

การบูรณาการเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

INTEGRATION OF PIEZOELECTRIC MATERIALS
FOR ENERGY HARVESTING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2567

KMITL-2024-EN-D-018-229

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INTEGRATION OF PIEZOELECTRIC MATERIALS
FOR ENERGY HARVESTING

PANAPONG SONGSUKTHAWAN



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2024

KMITL-2024-EN-D-018-229

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบูรณาการเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก
นักศึกษา	นาย ปณพศ์ ส่งสุขสวัสดิ์
รหัสประจำตัว	63601241
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการบูรณาการเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อพลังงานที่ผลิตได้จากเพียโซอิเล็กทริกไปใช้งานกับระบบที่ต้องการก าลังไฟฟ้าต่ำ เช่น ระบบส่องสว่าง ระบบควบคุมและตรวจจับ โดยมุ่งเน้นไปที่การเก็บเกี่ยวพลังงานจลน์จากกิจกรรมที่เกิดการสั่นสะเทือนความถี่ต่ำ อาทิเช่น การสัญจรบนทางเท้า และการขยับเขยื้อนพาหนะ โดยอาศัยคุณสมบัติการแปลงพลังงานกลเป็นไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเชื่อมต่อกับระบบเก็บเกี่ยวและสะสมพลังงาน การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ นำไปสู่การเลือกชนิดและรูปแบบการติดตั้งที่เหมาะสมกับการใช้งานแบบต่าง ๆ แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนคือการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้โดยการสร้างวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกเชื่อมต่อกับระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน และวิเคราะห์ผลตอบสนองทางกลด้วยการสร้างแบบจำลองวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการติดตั้งและแนวทางการปรับปรุงโครงสร้างของโมดูลเพียโซอิเล็กทริกที่เหมาะสม แปลงพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เกิดความเสียหายเมื่อรับแรง พบว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกชนิดเลดเซอร์โคเนตไททาเนตมีความเหมาะสมสำหรับการพัฒนาระบบเก็บเกี่ยวพลังงานในรูปแบบของการรับแรงกดและแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำ จึงทาการศึกษาการบูรณาการเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกและน ำเสนอการใช้งานสามรูปแบบ กล่าวคือติดตั้งเป็นพื้นแล้วนำพลังงานจากระบบส่องสว่างบริเวณทางเท้าและทางจักรยาน ติดตั้งกับจักรยานออกกาลังกายเพื่อนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้จ่ายอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก และติดตั้งบนจักรยานเคลื่อนที่เพื่อทดลองระบบที่ไม่ต้องพึ่งพาพลังงานจากภายนอก พบว่าการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถผลิตพลังงานได้เพียงพอและมีความเป็นไปได้ในการติดตั้งใช้งานจริง ผลการศึกษาเป็นประโยชน์ในการสนับสนุนพลังงานทางเลือกชนิดใหม่และสามารถน ำไปบูรณาการกับระบบพลังงานทางเลือกอื่นเพื่อการใช้งานที่หลากหลายยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Integration of Piezoelectric Materials for Energy Harvesting
Student	Mr. Panapong Songsukthawan
Student ID.	63601241
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2024
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chaiyan Jettanasen

ABSTRACT

This thesis presents a study on the integration of energy harvesting technology to utilize energy produced by piezoelectric materials for low-power systems, such as lighting and control systems. The focus is on harvesting kinetic energy from low-frequency vibrations, like pedestrian and vehicle movement, using the mechanical-to-electrical conversion properties of piezoelectric materials connected to energy harvesting and storage systems. The research includes two main parts: examining electrical characteristics to analyze factors affecting energy harvest by creating an equivalent circuit of piezoelectric material, and analyzing mechanical response through finite element analysis to determine optimal installation and structural improvements. Findings indicate that lead zirconate titanate ceramic piezoelectric materials are suitable for developing energy harvesting systems for compressive and low-frequency vibrational forces. The study explores three applications: installing piezoelectric materials as flooring to power lighting systems on sidewalks and bike paths, integrating with exercise bicycles to power small electronic devices, and mounting on mobile bicycles to implement a standalone energy system. Results show that energy harvesting using piezoelectric materials can produce sufficient power and is feasible for practical installation. This study supports the potential of new alternative energy sources and their integration with other energy systems for broader applications.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้อย่างด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากรองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ตลอดการทําวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ อีกทั้งสนับสนุนทุนค่าใช้จ่ายการทําวิจัยและค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาที่นักศึกษาเรียนอยู่ในระดับปริญญาเอกภายใต้ทุนปริญญาเอกพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สุดท้ายขอกราบเท้า คุณพ่อ วัลลภ ส่งสุขธวัช และคุณแม่ สุภาวดี ส่งสุขธวัช ผู้เป็นพรหมของลูกที่ให้กำเนิดชีวิต มอบอดีต ปัจจุบัน และอนาคตให้กับผู้วิจัย ตลอดชีวิตที่ผ่านมาท่านทั้งสองอบรม สั่งสอนและให้ก าลังใจในการต่อสู้กับชีวิต รวมถึงทุกคนในครอบครัวส ำหรับความช่วยเหลือและก าลังใจที่มีให้กับผู้วิจัยตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ปณพงค์ ส่งสุขธวัช

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	9
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	9
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	14
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	14
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	15
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	16
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	16
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากองค์ความรู้ใหม่.....	17
บทที่ 2 ระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน.....	18
2.1 แหล่งกำเนิดพลังงาน (เพียโซอิเล็กทริก).....	18
2.1.1 หลักการทำงานของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	20
2.1.1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	21
2.1.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	23
2.2 วงจรเก็บเกี่ยวพลังงาน.....	26
2.2.1 วงจรเรียงกระแส.....	26
2.2.2 วงจรกรอง.....	26
2.2.3 วงจรเก็บพลังงาน.....	27
2.3 ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System).....	28
2.3.1 แบตเตอรี่ลิเทียม.....	29
2.3.2 อัลตราคาปาซิเตอร์.....	30
2.4 ระบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	31
2.4.1 เมทริกซ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Matrix).....	33
บทที่ 3 คุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 ระบบพื้นถนนกำเนิดพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก.....	36
3.2 การศึกษาค่าพารามิเตอร์.....	44
3.3 ระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน.....	49
3.4 การศึกษาคุณลักษณะทางกล.....	52
3.5 การจำลองวัสดุเพียโซอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	53
บทที่ 4 ประยุกต์ใช้งานระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริก	55
4.1 การประยุกต์ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกสำหรับระบบไฟส่องสว่างทางเท้า	55
4.2 การประยุกต์ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกสำหรับจักรยานออกกำลังกาย	63
4.3 การประยุกต์ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกสำหรับจักรยานเคลื่อนที่	71
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะเพื่อการต่อยอดงานวิจัย	77
เอกสารอ้างอิง	79
ภาคผนวก ก	83
ประวัติผู้เขียน.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการใช้งานและวัตถุประสงค์การใช้งานเพียโซอิเล็กทริกแบ่งตามภาคส่วน	19
ตารางที่ 2.2 ความเหมาะสมในการใช้งานของเพียโซอิเล็กทริกแต่ละประเภท	20
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียม	29
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของอัลตราคาปาซิเตอร์	30
ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อจ ัดของระบบกักเก็บพลังงานชนิดต่าง ๆ	31
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก PPA-2011	37
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าส หรับการจ สองเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยโมดูล LTC-3588-1.57	
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการทดลอง	60
ตารางที่ 4.3 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากโมดูลทดลองพื้นก ชนิดพลังงานเมื่อติดตั้งและไม่ติดตั้งสปริง ..	61
ตารางที่ 4.4 ปริมาณไฟฟ้าของพื้นสร้างพลังงานภายใต้้น ำหนักของผู้ขับขี่ที่แตกต่างกัน	62
ตารางที่ 4.5 ปริมาณไฟฟ้าของพื้นผลิตไฟฟ้าภายใต้ความเร็วการขับขี่ที่แตกต่างกัน	62
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองปริมาณไฟฟ้าจากอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก ที่ความเร็วเฉลี่ย 75 rpm ...	65
ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองปริมาณไฟฟ้าจากอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก ที่ความเร็วเฉลี่ย 120 rpm .	65
ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองวัดปริมาณไฟฟ้าที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ที่ระยะแม่เหล็ก 6 มม.....	69
ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองวัดปริมาณไฟฟ้าที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ที่ระยะแม่เหล็ก 9 มม.....	70
ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองวัดปริมาณไฟฟ้าที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ที่ระยะแม่เหล็ก 12 มม.....	70
ตารางที่ 4.11 ปริมาณไฟฟ้าที่ได้จากการปั่นจักรยานด้วยความเร็วต่าง ๆ	73
ตารางที่ 4.12 ปริมาณไฟฟ้าที่ได้จากการปั่นจักรยานด้วยความเร็วต่าง ๆ บนพื้นผิวถนนต่าง ๆ.....	75
ตารางที่ 4.13 ปริมาณไฟฟ้าที่ได้จากการปั่นจักรยานด้วยความเร็วต่างๆ ในช่วงน ้ำหนักต่างๆ.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 ความต้องการพลังงานรวมทั่วโลกแยกตามเชื้อเพลิงและสถานการณ์ [1]	10
รูปที่ 1.2 ความต้องการพลังงานของภาคส่วนตามแหล่งที่มาและการใช้งาน [1]	10
รูปที่ 2.1 ปรัชญาการณเพียโซอิเล็กทริก.....	21
รูปที่ 2.2 ลักษณะการแปลงพลังงานของเพียโซอิเล็กทริก	21
รูปที่ 2.3 หลักการท างานของแบตเตอรี่ลิเทียม	29
รูปที่ 2.4 อัลตราคาปาซิเตอร์.....	30
รูปที่ 3.1 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก PPA-201	37
รูปที่ 3.2 ค่าการกระจัดและความถี่ธรรมชาติจากการติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในรูปแบบต่าง ๆ...	39
รูปที่ 3.3 ผลการจ ท่องทางกลของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในต านแห่งจับยึดที่ 1	40
รูปที่ 3.4 ผลการจ ท่องทางกลของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในต านแห่งจับยึดที่ 2	41
รูปที่ 3.5 ผลการจ ท่องทางกลของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในต านแห่งจับยึดที่ 3	42
รูปที่ 3.6 พื้นถนนก านิดพลังงาน	43
รูปที่ 3.7 แบบจ าสงทางไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริก.....	45
รูปที่ 3.8 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดเมื่อเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงทางกล.....	46
รูปที่ 3.9 แบบจ าสงทางไฟฟ้าเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสและโหลดตัวต้านทาน	47
รูปที่ 3.10 ก าส์ไฟฟ้าสูงสุดละเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่ค่าความต้านทานต่าง ๆ	47
รูปที่ 3.11 ก าส์ไฟฟ้าขาออกเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเก็บประจุภายในเพียโซอิเล็กทริก	48
รูปที่ 3.12 ก าส์ไฟฟ้าขาออกเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายในเพียโซอิเล็กทริก	48
รูปที่ 3.13 ก าส์ไฟฟ้าขาออกเมื่อเปลี่ยนแปลงคาบเวลาแรงกระท าทงกลกับเพียโซอิเล็กทริก.....	49
รูปที่ 3.14 วงจรเก็บเกี่ยวพลังงาน LTC3588-2.....	50
รูปที่ 3.15 วงจรควบคุมการประจุแบตเตอรี่ LTC4071	50
รูปที่ 3.16 การติดตั้งชุดทดลองเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก.....	51
รูปที่ 3.17 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกจากเพียโซอิเล็กทริก	52
รูปที่ 3.18 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงคอนทัวร์การกระจัดทางกล	54
รูปที่ 3.19 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงคอนทัวร์ความเค้นทางกล.....	54
รูปที่ 3.20 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงคอนทัวร์แรงดันไฟฟ้า.....	54
รูปที่ 4.1 การติดตั้งระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกประยุกต์ใช้งานทางเท้า.....	56
รูปที่ 4.2 สถาปัตยกรรมของระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริก	56
รูปที่ 4.3 สถาปัตยกรรมของระบบจ าสงทางไฟฟ้าของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน.....	58
รูปที่ 4.4 สัญญาณทางไฟฟ้าเมื่อเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงทางกล ที่จ าสงด้วย LTspice.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 แสดงแผนผังรูปแบบการท างานของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน.....	59
รูปที่ 4.6 การติดตั้งเพียโซอิเล็กทริกในชุดทดลอง	60
รูปที่ 4.7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าภายใต้การกระตุ้นด้วยแรงกล	61
รูปที่ 4.8 จักรยานออกก าสายที่ใช้ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริก.....	63
รูปที่ 4.9 กระบวนการท างานของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน.....	64
รูปที่ 4.10 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า ของโมดูลเพียโซอิเล็กทริกที่ความเร็วเฉลี่ย 75 rpm	66
รูปที่ 4.11 วงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกและตำแหน่งการวัด	67
รูปที่ 4.12 อุปกรณ์วัดความเร็วที่ติดตั้งบนจักรยานออกก าสายแบบเก็บเกี่ยวพลังงาน	69
รูปที่ 4.13 จุดตรวจวัดปริมาณไฟฟ้าภายในวงจรการเก็บเกี่ยวพลังงาน.....	69
รูปที่ 4.14 การติดตั้งโมดูลเพียโซอิเล็กทริกบนจักรยาน	72
รูปที่ 4.15 จุดวัดในการทดลองจักรยาน	74
รูปที่ 4.16 สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตำแหน่ง 1 และตำแหน่ง 2 ที่ความเร็วต่างๆ.....	75



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สถานการณ์พลังงานทั่วโลกได้ถูกรวบรวมและนำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับพลวัตที่เปลี่ยนแปลงไปของการผลิต การบริโภค และการจำหน่ายพลังงาน ในรายงานพลังงานโลกฉบับปี พ.ศ. 2566 (World Energy Report 2023) ผลการประเมินและวิเคราะห์ทิศทางเพื่อการกำหนดนโยบายพลังงานโดยผู้เชี่ยวชาญและนักวิจัยในสาขาที่เกี่ยวข้อง แสดงให้เห็นว่าทิศทางพลังงานทั่วโลกกำลังโน้มเอียงมาทางการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียน อาทิเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานน้ำมากขึ้นกว่าในอดีต และคาดว่าจะการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานสะอาดเหล่านี้จะมีสัดส่วนที่สูงกว่าการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินได้ภายในปี พ.ศ. 2568 และจะเป็นการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ในภาคการค้นหและผลิตพลังงาน

ถึงแม้มีการสนับสนุนและผลักดันใช้พลังงานหมุนเวียนมากขึ้นเรื่อย ๆ เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ก็ยังคงมีส่วนในการผลิตพลังงานที่สูง แต่มีการคาดการณ์ว่าการใช้งานจะลดลงด้วยความร่วมมือจากประเทศต่าง ๆ ที่พยายามลดการใช้เชื้อเพลิงเหล่านี้ทั้งในภาคครัวเรือนและธุรกิจให้ได้มากที่สุด เพื่อช่วยในการรักษาสีเขียวและสร้างความมั่นคงทางพลังงานในระดับโลกภายในปี พ.ศ. 2573 รูปที่ 1.1 แสดงแผนภูมิปริมาณความต้องการพลังงานรวมทั่วโลกแยกตามประเภทเชื้อเพลิง ประกอบด้วย ถ่านหิน น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ พลังงานทดแทนและพลังงานนิวเคลียร์ ในสถานการณ์ต่าง ๆ กัน กล่าวคือ สถานการณ์พลังงานภายใต้แนวโน้มนโยบายด้านพลังงานและภูมิอากาศในปัจจุบัน (The Stated Policies Scenario: STEPS) สถานการณ์ภาพฉายสถานการณ์พลังงานในอนาคตบนสมมติฐานว่าแต่ละประเทศจะทำตามความมุ่งมั่นสัญญาว่าด้วยการดำเนินการตามแผนการมีส่วนร่วมภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกที่แต่ละประเทศกำหนด (Nationally Determined Contributions: NDC) และสามารถบรรลุเป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (The Announced Pledges Scenario: APS) และสถานการณ์ภาพฉายอนาคตพลังงานที่บรรลุการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions: NZE) และรูปที่ 1.2 แสดงปริมาณความต้องการพลังงานของภาคส่วนตามแหล่งที่มาและการใช้งานในช่วงปี พ.ศ. 2565-2593 รวบรวมโดยองค์กรพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency: IEA) [1]

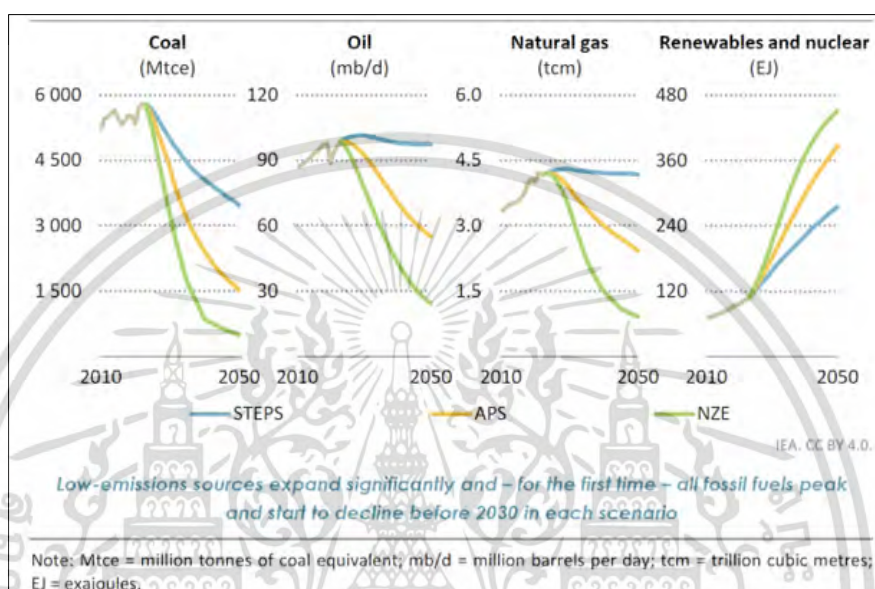
การศึกษาผลการวิเคราะห์สถานการณ์พลังงานของกลุ่มประเทศอุตสาหกรรมชั้นนำของโลก หรือ G7 ประกอบด้วย ประเทศอังกฤษ สหรัฐอเมริกา ประเทศเยอรมนี ประเทศญี่ปุ่น ประเทศฝรั่งเศส ประเทศแคนาดาและประเทศอิตาลี ทำให้เห็นแนวโน้มและความท้าทายด้านพลังงานในระดับภูมิภาคอย่างละเอียดยิ่งขึ้น ทั้งในการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มการใช้พลังงาน ความมั่นคงด้าน

พลังงาน และความพยายามในการลดดัชนีความเสี่ยงด้านความมั่นคงด้านพลังงาน (Energy Security)

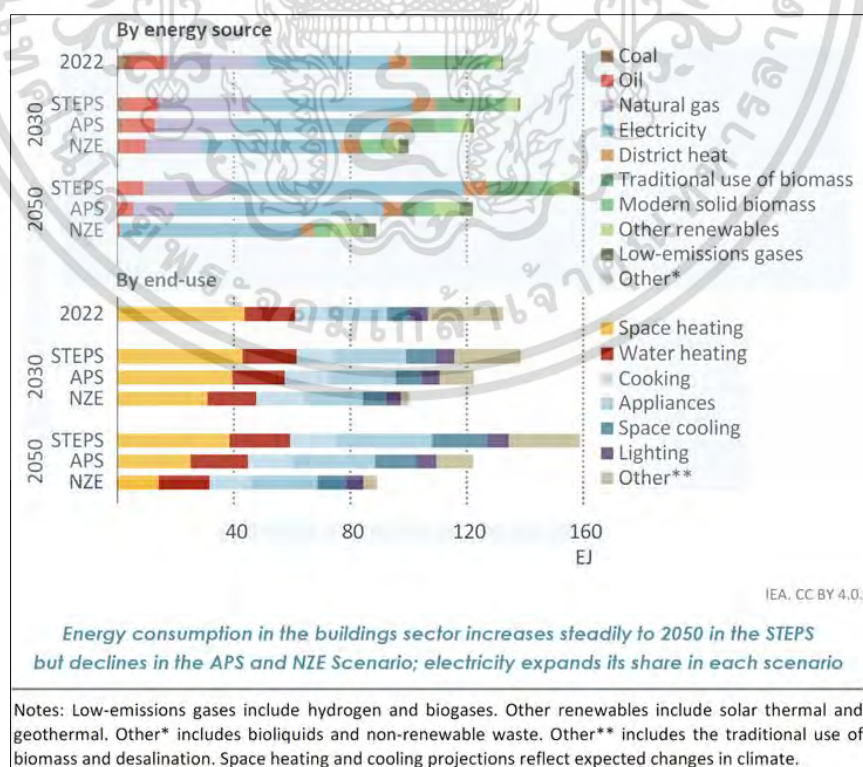
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Risk Index : ESRI) จากงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [2] พบว่าดัชนีความเสี่ยงด้านความมั่นคงด้านพลังงานของสหรัฐอเมริกามีความแตกต่างจากประเทศ G7 อื่น ๆ กล่าวคือมีรูปแบบที่สม่ำเสมอในทุก ๆ ไตรมาส ซึ่งบ่งชี้ว่าความเสี่ยงของความมั่นคงด้านพลังงานในสหรัฐฯ นั้นเป็นความเสี่ยงระยะยาว และจำเป็นต้องได้รับการดูแลตามนโยบายอย่างต่อเนื่องเพื่อบรรเทาผลกระทบด้านลบ ซึ่งต่างกับประเทศอื่นในกลุ่มซึ่งเป็นเพียงความเสี่ยงระยะสั้น [3]



รูปที่ 1.1 ความต้องการพลังงานรวมทั่วโลกแยกตามเชื้อเพลิงและสถานการณ์ [1]



รูปที่ 1.2 ความต้องการพลังงานของภาคส่วนตามแหล่งที่มาและการใช้งาน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้แล้วความจำเป็นในการแก้ไขปัญหาภาวะโลกร้อนและเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงานยังคงเป็นสิ่งที่นักวิจัยให้ความสำคัญและสนับสนุนโดยแสดงออกผ่านผลงานทางวิชาการต่าง ๆ เนื่องจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกยังคงเป็นสาเหตุหลักที่ท ให้อุณหภูมิโลกมีระดับที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลด้านลบต่อระบบนิเวศ เศรษฐกิจ และความเป็นอยู่ของมนุษย์ ในขณะเดียวกันความไม่มั่นคงทางพลังงานยังคงเป็นข้อกังวลและภัยคุกคามที่เร่งด่วน ทั้งด้านภูมิรัฐศาสตร์ ความขาดแคลนทรัพยากร และความไม่เท่าเทียมกันในการเข้าถึงพลังงาน ซึ่งตอกย้ำถึงความเปราะบางในภูมิทัศน์พลังงานทั่วโลก งานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [4] น าสนอผลการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศกับความเสี่ยงต่อการจัดหาพลังงาน พบว่าการลงทุนในพลังงานหมุนเวียนสามารถช่วยลดความเสี่ยงนี้ได้ และได้ให้ข้อเสนอแนะว่าการสร้างโครงสร้างพื้นฐานด้านพลังงานที่มั่นคง ควรท ำไปพร้อมกับการควบคุมปริมาณประชากร และการเสริมสร้างนโยบายต่อต้านการทุจริต ควบคุมไปกับการลงทุนในพลังงานสะอาด เช่นเดียวกันกับผลการศึกษาจาก [5] พบว่าแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยให้ประเทศต่าง ๆ บรรลุความเป็นอิสระด้านพลังงานในระดับที่สูงขึ้น โดยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและผู้วิจัยชี้ให้เห็นว่าพลังงานหมุนเวียนไม่เพียงแต่มีส่วนช่วยสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน แต่ยังช่วยบรรเทาผลกระทบด้านลบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศด้วย อีกทั้งในงานวิจัย [6] น าสนอถึงผลจากความไม่แน่นอนของนโยบายเศรษฐกิจที่เกิดขึ้นในหลายประเทศ กลับส่งผลกระทบเชิงบวกต่อผลตอบแทนหุ้นพลังงานทดแทน เนื่องด้วยในสถานการณ์ความไม่มั่นคงทางเศรษฐกิจ เทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนถูกมองว่าเป็นการลงทุนที่ปลอดภัยและคุ้มค่า และเป็นส่วนสำคัญต่อประเทศในการต่อสู้กับภัยคุกคามต่าง ๆ

ส ำหรับภาพรวมพลังงานของประเทศไทย ผลวิเคราะห์สรุปสถานการณ์การใช้พลังงานปี พ.ศ. 2566 และแนวโน้มการใช้พลังงานปี พ.ศ. 2567 โดยสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน พบว่าการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนกรกฎาคม มีปริมาณ 49,989 พันตันเทียบเท่า ้ำมันดิบ โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.8 จากช่วงเดือนเดียวกันของปีก่อนหน้า โดยมีสัดส่วนของการใช้พลังงานทดแทนร้อยละ 15.53 หรือ 7,761 พันตันเทียบเท่า ้ำมันดิบ โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.7 จากช่วงเดือนเดียวกันของปีก่อนหน้า และประเทศไทยมีเป้าหมายในการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกต่อการใช้พลังงานในขั้นสุดท้ายที่ร้อยละ 30 ภายในปี พ.ศ. 2580 (AEDP2018) [7] เมื่อพิจารณาพลังงานในภาคอาคารซึ่งเป็นส่วนที่ทางภาครัฐและเอกชนทั่วโลกให้ความสนใจ มีหลายวิจัยที่ระบุว่าอาคารต่าง ๆ เป็นส่วนที่ใช้พลังงานเป็นจ านวนมากเป็นอันดับต้น ๆ ของภาพรวมการใช้พลังงานทั้งหมด [8-13] ในบริบทของประเทศไทย อาคารเป็นส่วนสำคัญที่ต้องมีการก ำหนดยุทธศาสตร์และนโยบายพลังงานเชิงรุกเนื่องจากเป็นภาคที่มีการใช้พลังงานจ านวนมาก ผลการศึกษาพบว่าในปี พ.ศ. 2559 อาคารต่าง ๆ มีส่วนในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงถึงร้อยละ 77 จึงน ำไปสู่ ำนโยบายที่กำหนดเป้าหมายภายใต้พันธกรณีของประเทศไทยต่อ UNFCCC โดยมี

เป้าหมายในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างมีนัยสำคัญผ่านการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการนำ พลังงานหมุนเวียนมาใช้ผลิตพลังงาน [14]

จากการศึกษารูปแบบการใช้พลังงานในบริบทพลังงานระดับโลกโดยเฉพาะภูมิภาคเอเชียแสดงให้เห็นถึงบทบาทที่สำคัญของการขยายตัวของเมืองและเทคโนโลยีในยุคที่ความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้น จึงมีหลายงานวิจัยที่เน้นการวิเคราะห์เชิงนโยบายพลังงานและการสร้างเมืองโดยเน้นการสนับสนุนนโยบายพลังงานที่ยั่งยืน [11-13] ในส่วนของประเทศไทยนั้น การบูรณาการประสิทธิภาพพลังงานและพลังงานทดแทนในอาคารไม่ได้เป็นเพียงมาตรการเชิงนโยบายเท่านั้น แต่ยังเป็นการตอบสนองต่อข้อกังวลด้านความมั่นคงด้านพลังงานที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่งเห็นได้ชัดจากแผนของรัฐบาลที่จะลดความเข้มข้นของพลังงานลง 30% ภายในปี พ.ศ. 2579 ความพยายามนี้ได้รับการสนับสนุนจากกฎระเบียบเฉพาะที่ส่งเสริมให้อาคารอนุรักษ์พลังงานและใช้พลังงานหมุนเวียน ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสอดคล้องกับแนวโน้มความยั่งยืนในระดับโลก [14] นอกจากนี้รัฐบาลไทยยังมีการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเฉพาะจากภาคการขนส่งเพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับกำหนดยุทธศาสตร์การลดพลังงานของประเทศ [15] การศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีสารสนเทศด้านพลังงานตั้งแต่ผู้ใช้ปลายทางไปจนถึงผู้ออกแบบนโยบายมีความสำคัญและมีงานวิจัยสนับสนุนเพื่อให้มั่นใจว่าการดำเนินการนโยบายพลังงานมีประสิทธิภาพสูงสุด [16] โดยเน้นความเชื่อมโยงกันของนโยบาย เทคโนโลยี และพฤติกรรมผู้ใช้ในการบรรลุเป้าหมายด้านประสิทธิภาพพลังงาน การบูรณาการแหล่งพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการบรรลุความเป็นอิสระด้านพลังงานและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอน การศึกษาจำนวนมากมุ่งเน้นถึงความสำคัญของการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบอาคารและเพิ่มการใช้พลังงานหมุนเวียนในสถานที่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบแผนผังอาคารเพื่อการประหยัดพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ [17-20] นอกจากนี้ในงานวิจัยที่ [18] นาเสนอการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในอาคารเชิงพาณิชย์ ผลงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าการบูรณาการระบบพลังงานหมุนเวียนและเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการพลังงานในอาคาร เป็นประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจอย่างมาก [19]

ในประเทศไทยการใช้เทคโนโลยีพลังงานทดแทนได้รับการสนับสนุนอย่างมากจากนโยบายของรัฐบาลและโครงการอุดหนุน นโยบายเหล่านี้ได้รับการออกแบบมาเพื่อส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน โดยอำนวยความสะดวกผ่านกลไกต่าง ๆ เช่น อัตราภาษีเงินได้และมาตรการกำหนดสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียน (Renewables Portfolio Standard: RPS) กำหนดให้ผู้ผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงฟอสซิลจะต้องมีการผลิตหรือจำหน่ายไฟฟ้าที่ได้มาจากพลังงานหมุนเวียนควบคู่กันไปด้วยในสัดส่วนหนึ่ง แต่ไม่ระบุวิธีการ ซึ่งเป็นการเปิดช่องให้ผู้ผลิตอาจจัดหาพลังงานหมุนเวียนนั้นจากผู้ผลิตรายอื่น ๆ ก็ได้เพื่อให้ได้สัดส่วนการผลิตหรือจำหน่ายเป็นไปตามกรอบนโยบายที่กฎหมายกำหนด ทำให้ทิศทางภูมิทัศน์ของพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทยมีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชัดเจนมากขึ้นในปัจจุบัน [22] นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การเติบโตของประชากร และปัจจัยทางเศรษฐกิจ ให้ผลวิเคราะห์เชิงลึกเกี่ยวกับประสิทธิผลของนโยบายพลังงานทดแทนของประเทศไทย และผลกระทบในวงกว้างต่อการพัฒนาที่ยั่งยืน [23] และในระดับภูมิภาคควมนั้นการวิเคราะห์ตลาดของระบบจัดเก็บพลังงานแบตเตอรี่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคโนโลยีดังกล่าวในการเพิ่มความมั่นคงด้านพลังงานและความยั่งยืน เป็นการสนับสนุนการจัดเก็บพลังงานเพื่อเสริมการผลิตพลังงานหมุนเวียนในภูมิภาคควมถึงประเทศไทย [24]

การประเมินเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงาน ทั้งด้านมูลค่าและศักยภาพในอนาคตของเทคโนโลยีนี้ ไปสู่การกำหนดนโยบายและกลยุทธ์ในการจัดสรรทรัพยากรเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีที่ยั่งยืน ในงานวิจัยจากเอกสารอ้างอิง [25] นาเสนอนวัตกรรมล่าสุดและประสิทธิภาพของเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้แนวคิดของการเก็บเกี่ยวพลังงาน ในงานวิจัยที่ [26] นาเสนอการนาเอาเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานหลายรูปแบบผสมผสานใช้งานร่วมกัน จากการศึกษาผลงานวิจัย [27] พบว่าการเก็บเกี่ยวพลังงานจลน์ การเคลื่อนไหว และการสั่นสะเทือน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคการขนส่งทางบกมีการเกิดสภาพแวดล้อมแบบไดนามิกซึ่งสามารถนาเอาเทคโนโลยีเก็บเกี่ยวพลังงานมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [28-30] น เสนอการเก็บเกี่ยวพลังงานเทอร์โมอิเล็กทริก [33] และการนาเสนอระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานแบบผสมผสานหลายแหล่งพลังงานในภาคอาคาร [31,32] การเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกถือเป็นวิธีแก้ปัญหาที่น่าสนใจในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคาร ด้วยการแปลงความเค้นเชิงกลเป็นพลังงานไฟฟ้า อุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกสามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง ลดการพึ่งพาแหล่งพลังงานภายนอก สามารถน ไปใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ ตั้งแต่ระบบพื้นอาคารที่สามารถผลิตพลังงานจากการสัญจรไปมาของคนในอาคาร ไปจนถึงระบบตรวจสอบโครงสร้างอาคารที่ใช้พลังงานจากการสั่นสะเทือนแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพของโครงสร้างได้

งานวิจัยนี้จึงนาเสนอการวิจัยเกี่ยวกับการรวมเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริก เพื่อใช้พลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ในพื้นที่และบริเวณที่เกิดแรงสั่นสะเทือนปริมาณมาก โดยเน้นการเก็บเกี่ยวพลังงานจลน์จากกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเป็นประจำ เช่น การเดินทางเท้า และการขี่จักรยาน การวิจัยแบ่งเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางโครงสร้างเมื่อวัสดุได้รับแรงทางกล เพื่อหาชนิดและรูปแบบการติดตั้งที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในด้านความคงทนและการแปลงพลังงาน ติดตั้งเป็นพื้นกานาผลิตพลังงานเพื่อใช้งานกับระบบส่องสว่างบริเวณทางเท้าและทางจักรยาน ติดตั้งกับจักรยานออกก าสาย และติดตั้งบนจักรยานเคลื่อนที่ และส่วนสุดท้ายเป็นการให้ข้อเสนอแนะเพื่อต่อยอดงานวิจัยด้านการบูรณาการระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ศักยภาพของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในการเก็บเกี่ยวพลังงานการสั่นสะเทือน: การวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อหา ความเข้าใจถึงคุณสมบัติและประสิทธิภาพของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในการแปลงพลังงานการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานไฟฟ้า
2. เพื่อพัฒนาระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานการสั่นสะเทือนในสภาพแวดล้อม: การศึกษานี้มุ่งเน้นการออกแบบและทดสอบระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานที่สามารถนำไปใช้ได้จริง โดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นองค์ประกอบหลักในการแปลงพลังงาน
3. เพื่อจ าสงสถานการณ์และวิเคราะห์ปริมาณพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ในสภาพแวดล้อมจริง: การทดลองในงานวิจัยนี้ออกแบบจ าสงสถานการณ์จริงที่เกิดแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำเช่น การสัญจรบนทางเท้า และการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ น ผลการวัดและวิเคราะห์ไปประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเก็บเกี่ยวพลังงาน
4. เพื่อเสนอแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานในอนาคต: ผลการวิจัยจะนำไปสู่การเสนอแนะวิธีการพัฒนาและปรับปรุงระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ทั้งในด้านการออกแบบและการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืนในการใช้พลังงานทางเลือก

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. คุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีความสม าสมอทั้งคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า ในตัวอย่างการติดตั้งใช้งานต่าง ๆ การลดความซับซ้อนนี้จำเป็นต่อการสร้างแบบจำลองและคาดการณ์พฤติกรรมของวัสดุภายใต้สภาวะต่าง ๆ โดยไม่ต้องคำนึงถึงข้อบกพร่องของวัสดุหรือความแปรผันในกระบวนการผลิตซึ่งอยู่นอกเหนืองานวิจัย
2. สภาพแวดล้อมรอบ ๆ ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริก เช่น อุณหภูมิ ความชื้น คุณภาพอากาศ ยังคงอยู่ในช่วงที่ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของวัสดุหรือประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน เพื่อการควบคุมการทดลองและการจ าสงได้
3. แหล่งที่มาของพลังงานกล เช่น การสัญจรไปมาและการสั่นสะเทือนรูปแบบอื่น ค่อนข้างสม าสมอ และสามารถคาดการณ์ได้ในปริมาณและความถี่ของพลังงาน เพื่อการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพระบบเก็บเกี่ยวพลังงานในการเพิ่มการผลิตพลังงานไฟฟ้า
4. ระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกสามารถรวมเข้ากับโครงสร้างพื้นฐาน ระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ที่มีอยู่ ซึ่งรวมถึงความเข้ากันได้ของระบบกับการออกแบบอาคาร วัสดุ และระบบการจัดการพลังงานในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

1. ทฤษฎีการแปลงพลังงาน (Energy Conversion Theory): ทฤษฎีนี้เป็นหลักการพื้นฐานในฟิสิกส์ที่อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของพลังงานจากรูปแบบหนึ่งไปยังอีกรูปแบบหนึ่ง ในกรณีของการวิจัยนี้ ทฤษฎีนี้ถูกใช้เพื่ออธิบายการแปลงพลังงานจลน์จากกิจกรรม เช่น การเดินและการขยับให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เชื่อมต่อกับระบบเก็บพลังงาน การทำความเข้าใจและการประยุกต์ใช้ทฤษฎีนี้ช่วยให้สามารถออกแบบระบบที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถแปลงพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. ทฤษฎีความทนทานของวัสดุ (Material Durability Theory): การศึกษาความทนทานของวัสดุมีความสำคัญเนื่องจากลักษณะสถานการณ์การใช้งานที่ทางภาคทดลองวิจัย วัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะต้องทนต่อความเครียดและแรงกระทำทางกลที่เกิดจากการใช้งานต่อเนื่องในระยะยาว ทฤษฎีความทนทานของวัสดุถูกนำมาใช้เพื่อประเมินและเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุด สำหรับการติดตั้งในระบบการเก็บพลังงาน โดยจะพิจารณาถึงความสามารถในการทนทานต่อการสึกหรอและความเสียหายจากปัจจัยภายนอก
3. ทฤษฎีการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis Theory): การวิจัยนี้ใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทำนายและจำลองพฤติกรรมทางกลของโครงสร้างที่ต้องรับแรงกดหรือสั่นสะเทือนเป็นระยะเวลานานต่อเนื่องตลอดการทดลอง ทฤษฎีนี้เป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญในการออกแบบระบบเพื่อให้แน่ใจว่าโครงสร้างสามารถทนต่อแรงที่เกิดขึ้นได้โดยไม่เกิดความเสียหายหรือลดประสิทธิภาพการเก็บและแปลงพลังงาน
4. แนวคิดการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Concepts): การใช้เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืนเป็นแนวคิดหลักในวิจัยนี้ โดยเน้นความสำคัญของการลดการพึ่งพาพลังงานจากแหล่งภายนอกและเพิ่มการใช้พลังงานที่มาจากแหล่งทดแทนที่มีอยู่รอบตัว การบูรณาการเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานจะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า
5. แนวคิดการบูรณาการระบบ (Systems Integration Concepts): การบูรณาการระบบเป็นสิ่งจำเป็นในการรวมเทคโนโลยีการเก็บพลังงานเข้ากับระบบอื่น ๆ แนวคิดนี้ครอบคลุมการออกแบบระบบที่สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อการประหยัดพลังงานและสามารถดำเนินการได้อย่างอิสระจากพลังงานภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. วัสดุเพียโซอิเล็กทริก: มุ่งเน้นไปที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกประเภทเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) ที่สามารถนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมในสถานการณ์จำลองได้มากที่สุด โดยพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน ความทนทาน และความสามารถในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ
2. กลไกการเก็บเกี่ยวพลังงาน: จากการศึกษาเฉพาะการแปลงพลังงานกล เช่น การสั่นสะเทือน เนื่องจากการสัญจรบนทางเท้า และแรงกดจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนถนน เป็นพลังงานไฟฟ้า ไม่รวมการเก็บเกี่ยวพลังงานรูปแบบอื่น เช่น ความร้อนหรือแสงอาทิตย์
3. พื้นที่ใช้งาน: มุ่งเน้นไปที่พื้นบางประเภทที่มีการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการก าสไฟฟ้าต่ำ เช่น อาคารพาณิชย์ อาคารที่พักอาศัย หรือโครงสร้างพื้นฐานสาธารณะ ซึ่งการประยุกต์ใช้การเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกอาจเป็นประโยชน์และเป็นไปได้มากที่สุด
4. สถานที่ติดตั้ง: ระบุตำแหน่งเฉพาะภายในหรือรอบๆ พื้นที่ใช้งานที่มีความหนาแน่นของแรงสั่นสะเทือนมาก เช่น พื้น หรือทางเดิน เพื่อศักยภาพสูงสุดในการเก็บเกี่ยวพลังงาน

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. ศึกษาแนวคิดและองค์ประกอบของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ รวมไปถึงการจัดการพลังงานด้วยระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อนำมาพัฒนาและออกแบบระบบการเก็บเกี่ยวพลังงาน
2. ศึกษาและเสนอแนวทางประยุกต์ทฤษฎี รวมถึงงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่เหมาะสม สำหรับใช้งานส ารับระบบจ าลอง
3. เลือกวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาใช้ทดลอง พิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน คุณสมบัติทางกล การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่น ๆ และผลตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อพิจารณาศักยภาพและข้อจ ากัดของระบบการเก็บเกี่ยวพลังงาน
4. จ าลองและวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้จากการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน
5. ออกแบบและสร้างชุดทดลองระบบกักเก็บพลังงานส ารับกักเก็บพลังงานที่ผลิตได้จากระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน
6. ทดลองระบบที่ออกแบบในพื้นที่ติดตั้งใช้งานจริง บันทึกและวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อนำมาสรุปผลงานวิจัยและระบุข้อเสนอนะเพื่อการต่อยอดงานวิจัย
7. น าสถนอผลงานและจัดท ารูปเล่มวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากองค์ความรู้ใหม่

1. ได้รับแนวคิดในการออกแบบระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่มีประสิทธิภาพ นวัตกรรมไปสู่การพัฒนาวัสดุและอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกที่เป็นวัสดุพลังงานทางเลือกใหม่
2. ได้องค์ความรู้และข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการบูรณาการระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งมีส่วนสนับสนุนในด้านการอนุรักษ์และสนับสนุนนโยบายด้านพลังงาน
3. เพื่อเผยแพร่องค์ความรู้และส่งเสริมการใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียน เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล และผลกระทบจากปรากฏการณ์เรือนกระจก
4. ได้ข้อมูลเพื่อการพัฒนา นโยบาย ส่งเสริมการนำเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานมาใช้ ยกย่องความรู้ทางวิชาการในด้านเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนในหลายศาสตร์ อาทิเช่น วิศวกรรมศาสตร์ วัสดุศาสตร์ สถาปัตยกรรมศาสตร์ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำหรับการวิจัยในอนาคต

บทที่ 2

ระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน

ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานท ำหน้าที่เก็บรวบรวมและแปลงพลังงานจากแหล่งพลังงานรอบตัวให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้งานได้ เป็นวิธีการที่ยั่งยืนและใช้พลังงานทดแทนสำหรับผลิตพลังงาน และจ่ายให้กับอุปกรณ์หรือระบบที่ต้องการพลังงานต่ ำเนื้อหาส่วนนี้จะเน้นที่ส่วนประกอบและวิธีการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน โดยเริ่มจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกซึ่งเป็นแหล่งก ำเนิดพลังงานหลัก จากนั้นจะพิจารณาวงจรที่ออกแบบมาเพื่อเก็บเกี่ยวและแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ประกอบกับระบบกักเก็บพลังงานที่ช่วยให้สามารถใช้พลังงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ สุดท้ายจะกล่าวถึงระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือและมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการจ ำลองและปรับปรุงประสิทธิภาพการท างานของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน

2.1 แหล่งก ำเนิดพลังงาน (เพียโซอิเล็กทริก)

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าและในทางกลับกัน หากบ ำยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ชั่ว วัสดุก็จะเกิดการสั้นหรือการโก่งโค้งตัวได้ โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กั บั้วของศักย์ไฟฟ้าหรือทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่บ ำยให้กับวัสดุ ปรากฏการณ์เหล่านี้เกิดจากความสามารถในการจัดเรียงตัวของผลึกภายในเมื่อได้รับแรงทางกล ผลึกภายในที่ประกอบไปด้วยไดโพลจ นวนมากที่กระจายตัวอยู่ เกิดการเคลื่อนที่และท ำการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าใหม่ กล่าวคือประจุชนิดเดียวกันก็จะเคลื่อนที่ไปอยู่บริเวณพื้นผิวผิวดึงหนึ่งของวัสดุ และขั้วตรงข้ามเคลื่อนที่ไปยังผิวของวัสดุอีกผิวดึง ท ำให้เกิดสนามไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า และเมื่อต่อโหลดจึงเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ ซึ่งหลักการนี้เป็นพื้นฐานสำคัญในการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากกิจกรรมต่าง ๆ ที่มีแรงสั่นสะเทือน

นอกจากนี้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่ส ำคัญ เช่น ความยืดหยุ่น ความทนทานต่อแรงกด แรงยืด และแรงบิด รวมถึงความสามารถในการทนต่อสนามไฟฟ้าและความร้อน ขึ้นอยู่กั บัปรเภทของวัสดุที่ผสมขึ้นรูปเป็นโมดูลเพียโซอิเล็กทริก ท ำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีการประยุกต์ใช้งานในหลายด้าน เช่น การเก็บเกี่ยวพลังงาน การวัดและตรวจจ ำ และการแปลงพลังงานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เนื้อหาในส่วนนี้จะอธิบายถึงหลักการท างานและคุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องค ำึงส ำหรับการน ำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาใช้งานเป็นแหล่งพลังงานสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน รูปแบบการใช้งานเพียโซอิเล็กทริกในการผลิตพลังงานได้สรุปในตารางที่ 2.1 ประกอบกั บั

ตัวอย่างและวัตถุประสงค์ในการใช้งานแบ่งตามภาคส่วนต่าง ๆ และสรุปข้อดี ข้อจำกัดและลักษณะการใช้งานของเพียโซอิเล็กทริกแต่ละประเภทได้ ณ สื่อนอในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการใช้งานและวัตถุประสงค์การใช้งานเพียโซอิเล็กทริกแบ่งตามภาคส่วน

ภาคส่วน	ตัวอย่างการใช้งาน	วัตถุประสงค์
อุตสาหกรรม	- ติดตั้งเซนเซอร์เพียโซอิเล็กทริกในเครื่องจักรอุตสาหกรรมเพื่อตรวจจับความผิดปกติและเก็บเกี่ยวพลังงานสั่นสะเทือน	- ลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน - เพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน
	- ใช้พลังงานจากการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรในการจ่ายพลังงานให้กับเซ็นเซอร์ IoT ในโรงงานอัจฉริยะ	- ลดการใช้แบตเตอรี่ - เพิ่มความเป็นอิสระในการทำงานของเซนเซอร์
	- นำพลังงานจากการสั่นสะเทือนของรถไฟมาใช้ในการจ่ายพลังงานให้กับระบบสัญญาณและไฟส่องสว่าง	- ลดการใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก - เพิ่มความยั่งยืนของการผลิตพลังงาน
โครงสร้างพื้นฐาน	- ติดตั้งอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนบนสะพานเพื่อตรวจสอบสภาพโครงสร้างและจ่ายพลังงานให้กับเซ็นเซอร์	- ตรวจสอบความปลอดภัยของสะพาน - ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา
	- ใช้พลังงานจากการสั่นสะเทือนของอาคารในการจ่ายพลังงานให้กับระบบไฟฟ้าส่องสว่างฉุกเฉิน	- เพิ่มความปลอดภัยในกรณีไฟฟ้าดับ
การขนส่ง	- เก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนของยานพาหนะเพื่อประจุแบตเตอรี่หรือจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	- ลดการใช้เชื้อเพลิง - เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน
	- ใช้พลังงานจากการสั่นสะเทือนของเครื่องบินในการจ่ายพลังงานให้กับเซ็นเซอร์ตรวจสอบวัดสภาพเครื่องยนต์	- เพิ่มความปลอดภัยในการบิน - ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา
ชีวิตประจำวัน	- ใช้พลังงานจากการสั่นสะเทือนจากกิจกรรมในชีวิตประจำวันจ่ายพลังงานให้กับระบบบ้านอัจฉริยะ	- เพิ่มความสะดวกสบายในการใช้งานอุปกรณ์ในบ้านอัจฉริยะ - ลดการใช้พลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ความเหมาะสมในการใช้งานของเพียโซอิเล็กทริกแต่ละประเภท

ประเภทวัสดุ เพียโซอิเล็กทริก	ข้อดี	ข้อจำกัด	ความเหมาะสมในการนำไปใช้
เซรามิก	- สามารถผลิตพลังงาน ปริมาณมาก - ราคาถูก	- ไม่ยืดหยุ่น - แตกหักง่าย	เหมาะสม สำหรับบริเวณที่มีคนเดิน ผ่านจำนวนมาก เช่น สถานีรถไฟ สนามบิน ห้างสรรพสินค้า
พอลิเมอร์	- ยืดหยุ่น - ทนทานต่อแรง กระแทก - ไม่เป็นพิษ	- ให้พลังงานน้อย	เหมาะสม สำหรับพื้นรองเท้า และ อุปกรณ์สวมใส่
ผลึกเดี่ยว	- ให้พลังงานมาก - แม่นยำ สูง - ทนทานต่ออุณหภูมิสูง	- ราคาแพง - แตกหักง่าย	เหมาะสม สำหรับเซ็นเซอร์วัดความ ดันและความเร่งที่มีความแม่นยำ สูง
คอมโพสิต	- ปรับแต่งคุณสมบัติได้ ตามต้องการ - ผสมผสานข้อดีของวัสดุ หลายชนิด	- กระบวนการ ผลิตซับซ้อน - อาจมีราคาแพง	เหมาะสม สำหรับพื้นถนน โครงสร้าง ขนาดใหญ่

2.1.1 หลักการทำงานของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

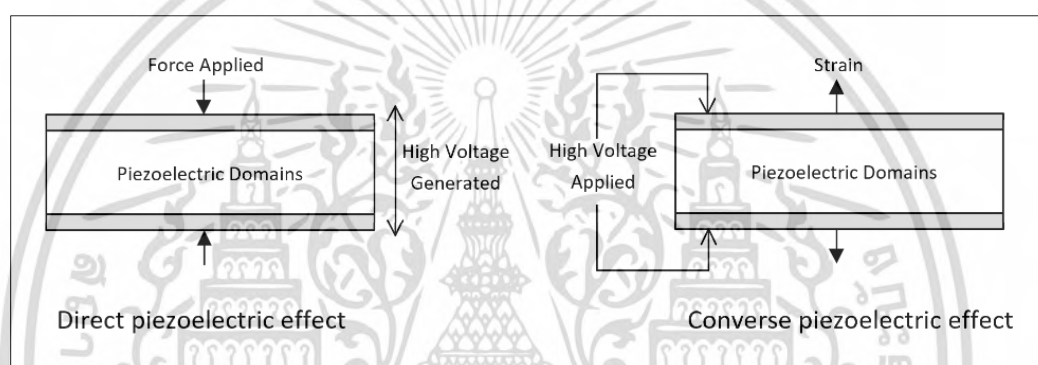
ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ทางกล-ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัสดุที่มีลักษณะพิเศษ กล่าวคือเป็นวัสดุที่มีการเรียงตัวของไดโพลในผลึกอย่างไม่สมมาตร แต่เมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงกระทำจากภายนอกและเกิดเป็นความเค้น (stress) ทางกล จะทำให้ขั้วคู่ภายในเกิดการเคลื่อนที่และจัดเรียงขั้วไฟฟ้าใหม่และเกิดเป็นศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (electrode) และในทางกลับกันเมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงสมดุลทางไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลึกและวัสดุจะเกิดการสั่นไหวได้เช่นเดียวกัน แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับพลังงานไฟฟ้าหรือทางกลดังรูปที่ 2.1

โดยทั่วไปวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถถูกออกแบบให้รับความเค้นทางกลในทิศทางตั้งฉากหรือขนานกับขั้วไฟฟ้าก็ได้ ผลของแรงอัดและแรงดึงที่กระทำต่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า ขั้วบวกและขั้วลบแบ่งเป็นสองลักษณะ คือการทำงานในโหมดตามยาว (longitudinal mode) จึงนิยมเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าโหมดดีสามสาม (d_{33} mode) และการทำงานในโหมดตามขวาง (transverse mode)

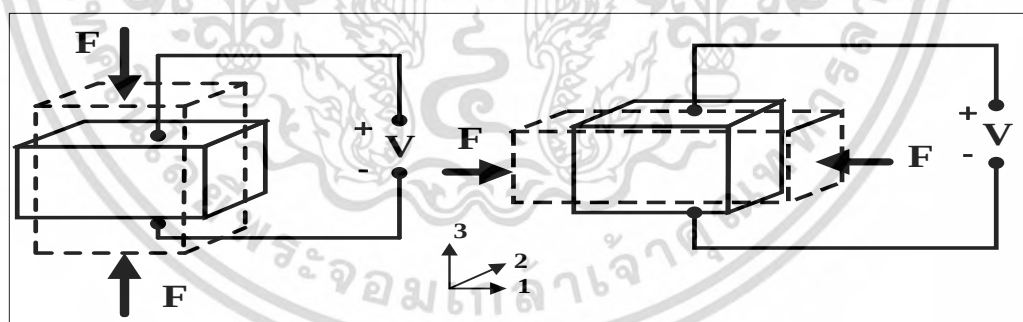
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่าโหมดดีสามหนึ่ง (d_{31} mode) แสดงดังรูปที่ 2.2 ในโหมดดีสามสามการผลิตพลังงานไฟฟ้าจะเกิดจากความอัดเค้นมากระทำกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในทิศทางตามขวาง รูปที่ 2.2 (ก) ในขณะที่โหมดดีสามหนึ่งการผลิตพลังงานไฟฟ้าจะเกิดจากความอัดเค้นมากระทำกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในทิศทางตามยาว รูปที่ 2.2 (ข)

อย่างไรก็ตามพบว่าโหมดดีสามสามมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกมากกว่าโหมดดีสามหนึ่ง ดังนั้นภายใต้เงื่อนไขสถานะเดียวกันเพียโซอิเล็กทริกโหมดดีสามสามสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า ด้วยเหตุนี้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกในโหมดดีสามสามจึงถูกพิจารณาเป็นโครงสร้างของพื้นถนนก นิดพลังงานในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก



(ก) การท างานในโหมดตามยาว (d_{33} mode) (ข) การท างานในโหมดตามขวาง (d_{31} mode)

รูปที่ 2.2 ลักษณะการแปลงพลังงานของเพียโซอิเล็กทริก

2.1.1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีคุณสมบัติทางกลที่โดดเด่นคือความยืดหยุ่น (elasticity) ซึ่งหมายถึงความสามารถของวัสดุในการกลับคืนสู่รูปร่างเดิมหลังจากได้รับแรงกระทำ เช่น แรงกด (compression) แรงยืด (tension) หรือแรงบิด (torsion) วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีโมดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) หรือที่เรียกว่าโมดูลัสยังก์ (Young's modulus) สูง ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการทนต่อแรงกระทำโดยไม่แตกหัก เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการเสียรูปถาวร (plastic deformation) การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (stress) และความเค้น (strain) ในวัสดุยืดหยุ่นสามารถใช้สมการฮุคส์ (Hooke's law) ดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.1)$$

โดยที่

- σ คือ ความเครียด (stress) หมายถึงแรงต่อหน่วยพื้นที่ที่กระทำ บนวัสดุ
 E คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) หรือ Young's modulus ซึ่งบ่งบอกถึงความแข็งแรงของวัสดุในการต่อต้านการเปลี่ยนรูป
 ε คือ ความเค้น (strain) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

โดยที่

- σ คือ ความเครียด (stress)
 F คือ แรงที่กระทำ (force)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (cross-sectional area)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.3)$$

โดยที่

- ε คือ ความเค้น (strain)
 ΔL คือ การเปลี่ยนแปลงความยาว (change in length)
 L_0 คือ ความยาวเริ่มต้นของวัสดุ (original length)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นสามารถแสดงเป็นกราฟ stress-strain curve ซึ่งจะแสดงถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ ต่างๆ โดยส่วนแรกของกราฟจะเป็นส่วนยืดหยุ่น (elastic region) ซึ่งวัสดุจะกลับคืนสู่รูปร่างเดิมเมื่อยกเลิกแรงกระทำ และส่วนหลังจากจุดยืดหยุ่นสูงสุด (yield point) จะเป็นส่วนพลาสติก (plastic region) ซึ่งวัสดุจะเกิดการเสียรูปถาวร และสมการของปัวซอง (Poisson's ratio) บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางที่ได้รับแรงกระทำ ดังสมการต่อไปนี้

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}} \quad (2.4)$$

โดยที่

- ν คือ ค่าสัมประสิทธิ์ปัวซอง (Poisson's Ratio)

ϵ_{trans} คือ ความเค้นในทิศทางตั้งฉาก

ϵ_{long} คือ ความเค้นในทิศทางที่ได้รับแรงกระทำ

ความทนทาน (durability) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นคุณสมบัติที่สำคัญ โดยเฉพาะในการใช้งานที่ต้องการการใช้งานซ้ำ ๆ วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถทนทานต่อการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำ เช่น การสั่นสะเทือน การกด หรือการยืดซ้ำ ๆ โดยไม่เกิดการเสียหายง่าย การทดสอบความทนทานของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมักจะใช้การทดสอบแบบ fatigue testing ซึ่งเป็นการทดสอบแรงกระทำซ้ำ ๆ วัสดุมักจะเกิดความเสียหายหรือแตกหัก สมการการคำนวณดังต่อไปนี้สามารถใช้สำหรับการทดสอบความทนทาน เช่น สมการ S-N curve (stress-number of cycles curve) สามารถใช้ในการวิเคราะห์อายุการใช้งานของวัสดุ

$$\sigma_f = \sigma_0 \left(\frac{N}{N_0} \right)^{-b} \quad (2.5)$$

โดยที่

σ_f คือ ความเครียดที่ล้มเหลว (Failure Stress)

σ_0 คือ ความเครียดอ้างอิง (Reference Stress)

N คือ จำนวนรอบที่ใช้ในการทดสอบ

N_0 คือ จำนวนรอบอ้างอิง

b คือ ค่าคงที่ของวัสดุ

2.1.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

โดยทั่วไปวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีทั้งคุณสมบัติเป็นทางกลและทางไฟฟ้าภายในตัว เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (direct piezoelectric effect) และปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกผกผัน (converse piezoelectric effect) ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรงคือการที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับความเค้น (strain) ทางกล และแปลงพลังงานเหล่านั้นเป็นพลังงานไฟฟ้า ในขณะที่ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกผกผันคือการกระตุ้นจากพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และแปลงเป็นพลังงานทางกลในรูปของการสั่นสะเทือน ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรงและปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกผกผันสามารถแสดงโดยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

$$D = d\vec{E} + \epsilon^T \vec{E} \quad (2.6)$$

$$S = S^E T + d\vec{E} \quad (2.7)$$

เมื่อ

- D คือ การกระจัดทางไฟฟ้าหรือความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (electric displacement)
 T คือ ความเค้น (stress)
 $\vec{E}$ คือ สนามไฟฟ้า (external electric field)
 S คือ ความเครียด (strain)
 d คือ ค่าคงที่ของเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric charge constant)
 ϵ^T คือ ค่าสภาพยอมที่ความเค้นคงที่ (dielectric constant at the constant T condition)
 S^E คือ ค่าความยืดหยุ่นที่วัดในสนามไฟฟ้าคงที่ (compliance at the constant E condition)

นอกจากนี้ สมการการสร้างแรงดันไฟฟ้ายังสามารถใช้สมการพื้นฐานของการแปลงพลังงานจากการกระทำทางกลเป็นพลังงานไฟฟ้า (electromechanical coupling equation)

$$V = gT \quad (2.8)$$

เมื่อ

- V คือ แรงดันไฟฟ้า (voltage)
 g คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงพลังงาน (electromechanical coupling coefficient)
 T คือ ความเครียด (stress)

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีความสามารถในการทนต่อสนามไฟฟ้าสูงโดยไม่เกิดการเสียหาย ความคงทนต่อสนามไฟฟ้าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการการรับแรงดันไฟฟ้าสูง ความคงทนต่อสนามไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถวัดได้โดยใช้สมการไฟฟ้า (Electrical Equation)

$$E = \frac{V}{d} \quad (2.9)$$

เมื่อ

- E คือ สนามไฟฟ้า (electric field)
 V คือ แรงดันไฟฟ้า (voltage)
 d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นวัสดุ (distance between plates)

การคำนวณสนามไฟฟ้ามีความสำคัญในการประเมินความสามารถของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในการทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง ช่วยให้สามารถออกแบบวัสดุและอุปกรณ์ที่มีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพในการใช้งานภายใต้แรงดันไฟฟ้าสูง นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความคงทนต่อสนามไฟฟ้ายังสามารถใช้สมการพลังงานไฟฟ้า (electric energy equation) ในการคำนวณพลังงานที่เก็บในวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 \quad (2.10)$$

เมื่อ

W คือ พลังงานที่เก็บในวัสดุ (stored energy)

ε คือ ความจุไฟฟ้า (permittivity)

E คือ สนามไฟฟ้า (electric field)

เนื่องจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเพียงแผ่นเดียวให้พลังงานไฟฟ้าได้น้อย ในการใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าส สำหรับพื้นถนนก านิตพลังงานจ านเป็นต้งองน แผ่นเพียโซอิเล็กทริกมาต่ออนุกรมหรือขนานเพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า สามารถแสดงวิธีการคำนวณทางสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

การเชื่อมต่อแบบอนุกรม

$$V_{os} = \frac{d_{33} F_m \omega n h R}{\sqrt{n h^2 + \omega^2 A^2 (\varepsilon_{33}^T)^2 R^2}} \quad (2.11)$$

$$P_{os} = \frac{d_{33}^2 F_m^2 \omega^2 n^2 h^2 R}{2 |n h^2 + \omega^2 A^2 (\varepsilon_{33}^T)^2 R^2|} \quad (2.12)$$

การเชื่อมต่อแบบขนาน

$$V_{op} = \frac{d_{33} F_m \omega n h R}{\sqrt{h^2 + \omega^2 A^2 (\varepsilon_{33}^T)^2 n^2 R^2}} \quad (2.13)$$

$$P_{op} = \frac{d_{33}^2 F_m^2 \omega^2 n^2 h^2 R}{2 |h^2 + \omega^2 A^2 (\varepsilon_{33}^T)^2 n^2 R^2|} \quad (2.14)$$

เมื่อ

V_{os} คือ แรงดันไฟฟ้าส หรับการต่อแบบอนุกรม

V_{op} คือ แรงดันไฟฟ้าส หรับการต่อแบบขนาน

P_{os} คือ ก าลังไฟฟ้าส หรับการต่อแบบอนุกรม

P_{op} คือ ก าลังไฟฟ้าส หรับการต่อแบบขนาน

d_{33} คือ ค่าคงที่ของเพียโซอิเล็กทริกโหมดสามสาม

F_m คือ ขนาดโหลดที่มากกระท า

ω คือ ขนาดความถี่ที่มากกระท า

n คือ จ านวนของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่มาต่ออนุกรมหรือขนานกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

h	คือ ความหนาของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก
A	คือ พื้นที่ของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก
ε_{33}^T	คือ ค่าสภาพยอมที่ความเค้นคงที่โหมดสามสาม
R	คือ ความต้านทานโหลด

2.2 วงจรเก็บเกี่ยวพลังงาน

2.2.1 วงจรเรียงกระแส

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสร้างพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current: AC) การแปลงพลังงานนี้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) ที่สามารถเก็บได้ จำเป็นต้องใช้วงจรเรียงกระแส ซึ่งอาจเป็นวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (half-wave rectifier) หรือแบบเต็มคลื่น (full-wave rectifier)

1. วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (half-wave rectifier) ประกอบด้วยไดโอดหนึ่งตัวที่ทำหน้าที่เรียงกระแสไฟฟ้าให้ไหลในทิศทางเดียวในช่วงครึ่งรอบของสัญญาณ AC สามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ตามสมการ

$$V_{DC} = \frac{V_{peak}}{\pi} \quad (2.15)$$

2. วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (full-wave rectifier) ประกอบด้วยไดโอดสี่ตัวในรูปแบบสะพาน ท ทำให้สามารถใช้ทั้งครึ่งบวกและครึ่งลบของสัญญาณ AC ในการแปลงเป็นสัญญาณ DC สามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ตามสมการ

$$V_{DC} = \frac{2V_{peak}}{\pi} \quad (2.16)$$

โดยที่

V_{DC} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

V_{peak} คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของสัญญาณกระแสสลับ

2.2.2 วงจรกรอง

หลังจากแปลงเป็นกระแสตรงแล้ว สัญญาณไฟฟ้าอาจยังคงมีริบเบิล (ripple) ซึ่งจำเป็นต้องกรองออกเพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงที่เรียบเนียน วงจรกรองที่ใช้กันทั่วไปประกอบด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor) หรือตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) สามารถคำนวณแรงดันริบเบิลได้จากสมการ

$$V_{ripple} = \frac{I_{load}}{f \cdot C} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

V_{ripple} คือ แรงดันไฟฟ้ารีปเปิล

I_{load} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด

f คือ ความถี่ของสัญญาณ

C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ

2.2.3 วงจรเก็บพลังงาน

พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการแปลงจะถูกเก็บในอุปกรณ์เก็บพลังงาน เช่น แบตเตอรี่หรือตัวเก็บประจุ วงจรเก็บพลังงานต้องออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเก็บและปล่อยพลังงาน โดยรายละเอียดของอุปกรณ์เก็บพลังงานมีดังนี้

1. แบตเตอรี่ (battery) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าในระยะยาว ซึ่งสามารถเก็บพลังงานได้มากและปล่อยพลังงานอย่างต่อเนื่องตามความต้องการ การเลือกแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานต้องพิจารณาความจุ ความทนทาน อายุการใช้งาน และความปลอดภัย แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion battery) เป็นตัวอย่างของแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้งานอย่างแพร่หลาย
2. ตัวเก็บประจุ (capacitor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าในระยะสั้น ซึ่งสามารถปล่อยพลังงานได้รวดเร็ว ตัวเก็บประจุมีความจุพลังงานต่ำกว่าแบตเตอรี่แต่มีความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงในช่วงเวลาสั้น ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการพลังงานอย่างรวดเร็ว เช่น การจ่ายพลังงานสำหรับการเริ่มต้นระบบหรือการรองรับการกระชากของกระแสไฟฟ้า สามารถคำนวณพลังงานที่เก็บในตัวเก็บประจุได้จากสมการ

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.18)$$

โดยที่

E คือ พลังงานที่เก็บในตัวเก็บประจุ (energy stored in the capacitor)

C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ (capacitance)

V คือ แรงดันไฟฟ้าผ่านตัวเก็บประจุ (voltage across the capacitor)

การออกแบบวงจรเก็บพลังงานที่ดีต้องสามารถเก็บพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยลดการสูญเสียพลังงานในกระบวนการเก็บและปล่อยพลังงาน การใช้ตัวเก็บประจุและแบตเตอรี่ที่มีคุณภาพสูงช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้ยาวนานและมีความเสถียร วัสดุที่มีคุณภาพสูงไม่เพียงแต่ช่วยลด

การสูญเสียพลังงานในกระบวนการประจุและดีประจุ แต่ยังช่วยเพิ่มความทนทานและอายุการใช้งานของอุปกรณ์เก็บพลังงาน ท ำให้ระบบสามารถท างานได้อย่างมีประสิทธิภาพในระยะยาว

วงจรเก็บพลังงานต้องสามารถปล่อยพลังงานได้ตามความต้องการของระบบโดยไม่มีค่าล่าช้าหรือความไม่เสถียรในการจ่ายพลังงาน การออกแบบวงจรที่มีการจัดการพลังงานอย่างเหมาะสมช่วยให้ระบบสามารถท างานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ การควบคุมการปล่อยพลังงานให้เป็นไปตามความต้องการของโหลด (load) อย่างมีประสิทธิภาพช่วยลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มความเสถียรในการท างานของระบบ ท ำให้สามารถรองรับการใช้งานในสภาวะต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ระบบการจัดการพลังงาน (energy management system) ช่วยในการควบคุมการเก็บและปล่อยพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ การใช้ตัวควบคุมแบบสมาร์ต (smart controller) และระบบการตรวจสอบ (monitoring system) ช่วยให้สามารถตรวจสอบสถานะของการเก็บพลังงานและปรับการท างานของระบบตามความต้องการได้ การตรวจสอบสถานะของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุอย่างต่อเนื่องช่วยให้สามารถคาดการณ์และป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้ ท ำให้การจัดการพลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย นอกจากนี้ ระบบการจัดการพลังงานยังช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานโดยรวมของระบบ ท ำให้การใช้พลังงานเป็นไปอย่างคุ้มค่าและยั่งยืน

2.3 ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System)

เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานทดแทนมีความไม่ต่อเนื่องและไม่สามารถคาดการณ์ถึงปริมาณแหล่งพลังงานที่นำมาผลิตไฟฟ้าอย่างชัดเจน เช่น การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตได้เฉพาะช่วงเวลาที่มียังแสงอาทิตย์ หรือการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลมจะสามารถผลิตได้เฉพาะช่วงที่มีแรงลมเท่านั้น ด้วยข้อจำกัดดังกล่าวท ำให้ระบบกักเก็บพลังงานเข้ามามีบทบาทสำคัญในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน เช่น กักเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินไว้ใช้ในกรณีที่ขาดแคลน ช่วยในการผสมผสานการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นต้น

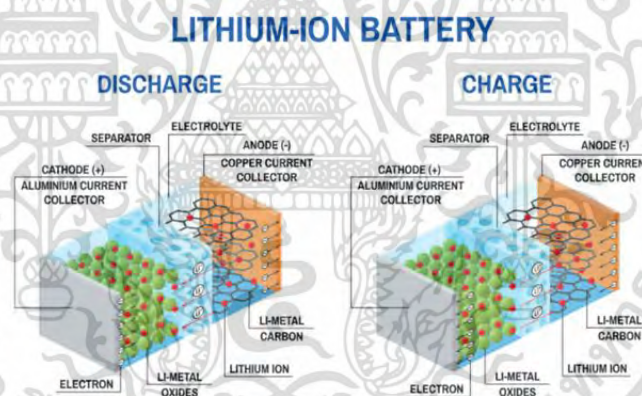
ระบบกักเก็บพลังงานจะถูกใช้จัดการกับความผันผวนของปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น ระบบกักเก็บพลังงานจะเก็บสะสมพลังงานที่ได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ในช่วงเวลากลางคืน เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถขายพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เหลือจากการใช้งานให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นในช่วงที่มีราคาไฟฟ้าสูงได้อีกด้วย

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งพลังงานทดแทน เช่น พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์และพลังงานลมจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสิ่งแวดล้อม เช่น ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และความเร็วลม เป็นต้น ซึ่งมีความไม่แน่นอนสูง ส่งผลท ำให้ติดก ำสไฟฟ้ากระเพื่อมและจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ไม่สม่ำเสมอ ท ำให้การเชื่อมต่อ

พลังงานที่ผลิตได้เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ ง่าย การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ใช้แก้ปัญหาดังกล่าวและช่วยสร้างเสถียรภาพให้กับระบบได้

2.3.1 แบตเตอรี่ลิเทียม

แบตเตอรี่ลิเทียมมีความหนาแน่นของพลังงาน ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพสูงกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรด แต่มีราคาค่อนข้างสูง แบตเตอรี่ลิเทียมใช้หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีเช่นเดียวกับแบตเตอรี่ตะกั่วกรด มีขั้วไฟฟ้าบวกคือ โลหะที่มีส่วนประกอบของลิเทียมไอออนออกไซด์ เช่น LiCoO_2 , LiMO_2 , LiNiO_2 เป็นต้น และมีขั้วไฟฟ้าลบเป็นแผ่นกราไฟท์ที่ซ้อนกันอยู่เป็นชั้น ๆ (layered graphitic carbon) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ เกลือของลิเทียม (LiPF_6) ละลายในสารอินทรีย์คาร์บอนในขั้นตอนการกักเก็บพลังงาน อะตอมของลิเทียมที่ขั้วไฟฟ้าบวกจะกลายเป็นไอออนและเคลื่อนย้ายผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วไฟฟ้าลบ ซึ่งเป็นกราไฟท์แล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ผ่านวงจรภายนอกแล้วไปเกาะอยู่ระหว่างชั้นของแกรไฟท์ในรูปของอะตอมลิเทียม ส่วนในขั้นตอนของการปล่อยพลังงาน ปฏิกิริยาจะเกิดในทิศทางตรงข้าม แสดงดังรูปที่ 2.3 และ คุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียมสรุปไว้ดังตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียม

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียม

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ความหนาแน่นทางพลังงาน (energy density)	150-250 Wh/kg
ความหนาแน่นทางกำลังไฟฟ้า (power density)	1,800 W/kg
อัตราการคายประจุต่อวัน (self-discharge per day)	0.1-0.3 %
อายุการใช้งาน (life time)	10.5-12.5 ปี
จำนวนรอบของการทำงาน (cycle life)	1,200-3,200 รอบ
ประสิทธิภาพในแต่ละรอบการทำงาน (cycle efficiency)	80%-90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 อัลตราคาปาซิเตอร์

เนื่องจากตัวเก็บประจุแบบธรรมดามีความหนาแน่นของพลังงานต่ำ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาตัวเก็บประจุแบบอัลตราคาปาซิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.4 ที่เก็บประจุไฟฟ้าเคมีบนพื้นผิวของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า ทำให้สามารถเก็บประจุได้มากกว่าและมีความหนาแน่นพลังงานสูงกว่าตัวเก็บประจุแบบธรรมดาประมาณ 10-100 เท่า อัลตราคาปาซิเตอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากพลังงานทดแทน เช่น พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานลม เป็นต้น และมีการนำไปใช้ร่วมกับแบตเตอรี่ลิเทียมในรถยนต์ไฮบริดจ์ เพื่อให้สามารถกักเก็บพลังงานได้อย่างรวดเร็วในช่วงที่รถเบรก คุณสมบัติของอัลตราคาปาซิเตอร์ แสดงไว้ดังตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.4 อัลตราคาปาซิเตอร์

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของอัลตราคาปาซิเตอร์

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ความหนาแน่นทางพลังงาน (energy density)	2.5-15 Wh/kg
ความหนาแน่นทางกักเก็บไฟฟ้า (power density)	1,000-2,000 W/kg
อัตราการคายประจุต่อวัน (self-discharge per day)	20-40 %
อายุการใช้งาน (life time)	มากกว่า 20 ปี
จำนวนรอบของการใช้งาน (cycle life)	มากกว่า 100,000 รอบ
ประสิทธิภาพในแต่ละรอบการชาร์จ (cycle efficiency)	มากกว่า 93%

อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีการพัฒนาอัลตราคาปาซิเตอร์ในหลายด้าน เช่น เพิ่มปริมาณความจุไฟฟ้าในการสะสมพลังงาน เพิ่มกำลังงานในการอัดและคายประจุ ลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มพิกัดแรงดันไฟฟ้าใช้งาน สำหรับการใช้นาระบบกักเก็บพลังงานจาก แบตเตอรี่ลิเทียมและอัลตราคาปาซิเตอร์ จำเป็นต้องพิจารณาถึงความคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกายภาพที่เหมาะสมในการใช้งาน สามารถสรุปมีข้อดีและข้อจำกัดของระบบกักเก็บพลังงานในแต่ละชนิด พิจารณาดังตารางที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อจ ัดของระบบกักเก็บพลังงานชนิดต่าง ๆ

ชนิดอุปกรณ์ กักเก็บพลังงาน	ข้อดี	ข้อจำกัด
แบตเตอรี่ ลิเทียม	มีความหนาแน่นทางพลังงานสูง มีการ ตอบสนองที่รวดเร็ว (ระดับมิลลิวินาที) มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา มี ประสิทธิภาพสูงและมีอายุการใช้งาน ยาวนาน	มีราคาแพง ต้องการระบบควบคุมที่ดี เนื่องจากบรรจุภัณฑ์และการระบาย ความร้อน ำได้ยากขึ้นอยู่กับลักษณะ ของเซลล์ จึงไม่มีความปลอดภัยในแง่ ของความร้อน ไม่สามารถคายประจุ ไฟฟ้าได้ในระดับลึก เนื่องจากจะท ำให้ อายุการใช้งานสั้น
อัลตรา คาปาซิเตอร์	-สามารถประจุและคายประจุไฟฟ้าได้ อย่างรวดเร็วโดยไม่ส่งผลกระทบต่ออายุ การใช้งาน จึงเหมาะสม ำหรับการใช้งานที่ ต้องการความเร็วในการตอบสนอง เช่น การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า จาก จัดการความผันผวนทางก าลังไฟฟ้าของ พลังงานทดแทน เป็นต้น -มีอัตราการคายประจุไฟฟ้าสูง -มีอายุการใช้งานยาวนาน	มีความหนาแน่นทางพลังงานต่ำ เมื่อ เทียบกับแบตเตอรี่และราคาสูง

2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เป็นเทคนิคเชิงตัวเลขที่ใช้ในการประมาณการแก้ปัญหาทางฟิสิกส์และวิศวกรรม เช่น การวิเคราะห์แรงทางกล การถ่ายเทความร้อน การไหลของของไหล และปัญหาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสนามทางวิศวกรรม FEM ใช้ในการแบ่งปัญหาที่ซับซ้อนออกเป็นส่วนย่อย ๆ ที่เรียกว่าองค์ประกอบไฟไนต์ (finite elements) ซึ่งสามารถแก้ไขได้ง่ายกว่า โดยมีขั้นตอนในการค านวณหลัก ๆ ดังนี้

1. การแบ่งโดเมน (discretization of domain) โดยการแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นองค์ประกอบย่อยหลายส่วน (elements) โดยใช้จุดที่เรียกว่าโหนด (nodes) ในการเชื่อมต่อองค์ประกอบเหล่านี้ องค์ประกอบแต่ละชิ้นจะมีสมการเชิงตัวเลขที่สัมพันธ์กับปัญหาที่ต้องการแก้ไข เช่น การกระจายแรง การเปลี่ยนรูปทรง หรือการถ่ายเทประจุไฟฟ้า

2. การกำหนดฟังก์ชันประมาณ (approximation functions) โดยการใช้ฟังก์ชันประมาณ (shape functions) เพื่อบรรยายลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรภายในองค์ประกอบแต่ละชิ้น ฟังก์ชันประมาณนี้ถูกกำหนดโดยโหนดและค่าที่กหนดไว้ที่โหนด
3. การสร้างสมการขององค์ประกอบ (element equations) โดยใช้กฎของฟิสิกส์ เช่น กฎของนิวตันสำหรับแรงทางกล หรือสมการการถ่ายเทความร้อน สมการเหล่านี้ถูกเขียนในรูปของเมทริกซ์ที่สัมพันธ์กับตัวแปรที่ไม่รู้ค่า (unknown variables) ที่โหนด
4. การประกอบสมการของระบบ (assembly of system equations) เพื่อสร้างสมการของระบบทั้งหมด สมการของระบบจะเป็นเมทริกซ์ขนาดใหญ่ที่ต้องแก้ไขเพื่อหาค่าของตัวแปรที่ไม่รู้ค่า
5. การแก้สมการของระบบ (solution of system equations) โดยใช้วิธีการเชิงตัวเลข เช่น การทวิคูณเพลิกซ์ (Gaussian Elimination) หรือวิธีการคอนจูเกตเกรเดียนต์ (Conjugate Gradient Method) ในการแก้สมการของระบบ ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าของตัวแปรที่ไม่รู้ค่าที่โหนด ซึ่งสามารถใช้ในการประมาณผลลัพธ์ในโดเมนทั้งหมด

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้สำหรับการคำนวณผลตอบสนองเมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงกระทำทางกล เป็นรูปแบบของสมการเมทริกซ์ที่ใช้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการสั่นสะเทือนแบบคัปปลิงตัว (coupled vibration analysis) สมการเมทริกซ์นี้ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุและโครงสร้างที่มีการตอบสนองต่อการกระทำทางกลและไฟฟ้าในเวลาเดียวกัน การวิเคราะห์แบบนี้เป็นสิ่งสำคัญในหลายด้านของวิศวกรรม เช่น การออกแบบวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในเซนเซอร์ แอคทูเอเตอร์ และระบบการเก็บเกี่ยวพลังงาน สมการทั่วไปของการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบคัปปลิงตัวสามารถเขียนได้ในรูปเมทริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{UU} & K_{UV} \\ K_{UV}^T & -K_{VV} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ V \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{UU} & 0 \\ 0 & -C_{VV} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \dot{V} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{UU} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{V} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix} \quad (2.19)$$

เมื่อ

- K_{UU} คือ เมทริกซ์ความแข็งแรงของโครงสร้าง (structural stiffness matrix)
 K_{VV} คือ เมทริกซ์ค่าความจุไฟฟ้า (dielectric permittivity matrix)
 K_{UV} คือ เมทริกซ์การเชื่อมโยงเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric coupling matrix)
 C_{UU} คือ เมทริกซ์การหน่วงของโครงสร้าง (structural damping matrix)
 C_{VV} คือ เมทริกซ์การสูญเสียทางไฟฟ้า (dielectric dissipation matrix)
 M_{UU} คือ เวกเตอร์แรงภายนอก (external force vectors)
 F คือ แรงจากภายนอก (force)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Q คือ ประจุไฟฟ้า (charge)
 U คือ การกระจัด (displacements)
 V คือ แรงดันไฟฟ้า (voltage)

2.4.1 เมทริกซ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Matrix)

เมทริกซ์เพียโซอิเล็กทริก $[e]$ เป็นส่วนสคัญในการเชื่อมโยงสนามไฟฟ้าและสนามความเครียด (stress field) โดยทั่วไปแล้ว เมทริกซ์นี้ใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ตอบสนองต่อแรงกลและไฟฟ้า การถอดเมทริกซ์เพียโซอิเล็กทริกสามารถทำได้สองรูปแบบคือ มาตรฐาน IEEE และรูปแบบที่ใช้ในซอฟต์แวร์ ANSYS โดยในมาตรฐาน IEEE เมทริกซ์เพียโซอิเล็กทริกจะมีการเรียงลำดับองค์ประกอบตามทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามความเครียดดังนี้

$$IEEE[e] = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} \\ e_{51} & e_{52} & e_{53} \\ e_{61} & e_{62} & e_{63} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

ในการใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS เมทริกซ์เพียโซอิเล็กทริก $[e]$ จะมีการเรียงลำดับองค์ประกอบที่แตกต่างจากมาตรฐาน IEEE เนื่องจากการจัดลำดับพิเศษของเวกเตอร์ความเครียด (stress vector components) ดังนี้

$$ANSYS[e] = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \\ e_{61} & e_{62} & e_{63} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} \\ e_{51} & e_{52} & e_{53} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

โดยที่

- x, y, z แสดงถึงทิศทางของสนามไฟฟ้า
 yz, xz, xy แสดงถึงการบิดเบือนหรือการเปลี่ยนแปลงในทิศทางดังกล่าว

เมทริกซ์เพียโซอิเล็กทริก $[e]$ มีความสำคัญในการวิเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากเป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามความเครียด ฟังก์ชันการทำงานของมันสามารถใช้ในการคำนวณการตอบสนองของวัสดุภายใต้แรงกระทำต่าง ๆ ทำให้สามารถคาดการณ์และออกแบบวัสดุและโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ และในส่วนของสมการแสดงในรูปแบบเมทริกซ์ที่เชื่อมโยงเวกเตอร์ความเครียด $\{T\}$ กับเวกเตอร์การยืดตัว $\{S\}$ และเวกเตอร์สนามไฟฟ้า $\{E\}$

สามารถเขียนได้โดยใช้การย่อแบบเมทริกซ์ สำหรับเทนเซอร์ยืดหยุ่น ในสมการนี้ เมทริกซ์เพียโซอิเล็กทริก [e] แทนที่แสดงผลของสนามไฟฟ้าต่อการยืดตัวของวัสดุ ในขณะที่เมทริกซ์ยืดหยุ่น [c] แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการยืดตัวของวัสดุ โดยในการใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS จะต้องมีการแปลงสมการเมทริกซ์จากมาตรฐาน IEEE และใช้สมการดังนี้ในการคำนวณ

$$\begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{16} & c_{14} & c_{15} \\ & c_{22} & c_{23} & c_{26} & c_{24} & c_{25} \\ & & c_{33} & c_{36} & c_{34} & c_{35} \\ & & & c_{66} & c_{46} & c_{56} \\ & & & & c_{44} & c_{54} \\ & & & & & c_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \\ e_{61} & e_{62} & e_{63} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} \\ e_{51} & e_{52} & e_{53} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (2.22)$$

โดยที่

$\{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6\}^T$ คือ เวกเตอร์ความเครียดที่เกิดขึ้นในระบบ

$\{S_1 S_2 S_3 S_4 S_5 S_6\}^T$ คือ เวกเตอร์การยืดตัวในแต่ละทิศทาง

$\{E_1 E_2 E_3\}^T$ คือ เวกเตอร์สนามไฟฟ้าในแต่ละทิศทาง

[c] คือ เมทริกซ์ยืดหยุ่น (elastic matrix)

[e] คือ เมทริกซ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric matrix)

การวิเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนซึ่งต้องใช้เครื่องมือทางคณิตศาสตร์และการคำนวณขั้นสูง เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติพิเศษในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าและกลับกันได้ การใช้เมทริกซ์แบบอย่างง่าย (simplified matrix) ในการคำนวณการตอบสนองของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง ช่วยลดความซับซ้อนของสมการและการประมวลผลข้อมูล สามารถทำการวิเคราะห์และออกแบบวัสดุได้รวดเร็วและแม่นยำมากยิ่งขึ้นการปรับใช้เมทริกซ์แบบอย่างง่าย ยังช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในการใช้งานและลดการใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ ทำให้การพัฒนาและปรับปรุงผลิตภัณฑ์เป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีประสิทธิภาพมากขึ้น การวิเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกในทิศทางการโพลาไรซ์ที่ต่างกัน (x-polarized, y-polarized, z-polarized) มีการใช้เมทริกซ์เพียโซอิเล็กทริกและเมทริกซ์ค่าความจุไฟฟ้า (permittivity constants) ที่ต่างกัน ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกดังนี้ที่มีทิศทางการโพลาไรซ์ในแนวความหนาหรือ z-polarized เมทริกซ์เพียโซอิเล็กทริกและเมทริกซ์ค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยจึงมีค่าตามสมการต่อไปนี้

$$[e]_{z\text{-polarized}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_{15} & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -5.4 \\ 0 & 0 & -5.4 \\ 0 & 0 & 15.8 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12.3 & 0 \\ 12.3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{C}{m^2} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[\varepsilon]_{z\text{-polarized}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 \\ & K_{11} & 0 \\ & & K_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 916 & 0 & 0 \\ & 916 & 0 \\ & & 830 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางกลและการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม ANSYS มีข้อดีหลายประการที่ทำให้เป็นเครื่องมือที่น่าเชื่อถือสำหรับการวิเคราะห์วัสดุและโครงสร้าง ประการแรกคือความแม่นยำสูงในการจำลองและคำนวณผลตอบสนองทางกลและไฟฟ้า ทำให้สามารถทำนายพฤติกรรมของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกภายใต้แรงกระทำต่าง ๆ ได้อย่างละเอียด ประการที่สองคือความสามารถในการสร้างแบบจำลองสามมิติที่ละเอียดซับซ้อน ซึ่งช่วยให้เห็นภาพรวมของปัญหาและแก้ไขได้อย่างครบถ้วน ประการที่สามคือการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลองจริง โดยสามารถปรับเปลี่ยนแบบจำลองและทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่หลากหลายได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ ANSYS ยังมีฐานข้อมูลวัสดุและโมเดลทางกายภาพที่ครบถ้วนและสามารถปรับแต่งได้ตามความต้องการ ทำให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้อ้างอิงในการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งยังสามารถใช้ในการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย ผลการจำลองและวิเคราะห์จะนำเสนอในเนื้อหาส่วนถัดไป

บทที่ 3

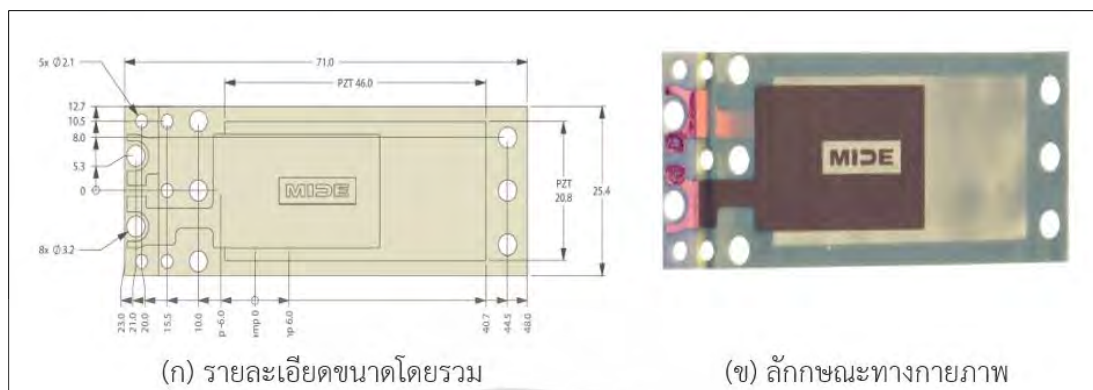
คุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่มีความสามารถพิเศษในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าและในทางกลับกัน ซึ่งหมายความว่าเมื่อวัสดุเหล่านี้ได้รับแรงกดหรือความเค้นจากภายนอก จะสามารถผลิตไฟฟ้าได้ คุณสมบัตินี้ทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีความน่าสนใจอย่างมากในการประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ตัวกำเนิดพลังงาน และองค์ประกอบในระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการการตอบสนองที่รวดเร็วและการบำรุงรักษาที่ต่ำ ทางด้านไฟฟ้า วัสดุเหล่านี้สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนรูปร่างกายภาพเกิดขึ้น และในแง่ของคุณสมบัติทางกล วัสดุเพียโซอิเล็กทริกยังมีความแข็งแรงและทนทานต่อแรงกดหรือการกระแทกที่อาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างการใช้งานปกติ ความสามารถเหล่านี้ทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการรวบรวมพลังงานจากสภาพแวดล้อมและการปรับปรุงความเป็นไปได้ของอุปกรณ์พกพาและวิศวกรรมพลังงานทดแทนที่ยั่งยืน

3.1 ระบบพื้นถนนกำเนิดพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก

พลังงานไฟฟ้าจากพื้นถนนกำเนิดพลังงานเกิดจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงกดทับทางกลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนท้องถนน เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพทางพลังงาน พื้นถนนกำเนิดพลังงานจำเป็นต้องถูกออกแบบให้มีขนาดที่เหมาะสม มีความสามารถถ่ายโอนความเค้นไปยังวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้ รวมถึงความทนทานสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงด้วย ในส่วนนี้เสนอการออกแบบพื้นถนนกำเนิดพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกสำหรับเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานให้กับระบบแสงสว่างไฟถนน และเสนอการจำลองเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของการติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในพื้นที่ถนนก าเนิดพลังงานด้วยโปรแกรม ANSYS

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกสำเร็จรูป PPA-2011 มีขนาดความยาว 71 มิลลิเมตร กว้าง 25.4 มิลลิเมตร มีความหนา 0.76 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 3.1 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกสำเร็จรูป PPA-2011 ประกอบไปด้วยแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่น ขนาดยาว 46 มิลลิเมตร กว้าง 20.8 มิลลิเมตร วางประกบกันขึ้นด้วยแผ่นทองแดง (copper) และอีพ็อกซี (FR4) โดยแสดงรายละเอียดลำดับชั้นในตารางที่ 3.1 อ้างอิงจากข้อมูลจากภาพของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกชนิดนี้พบว่าสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด 34 มิลลิวัตต์ เมื่อแผ่นเพียโซอิเล็กทริกถูกทำให้โค้งงอ โดยมีระยะพิคทูพิกเท่ากับ 18.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก PPA-201

พื้นถนนกานิตพลังงานควรถูกออกแบบและพัฒนาให้เหมาะสมกับลักษณะการจราจรบนถนนเพื่อ
 ดึงประสิทธิภาพสูงสุดของการผลิตพลังงาน พื้นถนนกานิตพลังงานถูกออกแบบโดยมีคุณสมบัติทาง
 เทคนิคคือ มีความสามารถในการสะสมความเค้นบนพื้นผิวถนนสูงสุด ความแข็งแรงของโครงสร้าง ฉนวน
 อุณหภูมิ การกันน้ำ ความทนทานในการใช้งานจริง การจัดวางองค์ประกอบของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกใน
 พื้นกานิตพลังงานให้เหมาะสม และความสะดวกในการซ่อมบำรุงรักษา รวมถึงการกำหนดขนาดของพื้น
 ถนนกานิตพลังงานและตำแหน่งการติดตั้งพื้นกานิตพลังงานที่เหมาะสม

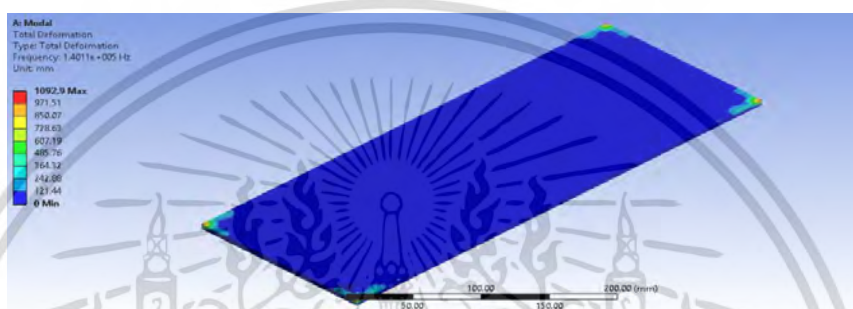
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก PPA-2011

ชั้นวัสดุ	ความหนา (mm)
อีพ็อกซี (FR4)	0.08
แผ่นทองแดง (Copper)	0.03
เพียโซอิเล็กทริก	0.15
แผ่นทองแดง (Copper)	0.03
อีพ็อกซี (FR4)	0.08
แผ่นทองแดง (Copper)	0.03
เพียโซอิเล็กทริก	0.15
แผ่นทองแดง (Copper)	0.03
อีพ็อกซี (FR4)	0.08
รวม	0.76

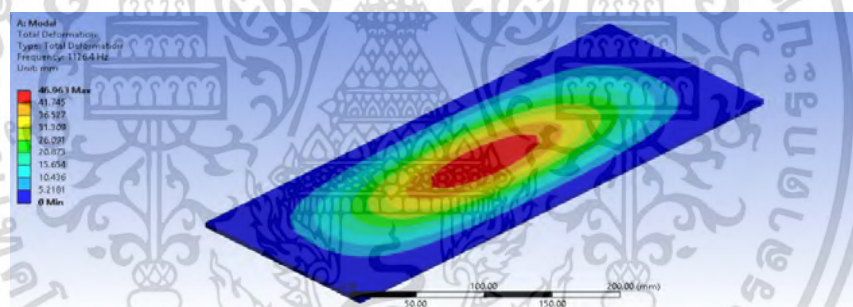
ผลลัพธ์จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ANSYS ส าหรับศึกษาและทดสอบความเป็นไปได้
 ของการติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในพื้นที่ถนนกานิตพลังงาน โดยแบ่งเป็น 2 กรณีศึกษา ได้แก่ การหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

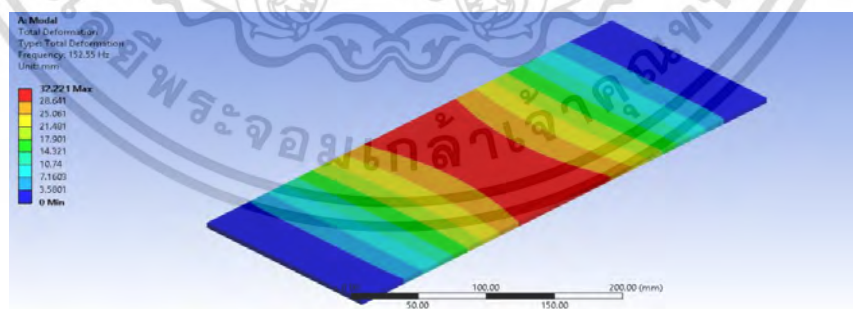
ลักษณะการติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่เหมาะสม และการหาตำแหน่งของการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่เหมาะสม โดยผลจากการจำลองจะถูกนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบพื้นถนนกานิตพลังงาน เพื่อให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด ผลลัพธ์ค่าการกระจัดและค่าความถี่ธรรมชาติของการแกว่งตัวแบบอิสระของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกภายใต้แรงกระทำทางพื้นที่ป้อนให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในลักษณะการติดตั้งแตกต่างกัน ได้แก่ 1. แบบยึดที่ส่วนฐาน 2. แบบยึดที่ขอบส่วนฐาน 3. แบบยึดปลายทั้งสองฝั่ง และ 4. แบบยึดแบบคานยื่น แสดงดังรูปที่ 3.2



(ก) ติดตั้งแบบยึดที่ส่วนฐาน

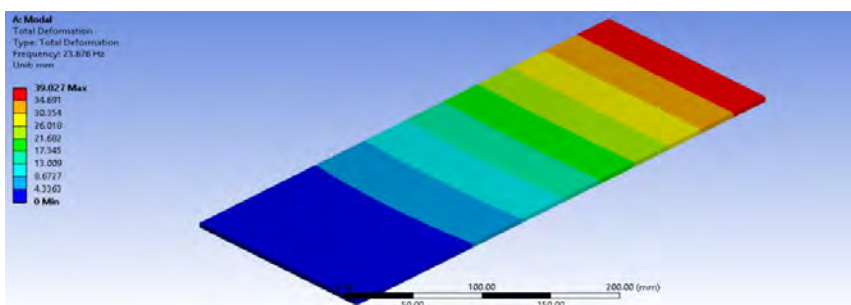


(ข) ติดตั้งแบบยึดที่ขอบส่วนล่าง



(ค) ติดตั้งแบบยึดปลายทั้งสองฝั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

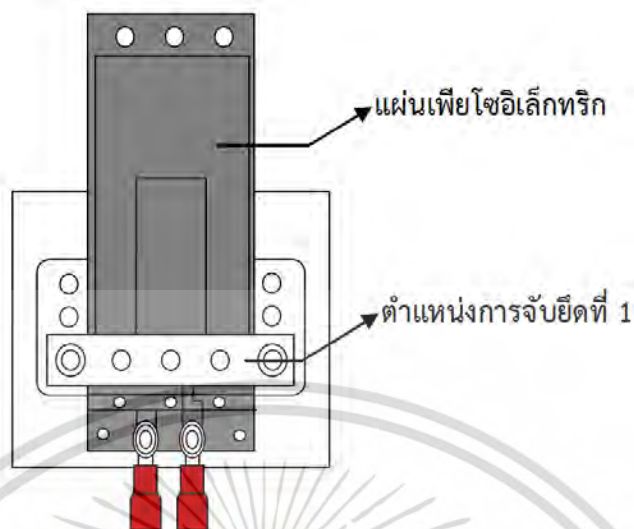


(ง) ติดตั้งแบบยึดแบบคานยื่น

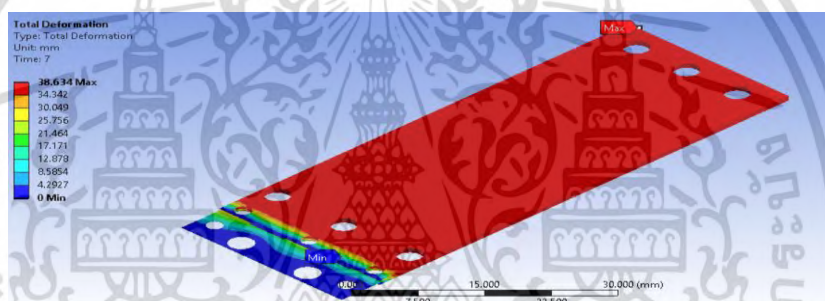
รูปที่ 3.2 ค่าการกระจัดและความถี่ธรรมชาติจากการติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในรูปแบบต่าง ๆ

เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับช่วงการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก หากสามารถออกแบบให้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกมีค่าความถี่ธรรมชาติลดลงได้ คือใกล้เคียงกับค่าความถี่การเคลื่อนที่ของยานพาหนะซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนความถี่ต่ำนั้น แผ่นเพียโซอิเล็กทริกจะสามารถสั่นพ้องและทาแอมพลิจูดการสั่นอย่างอิสระได้มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้พลังงานที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 3.2 พบว่าการติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในลักษณะแตกต่างกันส่งผลให้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกมีค่าการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติแตกต่างกันด้วย โดยการติดตั้งแบบยึดที่ส่วนฐาน แบบยึดที่ขอบส่วนฐาน แบบยึดปลายทั้งสองฝั่งและแบบยึดแบบคานยื่น มีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 140,000 Hz, 1,126.4 Hz, 152.55 Hz, and 23.68 Hz ตามลำดับ ซึ่งผลลัพธ์จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งแบบยึดแบบคานยื่นสามารถทำให้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกมีค่าความถี่ธรรมชาติที่ต่ำที่สุด ดังนั้นการติดตั้งในลักษณะแบบยึดแบบคานยื่นจึงถูกนำมาพิจารณาออกแบบพื้นถนนกานิตพลังงาน

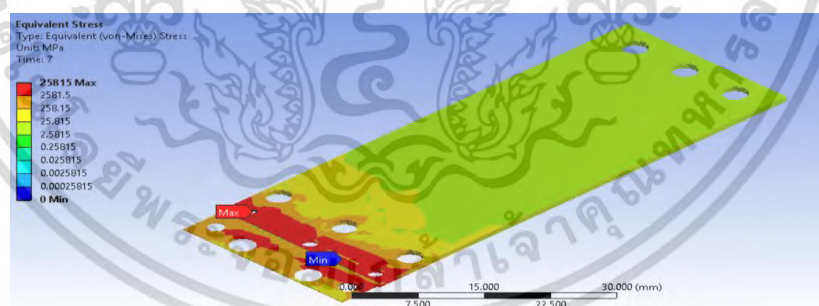
ผลจากการจำลองการเปลี่ยนรูปและค่าความเค้นของการวางตำแหน่งการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ต่างกันทั้งหมด 3 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 3.3 รูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 สำหรับการวางตำแหน่งของการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งที่ 1 (ในสุด) ตำแหน่งที่ 2 (ตรงกลาง) และตำแหน่งที่ 3 (ด้านนอก) ตามลำดับ ในการศึกษาผลจากการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกค่าแรงทางกลขนาด 300 นิวตัน ถูกนำมาใช้ในการทดสอบทดสอบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่มีลักษณะการจับยึดแบบคานยื่น



(ก) ตำแหน่งการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งที่ 1



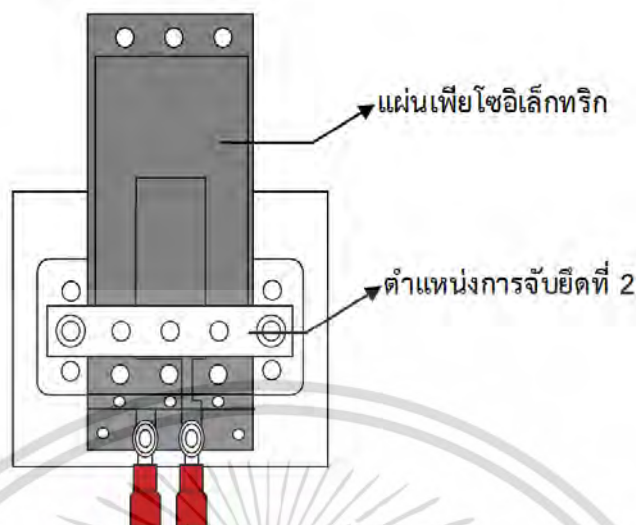
(ข) การเปลี่ยนรูปเมื่อทำการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งที่ 1



(ค) ความเค้นเมื่อทำการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งที่ 1

รูปที่ 3.3 ผลการจำลองทางกลของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งจับยึดที่ 1

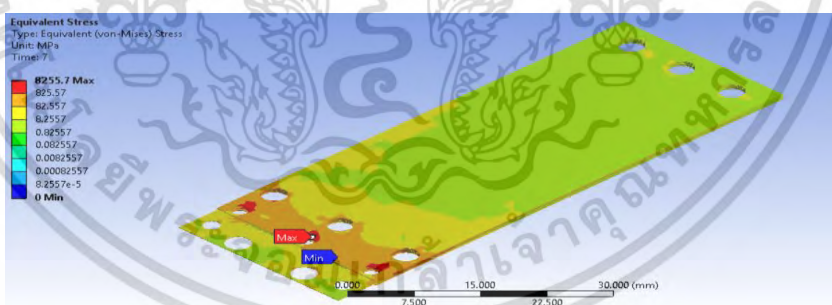
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ตำแหน่งการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งที่ 2



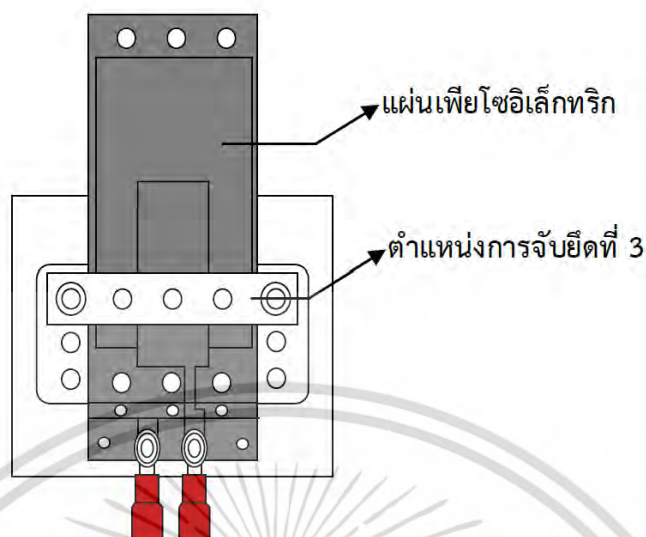
(ข) การเปลี่ยนรูปเมื่อทำการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งที่ 2



(ค) ความเค้นเมื่อทำการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งที่ 2

รูปที่ 3.4 ผลการจำลองทางกลของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งจับยึดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ตำแหน่งการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งที่ 3



(ข) การเปลี่ยนรูปเมื่อทำการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งที่ 3



(ค) ความเค้นเมื่อทำการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งที่ 3

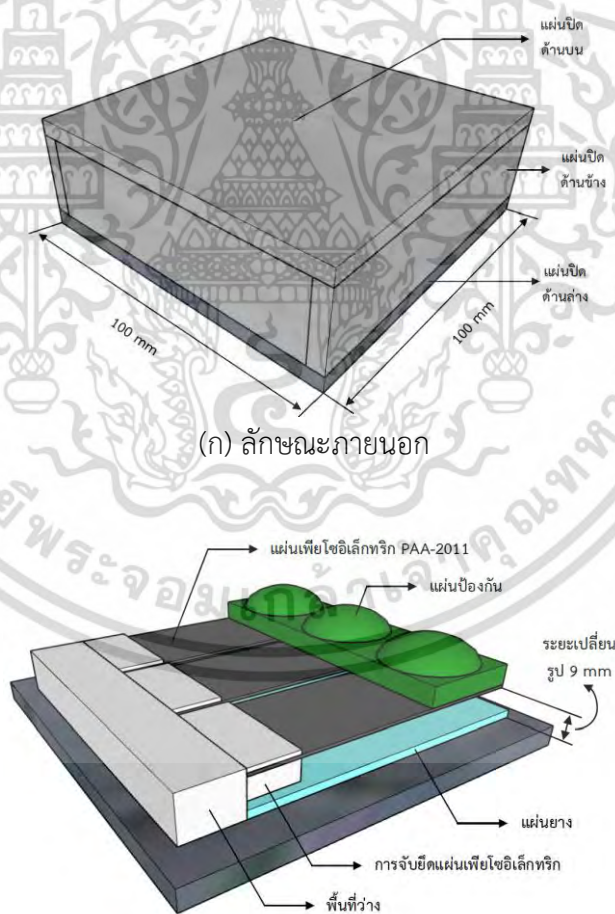
รูปที่ 3.5 ผลการจำลองทางกลของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งจับยึดที่ 3

ผลจากการจำลองแสดงให้เห็นว่าการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งที่ 1 มีการเปลี่ยนรูปและมีค่าความเค้นสูงสุด ส่งผลให้การจับยึดในรูปแบบนี้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 3 ที่สภาวะการทำงานแบบเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งที่ 1 จำเป็นต้องพิจารณาถึงระยะปลอดภัยของการใช้งานแผ่นเพียโซอิเล็กทริกด้วย เนื่องจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาใช้งานมีคุณสมบัติเป็นชนิดเซรามิค มีความเปราะบางและแตกง่าย เพราะฉะนั้นในการน ไปติดตั้งใช้งานในพื้นที่ถนนกานิตพลังงานควรออกแบบให้มีระยะการเปลี่ยนรูปที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงปัจจัยประสิทธิภาพทางพลังงานและข้อจำกัดของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกด้วย

ผลจากการศึกษา แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งแบบยึดแบบคานยื่นมีความเหมาะสมสำหรับพื้นถนนกานิตพลังงาน และการจับยึดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ตำแหน่งด้านนอกสุดจะทำให้ค่าการเปลี่ยนรูปและค่าความเค้นสูงสุด ดังนั้นการออกแบบพื้นถนนกานิตพลังงานจึงมีรูปแบบการติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบพื้นถนนกานิตพลังงาน โดยนำเสนอรูปแบบการออกแบบพื้นถนนกานิตพลังงานสำหรับการขนส่งแบบเบามีขนาดความกว้าง 100 มิลลิเมตร และความยาว 100 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดพื้นถนนกานิตพลังงานที่มีขนาดเหมาะสมที่สุด แสดงโมเดลพื้นถนนกานิตพลังงานดังรูปที่ 3.6



(ก) ลักษณะภายนอก

(ข) องค์ประกอบภายใน

รูปที่ 3.6 พื้นถนนกานิตพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.6 พื้นถนนกานิตพลังงานที่นําสอบประกอบด้วยแผ่นเพียโซอิเล็กทริกสำเร็จรูป PAA-2011 จำนวน 3 แผ่น แผ่นปิดด้านบน แผ่นปิดด้านข้าง แผ่นปิดด้านล่าง แผ่นป้องกัน พื้นที่ว่างและแผ่นยาง เนื่องจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเมื่อมีระยะโค้งงอ (การเปลี่ยนรูป) แบบพิกทูปิกเท่ากับ 18.5 มิลลิเมตร ดังนั้นเมื่อนำแผ่นเพียโซอิเล็กทริกมาติดตั้งแบบยึดแบบคานยื่นจึงกำหนดให้มีระยะปลอดภัยของการเปลี่ยนรูปเท่ากับ 9 มิลลิเมตร เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่เกิดกับแผ่นเพียโซอิเล็กทริก แผ่นปิดด้านบนและด้านข้างทำจากแผ่นอะลูมิเนียม มีค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่น (Elastic Modulus) เท่ากับ 71 GPa ค่าความต้านแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับ 460 MPa และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.78 g/cm^3 ในขณะที่แผ่นปิดด้านล่างทำจากแผ่นเหล็ก มีค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่นเท่ากับ 203 GPa ค่าความต้านแรงดึง เท่ากับ 415 MPa และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 7.85 g/cm^3 แผ่นป้องกันทำหน้าที่ส่งผ่านแรงทางกลจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะไปยังด้านบนของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกและช่วยป้องกันความเสียหายของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก แผ่นป้องกันที่เลือกใช้มีลักษณะทรงกลม มีคุณสมบัติความยืดหยุ่น แข็งแรง ฉนวนทางไฟฟ้าและทนความร้อน ดังนั้นวัสดุโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) ที่มีค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่นเท่ากับ 1.6 GPa ค่าความต้านแรงดึง 90 MPa ค่าความทนทานอุณหภูมิ 120°C และค่าความต้านทานทางปริมาตรเท่ากับ $10^{15} \Omega/\text{cm}$

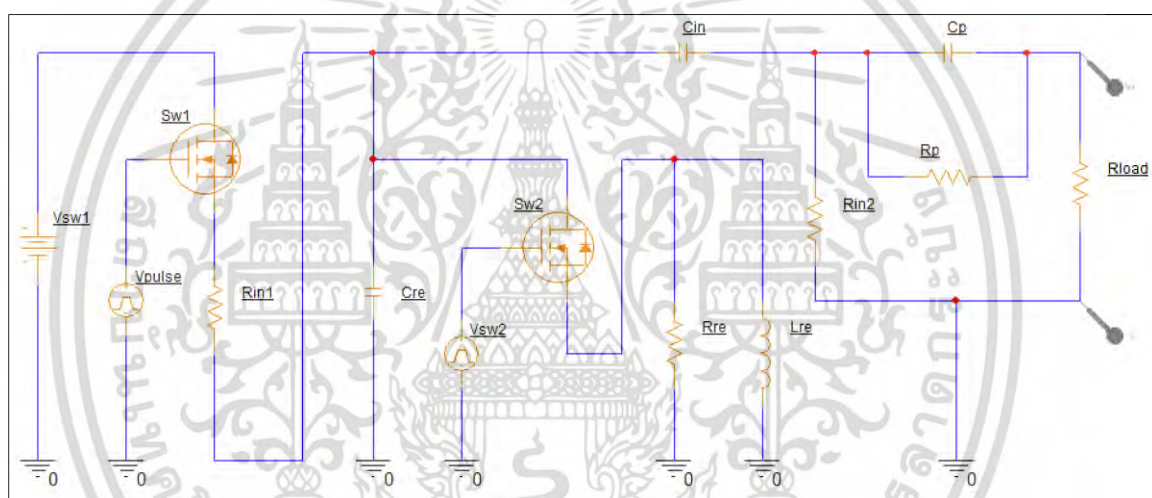
3.2 การศึกษาค่าพารามิเตอร์

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

เนื่องจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเกี่ยวเนื่องกันระหว่างคุณสมบัติทางกลและไฟฟ้า (electromechanical coupling properties) ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ระบุในเอกสารข้อมูล (datasheet) จะมีทั้งค่าพารามิเตอร์ทางกลและทางไฟฟ้ารวมอยู่ด้วยกันส่งผลให้การวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าเป็นไปโดยยาก การแปลงค่าพารามิเตอร์ทางกลเป็นพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าจึงเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญเพื่อให้โปรแกรม OrCAD-Pspice สามารถคำนวณผลตอบสนองทางไฟฟ้าได้

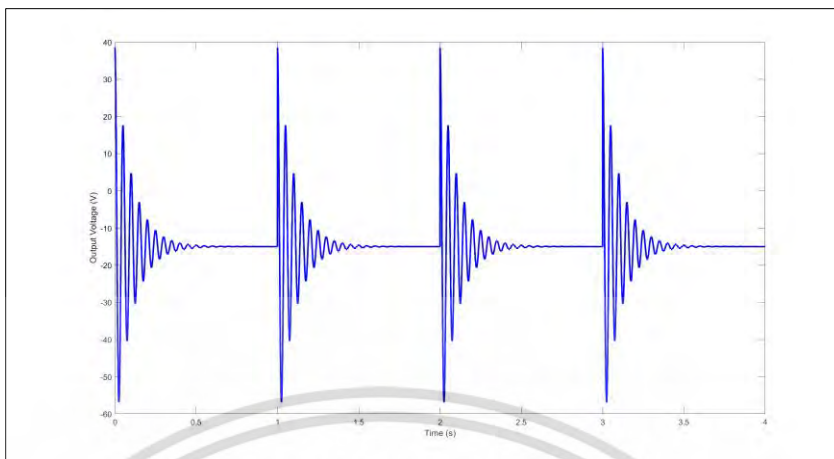
โดยทั่วไปการสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะทำการจำลองสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าเมื่อเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงกระทำทางกลหรือความถี่กระตุ้น (excitation frequency) ตรงกันกับความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของวัสดุ กล่าวคือเป็นแบบจำลองการ

ทางานความถี่สูง (high frequency model) ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นการที่จะให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกซึ่งมีความถี่ธรรมชาติที่สูงสั่นในสภาวะสั่นพ้อง (resonance vibration) จำเป็นต้องใช้เครื่องสั่น (shaker) ที่สามารถควบคุมความเร่งและแอมพลิจูดการสั่นเพื่อให้แรงทางกลในลักษณะการสั่นที่มีความถี่สูงและคงที่กับเพียโซอิเล็กทริก กระแสและแรงดันไฟฟ้าจะออกมาในลักษณะของสัญญาณไซน์ (sinusoidal signal) ซึ่งไม่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การนำพลังงานจากการเดินซึ่งเป็นการสั่นสะท้อนความถี่ต่ำมาใช้งาน รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกของเพียโซอิเล็กทริกจึงมีความผิดเพี้ยนจากสัญญาณไซน์ไป ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและออกแบบแบบจำลองทางไฟฟ้าให้สอดคล้องกับการทางานความถี่ต่ำและเปรียบเทียบกับสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงด้วยออสซิลโลสโคป (oscilloscope) โดยแบบจำลองทางไฟฟ้าเมื่อทำการแปลงค่าพารามิเตอร์เป็นพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าทั้งหมด แสดงไว้ดังรูปที่ 3.7

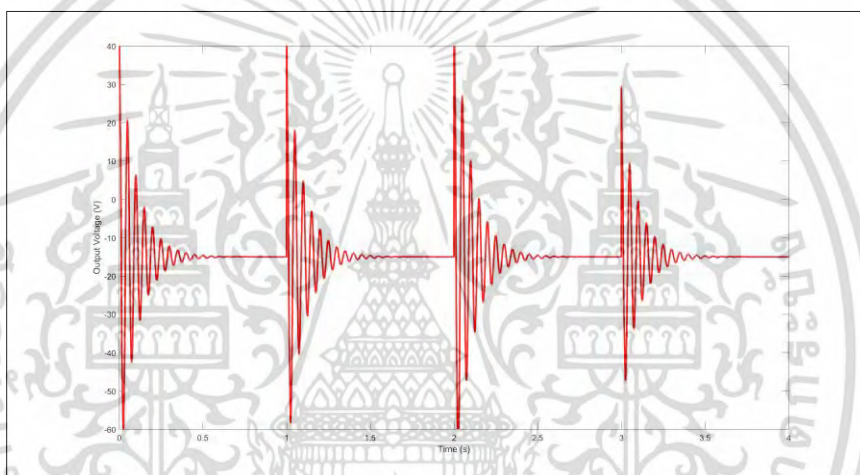


รูปที่ 3.7 แบบจำลองทางไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริก

จะเห็นว่าผู้วิจัยใช้แหล่งจ่ายแบบพัลส์ (V_{pulse}) เพื่อจำลองแรงกระทำทางกลความถี่ต่ำจากการเดินและกลศาสตร์ของสัญญาณตามความถี่ของการเดินไว้ที่ 2 เฮิรตซ์ 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) ของอุปกรณ์จับรอบคาบการสั่น (vibration period) แสดงผลแรงดันไฟฟ้าขาออกจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม OrCAD-Pspice เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าจากวัสดุเมื่อได้รับแรงทางกลจริงไว้ดังรูปที่ 3.8



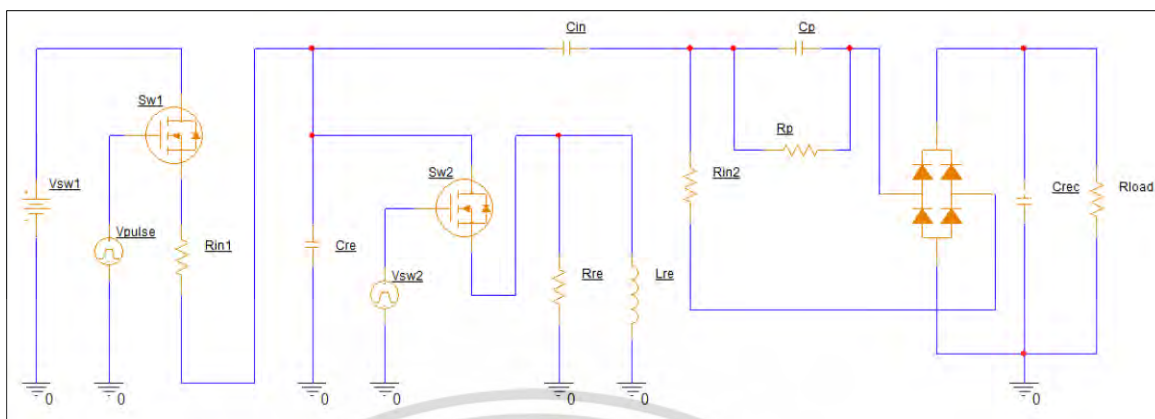
(ก) แรงดันไฟฟ้าจากโปรแกรม จ ลอง



(ข) แรงดันไฟฟ้าจากการวัดจากชุดทดลอง

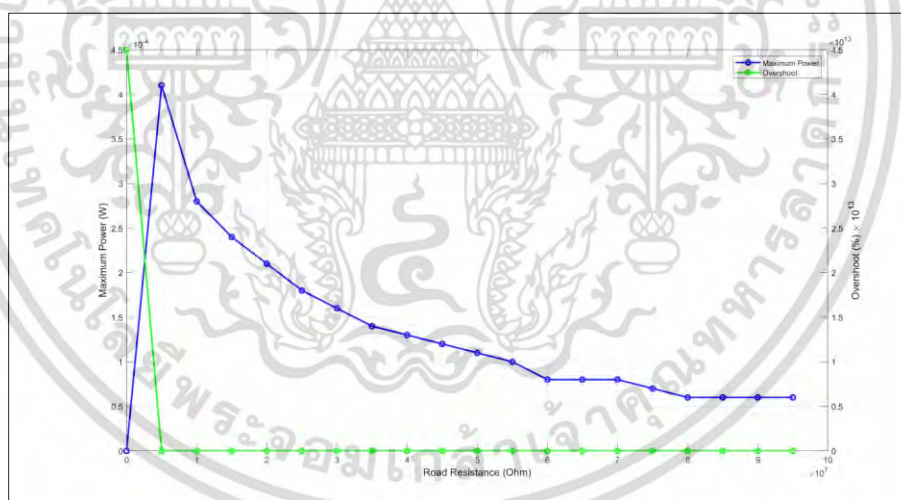
รูปที่ 3.8 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดเมื่อเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงทางกล

เห็นได้ว่าผลการจำลองมีความใกล้เคียงกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง ผู้วิจัยจึงใช้แบบจำลองนี้เพื่อการศึกษาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการวิจัยเป็นการนำพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำไปใช้งานกับอุปกรณ์กำลังไฟฟ้าต่ำซึ่งโดยทั่วไปแล้วเป็นอุปกรณ์ประเภทดิจิทัลที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง จึงทำการเพิ่มเติมส่วนของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (full bridge rectifier) เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นไฟฟ้ากระแสตรงต่อไปยังตัวต้านทานซึ่งทำหน้าที่เป็นภาระทางไฟฟ้า แบบจำลองจึงปรับเปลี่ยนและแสดงไว้ดังรูปที่ 3.9



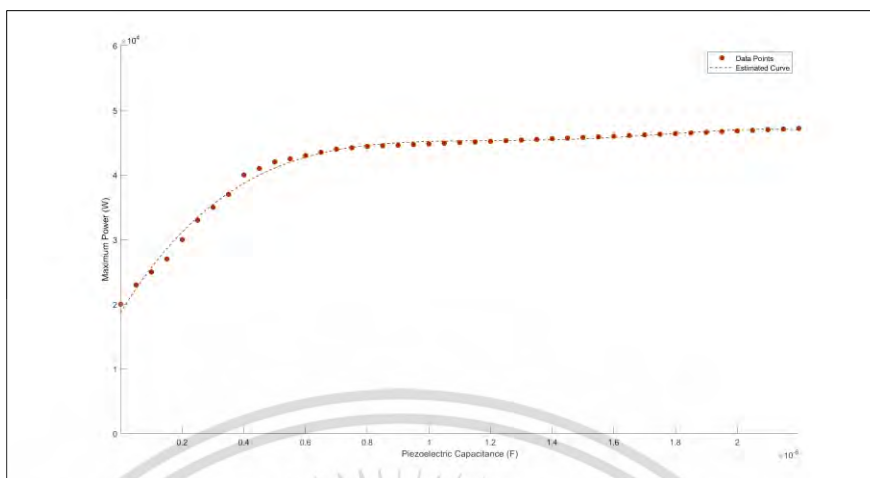
รูปที่ 3.9 แบบจำลองทางไฟฟ้าเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสและโหลดตัวต้านทาน

การวิเคราะห์ค่าความต้านทานที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาค่าพารามิเตอร์ได้ผลการจำลองออกมาดังรูปที่ 3.10 โดยเลือกค่าของตัวต้านทานซึ่งทำหน้าที่เป็นภาระทางไฟฟ้าที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด (maximum output power) และมีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (overshoot percentage) ต่ำที่สุดเป็นค่าที่ใช้สำหรับการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่อไป



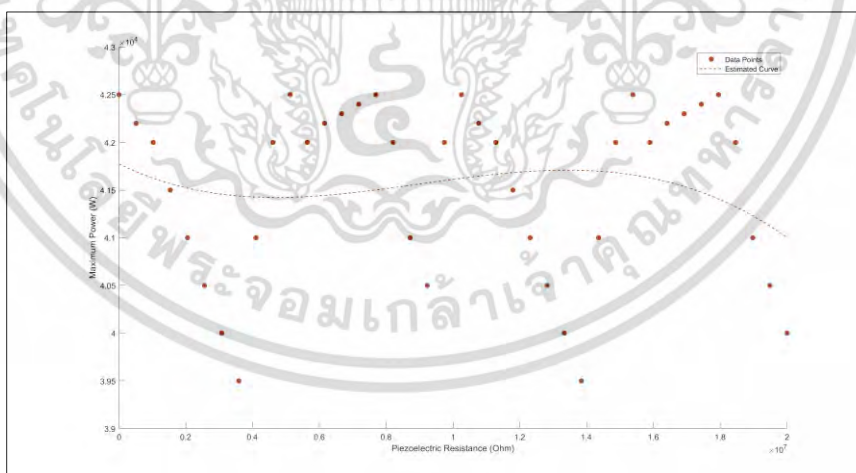
รูปที่ 3.10 กราฟกำลังไฟฟ้าสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่ค่าความต้านทานต่าง ๆ

ทำการเพื่อแบ่งออกเป็น 3 กรณีคือการปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานภายใน ค่าความเก็บประจุภายในและปรับเปลี่ยนคาบเวลากระตุ้น แสดงผลการจำลองต่อกำลังไฟฟ้าขาออกของเพียโซอิเล็กทริก ได้ผลสรุปว่าค่าความเก็บประจุภายในเมื่อมีค่าสูงขึ้นโดยเมื่อเพิ่มค่าความเก็บประจุภายในจนถึงประมาณ 800 nF ค่า กำลังไฟฟ้าขาออกจะเพิ่มขึ้นช้าลงและเข้าใกล้ค่าคงที่แสดงไว้ดังรูปที่ 3.11

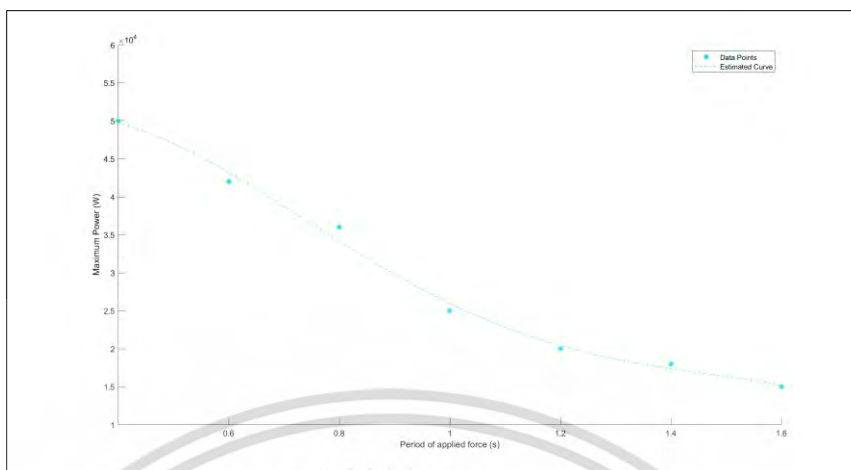


รูปที่ 3.11 ก กำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเก็บประจุภายในเพียโซอิเล็กทริก

ในส่วนของการปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานภายในของเพียโซอิเล็กทริกไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าขาออกแต่ค่ากำลังไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะเห็นได้ว่าค่อนข้างที่จะคงที่แสดงผลการจำลองไว้ดังรูปที่ 3.12 และค่ากำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อทำการเพิ่มคาบเวลาของแรงกระตุ้นทางกลที่ป้อนให้กับเพียโซอิเล็กทริกได้ข้อสรุปว่าการเพิ่มคาบเวลาในการกระตุ้นทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าที่ลดลงเนื่องจากความถี่ของการกระตุ้นมีค่าแตกต่างจากความถี่ธรรมชาติของวัสดุมากขึ้นแสดงผลการจำลองไว้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 ก กำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายในเพียโซอิเล็กทริก

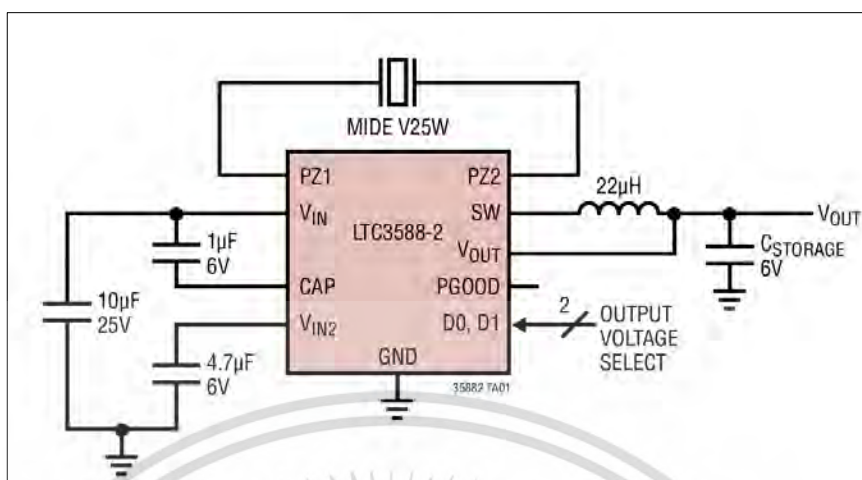


รูปที่ 3.13 กำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อเปลี่ยนแปลงคาบเวลาแรงกระทำ ทางกลกับเพียโซอิเล็กทริก

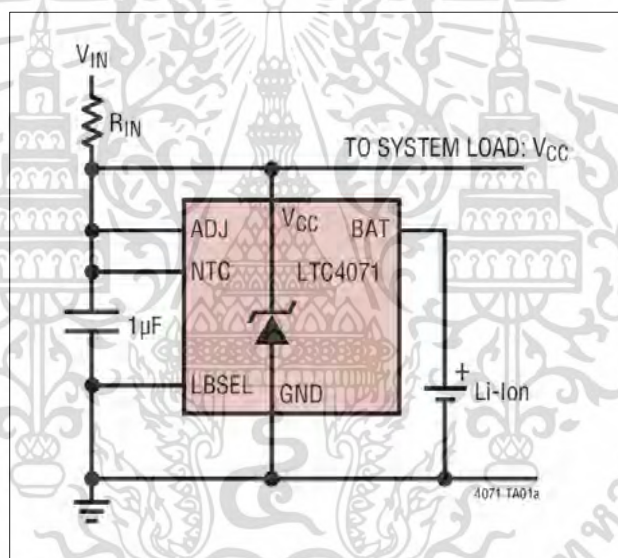
การศึกษาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจึงมีความสำคัญกับการเลือกประเภทของเพียโซอิเล็กทริกที่เหมาะสมแก่วัตถุประสงค์การใช้งาน สามารถประเมินค่าพลังงานที่ต้องการเพื่อการวางแผนการสะสมพลังงานเพื่อใช้งานกับอุปกรณ์ที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นต่อไปอีกทั้งยังสามารถเปรียบเทียบกับราคาวัสดุเพื่อความคุ้มค่าในการติดตั้งใช้งานจริง

3.3 ระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน

ในส่วนการการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริก จำเป็นต้องอาศัยวงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานซึ่งเลือกใช้แผงวงจร LTC3588-2 แสดงไว้ดังรูปที่ 3.14 โดยหน้าที่หลักของวงจรคือการแปลงพลังงานที่ไฟฟ้าที่เพียโซอิเล็กทริกผลิตได้ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้กับอุปกรณ์ประเภทตรวจจับและอุปกรณ์ไร้สาย การทดลองอาศัยไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำไปประจุแบตเตอรี่ต่อไปจึงต้องอาศัยวงจรควบคุมการประจุ LTC4071 แสดงไว้ดังรูปที่ 3.15 ภายในแผงวงจรประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสและวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง-กระแสตรงแบบลดทอนแรงดันแบบความสูญเสียทางไฟฟ้าต่ำ เพื่อให้พลังงานไฟฟ้าขาออกมีค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงและแรงดันไฟฟ้ามีความเหมาะสมกับการประจุแบตเตอรี่ ลักษณะการติดตั้งการทดลองและรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริกแสดงไว้ดังรูปที่ 3.16 และ 3.17 ตามลำดับ

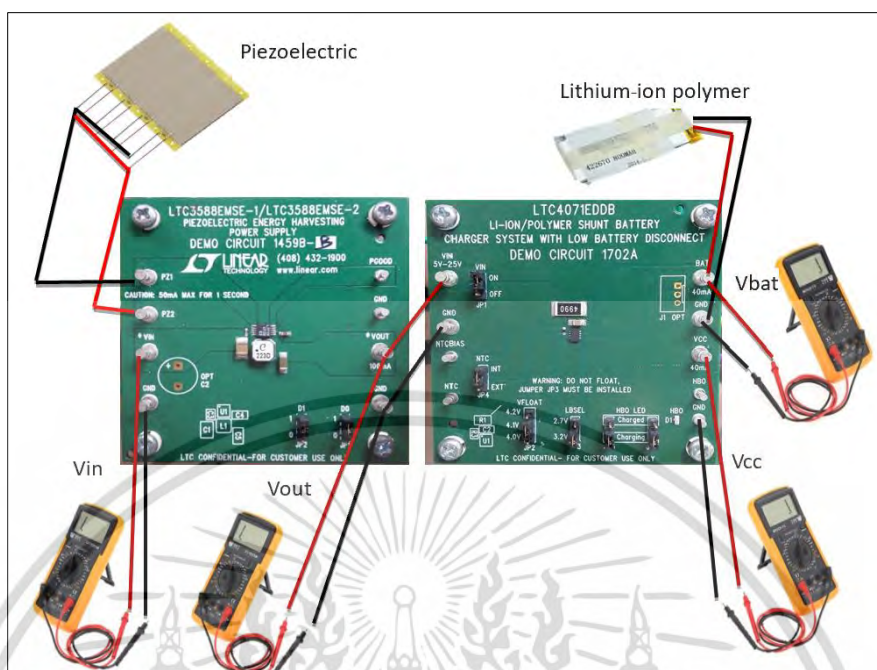


รูปที่ 3.14 วงจรเก็บเกี่ยวพลังงาน LTC3588-2

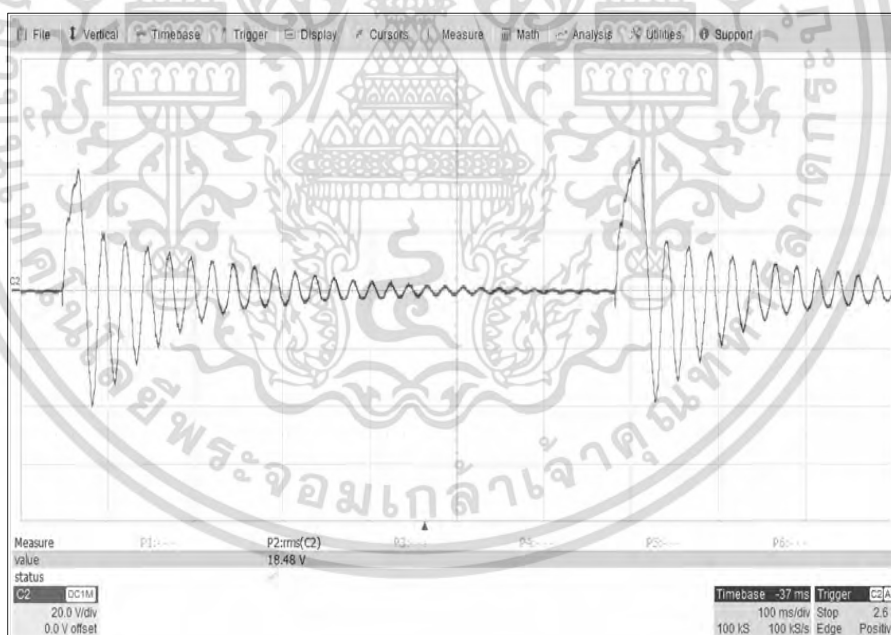


รูปที่ 3.15 วงจรควบคุมการประจุแบตเตอรี่ LTC4071

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าโดยการต่ออนุกรมและขนานเพียโซอิเล็กทริกพบว่า การต่ออนุกรมสามารถเพิ่มปริมาณแรงดันไฟฟ้า ส่วนการต่อขนานจะเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้า จึงเลือกการติดตั้งเป็นแบบต่อขนานเพื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากธรรมชาติของเพียโซอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์ที่ให้แรงดันไฟฟ้าที่สูงแต่กระแสไฟฟ้าต่ำ การต่อขนานจึงมีความเหมาะสมในการติดตั้งเป็นพื้นกานิดพลังงาน

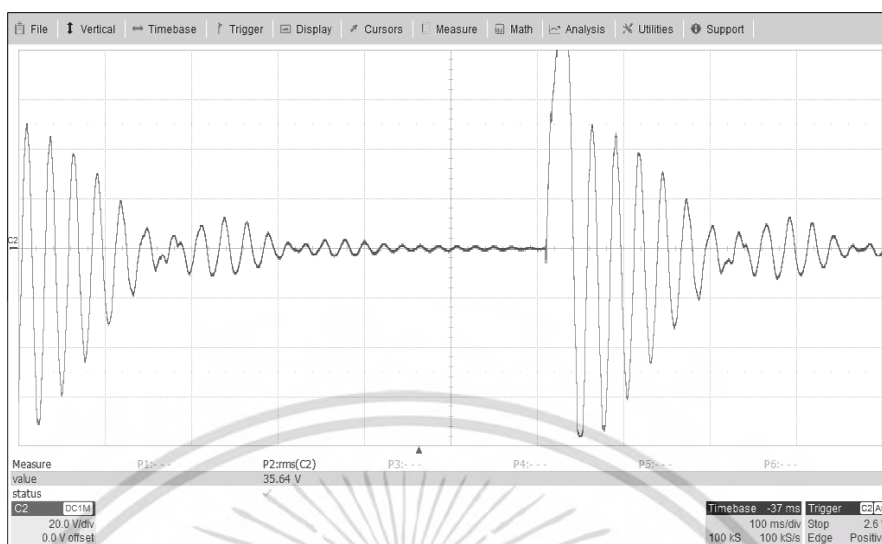


รูปที่ 3.16 การติดตั้งชุดทดลองเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก

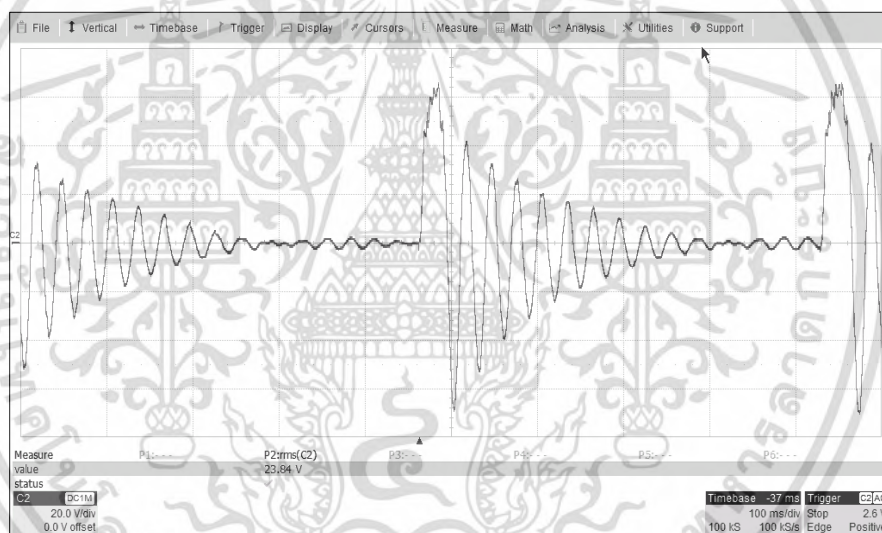


(ก) แรงดันไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) สัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นอนุกรม



(ค) สัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นขนาน

รูปที่ 3.17 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกจากเพียโซอิเล็กทริก

3.4 การศึกษาคุณลักษณะทางกล

การศึกษาคุณลักษณะของวัสดุเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองทางกลเป็นอีกส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการน วัสดุใด ๆ ไปติดตั้งใช้งานจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการน วัสดุเพียโซอิเล็กทริกซึ่งมีราคาที่สูงอีกทั้งมีขนาดเล็กและเปราะ อาจเกิดความเสียหายหรือสูญเสียคุณสมบัติการแปลงพลังงานไปเมื่อได้รับแรงทางกลมากจนเกินไป ในทางตรงกันข้ามพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเก็บเกี่ยวได้จากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นแปรผันโดยตรงกับความเค้นทางกลที่เกิดขึ้นกับผลึกในเนื้อวัสดุ กล่าวคือเมื่อแรงทางกลที่ได้รับสูงขึ้นจะทำให้เกิดความเค้นสะสมมากท ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้รับก็จะมีปริมาณที่สูงขึ้น ดังนั้นการที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับพลังงานทางกลน้อยจนเกินไปก็อาจทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากการแปลงพลังงานมีค่าที่ต่ำกว่าปริมาณที่ควรจะได้รับและไม่คุ้มค่าแก่การติดตั้งใช้งานหากปราศจากการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกล

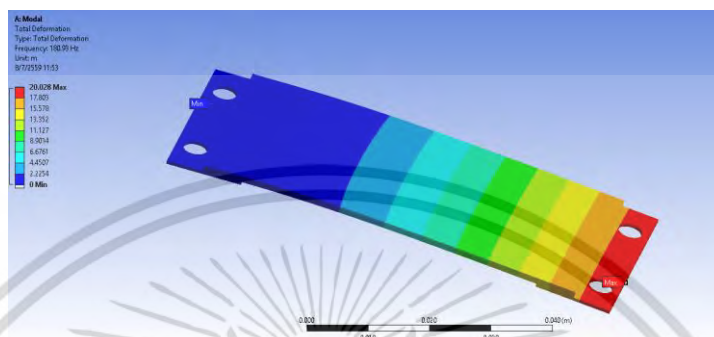
การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางกลบนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งเป็นการนำรูปทรงของปัญหาทางวิศวกรรมที่มีความซับซ้อนและเงื่อนไขการวิเคราะห์ มาแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นรูปทรงทางเลขาคณิตอย่างง่ายที่เรียกว่าเอลิเมนต์แล้วสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์ที่มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของเอลิเมนต์เหล่านั้น รวบรวมสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งหมดเป็นระบบสมการและระบุเงื่อนไขขอบเขตการวิเคราะห์ (boundary conditions) จากนั้น คำนวณผลเฉลยของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ในงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะทางกลของวัสดุไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ถูกสร้างและพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี พ.ศ. 2512 และถูกเผยแพร่จนเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางทั่วโลก

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกฟีน มาวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ใช้เป็นเพียโซอิเล็กทริกประเภทวัสดุผสมเซรามิกเลทเซอร์โครเนตไททาเนต (Lead Zirconate Titanate: PZT) ของบริษัท MIDE Technology รุ่น PPA-2011 ด้วยความที่ PZT มีคุณสมบัติเซรามิกที่เปราะและแตกหักได้ง่าย ในการใช้งานที่ต้องรับแรงทางกลโดยตรงจะต้องมีการเสริมความแข็งแรงให้แก่วัสดุนิยมใช้โลหะบางชั้นกลางระหว่าง PZT สองแผ่นที่มีลักษณะการจัดเรียงขั้วที่ตรงข้ามกันเพื่อให้สามารถรับแรงได้มากยิ่งขึ้นและ

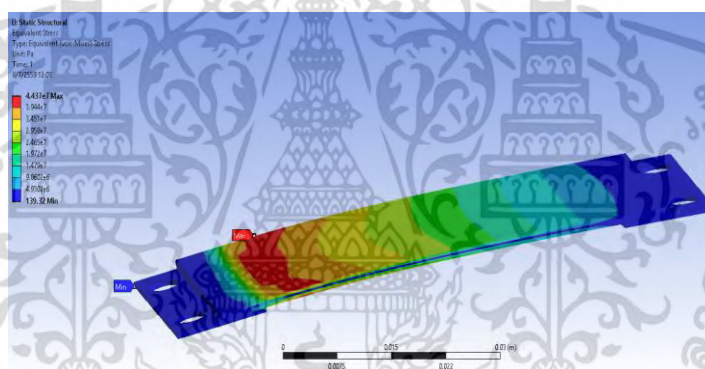
3.5 การจำลองวัสดุเพียโซอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในส่วนต่อไปเป็นการจำลองวัสดุเพียโซอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะทางกลของวัสดุเพื่อศึกษาความสามารถในการแปลงพลังงานในเชิงกล การศึกษาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เริ่มจากการวาดแบบวัสดุและกำหนดค่าเฉพาะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและเงื่อนไขขอบเขตเพื่อการประมวลผลจากโปรแกรม ANSYS Workbench โดยอาศัยการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ผลการวิเคราะห์สามารถวิเคราะห์ได้หลากหลายกว่าการวิเคราะห์ทางไฟฟ้า อาทิเช่นการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของการแกว่งตัวแบบอิสระของเพียโซอิเล็กทริกภายใต้แรงกระทำทางกลที่ป้อนให้วัสดุเพื่อการออกแบบปรับปรุงค่าความถี่ธรรมชาติของเพียโซอิเล็กทริกให้มีความใกล้เคียงกับความถี่ของการกระตุ้นภายในสภาวะการติดตั้งใช้งานพื้นกานผลิตพลังงานจริง นำไปสู่การเพิ่มปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ กล่าวคือเป็นไปตามทฤษฎีการส่งผ่านก าลังไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อความถี่ของการกระตุ้นตรงกับกับความถี่ธรรมชาติของวัสดุ ผลการวิเคราะห์อื่น ๆ เช่น การกระจายตัวของความเค้นทางกลที่เกิดขึ้นบนวัสดุหากได้รับแรงทางกลในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งถ้ามีค่ามากจนเกินไปอาจทำให้วัสดุเสียหายและสูญเสียคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกไป แต่ในทางตรงกันข้ามความเค้นทางกลที่สูงนั้นส่งผลให้พลังงานที่

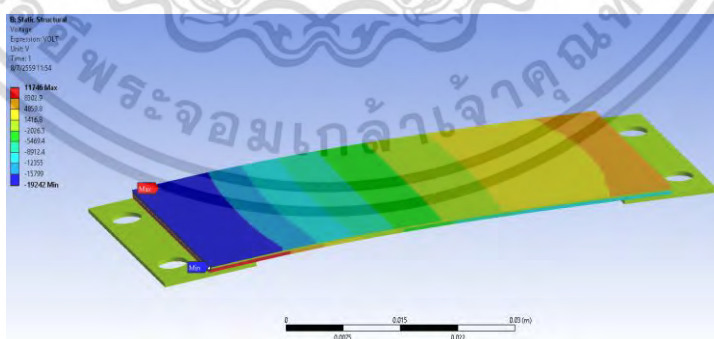
ได้รับจากเพียโซอิเล็กทริกมีค่าสูงขึ้นไปด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความสำคัญกับการออกแบบชุดติดตั้งใช้งานจริงเพื่อให้ได้รับพลังงานไฟฟ้าสูงสุดโดยที่วัสดุไม่เกิดความเสียหาย ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แสดงไว้ดังรูปที่ 3.18 – 3.20



รูปที่ 3.18 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงคอนทัวร์การกระจัดทางกล



รูปที่ 3.19 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงคอนทัวร์ความเค้นทางกล



รูปที่ 3.20 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงคอนทัวร์แรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ประยุกต์ใช้งานระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริก

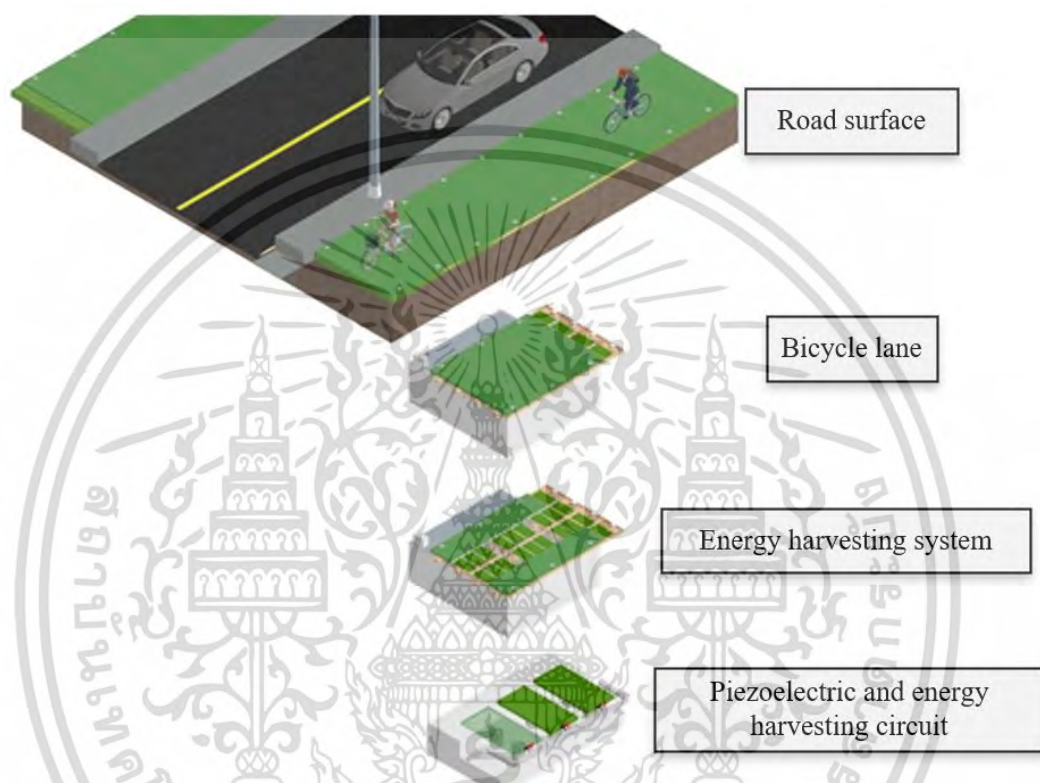
วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีความสามารถพิเศษในการแปลงความเค้นเชิงกล เช่น แรงสั่นสะเทือนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เทคโนโลยีพลังงานทางเลือกนี้มีประโยชน์ในการช่วยผลิตพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอต่อการใช้งานโดยไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศ ในขณะเดียวกันเป็นการสนับสนุนการใช้งานเทคโนโลยีพลังงานทางเลือกใหม่ ๆ ที่สามารถนำเอาพลังงานที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ มาแปลงเป็นพลังงานที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ จากผลการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและผลตอบแทนทางกล ซึ่งนำไปสู่รูปแบบการติดตั้งระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพแล้วนั้น เนื้อหาในส่วนต่อไปนี้จะนำเสนอการบูรณาการใช้งานระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกกับพื้นที่ทา การทดลอง โดยนำเสนอการประยุกต์ใช้งาน 3 รูปแบบ กล่าวคือติดตั้งใช้งานเพื่อแปลงพลังงานการสั่นสะเทือนจากการเดินและขี่จักรยานเป็นพลังงานไฟฟ้าใช้บริเวณทางเท้าและทางจักรยาน และการติดตั้งใช้งานกับเครื่องออกกำลังกายเพื่อช่วยในการผลิตพลังงานไฟฟ้าใช้งานกับอุปกรณ์ที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าในระดับที่ไม่สูงมาก และติดตั้งบนโครงจักรยาน

4.1 การประยุกต์ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกสำหรับระบบไฟส่อง

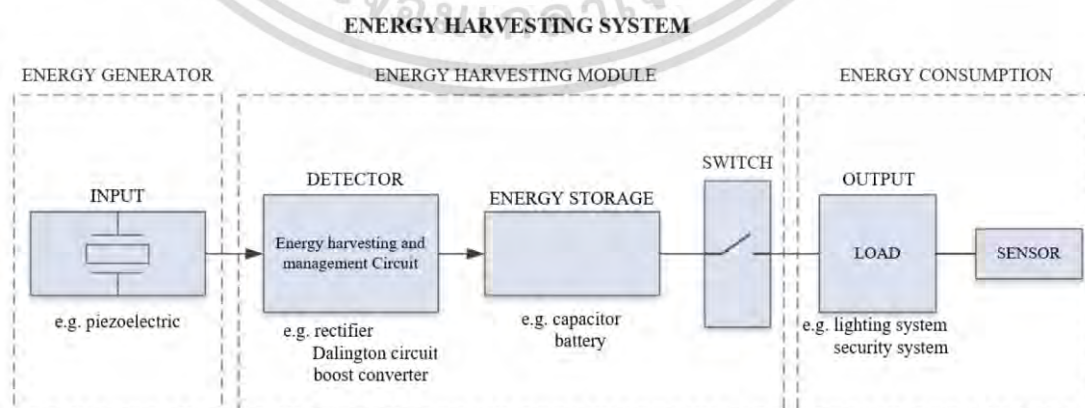
สว่างทางเท้า

เนื้อหาในส่วนนี้เป็นการประยุกต์ใช้ระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นแหล่งพลังงานสำหรับใช้งานระบบส่องสว่างบริเวณทางเท้าและทางจักรยาน การพัฒนาระบบเก็บเกี่ยวพลังงานและติดตั้งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกออกแบบให้ทำงานในลักษณะของพื้นกาวนิคมพลังงานเพื่อรับแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำ โดยใช้หลักการแปลงพลังงานการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมบนพื้นทางเดินและทางจักรยาน แปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางตรงในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเอาพลังงานที่ผลิตได้จากเพียโซอิเล็กทริกมาใช้งานแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลา กล่าวคือช่วงเวลากลางวันหรือช่วงที่มีปริมาณแสงสว่างเพียงพอ ออกแบบให้นำพลังงานที่ผลิตได้สะสมในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเนื่องจากมีความสว่างบริเวณทางเดินเพียงพออยู่แล้วไม่ต้องมีการใช้งานระบบส่องสว่าง แต่จะนำเอาพลังงานที่สะสมไว้มาช่วยจ่ายให้กับระบบส่องสว่างในเวลากลางคืน และอีกช่วงเวลาคือช่วงที่แสงสว่างไม่เพียงพอต่อการใช้งานทางเท้าและทางจักรยานอย่างปลอดภัย โดยทำการออกแบบให้ระบบนำเอาพลังงานที่สะสมไว้ตอนช่วงเวลากลางวันเอามาใช้กับระบบส่องสว่างเพื่อแสงสว่างที่เพียงพอต่อการใช้งาน และนำพลังงานที่ได้ขณะที่มีการเดินหรือขี่จักรยานผ่านทางที่ติดตั้งระบบไว้ จ่ายไปยังหลอด LED ที่ติดตั้งบริเวณพื้น ใช้งานในรูปแบบของไฟถนน เพื่อความปลอดภัยในการใช้ทาง ระบบที่นำเสนอประกอบไปด้วยโมดูลพื้นกาวนิคมพลังงานหลายชุดต่อเรียงเป็นทาง โดยแต่ละชุดประกอบไปด้วยพื้นยางเอทรีลีนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพรงฟิล์มไดอินเพื่อรับแรงกระดกและแรงกระแทก มีคุณสมบัติทนน้ำ ความร้อน และมีความยืดหยุ่น รับแรงกระแทกได้ดี สามารถใช้งานได้ดีกับทั้งภายในและภายนอกสถานที่ และชุดกำเนิดพลังงาน กล่าวคือโมดูลเพียโซอิเล็กทริกที่มีการติดตั้งที่เหมาะสมต่อการรับแรงในรูปแบบพื้นกานะพลังงาน ระบบบริหารจัดการพลังงาน และหลอด LED ภาพรวมของระบบการทางานนี้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 และสถาปัตยกรรมของระบบแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 การติดตั้งระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกประยุกต์ใช้งานทางเท้า และทางจักรยาน



รูปที่ 4.2 สถาปัตยกรรมของระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

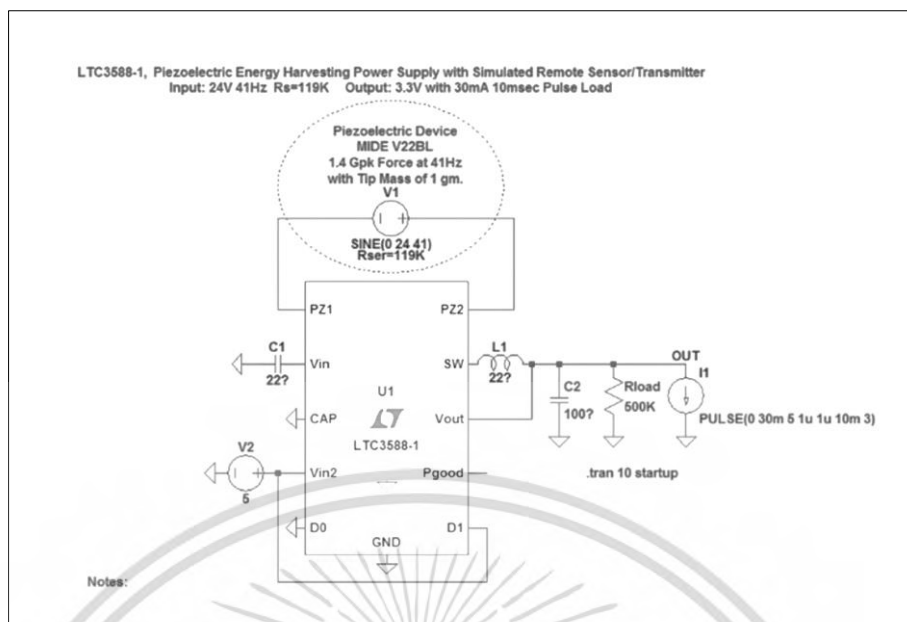
ในส่วนของการจำลองทางไฟฟ้าของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่นำเสนอจัดทำโดยใช้ซอฟต์แวร์ LTSpice ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์จำลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาโดย Linear Technology (ปัจจุบันเป็นส่วนหนึ่งของ Analog Devices) มั่นใจในการจำลองและวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงการออกแบบและทดสอบวงจรประเภทต่าง ๆ เช่น วงจรอนาล็อกและดิจิทัล โดยสถาปัตยกรรมของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่นำเสนอประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก อาทิเช่น วงจรรวม (Integrated Circuit: IC) LTC-3588-1 ที่ออกแบบมาเพื่อการเก็บเกี่ยวพลังงาน (energy harvesting) และการจัดการพลังงาน (power management) เหมาะสำหรับการใช้ในระบบที่ต้องการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานที่มีกระแสไฟฟ้าต่ำและพลังงานจำกัด และทำการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองประกอบไปด้วยแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความถี่ มีรายละเอียดดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าสำหรับการจำลองเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยโมดูล LTC-3588-1

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้า	ค่าที่ใช้สำหรับการจำลอง
แรงดันไฟฟ้าขาเข้า	24 V
ความถี่	41 Hz
ความต้านทานภายใน	119 kOhm
แรงดันไฟฟ้าขาออก	3.3 V
กระแสไฟฟ้าขาออก	30 mA

การทางานจะเริ่มจากการจำลองสัญญาณทางไฟฟ้าเมื่อเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงกระตุ้น โดยแหล่งกำเนิดแรงดันเพียโซอิเล็กทริกจำลองโดยใช้โมเดลของ MIDE V22BL สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงสั่นสะเทือนที่ความถี่ 41Hz โดยแรงสั่นสะเทือนนี้มีค่าความเข้มสูงสุด (peak) เท่ากับ 1.4 G (ซึ่ง G หมายถึงค่าแรง g-force หรือการเร่งโน้มถ่วงของโลก) โดยมีมวลของน้ำหนักปลายที่ติดอยู่กับอุปกรณ์เท่ากับ 1 กรัม ในส่วนของ LTC3588-1 ใช้สำหรับการจัดการพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก รับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าผ่านขา Vin1 และ Vin2 ตัวเก็บประจุ C1 และ C2 ใช้สำหรับกรองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและเก็บพลังงานเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าให้คงที่และเพียงพอสำหรับการใช้งาน สวิตช์ ทาหน้าที่ควบคุมการส่งพลังงานไปยังโหลดโดยจะเปิด-ปิดตามการกำหนดค่าตามรูปแบบการใช้งาน และ Vout เป็นขาต่อแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ถูกปรับให้เหมาะสมสำหรับโหลด และถ้าแรงดันขาออกถึงค่าที่กำหนด ขา Pgood จะแสดงสถานะพร้อมใช้งาน และโหลดที่ใช้ในการจำลองเป็นตัวต้านทาน 500 k Ω และโหลดแบบพัลส์ที่มีช่วงพัลส์ 10 ms ทุก ๆ 30 ms และมีค่ากระแสไฟฟ้า 30 mA ซึ่งหมายความว่าโหลดนี้จะดึงกระแสไฟฟ้า 30 mA เป็นระยะเวลา 10 ms จากนั้นจะหยุดดึงกระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 20 ms และจะทวนซ้ำในรูปแบบนี้ตลอดเวลา สถาปัตยกรรมของระบบจำลองทางไฟฟ้าของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วย LTC3588-1 แสดงดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 สถาปัตยกรรมของระบบจ หล่องทางไฟฟ้าของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน

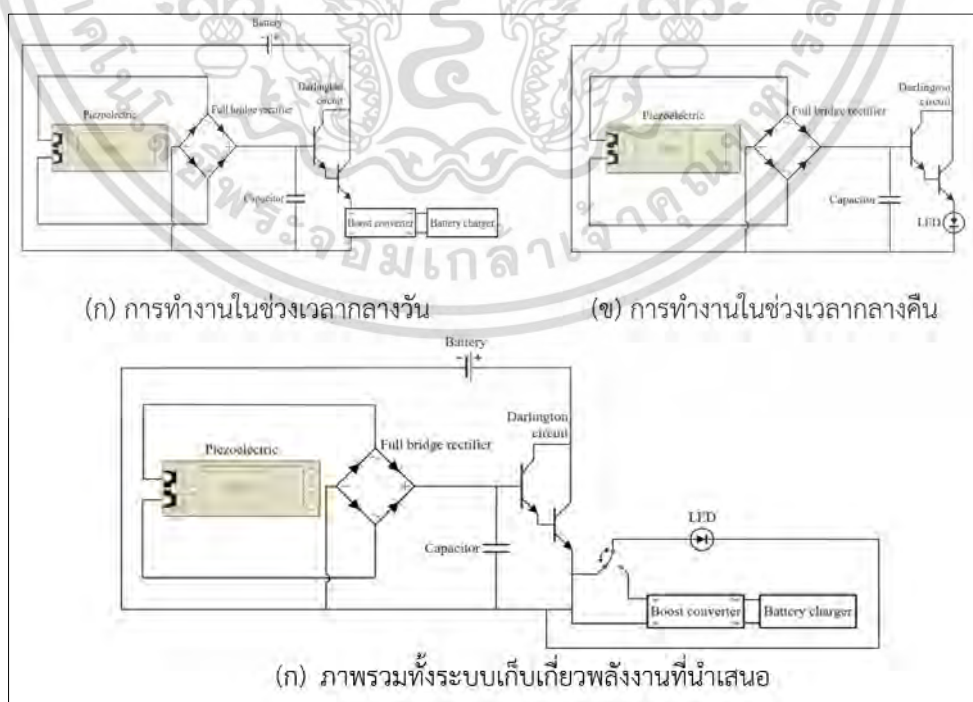


รูปที่ 4.4 สัญญาณทางไฟฟ้าเมื่อเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงทางกล ที่จ าลองด้วย LTspice

ผลการจ าลองจากระบบ LTC3588-1 เมื่อได้รับพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งประกอบด้วยกราฟ 4 ส่วน โดยส่วน (รูป ก) แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าจากอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกที่ความถี่ 41Hz ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสูงสุดประมาณ 15 V ส่วน (รูป ข) แสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าขาเข้าที่สอดคล้องกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้า โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดสลับกันตามเวลา ในส่วนของผลลัพธ์ขาออก (รูป ค) แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกจาก LTC3588-1 ซึ่งถูกปรับให้เหมาะสมสำหรับโหลด โดยมีค่าแรงดันประมาณ 3.3 V อย่างคงที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตลอดเวลา และส่วน (รูป ง) แสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าขาออกซึ่งแสดงถึงการดึงกระแสไฟฟ้าโดยโหลดแบบพัลส์ที่มีช่วงพัลส์ 10 ms ทุก ๆ 30 ms โดยในช่วงที่โหลดท างานจะมีกระแสไฟฟ้าสูงถึง 30 mA และไม่มีการดึงกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาที่เหลือ จากผลการจ าลองนี้แสดงให้เห็นว่า LTC3588-1 สามารถจัดการกับแรงดันไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริกและส่งออกแรงดันที่เหมาะสมและเสถียรให้กับโหลดได้ แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดเป็นช่วงเวลาต่าง ๆ ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของวงจรในการเก็บเกี่ยวและจัดการพลังงานจากแหล่งพลังงานที่มีการสั่นสะเทือน

รูปที่ 4.5 แสดงการออกแบบระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่น าสโน ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนคือการทำงานในช่วงเวลากลางวันและการทำงานในช่วงเวลากลางคืน ในส่วนของการทำงานในช่วงเวลากลางวัน (รูป ก) ระบบจะใช้พลังงานที่ได้รับจากอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกซึ่งผ่านการแปลงสัญญาณไฟฟ้าผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (full bridge rectifier) และเก็บพลังงานในตัวเก็บประจุ จากนั้นพลังงานที่เก็บได้จะถูกส่งผ่านวงจร Darlington และวงจรแปลงผันก าลไฟฟ้าเพื่อประจุแบตเตอรี่ทำให้พลังงานที่ได้สามารถเก็บไว้ใช้ในช่วงเวลากลางคืนได้ ในส่วนของการทำงานในช่วงเวลากลางคืน (รูป ข) ระบบจะนำพลังงานที่สะสมไว้ในแบตเตอรี่มาใช้ สำหรับการส่องสว่างในบริเวณที่ติดตั้งและใช้พลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกที่ยังคงทำงานในเวลากลางคืนเพื่อจ่ายพลังงานให้กับ LED ที่ติดตั้งบนพื้นที่ทดลอง และ (รูป ค) เป็นการรวมทั้งสองระบบเข้าด้วยกัน โดยแสดงถึงการทำงานทั้งในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานและใช้งานได้ตลอด 24 ชั่วโมง โดยใช้พลังงานที่ได้จากอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกและแบตเตอรี่ที่เก็บพลังงานไว้ในช่วงเวลากลางวันมาใช้งานในช่วงเวลากลางคืนส ำหรับการส่องสว่างด้วย LED ที่พื้น ซึ่งสามารถใช้เป็นไฟน ทางได้



รูปที่ 4.5 แสดงแผนผังรูปแบบการทำงานของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาผลตอบสนองทางกลเมื่อเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงทางกล พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้แปรผันตรงกับปริมาณแรงที่กระทำ ท่อวัสดุ แต่หากได้รับแรงกระทำในปริมาณที่มากหรือรวดเร็วจนเกินไป วัสดุอาจเกิดความเสียหายและสูญเสียคุณสมบัติการแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้าได้ ดังนั้นการออกแบบชุดการทดลองจึงใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่น คือ ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (Ethylene Propylene Diene Monomer: EPDM) ซึ่งเป็นยางชนิดที่ไม่มีส่วนที่โมเลกุลไม่อิ่มตัวสามารถทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากปัจจัยภูมิอากาศภายนอก เช่น แสงแดด ออกซิเจน ความร้อน และสารเคมีได้ดี เพื่อส่งผ่านแรงทางกลไปยังโมดูลเพียโซอิเล็กทริก ด้านล่างของโมดูลเพียโซอิเล็กทริกมีการติดตั้งสปริงเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดจากระยะกระจัดที่ส่วนปลายโมดูลที่สูงจนเกินไป อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความสามารถในการสั่นสะเทือนที่ต่อเนื่องจากแรงปฏิกิริยาที่สะสมในสปริงเมื่อได้รับแรงทางกลส่งกลับมาสั่นโมดูลเพียโซอิเล็กทริก การสั่นที่เกิดขึ้นจึงมีความต่อเนื่องและสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยสูงขึ้นกว่าชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งสปริงด้านล่างโมดูล โดย ท ทดลองทั้งหมด 10 ชุดการทดลอง รูปแบบการติดตั้งแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 คุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้และผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ตามล ำดับ



(ก) การติดตั้งสปริงด้านล่างโมดูลเพียโซอิเล็กทริก

(ข) พ้นยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่ใช้

รูปที่ 4.6 การติดตั้งเพียโซอิเล็กทริกในชุดทดลอง

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติ	ค่าจำเพาะ	หน่วย
ขนาดโดยรวมของโมดูลเพียโซอิเล็กทริก	71.0 x 25.4 x 0.76	mm.
ความหนาแน่น	7.8	g/cm ³
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ที่ 1 kHz)	3,800	-
ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก g_{33}	19.0	V.m/N x 10 ⁻³
ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก g_{31}	-9.5	V.m/N x 10 ⁻³
ค่าสัมประสิทธิ์ประจุไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก d_{33}	650	m/V x 10 ⁻¹²
ค่าสัมประสิทธิ์ประจุไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก d_{31}	-320	m/V x 10 ⁻¹²
ความเก็บประจุ	190	nF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากโมดูลทดลองพื้ก ชนิดพลังงานเมื่อติดตั้งและไม่ติดตั้งสปริง

จำนวนโมดูลพื้กกำเนิด พลังงาน (ชุดทดลอง)	แรงดันไฟฟ้าเมื่อชุดการ ทดลองไม่ติดตั้งสปริง (V)	แรงดันไฟฟ้าเมื่อชุดการ ทดลองติดตั้งสปริง (V)
1	5.12	15.30
2	4.87	16.71
3	4.87	15.66
4	5.57	13.67
5	6.14	15.98
6	5.14	15.14
7	4.98	14.65
8	5.88	14.47
9	5.00	16.11
10	4.31	17.01



รูปที่ 4.7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าภายใต้การกระตุ้นด้วยแรงกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองที่พบว่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดผ่านวงจรเรียงกระแสมีค่าประมาณ 15.4 V ซึ่งเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 4.55 V และเมื่อใช้บูสต์คอนเวอร์เตอร์เพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นเป็น 12.9 V ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากชุดทดลองแสดงในรูปที่ 4.7 โดยตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลองมีการติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 32 แผ่น และวัดกำลังไฟฟ้าทั้งหมดประมาณ 7.14 W นอกจากนี้ในตารางที่ 4.4 และ 4.5 แสดงผลการทดลองปริมาณพลังงานที่สร้างขึ้นสำหรับผู้ขับขี่ที่มีน้ำหนักและความเร็วในการขับขี่ที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อแรงกดดันเนื่องจากน้ำหนักเพิ่มขึ้น พลังงานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงที่กระทำ ทับสปริงและพลังงานที่สะสมและปล่อยออกมาจากสปริงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เพียโซอิเล็กทริกมีการสั่นในระดับที่สูงและต่อเนื่องมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม ความเร็วที่สูงขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาที่พลังงานจะถูกส่งต่อไปยังโหลดลดลง ทำให้ปริมาณพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวโดยวัดค่าค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดมีปริมาณลดลง

ตารางที่ 4.4 ปริมาณไฟฟ้าของพื้นสร้างพลังงานภายใต้ น้ำหนักของผู้ขับขี่ที่แตกต่างกัน

น้ำหนัก (กก.)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
55	2.87	0.328	0.9414
75	3.17	0.363	1.1507
90	3.33	0.403	1.3420

ตารางที่ 4.5 ปริมาณไฟฟ้าของพื้นผลิตไฟฟ้าภายใต้ความเร็วการขับขี่ที่แตกต่างกัน

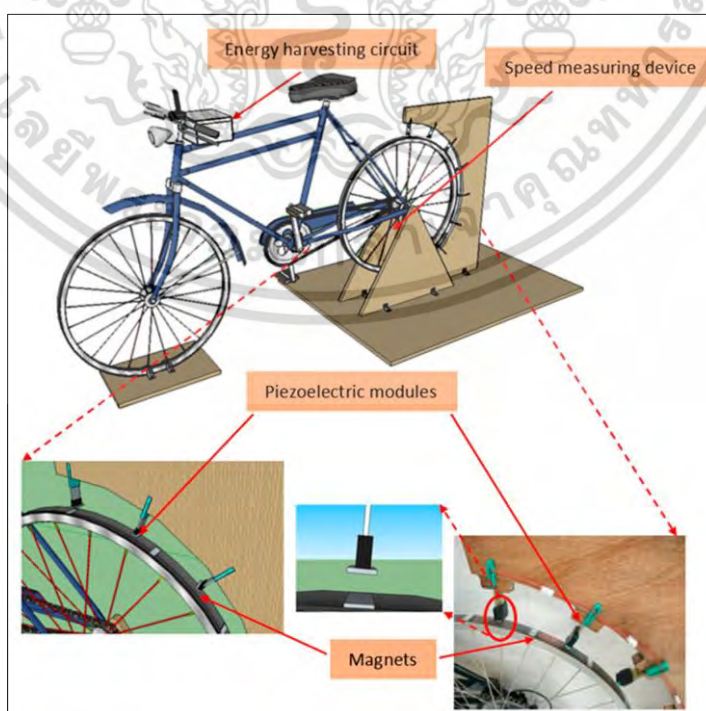
ความเร็ว (กม./ชม.)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
5	3.20	0.352	1.1264
10	3.12	0.309	1.0976
20	3.20	0.343	0.9641

การทดลองแสดงให้เห็นว่าเพียโซอิเล็กทริกสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้มากขึ้นเมื่อมีน้ำหนักกดที่เพิ่มขึ้น แต่จะเก็บเกี่ยวพลังงานได้น้อยลงเมื่อความเร็วการขับขี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาที่แรงกระทำต่อเพียโซอิเล็กทริกมีน้อยลง การออกแบบระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดจึงควรพิจารณาแรงกดจากน้ำหนักของผู้ขับขี่เป็นหลัก ในขณะที่ความเร็วการขับขี่ควรอยู่ในระดับที่ไม่สูงเกินไปเพื่อให้สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.2 การประยุกต์ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกสำหรับจักรยานออกกำลังกาย

เนื้อหาในส่วนนี้จะนำเสนอการศึกษาการประยุกต์ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกกับระบบ จอจักรยานออกกำลังกายโดยนาจักรยานที่ไม่ได้ใช้งานแล้วนำมาดัดแปลงเป็นจักรยานออกกำลังกาย วัสดุแบบอยู่กับที่ เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อพลังงานที่ผลิตได้เมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงกระทำ ทางกลแบบต่อเนื่อง รูปแบบการติดตั้งเพื่อป้องกันไม่ให้โมดูลเพียโซอิเล็กทริกรับแรงทางกลโดยตรง เหนินการทดลองโดยอาศัยแรงทางกลในรูปแบบของแรงผลักดันของแรงแม่เหล็กถาวรที่มีขั้วเดียวกันติดตั้งสองบริเวณ กล่าวคือที่ปลายของโมดูลเพียโซอิเล็กทริกที่ติดตั้งในรูปแบบของคานยื่นบริเวณโครงจับยึดล้อหลัง และอีกส่วนติดตั้งที่ล้อหลังของจักรยาน เมื่อจักรยานถูกปั่นล้อหลังจะเคลื่อนที่ผ่านโมดูลเพียโซอิเล็กทริก ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างแม่เหล็กที่มีขั้วเดียวกัน ซึ่งจะทําให้ส่วนปลายของเพียโซอิเล็กทริกเกิดการกระจัดและการสั่นสะเทือน การกระจัดนี้จะถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเพียโซอิเล็กทริก

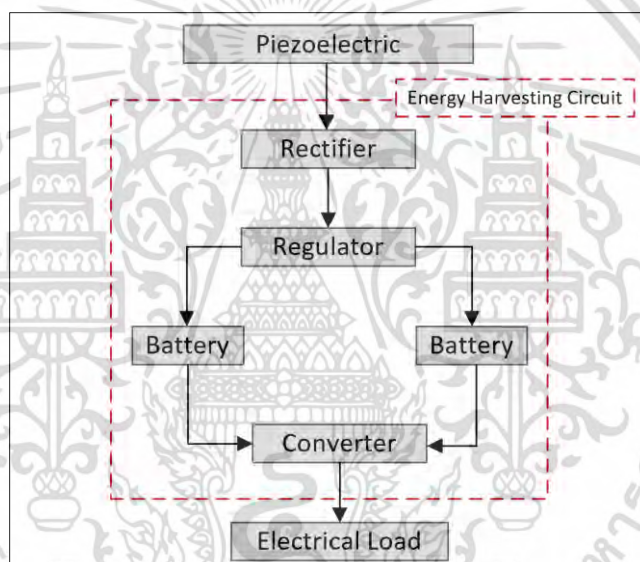
ความถี่ธรรมชาติของวัสดุคือความถี่ที่วัสดุจะสั่นด้วยแอมพลิจูดสูงสุดเมื่อได้รับแรงกระทำที่ตรงกับความถี่นี้ การลดความถี่ธรรมชาติของเพียโซอิเล็กทริกจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงาน การติดตั้งแม่เหล็กที่ปลายของโมดูลเพียโซอิเล็กทริกทำให้เกิดผลที่คล้ายกับการเพิ่มมวลที่ปลายของวัสดุ ซึ่งจะลดความถี่ธรรมชาติลง การลดความถี่ธรรมชาติทำให้เพียโซอิเล็กทริกสามารถตอบสนองต่อแรงกระทำที่มีความถี่ต่ำลงได้ดีขึ้น และเพิ่มความต่อเนื่องของการสั่นสะเทือน เมื่อเพียโซอิเล็กทริกสั่นสะเทือนอย่างต่อเนื่อง การเก็บเกี่ยวพลังงานก็จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 4.8 จักรยานออกกำลังกาย สังกายที่ใช้ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดได้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.8 แสดงการประยุกต์ใช้ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกกับระบบจำลอง จักรยานออกก าสาย โดยการดัดแปลงจักรยานที่ไม่ได้ใช้งานแล้วให้กลายเป็นจักรยานที่ปั่นอยู่กับที่ เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อพลังงานที่ผลิตได้ ระบบนี้ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักหลายส่วน จักรยานที่ถูกดัดแปลงโดยการติดตั้งโครงจับยึดล้อหลังเพื่อให้จักรยานไม่เคลื่อนที่ วงจรเก็บเกี่ยว พลังงานที่ติดตั้งบนจักรยานทำหน้าที่รวบรวมและแปลงพลังงานที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกให้เป็น พลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้งานได้ อุปกรณ์วัดความเร็วที่ติดตั้งบนจักรยานท านหน้าที่วัดความเร็วการปั่น ของจักรยานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อพลังงานที่ผลิตได้ โมดูลเพียโซอิเล็กทริกที่ติดตั้ง แบบคานยื่นบริเวณซี่ล้อหลังของจักรยานทำหน้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าเมื่อเกิดการกระจัดของวัสดุ แม่เหล็กที่ติดตั้งอยู่ที่ปลายโมดูลเพียโซอิเล็กทริกและบริเวณโครงจับยึดล้อหลังท านหน้าที่สร้างแรงผลัก กันเมื่อมีการเคลื่อนที่ผ่านของซี่ล้อหลัง แรงผลักกันนี้ท าให้สนปลายของวัสดุเกิดการกระจัดและผลิต พลังงานไฟฟ้าได้



รูปที่ 4.9 กระบวนการท างานของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน

กระบวนการท างานของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานแสดงดังรูปที่ 4.9 เริ่มต้นจากการผลิตพลังงาน ไฟฟ้าโดยเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งสามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าจากแรงกระทำหรือการสั่นสะเทือน ต่อมา พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกจะถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยวงจรเรียง กระแสเพื่อให้สามารถใช้งานได้ในระบบไฟฟ้า จากนั้นไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จะถูกควบคุมแรงดันโดย วงจรควบคุมแรงดันเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมและเสถียร การเก็บ พลังงานไฟฟ้าจะด เนินการโดยการส่งพลังงานไปยังแบตเตอรี่ 2 โมดูล เพื่อใช้ในภายหลังเมื่อมีความ ต้องการใช้งานพลังงานไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมกับ การใช้งานของโหลดไฟฟ้าโดยวงจรแปลงไฟฟ้ากำลังไฟฟ้า สุดท้ายพลังงานไฟฟ้าที่แปลงแล้วจะถูก จ่ายให้กับโหลดไฟฟ้าเพื่อน ำไปใช้งานต่าง ๆ ตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของรูปแบบการเชื่อมต่อและความเร็วในการหมุนต่อปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก โดยการทดลองแบ่งออกเป็นสองรูปแบบการเชื่อมต่อคือการต่อแบบขนานและการต่อแบบอนุกรม ในแต่ละรูปแบบมีการทดสอบที่ความเร็วการหมุนสองระดับคือ 75 รอบต่อนาที (rpm) และ 120 rpm การต่อแบบขนานนั้น โมดูลเพียโซอิเล็กทริกหลายโมดูลถูกเชื่อมต่อกันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าคงที่แต่เพิ่มกระแสไฟฟ้า ส่วนการต่อแบบอนุกรม โมดูลเพียโซอิเล็กทริกหลายโมดูลถูกเชื่อมต่อกันเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามจำนวนโมดูลที่เพิ่มขึ้น โดยผลการทดลองจะเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกิโลวัตต์ที่ได้จากการทดลองในแต่ละรูปแบบการเชื่อมต่อและความเร็วการหมุน

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองปริมาณไฟฟ้าจากอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก ที่ความเร็วเฉลี่ย 75 rpm

จำนวนโมดูลเพียโซอิเล็กทริก และรูปแบบการเชื่อมต่อ		แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (uW)
ต่อขนาน	1 โมดูล	14.4	0.09	8.10
	2 โมดูล	24.1	0.10	10.10
	3 โมดูล	38.9	0.12	14.40
	4 โมดูล	45.6	0.13	16.90
ต่ออนุกรม	2 โมดูล	17.1	0.19	36.10
	3 โมดูล	17.3	0.28	78.40
	4 โมดูล	17.6	0.37	136.90

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองปริมาณไฟฟ้าจากอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก ที่ความเร็วเฉลี่ย 120 rpm

จำนวนโมดูลเพียโซอิเล็กทริก และรูปแบบการเชื่อมต่อ		แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (uW)
ต่อขนาน	1 โมดูล	22.5	0.10	10.10
	2 โมดูล	30.3	0.11	12.10
	3 โมดูล	44.1	0.14	19.60
	4 โมดูล	48.7	0.15	22.50
ต่ออนุกรม	2 โมดูล	23.6	0.23	52.90
	3 โมดูล	24.2	0.33	108.90
	4 โมดูล	26.4	0.42	176.40

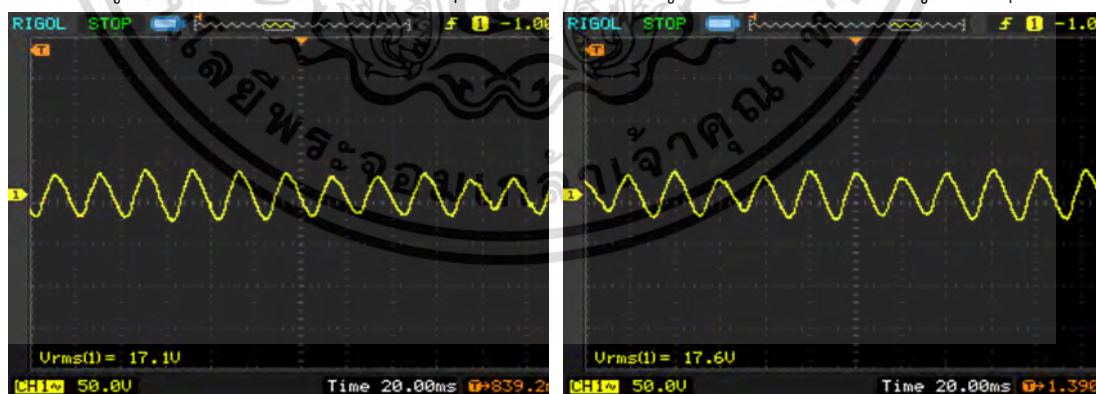
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.6 และ 4.7 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนโมดูลเพียโซอิเล็กทริก แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นทั้งในรูปแบบการต่อแบบขนานและอนุกรม ที่ความเร็ว 75 rpm การต่อแบบขนานให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มจาก 14.4 V เป็น 45.6 V และกำลังไฟฟ้าเพิ่มจาก 8.10 μW เป็น 16.90 μW ในขณะที่การต่อแบบอนุกรมให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มจาก 17.1 V เป็น 17.6 V แต่ กำลังไฟฟ้าเพิ่มจาก 36.10 μW เป็น 136.90 μW

ในส่วนของการปั่นจักรยานที่ความเร็ว 120 rpm การต่อแบบขนานให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มจาก 22.5 V เป็น 48.7 V และกำลังไฟฟ้าเพิ่มจาก 10.10 μW เป็น 22.50 μW ในขณะที่การต่อแบบอนุกรมให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มจาก 23.6 V เป็น 26.4 V แต่ กำลังไฟฟ้าเพิ่มจาก 52.90 μW เป็น 176.40 μW สรุปได้ว่าการเพิ่มจำนวนโมดูลเพียโซอิเล็กทริกและการปรับความเร็วการหมุนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยการเลือกวิธีการเชื่อมต่อและการปรับความเร็วที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าได้ ตัวอย่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของโมดูลเพียโซอิเล็กทริกที่ความเร็วเฉลี่ย 75 rpm แสดงดังรูปที่ 4.10



(ก) โมดูลเพียโซอิเล็กทริกสองตัวต่ออนุกรม

(ข) โมดูลเพียโซอิเล็กทริกสี่โมดูลต่ออนุกรม



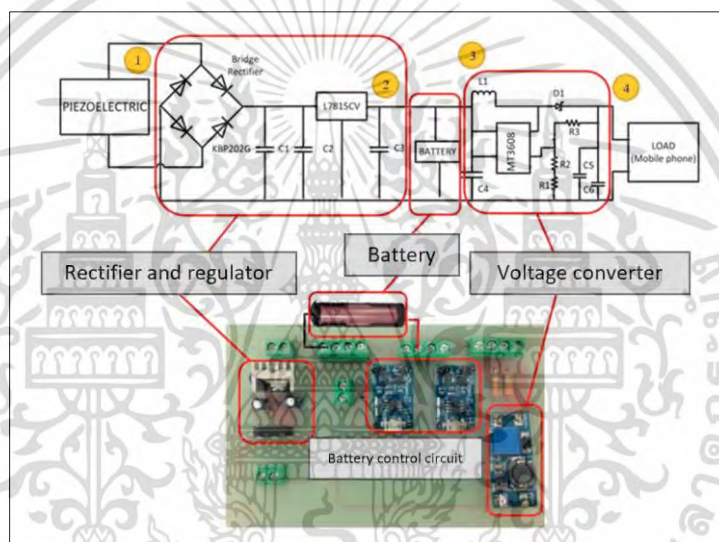
(ค) โมดูลเพียโซอิเล็กทริกสองโมดูลต่อขนาน

(ง) โมดูลเพียโซอิเล็กทริกสี่โมดูลต่อขนาน

รูปที่ 4.10 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า ของโมดูลเพียโซอิเล็กทริกที่ความเร็วเฉลี่ย 75 rpm

วงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือ เพียโซอิเล็กทริกซึ่งทำหน้าที่ผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากแรงกระทำหรือการสั่นสะเทือน ต่อมาวงจรเรียงจะทำการแปลงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและจะถูกควบคุมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยวงจรควบคุมแรงดันซึ่งมีการใช้ตัวเก็บประจุเพื่อกรองและรักษาเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า จากนั้นพลังงานไฟฟ้าที่ถูกควบคุมแรงดันแล้วจะถูกเก็บไว้ในแบตเตอรี่เพื่อใช้ในภายหลัง เมื่อมีการใช้งานพลังงานไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการใช้งานของโหลดต่าง ๆ โดยวงจรแปลงแรงดันซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ ไดโอด ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่เสถียรและเหมาะสม พลังงานไฟฟ้าที่ถูกแปลงแล้วจะถูกจ่ายให้กับโหลดไฟฟ้า เช่น โทรศัพท์มือถือ สำหรับบท ทนึ่งการวัด สามารถวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าในแต่ละจุดของวงจรเพื่อประเมินประสิทธิภาพการแปลงพลังงานและการเก็บเกี่ยวพลังงานในแต่ละขั้นตอน วงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกและต ทนึ่งการวัดในระบบแสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 วงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกและต ทนึ่งการวัด

ในการออกแบบระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกและการจัดการพลังงานที่เก็บได้จากแบตเตอรี่ มีการใช้แพลตฟอร์มอิเล็กทรอนิกส์แบบโอเพ่นซอร์สอย่าง Arduino เพื่อควบคุมการชาร์จและการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่สองเซลล์ คือ แบตเตอรี่ A และ แบตเตอรี่ B หลักการทำงานของระบบนี้ถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บพลังงานและลดความสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน โดยมีรูปแบบการทำงานดังนี้

สถานการณ์ที่ 1: เมื่อแบตเตอรี่ A มีความจุน้อยกว่าหรือเท่ากับ 50% และแบตเตอรี่ B มีความจุมากกว่า 50% Arduino จะสั่งให้แบตเตอรี่ A เก็บพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก ในขณะเดียวกัน แบตเตอรี่ B จะทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้กับโหลด การทำเช่นนี้ช่วยให้แบตเตอรี่ B ที่มีความจุสูงทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้กับโหลดเพื่อลดการดิสชาร์จกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่มีความจุต่ำ

สถานการณ์ที่ 2: เมื่อแบตเตอรี่ A มีความจุมากกว่า 50% และแบตเตอรี่ B มีความจุน้อยกว่าหรือเท่ากับ 50% Arduino จะสั่งให้แบตเตอรี่ A จ่ายพลังงานให้กับโหลด และให้แบตเตอรี่ B เก็บพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก การจัดการในรูปแบบนี้ช่วยให้แบตเตอรี่ B ที่มีความจุต่ำสามารถเก็บพลังงานได้มากขึ้นในขณะที่แบตเตอรี่ A ที่มีความจุสูงจ่ายพลังงานให้กับโหลด

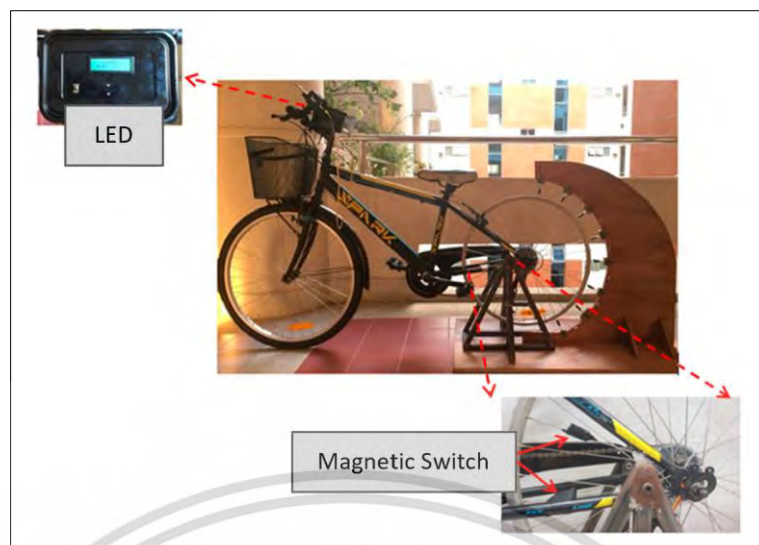
สถานการณ์ที่ 3: เมื่อแบตเตอรี่ A และ B มีความจุน้อยกว่าหรือเท่ากับ 50% Arduino จะสั่งให้แบตเตอรี่ A เก็บพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก ส่วนแบตเตอรี่ B จะไม่ทำการเก็บพลังงานหรือจ่ายพลังงานให้กับโหลด เพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บพลังงานของระบบ

สถานการณ์ที่ 4: เมื่อแบตเตอรี่ A และ B มีความจุมากกว่า 50% Arduino จะสั่งให้แบตเตอรี่ A จ่ายพลังงานให้กับโหลด ในขณะที่แบตเตอรี่ B รักษาความจุเพื่อใช้ในกรณีที่มีความต้องการพลังงานสูงหรือในสถานการณ์ที่แบตเตอรี่ A ต้องการการชาร์จ

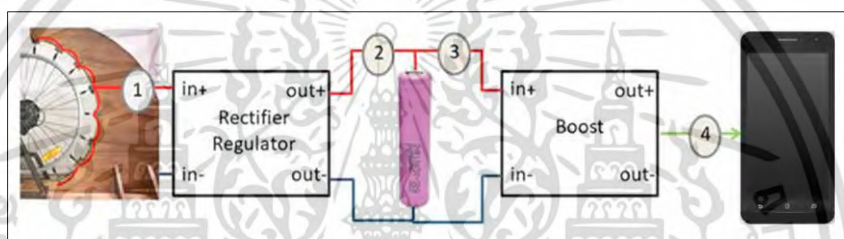
หลักการท างานของระบบนี้ถูกออกแบบมาเพื่อลดการสูญเสียพลังงานและยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยใช้ Arduino ในการควบคุมการสลับการชาร์จและการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่สองเซลล์ตามสถานะความจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์

ในส่วนของอุปกรณ์วัดความเร็วที่ใช้ในระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากการปั่นจักรยาน ประกอบด้วยสวิตช์แม่เหล็กที่ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณการหมุนของล้อหลัง ตามที่แสดงในรูปที่ 4.12 สวิตช์แม่เหล็กนี้ประกอบด้วยแม่เหล็กสองอันวางอยู่บริเวณซี่ล้อหลังของจักรยาน เมื่อจักรยานถูกปั่น แม่เหล็กจะหมุนผ่านสวิตช์ ทำให้เกิดการตรวจจับสัญญาณซึ่งถูกส่งไปยัง Arduino เพื่อคำนวณความเร็วและแสดงผลบนจอ LCD ที่ติดตั้งอยู่ด้านหน้าของจักรยาน ระบบนี้ออกแบบความเร็วรอบเป็นสามระดับคือ 100 120 และ 140 รอบต่อนาที การทดลองนี้ทำการวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าในจุดวัดทั้งหมดสี่จุดดังที่แสดงในรูปที่ 4.13 จุดที่ 1 คือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากเพียโซอิเล็กทริกที่เชื่อมต่อแบบขนาน จุดที่ 2 คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหลังวงจรควบคุมเรียงกระแส จุดที่ 3 คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกจากแบตเตอรี่ และจุดที่ 4 คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหลังจากผ่านวงจรแปลงผันก าลัไฟฟ้า

ในการศึกษานี้ยังมีการพิจารณาผลกระทบของระยะห่างระหว่างแม่เหล็กที่ติดตั้งบนล้อจักรยานและอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก โดยทำการทดสอบที่ระยะห่าง 3 ระดับคือ 6 มม. 9 มม. และ 12 มม. ผลลัพธ์ของการทดลองแสดงในตารางที่ 4.8, 4.9, และ 4.10 ตามล าดับ ข้อมูลเหล่านี้จะช่วยให้เราสามารถวิเคราะห์และปรับปรุงการออกแบบระบบเก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการแปลงพลังงานกลจากการปั่นจักรยานเป็นพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 4.12 อุปกรณ์วัดความเร็วที่ติดตั้งบนจักรยานออกก าลังกายแบบเก็บเกี่ยวพลังงาน



รูปที่ 4.13 จุดตรวจวัดปริมาณไฟฟ้าภายในวงจรการเก็บเกี่ยวพลังงาน

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองวัดปริมาณไฟฟ้าที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ที่ระยะแม่เหล็ก 6 มม.

ตำแหน่งที่วัดค่า		ความเร็วเฉลี่ย (รอบต่อนาที)		
		100	120	140
จุดที่ 1	แรงดันไฟฟ้า (V)	5.67	6.03	5.11
	กระแสไฟฟ้า (mA)	18.00	20.00	14.00
	ก าลังไฟฟ้า (mW)	102.10	120.60	71.54
จุดที่ 2	แรงดันไฟฟ้า (V)	3.76	4.16	3.92
	กระแสไฟฟ้า (mA)	8.00	9.00	8.00
	ก าลังไฟฟ้า (mW)	30.08	37.44	31.36
จุดที่ 3	แรงดันไฟฟ้า (V)	3.92	3.92	3.92
	กระแสไฟฟ้า (mA)	88.00	88.00	88.00
	ก าลังไฟฟ้า (mW)	345.00	345.00	345.00
จุดที่ 4	แรงดันไฟฟ้า (V)	5.68	5.68	5.68
	กระแสไฟฟ้า (mA)	88.00	88.00	88.00
	ก าลังไฟฟ้า (mW)	500.00	500.00	500.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองวัดปริมาณไฟฟ้าที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ที่ระยะแม่เหล็ก 9 มม.

ตำแหน่งที่วัดค่า		ความเร็วเฉลี่ย (รอบต่อนาที)		
		100	120	140
จุดที่ 1	แรงดันไฟฟ้า (V)	5.20	6.09	5.15
	กระแสไฟฟ้า (mA)	14.00	20.00	15.00
	ก าลังไฟฟ้า (mW)	72.80	121.80	77.25
จุดที่ 2	แรงดันไฟฟ้า (V)	3.52	4.20	3.20
	กระแสไฟฟ้า (mA)	8.00	9.00	8.00
	ก าลังไฟฟ้า (mW)	28.16	37.80	25.60
จุดที่ 3	แรงดันไฟฟ้า (V)	3.92	3.92	3.92
	กระแสไฟฟ้า (mA)	88.00	88.00	88.00
	ก าลังไฟฟ้า (mW)	345.00	345.00	345.00
จุดที่ 4	แรงดันไฟฟ้า (V)	5.68	5.68	5.68
	กระแสไฟฟ้า (mA)	88.00	88.00	88.00
	ก าลังไฟฟ้า (mW)	500.00	500.00	500.00

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองวัดปริมาณไฟฟ้าที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ที่ระยะแม่เหล็ก 12 มม.

ตำแหน่งที่วัดค่า		ความเร็วเฉลี่ย (รอบต่อนาที)		
		100	120	140
จุดที่ 1	แรงดันไฟฟ้า (V)	5.25	5.69	5.14
	กระแสไฟฟ้า (mA)	14.00	18.00	15.00
	ก าลังไฟฟ้า (mW)	73.50	102.40	77.10
จุดที่ 2	แรงดันไฟฟ้า (V)	3.36	4.16	3.20
	กระแสไฟฟ้า (mA)	8.00	9.00	8.00
	ก าลังไฟฟ้า (mW)	26.88	37.44	25.60
จุดที่ 3	แรงดันไฟฟ้า (V)	3.92	3.92	3.92
	กระแสไฟฟ้า (mA)	88.00	88.00	88.00
	ก าลังไฟฟ้า (mW)	345.00	345.00	345.00
จุดที่ 4	แรงดันไฟฟ้า (V)	5.68	5.68	5.68
	กระแสไฟฟ้า (mA)	88.00	88.00	88.00
	ก าลังไฟฟ้า (mW)	500.00	500.00	500.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลลัพธ์จะเห็นว่า ระยะห่างแม่เหล็กมีผลต่อแรงกระทำที่เกิดขึ้นบนเพียโซอิเล็กทริก แรงที่เกิดขึ้นมาจากการกระจัดของเพียโซอิเล็กทริกเมื่อแม่เหล็กที่ติดตั้งบนล้อจักรยานหมุนผ่าน แม่เหล็กที่ติดตั้งบนเพียโซอิเล็กทริก ระยะห่างที่เหมาะสมจะทำให้เกิดแรงกระทำที่เพียงพอในการ กระตุ้นเพียโซอิเล็กทริกให้เกิดการสั่นสะเทือนและผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น ระยะห่างที่ 9 มม. เป็นระยะที่ให้แรงกระทำ ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกระตุ้นเพียโซอิเล็กทริก ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งส่งผลให้ วัสดุไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงที่สุด

ความเร็วรอบมีผลโดยตรงต่ออัตราการเกิดแรงกระทำต่อเพียโซอิเล็กทริก ความเร็วรอบที่ เพิ่มขึ้น ทำให้เพียโซอิเล็กทริกถูกกระตุ้นบ่อยขึ้น ซึ่งส่งผลให้ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น ความเร็ว รอบที่ 120 rpm ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการผลิตพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากเป็นความเร็วที่เพียงพอในการ กระตุ้นเพียโซอิเล็กทริกอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ โดยไม่ทำให้เกิดการกระตุ้นที่เร็วเกินไปซึ่งอาจทา ให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ไม่เสถียรและประสิทธิภาพการผลิตพลังงานลดลง

การเลือกตำแหน่งวัดที่เหมาะสมช่วยให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของระบบได้อย่าง แม่นยำ จุดที่ 1 แสดงการผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากเพียโซอิเล็กทริก จุดที่ 2 แสดงการแปลง แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหลังวงจรควบคุมเรียงกระแส จุดที่ 3 แสดงการเก็บพลังงานในแบตเตอรี่ และ จุดที่ 4 แสดงการแปลงแรงดันไฟฟ้าสำหรับการใช้งานโหลด และการวัดในแต่ละจุดช่วยให้สามารถ ประเมินและปรับปรุงประสิทธิภาพของแต่ละขั้นตอนในกระบวนการเก็บเกี่ยวพลังงานได้ ระยะห่าง แม่เหล็กที่ 9 มม. และความเร็วรอบที่ 120 rpm เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด ส าหรับการผลิตพลังงาน ไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากให้แรงกระทำที่เหมาะสมและการกระตุ้นที่สม่ำเสมอ ทำให้เกิด การสั่นสะเทือนที่มีประสิทธิภาพและผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด

4.3 การประยุกต์ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกสำหรับจักรยานเคลื่อนที่

การประยุกต์แบบสุดท้ายในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนขณะปั่นจักรยานนี้ ถูก ออกแบบให้ติดตั้งโมดูลเพียโซอิเล็กทริกบนดุมล้อหน้าและบังโคลนล้อหลังของจักรยาน โดยอาศัย แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากโครงสร้างแม่เหล็กที่ติดตั้งไว้กับล้อ อุปกรณ์เหล่านี้ประกอบด้วยวงจรเพีย โซอิเล็กทริก แม่เหล็ก ส่วนจับยึดที่ผลิตโดยเครื่องพิมพ์แบบ 3 มิติ เซ็นเซอร์ตรวจจับ และกล่อง ควบคุมที่ติดตั้งในตะกร้าจักรยาน วงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานนี้ถูกควบคุมโดยโมดูล Arduino ESP 32 Wi-Fi ซึ่งสามารถควบคุมผ่านแอปพลิเคชันมือถือได้ นอกจากนี้ยังมีแบตเตอรี่ขนาด 3200 mAh 5 V ที่จ่ายพลังงานให้กับเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งบนจักรยาน อาทิเช่น เซ็นเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิ เซ็นเซอร์อัลตราโซนิกเพื่อวัดระยะวัตถุและแจ้งเตือน เซ็นเซอร์ตรวจจับฝุ่นและก๊าซอันตราย และรีเลย์ ส ำหรับควบคุมไดโอดแปลงแสงที่ติดบริเวณด้านหน้า

การทดลองนี้มีการติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกสองจุดบนจักรยาน คือบริเวณดุมล้อหน้าและบังโคลนล้อหลัง ดุมล้อหน้าของจักรยานได้รับการออกแบบให้บรรจุอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกจำนวน 8 ชิ้นในแต่ละด้าน ส่วนปลายของอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกแต่ละตัวมีแถบแม่เหล็กสำหรับสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าบนแม่เหล็กอีก 4 ตัวที่วางอยู่บนฝั่งตรงข้ามที่ล้อด้านใน ส่งผลให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสัมผัสเนื่องระหว่างการปั่นจักรยาน ซึ่งอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ล้อหน้าใช้อุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกทั้งหมด 16 ชิ้นและแม่เหล็กทั้งหมด 24 ชิ้น

นอกจากนี้ บริเวณบังโคลนล้อหลังของจักรยานได้รับการออกแบบให้ติดตั้งแม่เหล็กกับอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก 7 ชิ้นในแต่ละด้าน โดยมีระยะห่าง 1.3 ซม. ระหว่างแม่เหล็ก 2 อันที่อยู่ตรงข้ามในแต่ละด้านของล้อที่ก าสเคลื่อนที่ โดยรวมแล้ว มีแม่เหล็ก 18 ชิ้นและอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก 14 ชิ้นติดตั้งอยู่ที่บริเวณล้อหลัง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ระบบนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนขณะปั่นจักรยาน ซึ่งสามารถนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้ไปใช้กับเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ต่าง ๆ บนจักรยาน



(ก) ระยะห่างในการติดตั้งโมดูลเพียโซอิเล็กทริกที่ล้อหน้า



(ข) ระยะการติดตั้งโมดูลเพียโซอิเล็กทริกที่บังโคลนล้อหลัง

รูปที่ 4.14 การติดตั้งโมดูลเพียโซอิเล็กทริกบนจักรยาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองนี้ถูกออกแบบมาเพื่อวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และพลังงานที่ผลิตได้จากเพียโซอิเล็กทริกที่ติดตั้งบนจักรยาน โดยใช้แม่เหล็กที่ติดตั้งบนล้อเพื่อสร้างแรงกระทำ กับเพียโซอิเล็กทริก แรงดันไฟฟ้าถูกวัดที่สี่จุด ได้แก่ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหลังวงจรเรียงกระแส หลังตัวเก็บประจุ หลังแบตเตอรี่ และหลังตัวแปลงผันแรงดันไฟฟ้า โดยการทดลองนี้ใช้ความเร็วการหมุนที่แตกต่างกันสามระดับคือ 30 60 และ 90 รอบต่อนาที และวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และพลังงานเฉลี่ยในแต่ละจุดวัด

ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.11 โดยพบว่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละความเร็วการหมุน โดยทั่วไปแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วการหมุนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยมีแนวโน้มสูงขึ้นที่จุดวัดหลังตัวเก็บประจุและแบตเตอรี่ เนื่องจากตัวเก็บประจุช่วยท ให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้ามีความคงที่มากขึ้น แม้ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยจะสูงขึ้นแต่ยังมีช่วงที่ไม่เสถียรซึ่งอาจเป็นผลจากแรงในการปั่นจักรยาน และช่วงหน้าสัมผัสแม่เหล็กที่ไม่เสถียร

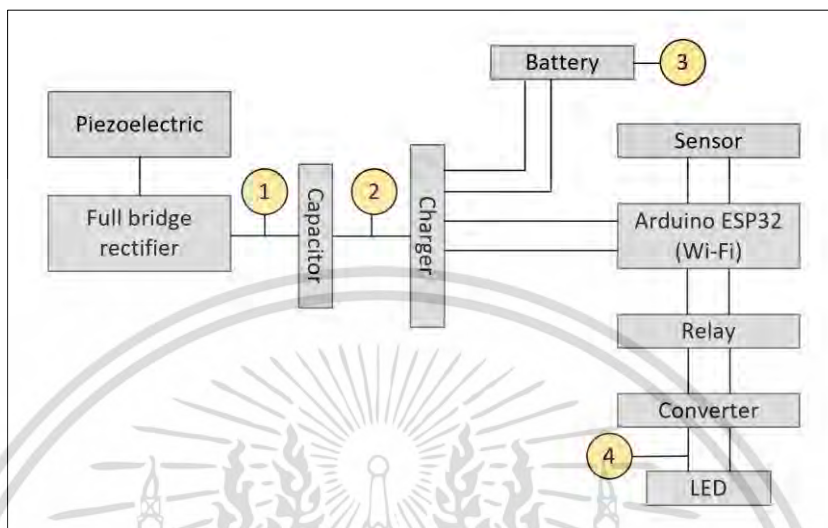
ตารางที่ 4.11 ปริมาณไฟฟ้าที่ได้จากการปั่นจักรยานด้วยความเร็วต่าง ๆ

จุดที่ทำการวัด		ความเร็วในการขี่จักรยาน (รอบต่อนาที)		
		30	60	90
จุดที่ 1	แรงดันไฟฟ้า (V)	1.93	2.81	2.62
	กระแสไฟฟ้า (mA)	0.37	1.72	1.79
	กำลังไฟฟ้า (mW)	0.71	4.83	4.69
จุดที่ 2	แรงดันไฟฟ้า (V)	2.07	7.59	7.04
	กระแสไฟฟ้า (mA)	0.33	0.63	0.63
	กำลังไฟฟ้า (mW)	0.68	4.78	4.56
จุดที่ 3	แรงดันไฟฟ้า (V)	3.80	3.80	3.80
	กระแสไฟฟ้า (mA)	1.46	1.46	1.46
	กำลังไฟฟ้า (mW)	5.55	5.55	5.55
จุดที่ 4	แรงดันไฟฟ้า (V)	10.00	10.00	10.00
	กระแสไฟฟ้า (mA)	0.50	0.50	0.50
	กำลังไฟฟ้า (mW)	5.00	5.00	5.00

จากการวัดพบว่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละความเร็วเป็นผลมาจากแรงผลักของแม่เหล็กที่ทำให้เพียโซอิเล็กทริกเกิดการสั่นสะเทือนและผลิตแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ตัวเก็บประจุจะได้สัญญาณที่คงที่มากขึ้น แต่ยังคงมีช่วงที่ไม่เสถียร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีการตอบสนองแบบระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่สองที่มีการหน่วงสั้นและเสียงเรียกเข้า การทดสอบนี้ช่วยให้เห็นภาพรวมของประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานและความเสถียรของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกบนจักรยาน ตัวอย่างรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตำแหน่ง 1 และตำแหน่ง 2 ที่ความเร็วต่าง ๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.16



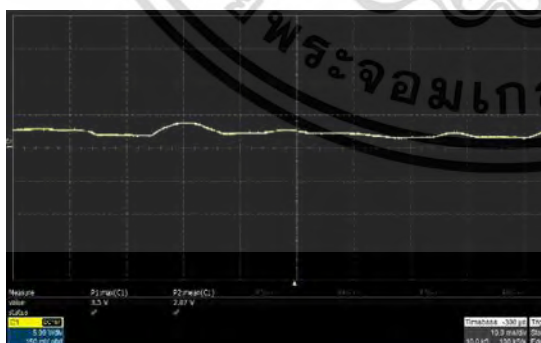
รูปที่ 4.15 จุดวัดในการทดลองจักรยาน



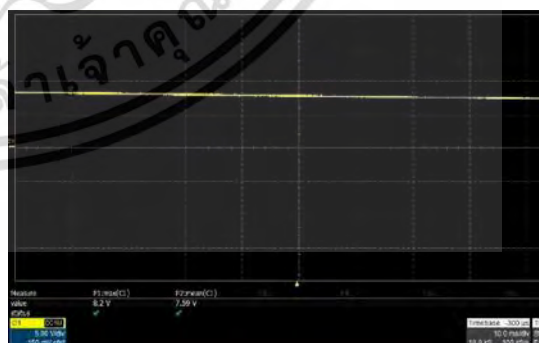
(ก) ต. ตำแหน่ง 1 ที่ความเร็ว 30 รอบต่อนาที



(ข) ต. ตำแหน่งที่ 2 ที่ความเร็ว 30 รอบต่อนาที

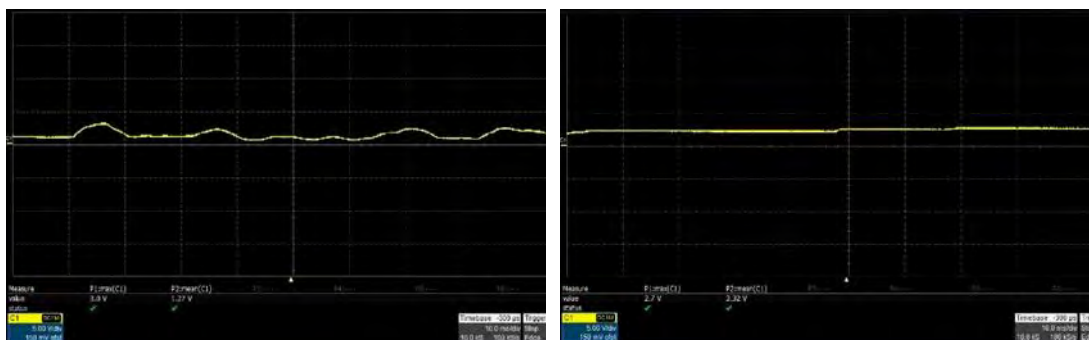


(ค) ต. ตำแหน่ง 1 ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที



(ง) ต. ตำแหน่ง 2 ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) ต. ท. 1 ที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที (ข) ต. ท. 2 ที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที

รูปที่ 4.16 สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ ต. ท. 1 และ ต. ท. 2 ที่ความเร็วต่างๆ

การทดลองนี้ศึกษาผลกระทบของพื้นผิวถนนและน้ำหนักบรรทุกต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริกที่ติดตั้งบนจักรยาน โดยใช้ความเร็วการหมุนที่แตกต่างกันคือ 30 60 และ 90 รอบต่อนาที ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.13 สำหรับตารางที่ 4.12 พบว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะสูงขึ้นเมื่อความเร็วการหมุนเพิ่มขึ้น โดยพื้นผิวถนนที่ขรุขระที่สุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด สาเหตุมาจากแรงสั่นสะเทือนที่มากขึ้นเมื่อปั่นบนพื้นผิวขรุขระ ทำให้เพียโซอิเล็กทริกสามารถแปลงแรงสั่นสะเทือนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น พื้นผิวถนนเรียบให้กำลังไฟฟ้าต่ำที่สุด เนื่องจากมีแรงสั่นสะเทือนน้อยกว่า

ตารางที่ 4.12 ปริมาณไฟฟ้าที่ได้จากการปั่นจักรยานด้วยความเร็วต่าง ๆ บนพื้นผิวถนนต่าง ๆ

เงื่อนไขการวัด		ความเร็วในการขี่จักรยาน (รอบต่อนาที)		
		30	60	90
พื้นผิวถนนเรียบ	แรงดันไฟฟ้า (V)	8.54	11.44	9.73
	กระแสไฟฟ้า (mA)	0.88	1.15	0.95
	ก. กำลังไฟฟ้า (mW)	7.53	13.11	9.20
พื้นผิวถนนที่มีความขรุขระปานกลาง	แรงดันไฟฟ้า (V)	10.69	11.49	11.49
	กระแสไฟฟ้า (mA)	0.86	1.18	0.98
	ก. กำลังไฟฟ้า (mW)	9.21	13.59	11.21
พื้นผิวถนนขรุขระมาก มีหินและกรวด	แรงดันไฟฟ้า (V)	10.46	12.92	10.74
	กระแสไฟฟ้า (mA)	0.92	1.17	1.25
	ก. กำลังไฟฟ้า (mW)	9.67	15.08	13.38

ในตารางที่ 4.13 การวัดผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกันในช่วง 40–50 กก. 50–65 กก. และ 65–80 กก. พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงน้ำหนักใกล้เคียงกัน โดยความเร็วในการหมุนที่ 60 รอบต่อนาทีให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์ก่อนหน้านี้ แสดงให้เห็นว่า น้ำหนักบรรทุกทุกมีผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อยเมื่อเทียบกับความเร็วในการหมุนที่มีผลกระทบมากกว่า

ตารางที่ 4.13 ปริมาณไฟฟ้าที่ได้จากการปั่นจักรยานด้วยความเร็วต่างๆ ในช่วงน้ำหนักต่างๆ

เงื่อนไขการวัด		ความเร็วในการขี่จักรยาน (รอบต่อนาที)		
		30	60	90
น้ำหนัก 40-50 กก.	แรงดันไฟฟ้า (V)	8.54	11.49	9.73
	กระแสไฟฟ้า (mA)	0.88	1.18	0.95
	กำลังไฟฟ้า (mW)	7.53	13.59	9.20
น้ำหนัก 50-65 กก.	แรงดันไฟฟ้า (V)	8.21	12.09	9.62
	กระแสไฟฟ้า (mA)	0.92	1.01	0.96
	กำลังไฟฟ้า (mW)	7.57	12.19	9.24
น้ำหนัก 65-80 กก.	แรงดันไฟฟ้า (V)	8.79	11.79	9.39
	กระแสไฟฟ้า (mA)	0.79	1.06	0.73
	กำลังไฟฟ้า (mW)	6.91	12.51	6.92

น้ำหนักบรรทุกของผู้ขี่มีผลกระทบต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าน้อย เนื่องจากน้ำหนักไม่ส่งผลโดยตรงต่อแรงสั่นสะเทือนที่กระทำกับเพียโซอิเล็กทริก แรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการปั่นจักรยานบนพื้นผิวถนนขรุขระเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เพียโซอิเล็กทริกสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น เหตุผลที่น้ำหนักบรรทุกไม่ส่งผลมากเพราะ เพียโซอิเล็กทริกตอบสนองต่อแรงกดและแรงสั่นสะเทือนมากกว่าแรงกดคงที่ ดังนั้นการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจะไม่ทำให้แรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับเพียโซอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในแรงกดที่ไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในแรงสั่นสะเทือนที่เพียโซอิเล็กทริกสามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ในทางกลับกัน ความเร็วการหมุนและสภาพพื้นผิวถนนมีผลกระทบมากกว่า เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วและพื้นผิวถนนทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนที่มากขึ้นและมีความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริก

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะเพื่อการต่อยอดงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาศึกษาการบูรณาการเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง โดยเน้นการวิเคราะห์และประยุกต์ใช้ในหลากหลายสภาพแวดล้อมและการใช้งานต่าง ๆ เช่น พื้นทางเดิน ทางจักรยาน จักรยานออกกำลังกาย และจักรยานเคลื่อนที่ การวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานและการใช้งานวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในระบบต่าง ๆ โดยได้ดำเนินการศึกษาและวิเคราะห์ใน 5 ส่วนหลัก ดังนี้

1. การวิเคราะห์ทางไฟฟ้า: การศึกษาและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้จากเพียโซอิเล็กทริกพบว่า ความถี่ในการกระตุ้นโมดูลเพียโซอิเล็กทริกส่งผลต่อพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้มากที่สุด เนื่องจากถ้าความถี่กระตุ้นมีค่าตรงกับกับความถี่ธรรมชาติของวัสดุจะทให้เกิดการสั่นพ้องและแปลงพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ค่าความเก็บประจุภายในแปรผันโดยตรงกับพลังงานที่ผลิตได้ ในขณะที่ค่าความต้านทานภายในไม่ส่งผลต่อปริมาณพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการเชื่อมต่อแบบขนานจะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น ส่วนการเชื่อมต่อแบบอนุกรมทำให้กระแสไฟฟ้าสูงขึ้นตามจำนวนโมดูลที่เพิ่มขึ้น

2. การวิเคราะห์ทางกล: การจำลองระบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าความถี่ธรรมชาติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีบทบาทสำคัญต่อการเก็บเกี่ยวพลังงาน เมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงกระตุ้นที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติ จะเกิดการสั่นพ้องซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานจากการสั่นสะเทือนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ การปรับปรุงหรือดัดแปลงโครงสร้างหรือการติดตั้งเพื่อลดความถี่ธรรมชาติของวัสดุจึงเป็นสิ่งที่ไม่ควรทำ สำหรับการประยุกต์ใช้งานเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานสั่นสะเทือนความถี่ต่ำ อาทิเช่น ปรับรูปแบบการจับยึด ปรับระยะการสั่น หรือเพิ่มมวลที่ปลาย ทาให้เพียโซอิเล็กทริกสามารถตอบสนองต่อแรงกระทำที่มีความถี่ต่ำลงได้ดีขึ้น และเพิ่มความต่อเนื่องของการสั่นสะเทือน การเก็บเกี่ยวพลังงานก็จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น

3. การประยุกต์ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกสำหรับระบบไฟส่องสว่างทางเท้า: การติดตั้งเพียโซอิเล็กทริกบนพื้นทางเดินและทางจักรยานที่ติดตั้งสปริงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานได้มากขึ้น สปริงที่ติดตั้งช่วยเพิ่มแรงสั่นสะเทือนและยืดระยะเวลาการสั่นสะเทือนทาให้เพียโซอิเล็กทริกสามารถแปลงแรงสั่นสะเทือนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น การทดลองแสดงให้เห็นว่าพื้นทางเดินและทางจักรยานที่ติดตั้งสปริงสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าการติดตั้งแบบทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การประยุกต์ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกสำหรับจักรยานออกกำลังกาย: การทดลองโดยใช้แม่เหล็กที่มีระยะห่างแตกต่างกัน พบว่าระยะห่างของแม่เหล็กมีผลต่อแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่วัดได้เกิดจากแรงผลักของแม่เหล็กที่กระทำต่อเพียโซอิเล็กทริก ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. การประยุกต์ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกสำหรับจักรยานเคลื่อนที่: การทดลองเพื่อตรวจสอบผลกระทบของพื้นผิวถนนและน้ำหนักบรรทุกต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า พบว่าพื้นผิวถนนที่ขรุขระมากขึ้นสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้นเนื่องจากแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นมีมากกว่า น้ำหนักบรรทุกของผู้ขับขี่มีผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อยเมื่อเทียบกับผลกระทบจากพื้นผิวถนนและความเร็วในการหมุน

ข้อเสนอแนะเพื่อต่อยอดงานวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

1. การปรับปรุงประสิทธิภาพของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก: ควรศึกษาและพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในการแปลงพลังงานการสั่นสะเทือนเป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น พิล์มบาง หรือ โครงสร้างนาโน ซึ่งมีพื้นที่สัมผัสที่มากขึ้นและประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานสูงกว่าเดิม

2. การประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย: ควรทำการศึกษาการใช้ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น ใต้ทะเล หรือในสภาพแวดล้อมที่มีการสั่นสะเทือนสูง นอกจากนี้ควรทดสอบการติดตั้งระบบในอาคารประเภทต่าง ๆ เช่น อาคารสํานักงาน หรือโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความเหมาะสมในการใช้งานจริง

3. การพัฒนาเทคโนโลยีการจัดเก็บพลังงาน: ควรวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการจัดเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น แบตเตอรี่ที่มีความจุสูง หรือระบบการจัดเก็บพลังงานด้วยตัวเก็บประจุ นอกจากนี้ควรศึกษาการรวมระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเข้ากับเทคโนโลยีการจัดเก็บพลังงาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืนของระบบ

4. การเพิ่มการใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์: ควรศึกษาและพัฒนาการใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกในการเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เช่น เซ็นเซอร์ไร้สาย อุปกรณ์สวมใส่อัจฉริยะ หรืออุปกรณ์ IoT เพื่อเพิ่มความสะดวกและประสิทธิภาพในการใช้งานของอุปกรณ์เหล่านี้

5. การศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสังคม: ควรวิจัยผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกและการติดตั้งระบบในพื้นที่ต่าง ๆ นอกจากนี้ควรศึกษาผลกระทบทางสังคม เช่น การยอมรับของผู้ใช้ ผลกระทบต่อสุขภาพ และความปลอดภัยในการใช้งาน เพื่อให้แน่ใจว่าการนำเทคโนโลยีนี้มาใช้จะเป็นประโยชน์และไม่ก่อให้เกิดผลกระทบที่ไม่พึงประสงค์ต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] International Energy Agency (IEA), “World Energy Outlook 2023,” IEA, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> [Accessed: 05-Jan-2024].
- [2] C. T. Tugcu and A. N. Menegaki, “The impact of renewable energy generation on energy security: Evidence from the G7 countries,” *Gondwana Research*, vol. 125, pp. 253-265, 2024.
- [3] Y. Fan, T. Chang, and O. Ranjbar, “Analyzing the degree persistence of shocks to energy security of the G7 countries: Evidence using panel SPSM-quantile unit root test,” *Economic Analysis and Policy*, vol. 82, pp. 389-399, 2024.
- [4] B. Njindan lyke, “Climate change, energy security risk, and clean energy investment,” *Energy Economics*, vol. 129, 2024, 107225.
- [5] K. Khan, A. Khurshid, J. Cifuentes-Faura, and D. Xianjun, “Does renewable energy development enhance energy security?,” *Utilities Policy*, vol. 87, 2024, 101725.
- [6] P. Igeland, L. Schroeder, M. Yahya, Y. Okhrin, and G. S. Uddin, “The energy transition: The behavior of renewable energy stock during the times of energy security uncertainty,” *Renewable Energy*, vol. 221, 2024, 119746.
- [7] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, “Thailand Energy Situation January - July 2023,” Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2023. [Online]. Available: <https://kc.dede.go.th/knowledge-view.aspx?p=478> [Accessed: 05-Jan-2024].
- [8] Z. Xing, Y. Pan, Y. Yang, X. Yuan, Y. Liang, and Z. Huang, “Transfer learning integrating similarity analysis for short-term and long-term building energy consumption prediction,” *Applied Energy*, vol. 365, 2024, 123276.
- [9] X. Cui, M. Lee, C. Koo, and T. Hong, “Energy consumption prediction and household feature analysis for different residential building types using machine learning and SHAP: Toward energy-efficient buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 309, 2024, 113997.
- [10] N. Bucarelli and N. El-Gohary, “Sensor deployment configurations for building energy consumption prediction” *Energy and Buildings*, vol. 308, 2024, 113888.

- [11] H. Xing, S. Husain, M. Simionescu, S. Ghosh, and X. Zhao, "Role of green innovation technologies and urbanization growth for energy demand: Contextual evidence from G7 countries," *Gondwana Research*, vol. 129, pp. 220-238, 2024.
- [12] Y. Yu, N. Zhang, and J. D. Kim, "Impact of urbanization on energy demand: An empirical study of the Yangtze River Economic Belt in China," *Energy Policy*, vol. 139, 2020, 111354.
- [13] A. Yaduvanshi, R. Singh, and R. Kumar, "Population changes and sustainability of energy drive cooling demand related risks in urbanized India," *Energy and Buildings*, vol. 260, 2022, 111891.
- [14] P. Misila, P. Winyuchakrit, and B. Limmeechokchai, "Thailand's long-term GHG emission reduction in 2050: the achievement of renewable energy and energy efficiency beyond the NDC," *Heliyon*, vol. 6, no. 12, 2020, e05720.
- [15] P. Pita, P. Winyuchakrit, and B. Limmeechokchai, "Analysis of factors affecting energy consumption and CO2 emissions in Thailand's road passenger transport," *Heliyon*, vol. 6, no. 10, 2020, e05112.
- [16] W. Chaiyapa, K. Hartley, and D. del Barrio Alvarez, "From end-users to policy designers: Breaking open the black box of energy technocracy in Thailand," *Energy Research & Social Science*, vol. 73, 2021, 101912.
- [17] A. A. Hassan and K. El-Rayes, "Optimizing the integration of renewable energy in existing buildings," *Energy and Buildings*, vol. 238, 2021, 110851.
- [18] N. T. Mbungu, R. M. Naidoo, R. C. Bansal, M. W. Siti, and D. H. Tungadio, "An overview of renewable energy resources and grid integration for commercial building applications," *Journal of Energy Storage*, vol. 29, 2020, 101385.
- [19] C. Reddick, M. Sorin, J.-C. Bonhivers, and D. Laperle, "Waste heat and renewable energy integration in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 211, 2020, 109803.
- [20] A. A. Hassan and K. El-Rayes, "Optimal use of renewable energy technologies during building schematic design phase," *Applied Energy*, vol. 353, pt. A, 2024, 122006.
- [21] T. Wilberforce, A. G. Olabi, E. T. Sayed, M. Mahmoud, A. H. Alami, and M. A. Abdelkareem, "The state of renewable energy source envelopes in urban areas," *International Journal of Thermofluids*, vol. 21, 2024, 100581.

- [22] S. Keyuraphan, P. Thanarak, N. Ketjoy, and W. Rakwichian, "Subsidy schemes of renewable energy policy for electricity generation in Thailand," *Procedia Engineering*, vol. 32, pp. 440-448, 2012.
- [23] V. N. Xuan, L. M. Huong, N. T. P. Thu, and P. X. Hoa, "Carbon dioxide emissions, population, foreign direct investment, and renewable energy nexus: New insights from Thailand," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 4812-4823, 2024.
- [24] Y. Yoo and Y. Ha, "Market attractiveness analysis of battery energy storage systems in Indonesia, Malaysia, the Philippines, Thailand, and Vietnam," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 191, 2024, 114095.
- [25] P. Chandra and A. Dong, "Valuation of energy harvesting technologies — Insights for technology managers," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 6987-6998, 2022.
- [26] D. Hao, L. Qi, A. M. Tairab, A. Ahmed, A. Azam, D. Luo, Y. Pan, Z. Zhang, and J. Yan, "Solar energy harvesting technologies for PV self-powered applications: A comprehensive review," *Renewable Energy*, vol. 188, pp. 678-697, 2022.
- [27] H. Liu, H. Fu, L. Sun, C. Lee, and E. M. Yeatman, "Hybrid energy harvesting technology: From materials, structural design, system integration to applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 137, 2021, 110473.
- [28] H. Pan, L. Qi, Z. Zhang, and J. Yan, "Kinetic energy harvesting technologies for applications in land transportation: A comprehensive review," *Applied Energy*, vol. 286, 2021, 116518.
- [29] L. Qi, J. Song, Y. Wang, M. Yi, Z. Zhang, and J. Yan, "Mechanical motion rectification-based electromagnetic vibration energy harvesting technology: A review," *Energy*, vol. 289, 2024, 130030.
- [30] M. Gholikhani, H. Roshani, S. Dessouky, and A. T. Papagiannakis, "A critical review of roadway energy harvesting technologies," *Applied Energy*, vol. 261, 2020, 114388.
- [31] A. Brambilla, E. Gasparri, L. Zolfaghari, R. Keshavarzi, and A. Andaloro, "On the applicability of atmospheric water harvesting technologies on building facades: A critical review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 366, 2022, 132809.

- [32] K. Calautit and C. Johnstone, “State-of-the-art review of micro to small-scale wind energy harvesting technologies for building integration,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 20, 2023, 100457.
- [33] J. Joung, S.-Y. Cheon, Y.-K. Kang, M. Kim, J. Park, and J.-W. Jeong, “Impact of external electric resistance on the power generation in the thermoelectric energy harvesting blocks,” *Renewable Energy*, vol. 212, pp. 779-791, 2023.
- [34] M. R. Rashmi, K. T. Sairam, and A. Suresh, “Energy harvesting through piezoelectric technology,” *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [35] S. Li, X. Tang, W. Guo, Y. Li, D. Chen, J. Zhang, Q. Zhang, H. Xu, X. Zhou, Z. Wan, R. Premadasa, H. Lu, Q. Zhang, H. Salehi, and P. Jiao, “Numerical simulations of piezoelectricity and triboelectricity: From materials, structures to devices,” *Applied Materials Today*, vol. 37, 2024, 102092.
- [36] A. Ali, S. Ali, H. Shaukat, E. Khalid, L. Behram, H. Rani, W. A. Altabey, S. A. Kouritem, and M. Noori, “Advancements in piezoelectric wind energy harvesting: A review,” *Results in Engineering*, vol. 21, 2024, 101777.
- [37] P. K. Singh, G. A. Kaur, M. Shandilya, P. Rana, R. Raj, Y. K. Mishra, M. Syväjärvi, and A. Tiwari, “Trends in piezoelectric nanomaterials towards green energy scavenging nanodevices,” *Materials Today Sustainability*, vol. 24, 2023, 100583.
- [38] P. Mukilan, M. Balasubramanian, R. Narayanamoorthi, P. Supraja, and C. Velan, “Integrated solar PV and piezoelectric based torched fly ash tiles for smart building applications with machine learning forecasting,” *Solar Energy*, vol. 258, pp. 404-417, 2023.
- [39] A. Abedanzadeh, R. Ghasempour, and M. H. Jahangir, “Modeling and parametric analysis of the energy generation by the piezoelectric energy harvesters: A case study,” *Energy Reports*, vol. 10, pp. 1875-1887, 2023.



ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MATERIAL PROPERTIES

5.1 PIEZOELECTRIC PROPERTIES

Property	Symbol	Units	PZT 5 A	PZT 5H	PMN-PT
Dielectric Constant (1KHz)	K'_{33}		1900	3800	5400
Dielectric Loss Factor (1KHz)	$\tan \delta_f$	%	1.8	2.0	≤ 0.6
Density	ρ	g/cm ³	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	$\mu\text{Coul/cm}^2$	39.0	39	
Coupling Coefficients	k_{31}		0.65	0.75	
	k_{32}		0.72	0.75	0.91
	k_{33}		0.36	0.43	0.44
	k_{15}		0.48	0.55	0.60
	k_{12}		0.59	0.75	0.35
Piezoelectric Charge (Displacement) Coefficient	d_{31}	Coul/m ² x 10 ⁻¹² (or) m/V x 10 ⁻¹²	-190	-320	-699
	d_{32}		390	650	1540
Piezoelectric Voltage Coefficient	g_{31}	V-m/V x 10 ⁻³	24.0	19.0	32.2
	g_{32}		-11.3	-9.5	-14.6
Elastic Modulus	Y_{11}^E	N/m ² x 10 ¹⁰	6.7	6.3	1.9
	Y_{33}^E		5.3	5.0	1.7
Resonant Thickness	N_r	KHz-cm	211	202	200
Anti-Resonant Thickness	N_a	KHz-cm	236	236	
Thermal Expansion (to Poling)	α	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	ν		0.31	0.31	0.37

Mide'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. Mide 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.

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

There are a number of online resources that provide additional

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

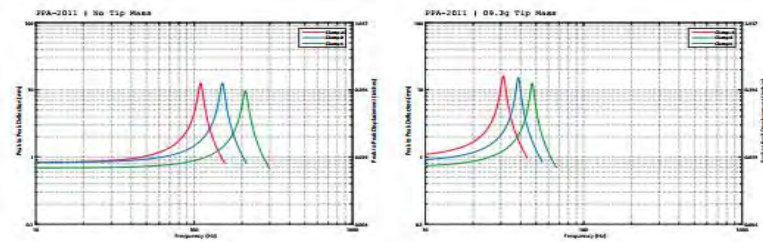


Figure 22: The peak to peak tip displacement is provided for when the piezo is driven with a ± 100 volt signal.

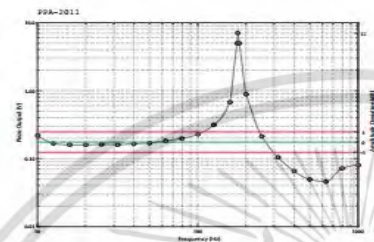


Figure 23: The frequency response of the accelerometer is provided with ± 3 dB error bands to highlight the frequency range where accurate measurement can be expected.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.0 PRODUCT DATA

2.8 PRODUCT: PPA-2011

The PPA-2011 is recommended for energy harvesting and sensing applications. It also exhibits good performance as a resonant actuator. With two piezo layers it generally offers improved performance over the PPA-1011 but at a slightly higher cost.

DESCRIPTION

Performance data for the PPA-2011 is summarized in the following tables and plots. Refer to Section 6 for information on how this data was gathered. Please note that this data is to be used only as reference and that there is some variability from unit to unit. Temperature, clamp conditions, drive quality, all can contribute to additional variability. All test data was gathered at room temperature and with the PPA-9001 clamp kit hardware.

SPECIFICATIONS

Overview	
Capacitance (nF)	190
Mass (g)	4.0
Full Scale Voltage Range (V)	± 120

Layer Material ¹	Thickness (mils)	Thickness (mm)
FR4	3.0	0.08
Copper	1.4	0.03
PZT 5H	6.0	0.15
Copper	1.4	0.03
FR4	3.0	0.08
Copper	1.4	0.03
PZT 5H	6.0	0.15
Copper	1.4	0.03
FR4	3.0	0.08
Total	30.0	0.76

¹Information on material properties is provided in Section 5.

²The layer thicknesses do not perfectly add up to the actual thickness of the product due to the epoxy layers. These epoxy layers can be ignored for finite element analysis however.

Stiffness			
Parameter	Clamp -6	Clamp 0	Clamp 6
Effective Stiffness (N/m)	386.08	573.67	861.10
Effective Mass (g)	0.811	0.607	0.495
Max Tip Deflection (mm)	16.0	15.5	13.0

See Section 4.3 for more information on how to use this data to tune your piezo.

Sensitivity, middle clamp, no added tip mass	
Sensitivity (mV/g)	175.13
Upper Frequency Limit (Hz)	108.0
Resonance (Hz)	178.0
Sensitivity at Resonance (W/g)	7.0

DIMENSIONS

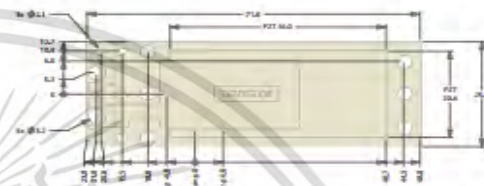


Figure 19: The overall dimensions (mm) for the PPA-2011 are shown. The total thickness is 0.76 mm (30 mils).

PLOTS

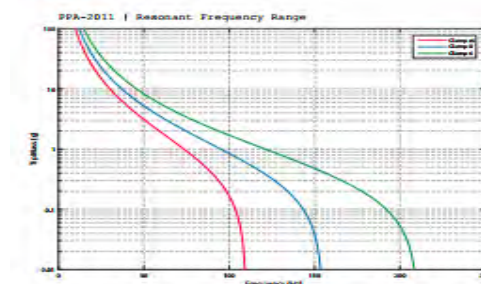


Figure 20: Refer to Section 4.3 for more information on tuning your piezo.

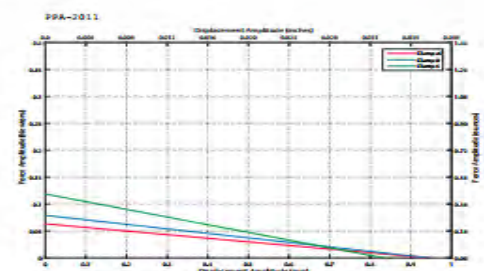


Figure 21: Static displacement and block force are compared for the three different clamp locations. The piezo was driven with 100 volts to generate this data.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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 Ω)	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	0.90	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	0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



LTC3588-2

Nanopower Energy Harvesting Power Supply with 14V Minimum V_{IN}

FEATURES

- 1500nA Input Quiescent Current (Output in Regulation – No Load, $V_{IN} = 18V$)
- 830nA Input Quiescent Current in UVLO, $V_{IN} = 12V$
- 14V to 20V Input Operating Range
- Integrated Low-Loss Full-Wave Bridge Rectifier
- 16V UVLO Improves Power Utilization from High Voltage Current Limited Inputs
- Up to 100mA of Output Current
- High Efficiency Integrated Hysteretic Buck DC/DC
- Selectable Output Voltages: 3.45V, 4.1V, 4.5V, 5.0V
- Input Protective Shunt – Up to 25mA Pull-Down at $V_{IN} \geq 20V$
- Available in 10-Lead MSE and 3mm x 3mm DFN Packages

APPLICATIONS

- Piezoelectric Energy Harvesting
- Electro-Mechanical Energy Harvesting
- Low Power Battery Charging
- Wireless HVAC Sensors
- Mobile Asset Tracking
- Tire Pressure Sensors
- Battery Replacement for Industrial Sensors

DESCRIPTION

The **LTC®3588-2** 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.

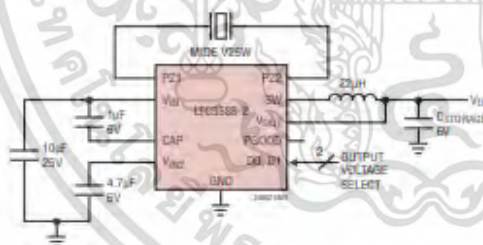
An ultralow quiescent current undervoltage lockout (UVLO) mode with a 16V rising threshold enables efficient energy extraction from sources with high open circuit voltages. This energy is transferred from the input capacitor to the output via a high efficiency synchronous buck regulator. The 16V UVLO threshold also allows for input to output current multiplication through the buck regulator. The buck features a sleep state that minimizes both input and output quiescent currents while in regulation.

Four output voltages of 3.45V, 4.1V, 4.5V and 5.0V are pin selectable with up to 100mA of continuous output current, and suit Li-Ion and LiFePO₄ batteries as well as supercapacitors. An input protective shunt set at 20V provides overvoltage protection.

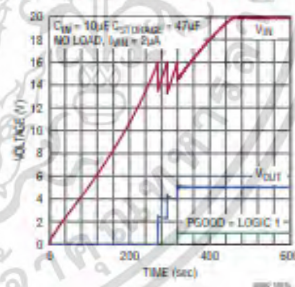
L, LT, LTO, LTM, Linear Technology, the Linear logo and Burst Mode are registered trademarks of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

TYPICAL APPLICATION

High Voltage Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply



LTC3588-2 5.0V Regulator Start-Up Profile



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 1)

V_{IN}	Low Impedance Source	–0.3V to 18V*	V_{OUT}	–0.3V to [Lesser of ($V_{IN} + 0.3V$) or 6V]
	Current Fed, $I_{SW} = 0A$	25mA†	PGOOD	–0.3V to [Lesser of ($V_{OUT} + 0.3V$) or 6V]
PZ1, PZ2		0V to V_{IN}	I_{PZ1}, I_{PZ2}	±50mA
D0, D1		–0.3V to [Lesser of ($V_{IN2} + 0.3V$) or 6V]	I_{SW}	350mA
CAP		[Higher of –0.3V or ($V_{IN} - 6V$)] to V_{IN}	Operating Junction Temperature Range	(Notes 2, 3) –40 to 125°C
V_{IN2}		–0.3V to [Lesser of ($V_{IN} + 0.3V$) or 6V]	Storage Temperature Range	–65 to 125°C
			Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	MSE Only
				300°C

* V_{IN} has an internal 20V clamp† For $t < 1ms$ and Duty Cycle $< 1\%$
Absolute Maximum Continuous Current = 5mA**PIN CONFIGURATION****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
- Ultra-low 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

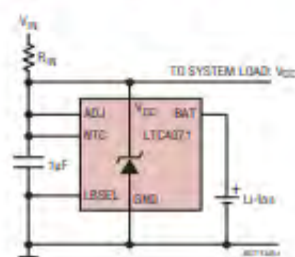
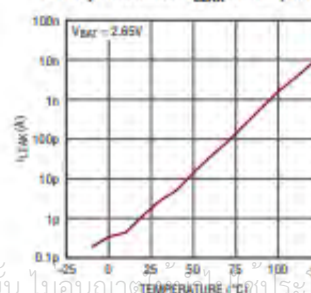
DESCRIPTION

The LTC4071 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.

LT, LTC, LTM, 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**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ข้อมูลนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Notes 1, 2)

I_{CC}, I_{BAT} $\pm 60\text{mA}$ Continuous
 I_{BAT} 400mA for Single Pulse $< 10\text{ms}$
 I_{CC} -400mA for Single Pulse $< 10\text{ms}$
 $ADJ, NTC, NTCBIAS, HBO$ Voltages... -0.3V to $V_{CC} + 0.3\text{V}$

$LBSEL$ Voltage -0.3V to 6V
 Operating Junction Temperature Range... -40°C to 125°C
 Storage Temperature Range -65°C to 150°C
 Peak Reflow Temperature 260°C

PIN CONFIGURATION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายปณพงค์ ส่งสุขถวัลย์
วัน เดือน ปีเกิด 27 มกราคม 2535
ที่อยู่ 139/36 หมู่ที่ 1 ต. บลั้งสิต อ. ภาณุราชบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
ประวัติการศึกษา 2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าก ตั้ง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2561 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าก ตั้ง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานวิจัย ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ ได้แก่
1. Jettanasen, C.; Songsukthawan, P.; Ngaopitakkul, “A. Conversion of Mechanical Energy to Electrical Energy Using Piezoelectric Materials for Bicycle Lane Lighting Systems”, *Appl. Sci.* 2022, 12, 7237.
2. Jettanasen, C.; Songsukthawan, P.; Ngaopitakkul, “A. Development of Micro-Mobility Based on Piezoelectric Energy Harvesting for Smart City Applications”, *Sustainability* 2020, 12, 2933.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้