขถวัลย์ และคุณแม่ สุภาวดี ส่งสุขถวัลย์ ผู้เป็นพรหมของ ลูกที่ให้กำเนิดชีวิต มอบ อดีต ปัจจุบัน และอนาคตให้กับผู้วิจัย ตลอดชีวิตที่ผ่านมาท่านทั้งสอง อบรม สั่งสอนและให้กำลังใจในการต่อสู้กับชีวิต รวมถึงทุกคนในครอบครัวสำหรับความช่วยเหลือและ กำลังใจที่มีให้กับผู้วิจัยตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ปณพงค์ ส่งสุขถวัลย์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	12
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	12
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	13
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	13
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา.....	14
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	16
2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	16
2.2 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก.....	17
2.3 การกำหนดทิศทางอ้างอิง.....	19
2.4 กระบวนการจัดเรียงขั้วหรือกระบวนการโพลี.....	20
2.5 การเก็บเกี่ยวพลังงาน.....	20
2.6 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก.....	21
2.7 การแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า.....	21
2.8 แอคชูเอเตอร์ของเพียโซอิเล็กทริก.....	22
2.9 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	28
3.1 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ .....	28
3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	33
3.3 การจำลองการประจุแบตเตอรี่ด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก .....	35
3.4 ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก .....	37
บทที่ 4 การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์โครงสร้าง.....	41
4.1 การศึกษาคุณลักษณะทางกล .....	41
4.2 การจำลองวัสดุเพียโซอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	42
4.3 การจำลองการติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเพื่อวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ .....	43
4.4 การจำลองความเค้นและความเครียดสะสมในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแบบต่าง ๆ .....	51
4.5 การจำลองผลตอบสนองทางกลของเพียโซอิเล็กทริก PZT5H .....	56
บทที่ 5 บทสรุป.....	61
5.1 สิ่งที่ต้องพัฒนาต่อไป.....	62
เอกสารอ้างอิง .....	63
ภาคผนวก.....	69
ประวัติผู้เขียน.....	769

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	สรุปขนาดแรงดันไฟฟ้าเมื่อต่อแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในลักษณะต่าง ๆ..... 35
3.2	สรุปเวลาในการประจุแบตเตอรี่ของการติดตั้งเพียโซอิเล็กทริกแบบต่าง ๆ ..... 36
4.1	ค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นโหมดต่าง ๆ เมื่อติดตั้งวัสดุในลักษณะยึดที่ส่วนฐาน..... 49
4.2	ค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นโหมดต่าง ๆ เมื่อติดตั้งวัสดุในลักษณะยึดรอบฐาน ..... 50
4.3	ค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นโหมดต่าง ๆ เมื่อติดตั้งวัสดุในลักษณะยึดปลายทั้งสองฝั่ง..... 50
4.4	ค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นโหมดต่าง ๆ เมื่อติดตั้งวัสดุในลักษณะยึดแบบคานยื่น..... 50
4.5	ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ..... 51
4.6	ผลการจำลองค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ ..... 56
4.7	ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างของเพียโซอิเล็กทริก PZT5H ..... 56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 วงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก .....	5
1.2 พื้นกำเนิดพลังงานที่สถานีโตเกียวประเทศญี่ปุ่น .....	6
1.3 ลักษณะการติดตั้งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่พื้นถนน .....	7
1.4 แบบจำลองทางขับ ที่ติดตั้งพื้นเพียโซอิเล็กทริก .....	8
1.5 พื้นถนนกำเนิดพลังงานประเทศจีน .....	9
1.6 แผ่นกำเนิดพลังงานติดตั้งที่ระบบรถไฟประเทศอิสราเอล.....	9
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเพียโซอิเล็กทริกและกลุ่มย่อยที่มีพื้นฐานของความสมมาตร .....	16
2.2 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางตรง .....	18
2.3 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกผกผัน.....	18
2.4 แกนอ้างอิงกำหนดทิศทางของพลังงาน .....	19
2.5 การไหลไรเซนชันของวัสดุเซรามิกเพื่อสร้างปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก.....	20
2.6 ลักษณะการทำงานแบบตามยาว Longitudinal Motor.....	23
2.7 ลักษณะการทำงานแบบตามขวาง Transverse Motor.....	23
2.8 ลักษณะการทำงานแบบสองชั้น .....	24
2.9 ลักษณะการติดตั้งแบบ Stack Generators .....	24
2.10 ประสิทธิภาพการทำงาน.....	25
2.11 คุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเทียบกับแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุชนิดอื่น .....	27
3.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริก .....	29
3.2 เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าจากวัสดุเมื่อได้รับแรงทางกลจริง .....	30
3.3 แบบจำลองทางไฟฟ้าเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสและโหลดตัวต้านทาน.....	31
3.4 กำลังไฟฟ้าสูงสุดละเปอร์เซ็นต์การฟุ้งเกินที่ค่าความต้านทานต่าง ๆ.....	31
3.5 กำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเก็บประจุภายในเพียโซอิเล็กทริก .....	32
3.6 กำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายในเพียโซอิเล็กทริก.....	32
3.7 กำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อเปลี่ยนแปลงคาบเวลาการป้อนแรงกระทำทางกลกับเพียโซอิเล็กทริก ....	33
3.8 แรงดันไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริก .....	34
3.9 สัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นอนุกรม.....	34
3.10 สัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นขนาน.....	34
3.11 วงจรไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการจำลองประจุแบตเตอรี่.....	35
3.12 รูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ .....	36
3.13 วงจรเก็บเกี่ยวพลังงาน LTC5388-2.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.14	วงจรควบคุมการประจุแบตเตอรี่ LTC4071 .....	37
3.15	การติดตั้งชุดทดลองเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก .....	38
3.16	แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานเทียบกับเวลา .....	39
3.17	แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานเทียบกับเวลา .....	39
3.18	แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานเทียบกับเวลาเมื่อต่อวงจรประจุแบตเตอรี่ .....	40
3.19	แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานเทียบกับเวลาเมื่อต่อวงจรประจุแบตเตอรี่ .....	40
4.1	การกระจัดเมื่อติดตั้งแบบยึดที่ส่วนฐาน (base fixed) ในการสั่นโหมดต่าง ๆ .....	44
4.2	การกระจัดเมื่อติดตั้งแบบยึดรอบฐาน (membrane fixed) ในการสั่นโหมดต่าง ๆ .....	46
4.3	การกระจัดเมื่อติดตั้งแบบยึดปลายทั้งสองฝั่ง (bridge fixed) ในการสั่นโหมดต่าง ๆ .....	47
4.4	การกระจัดเมื่อติดตั้งแบบยึดแบบคานยื่น (cantilever fixed) ในการสั่นโหมดต่าง ๆ .....	49
4.5	ผลเฉลยทางกลของวัสดุ PZT4 .....	52
4.6	ผลเฉลยทางกลของวัสดุ PZT5A .....	53
4.7	ผลเฉลยทางกลของวัสดุ PZT5H .....	54
4.8	ผลเฉลยทางกลของวัสดุ PZT8H .....	54
4.9	ผลเฉลยทางกลของวัสดุ BaTiO <sub>3</sub> .....	55
4.10	แบบจำลองโมดูล PZT5H .....	57
4.11	การกำหนดระยะยึดและระยะความยาวคานยื่นของการทดลอง .....	57
4.12	ผลเฉลยทางกลของวัสดุ PZT5H ที่ระยะยึด clamp6 .....	58
4.13	ผลเฉลยทางกลของวัสดุ PZT5H ที่ระยะยึด clamp0 .....	59
4.14	ผลเฉลยทางกลของวัสดุ PZT5H ที่ระยะยึด clamp-6 .....	59

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันพัฒนาการของเทคโนโลยีและลักษณะการดำเนินชีวิตของมนุษย์ล้วนเป็นสาเหตุให้ ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าทั่วโลกมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้น เรื่อย ๆ ในอนาคต ส่งผลให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศสูงขึ้นเนื่องจากการผลิต ไฟฟ้าส่วนใหญ่ในปัจจุบันผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันดิบ ถ่านหิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยมีการนำเอาก๊าซธรรมชาติมาผลิตไฟฟ้าสูงถึงร้อยละ 70 ของความต้องการใช้ ไฟฟ้าทั้งหมด ส่งผลกระทบอย่างรุนแรงและต่อเนื่องกับสภาพแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งชีวิตความเป็นอยู่ของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ รวมไปถึงมนุษย์ ทั้งภาครัฐและเอกชนจึงนำเทคโนโลยีพลังงานทดแทนมา เพื่อประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้ามากขึ้น เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดไม่ส่งผลเสียต่อระบบนิเวศน์ และสิ่งแวดล้อม และยังเป็นพลังงานที่สามารถนำมาใช้ใหม่ได้อย่างไม่มีวันหมดไป เช่น พลังงานจาก แสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานชีวมวล เป็นต้น

ปัจจุบันทางภาครัฐในส่วนของสภานโยบายวิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติได้ออกนโยบายส่งเสริม การวิจัยและนวัตกรรมอีกทั้งตั้งยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติเพื่อผลักดันและพลิกโฉม ประเทศไทย สร้างโอกาสและเพิ่มขีดความสามารถในระยะยาว โดยให้ความสำคัญกับกลุ่มเทคโนโลยี ที่หลากหลาย เทคโนโลยีด้านพลังงานทดแทนและการสะสมพลังงานก็เป็นอีกหนึ่งกลุ่มเทคโนโลยีที่มี ความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศให้มีความมั่นคงทางพลังงานที่ยั่งยืน สามารถลดต้นทุนการผลิตตอบ โจทย์การสร้างความมั่นคงทางเศรษฐกิจ พลังงานโดยใช้พลังงานหมุนเวียนที่มีอยู่ในธรรมชาติมาใช้ ประโยชน์ ลดผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ เพิ่มโอกาสการพัฒนาเศรษฐกิจและเพิ่มช่อง ทางการแข่งขันในภาคการผลิตและบริการเพื่อการสร้างเครือข่ายการพัฒนานวัตกรรมและการวิจัย ด้านพลังงานที่เข้มแข็งอย่างเป็นระบบ [1] ทางกระทรวงพลังงานจึงได้มีการประกาศยุทธศาสตร์ พลังงานเพื่อการจัดหาพลังงานให้เพียงพอต่อความต้องการ มีความมั่นคง และส่งเสริมการลงทุน รวมไปถึงการเพิ่มสัดส่วนการผลิตและการใช้พลังงานทดแทนต่อยอดไปถึงพัฒนาวัตถุดิบทางเลือกอื่น [2] มีการวางแผนอนุรักษ์พลังงาน (Energy Efficiency Plan : EEP 2015) มีเป้าหมายร่วมที่จะลด อัตราส่วนของปริมาณพลังงานที่ใช้ต่อผลของกิจกรรมหรือลดความเข้มการใช้พลังงาน (Energy Intensity, EI) ลงอย่างน้อยร้อยละ 45 ภายในปี พ.ศ. 2578 (ค.ศ. 2035) แทนที่ด้วยสัดส่วนการใช้ พลังงานทดแทนในการใช้ผลิตไฟฟ้าให้สูงขึ้นทุก ๆ ปีจนอาจเป็นพลังงานหลักในการผลิตไฟฟ้าใน อนาคตทั้งในระดับประเทศรวมถึงระดับการผลิตพลังงานโลก [3] วางเกณฑ์มาตรฐานการอนุรักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานบังคับใช้สำหรับอาคารสร้างใหม่หรือดัดแปลง กำหนดใช้ในพื้นที่ตั้งแต่ 2,000 ตารางเมตรขึ้นไป เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้สอดคล้องกับแผนอนุรักษ์พลังงาน มุ่งเน้นการออกแบบการใช้พลังงานทางเลือกมาช่วยในการลดภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงานอีกทั้งเป็นการลดความรุนแรงของภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้นอยู่ในปัจจุบัน [4]

อีกหนึ่งพลังงานทางเลือกที่จะช่วยลดการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงฟอสซิล ไม่สร้างมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไม่หมดไปเช่นเดียวกับเทคโนโลยีพลังงานทดแทนรูปแบบต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น กล่าวคือเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานจากพลังงานที่สูญเสียเปล่า (Waste Energy Harvesting) โดยมีแนวคิดในการนำเอาพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งเป็นผลได้จากกิจกรรมต่าง ๆ และสลายไปในสิ่งแวดล้อมหากไม่มีระบบกักเก็บและนำมาแปรรูปเป็นพลังงานไฟฟ้า อาจมีการนำพลังงานที่ได้รับสะสมไว้ในอุปกรณ์สะสมพลังงานเพื่อใช้งานสำหรับอุปกรณ์ที่ต้องการกำลังไฟฟ้สูงขึ้นไป ปัจจุบันเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานมีอยู่ด้วยกันหลากหลายรูปแบบ เช่น การเก็บเกี่ยวพลังงานจากระดับความแตกต่างของอุณหภูมิเปลี่ยนด้วยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) การเก็บเกี่ยวพลังงานจากพลังงานความร้อนด้วยวัสดุไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric) การเก็บเกี่ยวพลังงานจากความเค้นทางกลด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ด้วยความสามารถในการแปลงพลังงานเป็นพลังงานในรูปแบบที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และไม่มีข้อจำกัดด้านระยะเวลาในการเก็บสะสมพลังงานและข้อจำกัดเรื่องพื้นที่การติดตั้ง สามารถเชื่อมต่อกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ เพื่อดัดแปลงการใช้งานให้มีความหลากหลาย การเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจึงมีความน่าสนใจและมีการศึกษาพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยนิยมนำพลังงานที่ได้รับใช้ในระบบไร้สายและเซนเซอร์ [5-7] แต่หากใช้ปริมาณแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่มากเพียงพอผนวกกับพัฒนาจอร์อินเตอร์เฟส และเชื่อมต่อกับอุปกรณ์สะสมพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ ก็จะสามารถรวบรวมพลังงานที่มากพอเพื่อใช้กับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้ที่สูงขึ้นไป

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการติดตั้งพื้นที่กำเนิดพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และนำพลังงานที่ได้รับสะสมลงในแบตเตอรี่เพื่อให้ปริมาณพลังงานที่ได้รับสูงเพียงพอต่อการใช้งานไดโอดเปล่งแสง (LED) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการส่องสว่างที่กำลังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจึงเลือกมาศึกษาเพื่อใช้อุปกรณ์ให้แสงสว่างในระบบ วัสดุเพียโซอิเล็กทริกประเภทเลทเซอร์โครเนทไททานเนต (PZT) เป็นที่นิยมและนำมาใช้งานแพร่หลายมากที่สุดและเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งานในลักษณะของพื้นที่กำเนิดพลังงาน เพราะสามารถหาซื้อหรือขึ้นรูปได้ง่าย มีค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างแรงทางกลกับกำลังไฟฟ้ที่สูง สามารถทนต่อความร้อนได้ มีกำลังไฟฟ้ขาออกที่สูง [8-10] แต่มีข้อจำกัดตรงที่เป็นวัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นเซรามิกทำให้มีความเปราะและแตกหักง่าย จึงต้องมีการเสริมความแข็งแรงของตัววัสดุโดยการใช้แผ่นโลหะบางคั่นระหว่างเพียโซอิเล็กทริกสองแผ่น และใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถรับแรงจากน้ำหนักที่ตกลงบนตัวอุปกรณ์และไม่ทำให้อุปกรณ์แตกหักเสียหาย การออกแบบหน้าสัมผัสที่ใช้เหยียบแทนพื้นจะต้องไม่หนาจนเกินไปที่จะไม่ทำให้เกิดความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นทางกลที่ตัวอุปกรณ์และไม่สร้างกำลังไฟฟ้า จึงต้องมีการสร้างแบบจำลองทางกลวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีเชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ANSYS เพื่อหาจุดที่เหมาะสมสำหรับการนำเพียโซอิเล็กทริกทำพื้นกำเนิดพลังงาน เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการสร้างและทดลอง และความสะดวกรวดเร็วในการออกแบบระบบใช้งาน

จากการศึกษาทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่นในเอกสารอ้างอิงที่ [11] โดย Xiaofeng Li และ Vladimir Strezov ได้ทำการวิจัยและทดลองนำการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้งานในมหาวิทยาลัย Macquarie University ในประเทศออสเตรเลีย โดยติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งที่ได้ทำการเก็บสถิติไว้ว่ามีผู้คนเดินผ่านเป็นปริมาณมากโดยปุกระเบื่องที่ทำจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไว้ และได้ผลการทดลองเป็นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ 1.1 MWh ต่อปี โดยคาดว่าจะพัฒนาต่อไปอย่างต่อเนื่องให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงถึง 9.9 MWh ต่อปี ซึ่งจะช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของอาคารรวม 0.5% จากพลังงานที่สูญเสียไปโดยการเดินผ่านของผู้คน ในเอกสารอ้างอิงที่ [12] นำเสนอและจำลองติดตั้งเพียโซอิเล็กทริกกับพื้นถนนเพื่อนำพลังงานที่ได้มาใช้ในการทำงานตัวตรวจจับความเร็วและแสดงสัญญาณไฟกำกับความเร็ว (lane marker) พลังงานที่ได้จากการติดตั้งเพียงพอต่อการทำงานสามารถนำไปใช้งานเพื่อลดอัตราการเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยของ J.John และ M.Hemalatha ในเอกสารอ้างอิงที่ [13] ได้มีการทดลองระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเดินด้วยวิธีต่าง ๆ ผลปรากฏว่าการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีความหนาแน่นของพลังงาน 35.4 mJ/cm<sup>3</sup> ซึ่งสูงกว่าการเก็บเกี่ยวพลังงานจากไฟฟ้าสถิตและแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า นำพลังงานที่ได้ประจุลงแบตเตอรี่ประเภท Li-ion ใช้งานกับโทรศัพท์มือถือ และในเอกสารอ้างอิงที่ [14] Q. Zhu และคณะได้ทำการทดลองติดตั้งเพียโซอิเล็กทริกกับถนนเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานการสั่นสะเทือนเมื่อมียานพาหนะแล่นผ่าน ผลการทดลองสรุปได้ว่าพลังงานจากการสั่นสะเทือนเมื่อแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าแล้วมีปริมาณที่เพียงพอต่อระบบเซ็นเซอร์แต่สิ่งสำคัญและส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้คือการออกแบบโครงสร้างเพื่อให้มีความถี่ธรรมชาติมีค่าที่ใกล้เคียงกับความถี่ที่ป้อนให้แก่ตัววัสดุ

เนื่องจากงานวิจัยจำนวนมากได้มีการให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการศึกษาเรื่องความถี่ธรรมชาติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาติดตั้งใช้งานในลักษณะต่าง ๆ จึงมีการทบทวนวรรณกรรมเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการออกแบบโครงสร้างทางกลให้มีความเหมาะสมและความคุ้มค่าในการติดตั้งระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริก จากเอกสารอ้างอิงที่ [15] S.Y. Wang ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ เพื่อศึกษาการจำลองแบบสถิตและแบบพลวัต เปรียบเทียบกับแบบจำลองสองมิติ ผลปรากฏว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในสามมิติมีความถูกต้องแม่นยำเมื่อเทียบผลตอบสนองกับการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ต่อมาในเอกสารอ้างอิงที่ [16] X. Zhu และคณะได้ใช้โปรแกรม ANSYS เพื่อจำลองโครงสร้างของเพียโซอิเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งแบบคานยื่นในโหมดการสั่นต่าง ๆ เพื่อศึกษาลักษณะของการบิดตัวและออกแบบวงจรควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB ต่อมา A. Daniels และคณะได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของค่าพารามิเตอร์ทางกล-ไฟฟ้าต่าง ๆ ต่อกำลังไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้ ทดลองโดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก 25 ชนิดสรุปได้ค่าสัมประสิทธิ์การแปลงพลังงานทางกล-ไฟฟ้ามีผลต่อปริมาณกำลังไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้มากที่สุด

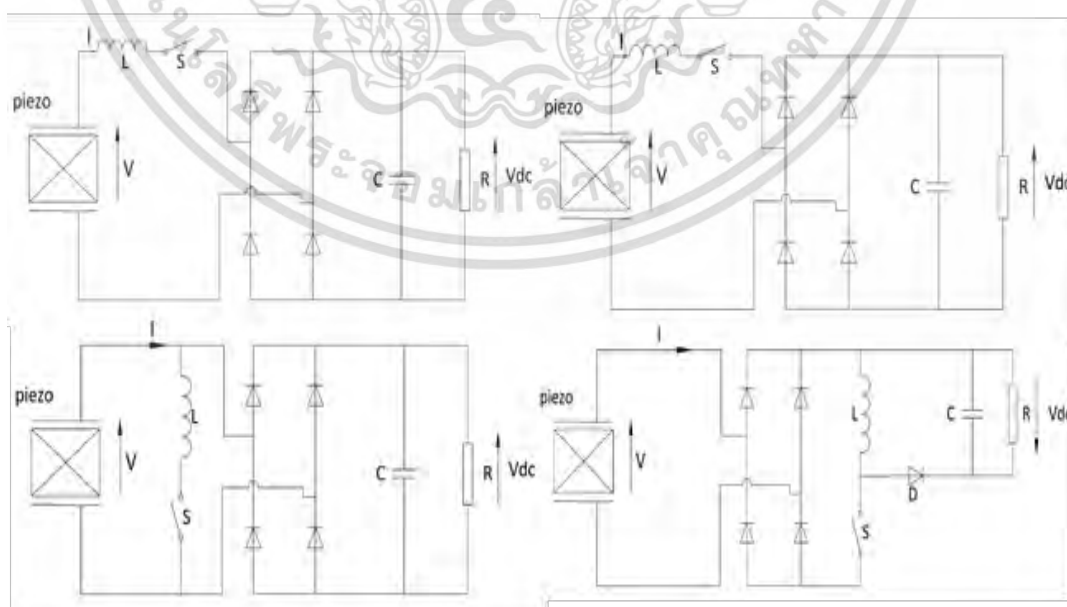
ในงานวิจัย [17] ศึกษาการออกแรงลงบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกโดยตรง ผลปรากฏว่าการแปลงรูปพลังงานจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อออกแรงกระทำที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ตามธรรมชาติของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก จากสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric material) ที่อ้างอิงในเอกสาร [18-20] พบว่าโดยทั่วไปนิยมใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก เช่น วัสดุผสมเลดเซอร์โคเนต-ไททาเนต (PZT) เนื่องจากโครงสร้างอะตอมของวัสดุผสมเลดเซอร์โคเนตไททาเนตเมื่อผ่านกระบวนการโพลิงหรือกระบวนการจัดเรียงไดโพลในเนื้อผลึกแล้วมีสภาพความเป็นขั้ว และมีสภาพยอมทางไฟฟ้าที่สูง ทำให้วัสดุผสมเลดเซอร์โคเนตไททาเนตเป็นที่นิยมเพราะมีค่าพลังงานไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้สูงที่สุดต่อราคาลงทุนในปัจจุบัน ซึ่งลักษณะการใช้งานมักจะไม่ได้วัสดุสัมผัสกับแรงโดยตรง และนิยมใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไฟฟ้าไม่สูงมาก อาทิงานวิจัยของ W.H. Liao และ T.H. Ng [21] พบว่าแผ่นเพียโซอิเล็กทริกนิยมใช้กับระบบเซนเซอร์และไร้สาย แต่หากใช้ปริมาณแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่มากพอผนวกกับพัฒนาวงจรอินเตอร์เฟสและเชื่อมต่อกับอุปกรณ์สะสมพลังงาน ก็จะสามารถรวบรวมพลังงานได้มากพอเพื่อใช้กับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นไป เช่นระบบส่องสว่าง เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยของ Xiaochen Zhang และ Ying Zhou [22] ก็ได้ใช้แรงสั่นสะเทือนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกซึ่งทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าและได้นำมากักเก็บไว้ที่แบตเตอรี่

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้ประโยชน์จากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก มีอยู่หลายอย่าง ขึ้นกับลักษณะของแรงกระตุ้นทางกลที่ป้อนให้กับวัสดุ เช่น ในเอกสารอ้างอิงที่ [23-24] นำไปใช้งานโดยเน้นการนำไปใช้งานกับสิ่งทอเพื่อการสวมใส่และผลิตพลังงานไฟฟ้ากับอุปกรณ์ที่ต้องการกำลังไฟฟ้าต่ำ สามารถนำมาใช้เป็นทรานสดิวเซอร์ในอุปกรณ์อัลตราโซนิก (ultrasonic) ทางการแพทย์ ชุดเตอร์กล้องถ่ายภาพ วาล์วไฮดรอลิก (hydraulic valve) เป็นต้น และในกรณีให้แรงแกว่งตัวทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า สามารถใช้เป็นอุปกรณ์จุดแก๊ส (gas ignitor) ในเตาเครื่องทำความร้อน ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator) ใช้เป็นตัวตรวจจับความดัน (pressure sensor) เป็นต้น ในทางการทหารมีการนำไปใช้มากเช่นกัน เนื่องจากน้ำหนักของแบตเตอรี่เป็นหนึ่งในข้อจำกัดในสนามรบจึงนิยมใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าไปใช้กับอุปกรณ์ไร้สาย เช่น วิทยุและการสื่อสารทางดาวเทียม

ดังนั้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำได้จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือ ในงานวิจัย [25-26] จะออกแรงกระทำต่อแผ่นเพียโซอิเล็กทริกทางอ้อม โดยใช้หลักการของคาน เพื่อที่จะได้มีการเก็บสะสมพลังงานได้มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าการป้อนแรงทางกลโดยตรง ในเอกสารที่ [26] ได้มีการใช้วงจรเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานการสั่นสะเทือนความถี่ต่ำของการเคลื่อนไหวของมนุษย์ และได้นำเสนอตัวเก็บเกี่ยวพลังงานไฮบริดจ์ ประกอบไปด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกติดตั้งในลักษณะคานยื่นและคู่แม่เหล็กถาวรโดยติดตั้งไว้บนหนึ่งที่ปลายคานยื่นและอีกอันหนึ่งที่มีขั้วตรงข้ามไว้กับแหล่งพลังงานทางกลในระยะที่ห่างออกไปเพื่อให้แรงแม่เหล็กช่วยให้เกิดการเคลื่อนไหวของเพียโซอิเล็กทริกและผลิตไฟฟ้าออกมาได้มากยิ่งขึ้นโดยไม่ต้องมีเครื่องสั่นเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานสูงสุดจากความถี่การสั่นธรรมชาติของวัสดุ ในเอกสารอ้างอิงที่ [27] มีการสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริกโดยแปลงค่าพารามิเตอร์ทางกลเป็นค่าทางไฟฟ้าทั้งหมดด้วยความสัมพันธ์ทางกล-ไฟฟ้า เพื่อให้ง่ายต่อการจำลองรูปคลื่นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยกล่าวไว้ว่าเมื่อเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงกระทำทางกลพลังงานจะถูกเก็บไว้ในตัวอุปกรณ์ในรูปของพลังงานศักย์และเมื่อไม่ได้รับแรงกระทำจะเปลี่ยนพลังงานที่เก็บไว้เป็นพลังงานจลน์แล้วสั่นต่อไปด้วยความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์จนครบคาบของการสั่น จึงได้จำลองวงจรไฟฟ้าโดยแบ่งวงจรเป็นช่วงที่ได้รับแรงและไม่ได้รับแรงใช้สวิทช์สองตัวทำงานสลับกัน โดยทำการตั้งค่าความถี่ของแหล่งจ่ายตามความถี่ของการย่ำเดิน รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองมีลักษณะที่คล้ายกับการทดลองจริง สามารถนำไปใช้สำหรับการศึกษาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าได้ ต่อมาแนวคิดร่องเท้ากำเนิดพลังงาน [28-31] เกิดขึ้นโดยที่มีการติดตั้งวงจรเรียงกระแสเพื่อให้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกจากการก้าวเดินที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับแปลงเป็นกระแสตรงแล้วประจุลงแบตเตอรี่ขนาดเล็กแต่มีความจุเพียงพอสำหรับอุปกรณ์พกพาต่างๆ เช่น โทรศัพท์มือถือ ลักษณะการติดตั้งและรูปคลื่นสัญญาณได้อธิบายไว้ในเอกสารที่ [28-29] ตัวอย่างวงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกได้แสดงไว้ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 วงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเอกสารอ้างอิงที่ [30] ได้ทดสอบร่องเท้ากำเนิดพลังงานโดยการเดินและวิ่ง ผลสรุปว่าการวิ่งทำให้ได้รับพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้เพิ่มมากขึ้นและสามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ในเอกสารที่ [31] มีการสรุปการใช้เพียงโซลิดสเตทเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์ในทางปฏิบัติว่าการประมวลผลและวงจรการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ รวมไปถึงเทคนิคการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ได้ค่าพลังงานที่สูงขึ้น เทคนิคการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (maximum power point tracking) สามารถนำมาใช้เพื่อการเก็บเกี่ยวพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง

ในส่วนของงานวิจัยต่าง ๆ ในต่างประเทศ [32] ที่มีการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในรูปแบบของการรับแรงจากการเดินของมนุษย์ การรับแรงจากรถยนต์บนท้องถนน และการรับแรงสั่นสะเทือนจากรถไฟ ที่เป็นสิ่งที่ต้องใช้ในชีวิตประจำวัน ได้นำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกใส่ไว้ตามสถานที่ที่ผู้คนสัญจรไปมาในปริมาณมาก ยกตัวอย่างเช่นในประเทศญี่ปุ่นได้ออกแบบติดตั้งพื้นกำเนิดพลังงานไว้ที่บริเวณช่องทางเดินเก็บค่าโดยสารรถไฟฟ้านิโตเกียว ดังรูปที่ 1.2 เพราะเป็นตำแหน่งที่มีความหนาแน่นของผู้คนต่อพื้นที่ที่สูงมาก จึงทำให้สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้มากโดยทำการเก็บเกี่ยวพลังงานจลน์จากการเดินผ่านของผู้ใช้บริการแล้วนำไปจ่ายให้กับช่องจำหน่ายตั๋วและระบบจอแสดงผล ได้ทำการติดตั้งเป็นพื้นที่รวม 25 ตารางเมตร ทั้งนี้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 1,400 กิโลวัตต์ต่อวัน



รูปที่ 1.2 พื้นกำเนิดพลังงานที่สถานีโตเกียวประเทศญี่ปุ่น

ในเอกสารอ้างอิงที่ [33] Guoliang Ye และคณะได้ทำการศึกษาสัญญาณทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในลักษณะการใช้งานเพียโซอิเล็กทริกกับพื้นถนนและสรุปไว้ว่าพลังงานที่ได้รับแปรผันโดยตรงกับแรงที่กระทำลงบนเพียโซอิเล็กทริกในลักษณะการติดตั้งแบบคานยื่น คานเพียโซอิเล็กทริกขนาดใหญ่ขึ้นจะยังสามารถได้รับพลังงานที่สูงขึ้นและการนำไปใช้กับรางรถไฟเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะพัฒนาต่อไป ในเอกสารอ้างอิงที่ [34] Takeshi Kasuga และคณะ ได้นำเสนอและจำลองการติดตั้งระบบส่องสว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้เป็นตัวแบ่งเลนในทางควอนตัมโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก ตัวเก็บประจุ และหลอดไฟแบบไดโอดเปล่งแสง ชนิดสว่างพิเศษ โดยหลอดไฟแบบไดโอดเปล่งแสง จะสว่างจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นเมื่อรถยนต์วิ่งผ่านบนวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ทำเป็นพื้นถนนแสดงไว้ดังรูปที่ 1.3 ความเร็วของรถยนต์มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ตัวแบ่งเลนรถยนต์นี้ไม่จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายภายนอกและมีอายุการใช้งานเป็นระยะเวลานาน ในเอกสารอ้างอิงที่ [35] M. Vazquez Rodriguez และคณะได้ทำการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและได้ติดตั้งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในพื้นที่ถนนในบริเวณมหาวิทยาลัยในรูปแบบต่าง ๆ นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันจากการทดลองพบสามารถยืนยันผลการทดลองได้และได้สรุปไว้ว่าพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้เพียงพอสำหรับการทำงานของเซนเซอร์ในระบบโยธาและการใช้งานบนท้องถนนได้ เช่นเดียวกับในเอกสารอ้างอิงที่ [36] ทำการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการวิ่งของรถยนต์แล้วนำไปใช้กับอุปกรณ์ไร้สายของ Qingyuan Zhu และคณะในลักษณะพื้นถนนที่ต่างกันและพิจารณาวงจรอินเทอร์เฟสในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบ และได้กล่าวไว้ว่าการใช้เพียโซอิเล็กทริกเป็นการลดปัญหาการติดตั้งและช่วยลดค่าบำรุงรักษาได้อย่างมาก การทดลองยืนยันว่าแรงสั่นสะเทือนจากรถยนต์เพียงพอสำหรับการนำพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้มาใช้กับระบบไร้สาย



รูปที่ 1.3 ลักษณะการติดตั้งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่พื้นถนน

ในอีกลักษณะหนึ่งที่น่ามาประยุกต์ใช้งานกับระบบรถยนต์นำเสนอบนโดย Pranjal Kaustubh และ Nishank Vaish ดังเอกสารอ้างอิงที่ [37] ได้นำเสนอการใช้เพียโซอิเล็กทริกพอลิเมอร์ติดตั้งภายในยางรถยนต์ ผลสรุปว่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ต่อหนึ่งล้ออยู่ระหว่าง 2.1-2.8 โวลต์ จึงใช้ค่าที่ได้ต่ำสุดคือ 2.1 มาคำนวณรวมสี่ล้อได้แรงดัน 8.1 โวลต์ เมื่อผ่านวงจรเรียงกระแสแรงดันจะอยู่ที่ประมาณ 6.57 โวลต์ นำไปผ่านวงจรทบระดับแรงดันได้แรงดัน 24 โวลต์ ที่กระแสไฟฟ้า 3.2 แอมป์ สามารถนำไปประจุลงแบตเตอรี่ประเภท NiMH 20 โวลต์ 10 แอมป์ชั่วโมงใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 3.1 ชั่วโมง และในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ของงานชิ้นนี้แล้วไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิงที่ [38] โดย Samer A. Rajab ได้นำเพียโซอิเล็กทริกไปใช้งานสำหรับเป็นเซนเซอร์ในการแยกประเภทรถยนต์ขนาดต่าง ๆ กันและรถจักรยานยนต์ ได้ผลออกมามีความถูกต้องแม่นยำและสามารถใช้งานได้จริง ในเอกสารอ้างอิงที่ [39] ได้มีการวิจัยและทดลองของ Ysung-Tsi Wu และคณะ โดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเพื่อใช้ในอาคารอัจฉริยะ ซึ่งโดยทั่วไปภายในอาคารอัจฉริยะจะมีการติดตั้งเซนเซอร์ต่าง ๆ เพื่อตรวจวัดสิ่งแวดล้อมภายนอก อาทิ อุณหภูมิและแสงสว่าง เพื่อทำการปรับบรรยากาศภายในแบบอัตโนมัติให้เหมาะสม ภายในอาคาร ช่วยในการประหยัดพื้นที่และความไม่สวยงามในการเดินสายไฟ ในเอกสารอ้างอิงที่ [40] Chung S. Leung และคณะได้นำเสนอการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาใช้งานภายในสนามบินโดยทำงานเป็นเซนเซอร์การตรวจสอบการเคลื่อนที่และนับจำนวนเครื่องบินบนพื้นที่บนสนามบินที่จัดเตรียมไว้สำหรับให้เครื่องบินขับเคลื่อนระหว่างลานจอดอากาศยานกับทางวิ่ง (taxiway) โดยสามารถทำงานแบบไม่ต้องมีแหล่งจ่ายภายนอกแต่ยังคงต้องการพัฒนาต่อไปในเรื่องของการติดต่อสื่อสารกับระหว่างเซนเซอร์แต่ละตัวในหลายพื้นที่บนสนามบินที่จัดเตรียมไว้ เพื่อเพิ่มความถูกต้องแม่นยำและความปลอดภัยต่อไปลักษณะของแบบจำลอง แสดงไว้ดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 แบบจำลองทางขับ ที่ติดตั้งพื้นเพียโซอิเล็กทริก

ในเอกสารที่ [41] เป็นการติดตั้งเซนเซอร์เพียโซอิเล็กทริกพื้นถนนในประเทศจีนตรงบริเวณทางม้าลายเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการข้ามถนนและประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสัญญาณไฟและเซนเซอร์และมีการทดลองพื้นกำเนิดพลังงานโดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ต่าง ๆ จากพลังงานจลน์เมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถยนต์วิ่งผ่านแล้วแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยติดตั้งเป็นเส้นตามขวางมีความกว้างไม่กี่เซนติเมตร แสดงไว้ดังรูปที่ 1.5 และได้เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางจากแนวคิดการเปลี่ยนความแออัดของการจราจรบนพื้นถนนเป็นแหล่งพลังงานสะอาด พลังงานที่ได้รับประมาณ 400 กิโลวัตต์ ต่อพื้นถนน กำเนิดพลังงาน 1 กิโลเมตร



รูปที่ 1.5 พื้นถนนกำเนิดพลังงานประเทศจีน

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงกดและความเค้นอัดจากการวิ่งของรถไฟก็เป็นอีกลักษณะหนึ่งที่ประเทศอิสราเอลได้ติดตั้งแผ่นกำเนิดพลังงานที่ทำด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจากที่เคยทดลองติดตั้งใช้งานกับทางด่วนเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานจากรถยนต์แล้วพัฒนาติดตั้งในระบบรถไฟภายในประเทศ แสดงไว้ดังรูปที่ 1.6 เพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานให้ได้มากยิ่งขึ้น โดยจะติดตั้งไว้ตามแนวล้อรถไฟ เมื่อรถไฟวิ่งผ่าน 10 คัน จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 120 กิโลวัตต์ พลังงานที่ได้เพียงพอสำหรับระบบการให้สัญญาณไฟในระบบรถไฟ



รูปที่ 1.6 แผ่นกำเนิดพลังงานติดตั้งที่ระบบรถไฟประเทศอิสราเอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันในต่างประเทศได้มีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการนำเอาพลังงานที่สูญเสียเปล่ามาใช้ให้เกิดประโยชน์ในหลากหลายสาขาวิชาไม่ว่าจะเป็นการประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ ในเอกสารอ้างอิงที่ [42] L. Minvielle และคณะได้ศึกษาประยุกต์ใช้งานเพียโซอิเล็กทริกเพื่อป้องกันการลัมของผู้ป่วยโดยใช้เพียโซเซ็นเซอร์สร้างพื้นอัจฉริยะเพื่อตรวจจับการลัมและการเรียนรู้ของเครื่องจักร (machine learning) ในการพัฒนาระบบอย่างต่อเนื่อง โดยไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกพบว่าระบบมีความถูกต้องแม่นยำในการตรวจจับถึง 94.4% ในเอกสารอ้างอิงที่ [43] Z. Chen และคณะได้ศึกษาการดัดแปลงวงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกโดยทำการเปรียบเทียบวงจร 3 รูปแบบ คือรูปแบบวงจรมาตรฐาน วงจรมาตรฐานเชื่อมต่อระหว่างเพียโซอิเล็กทริกกับวงจรเรียงกระแสด้วยสวิตช์ และวงจรแบบมาตรฐานเชื่อมต่อด้วยสวิตช์และตัวเหนี่ยวนำ (P-SSHI) โดยให้สวิตช์ทำงานต่อตัวเหนี่ยวนำเข้าวงจรในช่วงวงจรทำงานในช่วงไม่นำกระแส ซึ่งเป็นรูปแบบวงจรที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุด ต่อมาได้เพิ่มเติมการควบคุมสวิตช์เป็น 7 ชั้นต่อชุดตัวเก็บประจุเข้าในวงจร ผลปรากฏว่าวงจรที่นำเสนอเป็นวงจรใหม่ถึงแม้ได้พลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้น้อยกว่าวงจร P-SSHI แต่สามารถลดขนาดและน้ำหนักของวงจรได้อย่างมาก ผลงานวิจัยการติดตั้งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกภายในสันรองเท้าเพื่อรับแรงกดจากน้ำหนักตัวมนุษย์ ในเอกสารอ้างอิงที่ [44] ด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกหลายประเภท เช่น วัสดุเพียโซอิเล็กทริกผสมเซรามิก และวัสดุเพียโซอิเล็กทริกผสมโพลีเมอร์ทำการสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดย A. Ramos และคณะ ทดลองติดตั้งจริงในรองเท้ากีฬาแต่ละประเภทผลปรากฏว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ติดตั้งสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้ 13 โวลต์ ในระยะเวลา 4.5 วินาทีในรองเท้ากีฬาประเภทพื้นบาง

ในงานวิจัยที่ [45] D. Vasic และคณะสนใจการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกจึงศึกษาคำแนะนำการติดตั้งอุปกรณ์กับจักรยานเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าไว้ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พกพา ต่อมา D. Kumar และคณะนำเสนอการออกแบบชุดทดลองพื้นผลิตพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ในเอกสารอ้างอิงที่ [46] และวิเคราะห์สัญญาณทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อออกแบบวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานที่มีค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าต่ำ M. Arivalagan และคณะทำการศึกษาในเอกสารอ้างอิง [47] เกี่ยวกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริกและได้ออกแบบจำลองทางไฟฟ้าเพื่อการจำลองระบบและวิเคราะห์สเปกตรัมของการสั่นสะเทือน นำไปสู่ออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อการใช้ประโยชน์ต่อไป ในเอกสารอ้างอิงที่ [48] X. Cui และคณะได้ทำการวิเคราะห์ค่าตัวเก็บประจุในวงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เหมาะสมสำหรับระบบที่มีการติดตั้งเพียโซอิเล็กทริกเดี่ยวและติดตั้งวัสดุจำนวนมาก พบว่าค่าของตัวประจุในวงจรจำเป็นต้องเพิ่มมากขึ้นหากความถี่การใช้งานและจำนวนเพียโซอิเล็กทริกที่ติดตั้งมากขึ้นเพื่อให้ระบบสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ A. M. Eltamaly และ K. E. Addoweesh [49] ทำการออกแบบวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานรูปแบบใหม่ประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุสองตัวแทนที่ตัวต้านทานไอโอดและตัวเก็บประจุจำนวนมากจากวงจรดั้งเดิม พบว่าวงจรที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบสามารถลดค่าการสูญเสียทางไฟฟ้าได้ถึง 26% และเพิ่มปริมาณกำลังไฟฟ้าขาออกได้ 18% ในงานวิจัย [50] K. M. Howell และคณะศึกษากระบวนการแปลงพลังงานในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแบบต่าง ๆ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแปลงพลังงานและลักษณะทางกายภาพที่ต่างกัน พบว่าวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกสูงและมีลักษณะทางกายภาพที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ปริมาณมาก งานวิจัยที่ [51] A. Othman ได้ทดลองประยุกต์ใช้คุณสมบัติการแปลงพลังงานมาใช้ติดตั้งในร่องเท้าของทหารเพื่อนำพลังงานที่สามารถผลิตได้ไปใช้ในยามจำเป็นเมื่ออยู่ในพื้นที่ที่ไม่มีพลังงานไฟฟ้าใช้และจำลองพลังงานที่สามารถผลิตได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ความถี่การใช้งานเป็นอีกสิ่งที่มีความสัมพันธ์ต่อพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ โดยในงานวิจัยของ S. Ferreira และคณะในเอกสารอ้างอิงที่ [52] ได้ทำการศึกษาผลของความถี่ต่อพลังงานไฟฟ้ากับเพียโซอิเล็กทริกที่มีลักษณะทางกายภาพที่ต่างกัน

งานวิจัยที่ [53] R. F. Rangel และคณะ วิเคราะห์ความถี่และขนาดของแรงทางกลที่ป้อนให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เหมาะสมสำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกผสมเซรามิกที่มีลักษณะการติดตั้งแบบคาน ในงานวิจัย [54] ของ M. Ahad และคณะได้ทำการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT เมื่อติดตั้งบนวัสดุต่างกัน 9 ชนิดโดยป้อนแรงทางกลโดยตรงและทางอ้อม ผลการทดลองชี้ว่าเมื่อเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงโดยตรงจะผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเมื่อติดตั้งบนโพลี แต่หากได้รับแรงทางกลทางอ้อมจะผลิตพลังงานได้สูงสุดเมื่อติดตั้งบนอะลูมิเนียม L. Parali และ A. Sari ได้นำเสนอแบบจำลองทางไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริกและวิเคราะห์พลังงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในเอกสารอ้างอิงที่ [55] ยืนยันผลการจำลองด้วยชุดทดลองและมีแผนการพัฒนาแบบจำลองเมื่อเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงอย่างไม่เป็นเชิงเส้นในงานวิจัยฉบับหน้า และในเอกสารอ้างอิงที่ [56] M. A. M. Hatta และคณะนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าที่สามารถเก็บเกี่ยวได้สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีรูปทรงต่างกัน

จะเห็นได้ปัจจุบันวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้เข้ามามีบทบาทในเทคโนโลยีพลังงานทางเลือกมากขึ้น มีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุเพื่อการออกแบบระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่มีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีการศึกษาออกแบบติดตั้งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในอุปกรณ์หรือพื้นที่ที่มีศักยภาพในการรับแรงทางกลสูงเพื่อเพิ่มปริมาณพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้จากเพียโซอิเล็กทริก แต่การศึกษาเพียงคุณลักษณะและคุณภาพสัญญาณไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อการติดตั้งใช้งานจริงเนื่องจากพื้นที่หรืออุปกรณ์ที่ศักยภาพในการรับแรงทางกลปริมาณมากส่งผลให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่นำไปติดตั้งอาจเกิดความเสียหายและสูญเสียคุณสมบัติการแปลงพลังงานไป การศึกษาโครงสร้างและผลตอบสนองทางกลจึงเป็นอีกส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญ และจากลักษณะการติดตั้งใช้งานจริงดังที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าในต่างประเทศได้เห็นความสำคัญของเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกและได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเห็นถึงข้อได้เปรียบของพลังงานทางเลือกนี้หลายประการ เช่น เป็นพลังงานที่สะอาดไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถนำเอาพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สูญเสียไปจากการดำเนินชีวิตประจำวันมาใช้ประโยชน์ มีต้นทุนการติดตั้งที่ต่ำ การติดตั้งไม่ทำลายระบบนิเวศน์และทิวทัศน์ มีความซับซ้อนของระบบที่น้อย สามารถเชื่อมต่อกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ได้ง่าย และสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก

จากเหตุผลข้างต้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีการนำเสนอการศึกษาความเป็นไปได้การนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทำเป็นพื้นกำเนิดพลังงานติดตั้งในพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของแรงกระทำทางกลสูง ผสมกับการใช้ระบบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าต่อการลงทุน กล่าวคือพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะแปรผันไปตามแรงเค้นทางกลที่ผลิตในตัววัสดุได้รับ แต่หากได้รับแรงกระทำทางกลที่สูงจนเกินไปวัสดุอาจได้รับความเสียหายและเสียดสภาพความเป็นเพียโซอิเล็กทริกไปและหากได้รับแรงกระทำทางกลน้อยจนเกินไปอาจได้รับพลังงานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าปริมาณที่ควรจะได้รับ ทั้งนี้การวิเคราะห์ด้วยระบบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์จะช่วยคำนวณเชิงตัวเลขผนวกกับการวิเคราะห์เชิงวัสดุและโครงสร้าง หากจุดที่เหมาะสมและมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนติดตั้งพื้นกำเนิดพลังงานทำให้การประหยัดพลังงานด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

สำหรับการศึกษาระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสำหรับการประยุกต์ใช้งานกำลังไฟฟ้านั้นมีจุดประสงค์ที่สำคัญดังนี้

1. เพื่อศึกษาเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานและคุณลักษณะเฉพาะของโครงสร้างวัสดุที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก
2. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และการนำไปประยุกต์ใช้ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกสำหรับใช้งานเมื่อได้รับการสั่นสะเทือนความถี่ต่ำ
3. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้เพื่อการออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด
4. เพื่อออกแบบและประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานพื้นกำเนิดพลังงานเพื่อความปลอดภัยและประหยัดพลังงานไฟฟ้า
5. เพื่อส่งเสริมการใช้พลังงานทางเลือกและสนับสนุนการให้มีการพัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มสัดส่วนในการผลิตไฟฟ้าเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการตั้งสมมุติฐานจากการใช้งานวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์แปลงพลังงานการสั่นสะเทือนทางกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยกระบวนการการศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าและผลตอบสนองทางกล เริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติและข้อจำกัดของวัสดุศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเพียโซอิเล็กทริกนำไปสู่การเลือกประเภทวัสดุและระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน จากนั้นสร้างแบบจำลองทางกลเพื่อวิเคราะห์ผลเฉลยทางกลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ออกแบบจำลองลักษณะการติดตั้ง

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทั้งทางกลและทางไฟฟ้า ดังนั้นการศึกษาเพียงแต่คุณลักษณะทางไฟฟ้าจึงไม่เพียงพอต่อการออกแบบติดตั้งเนื่องจากในทางไฟฟ้าสามารถวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางให้เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดหรือเกิดความสูญเสียทางไฟฟ้าต่ำสุดขณะการแปลงพลังงาน แต่ทว่าลักษณะการติดตั้งที่ต่างกันมีผลต่อพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้เนื่องจากเพียโซอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติขึ้นอยู่กับทิศทาง (Anisotropic material) กล่าวคือทิศทางหรือมุมที่รับแรงมีผลต่อปริมาณและทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ได้รับ

เพียโซอิเล็กทริกที่เลือกใช้เป็นประเภท PZT เนื่องจากสามารถทนต่ออุณหภูมิการใช้งานที่สูงสามารถติดตั้งภายนอกอาคารได้ มีค่าสัมประสิทธิ์การแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้าที่สูง มีค่าสูญเสียทางกลขณะแปลงพลังงานต่ำ แต่มีข้อจำกัดด้วยคุณสมบัติเซรามิกทำให้ PZT มีความเปราะ และอาจสูญเสียคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกไปได้หากได้รับแรงทางกลที่มากเกินไปและอาจได้รับพลังงานที่น้อยกว่าที่คาดการณ์หากออกแบบให้วัสดุรับแรงทางกลที่มีปริมาณน้อยเกินไปส่งผลให้ต้นทุนการติดตั้งสูงขึ้นเทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับ การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถหาจุดที่เหมาะสมเพื่อให้วัสดุสามารถรับความเค้นทางกลได้สูงสุดที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายและได้รับพลังงานไฟฟ้าสูงสุด

#### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบ่งออกเป็นสองส่วนคือส่วนการวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าด้วย OrCAD PSpice จำลองการประจุแบตเตอรี่ด้วย MATLAB Simulink และวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อหาผลตอบสนองทางกลด้วย ANSYS Workbench
2. วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้งานเป็นประเภท PZT (Lead-Zirconate-Titanate) ซึ่งเป็นวัสดุประเภทเพียโซเซรามิก
3. วิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกโดยมุ่งเน้นการแปลงพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำ

#### 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในทุก ๆ ด้าน ตลอดจนข้อจำกัดและอุปสรรคต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นในการติดตั้งใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จัดเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ได้แก่ เพียโซอิเล็กทริก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน อุปกรณ์และเครื่องมือวัด และโปรแกรมที่ใช้ในการจำลอง เป็นต้น
3. ศึกษาการและออกแบบแบบจำลองทางไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริกเพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุ
4. ศึกษาพารามิเตอร์และข้อจำกัดทางกายภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางกลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
5. จำลองระบบเก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้จากเพียโซอิเล็กทริก และจำลองระบบเก็บเกี่ยวพลังงานต้นแบบ
6. ทำการศึกษาความถี่การกระตุ้นที่ตำแหน่งการติดตั้งต่าง ๆ เพื่อการดัดแปลงโครงสร้างของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้มีความถี่ธรรมชาติให้มีความใกล้เคียงกับความถี่กระตุ้นเพื่อการแปลงพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ
7. บันทึกและวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อนำมาทำการสรุปผล
8. ทำการวิเคราะห์ประเมินความเป็นไปได้ในการติดตั้งใช้งาน สรุปผลการทดลองและนำเสนอผลงานและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## 1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกโดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ตอน กล่าวคือการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบและสรุปการเลือกใช้ประเภทของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เหมาะสมกับการใช้งานโดยการสร้างแบบจำลองเป็นลักษณะการจำลองสัญญาณทางไฟฟ้ารวมไปถึงการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยจำลองการให้พลังงานทางกลเป็นค่าคงที่ อีกส่วนหนึ่งเป็นการสร้างแบบจำลองทางกลเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างและผลตอบสนองโดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองที่สร้างขึ้นเป็นแบบลดรูปกล่าวคือใช้เพียงส่วนประกอบที่สำคัญและมีนัยสำคัญสำหรับการคำนวณ เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการคำนวณแต่ยังคงมีความถูกต้องแม่นยำในการวิเคราะห์ผลเฉลยในรูปแบบต่าง ๆ

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่ได้รับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ด้าน คือประโยชน์ทางด้านพลังงานทดแทนและประโยชน์ทางด้านวิศวกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ประโยชน์ทางด้านพลังงานทดแทน

1. ผลงานวิจัยจะเป็นส่วนช่วยในการสนับสนุนและส่งเสริมให้มีการค้นคว้าและวิจัยทางด้านการใช้พลังงานทางเลือกใหม่เพื่อช่วยผลิตพลังงานไฟฟ้า
2. งานวิจัยนี้เป็นส่วนช่วยในการส่งเสริมแผนอนุรักษ์พลังงานสนับสนุนข้อมูลการวิจัยด้านการค้นคว้าและพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่
3. ทำให้มีการใช้ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานเป็นหนึ่งในกลยุทธ์ในการลดการผลิตพลังงานไฟฟ้าแทนการผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อตอบสนองความต้องการใช้ไฟของประเทศไทยที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากองค์ความรู้ใหม่

1. เพื่อเผยแพร่เป็นองค์ความรู้ในการใช้ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก
2. เป็นแนวคิดให้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกและนำไปประยุกต์ใช้ในสถานที่ต่าง ๆ ในประเทศเพื่อช่วยผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานที่สูญเปล่าให้เกิดประโยชน์
3. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการวิจัยขั้นนี้ไปเผยแพร่ เพื่อการวิจัยและพัฒนาในองค์ความรู้ที่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยขั้นนี้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

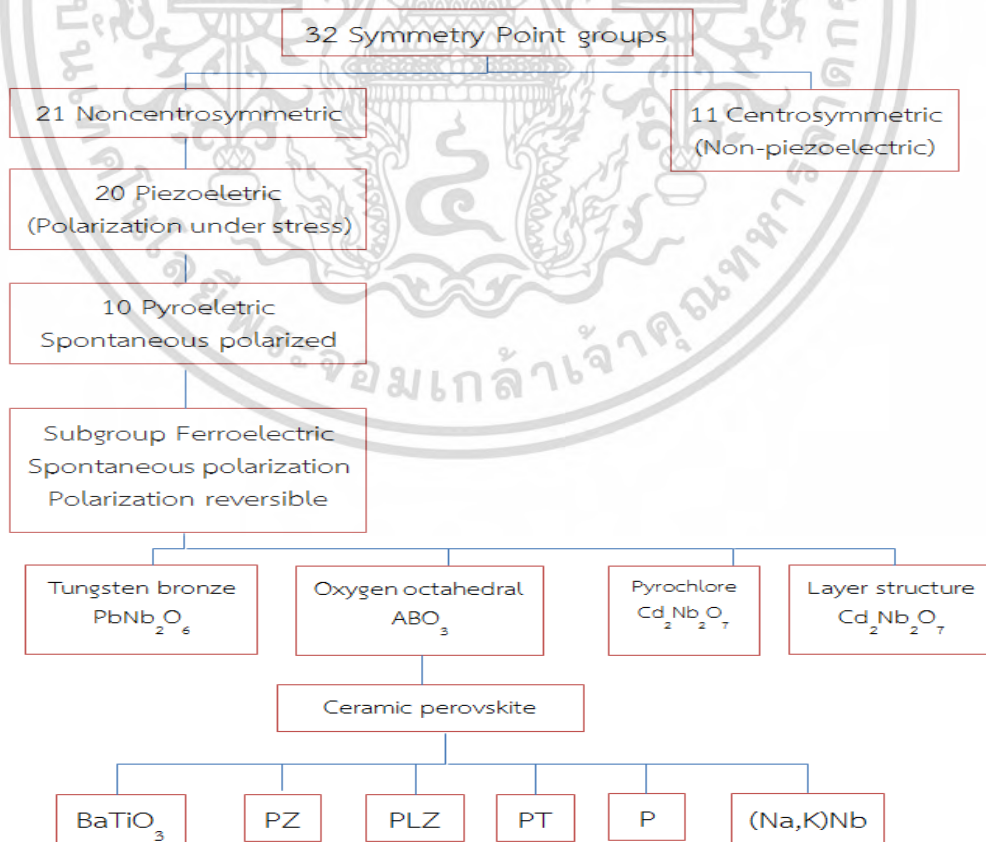
## บทที่ 2

# ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

บทนี้นำเสนอข้อมูลและทฤษฎีเพื่อใช้ศึกษาระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก รวมไปถึงข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์

### 2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นวัสดุมีความสามารถในการแปลงพลังงานทางกลในรูปของแรงสั่นสะเทือนเป็นไฟฟ้าในรูปของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและในทางกลับกันสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้โดยอาศัยการจัดเรียงตัวภายในผลึกทำให้เกิดสนามไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของวัสดุ ส่งผ่านพลังงานไปยังวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานและอุปกรณ์สะสมพลังงานและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ปลายทางต่อไป ปัจจุบันสารเชิงประกอบที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกมีหลากหลายชนิด ได้แก่สารเชิงประกอบผสมเซรามิก แบบเรียบมโททานิต เลดเซอร์โคเนตโททานิต และสารเชิงประกอบโพลีไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเพียโซอิเล็กทริกและกลุ่มย่อยที่มีพื้นฐานของความสมมาตร

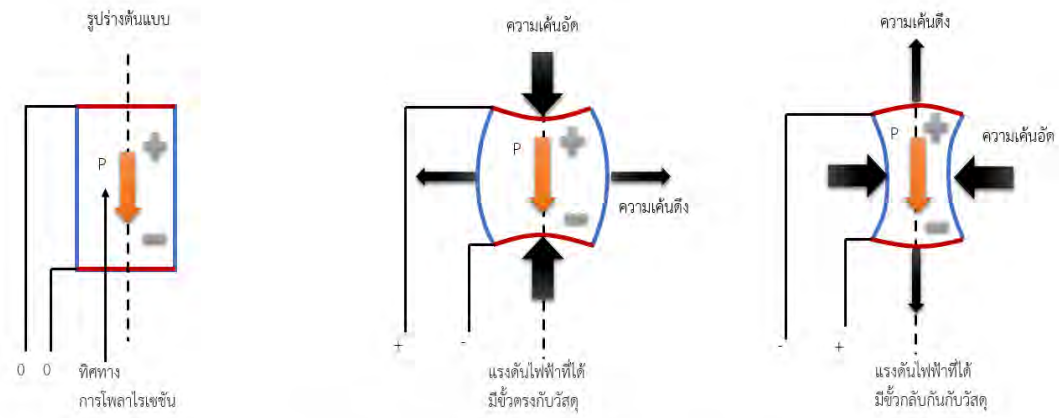
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นที่รู้กันว่าสภาพความเป็นเพียโซอิเล็กทริกพิจารณาได้จากระดับโครงสร้างอะตอมของผลึกและหลักการการแพร่กระจายของไอออนภายในโครงสร้างผลึก การจัดกลุ่มของไอออนจะถูกจำกัดด้วยตำแหน่งที่มีพลังงานสูงสุด ผลึกมีองค์ประกอบทางเคมีคงที่ และประกอบด้วยไอออนเรียงตัวกันซ้ำ ๆ ต่อกันเป็นเครือข่ายเกิดเป็นระบบผลึก (lattice) หน่วยที่เล็กที่สุดที่มีความสมมาตรเรียกว่าหน่วยเซลล์ (unit cell) และเป็นตัวบอกความเป็นไปได้ของการมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกในผลึกการแบ่งกลุ่มของผลึกจึงพิจารณาจากสมมาตรของผลึกโดยแบ่งเป็น 32 กลุ่มผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.1

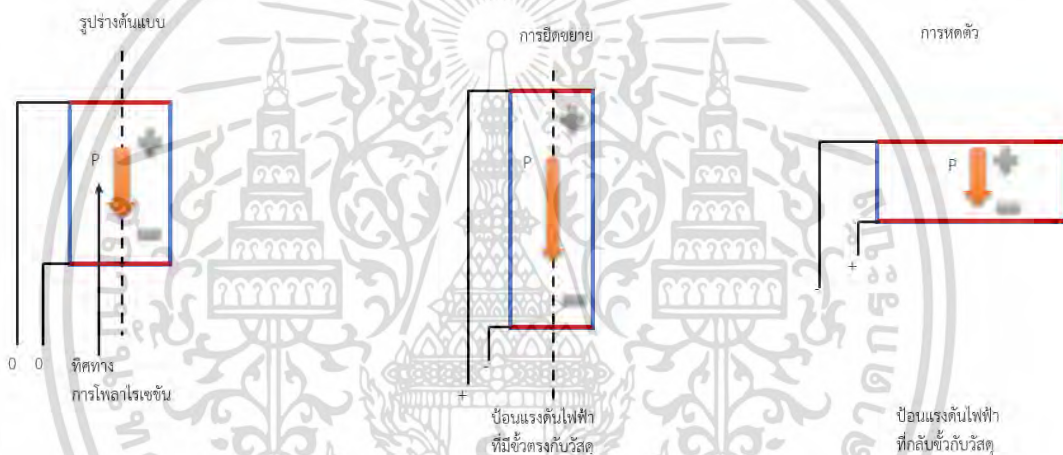
## 2.2 ปรัชญาการเพียโซอิเล็กทริก

ปรัชญาการเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectricity) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมทางกลและทางไฟฟ้าของวัสดุ ถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ.1880 โดยพี่น้องตระกูลคูรี J. Curie และ P. Curie จากแร่ควอตซ์ (quartz) โดยทำการทดลองป้อนแรงทางกลทั้งแรงกดและแรงดึงเพื่อให้เกิดความเค้นทางกลขึ้นกับผลึกควอตซ์ ปรากฏว่าขั้วคู่ (dipoles) ภายในเกิดการจัดเรียงตัว กล่าวคือขั้วบวกไปอยู่ที่ผิวด้านหนึ่งส่วนขั้วลบไปอยู่ที่ฝั่งตรงกันข้ามทำให้ผลึกอยู่ในสถานะขั้ว (polarized state) เกิดการกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement) และสนามไฟฟ้าก็ถูกสร้างขึ้น เข็มของเครื่องมือวัดเบนออกแสดงว่ามีความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างผิวของวัสดุ และได้เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางตรง (direct piezoelectric effect) แสดงไว้ดังรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าถ้าสมมติทิศทางการโพลาริเซชันตั้งรูป เมื่อออกแรงกดหรือป้อนความเค้นอัดในทิศทางเดียวกันหรือขนานกับทิศทางการโพลาริเซชันของเพียโซอิเล็กทริก แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีขั้วตรงกันกับโพลาริเซชันของวัสดุ เรียกลักษณะการแปลงพลังงานนี้ว่าการทำงานในโหมดตามยาว (longitudinal mode) แต่ถ้าหากป้อนความเค้นอัดในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวการโพลาริเซชัน กล่าวคือเกิดความเค้นดึงในทิศทางขนานกับแนวการโพลาริเซชัน ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับกรณีแรก กล่าวคือแรงที่ป้อนกับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีทิศทางตั้งฉากกัน จึงเรียกว่าการทำงานในโหมดตามขวาง (transverse mode)

และในทางตรงกันข้ามเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าแก่วัสดุแล้วเกิดความเค้นทางกลสะสมในผลึกทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนไหวแสดงถึงพลังงานทางกลที่ได้รับ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกผกผัน (converse piezoelectric effect) แสดงไว้ดังรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางขนานกับทิศทางการโพลาริเซชันของวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) ในลักษณะการยืดขยายและเกิดการหดตัวเมื่อป้อนสนามไฟฟ้ากลับขั้วกันกับทิศทางการโพลาริเซชันของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 2.2 ปรัชการณเพียโซอิเล็กทริกทางตรง



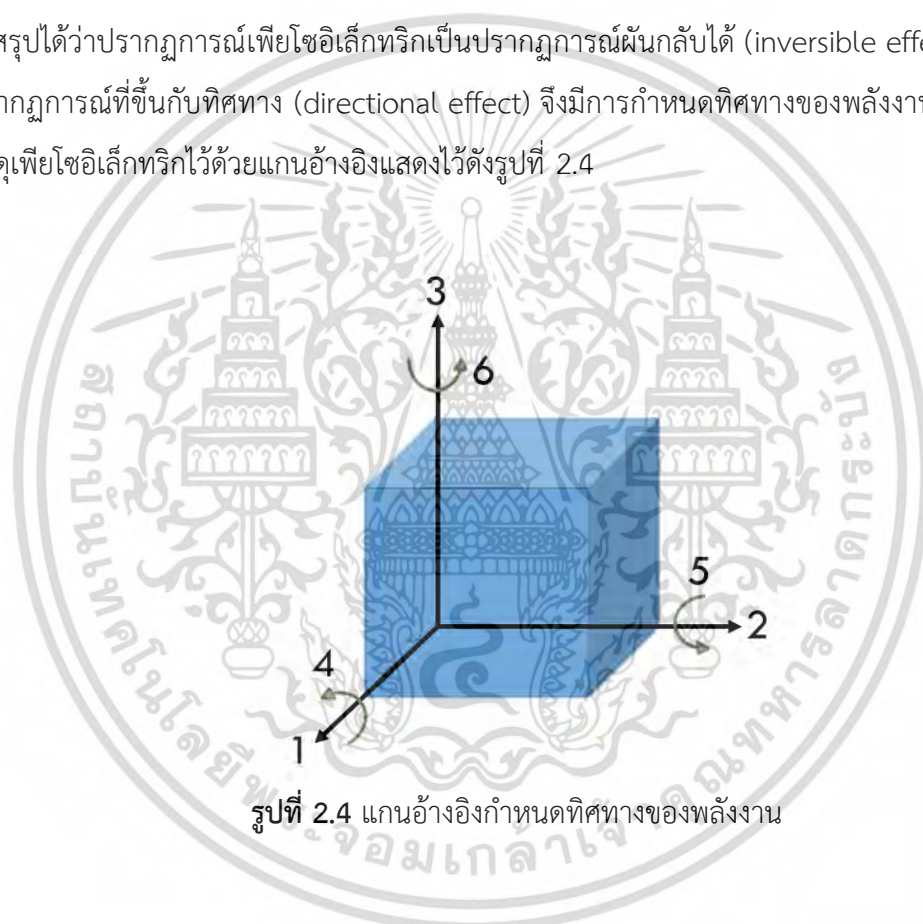
รูปที่ 2.3 ปรัชการณเพียโซอิเล็กทริกผ้นกลับ

ความเป็นเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectricity) เพียโซอิเล็กทริกเป็นคุณสมบัติหนึ่งของวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกพิเศษ กล่าวคือปริมาณประจุไฟฟ้าบนผิวของวัสดุสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้เมื่อรับแรงทางกล (mechanical force) และเกิดความเค้น (stress) ภายในผลึก ส่งผลให้เกิดการกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement) และเกิดความต่างศักย์ (voltage different) ที่ผิวของวัสดุได้ หรือที่เรียกกันว่าวัสดุเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct piezoelectric effect) และในทางกลับกันหากวัสดุที่มีความเป็นเพียโซอิเล็กทริกได้รับการกระตุ้นจากพลังงานไฟฟ้า กระแสสลับก็จะสามารถแปลงพลังงานนั้นเป็นพลังงานทางกลอยู่ในรูปของการสั่นสะเทือน (vibration) หรือปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกผ้นกลับ (converse piezoelectric effect) ปัจจุบันได้มีการนำเอาวัสดุที่มีโครงสร้างทางเคมีเฉพาะเหล่านี้มาประยุกต์เป็นแหล่งพลังงานขนาดเล็กโดยอาศัยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางตรง ใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการกำลังไฟฟ้าต่ำ เช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ในระบบไร้สาย (wireless devices) และตัวตรวจจับ (Sensor) เรียกเทคโนโลยีนี้ว่า เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric energy harvesting: PEH) ประสิทธิภาพและพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบยังเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจและพัฒนาอย่างต่อเนื่องให้เป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานทดแทนขนาดเล็กในอนาคต

### 2.3 การกำหนดทิศทางอ้างอิง

จากที่กล่าวมาข้างต้นในหัวข้อที่แล้วจะเห็นได้ว่าทิศทางของพลังงานขาเข้าไม่ว่าจะเป็นปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางตรงหรือปรากฏการณ์ผกกลับส่งผลกับทิศทางของพลังงานขาออก จึงสรุปได้ว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ผกกลับได้ (inversible effect) และเป็นปรากฏการณ์ที่ขึ้นกับทิศทาง (directional effect) จึงมีการกำหนดทิศทางของพลังงานที่กระทำต่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไว้ด้วยแกนอ้างอิงแสดงไว้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แกนอ้างอิงกำหนดทิศทางของพลังงาน

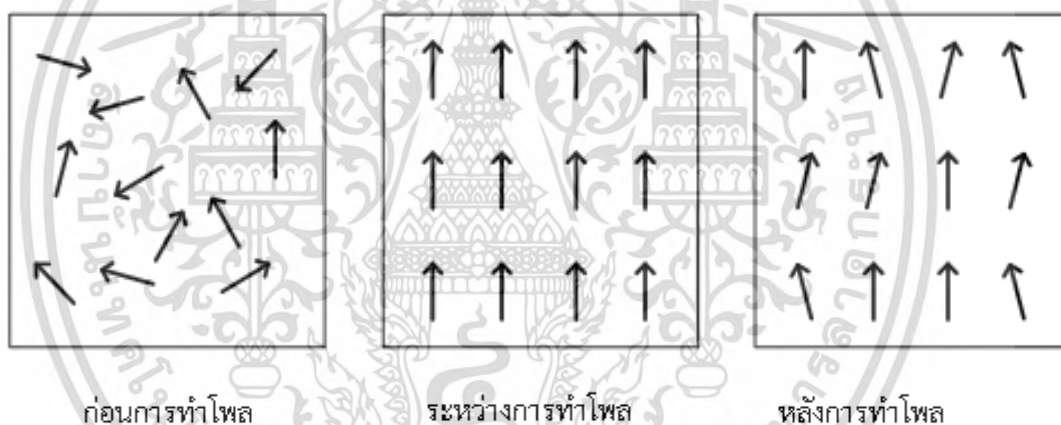
โดยแกน 1 2 และ 3 จะเป็นแนวแกนแสดงแรงหลักที่กระทำต่อวัสดุ ส่วนแกน 4 5 และ 6 จะแสดงแรงเค้นเฉือนรอบแกน 1 2 และ 3 ตามลำดับ การทำงานในโหมดตามยาว (longitudinal mode) จึงนิยมเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าโหมดดีสามสาม ( $d_{33}$  mode) และการทำงานในโหมดตามขวาง (transverse mode) เรียกว่าโหมดดีสามหนึ่ง ( $d_{31}$  mode) ซึ่งค่า  $d$  เป็นพารามิเตอร์แสดงสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient) จะอธิบายไว้ในส่วนของสมการการแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 กระบวนการจัดเรียงซ้ำหรือกระบวนการโพลิง

เป็นกระบวนการสำคัญที่จะทำให้เกิดสภาพเพียโซอิเล็กทริกในเซรามิกชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริกในระหว่างกระบวนการโพลิงวัสดุจะเกิดการขยายตัวตามแนวแกนสนามไฟฟ้าเล็กน้อย และเกิดการยืดหดตัวในทิศทางที่ตั้งฉากทั้งสองทิศทางเล็กน้อยเช่นกัน ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิในการโพลิงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดการจัดทิศทางและสมบัติที่ได้ของวัสดุเซรามิกใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกินอุณหภูมิคูรี (Curie temperature,  $T_c$ ) เพราะเซรามิกจะเสียสภาพโพลาริเซชันที่เกิดจากการโพลิงที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี ( $T_c$ )

สรุปกระบวนการจัดเรียงซ้ำเริ่มจากไดโพลในผลึกกระจายตัวกันอย่างไร้ทิศทาง จึงทำให้ประจุไฟฟ้าสุทธิเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อผ่านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงความเข้มสูงเพื่อจัดเรียงไดโพลในผลึกให้เป็นระเบียบทำให้เกิดการกระจัดทางไฟฟ้า และเมื่อสนามไฟฟ้าความเข้มสูงออก ไดโพลยังคงมีการจัดเรียงซ้ำในผลึก ทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีความต่างศักย์ที่ผิวได้



รูปที่ 2.5 การโพลาริเซชันของวัสดุเซรามิกเพื่อสร้างปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

## 2.5 การเก็บเกี่ยวพลังงาน

เป็นกระบวนการค้นหาแหล่งพลังงานที่เกิดขึ้นเองในสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น พลังงานลม พลังงานความร้อน พลังงานน้ำ หรือพลังงานที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ เช่น พลังงานจากแรงสั่นสะเทือนเมื่อมีการสัญจรบนท้องถนน พลังงานลมหรือความร้อนที่เกิดจากการทำงานของเครื่องความร้อนและการสั่นสะเทือนจากการเดินเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งพลังงานเหล่านี้จะสูญหายไปตามธรรมชาติหากไม่มีการออกแบบระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานเหล่านี้ไว้และแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถป้อนให้กับอุปกรณ์พกพาและอุปกรณ์ดิจิทัลต่าง ๆ ที่ต้องการกำลังไฟฟ้าไม่สูงมากได้ การออกแบบระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจึงต้องคำนึงถึงอุปกรณ์แปลงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานที่มีความเหมาะสมกับลักษณะของแหล่งพลังงานที่ต้องการนำมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า พิกัดและชนิดของอุปกรณ์สะสมพลังงานรวมไปถึงอุปกรณ์เชื่อมต่อบนที่มีความสูญเสียทางไฟฟ้าต่ำ เพื่อที่จำจ่ายไอพลังงานไฟฟ้าไปยังโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพ พลังงานในสิ่งแวดล้อมที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้คือพลังงานการสั่นสะเทือนความถี่ต่ำจากการเดินหรือการสัญจรบนท้องถนน อุปกรณ์แปลงพลังงาน (transducer) ที่มีความเหมาะสมคือวัสดุที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก กล่าวคืออุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานทางกลเป็นไฟฟ้าได้ และมีเป้าหมายเพื่อสะสมพลังงานที่ได้ลงในแบตเตอรี่ ดังนั้นอุปกรณ์เชื่อมต่อหลักจึงประกอบไปด้วย วงจรเรียงกระแส (rectifier) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรง-กระแสตรง (converter) วงจรควบคุมแรงดัน (regulator) เพื่อนำไปใช้กับอุปกรณ์ภายนอกที่อาจต้องการกำลังไฟฟ้าในระดับที่สูงขึ้นต่อไป

## 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการแปลงพลังงานของเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างแรงกระทำทางกลที่ป้อนให้กับวัสดุกับแรงดันไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ เนื่องจากคุณสมบัติที่ขึ้นกับทิศทางของวัสดุค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกจึงเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับทิศทางของแรงทางกลและทิศทางของแรงดันไฟฟ้า จึงเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ระบุสองทิศทาง สามารถเขียนอยู่ในรูป  $d_{ij}$  โดยที่  $i$  แสดงทิศทางของการกระตุ้น และ  $j$  จะอธิบายทิศทางของการตอบสนอง ค่าสัมประสิทธิ์นี้จะมีค่าต่างกันตามลักษณะที่นำเพียโซอิเล็กทริกไปใช้งาน โดยลักษณะการใช้งานที่เป็นที่นิยมมีอยู่ 2 ลักษณะคือ การใช้งานในโหมดตามขวาง (transverse mode) จะเป็นการใช้งานที่เป็นลักษณะของการการป้อนแรงทางกลตามขวาง สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่ใช้สำหรับการคำนวณพลังงานคือ  $d_{31}$  ส่วนการใช้งานในโหมดตามยาว (longitudinal mode) จะใช้ค่า  $d_{33}$

## 2.7 การแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า

สมการที่อธิบายเกี่ยวกับผลของปรากฏการณ์ Piezoelectric เขียนได้ดังนี้

$$D = dE + \epsilon^T E \quad (2.1)$$

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

เมื่อ  $D$  = การกระจัดทางไฟฟ้าหรือความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า

$T$  = ความเค้น

$E$  = สนามไฟฟ้า

$S$  = ความเครียด

$d$  = ค่าคงที่ของเพียโซอิเล็กทริก

$\epsilon^T$  = ค่าสภาพยอมที่ความเค้นคงที่

$s^E$  = ค่าความยืดหยุ่นที่วัดในสนามไฟฟ้าคงที่

ค่าของเพียโซอิเล็กทริกจะเกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงเค้นอาจจะเขียนในรูปของแรงดันหรือค่า  $g$  มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อนิวตันต่อตารางเมตรดังสมการซึ่งค่า  $g$  เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับ  $d$  ดังนี้

$$g = d/\epsilon = d/\epsilon_r \epsilon_0 \quad (2.3)$$

เมื่อ

$\epsilon$  = ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity)

$\epsilon_r$  = ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)

$\epsilon_0$  = ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (Permittivity in free space  $\approx 8.854 \times 10^{-12}$  F/m)

ส่วนค่าความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลหรือในทางกลับกันของเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Coupling Factor) สามารถหาได้ดังนี้

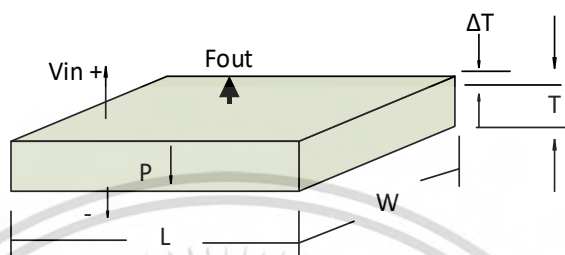
$$K = \text{พลังงานไฟฟ้าขาออก} / \text{พลังงานทางกลขาเข้าทั้งหมด} \quad (2.4)$$

ซึ่งค่า  $K$  นั้นจะเป็นผลปรากฏการณ์ของเพียโซอิเล็กทริกทั้งผลทางตรง(Direct Effect) และผลทางอ้อม (Converse Effect) ทั้งสองกรณีและค่าของ  $K$  นั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ

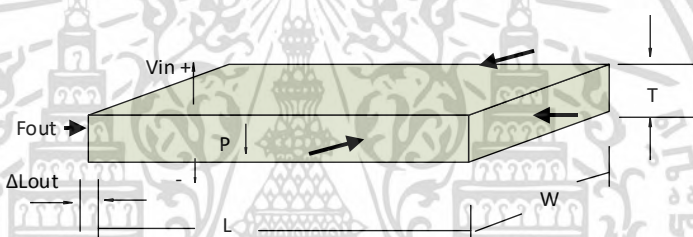
## 2.8 แอคชัวเอเตอร์ของเพียโซอิเล็กทริก

เมื่อสนามไฟฟ้าที่มีขั้วเดียวกันกับขั้วโพรไธไลเซนชันเริ่มต้นถูกวางขวางความหนาของแผ่นเพียโซเซรามิกแผ่นเดียวแผ่นจะขยายความหนาหรือขยายด้าน Longitudinal ดังรูปที่ 2.6 คือด้านเดียวกับแกนของโพรไธไลเซนชัน และเกี่ยวเนื่องกับทิศทางตั้งฉากกับแกนของโพรไธไลเซนชันหรือด้าน Transverse เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ 2.7 เมื่อสนามถูกย้อนกลับการเคลื่อนที่ก็ย้อนกลับด้วยแผ่นเซรามิกจะใช้ผลกระทบนี้อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของแผ่นด้านความหนาจะมีขนาดเล็กมาก (อยู่ในหน่วยของ Nanometers) ขณะเดียวกันการเคลื่อนที่ในทิศ Transverse ตามแนวยาวจะกว้างกว่า(ในหน่วยของ Microns) เนื่องจากทิศทางความยาวจะมากกว่าความหนาของการเคลื่อนที่แนว Transverse ของแผ่นที่ผิวหน้าของโครงสร้างจะสามารถก่อให้เกิดความโค้งงอ

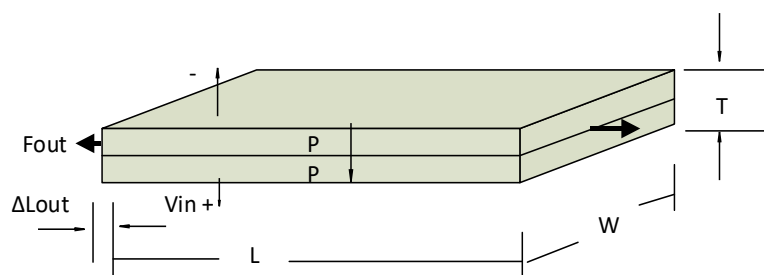


รูปที่ 2.6 ลักษณะการทำงานแบบตามยาว Longitudinal Motor



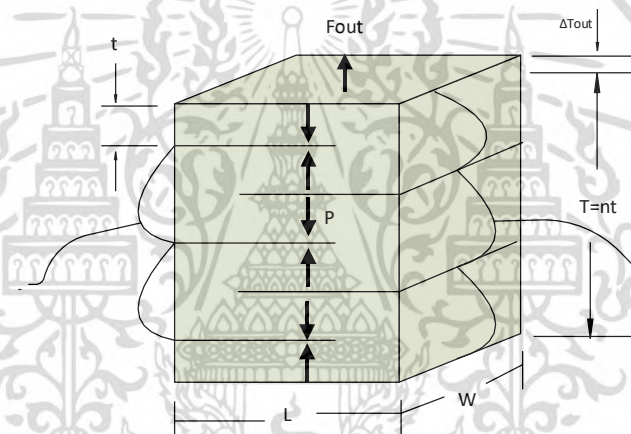
รูปที่ 2.7 ลักษณะการทำงานแบบตามขวาง Transverse Motor

สารสองชั้นสามารถงอและบิดได้โดยขึ้นกับโพลาริเซชันของชั้นสารเคลือบตรงกลางระหว่างสารเพียโซอิเล็กทริกสองชั้นจะเพิ่มความแข็งแรงทางกลและความหนืดแต่จะลดการเคลื่อนที่ 2-Layer หมายถึงจำนวนชั้นของเพียโซอิเล็กทริกและจริงๆแล้วสาร 2-Layer มี 8 ชั้นซึ่งประกอบไปด้วยชั้นอิเล็กโทรด 4 ชั้น เพียโซเซรามิก 2 ชั้นตัวยึด 2 ชั้นชั้นสองชั้นนี้จะช่วยให้สามารถลดความต่างศักย์ลงครึ่งหนึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาขานาน สารสองชั้นจะแสดงเหมือนชั้นเดียวเมื่อทั้งสองชั้นขยายไปด้วยกันถ้าสนามไฟฟ้าถูกนำมาใช้ซึ่งจะทำให้สารบางลงและขยายยาวขึ้นโดยปกติการเคลื่อนที่ในหนึ่งแกนจะถูกนำมาใช้ในการเคลื่อนที่ซึ่งจะอยู่ในหน่วยของไมครอนและแรงจะอยู่ในช่วงของ 10 ถึง 100 นิวตัน



รูปที่ 2.8 ลักษณะการทำงานแบบสองชั้น

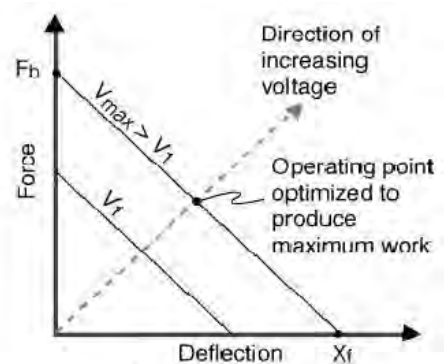
Stack Motors เป็นการประกอบและพันชั้นของสารเพียโซอิเล็กทริกจำนวนมากให้อยู่ในโครงสร้างเดียวกันการเคลื่อนที่เพียงเล็กน้อยของแต่ละชั้นจะส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของทั้งหมด การเคลื่อนที่นี้จะอยู่ในหลักหน่วยถึงหลักสิบบไมครอนและแรงจะอยู่ในหลัก 100 ถึง 1000 นิวตัน



รูปที่ 2.9 ลักษณะการติดตั้งแบบ Stack Generators

Piezoelectric Actuators โดยทั่วไปแล้วจะถูกระบุถึงการเคลื่อนที่อย่างอิสระและการป้องกันแรงเคลื่อนที่อย่างอิสระ หมายถึงการเคลื่อนที่ที่ได้รับระดับความต่างศักย์มากที่สุดเมื่อ Actuators สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระและไม่ต้องการมีแรงมากระทำการป้องกันแรงหมายถึงแรงที่ใส่เข้ามาที่ระดับความต่างศักย์มากที่สุดเมื่อ actuators ถูกป้องกันและไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ การเปลี่ยนรูป (Deflection) เกิดที่จุดสูงสุดเมื่อแรงเป็นศูนย์และแรงจะอยู่ที่สูงสุดเมื่อการเปลี่ยนรูปเป็นศูนย์ค่าอื่น ๆ ของการเคลื่อนที่และแรงจะถูกระบุโดยเส้นที่ลากระหว่างจุดสองจุดนี้ดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ประสิทธิภาพการทำงาน

โดยปกติแล้วเพียโซมอเตอร์จะต้องเคลื่อนที่ในปริมาณและแรงที่ถูกกำหนดซึ่งจะบอกจุดทำงานบนแกนแรงและการเคลื่อนที่มุมจะถูกพิจารณาถึงจุดที่ว่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานโดยทั่วไป ถ้ามันสามารถมีแรงที่ต้องการครึ่งหนึ่งของการเปลี่ยนรูปอย่างอิสระ

## 2.9 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก คือ super capacitor หรือเรียกอีกชื่อว่า ultra capacitor หรือ electrochemical capacitor และในภาษาไทยเรียกว่า ตัวเก็บประจุยิ่งยวด อุปกรณ์ชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษตรงที่มีค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) สูงกว่าตัวเก็บประจุอื่นๆ มากถึง 100-10,000 เท่า อีกทั้งยังสามารถอัดประจุให้เต็มได้ภายในเวลาอันรวดเร็วเพียง 1-10 วินาที เทียบกับ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนซึ่งต้องใช้เวลามากถึง 10-60 นาที และการคายประจุก็สามารถทำได้ภายในเวลา 1 วินาทีเช่นกัน จุดเด่นอีกประการของตัวเก็บประจุยิ่งยวดคือ เราสามารถที่จะอัดและคายประจุได้ กว่า 500,000 รอบ มากกว่าความสามารถของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถึง 100 เท่า และมากกว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (lead-acid battery) 1,000 - 10,000 เท่าเลยทีเดียว นอกจากนี้ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีราคา ต่อ kW ที่ต่ำ (US\$25-50/kW) เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (US\$75-150/kW) และยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แรงกระแทก และการสั่นสะเทือนได้ดีอีกด้วย ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นเช่นนี้ ประกอบกับงานวิจัยและพัฒนาคุณสมบัติของตัวเก็บประจุ ยิ่งยวดที่กำลังก้าวไปอย่างรวดเร็ว จึงไม่น่าแปลกใจที่อุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าชนิดนี้ จะได้รับความสนใจอย่างมาก มีการทำนายว่าใน อีก 10 ปีข้างหน้า ตัวเก็บประจุยิ่งยวดอาจชิงตลาดจากแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออนได้ถึง 50%

เมื่อให้ความต่างศักย์หรือกระแสไฟฟ้ากับขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้าง เช่น เมื่อต่อตัวเก็บประจุยิ่งยวดเข้ากับแบตเตอรี่ ประจุที่เป็นบวกภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะถูกดึงดูดเข้าหาขั้วลบของตัวเก็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุยิ่งยวด และประจุที่เป็นลบในสารละลายก็จะเข้าไปหาขั้วบวก การที่ใช้คาร์บอน ที่มีพื้นที่ผิวและ ปริมาตรรูพรุนสูงเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการกักเก็บประจุ เนื่องจากประจุของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สามารถที่จะแทรกตัว เข้าไปในรูพรุนได้ จึงมีจุดที่มีการดึงดูดกันระหว่างประจุบวกและลบเพิ่มขึ้น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจึงเสมือนกับการนำตัวเก็บประจุแบบธรรมดา (capacitor) ขนาดเล็กๆ มารวม ด้วยกันจำนวนมาก

ข้อแตกต่างที่สำคัญประการหนึ่งระหว่างแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่กล่าวมา คือ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดไม่อาศัยปฏิกิริยาทางเคมี ในการเก็บพลังงาน หากแต่ใช้แรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic charge) ระหว่างประจุต่างขั้วกัน ในขณะที่แบตเตอรี่ทุกชนิดอาศัยปฏิกิริยาเคมี นี่คือนิวเคลียสหนึ่งที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีอายุตามจำนวนรอบการใช้งานที่มากกว่า เนื่องจากไม่เกิดการ เสื่อมสภาพจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือ ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่ไม่พึงประสงค์ นอกจากตัวเก็บ ประจุยิ่งยวดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักและไม่อาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีแล้ว ยังมีตัวเก็บ ประจุยิ่งยวดที่ทำงานโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ในปัจจุบันมีตัวเก็บประจุยิ่งยวดจำนวนมาก และมีหลายรูปทรงให้เลือกตามการใช้งาน เช่น ทรงกระบอก (cylindrical) ทรงเหลี่ยม (prismatic) ทรงกระดุม (button) และแบบถุง (pouch) ภายในตัวเก็บประจุประกอบไปด้วยแผ่นโลหะที่มีการเคลือบวัสดุ คาร์บอนชั้นบางๆ ประกอบกับแผ่น กั้นซ้อนกัน และมีวุ้นเข้าด้วยกัน (ทรงกระบอก) หรือตัดให้ได้ขนาดและซ้อนทับกันเพื่อให้ได้ทรง เหลี่ยม กระดุมหรือถุง โดยส่วนใหญ่แล้วตัวเก็บประจุยิ่งยวด แบบที่อาศัยปฏิกิริยาจะมีขั้วข้างหนึ่งเป็น คาร์บอนเช่นเดิม แต่ขั้วอีกข้าง หนึ่งทำ จากวัสดุเช่นโลหะออกไซด์ เมื่อใช้งานจะมีปฏิกิริยาทางเคมี เกิดขึ้น ที่พื้นผิวอย่างรวดเร็วที่ขั้วโลหะออกไซด์ จุดประสงค์ที่เพิ่มขั้วที่เกิดปฏิกิริยา นั้นก็เพื่อเพิ่มความ จูไฟฟ้าและ/หรือแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (nominal voltage) ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั่นเอง

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดอีกชนิดที่กำลังได้รับความนิยมอย่างมากคือ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดลิเทียม ไอออน (Lithium-Ion Capacitor) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่นำ เอาข้อดีของตัวเก็บ ประจุยิ่งยวดและ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเข้าไว้ด้วยกัน ตัวเก็บประจุชนิดนี้มีขั้วข้างหนึ่งเป็นวัสดุคาร์บอนเช่นเดียวกับ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดอื่นๆ แต่ขั้วอีกข้างหนึ่งทำ จากวัสดุที่ใช้เป็นขั้วของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ส่วน สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีไอออนของลิเทียมเช่นเดียวกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ตัวเก็บประจุ ยิ่งยวด ชนิดลิเทียมไอออนมีคุณสมบัติที่โดดเด่นคือ ให้กำลัง ไฟฟ้าสูง สามารถคายประจุได้ที่อัตราถึง 200C อัด และคายประจุได้ถึงหลัก 100,000 รอบ มีค่าแรงดัน เฉลี่ยถึง 3.8-4.0 V กักเก็บพลังงาน ไฟฟ้าได้มากและมีการรักษาระดับ แรงดันไฟฟ้าขณะอัดและคายประจุ ต่างจากตัวเก็บประจุซึ่งมี แรงดันที่เพิ่มขึ้นและลดลงเป็นเชิงเส้นตามเวลาขณะอัดและคายประจุตามลำดับ การเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พฤติกรรมของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุชนิดอัดและคายประจุด้วยกระแสคงที่ (constant current charge/ discharge)

Characteristic	Lead-acid battery	Li-ion battery	Capacitor (Electrostatic & Electrolytic)	Supercapacitors	
				Carbon Supercapacitor	Li-ion Supercapacitor
Specific Energy (Wh/kg)	30-50	100-265	< 0.1	1-10	10-15
Specific Power (W/kg)	75-300	300-1,500	10,000-10,000,000	500-10,000	> 100,000
Cell voltage (V)	≈ 2.0	2.5-4.2	4-550	1.2-3.3	2.2-3.8
Capacitance (F)	-	-	< 1	0.1-12,000	300-3,300
Discharge Time	min - h	min - h	10	s - min	s - min
Charging time	h	min - h	10	s - min	min
Charge/discharge efficiency (%)	75-82	90	> 95	85-98	90
Cycle life (cycles)	500-2,000	< 5,000	10	> 500,000	10,000 - 100,000

รูปที่ 2.11 คุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเทียบกับแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุชนิดอื่น

เมื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะของตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดที่ใช้คาร์บอนเป็นขั้วและชนิดลิเทียมไอออนกับคุณสมบัติของแบตเตอรี่ ชนิดตะกั่ว-กรด แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่อื่นๆ รวมถึงชนิดอิเล็กทรอนิกส์ เห็นได้ว่าคุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดทั้งด้านพลังงานจำเพาะ กำลังจำเพาะ ค่าความจุไฟฟ้า เวลาในการอัดและคายประจุและอายุการใช้งาน มีค่าอยู่ระหว่างค่าของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุชนิดอื่นๆ ตัวเก็บประจุแบบยิ่งยวดจึงนับว่า เป็นเทคโนโลยีที่สามารถเติมช่องว่างระหว่างเทคโนโลยีแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุได้ดี อีกทั้งงานวิจัยและพัฒนาตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีทิศทางหลักมุ่งไปที่การเพิ่มความสามารถในการกักเก็บพลังงานให้ใกล้กับความสามารถของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมากขึ้น จึงคาดว่าคุณสมบัติของ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะมีการพัฒนาขึ้น อย่างรวดเร็วในอนาคตอันใกล้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

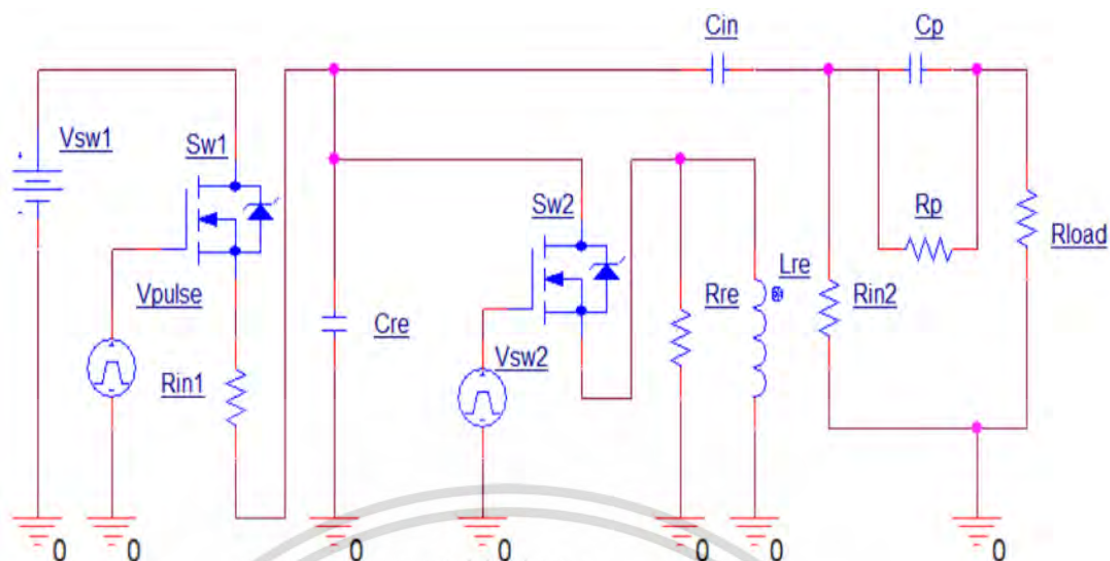
# การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

### 3.1 การศึกษาค่าพารามิเตอร์

การศึกษาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าขาออก (output power) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของวัสดุ กล่าวคือค่าความต้านทานและค่าความเก็บประจุภายใน (internal resistance and capacitance) ด้วยโปรแกรมจำลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ OrCAD Pspice ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถจำลองพฤติกรรมการทำงานของวงจรไฟฟ้าและสามารถวิเคราะห์ผลตอบสนองได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

เนื่องจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเกี่ยวเนื่องกันระหว่างคุณสมบัติทางกลและไฟฟ้า (Electromechanical coupling properties) ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ระบุในเอกสารข้อมูล (datasheet) จะมีทั้งค่าพารามิเตอร์ทางกลและทางไฟฟ้ารวมอยู่ด้วยกันส่งผลให้การวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าเป็นไปโดยยาก การแปลงค่าพารามิเตอร์ทางกลเป็นพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าจึงเป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญเพื่อให้โปรแกรม OrCAD-Pspice สามารถคำนวณผลตอบสนองทางไฟฟ้าได้

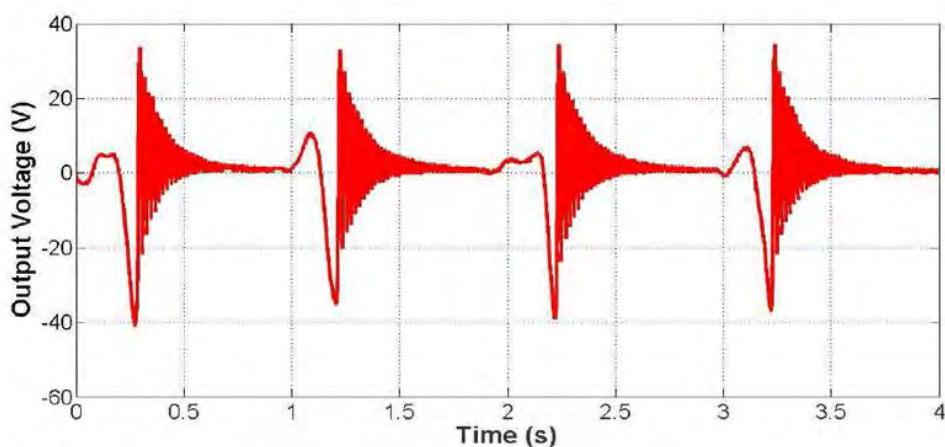
โดยทั่วไปการสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะทำการจำลองสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าเมื่อเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงกระทำทางกลหรือความถี่กระตุ้น (excitation frequency) ตรงกันกับความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของวัสดุ กล่าวคือเป็นแบบจำลองการทำงานความถี่สูง (high frequency model) ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นการที่จะให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกซึ่งมีความถี่ธรรมชาติที่สูงสั่นในสภาวะสั่นพ้อง (resonance vibration) จำเป็นต้องใช้เครื่องสั่น (shaker) ที่สามารถควบคุมความเร่งและแอมพลิจูดการสั่นเพื่อให้แรงทางกลในลักษณะการสั่นที่มีความถี่สูงและคงที่กับเพียโซอิเล็กทริก กระแสและแรงดันไฟฟ้าจะออกมาในลักษณะของสัญญาณไซน์ (sinusoidal signal) ซึ่งไม่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การนำพลังงานกลจากการเดินซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนความถี่ต่ำมาใช้งาน รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกของเพียโซอิเล็กทริกจึงมีความผิดเพี้ยนจากสัญญาณไซน์ไป ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและออกแบบแบบจำลองทางไฟฟ้าให้สอดคล้องกับการทำงานความถี่ต่ำและเปรียบเทียบกับสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงด้วยออสซิลโลสโคป (oscilloscope) โดยแบบจำลองทางไฟฟ้าเมื่อทำการแปลงค่าพารามิเตอร์เป็นพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าทั้งหมด แสดงไว้ดังรูปที่ 3.1



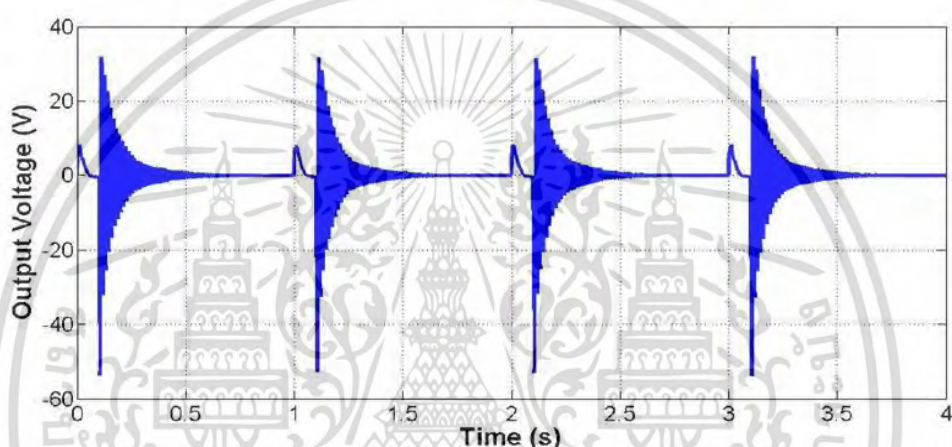
รูปที่ 3.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริก

จะเห็นได้ว่าผู้วิจัยใช้แหล่งจ่ายแบบพัลส์ ( $V_{pulse}$ ) เพื่อจำลองแรงกระทำทางกลความถี่ต่ำจากการเดินและกำลังความถี่ของสัญญาณตามความถี่ของการย่ำเดินไว้ที่ 2 เฮิร์ตซ์ เชื่อมต่อไปยังสวิตช์ควบคุม  $Sw1$  และ  $Sw2$  ซึ่งทำงานสลับกัน กล่าวคือ  $Sw1$  จะทำงานเมื่อเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงกระทำทางกล กล่าวคือ  $V_{pulse}$  เป็นช่วงการทำงานขาขึ้น (high stage) ในทางกลับกัน  $Sw2$  จะทำงานในช่วงที่เพียโซอิเล็กทริกไม่ได้รับแรงกระทำทางกล กล่าวคือ  $V_{pulse}$  เป็นช่วงการทำงานขาลง (low stage) โดยเชื่อมต่อกับตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเพื่อจำลองการสั่นอย่างต่อเนื่องด้วยความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของอุปกรณ์จวบจนครบคาบการสั่น (vibration period) แสดงผลแรงดันไฟฟ้าขาออกจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม OrCAD Pspice เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าจากวัสดุเมื่อได้รับแรงทางกลจริง ไว้ดังรูปที่ 3.2

เห็นได้ว่าผลการจำลองมีความใกล้เคียงกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง ผู้วิจัยจึงใช้แบบจำลองนี้เพื่อการศึกษาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการวิจัยเป็นการนำพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำไปใช้งานกับอุปกรณ์กำลังไฟฟ้าต่ำซึ่งโดยทั่วไปแล้วเป็นอุปกรณ์ประเภทดิจิทัลที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง จึงทำการเพิ่มเติมส่วนของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (full bridge rectifier) เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นไฟฟ้ากระแสตรงต่อไปยังตัวต้านทานซึ่งทำหน้าที่เป็นภาระทางไฟฟ้า แบบจำลองจึงปรับเปลี่ยนและแสดงไว้ดังรูปที่ 3.3



(ก)



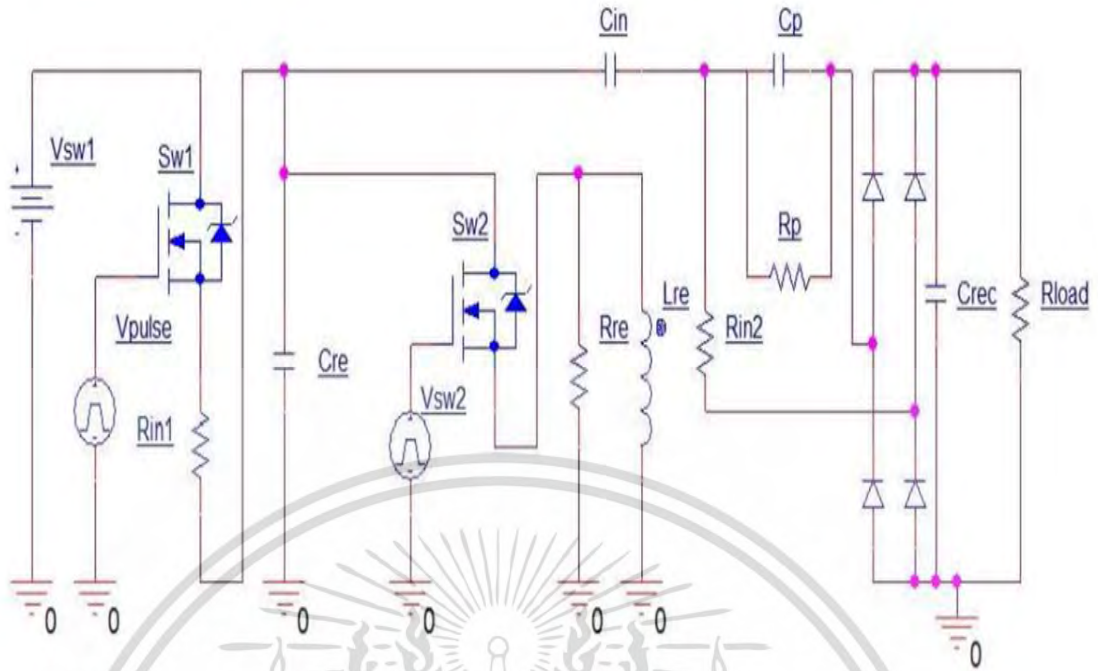
(ข)

รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าจากวัสดุเมื่อได้รับแรงทางกลจริง (ก) แรงดันไฟฟ้าจากการทดลองวัดจริง (ข) แรงดันไฟฟ้าจากการจำลอง

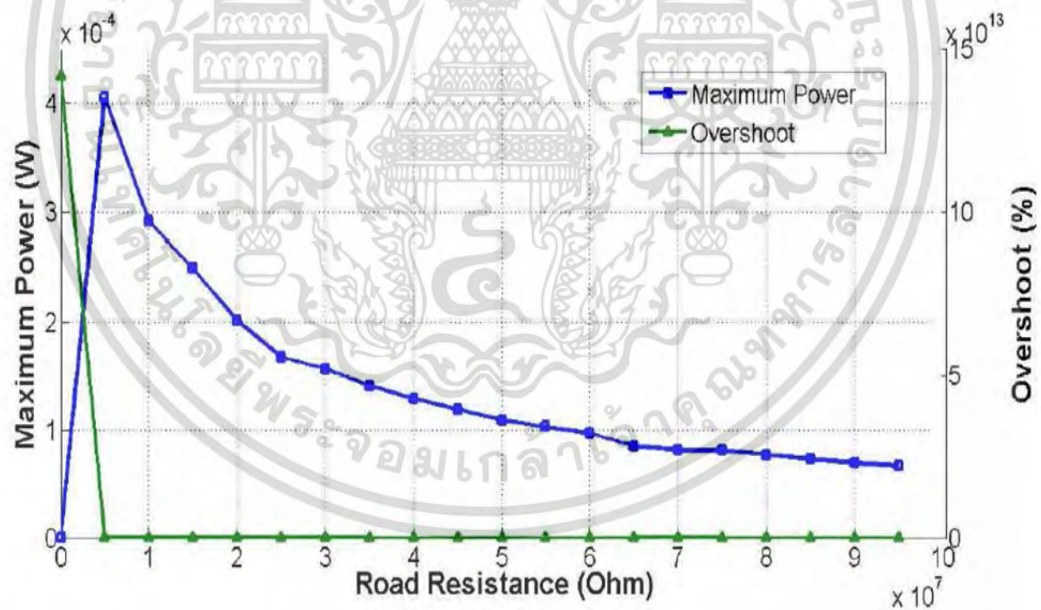
การวิเคราะห์ค่าความต้านทานที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาค่าพารามิเตอร์ได้ผลการจำลองออกมาดังรูปที่ 3.4 โดยเลือกค่าของตัวต้านทานซึ่งทำหน้าที่เป็นภาระทางไฟฟ้าที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด (maximum output power) และมีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (overshoot percentage) ต่ำที่สุดเป็นค่าที่ใช้สำหรับการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่อไป

ในขั้นตอนการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเก็บเกี่ยวได้จากเพียโซอิเล็กทริกแบ่งออกเป็น 3 กรณีคือการปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานภายใน ค่าความเก็บประจุภายในและปรับเปลี่ยนคาบเวลากระตุ้น แสดงผลการจำลองต่อกำลังไฟฟ้าขาออกของเพียโซอิเล็กทริก ได้ผลสรุปว่าค่าความเก็บประจุภายในเมื่อมีค่าสูงขึ้นโดยเมื่อเพิ่มค่าความเก็บประจุภายในจนถึงประมาณ 800 nF ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกจะเพิ่มขึ้นช้าลงและเข้าใกล้ค่าคงที่แสดงไว้ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

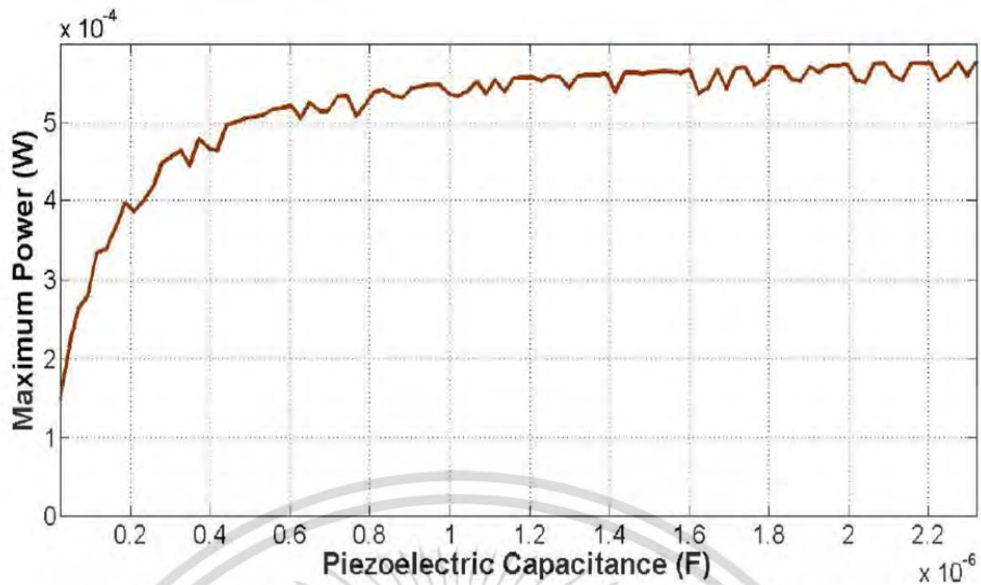


รูปที่ 3.3 แบบจำลองทางไฟฟ้าเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสและโหลดตัวต้านทาน



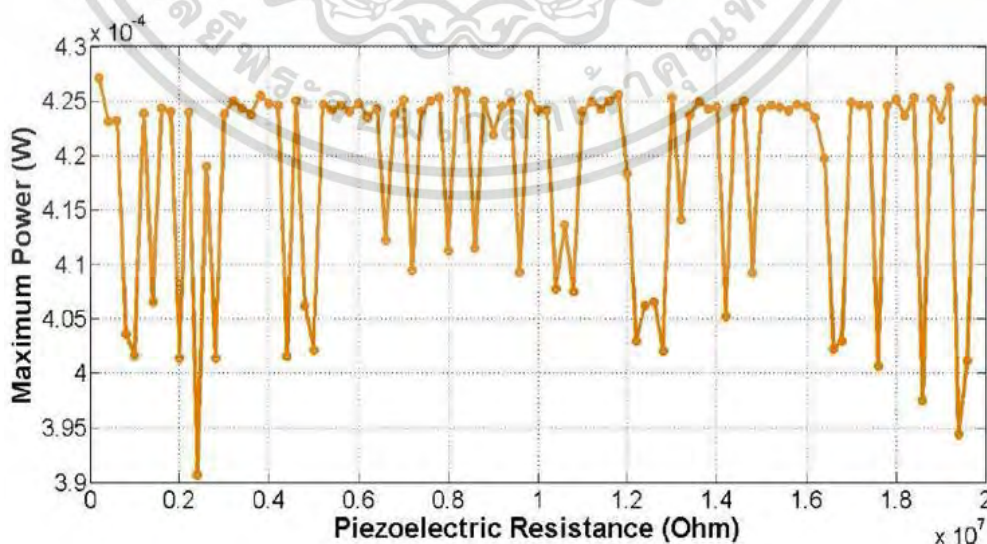
รูปที่ 3.4 กำลังไฟฟ้าสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่ค่าความต้านทานต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



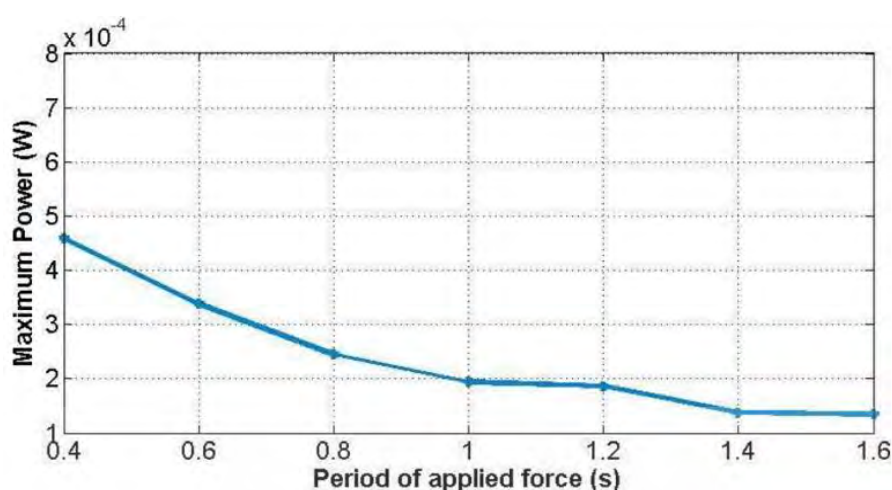
รูปที่ 3.5 กำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเก็บประจุภายในเพียโซอิเล็กทริก

ในส่วนของการปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานภายในของเพียโซอิเล็กทริกไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออกแต่ค่ากำลังไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะเห็นได้ว่าค่อนข้างที่จะคงที่ แสดงผลการจำลองไว้ดังรูปที่ 3.6 และค่ากำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อทำการเพิ่มคาบเวลาของแรงกระทำทางกลที่ป้อนให้กับเพียโซอิเล็กทริกได้ข้อสรุปว่าการเพิ่มคาบเวลาในการกระตุ้นทำให้กำลังไฟฟ้าออกมีค่าที่ลดลงเนื่องจากความถี่ของการกระตุ้นมีค่าแตกต่างจากความถี่ธรรมชาติของวัสดุมากขึ้น แสดงผลการจำลองไว้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 กำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายในเพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 กำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อเปลี่ยนแปลงคาบเวลาการป้อนแรงกระทำทางกลกับเพียโซอิเล็กทริก

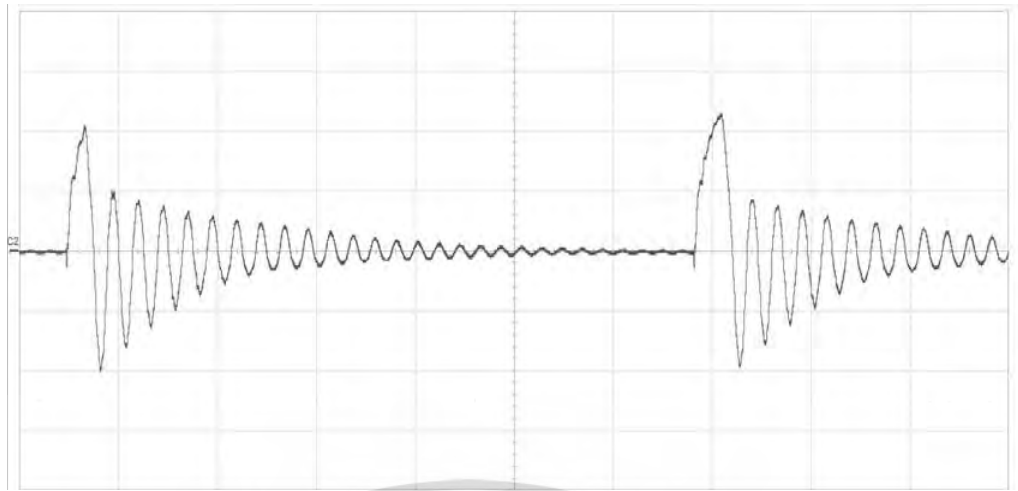
การศึกษาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจึงมีความสำคัญกับการเลือกประเภทของเพียโซอิเล็กทริกที่เหมาะสมแก่วัตถุประสงค์การใช้งาน สามารถประเมินค่าพลังงานที่ต้องการเพื่อการวางแผนการสะสมพลังงานเพื่อใช้งานกับอุปกรณ์ที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นต่อไปอีกทั้งยังสามารถเปรียบเทียบกับราคาวัสดุเพื่อความคุ้มค่าในการติดตั้งใช้งานจริง

### 3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

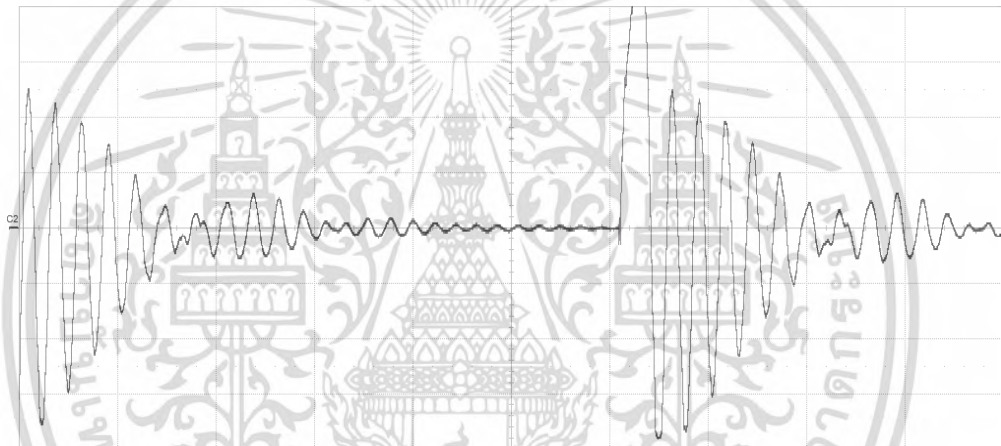
ลักษณะสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับแรงกระตุ้นทางกลที่มีความถี่ต่ำจะมีลักษณะคล้ายสัญญาณไซน์ที่มีความหน่วงทำให้แอมพลิจูดลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากออสซิลโลสโคปแสดงไว้ดังรูปที่ 3.8 สังเกตได้ว่าแรงที่กระทำต่อวัสดุมีผลต่อปริมาณแรงดันไฟฟ้าเพียงแค่ช่วงแรกเพียงเท่านั้น หลังจากที่ปลดแรงที่กระทำออกไปวัสดุจะสั่นด้วยตัวเองอย่างต่อเนื่องด้วยความถี่ธรรมชาติของวัสดุ ดังนั้นหากต้องการให้แรงดันไฟฟ้าขาออกจากเพียโซอิเล็กทริกมีปริมาณมากขึ้นจะต้องทำให้ช่วงของการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติของวัสดุมีแอมพลิจูดที่สูงขึ้น ส่งผลให้พลังงานโดยรวมเมื่อวัสดุรับแรงทางกลหนึ่งครั้งสูงขึ้นอย่างมาก การวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์จึงเป็นอีกส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญและจะกล่าวถึงในบทถัดไป

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าโดยการต่ออนุกรมและขนานเพียโซอิเล็กทริกพบว่าการต่ออนุกรมสามารถเพิ่มปริมาณแรงดันไฟฟ้า ส่วนการต่อขนานจะเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้า จึงเลือกการติดตั้งเป็นแบบต่อขนานเพื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากธรรมชาติของเพียโซอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์ที่ให้แรงดันไฟฟ้าที่สูงแต่กระแสไฟฟ้าต่ำ การต่อขนานจึงมีความเหมาะสมในการติดตั้งเป็นพื้นกำเนิดพลังงานเพื่อประโยชน์ต่อการลดระยะเวลาประจุแบตเตอรี่ รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริกแสดงไว้ดังรูปที่ 3.8 รูปคลื่นสัญญาณเมื่อทำการต่อขนานและอนุกรมแสดงไว้ดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ

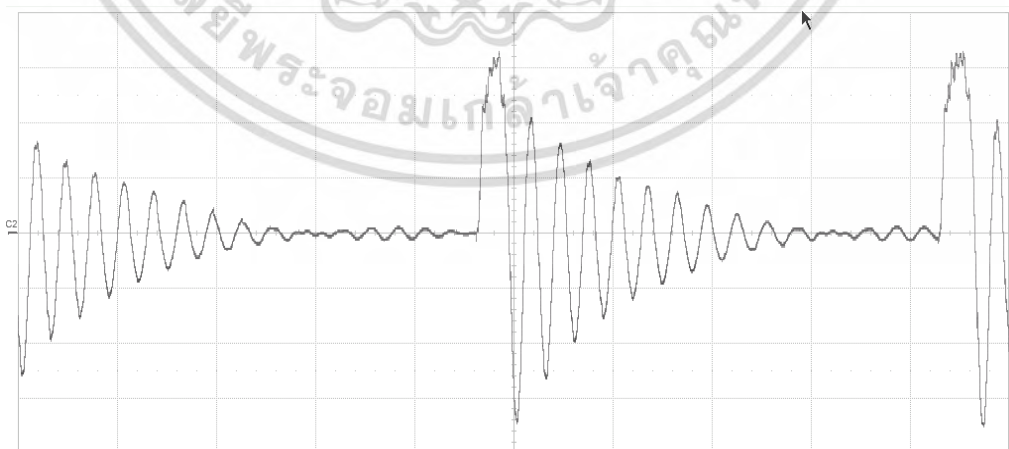
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แรงดันไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 3.9 สัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นอนุกรม



รูปที่ 3.10 สัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นขนาน

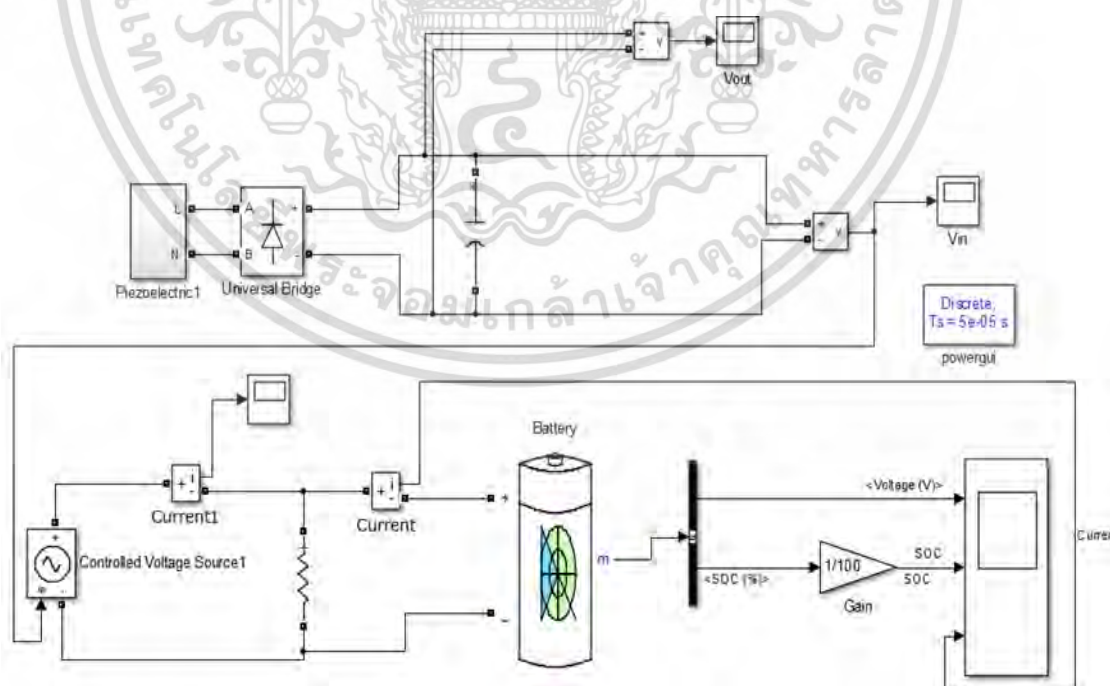
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สรุปขนาดแรงดันไฟฟ้าเมื่อต่อแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในลักษณะต่าง ๆ

ลักษณะการต่อ	ขนาดแรงดัน (V)
แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่น	20.48
แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นอนุกรมกัน	35.64
แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 3 แผ่นอนุกรมกัน	41.39
แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 4 แผ่นอนุกรมกัน	54.25
แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นขนานกัน	21.84
แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 3 แผ่นขนานกัน	24.97
แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 4 แผ่นขนานกัน	26.51

### 3.3 การจำลองการประจุแบตเตอรี่ด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

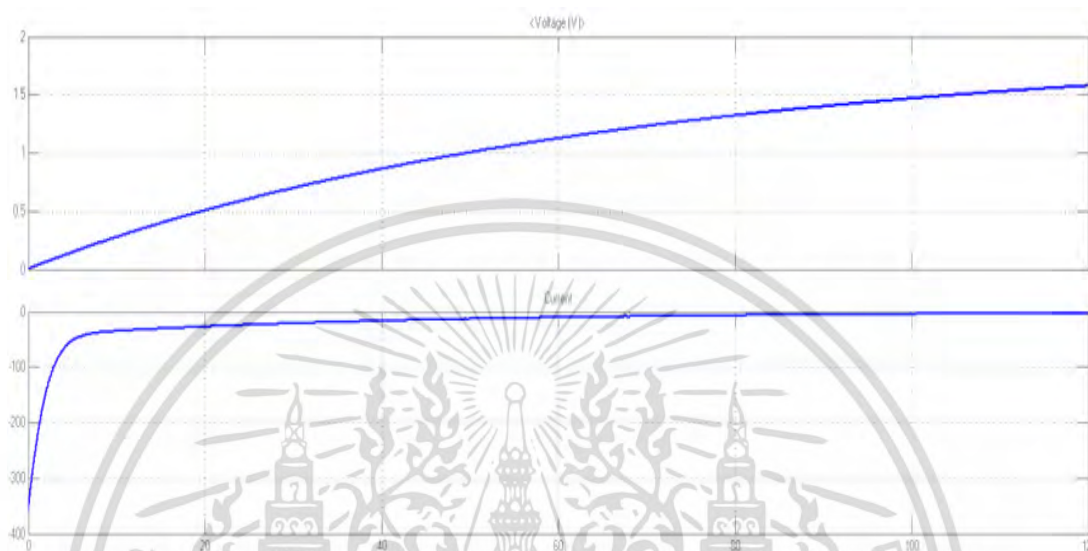
การจำลองการประจุแบตเตอรี่ด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในเนื้อหาส่วนนี้จะใช้แบบจำลองทางไฟฟ้าเหมือนกับเนื้อหาในส่วนก่อนหน้า โดยอาศัยการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink เนื่องจากมีโครงสร้างของแบตเตอรี่ให้ใช้งานสะดวกต่อการทดลองการประจุแบตเตอรี่ด้วยพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเก็บเกี่ยวได้จากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยวงจรไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการจำลองเพื่อการประจุแบตเตอรี่ด้วยเพียโซอิเล็กทริกแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการจำลองประจุแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการประจุแบตเตอรี่จะใช้ความถี่การกระตุ้นแผ่นเพียโซอิเล็กทริกด้วยความถี่ต่ำโดยการกำหนดค่าแอมพลิจูดและความถี่ของแรงทางกลแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและสวิตช์ไอจีบีที วงจรเรียงกระแส แบบจำลองโหลดที่ใช้ทดลองเป็นแบตเตอรี่ประเภท Ni-Mh ผลการจำลองแสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 รูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่แบตเตอรี่

ผลจากการทดลองแบ่งออกเป็นการติดตั้งเพียโซอิเล็กทริกเป็น 5 รูปแบบ กล่าวคือเพียโซอิเล็กทริกหนึ่งแผ่น เพียโซอิเล็กทริกสองแผ่นต่อขนาน เพียโซอิเล็กทริกสองแผ่นต่ออนุกรม เพียโซอิเล็กทริกสี่แผ่นต่อขนาน และเพียโซอิเล็กทริกสี่แผ่นต่ออนุกรม เพื่อประจุแบตเตอรี่ขนาด 20 mAh และ 40 mAh ผลการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 3.2

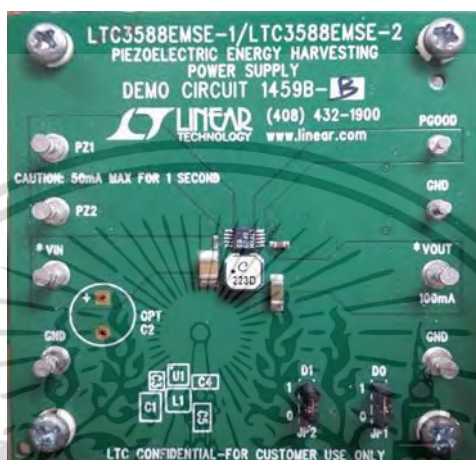
ตารางที่ 3.2 สรุปลเวลาในการประจุแบตเตอรี่ของการติดตั้งเพียโซอิเล็กทริกแบบต่าง ๆ

รูปแบบการติดตั้ง	เวลาในการประจุแบตเตอรี่	
	แบตเตอรี่ 20 mAh	แบตเตอรี่ 40 mAh
1 แผ่น	> 6 ชั่วโมง 22 นาที	> 7 ชั่วโมง 39 นาที
2 แผ่นต่อขนาน	6 ชั่วโมง 22 นาที	7 ชั่วโมง 39 นาที
4 แผ่นต่อขนาน	6 ชั่วโมง 10 นาที	7 ชั่วโมง 28 นาที
2 แผ่นต่ออนุกรม	1 ชั่วโมง 58 นาที	2 ชั่วโมง 23 นาที
4 แผ่นต่ออนุกรม	1 ชั่วโมง 3 นาที	1 ชั่วโมง 21 นาที

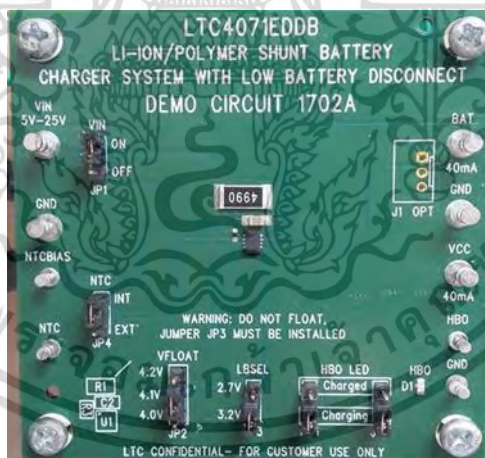
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ในส่วนการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริก จำเป็นต้องอาศัยวงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานซึ่งเลือกใช้แผงวงจร LTC5388-2 แสดงไว้ดังรูปที่ 3.13 โดยหน้าที่หลักของวงจรคือการแปลงพลังงานไฟฟ้าที่เพียโซอิเล็กทริกผลิตได้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้กับอุปกรณ์ประเภทเซนเซอร์และอุปกรณ์ไร้สาย



รูปที่ 3.13 วงจรเก็บเกี่ยวพลังงาน LTC5388-2

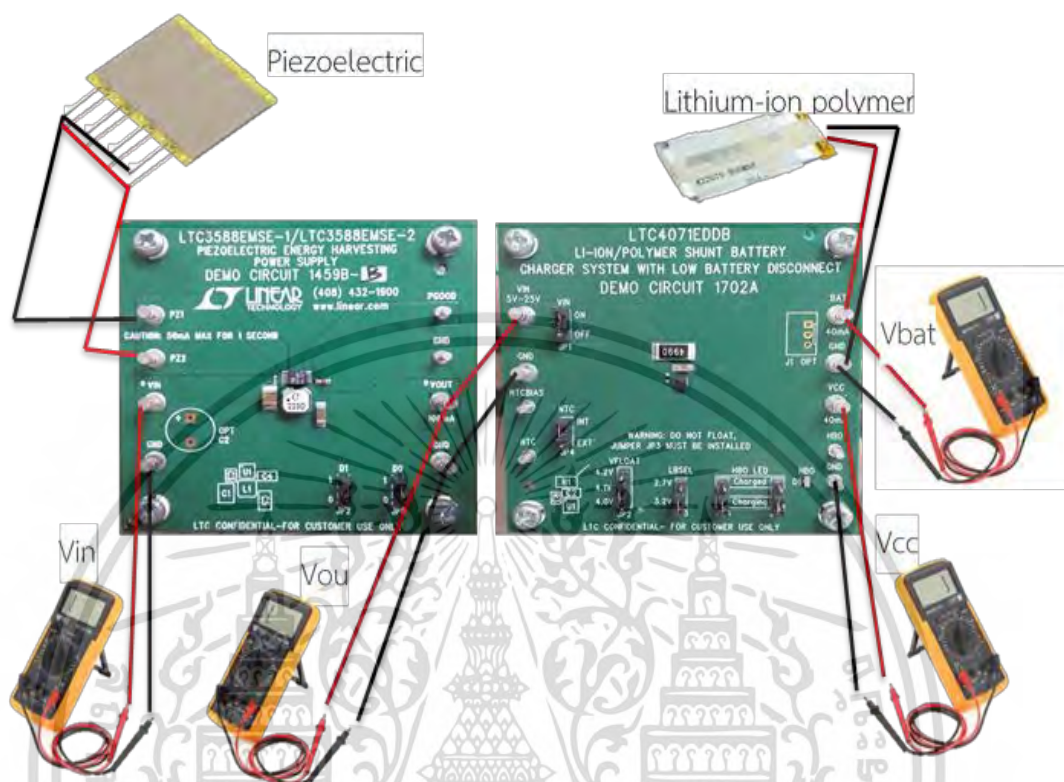


รูปที่ 3.14 วงจรควบคุมการประจุแบตเตอรี่ LTC4071

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้อาศัยพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำไปทดลองประจุแบตเตอรี่ โดยอาศัยวงจรควบคุมการประจุแบตเตอรี่ LTC4071 แสดงไว้ดังรูปที่ 3.14 ภายในแผงวงจรประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสและวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง-กระแสตรงแบบลดทอนระดับแรงดันแบบความสูญเสียทางไฟฟ้าต่ำ เพื่อให้พลังงานไฟฟ้าขาออกมีค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นและมีระดับ

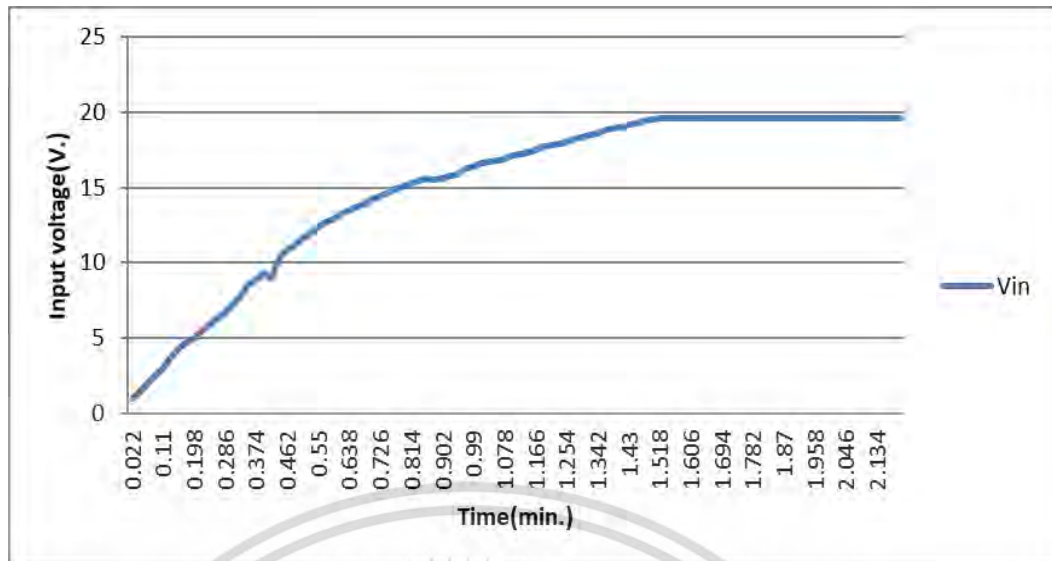
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการประจุแบตเตอรี่ ลักษณะการติดตั้งการทดลองและรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริกแสดงไว้ดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับ

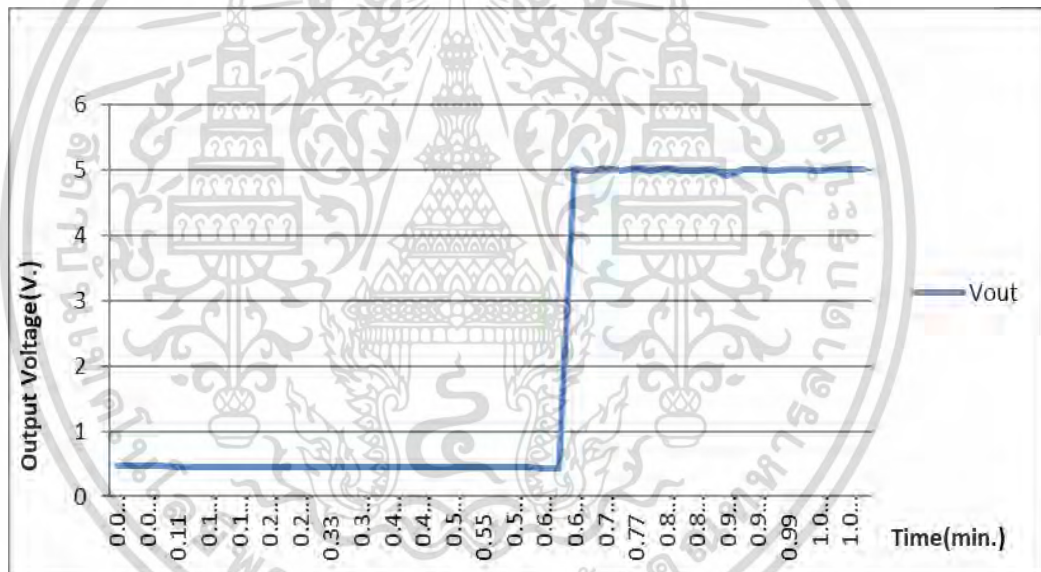


รูปที่ 3.15 การติดตั้งชุดทดลองเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุภายนอก 2 ตัว ขนาด 100  $\mu\text{F}$  35 V ที่ต่อขนานกันเพิ่มเข้าไปกับวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อสะสมพลังงานทางด้านขาเข้าที่ได้รับจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งพบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่มีการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ขนาดของแรงดันขาเข้าจะขึ้นไปสูงสุดประมาณ 19 V และจะคงที่ต่อเนื่อง หากได้รับพลังงานจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกอย่างต่อเนื่องเช่นกันแสดงไว้ดังรูปที่ 3.16 ทั้งนี้หากไม่ได้รับพลังงานจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก หรือมีการดึงพลังงานจากวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานไปใช้จะทำให้แรงดันอินพุตลดลง



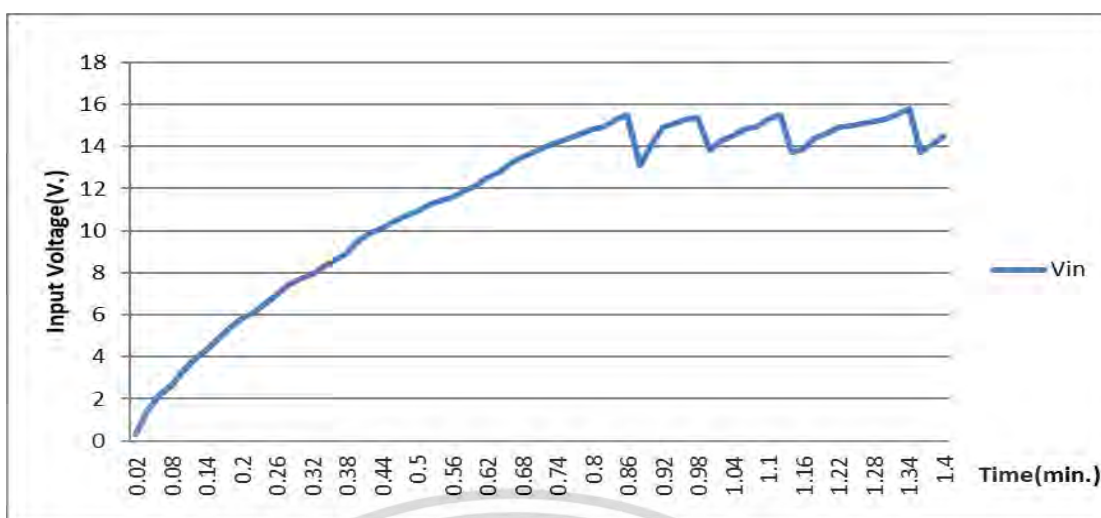
รูปที่ 3.16 แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานเทียบกับเวลา



รูปที่ 3.17 แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานเทียบกับเวลา

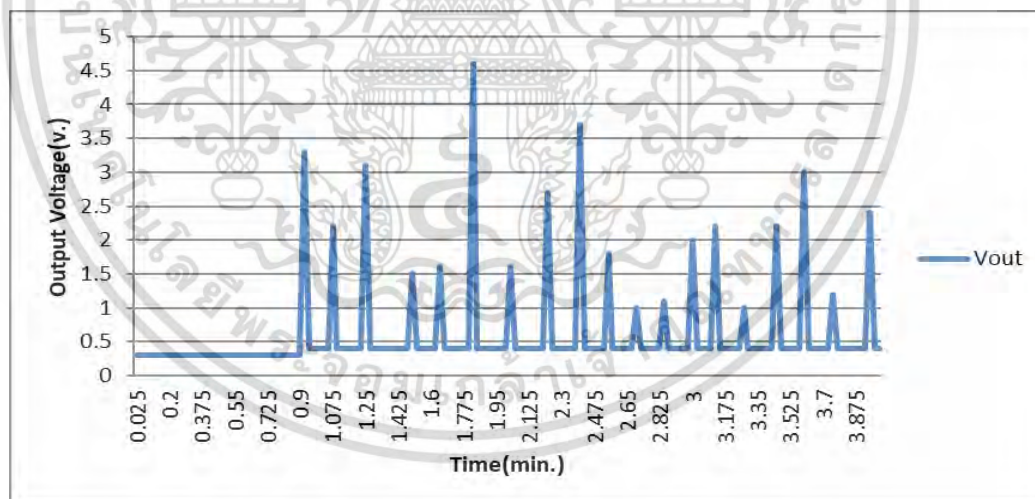
จากรูปที่ 3.17 แรงดันไฟฟ้าขาออกจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่มีการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ขนาดของแรงดันเอาต์พุตจะขึ้นไปสูงสุดที่ 5 V ตามบอร์ด LTC3588-2 และค่อนข้างคงที่ต่อเนื่อง เมื่อตัวเก็บประจุทางด้านอินพุต สะสมพลังงานถึงระดับ 15.5 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานเทียบกับเวลาเมื่อต่อวงจรประจุแบตเตอรี่

แรงดันไฟฟ้าขาเข้าจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่มีการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ขนาดของแรงดันอินพุตจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ และสูงสุดประมาณ 16 V หลังต่อวงจรชาร์จ ขนาดแรงดันอินพุตจะตกลงอยู่ระหว่าง 13 – 16 V ทุกครั้งที่แรงดันตกนั้น แสดงว่ามีการดึงพลังงานเข้าวงจรชาร์จ แบตเตอรี่แสดงไว้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.19 แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานเทียบกับเวลาเมื่อต่อวงจรประจุแบตเตอรี่

จากรูปที่ 3.19 แรงดันไฟฟ้าขาออกจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่มีการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ขนาดของแรงดันจะเพิ่มขึ้นไปจนถึง 5 V และต่ำกว่า 5 V หลังต่อวงจรชาร์จ แสดงว่ามีการดึงพลังงานเข้าแบตเตอรี่ หลังจากนั้นแรงดันเอาต์พุตจะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นและตกลงทุกครั้งที่มีการดึงพลังงานออกไป เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์โครงสร้าง

เนื่องจากปัญหาเชิงวิศวกรรมทั่วไปมักมีความซับซ้อนและอธิบายปัญหาด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ การวิเคราะห์ปัญหาในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถที่จะอธิบายได้ด้วยผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ซึ่งประกอบไปด้วยค่าตัวแปรตามตำแหน่งต่าง ๆ จำนวนมากนับไม่ถ้วนได้อย่างชัดเจน ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ผลตอบสนองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาที่สนใจ เพื่อที่จะลดค่าทั้งหมดจากผลเฉลยแม่นยำตรงที่มีจำนวนอนันต์เป็นค่าประมาณในจำนวนที่นับได้ (finite) โดยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (elements) ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน และมีสมการเฉพาะของแต่ละเอลิเมนต์ ทำการรวบรวมเป็นระบบสมการแล้วทำการวิเคราะห์หาผลเฉลยโดยประมาณตามตำแหน่งต่าง ๆ ของปัญหานั้น ความแม่นยำของผลเฉลยด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ รวมไปถึงรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ว่ามีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด

### 4.1 การศึกษาคุณลักษณะทางกล

การศึกษาคุณลักษณะของวัสดุเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองทางกลเป็นอีกส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการนำวัสดุใด ๆ ไปติดตั้งใช้งานจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำวัสดุพิเศษหรือคอมโพสิตที่มีราคาที่สูงอีกทั้งมีขนาดเล็กและเปราะ อาจเกิดความเสียหายหรือสูญเสียคุณสมบัติการแปลงพลังงานไปเมื่อได้รับแรงทางกลมากเกินไป ในทางตรงกันข้ามพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเก็บเกี่ยวได้จากวัสดุพิเศษหรือคอมโพสิตนั้นแปรผันโดยตรงกับความเค้นทางกลที่เกิดขึ้นกับผลึกในเนื้อวัสดุ กล่าวคือเมื่อแรงทางกลที่ได้รับสูงขึ้นจะทำให้เกิดความเค้นสะสมมากทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้รับก็จะมีปริมาณที่สูงขึ้น ดังนั้นการที่ได้รับพลังงานทางกลน้อยจนเกินไปก็อาจทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากการแปลงพลังงานมีค่าที่ต่ำกว่าปริมาณที่ควรจะได้รับและไม่คุ้มค่าแก่การติดตั้งใช้งานหากปราศจากการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกล

การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางกลบนพื้นฐานของหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ซึ่งเป็นการนำรูปทรงของปัญหาทางวิศวกรรมที่มีความซับซ้อนและเงื่อนไขการวิเคราะห์ มาแบ่งโดเมน (domain) ของปัญหาออกเป็นรูปทรงทางเรขาคณิตอย่างง่ายที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (elements) แล้วสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์ที่มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของเอลิเมนต์เหล่านั้น รวบรวมสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งหมดเป็นระบบสมการและระบุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขขอบเขตการวิเคราะห์ (boundary conditions) จากนั้นคำนวณหาผลเฉลยของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method: NM) ในงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะทางกลของวัสดุไฟไนต์อีลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ถูกสร้างและพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี พ.ศ. 2512 และถูกเผยแพร่จนเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางทั่วโลก

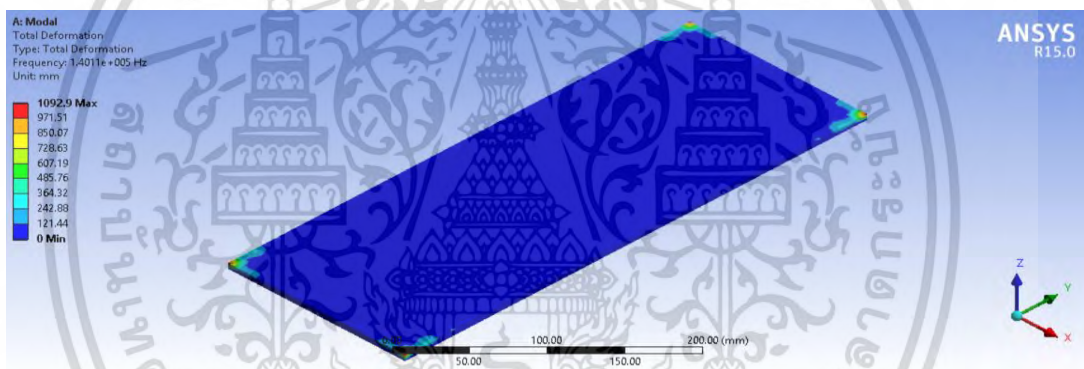
วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ใช้เป็นเพียโซอิเล็กทริกประเภทวัสดุผสมเซรามิกเลทเซอร์โครเนตไททาเนต (Lead Zirconate Titanate: PZT) ของบริษัท MIDE Technology รุ่น PPA-2011 ด้วยความที่ PZT มีคุณสมบัติเซรามิกทำให้เปราะและแตกหักได้ง่าย ในการใช้งานที่ต้องรับแรงทางกลโดยตรงจะต้องมีการเสริมความแข็งแรงให้แก่วัสดุนิยมใช้โลหะบางชั้นกลางระหว่าง PZT สองแผ่นที่มีลักษณะการจัดเรียงขั้วที่ตรงข้ามกันเพื่อให้สามารถสะสมพลังงานได้มากยิ่งขึ้น

#### 4.2 การจำลองวัสดุเพียโซอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

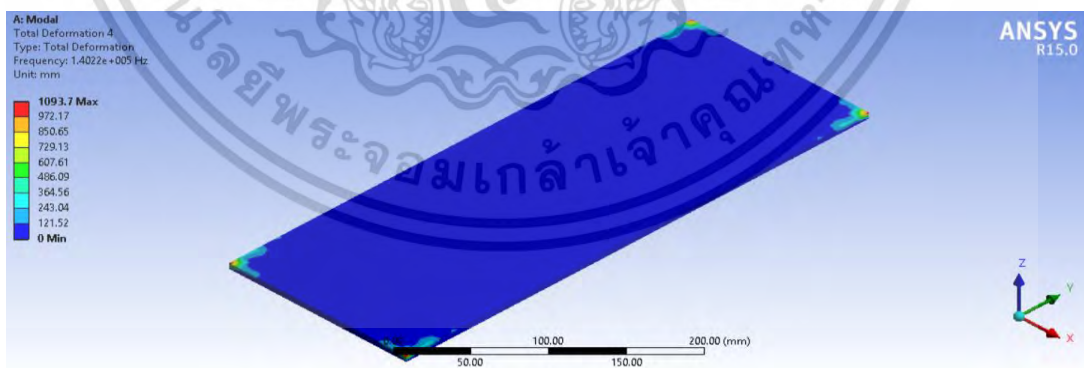
ในส่วนต่อไปเป็นการจำลองวัสดุเพียโซอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะทางกลของวัสดุเพื่อศึกษาความสามารถในการแปลงพลังงานในเชิงกล การศึกษาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เริ่มจากการวาดแบบวัสดุและกำหนดค่าเฉพาะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและเงื่อนไขขอบเขตเพื่อการประมวลผลจากโปรแกรม ANSYS Workbench โดยอาศัยการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ผลการวิเคราะห์สามารถวิเคราะห์ได้หลากหลายกว่าการวิเคราะห์ทางไฟฟ้า อาทิเช่นการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของการแกว่งตัวแบบอิสระของเพียโซอิเล็กทริกภายใต้แรงกระทำทางกลที่ป้อนให้วัสดุเพื่อการออกแบบปรับปรุงค่าความถี่ธรรมชาติของเพียโซอิเล็กทริกให้มีความใกล้เคียงกับความถี่ของการกระตุ้นภายในสภาวะการติดตั้งใช้งานพื้นกำเนิดพลังงานจริงนำไปสู่การเพิ่มปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ กล่าวคือเป็นไปตามทฤษฎีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อความถี่ของการกระตุ้นตรงกับกับความถี่ธรรมชาติของวัสดุ ผลการวิเคราะห์อื่น ๆ เช่น การกระจายตัวของความเค้นทางกลที่เกิดขึ้นบนวัสดุหากได้รับแรงทางกลในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งถ้ามีค่ามากจนเกินไปอาจทำให้วัสดุเสียหายและสูญเสียคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกไป แต่ในทางตรงกันข้ามความเค้นทางกลที่สูงนั้นส่งผลให้พลังงานที่ได้รับจากเพียโซอิเล็กทริกมีค่าสูงขึ้นไปด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์ทางไฟไนต์อีลิเมนต์มีความสำคัญกับการออกแบบชุดติดตั้งใช้งานจริงเพื่อให้ได้รับพลังงานไฟฟ้าสูงสุดโดยที่วัสดุไม่เกิดความเสียหาย

### 4.3 การจำลองการติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเพื่อวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ

จากที่กล่าวมาว่าความถี่ธรรมชาตินั้นส่งผลอย่างมากกับพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้จากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เนื่องด้วยแรงดันไฟจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับช่วงการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติของวัสดุ หากสามารถทำให้ความถี่ธรรมชาติมีค่าต่ำลง กล่าวคือมีความใกล้เคียงกับความถี่กระตุ้นซึ่งในวิทยานิพนธ์มุ่งเน้นไปที่ความถี่ของการเดินซึ่งเป็นการสั่นสะท้อนความถี่ต่ำแล้วนั้น วัสดุจะสามารถสั่นพ้องและทำและแอมพลิจูดการสั่นอย่างอิสระมีค่าสูงขึ้นทำให้พลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้นั้นมีปริมาณมากขึ้น การประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในเนื้อหาส่วนนี้จะทำการติดตั้งวัสดุที่มีรูปร่างเป็นแผ่นบางยาวลักษณะเหมือนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในลักษณะต่าง ๆ กันออกไป โดยแบ่งการติดตั้งออกเป็น 4 ลักษณะ คือ การยึดที่ส่วนฐาน (base fixed), การยึดรอบฐาน (membrane fixed), การยึดปลายทั้งสองฝั่งหรือแบบสะพาน (bridge fixed) และการยึดที่ปลายข้างใดข้างหนึ่งหรือแบบคานยื่น (cantilever fixed) ผลการจำลองแสดงไว้ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 ตามลำดับ

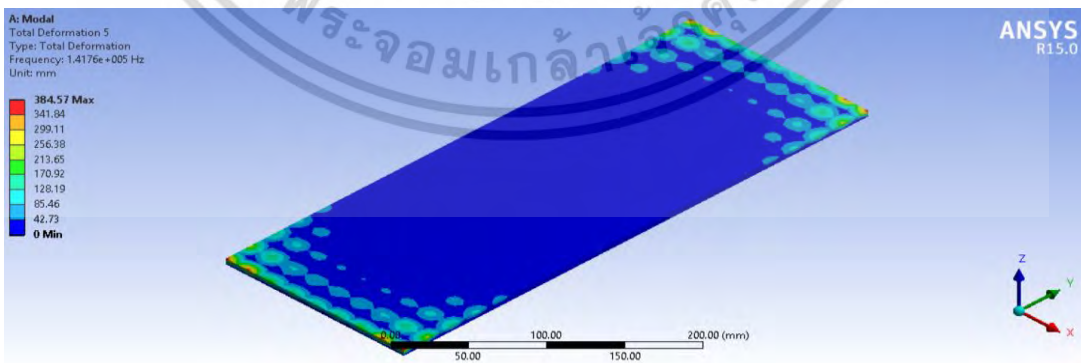
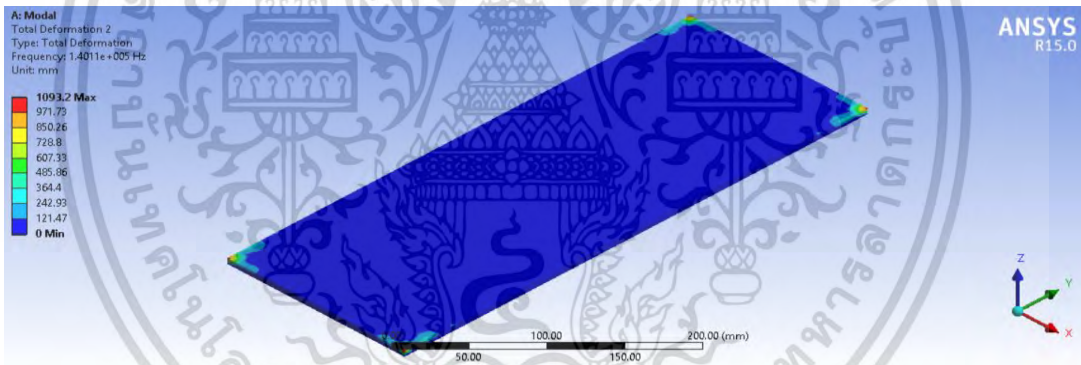
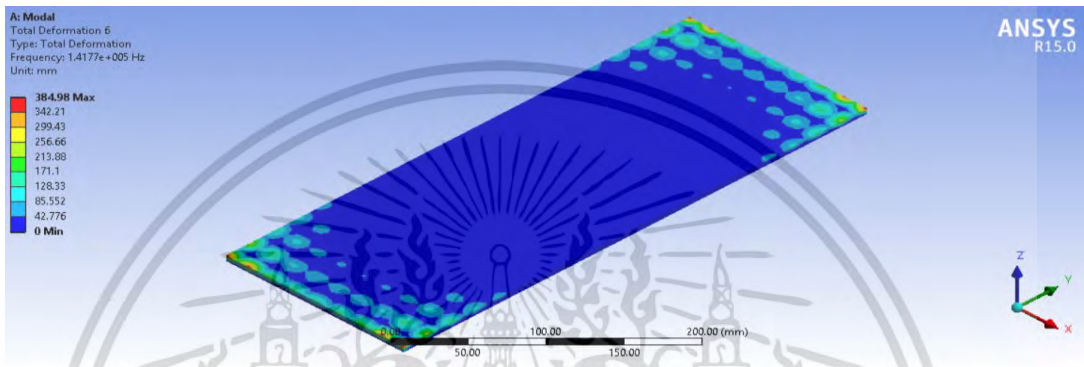
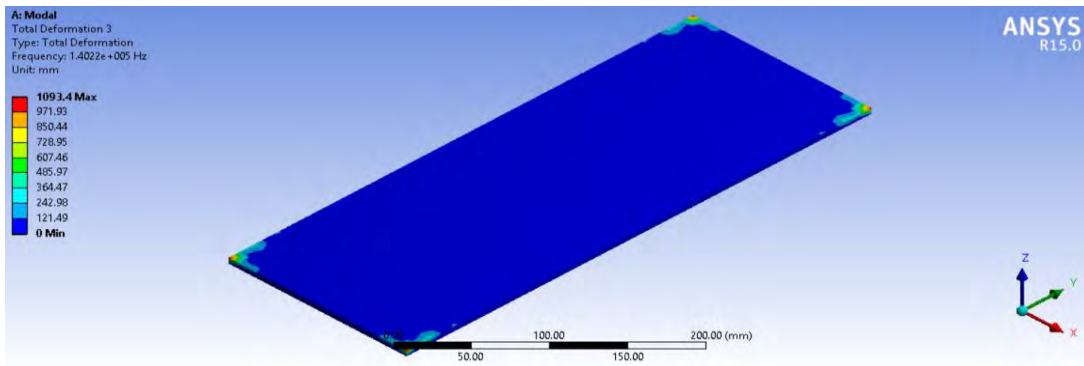


(ก)



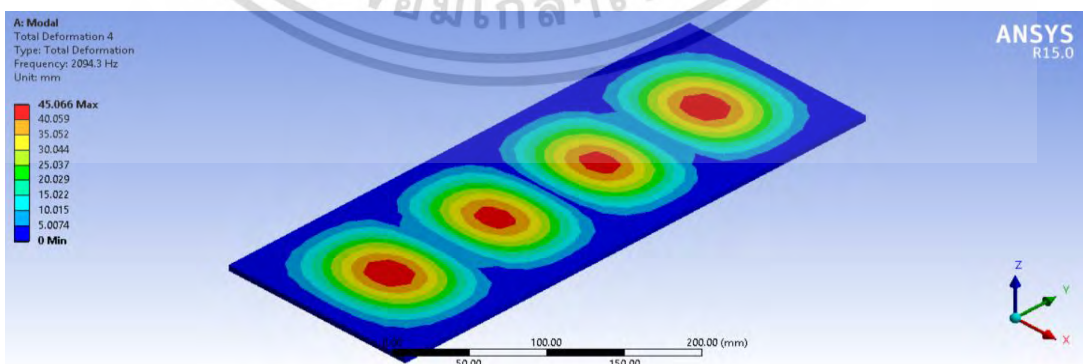
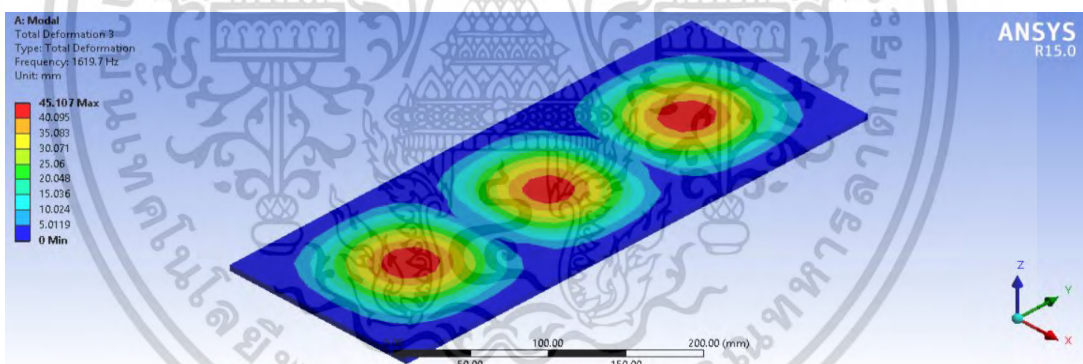
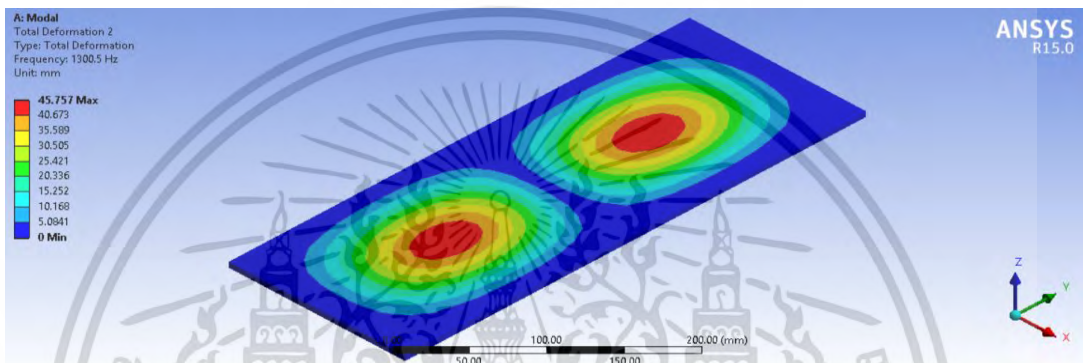
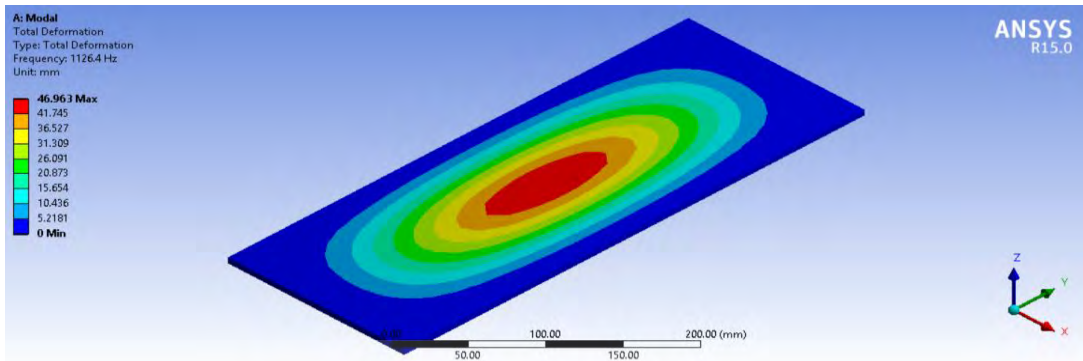
(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

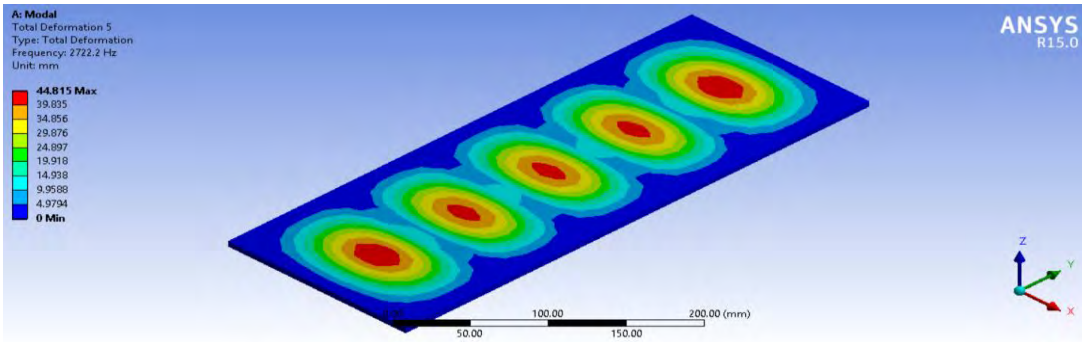


รูปที่ 4.1 การกระจัดเมื่อติดตั้งแบบยึดที่ส่วนฐาน (base fixed) ในการสั่นโหมดต่าง ๆ (ก) โหมด 1, (ข) โหมด 2, (ค) โหมด 3, (ง) โหมด 4, (จ) โหมด 5, (ฉ) โหมด 6

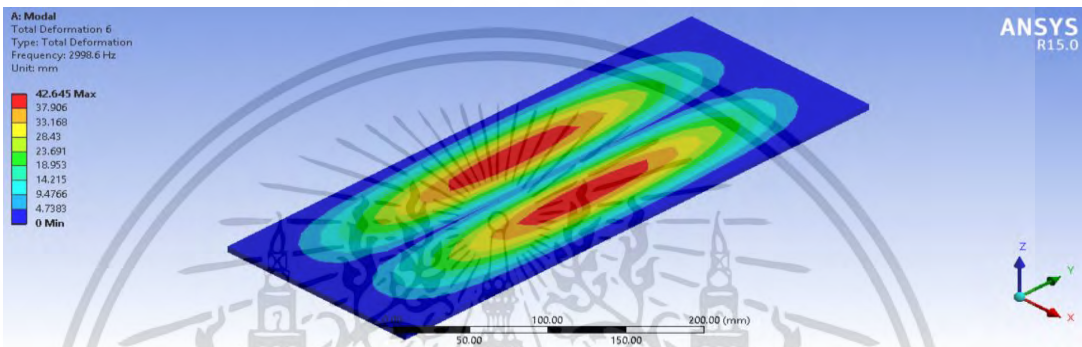
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

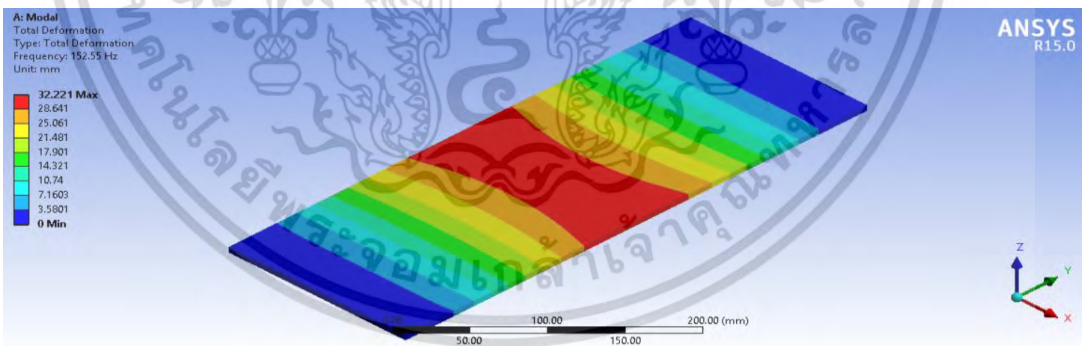


(จ)

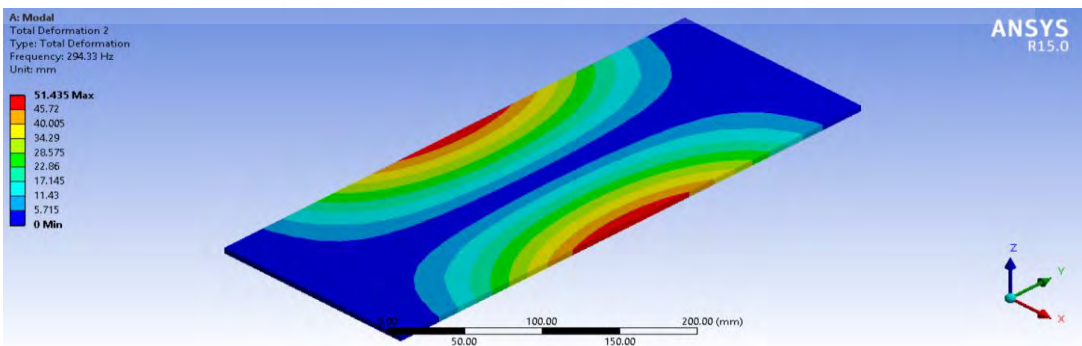


(ฉ)

รูปที่ 4.2 การกระจัดเมื่อติดตั้งแบบยึดรอบฐาน (membrane fixed) ในการสั่นโหมดต่าง ๆ (ก) โหมด 1, (ข) โหมด 2, (ค) โหมด 3, (ง) โหมด 4, (จ) โหมด 5, (ฉ) โหมด 6

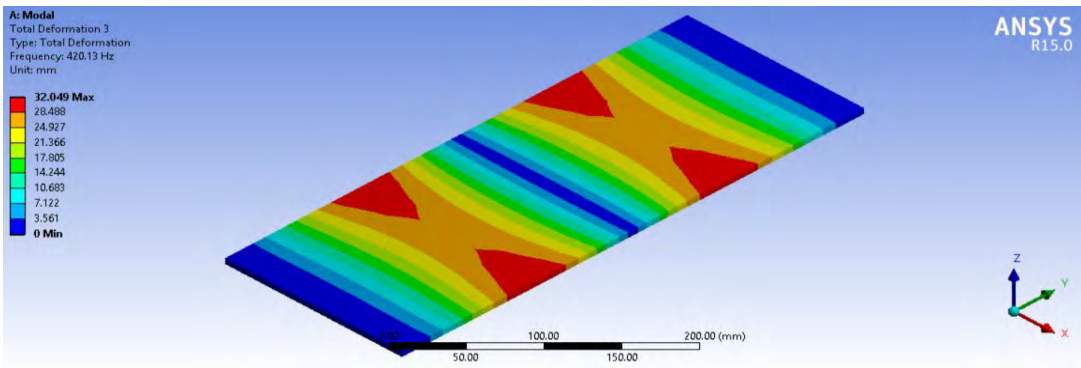


(ก)

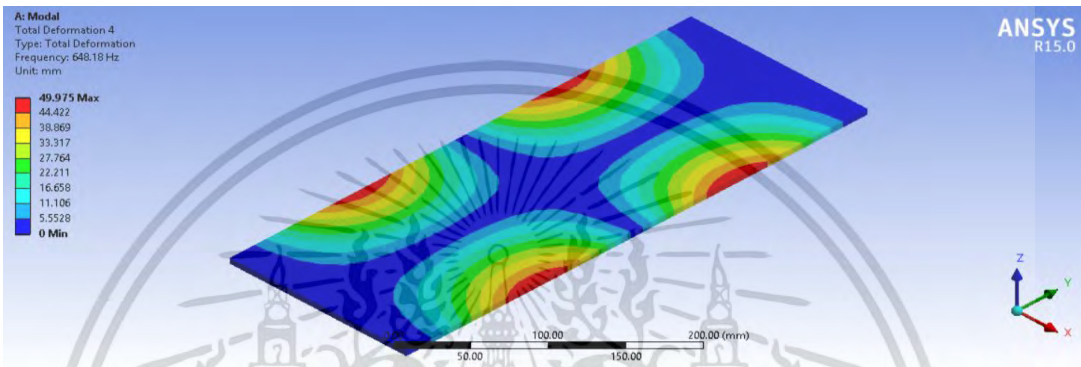


(ข)

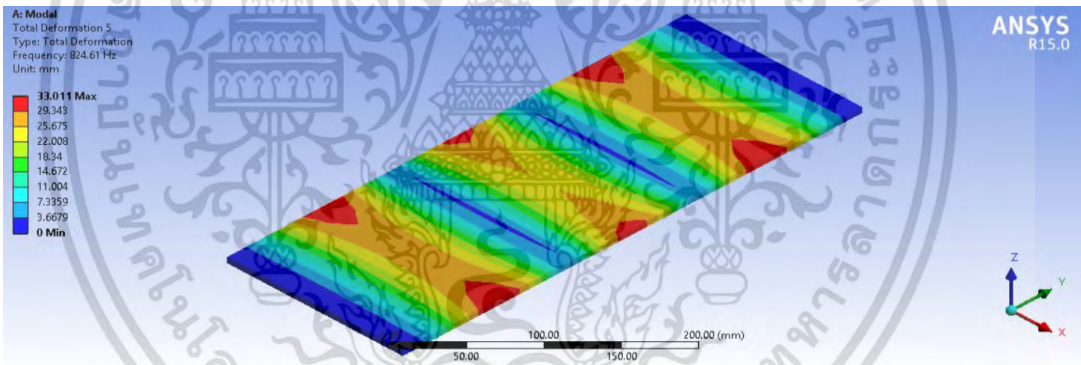
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



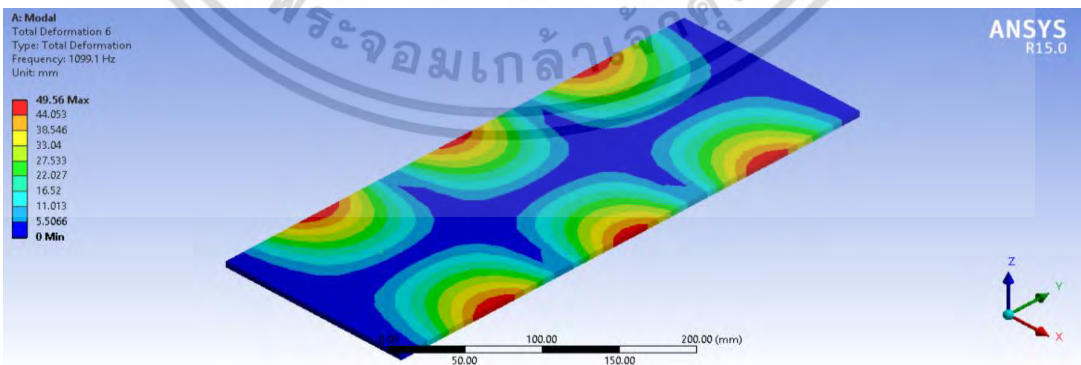
(ค)



(ง)



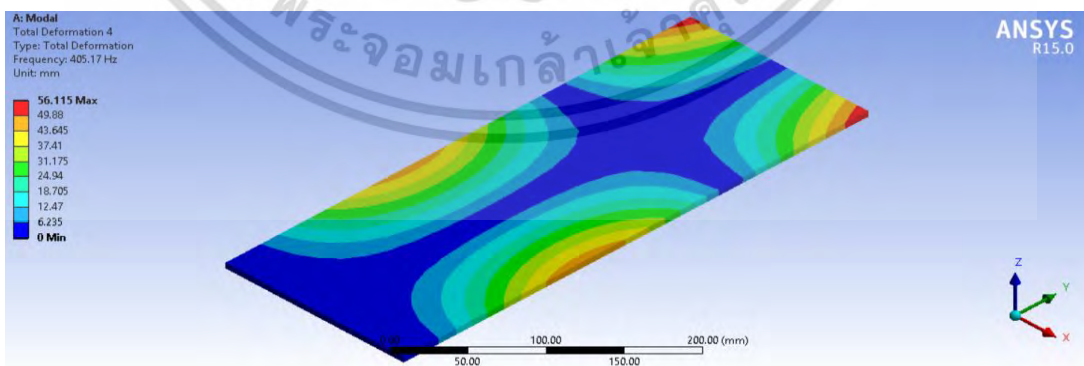
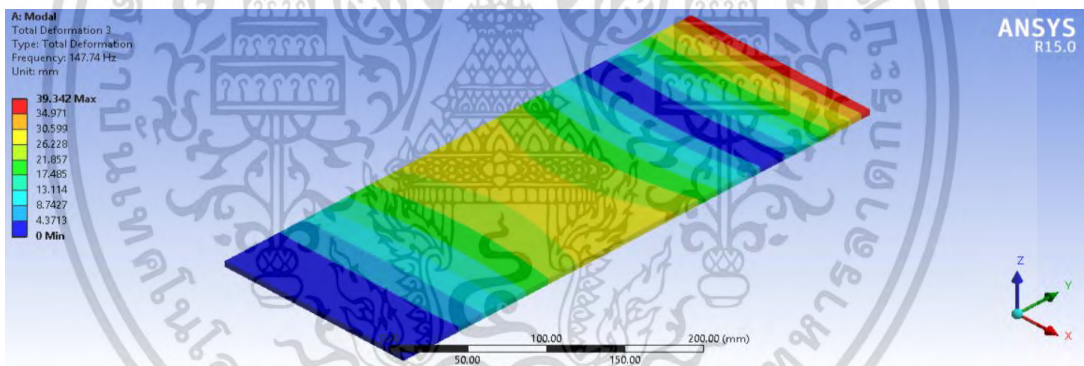
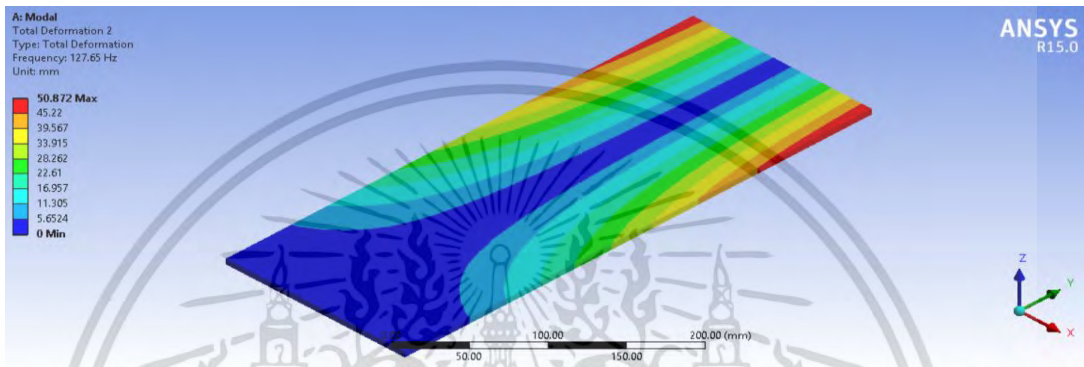
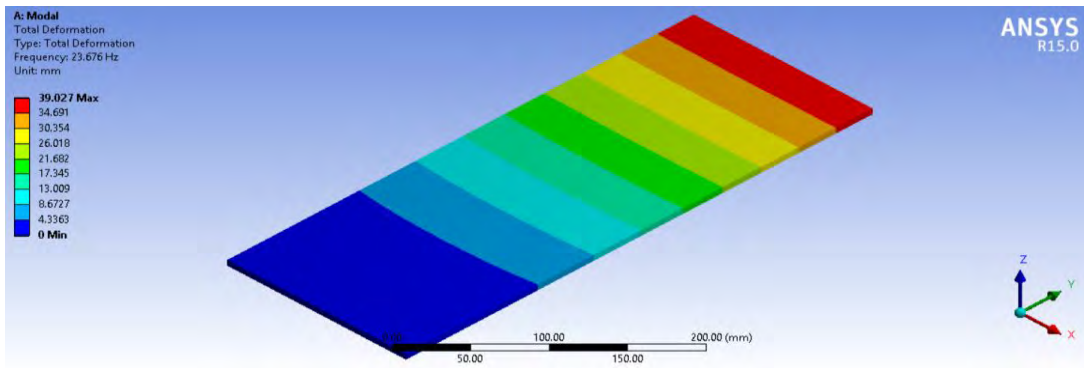
(จ)



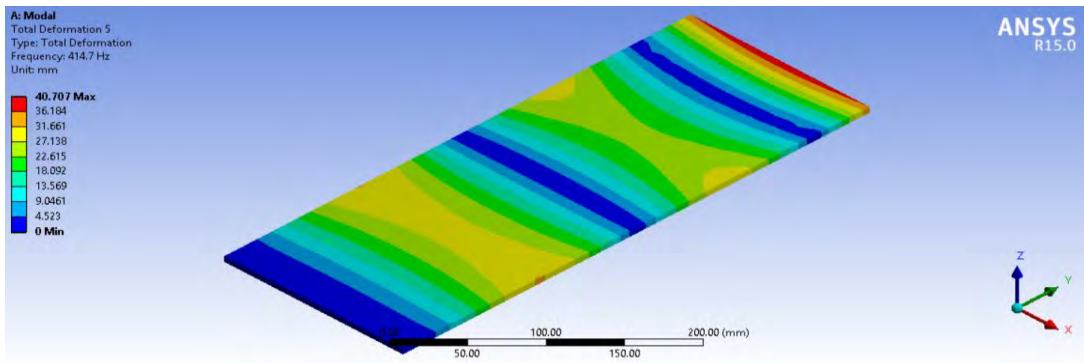
(ฉ)

รูปที่ 4.3 การกระจัดเมื่อติดตั้งแบบยึดปลายทั้งสองฝั่ง (bridge fixed) ในการสั่นโหมดต่าง ๆ (ก) โหมด 1, (ข) โหมด 2, (ค) โหมด 3, (ง) โหมด 4, (จ) โหมด 5, (ฉ) โหมด 6

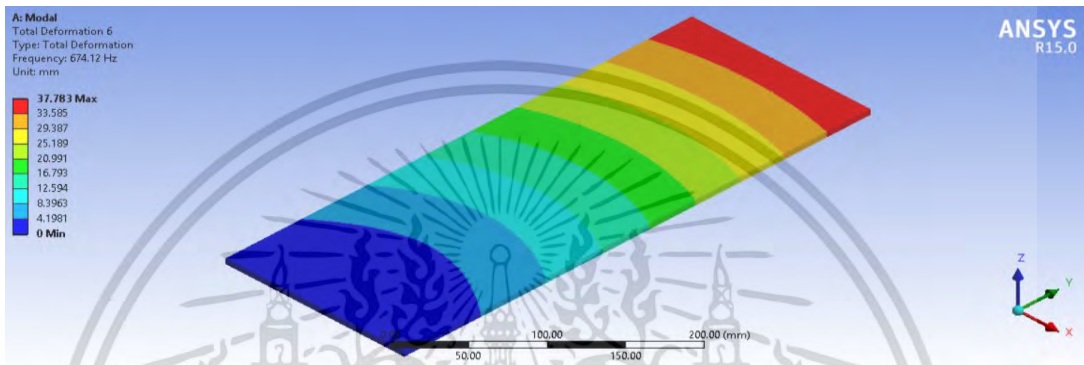
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.4 การกระจัดเมื่อติดตั้งแบบยึดแบบคานยื่น (cantilever fixed) ในการสั่นโหมดต่าง ๆ (ก) โหมด 1, (ข) โหมด 2, (ค) โหมด 3, (ง) โหมด 4, (จ) โหมด 5, (ฉ) โหมด 6

ตารางที่ 4.1 ค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นโหมดต่าง ๆ เมื่อติดตั้งวัสดุในลักษณะยึดที่ส่วนฐาน

โหมด	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)
1	1.40E+05
2	1.40E+05
3	1.40E+05
4	1.40E+05
5	1.42E+05
6	1.42E+05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นโหมมต่าง ๆ เมื่อติดตั้งวัสดุในลักษณะยึดรอบฐาน

โหมม	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)
1	152.55
2	294.33
3	423.13
4	648.18
5	824.61
6	1099.1

ตารางที่ 4.3 ค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นโหมมต่าง ๆ เมื่อติดตั้งวัสดุในลักษณะยึดปลายทั้งสองฝั่ง

โหมม	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)
1	1126.4
2	1300.5
3	1619.7
4	2094.3
5	2722.2
6	2998.6

ตารางที่ 4.4 ค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นโหมมต่าง ๆ เมื่อติดตั้งวัสดุในลักษณะยึดแบบคานยื่น

โหมม	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)
1	23.676
2	127.65
3	147.74
4	405.17
5	414.70
6	674.12

จากการจำลองการติดตั้งในลักษณะต่าง ๆ กัน พบว่าการติดตั้งแบบยึดที่ปลายฝั่งหนึ่งหรือการยึดแบบคานยื่น (cantilever fixed) สามารถทำให้วัสดุที่มีลักษณะแผ่นบางยาวมีค่าความถี่ธรรมชาติที่ต่ำที่สุดในทั้ง 4 แบบ การติดตั้งแต่ละแบบจะแสดงผล 6 โหมมการสั่น กล่าวคือค่าความถี่ธรรมชาติของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

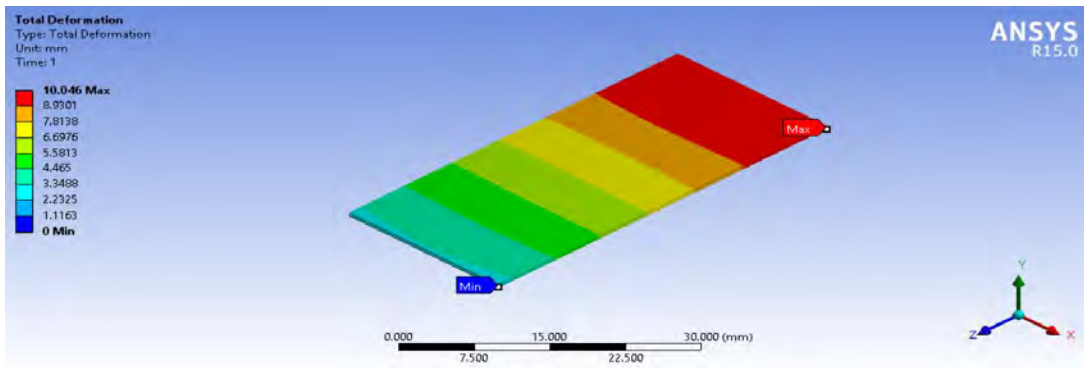
วัสดุ 6 ค่า โดยเรียงจากความถี่ต่ำไปความถี่สูง โหมดต่าง ๆ จะมีลักษณะการบิดตัวหรือโค้งงอของวัสดุที่แตกต่างกันออกไป ค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นโหมดต่าง ๆ ในแต่ละลักษณะการติดตั้งแสดงค่าไว้ดังตารางที่ 4.1 ถึง 4.4

#### 4.4 การจำลองความเค้นและความเครียดสะสมในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแบบต่าง ๆ

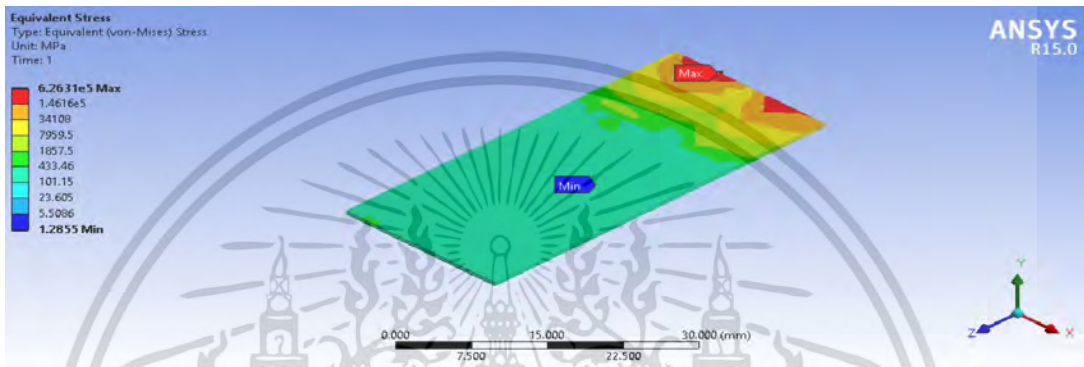
การจำลองเพื่อคำนวณค่าความเค้นและความเครียดสะสมในวัสดุเมื่อมีแรงกระทำทางกลมีความสำคัญ กล่าวคือพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้จากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นแปรผันโดยตรงกับปริมาณความเค้นและความเครียดสะสมในผลึก จึงทำการจำลองโดยอาศัยการติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในลักษณะคานยื่นเพื่อปริมาณพลังงานที่สูงจากการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติต่ำ โดยแบ่งประเภทของวัสดุออกเป็น 5 ชนิด กล่าวคือ PZT4, PZT5A, PZT5H, PZT8 และ BaTiO<sub>3</sub> โดยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงไว้ดังตารางที่ 4.5 ผลเฉลยในรูปแบบของคอนทัวร์แสดงค่าการเปลี่ยนรูป (deformation), ความเค้น (stress) และความเครียด (strain) แสดงไว้ดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.9 เพื่อวิเคราะห์เลือกวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีความเหมาะสมสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงาน กล่าวคือวัสดุที่เกิดความเค้นและความเครียดสูงกว่าชนิดอื่นภายใต้แรงกระทำทางกลลักษณะเดียวกัน

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

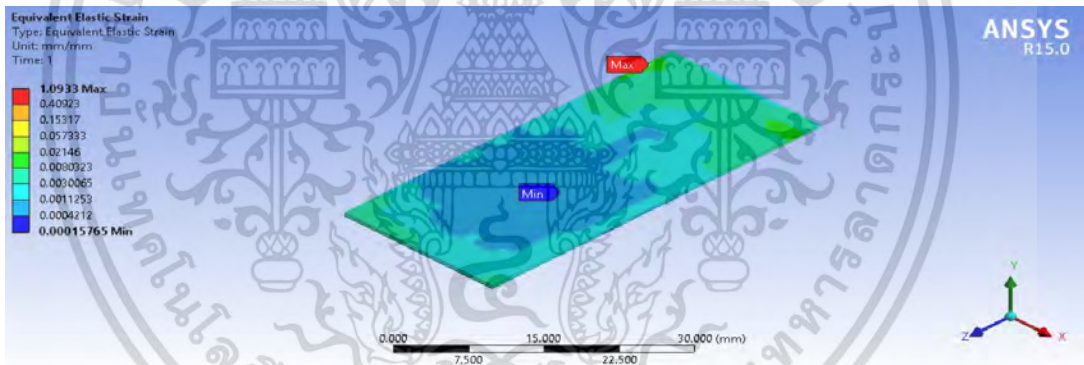
พารามิเตอร์	ชนิดเพียโซอิเล็กทริก				
	BaTiO <sub>3</sub>	PZT-4	PZT-5A	PZT-5H	PZT-8
r	5550	7500	7750	7800	7600
d <sub>31</sub>	-5.80E-11	-1.23E-10	-1.71E-10	-2.74E-10	-9.70E-11
d <sub>33</sub>	1.49E-10	2.89E-10	3.74E-10	5.93E-10	2.25E-10
d <sub>15</sub>	2.42E-10	4.96E-10	5.84E-10	7.41E-10	3.30E-10
s <sup>E</sup> <sub>11</sub>	8.60E-12	1.23E-11	1.64E-11	1.65E-11	1.15E-11
s <sup>E</sup> <sub>33</sub>	9.10E-12	1.55E-11	1.88E-11	2.07E-11	1.35E-11
s <sup>E</sup> <sub>12</sub>	-2.60E-12	-4.05E-12	-5.74E-12	-4.78E-12	-3.70E-12
s <sup>E</sup> <sub>13</sub>	-2.70E-12	-5.31E-12	-7.22E-12	-8.45E-12	-4.80E-12
s <sup>E</sup> <sub>44</sub>	2.22E-11	3.90E-11	4.75E-11	4.35E-11	3.19E-11
K <sup>T</sup> <sub>11</sub>	1300	1475	1730	3130	1290
K <sup>T</sup> <sub>33</sub>	1200	1300	1700	3400	1000



(ก)

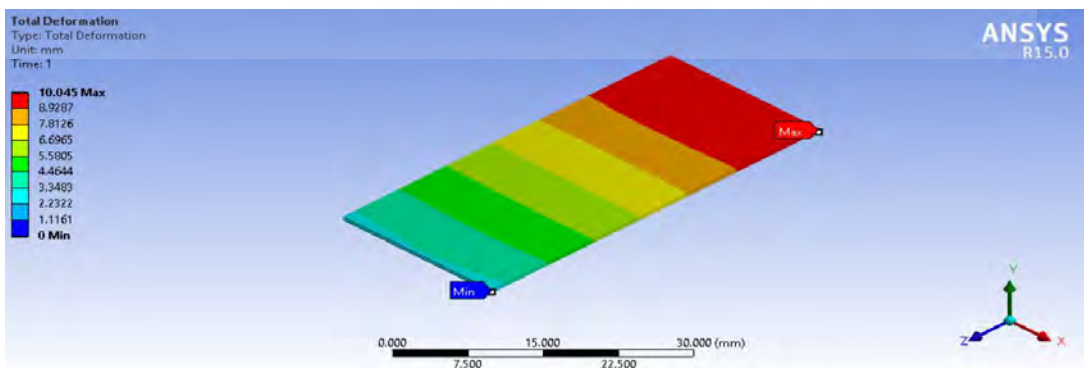


(ข)



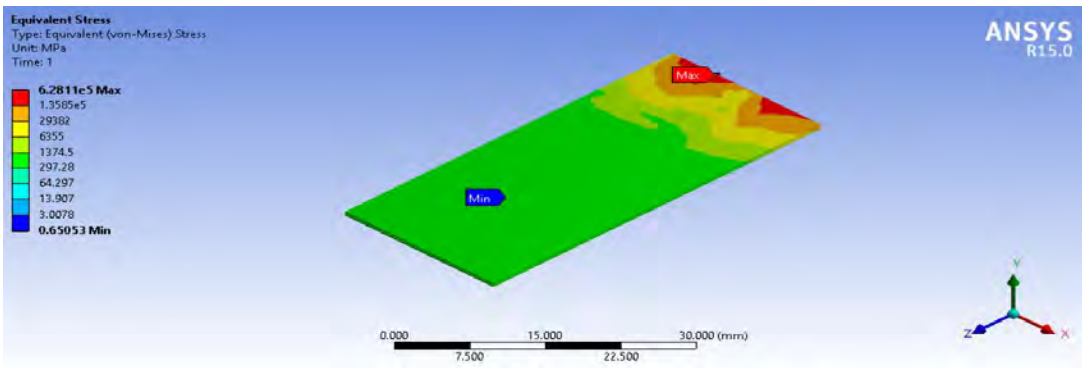
(ง)

รูปที่ 4.5 ผลเฉลยทางกลของวัสดุ PZT4 (ก) การเปลี่ยนรูป, (ข) ความเค้น, (ค) ความเครียด

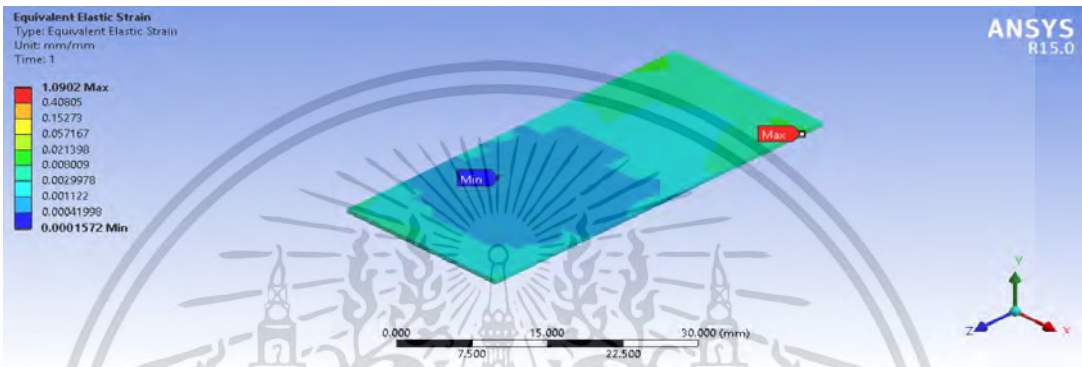


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

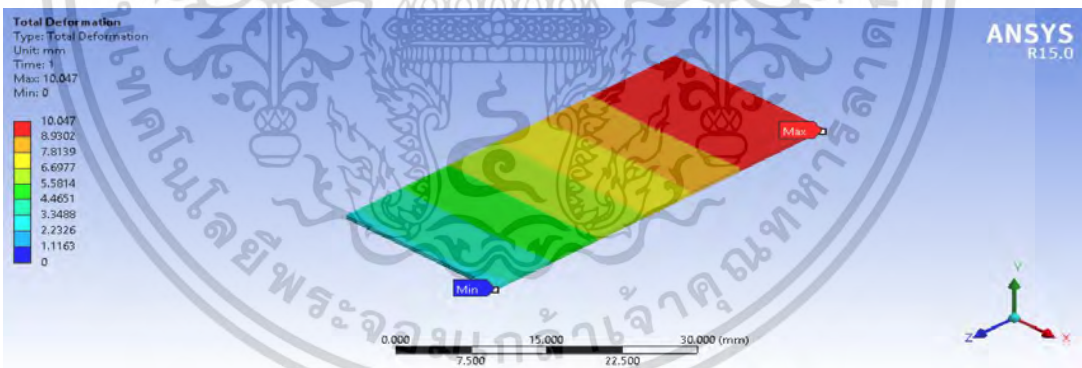


(ข)

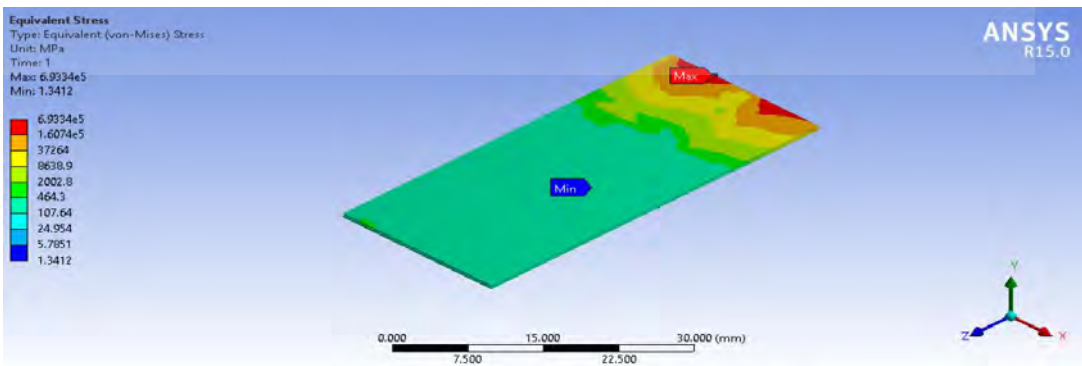


(ค)

รูปที่ 4.6 ผลเฉลยทางกลของวัสดุ PZT5A (ก) การเปลี่ยนรูป, (ข) ความเค้น, (ค) ความเครียด

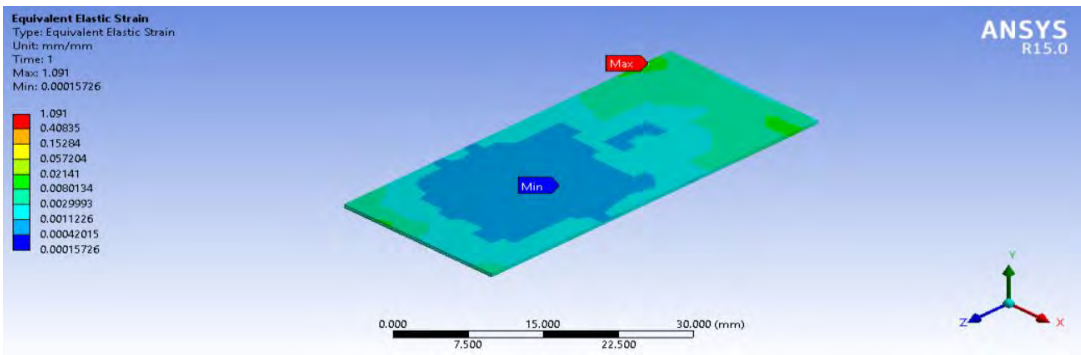


(ก)



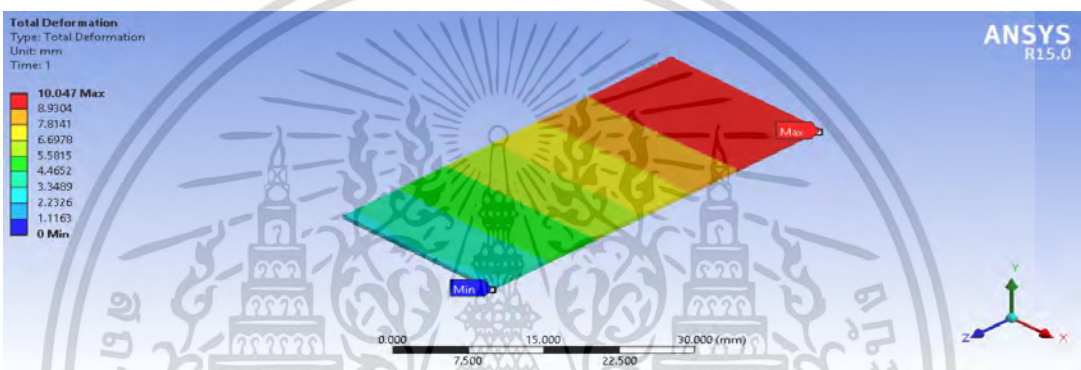
(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

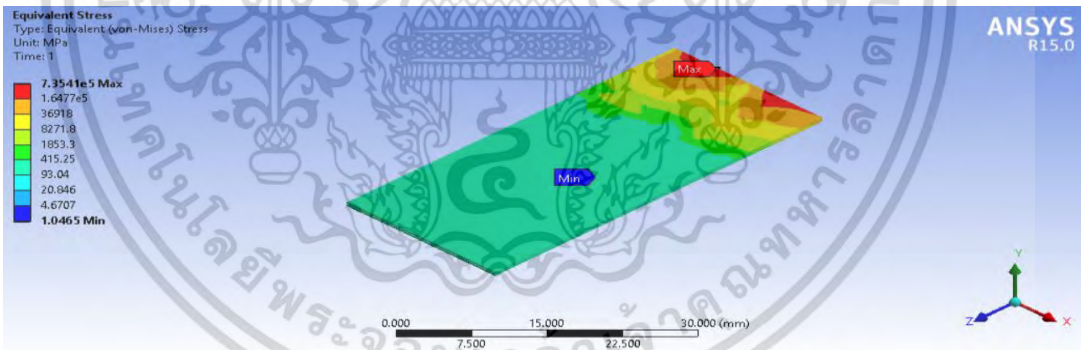


(ค)

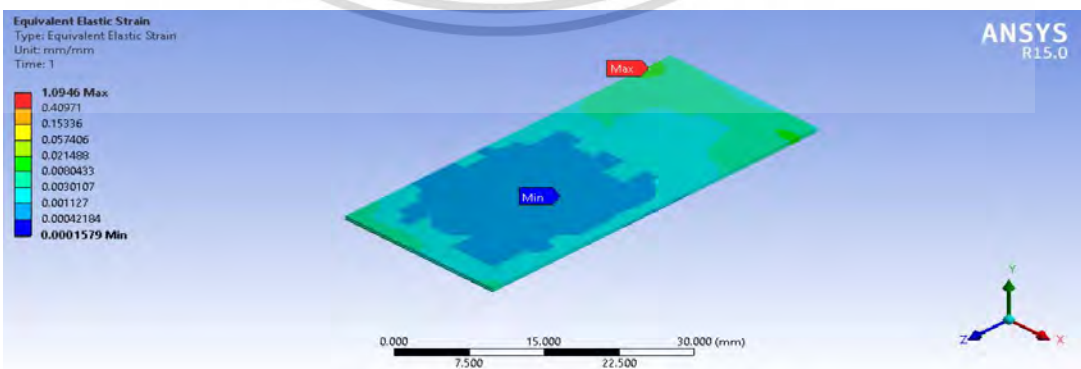
รูปที่ 4.7 ผลเฉลยทางกลของวัสดุ PZT5H (ก) การเปลี่ยนรูป, (ข) ความเค้น, (ค) ความเครียด



(ก)



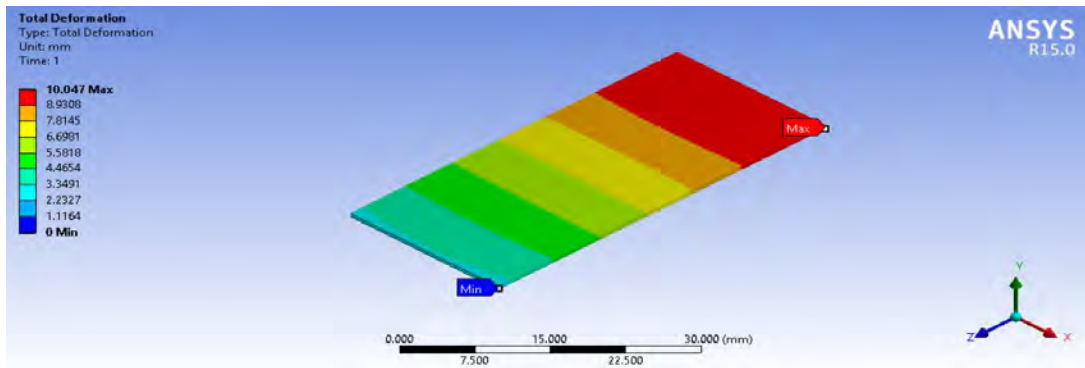
(ข)



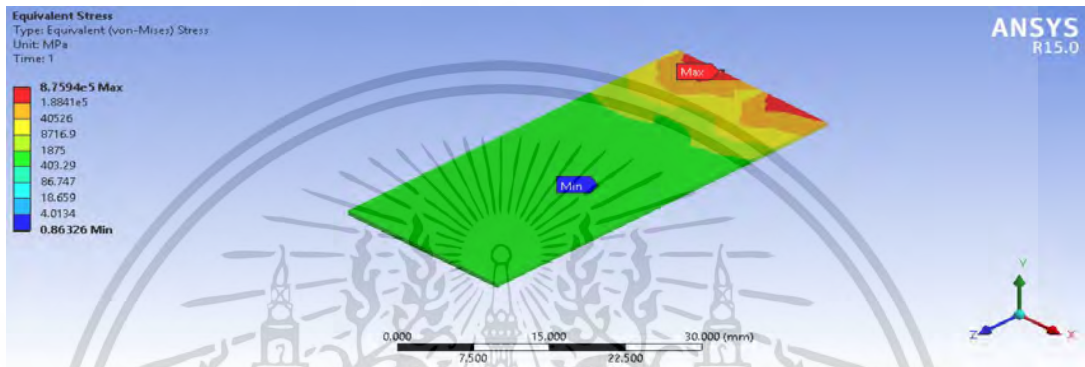
(ค)

รูปที่ 4.8 ผลเฉลยทางกลของวัสดุ PZT8H (ก) การเปลี่ยนรูป, (ข) ความเค้น, (ค) ความเครียด

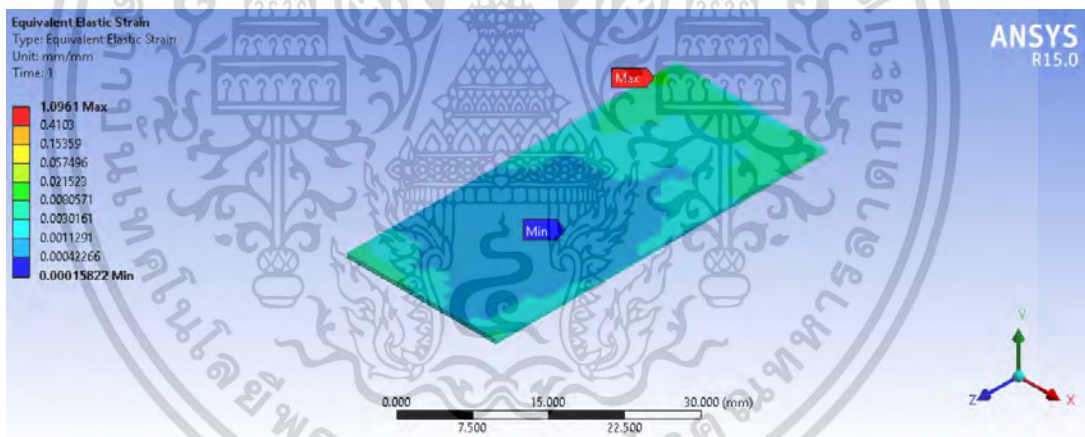
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.9 ผลเฉลยทางกลของวัสดุ  $\text{BaTiO}_3$  (ก) การเปลี่ยนรูป, (ข) ความเค้น, (ค) ความเครียด

ผลสรุปค่าความเค้นและความเครียดจากการจำลองแสดงไว้ดังตารางที่ 4.4 ปรากฏว่า  $\text{BaTiO}_3$  มีค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นภายในวัสดุสูงสุดเมื่อได้รับแรงทางกลเทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกประเภทอื่น ๆ แต่ทว่าในท้องตลาดมีเพียงเพียโซอิเล็กทริกประเภท PZT5A และ PZT5H ที่ตรงกับวัสดุที่นำมาจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงเลือกวัสดุประเภท PZT5H ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการจำลองค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ

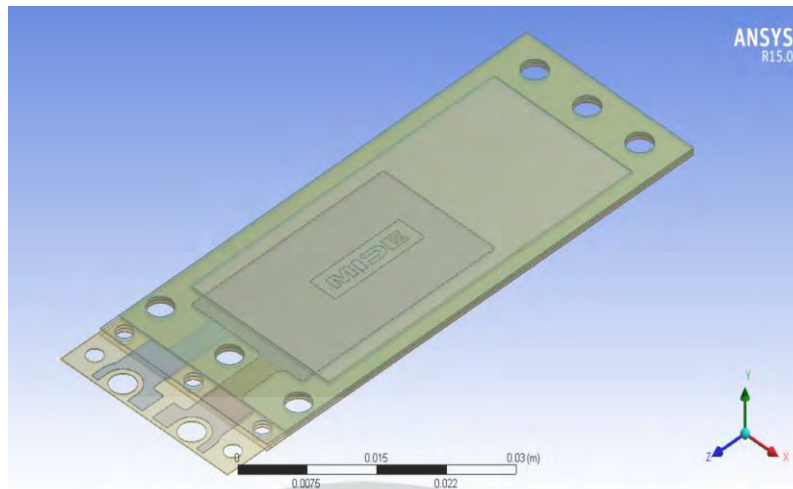
ประเภทวัสดุเพียโซอิเล็กทริก	ความเค้น		ความเครียด	
	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด
PZT4	6.26E+05	1.2855	1.0933	0.0015765
PZT5A	6.28E+05	0.65053	1.0902	0.001572
PZT5H	6.93E+05	1.3412	1.091	0.0015726
PZT8	7.35E+05	1.0465	1.0946	0.001579
BaTiO <sub>3</sub>	8.76E+05	0.86326	1.0961	0.0015822

#### 4.5 การจำลองผลตอบสนองทางกลของเพียโซอิเล็กทริก PZT5H

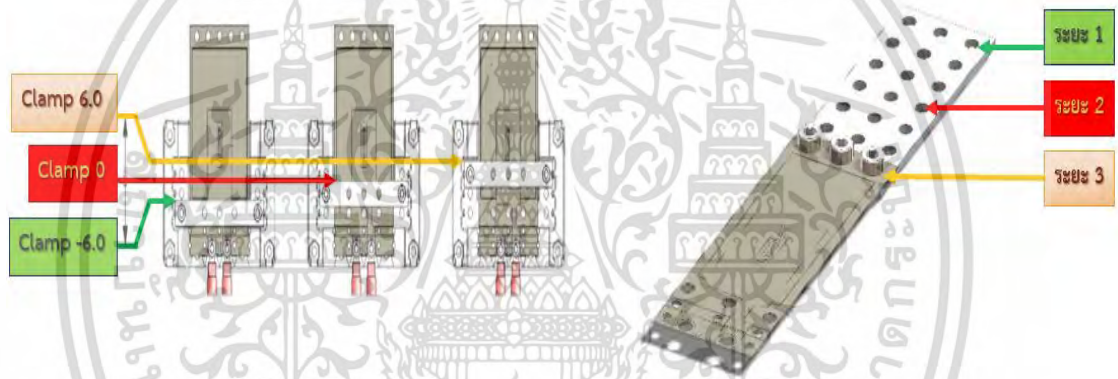
การจำลองผลตอบสนองทางกลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เริ่มจากการสร้างแบบจำลองตามขนาดของอุปกรณ์จริงแสดงไว้ดังรูปที่ 4.10 รวมไปถึงการใส่ข้อมูลทางกล-ไฟฟ้าของวัสดุ แสดงไว้ดังตารางที่ 4.5 นำไปสู่การคำนวณเมทริกซ์ความแข็งแรงของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เมทริกซ์สภาพยอมของวัสดุที่ความเค้นและความเครียดคงที่ของวัสดุ PZT5H เพื่อวิเคราะห์ผลเฉลยต่อไป ลักษณะการติดตั้งที่ใช้ในการวิเคราะห์โหนดเปลี่ยนแปลงระยะยึดและความยาวคานยื่นของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.11 ผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะยึด 3 ระยะแสดงไว้ดังรูปที่ 4.12 ถึง 4.14

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างของเพียโซอิเล็กทริก PZT5H

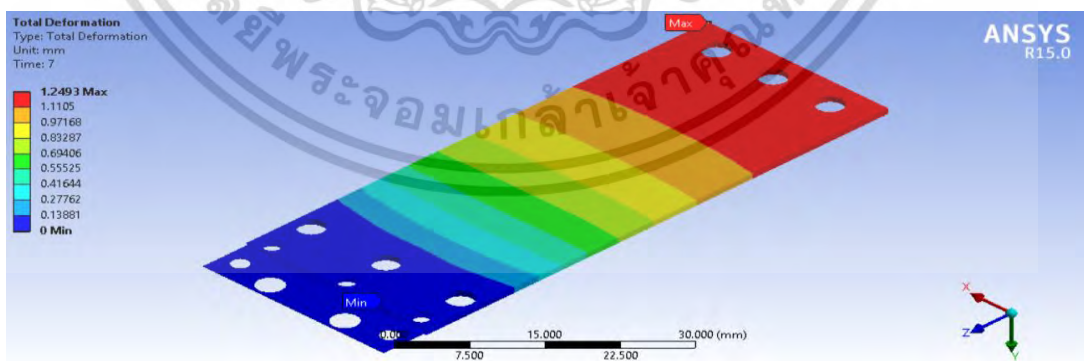
พารามิเตอร์	PZT-5H	หน่วย
r	7800	kg/m <sup>3</sup>
d <sub>31</sub>	-2.74E-10	m/V
d <sub>33</sub>	5.93E-10	m/V
d <sub>15</sub>	7.41E-10	m/V
s <sup>E</sup> <sub>11</sub>	1.65E-11	m s <sup>2</sup> /kg
s <sup>E</sup> <sub>33</sub>	2.07E-11	m s <sup>2</sup> /kg
s <sup>E</sup> <sub>12</sub>	-4.78E-12	m s <sup>2</sup> /kg
s <sup>E</sup> <sub>13</sub>	-8.45E-12	m s <sup>2</sup> /kg
s <sup>E</sup> <sub>44</sub>	4.35E-11	m s <sup>2</sup> /kg
K <sup>T</sup> <sub>11</sub>	3130	(unitless)
K <sup>T</sup> <sub>33</sub>	3400	(unitless)



รูปที่ 4.10 แบบจำลองโมดูล PZT5H

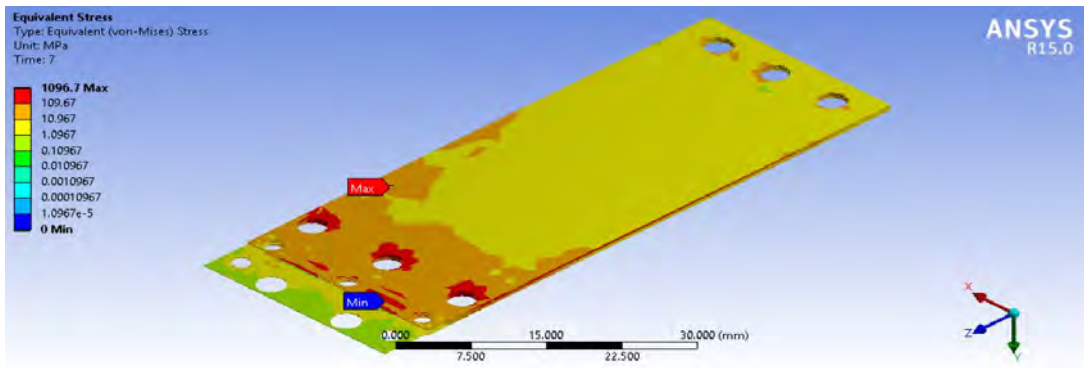


รูปที่ 4.11 การกำหนดระยะยึดและระยะความยาวคานยื่นของการทดลอง

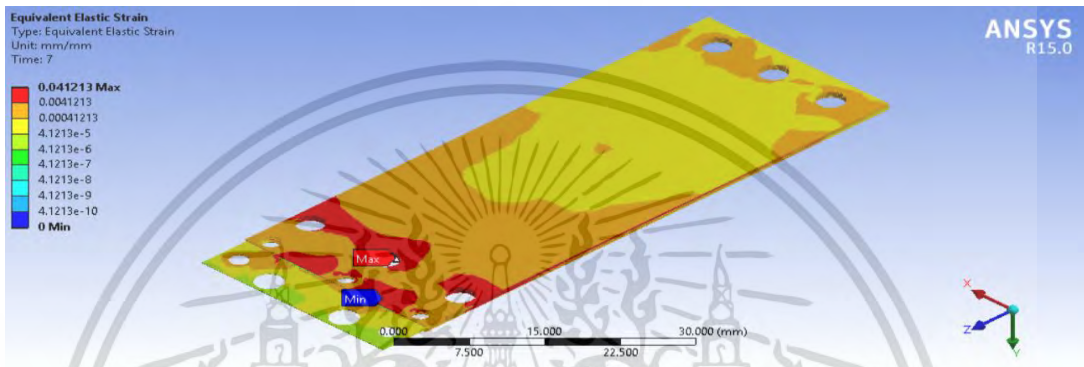


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

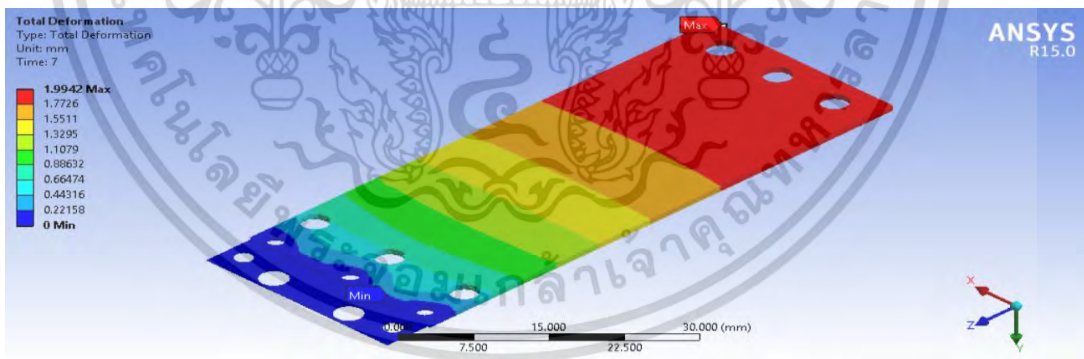


(จ)

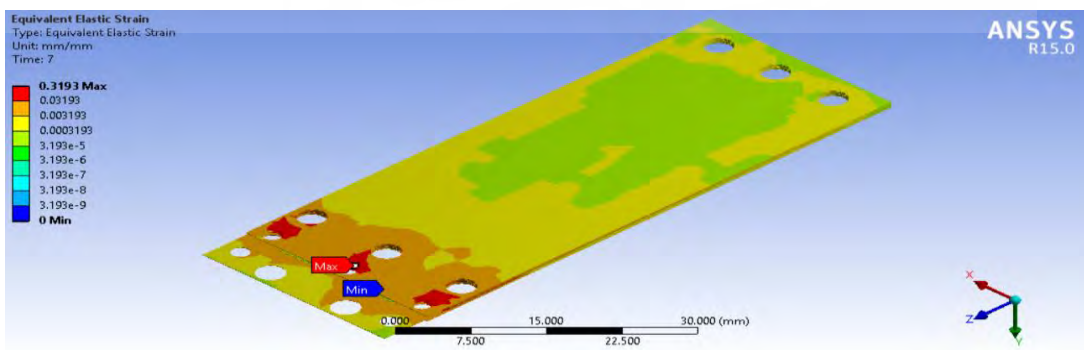


(ค)

รูปที่ 4.12 ผลเฉลยทางกลของวัสดุ PZT5H ที่ระยะยึด clamp6 (ก) การเปลี่ยนรูป, (จ) ความเค้น, (ค) ความเครียด

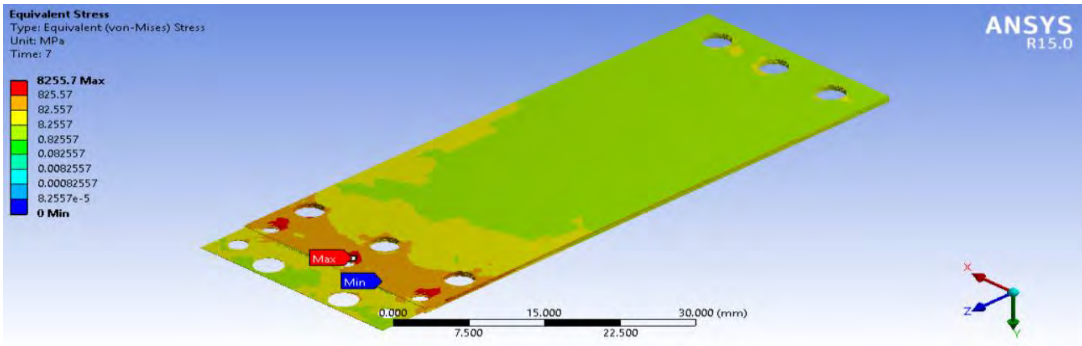


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



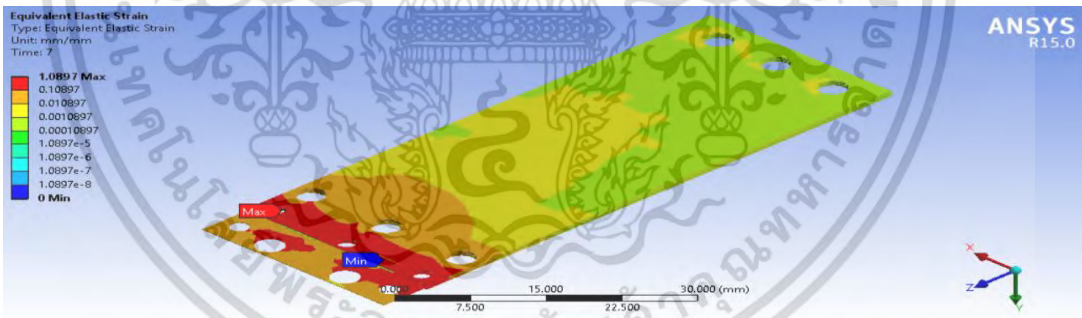
(ค)

รูปที่ 4.13 ผลเฉลยทางกลของวัสดุ PZT5H ที่ระยะยึด clamp0 (ก) การเปลี่ยนรูป, (ข) ความเค้น,

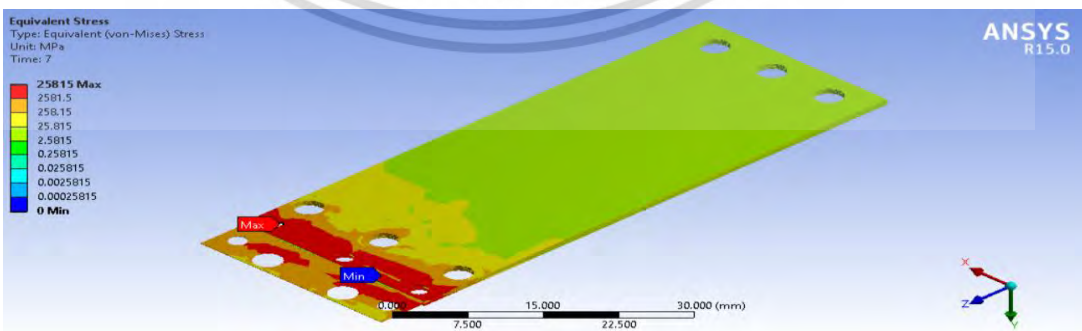
(ค) ความเครียด



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.14 ผลเฉลยทางกลของวัสดุ PZT5H ที่ระยะยึด clamp-6 (ก) การเปลี่ยนรูป, (ข) ความเค้น,

(ค) ความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองระยะการยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ตำแหน่งต่าง ๆ พบว่าการที่ยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ปลายสุด หรือตำแหน่ง clamp-6 ทำให้เกิดความเสียหายแก่วัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำทางกลที่มากกว่า 300 N แต่หากยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ตำแหน่งกลางหรือ clamp0 และตำแหน่งด้านในหรือ clamp6 เพียโซอิเล็กทริกไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากแรงทางกล กล่าวคือแผ่นเพียโซอิเล็กทริกสามารถยอมรับแรงภายนอกและเกิดการกระจัดที่ปลายแผ่นได้ไม่เกิน 15 mm วัสดุจึงไม่เกิดความเสียหาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุป

จากความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อศึกษาเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานและคุณลักษณะเฉพาะของโครงสร้างวัสดุที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกโดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือการวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้า คือการศึกษาค่าพารามิเตอร์ภายในที่ส่งผลต่อค่าพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้จากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปประกอบการตัดสินใจเลือกใช้ประเภทของวัสดุที่มีค่าความเก็บประจุภายในที่สูง จากนั้นทำการจำลองการประจุแบตเตอรี่ด้วยพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีการติดตั้งและจำนวนแผ่นต่าง ๆ กัน จากผลการทดลองในบทที่ 3 สรุปได้ว่าการเลือกขนาดและประเภทของแบตเตอรี่ส่งผลต่อความสามารถในการถ่ายเทพลังงานจากแหล่งกำเนิดพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไปยังแบตเตอรี่ ด้วยแนวคิดของการแมชชีนนิ่งอิมพีแดนซ์และคุณลักษณะเฉพาะของเพียโซอิเล็กทริกที่มีค่าอิมพีแดนซ์ภายในที่สูง ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญสำหรับการถ่ายเทพลังงานสูงสุดนำไปสู่การเพิ่มปริมาณพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้จากเพียโซอิเล็กทริก

แต่จากการวิเคราะห์สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกเพื่อศึกษาความเป็นไปได้และการนำไปประยุกต์ใช้ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกสำหรับใช้งานเมื่อได้รับการสั่นสะเทือนความถี่ต่ำ พบว่าช่วงเวลาการสั่นอย่างอิสระของวัสดุเมื่อไม่ได้รับแรงกระทำทางกลส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพลังงานโดยรวมที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ในการสั่นสะเทือนหนึ่งคาบดังนั้นจึงมีการวิเคราะห์โครงการทางกลเพื่อศึกษาผลของการออกแบบติดตั้งรวมไปถึงการตัดแปลงโครงสร้างของวัสดุเพื่อการประปรุงค่าความถี่ธรรมชาติให้สอดคล้องกับความถี่กระตุ้นซึ่งมุ่งเน้นไปที่ความถี่ต่ำจากการสั่นสะเทือนด้วยการเดิน

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้เพื่อการออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด จากผลการทดลองในบทที่ 4 พบว่าการวิเคราะห์โครงสร้างให้ผลการจำลองที่มีประโยชน์ต่อการติดตั้งใช้งานจริง กล่าวคือสามารถประมาณค่าแรงรับสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้เพื่อแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยที่ไม่เกิดความเสียหายต่อวัสดุ อีกทั้งยังสามารถคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติเมื่อนำวัสดุไปติดตั้งใช้งานจริงในลักษณะต่าง ๆ ผลปรากฏว่าการติดตั้งแบบคานยื่นสามารถลดค่าความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์ได้เป็นอย่างมาก จากนั้นทำการจำลองผลตอบสนองทางกลที่มีค่าเท่ากับกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกหลายประเภท และเลือกใช้ PZT5H ซึ่งเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ทำให้อาศัยง่ายและมีค่าความเค้นและความเครียดทางกลสะสมในผลึกเมื่อได้รับแรงกระทำทางกลที่สูงอยู่ในระดับดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับปรุงโครงสร้างทางกลเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติของวัสดุลดลง ส่งผลต่อพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้เป็นอย่างมาก จึงสามารถสรุปได้ว่าระบบเก็บเกี่ยวพลังงานการสั่นสะเทือนด้วยเพียโซอิเล็กทริกมีความเป็นไปได้ในการติดตั้งใช้งานจริงและมีศักยภาพเพียงพอต่อการใช้งานกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นหากมีการติดตั้งและวิเคราะห์โครงสร้างจะทำให้สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นเป็นปริมาณมากเมื่อเทียบการค่าใช้จ่ายในการเพิ่มจำนวนแผ่นที่ใช้ติดตั้งเมื่อใช้งานจริง เป็นไปตามวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบและประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานพื้นที่กำเนิดพลังงานเพื่อความปลอดภัยและประหยัดพลังงานไฟฟ้า อีกทั้งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการส่งเสริมการใช้พลังงานทางเลือกและสนับสนุนการให้มีการพัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มสัดส่วนในการผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมตามความมุ่งหมายของงานวิจัย

### 5.1 สิ่งที่ต้องพัฒนาต่อไป

1. ควรมีการเก็บผลการทดลองโดยการนำพื้นที่กำเนิดพลังงาน ไปทดสอบกับสถานที่จริง ที่มีผู้คนเดินผ่านไปมาในปริมาณมาก
2. ควรจำลองการป้อนแรงกระทำทางกลให้มีความหลายหลายมากยิ่งขึ้นสะท้อนสภาวะการใช้งานจริง หากมีการติดตั้งใช้งาน
3. ควรศึกษารายละเอียดของแบตเตอรี่ เพิ่มมากขึ้น เพื่อประสิทธิภาพในการเก็บสะสมพลังงานเพื่อการใช้งานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันนโยบายวิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ ยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ 20 ปี พ.ศ. 2560-2579 วันที่ 10 มกราคม พ.ศ.2561.  
เข้าถึงได้จากเว็บไซต์: <http://www.nric.or.th/wp-content/>
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน แผนอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2558-2579 วันที่ 25 มกราคม พ.ศ.2561.  
เข้าถึงได้จากเว็บไซต์: <http://www.enconfund.go.th/pdf/index/eep2015.pdf>
- [3] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน พลังงาน เร่งผลักดันมาตรการ Building Energy Code วันที่ 27 มกราคม พ.ศ.2561.  
สืบค้นได้จาก <http://energy.go.th/2015/executive-news-th/1919>
- [4] J.A. Paradiso, T. Starner. "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," **IEEE Computing Pervasive**, vol.4, no.1, pp.18- 27 Jan-March 2005.
- [5] Ramadass, Y.K.; Chandrakasan, A.P., "An Efficient Piezoelectric Energy Harvesting Interface Circuit Using a Bias-Flip Rectifier and Shared Inductor," **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, vol.45, no.1, pp.189-204, Jan. 2010.
- [6] Hatti, N.; Tungpimolrut, K.; Phontip, J.; Pechrach, K.; Manoonpong, P.; Komol, K., "A PZT modeling for energy harvesting circuits," **International Symposium on Applications of Ferroelectrics (ISAF/PFM), and International Symposium on Piezoresponse Force Microscopy and Nanoscale Phenomena in Polar Materials** , pp.1-4, 24-27 July 2011.
- [7] Ling Bing, K., Li, T., Hng, H.H., Boey, F., Zhang, T., Li, S., Waste Energy Harvesting: Mechanical and Thermal Energies, **Springer**, 2014.
- [8] Arnau Vives, Antonio (Ed.), Piezoelectric Transducers and Applications, **Springer**, 2008.
- [9] Elvin, Niell, Erturk, Alper (Eds.), Advances in Energy Harvesting Methods, **Springer**, 2013.
- [10] T. Kasuga, "Design of a Lane Marker Lighting System Using Piezoelectric Bimorph Modules," **8th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation (EUROSIM)**, Cardiff, pp. 633-636, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11]Xiaofeng Li, Vladimir Strezov, “Modelling piezoelectric energy harvesting potential in an educational building”, **Energy Conversion and Management**, vol.85, pp. 435-442, September 2014.
- [12]T. Kasuga, "Design of a Lane Marker Lighting System Using Piezoelectric Bimorph Modules," **8th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation**, Cardiff, pp. 633-636, 2013.
- [13]J. John Livingston and M. Hemalatha, “Charging an Electronic Gadget using Piezoelectricity”, **Indian Journal of Science and Technology**, vol. 7, p945-948, July 2014.
- [14]Q. Zhu, M. Guan and Y. He, "Vibration energy harvesting in automobiles to power wireless sensors," **International Conference on Information and Automation (ICIA)**, Shenyang, pp. 349-354, 2012.
- [15]S.Y. Wang, “A finite element model for the static and dynamic analysis of a piezoelectric bimorph”, **International Journal of Solids and Structures**, Volume 41, Issue 15, pp. 4075-4096, July 2004.
- [16]Zhu Xiaojin, Zhao Miao, Gao Zhiyuan and Chen Zhiyan, "Analysis of active vibration control for piezoelectric intelligent structures by ANSYS and MATLAB," **International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM 2010)**, Taiyuan, pp. V4-184-V4-188, 2010.
- [17]K. Boby, K. Aleena Paul, J.A. Thomas, and K.K. Nimisha, “Footstep Power Generation Using Piezo Electric Transducers,” **International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)**, vol. 3, no. 10, pp. 264-267, 2014.
- [18]L. Shi, X. Wei and Y. Wei, "Comparative analysis on piezoelectric effect and electromagnetic effect for the further study of multi-piezoelectric effect," **International Conference on Measurement, Information and Control (MIC)**, Harbin, pp. 907-911, 2012.
- [19]A.Singh, "Preparation and characterization of piezoelectric materials," **International Conference for Convergence of Technology (I2CT)**, Pune, pp. 1-5, 2014.

- [20]H.A. Sodano, D.J. Inman, and G. Park, "Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries," **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, vol. 16, no. 10, pp.799-807, 2015.
- [21]T.H. Ng, and W.H. Liao. "Sensitivity analysis and energy harvesting for a self-powered piezoelectric sensor," **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, vol.16, no. 10, pp.785-797, 2005.
- [22]X. Zhang and Y. Zhou, "Piezoelectric self-powered source of wireless bridge health monitoring nodes," **IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference**, Chongqing, China, pp. 910-913, 2016.
- [23]Li Tianze, Zhang Xia, Jiang Chuan and Hou Luan, "Analysis of the Characteristics of Piezoelectric Sensor and Research of Its Application", **18th IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics on**, pp. 1-4, 23-27 August 2009.
- [24]Waqar, S., et al., "Piezoelectric energy harvesting from intelligent textiles." **Electronic Textiles**. T. Dias. Oxford, Woodhead Publishing: 173-197, 2015.
- [25]Sung Joo Hwang and Hyun Jun Jung, "Designing and manufacturing a piezoelectric tile for harvesting energy from footsteps," **Current Applied Physics**, pp.669-674, 2015.
- [26]Minami, Y. and E. Nakamachi, "Development of enhanced piezoelectric energy harvester induced by human motion." **Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)**, 2012.
- [27]Hatti, N., et al., "A PZT modeling for energy harvesting circuits.", **International Symposium on Applications of Ferroelectrics (ISAF/PFM) and International Symposium on Piezoresponse Force Microscopy and Nanoscale Phenomena in Polar Materials**, 2011.
- [28]Pandey, H., et al., "Walking based wearable mobile phone charger and lightening system." **International Conference on Medical Imaging, m-Health and Emerging Communication Systems (MedCom)**, 2014.
- [29]Meier, R., et al., "A piezoelectric energy-harvesting shoe system for podiatric sensing." **36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)**, 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [30] Mitcheson, P. D., et al., "Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices." **Proceedings of the IEEE 96(9)**, pp.1457-1486, 2008.
- [31] Kymissis, J., et al., "Parasitic power harvesting in shoes." **Second International Symposium on Wearable Computers**, 1998.
- [32] A.N. Tripathi, H. Mishra and A. Mishra, "Eco-Friendly Alternative Of Energy Harvesting Piezoelectricity," **International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET)**, vol. 2, no. 1, pp. 213-216, 2015.
- [33] Guoliang, Y., et al., "Optimization of a piezoelectric system for energy harvesting from traffic vibrations." **IEEE International Ultrasonic Symposium (IUS)**, 2009.
- [34] Kasuga, T., et al., "Design of a Lane Marker Lighting System Based on Piezoelectric Power Generation." **IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)**, 2011.
- [35] Vazquez-Rodriguez, M., et al., "Energy harvesting input stage model for piezoelectric materials involved in road traffic applications." **IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)**, 2012.
- [36] Qingyuan, Z., et al., "Vibration energy harvesting in automobiles to power wireless sensors." **International Conference on Information and Automation (ICIA)**, 2012.
- [37] Kaustubh, P. and N. Vaish, "Highly efficient PVDF film energy harvester for self-charging vehicle system." **Proceedings of the 9<sup>th</sup> Industrial and Commercial Use of Energy Conference (ICUE)**, 2012.
- [38] Rajab, S. A., et al., "Novel vehicle and motorcycle classification using single element piezoelectric sensor." **5th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)**, 2012.
- [39] Tsung-Tsi, W., et al., "Analysis of high efficiency piezoelectric floor on intelligent buildings.", **Proceedings of SICE Annual Conference 2010**, 2010.
- [40] Leung, C. S., et al., "Piezoelectric sensors for taxiway airport traffic control system." **1st IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)**, 2013.

- [41]Qian, H.-b. and H. Han, "The Applications and Methods of Pedestrian Automated Detection." **International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)**, 2010.
- [42]L. Minvielle, M. Atiq, R. Serra, M. Mougeot and N. Vayatis, "Fall detection using smart floor sensor and supervised learning," **39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)**, Seogwipo, pp. 3445-3448, 2017.
- [43]Z. Chen, M. K. Law, P. I. Mak, W. H. Ki and R. P. Martins, "Fully Integrated Inductor-Less Flipping-Capacitor Rectifier for Piezoelectric Energy Harvesting," in **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, vol. 52, no. 12, pp. 3168-3180, Dec. 2017.
- [44]A. Ramos, A. Pinto, I. Fonseca and C. Ferreira, "System for micro generation and energy storage, state of the art — Example of the piezoelectric effect," **51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**, Coimbra, pp. 1-6, 2016.
- [45]D. Vasic, Y. Y. Chen and F. Costa, "Self-powered piezoelectric energy harvester for bicycle," **39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)**, Vienna, pp. 1856-1861, 2013.
- [46]D. Kumar, P. Chaturvedi and N. Jejurikar, "Piezoelectric energy harvester design and power conditioning," **IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)**, Bhopal, pp. 1-6, 2014.
- [47]M. Arivalagan, M. Lavanya, S. Deepa and B. Suganya, "Piezotransducer generator energy harvesting bike vibrations," **International Journal of Emerging Technology and Innovative Engineering (IJETIE)**, pp. 146-149, 2015.
- [48]X. Cui, M. Teng and J. Hu, "PSPICE-Based Analyses of the Vibration Energy Harvester System With Multiple Piezoelectric Units," **Journal of Electrical and Computer Engineering in Canadian**, vol. 38, no. 3, pp. 246-250, Summer 2015.
- [49]A. M. Eltamaly and K. E. Addoweesh, "A Novel Self-Power SSHI Circuit for Piezoelectric Energy Harvester," **Transactions on Power Electronics in IEEE**, vol. 32, no. 10, pp. 7663-7673, Oct. 2017.
- [50]K. M. Howell, A. De Pastina, A. Lozzi, T. Larsen, M. Faizan and L. G. Villanueva, "Piezoelectric nanoelectromechanical systems," **19th International**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), Kaohsiung, pp. 151-154, 2017.

- [51]A. Othman, "Modeling of piezoelectric energy harvesting system embedded in soldier's boot using Matlab/Simulink," **International Conference on Military Technologies (ICMT)**, Brno, pp. 787-792, 2017.
- [52]S. Ferreira, S. Valtchev, F. Coito and M. Mudrov, "Mechanical vibration using piezoelectric material," **International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)**, Brasov, pp. 681-686, 2017.
- [53]R. F. Rangel, C. da Rocha Souto, M. F. Cunha, A. G. Paulo e Silva, A. M. Marques de Lima and S. Y. C. Catunda, "Development and characterization of an electric power generator using piezoelectric (PZT) subjected to base excitation," **IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)**, Turin, pp. 1-6, 2017.
- [54]M. Ahad, S. Kim, J. Shen, D. Rice and I. Stern, "Power generation improvement for piezoelectric energy harvesting for roadsides sustainability," **SoutheastCon 2017**, Charlotte, NC, pp. 1-2, 2017.
- [55]L. Parali and A. Sari, "Vibration modelling of piezoelectric actuator (PEA) using Simulink software," **4th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)**, Ankara, pp. 153-157, 2017.
- [56]M. A. M. Hatta, M. W. A. Rashid, U. A. A. H. Azlan, K. S. Leong and N. A. Azmi, "Finite Element Method Simulation of MEMS Piezoelectric Energy Harvester Using Lead-Free Material," **International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)**, Kuala Lumpur, pp. 511-515, 2016.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MATERIAL PROPERTIES

### 5.1 PIEZOELECTRIC PROPERTIES

Property	Symbol	Units	PZT 5 A	PZT 5H	PMN-PT
Dielectric Constant (1KHz)	$K'_{11}$		1900	3800	5400
Dielectric Loss Factor (1KHz)	$\tan \delta_p$	%	1.8	2.0	$\leq 0.6$
Density	$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	7.8	7.8	8.0
Curie Point	$T_c$	°C	350	225	>142
Mechanical Quality Factor	$Q_m$		80	30	80
Coercive Field (Measured <1 Hz)	$E_c$	kV/cm	12.0	8	1.8-3.0
Remanent Polarization	$P_r$	$\mu\text{C}/\text{cm}^2$	39.0	39	
Coupling Coefficients	$k_x$		0.65	0.75	
	$k_{22}$		0.72	0.75	0.91
	$k_{21}$		0.36	0.43	0.44
	$k_1$		0.48	0.55	0.60
	$k_{12}$		0.59	0.75	0.35
Piezoelectric Charge (Displacement) Coefficient	$d_{31}$	Coul/m x 10 <sup>-12</sup>	-190	-320	-699
	$d_{32}$	(or) mV x 10 <sup>-12</sup>	390	850	1540
Piezoelectric Voltage Coefficient	$g_{33}$	V-m/N x 10 <sup>-3</sup>	24.0	19.0	32.2
	$g_{31}$		-11.3	-9.5	-14.6
Elastic Modulus	$Y_{11}^E$	N/m <sup>2</sup> x 10 <sup>10</sup>	6.7	6.3	1.9
	$Y_{33}^E$		5.3	5.0	1.7
	$N_p$	KHz-cm	211	202	200
Anti-Resonant Thickness	$N_a$	KHz-cm	236	236	
Thermal Expansion ( J to Poling)	$\alpha$	ppm/°C	3.0	3.5	
Specific Heat	$C_p$	J/kg °C	440	420	330
Thermal Conductivity	$K_x$	W/m °K	1.2	1.2	1.336
Poisson's Ratio	$\nu$		0.31	0.31	0.37

Midé's standard products typically use PZT 5H due to improved performance over PZT 5A at a comparable price. The performance of PZT 5A is more stable over temperature however. PMN-PT exhibits the best piezoelectric properties but this comes with a much higher cost. Midé offers three products (PPA-1031, PPA-1032, and PPA-1033) that have the same form factor but with these three different piezoelectric materials (PZT 5A, PZT 5H, and PMN-PT) for "apples to apples" comparison between these materials.

There are a number of online resources that provide additional

piezoelectric information and equations. A good reference Midé typically uses is from [Morgan Advanced Materials](#).

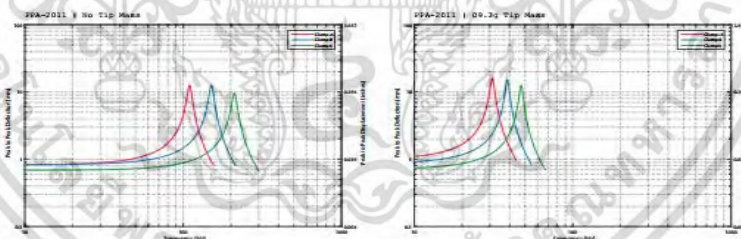


Figure 22: The peak to peak tip displacement is provided for when the piezo is driven with a  $\pm 100$  volt signal.

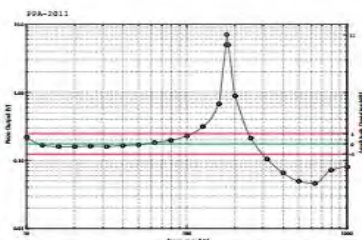


Figure 23: The frequency response of the accelerometer is provided with  $\pm 3$  dB error bands to highlight the frequency range where accurate measurement can be expected.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## SPECIFICATIONS

Energy Harvesting Data for Middle Clamp Location									
Acceleration Amplitude (g)	Frequency (Hz)	Tip Mass (gram)	RMS Power (mW)	RMS Voltage (V)	RMS Current (mA)	Resistance (k $\Omega$ )	RMS Open Circuit	Peak to Peak Displacement (mm)	Peak to Peak Displacement (in)
0.25	154.0	0.0	0.1	0.9	0.1	7.0	2.3	0.6	0.03
0.50	152.0	0.0	0.4	1.2	0.3	4.0	3.7	1.0	0.04
1.00	149.0	0.0	1.2	2.0	0.6	3.3	6.0	1.6	0.06
2.00	147.0	0.0	4.0	4.5	0.9	5.1	9.2	2.6	0.10
0.25	60.0	3.5	0.5	2.3	0.2	10.5	6.3	1.6	0.06
0.50	60.0	3.4	1.5	3.7	0.4	9.0	9.1	2.3	0.09
1.00	60.0	3.3	4.3	7.9	0.5	14.7	14.8	4.3	0.17
2.00	60.0	3.4	10.4	13.7	0.8	18.2	23.3	6.9	0.27
0.25	24.0	25.3	4.1	9.9	0.4	24.0	23.3	4.8	0.19
0.50	24.0	25.3	11.5	21.3	0.5	39.4	35.9	7.9	0.31
1.00	23.8	25.3	31.0	31.0	1.0	30.9	49.6	12.0	0.47
2.00	23.0	25.3	34.0	34.0	2.0	17.2	61.5	18.5	0.73

Block Force and Static Displacement, 100 volt signal			
Parameter	Clamp -6	Clamp 0	Clamp 6
Block Force Amplitude (N)	0.06	0.80	0.12
Displacement Amplitude (mm)	0.94	0.94	0.83

Dynamic displacement, no added tip mass, +/- 100 volt signal			
Parameter	Clamp -6	Clamp 0	Clamp 6
Resonant Frequency (Hz)	109.8	150.7	210.5
Half Power Bandwidth (Hz)	7.4	10.0	15.2
Q Factor	14.8	15.1	13.8
Peak to Peak Deflection at Resonance (mm)	12.5	12.6	9.6
Quasi Static Peak to Peak Deflection (mm)	0.8	0.8	0.6

Dynamic Displacement, 9.3 tip mass, +/- 100 volt signal			
Parameter	Clamp -6	Clamp 0	Clamp 6
Resonant Frequency (Hz)	31.1	38.7	47.3
Half Power Bandwidth (Hz)	2.0	2.2	2.6
Q Factor	15.6	17.6	18.2
Peak to Peak Deflection at Resonance (mm)	15.9	15.2	12.6
Quasi Static Peak to Peak Deflection (mm)	1.0	0.9	0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



LTC4071

## Li-Ion/Polymer Shunt Battery Charger System with Low Battery Disconnect

### FEATURES

- Charger Plus Pack Protection in One IC
- Low Operating Current (550nA)
- Near Zero Current (<0.1nA) Low Battery Disconnect Function to Protect Batteries from Over-Discharge
- Pin Selectable Low Battery Disconnect Level: 2.7V or 3.2V
- 1% Float Voltage Accuracy Over Temperature
- 50mA Maximum Internal Shunt Current
- Pin Selectable Float Voltage Options: 4.0V, 4.1V, 4.2V
- Ultralow Power Pulsed NTC Float Conditioning for Li-Ion/Polymer Protection
- Suitable for Intermittent, Continuous and Very Low Power Charging Sources
- High Battery Status Output
- Thermally Enhanced, Low Profile (0.75mm) 8-Lead (2mm x 3mm) DFN and MSOP Packages

### APPLICATIONS

- Low Capacity, Li-Ion/Polymer Battery Back-Up
- Thin Film Batteries
- Energy Scavenging/Harvesting
- Solar Power Systems with Back-Up
- Memory Back-Up
- Embedded Automotive

### DESCRIPTION

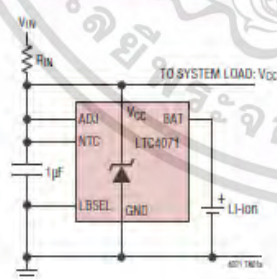
The LTC<sup>®</sup>4071 allows simple charging of Li-Ion/Polymer batteries from very low current, intermittent or continuous charging sources. A near-zero current low battery latching disconnect function protects even the lowest capacity batteries from deep discharge and potentially irreparable damage. The 550nA to 50mA operating current makes charging possible from previously unusable sources. With its low operating current the LTC4071 is well suited to charge low capacity Li-Ion or thin film batteries in energy harvesting applications. The unique architecture of the LTC4071 allows for an extremely simple battery charger solution, requiring just one external resistor.

The LTC4071 offers a pin selectable float voltage with  $\pm 1\%$  accuracy. The integrated thermal battery qualifier extends battery lifetime and improves reliability by automatically reducing the battery float voltage at NTC thermistor temperatures above 40°C. The LTC4071 also provides two pin selectable low battery disconnect levels and a high battery status output.

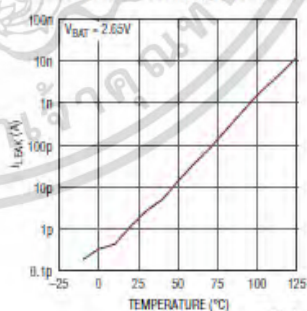
The device is offered in two thermally enhanced packages, a compact low profile (0.75mm) 8-lead (2mm x 3mm) DFN and an 8-lead MSOP package.

LTC, LT, LTC, Linear Technology, the Linear logo and Burst Mode are registered trademarks and ThinSOT is a trademark of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

### TYPICAL APPLICATION



Battery Disconnect  $I_{LEAK}$  vs Temperature



REV 1816

4071tc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



LTC3588-1

## Nanopower Energy Harvesting Power Supply

### FEATURES

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

### APPLICATIONS

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

### DESCRIPTION

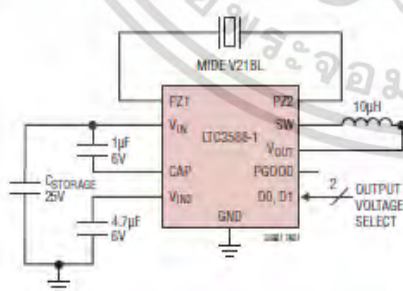
The LTC<sup>®</sup>3588-1 integrates a low-loss full-wave bridge rectifier with a high efficiency buck converter to form a complete energy harvesting solution optimized for high output impedance energy sources such as piezoelectric, solar, or magnetic transducers. An ultralow quiescent current undervoltage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

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

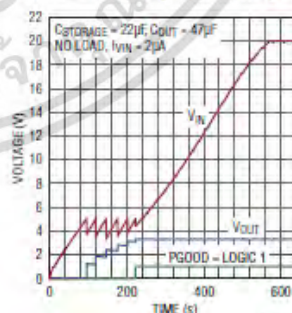
LTC, LT, LTC, LTM, Linear Technology, the Linear logo and Burst Mode are registered trademarks of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

### TYPICAL APPLICATION

100mA Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply



LTC3588-1 3.3V Regulator Start-Up Profile



3588 ftc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Generation and Storage of Electrical Energy from Piezoelectric Materials

Panapong Songsukthawan

Department of Electrical Engineering, Faculty of  
Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok 10520, Thailand  
Plugov82@gmail.com

Chaiyan Jettanasen

Department of Electrical Engineering, Faculty of  
Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok 10520, Thailand  
kjcchaya@staff.kmitl.ac.th

**Abstract**—The electrical energy generation and storage from piezoelectric materials are focused and discussed in this paper. This kind of materials is able to directly convert mechanical energy into electrical one, which can be later stored by utilizing energy harvesting technique/circuit. The energy conversion from ambient vibration is indeed nowadays fascinating research area. Due to the compatibility to integrate with electronics and microsystem with high voltage and supporting standalone circuit, it is the most popular electromechanical transducer materials for low power consumption applications, such as wireless and sensors. This paper focuses how to extract energy from piezoelectric materials to be stored in the energy storage device such as battery, in order to later supply electronic/electrical device/equipment. The simulation in MATLAB Simulink is presented and experimental results are also carried out in order to confirm the effectiveness of energy extraction. Consequently, this work may be practical for energy supplying of low power devices.

**Keywords**—Piezoelectric, PZT, Energy Conversion, Energy Harvesting, Energy Storage

## I. INTRODUCTION

New forms of alternative energy have been ongoing research because of the decreased fossil fuels, which are the main energy source to generate electricity at present, and are being phased out in developing countries to clean up their air pollution, supporting the growth of renewable energy to reduce world carbon emission, mitigating global warming situation, rescue the atmosphere, and etc. There are many sources of energy that are renewable, i.e., the production of power through use of the gravitational force of falling water, harnessing the sun energy by solar cells, conversion of wind energy by wind turbines. These sources of energy are considered to be environmentally friendly and shift away the time when we run out of main energy sources. There has been considerable development in power generation by utilizing dissipated energy around the ambient generated from human activities, and be converted to electrical form; this is called energy harvesting technology [1].

Currently, energy harvesting technology finds its focus on the accumulation of impracticable dissipated energy conversion into electricity. There are many sources of energy scavenging,

for example, thermal energy from human body and heat engine, wind and vibration energy from operated machine, potential energy of the rain or the flow of river. The harvested energy is usually utilized with low power consumption devices [2]. In this paper, it presents the feasibility of energy harvesting from pedestrian and transportation via the electromechanically transducer ability of piezoelectric, ceramic composition piezoelectric well-known as Lead Zirconate Titanate (PZT). The use of the harvested energy to charge the battery as energy reservoir for higher power requirement system will be introduced. Electrical schematic by MATLAB Simulink is presented and illustration kits are applied to confirm the electrical behavior and battery charging simulation result.

## II. PIEZOELECTRICITY

### A. Piezoelectric effect

The piezoelectric effect can be seen as transfer between electrical and mechanical energy. When atomic structure of piezoelectric materials is stressed, and then causes the mechanical deformation; formation of dipole moment creates electrical displacement, which results in an electric field, and finally voltage difference across the material is taken place. This is called direct piezoelectric effect, described by (1) and shown in Fig.1. Contrarily, the inverse piezoelectric effect is taken place when an electric field induces a deformation of the piezoelectric materials, described by (2) and shown in Fig.2 [3].

$$D_i = d_{ij}T_j \quad (1)$$

$$S_j = d_{ji}E_i \quad (2)$$

the subscript  $i$  refers the direction of applied electric field and subscript  $j$  relates the mechanical direction.

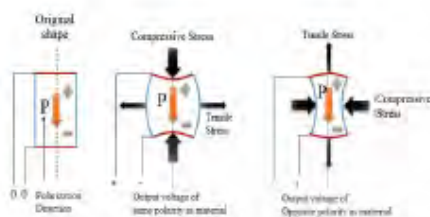


Fig. 1. Direct piezoelectric effect

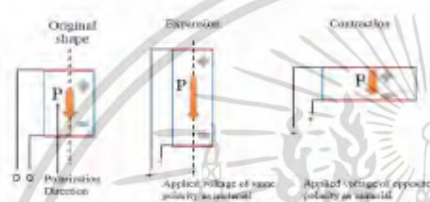


Fig. 2. Inverse piezoelectric effect

From the abovementioned equations, both piezoelectricity phenomena are invisible effect related to the piezoelectric coefficient  $d_{ij}$  which depends on the direction of the mechanical and electric fields, respectively and can be either positive or negative [4]. If considering the direct effect,  $d$  represents the piezoelectric coefficient of electric flux density  $D$  towards mechanical stress  $T$ . Conversely, the reverse effect  $d$  represents coefficient regarding the mechanical strain  $S$  causing applied electrical field  $E$ . There are some piezoelectric coefficients that are important for energy harvesting, when considering the direct piezoelectric effect,  $d_{31}$  and  $d_{33}$  are important, they usually occur at the same time while the device receives compressive or tensile stress. The  $d_{33}$  coefficient indicates the direction of applied stress and created electricity, which is the same in the 3rd direction, whereas the  $d_{31}$  coefficient refers the direction of those two components are perpendicular to each other; the reference direction is depicted in Fig.3.



Fig. 3. Reference directions in a piezoelectric element

### B. Lead-Zirconate-Titanate (PZT)

PZT is one of piezoelectric materials which are the most widely used and economically synthetic piezoelectric-ceramics due to reasons of their atomic structure rendering high electric

displacement causing highly polarized and permittivity, relatively high piezoelectric coefficient, chemically inert, high Curie point and easily tailored to meet the requirements of a specific purpose [5]. The selected PZT is Q220-A4-503 YB (Piezo System, Inc.), bimorph configuration with standard brass reinforced. When one piezoelectric sheet is compressed and the other one is stretched, electric charge develops across each layer and accumulates in brass housing for power generation. Their material properties are presented in table 1.

TABLE I. PZT PROPERTIES

Properties	Quantity
Relative Dielectric Constant	1800
Piezoelectric coefficients $d_{33}$	$390 \times 10^{-12}$ m/V
Piezoelectric coefficients $d_{31}$	$-190 \times 10^{-12}$ m/V
Cure temperature	350°C
Capacitance	232 nF
Open circuit voltage	20.9 V
Raised frequency	47 Hz

### III. SIMULATION

The extracted energy from vibration converted by piezoelectric materials is AC power with relatively low current, thus, to accumulate those energies, energy harvesting circuit is essential. This circuit is composed of a low-loss full-wave bridge rectifier with filtering capacitor for smoothly regulated voltage [6]. This paper presents an electrical model of piezoelectric element, directly connected with resistance which is represented an electrical load to investigate the electrical behavior in different element configurations. The simulation result by MATLAB Simulink is compared with experimental one in order to confirm that created model is accurate and can be used to further battery charging simulation. The selected PZT's parameters and their values are shown in Table 2 and simulation schematic is illustrated in Fig.4.

TABLE II. PARAMETERS IN SIMULATION

Parameters	Value
Resistive Load	50 k $\Omega$
Applied force, frequency	1 Hz
Resistance for coupling energy: Rin1	5 $\Omega$
Resistance for coupling energy: Rin2	500 $\Omega$
Resistance for resonance: Rre	6 $\Omega$
Internal resistance of the PZT: Rp	2 M $\Omega$
Inductance for resonance: Lre	1305 $\mu$ H
Capacitance for coupling energy: Cin	0.2 $\mu$ F
Capacitance for resonance: Cre	3450 $\mu$ F
Internal capacitance of the PZT: Cp	48.2 nF

The proposed electrical model is divided into 3 main parts: generation, vibration, and composition. The generation part is simulated by the pulse voltage source represented as applied mechanical force and its frequency is set at 1 Hz to simulate the frequency of walking across the piezoelectric device in function with a couple of switches which are complemented, and configured by two MOSFETs. The first one gets bias voltage when the voltage source creates positive pulse, and represented as a part of receiving mechanical force; another one is biased by negative pulse when releasing mechanical force and continuously vibrates with their natural frequency. The vibration part is taken into account described by subscript "re" components. The last section, which is composition part; it consists of RLC components which are converted from mechanical characteristics of PZT to electrical form as expressed in mechanical-electrical equations in (3) and (4).

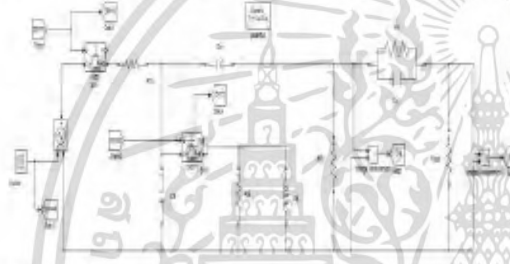


Fig. 4. PZT schematic connected to resistive load

$$M \frac{d^2y}{dt^2} + D \frac{dy}{dt} + Ky = P \tag{3}$$

$$C \frac{d\phi}{dt} + \frac{1}{R} \frac{d\phi}{dt} + \frac{1}{L} \phi = i \tag{4}$$

A. Comparison with experiment result

Fig.5 shows the simulation output voltage of PZT connected directly to 50 kΩ; the peak to peak voltage is about 80 V. The experimental output voltage depicted in Fig.6 is in good accordance in terms of the waveform shape and magnitude which is around 75 V peak to peak. Thus, the results confirm that the proposed PZT model is appropriate for precise simulation.

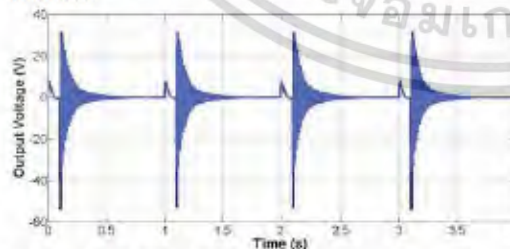


Fig. 5. Simulation piezoelectric voltage waveform

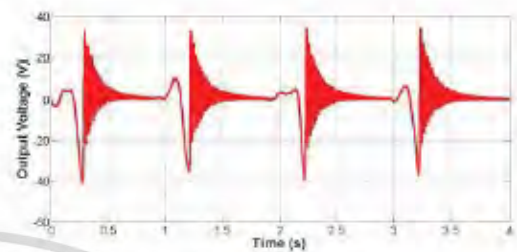


Fig. 6. Experimental piezoelectric voltage waveform

The simulation of piezoelectric configuration was considered in the series and parallel connection. If setting PZT in series configuration, the voltage is stepped up whereas in parallel configuration the voltage is remained as ever, but the current is augmented.

B. Battery charging

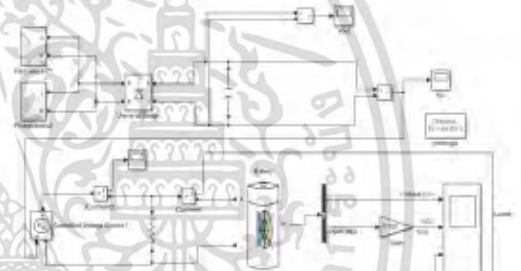


Fig. 7. Piezoelectric schematic connected to NiMH battery model

In practical utilization of piezoelectric materials, it usually connects with digital devices that need DC voltage supply. Therefore, battery charging application presented in this paper also requires full-wave bridge rectifier with coupling capacitance for smoothening DC voltage. The proposed energy storage device is Nickel Metal Hydride (NiMH) battery owing to several advantages; for instance, relatively high energy density, low internal impedance, long cycle life time, wide temperature range, and easily charging control [7].

The NiMH charging simulation schematic is shown in Fig.7. The abovementioned piezoelectric schematic is compressed in one function block, which is connected to the full-wave bridge rectifier and directly charge to NiMH battery. The piezoelectric simulation configurations are divided into 6 cases; single PZT, couple PZTs in series, and couple PZTs in parallel; each case is for connection with 20 mAh and 40 mAh NiMH, respectively. An example of simulation results is the case of couple PZTs in parallel connected to 40 mAh NiMH battery. Fig. 8 shows the results including charging voltage, charging current, and state of charge (SOC).

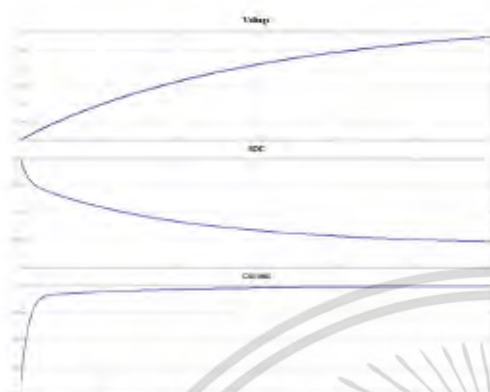


Fig. 8. PZT's state of charge

#### IV. EXPERIMENT



Fig. 9. Experimental setup of NiMH charging

For experiment, the piezoelectric sheet is connected to NiMH battery by using low power motor represented as applied mechanical force with low impact frequency (1 Hz) to vibrate the PZT. Fig.9 shows experimental kit applying 2 PZTs connected in parallel, the charging voltage monitored in real time is displayed on the computer's screen. The battery charging time in each piezoelectric configuration is presented in Table. 3; the results indicated that the charging time of parallel configuration with 20 mAh was minimized because of the current augmentation, hence, when charging with 40 mAh which is doubled battery capacitance, the charging time will be increased of about 21.2%.

TABLE III. BATTERY CHARGING TIME RESULTS

Battery capacitance	Piezoelectric configuration		
	Single	Couple in series	Couple in parallel
20 mAh	>6 hr. 22 min.	6 hr. 22 min.	1 hr. 58 min.
40 mAh	>7hr. 39 min.	7 hr. 39 min.	2 hr. 23 min.

#### V. CONCLUSION

This paper has presented the electrical model of piezoelectric-ceramic PZT and investigated simulation on electrical behavior and battery charging with voltage waveform in different configurations by MATLAB Simulink. The simulation results of PZT model compared with experimental results were in good agreement in terms of waveform shape and output signal. If using PZT in series, the voltage was stepped up while parallel configuration, the current was increased. Furthermore, the experiment of battery charging was taken into account to consider the feasibility of piezoelectric utilization with higher power consuming devices. It showed several results; the parallel configuration was appropriate for battery charging due to current augmentation while the voltage level was in sufficient level for battery charging. The proper battery capacitance is one of the significant factors of its power transfer. The matching impedance is also involved. In this case, it can be conclude that the high internal impedance of piezoelectric materials is more matched with 40 mAh NiMH battery than 20 mAh.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work is financially supported by Faculty of Engineering, King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Thailand. The authors would like to thank for this support.

#### REFERENCES

- [1] J.A. Paradiso, T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," IEEE Computing Pervasive, vol.4, no.1, pp.18- 27 Jan-March 2005.
- [2] Minami, Y. and E. Nakamachi (2012). "Development of enhanced piezoelectric energy harvester induced by human motion." Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)-2012 Annual International Conference of the IEEE.
- [3] Li Tianze, Zhang Xia, Jiang Chuan and Hou Luan, "Analysis of the Characteristics of Piezoelectric Sensor and Research of Its Application", 18<sup>th</sup> IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics on 23-27 August 2009, pp. 1-4.
- [4] Geoffrey K. Otman, Heath F. Hofmann, Archin C. Bhatt, and George A. Lesjaire, "Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless Remote Power Supply", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No. 5, September 2002, pp. 669-676.
- [5] Dhananjay Kumar, Pradyumn Charurvedi and Nupur Jejurkar, "Piezoelectric Energy Harvester Design and Power Conditioning", IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS) on 1-2 February 2014, pp. 1-6.
- [6] Hani, N., et al. (2011). "A PZT modeling for energy harvesting circuit." Applications of Ferroelectrics (SAF/PPM), 2011 International Symposium on and 2011 International Symposium on Piezoresponse Force Microscopy and Nanoscale Phenomena in Polar Materials.
- [7] Mingjie Guan, Wei-Hsin Liao, "Comparative analysis of piezoelectric power harvesting circuits for rechargeable batteries," IEEE International Conference on Information Acquisition, 2005, pp.4 - 27 June-3 July 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายปณพงค์ ส่งสุขถวัลย์
วัน เดือน ปีเกิด	27 มกราคม 2535 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ
ที่อยู่	139/36 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลรังสิต อำเภอธัญบุรี ปทุมธานี 12110
ประวัติการศึกษา	2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานวิจัย	ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการและ วารสารวิชาการระดับนานาชาติทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าระหว่างศึกษา ปริญญาโท ซึ่งตีพิมพ์ในการประชุมชื่อ IEEE 3 <sup>rd</sup> International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 – ECCE Asia) 2017



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้