



รายงานการวิจัย

พลังงานทางเลือกจากการเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับใช้ในที่อยู่อาศัยอัจฉริยะ
ที่รองรับสังคมประชากรสูงวัย

Alternative energy from energy harvesting for smart accommodations
targeting aging society

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์. ดร. ดอน อิศรากร
รองศาสตราจารย์. ดร. สุตเชตต์ พจน์ประไพ
รองศาสตราจารย์. ดร. นันทกาญจน์ มุรติ
นายศุภกร สุวรรณ

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานทางเลือกจากการเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับใช้ในที่อยู่อาศัยอัจฉริยะ
ที่รองรับสังคมประชากรสูงวัย

Alternative energy from energy harvesting for smart accommodations
targeting aging society



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

ปัจจุบันนี้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นทุกปีทั้งจากภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือน สถานการณ์พลังงานของโลกในปัจจุบันจึงนับได้ว่าเป็นปัญหาเข้าขั้นวิกฤต นอกจากนี้ยังพบว่าแหล่งพลังงานหลักของโลก ได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน ได้ถูกนำมาเปลี่ยนให้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานสำคัญๆ มากกว่า 80% ของความต้องการพลังงานปฏุมภูมิในชีวิตประจำวัน เป็นแหล่งพลังงานสิ้นเปลืองและเป็นต้นเหตุก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยปัจจัยต่างๆดังกล่าวจึงเป็นแรงผลักดันไปสู่การค้นคว้าและวิจัยพลังงานทางเลือกในรูปแบบต่าง ๆ เช่น พลังงานจากชีวมวล พลังงานน้ำ พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ นอกจากนี้พลังงานทางเลือกเหล่านี้แล้วยังมีงานวิจัยที่กล่าวถึงพลังงานทางเลือกที่ได้จากการเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลแล้วแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยวัสดุพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ในทางทฤษฎีเราทราบแล้วว่าวัสดุพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) เป็นวัสดุที่สามารถสะสมพลังงานจากแรงกระทบลงบนแผ่นวัสดุ โดยจะเปลี่ยนพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า วัสดุพิโซอิเล็กทริกสามารถตรวจวัดแรงกลต่าง ๆ เช่น แรงดัน ความเร่ง การสั่น แรงเครียด หรือแรงกระทำอื่น ๆ ที่เกิดกับวัตถุ แล้วเปลี่ยนพลังงานกลต่าง ๆ เหล่านี้ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ไม่นานมานี้มีงานวิจัยเชิงพาณิชย์ที่สร้างพื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน ถนนเก็บเกี่ยวพลังงาน และรางรถไฟเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้หลักการของวัสดุพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric).

เพื่อให้สอดคล้องกับแผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี รวมทั้งสภาพเศรษฐกิจและสังคมประเทศไทย กลุ่มคณะวิจัยขอเสนอแผนงานวิจัยการสร้างพลังงานทางเลือกจากนวัตกรรมทางวัสดุศาสตร์ และการแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนแนวใหม่ที่ทั้งสะอาด ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถนำมายางพาราที่มีอยู่ในประเทศมาเพิ่มมูลค่า รวมทั้งนำไปประยุกต์ใช้กับแนวความคิดเรื่องบ้านอัจฉริยะสำหรับผู้สูงอายุ นวัตกรรมที่จะถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทางเลือกในที่นี่คณะวิจัยได้ตั้งชื่อว่า “พื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid)” พื้นอัจฉริยะลูกผสมดังกล่าวจะถูกออกแบบให้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากการสั่นสะเทือนของวัสดุพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) และการเหนี่ยวนำของแม่เหล็ก (Magnetoelectric generator)

คำสำคัญ : เก็บเกี่ยวพลังงาน, พิโซอิเล็กทริก, บ้านอัจฉริยะ

ABSTRACT

The demand for energy consumption has considerably increased every year whether in the industry or household. The present energy situation in the world can be thus the critical problem. More than 80% of electricity demand to be supplied by the fossil energy like oil, coal and natural gas. These energy sources are not sustainable, causing the environmental degradation. For these reasons, the research on the clean energy has been widely investigated, including biomass, water, wind and solar. In addition to this, one of energy conversion technologies, harvesting energy from ambient environment into useable electrical energy through piezoelectric material has been popular. It recently becomes a commercial technology for a variety of energy harvesting applications such as road, railway and human motion energy harvesters.

In order to comply with Thailand's energy efficiency plan for 20 years, economy and society, the authors have researched on the energy sources available in ambient environment and the energy harvesting device to achieve the clean energy with having no effect on the environment. Moreover, the outcome of this research is expected to increase the value of existing rubber and to adapt in a concept of smart home for the oldsters. The invented device is called the Smart Floor Hybrid (SFH) which is a combination of a piezoelectric material and electromagnetic generator.

Keyword : *harvesting energy, piezoelectric, smart home*

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2561 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ได้ให้ทุนในการวิจัยนี้ งานวิจัยนี้จะไม่สามารถสำเร็จได้หากขาดทุนวิจัยดังกล่าว

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เป็นส่วนหนึ่งในการวิจัย พัฒนา ทดลองชิ้นงาน ในท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ผู้วิจัยใช้พื้นที่ ภายในสถาบันเพื่อทำการวิจัย

ผศ.ดร. ดอน อิศรากร

รศ.ดร. สุตเขตต์ พจน์ประไพ

รศ.ดร. นันทกาญจน์ มุรติต

นายศุภกร สุวรรณ



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.4 ขั้นตอนการทำวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.6 รายละเอียดของรายงานการวิจัย.....	7
บทที่ 1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 การเก็บเกี่ยวพลังงาน.....	7
2.2 พื้นฐานปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกในของแข็ง.....	8
2.2.1 การเกิดโพลาริเซชัน.....	13
2.2.2 ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกในเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก.....	16
2.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสภาพเฟอร์โรอิเล็กทริกในเซรามิก.....	21
2.3.1 อิเล็กโทรสตรักชันในเซรามิกส์เฟอร์โรอิเล็กทริก.....	23
2.4 แนวคิดของพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานและเทคนิคการเพิ่มความถี่.....	25
2.5 ระบบสมาร์ทโฮม (Smart Home).....	28
2.5.1 ภาพรวมหลักการทำงานของเกตเวย์.....	29
2.5.2 ระบบการเชื่อมต่อไร้สายของสมาร์ทโฮม.....	30
บทที่ 3 การออกแบบและการทดสอบ.....	36
3.1 การออกแบบพินกำเนิดพลังงานต้นแบบด้วยแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแบบคานชนิด PZT.....	36

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.1 การตรวจสอบความเป็นไปได้พื้นที่กำเนิดพลังงานต้นแบบ.....	38
3.1.2 พื้นที่กำเนิดพลังงานและวิธีการประเมินประสิทธิภาพ.....	39
3.2 การสร้างต้นแบบโครงสร้างพื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid).....	41
3.2.1 การทดสอบลักษณะและวัดประสิทธิภาพของต้นแบบโครงสร้างพื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid).....	42
3.2.1.1 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VDC) และกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (IDC) ของ Magnetolectric generator.....	43
3.2.1.2 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VDC) และกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (IDC) ของ Piezoelectric.....	44
3.2.1.3 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VDC) และกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (IDC) ของวัสดุ ลูกผสมระหว่าง Magnetolectric generator และ Piezoelectric ผ่านวงจรลูกผสมสำหรับเก็บ เกี่ยวพลังงาน.....	46
3.2.2 วิธีการทดสอบและวัดประสิทธิภาพการชาร์จแบตเตอรี่ 3.6V/120 mAh โดยพื้น อัจฉริยะลูกผสมของวัสดุลูกผสมระหว่าง Magnetolectric generator และ Piezoelectric ผ่านวงจรลูกผสมสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน.....	47
3.3 การออกแบบการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้ากลเข้ากับยางพารา.....	48
3.3.1 SSIC (Synchronized Switch Inversion Circuit).....	50
3.3.2 SSIC Ext.....	50
3.4 การออกแบบในส่วนฮาร์ดแวร์ระบบไฮมอโตเมชัน.....	51
3.4.1 การออกแบบในส่วนประมวลผล.....	51
3.4.2 การออกแบบในส่วนการเชื่อมต่อผ่านระบบไร้สาย.....	52
3.4.3 การออกแบบในส่วนซอฟต์แวร์.....	54
3.4.4 การออกแบบในส่วนเซิร์ฟเวอร์.....	55
3.4.5 การออกแบบในส่วนแอปพลิเคชันสำหรับสมาร์ทโฟน.....	55
3.4.6 การออกแบบตัวเครื่อง.....	57
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	58
4.1 ผลการทดลองพื้นที่กำเนิดพลังงานต้นแบบด้วยแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแบบคานชนิด PZT.....	58
4.1.1 การวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง.....	60
4.2 ผลการทดสอบและวัดประสิทธิภาพของพื้นอัจฉริยะลูกผสม.....	65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VDC) และกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (IDC) ของ Magnetolectric generator.....	65
4.2.2 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VDC) และกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (IDC) ของ Piezoelectri.....	66
4.2.3 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VDC) และ กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (IDC) ของ ของวัสดุ ลูกผสมระหว่าง Magnetolectric generator และ Piezoelectric ผ่านวงจรลูกผสมสำหรับเก็บ เกี่ยวพลังงาน.....	67
4.3 ผลการทดสอบและวัดประสิทธิภาพการชาร์จแบตเตอรี่ 3.6V 120 mAh โดยพื้นอัจฉริยะ ลูกผสมของวัสดุลูกผสมระหว่าง Magnetolectric generator และ Piezoelectric ผ่านวงจร ลูกผสมสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน	69
4.4 ผลการทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้ากลเข้ากับยางพารา.....	70
4.5 ผลการทดลองระบบสมาร์ทโฮม (Smart Home).....	73
4.5.1 รูปลักษณ์ภายนอก.....	73
4.5.2 แผงวงจร.....	74
4.5.3 อินเทอร์เน็ตของเกตเวย์.....	74
4.5.4 แอปพลิเคชันสมาร์ทโฮม.....	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	75
5.1 สรุปผลการวิจัยพื่นกำเนิดพลังงานต้นแบบด้วยแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแบบคานชนิด PZT.....	75
5.2 สรุปผลการทดสอบและวัดประสิทธิภาพพื้นอัจฉริยะลูกผสมของวัสดุลูกผสมระหว่าง Magnetolectric generator และ Piezoelectric ผ่านวงจรลูกผสมสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน	75
5.2.1 สรุปผลการทดสอบพื้นอัจฉริยะลูกผสม	75
5.3 สรุปผลการวิจัยพื่นกำเนิดพลังงานต้นแบบด้วยแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแบบคานชนิด PZT.....	76
เอกสารอ้างอิง	77
ภาคผนวก ก ประวัติผู้วิจัย	78
ภาคผนวก ข ผลผลิตของโครงการวิจัย	105

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	ชื่อของบริษัทที่ผลิตงานเกี่ยวกับพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานถนนเก็บเกี่ยวพลังงานและพลังงานที่ผลิตได้ ...	2
ตารางที่ 2.1	แสดง point groups ของผลึก.....	9
ตารางที่ 3.1	Dimension and magnetic property of the materials used.....	38
ตารางที่ 4.1	Estimation of operational time of a low-power wireless sensor node assumed powered by output energy from actual pedestrian steps.....	64
ตารางที่ 4.2	สรุปรูปแบบการทดสอบพื้นอัจฉริยะลูกผสมและพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้.....	68



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1	ไดอะแกรมแสดงการจัดการพลังงานที่ได้จากการเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า.....	4
รูปที่ 2.1	ก. Direct force configuration และ ข. indirect force configuration	8
รูปที่ 2.2	ตัวอย่างการเรียงตัวของผลึกที่มีสมมาตรที่มีศูนย์กลาง ค่ารวมของโพลาริเซชันมีค่าเป็นศูนย์ (a) เมื่อไม่มีแรงกระทำหรือความเค้นเชิงกลต่อผลึก และ (b) ภายใต้แรงกระทำหรือความเค้นเชิงกลต่อผลึก	11
รูปที่ 2.3	ตัวอย่างการเรียงตัวของผลึกที่ไม่มีสมมาตรที่มีศูนย์กลาง (a) ค่ารวมของโพลาริเซชันมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อไม่มีแรงกระทำหรือความเค้นเชิงกลต่อผลึก และ (b) ค่ารวมของโพลาริเซชันมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ภายใต้แรงกระทำหรือความเค้นเชิงกลต่อผลึก.....	11
รูปที่ 2.4	สมมาตรของผลึกและผลึกที่มีคุณสมบัติไพโซอิเล็กทริก ไพโรอิเล็กทริก และเพโรอิเล็กทริก	12
รูปที่ 2.5	ไดโพลโมเมนต์ ($P = qa$) เนื่องจากคู่ของประจุบวก (+q) และลบ (-q) ที่มีระยะห่างเท่ากับ a	13
รูปที่ 2.6	การเกิดไดโพลโมเมนต์ ทั้ง 5 แบบ (a) อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน (Electronic polarization), (b) อะตอมิก หรือ ไอออนิก โพลาริเซชัน (Atomic or ionic polarization), (c) ไดโพล หรือ ออเรียนเตชันนอลโพลาริเซชัน (Dipolar or orientational polarization), (d) โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง (Spontaneous polarization), (e) อินเตอร์เฟซ หรือ สเปซชาร์จ์โพลาริเซชัน (Interface or space charge polarization)	14
รูปที่ 2.7	การโพลีเซรามิกภายใต้สนามไฟฟ้าลบ (coercive field): (a) ก่อนทำการโพล โพลาริเซชันมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแบบสุ่ม (b) ขณะทำการโพลโดยจ่ายสนามไฟฟ้ากระแสตรงทำให้โพลาริเซชันจัดเรียงตัวตามแนวสนามไฟฟ้า (c) หลังการโพล โพลาริเซชันคงค้าง (remanent polarization) ส่วนมากยังมีทิศทางใกล้เคียงกับทิศทางของสนามไฟฟ้าในขณะที่ทำการโพล	16
รูปที่ 2.8	ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (a) หลังจากที่เราทำผ่านการโพล โพลาริเซชันจัดเรียงตัวตามแนวสนามไฟฟ้า (b) และ (c) ผลทางตรง (direct effect) หรือ เครื่องกำเนิดสัญญาณ (generator) สังเกตว่าทิศทางของแรงที่ให้จะมีผลต่อทิศทางของขั้วหรือศักย์ไฟฟ้าที่ได้ (d) และ (e) ผลแบบย้อนกลับ (converse effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่หรือการทำงานทางกลเนื่องจากการป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไป เรียกรูปแบบการทำงานนี้ว่า มอเตอร์ (motor)	17
รูปที่ 2.9	แกนอ้างอิงที่ใช้สำหรับระบุทิศทางของปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก.....	18

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.10	ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบผลย้อนกลับโดย (a) ป้อนสนามไฟฟ้าไปในทิศทางเดียวกับทิศทางของการโพล ทำให้เกิดการยึดตัวในแกน 3 (d33-effect) และหดตัวในแนวแกน 1 (d31-effect) (b) ในขณะที่ป้อนสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับทิศทางของการโพล ทำให้เกิดความเครียดเฉือนรอบแกน 2 (d15-effect) โดยเส้นประแสดงถึงรูปร่างวัสดุก่อนการป้อนสนามไฟฟ้า เส้นทึบแสดงรูปร่างที่เปลี่ยนไปหลังให้สนามไฟฟ้า.....	19
รูปที่ 2.11	(a) โครงสร้างแบบ perovskite (b) เครือข่ายแบบสามมิติที่ของ oxygen octahedral ของ PLZT ..	22
รูปที่ 2.12	การเปลี่ยนทิศทางการโพลาริเซชันในโครงสร้างเตตระโกนัล (tetragonal structure) สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งหมด 6 ทิศทางซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้.....	23
รูปที่ 2.13	ปรากฏการณ์ (a)ไพโซอิเล็กทริก และ (b)อิเล็กโตรสตรักชัน ภายใต้สนามไฟฟ้า	24
รูปที่ 2.14	Schematic drawing of energy harvesting floor tile.....	25
รูปที่ 2.15	(a) Waiting for load; (b) and (c) Loaded and unloaded states of energy harvesting floor tile.....	26
รูปที่ 2.16	Schematic of a unimorph piezoelectric cantilever with a proof mass	28
รูปที่ 2.17	การเชื่อมต่อของระบบสมาร์ทโฮม	29
รูปที่ 2.18	เกตเวย์ที่เชื่อมต่อทุกชนิดคลื่น	30
รูปที่ 2.19	ตัวอย่างอุปกรณ์สมาร์ทโฮม.....	30
รูปที่ 2.20	เครื่องหมายการค้าของ Zigbee	31
รูปที่ 2.21	ช่องสัญญาณของ Zigbee	31
รูปที่ 2.22	รูปแบบการเชื่อมต่อของ Zigbee	32
รูปที่ 2.23	เครื่องหมายการค้าของ Z-Wave.....	32
รูปที่ 2.24	เครื่องหมายการค้าของ Wi-Fi.....	33
รูปที่ 2.25	เครื่องหมายการค้าของ Bluetooth	34
รูปที่ 3.1	Validation of the designed mechanism	37

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.2 Voltage at the free end of the PZT cantilever as the vertical displacement was increased.....	37
รูปที่ 3.3 Magnetic flux density simulation	38
รูปที่ 3.4 A test setup showing (a) the energy harvesting floor tile and (b) the oscilloscope measuring the voltage (Tektronix TDS3032B).....	40
รูปที่ 3.5 (a) Circuit of an individual PZT cantilever; (b) Circuit of electrically connected PZT cantilevers, rectifiers, and load resistors.....	41
รูปที่ 3.6 แสดงต้นแบบโครงสร้างพื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid) (ด้านบน) ภาพวาดและ (ด้านล่าง) ภาพถ่ายจริง	42
รูปที่ 3.7 (ก) แสดงการให้แรงเชิงกลแก่ Magnetolectric generator (ข) แผนภาพวงจรการวัดค่าการเก็บเกี่ยวพลังงานแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VDC) และ (ค) แผนภาพวงจรการวัดค่าการเก็บเกี่ยวพลังงานกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (IDC) จาก Magnetolectric generator.....	43
รูปที่ 3.8 (ก) แสดงการให้แรงเชิงกลแก่วัสดุ Piezoelectric (ข) แผนภาพวงจรการวัดค่าการเก็บเกี่ยวพลังงานแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VDC) และ (ค) แผนภาพวงจรการวัดค่าการเก็บเกี่ยวพลังงานกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (IDC) จากวัสดุ Piezoelectric	45
รูปที่ 3.9 (ก) แผนภาพวงจรการวัดค่าการเก็บเกี่ยวพลังงานแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VDC) และ (ข) แผนภาพวงจรการวัดค่าการเก็บเกี่ยวพลังงานกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (IDC) จากพื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid) ระหว่าง Magnetolectric generator และ Piezoelectric.....	46
รูปที่ 3.10 แผนภาพวงจรแสดงการวัดค่าการเก็บเกี่ยวพลังงานจากพื้นอัจฉริยะลูกผสมเพื่อชาร์จถ่าน กระดุมขนาด 3.6V/120 mAh	47
รูปที่ 3.11 (ก) ความต้องการผลผลิตที่ยังไม่มีพืชเศรษฐกิจใดมาแทนที่ได้ในตลาดประเภทเดียวกัน (ข) การออกสูตรยาง	48
รูปที่ 3.12 ภาพรวมการนำวิทยาการสื่อสารไร้สายมาผนวกกับยางพาราและการสร้างพลังงานทดแทนจากการเคลื่อนไหวโดยที่ยางพารานั้นเหมาะสมสำหรับผู้สูงวัยยืนหรือเดินผ่าน	48
รูปที่ 3.13 ชุดทดสอบการสร้าง สัญญาณขาเข้า- ขาออก	49

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.14	ไดอะแกรมการจัดการพลังงานและระบบเมื่อยังไม่ผนวกยางพารา	49
รูปที่ 3.15	ขั้นตอนที่เกี่ยวข้องก่อนจะได้อัจฉริยะจัดการพลังงานเป็น Integrated circuit (IC).....	49
รูปที่ 3.16	แสดง Synchronized Switch Inversion Circuit	50
รูปที่ 3.17	แสดงส่วนอะนาล็อกของ SSIC Ext	50
รูปที่ 3.18	แสดง pattern layout ของ SSIC Ext.....	51
รูปที่ 3.19	บอร์ด Beaglebone Black	51
รูปที่ 3.20	จอ Beaglebone Cape พร้อมระบบทัชสกรีน.....	52
รูปที่ 3.21	โมดูล Zigbee รุ่น CC2530F256.....	52
รูปที่ 3.22	โมดูล Z-Wave รุ่น ZM5304AE.....	52
รูปที่ 3.23	โมดูล RF433 รุ่น H34A(ซ้าย) H3V4F(ขวา).....	53
รูปที่ 3.24	โมดูล Wi-Fi รุ่น RTL8811.....	53
รูปที่ 3.25	โมดูล Bluetooth รุ่น LM910.....	53
รูปที่ 3.26	โมดูล GSM รุ่น Quectel UC20	54
รูปที่ 3.27	ภาพออกแบบเกตเวย์	54
รูปที่ 3.28	ตัวอย่างหน้าแอปพลิเคชัน.....	55
รูปที่ 3.29	หน้า Smart Control.....	56
รูปที่ 3.30	หน้า Home Security	56
รูปที่ 3.31	ภาพเรเนเตอร์ของเกตเวย์.....	57
รูปที่ 4.1	Normalized energy from using different airgaps (d_2).....	58
รูปที่ 4.2	Oscillating voltage across the optimal load resistor.....	59
รูปที่ 4.3	Voltages generated with step time intervals T_d of (a) 0.5, (b) 1 and (c) 1.5 s; (d) the trend of harvested energy that varied with step time interval	59
รูปที่ 4.4	Output energy with increasing number of plucks.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5 The average power of one unimorph PZT cantilever and 24 paralleled unimorph PZT cantilevers.....	61
รูปที่ 4.6 Numbered locations on the cover plate.....	62
รูปที่ 4.7 Output energy generated by a step that landed on different locations of the energy harvesting floor tile.....	62
รูปที่ 4.8 Energy conversion efficiency versus load resistor values.....	63
รูปที่ 4.9 Output voltage and energy generated by many pedestrians stepping on the energy harvesting floor tile.....	64
รูปที่ 4.10 (ก) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VDC) และ (ข) กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (IDC) ของ Magnetolectric generator.....	65
รูปที่ 4.11 (ก) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VDC) และ (ข) กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (IDC) หลังผ่านวงจร DC stepdown transformer และ voltage regulator.....	65
รูปที่ 4.12 (ก) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VDC) และ (ข) กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (IDC) ของ Piezoelectric.....	66
รูปที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VDC) และ (ข) กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (IDC) ของ Piezoelectric หลังผ่านวงจร Energy harvester (LTC3588-2).....	66
รูปที่ 4.14 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VDC) และ (ข) กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (IDC) ของวัสดุลูกผสม Magnetolectric-Piezoelectric หลังจากผ่านวงจรลูกผสมสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน.....	67
รูปที่ 4.15 การชาร์จแบตเตอรี่ 3.6V/120mAh โดยพื้นอัจฉริยะลูกผสมของวัสดุลูกผสมระหว่าง Magnetolectric generator และ Piezoelectric ผ่านวงจรลูกผสมสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน.....	69
รูปที่ 4.16 แสดงชุดกำเนิดพลังงานยังไม่เชื่อมต่อเป็นเนื้อเดียวกับยางพารา.....	70
รูปที่ 4.17 มีการพัฒนาออกแบบวงจรและชิ้นงานให้รองรับช่วงความถี่กว้างขึ้น.....	70
รูปที่ 4.18 วงจรและชิ้นงานที่สามารถรองรับช่วงความถี่กว้างขึ้น.....	71
รูปที่ 4.19 แสดงการขึ้นรูปยางพาราแบบปิด 100% หุ้มชั้นฟิล์มป้องกันวงจรและสายไฟฟ้าเชื่อมต่อ.....	71
รูปที่ 4.20 การทดสอบ embedded excited piezo-generator rubber (EEPGR).....	72
รูปที่ 4.21 แสดงแอปพลิเคชัน remote monitoring ผ่าน mobile application.....	72

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.22 แสดงแผ่นโคมยางขึ้นอื่นสำหรับปิดทับข้างบน.....	72
รูปที่ 4.23 แสดงแผ่นโคมยางขึ้นอื่นสำหรับปิดทับข้างบน.....	73
รูปที่ 4.24 รูปลักษณะภายนอกของเกตเวย์ตัวต้นแบบ.....	73
รูปที่ 4.25 แผงวงจรของเกตเวย์ตัวต้นแบบ.....	74
รูปที่ 4.26 อินเทอร์เน็ตต้นแบบของเกตเวย์.....	74
รูปที่ 4.27 แอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน.....	74



บทที่ 1

บทนำ





1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

ปัจจุบันนี้พลังงานไฟฟ้ามีความต้องการสูงขึ้นทุกปีทั้งจากภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือน สถานการณ์พลังงานของโลกในปัจจุบันจึงนับได้ว่าเป็นปัญหาเข้าขั้นวิกฤต นอกจากนี้ยังพบว่าแหล่งพลังงานหลักของโลก ได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน ได้ถูกนำมาเปลี่ยนให้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานสำคัญ ๆ มากกว่า 80% ของความต้องการพลังงานปฐมภูมิในชีวิตประจำวัน เป็นแหล่งพลังงานสิ้นเปลืองและเป็นต้นเหตุก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม อันเป็นผลมาจากการมีคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในปริมาณสูง และการแพร่กระจายมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอื่นๆ สำหรับสถานการณ์ในประเทศไทยก็เช่นกัน เนื่องจากจำนวนประชากรของประเทศไทยมีปริมาณเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 70 ล้านคน และมีการเจริญเติบโตด้านอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ด้วยปัจจัยดังกล่าวจึงมีผลทำให้มีความต้องการด้านพลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นประเทศไทยได้มีแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย ช่วงปี 2555-2562 ประกอบด้วย การรับซื้อไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานต่างกัน ได้แก่ รับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (ในประเทศและรับซื้อจากต่างประเทศ) เท่ากับ 8,194 เมกะวัตต์ โรงไฟฟ้าระบบ Cogeneration 5,107 เมกะวัตต์ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนรวม 6,551 เมกะวัตต์ และโรงไฟฟ้าถ่านหิน/ลิกไนต์ 3,473 เมกะวัตต์ แม้กระนั้นพลังงานไฟฟ้าก็ยังมีความต้องการสูงขึ้นทุกปีจากภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือน ดังนั้นจึงมีแผนพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพและลดการใช้พลังงานไฟฟ้าให้สอดคล้องกับ “แผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี (พ.ศ. 2554-2573)” ของกระทรวงพลังงาน ด้วยปัจจัยต่างๆดังกล่าวจึงเป็นแรงผลักดันไปสู่การค้นคว้าและวิจัยพลังงานทางเลือกในรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงานจากชีวมวล พลังงานน้ำ พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ นอกจากพลังงานทางเลือกเหล่านี้แล้วยังมีงานวิจัยที่กล่าวถึงพลังงานทางเลือกที่ได้จากการเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลแล้วแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยวัสดุพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ในทางทฤษฎีเราทราบแล้วว่าวัสดุพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) เป็นวัสดุที่สามารถสะสมพลังงานจากแรงกระทบลงบนแผ่นวัสดุ โดยจะเปลี่ยนพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า วัสดุพิโซอิเล็กทริกสามารถตรวจวัดแรงกลต่างๆ เช่น แรงดัน ความเร่ง การสั่น แรงเครียด หรือแรงกระทำอื่นๆ ที่เกิดกับวัตถุ แล้วเปลี่ยนพลังงานกลต่างๆ เหล่านี้ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ไม่นานมานี้มีงานวิจัยเชิงพาณิชย์ที่สร้างพื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน ถนนเก็บเกี่ยวพลังงาน และรางรถไฟเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้หลักการของวัสดุพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) เพื่อเป็นพลังงานทางเลือกซึ่งมีการเริ่มโครงการในช่วงปี ค.ศ. 2007 (พ.ศ. 2550) โดยมีบริษัท INNOWATECH ซึ่งมีต้นกำเนิดจากงานวิจัยของคณาจารย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของจากประเทศอิสราเอล ได้ทำการทดลองใช้งานถนนเก็บเกี่ยวพลังงานในช่วงปี ค.ศ. 2009 (พ.ศ. 2552) ถนนดังกล่าวสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ในประมาณ 0.4 เมกะวัตต์ในช่วงความยาว 1 กิโลเมตร ในช่วงที่มียานพาหนะวิ่งผ่าน 1000 คัน/ชั่วโมง ชื่อของบริษัทต่างๆ ที่ผลิตงานเหล่านี้แสดงไว้ในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ชื่อของบริษัทที่ผลิตงานเกี่ยวกับพื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน ถนนเก็บเกี่ยวพลังงาน และพลังงานที่ผลิตได้

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

จากงานวิจัยเกี่ยวกับพื้นและถนนเก็บเกี่ยวพลังงานดังกล่าวทางคณะวิจัยพบว่าเรายังสามารถเพิ่มความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีกโดยผสมผสานระหว่างหลักการของวัสดุพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) และการเหนี่ยวนำของแม่เหล็ก (Magnetoelectric Generator)

เพื่อให้สอดคล้องกับแผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี รวมทั้งสภาพเศรษฐกิจและสังคมประเทศไทย กลุ่มคณะวิจัยขอเสนอแผนงานวิจัยการสร้างพลังงานทางเลือกจากนวัตกรรมทางวัสดุศาสตร์ และการแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนแนวใหม่ที่ทั้งสะอาด ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำมายางพาราที่มีอยู่ในประเทศมาเพิ่มมูลค่า รวมทั้งนำไปประยุกต์ใช้กับแนวความคิดเรื่อง smart home สำหรับผู้สูงอายุ นวัตกรรมที่จะถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทางเลือกในที่นี้คณะวิจัยได้ตั้งชื่อว่า “พื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid)” พื้นอัจฉริยะลูกผสมดังกล่าวจะถูกออกแบบให้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากการสั่นสะเทือนของวัสดุพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) และการเหนี่ยวนำของแม่เหล็ก (Magnetoelectric Generator) พื้นอัจฉริยะลูกผสมดังกล่าวจะใช้วัสดุห่อหุ้มที่ทำจากยางคอมปาวด์สูตรเฉพาะสำหรับทำยางปูพื้นซึ่งจะนำมายางพาราที่มีอยู่ในประเทศมาใช้เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้พื้นที่อัจฉริยะสำหรับอาคารขนาดใหญ่ในตัวเมืองเป็นที่ทราบกันดีว่าปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าในแต่ละปีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในภาคครัวเรือนและภาคธุรกิจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาคารและตึกสูงหลายแห่งที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าตลอด 24 ชั่วโมง การใช้พลังงานไฟฟ้าส่วนมากเป็นพลังงานที่ใช้กับระบบเครื่องปรับอากาศ แสงสว่าง และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ เป็นต้น ที่เห็นชัด ได้แก่ ห้างสรรพสินค้า โรงแรม โรงพยาบาล และร้านสะดวกซื้อ ที่ต้องเปิดให้บริการ 24 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาถึงอัตราการขยายตัวของ การเปิดกิจการใหม่พบว่า ธุรกิจห้างสรรพสินค้าขนาดใหญ่ (super department store) มีอัตราการเติบโตตลอดอย่างต่อเนื่อง เป็นเพราะการขยายตัวของสังคมเมือง รวมถึงการเปิดเออีซีเป็นโอกาสสำคัญในการรองรับนักท่องเที่ยวที่จะเข้ามา ดังนั้นโอกาสการขยายฐานลูกค้าจึงเพิ่มขึ้น โอกาสของการเพิ่มความถี่ของการเข้าใช้บริการต่างๆในห้างสรรพสินค้าขนาดใหญ่จึงสูงขึ้น

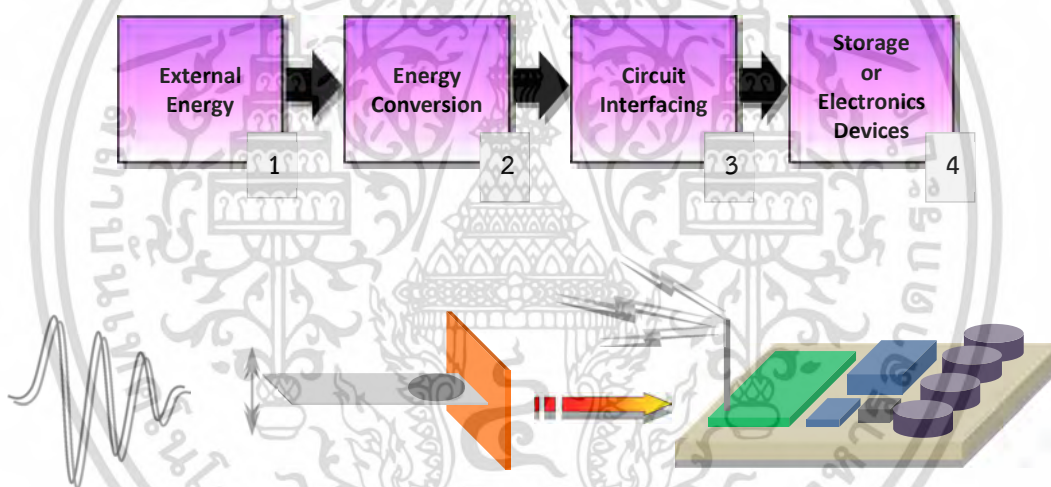
นอกจากประโยชน์ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้แล้ว พื้นที่อัจฉริยะยังสามารถส่งข้อมูลผ่านระบบไร้สายเพื่อแสดงสภาพความหนาแน่นของผู้คน น้ำหนักและการเคลื่อนที่ของคนหรือวัตถุบนพื้นที่เราติดตั้งพื้นที่อัจฉริยะไว้ โดยระบบดังกล่าวนี้ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกเนื่องจากตัวพื้นผิวของพื้นมีคุณสมบัติไพโซอิเล็กทริกซึ่งจะส่งสัญญาณไฟฟ้าเมื่อมีแรงกดทับบนพื้น สัญญาณดังกล่าวจะถูกแปลงและส่งข้อมูลที่ต้องการผ่านระบบไร้สาย การประยุกต์ใช้งานดังกล่าวนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในรูปแบบของเซนเซอร์ที่ไม่ต้องใช้ไฟฟ้าและสามารถส่งผ่านสัญญาณด้วยตัวมันเอง (active sensor) ดังนั้นการประยุกต์ใช้พื้นที่อัจฉริยะในกรณีนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ smart home และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พกพาकिनไฟน้อยระดับไมโครวัตต์หรือแม้แต่นาโนวัตต์ซึ่งสามารถนำมาช่วยยกระดับคุณภาพชีวิตของสังคมประเทศไทยที่จะก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุในไม่ช้านี้

จากข้อมูลในปี พ.ศ. 2556 จำนวนผู้สูงอายุในประเทศไทยเพิ่มมากขึ้นคิดเป็นร้อยละ 10 โดยประมาณของประชากรทั้งประเทศ ความเป็นอยู่ของผู้สูงอายุมีความเสี่ยงได้แทบทุกชั้นตอนไม่ว่าจะเป็นการเดินทาง นั่ง ยืน นอน และกิจกรรมการเคลื่อนไหวของกลุ่มบุคคลดังกล่าวมักต้องอาศัยอุปกรณ์ช่วย ในที่นี้โครงการนอกจากเน้นเรื่องการวิจัยและพัฒนานวัตกรรมด้านการเก็บเกี่ยวพลังงานแล้วยังต้องการเน้นอุปกรณ์ที่แปรรูปจากยางพาราซึ่งมีความเป็นไปได้สูงมากที่จะผลิตให้อยู่ในรูปแบบที่รองรับกิจกรรมของผู้สูงอายุ ด้วยเหตุที่ประเทศไทยมียอดขายยางพาราเป็นอันดับหนึ่งของโลก (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2559) แต่กระนั้นก็ตามสาเหตุจากวิกฤตเศรษฐกิจโลก ปัญหาราคาน้ำมัน ปัญหาด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศและสิ่งแวดล้อมที่อาจจะเป็นปัจจัยอันส่งผลต่อราคา ยางให้ต่ำลงจนทำให้เกษตรกรชาวสวนยางเดือดร้อน การช่วยหาทางออกจึงเกิดขึ้นโดยผ่านงานวิจัยชิ้นนี้ร่วมกับ การนำยางพาราที่มีอยู่ในประเทศทำการเพิ่มมูลค่า ทำการพัฒนาและเพิ่มขีดความสามารถการใช้งาน การเปลี่ยนรูปพลังงานกลจากกิจกรรมของผู้สูงอายุเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อประจุกระแสไฟให้กับแบตเตอรี่อุปกรณ์สื่อสารแบบพกพาหรือเก็บสะสมสำหรับเซนเซอร์ เช่น เซ็นเซอร์ตรวจจับการหกล้ม (fall detecting sensor) ระบบตรวจสอบคุณภาพอากาศภายในที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุ (Indoor Air Quality System) บนโครงข่ายการสื่อสารไร้สายแบบกินพลังงานต่ำ เป็นต้น ระบบเซนเซอร์เหล่านี้สามารถทำงานได้โดยใช้พลังงานที่สร้างขึ้นเองโดยอาศัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกซึ่งมีจุดเด่นคือสำหรับขนาดเท่ากันจะได้พลังงานไฟฟ้าเอาต์พุตสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น เช่น หลักการไฟฟ้าสถิตซึ่งต้องกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าภายนอกให้เริ่มทำงาน นอกจากนี้วิธีการทางไพโซอิเล็กทริกใช้แรงกระทำจากผู้สูงอายุได้โดยตรงไม่ว่าจะเป็นบุคคลเดียวหรือกลุ่มบุคคลไม่ว่าจะอาศัยในบ้านเรือนของตนเองหรือบ้านพักคนชรา โครงการนี้จึงเป็นการบูรณาการเทคโนโลยีการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากลเป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีการป้องกันการลัดวงจร ป้องกันการสะสมความร้อนและการถูกรบกวนด้วยวัสดุห่อหุ้มที่ทำจากยางคอมปาวด์สูตรเฉพาะสำหรับทำยางปูพื้นที่มีความหนาและความนิ่มเหมาะสมสำหรับผู้สูงอายุลงมารวมถึงทุกวัย ผลลัพธ์ที่ได้สามารถขยายผลไปยังสถานที่อื่นๆเช่น ศูนย์การค้า ที่จอดรถ โรงเรียน ฯลฯ

มินิกริด (minigrid) เป็นระบบการจัดการพลังงานกระจายพลังงานในระดับจุลภาคลงมา มีลักษณะไดอะแกรมอย่างง่ายดังรูปประกอบที่ 3 การนำชิ้นงานมาใช้งานจะต้องสอดคล้องกับไดอะแกรมนี้จึงจะเกิดประโยชน์ใช้งานได้จริง



รูปที่ 1.1 ไดอะแกรมแสดงการจัดการพลังงานที่ได้จากการเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและจัดทำต้นแบบพื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid) สำหรับเปลี่ยนรูปพลังงานด้วยวิธีการทางไพโซอิเล็กทริกผสมผสานกับการสร้างพลังงานไฟฟ้าจากการเหนี่ยวนำของแม่เหล็ก ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อออกแบบและจัดสร้างระบบจัดการพลังงานเอาต์พุตที่ได้จากกิจกรรมของผู้สูงอายุภายในสถานที่อยู่อาศัย

1.2.3 เพื่อห่อหุ้มด้วยการสอดหรือฝัง (embed) ระบบการจัดการพลังงานที่ได้ด้วยยางพาราแปรรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.4 เพื่อทำมินิกริดที่เหมาะสมกับการแปลงพลังงานและการใช้งาน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

จัดทำต้นแบบพื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid) ซึ่งอาจมีมากกว่าต้นแบบเดียวโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อแปลงพลังงานจากการเคลื่อนไหวของผู้คนซึ่งอาจเป็นบุคคลเดียวหรือกลุ่มบุคคล ทำการทดสอบลักษณะและวัดประสิทธิภาพของต้นแบบต่างๆ เงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น โหลด ชนิดและจำนวนวัสดุที่ใช้

ออกสูตรน้ำยาพาราให้เป็นน้ำยาแบบคอมพาวด์ที่เหมาะสมสำหรับขึ้นรูปยางแผ่นขนาดและรูปร่างต่างๆ ทดสอบและคัดเลือกลักษณะที่เหมาะสมสำหรับ embed ระบบแปลงพลังงาน

พัฒนาระบบตรวจสอบต่างๆ ด้วยเซ็นเซอร์ที่เหมาะสมกับปริมาณไฟฟ้าที่ได้จากการกักเก็บ เช่น ระบบตรวจสอบคุณภาพอากาศภายในที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุ (Indoor Air Quality System) บนโครงข่ายการสื่อสารไร้สายแบบกินพลังงานต่ำ นำไปใช้งานจริงในลักษณะมินิกริดและประเมินผล โดยทีมงานทั้งทีมและผู้สังเกตการณ์จากภายนอก เช่น บุคลากรทางด้านสาธารณสุข ทางด้านพลังงาน ทางด้านพาณิชย์ เป็นต้น

1.4 ขั้นตอนการทำวิจัย

1.4.1 พัฒนาระบบเก็บเกี่ยวพลังงานกลประกอบด้วยโครงสร้างเก็บเกี่ยวพลังงานวงจรจัดการพลังงานและส่วนเก็บสะสมพลังงานที่ระบบรองรับความถี่ทำงาน (operation frequency) จากแหล่งกำเนิดในช่วง 100 Hz ลงไป

1.4.2 พัฒนาโครงสร้างเก็บเกี่ยวพลังงานกลสำหรับรองรับการสั่นที่ความถี่ (frequency) ต่ำและขนาดการสั่น (amplitude) ต่ำเพื่อรับพลังงานจากการเคลื่อนไหว

1.4.3 พัฒนาวจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อจัดการพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริกเพื่อให้สามารถประจุกระแสไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ชนิดประจุใหม่และจัดการพลังงานที่ได้หรือเก็บสะสมไว้เพื่อให้เพียงพอต่อการทำงานของวงจรสื่อสารที่สิ้นเปลืองพลังงานไม่เกิน 100 mW อย่างต่อเนื่องให้นานที่สุด

1.4.4 พัฒนาวจรเก็บเกี่ยวพลังงานให้รองรับการผลิตเป็นวงจรรวม (integrated circuit หรือคำย่อ IC) เพื่อลดขนาดและต้นทุนการผลิต เพื่อเพิ่มแรงจูงใจแก่ผู้ใช้ทั่วไปและเพิ่มความเข้าใจในเทคโนโลยี

1.4.5 ออกแบบพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพอากาศภายในอาคาร (ชุดตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Temperature), ความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และอื่นๆ) และระบบอัตโนมัติภายในบ้าน (Home Automation System) บนโครงข่ายการสื่อสารแบบไร้สาย พร้อมอุปกรณ์แสดงผล หรือสามารถส่งข้อมูลไปแสดงผลบนสมาร์ตโฟน แท็บเล็ตหรือการเก็บข้อมูลในรูปแบบต่างๆ

1.4.6 สอบเทียบค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์กับอุปกรณ์หรือเครื่องมาตรฐาน (Calibration)

1.4.7 ติดตั้งและทดสอบระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.7.1 จัดการพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกเพื่อให้สามารถประจุกระแสไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ชนิดประจุใหม่

1.4.7.2 ระบบตรวจสอบคุณภาพอากาศภายในอาคารบนโครงข่ายการสื่อสารแบบไร้สาย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ต้นแบบ smart floor, smart wall พร้อมวงจรเชื่อมต่อที่ย่อส่วนให้ embed ได้ และเซนเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับผู้สูงอายุ อย่างน้อย 1 อย่าง เช่น ตรวจรู้การหกล้มของผู้สูงอายุ, ระบบตรวจสอบคุณภาพอากาศภายในอาคารที่พักอาศัย (IAQ), ระบบสมาร์ทโฮม

1.5.2 มีจัดการที่เป็นรูปธรรมผลักดันผลลัพธ์จากโครงการวิจัยใช้งานจริงในที่อยู่อาศัยหรือพำนักของผู้สูงอายุ

1.5.3 ยางพารามีการนำไปใช้ประโยชน์ในวิทยาการใหม่ๆ มากขึ้น

1.6 รายละเอียดของรายงานการวิจัย

เนื้อหาที่จะกล่าวในรายงานการวิจัยฉบับนี้ประกอบด้วย

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความจำเป็นมา วัตถุประสงค์ ขอบเขตการศึกษา ขั้นตอนการศึกษา ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและรายละเอียดของรายงานการวิจัยแต่ละบท

บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ซึ่งกล่าวถึงหลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการ การเก็บเกี่ยวพลังงาน พื้นฐานปรากฏการณ์ไพเอโซอิเล็กทริกในของแข็ง ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสภาพเพโรอิเล็กทริกในเซรามิก และการนำเอาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมาใช้กับระบบสมาร์ทโฮม

บทที่ 3 การออกแบบและการทดสอบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน นำเสนอการออกแบบระบบสมาร์ทโฮมไร้สาย การออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อให้ได้พลังงานสูงสุดและการทดลองใช้งาน

บทที่ 4 ผลการทดลองการจัดการพลังงานจากพื้นกำเนิดพลังงานต้นแบบด้วยแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแบบคานชนิด PZT และพื้นกำเนิดพลังงานแบบอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid) เพื่อนำไปใช้กับระบบสมาร์ทโฮม เป็นส่วนของการเลือกใช้งานจริง การพลังงาน การบริหารการทำงานของอุปกรณ์เพื่อให้มีพลังงานต่ำที่สุด

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงบทสรุปของการวิจัยและแนวทางในการ พัฒนาต่อ

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

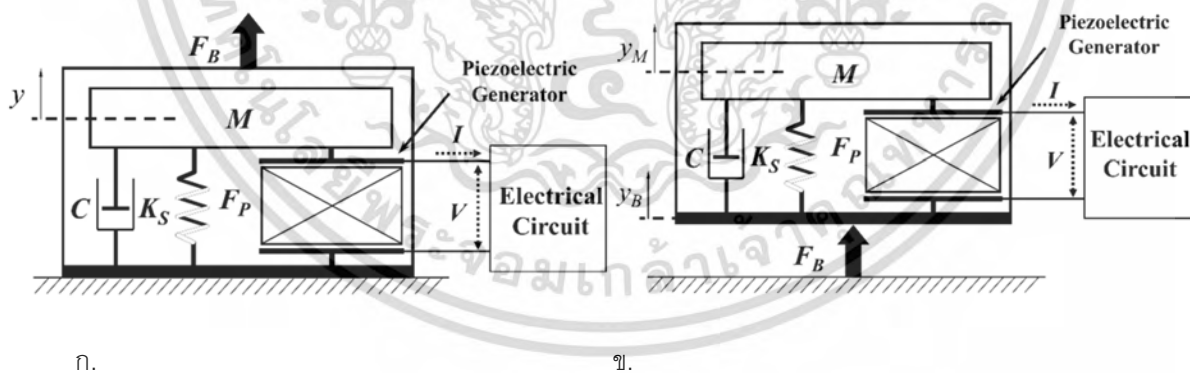
2.1 การเก็บเกี่ยวพลังงาน

คำว่า เก็บเกี่ยว หรือ harvest[1] มีความหมายตามพจนานุกรมว่าการเก็บ รวบรวมพืชผักผลไม้จากพื้นที่เพาะปลูก เมื่อมีการนำค่านีมาใช้กับพลังงานกล หมายความว่า การนำพลังงานกล (mechanical energy) จากแหล่งกำเนิดการสั่นที่มีอยู่แล้ว (ambient energy source) รวมทั้งการเคลื่อนไหวร่างกาย (body movement) และการเคลื่อนที่ของวัตถุ (object movement) มาแปลง (convert) เป็นพลังงานไฟฟ้า (electrical energy) จัดเก็บไว้ในวงจรไฟฟ้าที่มีตัวจัดเก็บพลังงานเช่น ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitor) หรือ ในแบตเตอรี่ และนำไปป้อน ให้แก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าให้ทำงานได้ในยามต้องการ ช่วยให้เรา มีความสะดวกในการใช้ชีวิตมากขึ้น ลดจำนวนครั้งหรือลดขนาดของแบตเตอรี่ หรือแม้แต่ทดแทนการใช้แบตเตอรี่ อย่างสิ้นเชิงทำให้เป็นอุปกรณ์ทำงานได้ด้วยตัวเอง (self-powered device)[2] แม้อยู่ในสถานที่ห่างไกล ไม่มีคนควบคุม (unmanned) โดยในกระบวนการเก็บเกี่ยวพลังงานกลปราศจากการเผาไหม้และไม่มีการคายแก๊สชนิดใด จึงจัดเป็นพลังงานสะอาด (clean energy) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่กล่าวถึง เช่น โทรศัพท์มือถือ เครื่องอ่านบัตรประจำตัว เครื่องมือและระบบสื่อสารไร้สาย ตัวควบคุมระยะไกลของวิทยุ โทรศัพท์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) สำหรับควบคุมการปิดเปิดหลอดไฟหรือประตู หน้าต่าง เครื่องปรับอากาศ ฯลฯ กลไกการแปลงพลังงานคือวิธีการไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric method) ซึ่งประกอบด้วย วัสดุไพโซอิเล็กทริกชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิด รูปร่างต่างๆเช่น เม็ดกลม(disk) แผ่นแบน (plate) เส้น (fiber) เป็นต้น การเชื่อมต่อกับส่วนที่จัดเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุไพโซอิเล็กทริก อย่างเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน โดยหลักการทางไพโซอิเล็กทริก คือ วัสดุที่มีความสามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือในทางกลับกันแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้ มีข้อดีคือ (ก) ไม่มีแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าภายนอกเกี่ยวข้องตลอดกระบวนการ ในขณะที่การแปลงด้วยวิธีการอิเล็กโตรสแตติก (electrostatic method) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการแปรเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้า ต้องมีแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าตลอดเวลา (ข) ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการแปลงด้วยวิธีนี้มีค่า 3-8 โวลต์ ในขณะที่การแปลงด้วยวิธีอิเล็กโตรแมกเนติก (electromagnetic method)[3] ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของขดลวดในสนามแม่เหล็ก ให้พลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 1 โวลต์ (ค) ให้ค่าความหนาแน่นพลังงานคงที่ตลอดอายุการใช้งาน ในขณะที่เครื่องยนต์ความร้อน (heat engine) ที่ใช้ไฮโดรคาร์บอนเป็นเชื้อเพลิงตลอดจนแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ มีค่าความหนาแน่นพลังงานลดลงเมื่อเวลาผ่านไป แหล่งกำเนิดพลังงานกลใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพแวดล้อมที่เก็บเกี่ยวมาใช้ประโยชน์ ได้แก่ การเคลื่อนไหวร่างกาย เช่น เดิน วิ่ง กระโดด ใช้มือหมุนวัตถุ ตลอดจนการเคลื่อนไหวของวัตถุอื่น เช่น รถยนต์วิ่ง สะพานแกว่ง สายพานเลื่อน กังหัน ใบพัด ระเบิดใต้น้ำ ฯลฯ

สำหรับยางพารามักออกแบบให้มีการใช้งานแบบรับแรงกดและกระแทกหรือเป็นส่วนผสมในวัสดุสังเคราะห์อื่น ๆ เพื่อเพิ่มความสามารถรองรับแรงกด กระแทก และตบโจทย์เพื่อสุขภาพ เช่น แผ่นรองส้นเท้า จากยางพารา แผ่นยางรองเท้าเพื่อสุขภาพ เป็นต้น ทั้งนี้เพราะยึดถือคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นและความทนทานของยางพารา อย่างไรก็ตาม ในที่นี้ความสำคัญของยางพาราที่มีความยืดหยุ่น ทนทานการฉีกขาด ทนความร้อน และการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า คือทำหน้าที่ห่อหุ้มโครงสร้างคานติลเวอร์ที่อยู่ภายใน ที่โครงสร้างนี้มีวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่มีคุณสมบัติแปลงพลังงานดังกล่าวข้างต้น ทั้งโครงสร้างนั้นฝังตัวในแผ่นยางพาราวัลคาไนซ์ (vulcanized rubber)[4] รองรับการเคลื่อนไหวเมื่อใดก็จะก่อเกิดกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวจากการเคลื่อนไหวนั้น พอเพียงให้อุปกรณ์ขนาดเล็กทำงานหรือสามารถประจุให้กับแบตเตอรี่ชนิดประจุซ้ำได้ ในที่นี้เน้นแรงกลจากการเคลื่อนไหวอริยาบถต่างๆ เช่น นั่ง นอน ยืน เดิน เดินเร็ว วิ่ง ระบบของยางแผ่นฝังตัว โครงสร้างเก็บเกี่ยวพลังงานจึงเสมือนแหล่งกำเนิดพลังงานแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete power supply เก็บเกี่ยวพลังงานกลได้ทั้งแบบทางตรงและทางอ้อม แบบทางตรง คือ การให้แรงทางกลหรือกดลงไปในตัวเก็บเกี่ยวพลังงานโดยตรง (รูปที่ 1ก) ส่วนแบบทางอ้อม (รูปที่ 1 ข) คือ การได้รับพลังงานกลที่เกิดขึ้นโดยรอบโครงสร้างซึ่งพลังงานหรือแรงทางกลนี้ไม่จำเป็นต้องกระทำกับโครงสร้างโดยตรง นั่นคือการเกิดขึ้นในรูปแบบของแรงเฉื่อย การผนวกยางพาราแปรรูปเข้ากับเทคโนโลยีทางด้านพลังงานที่มี IoT เป็นตัวช่วยให้เป็นรูปธรรมจึงเท่ากับสร้างโอกาสทางการค้าของยางพารา ให้กว้างขวางขึ้น



รูปที่ 2.1 ก. Direct force configuration และ ข. indirect force configuration

2.2 พื้นฐานปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกในของแข็ง

เพื่อให้เข้าใจปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก ผู้ศึกษาจำเป็นที่จะต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างและสมมาตรของผลึกภายในของวัสดุก่อนซึ่งจะได้อธิบายดังต่อไปนี้ โครงสร้างของวัสดุเซรามิกโดยทั่วไปเกิดจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดเรียงตัวของอะตอมเข้าด้วยกันเป็นผลึก (crystal) หนึ่งผลึก และผลึกหลายๆผลึกรวมตัวกันเป็นเกรน(grain) เมื่อพิจารณาผลึกเดี่ยวหนึ่งผลึก ผลึกดังกล่าวจะมีส่วนประกอบทางเคมีคงที่และประกอบด้วยไอออน (อะตอมที่มีประจุบวกหรือประจุลบ) เรียงตัวซ้ำๆ กันต่อกันเป็นเครือข่าย เกิดเป็นระนาบผลึก (lattice) หน่วยที่เล็กที่สุดที่มีความสมมาตรของผลึกเรียกว่า เซลล์หน่วย หรือ ยูนิตเซลล์ (unit cell)[5] และสมมาตรของยูนิตเซลล์เหล่านี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ของการมีคุณสมบัติไพเอโซอิเล็กทริก ไพโรอิเล็กทริก และเพโรอิเล็กทริกของผลึก สมมาตรของโครงสร้างผลึกสามารถแบ่งออกเป็น 32 แบบ หรือ 32 point groups ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดง point groups ของผลึก¹

ระบบผลึก (Crystal system)	สมมาตรผลึก			ระบบผลึก (Crystal system)	สมมาตรผลึก		
	International notation	SchÖnfies's notation	Remarks		International notation	SchÖnfies's notation	Remarks
Triclinic	1	C_1	- * +	Trigonal	3	C_3	- * +
	$\bar{1}$	C_i	i - -		$\bar{3}$	C_{3i}	i - -
Monoclinic	2	C_2	- * +	Hexagonal	$3m$	C_{3v}	- * +
	M	C_s	- * +		32	D_3	- * -
	$2/m$	C_{2h}	i - -		$\bar{3}m$	D_{3d}	i - -
Ortho-rhombic	$mm2$	C_{2v}	- * +	Cubic	6	C_6	- * +
	222	D_2	- * -		$\bar{6}$	C_{3h}	- * -
	Mmm	D_{2h}	i - -		$6mm$	C_{6v}	- * +
Tetragonal	4	C_4	- * +	Cubic	$6/m$	C_{6h}	i - -
	$\bar{4}$	S_4	- * -		622	D_6	- * -
	$\bar{4}2m$	D_{2d}	- * -		$\bar{6}m2$	D_{3h}	- * -

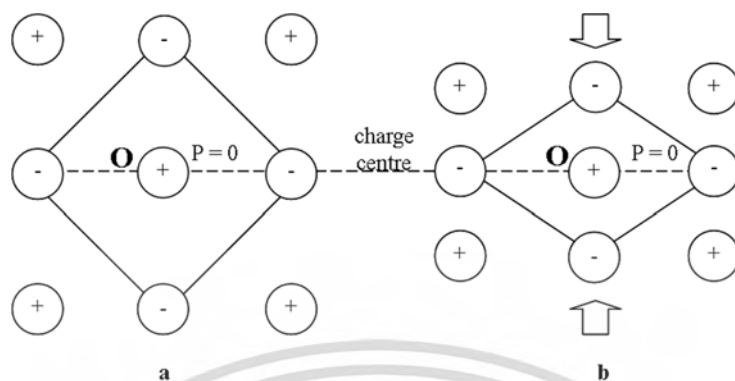
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

422	D_4	- * -	6/mmm	D_{6h}	i - -
4mm	C_{4v}	- * +	23	T	- * -
4/m	C_{4h}	i - -	$\bar{4}3m$	T_d	- * -
4/mmm	D_{4h}	i - -	$m\bar{3}$	T_h	i - -
			432	O	- - -
			$m\bar{3}m$	O_h	i - -

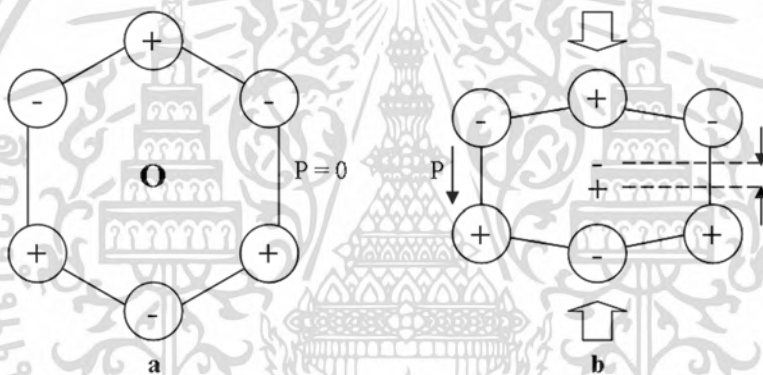
เครื่องหมายในส่วนหมายเหตุ “ i ” หมายถึงสมมาตรที่มีศูนย์กลาง (centrosymmetric) ซึ่งไม่แสดงปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก สำหรับเครื่องหมาย “ * ” และ “ + ” หมายถึงสมมาตรที่ไม่มีศูนย์กลาง (noncentrosymmetric) โดยที่ “ * ” คือสมมาตรที่แสดงปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก และ “ + ” คือสมมาตรที่แสดงทั้งปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริกและเพโรอิเล็กทริก

จากตารางจะเห็นได้ว่าผลึกที่มีสมมาตรที่มีศูนย์กลางมีอยู่ทั้งหมด 11 แบบ ซึ่งผลึกเหล่านี้จะไม่มีคุณสมบัติไพโรอิเล็กทริก ในขณะที่บางกลุ่มมีสมมาตรที่ไม่มีศูนย์กลางซึ่งมีอยู่ 20 แบบ ผลึกเหล่านี้สามารถแสดงปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริกได้ ตัวอย่างของการเรียงตัวของผลึกที่มีสมมาตรที่มีศูนย์กลาง และสมมาตรที่ไม่มีศูนย์กลาง แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ รูปทั้งสองนี้ใช้สำหรับการอธิบายความสัมพันธ์ของสมมาตรของผลึกกับปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริกอย่างง่าย ในรูปที่ 2.1 เป็นยูนิตเซลล์ที่มีการเรียงตัวของอะตอมในผลึกของ NaCl ซึ่งมีสมมาตรที่มีศูนย์กลาง โดยสังเกตได้จากเมื่อทำการลากเส้นตรงจากตำแหน่งศูนย์กลาง (ในที่นี้คือตำแหน่ง O) ไปยังไอออนที่อยู่ถัดไปที่ใกล้ที่สุด และทำการลากเส้นตรงอีกครั้งจากตำแหน่งศูนย์กลางแต่ให้ลากไปในทิศตรงกันข้ามกับครั้งแรก (ทำมุม 180° กับครั้งแรก) จะพบว่าไอออนที่เส้นตรงลากไปพบนั้นจะเป็นไอออนชนิดเดียวกัน (ตัวอย่างเช่น Cl^- กับ Cl^- หรือ Na^+ กับ Na^+) จากรูปที่ 2.1a จะเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีแรงกระทำหรือความเค้นเชิงกลต่อผลึกจุดศูนย์กลางรวมของประจุบวกและลบจะอยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกันคือที่จุด O ซึ่งทำให้ค่ารวมของโพลาริเซชันมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อมีแรงกระทำหรือความเค้นเชิงกลต่อผลึก (รูปที่ 2.1b) จุดศูนย์กลางรวมของประจุบวกและลบยังคงอยู่ที่จุดเดียวกันดังนั้นก็ทำให้ค่ารวมของโพลาริเซชัน (net polarization) จึงมีค่าเป็นศูนย์เท่าเดิม ปรากฏการณ์ดังกล่าวต่างจากในกรณีของผลึกที่สมมาตรไม่มีศูนย์กลาง (รูปที่ 2.2a) ซึ่งในที่นี้เห็นตัวอย่างของผลึกเฮกซาโกนอล (Hexagonal) เมื่อไม่มีแรงกระทำหรือความเค้นเชิงกลต่อผลึก จุดศูนย์กลางรวมของประจุบวกและลบจะอยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกันคือที่จุด O ค่าโพลาริเซชันโดยรวมมีค่าเป็นศูนย์ แต่เมื่อมีแรงกระทำหรือความเค้นเชิงกลต่อผลึกจุดศูนย์กลางรวมของประจุบวกและลบยังแยกออกจากกันดังรูปที่ 2.2b ดังนั้นจึงทำให้ค่ารวมของโพลาริเซชันจึงมีค่าไม่เท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



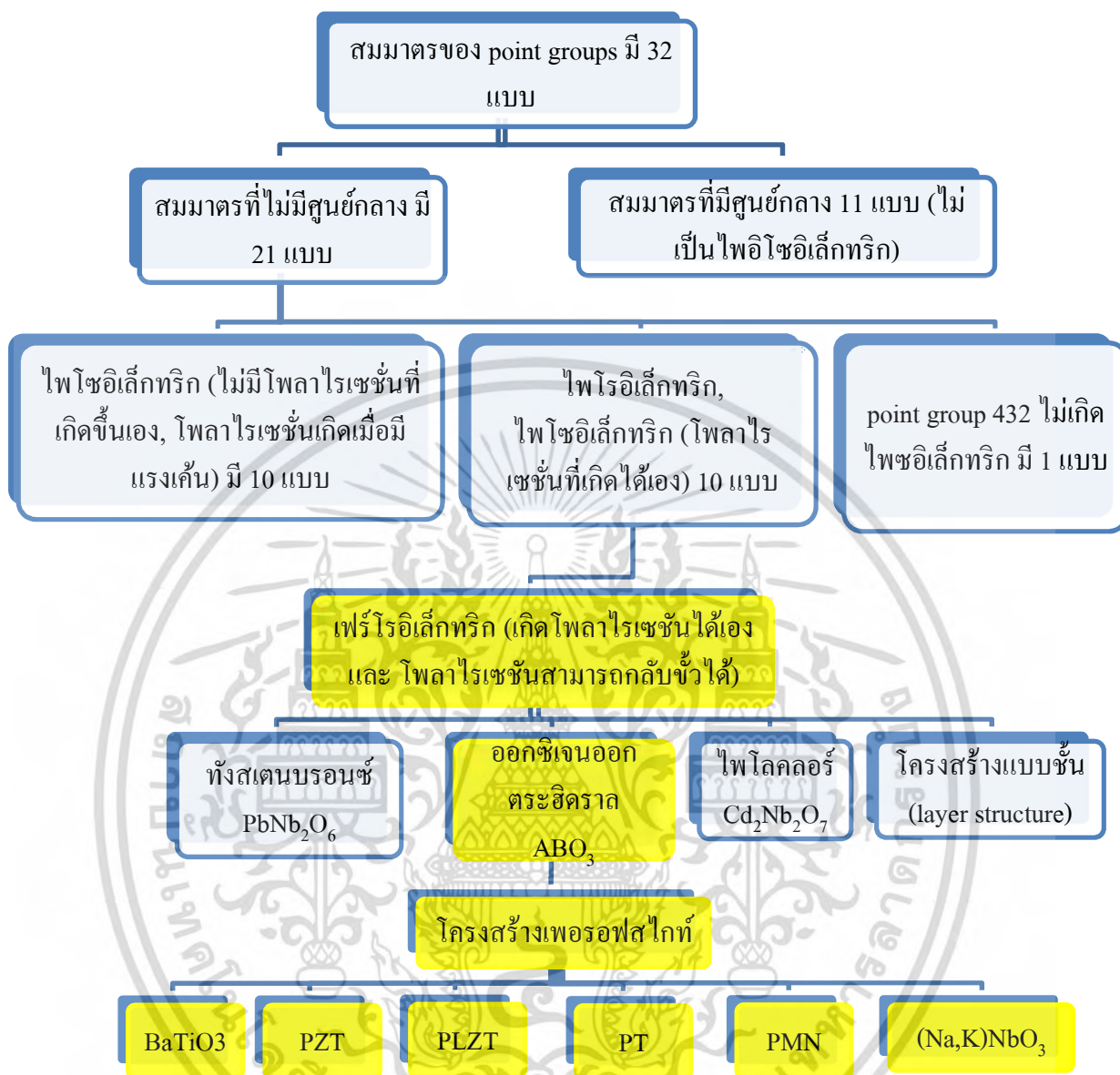
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการเรียงตัวของผลึกที่มีสมมาตรที่มีศูนย์กลาง ค่ารวมของโพลาริเซชันมีค่าเป็นศูนย์ (a) เมื่อไม่มีแรงกระทำหรือความเค้นเชิงกลต่อผลึก และ (b) ภายใต้แรงกระทำหรือความเค้นเชิงกลต่อผลึก



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการเรียงตัวของผลึกที่ไม่มีสมมาตรที่มีศูนย์กลาง (a) ค่ารวมของโพลาริเซชันมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อไม่มีแรงกระทำหรือความเค้นเชิงกลต่อผลึก และ (b) ค่ารวมของโพลาริเซชันมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ภายใต้แรงกระทำหรือความเค้นเชิงกลต่อผลึก

ภาพรวมของการแบ่งกลุ่มสมมาตรของผลึกและผลึกที่มีคุณสมบัติไพเอโซอิเล็กทริก ไพโรอิเล็กทริก และเฟร์โรอิเล็กทริก สามารถแสดงให้เห็นได้จากแผนผังในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 สมมาตรของผลึกและผลึกที่มีคุณสมบัติไพโซอิเล็กทริก ไพโรอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริก (ดัดแปลงจากเอกสารอ้างอิง [6] และ [7])

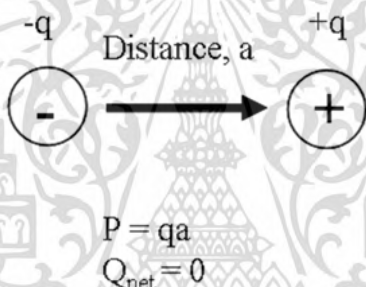
จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าสมมาตรของผลึกที่มีสมมาตรที่ไม่มีศูนย์กลางมีอยู่ทั้งหมด 21 สมมาตร จาก 32 สมมาตร ถึงแม้ว่า 21 สมมาตรดังกล่าวอยู่ในเงื่อนไขที่สามารถแสดงคุณสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ แต่มีอยู่หนึ่งสมมาตรคือ point group 432 ที่ไม่สามารถแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ ดังนั้นจึงเหลือสมมาตรที่ไม่มีศูนย์กลางอยู่เพียง 20 แบบ เท่านั้นที่สามารถแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ และภายใน 20 แบบนี้มี 10 แบบ ไม่มีโพลาริเซชันแบบถาวรหรือโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง (spontaneous polarization) ที่เหลืออีก 10 แบบ เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมาตรที่มีโพลาริเซชันแบบถาวรหรือโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง (spontaneous polarization) โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเฟสของผลึก เมื่ออุณหภูมิลดลงผ่านอุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) ดังนั้นผลึกที่มีสมมาตรในกลุ่มนี้จะสามารถแสดงคุณสมบัติไพเอโซอิเล็กทริก ไพโรอิเล็กทริก นอกจากนั้นโพลาริเซชันของผลึกบางตัวในกลุ่มนี้สามารถกลับทิศทางตามทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้กับผลึก ผลึกที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้เรียกว่า ผลึกที่มีคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric crystal)

2.2.1 การเกิดโพลาริเซชัน[8]

การที่ผลึกสามารถแสดงปรากฏการณ์ไพเอโซอิเล็กทริกได้นั้นเนื่องจากผลึกเหล่านั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่า โพลาริเซชันเนื่องจากแรงเค้นเชิงกลภายนอกกระทำ โพลาริเซชันที่กล่าวถึงนี้คือค่ารวมของไดโพลโมเมนต์ ไดโพลโมเมนต์เป็นค่าเวกเตอร์ที่บ่งบอกถึงขนาดและทิศทางของขั้วทางไฟฟ้า (polarity) ที่เกิดขึ้นจากคู่ของประจุบวก (ขนาด q) และลบ (ขนาด q) ที่ถูกแยกออกจากกันดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.5 ไดโพลโมเมนต์ ($P = qa$) เนื่องจากคู่ของประจุบวก (+ q) และลบ (- q) ที่มีระยะห่างเท่ากับ a

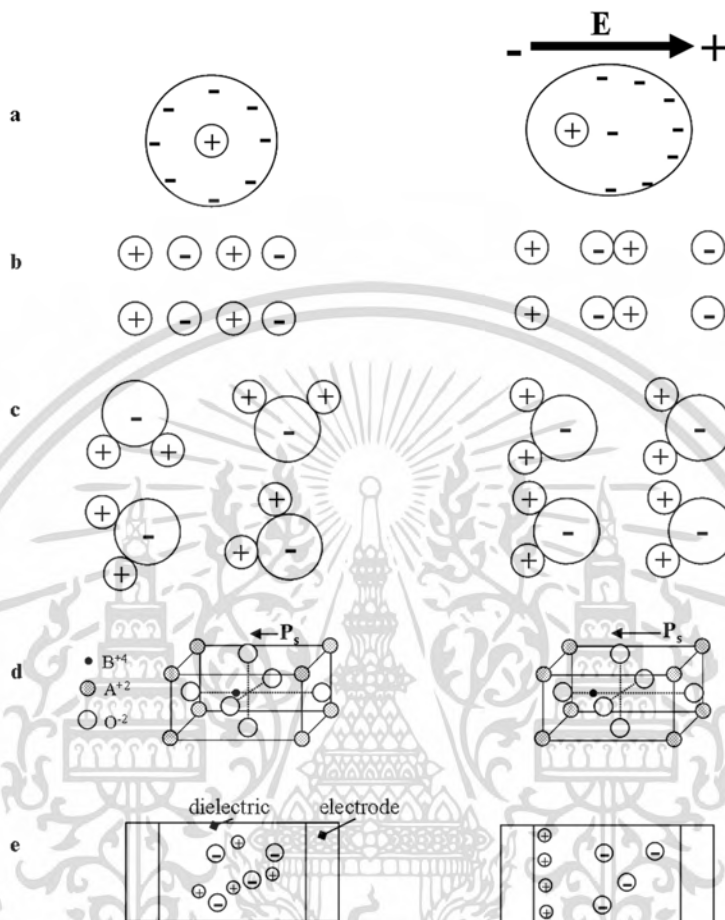
ค่าไดโพลโมเมนต์ของคู่ของประจุบวก (+ q) และลบ (- q) ที่มีระยะห่างเท่ากับ a สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$P = qa, \quad (2.1)$$

โดยที่ P คือ ค่าเวกเตอร์ของไดโพลโมเมนต์ q คือขนาดของประจุ และ a คือ ระยะห่างระหว่างประจุ โดยพื้นฐานการเกิดไดโพลโมเมนต์ มีอยู่ 5 แบบได้แก่

- อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน (Electronic polarization)
- อะตอมมิก หรือ ไอออนิก โพลาริเซชัน (Atomic or ionic polarization)
- ไดโพล หรือ ออเรียนเตชันนอลโพลาริเซชัน (Dipolar or orientational polarization)
- โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง (Spontaneous polarization)

— อินเตอร์เฟส หรือ สเปสชาร์จ์โพลาริเซชัน (Interface or space charge polarization)



รูปที่ 2.6 การเกิดไดโพลโมเมนต์ ทั้ง 5 แบบ (a) อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน (Electronic polarization), (b) อะตอมมิก หรือ ไอออนิก โพลาริเซชัน (Atomic or ionic polarization), (c) ไดโพล หรือ ออเรียนเตชันนอลโพลาริเซชัน (Dipolar or orientational polarization), (d) โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง (Spontaneous polarization), (e) อินเตอร์เฟส หรือ สเปสชาร์จ์โพลาริเซชัน (Interface or space charge polarization)

รูปแบบของโพลาริเซชันแบบต่างๆ แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.5 โดยธรรมชาติแล้วอะตอมหนึ่งอะตอมจะมีค่าไดโพลโมเมนต์เป็นศูนย์ เนื่องจากจุดศูนย์กลางของประจุบวกและลบอยู่ตำแหน่งเดียวกันและจะหักล้างกันเป็นศูนย์ แต่ถ้าอะตอมตัวนี้ถูกวางไว้ในสนามไฟฟ้าจะทำให้จุดศูนย์กลางของประจุบวกและลบแยกออกจากกันและทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ ลักษณะการเกิดไดโพลโมเมนต์ภายในอะตอมเนื่องจากสนามไฟฟ้านอกนี้เรียกว่า อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน (electronic polarization, รูปที่ 2.5a) ซึ่งโพลาริเซชันชนิดนี้เกิดขึ้นกับทุกสสารเนื่องจากเป็นโพ

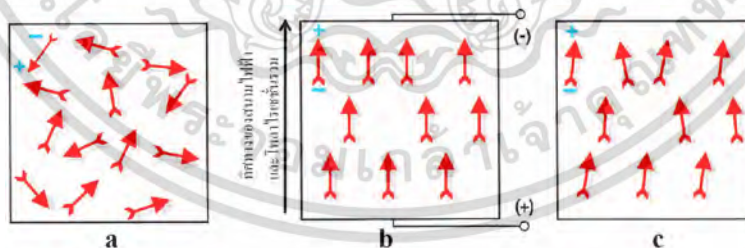
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลาไรเซชันระดับอะตอมและจะเกิดขึ้นต่อเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้ากับสารเท่านั้น ค่าโพลาไรเซชันชนิดดังกล่าวนี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับโพลาไรเซชันชนิดอื่น โพลาไรเซชันชนิดต่อมาคือ อะตอมมิก หรือ ไอออนนิค โพลาไรเซชัน (Atomic or ionic polarization, รูปที่ 2.5b) เกิดขึ้นเฉพาะสารที่มีพันธะไอออนนิค (เช่น NaCl, KCl, และ LiBr) และจะเกิดขึ้นเมื่อจุดศูนย์กลางของไอออนบวกกับไอออนลบแยกจากกันเมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้า เมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้ลดลงจนเป็นศูนย์ ไอออนนิค โพลาไรเซชันก็จะหายไป สำหรับไดโพล หรือ ออเรียนเตชันนอลโพลาไรเซชันเป็นโพลาไรเซชันจะเกิดขึ้นในโมเลกุลของสารที่มีโครงสร้างของโมเลกุลที่ไม่สมมาตร เช่น H_2O และ HCl ในรูป 2.5c แสดงตัวอย่างของโมเลกุลของน้ำซึ่งเวกเตอร์รวมของโพลาไรเซชันที่เกิดจาก H^+ (2 ตัว) และ O^{2-} (1 ตัว) มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามไฟฟ้าแต่ค่าเวกเตอร์รวมของโพลาไรเซชันเหล่านี้ยังมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ดังนั้นออเรียนเตชันนอลโพลาไรเซชันจึงเป็นโพลาไรเซชันชนิดถาวร แต่อย่างไรก็ตามเมื่อโมเลกุลเหล่านี้มารวมตัวกันเป็นสาร เช่น น้ำ (H_2O) ออเรียนเตชันนอลโพลาไรเซชันของแต่ละโมเลกุลจะเรียงตัวกันอย่างสุ่ม (random orientation) ดังนั้นจึงไม่มีค่าโพลาไรเซชันรวม แต่เมื่อใดก็ตามที่สารเหล่านี้ถูกวางไว้ภายใต้สนามไฟฟ้าจะทำให้มีการเรียงตัวของโพลาไรเซชันของแต่ละโมเลกุลให้มีทิศทางไปในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะทำให้เกิดโพลาไรเซชันรวม โพลาไรเซชันชนิดต่อมาที่มีความสำคัญสำหรับวัสดุเพโรอิเล็กทริก คือ โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเอง (spontaneous polarization, รูปที่ 2.5d) โพลาไรเซชันดังกล่าวนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเฟสของผลึก เมื่ออุณหภูมิลดลงผ่านอุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเองนี้จะมีเฉพาะในผลึกที่มีสมมาตรบางประเภทเท่านั้นดังที่กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้ โพลาไรเซชันดังกล่าวนี้มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเป็นอย่างมาก เช่นทำให้มีค่าไดอิเล็กทริกที่สูงมาก ในผลึกของแข็งโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเองจะเกิดขึ้นในแต่ละยูนิตเซลล์ (unit cell) เมื่อแต่ละยูนิตเซลล์มารวมตัวกันเป็นผลึกโพลาไรเซชันเหล่านี้จะมีทิศทางแบบสุ่มจึงทำให้เวกเตอร์ของโพลาไรเซชันหักล้างกันเป็นศูนย์ แต่เมื่อใดก็ตามที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าให้แก่ผลึกเหล่านี้จะทำให้โพลาไรเซชันของแต่ละยูนิตเซลล์ มีการจัดเรียงตัวในแนวทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะทำให้เกิดโพลาไรเซชันรวม สิ่งที่น่าสนใจของโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเองนี้คือ เมื่อเราป้อนสนามไฟฟ้าให้สูงถึงค่าหนึ่งแล้วลดสนามไฟฟ้าจนเป็นศูนย์ โพลาไรเซชันรวมจะไม่ลดลงจนเป็นศูนย์เนื่องจากจะมีโพลาไรเซชันคงค้าง (remanent polarization) ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้วัสดุ ไพโอโซอิเล็กทริก เฟอร์โรอิเล็กทริก (ทั้งที่เป็นผลึกเชิงเดี่ยว และ พหุผลึก) สามารถถูกนำไปประยุกต์มาใช้งานได้ โพลาไรเซชันชนิดสุดท้ายที่จะกล่าวถึงในที่นี้คือ อินเตอร์เฟซ หรือ สเปซชาร์จ์โพลาไรเซชัน (Interface or space charge polarization) โพลาไรเซชันชนิดนี้มีค่าค่อนข้างน้อย และเกิดจากประจุบวกหรือลบที่สะสมกัน ณ บริเวณรอยต่อของสารต่างชนิดในวัสดุ หรือเกิดขึ้นบริเวณขอบเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ปฏิกิริยาโพลาไรเซชันในเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก

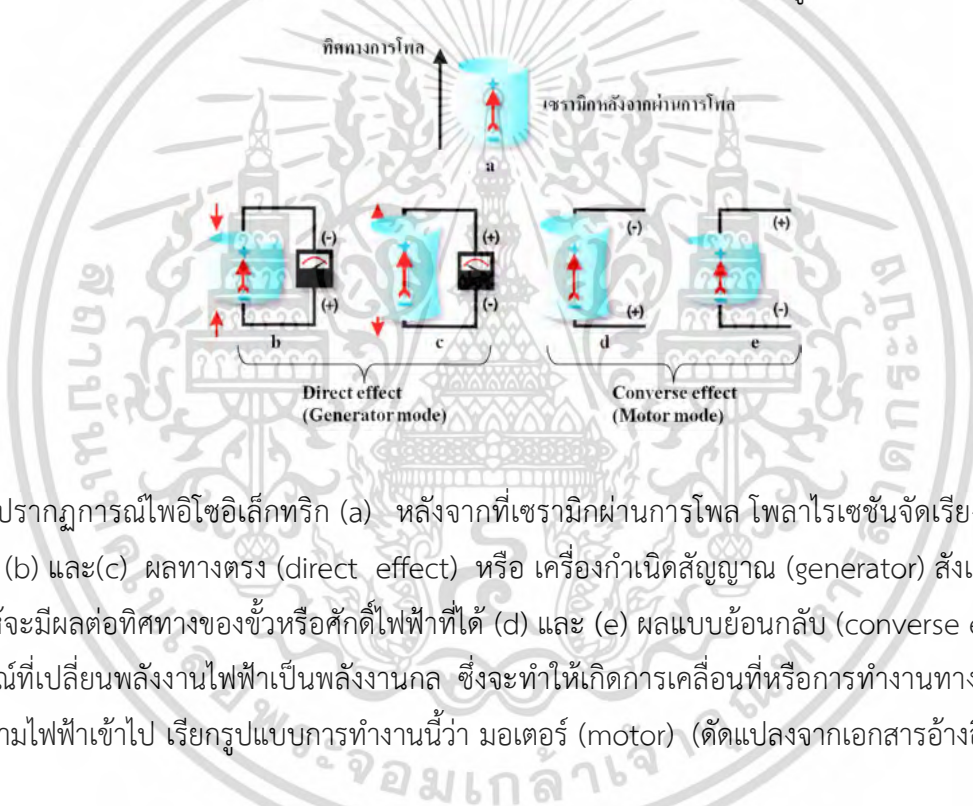
การที่เซรามิกที่มีคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกจะแสดงปรากฏการณ์โพลาไรเซชันได้นั้น เซรามิกจะต้องผ่านกระบวนการทำขั้วหรือการโพลก่อนนำมาใช้งาน จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 การค้นพบว่า การให้กระแสไฟฟ้าเพื่อทำการโพลเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก (ที่เป็นพหุผลึก) ทำให้เกิดการจัดเรียงโพลาริเซชันของผลึกหรือโดเมนภายในเซรามิกและทำให้เซรามิกมีคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่คล้ายคลึงกับผลึกเชิงเดี่ยว ดังนั้นกระบวนการโพล เป็นกระบวนการสำคัญที่จะทำให้เกิดสภาพโพลาไรเซชันในเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก หากไม่มีการโพล เซรามิกจะไม่เปลี่ยนสภาพแม้ว่าแต่ละผลึกจะเป็นโพลาไรเซชันอยู่แล้วก็ตามเนื่องจากโพลาริเซชันจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแบบสุ่มซึ่งทำให้โพลาริเซชันรวมมีค่าเป็นศูนย์ โดยทั่วไปแล้วการโพลเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกจะทำได้โดยการป้อนสนามไฟฟ้าที่มีขนาดสูงกว่าค่าสนามไฟฟ้าลบถ่วง (coercive field) ซึ่งเป็นค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้โพลาริเซชันมีการเปลี่ยนทิศทาง โดยปกติการโพลจะทำภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิสูงแต่ไม่เกินอุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) เช่น โพลที่ $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่ออุณหภูมิคูรีมีค่าประมาณ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ สนามไฟฟ้าจะถูกป้อนค้างไว้ที่แรงดันและอุณหภูมิจึงเป็นเวลาประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นจึงทำการลดอุณหภูมิจนถึงหรือใกล้เคียงอุณหภูมิห้องแล้วจึงลดค่าแรงดันไฟฟ้าจนเป็นศูนย์ หลังจากการโพลถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามแล้วก็ตามแต่โพลาริเซชันภายในเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกส่วนใหญ่ยังคงเรียงตัวในทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ได้ทำการโพล โพลาริเซชันเหล่านี้เรียกว่า โพลาริเซชันคงค้าง (remanent polarization) ดังที่กล่าวมาแล้ว ภาพไดอะแกรมที่แสดงทิศทางของโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้าแสดงไว้ในรูปที่ 2.6 หลังจากที่ผ่านมาการโพลแล้วเซรามิกจะสามารถนำมาใช้งานได้ แต่การใช้งานเซรามิกเหล่านี้จะต้องใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี เพราะเซรามิกจะเสียสภาพโพลาริเซชันเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี⁴ ในทางปฏิบัติแล้วเซรามิกเหล่านี้ไม่ควรใช้งานที่อุณหภูมิเกินครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิคูรี



รูปที่ 2.7 การโพลเซรามิกภายใต้สนามไฟฟ้าลบถ่วง (coercive field): (a) ก่อนทำการโพล โพลาริเซชันมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแบบสุ่ม (b) ขณะทำการโพลโดยจ่ายสนามไฟฟ้ากระแสตรงทำให้โพลาริเซชันจัดเรียงตัวตามแนวสนามไฟฟ้า (c) หลังการโพล โพลาริเซชันคงค้าง (remanent polarization) ส่วนมากยังมีทิศทางใกล้เคียงกับทิศทางของสนามไฟฟ้าในขณะที่ทำการโพล (ดัดแปลงจากเอกสารอ้างอิง [9])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบ่งออกเป็นสองปรากฏการณ์คือ ผลทางตรง (direct effect) และผลย้อนกลับ (converse effect) สำหรับ ผลทางตรง (direct effect) เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุไพโซอิเล็กทริกเปลี่ยนพลังงานกล (ความเค้นหรือความเครียดเชิงกล) เป็นพลังงานไฟฟ้า (ประจุไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้า) ซึ่งเรียกรูปแบบการทำงานนี้ว่า เครื่องกำเนิด (generator) ผลแบบย้อนกลับ (converse effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่หรือการทำงานทางกลเนื่องจากการป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไป เรียกรูปแบบการทำงานนี้ว่า มอเตอร์ (motor) อย่างไรก็ตามต้องพึงระลึกไว้เสมอว่า ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นกับเซรามิก (พหุผลึก) เพรโรอิเล็กทริกได้ก็ต่อเมื่อเซรามิกได้ผ่านการโพลมาแล้ว เนื่องจากโพลาริเซชันเป็นค่าเวกเตอร์ดังนั้นทิศทางของแรงหรือสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อเซรามิกจะมีผลต่อทิศทางของโพลาริเซชันหรือความเครียดที่เกิดขึ้นเช่นกัน ดังที่ได้แสดงตัวอย่างประกอบไว้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.8 ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (a) หลังจากทีเซรามิกผ่านการโพล โพลาริเซชันจัดเรียงตัวตามแนวสนามไฟฟ้า (b) และ(c) ผลทางตรง (direct effect) หรือ เครื่องกำเนิดสัญญาณ (generator) สังเกตว่าทิศทางของแรงที่ให้จะมีผลต่อทิศทางของขั้วหรือศักย์ไฟฟ้าที่ได้ (d) และ (e) ผลแบบย้อนกลับ (converse effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่หรือการทำงานทางกลเนื่องจากการป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไป เรียกรูปแบบการทำงานนี้ว่า มอเตอร์ (motor) (ดัดแปลงจากเอกสารอ้างอิง [9])

ในเชิงคณิตศาสตร์สมการพื้นฐานที่ใช้ในการอธิบายผลของปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกทั้งสองแบบสามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (\text{generator}) \quad (2.1)$$

$$S = s^E T + dE \quad (\text{motor}) \quad (2.2)$$

โดยที่ D ค่า dielectric displacement (หรือ polarization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϵ^T ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก หรือ ค่าสภาพยอม (dielectric constant, permittivity), ด้วย T หมายถึง ความเค้นมีค่าคงที่ หรือเซรามิกไม่ถูกจำกัดเชิงกล (mechanical unconstrained)

E ค่าสนามไฟฟ้า (electric field)

T ความเค้น (stress)

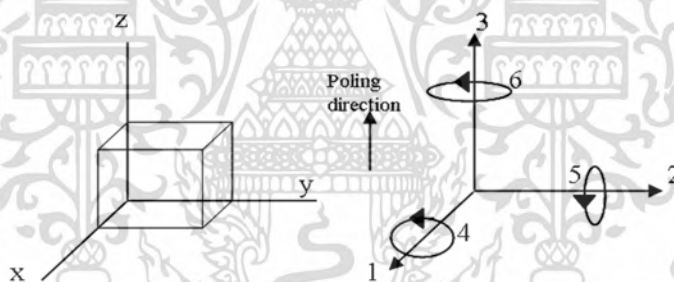
S ความเครียด (strain)

d ค่าคงที่ หรือ สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric constant or coefficient)

s^E ค่ายืดหยุ่น (elastic compliance), ด้วย E หมายถึง สนามไฟฟ้ามีค่าคงที่ หรือ

อิเล็กโทรดทั้งสองด้านของเซรามิกถูกต่อเข้าหากัน (shorted circuit)

โดยสมการที่ 2.1 และ 2.2 อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงไฟฟ้ากับเชิงกลของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เช่น โพลาริเซชันและความเครียด ในความเป็นจริงแล้วค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการเป็นค่าที่มีคุณสมบัติขึ้นอยู่กับทิศทางซึ่งโดยทั่วไปจะทำให้เข้าใจง่ายขึ้นโดยระบุด้วยตัวเลขห้อยสองตัว (ถ้าใช้สัญลักษณ์แบบเต็มรูปแบบจะใช้ตัวห้อยสี่ตัวซึ่งใช้สำหรับเทนเซอร์) เช่น สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก d_{31} การกำหนดทิศทางด้วยตัวเลขสามารถอธิบายอย่างง่ายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.9 แกนอ้างอิงที่ใช้สำหรับระบุทิศทางของปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก

จากรูปที่ 2.8 ทิศทางของการโพลจะแทนด้วยทิศทางแนวแกน Z ซึ่งแทนด้วยตัวเลข 3 เสมอ อีกสองแกนที่ตั้งฉากกับแกน Z คือแกน X และ Y แทนด้วยเลข 1 และ 2 สำหรับเลข 4, 5 และ 6 จะแทนการปิดรอบแกน 1, 2 และ 3 ตามลำดับ (ซึ่งโดยทั่วไปจะหมายถึง ความเค้นหรือความเครียดเฉือน) ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ไม่มีความเค้นกระทำต่อวัสดุ เมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุไพโซอิเล็กทริกในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของการโพล (ให้สนามไฟฟ้าในทิศทาง 1 หรือ 2) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุในแนวตั้งฉากกับทิศทางของการโพล (เกิดความเครียดในทิศทาง 1 หรือ 2) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์โดยใช้สมการที่ 2.2 ดังนี้

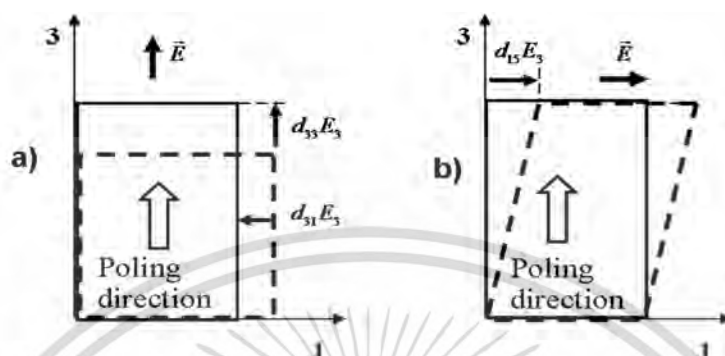
$$S_1 = d_{31}E_1 \quad (T = 0 \text{ เนื่องจากไม่มีความเค้นกระทำต่อวัสดุ})$$

หรือ

$$S_2 = d_{32}E_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างของปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบผลย้อนกลับในทิศทางต่างๆ แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.10 ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบผลย้อนกลับโดย (a) ป้อนสนามไฟฟ้าไปในทิศทางเดียวกับทิศทางของการโพล ทำให้เกิดการยืดตัวในแกน 3 (d_{33} -effect) และหดตัวในแนวแกน 1 (d_{31} -effect) (b) ในขณะที่ป้อนสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับทิศทางของการโพล ทำให้เกิดความเครียดเฉือนรอบแกน 2 (d_{15} -effect) โดยเส้นประแสดงถึงรูปร่างวัสดุก่อนการป้อนสนามไฟฟ้า เส้นทึบแสดงรูปร่างที่เปลี่ยนไปหลังให้สนามไฟฟ้า

สำหรับวัสดุไพโซอิเล็กทริกค่าพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกถึงคุณสมบัติความเป็นไพโซอิเล็กทริกเรียกว่าตัวเลขแห่งคุณค่า (figures of merit) ซึ่งมี 5 ตัวที่สำคัญได้แก่ ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก d (บางครั้งเรียกว่าค่าคงที่ประจุไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric charge constant)) ซึ่งได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้, ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก หรือ ค่าคงที่ศักดีไฟฟ้าไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric voltage constant) g , แฟกเตอร์คู่ควบไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric coupling factor) k , แฟกเตอร์คุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor) Q_m และ อะคูสติก อิมพีแดนซ์ (acoustic impedance) Z ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก หรือ ค่าคงที่ศักดีไฟฟ้าไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric voltage constant) g เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับบ่งบอกถึงความสามารถในการสร้างค่าศักย์ไฟฟ้าต่อหน่วยของความเค้นที่กระทำบนเซรามิก ค่า g มีความสัมพันธ์กับ d ดังนี้

$$g = \frac{d}{K\epsilon_0} \quad (2.3)$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant): *ในตำราบางเล่มโดยเฉพาะทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์มักจะแทนค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ด้วย ϵ_r

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอม (permittivity) ของอากาศ มีค่า 8.854×10^{-12} F/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุจะมีค่า g สูง ณ ที่ค่า d คงที่หนึ่งๆ เมื่อวัสดุมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (K) ต่ำ เซรามิกที่มีค่า g สูงส่วนใหญ่แล้วเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดแข็ง (ferroelectrically hard material) ซึ่งหมายถึงวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกประเภทที่โพลาริเซชันเกิดการสับเปลี่ยนทิศทาง (polarization switching) ได้ยาก และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดแข็งนี้นิยมใช้ทำเป็นตัวจุดไฟ (gas igniter) แพลกเตอร์คู่ควบไพโซอิเล็กทริก หรือ piezoelectric coupling factor, k (ได้แก่ k_{33} , k_{31} และ k_p : *เพื่อไม่ให้เกิดความสับสนขอให้สังเกตว่า แพลกเตอร์คู่ควบไพโซอิเล็กทริกจะแทนด้วยอักษรภาษาอังกฤษตัว เค เล็ก (k) ในขณะที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะแทนด้วยตัวใหญ่ (K)) เป็นค่าที่ใช้วัดความสามารถของวัสดุที่มีคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกในการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นไฟฟ้าหรือจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยหาได้จากกราฟที่สองของอัตราส่วนของพลังงานที่ให้ออกมาในรูปของไฟฟ้าต่อพลังงานกลทั้งหมดที่ให้เข้าไป (สำหรับผลทางตรง หรือ direct effect) หรือหาได้จากกราฟที่สองของอัตราส่วนของพลังงานทางกลที่ให้ออกมาได้ต่อพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ให้เข้าไป (สำหรับผลแบบย้อนกลับ หรือ converse effect) ค่าแพลกเตอร์คู่ควบไพโซอิเล็กทริกสามารถเขียนได้เป็นสมการดังนี้

$$k^2 = \frac{\text{พลังงานที่ได้}}{\text{พลังงานทั้งหมดที่ป้อนเข้า}} \quad (2.4)$$

โดยปกติแล้วการเปลี่ยนรูปของพลังงานไฟฟ้าไปเป็นรูปของพลังงานกล หรือพลังงานกลเป็นไฟฟ้า จะไม่สมบูรณ์ ดังนั้นค่า k จะน้อยกว่า 1 เสมอ สำหรับวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่คืนันควรมีค่า k ที่สูง เซรามิก

โดยทั่วไปมีค่า k_p อยู่ในช่วง 0.35 สำหรับ BaTiO_3 และ 0.72 สำหรับ PLZT แพลกเตอร์คุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor) Q_m เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงลักษณะความเร็วของรูปร่างสเปกตรัมของอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนน ในทางกายภาพค่าดังกล่าวจะบอกถึงการยืดหดตัวหรือการเกิดความเครียดของวัสดุที่ความถี่เรโซแนน ส่วนกลับของค่าดังกล่าว (Q_m^{-1}) บ่งบอกถึงความสูญเสียเชิงกลซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ $\tan \delta$ ถ้าค่าดังกล่าวมีค่ามากการสูญเสียพลังงานเชิงกลขณะสั้นของวัสดุเนื่องจากการยืดหดตัวในช่วงความถี่เรโซแนนจะมีมากค่า อคูสติค อิมพีแดนซ์ (acoustic impedance) Z เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ประเมินความสามารถในการถ่ายทอดพลังงานผ่านคลื่นเสียง (acoustic energy transfer) ระหว่างวัสดุสองชนิด ซึ่งหาได้จากสูตร

$$Z = \sqrt{\rho c} \quad (2.5)$$

โดยที่ ρ คือความหนาแน่น และ c คือ ความแข็งยืดหยุ่น (elastic stiffness) ของวัสดุ

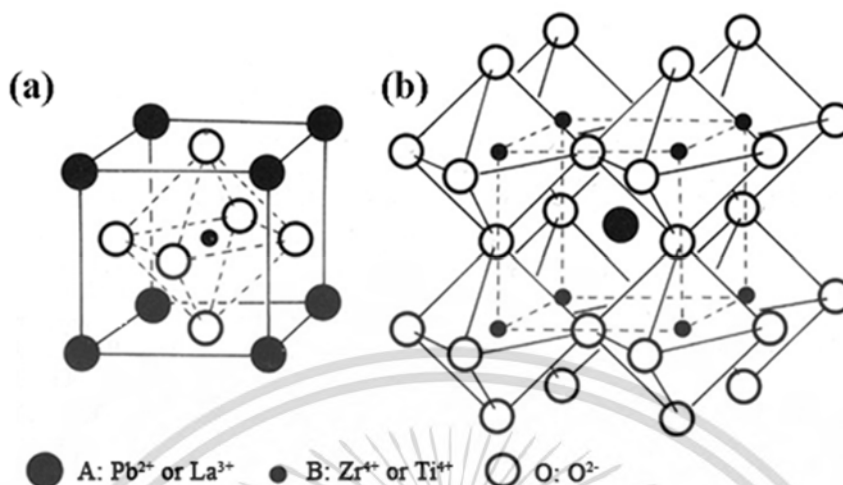
2.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสภาพเฟอร์โรอิเล็กทริกในเซรามิก

ไดอะแกรมในรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าผลึกที่มีสมมาตรที่ไม่มีศูนย์กลาง (noncentrosymmetric) 10 แบบสามารถแสดงคุณสมบัติไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric) ได้ ผลึกกลุ่มนี้มีสมบัติเฉพาะคือจะเกิดโพลาริเซชันแบบถาวรในช่วงอุณหภูมิหนึ่งๆ (อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิคูรี) ซึ่งต่างจากไพโรอิเล็กทริกที่จะเกิดโพลาริเซชันเมื่อมีความเค้นมากระทำเท่านั้น วัสดุที่มีคุณสมบัติไพโรอิเล็กทริกจะมีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเฟสเมื่ออุณหภูมิของผลึกลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี และทำให้เกิดสภาพมีขั้วถาวรในโครงสร้างผลึก โพลาริเซชันของผลึกชนิดนี้มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิดังนั้นจึงเรียกว่า สภาพไพโรอิเล็กทริก (ไพโร หรือ pyro มาจากภาษากรีก หมายถึง ความร้อน) ค่าไดโพลโมเมนต์โดยรวมของผลึกไพโรอิเล็กทริกแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางกระแสไฟฟ้าที่ได้จากผลึกเมื่อมีการให้ความร้อนแก่ผลึก วัสดุไพโรอิเล็กทริกบางกลุ่มมีคุณสมบัติพิเศษคือโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองนั้นสามารถกลับทิศทางได้โดยสนามไฟฟ้าภายนอก วัสดุกลุ่มพิเศษเหล่านี้ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก ดังนั้นผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกจึงมีคุณสมบัติที่สำคัญสองประการ คือ

1. มีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นได้เอง (spontaneous polarization)
2. โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นได้เอง (spontaneous polarization) สามารถกลับทิศทางได้โดยสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้แก่ผลึก เซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกอาจแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มย่อย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ตามชนิดของโครงสร้างของยูนิทเซลล์ คือ

1. กลุ่ม tungsten-bronze
2. กลุ่ม oxygen octahedral
3. กลุ่ม pyrochlore
4. กลุ่ม bismuth layer

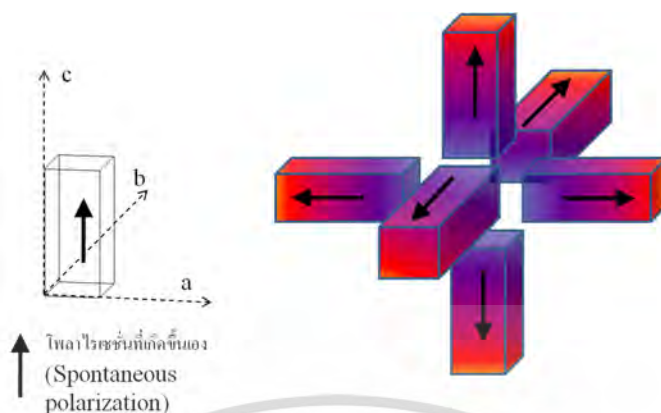
ในสี่กลุ่มนี้ กลุ่มที่ 2 (ABO_3 perovskite)[10] เป็นกลุ่มมีความสำคัญที่สุดและถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นอย่างมาก เซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ใช้กันมากในปัจจุบันได้แก่ $BaTiO_3$, PZT, PLZT, PT, PMN, และ $(Na,K)NbO_3$ โครงสร้างโดยทั่วไปของยูนิทเซลล์ของ ABO_3 แสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงให้เห็นโครงสร้างของยูนิทเซลล์ ABO_3 ทั้งในมุมมองของโครงสร้างแบบ perovskite (รูปที่ 2.10a) และ oxygen octahedral (รูปที่ 2.10b) ตัวอย่างเช่น ยูนิทเซลล์ของ PLZT ประกอบด้วยเครือข่ายที่เชื่อมต่อกันที่มุมของ oxygen octahedral โดยมี Zr^{4+} และ Ti^{4+} ที่ตำแหน่ง B ภายในโครงสร้าง octahedral (octahedral cage)[11] และมี Pb^{2+} และ La^{3+} อยู่ที่ตำแหน่ง A ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แทรกอยู่ระหว่างช่องว่างที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ octahedral เนื่องจากการมีค่าประจุที่ต่างกันของ Pb^{2+} และ La^{3+} อาจทำให้โครงสร้างไม่มีค่าเป็นกลางทางไฟฟ้างดนั้นเพื่อทำให้โครงสร้างมีค่าเป็นกลางทางไฟฟ้า บางตำแหน่งของ A และ B ในเครือข่ายของ octahedral จะเป็นที่ว่าง



รูปที่ 2.11 (a) โครงสร้างแบบ perovskite (b) เครือข่ายแบบสามมิติของ oxygen octahedral ของ PLZT

เมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้าให้กับยูนิตเซลล์ ไอออน Zr^{4+} และ Ti^{4+} จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่ตามทิศทางของสนามที่ให้ เนื่องจากผลึกมีการเรียงตัวแบบสุ่ม (randomly orientation) และ ไอออนถูกบังคับให้เคลื่อนที่เฉพาะบางทิศทางในผลึกของยูนิตเซลล์ การเคลื่อนที่ของไอออนจึงมีทิศทางใกล้เคียงกับทิศทางของสนามไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเคลื่อนที่นี้เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของยูนิตเซลล์อย่างมากและส่งผลกระทบต่อขนาดของเซรามิกทั้งชิ้น การเปลี่ยนแปลงขนาดอาจมากถึงประมาณ 0.2 % ในทิศทางตามสนามไฟฟ้าที่ได้รับ และการเปลี่ยนแปลงของขนาด ในทิศทางที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าจะมีค่า ประมาณครึ่งหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงในแนวสนามไฟฟ้า การที่จะทำให้โพลาริเซชันหรือโดเมน (โดเมน หมายถึง โพลาริเซชันที่อยู่ในบริเวณเดียวกันที่มีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน) กลับมามีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มอีกครั้งหนึ่งเหมือนสภาพก่อนการให้สนามไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนแก่วัสดุที่อุณหภูมิสูงกว่า อุณหภูมิคูรี ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า การสลายขั้วโดยความร้อน (thermal depoling) [12], [13]

ในรูปที่ 2.11 แสดงการเปลี่ยนทิศของการโพลาริเซชันเกิดจากการเคลื่อนที่ของ Zr^{4+} และ Ti^{4+} ตามแกน c ในโครงสร้างยูนิตเซลล์เตตระโกนัล (tetragonal structure) ซึ่งทิศทางของโพลาริเซชันสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งหมด 6 ทิศทาง



รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนทิศของการโพลาไรเซชันในโครงสร้างเตตระโกนัล (tetragonal structure) สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งหมด 6 ทิศทางซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้

ตามที่กล่าวมาแล้วเมื่อยูนิเซลล์หลาย ๆ หน่วยที่ติดกันอยู่มีโพลาไรเซชันจัดเรียงตัวไปในแนวเดียวกันเราเรียกพื้นที่นี้ว่าโดเมนหนึ่งโดเมน โดเมนแต่ละโดเมนจะมีผนัง (domain wall) ที่แยกกับโดเมนอื่น ๆ ที่เรียงตัวในอีกทิศทางหนึ่ง โดเมนในวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกเป็นเตตระโกนัล (tetragonal) จะมีการสับเปลี่ยนทิศทางได้สองทิศทางคือ สับเปลี่ยนทิศทาง 90° องศา (90° domain switching) และ 180° องศา (180° domain switching) การสับเปลี่ยนทิศทางแบบ 90° จะทำให้เกิดความเครียดในวัสดุ ในขณะที่การสับเปลี่ยนทิศทางแบบที่ 180° จะไม่ทำให้เกิดความเครียด ในขณะที่ในวัสดุที่มีผลึกแบบบรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) จะเกิดการสับเปลี่ยนทิศทางของโดเมนแบบ 70.5° และ 110° ซึ่งมีผลทำให้เกิดความเครียดในวัสดุ และการสับเปลี่ยนทิศทางของโดเมนแบบ 180° ซึ่งไม่ทำให้เกิดความเครียด (รายละเอียดที่เกี่ยวกับโดเมนของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกจะกล่าวในบทที่ 3)

2.3.1 อิเล็กโทรสตริกชันในเซรามิกส์เฟอร์โรอิเล็กทริก

อิเล็กโทรสตริกชันเป็นปรากฏการณ์ทั่วไปอย่างหนึ่งของไฟฟ้าเชิงกล (electromechanical) ที่อยู่ในสารไดอิเล็กทริก (dielectric materials) ดังนั้นวัสดุจำพวกเฟอร์โรอิเล็กทริกจึงมีคุณสมบัติดังกล่าวด้วยเช่นกัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้คือการเปลี่ยนขนาดหรือรูปร่างของวัสดุเมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้าภายนอกให้แก่วัสดุ และการเปลี่ยนขนาดของวัสดุไม่ขึ้นกับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้แก่วัสดุ ขนาดของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงนี้จะแปรผันกับกำลังสองของค่าสนามไฟฟ้าที่ให้ อิเล็กโทรสตริกชันต่างจากปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกตรงที่ วัสดุไพโซอิเล็กทริกจะมีการเปลี่ยนขนาดที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้ และทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้นั้นยังมีผลต่อทิศทางการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุ (การยืด หรือหด) ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่า อิเล็กโทรสตริกชันมีผลทำให้เกิดการขยายหรือยืดตัวของวัสดุเท่านั้น(ไม่มีการหดตัว) ไม่ว่าจะป้อนสนามไฟฟ้าในทิศทางใดก็ตาม และ

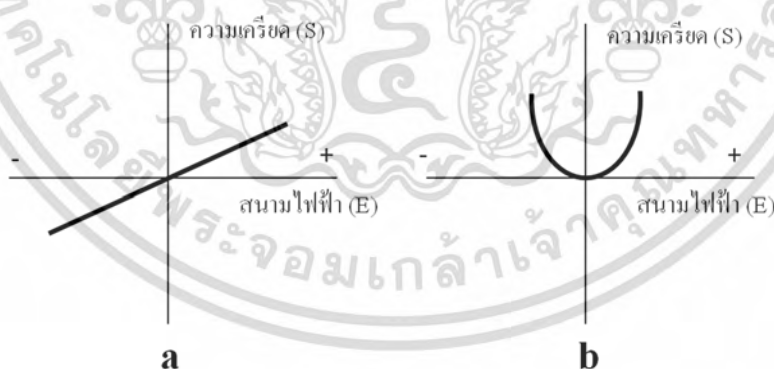
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุจะคลายตัวกลับไปเป็นเหมือนเดิมเมื่อปราศจากสนามไฟฟ้ามากกระทำ (ดูรูปที่ 2.12 ประกอบ) สำหรับวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกผลของอิเล็กโตรสตริกชันมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของโพโซอิเล็กทริกเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้มีความน้อย สมการที่สอดคล้องกับปรากฏการณ์อิเล็กโตรสตริกชันสามารถเขียนได้ดังนี้

$$S = mE^2 \quad (\text{ในแง่ของสนามไฟฟ้า}) \quad (2.6)$$

$$S = QP^2 \quad (\text{ในแง่ของโพลาริเซชัน}) \quad (2.7)$$

เมื่อ P คือ โพลาริเซชัน m และ Q คือ สัมประสิทธิ์อิเล็กโตรสตริกทีฟ (electrostrictive coefficients) เช่นเดียวกับปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (อิเล็กโตรสตริกชันเป็นปริมาณทางเวกเตอร์โดยปกติจะต้องแสดงตัวเลขห้อยในสมการด้วย) เนื่องจากว่าอิเล็กโตรสตริกชันเป็นคุณสมบัติโดยทั่วไปของสารไดอิเล็กทริก (dielectric materials) ทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็น ผลึก (crystalline) หรือ ออสัญฐาน (Amorphous) ก็ตาม ดังนั้นสารเฟอร์โรอิเล็กทริกจึงมีคุณสมบัติดังกล่าวอยู่ด้วย ที่สำคัญคือ อิเล็กโตรสตริกชัน จะมีผลอย่างมากในสารเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric materials) เมื่อสารเหล่านี้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าค่า T_C เล็กน้อย ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่สนามไฟฟ้าสามารถทำให้เฟสของเฟอร์โรอิเล็กทริกไม่เสถียร (unstable ferroelectric phase) ยิ่งกว่านั้น คุณสมบัติอิเล็กโตรสตริกชัน นี้สามารถนำมาใช้ประยุกต์กับสารรีแลกซอร์ (relaxor materials) เช่น PMN, PZN (lead zinc niobate) และ PLZT เนื่องจากมีค่า T_C ที่อยู่ในช่วงกว้างและอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ไม่สูงนัก ดังนั้นจึงสามารถนำสารรีแลกซอร์มาใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิก่อนข้างกว้าง



รูปที่ 2.13 ปรากฏการณ์ (a)โพโซอิเล็กทริก และ (b)อิเล็กโตรสตริกชัน ภายใต้สนามไฟฟ้า

วัสดุอิเล็กโตรสตริกทีฟสามารถที่จะนำมาใช้งานในโหมดของโพโซอิเล็กทริกโดยใช้สนามไฟฟ้าไบแอส (field-biased piezoelectric mode) ซึ่งทำได้โดยการให้สนามไฟฟ้าไบแอสกระแสตรง (DC electric field bias) แก่วัสดุอิเล็กโตรสตริกทีฟ สนามไฟฟ้าไบแอสนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดโพลาริเซชันเหมือนในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

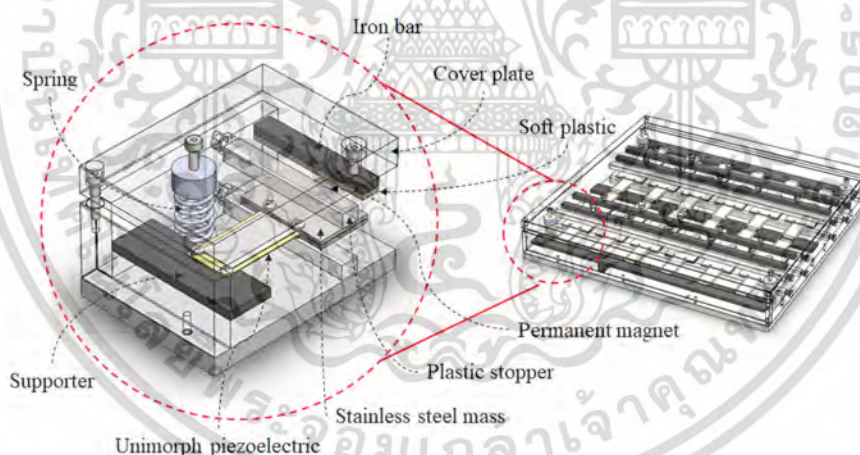
(ferroelectric polarization) ดังนั้นในขณะที่มีสนามไฟฟ้าอยู่วัสดุสามารถแสดงปรากฏการณ์โพธิโซอิเล็กทริกได้ และยังสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นผลของปรากฏการณ์โพธิโซอิเล็กทริกก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ยกตัวอย่างเช่นสามารถทำให้วัสดุรีแลกเซอร์ขยายตัวได้มาก (สามารถทำให้เกิดค่าความเค้นตามแนวยาวได้ถึง 0.1% สำหรับ PMN) ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริก d กับค่า โพลาริซและค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric permittivity) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$d_{33} = 2Q_{11} P_3 \epsilon_{33} \quad (2.8)$$

$$d_{31} = 2Q_{12} P_3 \epsilon_{33} \quad (2.9)$$

เมื่อ Q_{11} และ Q_{12} คือค่าสัมประสิทธิ์อิเล็กโทรสทริกที่ฟตามยาว และตามขวางตามลำดับ ดังนั้น ถ้าต้องการให้สัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริกสูง จะต้องใช้วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าโพลาริซสูง ค่าสัมประสิทธิ์ Q ที่แสดงไว้ในสมการข้างต้นเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ⁶⁻⁹

2.4 แนวคิดของพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานและเทคนิคการเพิ่มความถี่

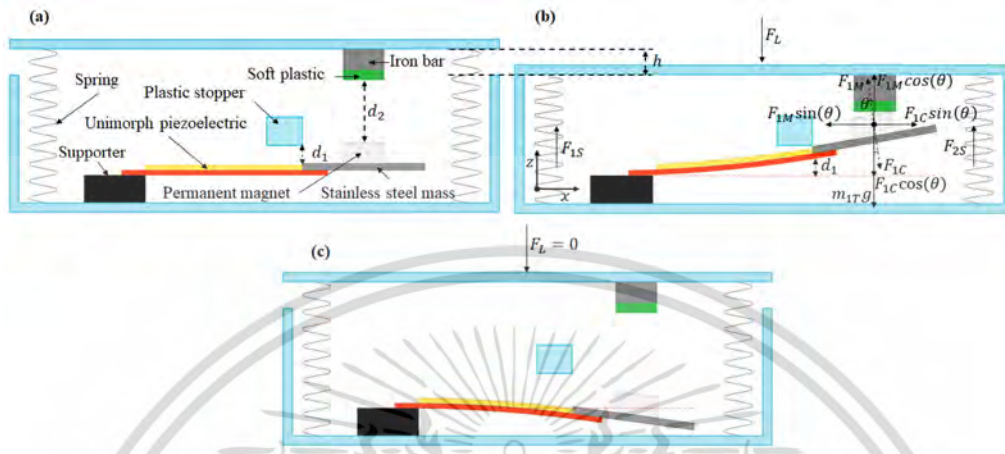


รูปที่ 2.14 Schematic drawing of energy harvesting floor tile

แผนผังของพื้นกำเนิดพลังงานที่มีกลไกการเพิ่มความถี่ติดตั้งอยู่ภายใน แสดงดังรูปที่ 2.13 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกแบบคานชนิด PZT จำนวน 24 ชิ้น ด้านหนึ่งถูกยึดติดกับฐานรองรับ และปลายอีกด้านหนึ่งถูกปล่อยให้แกว่งเป็นอิสระ และที่ปลายนั้นมีก้อนมวลสแตนเลสติดตั้งอยู่เพิ่มความถี่ให้กับเพียโซอิเล็กทริก เพื่อเพิ่มพลังงานที่เกิดขึ้นขณะที่เกิดการสั่น แม่เหล็กถาวรติดอยู่บนของก้อนมวล สำหรับใช้ดึงดูดแท่งเหล็กที่ติดอยู่ใต้ฉากของพื้นกำเนิดพลังงานเมื่อแผ่นพื้นถูกเหยียบ และมีพลาสติกอ่อนที่ติดตั้งไว้ระหว่างเหล็กและแม่เหล็กถาวรสำหรับการดูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นแรงกระแทก มีการติดตั้งสปริงที่มุมทั้งสี่เพื่อดันแผ่นฟลายปิดขึ้นหลังจากมีการเหยียบ และมีตัวหยุดติดตั้งไว้ในโครงสร้างเพื่อป้องกันเพียโซอิเล็กทริกเสียหายจากระยะการสั่นที่มากเกินไป



รูปที่ 2.15 (a) Waiting for load; (b) and (c) Loaded and unloaded states of energy harvesting floor tile

รูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นถึงลำดับการทำงานของกลไกการเพิ่มความถี่ของพื้นกำเนิดพลังงาน ในสภาวะรอการทำงาน (รูปที่ 2.14(a)) ช่องว่างที่อยู่ระหว่างแม่เหล็กถาวรและแท่งเหล็ก (d_2) ต้องมีค่าระยะที่เหมาะสม เพื่อให้แน่ใจว่าแรงดึงดูดจากแม่เหล็กถาวร(F_{IM}) จะไม่ไปรบกวนการสั่นของเพียโซอิเล็กทริก ดังนั้นแท่งเหล็กควรติดตั้งเมื่อ $F_{IM} = 0$ แรงดึงดูดที่กระทำโดยแม่เหล็กถาวรที่มีผลต่อช่องว่างอากาศสามารถหาได้จากสมการแม่เหล็กไฟฟ้าของ Maxwell ดังต่อไปนี้

$$F_{IM} = \frac{B^2 A_L}{2\mu_0} \tag{2.10}$$

เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots$ ถึง 24 แต่ละค่าระบุถึงตัวของแม่เหล็กถาวรและเพียโซอิเล็กทริก. B คือค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก A , คือหน้าตัดพื้นที่ของขั้ว และ μ_0 คือค่าการแทรกตัวของอากาศ

สำหรับสถานะเมื่อมีการเหยียบ กลไกทำงาน แสดงดังรูป 2.14(b) เมื่อพื้นกำเนิดพลังงานถูกเหยียบ สปริงจะถูกบีบอัดด้วยแรงอัด (F_L) จากน้ำหนักของแรงที่เหยียบลง แรงอัด F_L ควรจะมากกว่าแรงดึงกลับของสปริง (F_{JS})

$F_L > \sum_{j=1}^a F_{JS}$ เมื่อ a คือจำนวนของสปริงที่ใช้ จากกฎข้อที่สองของนิวตันและ กฎของ F_L และ F_{JS} สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$F_L = m_L g \tag{2.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{js} = -k_{js}h \quad (2.12)$$

เมื่อตัวห้อย $j = 1, 2, 3$ and 4 ระบุถึงจำนวนของสปริง m_L คือมวลของน้ำหนักที่มาเหยียบ; g คือค่าความเร่งโน้มถ่วง k_{js} คือค่าคงที่ของสปริง และ h แสดงถึงค่าระยะขจัดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีแรงกระทำ สถานะไหลดยังเป็นสถานะที่แท่งเหล็กมาใกล้กับตำแหน่งที่มีความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสูง ดังนั้นแม่เหล็กถาวรจะดึงดูดแท่งเหล็ก ดังนั้นแม่เหล็กถาวรจะเบี่ยงเบนคานเพียโซอิเล็กทริกที่อยู่ใต้แท่งเหล็กเข้าหา แรงที่เกิดขึ้นในแกน Z (F_{iz}) ส่งผลให้คานเพียโซอิเล็กทริกเกิดการเบนจะหาได้จากสมการดังนี้

$$F_z = F_{im} \cos \theta - (F_{ic} \cos \theta + m_{IT}g) \quad (2.13)$$

เมื่อ F_{ic} is แรงดึงกลับของคานเพียโซอิเล็กทริก θ คือมุมพิวด้านบนของแม่เหล็กถาวร และ m_{IT} แสดงถึงมวลรวมของแม่เหล็กและก้อนมวลที่ปลายของคานเพียโซอิเล็กทริก แรงดึงกลับ F_{ic} สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ [14]

$$F_{ic} = k_{ic}d_1 \quad (2.14)$$

เมื่อ k_{ic} ค่าคงที่สปริงของคานเพียโซอิเล็กทริก d_1 คือระยะขจัดของคานเพียโซอิเล็กทริกที่เกิดขึ้น และ k_{ic} คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$k_{ic} = \frac{3(EI)_{\text{Cantilever}}}{l^3} = \frac{3(E_p I_p + E_e I_e)}{l^3} \quad (2.15)$$

เมื่อ $(EI)_{\text{Cantilever}}$ คือค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของคานเพียโซอิเล็กทริก l คือความยาวของคานเพียโซอิเล็กทริก และชั้นยืดหยุ่น E_p และ E_e คือค่ามอดุลัสของยังของเพียโซอิเล็กทริกและของชั้นยืดหยุ่น และ I_p กับ I_e คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเพียโซอิเล็กทริกและชั้นยืดหยุ่น โมเมนต์ความเฉื่อยของเพียโซอิเล็กทริกและชั้นยืดหยุ่นสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ [15],

$$I_p = \frac{w_p t_p^3}{12} + w_p t_p \left(\frac{t_p}{2} - t_n \right)^2 \quad (2.16)$$

$$I_e = \frac{w_e t_e^3}{12} + w_e t_e \left(\frac{t_e}{2} - t_n \right)^2 \quad (2.17)$$

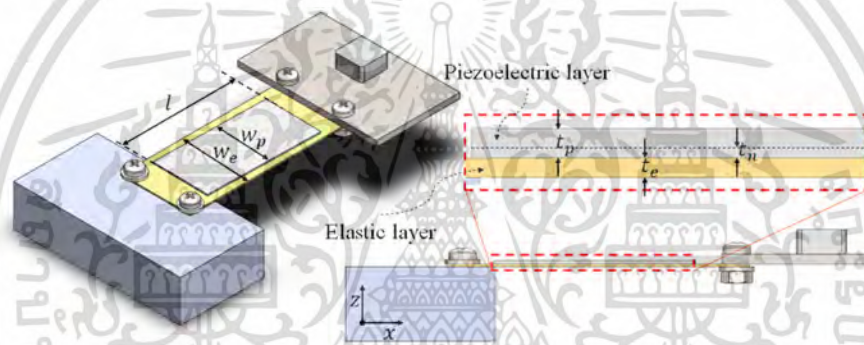
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ w_p และ w_e คือความกว้างของเพียโซอิเล็กทริกและชั้นยืดหยุ่น t_p และ t_e คือความหนาของเพียโซอิเล็กทริกและชั้นยืดหยุ่น และ t_n คือค่าระยะทางของระนาบกลางในชั้นเพียโซอิเล็กทริก แสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง

$$t_n = \frac{E_p t_p^2 - E_e t_e^2}{2(E_p t_p + E_e t_e)} \quad (2.18)$$

ยิ่งไปกว่านั้น ความเครียดอัดที่เกิดในคานเพียโซอิเล็กทริก เกิดจากการเหนี่ยวนำในแรงแกน x

$$F_x = F_{iM} \sin\theta - F_{iC} \sin\theta \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.16 Schematic of a unimorph piezoelectric cantilever with a proof mass

ในสถานะหลังจากมีการเหยียบ เมื่อเท้ายกออกจากพื้นกำเนิดพลังงาน $F_L = 0$ จะแสดงในรูปที่ 2.15 และแรงดึงกลับของสปริงทั้งหมด จะมีค่ามากกว่าแรงที่เกิดขึ้นในแกน z $\sum_{j=1}^a F_{jS} > \sum_{i=1}^b F_{iz}$ เมื่อ b คือจำนวนของคานที่มีแม่เหล็กถาวรติดอยู่ สปริงจะดันฝาของพื้นกำเนิดพลังงาน และแท่งเหล็กที่ติดตั้งอยู่ภายในขึ้นจากแรงของแม่เหล็กถาวร ในขั้นตอนนี้จะเป็นการแยกแม่เหล็กถาวรออกจากแท่งเหล็กแบบทันที เพื่อให้คานเพียโซอิเล็กทริกเกิดการสั่นแบบอิสระด้วยความถี่สูง

2.5 ระบบสมาร์ทโฮม (Smart Home)

ในปัจจุบันการควบคุมเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านหรือระบบสมาร์ทโฮม(Smart Home) ได้เป็นที่นิยมและแพร่หลายมากขึ้นและมีโอกาสจะได้รับความนิยมถึงขั้นเป็นอุปกรณ์มาตรฐานภายในบ้าน เนื่องจากความสะดวกสบายในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ (Smart Device) การตั้งเงื่อนไขการเปิดปิดอุปกรณ์ต่าง ๆ หรือแม้กระทั่ง

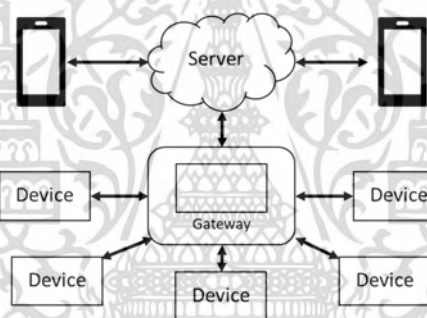
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบรักษาความปลอดภัยภายในบ้าน โดยผู้ใช้งานจะสามารถควบคุมทั้งหมดได้ภายในสมาร์ทโฟนเพียงเครื่องเดียวผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

ในการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ผ่านสมาร์ทโฟนนั้น จะต้องมีตัวจัดการ หรือศูนย์กลางการจัดการอุปกรณ์ เรียกว่าเกตเวย์ (Gateway) ซึ่งจะเป็นตัวสำหรับเชื่อมอุปกรณ์ Smart Device ทั้งหมด และทำการรับส่งคำสั่งมายังสมาร์ทโฟนผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

2.5.1 ภาพรวมหลักการทำงานของเกตเวย์

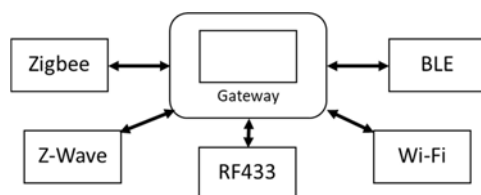
ในระบบสมาร์ทโฮมนั้น การควบคุมอุปกรณ์ Smart Device ต่างๆที่มีจำนวนมากติดตั้งอยู่ภายในบ้านนั้น จำเป็นจะต้องมีศูนย์กลางการสั่งการ เรียกว่าเกตเวย์ (Gateway) โดยเกตเวย์นั้นจะมีหน้าที่ควบคุมอุปกรณ์ทั้งหมดที่ผู้ใช้งานนำมาเชื่อมต่อ และทำการจัดการสถานะอุปกรณ์ทั้งหมด รวมไปถึงการตั้งเงื่อนไขการทำงานต่างๆจากผู้ใช้งาน และมีหน้าที่ที่ส่งข้อมูลเหล่านี้ไปยังเซิร์ฟเวอร์ เพื่อให้ผู้ใช้งานผ่านแอปพลิเคชันสามารถควบคุมเกตเวย์ได้ผ่านระบบอินเทอร์เน็ต ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.17 การเชื่อมต่อของระบบสมาร์ทโฮม

การทำงานของเกตเวย์นั้น จะต้องมีฟังก์ชันในการเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับเกตเวย์เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถระบุตัวอุปกรณ์ที่ต้องการสั่งการผ่านเกตเวย์นี้ได้ โดยเกตเวย์จะต้องเป็นตัวจัดการรายชื่ออุปกรณ์ที่ผู้ใช้งานนำมาเชื่อมต่อทั้งหมด และมีฟังก์ชันในการสั่งการอุปกรณ์นั้นๆแยกแต่ละตัวอุปกรณ์ โดยจะต้องแสดงชื่อหรือไอคอนที่ระบุตัวอุปกรณ์นั้นๆ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถกดเข้ามาควบคุมอุปกรณ์ได้ผ่านหน้าจอเกตเวย์

ในการเชื่อมต่อระหว่างเกตเวย์และอุปกรณ์ Smart Device นั้น เนื่องจากระบบสมาร์ทโฮมนั้นมีการส่งข้อมูลผ่านระบบคลื่นวิทยุไร้สายอยู่หลากหลายมาตรฐานเช่น Zigbee, Z-Wave, RF433, Wi-Fi, Bluetooth เป็นต้น ซึ่งแต่ละชนิดก็จะมีข้อดีข้อเสีย และการเชื่อมต่อที่แตกต่างกันออกไป และจากจุดประสงค์ข้างต้นทำให้เกตเวย์นี้จำเป็นจะต้องมีฟังก์ชันในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ทุกชนิด ซึ่งรายละเอียดของแต่ละชนิดจะแสดงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.18 เกตเวย์ที่เชื่อมต่อทุกชนิดคลื่น

ในส่วนของอุปกรณ์ Smart Device นั้น จะแยกออกเป็นสองประเภทด้วยกันคือ อุปกรณ์ประเภทอินพุต เช่น PIR, Temperature Sensor, Smoke Detector, Gas Detector เป็นต้น และอุปกรณ์ประเภทเอาต์พุต เช่น สวิตช์ต่างๆ, รีโมทอินฟราเรด เป็นต้น ซึ่งในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์นั้น ก็จะแยกเป็นสองประเภทคือ อุปกรณ์ประเภทเชื่อมต่อสองทาง หมายถึงมีทั้งรับและส่งข้อมูล จะใช้คลื่น Zigbee, Z-Wave, Wi-Fi, Bluetooth และอีกประเภทคืออุปกรณ์ที่รับหรือส่งข้อมูลทางเดียว หมายถึงอุปกรณ์ชนิดเอาต์พุต เกตเวย์จะสามารถสั่งได้อย่างเดียว ไม่สามารถอ่านสถานะกลับได้ เหล่านี้จะใช้คลื่น RF433 ละ Bluetooth บางส่วน เป็นต้น



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างอุปกรณ์สมาร์ทโฮม

2.5.2 ระบบการเชื่อมต่อไร้สายของสมาร์ทโฮม

ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์สมาร์ทโฮมผ่านคลื่นวิทยุไร้สายนั้น จะมีความนิยมใช้งานหลักๆอยู่ 5 ชนิด ดังต่อไปนี้

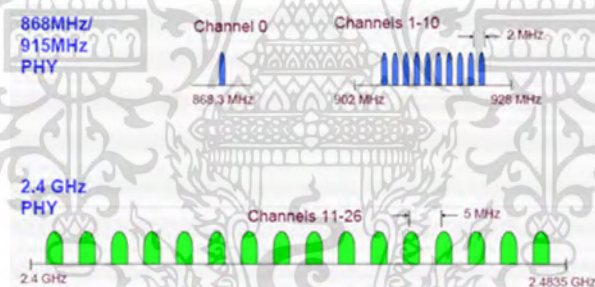
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) Zigbee



รูปที่ 2.20 เครื่องหมายการค้าของ Zigbee

ระบบส่งข้อมูลไร้สาย Zigbee คือมาตรฐานสากลสำหรับการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุ ออกแบบโดย ZigBee Alliance ซึ่งเป็นการสื่อสารไร้สายที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำ ใช้พลังงานต่ำ และมีราคาที่ถูก โดยมีจุดประสงค์การออกแบบเพื่อใช้ในระบบเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) โดยเฉพาะ และการสื่อสารชนิดนี้มีจุดเด่นคือสามารถรองรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์ได้สูงถึง 64000 อุปกรณ์ ย่านความถี่ตามมาตรฐานจะมีอยู่ 3 ย่าน คือ ย่าน 2.4 GHz, 915 MHz, 868 MHz โดยแต่ละย่านจะมีช่องสัญญาณ 16 ช่อง, 10 ช่อง และ 1 ช่อง ตามลำดับ โดยมีอัตรารับส่งข้อมูลอยู่ที่ 250 Kbps, 40 Kbps, 20 Kbps ตามลำดับ



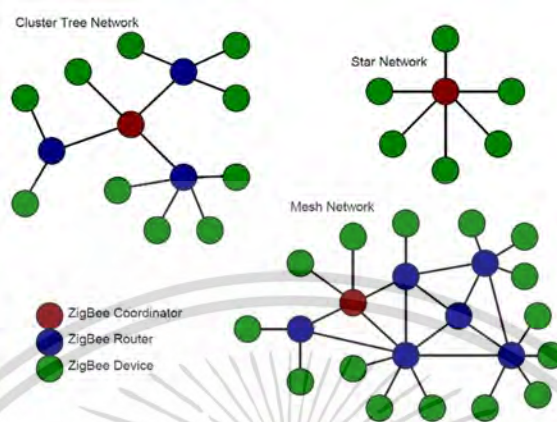
รูปที่ 2.21 ช่องสัญญาณของ Zigbee

ในการสร้างเครือข่ายของ Zigbee นั้น จะอยู่บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 โดย Zigbee จะเป็นตัวกำหนดการทำงานและความสามารถของแต่ละอุปกรณ์บนพื้นฐานการเชื่อมต่อนี้ อีกทั้ง ซึ่งมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ได้แบ่งชนิดอุปกรณ์ในเครือข่ายออกเป็น 2 ชนิด คือ FFD (Full Function Device) และ RFD (Reduce Function Device) ทาง Zigbee จึงได้กำหนดชนิดของตัวอุปกรณ์เป็น 3 ชนิดคือ

1. Coordinator คืออุปกรณ์ที่มีหน้าที่สร้างเครือข่าย เชื่อมโยงเครือข่ายทั้งหมด โดยกำหนด address ให้กับอุปกรณ์ที่อยู่ในวงเครือข่าย ไม่ให้ซ้ำกัน และดูแลจัดการเรื่องการ Routing เส้นทางข้อมูล
2. Router มีหน้าที่ รับส่งข้อมูลและสร้างเส้นทางระหว่างอุปกรณ์ในเครือข่าย โดยสามารถรับข้อมูลจากอุปกรณ์ตัวหนึ่งส่งไปยังอีกตัวได้ตามคำสั่งของ Coordinator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. End Device เป็นอุปกรณ์ปลายทางสุด ซึ่งมีหน้าที่รับส่งข้อมูลตามคำสั่งเท่านั้น ไม่สามารถส่งข้อมูลจากอีกตัวไปยังอีกตัวได้



รูปที่ 2.22 รูปแบบการเชื่อมต่อของ Zigbee

ในการใช้งาน Zigbee สำหรับระบบสมาร์ตโฮมนั้นเนื่องจากชิปมีจุดเด่นที่สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ได้จำนวนมากและสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างมาก ซึ่งเป็นจุดเด่นที่สามารถนำมาใช้กับระบบสมาร์ตโฮมได้ แต่เนื่องจากชิปเป็นเพื่อมาตรฐานการส่งข้อมูล ทำให้บริษัทต่างๆที่นำการส่งข้อมูลชนิดนี้ไปใช้กับระบบสมาร์ตโฮมจำเป็นจะต้องออกแบบเงื่อนไขและชุดคำสั่งสำหรับระบบของตัวเอง ทำให้อุปกรณ์สมาร์ตโฮมแต่ละยี่ห้อไม่สามารถติดต่อกันได้ทั้งที่ใช้การสื่อสารชิปเหมือนกัน ทาง Zigbee Alliance จึงมีการกำหนดชุดคำสั่งที่ทำงานบนพื้นฐานของชิปคือมาตรฐานที่ชื่อว่า HA 1.2 เพื่อให้อุปกรณ์สมาร์ตโฮมในแต่ละยี่ห้อสื่อสารบนมาตรฐานเดียวกันและสามารถใช้ร่วมกันได้

2) Z-wave



รูปที่ 2.23 เครื่องหมายการค้าของ Z-Wave

ระบบการเชื่อมต่อซีเวฟ (Z-Wave) เป็นเทคโนโลยีการเชื่อมต่อไร้สายที่ออกแบบมาสำหรับระบบสมาร์ตโฮมโดยเฉพาะ โดยมีการก่อตั้งสมาพันธ์ Z-Wave (Z-Wave Alliance) เพื่อดูแลเรื่องมาตรฐานของอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยีนี้ เนื่องจากแนวคิดการออกแบบของเทคโนโลยีนี้คือ อุปกรณ์ทุกชิ้นทุกยี่ห้อที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ซีเวฟจะต้องเชื่อมต่อกันได้ เนื่องจากถูกกำหนดชุดข้อมูลสำหรับการใช้งานมาแล้วทั้งหมด เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานเดียวกัน

การเชื่อมต่อซีเวฟ เนื่องจากออกแบบมาสำหรับระบบสมาร์ตโฮม ซึ่งแต่ละบ้านในปัจจุบันจะมีระบบ Wi-Fi หรือ Bluetooth ใช้งานตลอดเวลาอยู่แล้ว ซึ่งสองระบบนั้นจะใช้น่านความถี่ที่ 2.4GHz ดังนั้นทางซีเวฟต้องการจะหลีกเลี่ยงการชนกันของสัญญาณ จึงเลือกใช้คลื่นวิทยุฟรี ย่าน 868, 908 และ 921 MHz แทน โดยการเชื่อมต่อข้อมูลจะไม่ได้อยู่บนมาตรฐานของ IEEE เหมือน Zigbee, Wi-Fi แต่จะกำหนดมาตรฐานขึ้นมาใหม่ทั้งหมดโดยมีการเข้ารหัสข้อมูลอยู่ในหลายระดับ เพื่อให้ระบบมีความปลอดภัยสูง

3) RF433

การส่งข้อมูลผ่านวิทยุคลื่น 433MHz เป็นการส่งข้อมูลดิบผ่าน modulation แบบ ASK/FSK ซึ่งเป็นการ modulated ทางดิจิทัล สำหรับการส่งข้อมูลดิจิทัลเหมือนระบบอื่น แต่จะแตกต่างกันที่ระบบนี้จะไม่มีการจัดการข้อมูลเลย ตัวอุปกรณ์ที่ใช้งานสัญญาณนี้จึงต้องมีการจำแนกข้อมูลที่อ่านได้ด้วยซอฟต์แวร์เอง ซึ่งการส่งสัญญาณชนิดนี้จะเป็นการส่งสัญญาณทางเดียว กล่าวคือจะมีอุปกรณ์อยู่สองชนิดคือตัวรับ (Receiver) ที่มีหน้าที่รับสัญญาณอย่างเดียว และตัวส่ง (Transmitter) ที่มีหน้าที่ส่งสัญญาณอย่างเดียว

ในด้านการใช้งานในระบบสมาร์ตโฮม เนื่องจากการส่งข้อมูลระบบนี้เป็นเพียงวิธีการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ ไม่ได้มีมาตรฐานใด ดังนั้นบริษัทผู้ผลิตจึงต้องเป็นผู้กำหนดมาตรฐานขึ้นมาเอง อุปกรณ์ส่วนมากจะไม่สามารถใช้งานข้ามยี่ห้อกันได้ เนื่องจากบางยี่ห้อที่ใช้การส่งรหัสธรรมดา บางยี่ห้อจะมีการเข้ารหัสด้วย (Encryption) เพื่อเพิ่มความปลอดภัย จะมีเพียงแต่อุปกรณ์ประเภทสวิทช์ไฟที่หลายยี่ห้อใช้งานเหมือนกันคือ ผู้ใช้จะต้องทำการบันทึกสัญญาณที่ตัวอุปกรณ์ โดยการให้ตัวส่ง ส่งรหัสไบนารีจำนวน 24-32บิต ออกมา และกดที่ตัวอุปกรณ์เพื่อจดจำรหัสนั้น

อุปกรณ์สมาร์ตโฮมระบบนี้จะมีข้อเด่นกว่าระบบอื่นคือ มีราคาที่ถูกมาก และอุปกรณ์จะใช้ไฟน้อยมาก แต่ข้อเสียอย่างมากคือ อุปกรณ์ส่วนมากไม่มีระบบรักษาความปลอดภัยทางด้านข้อมูล ทำให้หากมีเพื่อนบ้านใช้งานอุปกรณ์ชนิดเดียวกันและบังเอิญตั้งรหัสไว้ตรงกัน จะสามารถรบกวนกันได้ทันที หรือผู้ไม่หวังดีสามารถดักฟังสัญญาณและทำการควบคุมอุปกรณ์ได้ทันที

4) Wi-Fi



รูปที่ 2.24 เครื่องหมายการค้าของ Wi-Fi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไวไฟ (Wi-Fi) คือเทคโนโลยีเครือข่ายแบบไร้สาย มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้ถูกออกแบบมาเพื่อรับส่งข้อมูลไร้สายระหว่างอุปกรณ์หรือคอมพิวเตอร์ในปริมาณมากๆ เพื่อแทนระบบ LAN ที่ต้องใช้สายมาเป็นระบบไร้สายด้วยคลื่นวิทยุย่าน 2.4GHz, 5GHz ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีนี้ยมนำมาใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์เข้ากับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

ในปัจจุบันระบบไวไฟภายในบ้านจะเชื่อมต่ออุปกรณ์ในรูปแบบ Star ซึ่งจะมีจุดศูนย์กลางการเชื่อมต่อตัวเดียวเรียกว่า Router ซึ่งจำแนกอุปกรณ์ด้วยระบบ IP (Internet Protocol) โดยการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ตัวหนึ่งไปยังอีกตัวจะต้องผ่านเราเตอร์ซึ่งเป็นตัวกลางในการจัดการข้อมูลทั้งหมดก่อน

ในด้านการใช้งานไวไฟในระบบสมาร์ตโฮม ไวไฟจะมีข้อได้เปรียบคือเป็นระบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายอยู่แล้ว การซื้ออุปกรณ์สมาร์ตโฮมไปติดตั้งจะสามารถใช้งานได้ทันทีโดยไม่ต้องมีเกตเวย์ เนื่องจากอุปกรณ์สามารถติดต่อสื่อสารผ่านอินเทอร์เน็ตได้โดยตรง แต่จะมีข้อเสียคือการเชื่อมต่ออุปกรณ์มีจำกัดตามความสามารถของเราเตอร์ซึ่งจะสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์พร้อมๆกันได้เพียงหลักสิบถึงร้อยอุปกรณ์ และเนื่องจากการเชื่อมต่อรูปแบบ Star แบบเดียว ทำให้สัญญาณครอบคลุมในบริเวณที่ไม่กว้างมากนัก และอุปกรณ์ไวไฟใช้พลังงานสูง จึงไม่สามารถออกแบบให้อุปกรณ์สมาร์ตโฮมใช้งานบนแบตเตอรี่ได้

เนื่องจากการใช้งานไวไฟในระบบสมาร์ตโฮมนั้นไม่มีมาตรฐานรองรับ บริษัทผู้ออกแบบจึงต้องทำการกำหนดมาตรฐานของตัวเองขึ้นมา ทำให้อุปกรณ์สมาร์ตโฮมในแต่ละยี่ห้อจึงไม่สามารถใช้งานร่วมกันได้

5) Bluetooth



รูปที่ 2.25 เครื่องหมายการค้าของ Bluetooth

บลูทูธ (Bluetooth) คือมาตรฐานเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุ ย่าน 2.4GHz ถูกออกแบบมาเพื่อทดแทนการเชื่อมต่อผ่านบัสอนุกรม RS-232 ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ในความเร็วที่ต่ำ โดยระบบนี้จะต้องมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งสองฝั่งก่อน เรียกว่าการ Pairing ซึ่งจะสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ได้เพียง 1 ต่อ 1 อุปกรณ์เท่านั้นโดยไม่ต้องมีตัวกลางการจัดการข้อมูล

ต่อมาบลูทูธได้มีความนิยมใช้กันมากขึ้นเนื่องจากความสะดวกในการติดต่อระหว่างอุปกรณ์ ความสะดวกในการย้ายการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ จึงได้มีการพัฒนาให้มีความเร็วในการส่งข้อมูลที่สูงขึ้น เป็นเวอร์ชัน 2, 3, 4, และ 5 ในปัจจุบัน

จากความนิยมในการใช้งานเชื่อมต่ออุปกรณ์เช่นหูฟัง เม้าส์ คีย์บอร์ด เข้ากับคอมพิวเตอร์หรือสมาร์ทโฟน จึงได้มีการออกแบบให้บลูทูธสามารถติดต่ออุปกรณ์ได้พร้อมกันมากกว่า 1 อุปกรณ์ ในเวอร์ชัน 4 ขึ้นไป โดยจะเชื่อมต่อในรูปแบบ Star และในเวอร์ชัน 4.2 ได้มีการปรับปรุงให้มีการเชื่อมต่อได้มากขึ้นและปรับปรุงชุดข้อมูลในการเชื่อมต่อเพื่อให้อุปกรณ์ใช้พลังงานน้อยลง เพื่อรองรับระบบ IoT (Internet of Thing)

ในด้านการใช้งานในระบบสมาร์ตโฮม เนื่องจากอุปกรณ์สมาร์ตโฮมนั้นจัดอยู่ในกลุ่มของ IoT ดังนั้นผู้ผลิตจึงมีการเลือกใช้เทคโนโลยีบลูทูธนี้ในระบบสมาร์ตโฮมด้วย แต่เนื่องจากบลูทูธเป็นเพียงระบบการสื่อสาร ไม่ได้มีชุดคำสั่งมาตรฐานสำหรับสมาร์ตโฮมเช่นเดียวกับไวไฟ ดังนั้นบริษัทผู้ออกแบบจึงต้องทำการกำหนดมาตรฐานของตัวเองขึ้นมา ทำให้อุปกรณ์สมาร์ตโฮมในแต่ละยี่ห้อจึงไม่สามารถใช้งานร่วมกันได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

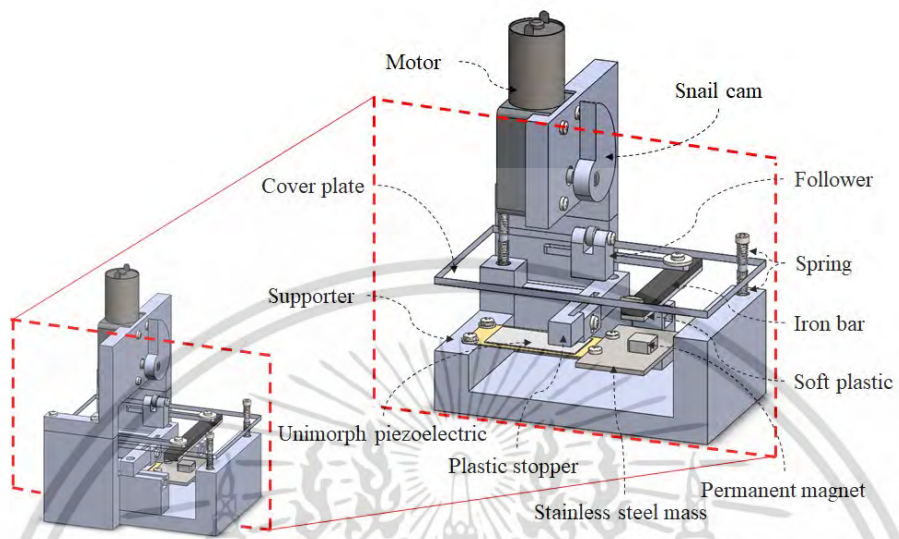
บทที่ 3

การออกแบบและทดสอบ

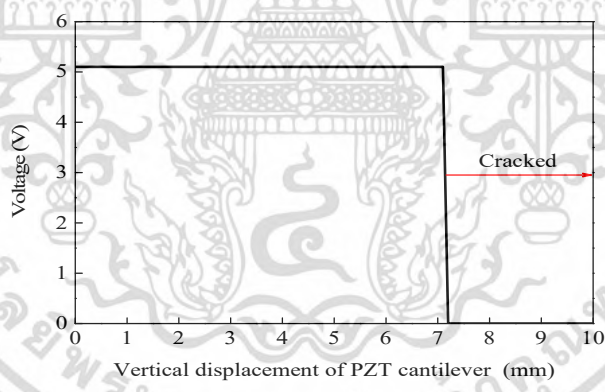
3.1 การออกแบบพื้นกำเนิดพลังงานต้นแบบด้วยแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแบบคานชนิด PZT

คานเพียโซอิเล็กทริก ดังแสดงในรูปที่ 3.1 คือต้นแบบชิ้นแรกที่ทำการศึกษาเพื่อใช้ศึกษาคุณสมบัติและคุณลักษณะที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการปรับขนาดของระบบให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงที่มีการใช้งานคานเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT จำนวน 24 ชิ้น ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการออกแบบพื้นกำเนิดพลังงานโครงสร้างในแต่ละส่วนได้รับการกำหนดค่าดังนี้ มวลสแตนเลสขนาด $60 \times 30 \times 2 \text{ mm}^3$ มีแม่เหล็กถาวร (NdFeB) ขนาด $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ ติดอยู่ด้านบนด้วยกาว และติดอยู่แบบอิสระที่ด้านปลายของคานที่มีชั้นเพียโซอิเล็กทริกที่มีขนาด $40 \times 20 \times 0.3 \text{ mm}^3$ และมีชั้นยึดหยุ่นขนาด $60 \times 25 \times 0.2 \text{ mm}^3$ การกำหนดค่าเป็นตามที่แสดงในรูปที่ 2(a) แสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ในสถานะรอโหลด (สภาวะสมดุล) เนื่องจากพลังงานที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนกับการกระจัดของคานเพียโซอิเล็กทริก จึงต้องมีช่องว่างอากาศที่กว้างระหว่างตัวหยุดพลาสติก และคานเพียโซอิเล็กทริก (d_1) อย่างไรก็ตาม ชั้นเพียโซอิเล็กทริก PZT อาจเกิดการแตกหรือเสียหายจากการโค้งงอมากเกินไป ดังนั้นเราจำเป็นต้องตั้งระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างตัวหยุดและคาน ในการดำเนินการของเรา ด้านหนึ่งของเพียโซอิเล็กทริกถูกตรึงไว้และป้อนไฟฟ้ากระแสตรง ในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่งถูกกะด้วยสเกลแบบเฟืองสะพานเพื่อปรับการเคลื่อนที่ตามแนวตั้ง การโค้งงอมากเกินไปสามารถตรวจสอบได้จากแรงดันด้านปลายที่เป็นอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 5

ชั้นเพียโซอิเล็กทริก PZT เกิดการแตกหรือเสียหายในแนวตั้งประมาณ 7.1 มิลลิเมตร แรงดันไฟฟ้าที่ด้านปลายอิสระจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น ตัวหยุดพลาสติกจึงถูกใช้เพื่อกำหนดระยะในการเคลื่อนที่แนวตั้งของคานเพียโซอิเล็กทริกไว้ที่ 4 มิลลิเมตร ($d_1 = 4 \text{ mm}$) นอกจากนั้นขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมนั้น ช่องว่างอากาศที่เหมาะสมระหว่างแม่เหล็กถาวรและแม่เหล็ก (d_2) ถูกกำหนดโดยการจำลองการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม FEMM 4.2 การจำลองถูกพิจารณาในด้านสองมิติ โดยมีค่าที่กำหนดในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 Validation of the designed mechanism



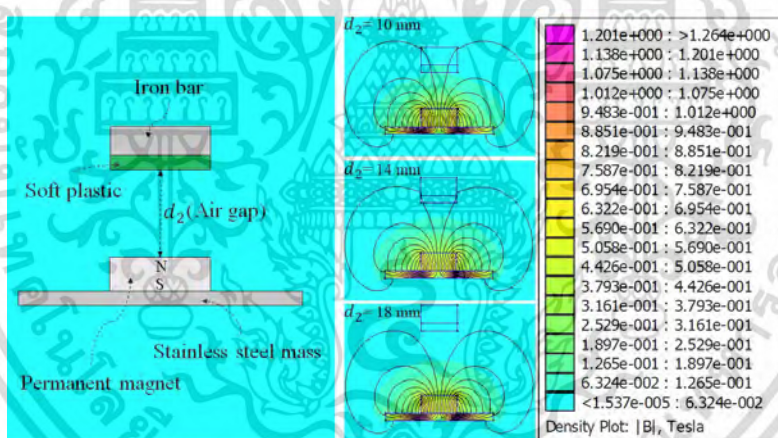
รูปที่ 3.2 Voltage at the free end of the PZT cantilever as the vertical displacement was increased

รูปที่ 3.2 แสดงผลการจำลองความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ดังที่เห็นได้ว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กลดลงเหลือ ศูนย์ที่ระยะ 18 มิลลิเมตร จากแม่เหล็กถาวร ในระยะนี้แรงดึงดูดจากแม่เหล็กเข้าหาศูนย์ตามสมการ ดังนั้นสำหรับ ตัวต้นแบบ ค่า d_2 ได้ถูกกำหนดไว้ที่ 18 มิลลิเมตร ค่าของ d_2 ที่ได้จากการจำลองได้รับการยืนยันในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 Dimension and magnetic property of the materials used

Parameters	Dimension	Relative permittivity	Coercivity (A/m)	Electric conductivity (MS)
Iron bar	5 mm x 10 mm	14872	-	-
Soft plastic	2 mm x 10 mm	1	-	-
Air gap	10, 14, and 18 mm	1.0006	-	-
Permanent magnet (NeFeB)	10 mm x 2 mm	1.045	883310	0.667
416 stainless-steel mass	30 mm x 2 mm	440	-	-



รูปที่ 3.3 Magnetic flux density simulation

3.1.1 การตรวจสอบความเป็นไปได้พื้นที่กำเนิดพลังงานต้นแบบ

มอเตอร์และลูกเบี้ยวสำหรับการจำลองกำลังของขั้นตอนการเหยียบ ถูกติดตั้งบนอุปกรณ์ต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4 ลูกเบี้ยวติดตั้งอยู่กับแกนของมอเตอร์ ถูกใช้เพื่อเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น เมื่อลูกเบี้ยวสัมผัสกับแท่นรองรับทำให้แผ่นฝาเคลื่อนที่ขึ้นและลง จำลองการเคลื่อนไหวโดยการเหยียบ โดยทั่วไปความเร็วการเดินและความถี่ของขั้นตอนการเดินเท้าบนพื้นทั้งในพื้นที่ที่มีผู้คนหนาแน่นหรือไม่พลุกพล่านนั้นไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับจำนวนคนและการก้าวเท้าของแต่ละบุคคล ตัวแปรเหล่านี้ไม่สามารถระบุได้อย่างแน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งหนึ่งที่แน่นอนคือช่วงเวลาที่เราของผู้คนเหยียบลงมาที่พื้นนั้นมีระยะเวลานานสำหรับผู้เดินช้าและน้อยกว่าสำหรับผู้เดินเร็ว ความหนาแน่นของผู้คนจำนวนมากอาจทำให้การก้าวเดินช้าลง ดังนั้นระยะเวลาในการที่เราสัมผัสพื้นนั้นอาจนานกว่าปกติ [16] ดังนั้นการจำลองพฤติกรรมที่เกี่ยวกับพลังงานนี้ จึงขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่เกิดขึ้น (T_d) ในระหว่างแผ่นผาเคลื่อนที่ขึ้นลง เช่น ระยะเวลาของลูกเบียร์ที่หมุนมาทดแทนรองรับ และทำการตรวจสอบพลังงานที่เกิดขึ้นด้วยโพลความต้านทานค่าต่างๆ แรงดันตกคร่อมโพลความต้านทานถูกวัดด้วยออสซิลโลสโคป (Tektronix TD 3032B) แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นรูปคลื่นชั่วคราว [17] สามารถคำนวณพลังงานที่เกิดขึ้น $P(t_m)$ ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$P(t_m) = \frac{V_L^2(t_m)}{R_L} \quad (11)$$

เมื่อ $V_L(t_m)$ คือแรงดันตกคร่อมชั่วขณะที่เวลา t_m ; $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ จนถึงระยะเวลาหนึ่ง และ R_L คือ ค่าความต้านทานของโพลตัวต้านทานที่เวลา t_N เมื่อ N คือจำนวนตัวอย่าง ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสามารถหาได้จาก

$$P_{Avg}(t_N) = \frac{1}{t_N} \int_0^{t_N} \frac{V_L^2(t)}{R_L} dt \quad (12)$$

ดังนั้นพลังงานที่ผลิตจากเครื่องต้นแบบซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา จึงถูกคำนวณโดยนิพจน์ต่อไปนี้

$$E(t_N) = \sum_{m=0}^N P(t_m) \Delta t_m, \quad \text{for } N > 0 \quad (13)$$

เมื่อ Δt_m คือช่วงเวลาการวัดแรงดันตกคร่อมไฟฟ้า

3.1.2 พื้นกำเนิดพลังงานและวิธีการประเมินประสิทธิภาพ

ต้นแบบที่ผ่านการออกแบบดังรายละเอียดหัวข้อที่ 3 พื้นกำเนิดพลังงานขนาด $430 \times 430 \times 70.50 \text{ mm}^3$ ที่ด้านในติดตั้ง คานเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT ไว้จำนวน 24 ตัว แสดงดังรูปที่ 3.4 ช่องว่าง d_1 และ d_2 มีขนาดระหว่าง 2 – 5 และ 16 – 19 มิลลิเมตร ตามลำดับ ช่องว่างดังกล่าวไม่สามารถตั้งเป็นค่าคงที่ได้ เนื่องจากความโค้งที่แตกต่างกับเล็กน้อยของเพียโซอิเล็กทริกที่เกิดจากผู้ผลิต วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นประกอบด้วยไดโอดขนาดเล็กชนิด Schottky (BAT 46) ที่ถูกติดตั้งและเชื่อมต่อด้วยวงจรรขนานกับคานเพียโซอิ

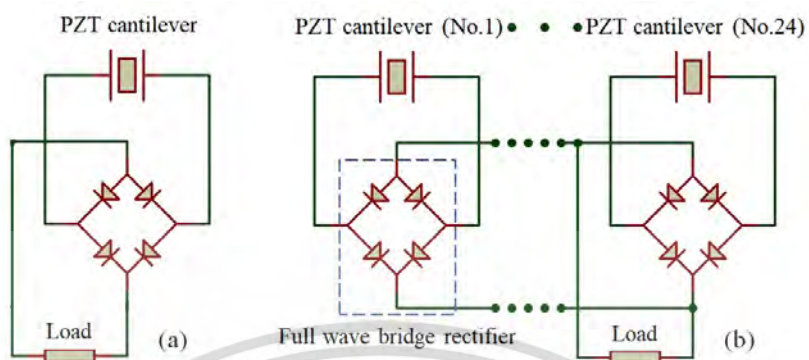
เล็กทริกแต่ละตัว ดังแสดงในรูปที่ (b) วงจรขนานถูกใช้เพื่อรวมกระแสที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากคานเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากเพียโซอิเล็กทริกแต่ละตัวให้กระแสไฟฟ้าที่น้อยแม้จะสามารถให้แรงดันไฟฟ้าที่สูงได้

งานวิจัยนี้มีการประเมินผลสามด้านต่อไปนี้ 1. การประเมินประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานของคานเพียโซอิเล็กทริกที่ 1 ตัว และ 24 ตัว 2. ผลกระทบของตำแหน่งการวางเท้าบนพื้นกำเนิดพลังงานต่อประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงาน และ 3. ประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากพื้นกำเนิดพลังงานในสถานการณ์จริง ประการแรก ประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานของคานเพียโซอิเล็กทริก 1 ตัว และคานเพียโซอิเล็กทริก 24 ตัว จะถูกทดสอบด้วยต้นตันทานโพลต์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (a) and (b) จะทำการสุ่มเลือกสามตัวอย่างของคานเพียโซอิเล็กทริกที่ผ่านการทดสอบประสิทธิภาพ จากนั้นจึงทำการประเมินประสิทธิภาพของคานเพียโซอิเล็กทริกที่เชื่อมต่อกันทั้งหมด 24 ตัว ตัวต้นตันทานโพลต์ที่ขยายการถ่ายโอนกำลังไฟสูงสุดของคานเพียโซอิเล็กทริกเหล่านี้ จะถูกเลือกเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบอื่นๆ ประการที่สอง พลังงานที่ได้จากการกำเนิดโดยการเหยียบพื้นกำเนิดพลังงานที่ตำแหน่งต่างๆจะถูกวัดและทำการเปรียบเทียบ ผลลัพธ์จะแสดงว่าประสิทธิภาพของพื้นกำเนิดพลังงานสอดคล้องกันหรือไม่เมื่อถูกเปรียบเทียบลงบนตำแหน่งที่แตกต่างกันเพื่อระบุว่าพื้นที่ออกแบบไว้ใหญ่เกินไปหรือไม่ เพื่อใช้ในการพิจารณาขนาดที่เหมาะสม และสุดท้าย ประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานของพื้นกำเนิดพลังงานจะถูกติดตั้งและทำการทดสอบจริงโดยผู้เข้าร่วมการทดสอบ ผลลัพธ์จะระบุว่าปริมาณพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้เพียงพอหรือไม่สำหรับการนำไปใช้เป็นพลังงานให้กับโหมดเซ็นเซอร์ไร้สายที่มีอยู่ตามท้องตลาด



รูปที่ 3.4 A test setup showing (a) the energy harvesting floor tile and (b) the oscilloscope measuring the voltage (Tektronix TDS3032B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 (a) Circuit of an individual PZT cantilever; (b) Circuit of electrically connected PZT cantilevers, rectifiers, and load resistors

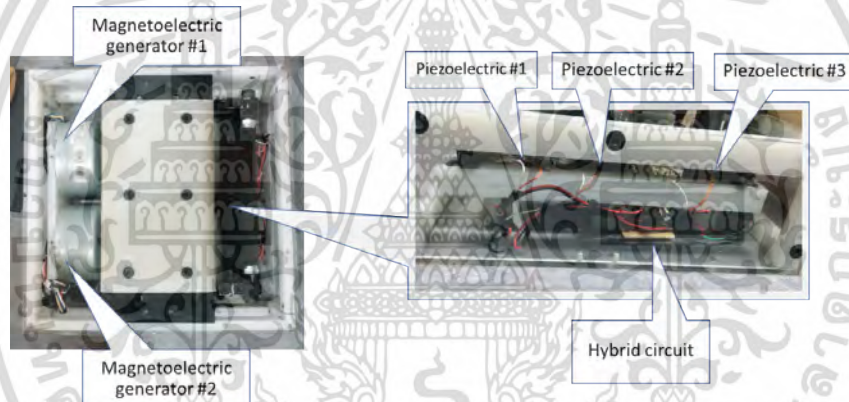
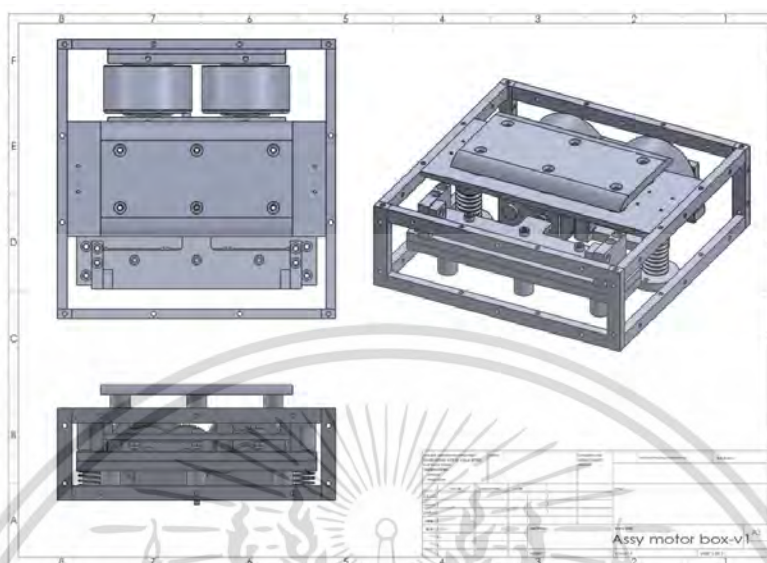
3.2 การสร้างต้นแบบโครงสร้างพื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid)

พลังงานด้วยวิธีการทางไพโซอิเล็กทริกผสมผสานกับการสร้างพลังงานไฟฟ้าจากการเหนี่ยวนำของแม่เหล็ก ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานงานกลเป็นไฟฟ้า

ส่วนประกอบ

1. Magneto electric generator จำนวน 2 มอเตอร์
2. แผ่น Piezoelectric (PZT ceramic) จำนวน 3 แผ่น
3. วงจรลูกผสมสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานจาก Magnetoelectric generator และ Piezoelectric
4. พื้นที่มีกลไกสำหรับให้แรงเชิงกลแก่วัสดุ Magnetoelectric generator และ Piezoelectric

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



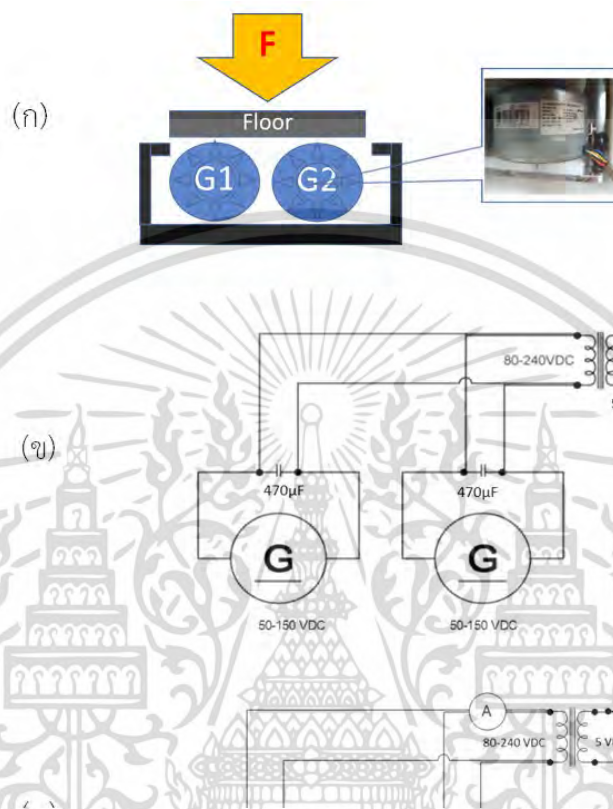
รูปที่ 3.6 แสดงต้นแบบโครงสร้างพื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid) (ด้านบน) ภาพวาดและ(ด้านล่าง) ภาพถ่ายจริง

3.2.1 การทดสอบลักษณะและวัดประสิทธิภาพของต้นแบบโครงสร้างพื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid)

ทำวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage: V) และกระแสไฟฟ้า (Current: I) ที่ผลิตได้จากพื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid) โดย FLUKE 8846A 6-1/2 DIGIT PRECISION MULTIMETER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.1 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) และกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) ของ Magnetolectric generator



รูปที่ 3.7 (ก) แสดงการให้แรงเชิงกลแก่ Magnetolectric generator (ข) แผนภาพวงจรการวัดค่าการเก็บเกี่ยวพลังงานแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) และ (ค) แผนภาพวงจรการวัดค่าการเก็บเกี่ยวพลังงานกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) จาก Magnetolectric generator

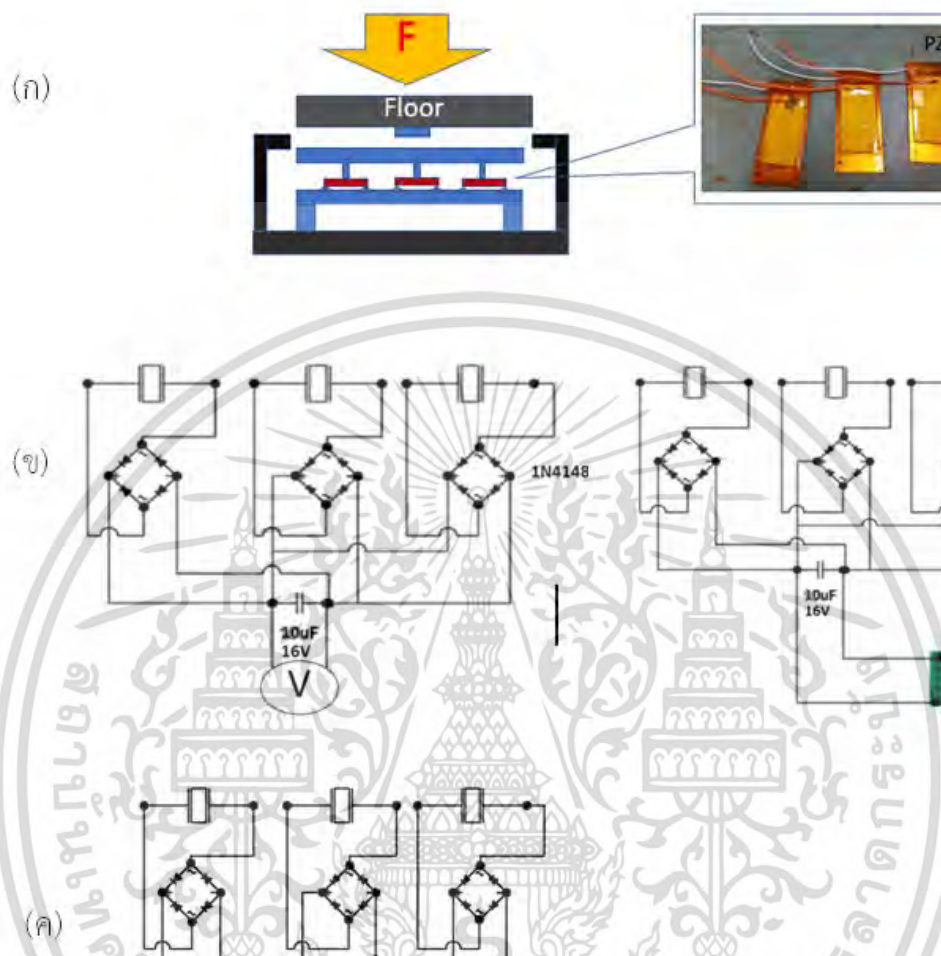
เมื่อให้แรงเชิงกลแก่พื้นจะส่งผลให้เกิดการหมุนแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็ก (Magnetolectric generator) ผ่านกลไกเชิงกลภายในเกิดกระแสไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นดังรูปที่ 3.7 (ก) กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็ก แต่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กยังมีลักษณะเป็นระลอกคลื่น (ripple) มีแรงดันไฟฟ้าสูง ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน จึงจำเป็นต้องใช้วงจรกรองแรงดันโดยตัวเก็บประจุ (capacitor filter circuit) โดยวงจรนี้เลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด $470 \mu\text{F}$ ต่อขนานกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็ก จากนั้นบันทึกแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งคู่ด้วย FLUKE 8846A 6-1/2 DIGIT PRECISION MULTIMETER ดังรูปที่ 3.7 (ข) จากนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กจะถูกปรับลดลงมาเหลือ 5 โวลต์ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน จากนั้นจึงมีการวัดกระแสที่ไฟฟ้าที่ได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอมป์มิเตอร์ (FLUKE 8846A 6-1/2 DIGIT PRECISION MULTIMETER) ทั้งก่อนและหลังหม้อแปลงไฟฟ้าโดยให้ตัวต้านทานขนาด 1.5 โอห์มเป็นตัวดึงกระแสไฟฟ้าออกจากวงจร ดังรูปที่ 3.7 (ค)

3.2.1.2 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) และกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) ของ Piezoelectric

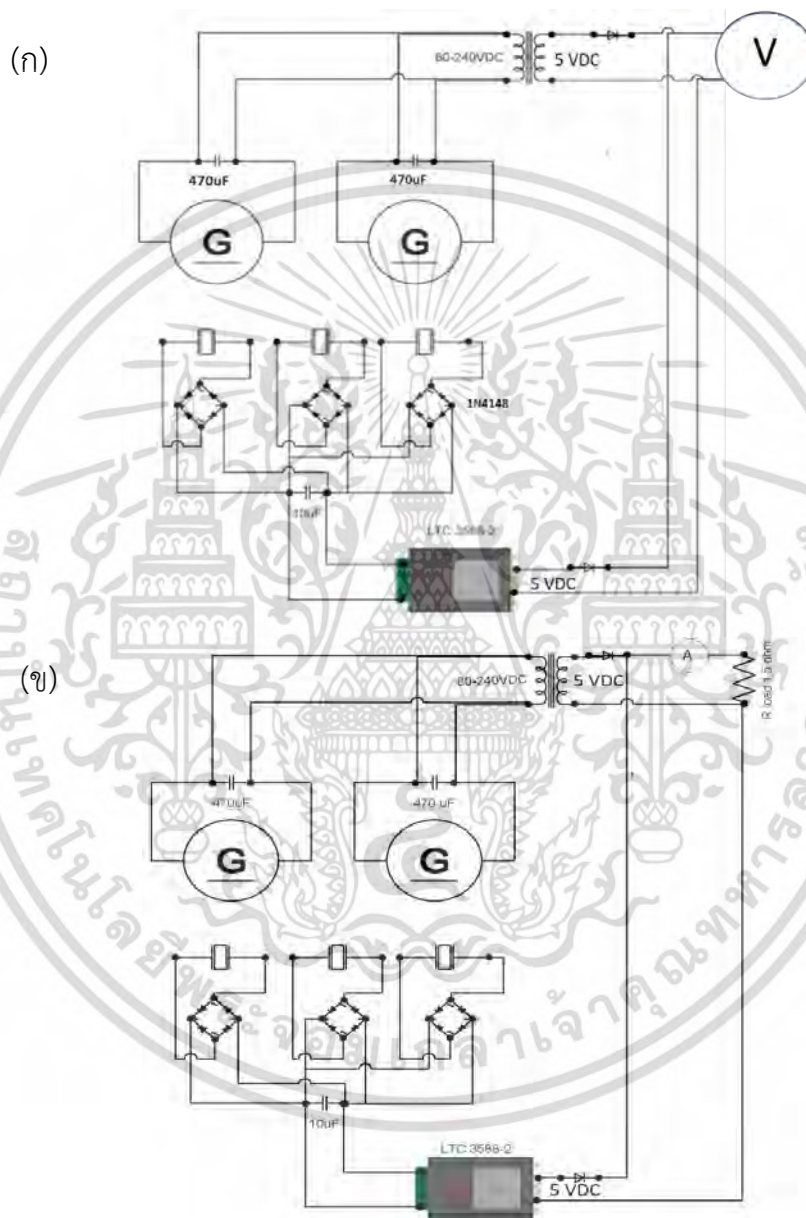
การวัดประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าของวัสดุพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) เมื่อให้แรงเชิงกลแก่พื้นจะส่งผลให้กระเบื้องกวดออกแรงกระทำต่อแผ่นพิโซอิเล็กทริกจนเกิดไฟฟ้ากระแสสลับขึ้น ดังรูปที่ 3.8 (ก) จากนั้นจะถูกปรับให้กลายเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full wave Rectifier Circuit) แรงดันได้จากวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นยังมีระลอกคลื่นปนอยู่ปริมาณสูง ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน จะต้องนำแรงดันนี้ไปผ่านวงจรกรองก่อนที่จะนำไปใช้งาน วงจรกรองแบบใช้ตัวเก็บประจุ โดยใช้ตัวเก็บประจุ C ต่อขนานกับตัวต้านทานโหลด ตัวเก็บประจุ จะทำหน้าที่เก็บประจุไว้ในช่วงเวลาไดโอดนำกระแสและทำหน้าที่คายประจุผ่านตัวต้านทานโหลดในช่วงเวลาที่ไดโอดไม่นำกระแส การทำงานของวงจรกรองจะทำการกรองแรงดันไฟตรงที่ยังไม่เรียบให้มีความราบเรียบยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 3.8 (ข) แต่เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าของวัสดุพิโซอิเล็กทริกมีปริมาณน้อยจึงจำเป็นต้องมีวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานประสิทธิภาพสูงอย่างวงจร Energy harvester (LTC3588-2) เข้ามาช่วยปรับและรักษาแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่สามารถนำไปใช้งานได้โดยใช้ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพวงจรจึงมีการวัดบันทึกแรงดันและกระแสไฟฟ้าก่อนและหลังวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานประสิทธิภาพสูง ดังรูปที่ 3.8 (ค)



รูปที่ 3.8 (ก) แสดงการให้แรงเชิงกลแก่วัสดุ Piezoelectric (ข) แผนภาพวงจรการวัดค่าการเก็บเกี่ยวพลังงานแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) และ (ค) แผนภาพวงจรการวัดค่าการเก็บเกี่ยวพลังงานกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) จากวัสดุ Piezoelectric

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.3 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) และกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) ของวัสดุลูกผสมระหว่าง Magnetolectric generator และ Piezoelectric ผ่านวงจรลูกผสมสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน

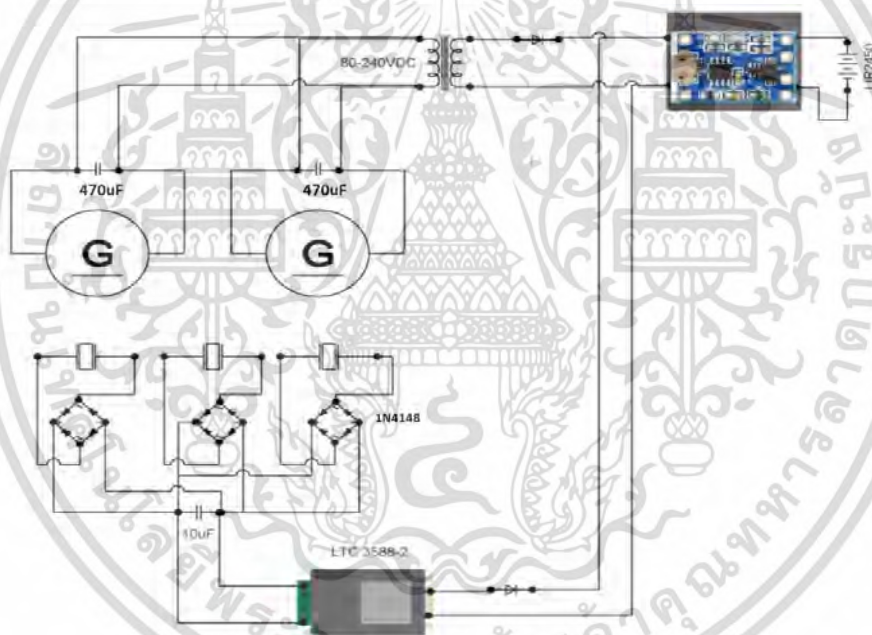


รูปที่ 3.9 (ก) แผนภาพวงจรการวัดค่าการเก็บเกี่ยวพลังงานแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) และ (ข) แผนภาพวงจรการวัดค่าการเก็บเกี่ยวพลังงานกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) จากพื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid) ระหว่าง Magnetolectric generator และ Piezoelectric

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานร่วมกันระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพิโซอิเล็กทริกจำเป็นต้องปรับแรงดันให้เท่ากันก่อนด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าและวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานประสิทธิภาพสูง (LTC3588-2) ดังรูปที่ 3.9 (ก) จากนั้นนำมาต่อขนานกันเพื่อนำไปใช้งาน เพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าจากแต่ละแหล่งกำเนิดไหลย้อนไปรบกวนกันในระหว่างที่แต่ละแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 5 โวลต์ จึงมีการใช้ไดโอดเพื่อบังคับทิศทางกระแสของกระแสไฟฟ้า แล้ววัดบันทึกกระแสไฟฟ้ารวมของวงจรลูกผสม ดังรูปที่ 3.9 (ข)

3.2.2 วิธีการทดสอบและวัดประสิทธิภาพการชาร์จแบตเตอรี่ 3.6V/120 mAh โดยพื้นอัจฉริยะลูกผสมของวัสดุลูกผสมระหว่าง Magnetolectric generator และ Piezoelectric ผ่านวงจรลูกผสมสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน



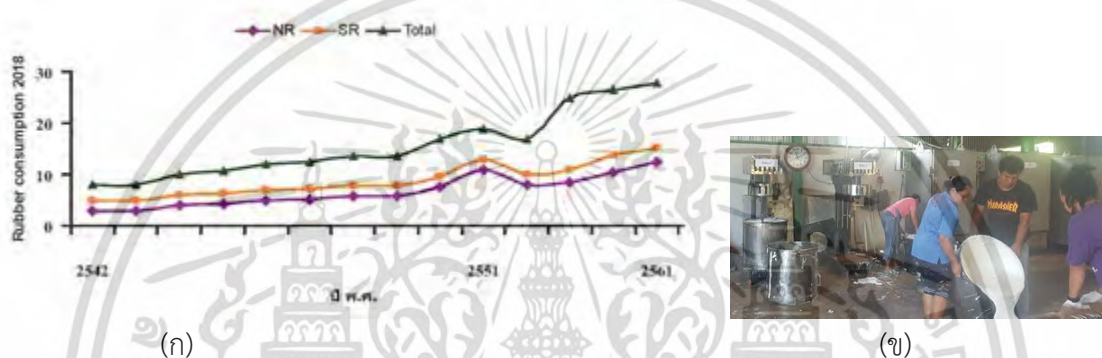
รูปที่ 3.10 แผนภาพวงจรแสดงการวัดค่าการเก็บเกี่ยวพลังงานจากพื้นอัจฉริยะลูกผสม เพื่อชาร์จถ่านกระดุมขนาด 3.6V/120 mAh

เพื่อทดสอบการใช้งานจริงจึงนำวงจรลูกผสมระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กและแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากวัสดุพิโซอิเล็กทริก จากรูปที่ 3.7 (ก) นำมาต่อกับวงจรชาร์จแบตเตอรี่สำเร็จรูป TP4056 โดยชาร์จประจุแบตเตอรี่ให้แก่ถ่านกระดุม LIR2450 ขนาด 120 mAh โดยวัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแบตเตอรี่ตลอดเวลาด้วย FLUKE 8846A 6-1/2 DIGIT PRECISION MULTIMETER เพื่อวัดประสิทธิภาพการชาร์จแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

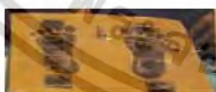
3.3 การออกแบบการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้ากลเข้ากับยางพารา

โครงการนี้มีการผนวกเทคโนโลยี การเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากล เข้ากับ ยางพารา พืชเศรษฐกิจที่ประเทศไทยส่งออกเป็นอันดับหนึ่งของโลกซึ่งยังไม่มีแนวโน้มว่าความต้องการจะลดลง มีการออกสูตรยางที่เหมาะสมและขึ้นรูป เพื่อให้สอดคล้องกับการสอดแทรกพลังงานสั้นที่เกิดจากกิจกรรมในชีวิตประจำวันมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า และใช้ประโยชน์ในแวดวงผู้สูงอายุ เช่น รับส่งข้อมูลได้ตามการกำหนดของผู้ออกแบบระบบให้ทำงานแบบอัตโนมัติหรือตามการสั่งการผ่าน wi-fi



รูปที่ 3.11 (ก) ความต้องการผลผลิตยางยังไม่มีพืชเศรษฐกิจใดมาแทนที่ได้ในตลาดประเภทเดียวกัน

(ข) การออกสูตรยาง



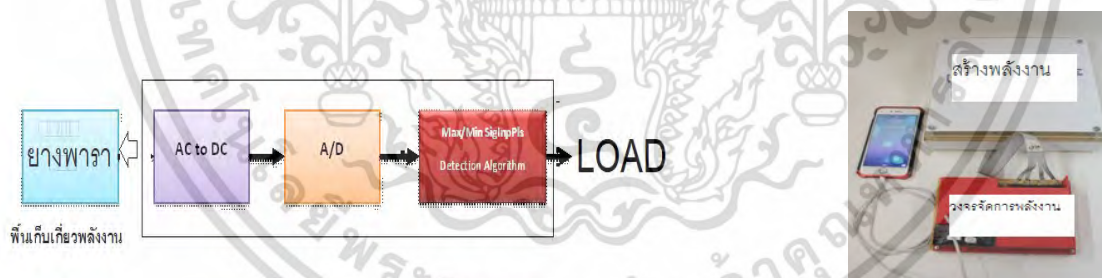
ยางพารามีชุดอุปกรณ์แปลงพลังงานกลเป็นไฟฟ้า

รูปที่ 3.12 ภาพรวมการนำวิทยาการสื่อสารไร้สายมาผนวกกับยางพาราและการสร้างพลังงานทดแทนจากการเคลื่อนไหวโดยที่ยางพารานั้นเหมาะสมสำหรับผู้สูงอายุยืนหรือเดินผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ชุดทดสอบการสร้าง สัญญาณขาเข้า- ขาออก



รูปที่ 3.14 ไดอะแกรมการจัดการพลังงานและระบบเมื่อยังไม่ผนวกขงพารา



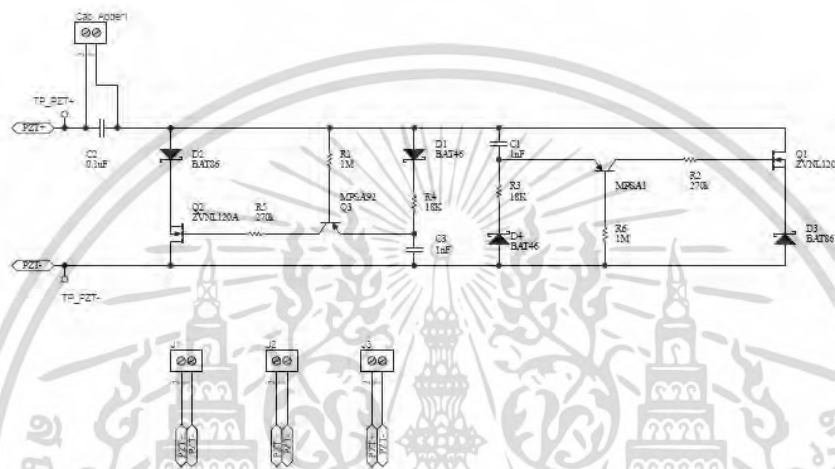
รูปที่ 3.15 ขั้นตอนที่เกี่ยวข้องก่อนจะได้วงจรจัดการพลังงานเป็น Integrated circuit (IC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานต่อเนื่องงานหนึ่งคือการทำ FPGA analysis ออกแบบวงจรจัดการพลังงานให้ซับซ้อนน้อยที่สุดที่ สัญญาณขาเข้าขาออกและยังทำงานได้ ทั้งนี้เพราะความสิ้นเปลืองในกระบวนการ fabrication ยิ่งมากถ้าหาก วงจรยิ่งซับซ้อนและเสียเวลา จึงคำนึงถึงส่วน อนุโลมทั้งขาเข้าและขาออก ก่อนนำไปทำ layout ดังนี้

3.3.1 SSIC (Synchronized Switch Inversion Circuit)

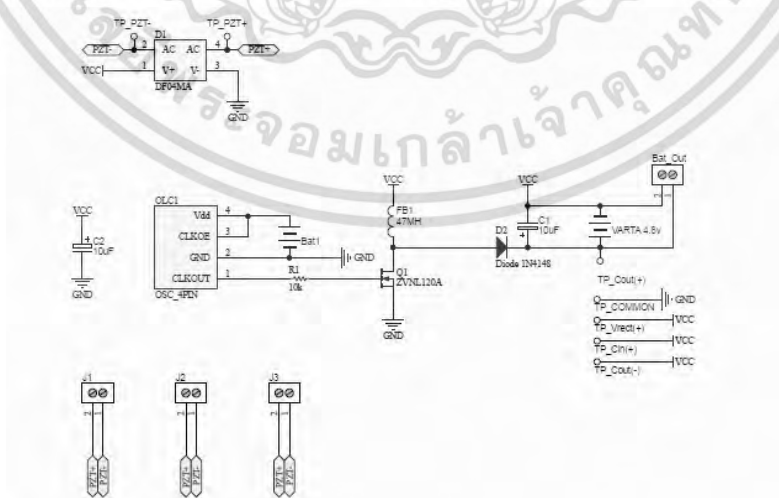
มีส่วนอนุโลมดังรูป



รูปที่ 3.16 แสดง Synchronized Switch Inversion Circuit

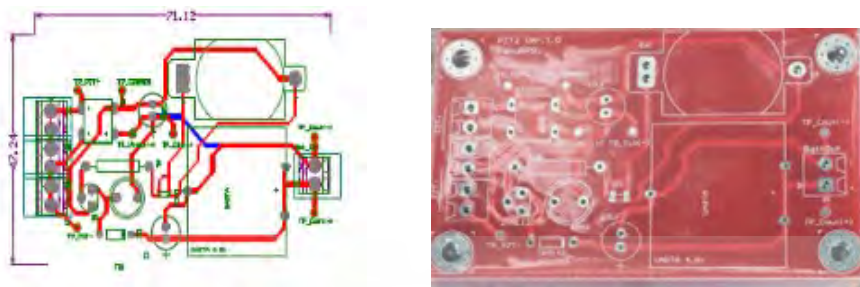
3.3.2 SSIC Ext

มีส่วนอนุโลม ดังรูป และสำหรับชุดนี้ได้ทำ pattern layout ดังรูป มีชิ้นงานแบบ discrete ดังรูป ได้ทำไว้จำนวนเหมือนกัน 20 ชุด



รูปที่ 3.17 แสดงส่วนอนุโลมของ SSIC Ext

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แสดง pattern layout ของ SSIC Ext

มีความพยายามควบคุมสูตร คุณภาพและกำหนดลักษณะผลิตภัณฑ์ที่เข้าข่ายเป็นแผ่นยางผนวกระบบจัดการพลังงานและพร้อมสมกับวัย 60 ขึ้นไป โดยยึดมาตรฐาน ASTM D2240 Shore Hardness Test for Rubber. ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ 2 แบบใหญ่ๆ ออกแบบสอบถามทดสอบจากกลุ่มประชากรอายุ 60 ปีขึ้นไปจำนวนไม่ต่ำกว่า 200 คน ได้ผลสรุปเชิงสถิติว่า ควรออกสูตรแบบผลิตภัณฑ์ใด

3.4 การออกแบบในส่วนฮาร์ดแวร์ระบบโฮมอโตเมชัน

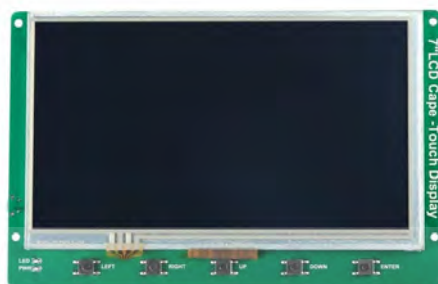
ในส่วนของฮาร์ดแวร์จะแยกออกเป็นสองส่วนหลักดังต่อไปนี้

3.4.1 การออกแบบในส่วนประมวลผล



รูปที่ 3.19 บอร์ด Beaglebone Black

ในส่วนการประมวลผลนั้นเนื่องจากเป็นโครงการในเฟสแรกเพื่อออกแบบระบบการทำงานหลักผู้ออกแบบจึงได้เลือกบอร์ดประมวลผลสำเร็จรูป Beaglebone Black ซึ่งเป็นบอร์ดประมวลผลที่มีประสิทธิภาพสูง และมีจุดเด่นคือภาคจ่ายไฟบนบอร์ดที่มีเสถียรภาพสูง เพื่อป้องกันการเกิดความผิดพลาดของบอร์ดในระหว่างออกแบบซอฟต์แวร์ และแสดงผลผ่านจอสัมผัสชนิด Resistive Touch ขนาด 7 นิ้ว



รูปที่ 3.20 จอ Beaglebone Cape พร้อมระบบทัชสกรีน

3.4.2 การออกแบบในส่วนการเชื่อมต่อผ่านระบบไร้สาย

ในส่วนนี้ผู้ออกแบบจะเลือกโมดูลที่เหมาะสมมาติดตั้งบนบอร์ดดังต่อไปนี้

โมดูล Zigbee จะใช้โมดูลสำเร็จรูปยี่ห้อ Texas Instrument รุ่น CC2530F256 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความสามารถในการเชื่อมต่อผ่านมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งสามารถเขียนโปรแกรมรองรับกับระบบ Zigbee ได้ ติดต่อสื่อสารผ่านบัส UART



รูปที่ 3.21 โมดูล Zigbee รุ่น CC2530F256

โมดูล Z-Wave จะใช้โมดูล ZM5304AE-CME3R ซึ่งเป็นโมดูลสำเร็จรูปพร้อมเสาอากาศสำหรับระบบ Z-Wave โดยเฉพาะ ออกแบบโดยบริษัท Sigma Design โดยเลือกใช้คลื่นความถี่ที่ 868.42MHz เนื่องจากมีอุปกรณ์รองรับคลื่นความถี่นี้จำนวนมาก สามารถติดต่อสื่อสารผ่านบัส UART และ USB



รูปที่ 3.22 โมดูล Z-Wave รุ่น ZM5304AE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมดูล RF433 จะใช้โมดูล H34A และ H3V4F เป็นโมดูลรับส่งข้อมูลผ่านคลื่นความถี่ 433MHz โดยมีการ Modulate สัญญาณในระบบ ASK/FSK แบบเดียวกับที่ใช้ในระบบสโมทโฮม และมีขนาดเล็กที่สุด ต้นทุนต่ำที่สุด และมีเสถียรภาพสูง



รูปที่ 3.23 โมดูล RF433 รุ่น H34A(ซ้าย) H3V4F(ขวา)

โมดูล Wi-Fi จะใช้โมดูล RTL8811 เนื่องจากสามารถติดต่อผ่านบัส USB ได้และเชื่อมต่อระบบไวไฟตามมาตรฐานล่าสุด 802.11ac ที่ย่านความถี่ทั้ง 2.4GHz และ 5GHz เพื่อรองรับการทำงานในอนาคตได้



รูปที่ 3.24 โมดูล Wi-Fi รุ่น RTL8811

โมดูล Bluetooth จะใช้โมดูล LM910 ซึ่งเป็นโมดูลบลูทูธเวอร์ชัน 4.0 ที่สามารถรองรับระบบ BLE ที่ใช้ในระบบสโมทโฮมได้ และติดต่อผ่านบัส USB และมีเสาอากาศบนโมดูล ซึ่งพร้อมนำไปใช้งานได้ทันที



รูปที่ 3.25 โมดูล Bluetooth รุ่น LM910

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

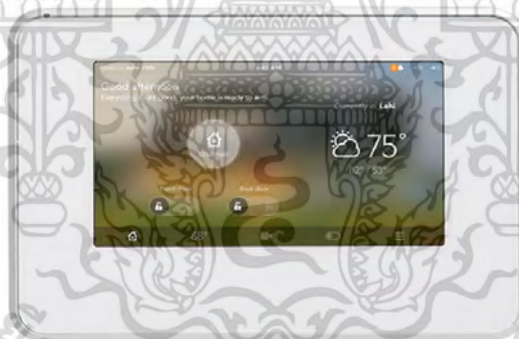
โมดูล GSM จะใช้โมดูล Quectel UC15/UC20 เป็นโมดูลที่สามารถเชื่อมต่อระบบ 3G/4G บนเครือข่าย Cellular Network ได้ รองรับเครือข่ายโทรศัพท์ตามความถี่ที่ใช้ในประเทศไทยได้ มีเสถียรภาพที่สูงเนื่องจากถูกออกแบบมาสำหรับงานอุตสาหกรรมโดยเฉพาะ เชื่อมต่อผ่านบัส PCI



รูปที่ 3.26 โมดูล GSM รุ่น Quectel UC20

3.4.3 การออกแบบในส่วนซอฟต์แวร์

ในส่วนของซอฟต์แวร์ของเกตเวย์นั้น จะเป็นการเขียนแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการ Linux สำหรับบอร์ด BeagleBone Black โดยในโครงการระยะแรกนี้จะออกแบบให้มีหน้าจอ Interface สำหรับใช้งาน โดยผู้ใช้สามารถสั่งการผ่านระบบที่ซกรีนได้เลย



รูปที่ 3.27 ภาพออกแบบเกตเวย์

ส่วนของฟังก์ชันการทำงานบนเกตเวย์นั้นจะแยกเป็นสองส่วนดังต่อไปนี้

- ส่วน User Interface ในส่วนนี้ผู้ออกแบบจะเปิดโอกาสให้ผู้ใช้สามารถควบคุมอุปกรณ์ผ่านหน้าจอสัมผัสของเกตเวย์ได้ โดยจะมีฟังก์ชันการควบคุมหรืออ่านสถานะของอุปกรณ์แต่ละตัว และฟังก์ชันในการเชื่อมต่อหรือลบอุปกรณ์ได้ โดยในการเชื่อมต่อหรือลบอุปกรณ์แต่ละเทคโนโลยีการเชื่อมต่อนั้น จะแตกต่างกันออกไป ทางผู้ออกแบบจึงได้ออกแบบซอฟต์แวร์เพื่อปรับ Interface การเชื่อมต่อของทุกเทคโนโลยีให้มีลักษณะเหมือนกันทั้งหมด โดยจะอิงกับระบบ Z-Wave เนื่องจากมีขั้นตอนที่ชัดเจนที่สุด เพื่อให้ง่ายต่อการเพิ่มลดอุปกรณ์และลดความสับสนของผู้ใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนเบื้องหลังการทำงาน Back-end ของตัวเกตเวย์ เนื่องจากตัวเกตเวย์จะมีหน้าที่รับผิดชอบการเชื่อมต่ออุปกรณ์ การส่งงาน โดยข้อมูลการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งหมดจะอยู่ที่เกตเวย์โดยจะรอรับคำสั่งจากเซิร์ฟเวอร์ และส่งค่าสถานะของเกตเวย์ ค่าสถานะของอุปกรณ์ ตามที่เซิร์ฟเวอร์สั่งการมา และทำการบันทึกข้อมูลทั้งหมดไว้ที่ตัวเกตเวย์ เช่นไอดีอุปกรณ์แต่ละตัว ชื่ออุปกรณ์ที่ผู้ใช้ได้กำหนดไว้ และสถานะของอุปกรณ์ต่างๆ

3.4.4 การออกแบบในส่วนเซิร์ฟเวอร์

ในส่วนเซิร์ฟเวอร์นั้น หน้าที่หลักๆคือการจำแนกคำสั่งระหว่างเกตเวย์และสมาร์ทโฟน โดยออกแบบให้เซิร์ฟเวอร์ทำการจับคู่ระหว่างรหัสเกตเวย์ที่กรอกในบัญชีผู้ใช้งานที่ล็อกอินบนสมาร์ทโฟน กับรหัสที่ติดตั้งกับเกตเวย์ตั้งแต่เริ่มต้น เพื่อให้เซิร์ฟเวอร์ทำการจัดสรรและส่งข้อมูลระหว่างสมาร์ทโฟนที่ล็อกอินแต่ละไอดีไปยังเกตเวย์ของผู้ใช้นั้นๆได้อย่างถูกต้อง

ส่วนของระบบชื่อผู้ใช้นั้น ผู้ออกแบบได้ออกแบบให้ผู้ใช้งานต้องทำการสมัครชื่อผู้ใช้ โดยจะต้องกรอกรหัสของเกตเวย์ของผู้ใช้ในขั้นตอนการสมัครด้วย จะถือเป็นการเชื่อมต่อระหว่างบัญชีผู้ใช้นั้นและตัวเกตเวย์

ผู้ออกแบบได้เลือกใช้เซิร์ฟเวอร์ของทาง Amazon EC2 (Amazon Elastic Compute Cloud) เนื่องจากมี Service API ให้ครบ มีระบบ Cloud computing มีเสถียรภาพสูง มีระบบ Database ที่ดี ซึ่งเป็นเซิร์ฟเวอร์ที่มีความน่าเชื่อถือที่สุด เหมาะแก่การนำมาใช้จัดการระบบขนาดใหญ่ เช่นสมาร์ทโฮมนี้ โดยเซิร์ฟเวอร์ตัวนี้มีความยืดหยุ่นที่สูงมาก สามารถจัดการกับ Connection ปริมาณมากๆได้ โดยมีระบบ Load Balance รองรับอยู่

3.4.5 การออกแบบในส่วนแอปพลิเคชันสำหรับสมาร์ทโฟน

การออกแบบแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน จะออกแบบให้การใช้งานของทั้งสองระบบ (Android/iOS) นั้นมีการใช้งานที่เหมือนกัน (User Experience) โดยการออกแบบจะใช้ผู้ทดสอบ มาทดลองการใช้งานแอปพลิเคชันสมาร์ทโฮมยี่ห้อต่างๆ และลงความคิดเห็น เพื่อนำมาเป็นพื้นฐานการออกแบบการทำงานของแอปพลิเคชัน

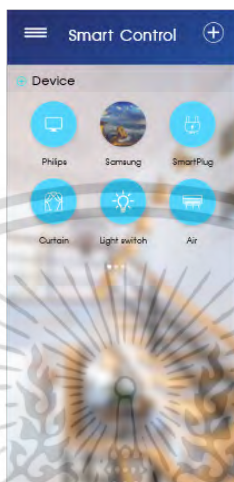


รูปที่ 3.28 ตัวอย่างหน้าแอปพลิเคชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอปพลิเคชันจะแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆคือ

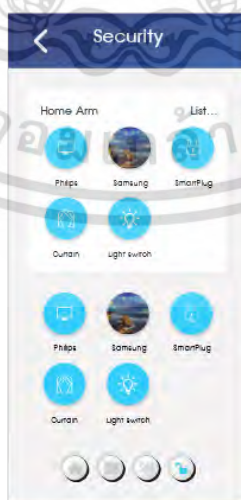
1) ส่วน Smart Control



รูปที่ 3.29 หน้า Smart Control

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เช่นสั่งเปิดปิดไฟ ตั้งชื่ออุปกรณ์ เชื่อมต่อหรือลบอุปกรณ์ โดยจะมีหน้าที่รวมอุปกรณ์ทั้งหมดที่ได้ทำการเชื่อมต่อแล้ว เป็นสัญลักษณ์ไอคอนของอุปกรณ์ชนิดนั้นๆแสดงอยู่ และสามารถกดเข้าไปควบคุมได้ มีเมนูในการเพิ่มลบอุปกรณ์ และเมนูในการเพิ่มลบรีโมทอินฟราเรด ในลักษณะเดียวกับบนตัวเกตเวย์ เพื่อให้เข้าใจง่ายต่อการเชื่อมต่อ

2) ส่วน Home Security



รูปที่ 3.30 หน้า Home Security

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนนี้จะเป็นส่วนที่แสดงชุดอุปกรณ์ประเภทอินพุต เช่น เซ็นเซอร์วัดความเคลื่อนไหว (PIR), เซ็นเซอร์จับควันไฟ(Smoke Detector), เซ็นเซอร์ตรวจจับแก๊สรั่ว (Gas Leak Detector) เป็นต้น โดยหน้าจอก็จะแสดงชุดอุปกรณ์อินพุตดังกล่าวที่ได้ทำการเชื่อมต่อแล้วแยกออกเป็นสองกลุ่มคือ Home arm และ Non-Home arm สำหรับใช้ในโหมดรักษาความปลอดภัยที่มีอยู่ 3 โหมด คือ

Home arm คือโหมดที่จะยอมให้อุปกรณ์อินพุตเฉพาะในกลุ่ม Home arm ทำงาน Arm คือโหมดที่จะให้อุปกรณ์อินพุตทั้งหมดทำงาน

Disarm คือปิดการทำงานทั้งหมด

สำหรับใช้งานในสถานการณ์ต่างๆ เช่น มีคนอยู่อาศัยในบ้าน หรือทุกคนออกไปทำธุระนอกบ้านทั้งหมด เป็นต้น

3.4.6 การออกแบบตัวเครื่อง

ลักษณะการออกแบบตัวเครื่อง เนื่องจากเกตเวย์ผู้ใช้สามารถสั่งการผ่านหน้าจอสัมผัส ดังนั้นการออกแบบจะเป็นลักษณะประมาณแท็บเล็ตตั้งรูป ตามความหนาของหน้าจอและบอร์ดควบคุมภายในเกตเวย์ และมีการฉลुरुเพื่อระบายความร้อนจากการทำงานของซีพียู เพื่อลดความร้อนสะสมให้มีเสถียรภาพยิ่งขึ้น มีรูหลังเกตเวย์สำหรับแขวนติดผนังได้เช่นเดียวกันกรอบรูป



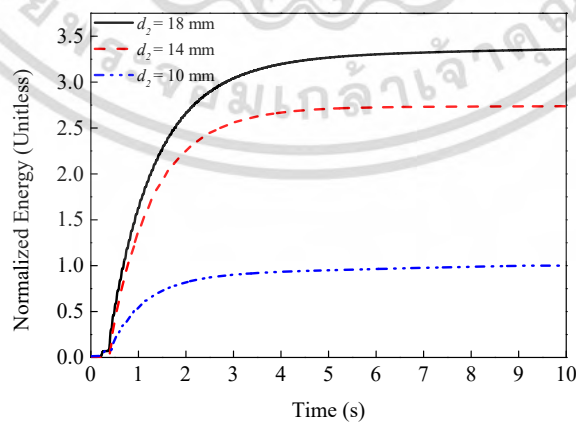
รูปที่ 3.31 ภาพเรนเดอร์ของเกตเวย์

บทที่ 4

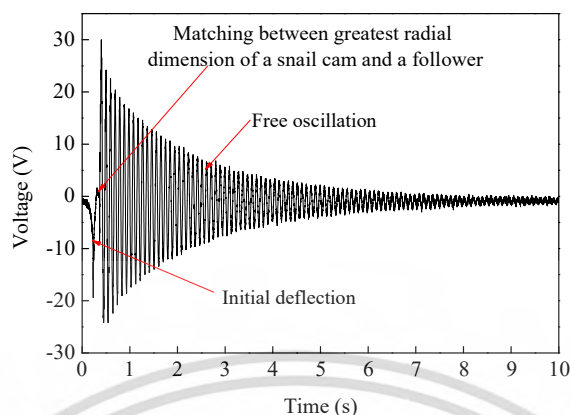
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการทดลองพื่นกำเนิดพลังงานต้นแบบด้วยแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแบบคานชนิด PZT

ก่อนที่จะทำการตรวจสอบประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงาน พบตัวต้านทานโหลดที่เหมาะสมที่สุดโดยการเชื่อมต่อโหลดตัวต้านทานหลายตัวเข้ากับต้นแบบโดยตรง และหมุนลูกเบี้ยวด้วยความเร็วเชิงมุมที่ 8 rad/s และมีรอบการหมุนแต่ละครั้ง T_d ที่ 0.1s ความจุและความต้านทานของคานเพียโซอิเล็กทริกในต้นแบบมีค่า 46.84 nF และ 320.13 k Ω ตามลำดับ ทำการวัดโดยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (Bode สูงสุดตรวจพบที่ตัวต้านทาน 100 - OMICRON Lab) เฉลี่ยโหลด 800 k Ω ตัวต้านทานนี้จึงถูกเลือกให้เป็นค่าที่เหมาะสม ขั้นตอนต่อไปคือการหาช่องว่างอากาศที่ดีที่สุด รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องต้นแบบที่มีขนาดของช่องว่างอากาศ d_2 ที่แตกต่างกัน อัตราส่วนของพลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นเมื่อช่องว่างอากาศ d_2 เท่ากับ 18 และ 14 mm ต่อพลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นเมื่อช่องว่างอากาศ d_2 คือ 10 mm เท่ากับ 3.35 และ 2.73 ต่อ 1 ตามลำดับ การลดขนาดของช่องว่างอากาศ d_2 นำไปสู่การลดลงอย่างมีนัยสำคัญในการส่งออกพลังงานเนื่องจากระยะขจัดในแนวตั้งที่เกิดขึ้นของคานเพียโซอิเล็กทริกลดลง เนื่องจากแรงดึงดูระหว่างแม่เหล็กถาวรและแท่งเหล็กลดลงเมื่อช่องว่างเพิ่มขึ้น ตามที่ได้กล่าวไว้ในส่วนที่ 2 การแกว่งตัวฟรีจะหยุดลงเมื่อมีช่องว่างอากาศ d_2 ที่น้อยที่สุด ทำให้เกิดพลังงานเอาต์พุตขั้นต่ำ ดังนั้น ต้นแบบถูกกำหนดค่าด้วย $d_2 = 18$ mm ที่สามารถสร้างพลังงานเฉลี่ย 0.075 mW พร้อมแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 54.20 V ดังแสดงในรูปที่ 4.2

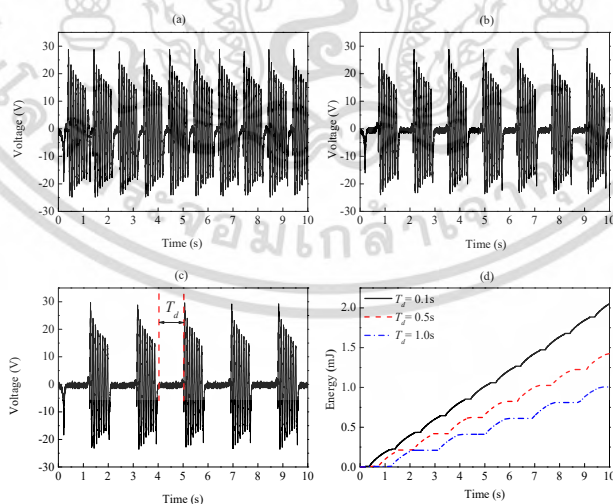


รูปที่ 4.1 Normalized energy from using different airgaps (d_2)



รูปที่ 4.2 Oscillating voltage across the optimal load resistor

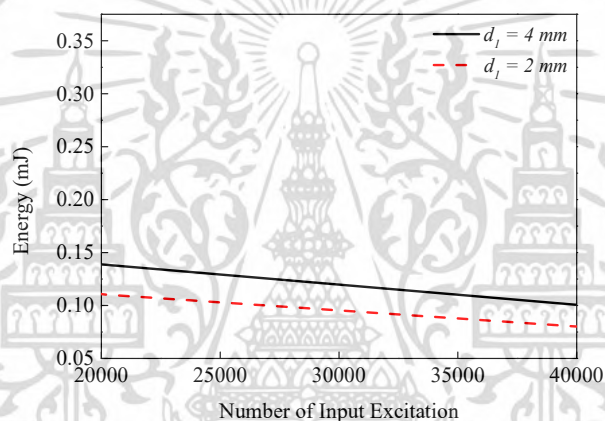
ประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานได้กำหนดไว้ ดังนี้ ตามวิธีการทดลองในหัวข้อย่อย B ลูกเบี้ยวถูกหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมที่ 8 rad/s ด้วยคาบเวลา (T_d) ที่แตกต่างกัน ดังนี้ 0.1, 0.5 and 1.0 วินาที ซึ่งสันนิษฐานว่าแทนความเร็วของคนเดินถนนที่ถูกต้อง รูปที่ 4.3 (a), (b) and (c) แสดงถึงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากความเร็วในการเดินเหล่านี้ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าความถี่ในการสั่นของคานดเพียโซอิเล็กทริก PZT อยู่ที่ 1.01Hz, 0.71 Hz และ 0.52 Hz, ตามลำดับ รูปที่ 4.3 (d) แสดงให้เห็นถึงพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ในช่วง 10 วินาที ในคาบระยะเวลา (T_d) ที่แตกต่างกัน พลังงานทั้งหมดที่ได้คือ 2.05, 1.42 และ 1.00 mJ ตามลำดับ ผลของการเพิ่มหรือลดคาบระยะเวลา เช่น การเดินที่ช้าลง เป็นการลดช่วงการสั่นของเพียโซอิเล็กทริก ทำให้พลังงานเอาต์พุตลดลงตามไป



รูปที่ 4.3 Voltages generated with step time intervals T_d of (a) 0.5, (b) 1 and (c) 1.5 s; (d) the trend of harvested energy that varied with step time interval

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนถัดไป ทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของต้นแบบ สำหรับการทดสอบความน่าเชื่อถือ ลูกเบี้ยวหมุนอย่างต่อเนื่องด้วยคาบเวลา (Td) เท่ากับ 0.1 วินาที ในการกระตุ้นต้นแบบ พบว่าพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ครั้งแรกจนถึงสี่หมื่นครั้ง ปัญหานี้ไม่เกี่ยวกับข้อบกพร่องหรือเสียหายของเพียโซอิเล็กทริก แต่เกิดจากชั้นของเพียโซอิเล็กทริกแยกตัวจากชั้นยึดหยุ่นซึ่งอาจมาจากกาวที่นำมาใช้ยึดติดมีประสิทธิภาพไม่ดีพอที่จะยึดเข้าด้วยกันภายใต้การสั่นในแนวตั้งของคานเพียโซอิเล็กทริก เพื่อแก้ไขสถานการณ์ดังกล่าว การกระจัดในแนวตั้งของคานเพียโซอิเล็กทริกถูกจำกัดไว้ที่ 2 mm ($d_1 = 2 \text{ mm}$) อย่างไรก็ตามการแยกตัวของชั้นยึดหยุ่นกับเพียโซอิเล็กทริกยังคงเกิดขึ้นดังที่แสดงไว้ในกราฟผลการทดลอง รูปที่ 4.4 ช่องว่างอากาศ d_1 ที่เล็กมากๆ อาจทำให้คานเพียโซอิเล็กทริกสามารถทำงานได้นานขึ้นแต่พลังงานเอาต์พุตจะลดลงเนื่องจากความเค้นต่ำในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

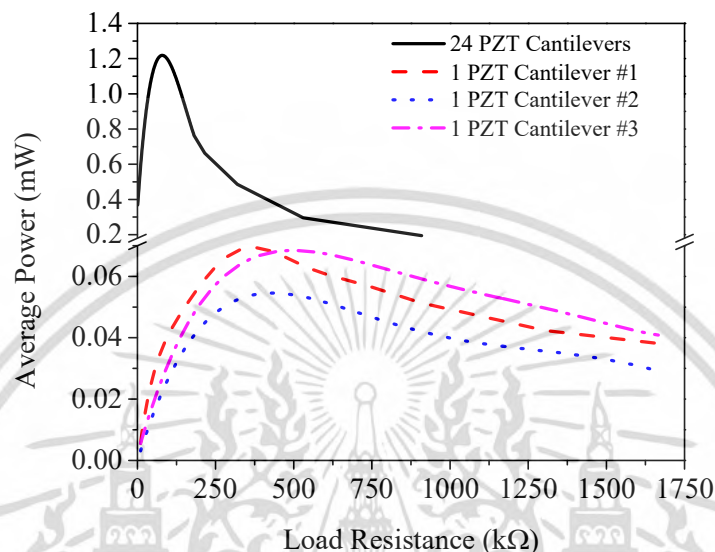


รูปที่ 4.4 Output energy with increasing number of plucks

4.1.1 การวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง

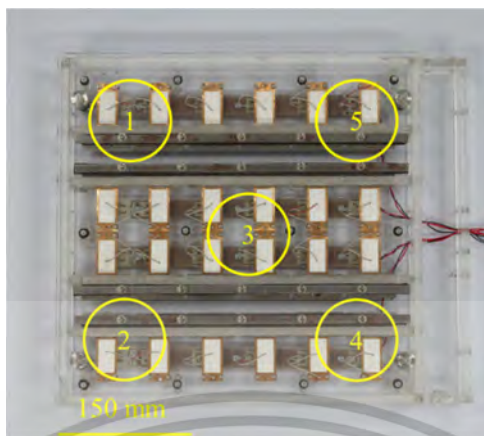
ผลการทดลองของการทดสอบครั้งแรกแสดงในรูปที่ 4.5 ด้วยความตื่นเต้นการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยการเหยียบเพียงหนึ่งครั้งได้พลังงานเฉลี่ยต่อคานเพียโซอิเล็กทริก 1 ตัว เท่ากับ 0.069 0.054 และ 0.068 mW ที่ค่าโหลดตัวต้านทานที่เหมาะสมคือ 377.21 377.21 และ 448.90 $k\Omega$ สำหรับคานเพียโซอิเล็กทริกหมายเลข #1 #2 และ #3 ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้รับแปรผันตามระยะขจัดในแนวตั้ง (ช่องอากาศ d_1) คานเพียโซอิเล็กทริกหมายเลข #1 และ #3 ที่มีช่องอากาศ d_1 ประมาณ 4 mm สามารถกำหนดพลังงานเฉลี่ยสูงกว่าหมายเลข #2 ที่มีช่องอากาศ d_1 ประมาณ 3 mm เนื่องจากช่องว่างอากาศ d_1 กำหนดระยะขจัดในแนวตั้งของคานเพียโซอิเล็กทริกไว้ทุกตัวไม่เกิน 4 mm กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้รับจากคานเพียโซอิเล็กทริกทั้งหมดจำนวน 24 ตัว อยู่ที่ 1.24 mW ที่ค่าตัวต้านทานที่เหมาะสม 74.44 $k\Omega$ ไม่ใช่ผลรวมทั้งหมดที่ 1.65 mW ดังที่คาดไว้ สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าการเป็นไปได้ที่จะได้รับประสิทธิภาพการแปลงสูงสุดโดยการปรับระยะห่างของช่องว่างอากาศของ

คานเพียโซอิเล็กทริกทุกตัวให้เหมาะสม หรือง่ายกว่าถ้าเราสามารถได้รับคานเพียโซอิเล็กทริกจากผู้ผลิตที่มีความคงทนต่อการโค้งงอในแนวตั้งที่มากจนไม่ต้องการการปรับแต่งช่องว่างอากาศ จะสามารถได้รับประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานสูงที่สุด

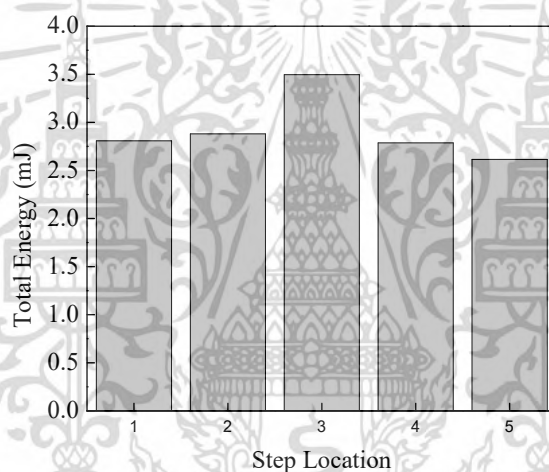


รูปที่ 4.5 The average power of one unimorph PZT cantilever and 24 paralleled unimorph PZT cantilevers

สำหรับการทดสอบครั้งที่สอง พื้นเก็บเกี่ยวพลังงานจะถูกเหยียบที่ตำแหน่งต่างๆ 5 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.6 พลังงานที่ได้รับจากแต่ละตำแหน่งคือ 2.80 2.87 3.49 2.78 และ 2.61 mJ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเหยียบในตำแหน่งที่ #3 นั้นให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าตำแหน่งอื่น เนื่องจากแรงเหยียบสามารถกระจายไปทั่วแผ่นฝาครอบได้อย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของแท่งเหล็กที่ติดอยู่ที่ฝาครอบเข้าหาแม่เหล็กถาวรที่ติดตั้งบนคานเพียโซอิเล็กทริกทั้งหมดพร้อมกันและสม่ำเสมอ ในอีกทางหนึ่งการเหยียบแผ่นฝาครอบที่มุมหนึ่ง (ตำแหน่งที่ 1 2 4 หรือ 5) สามารถทำให้กลไกทำงานได้เฉพาะบริเวณมุมนั้น เนื่องจากแรงไม่สามารถกระจายไปยังตำแหน่งอื่นๆ และไม่เพียงพอที่จะกดสปริงที่รองรับแรงที่อยู่ในมุมนั้นได้ ดังนั้น คานเพียโซอิเล็กทริกเพียงบางส่วนจากทั้งหมด 24 ตัวนั้นที่ส่งผลลัพธ์น่าสนใจ ผลการทดลองนี้ทำให้เราทราบว่าฝาครอบพื้นกำเนิดพลังงานควรจำมีขนาดใหญ่กว่ากลไกที่อยู่ภายใต้ เพื่อที่เมื่อถูกเหยียบ กลไกสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพโดยไม่ต้องคำนึงถึงตำแหน่งการเหยียบ



รูปที่ 4.6 Numbered locations on the cover plate



รูปที่ 4.7 Output energy generated by a step that landed on different locations of the energy harvesting floor tile

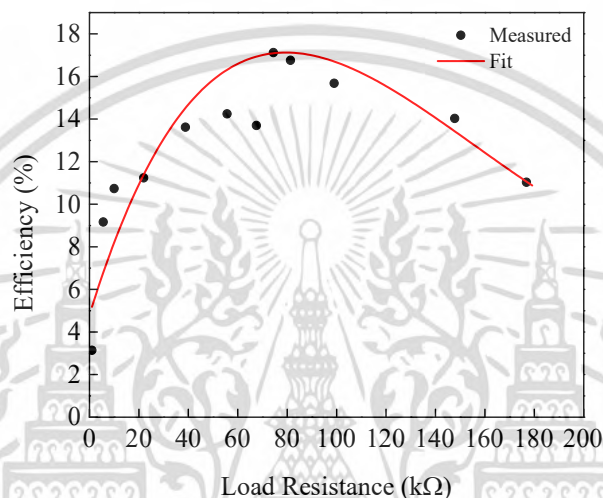
ตำแหน่งการเหยียบที่เหมาะสมที่สุด ตำแหน่งที่ #3 ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสดงให้เห็นในความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างปริมาณของพลังงานไฟฟ้าเอาต์พุตและพลังงานกลอินพุต พลังงานกลอินพุตถูกค้นพบจากพลังงานศักย์ที่เก็บไว้ในคานเพียโซอิเล็กทริก โดยพิจารณาจากการกระจัดและค่าคงที่สปริงที่มีประสิทธิภาพด้วยสมการต่อไปนี้

$$E_{Input} = \frac{1}{2} k_{eff} z_0^2 \quad (14)$$

$$k_{eff} = \omega_n^2 M \quad (15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ k_{eff} แทนค่าคงที่ของสปริง z_0 คือระยะขจัดที่ปลายของคานเพียโซอิเล็กทริก ω_n คือความถี่สั่นพ้องของการสั่นสะเทือนของคานเพียโซอิเล็กทริก และ M คือมวลที่ติดอยู่ที่ตำแหน่งของปลายเพียโซอิเล็กทริกที่สามารถแกว่งได้อย่างอิสระ ความถี่เรโซแนนท์ของคานเพียโซอิเล็กทริกขณะสั่นแบบอิสระหาได้จากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเอาต์พุต ซึ่งมีค่าประมาณ 10.54 Hz รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สามารถวัดได้โดยตัวต้านทานโหลดต่างๆ ดังที่เห็นว่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ 17.12 % ที่ค่าโหลดตัวต้านทานที่เหมาะสม 74.44 k Ω .



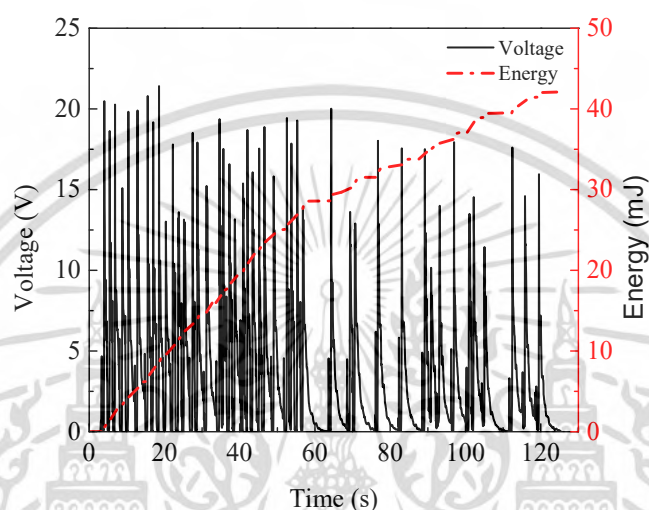
รูปที่ 4.8 Energy conversion efficiency versus load resistor values

ในการทดสอบครั้งสุดท้าย พลังงานที่ผลิตได้ถูกนำไปวางไว้บนทางเดินหน้าห้องเรียน ที่มีนักศึกษาจำนวน 45 คนต้องเดินผ่านและเหยียบมัน ในสถานการณ์จำลองนี้ แรงดันและแอมป์ของพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ถูกบันทึกและคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 แอมป์จูดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตอยู่ในช่วง 10.15 - 21.41V ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันนั้นไม่ได้เกิดจากน้ำหนักของแต่ละคน แต่เกิดจากนักศึกษาที่เดินผ่านไม่ได้เหยียบในตำแหน่งเดียวกันทุกครั้งดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น พลังงานเอาต์พุตทั้งหมดที่ได้จากการทดลองนี้คือ 42.09 mJ พลังงานเฉลี่ยต่อการเหยียบต่อหนึ่งครั้งอยู่ที่ 0.93mJ

เนื่องจากแนวคิดของงานนี้คือการใช้พื้นที่เก็บเกี่ยวพลังงานในการพัฒนาเมืองอัจฉริยะเพื่อจัดหาแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่กินพลังงานต่ำ เอาต์พุตรวมที่ได้จากการทดลองจึงถูกนำมาใช้เพื่อจัดหาโหนดเซ็นเซอร์ไร้สายพลังงานต่ำ [18], [19], [20] และที่แสดงในตารางที่ 4.1 สามารถให้พลังงานกับเซ็นเซอร์วัดความเร่ง เซ็นเซอร์วัดความเครียด เซ็นเซอร์ตรวจจับควัน โหนดเซ็นเซอร์ไร้สายแต่ละประเภทมีช่วงระยะเวลาการทำงานที่ 1.60 70.15 และ 8,503.03 วินาที ตามลำดับ โหนดเซ็นเซอร์ไร้สายเหล่านี้มักจะทำงานในสถานะไฮเบอร์เนตและแอคทีฟเพื่อลดการใช้พลังงาน ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะเก็บพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ในตัวเก็บประจุในระหว่างสถานะไฮเบอร์เนตของโหนดเพื่อใช้อย่างเพียงพอในสถานะแอคทีฟครั้งถัดไปเพื่อเก็บข้อมูลและส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูล ควรสังเกตว่าพลังงานที่ค่อนข้างสูงที่พบในงานวิจัยนี้ มาจากการใช้ตัวต้านทานค่าที่เหมาะสมเป็นโหลด ในการใช้งานจริงพลังงานจำนวนหนึ่งที่เก็บเกี่ยวได้จะหายไปเมื่อถูกเก็บไว้ในตัวเก็บประจุที่เป็นแหล่งพลังงานให้กับอุปกรณ์ไร้สาย เนื่องจากการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าในชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในขณะที่ไม่มีการเหยียบให้กลไกทำงาน กระแสรั่วไหลสามารถจัดการให้ลดลงได้โดยปรับปรุงวงจรแม่เหล็ก และใช้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์พลังงานต่ำ [21], [22].



รูปที่ 4.9 Output voltage and energy generated by many pedestrians stepping on the energy harvesting floor tile

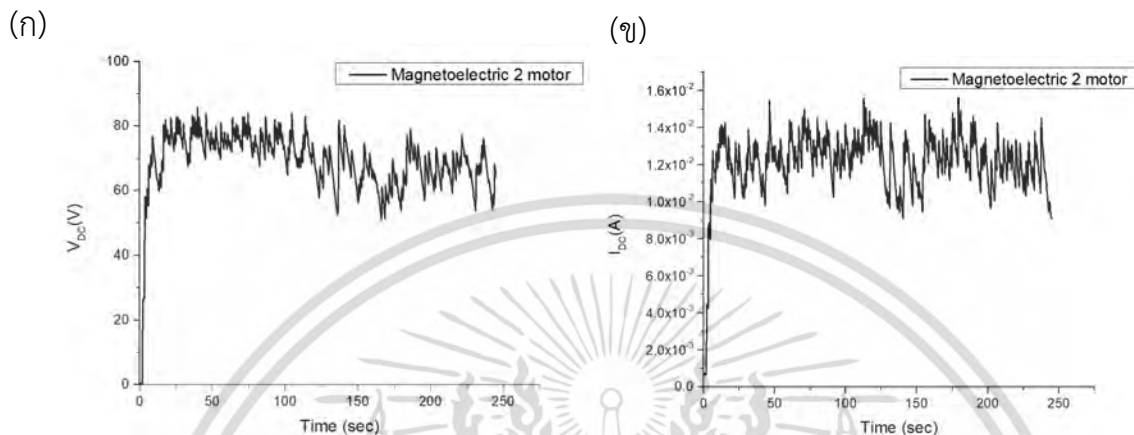
ตารางที่ 4.1 Estimation of operational time of a low-power wireless sensor node assumed powered by output energy from actual pedestrian steps

Reference	Wireless sensor node	Power consumption (mW)	Operational time (s)
Sudhawiyangkul, Thapanun <i>et al</i> [18]	Accelerometer	26.31	1.60
Zeiser, R <i>et al</i> [19]	Capacitive strain gauge	0.6	70.15
Luis, Juan A <i>et al</i> [20]	Smoke detecting	4.95×10^{-3}	8,503.03

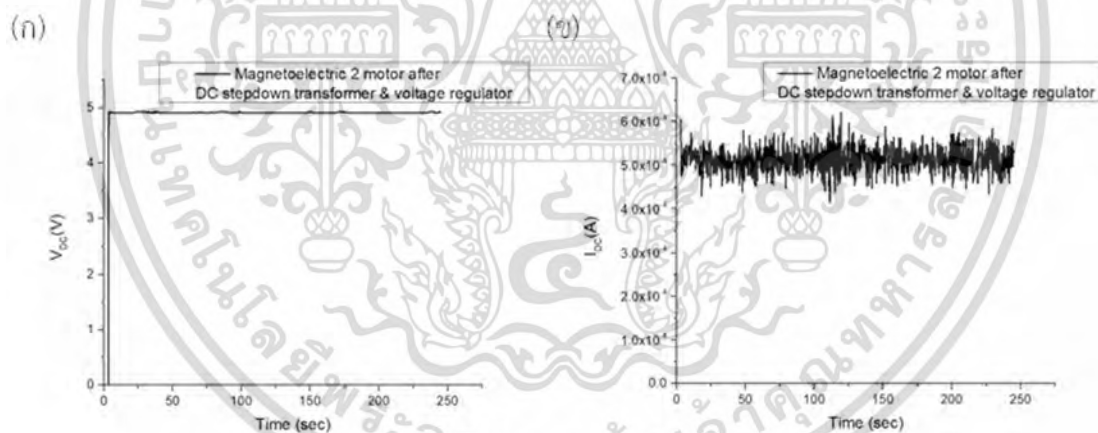
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบและวัดประสิทธิภาพของพื้นอัจฉริยะลูกผสม

4.2.1 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) และกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) ของ Magnetolectric generator



รูปที่ 4.10 (ก) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) และ (ข) กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) ของ Magnetolectric generator



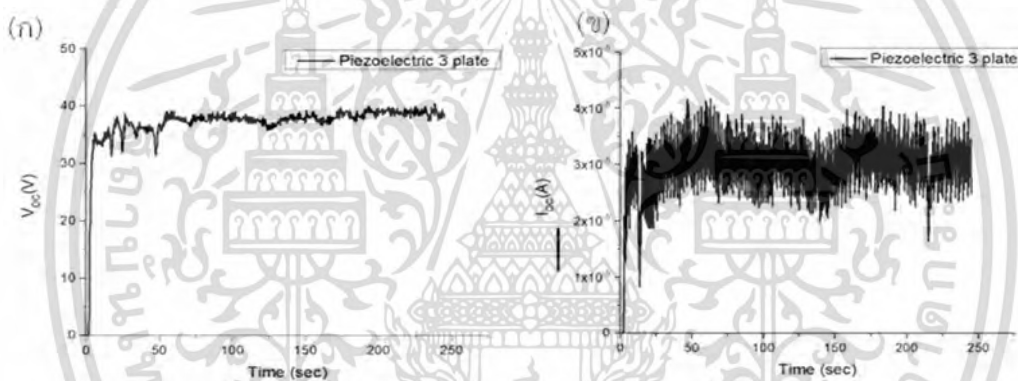
รูปที่ 4.11 (ก) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) และ (ข) กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) หลังผ่านวงจร DC stepdown transformer และ voltage regulator

ให้แรงเชิงกลแก่พื้น ที่ประกอบด้วยกลไกสำหรับหมุนปั่น Magnetolectric generator จำนวน 2 มอเตอร์ดังรูปที่ 4.10 (ก) และทำการต่อวงจรวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้างดังรูปที่ 4.10 (ข) ผลการทดสอบ วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้สูงสุดคือ 85.80 V เฉลี่ย 75.41 V และค่าของกระแสไฟฟ้าที่ได้โดยผ่านตัวต้านทาน 1.5Ω แสดงค่าสูงสุดคือ 15.6 mA เฉลี่ย 13.2 mA คิดเป็นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.1 W ดังผลการทดสอบแสดงในกราฟรูปที่

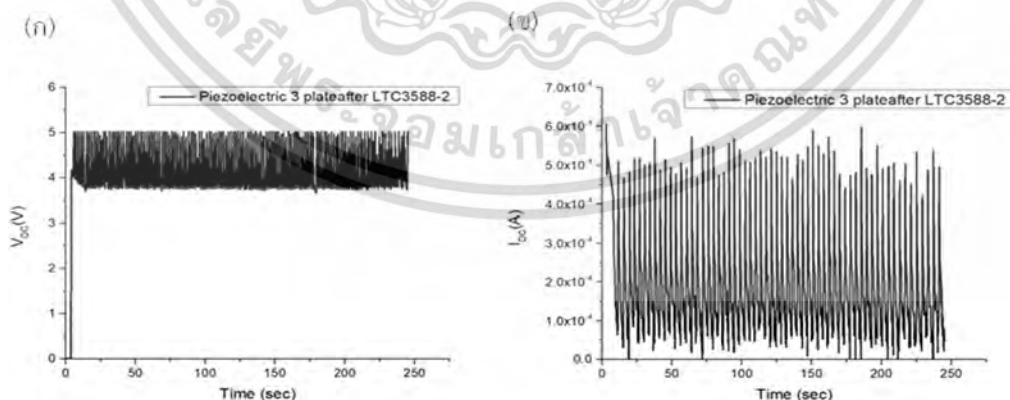
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6 (ก) และ (ข) จากนั้นทำการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าให้ลดลงเหลือประมาณ 5 V ด้วยวงจร DC step down และ voltage regulator เพื่อที่จะสามารถนำไปไฮบริดกับวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานจาก Piezoelectric ผลที่ได้คือค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดคือ 4.93 V เฉลี่ย 4.91 V และค่าของกระแสไฟฟ้าที่ได้โดยผ่านตัวต้านทาน 1.5Ω แสดงค่าสูงสุดคือ 0.62 mA เฉลี่ย 0.53 mA คิดเป็นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 2.62 mW ดังผลการทดสอบแสดงในกราฟรูปที่ 4.11 (ก) และ (ข) จากผลการทดสอบและวัดประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าจาก Magnetolectric generator จำนวน 2 มอเตอร์นั้นพบว่าประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้าที่ได้หลังจากผ่านวงจร DC step down และ voltage regulator ลดลงเนื่องจากเกิดการสูญเสียแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าระหว่างการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง ดังนั้นจึงควรปรับปรุง matching impedance และวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

4.2.2 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) และ กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) ของ Piezoelectric



รูปที่ 4.12 (ก) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) และ (ข) กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) ของ Piezoelectric



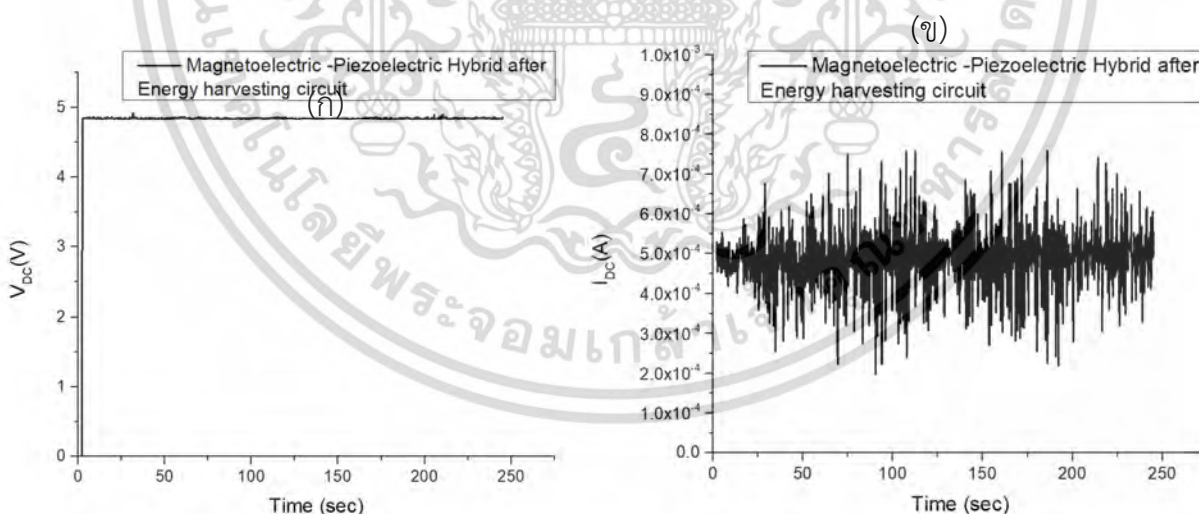
รูปที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) และ (ข) กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) ของ Piezoelectric

หลังผ่านวงจร Energy harvester (LTC3588-2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้แรงเชิงกลแก่พื้น ที่มีกลไกสำหรับเคาะให้แรงตกกระทบ Piezoelectric จำนวน 3 แผ่นเพื่อให้แผ่น Piezoelectric เกิดการโก่งงอเล็กน้อยโดยไม่แตกหัก ดังรูปที่ 3.7 (ก) และทำการต่อวงจรวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าดังรูปที่ 3.7 (ข) และ (ค) ผลการทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้สูงสุดคือ 40.44 V เฉลี่ย 38.60 V และค่าของกระแสไฟฟ้าที่ได้โดยผ่านตัวต้านทาน 1.5 Ω แสดงค่าสูงสุดคือ 41.7 μA เฉลี่ย 34.0 μA คิดเป็นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 1.31 mW ดังผลการทดสอบแสดงในกราฟรูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) จากนั้นทำการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าให้ลดลงเหลือประมาณ 5 V ด้วยวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานจาก Piezoelectric (LTC3588-2) ผลที่ได้คือค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดคือ 5.02 V เฉลี่ย 4.47 V และค่าของกระแสไฟฟ้าที่ได้โดยผ่านตัวต้านทาน 1.5 Ω แสดงค่าสูงสุดคือ 0.60 mA เฉลี่ย 0.28 mA คิดเป็นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 1.24 mW ดังผลการทดสอบแสดงในกราฟรูปที่ 4.13 (ก) และ (ข) จากผลการทดสอบและวัดประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าจาก Piezoelectric จำนวน 3 แผ่นนั้นพบว่าประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้าที่ได้หลังจากผ่านเก็บเกี่ยวพลังงานจาก Piezoelectric (LTC3588-2) ลดลงเล็กน้อยเนื่องจากเกิดการสูญเสียแรงดันไฟฟ้าลดลงแต่กระแสไฟฟ้าที่ได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของวงจร LTC3588-2 ดังนั้นควรปรับปรุง matching impedance และวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

4.2.3 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) และ กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) ของวัสดุคุณสมบัติ Magnetoelectric generator และ Piezoelectric ผ่านวงจรลูกผสมสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน



รูปที่ 4.14 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) และ (ข) กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) ของวัสดุคุณสมบัติ Magnetoelectric-Piezoelectric หลังจากผ่านวงจรลูกผสมสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการให้พลังงานไฟฟ้าจากแรงเชิงกลที่กระทำบนพื้นอัจฉริยะลูกผสมระหว่าง Magnetolectric จำนวน 2 มอเตอร์และ Piezoelectric จำนวน 3 แผ่น โดยผ่านวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าให้ได้ประมาณ 5 V ดังวงจรที่แสดงในรูปที่ 3.8 (ก) และ (ข) พบว่าหลังจากให้แรงเชิงกลกระทำบนพื้นผ่านกลไกการหมุนปั่น Magnetolectric และเคาะแผ่น Piezoelectric พร้อมกันนั้น พื้นอัจฉริยะลูกผสมสามารถให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้สูงสุดคือ 4.91 V เฉลี่ย 4.85 V และค่าของกระแสไฟฟ้าที่ได้โดยผ่านตัวต้านทาน 1.5Ω แสดงค่าสูงสุดคือ 0.76 mA เฉลี่ย 0.54 mA คิดเป็นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 2.63 mW ดังผลการทดสอบแสดงในกราฟรูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) ซึ่งประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าที่ได้นั้นสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงเชิงกลในชีวิตประจำวันที่สุดยุเปลา ไปใช้เพื่อชาร์จแบตเตอรี่ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เช่น โทรศัพท์มือถือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสวมใส่ ถ่านกระดุม เป็นต้น

ตารางที่ 4.2 สรุปรูปแบบการทดสอบพื้นอัจฉริยะลูกผสมและพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้

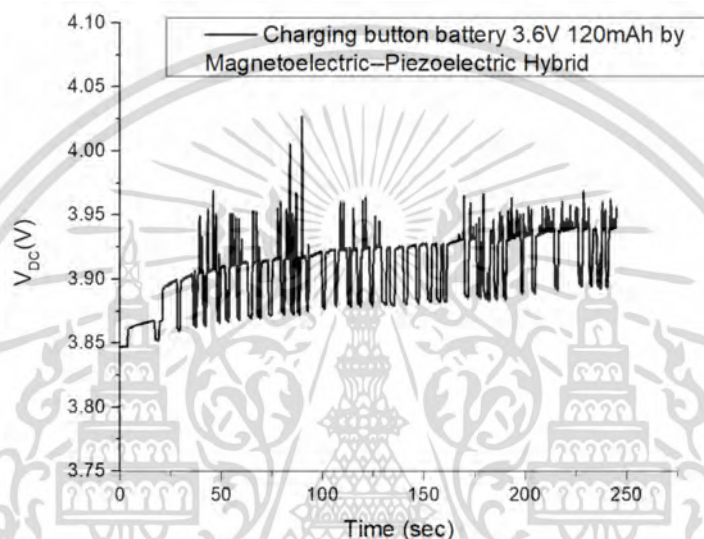
รูปแบบการทดสอบ	ก่อนผ่านวงจรเก็บเกี่ยวพลังงาน			หลังผ่านวงจรเก็บเกี่ยวพลังงาน		
	$V_{DC}(V)$	$I_{DC}(A)$	$P(W)$	$V_{DC}(V)$	$I_{DC}(A)$	$P(W)$
Magnetolectric 2 มอเตอร์	75.41	1.32×10^{-2}	9.95×10^{-1}	4.91	5.33×10^{-4}	2.62×10^{-3}
Piezoelectric 3 แผ่น	38.60	3.40×10^{-5}	1.31×10^{-3}	4.47	2.78×10^{-4}	1.24×10^{-3}
Hybrid ลูกผสม				4.85	5.42×10^{-4}	2.63×10^{-3}

ผลการทดสอบและการวัดประสิทธิภาพของพื้นอัจฉริยะลูกผสมที่ประกอบด้วย Magnetolectric จำนวน 2 มอเตอร์และ Piezoelectric จำนวน 3 แผ่น แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่เก็บเกี่ยวได้ดังตารางที่ 4.2 โดยแสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้หลังจากผ่านวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานจาก Magnetolectric จำนวน 2 มอเตอร์คือ 2.62 mW จาก Piezoelectric จำนวน 3 แผ่นคือ 1.24 mW และจากการไฮบริดคือ 2.63 mW ซึ่งจากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้มาจาก Magnetolectric เป็นหลักเนื่องจากวัสดุให้กำลังไฟฟ้าค่อนข้างสูงกว่าวัสดุ Piezoelectric แตกต่างกันอย่างมากระหว่างมาก อย่างไรก็ตามการปรับปรุงประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าของพื้นอัจฉริยะลูกผสมนั้นจะต้องทำการทดสอบหา matching impedance เพื่อหาลำดับกำลังไฟฟ้าสูงสุดของวัสดุแต่ละชนิดที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้และพัฒนาวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าของการไฮบริดพื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัจฉริยะลูกผสมระหว่าง Magnetolectric และ Piezoelectric เพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานและนำไปประยุกต์ใช้ในลำดับต่อไป

4.3 ผลการทดสอบและวัดประสิทธิภาพการชาร์จแบตเตอรี่ 3.6V 120mAh โดยพื้นอัจฉริยะลูกผสมของวัสดุลูกผสมระหว่าง Magnetolectric generator และ Piezoelectric ผ่านวงจรลูกผสมสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน

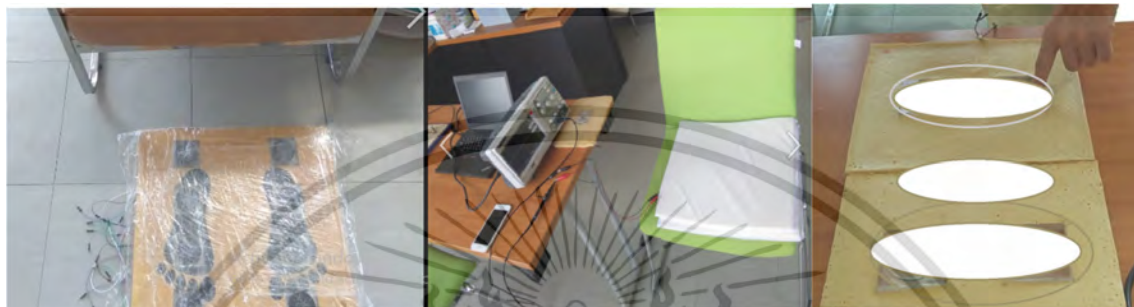


รูปที่ 4.15 การชาร์จแบตเตอรี่ 3.6V/120 mAh โดยพื้นอัจฉริยะลูกผสมของวัสดุลูกผสมระหว่าง Magnetolectric generator และ Piezoelectric ผ่านวงจรลูกผสมสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน

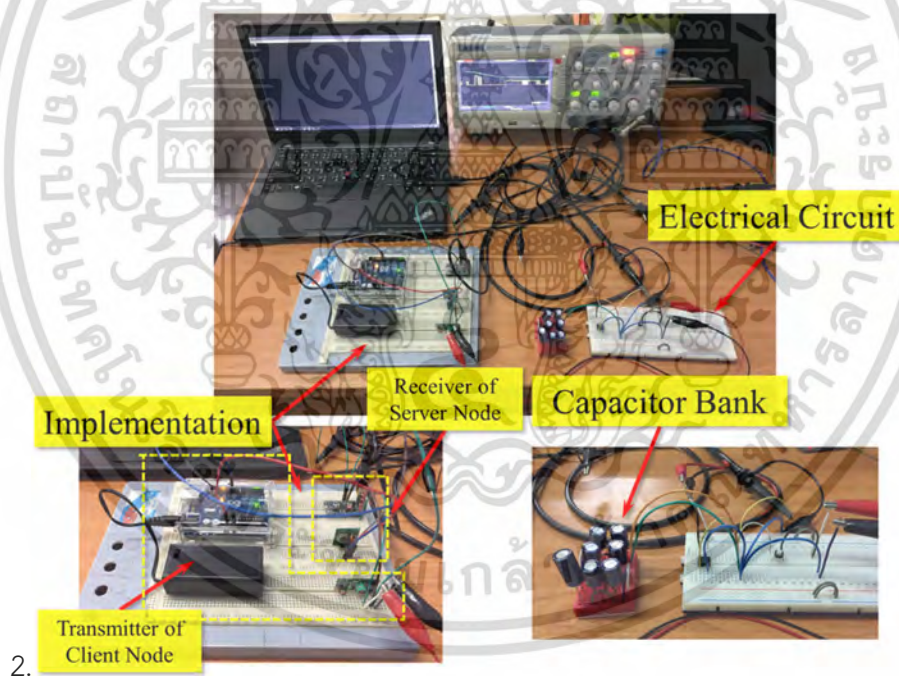
จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการให้แรงเชิงกลแก่พื้นอัจฉริยะลูกผสมนั้น ได้ถูกนำมาทดสอบเพื่อประยุกต์ใช้เก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับชาร์จแบตเตอรี่ LIR2450 ผ่านกระดุมขนาด 3.6V/120 mAh โดยต่อวงจรของพื้นอัจฉริยะลูกผสมกับวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานและวงจรสำหรับชาร์จแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพสำหรับชาร์จแบตเตอรี่ LIR2450 แสดงดังกราฟรูปที่ 4.15 จากค่าความจุของแบตเตอรี่ เริ่มต้นที่ 3.85V เพิ่มขึ้นเป็น 3.96V (108.78mV) คิดเป็น 2.83% ในระยะเวลา 4 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นลูกผสมนี้ สามารถนำมาประยุกต์ทำพื้นทางเดินหรือพื้นถนน เพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลที่สูญเสียไปจากการเดิน วิ่ง รถมอเตอร์ไซด์

4.4 ผลการทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้ากลเข้ากับยางพารา

จากการออกแบบวงจรและชิ้นงาน ก่อนหน้า เพื่อใช้ประโยชน์ในลักษณะเหยียบหรือเดินผ่าน,นั่งทับและขยับร่างกาย, วางบนโต๊ะใช้มือกด-ออกแรงบริหารมือ ชุดกำเนิดพลังงานยังไม่เชื่อมต่อเป็นเนื้อเดียวกับยางพารา เป็นเพียงการเจาะวางตาม lay out ที่ออกแบบ ยังไม่จัดเป็นการขึ้นรูปแบบปิดหรือ embed



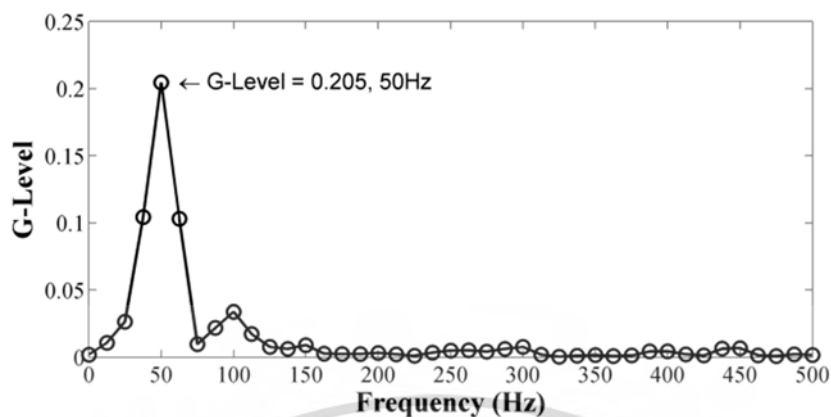
รูปที่ 4.16 แสดงชุดกำเนิดพลังงานยังไม่เชื่อมต่อเป็นเนื้อเดียวกับยางพารา



รูปที่ 4.17 มีการพัฒนาออกแบบวงจรและชิ้นงานให้รองรับช่วงความถี่กว้างขึ้น

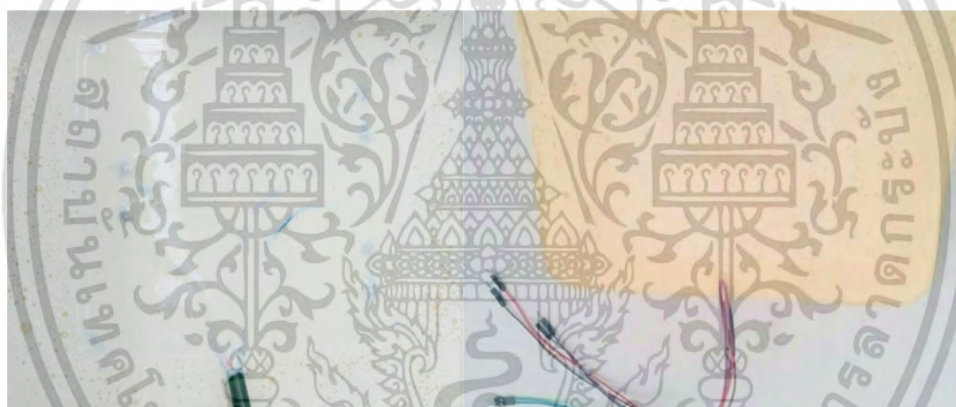
นำไปทดสอบพบว่ามี frequency bandwidth ดังรูปถัดไป รูปที่ 4.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



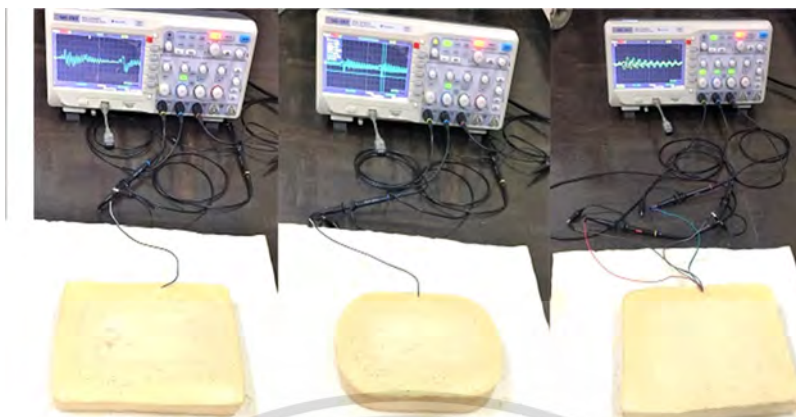
รูปที่ 4.18 วงจรและชิ้นงานที่สามารถรองรับช่วงความถี่กว้างขึ้น

frequency bandwidth ที่ได้ จะมี 2 ช่วงคือ ช่วงต่ำกว่า 30 Hz ลงมา และ ช่วง 10-50 Hz รองรับอิริยาบถได้หลากหลาย สามารถนำโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ไปดำเนินการต่อกับยางพาราได้



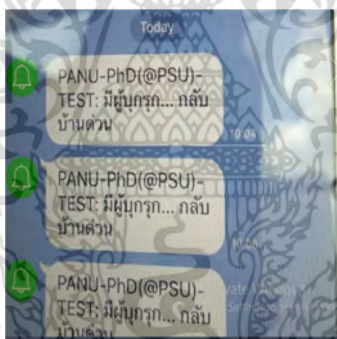
รูปที่ 4.19 แสดงการขึ้นรูปยางพาราแบบปิด 100% หุ้มชั้นฟิล์มป้องกันวงจรและสายไฟฟ้าเชื่อมต่อ

มีการพัฒนาระดับของการผนวกกับยางพารา นั่นคือขึ้นรูปแบบปิด 100% หุ้มชั้นฟิล์มป้องกันวงจรและสายไฟฟ้าเชื่อมต่อและจากนั้นจะได้ชิ้นงานที่ฝังในแผ่นยาง ดังรูปที่ 4.19 ชิ้นงานที่ได้ เรียกว่า embedded excited piezo-generator rubber (EEPGR) นำไปทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและ field test กับผู้สูงอายุกลุ่มที่เคยส้อมตัวอย่าง และ อายุในช่วงวัยอื่นๆ



รูปที่ 4.20 การทดสอบ embedded excited piezo-generator rubber (EEPGR)

จับภาพ (capture) สัญญาณ output จากชุดกำเนิดพลังงานที่ฝังมิดในยาง ดังรูป สูงสุด 2.5 โวลต์ สำหรับช่วงความถี่ ต่ำกว่า 30 Hz และ 12 โวลต์สำหรับช่วง 10-50 Hz สอดคล้องกับแรงกดจากน้ำหนักตัวของ users ทั่วไป



รูปที่ 4.21 แสดงแอปพลิเคชัน remote monitoring ผ่าน mobile application

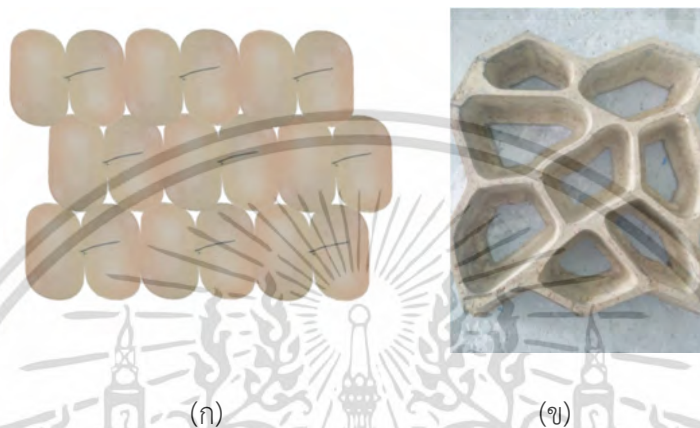
สัญญาณที่ได้ สามารถใช้เป็น remote monitoring ผ่าน mobile application ได้เช่นเดิม



รูปที่ 4.22 แสดงแผ่นโพลิเมอร์ยางขึ้นอื่นสำหรับปิดทับข้างบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้งานภายนอกห้องปฏิบัติการ ควรมีแผ่นโฟมยางขึ้นอื่นต่างหากปิดทับข้างบนและจะได้สัญญาณก็ต่อเมื่อมี แรงกระแทก (impact load force) ประมาณ 10 KPa ขึ้นไป เทียบเท่ากับการเดินเร็ว การวิ่งลงน้ำหนัก ในลักษณะนี้ จึงอาจขยายผล จากกลุ่มผู้สูงอายุไปยังกลุ่มอื่นๆเช่น นักกีฬา ประชาชนทั่วไปวิ่งออกกำลังกายผ่านไบบนยางแผ่นชุดนี้ เป็นต้น



รูปที่ 4.23 แสดงแผ่นโฟมยางขึ้นอื่นสำหรับปิดทับข้างบน

รูปที่ 4.23(ก) เป็นการต่อยอดในสาธารณะแทนด้วยภาพสเก็ตของแผ่นยางผลิตพลังงานจำนวนมากวางต่อกันและรูปที่ 4.23(ข) บล็อกยางพารา (ผลิตและจำหน่ายโดยผู้ประกอบการในท้องถิ่น) ที่สามารถนำมาขยายขนาดช่องบางช่อง เพื่อฝังชุดกำเนิดพลังงานพร้อมขึ้นรูปน้ำยาไปด้วยกัน

4.5 ผลการทดลองระบบสมาร์ทโฮม (Smart Home)

4.5.1 รูปลักษณะภายนอก



รูปที่ 4.24 รูปลักษณะภายนอกของเกตเวย์ตัวต้นแบบ

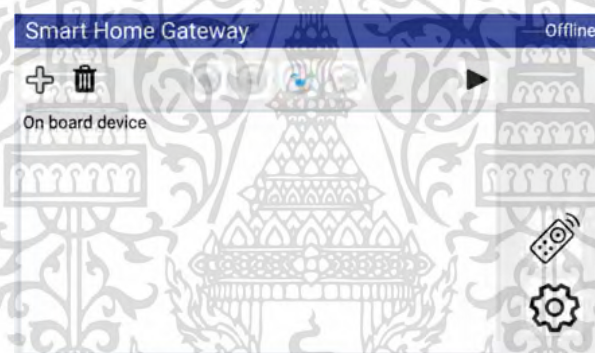
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 แผงวงจร



รูปที่ 4.25 แผงวงจรของเกตเวย์ตัวต้นแบบ

4.5.3 อินเทอร์เฟซของเกตเวย์



รูปที่ 4.26 อินเทอร์เฟซต้นแบบของเกตเวย์

4.5.4 แอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน



รูปที่ 4.27 แอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัยพื้นกำเนิดพลังงานต้นแบบด้วยแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแบบคานชนิด PZT

พื้นที่เก็บเกี่ยวพลังงานพร้อมกลไกการเพิ่มความถี่ได้รับการออกแบบและศึกษาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ความถี่ในการแปลงทำได้โดยการใช้แรงคืนจากสปริงเพื่อแยกแ่งเหล็กออกจากแม่เหล็กถาวรที่ถูกดูดเข้ากันด้วยแรงแม่เหล็ก ระยะขจัดในแนวตั้งของคานเพียโซอิเล็กทริกที่มากเกิดไปอาจทำให้เกิดรอยแตกในชั้นเพียโซอิเล็กทริก ปัญหานี้ได้รับการวิเคราะห์แล้วสามารถป้องกันไม่ให้เกิดขึ้นโดยการใช้ตัวหยุด ช่องว่างอากาศระหว่างแม่เหล็กถาวรและแ่งเหล็กมีอิทธิพลอย่างมากต่อการกำเนิดพลังงาน วิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) และการทดสอบ เมื่อช่องว่างอากาศมีขนาดใหญ่พอที่จะลดแรงแม่เหล็กที่ดึงดูดแ่งเหล็กให้เป็นศูนย์ได้ คานเพียโซอิเล็กทริกที่สั้นจะให้พลังงานเอาต์พุตสูงสุด การตรวจสอบความถูกต้องของกลไกการออกแบบนั้นทำบนคานเพียโซอิเล็กทริกเพียงตัวเดียว ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า แม้ว่าคานเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการวิจัยนี้มีปัญหาของชั้นเพียโซอิเล็กทริกและชั้นยึดหยุ่นที่หลุดออกจากกัน แต่ตัวต้นแบบก็ประสบความสำเร็จเกี่ยวกับกลไกการเพิ่มความถี่ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่ดี จากนั้นปรับขนาดของพื้นกำเนิดพลังงานให้สามารถรองรับคานเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 24 ตัว และใช้ในการทดลองประเมินประสิทธิภาพ พบว่าความแตกต่างของความโค้งของคานเพียโซอิเล็กทริกที่เกิดจากผู้ผลิต และพื้นที่เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดใหญ่สามารถลดพลังงานเอาต์พุตทั้งหมดได้ ปัญหาที่พบได้รับการจัดการโดยการปรับจูนระยะขจัดสูงสุดของคานเพียโซอิเล็กทริกแต่ละตัว ในขณะที่อีกปัญหาจะได้รับการจัดการในการวิจัยในอนาคตโดยการทำให้พื้นกำเนิดพลังงานมีขนาดเล็กลง ในการทดสอบจริงที่มีคนเดินและเหยียบพื้นกำเนิดพลังงานเป็นจำนวน 45 ครั้ง พบว่าจำนวนทั้งหมดนี้สามารถให้พลังงานที่เก็บเกี่ยวได้สูงพอที่จะเปิดใช้งานโหมดเซ็นเซอร์ไร้สายที่ต้องการพลังงานต่ำ

5.2 สรุปผลการทดสอบและวัดประสิทธิภาพพื้นอัจฉริยะลูกผสมของวัสดุลูกผสมระหว่าง Magnetolectric generator และ Piezoelectric ผ่านวงจรลูกผสมสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน

5.2.1 สรุปผลการทดสอบพื้นอัจฉริยะลูกผสม

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นออกแบบและจัดทำต้นแบบพื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid) สำหรับเปลี่ยนรูปพลังงานด้วยวิธีการทางไพโอโซอิเล็กทริกผสมผสานกับการสร้างพลังงานไฟฟ้าจากการเหนี่ยวนำของแม่เหล็ก ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานงานกลเป็นไฟฟ้า โดยศึกษาทดสอบและวัดประสิทธิภาพค่าแรงดันไฟฟ้า (V)

กระแสไฟฟ้า (I) และกำลังไฟฟ้า (P) ที่เก็บเกี่ยวพลังงานได้จากการให้แรงกดเชิงกลแก่พื้นอัจฉริยะลูกผสมและวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากวัสดุ Magnetolectric จำนวน 2 โมเตอร์ Piezoelectric จำนวน 3 แผ่น และจากการไฮบริด โดยตรงและผ่านวงจรสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน โดยทำการสร้างชุดต้นแบบพื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid) ที่สามารถให้แรงกดเชิงกลได้ จากนั้นทำการศึกษาแรงกดเชิงกล ที่มีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแต่ละวัสดุรวมถึงการไฮบริด พร้อมทั้งศึกษาวงจรที่สามารถใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าของวัสดุ และศึกษาการประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1. ทิมวิจัยได้ออกแบบและจัดทำต้นแบบของพื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid) จำนวน 10 อัน และขยายต่อยอดอีก 20 อันเพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานบนพื้นที่จากกิจกรรมของผู้สูงอายุ ภายในสถานที่อยู่อาศัย หรือมีคนเดินจำนวนมากเช่นห้างสรรพสินค้า หรือบนพื้นถนนสำหรับให้รถวิ่งผ่าน เพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลที่สูญเปล่ามาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้

2. พื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid) ประกอบด้วย Magnetolectric จำนวน 2 โมเตอร์ และ Piezoelectric จำนวน 3 แผ่น สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้เฉลี่ย 2.63 mW ต่อการเหยียบให้แรงเชิงกล 1 ครั้ง สามารถนำไปประยุกต์ใช้เก็บเกี่ยวพลังงานในการประจุไฟฟ้าแก่แบตเตอรี่ขนาดประจุต่ำกว่า 5V ได้ เพื่อประจุไฟฟ้าและเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยแรงเชิงกล

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากต้นแบบของพื้นอัจฉริยะลูกผสม (Smart floor hybrid) ต้องปรับปรุงเรื่องของการกระดกกระทบของคานที่ให้แรงแก่ Piezoelectric ให้เสียงเบาและปรับปรุงกลไกหมุนปืน Magnetolectric ให้ราบรื่นและสมดุล มากขึ้น

ปรับปรุงแท่นวางแผ่น Piezoelectric และตัวเคาะให้แรงกระทำที่ให้แรงเชิงกลและความถี่ที่เพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจาก Piezoelectric

ศึกษาทดลองเพิ่มเติมเกี่ยวกับการหา matching impedance เพื่อหากำลังไฟฟ้าสูงสุดของวัสดุแต่ละชนิดที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้

พัฒนางจรเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าของการไฮบริดพื้นอัจฉริยะลูกผสมระหว่าง Magnetolectric และ Piezoelectric เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] French, A.P. 1971. Vibrations and Waves, The M.I.T. Introductory Physics Series. W.W. Norton & Company, Inc.: New York, USA.
- [2] Roundy, S., P.K. Wright, and J. Rabaey. 2003. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. Computer Communications 26 (11): 1131-1144
- [3] Ikeda, T. 1990. Fundamentals of Piezoelectricity. Oxford University Press: New York, USA
- [4] Thomson, W.T. 1993. Theory of Vibration with Applications. 4th ed. Springer Science & Business Media, Inc.: New York, USA.
- [5] Xu Y. Ferroelectric materials and their applications: North-Holland New York, NY, 1991.
- [6] G. H. Haertling, "Ferroelectric Ceramics: History and Technology," Journal of the American Ceramic Society 82 (4), 797-1615 (1999).
- [7] K. C. Kao, Dielectric Phenomena in Solids. (Academic Press, 2004).
- [8] "IEEE Standard Definitions of Primary Ferroelectric Terms," ANSI/IEEE Std. 180-1986, 1–21, IEEE, New York, 1986.
- [9] APC International Piezoelectric Ceramic: Principles and Applications, APC International, Ltd., 2002.
- [10] S. J. Jang, K. Uchino, S. Nomura, and L. E. Cross, "Electrostrictive Behavior of Lead Magnesium Niobate-Based Ceramic Dielectrics," Ferroelectrics, 27, 31–34 (1980).
- [11] M. A. Ealey and P. A. Davis, "Standard SELECT Electrostrictive Lead Magnesium Niobate Actuators for Active and Adaptive Optical Components," Opt. Eng., 29 [11], 1373–82 (1990).
- [12] L. E. Cross, "Relaxor Ferroelectrics," Ferroelectrics, 76, 241–67 (1987).
- [13] J. Zhao, Q. M. Zhang, N. Kim, and T. Shrout, "Electromechanical Properties of Relaxor Ferroelectric Lead Magnesium Niobate—Lead Titanate Ceramics," Jpn. J. Appl. Phys., Part I, 34 [10], 5658–63 (1995).
- [14] X. Gao, W.H. Shih, and W.Y. Shih, "Induced voltage of piezoelectric unimorph cantilevers of different nonpiezoelectric/piezoelectric length ratios," Smart Mater. Struct., vol. 18, no. 12, 2009, pp. 125018-125025.
- [15] L. Gu and C. Livermore, "Impact-driven, frequency up-converting coupled vibration energy harvesting device for low frequency operation," Smart Mater. Struct., vol. 20, no. 4, pp. 045004–045013, Mar. 2011.

- [16] Tom V. Mathew “Pedestrian Studies,” Lecture notes in Traffic Engineering and Management, 2014.
- [17] P. Janphuang, R. A. Lockhart, D. Isarakorn, S. Henein, D. Briand and N. F. de Rooij, "Harvesting Energy from a Rotating Gear Using an AFM-Like MEMS Piezoelectric Frequency Up-Converting Energy Harvester," in Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 24, no. 3, pp. 742-754, June 2015.
- [18] Sudhawiyangkul, Thapanun; Isarakorn, Don “Design and realization of an energy autonomous wireless sensor system for ball screw fault diagnosis,” Sensors and Actuators A 258 (2017) 49–58.
- [19] Zeiser, R; Fellner, T; Wilde, J. “Capacitive strain gauges on flexible polymer substrates for wireless, intelligent systems” Journal of Sensors and Sensor Systems; Gottingen 3.1(2014): 77-86.
- [20] Luis, J.A.; Galán, J.A.G.; Espigado, J.A. Low Power Wireless Smoke Alarm System in Home Fires. Sensors 2015, 15, 20717-20729.
- [21] Miah A. Halim, Jae Y. Park, “Theoretical modeling and analysis of mechanical impact driven and frequency up-converted piezoelectric energy harvester for low-frequency and wide-bandwidth operation,” Sensors and Actuators A: Physical, Volume 208, 2014, Pages 56-65, ISSN 0924-4247
- [22] D. Alghisi, S. Dalola, M. Ferrari, V. Ferrari, “Triaxial ball-impact piezoelectric converter for autonomous sensors exploiting energy harvesting from vibrations and human motion,” Sensors and Actuators A: Physical, Volume 233, 2015, Pages 569-581, ISSN 0924-4247.



ภาคผนวก ก ประวัติผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Curriculum Vitae

Last modified on April 23, 2019

Personal Information

Surname ISARAKORN (อิสรากร)
Name Don (ดอน)
Country of Birth Thailand
Sex Male
Nationality Thai
Marital Status Married (2 children)



Present Affiliation

Multi-Scale Electromechanical Systems Laboratory
Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Bangkok 10520, Thailand
E-mail: don.is@kmutl.ac.th
Mobile: 095-470-7777

Education

- 2010-2011 **Postdoctoral research fellow**
SAMLAB, Institute of Microengineering, EPFL, Switzerland
Ethicon, part of the Johnson&Johnson family of companies, USA
Medos International Sarl, Le Locle, Switzerland
Project: Si-Ul Scalpel – Micromachined Ultrasonic Scalpel for CMF and Plastic Surgery
Funding agency: The Commission for Technology and Innovation CTI, Switzerland
- 2006-2010 **Ph.D. in Microsystems and Microelectronics**
Institute of Microengineering,
Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), Switzerland
Thesis title: Epitaxial Piezoelectric MEMS on Silicon
Advisors: Prof.Dr. Nico de Rooij/Dr. Danick Briand
- 2001-2003 **Master of Engineering (M.Eng.) in Control Engineering,**
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand (GPA of 3.93/4.00)
Thesis title: Position Control of Ultrasonic Linear Motor Using PDFF Controller Designed by CDM
Advisor: Assoc.Prof.Dr. Jongkol Ngamwivit
- 1999-2000 **Certificate of International Exchange Study**
(Japanese University Studies in Science & Technology)
National University of Electro-Communications, Japan (GPA of 3.90/4.00)
- 1995-2000 **Bachelor of Engineering (B.Eng.) in Electronics Engineering,**
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand (GPA of 3.06/4.00)

Research Interests

Primary: Microsensors and microactuators, Piezoelectric materials for sensing and actuating applications, MEMS process development, Energy harvesting systems, PowerMEMS, Biosensors.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Secondary: Robotics, Micro-mechatronics, Automatic control systems.

Internships and Participation in Sponsored Research Programs

September-November, 2004 **KMITL-Tokai University Academic Cooperation Program:**

Visiting Researcher at Department of Applied Computer Engineering,
Tokai University, Japan.

August-September, 2001

ACCU International Exchange Program:

Technical Education Based on Micromachine Technology and Cultural Interchange
between Young Engineers, Department of Intelligent Mechanical Systems Engineering, Kagawa
University, Japan.

1999-2000

UEC Exchange Study Program:

Applied Micro Systems Laboratory, Robotics Division
Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems,
National University of Electro-Communications, Japan.

April-May, 1998

Summer Internship:

Department of Applied Computer Engineering, Tokai University, Japan.

Training

Mar, 2019

Intellectual Property Law and Practice (IPLP) Class 3, Faculty of Law, Assumption University

Sep-Nov, 2018

Patent Agent, Department of Intellectual Property, Ministry of Commerce, Thailand, Registration no. 2603

September, 2017

หลักสูตรการพัฒนาศักยภาพผู้บริหารมืออาชีพทางการกีฬาสู่ความเป็นเลิศ รุ่นที่ 1
สถาบันพระปกเกล้า (10 วัน)

September, 2015

Research & Innovation Executive Programme (หลักสูตรผู้บริหารชุดโครงการวิจัยและนวัตกรรม รุ่นที่ 3),
organized by Knowledge Network Institute of Thailand (KNIT), Bangkok, Thailand (5 days)

July, 2015

Faculty Governance Programme, FGP (หลักสูตรธรรมาภิบาลเพื่อการพัฒนาผู้บริหาร), organized by
Knowledge Network Institute of Thailand (KNIT), Bangkok, Thailand (2 days)

March, 2013

Integrated Design Engineering: I-Designer, organized by National Science Technology and Innovation Policy
Office, Phuket, Thailand (5 days)

March, 2013

Researcher Entrepreneur: ResEur, organized by National Science Technology and Innovation Policy Office,
Phuket, Thailand (5 days)

May, 2007

Cantilever-based Sensors for Nanoscience, Barcelona, Spain (1 day).

September, 2006

Introduction to Scanning Electron Microscope Observation, SAMLAB, Institute of Microtechnology,
University of Neuchatel, Switzerland (1 day).

September, 2006

Introduction to Atomic Force Microscope, SAMLAB, Institute of Microtechnology, University of Neuchatel,
Switzerland (1 day).

September, 2006

Introduction to Microfabrication, SAMLAB, Institute of Microtechnology, University of Neuchatel, Switzerland
(5 days).

August, 2006

Biological binding and bioanalytical applications, School of Life Science, Muttenz, Switzerland (1 day).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Academic Experience

- 2013-present **Assistant Professor:** Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- 2012-present **Researcher:** Multimedia Intelligent Technology (BU-MIT), Bangkok University.
- 2011-2013 **Lecturer:** Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- 2010-2011 **Postdoctoral research fellow:** The Sensors, Actuators and Microsystems Laboratory (SAMLAB), Institute of Microengineering, EPFL, Switzerland.
- 2006-2010 **Research assistant:** The Sensors, Actuators and Microsystems Laboratory (SAMLAB), Institute of Microengineering, EPFL, Switzerland.
- 2003-2006 **Lecturer:** Department of Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- 2003-2006 **Researcher:** Control and Mechatronics Laboratory, Research Center for Communications and Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- 2002-2003 **Research Assistant:** Control and Mechatronics Laboratory, Research Center for Communications and Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

Executive Experience

- 2016-2017 **Secretary General:** Thailand Karate Federation
- 2017 **Committee member:** Innovation hubs under Council of University Presidents of Thailand
- 2015-2017 **Vice President for Innovation:** King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
- 2012-present **Member of curriculum committee:** B.Eng in Control Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
- 2016 **(Acting) Director:** KMITL Research and Innovation Services
- 2016 **(Acting) Vice Director:** KMITL Research and Innovation Services

Membership in Scientific committees

- 2015 Organizing committee: The 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Pattaya, October 25-28, 2015
- 2015 Judge panel: KTD-U Project (กระทิงแดง U-Project ปีที่ 2), February 13, 2015
- 2014 General Co-chair: Regional Conference on Computer and Information Engineering 2014
- 2014 Judge panel: The Autonomous Aerial Vehicle Challenge and ASEAN Military Academy Symposium 2014, September 17-19, 2014

2014 Committee of experts: The 3rd Thailand National Research Universities Summit, 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2014	Organizing committee: International Conference on Engineering and Technology 2014 (ICET 2014)
2014	Technical subcommittee: Thai Green Label Scheme in Watches, Thailand Environment Institute Foundation
2013	Judge panel: True Innovation Awards 2012
2013	Organizing committee: 2013 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST 2013)
2013	Organizing committee: 2013 Regional Conference on Computer and Information Technology (RCCIE 2013)
2012	Invited committee: True Innovation Awards 2012
2012	Organizing committee: 2012 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST 2012)
2012	Organizing committee: 2012 International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS 2012)
2006-present	Member of the International Micro-Mechanisms Contest organized by the Japan Society for Precision Engineering, Japan
2006-present	Member of the International Micro Robot Maze Contest organized by Nagoya University and the city of Nagoya, Japan

Professional Consulting Experience

2017	Small and Medium Enterprise Development Bank of Thailand (SME Development Bank) Establishing and organizing the Innovation Center.
2015	PTT Research and Technology Institute Providing assistance in the development of ultrasonic devices.
2013	CTAsia Robotics Co.,Ltd: Developing a humanoid robot as a service robot.
2012	Dechapanich Fishing Net Factory Ltd., Part (DFN): Developing advanced machines for fishing net production.
2005	Zenimed (Thailand) Co.,Ltd: Providing technical assistance in the production of vacuum blood collection tubes.
2003	Global English School, Nonthaburi, Thailand: Providing academic assistance in the development of robotics courses for elementary classes.

Research Projects

- Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang, Subhawatt Jayasvasti, and Pattanaphong Janphuang, “Cycling Power Meter,” *Innovation Technology Assistance Program (ITAP)*, 2017
- Don Isarakorn, Noppadol Maneerat, and Supakorn Suwan, “Feasibility study of engineering aspects of design development and production of metered taxis for people with disability Phase II,” National Office for Empowerment of Persons with Disabilities (NEP), Ministry of Social Development and Human Security, 2017.
- Don Isarakorn, Supakorn Suwan, and Noppadol Maneerat, “Design and development of a prototype handicapped trike for improving the life quality of handicaps Phase II,” National Office for Empowerment of Persons with Disabilities (NEP), Ministry of Social Development and Human Security, 2017.
- Don Isarakorn and Subhawatt Jayasvasti, “Low Cost Piezoelectric Biosensor System,” HERP Research Grant, Office of the Higher Education Commission, 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Don Isarakorn, Noppadol Maneerat, and Supakorn Suwan, “Feasibility study of engineering aspects of design development and production of metered taxis for people with disability Phase I,” National Office for Empowerment of Persons with Disabilities (NEP), Ministry of Social Development and Human Security, 2016.
- Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang, Thapanun Sudhawiyangkul, and Subhawatt Jayasvasti, “วิจัยและพัฒนาเครื่องทดสอบต้นแบบ Ultrasonic Technology สำหรับ Biofouling Mitigation,” Geo-science and Petroleum Engineering Research Department, PTT Research and Technology Institute, 2015.
- Don Isarakorn and Voraphong Sutthisaksri, “A micro gripper actuated by piezoelectric transduction for hard disk drive,” TRF-STX Co-funded Master degree Scholarship, Research and Researcher for Industry (RRI), The Thailand Research Fund (TRF), 2015-2016.
- Don Isarakorn and Parinya Wattananukulchai, “Design analysis and performance evaluation of piezoelectric PMN-PT based dual-stage actuator for hard disk drives,” TRF-STX Co-funded PhD Scholarship, Research and Researcher for Industry (RRI), The Thailand Research Fund (TRF), 2015-2017.
- Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang and Thapanun Sudhawiyangkul, “Machine Condition Monitoring System for Preventive Maintenance,” Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2014.
- Songmoung Nundrakwang, Don Isarakorn, Thapanun Sudhawiyangkul, and Subhawatt Jayasvasti, “Impedance analyzer for laboratory,” Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2014.
- Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang, and Thapanun Sudhawiyangkul, “Wireless Sensor Networks Powered by Energy Harvesting from Machine,” Thailand Research Organizations Network, National Research Council of Thailand, 2014.
- Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang, and Ratchanee Gullayanon, “Design and development of a prototype handicapped trike for improving the life quality of handicaps,” National Office for Empowerment of Persons with Disabilities (NEP), Ministry of Social Development and Human Security, 2013.
- Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang, Ratchanee Gullayanon and Thapanun Sudhawiyangkul, “E²-Cart: Eco & Energy Cart,” Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2013.
- Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang, and Ratchanee Gullayanon, “Heat Exchanging Device using Thermoelectric Effect,” Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2013.
- Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang, Ratchanee Gullayanon and Thapanun Sudhawiyangkul, “Fundus Image Database System and Primary Diabetic Retinopathy Screening Software,” A New Researcher Scholarship of CSTC, MOST, 2012.
- Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang, Noppadol Maneerat and Kasemsuk Sepsirisuk, “Design and Development of an Electric Stand-up Wheelchair,” Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2012.
- Don Isarakorn and Songmoung Nundrakwang, “Self-powered System for Machine Condition Monitoring Applications,” Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2012.
- Songmoung Nundrakwang and Don Isarakorn, “Design and development of Wind Energy Harvesting Kits for Kids,” Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2012.
- Songmoung Nundrakwang and Don Isarakorn, “Design and Development of Low-cost Robot Kits for Elementary Students,” Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2012.
- “Si- μ Scalpel – Micromachined Ultrasonic Scalpel for CMF and Plastic Surgery,” The Commission for Technology and Innovation CTI, Switzerland, 2010-2011.
- “Electronic materials for energy systems and other applications,” NCCR-MaNEP of the Swiss National Science Foundation, Switzerland, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- “MEMS fabrication based on epitaxial piezoelectric thin films on silicon,” NCCR-MaNEP of the Swiss National Science Foundation, Switzerland, 2006-2010.
- Hisayuki Aoyama, Taworn Benjanarasuth, Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang, Jongkol Ngamwiwit, Pitikhate Sooraksa, Boonchana Purahong, “Cross-over IT Mechatronics Contest Between KMITL and UEC,” GP-UEC Project, Japan, 2005-2007.
- Don Isarakorn, Jongkol Ngamwiwit and Taworn Benjanarasuth, “Design of Micro Manipulator by Using Stick-Slip Motors,” Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2005.
- Don Isarakorn, Jongkol Ngamwiwit and Taworn Benjanarasuth, “Design of Micro Robot for Micro/Nano Applications,” Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2005.
- Don Isarakorn, Jongkol Ngamwiwit and Taworn Benjanarasuth, “Development of Control System for Multiple Autonomous Robots,” Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2004.
- Don Isarakorn, Jongkol Ngamwiwit, Taworn Benjanarasuth, Mongkol Mongkolwongrojn, Wasin Sarawit, “Electrochemical-Metallizing Power Supply,” Research Center for Communications and Information Technology, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2004.
- Don Isarakorn, Jongkol Ngamwiwit and Taworn Benjanarasuth, “Speed and Position Control of Ultrasonic Motor using PDFF Controller Designed by Coefficient Diagram Method,” Research Center for Communications and Information Technology, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2003.
- Don Isarakorn, Jongkol Ngamwiwit and Taworn Benjanarasuth, “Application of Shape-Memory Alloy (SMA) to Miniature Manipulator,” Research Center for Communications and Information Technology, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2003.

Awards and Honors

- | | |
|-----------|---|
| 2017 | Gold Award, Thailand Research Expo 2017, National Research Council of Thailand |
| 2016 | Science and Technology Research Grant, Thailand Toray Science Foundation |
| 2015 | Silver medal, 2015 Taipei International Invention Show & Technomart |
| 2015 | รางวัลอันดับ 3 การประกวดผลงานนวัตกรรมสายอุดมศึกษา สาขาวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2558 สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ |
| 2015 | Outstanding award (Rank #1) Sci & Tech Initiative and Sustainability Awards (STISA 8 th) from the Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry. |
| 2013 | Outstanding award (Rank #1) Sci & Tech Initiative and Sustainability Awards (STISA 6 th) from the Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry. |
| 2011 | Good Ph.D. thesis award from Office of National Research Council of Thailand. |
| 2011 | Outstanding Ph.D. thesis award in the field of Microtechnology “Prix de La Ville de La Chaux-de-Fonds 2011” from La Ville de la Chaux-de-Fonds and Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland. |
| 2006-2010 | Ph.D. Fellowship, Thai Government Science and Technology Scholarship. |
| 2006 | Outstanding KMITL Alumni Award, KMITL, Thailand. |
| 2006 | Micromechanism Contest 2006, Tokyo University of Science, Chiba, Japan |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการประชาสัมพันธ์โครงการวิจัย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Sumo Micro Robot Competition (wireless); Best Technical Prize
 - Dice Operating Micro Mechanism Competition (wire); First Prize
 - Dice Operating Micro Mechanism Competition (wireless); Best Technical Prize
 - Obstacle Running Micro Mechanism Competition; Best Technical Prize
- 2005 **International Micro Robot Maze Contest 2005 (Robo Festa)**, Nagoya, Japan
- Micro Robot Racer, Second Prize
 - Teleoperated Mountain Climbing Micro Robot Competition; Second Prize
 - Wireless Autonomous Micro Robot Competition; First Prize
 - Wireless Autonomous Micro Robot Competition; Third Prize
- 2005 **Micromechanism Contest 2005**, Keio University, Japan
- Dice Operating Micro Mechanism Competition; Second Prize
 - Dice Operating Micro Mechanism Competition; Successful Prize
 - Obstacle Running Micro Mechanism Competition; Best Technical Prize
 - Obstacle Running Micro Mechanism Competition; Successful Prize
 - Stick-Slip Micromotor; Best Technical Prize
- 2004 **International Micro Robot Maze Contest 2004**, Nagoya, Japan
- Micro Robot Racer; Third Prize and Unique Prize
 - Teleoperated Mountain Climbing Micro Robot Competition; Best Idea Prize
 - Best Documentation Award
- 2004 **Micromechanism Contest 2004**, University of Tokyo, Japan
- Low-cost micro robot; Successful Prize
- 2003 **The Thailand Traveling Award**, Government of Thailand.
- 2003 **International Micro Robot Maze Contest 2003**, Nagoya, Japan
- Teleoperated Mountain Climbing Micro Robot Competition; Best Design Prize
 - Wireless Autonomous Micro Robot Competition; Fighting Spirit Prize
- 2002 **International Micro Robot Maze Contest 2002**, Nagoya, Japan
- Wireless Autonomous Micro Robot Competition; Second Prize
- 2001-2003 **Royal Thai Government Scholarship** for M.Eng programme at KMITL
- 2001 **International Micro Robot Joint Contest (Robo Festa)**, Kanagawa, Japan
- Dice Operating Micro Mechanism Competition; Second Prize
 - Wireless Autonomous Micro Robot Competition; Third Prize
- 2000 **Micromechanism Contest 2000**, Tokyo Denki University, Japan
- Sumo Micro Robot Competition; Best Technical Prize
- 1999 **Robot Idea Contest (Micro Robot)**, University of Electro-Communications, Japan
- Sumo Micro Robot Competition; First Prize
- 1999-2000 **Association of International Exchange (AIEJ) Scholarship**, Japan.

Patent

Granted

“Piezoelectric energy harvesting device using impulsive force”, Thai patent: Patent no. 63379
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

“Energy Scavenging from a Rotating Gear using an Impact Type Piezoelectric MEMS Scavenger”, International Patent: P2203PC00/ European Patent: N^oEP 11168703.4

“อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้วิธีการสั่นแบบต่อเนื่อง”, Thai patent: Petty patent no. 14609

“Piezoelectric energy harvesting floor”, Thai patent: Patent no. 67392

Pending

“ตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก”, Thai patent: Petty patent pending no. 1803000774

“อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกแบบสั่นต่อเนื่อง”, Thai patent: Petty patent pending no. 1703001840

“ทางลาดชันขึ้นลงสำหรับรถจักรยานยนต์คนพิการ”, Thai patent: Petty patent pending no. 1703002278

“Piezoelectric energy generating device from impact force”, Thai patent: Patent pending no. 1201006020

Book

D. Isarakorn, Position control of Ultrasonic Linear Motor by Coefficient Diagram Method, LAP Lambert Academic Publishing, ISBN: 978-3-8465-9470-4, 2011.

Book Chapter

D. Isarakorn, D. Briand, and N. F. de Rooij, Harvesting waste energy, McGraw-Hill Yearbook of Science & Technology 2012, December 16, 2011, ISBN-13: 978-0071774031.

Peer-reviewed Journals

- Parinya Wattananukulchai and Don Isarakorn, “Performance Evaluation using Laser Doppler Vibrometer Sensing Technique on Advanced Lead Magnesium Niobate-Lead Titanate Piezoelectric-Material-Based Microactuator for Hard Drive Head,” *Sensors and Materials*, Vol. 30, No. 10, Pages 2183-2197.
- Phosy Panthongsy, Don Isarakorn, Pattanaphong Janphuang, Kazuhiko Hamamoto, “Fabrication and evaluation of energy harvesting floor using piezoelectric frequency up-converting mechanism,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 279, 15 August 2018, Pages 321-330.
- Thapanun Sudhawiyangkul and Don Isarakorn, “Design and realization of an energy autonomous wireless sensor system for ball screw fault diagnosis,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 258, 1 May 2017, Pages 49–58.
- P. Janphuang, R.A. Lockhart, D. Isarakorn, S. Henein, D. Briand, N.F. de Rooij, “Harvesting Energy From a Rotating Gear Using an AFM-Like MEMS Piezoelectric Frequency Up-Converting Energy Harvester,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 24, No. 3, pp. 742-754, 2015.
- Don Isarakorn, Thapanun Sudhawiyangkul, and Songmoung Nundrakwang, “Energy analysis in Zigbee based wireless sensor node powered by piezoelectric energy harvester,” *Advanced Materials Research*, Vol. 931-932 (2014), pp. 1328-1332, 2014.
- Payon Krainuyachan, Worawat Choensawat, and Don Isarakorn, “Investigating the Effectiveness of BU WebEx System,” *KMITL Science and Technology Journal*, Vol. 12, No. 2, 2013.
- A. Sambri, D. Isarakorn, A. Torres-Pardo, S. Gariglio, P. Janphuang, D. Briand, O. Stephan, J. W. Reiner, J. -M. Triscone, N. F. de Rooij, and C. H. Ahn, Epitaxial piezoelectric thin films on silicon for energy harvesting devices, *Smart Materials Research*, Vol. 2012, 426048, 2012.
- D. Isarakorn, A. Sambri, P. Janphuang, D. Briand, S. Gariglio, J. -M. Triscone, F. Guy, J. W. Reiner, C. H. Ahn, and N. F. de Rooij, Epitaxial piezoelectric MEMS on silicon, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 20, 055008, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- D. Isarakorn, M. Linder, D. Briand, and N. F. de Rooij, **Evaluation of static measurement in piezoelectric cantilever sensors using a charge integration technique for chemical and biological detection**, *Measurement Science and Technology*, Vol. 21, 075801, 2010.
- D. Isarakorn, D. Briand, A. Sambri, S. Gariglio, J. -M. Triscone, F. Guy, J. W. Reiner, C. H. Ahn, and N. F. de Rooij, **Finite element analysis and experiments on a silicon membrane actuated by an epitaxial PZT thin film for localized-mass sensing applications**, *Sensors and Actuators, B: Chemical*, Vol. 153, pp. 54-63, 2011.
- D. Isarakorn, D. Briand, P. Janphuang, A. Sambri, S. Gariglio, J. -M. Triscone, F. Guy, J. W. Reiner, C. H. Ahn, and N. F. de Rooij, **The realization and performance of vibration energy harvesting MEMS devices based on an epitaxial piezoelectric thin film**, *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, 025015, 2011.

Conference proceedings

- S. Sriyuttakrai, D. Isarakorn, S. Boonprasert, S. Nundrakwang, **“Practical Test of Contactless Rotational Piezoelectric Generator for Low Speed Application,”** *The IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia 2019*, Bangkok, Thailand 2019.
- V. Sutthisaksri and D. Isarakorn, **“Development of a Piezoelectric Micro Gripper for Hard Disk Head Testing Process,”** *The 57th Kasetsart University Annual Conference*, Bangkok, Thailand 2019.
- Phosy Panthongsy, Don Isarakorn, and Kazuhiko Hamamoto, **“A Test Bench for Characterization of Piezoelectric Frequency Up-Converting Energy Harvesters,”** *The International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2018)*, Chiang Rai, Thailand, 2018.
- Parinya Wattananukulchai and Don Isarakorn, **“Reliability of PMN-PT Piezoelectric Material as an Actuator for High Density Hard Disk Drive,”** *The International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2018)*, Chiang Rai, Thailand, 2018.
- Subhawatt Jayasvasti and Don Isarakorn, **“Study of Interaction Between Operational Clock-Frequency and Energy Consumption of Microcontrollers for Wireless Sensor Applications,”** *International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology*, Phuket, pp. 646-649, 2018.
- Pattanaphong Janphuang, Mongkhon Laebua, Chanwut Sriphung, Phatsakon Taweewat, Anan Sirichalarmkul, Kasiphisan Sukjantha, Napatporn Promsawat, Pimchanok Leuasongnoen, Somphong Suphachiaraphan, Kantapon Phimol, Don Isarakorn, and Somchai Tancharakorn, **“Polymer based microneedle patch fabricated using microinjection moulding,”** *International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology*, Phuket, pp. 650-653, 2018.
- Subhawatt Jayasvasti, Don Isarakorn and Songmoung Nundrakwang, **“Comparative study of QCM analyzers based on piezoelectric oscillator and electromechanical impedance techniques,”** *9th Biomedical Engineering International Conference (BMEICON)*, Laung Prabang, Laos, 2016.
- Parinya Wattananukulchai and Don Isarakorn, **“A comparative study based on classical and newer piezoelectric materials based unimorph actuators for Hard Disk Drive,”** *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Marina Bay Sands, Singapore, 2016.
- P. Panthongsy and D. Isarakorn, **“Comparative study of piezoelectric energy harvesters based on polycrystalline PZT and single-crystalline PMN-PT materials,”** *The 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2016)*, Chiang Mai, Thailand, 2016.
- T. Sudhawiyangkul and D. Isarakorn, **“Design and Optimization of a Small-Scale Linear Electromagnetic Energy Harvester”,** *The 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2015)*, Hau Hin, Thailand, 2015.

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- P. Panthongsy, T. Sudhawiyangkul and D. Isarakorn, "Piezoelectric Energy Harvesting from Machine Vibrations for Wireless Sensor System", *The 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2015)*, Hau Hin, Thailand, 2015.
- Theerawat Chongcharoen, Noppadol Maneerat, Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang, and Kasemsuk Sepsirisuk, "Safety system in five wheels electric wheelchair with ultrasonic," *2014 International Conference on Green and Human Information Technology (ICGHIT 2014)*, Ho Chi Minh City, Vietnam, pp.48-51, 2014.
- S.Sreng, J.-i. Takada, N.Maneerat, D.Isarakorn, R.Varakulsiripunth, B.Pasaya, and R.Panjaphongse, "Feature extraction from retinal fundus image for early detection of diabetic retinopathy," *Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*, 2013 IEEE Region 10, Sendai, Japan, pp. 63-66, 2013.
- S.Sreng, N.Maneerat, D.Isarakorn, B.Pasaya, J.-i. Takada, R.Panjaphongse, and R.Varakulsiripunth, "Automatic exudate extraction for early detection of Diabetic Retinopathy," *2013 International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, Yogyakarta, Indonesia, pp. 31-35, 2013.
- P.Yunuch, N.Maneerat, D.Isarakorn, B.Pasaya, R.Panjaphongse, and R.Varakulsiripunth, "Automatic microaneurysms detection through retinal color image analysis," *2013 International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, Yogyakarta, Indonesia, pp. 36-40, 2013.
- Jirawat Chomputawat, Worawat Choensawat, Don Isarakorn, "An Approach for Generating Labanotation from Motion Capture Data," *International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology*, Bangkok, Thailand, pp. 291-295, 2013.
- ดอน อิศรากร, สองเมือง นันทขว้าง, อังชล สีสทิพัฒน์, ภาณุพงศ์ โลจรัส, วัชรินทร์ กิจวีโรภักษ์ และหฤษฎ์ เอี่ยมประภากุล, "อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดย่อส่วนจากการเคลื่อนที่ของมนุษย์," *การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9*, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 94-99, 2556
- ดอน อิศรากร, สองเมือง นันทขว้าง, ณัฐพล พรณัฐพิบูล, วิรุฒ แซ่มะน้อย และสิรินาถ มวารรณ, "การเก็บเกี่ยวพลังงานจากข้อต่อหัวเข่าโดยใช้สเตปเปอร์มอเตอร์," *การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9*, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 154-159, 2556
- ดอน อิศรากร, สองเมือง นันทขว้าง, ธนากร หมูทอง, ธนาพร สิริโสภานพรมรย, พรสุดา พัสตร และวิรุฒม์ ยืนยง, "การเก็บเกี่ยวพลังงานจากรถเข็นซีอปั้ง," *การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9*, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 160-165, 2556
- ดอน อิศรากร, สองเมือง นันทขว้าง, สุภาพันท์ สุธาวิยางกูร, บุลพร สุกใส และเฉลิมชัย จงสินทวี, "การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการกระแทกโดยใช้เพียโซบักเซอร์เพื่อติดตามสภาพเครื่องจักร," *การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9*, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 205-210, 2556
- ดอน อิศรากร, สองเมือง นันทขว้าง, โกมล บัญญัติเลิศถาวร, กฤษฏา ประทานกิต และวิมา จงเจริญกมล, "พื้นกำเนิดพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก," *การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9*, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 988-993, 2556
- ดอน อิศรากร, สองเมือง นันทขว้าง, ธนพล บุญโชติ, บุลกร สีเหลืองเย็น และพงษ์ศร นุ่มทอง, "การออกแบบใบหญ้าเพียโซอิเล็กทริกเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานจากลม," *การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9*, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 1000-1005, 2556
- ดอน อิศรากร, สองเมือง นันทขว้าง, ณวันยุท สนั่นจิตร, ณัฐพงศ์ เหมืองหม้อ และธงชัย ทองคำ, "การศึกษาระดับการสั่นของสะพานเพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับเซนเซอร์," *การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9*, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 89-93, 2556
- D. Isarakorn, S. Nundrakwang, K. Banyatlettawon, K. Prapanukit, and W. Jongcharoenkamol, "An Investigation of Impact Energy Harvesting with Piezo Buzzers as a Low-cost Power Generator," *International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology*, Bangkok, Thailand, pp. 297-300, 2012.
- D. Isarakorn, S. Nundrakwang, T. Sudhawiyangkul, B. Suksai, and C. Jongsintawee, "Energy Harvesting Using an Impact Type Piezoelectric Energy Harvester," *International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology*, Bangkok, Thailand, pp. 344-347, 2012.
- F. Friedrich, R. Lockhart, D. Briand, D. Isarakorn and P. Margairaz et al. "Silicon micromachined ultrasonic transducer with improved power transfer for cutting applications," *IEEE International Ultrasonics Symposium IUS*, Dresden, Germany, pp. 1169-1172, 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- D. Briand, P. Janphuang, R. A. Lockhart, D. Isarakorn and N. de Rooij, "Recent advances in MEMS based vibrations energy harvesting towards autonomous systems," *IEEE International Ultrasonics Symposium V*, IUS 2012, Dresden, Germany, 2012.
- P. Janphuang, D. Briand, D. Isarakorn and N. de Rooij, "Impact type piezoelectric MEMS harvester coupled with a gear for an autonomous power source," *2ème Journées Nationales sur la Récupération et le Stockage d'Énergie pour l'Alimentation des Microsystèmes Autonomes*, Grenoble, France, 2012.
- D. Isarakorn, DC motor control using CDM based two-degree-of-freedom controller for desired tracking and disturbance rejection characteristics, *12th International Conference on Control, Automation and Systems*, Jeju Island, Korea, pp. 1167-1172, 2012.
- D. Isarakorn, Piezoelectric properties of an Epitaxial $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3$ thin film for energy harvesting MEMS devices, *Siam Physics Congress SPC2012*, Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand, pp. 135-138, 2012.
- A. Sambri, S. Gariglio, D. Isarakorn, D. Briand, A. Torres Pardo, J. W. Reiner, C. H. Ahn, and J. -M. Triscone, Epitaxial ferroelectric thin films on silicon for energy harvesting MEMS, *4th International Workshop on Smart Materials & Structures 2011*.
- J. Singh, C. Robert, A. Boegli, P. Janphuang, D. Isarakorn, D. Briand, N. F. de Rooij, and P. A. Farine, A sub-threshold passive step-up rectifier for vibration energy scavengers, *Proc. of the PowerMEMS 2011 Conference*, Seoul, pp. 38-41, 2011.
- J. J. Ruan, A. V. Quintero, P. Janphuang, D. Isarakorn, D. Briand, and N. F. de Rooij, PZT thick sheet on flexible plastic substrate for vibration energy harvesting, *Proc. of the PowerMEMS 2011 Conference*, Seoul, pp. 151-154, 2011.
- P. Janphuang, A. V. Quintero, D. Isarakorn, J. J. Ruan, D. Briand, and N. F. de Rooij, Assembling of thick PZT sheet on silicon for energy harvesting applications, *Proc. of the PowerMEMS 2011 Conference*, Seoul, pp. 241-244, 2011.
- P. Janphuang, D. Isarakorn, D. Briand, and N. F. de Rooij, Energy harvesting from a rotating gear using an impact type piezoelectric MEMS scavenger, *Proc. of The 16th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers' 11)*, Beijing, China, pp. 735-738, 2011.
- D. Isarakorn, D. Briand, P. Janphuang, A. Sambri, S. Gariglio, J. -M. Triscone, F. Guy, J. W. Reiner, C. H. Ahn, and N. F. de Rooij, Energy harvesting MEMS device based on an epitaxial PZT thin film: fabrication and characterization, *Proc. of the PowerMEMS 2010 Conference*, pp. 203-206 Leuven, 2010.
- D. Isarakorn, D. Briand, S. Gariglio, A. Sambri, N. Stucki, J. -M. Triscone, F. Guy, J. W. Reiner, C. H. Ahn, and N. F. de Rooij, A study on epitaxial piezoelectric thin films grown on silicon for energy scavenging applications, *Proc. of the PowerMEMS 2008 Conference*, Vol.1, pp. 269-272, Sendai, 2008.
- D. Isarakorn, M. Linder, D. Briand, and N. F. de Rooij, Detection of surface stress induced deflections in piezoelectric cantilever sensors using a charge integrator, *Proc. of International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 937-940, Seoul, 2008.
- D. Isarakorn, D. Briand, S. Gariglio, A. Sambri, N. Stucki, J. -M. Triscone, F. Guy, S. -H. Baek, C. -B. Eom, J. W. Reiner, C. H. Ahn, and N. F. de Rooij, Establishment of a technology platforms for epitaxial piezoelectric MEMS, *Proc. of the Eurosensors XXII Conference*, Vol.1, pp. 819-822, Dresden, 2008.
- S. Gariglio, N. Stucki, J. -M. Triscone, D. Isarakorn, D. Briand, N. F. de Rooij, S. -H. Baek, C. -B. Eom, J. W. Reiner, and C. H. Ahn, MEMS fabrication based on epitaxial piezoelectric thin films on silicon, Presented at *The 3rd International Conference on Smart Materials, Structures and Systems*, Sicily, 2008.
- S. Gariglio, N. Stucki, J. -M. Triscone, D. Isarakorn, D. Briand, N. F. de Rooij, S. -H. Baek, C. -B. Eom, J. W. Reiner, and C. H. Ahn, MEMS fabrication based on epitaxial piezoelectric thin films on silicon, Presented at *Workshop on Oxide Electronics 15*, Colorado, 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- A. Sambri, S. Gariglio, J. -M. Triscone, D. Isarakorn, D. Briand, and N. F. de Rooij, **Epitaxial thin films on silicon for MEMS devices**, Presented at *The 1st National Congress on Functional Oxides for Electronics*, Sorrento, 2009.
- S. Nundrakwang, A. I. Chayadi, D. Isarakorn, T. Benjanarasuth, J. Ngamwiwit and N. Komine. “Swinging-up the Rotational Inverted Pendulum with Limited Sector of Arm Angle via Energy Control.” *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2005, Korea.
- A. I. Chayadi, D. Isarakorn, T. Benjanarasuth, J. Ngamwiwit and N. Komine. “Application of Coefficient Diagram Method for Rotational Inverted Pendulum Control.” *8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, 2004, China, pp. 1769-1773.
- S. Wanchana, T. Benjanarasuth, D. Isarakorn, J. Ngamwiwit and N. Komine. “Phase-Locked Loop Process Control System using LQR Approach.” *8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, 2004, China, pp. 1615-1619.
- N. Khuakoonrat, T. Benjanarasuth, D. Isarakorn, J. Ngamwiwit, and N. Komine. “I-PDA Controller Designed by CDM Incorporating FFC for Two-Inertia System.” *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2004, Thailand, pp. 1833-1837.
- Adha I. Chayadi, T. Benjanarasuth, D. Isarakorn, J. Ngamwiwit and N. Komine. “CDM Controller Incorporating Friction Compensation for Rotational Inverted Pendulum.” *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2004, Thailand, pp. 1901-1905.
- S.Khumma, T.Benjanarasuth, D.Isarakorn, J.Ngamwiwit, S.Wanchana, and N.Komine. “Application of LQR for Phase-Locked Loop Control System.” *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2004, Thailand, pp. 520-523.
- D.Isarakorn, C.Suksrimuang, T.Benjanarasuth, J.Ngamwiwit, and N.Komine. “Design of a Low-Cost Micro Robotic System for Developing and Validation Control Algorithms.” *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2004, Thailand, pp. 1945-1948.
- D.Isarakorn, N.Suksariwattanaagul, T.Benjanarasuth, J.Ngamwiwit, and N.Komine. “Two-Degree-of-Freedom Controller Designed by Coefficient Diagram Method.” *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2004, Thailand, pp. 262-267.
- Adha I. Cahyadi, D.Isarakorn, T.Benjanarasuth, J.Ngamwiwit, and N.Komine. “CDM Controller for Rotational Inverted Pendulum.” *The 4th Information and Computer Engineering Postgraduate Workshop*, 2004, Thailand, pp. 105-109.
- S.Nundrakwang, D.Isarakorn, T.Benjanarasuth, J.Ngamwiwit, and N.Komine. “PDF Controller Design by CDM for Position Control of Traveling-Wave Ultrasonic Motor.” *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2003, Korea, pp. 1847-1852.
- D.Isarakorn, T.Benjanarasuth, S.Panaudomsup, J.Ngamwiwit, and N.Komine. “Position Control of Ultrasonic Linear Motor Using I-PD Controller Designed by CDM Incorporating with Input Shaper.” *The Third International Symposium on Communications and Informations Technologies*, 2003, Thailand, pp. 400-404.
- D.Isarakorn, S.Panaudomsup, T.Benjanarasuth, J.Ngamwiwit, and N.Komine. “Speed Control of Ultrasonic Motor using PDF Controller Designed by CDM.” *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2002, Korea, pp. 1378-1383.
- D.Isarakorn, S.Panaudomsup, T.Benjanarasuth, J.Ngamwiwit, and N.Komine. “Position Control of Ultrasonic Linear Motor using PDF Controller Designed by CDM.” *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2002, Korea, pp. 1378-1383.
- D.Isarakorn, S.Panaudomsup, T.Benjanarasuth, J.Ngamwiwit, and N.Komine. “Application of CDM to PDF Controller for Motion Control System.” *The 4th Asian Control Conference*, 2002, Singapore, pp. 1173-1177.

Other Publications

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- D.Isarakorn, J.Ngamwiwit and T.Benjanarasuth, “Design of Micro Robot for Micro/Nano Applications.” *KMITL Technical Report*, 2005.
- D.Isarakorn, J.Ngamwiwit and T.Benjanarasuth, “Design of Micro Manipulator by Using Stick-Slip Motors.” *KMITL Technical Report*, 2005.
- D.Isarakorn, J.Ngamwiwit and T.Benjanarasuth, “Development of Control System for Multiple Autonomous Robots.” *KMITL Technical Report*, 2004.
- D.Isarakorn, J.Ngamwiwit, T.Benjanarasuth, M.Mongkolwongrojn, W.Sarawit, “Electrochemical-Metallizing Power Supply.” *ReCCIT Technical Report*, 2004.
- D.Isarakorn, C.Suksrimuang, T.Benjanarasuth, J.Ngamwiwit, and N.Komine. “Design of a Low-Cost Micro Robotic System for Developing and Validation Control Algorithms.” *ReCCIT Technical Report*, 2004.
- D.Isarakorn. “Micro Robot.” *Future Electronic and Technology*, 2002, no 13, pp. 31-34.
- D.Isarakorn. “V-Bot.” *Future Electronic and Technology*, 2002, no 13, pp. 38-41.
- D.Isarakorn. “Application of Shape-Memory Alloy (SMA) to Miniature Manipulator.” *Kaesdaumpan Magazine*, 2002, no 3, pp. 11.
- D.Isarakorn. “Introduction of International Micro Robot Joint Contest.” *Technical Report of ACCU International Exchange Program*, 2001.

Peer Reviewer

IEEE Transactions of Industrial Electronics
 Sensors and Materials
 International Journal of Integrated Engineering
 Open Electrical & Electronic Engineering Journal
 Journal of Micromechanics and Microengineering
 Measurement Science and Technology
 Journal of Microelectromechanical Systems
 Optics Express
 Sensors and Actuators, A: Physical
 Smart Materials and Structures
 Electron Device Letters
 Journal of Physics D: Applied Physics
 Ladkrabang Engineering Journal

Invited Lectures

- **Micro Robot:** Regional Robot Contest 2005, National University of Laos, Vientiane, Laos PDR, November, 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **Microbotics:** Research Seminar Series by the Research Center for Communications and Information Technology (ReCCIT), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, September, 2005.
- **Introduction to Presentations:** Seminar M1 for Master of Engineering Program in Control Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, July, 2003.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Curriculum Vitae

Assoc. Prof. Dr. Soodkhet Pojprapai



School of Ceramic Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology

Nakorn Ratchasima 30000

Tel: 6644-224-542

Fax: 66044-224612

E-mail: soodkhet@sut.ac.th, soodkhet@g.sut.ac.th

Position:

07/2018-present: Executive Board Chairman of Suratec co., Ltd.

09/2015-present: head of Data Storage Science and Technology Research Unit, Suranaree University of Technology, Thailand

09/2014-09/2015: head of Smart Innovative Energy Research Unit, Suranaree University of Technology, Thailand

08/2012-present: Assistant professor, School of Ceramic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

2010-2014: Adjunct lecturer, School of Material Science and Engineering, The University of New South Wales, Australia

2009-08/2012: Lecturer, School of Ceramic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Education Background:

2009: Ph.D. Materials Science and Engineering University of New South Wales,
Australia (Thai Government Scholarship)

2002: M. Eng. Nuclear Technology Chulalongkorn University, Thailand

1997: B. Eng. Industrial Engineering Chulalongkorn University, Thailand

Working Experience:

08/2017-present: Associate Professor, School of Ceramic Engineering, Institute of
Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

08/2012-082017: Assistant Professor, School of Ceramic Engineering, Institute of
Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

5/2011-2014: Adjunct Lecturer, School of Ceramic Engineering, The University of
New South Wales, Australia

9/2008-3/2009: Post doctoral researcher, School of Materials Science and Engineering,
The University of New South Wales, Sydney, Australia.

2003-2004: Researcher, Nuclear Technology department, Faculty of Engineer,
Chulalongkorn University, Thailand

1997-1999: Production Engineer, TBKK Ltd., Thailand

Teaching experience

1. Advanced Electrical Engineering Materials
2. Electrical Engineering Materials
3. Introduction to Ferroelectric materials and devices
4. X-ray diffraction
5. Quality Control
6. Engineering Economy
7. Production Planning and Control

Industrial consulting experience

1. Introduction to magnetic materials and dual-stage hard disk drive actuator at (TDK) (Thailand)
2. PZT micro actuator course at WD (Thailand)
3. PZT micro actuator course at Seagate Technology (Thailand)
4. PZT micro actuator course at MPT (TDK) (Thailand)

Research Interests

1. Characterization of mechanical and electrical properties of electroceramic
2. Characterization of piezoelectric, multiferroic and ferromagnetic materials
3. Piezoelectric Energy harvesting
4. Wearable sensor applications
5. X-ray diffraction technique for electroceramic materials
6. X-ray absorption technique for electroceramic materials

Publications (Selected)

1. S. Tigunta, P. Khlikhum, P. Kidkhunthod, N. Chanlek, L. Supadee, **S. Pojprapai**, Dissolution behavior of MgO thin film-barrier magnetic tunneling junctions, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* (2019).
2. P. Jaiban, P. Kantha, K. Pengpat, **S. Pojprapai**, W. Wongkeo, M. Unruan, and N. Pisitpipathsin, Relationship in dielectric, ferroelectric behaviors and large strain response of BaTiO₃-doped (Bi_{0.4871}Na_{0.4871})La_{0.0172}TiO₃ ceramics, *Materials Research Express* (2019).
3. P. Jaimeewong, S. Sittinon, S. Buntham, P. Bomlai, O. Namsar, **S. Pojprapai**, and A. Watcharapasorn, Ferroelectric, Piezoelectric and Dielectric Behaviors of CoO- and Fe₂O₃-Doped BCZT Ceramics, *Physica Status Solidi a* (2018).
4. O. Namsar, C. Uthaisar, **S. Pojprapai**, Ferroelectric fatigue mechanism under bipolar electrical loading in KNN lead free piezoelectric ceramic, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* (2018).

5. O. Namsara, C. Uthaisara, J. Glaumb, **S. Pojprapai**, Orthorhombic-tetragonal phase transition induced by Ta isovalent doping and its effect on the fatigue characteristics of KNL-NSTx ceramics, *Ceramic International* (2018).
6. M. Promsawat, N. Promsawat, S. Jiansirisomboon, O. Namsar, F. Marlton, J. Daniels and **S. Pojprapai**, Investigation of frequency effect on electrical fatigue and crack tip domain-switching behaviors in $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.65}\text{Ti}_{0.35}\text{O}_3$ ceramics via synchrotron X-ray diffraction, *Journal of the European Ceramic Society* 44 (2018) 1526–1533.
7. N. Promsawat, M. Promsawat, B. Marungsri, P. Janphuang, Z. Luo, and **S. Pojprapai**, Investigation of The Effect of Temperature on Aging Behavior of Fe-Doped Lead Zirconate Titanate, *Functional Materials Letters*: 3, 1750026 (2017).
8. M. Promsawat, B. Marungsri, N. Promsawat, P. Janphuang, Z. Luo, and **S. Pojprapai**, Effects of Temperature on Aging Degradation of Soft And Hard Lead Zirconate Titanate Ceramics, *Ceramics International*: 43: 9709-9714 (2017).
9. M. Promsawat, M. Deluca, S. Kamposiri, B. Marungsri, and **S. Pojprapai**, Electrical Fatigue Behavior of Lead Zirconate Titanate Ceramic Under Elevated Temperatures, *Journal of the European Ceramic Society* 37: 2047–2055 (2017).
10. H. Wattanasarn, W. Photankham, T. Seetawan, R. Yimnirun, C. Thanachayanont, N. Petnoi, S. Pojprapai, Dielectric and ferroelectric properties modification of $0.7\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.3\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ceramics by $\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$, *Materials Research Bulletin* 76: 292–299 (2016).
11. W. Kempet, B. Marungsri, R. Yimnirun, W. Klysubun, T. Fangsuwannarak, S. Rattanachan, N. Pisitpipathsin, M. Promsawat and **S. Pojprapai**, Polarization Switching of PZT under Electrical Field via in-situ Synchrotron X-ray Absorption Spectroscopy, *Ferroelectrics*, 492: 35–42, (2016).
12. O. Namsar, **S. Pojprapai**, A. Watcharapasorn, and S. Jiansirisomboon, Polarization Fatigue in Ferroelectric $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3\text{-SrBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ Ceramics, *Electron. Mater. Lett.*, Vol. 11, No. 5: 881-889 (2015).
13. N. Pisitpipathsin, Y. Sratta, S. Unruan, M. Promsawat, B. Marungsri, R. Yimnirun, S. Rattanachan, and **S. Pojprapai**, Effect of Temperature on Ferroelectric and

- Piezoelectric Behaviour of Mn-Doped 0.75BF-0.25BT Multiferroic Ceramics, *Ferroelectrics*, 489: 110–117, (2015).
14. P. Kantha, N. Pisitpipathsin, M. Promsawut, K. Pengpat, N. Petnoi, S. Jiansirisomboon, K. Pengpat, S. **Pojprapai**, The effect of BZT doping on phase formation, dielectric and ferroelectric properties of BNLT ceramics, *J Mater Sci: Mater Electron* (2015).
 15. N. Pisitpipathsin, P. Kantha, K. Pengpat, M. Promsawut, S. **Pojprapai**, Effect of KNbO_3 on physical and electrical properties of lead-free BaTiO_3 ceramic, *Ceramic International*, 41, 3639 – 3646 (2015).
 16. T. Iamsasri, G. Tutuncu, C. Uthaisar, S. Wongsanmai, S. **Pojprapai**, and J. L. Jones, Electric field-induced phase transitions in Li-modified $\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3$ at the polymorphic phase boundary, *Journal of Applied Physics*, 117, 024101-1 - 024101-7 (2015).
 17. O. Namsar, S. **Pojprapai**, A. Watcharapasorn, and S. Jiansirisomboon, Enhancement of fatigue endurance in ferroelectric PZT ceramic by the addition of bismuth layered SBT, *Journal of Applied Physics*, 116, 164105-1 - 164105-7 (2014).
 18. N. Heidari Bateni, M. N. Hamidon, K. A. Matori, S. **Pojprapai**, P. Kantha, Electrical evaluation of ceramic obtained from white rice husk ash and soda lime silica glass for electronic applications, *J Mater Sci: Mater Electron*, V25, issue 12, 5491-5495 (2014).
 19. P. Kantha, N. Pisitpipathsin, S. Eitssayeam, K. Pengpat, and S. **Pojprapai**, Structural and Electrical Properties of BZT-added BNLT ceramics, *Ceramic International*, V40, issue 3, 4251-4256 (2014).
 20. P. Kantha, N. Pisitpipathsin, S. Eitssayeam, K. Pengpat, and S. **Pojprapai**, Structure and Dielectric Properties of Lead-Free $\text{BaSn}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$ - $\text{BaFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ Ceramics, *Ferroelectrics*, V458, issue 1, 83-90 (2014).
 21. T. Iamsasri, G. Tutuncu, C. Uthaisar, S. **Pojprapai**, and J. L. Jones, Analysis Methods for Characterizing Ferroelectric/Ferroelastic Domain Reorientation in Orthorhombic Perovskite Materials and Application to Li-Doped $\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3$, *Journal of Materials Science*, V48, Number 20 (2013).

22. W. Kempet, B. Marungsri, R. Yimnirau, W. Klysubun, and **S. Pojprapai**, Investigation of the local distortion of PZT ceramic under electrical field via in-situ X-ray Absorption Spectroscopy technique, *Ferroelectrics*, V453, issue 1, 106-112 (2013).
23. Y. Sratta, S. Chandarak, M. Unruan, P. Kantha, B. Marungsri, R. Yimnirun, and **S. Pojprapai**, Effect of Temperature on Ferroelectric Properties of Bismuth Ferrite-Barium Titanate, *Integrated Ferroelectrics*, V148, issue 1, 67-72 (2013).
24. C. Uthaisar, P. Kantha, R. Yimnirun, and **S. Pojprapai**, Effect of Sintering Temperature of Lead-free $(K_{0.50}Na_{0.46}Li_{0.04})(Nb_{(0.96-x)}Sb_{0.04}Ta_x)O_3$ Ceramics on Piezoelectric Properties, *Integrated Ferroelectrics*, V149, issue 1, 114-120 (2013).
25. A. Phuetthonglang, B. Marungsri, A. Oonsivilai, P. Kantha, R. Yimnirun and **S. Pojprapai**, Effect of Heat Treatment on Aging Degradation of the Piezoelectric Properties of Lead Zirconate Titanate, *Integrated Ferroelectrics*, V149, issue 1, 75-82 (2013).
26. **S. Pojprapai**, and J. Glaum , The effect of temperature on bipolar electrical fatigue behavior of lead zirconate titanate ceramics, *Functional Materials Letter*, 5, 12500270 – 12500274, (2012).
27. **S. Pojprapai**, Z. Luo, and R. Yimnirun, Frequency effect on electrical fatigue behavior of lead zirconate titanate ceramics, *Electronic Letters*, V48, issue 17, (2012).
28. Z. Luo, **S. Pojprapai**, J. Glaum, and M. Hoffman , Electrical fatigue induced cracking in lead zirconate titanate piezoelectric ceramic and its influence quantitatively analyzed by re-fatigue method, *Journal of The American Ceramic Society*, V8, issue 8, (2012).
29. **S. Pojprapai**, H. Simons, A. Studer, and M. Hoffman, “Temperature dependence on domain switching behavior in lead zirconate titanate under electrical load via in-situ neutron diffraction”, *Journal of The American Ceramic Society* (2011).
30. S. Chandarak, **S. Pojprapai**, S. Srilomsak, P. Jantaratana, S. Rujirawat, and R. Yimnirun, “Magnetoelectric Properties of Cu- and Mn-Doped $0.75BiFeO_3-0.25BaTiO_3$ Multiferroic Ceramics”, *Ferroelectrics*, V. 419 (2011).

31. S. Chandarak, A. Ngamjarurojana, **S. Pojprapai**, S. Srilomsak, S. Sujirawat, and R. Yimmirun, "Effect of Mn and Cu doping on electrical properties of 0.75BiFeO₃-0.25BaTiO₃ ceramics", *Integrated Ferroelectrics*, V. 114, 2010.
32. **S. Pojprapai (Imlao)**, J. L. Jones, T. Vodenitcharova, J. V. Bernier, M. Hoffman, "Investigation of the domain switching zone near a crack tip in pre-poled lead zirconate titanate ceramic via in-situ x-ray diffraction", *Script. Mater.*, V. 64, 2011.
33. A. Matsutani, Z. J. Luo, **S. Pojprapai**, M. Hoffman and G. Pezzotti "Visualization of highly graded oxygen vacancy profiles in lead-zirconate-titanate by spectrally resolved cathodoluminescence spectroscopy", *Appl. Phys. Lett.*, V. 95, 2010.
34. **S. Pojprapai(Imlao)**, J. Russell, Z. Luo, B. Clausen, S. C. Vogel, D. W. Brown, M. Hoffman, "Dynamic processes of domain switching in lead zirconate titanate under cyclic mechanical loading by *in situ* neutron diffraction", *Acta Mater.* 58 (2010).
35. **S. Pojprapai (Imlao)**, J. Russell, H. Man, J. L. Jones, J. E. Daniels, M. Hoffman, "Frequency effects on fatigue crack growth and crack-tip domain switching behavior in a lead zirconate titanate ceramic", *Acta Mater.* 57, 2009.
36. **S. Pojprapai (Imlao)**, J. L. Jones, A. J. Studer, J. Russell, N. Valanoor, M. Hoffman, "Ferroelastic domain switching fatigue in lead zirconate titanate ceramics", *Acta Mater.*, V. 56, 2008.
37. H. Man., T. Furukawa, M. Hoffman and **S. Pojprapai (Imlao)**, "An Indirect Implicit Technique for Modelling Piezoelectric Ceramics ", *Computational Materials Science*, 2008.
38. H. Man, T. Furukawa, M. Hoffman, **S. Imlao** and Z. Lou, "An Indirect Implicit Model for Frequency Dependent Hystereses of Piezoelectric Ceramics ", *Journal of Australasian Ceramic Society*, 43(2), 69-74, 2007.
39. **S. Imlao**, J. L. Jones, M. Hoffman, and S. C. Vogel, *J. Am. Ceram. Soc.*, "Domain switching under cyclic mechanical loading in lead zirconate titanate", *J. Am. Ceram. Soc.*, V. 89, 2006.
40. **S. Pojprapai(Imlao)**, J. L. Jones, Ma Hoffman, "Determination of domain orientation in PZT ceramics by Raman spectroscopy", *Appl. Phys. Lett.*, V. 88, 2006.

Awards

1. Bernd Rode 2017 (Senior Researcher), ASEA-UNINET, Austria
2. The Graduate Excellence in Materials Science award, Material Science and Technology conference (2007), USA.
3. Out standing (oral) presentation Australian Research Network for Advance Materials (ARNAM) annual Workshops (2006), Brisbane, Australia.

Funds/Grants

1. Thailand MED TECH Excellence Fund 2019 (5 M฿)
2. Technology and Innovation-based Enterprise Development Fund 2018 (2.5 M฿)
3. UK Newton Fund : the Royal Academy of Engineering and Office for Higher Education Coordination's Industry Academia Partnership Programme 2016-2018 (2.5 M฿)
4. The Royal Golden Jubilee (RGJ) Ph.D. Grant (PhD student supervisor), Thai Research Fund 2017 - 2022 (2.93 M฿)
5. The Royal Golden Jubilee (RGJ) Ph.D. Grant (PhD student supervisor), Thai Research Fund 2016 - 2021 (2.87 M฿)
6. UK Newton Fund Researcher Links Travel Grant 2015.
7. The Royal Golden Jubilee (RGJ) Ph.D. Grant (PhD student supervisor), Thai Research Fund 2015- 2018 (1.65 M฿)
8. Western Digital (Thailand) Research Grant 2015 - 2018 (3 M฿)
9. Invention Fund H.R.H Princess Maha Chakri Sirindhorn 2014 (0.2 M฿)
10. SUT research fund 2014 (0.2 M฿)
11. Austria-Thai Research exchange program scholarship and Technology grant 2014: conduct the experiment at the Materials Center Leoben, Leoben University, Austria
12. SUT research fund 2013 (0.2 M฿)

13. Thai Research Fund 2013-2015 (0.6 M฿)
14. Seagate Technology Thailand Fund 2011. (0.7 M฿)
15. Thai Research Fund 2010-2012 (0.6 M฿).
16. Synchrotron Light Research Institute, Thailand 2010-2011. (1.2 M฿)
17. I/UCRC in HDD Component 2009. (0.7 M฿)
18. Travel grant supported by the Access to Major Research Facilities (AMRF) program (2008): conduct the experiment at European Synchrotron Radiation Facility.

Professional Societies

- 2013-2015: committee of The Center of Excellence in Nanotechnology for Energy, Thailand
- 2013-2015: advisory board Of International Journal of Electroactive Materials
- 2010-2011: proposal reviewer committee of Synchrotron Light Research Institute, Thailand
- 2007-2009: committee of Australian Research Network for Advance Materials

ประวัตินักวิจัย

ชื่อ-สกุล ศุภกร สุวรรณ เลขประจำตัวประชาชน 1 5206 00039 785
หน้าที่การงานปัจจุบัน (อาจารย์/เจ้าหน้าที่ /นักวิจัย /นักศึกษาระดับ...../อื่นๆ)
ตำแหน่ง วิศวกร อัตราเงินเดือน 26,950 บาท



ประวัติการศึกษาสูงสุด

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	ปีที่จบ	สถาบันที่จบ
Doctor of Engineering	ดุขภฏบ้ณชฏทไฟฟา	กำลังศึษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วศ.ม. วิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต	วิศวกรรมชีวการแพทย	2556	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วศ.บ. วิศวกรรมศาสตร บัณฑิต	วิศวกรรม อิเล็กทรอนิกส์	2553	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สถานที่ติดต่อ

ที่ทำงาน : ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จสจ.	ที่บ้าน : 139 หมู่ 6 ต.วิเชตนคร อ.แจ้ห่ม จ.ลำปาง 52120 ประเทศไทย
โทรศัพท์ : 02-329-8344	โทรศัพท์: -
โทรสาร : 027392398	โทรมือถือ : 092-280-2589
E-mail : kssupako@kmitl.ac.th	

ผลงานวิจัย

1. Supakorn Suwan, Kitiphol Chitsakul, Suradej Tretriluxana, Metha Kongpoon. IMUs Motion Capture for Human Gait Analysis. 1st Icest 2012 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology; The swissotel Le Concorde, Bangkok, Thailand.
2. Choopol Phromsuthirak, Supakorn Suwan, Arthorn Sanpanich, Chuchart Pintavirooj. Hand Shape Identification using Palm print Alignment based on Intrinsic Local Affine-invariant Fiducial Points. 2014 7th Biomedical Engineering International Conference; Fukuoka, Japan, 26-28 November.
3. ทำวิจัยโครงการ Police Help Me (ตำรวจช่วยด้วย) ร่วมกับศูนย์การค้าพาราไดซ์ปาร์ค ถ.ศรีนครินทร์เขตพื้นที่รับผิดชอบของสถานีตำรวจนครบาลประเวศกองบังคับการตำรวจนครบาล 4 กองบัญชาการตำรวจนครบาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Supakorn Suwan, Kanchana Phasuk, Kitiphol Chitsakul, Wibool Piyawattanametha. Rapid e. coli Detection based on fluorescence technique. 2017 10th Biomedical Engineering International Conference; Aug 31-Sep 2, 2017 Hokkaido, Japan.
5. Yutthana Pititeeraphab, Chuchart Pintavirooj, Supakorn Suwan. Identity Verification Using Geometry of Human hands. 2018 11th Biomedical Engineering International Conference; November 21-24, 2018 Chiang Mai, Thailand.

สาขางานวิจัยที่สนใจ

- ระบบแสดงผลแบบเวลาจริง (Real-Time Monitoring)
- การสื่อสารข้อมูลบนโครงข่ายไร้สาย (Wireless Network Connection)
- การอินเตอร์เฟสด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Interface)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing)
- Smart City and Applications
- การออกแบบและพัฒนานวัตกรรมเพื่อผู้พิการ
- ระบบควบคุมและสั่งการระยะไกล (Remoted Control Units)

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่สำเร็จ

1. โครงการการศึกษาความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมเพื่อการพัฒนา ออกแบบและผลิตรถยนต์รับจ้าง (แท็กซี่มิเตอร์) สำหรับคนพิการ ระยะที่ 1 โดยได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการสำนักงานส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการแห่งชาติกระทรวงการพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์ ประจำปีงบประมาณ 2558
2. รองหัวหน้าโครงการออกแบบ พัฒนาและผลิตรถยนต์รับจ้างสำหรับผู้พิการทางด้านการเคลื่อนไหว โดยโครงการดังกล่าวได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการ กรมส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการ
3. นักวิจัยหลักและที่ปรึกษาร่วมให้กับภาคเอกชนในการพัฒนาและออกแบบระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน (Battery Management System) สำหรับใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าสมัยใหม่ โดยได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการคูปองนวัตกรรม ของสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หัวหน้าโครงการ “ระบบจัดการแบตเตอรี่แบบชาร์จไวสำหรับรถไฟฟ้า” โปรแกรมสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรม (INDUSTRIAL TECHNOLOGY ASSISTANCE PROGRAM: ITAP)
5. ร่วมออกแบบ, พัฒนาโครงสร้างและดำเนินโครงการ ECO-System ของพระจอมเกล้าลาดกระบัง
6. ผู้ร่วมวิจัยโครงการวิจัยและพัฒนาเพื่อตอบสนองภาคการผลิตสาขาอุตสาหกรรมและแก้ไขปัญหาสำคัญของประเทศ “การขับเคลื่อนการแก้ไขปัญหาจังหวัดชายแดนภาคใต้” ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินอุดหนุนทั่วไป (เงินงบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ 2560
7. ผู้ร่วมวิจัยโครงการวิจัยและพัฒนาเพื่อตอบสนองภาคการผลิตสาขาอุตสาหกรรมและแก้ไขปัญหาสำคัญของประเทศ “การบริหารจัดการขยะและของเสียอันตราย” ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินอุดหนุนทั่วไป (เงินงบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ 2560
8. นักวิจัยและผู้ประสานงานโครงการ “พลังงานทางเลือกจากการเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับใช้ในที่อยู่อาศัยอัจฉริยะที่รองรับสังคมประชากรสูงวัย (Alternative energy from energy harvesting for smart accommodations targeting aging society)” สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2561
9. หัวหน้าโครงการ “โครงการพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไร้แปลงถ่านสำหรับมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้า” โปรแกรมสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรม (INDUSTRIAL TECHNOLOGY ASSISTANCE PROGRAM: ITAP)
10. ที่ปรึกษาโครงการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในหน่วยงานภาครัฐ – กองทัพอากาศ (กองบิน 41)
11. ที่ปรึกษาโครงการจัดตั้งหน่วยตัดแปลง หน่วยงานติดตั้ง และหน่วยซ่อมบำรุงเครื่องมืออุปกรณ์พิเศษ
12. ที่ปรึกษาโครงการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในหน่วยงานภาครัฐ – กองทัพอากาศ (คณะกรรมการพลังงานทดแทนกองทัพอากาศ จังหวัดกรุงเทพมหานคร)
13. ที่ปรึกษาโครงการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในหน่วยงานภาครัฐ-กองทัพอากาศ (กองบิน ๗)
14. นักวิจัยในคณะที่ปรึกษาโครงการฝ่ายวิจัยและพัฒนาการไฟฟ้านครหลวง “โครงการจัดทำต้นแบบอุปกรณ์ FRTU ในระบบ DMS”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Fabrication and evaluation of energy harvesting floor using piezoelectric frequency up-converting mechanism

Phosy Panthongsy^a, Don Isarakorn^{b,*}, Pattanaphong Janphuang^c, Kazuhiko Hamamoto^d

^a Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

^b Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

^c Synchrotron Light Research Institute, 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

^d Department of Information Media Technology, School of Information and Telecommunication Engineering, Tokai University, 2-3-23 Takanawa Minato-ku, Tokyo, 108-8619, Japan



ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 November 2017
Received in revised form 22 May 2018
Accepted 17 June 2018
Available online 20 June 2018

Keywords:

Energy harvesting floor
Frequency up-converting strategy
Low-Frequency energy harvesting
Piezoelectric harvester

ABSTRACT

This paper reports on the fabrication and evaluation of an energy harvesting floor tile using unimorph PZT piezoelectric cantilevers to convert kinetic energy from human footsteps into usable electricity. The operation of the tile is based on frequency up-converting mechanism in which low frequency input vibrations are converted into high frequency vibrations of an electromechanical transduction. The operational frequency of the PZT unimorph cantilever was converted up by an interaction between a permanent magnet and an iron bar. Vertical displacement of the oscillating cantilever was localized with a stopper preventing damage to the piezoelectric layer from shock or over-displacement excitation. The magnetic field density between the magnet and the iron bar was investigated through finite element analysis simulation in order to define an optimal air gap. Experimentally, a unimorph PZT cantilever was initially prototyped to validate the design. The results showed a successful frequency up-conversion with a resonant frequency of 10.54 Hz. Then, it was scaled up by accommodating 24 unimorph PZT cantilevers followed by experimental validation to evaluate its energy harvesting performance. Each cantilever was connected to a full wave bridge rectifier then connected in parallel with the other cantilevers. The generated electrical power and energy were investigated through various resistive loads. The average power and total output energy produced by one foot step on the tile were found to be 1.24 mW and 3.49 mJ, respectively at an optimal load resistance of 74.44 k Ω . The energy conversion efficiency reached 17.12% demonstrating the potential of harvesting energy from human motion.

© 2018 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Wireless sensor node emerged decades ago has been continuously important in a variety of fields including industry, agriculture, infrastructure, disaster prediction and environment monitoring due to its ability to track information in a hard-to-reach location at a lower cost than wire solution. Following the feature of communication without wiring and recent trend of electronics technology that electronic components are reduced in size and power consumption, many existed wireless sensor nodes are powered by battery. However, there are several issues on battery use such as limited energy storage capacity, battery lifespan, and inconvenient maintenance of depleted batteries in unreachable location

especially implanted sensors. Therefore, harvesting ambient environment energy to supply sustainable electrical power to devices such as an energy autonomous system is highly desirable. Energy powering small embedded device is typically harvested from light, thermal or vibration sources. Environmental vibration has particularly attracted many researchers because of its ubiquity. In this respect, electrical energy can be obtained by electrostatic [1], electromagnetic [2] or piezoelectric [3] conversion. Piezoelectric generator has received great interest due to its simple, low structure profile, ease of integration, high power density and high energy conversion efficiency [4,5].

At present, piezoelectric energy harvesters are usually resonant-type device. Its resonant frequency is closely matched to the frequency of the surrounding vibration sources in order to achieve maximum power generation. However, resonant-type device is not a good option for conversion of human movement or variable vibration over time. Its generated electrical energy drops significantly at

* Corresponding author.

E-mail address: don.is@kmitl.ac.th (D. Isarakorn).

low frequency when the resonant frequency of the harvester deviates far from the frequency of the vibration source [6,7]. To achieve a high harvesting efficiency, several frequency up-conversion mechanisms that excite a harvester from low-frequency input vibration have been investigated recently. A commonly used strategy is to make the cantilever or buzzer disk of a piezoelectric harvester deflect initially and then leave it to oscillate freely. An initial deflection can be implemented by mechanical contact or by non-contact magnetic interaction.

A contact frequency up-conversion mechanism was firstly presented by Umeda et al [8,9]; they investigated the generated energy from a piezoelectric beam impacted by a steel ball. After this pioneering paper, many researchers have begun further investigations. For example, Ranaud et al. [10] used a moving mass to strike one of two piezoelectric cantilevers located at each end of a harvester container while the harvester was being shaken from side to side. The impact from the moving mass increased the operational frequency of the piezoelectric enabling it to harvest energy from low-frequency and high-amplitude input and provide power to wearable gait monitoring device. Pozzi et al. [11] applied a plucking-based frequency up-conversion strategy to a piezoelectric wearable energy harvester in order to convert energy from knee-joint motion. This mechanical plucking deflected the piezoelectric beams through a plectrum and then rapidly left them free to vibrate. The core challenge in integration of a contact frequency up-conversion mechanism to a harvester is the decrease in life span of the piezoelectric cantilever [12].

On the non-contact up-conversion mechanism side, Kulah et al. [13] reported one that employed the attractive force between permanent magnet and metal to increase the vibrational frequency of cantilever coils in an electromagnetic energy harvester. In addition, Pillatsch et al. [14] demonstrated a body-movement-energy harvesting device that used a rotational system. In this device, magnetic coupling with a rotating proof mass was used to pluck the piezoelectric cantilever. In another study, Luong et al. [15] used magnetic force interaction between permanent magnets to excite a piezocomposite generating element (PCGE) in a small-scale windmill. The primary magnet was attached to the input rotor, and the secondary magnet was attached to the free end of the PCGE. The main advantage of non-contact frequency up-conversion mechanism is that the piezoelectric or coil cantilevers do not have to suffer repeated damaging physical contact with anything which makes their operation more reliable than that of the contact frequency up-conversion mechanism. However, the energy by generated a non-contact generator drops significantly at high speed of magnetic plucking [16]. Therefore, an efficient energy harvester with frequency up-conversion mechanism that has a long operational life time and suffers no effect of high plucking speed is of much interest.

This paper proposes an energy harvesting floor tile based on frequency up-conversion principle for converting low-frequency vibration especially pedestrian's step into usable electrical energy. Its conceptual model and the frequency up-conversion mechanism are introduced first. Then, the validation of the design is presented. Next, the fabrication and evaluation of the energy harvesting floor tile are described. Lastly, a conclusion is given.

2. Concepts of energy harvesting floor tile and frequency up-conversion strategy

The schematic diagram of the energy harvesting floor tile with the frequency up-conversion mechanism is illustrated in Fig. 1. Twenty-four unimorph piezoelectric cantilevers are mounted on a supporter, the free ends of which are attached to a stainless-steel mass to increase the strain in the piezoelectric substance causing

the increase of electrical output power during oscillation. The permanent magnets are glued to the top surface of the mass for attracting the iron bar underneath the cover plate when the floor tile is stepped on. The soft plastic is used to absorb the impact force between the iron bar and the permanent magnet. Four springs are installed at each corner pulling up the cover plate. A stopper is used to protect the piezoelectric layer from damage from over-displacement excitation.

Fig. 2 illustrates the frequency up-converting sequences of energy harvesting floor tile. In the waiting for load state (Fig. 2(a)), the air gap between the permanent magnet and the iron bar (d_2) should be optimized to ensure that the attracting force from the permanent magnet (F_{iM}) to the iron bar is not going to stop vibrating cantilever; therefore, the iron bar should be located where $F_{iM} = 0$. The attractive force exerted by the permanent magnet at the air gap is given by the following Maxwell's equation:

$$F_{iM} = \frac{B^2 A_i}{2\mu_0}, \quad (1)$$

where the subscript $i = 1, 2, 3, \dots$ and 24 identifies a particular permanent magnet and unimorph cantilever. B represents the magnetic flux density, A_i is the cross section of the area of the pole, and μ_0 is the permeability of the air.

For the loaded state shown in Fig. 2(b), when the energy harvesting floor tile is stepped on, springs are compressed by a compressive force (F_L) from the weight of the pedestrian. The compressive force F_L should be larger than the restoring force of the spring (F_{jS});

$$F_L > \sum_{j=1}^a F_{jS} \quad \text{where } a \text{ is the total number of the springs used. From}$$

Newton's second law and Hooke's law, F_L and F_{jS} can be calculated by the equations below,

$$F_L = m_L g, \quad (2)$$

$$F_{jS} = -k_{jS} h, \quad (3)$$

where the subscript $j = 1, 2, 3$ and 4 identifies a particular spring; m_L is the mass of the pedestrian; g is the gravitational acceleration; k_{jS} is the spring constant; and h represents the displacement from the equilibrium position of the spring. The loaded state is also a state that the iron bar comes close to a location where the magnetic field density is high so that the bar will be attracted by the permanent magnet. Thus, the permanent magnet deflects the piezoelectric cantilever underneath the iron bar. The resultant force in the z -axis (F_{iZ}) deflecting the unimorph piezoelectric cantilever is equal to

$$F_{iZ} = F_{iM} \cos \theta - (F_{iC} \cos \theta + m_{iT} g), \quad (4)$$

where F_{iC} is the restoring force of the unimorph piezoelectric cantilever; θ is the top surface angle of permanent magnet, and m_{iT} represents the total mass of the magnet and the stainless-steel mass at tip of piezoelectric unimorph cantilever. The restoring force F_{iC} can be calculated from the equation below: [17]

$$F_{iC} = k_{iC} d_1, \quad (5)$$

where k_{iC} is the effective spring constant of the unimorph piezoelectric cantilever; d_1 is the displacement of the unimorph piezoelectric cantilever from its rest position; and k_{iC} is calculated by the following equation,

$$k_{iC} = \frac{3(EI)_{\text{cantilever}}}{l^3} = \frac{3(E_p I_p + E_e I_e)}{l^3}, \quad (6)$$

where $(EI)_{\text{cantilever}}$ is the effective bending modulus of the unimorph piezoelectric cantilever; l is the length of the piezoelectric and elastic layers; E_p and E_e are the Young's modulus of the piezoelectric and elastic layers; and I_p and I_e are the moments of inertia

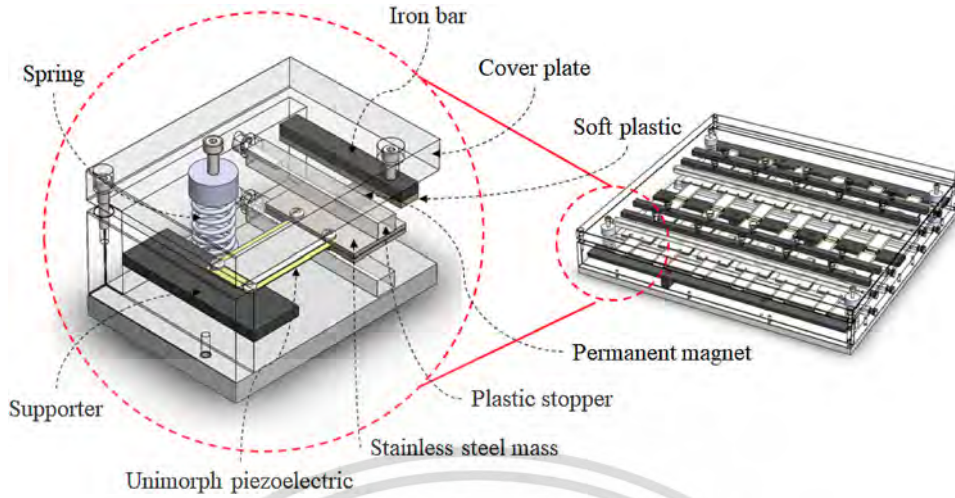


Fig. 1. Schematic drawing of energy harvesting floor tile.

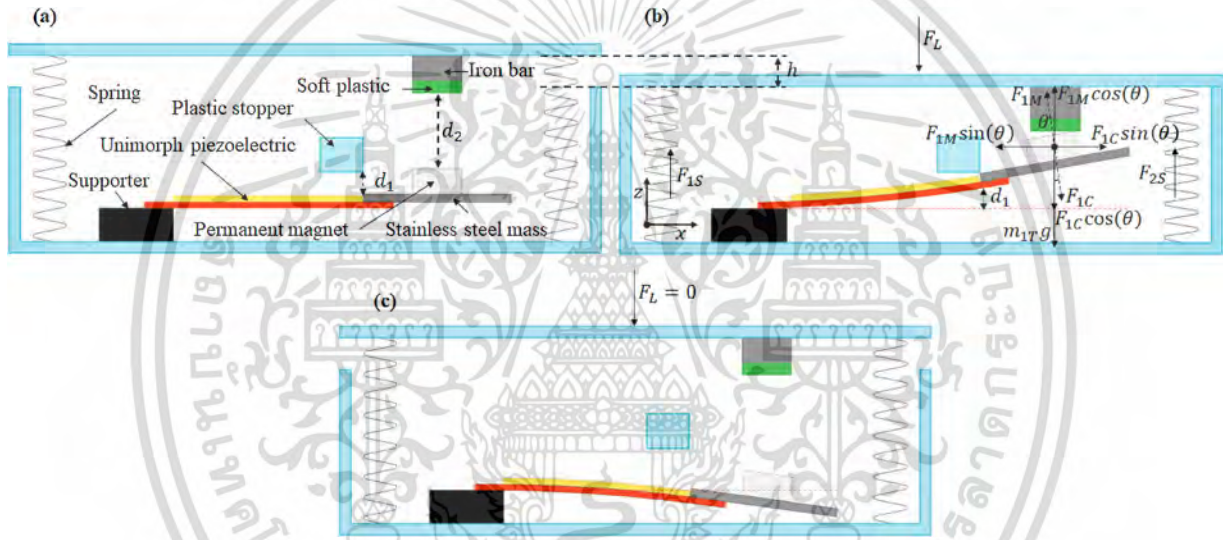


Fig. 2. (a) Waiting for load; (b) and (c) Loaded and unloaded states of energy harvesting floor tile.

of the piezoelectric and elastic layers. The moments of inertia of the piezoelectric and elastic layers can be determined by the following equations [18],

$$I_p = \frac{w_p t_p^3}{12} + w_p t_p \left(\frac{t_p}{2} - t_n \right)^2, \quad (7)$$

$$I_e = \frac{w_e t_e^3}{12} + w_e t_e \left(\frac{t_e}{2} - t_n \right)^2, \quad (8)$$

where w_p and w_e are the widths of the piezoelectric and elastic layers; t_p and t_e are the thicknesses of the piezoelectric and elastic layers; and t_n is the distance of the neutral plane in the piezoelectric layer, shown in Fig. 3, which can be calculated by the equation below,

$$t_n = \frac{E_p t_p^2 - E_e t_e^2}{2(E_p t_p + E_e t_e)}. \quad (9)$$

Furthermore, the compressive stress in the unimorph piezoelectric cantilever is induced by the resultant force in the x-axis,

$$F_{ix} = F_{iM} \sin \theta - F_{iC} \sin \theta. \quad (10)$$

In the unloaded state, when the foot moves up and away from the energy harvesting floor tile; $F_L = 0$ as shown in Fig. 2(c) and the

total restoring force of the spring is higher than the total force in the z-axis; $\sum_{j=1}^a F_{js}$ $\sum_{i=1}^b F_{iz}$ where b is the number of the cantilevers with

an attached permanent magnet; the springs will push the cover plate and the iron bar up and away from the permanent magnet. This step will rapidly separate the permanent magnet from the iron bar allowing the unimorph piezoelectric cantilever to freely oscillate at a high frequency.

3. Verification of the feasibility of the designed mechanism

3.1. Prototype of the proposed tile

A unimorph piezoelectric cantilever as shown in Fig. 4 was firstly prototyped and properly characterized before the system was scaled up to be composed of 24 unimorph PZT cantilevers. To optimize and verify the design of the energy harvesting floor tile, the following structure was configured. A $60 \times 30 \times 2 \text{ mm}^3$ stainless steel mass was glued with a $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ permanent magnet (NdFeB), and then mounted on the free end of a unimorph PZT cantilever consisted of a $40 \times 20 \times 0.3 \text{ mm}^3$ PZT layer and a $60 \times 25 \times 0.2 \text{ mm}^3$ elastic layer. The configuration was as that

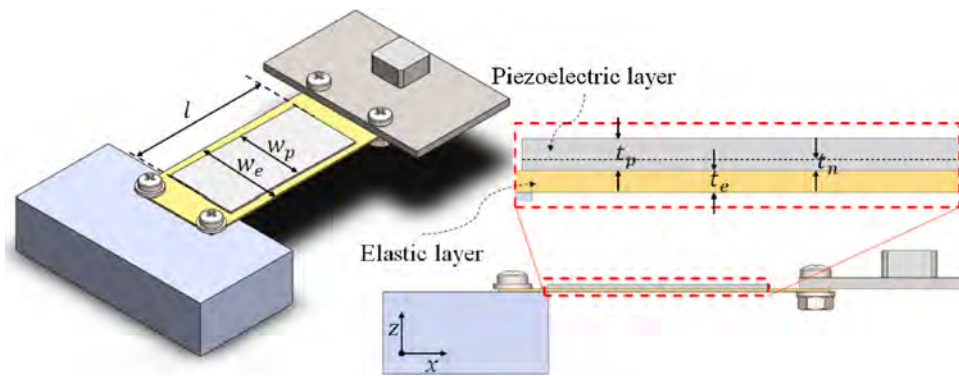


Fig. 3. Schematic of a unimorph piezoelectric cantilever with a proof mass.

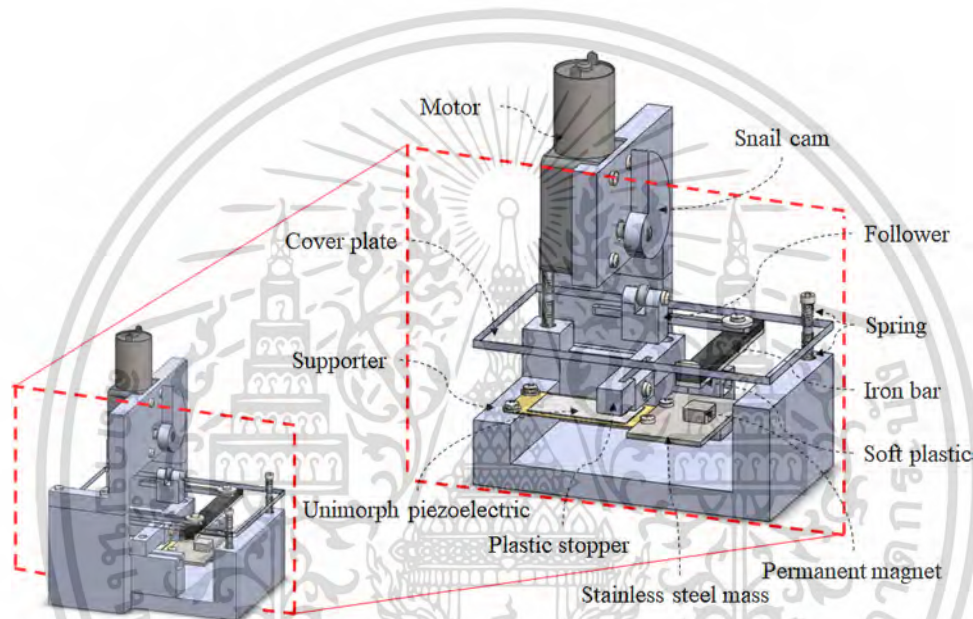


Fig. 4. Validation of the designed mechanism.

Table 1
Dimension and magnetic property of the materials used.

Parameters	Dimension	Relative permittivity	Coercivity (A/m)	Electric conductivity (MS)
Iron bar	5 mm × 10 mm	14872	–	–
Soft plastic	2 mm × 10 mm	1	–	–
Air gap	10, 14, and 18 mm	1.0006	–	–
Permanent magnet (NeFeB)	10 mm × 5 mm	1.045	883310	0.667
416 stainless-steel mass	30 mm × 2 mm	440	–	–

shown in Fig. 2(a) of the schematic of the waiting for load state (equilibrium state). Since the generated power is proportional to the displacement of the piezoelectric cantilever, the largest air gap between the plastic stopper and the PZT cantilever (d_1) is required. However, the PZT layer may crack from over-bending, thus we needed to set a proper distance between the stopper and the cantilever. In our implementation, one end of the PZT cantilever was clamped to the supporter and supplied with DC voltage while the other free end was pressed by a rack-and-pinion scale to vary the vertical displacement. Over-bending could be observed from the voltage at the free end. As shown in Fig. 5, as the PZT layer broke at a vertical displacement of approximately 7.1 mm, the voltage at the free end became zero. Therefore, a plastic stopper was used to fix

the vertical displacement of the PZT cantilever to 4 mm ($d_1 = 4$ mm). In addition to that optimization step, an optimal air gap between the permanent magnet and the iron bar (d_2) was determined by finite element analysis simulation with FEMM 4.2 software. The simulation was implemented in 2D with parameters shown in Table 1. Fig. 6 illustrates the simulation results of magnetic flux density. As can be seen, the magnetic flux density was diminished to approximately zero at 18 mm far from the permanent magnet. At this distance, the attractive force from the magnet approached zero according to Eq. (1). Thus, d_2 was set to be 18 mm for the prototype. This value of d_2 from simulation was verified in an actual experiment that it was truly optimal.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

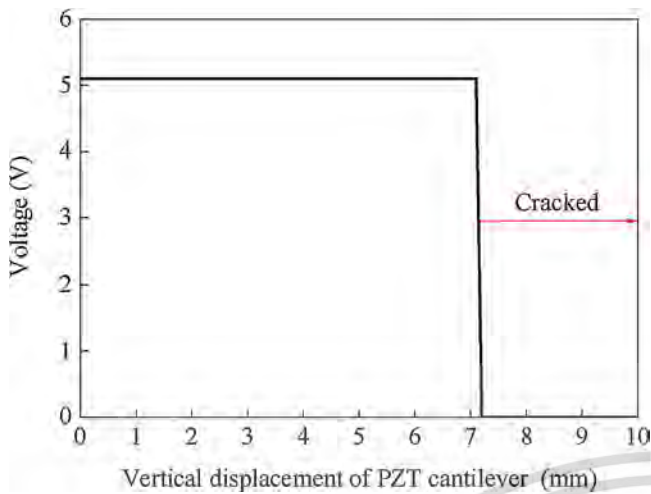


Fig. 5. Voltage at the free end of the PZT cantilever as the vertical displacement was increased.

3.2. Verification method

A motor and a snail cam for simulating force of human steps were mounted on the prototype as shown in Fig. 4. The snail cam attached to the shaft of the motor was used to transform the motor's rotary motion into linear motion. The follower of the snail cam made the cover plate move up and down, simulating movement caused by pedestrian step. Generally, walking velocity and frequency of pedestrian steps on the floor either in a crowded or uncrowded area are inconstant, depending on number of people and individual stride. These parameters could not be simulated exactly. One thing for certain is that the time interval that the foot of a pedestrian makes contact with the floor is longer for a slow walker and shorter for a fast walker. A high density of pedestrians may cause them to walk slower hence this time interval may be longer [19]. Accordingly, this simulation of energy harvesting behavior was based on the step time interval (T_d) between the cover plate moving up and down, i.e., the cycle time of the greatest radial dimension of the snail cam pressing on the follower. The generated energy was investigated with various resistive loads. The voltage across resistive load was measured with an oscilloscope (Tektronix

TD 3032B). As the measured voltage was a transient waveform [20], the instantaneous power $P(t_m)$ could be calculated by

$$P(t_m) = \frac{V_L^2(t_m)}{R_L}, \tag{11}$$

where $V_L(t_m)$ is the transient voltage across the resistive load at time t_m ; $m=0,1,2,3, \dots$ identifies the voltage sample at a particular time; and R_L is the resistance of the resistive load. At time t_N where N is the number of voltage samples, the average power can be found as

$$P_{Avg}(t_N) = \frac{1}{t_N} \int_0^{t_N} \frac{V_L^2(t)}{R_L} dt \tag{12}$$

Thus, the energy produced from the prototype as a function of time was calculated by the following expression,

$$E(t_N) = \sum_{m=0}^N P(t_m) \Delta t_m, \text{ for } N > 0, \tag{13}$$

where Δt_m is the measurement time interval of the voltage samples.

3.3. Verification results

Before experimentally investigating the energy harvesting performance, an optimal load resistor was found by connecting various resistive loads to the prototype directly and rotating the snail cam with an angular velocity of 8 rad/s and step time interval T_d of 0.1 s. The capacitance and resistance of the PZT cantilever in the prototype were 46.84 nF and 320.13 k Ω , respectively, measured by an impedance analyzer (Bode 100 - OMICRON Lab). The maximum average power was observed with a load resistor of 800 k Ω ; this resistor was thus chosen as the optimal one. The next step was to find the optimal air gap. Fig. 7 shows a comparison of the performances of the prototype installed with different air gaps d_2 . The ratio of the total output energy generated when the air gap d_2 were 18 and 14 mm to the total output energy generated when d_2 was 10 mm were 3.35 and 2.73 to 1, respectively. Decreasing the amount of the air gap d_2 led to a significant drop in output energy because the vertical displacement of the oscillating PZT cantilever was diminished by the stronger attractive force between the permanent magnet and the iron bar as mentioned in section II. Free oscillation would be stopped with the shortest air gap d_2 , producing

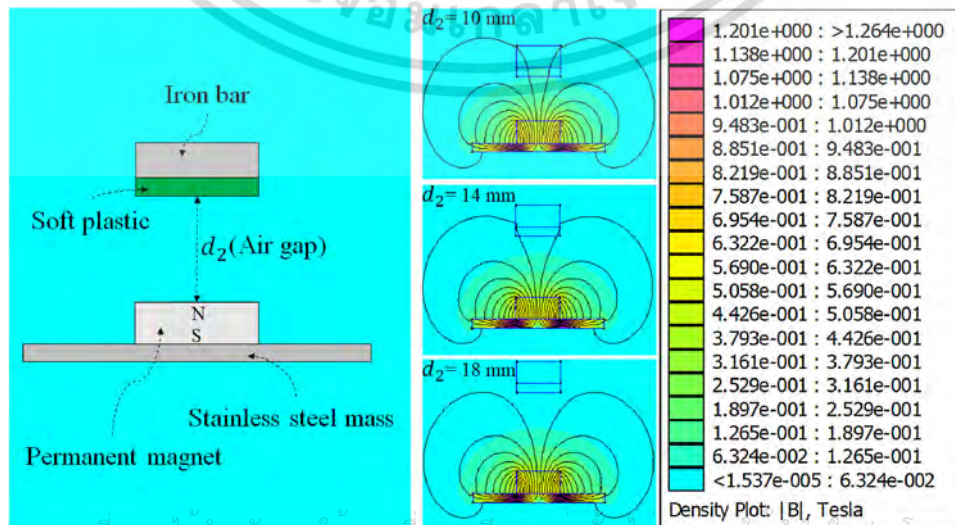


Fig. 6. Magnetic flux density simulation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นเป็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

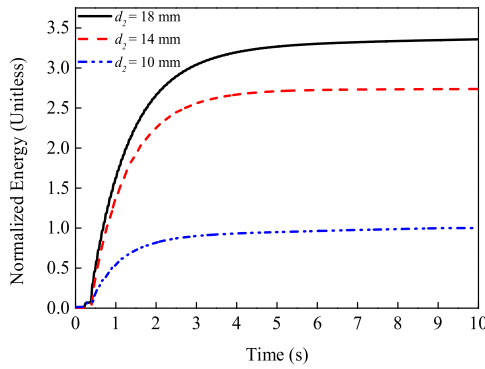


Fig. 7. Normalized energy from using different airgaps (d_2).

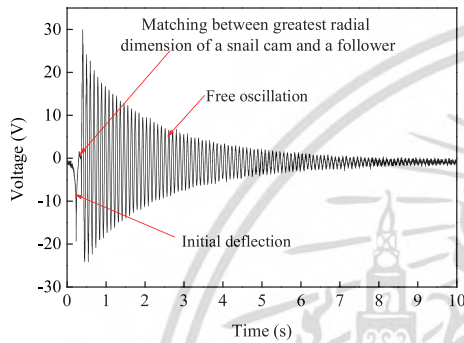


Fig. 8. Oscillating voltage across the optimal load resistor.

the minimum output energy. Therefore, the prototype was configured with $d_2 = 18$ mm that could generate an average power of 0.075 mW with a peak-to-peak voltage of 54.20V as shown in Fig. 8.

The energy harvesting performance was determined as follows. Following the experimental method in subsection B, a snail cam

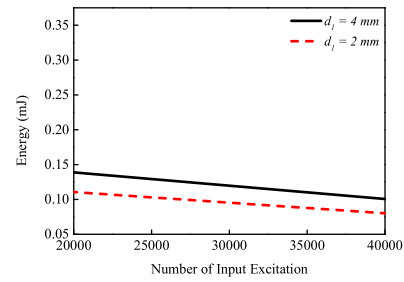


Fig. 10. Output energy with increasing number of plucks.

was rotated at an angular velocity of 8 rad/s with various step time intervals (T_d) of 0.1, 0.5 and 1.0 s which were assumed to represent accurately the walking speeds of a pedestrian. Fig. 9(a), (b) and (c) depict the output voltages from these walking speeds, respectively. The results show that the PZT cantilever plucking frequencies were 1.01 Hz, 0.71 Hz and 0.52 Hz, respectively. Fig. 9(d) illustrates the energy harvested during 10 s with different step time intervals (T_d). The total output energies were 2.05, 1.42 and 1.00 mJ, respectively. Increasing the step time interval, i.e. slower walking speed, reduced the number of plucks on the PZT cantilever over time leading a decreasing in the total output energy.

Next, the reliability of the prototype was examined. For the reliability test, the snail cam was continuously rotated with a step time interval T_d of 0.1 s to excite the prototype. It was found that the harvestable energy steadily decreased from the first pluck up to the forty-thousandth pluck. This issue was not related to mechanical failure or regression of the PZT cantilever. It occurred from progressive detachment of the piezoelectric layer from the elastic layer that might come from insufficient adhesive function of the glue that bonded the two layers together under a large vertical displacement of the PZT cantilever. To remedy that situation, the PZT cantilever's vertical displacement was restricted to 2 mm

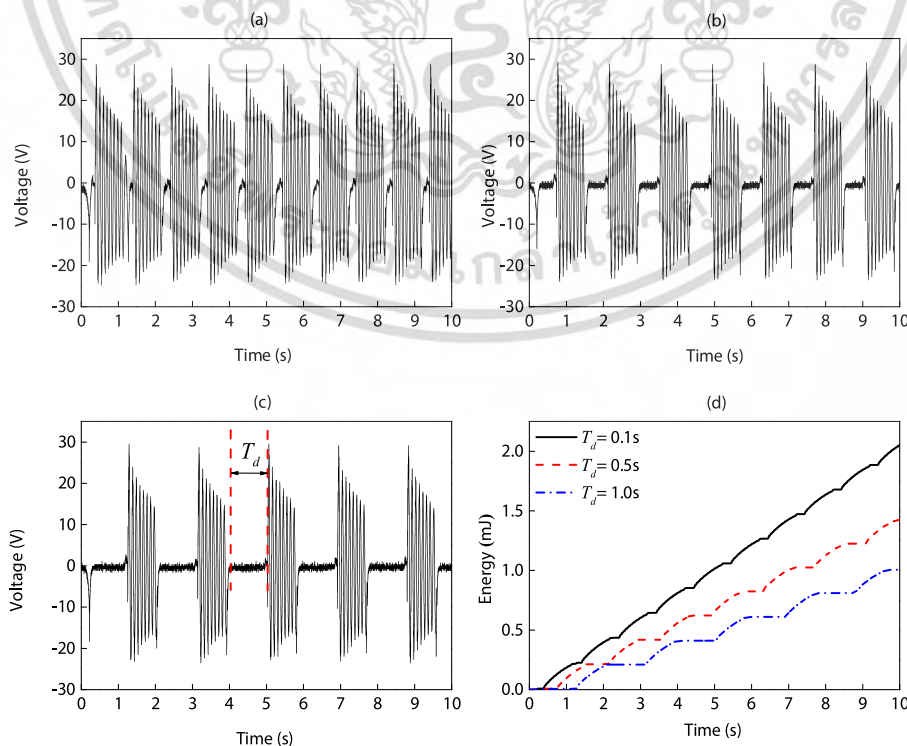


Fig. 9. Voltages generated with step time intervals T_d of (a) 0.5, (b) 1 and (c) 1.5 s; (d) the trend of harvested energy that varied with step time interval.

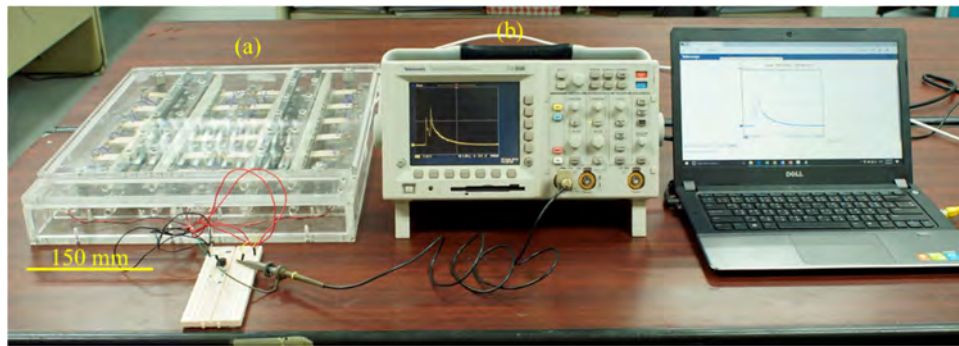


Fig. 11. A test setup showing (a) the energy harvesting floor tile and (b) the oscilloscope measuring the voltage (Tektronix TDS3032B).

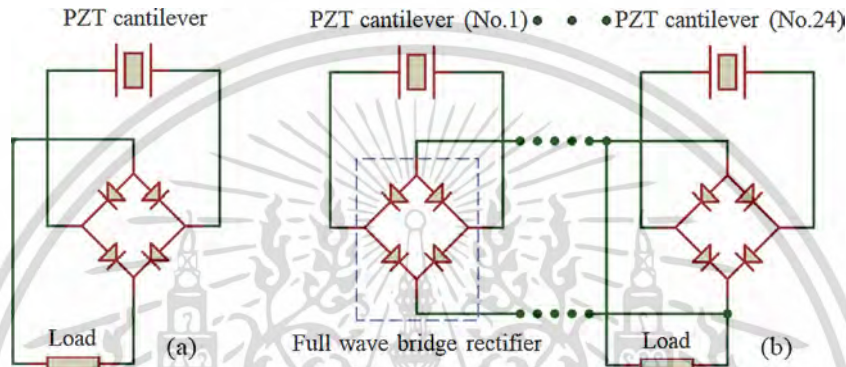


Fig. 12. (a) Circuit of an individual PZT cantilever; (b) Circuit of electrically connected PZT cantilevers, rectifiers, and load resistors.

($d_1 = 2 \text{ mm}$). However, the progressive detachment still happened as shown by the results in Fig. 10. A very short air gap d_1 might make the PZT cantilever last a longer time, but the output energy would be lower due to the low stress in the piezoelectric material.

4. Evaluation of the performance of the energy harvesting floor tile

4.1. Energy harvesting floor tile and performance evaluation method

The prototype validated as described in Section III, a $430 \times 430 \times 70.50 \text{ mm}^3$ energy harvesting floor tile was constructed of 24 unimorph PZT cantilevers as shown in Fig. 11. The air gaps d_1 and d_2 varied from 2–5 and 16–19 mm, respectively; they could not be set to one fixed distance because of the slightly different curvature of the unimorph PZT cantilevers obtained from the manufacturer. A full wave bridge rectifier consisted of small signal Schottky diodes (BAT 46) was used with each PZT cantilever and electrically parallelly connected to other rectifiers as shown in Fig. 12(b). A parallel circuit was used to sum the output currents from all PZT cantilevers. Its presence was due to each PZT producing only a low current even though it could generate a high voltage.

Three kinds of evaluation were performed: evaluation of the energy harvesting performance of one then 24 PZT cantilevers; the effect on energy harvesting performance of the placement location of footsteps; and the energy harvesting performance of the tile in a real scenario. Firstly, the energy harvesting performances of one PZT cantilever and 24 PZT cantilevers were investigated with various load resistors as shown in the Fig. 12(a) and (b). Each of three randomly selected PZT cantilevers was performance tested. The performance of all 24 connected PZT cantilevers was then evaluated. The load resistor that maximized the power transfer of all of

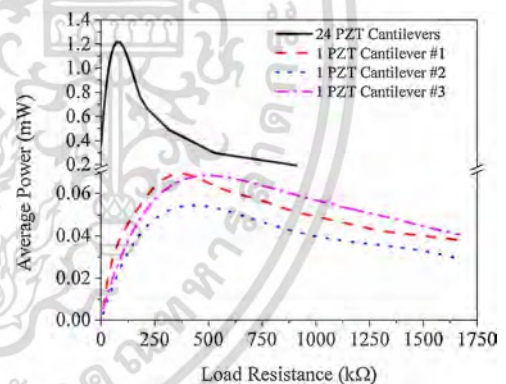


Fig. 13. The average power of one unimorph PZT cantilever and 24 paralleled unimorph PZT cantilevers.

these cantilevers was selected as the optimal load resistor for the other kinds of evaluation. Secondly, the output energy generated by stepping on each different location of the energy harvesting floor was measured and compared. The results would show whether the performance of the tile was consistent or not when it was stepped on its different areas hence they would indicate whether the tile was too big or not. And lastly, the tile’s energy harvesting performance when it was mounted and actually stepped on by a pedestrian was determined. The result would indicate whether the amount of the harvested energy would be sufficient or not for supplying a typical wireless sensor node.

5. Results and discussion

The experimental results of first test are shown in Fig. 13. By exciting the energy harvesting floor with a single foot step, the average output power per one PZT cantilever were 0.069, 0.054,

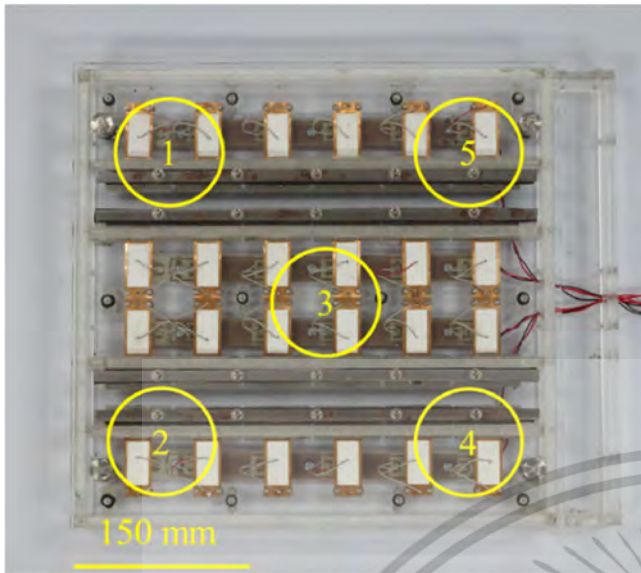


Fig. 14. Numbered locations on the cover plate.

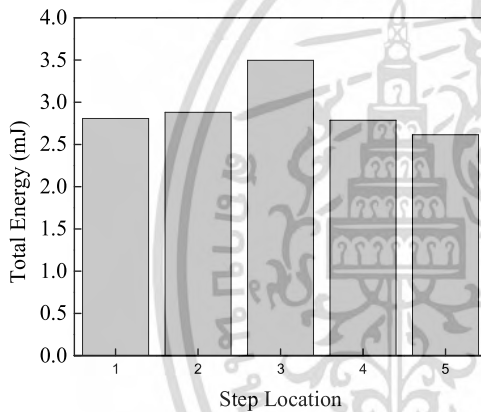


Fig. 15. Output energy generated by a step that landed on different locations of the energy harvesting floor tile.

and 0.068 mW at optimal load resistances of 377.21, 377.21, and 448.90 k Ω for cantilever #1, #2 and #3, respectively. Their different average output power varied with their vertical displacement (air gap d_1). The #1 and #3 PZT cantilevers with an air gap d_1 of approximately 4 mm were able to generate a higher average power than #2 with an air gap d_1 of approximately 3 mm. Since the air gaps d_1 that fixed the vertical displacement of many PZT cantilevers were shorter than 4 mm, the average output power from paralleled 24 PZT cantilevers was only 1.24 mW at optimal load resistance of 74.44 Ω k, not the total sum of 1.65 mW as expected. This demonstrates that it is possible to obtain the highest conversion efficiency by fine-tuning the air gap distance of every piezoelectric cantilevers properly or, simpler, if we can obtain cantilevers from a manufacturer with very tight tolerance of their curvature so that no air-gap tuning is needed, we will be able to achieve the highest conversion efficiency.

For the second test, the energy harvesting floor was stepped on at five numbered locations shown in Fig. 14. The total output energy of 2.80, 2.87, 3.49, 2.78, and 2.61 mJ were respectively obtained as exhibited in Fig. 15. The experimental results show that stepping on the location #3 was better than any other locations, since the force could distribute evenly throughout the cover plate, resulting in even movement of the iron bars mounted under the plate relative to the permanent magnet mounted on the PZT cantilevers, thus

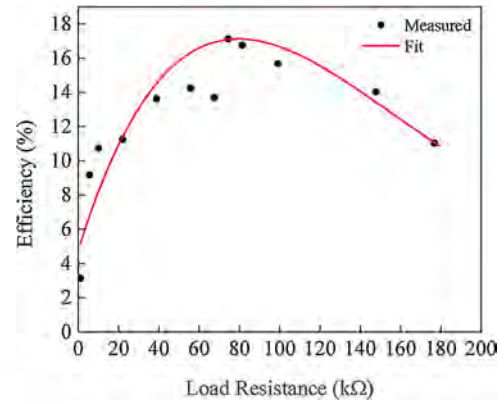


Fig. 16. Energy conversion efficiency versus load resistor values.

inducing all cantilevers evenly and consistently. On the other hand, stepping on the cover plate at a corner (First, Second, Fourth or Fifth location) could compress the assembly only locally around that corner because the distributed force to the other corners was low and could not compress down the supporting springs at those corners sufficiently. Thus, only some of the 24 PZT cantilevers were excited. This result suggested to us that the production floor tile should be of a smaller size such that the cover plate will be evenly pressed down by a foot step no matter what location on the plate it lands on.

With step landing on the optimal location #3, the energy conversion efficiency can be examined in the quantitative relation between the amount of the output electrical energy and the input mechanical energy. The input mechanical energy was found from the potential energy stored in a PZT cantilever based on the displacement and effective spring constant by the following equations,

$$E_{Input} = \frac{1}{2}k_{eff}z_0^2, \quad (14)$$

$$k_{eff} = \omega_n^2 M, \quad (15)$$

where k_{eff} represented effective spring constant, z_0 was the tip displacement of a PZT cantilever, ω_n was the resonant frequency of a freely oscillating PZT cantilever, and M was the seismic mass attached to the tip of a freely oscillating PZT cantilever. The resonant frequency of a freely oscillating PZT cantilever was found from the output AC voltage in Fig. 7, which was approximately 10.54 Hz. Fig. 16 demonstrates the measured conversion efficiency with various load resistors; as can be seen, the greatest conversion efficiency was 17.12% at the optimal load resistor of 74.44 k Ω .

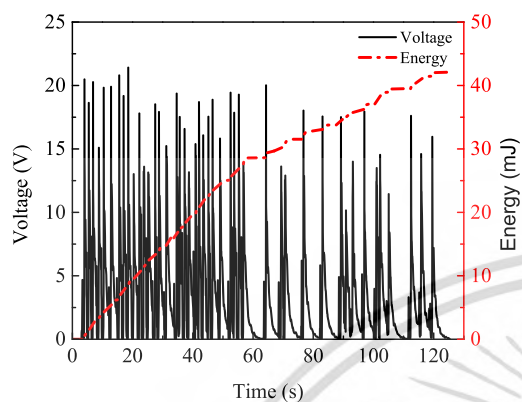
In the final test, the energy harvesting floor tile was placed on a passageway in front of a classroom where 45 students had to walk by and step on it. In this scenario, the output voltage and trend of harvestable energy over time were recorded and calculated and are shown in Fig. 17. The amplitudes of the output DC voltage were in the range of 10.15–21.41 V. The different voltage values were not due to the weight of each pedestrian, rather it was due to the pedestrians not stepping on the same location on the cover plate every time as discussed above. The total output energy derived from this experiment was 42.09 mJ. The average energy per one step was approximately 0.93 mJ.

Since the concept of this work is to employ the energy harvesting floor tile in the field of smart city, for providing a sustainable power source to low-power electronic devices, its total output energy was assumed to supply low-power wireless sensor nodes presented in [21,22,23], and shown in Table 2. The supplied energy can power an accelerometer, a capacitive strain gauge, and smoke detecting wireless sensor nodes to operate for approximately 1.60, 70.15, and 8,503.03 s, respectively. These wireless sensor nodes usually oper-

Table 2

Estimation of operational time of a low-power wireless sensor node assumed powered by output energy from actual pedestrian steps.

Reference	Wireless sensor node	Power consumption (mW)	Operational time (s)
Thapanun et al. [21]	Accelerometer	26.31	1.60
Zeiser, R et al. [22]	Capacitive strain gauge	0.6	70.15
Luis, Juan A et al. [23]	Smoke detecting	4.95×10^{-3}	8,503.03

**Fig. 17.** Output voltage and energy generated by many pedestrians stepping on the energy harvesting floor tile.

ate in both hibernated and active states in order to reduce power consumption; therefore, it is feasible to store the harvested energy in a capacitor during the node's hibernated state for sufficient use in the further duty cycle of data tracking and transmission. It should be noted that the relatively high amount of energy found in this study was from using an optimal resistor as a load. In real applications, some amount of the energy achieved in this experiment will be lost when it is stored in a capacitor as a power source for a wireless device due to self-discharge of the capacitor and leakage current in the electronic components when nobody is stepping on the floor tile. The leakage current can be minimized by optimizing the energy management circuit and using low-power electronic components [24,25].

6. Conclusion and future development

An energy harvesting floor tile with frequency up-conversion mechanism was designed and realized in this study. The frequency up-conversion was achieved by using restoring forces from springs to rapidly separate an iron bar away from a permanent magnet where they were attracted to each other via magnetic force. Too large a displacement of the unimorph cantilever could cause a crack in the piezoelectric layer; this situation was examined then prevented from happening further by using a stopper. The airgap between the permanent magnet and the iron bar strongly influenced the energy generation; the relationship was analyzed by both a Finite Element Method (FEM) and an experiment. When the airgap was large enough to diminish the magnetic force attracting the iron bar to zero, an oscillating PZT cantilever gave the maximum output energy. Validation of the designed mechanism was made with a tile with one unimorph PZT cantilever. The results suggested that even though the PZT cantilever used in this research had a problem of laminated layers between piezoelectric layer and elastic layer peeling off from each other, the prototype was successful with respect to frequency up-conversion mechanism with good energy conversion efficiency. The energy harvesting floor tile was then scaled up to consist of 24 PZT cantilevers and used in a performance evaluation experiment. It was observed that the differences in the curvature of the PZT cantilevers and the large size of energy harvesting floor could reduce the total output energy. The

former issue was dealt with by fine-tuning individually the amount of displacement that each cantilever could travel, while the latter issue would be dealt with in a future work by making the floor tile smaller. In an actual test having people walking and stepping on the floor tile for 45 steps, it was found that this number of steps could provide high enough harvested energy to activate a few low-power wireless sensor nodes.

For a future work, we will design a more robust piezoelectric cantilever with no lamination between piezoelectric layer and elastic layer so that no fine-tuning of cantilever displacement will be needed. In addition, another goal is to increase the output energy by optimizing the shape of the piezoelectric cantilever and the size of the energy harvesting floor tile as well as using a higher-energy-output piezoelectric material.

Acknowledgements

Mr. Phosy Panthongsy would like to express his sincere appreciation to the AUN/SEED-Net for the full financial support of his PhD degree education. The authors would like to thank King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL) and Synchrotron Light Research Institute (SLRI) for providing excellent research facilities and thank to Mr. Somphong Suphachiaraphan for sharing the useful information on the mechanism design.

References

- [1] F. Peano, T. Tambosso, Design and optimization of a MEMS electret-based capacitive energy scavenger, *J. Microelectromech. Syst.* 14 (2005) 435–529.
- [2] P. Glynn-Jones, M.J. Tudor, S.P. Beeby, N.M. White, An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems, *Sens. Actuators A* 110 (2004) 344–349.
- [3] D. Shen, S.-Y. Choe, D.-J. Kim, Analysis of piezoelectric materials for energy harvesting devices under high-g vibrations, *Jpn. J. Appl. Phys.* 46 (2007) 6755–6760.
- [4] S. Roundy, P.K. Wright, J. Rabaye, A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes, *Comput. Commun.* 26 (2003) 1131–1144.
- [5] S. Roundy, P.K. Wright, A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics, *Smart Mater. Struct.* 13 (2004) 1131–1142.
- [6] C.B. Williams, R.B. Yates, Analysis of a micro-electric generator for microsystems, *Sens. Actuators A Phys.* 52 (1996) 8–11.
- [7] H. Kulah, K. Najafi, Energy scavenging from low-frequency vibrations by using frequency up-conversion for wireless sensor applications, *IEEE Sens. J.* 8 (no. 3) (2008) 261–268.
- [8] M. Umeda, K. Nakamura, S. Ueha, Analysis of the transformation of mechanical impact energy to electric energy using piezoelectric vibrator, *Jpn. J. Appl. Phys.* 35 (5B) (1996) 3267–3273.
- [9] M. Umeda, K. Nakamura, S. Ueha, Energy storage characteristics of a piezo-generator using impact induced vibration, *Jpn. J. Appl. Phys.* 36 (5B) (1997) 3146–3151.
- [10] M. Renaud, P. Fiorini, R. van Schaijk, C. Van Hoof, Harvesting energy from the motion of human limbs: the design and analysis of an impact-based piezoelectric generator, *Smart Mater. Struct.* 18 (2009), 035001.
- [11] H. Kulah, K. Najafi, Energy scavenging from low-frequency vibrations by using frequency up-conversion for wireless sensor applications, *IEEE Sens. J.* 8 (no. 3) (2008) 261–268.
- [12] P. Janphuang, R.A. Lockhart, D. Isarakorn, S. Henein, D. Briand, N.F. de Rooij, Harvesting energy from a rotating gear using an AFM-like MEMS piezoelectric frequency up-converting energy harvester, *J. Microelectromech. Syst.* 24 (June (no. 3)) (2015) 742–754.
- [13] M. Pozzi, M. Zhu, Plucked piezoelectric bimorphs for knee-joint energy harvesting: modeling and experimental validation, *Smart Mater. Struct.* 20 (no. 5) (2011) 055007–055016.
- [14] P. Pillatsch, E.M. Yeatman, A.S. Holmes, A piezoelectric frequency up-converting energy harvester with rotating proof mass for human body application, *Sens. Actuators A Phys.* 206 (2014) 178–185.

- [15] H.T. Luong, N.S. Goo, Use of a magnetic force exciter to vibrate a piezocomposite generating element in a small scale windmill, *Smart Mater. Struct.* 21 (2012), 025017.
- [16] Y. Kuang, Z. Yang, M. Zhu, Design and characterization of a piezoelectric knee-joint energy harvester with frequency up-conversion through magnetic plucking, *Smart Mater. Struct.* 25 (8) (2016), p. 085029.
- [17] X. Gao, W.H. Shih, W.Y. Shih, Induced voltage of piezoelectric unimorph cantilevers of different nonpiezoelectric/piezoelectric length ratios, *Smart Mater. Struct.* 18 (no. 12) (2009) 125018–125025.
- [18] L. Gu, C. Livermore, Impact-driven, frequency up-converting coupled vibration energy harvesting device for low frequency operation, *Smart Mater. Struct.* 20 (March (no. 4)) (2011) 045004–045013.
- [19] Tom V. Mathew, Pedestrian studies, *Lect. Notes Traffic Eng. Manage.* (2014).
- [20] P. Janphuang, R.A. Lockhart, D. Isarakorn, S. Henein, D. Briand, N.F. de Rooij, Harvesting energy from a rotating gear using an AFM-like MEMS piezoelectric frequency Up-converting energy harvester, *J. Microelectromech. Syst.* 24 (June (no. 3)) (2015) 742–754.
- [21] Thapanun Sudhawiyangkul, Don Isarakorn, Design and realization of an energy autonomous wireless sensor system for ball screw fault diagnosis, *Sens. Actuators A* 258 (2017) 49–58.
- [22] R. Zeiser, T. Fellner, J. Wilde, Capacitive strain gauges on flexible polymer substrates for wireless, intelligent systems, *J. Sens. Sens. Syst.* 3 (1) (2014) 77–86, Gottingen.
- [23] J.A. Luis, J.A.G. Galán, J.A. Espigado, Low power wireless smoke alarm system in home fires, *Sensors* 15 (2015) 20717–20729.
- [24] A. Miah, Jae Y. Halim, Park, Theoretical modeling and analysis of mechanical impact driven and frequency up-converted piezoelectric energy harvester for low-frequency and wide-bandwidth operation, *Sens. Actuator A: Phys.* 208 (2014) 56–65, ISSN 0924-4247.
- [25] D. Alghisi, S. Dalola, M. Ferrari, V. Ferrari, Triaxial ball-impact piezoelectric converter for autonomous sensors exploiting energy harvesting from vibrations and human motion, *Sensor Actuator A: Phys.* 233 (2015) 569–581, ISSN 0924-4247.

Biographies



Phosy Panthongsy received the B.Eng. Degree in Electronic Engineering from National University of Laos (NUOL), Laos, in 2014, and the M.Eng. Degree in Computing in Engineering Systems from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand, in 2016. He has been a PhD student at Department of Instrumentation and Control engineering, KMITL. His research interests are in the energy harvesting systems, micro power management, and robotics.



Don Isarakorn is currently an Assistant Professor of Electrical Engineering with the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand. He is also the Head of the Multi-Scale Electromechanical Systems Laboratory with the Department of Instrumentation and Control Engineering, where he leads the activities on the mechatronic system integration. He received the B.Eng. degree in electronics engineering and the M.Eng. degree in control engineering from KMITL in 2000 and 2003, respectively, and the Ph.D. degree in piezoelectric microelectromechanical systems from the Sensors, Actuators, and Microsystems Laboratory, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, in 2011. His main research interests include piezoelectric materials for sensing and actuating applications, energy harvesting systems, robotics, mechatronics, automatic control systems, and biomedical instruments.

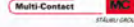


Pattanaphong Janphuang received his B.Eng. degree in electrical engineering from King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, in 2001, and M.Sc. in micro and nanotechnology from University of Neuchâtel, Switzerland, in 2009 respectively. He obtained his Ph.D. degree in the field of Microsystems and microelectronics from the Institute of Microengineering, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland, in 2014. He is currently a beamline scientist at BL6a: Deep X-ray Lithography and the Chief of User Office Division at SLRI. He has been author or co-author of over 30 papers published in scientific journals and conference proceedings. His research interests include polymeric MEMS, Power MEMS and energy harvesting, and autonomous smart sensing systems.



Kazuhiko Hamamoto, was born in Nagasaki prefecture, Japan in 1966. He received B.D, M.D and Ph.D from Tokyo University of Agriculture and Technology in 1989, 1991 and 1994 respectively. He was assistant professor in Dept. of Communications Eng., Tokai University in 1994, Associate Professor in 1999, and Professor in Dept. of Information Media Technology, School of Information and Tele-communication Eng., Tokai University in 2009 and Currently, he is the Dean of School of Information and Tele-communication Eng., Tokai University. His research interest is information architecture, especially, medical image processing, human interface and virtual reality. He joins IEICE, IEEJ, IEEE, VRSJ, JSST, etc. He is a member of Technical Committee of Medical and Biological Engineering, Society of Electronics, Information and Systems, IEEJ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Institute of Control, Robotics and Systems



2018 ECTI-CON

18-21 JULY 2018,
CHIANG RAI, THAILAND

15th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL
ENGINEERING/ELECTRONICS, COMPUTER,
TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGY

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LANNA
CONFERENCE VENUE : WIANG INN HOTEL

A Test Bench for Characterization of Piezoelectric Frequency Up-Converting Energy Harvesters

Phosy Panthongsy and Don Isarakorn*
Department of Instrumentation and Control
Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, 10520 Thailand
don.is@kmitl.ac.th

Kazuhiko Hamamoto
Department of Information Media Technology,
School of Information and Telecommunication
Engineering
Tokai University
2-3-23 Takanawa Minato-ku Tokyo 108-8619 Japan

Abstract—This work focuses on the design and realization of a test bench used to characterize the performances of the piezoelectric cantilever for frequency up-converting energy harvesters. A test bench is completed by combining a frequency up-converter with an oscilloscope (Tektronix TD 3032B). The frequency up-conversion mechanism achieves the excitation on a piezoelectric cantilever through an interaction between a permanent magnet and an iron bar. In the mechanism design, the air gap between a permanent magnet and an iron bar is analyzed by Finite Element Method (FEM). After the design is verified, a test bench is fabricated and then validated with experimental study by testing the performances of a PZT-5H bimorph (T220-H4-503X, Piezo Systems, Inc.); the considered performances are resonant frequency, average output power, total output energy and energy conversion efficiency. The experimental results demonstrate that a fabricated test bench is satisfactory.

Keywords—frequency up-conversion mechanism; finite element analysis; low-frequency vibration energy harvesting

I. INTRODUCTION

Energy harvesting from ambient environment has grown considerably over the last decades due to the rapid development of electronic devices with reduction of power consumption and size. The harvested energy is supplied to power the low-power consumption electronic devices and various types of wireless sensor nodes as the autonomous energy system instead of energy source from batteries, since the use of batteries has the problem on limited energy storage capacity and lifetime. Moreover, the depleted batteries are the toxic waste, the recycle and disposal process of which are very expensive. The main ambient energy harvesting strategies which have been reported are used to harvest energy from solar, temperature gradient, and vibration sources [1-3]. Among them, the vibration energy harvesting has been specially concentrated because the vibration is ubiquitous and easily found in ambient environment such as human body, industrial machines, bridges, and transportation. The vibration energy harvesting devices are commonly based on piezoelectric, electrostatic and electromagnetic transductions [4-6]. Among these transduction methods, the piezoelectric

energy harvester has been attracted with the great of interest by many researchers due to its high output energy density, lower profile of structure and simple configuration [7].

Typically, the piezoelectric energy harvester can be mainly divided into resonant and non-resonant types. The resonant type piezoelectric energy harvester is optimum when its resonant frequency matches to the frequency of vibration source. The mismatch between both frequencies results in low power generation efficiency. Thus, the resonant type harvester does not present a good option to the vibration source with low and variable frequency (e.g., the human moment, machinery with low and variable speed rotary, and so on) because the frequency of vibration source is usually variant and much lower than resonant frequency of harvester. To overcome this challenge, the non-resonant type piezoelectric energy harvester has been recently investigated, which is always resonated at high frequency by frequency up-converting mechanism with regardless the input vibration. In the frequency up-converting strategy, piezoelectric cantilever integrated to harvester is induced the initial deflection and then released to freely oscillate at high frequency [8] - [10]. Moreover, the energy conversion efficiency can be much increased, when the piezoelectric cantilever providing a good energy harvesting performance is integrated to the harvester. Therefore, the work relating to the selection of piezoelectric cantilever is concentrated, especially the fabrication of instrumentation for characterize the piezoelectric cantilever performance. Previously, there are some instrumentations that have been reported [11] - [13], however, they are designed for resonant harvesters which do not support to the harvester with frequency up-converting mechanism. Therefore, the aim of this research is to design and fabricate a test bench for characterization of the piezoelectric cantilever based on frequency up-conversion. In this paper, the overall system of a test bench is firstly reported, and then the structural configuration and method for piezoelectric cantilever characterization is given. After that, the validation of a test bench is illustrated. Finally, the conclusion is drawn.

(AUN/SEED-Net, JICA) and NRCT

II. OVERALL OF SYSTEM

Following to the operational behavior of piezoelectric energy harvester with frequency up-converting mechanism, a test bench can be designed. Its general system is shown as a block diagram in Fig.1, which consists of an oscilloscope (Tektronix TD 3032B) and a frequency up-converter. The oscilloscope is used to measure the output electricity from piezoelectric cantilever excited by the frequency up-converter. The frequency up-conversion strategy is based on magnetic plucking. As the design, the frequency up-converter is mainly divided into mechanism and control circuit parts. Its mechanism is illustrated in Fig.2. A plastic mass is a connector between tip of piezoelectric cantilever and a permanent magnet. A motor shaft is attached to a snail cam for transforming the rotary motion into the linear motion. When the greatest radial dimension of snail cam rotates to match a follower, a cover plate supported by the springs is pushed down, thus the iron bar attached underneath of a cover plate is moved closer to a permanent magnet at where high magnetic field. Meanwhile, a permanent magnet will bend a piezoelectric cantilever to attach the iron bar via the magnetic attractive force, while the displacement of piezoelectric cantilever is localized by the topper. Therefore, when a snail cam leaves a follower, the spring will suddenly pluck the cover plate up. It rapidly releases the iron bar from permanent magnet, and results in the free oscillation with high frequency of piezoelectric cantilever. As the time interval (t_d) of matching between the greatest radial dimension and a follower without controller is very short, and the permanent magnet cannot obviously attach to the iron bar resulting in inconstant mechanical input and unclear electrical output of harvester. The control circuit is designed to define a longer time interval t_d . The rotation of motor is controlled by using the microcontroller (ATmega32) through an integrated circuit chip (L293D driver motor), while the matching between the greatest radial dimension and a follower is tracked by a limit switch.

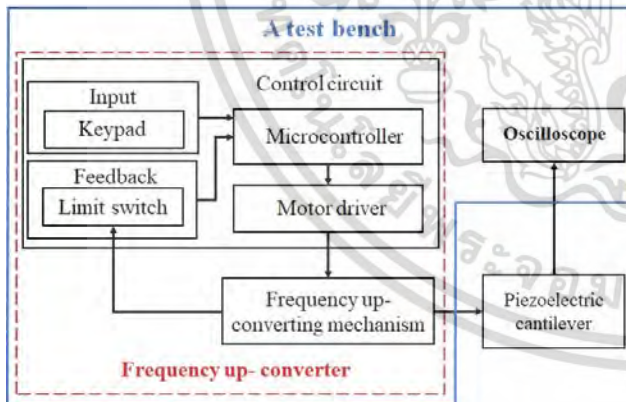


Fig. 1. Block diagram of overall system

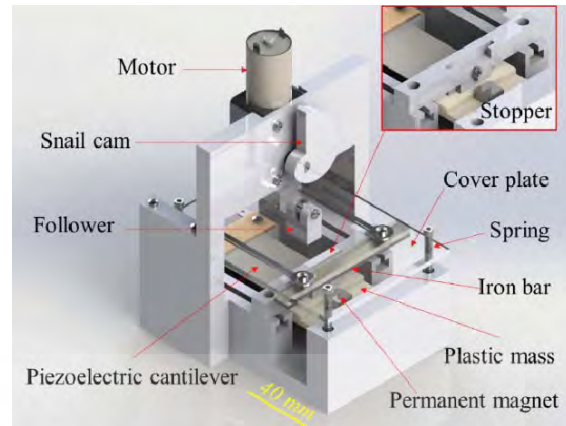


Fig. 2. Mechanism of frequency up-converter

III. STRUCTURAL CONFIGURATION AND CHARACTERIZATION METHOD

In the structural setup of a test bench, an airgap (d_a) between permanent magnet glued on a plastic mass and iron bar should be large enough. If an iron bar is positioned at where high magnetic field density, a permanent magnet will try to attract an iron bar via strong magnetic attractive force, thus the oscillating piezoelectric cantilever can be paused. It causes the unclear experimental results. Therefore, an iron bar should be located at where the magnetic field density equal zero or approximate zero. In this test bench, a $10 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}^3$ permanent magnet (NeFeB-N35) and an $86 \times 10 \times 2 \text{ mm}^3$ iron bar are used. The airgap (d_a) is considered in 2D simulation using the finite element analysis with a FEMM 4.2 software. In simulation, the magnetic flux density across an iron bar for the different distances of airgap (d_a) were observed. As the results shown in Fig. 3, the magnetic flux density across an iron bar was diminished to approximately zero when the length of airgap (d_a) reaches to 18 mm. Therefore, an iron bar was located at where far from permanent magnet approximately 18 mm.

For characterization strategy, a frequency up-converter was controlled to excite a piezoelectric cantilever with a single pluck. Then, the performance of piezoelectric cantilever was investigated with various resistive loads. The average output power (P_{Avg}) supplied to resistive load since the free oscillation of a piezoelectric began could be found by equation

$$P_{Avg}(t_n) = \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} \frac{V_L^2(t)}{R_L} dt \quad (1)$$

where $V_L(t)$ is the transient voltage across resistive load and R_L represents the load resistance and t_n is the time since the free oscillation began.

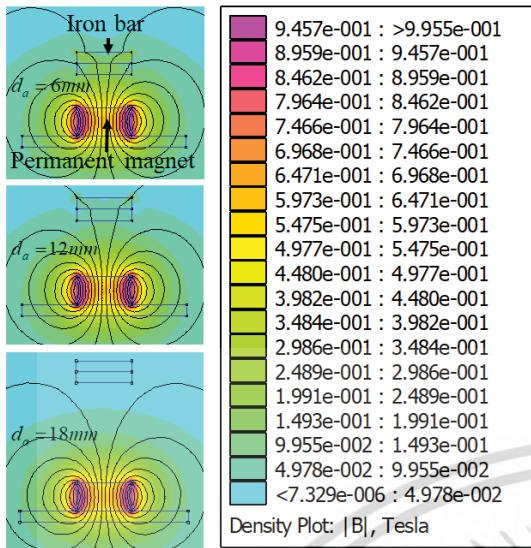


Fig. 3. Simulation results of magnetic flux density across the iron bar

With sampling interval (Δt) of voltage measurement of oscilloscope, the total output energy ($E(t_n)$) is calculated by using the following expression

$$E(t_n) = \sum_{m=1}^n \frac{V_L^2(t_m)}{R_L} \Delta t. \quad (2)$$

In addition to the average output power and total output energy exhibited above, the energy conversion efficiency also can be determined, which was defined as the ratio between output electrical energy and the input mechanical energy. The input mechanical energy (E_{input}) is approximately the potential energy stored in a piezoelectric cantilever as given by

$$E_{input} = \frac{1}{2} k_{eff} z^2 \quad (3)$$

where z is the displacement of piezoelectric cantilever and k_{eff} is the effective spring constant derived from the resonant frequency of piezoelectric cantilever (ω_n) and net weight of mass at the tip of piezoelectric cantilever (M) as

$$k_{eff} = \omega_n^2 M. \quad (4)$$

IV. VALIDATION OF A TEST BENCH

The experiment in this section was implemented to validate a test bench by characterizing the performance of a PZT-5H bimorph with a dimension of 0.51 x 31.8 x 63.5 mm³ (T220-H4-503X, Piezo Systems, Inc.). As the experimental set up shown in Fig. 4, the stopper was used to localize the

displacement of a bimorph at 2 mm, and the net weight of mass at the tip of bimorph including a permanent magnet, screw and plastic mass was 12.77 g. Being applied the single pluck with time interval (t_d) of 0.1 s, the performance of a bimorph could be characterized as the results shown in Fig.5. Figure 5 (a) illustrated the generated open circuit voltage. The peak-to-peak voltage was 84.7 V. According to the time period of oscillation (T) in the transient waveform, the resonant frequency of a bimorph was 20.83 Hz; the resonant frequency equals to 1/T. By directly connecting the various resistor to a bimorph, the average output power dissipated in the various resistive loads could be found as shown in the Fig.5(b). The maximum average power of 578.28 μ W was observed at optimal load resistance of approximately 99 k Ω . The load resistance was the combined resistance of load resistor and oscilloscope probe in parallel. Figure 5 (c) showed the measured voltage across an optimal load resistor and total energy calculated by using an equation (2). A bimorph could generate the total energy of 537.33 μ J. The measured energy-conversion efficiency as a function of load was presented in Fig. 5 (d). The greatest conversion efficiency was found to be 32.42 %.

The experimental results above prove that a test bench can be used to characterize piezoelectric cantilever for the piezoelectric energy harvester based on frequency up-conversion.

V. CONCLUSION

This paper presented a test bench for characterizing the piezoelectric cantilever based on frequency up-conversion. The overall system with operational method was reported. The frequency up-converter based on magnetic plucking was designed to excite the piezoelectric cantilever. The interaction between permanent magnet and iron bar was used to induce the initial deflection in piezoelectric cantilever before letting it to freely oscillate at high frequency. In mechanism design, the airgap between permanent magnet and iron bar was optimized using the Finite Element Analysis (FEA). After that, a test bench was fabricated and then validated with experimental study.

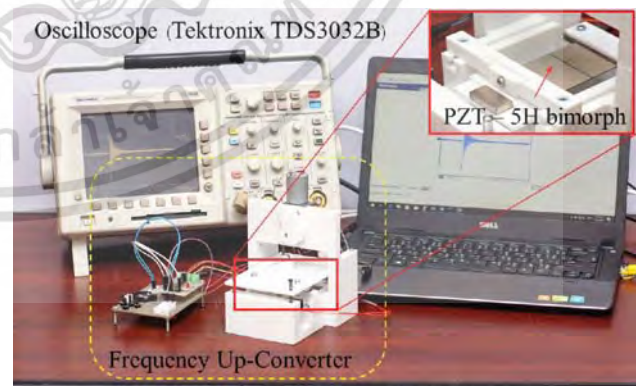


Fig. 4. Experimental setup

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the National Research Council of Thailand for financial support. Mr. Phosy Panthongsy would like to acknowledge the AUN/SEED-Net for the full financial support in his PhD degree education.

REFERENCES

- [1] D. Brunelli, L. Benini, C. Moser, L. Thiele, "An Efficient Solar Energy Harvester for Wireless Sensor Nodes," *Design, Automation and Test in Europe*, March 2008.
- [2] R. J. M. Vullers, R. Van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof, and R. Mertens, "Micro power energy harvesting," *Solid-state Electron.*, Vol. 53, pp.684-693, 2009.
- [3] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White, "Energy harvesting vibration sources for microsystem applications," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. R175-R195, 2006.
- [4] D. Shen, S. -Y. Choe, and D. -J. Kim, "Analysis of piezoelectric materials for energy harvesting devices under high-g vibrations," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 46, pp. 6755-6760.
- [5] F. Peano and T. Tambosso, "Design and optimization of a MEMS electret-based capacitive energy scavenger," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 14, pp. 435-529, 2005.
- [6] P. Glynn-Jones, M. J. Tudor, S. P. Beeby, and N. M. White, "An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems," *Sens. Actuators, A*, Vol. 110, pp. 344-349, 2004
- [7] S. Roundy and P. K. Wright, "A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics," *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, pp. 1131-1142, 2004
- [8] J. Rastegar, and R. Murray, "Novel two-stage piezoelectric-based electrical energy generators for low and variable speed rotary machinery," *in proc. SPIE*, vol. 7288, 2009, pp. 72880B-1-72880B-8.
- [9] M. Pozzi, and M. Zhu, "Plucked piezoelectric bimorphs for knee-joint energy harvesting: modeling and experimental validation," *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, no. 5, 2011, pp. 055007-055016.
- [10] P. Janphuang, D. Isarakom, D. Briand and N. F. de Rooij, "Energy harvesting from a rotating gear using an impact type piezoelectric MEMS scavenger," *2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, Beijing*, 2011, pp. 735-738.
- [11] M. Ferrari, V. Ferrari, D. Marioli, and A. Taroni, "Modeling, fabrication and performance measurements of a piezoelectric energy converter for power harvesting in autonomous microsystems," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, no. 6, pp. 2096-2101, Dec. 2006.
- [12] M. Karami, O. Bilgen, D. Inman, and M. Friswell, "Experimental and analytical parametric study of single-crystal unimorph beams for vibration energy harvesting," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 58, no. 7, pp. 1508-1520, Jul. 2011.
- [13] J. J. Ruan, R. A. Lockhart, P. Janphuang, A. V. Quintero, D. Briand and N. de Rooij, "An Automatic Test Bench for Complete Characterization of Vibration-Energy Harvesters," *in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, no. 11, pp. 2966-2973, Nov. 2013.

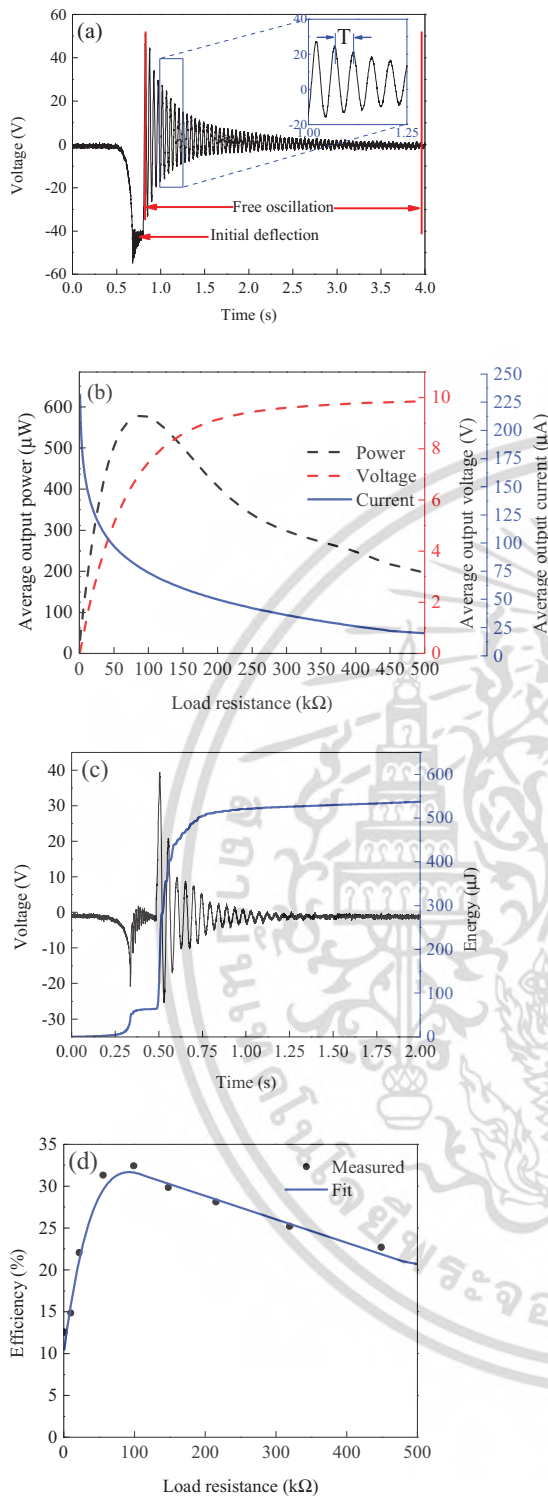


Fig. 5. The characterization results; (a) generated open circuit voltage; (b) average output power, voltage and current across resistive loads; (c) output voltage and total energy across an optimal load resistor; (d) measured energy conversion efficiency



CALL FOR PAPERS

THE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING,
APPLIED SCIENCES AND TECHNOLOGY
JULY 2-5, 2019 LUANG PRABANG, LAOS

ສະບາຍດີ ຫລວງພະບາງ



The International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST) was inaugurated in 2007 to provide opportunities for enhancing collaboration and exploring current interdisciplinary topics. This year is the 5th event and being held in Laos, a country with beautiful nature and culture.



TOPICS

Submissions are solicited on a wide variety of topics related to Engineering, Applied Sciences and Technology, but not limited to:

- TRACK 1 - INDUSTRIAL ENGINEERING, MATERIALS AND MANUFACTURING**
- TRACK 2 - MECHANICAL, MECHATRONICS AND CIVIL ENGINEERING**
- TRACK 3 - FOOD, CHEMICAL AND AGRICULTURAL ENGINEERING**
- TRACK 4 - TELECOMMUNICATIONS, COMPUTER SCIENCE, INSTRUMENTATION AND CONTROL, ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING**
- TRACK 5 - ACOUSTIC AND MUSIC ENGINEERING, THE SCIENCE AND APPLICATIONS OF MUSIC TECHNOLOGY, AND OTHER RELATED FIELDS**

The accepted conference papers in Track 4 and 5 will be submitted to the proceedings in **IEEE Xplore** Digital Library (indexed by **EI Compendex** and **SCOPUS**).

CONTACTS

WWW.ICEAST2019.ORG
Email: iceast2019@kmitl.ac.th
Facebook: iceast2019

IMPORTANT DATES

Online Submission Open	Jan 15, 2019
Paper Submission Deadline	Feb 28, 2019
Notification of Acceptance	Apr 20, 2019
Final Paper Submission Deadline	May 15, 2019
Author Registration Deadline	May 15, 2019
Conference Date	July 2-5, 2019

ເອກສານນີ້ເປັນເອກສານທີ່ສ່ວນໄວ້ສຳລັບການສຶກສາເທົ່ານັ້ນ ໄມ່ມອນຖືກນຳໄປໃຊ້ປະໂຫຍດ
ໄມ່ວ່າກຣຸນີໂຕໆ ທັງສິ້ນ ອີກທັງຫ້າມມີໃຫ້ດັດແປງເນື້ອຫາ ແລະຕ້ອງອ້າງອິງເຈົ້າຂອງເອກສານທຸກຄັ້ງທີ່ມີການນຳໄປໃຊ້

Performance and Behavior Analysis of Piezoelectric Energy Harvesting Floor Tiles

Phosy Panthongsy and Don Isarakorn*
Department of Instrumentation and
Control Engineering, Faculty of
Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, 10520 Thailand
don.is@kmitl.ac.th

Kazuhiko Hamamoto
Department of Information Media
Technology,
School of Information and
Telecommunication Engineering
Tokai University
2-3-23 Takanawa Minato-ku Tokyo
108-8619 Japan

Pattanaphong Janphuang
Synchrotron Light Research Institute
111 University Avenue, Muang
District, Nakhon Ratchasima, 30000
Thailand

Abstract—This paper presents the performance and behavior analysis of two unlike piezoelectric energy harvesting floor tiles in which they are functioned with different frequency up-conversion strategies to achieve the high energy conversion efficiency from low and variable-frequency vibration as the human footstep. One of such strategies is to convert the frequency of piezoelectric bimorph up through the magnetic interaction between a permanent magnet and an iron plate, while another one is achieved on that through the mechanical impact between a cover plate and a wall of the floor tile. Experimentally, the floor tiles having one piezoelectric bimorph inside of them are prototyped and then mounted to their individual input-exciting kit to investigate the energy harvesting performance. The input-exciting kits are employed to simulate the human footstep on floor tiles. The results show that the floor tile with frequency up-converting mechanism based on mechanical impact should be a better option for energy harvesting from human footstep due to the low-profile structure and good energy harvesting performance. Moreover, its operational way can result in long-lasting piezoelectric bimorph. When a cover plate is actuated to move down with the velocity of 54.13 mm/s and then released, the floor tile can produce the average power of 0.82 mW at load resistance approximately of 55.68 k Ω .

Keywords— Piezoelectric energy harvester, frequency up-conversion techniques, energy harvesting floor tiles, low-frequency vibration energy harvesting

I. INTRODUCTION

With plenty of vibrations available in the surrounding environment, converting kinetic energy into useable electricity for powering the low-power wireless electronic devices is of much interest. The vibration energy harvesting is possible through three kinds of transduction approaches including electrostatic [1], [2], electromagnetic [3], [4] and piezoelectric [5], [6]. Among them, the piezoelectric energy harvester has received great attention from many researchers and become ubiquitous in a variety of wireless applications (e.g. health monitoring, structure monitoring and industrial process monitoring) due to the simple structure, ease of configuration, high output power and high energy generation efficiency [7]. Its electricity output is commonly provided to power up the aforementioned electronic devices where hard wiring and, furthermore, is used instead of the power source from batteries to avoid several issues such as depleted battery replacement, limited energy storage capacity and toxic waste.

One difficulty in vibration energy harvesting is the low and variable frequency of vibration sources, which usually deviate from the resonant frequency of harvester. The

mismatch between both frequencies causes a decrease in energy conversion efficiency. To overcome this problem, the piezoelectric energy harvester combined with frequency up-converting mechanism has been investigated [8]–[10]. The frequency up-converting mechanism is used to deflect the piezoelectric component of harvester initially and then leave it to freely oscillate at high frequency, regardless of the external input vibration. The initial deflection in frequency up-conversion can be performed by non-contact magnetic plucking or mechanical contact. These methods present the best performance depending on the application.

Therefore, the purpose of this paper is to examine the performance and behavior of two energy harvesting floor tiles operated with different types of frequency up-converting mechanism for increasing the efficiency in human footstep energy harvesting. One of frequency up-converting mechanisms induces the initial deflection of piezoelectric cantilever through magnetic interaction and another one is based on a mechanical impact. Following the arrangement of this work, the overall structure and operational stage of both energy harvesting floor tiles is first presented. Their prototypes are then configured for evaluation of energy harvesting performance. After that, the experimental results are discussed and compared. Finally, the conclusion is given.

II. DESCRIPTION OF ENERGY HARVESTING FLOOR TILES

The overall structure and operational stage of both energy harvesting floor tiles were illustrated in this section. To make a clear statement in the further description, the energy harvesting floor tile (EHFT) with frequency up-converting mechanism based on magnetic interaction is defined to be a first EHFT and other one is a second EHFT.

A. First EHFT

The schematic drawing of the first EHFT is shown in Fig.1(a). The cover plate is placed as a tile surface supported by springs. Its underneath is attached with an iron plate. A base of a piezoelectric bimorph is fixed to the supporter, free end of which is attached to a proof mass glued with a permanent magnet; a proof mass is used to increase the strain in the piezoelectric material, leading an increase in output electricity. When the floor tile is stepped on, the cover plate is pushed down to compress the springs, thus an iron plate is attracted by a permanent magnet at where a cover plate contacts a wall. Closing between iron plate and permanent magnet causes that piezoelectric bimorph is deflected initially as shown in Fig.1(b). The displacement of piezoelectric bimorph is limited by a stopper to prevent -

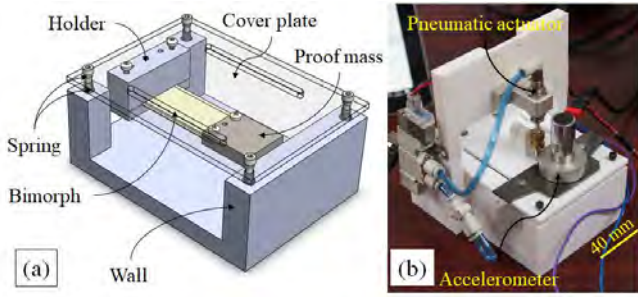


Fig. 4. (a) Schematic drawing of a second EHFT prototype and (b) its experimental setup.

TABLE I. PARAMETERS SETUP

Parameters	Dimensions	
	First EHFT	Second EHFT
Piezoelectric bimorph	71.0 x 25.4 x 0.71 mm ³	71 x 25.4 x 0.71 mm ³
Free length of bimorph	48.0 mm	48.0 mm
Mass (tainless steel)	30 x 26 x 6 mm ³	30 x 26 x 6 mm ³
Permant magnet	10 x 10 x 0.5 mm ³	-
d_1	1, 3 and 5 mm	-
d_2	18 mm	-
d_3	4 mm	4 mm

IV. EXPERIMENTAL RESULTS, DISCUSSION AND COMPARISON

In the experimental study of first EHFT, a snail cam was rotated with a fixed angular velocity of 8 rad/s to pass through the follower. The reason for fixing angular velocity is because the different input excitations have no effect on electricity output for this mechanism. Initially, the gap between a stopper and a piezoelectric bimorph (d_1) was set to 1 mm. The first EHFT generated the peak to peak voltage of 39.4 V as shown in the Fig.5. Its free oscillating frequency (f) was found to be 13.88 Hz regarding to the oscillation period (T); $f=1/T$. By changing the value of load resistor mechanically, the graphs in Fig.6 were obtained. A load resistance of approximately 55.68 k Ω at the maximum power output was chosen for studying the effect of gab d_1 on electricity output. When d_1 was increased from 1 to 3 and 5 mm, as can be seen in Fig.7, the average output power and energy went up significantly from 0.16 to 0.51 and 0.98 mW and 0.42 to 1.26 and 2.37 mJ, respectively.

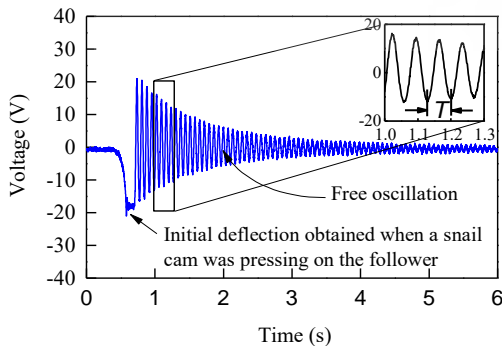


Fig. 5. Output voltage from using $d_1 = 1$ mm.

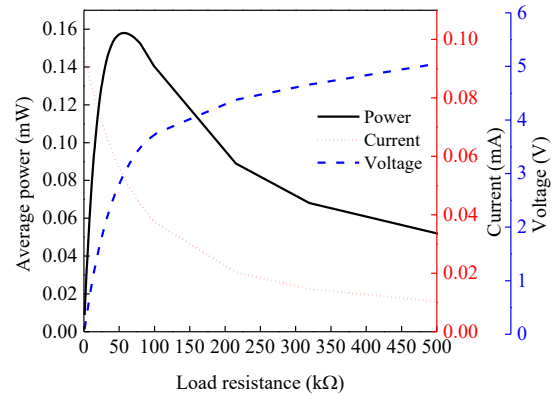


Fig. 6. Average output power with $d_1 = 1$ mm versus load resistor values

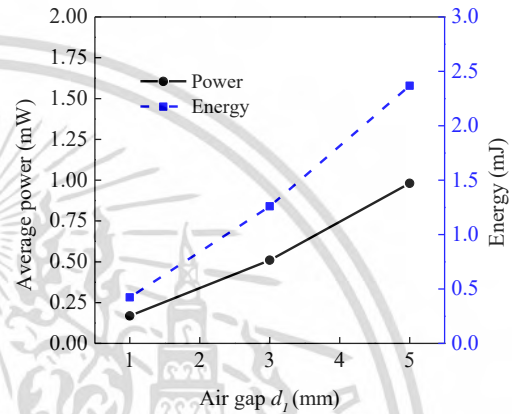


Fig. 7. Average output power and energy with increasing the gap d_1

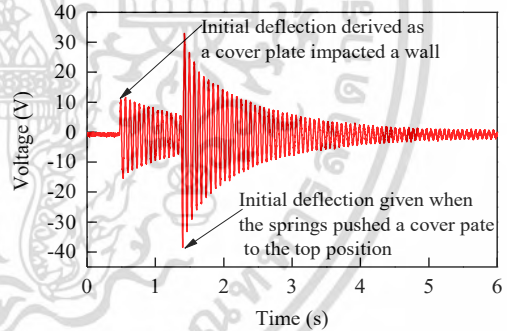


Fig. 8. Voltage generated when the cover pate was moved down with the velocity of 24.50 mm/s

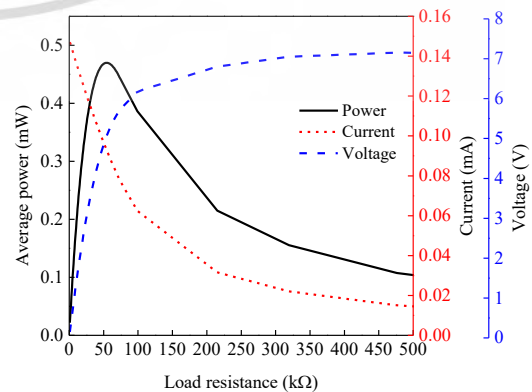


Fig. 9. Average output power across various load resistor obtained from pushing the cover plate down with the velocity of 24.50 mm/s

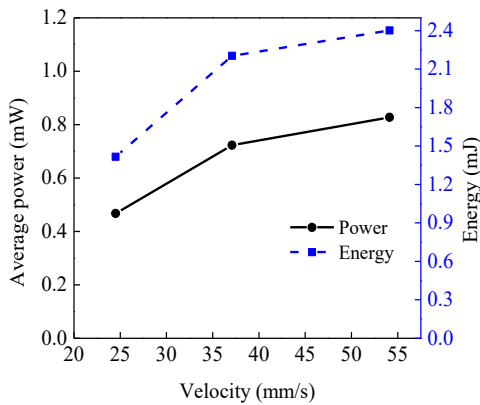


Fig. 10. Average output power and energy as the velocity of a cover plate was increased

For the second EHFT, a cover plate was pushed to move down with the velocities of 24.50, 31.10 and 54.13 mm/s. It assumed that the floor tile was stepped on by several pedestrians having different body weight. The higher velocity is for a heavyweight walker and lower for a lightweight walker. At 24.50 mm/s, the second EHFT produced the peak to peak voltage of 71.2 V with a free oscillating frequency of 14.08 Hz as illustrated in Fig.8. The load resistance of approximately 55.68 k Ω could be found at the maximum power as demonstrated in Fig.9, which was further used to investigate the effect of input excitation on electricity output. With making the velocity of a cover plate increase orderly, the average output power and energy rose from 0.47 to 0.72 and 0.82 mW and 0.96 to 1.67 and 2.40 mJ, respectively as plotted in Fig. 10. A slight increase in the amount of electricity where a velocity of the cover plate increase from 31.10 to 54.13 mm/s can rely on the relationship between a plucking proof mass and a reflected piezoelectric bimorph; a proof mass deflected piezoelectric bimorph initially with a bit larger displacement.

Through this work it was noticeable that:

- *For the first EHFT:* It had a bit complex structure, which gave the high energy conversion for using a large gap between a stopper and a piezoelectric bimorph. The direct contact between a piezoelectric bimorph and a stopper may cause a decrease in longevity of piezoelectric bimorph. In energy harvesting, varying force of input excitation, i.e. heavier or lighter walker, had no effect on electricity output. However, the electrical energy was produced only after the cover plate was unloaded, while stepping on the cover plate was for inducing the initial deflection.

- *For the second EHFT:* It could be easily configured with a simple structure. The frequency up-converting mechanism was not directly contact on piezoelectric bimorph for inducing the initial deflection, thus piezoelectric bimorph could be long-lasting. In addition, the electricity output was directly proportional to the force of input excitation, the high amount of which was observed at high velocity of a cover plate. Interestingly, the electrical energy can be harvested when the floor tile is loaded and unloaded.

Regarding to the structure profile, operational strategy and energy harvesting performance of both EHFTs, the

second EHFT is of much interest. It should be better than the first EHFT in term of the long-lasting use and harvesting energy from pedestrian in both crowded and uncrowded areas.

V. CONCLUSION

Two energy harvesting floor tiles especially aimed to harvest energy from human footstep were proposed in this paper. The different frequency up-conversion techniques used to increase the energy conversion efficiency were depicted. One of these techniques was based on magnetic interaction and another was formed on the mechanical impact. To find the best the floor tile, the comparative study of both floor tiles was implemented. Initially, their prototypes consisting of one piezoelectric inside were fabricated and then evaluated with the input-exciting kit. By considering the experimental results, structure and operational characteristic, the best floor tile could be found at last.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully thank the National Research Council of Thailand for financial support. Mr. Phosy Panthongsy would like to express his sincere appreciation to the AUN/SEED-Net for the fully financial support in his PhD degree education.

REFERENCES

- [1] L. G. W. Tvedt, D. S. Nguyen, and E. Halvorsen, "Nonlinear Behavior of an Electrostatic Energy Harvester Under Wide- and Narrowband Excitation," *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 305–316, Apr. 2010.
- [2] P. D. Mitcheson, P. Miao, B. H. Stark, E. M. Yeatman, A. S. Holmes, and T. C. Green, "MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation," *Sens. Actuators Phys.*, vol. 115, no. 2, pp. 523–529, 2004.
- [3] P. Glynn-Jones, M. J. Tudor, S. P. Beeby, and N. M. White, "An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems," *Sens. Actuators Phys.*, vol. 110, no. 1, pp. 344–349, 2004.
- [4] L. C. Rome, L. Flynn, E. M. Goldman, and T. D. Yoo, "Generating electricity while walking with loads," *Science*, vol. 309, pp. 1725–8, 2005.
- [5] D. Zhu, S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. R. Harris, "A credit card sized self powered smart sensor node," *Sens. Actuators Phys.*, vol. 169, no. 2, pp. 317–325, 2011.
- [6] N. Jackson, R. O'Keefe, F. Waldron, M. O'Neill, and A. Mathewson, "Evaluation of low-acceleration MEMS piezoelectric energy harvesting devices," *Microsyst. Technol.*, vol. 20, no. 4, pp. 671–680, Apr. 2014.
- [7] S. Roundy and P. K. Wright, "A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics," *Smart Mater. Struct.*, vol. 13, no. 5, pp. 1131–1142, Aug. 2004.
- [8] Y. Zhang and C. S. Cai, "A retrofitted energy harvester for low frequency vibrations," *Smart Mater. Struct.*, vol. 21, no. 7, p. 075007, Jun. 2012.
- [9] P. Pillatsch, E. M. Yeatman, and A. S. Holmes, "A piezoelectric frequency up-converting energy harvester with rotating proof mass for human body applications," *Sens. Actuators Phys.*, vol. 206, pp. 178–185, 2014.
- [10] Y. Kuang, Z. Yang, and M. Zhu, "Design and characterisation of a piezoelectric knee-joint energy harvester with frequency up-conversion through magnetic plucking," *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 8, p. 085029, Jul. 2016.
- [11] P. Janphuang, R. A. Lockhart, D. Isarakorn, S. Henein, D. Briand, and N. F. de Rooij, "Harvesting Energy From a Rotating Gear Using an AFM-Like MEMS Piezoelectric Frequency Up-Converting Energy Harvester," *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 742–754, Jun. 2015.



คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

- การประดิษฐ์
- การออกแบบผลิตภัณฑ์
- อนุสิทธิบัตร

ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้
ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522
แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2535
และ พระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2542

สำหรับเจ้าหน้าที่	
วันรับคำขอ 14 ส.ย. 2561	เลขที่คำขอ
วันยื่นคำขอ 14 ส.ย. 2561	1803001351
สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	
ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์ ประเภทผลิตภัณฑ์	
วันประกาศโฆษณา	เลขที่ประกาศโฆษณา
วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร
ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่	

1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์ สุนทรภพ สอนคุณสมภพ เพื่อใช้สิทธิโดยวิธีกรรมแบบเส้นต่อเนื่อง

2. คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันและเป็นคำขอลำดับที่
ในจำนวน _____ คำขอ ที่ยื่นในคราวเดียวกัน

3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร บุคคลธรรมดา นิติบุคคล หน่วยงานรัฐ มูลนิธิ อื่นๆ

ชื่อ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ที่อยู่ เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1

ตำบล/แขวง ลาดกระบัง อำเภอ/เขต ลาดกระบัง จังหวัด กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10520 ประเทศ ไทย

อีเมล kmitt.tlo@gmail.com, ip_kmilt@hotmail.com

เลขประจำตัวประชาชน เลขทะเบียนนิติบุคคล เลขประจำตัวผู้เสียภาษีอากร 0 9 9 4 0 0 0 1 6 0 6 2 3 เพิ่มเติม (ดั่งแนบ)

ในกรณีที่มาตรา สี่สิบสาม ทานสะดวกใช้ทาง อีเมลผู้ขอ อีเมลตัวแทน

4. สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ ผู้รับโอน ผู้ขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น

5. ตัวแทน (ถ้ามี)

ชื่อ นางสาวณิชา สิมสุข

ที่อยู่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำนักงานบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1

ตำบล/แขวง ลาดกระบัง อำเภอ/เขต ลาดกระบัง จังหวัด กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10520 ประเทศ ไทย

อีเมล kmitt.tlo@gmail.com, ip_kmilt@hotmail.com

เลขประจำตัวประชาชน 3 1 1 9 9 0 0 0 9 2 7 6 1 เพิ่มเติม (ดั่งแนบ)

6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ ชื่อและที่อยู่เดียวกับผู้ขอ ชื่อ นชอดอน อัครภร

ที่อยู่ สังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1

ตำบล/แขวง ลาดกระบัง อำเภอ/เขต ลาดกระบัง จังหวัด กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10520 ประเทศ ไทย

อีเมล _____

เลขประจำตัวประชาชน 3 1 0 0 9 0 3 8 7 9 9 2 5 เพิ่มเติม (ดั่งแนบ)

7. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม
ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้ถือว่าได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตร
เลขที่ _____ วันยื่น _____ เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ
 คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ ขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ

หมายเหตุ ในกรณีที่ไม่อาจระบุรายละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์นี้โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังกล่าวด้วย

สำหรับเจ้าหน้าที่

จำแนกประเภทสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	<input type="checkbox"/> กลุ่มเคมี	สิทธิบัตรการออกแบบ	อนุสิทธิบัตร
<input type="checkbox"/> กลุ่มวิศวกรรม	สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เคมีเทคนิค)	<input type="checkbox"/> สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 1)	<input type="checkbox"/> อนุสิทธิบัตร (วิศวกรรม)
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (วิศวกรรม)	สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ปิโตรเคมี)	<input type="checkbox"/> สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 2)	<input type="checkbox"/> อนุสิทธิบัตร (เคมี)
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ไฟฟ้า)	สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เทคโนโลยีชีวภาพ)	<input type="checkbox"/> สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 3)	
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ฟิสิกส์)	สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เภสัชภัณฑ์)		

8. การยื่นคำขออนุญาตนำเข้า <input type="checkbox"/> PCT <input type="checkbox"/> เพิ่มเติม (ดังแนบ)				
วันยื่นคำขอ	เลขที่คำขอ	ประเทศ	สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	สถานะคำขอ
8.1				
8.2				
8.3				
8.4 <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอสิทธิให้ถือว่าได้ยื่นคำขอนี้ในวันที่ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรในต่างประเทศเป็นครั้งแรกโดย <input type="checkbox"/> ได้ยื่นเอกสารหลักฐานพร้อมคำขอนี้ <input type="checkbox"/> ขอยื่นเอกสารหลักฐานหลังจากวันยื่นคำขอนี้				
9. การแสดงการประดิษฐ์หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรได้แสดงการประดิษฐ์ที่หน่วยงานของรัฐเป็นผู้จัด วันแสดง วันเปิดงานแสดง ผู้จัด				
10. การประดิษฐ์เกี่ยวกับจุลชีพ				
10.1 เลขทะเบียนฝากเก็บ		10.2 วันที่ฝากเก็บ		10.3 สถาบันฝากเก็บ/ประเทศ
11. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอยื่นเอกสารภาษาต่างประเทศก่อนในวันยื่นคำขอนี้ และจะจัดยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ที่จัดทำเป็นภาษาไทยภายใน 90 วัน นับจากวันยื่นคำขอนี้ โดยขอยื่นเป็นภาษา <input type="checkbox"/> อังกฤษ <input type="checkbox"/> ฝรั่งเศส <input type="checkbox"/> เยอรมัน <input type="checkbox"/> ญี่ปุ่น <input type="checkbox"/> อื่นๆ				
12. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้อธิบดีประกาศโฆษณาคำขอรับสิทธิบัตร หรือรับจดทะเบียน และประกาศโฆษณาอนุสิทธิบัตรนี้ หลังจากวันที่ <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอให้ใช้รูปเขียนหมายเลข <input type="checkbox"/> ในการประกาศโฆษณา				
13. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ประกอบด้วย			14. เอกสารประกอบคำขอ	
ก. แบบพิมพ์คำขอ	3 หน้า		<input type="checkbox"/> เอกสารแสดงสิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	
ข. รายละเอียดการประดิษฐ์ หรือคำพรรณนาแบบผลิตภัณฑ์	7 หน้า		<input type="checkbox"/> หนังสือรับรองการแสดงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์	
ค. ข้อถ้อยสิทธิ	2 หน้า		<input checked="" type="checkbox"/> หนังสือมอบอำนาจ	
ง. รูปเขียน	5 รูป	9 หน้า	<input type="checkbox"/> เอกสารรายละเอียดเกี่ยวกับจุลชีพ	
จ. ภาพแสดงแบบผลิตภัณฑ์			<input type="checkbox"/> เอกสารการขอนับวันยื่นคำขอในต่างประเทศเป็นวันยื่นคำขอในประเทศไทย	
<input type="checkbox"/> รูปเขียน	- รูป	- หน้า	<input type="checkbox"/> เอกสารขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ	
<input type="checkbox"/> ภาพถ่าย	- รูป	- หน้า	<input checked="" type="checkbox"/> เอกสารอื่นๆ สัญญาโอนสิทธิ สำเนาประกาศฯ แต่งตั้งอธิการบดี	
ฉ. บทสรุปการประดิษฐ์	1 หน้า			
15. ข้าพเจ้าขอรับรองว่า <input checked="" type="checkbox"/> การประดิษฐ์นี้ไม่เคยยื่นขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรมาก่อน <input type="checkbox"/> การประดิษฐ์นี้ได้พัฒนาปรับปรุงมาจาก				
16. ลายมือชื่อ <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร <input checked="" type="checkbox"/> ตัวแทน <div style="text-align: center;"> นางสาวณิชา สิบสุข</div>				

หมายเหตุ บุคคลใดยื่นขอรับสิทธิบัตรการประดิษฐ์หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ หรืออนุสิทธิบัตร โดยการแสดงข้อความอันเป็นเท็จแก่พนักงานเจ้าหน้าที่ เพื่อให้ได้ไปซึ่งสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตร ต้องระวางโทษจำคุกไม่เกินหกเดือน หรือปรับไม่เกินห้าพันบาท หรือทั้งจำทั้งปรับ

ใบต่อแนบท้าย ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์

6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์

6.2 Mr.Phosy Panthongsy

ที่อยู่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ตำบล/แขวง ลาดกระบัง

อำเภอ/เขต ลาดกระบัง จังหวัด กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10520

อีเมล -

หนังสือเดินทางเลขที่ P 1148364



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

รายละเอียดการประดิษฐ์

ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์

อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้วิธีการแบบสั้นต่อเนื่อง

สาขาวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์

- 5 วิศวกรรมเครื่องกลในส่วนที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้วิธีการแบบสั้นต่อเนื่อง

ภูมิหลังของศิลปะหรือวิทยาการที่เกี่ยวข้อง

ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสภาพแวดล้อมยังคงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจจากนักศึกษา อาจารย์ นักวิจัย นักธุรกิจ หรือแม้แต่ประชาชน มีการผลิตอุปกรณ์ที่ภายในสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากสภาพแวดล้อมแล้วนำพลังงานนั้นมาใช้กับอุปกรณ์ของตนเองได้ หรือการผลิตเครื่องหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานขึ้นมา แต่การพัฒนาอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันขนาดของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานกับพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้เป็นเรื่องสวนทางกัน กล่าวคือขนาดของอุปกรณ์มีขนาดเล็กลง แต่พลังงานที่เก็บเกี่ยวได้เมื่อเทียบกับขนาดนั้นเพิ่มมาจากแต่ก่อน พลังงานที่ได้จากการเก็บเกี่ยวนี้จะถูกนำไปใช้กับงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการพลังงานต่ำและนำพลังงานมาจ่ายให้กับระบบโดยที่ไม่ต้องการแบตเตอรี่ เพราะว่าการใช้แบตเตอรี่นั้นยังคงมีปัญหาเกี่ยวกับขนาดต่อความจุ และอายุการใช้งานที่บางครั้งไม่เหมาะสมกับระยะเวลาการใช้งานที่ต้องการ อีกทั้งแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพแล้วยังก่อให้เกิดมลพิษ ซึ่งขบวนการที่ใช้กำจัดแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพนั้นใช้ต้นทุนที่สูงมาก

พลังงานที่ได้จากการเก็บเกี่ยวพลังงานหลักๆ นั้น ส่วนมากได้มาจากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และพลังงานจากการสั่นสะเทือน จากที่กล่าวมาข้างต้น แหล่งพลังงานจากการสั่นสะเทือนนั้น ดูจะเป็นสิ่งที่น่าสนใจมากที่สุด เนื่องจากมีอยู่รอบตัว พบเจอได้ง่าย และยังสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานเหล่านั้นมาใช้ได้จริง ดังเช่น การเคลื่อนไหวของมนุษย์ เครื่องจักรทางอุตสาหกรรม การสั่นของสะพานขณะมีรถวิ่งผ่าน และขนส่งการคมนาคม ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานนี้ จะมีรูปแบบการเก็บเกี่ยวพลังงานหลักๆ เช่น การเก็บเกี่ยวพลังงานแบบเพียโซอิเล็กทริก แบบไฟฟ้าสถิต แบบแม่เหล็กไฟฟ้า จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้น การเก็บเกี่ยวพลังงานแบบเพียโซอิเล็กทริกเป็นหนึ่งในวิธีที่ดีที่สุด เนื่องจากมีสัดส่วนของพลังงานต่อขนาดสูง โครงสร้างการออกแบบไม่ซับซ้อน การติดตั้งระบบง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติ การเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกนั้นจะมีสองแบบหลักๆ คือ การใช้หลักการของความถี่สั่นพ้อง (Resonance Type) และการใช้หลักการของความถี่ไม่สั่นพ้อง (Non-Resonance Type) โดยแบบการใช้หลักการของความถี่สั่นพ้อง (Resonance Type) นั้นจะทำงานได้ดีที่สุดเมื่อความถี่สั่นพ้องของเพียโซอิเล็กทริกตรงกับความถี่สั่นพ้องของแหล่งกำเนิด หากไม่ตรงกันจะทำให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพต่ำ

5 ฉะนั้นจึงเป็นทางเลือกที่ไม่ดีเท่าไรที่จะนำมาใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแหล่งพลังงานที่มีความถี่ต่ำหรือแหล่งพลังงานที่มีความถี่ที่ผันแปรอยู่เสมอ เช่น การเคลื่อนไหวของมนุษย์ เครื่องจักรที่มีความเร็วในการหมุนต่ำ หรือมีการเปลี่ยนแปลงหลายความเร็วในหนึ่งรอบการทำงาน แบบการใช้หลักการของความถี่ไม่สั่นพ้อง (Non-Resonance Type) จึงเป็นตัวเลือกหลักในการนำไปใช้การออกแบบ ผลิต และในการวิจัย

10 อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน เนื่องจากสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้โดยไม่สนใจความถี่ของแหล่งกำเนิด จึงมีความยืดหยุ่นอย่างมากในด้านการออกแบบ และในการนำมาใช้งาน การที่จะนำเพียโซอิเล็กทริกมาใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานนั้นนอกจากที่ต้องเลือกเพียโซอิเล็กทริกที่มีคุณสมบัติที่ดีแล้ว ยังคงต้องมีการนำ

กลไกมาใช้ร่วมด้วย เพื่อเพิ่มความถี่ของเพียโซอิเล็กทริก ทำให้ได้เก็บเกี่ยวพลังงานได้มากขึ้น แต่การเลือกเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาใช้ให้มีค่าความถี่ที่เหมาะสมกับระบบก็ยังไม่เพียงพอที่จะบอกว่าเหมาะสมต่อระบบ

15 ที่สุด เนื่องจากเพียโซอิเล็กทริกที่มีค่าความถี่เดียวกัน รูปแบบเดียวกัน แต่ต่างกันด้วย ยี่ห้อ รูปร่าง หรือสารผลิต ก็อาจให้ค่าคุณสมบัติ จำเช่น ค่าพลังงาน ค่ากำลัง หรือความคงทนต่างกัน จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบจากอุปกรณ์ทดสอบ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา สิ่งประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ทดสอบเพียโซอิเล็กทริกนั้น ยังใช้เทคนิคแบบความถี่สั่นพ้องของ Jinyu J. Ruan, Robert A. Lockhart, Pattanaphong Janphuang, Andrés Vásquez Quintero, Danick Briand, and Nico de Rooij. "An Automatic Test Bench for Complete

20 Characterization of Vibration-Energy Harvesters," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 62, no. 11, 2013, pp. 2966-2973. กล่าวถึงอุปกรณ์ทดสอบดังกล่าว สามารถหาค่าโหลดที่เหมาะสมได้ ในการนำมาทดสอบเพียโซอิเล็กทริกทางด้านเก็บเกี่ยวพลังงาน เทคนิคดังกล่าวยังไม่สามารถถึงประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบออกมาได้ จึงนำทฤษฎีในการเพิ่มความถี่ให้กับเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบโดยใช้หลักการจากบทความดังต่อไปนี้

M. Pozzi, and M. Zhu, "Plucked piezoelectric bimorphs for knee-joint energy harvesting: modeling and experimental validation," *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, no. 5, 2011, pp. 055007-055016.

P. Pillatsch, E.M. Yeatman, and A.S. Holmes, "A piezoelectric frequency up-converting energy harvester with rotating proof mass for human body application," *Sens. Actuator A, Phys.*, vol. 206, 2014, pp. 178-185.

Luong H T and Goo N S 2 0 1 2 Use of a magnetic force exciter to vibrate a piezocomposite generating element in a small scale windmill *Smart Mater. Struct.* 21 025017

Y. Kuang, Z. Yang, M. Zhu Design and characterization of a piezoelectric knee-joint energy harvester with frequency up-conversion through magnetic plucking *Smart Mater. Struct.*, 25 (8) (2016), p. 085029

จากเทคนิคการเพิ่มความถี่ มีผลทำให้เพียโซอิเล็กทริกสามารถทำงานได้ในความถี่ที่สูงกว่าความถี่ที่มากกระทำ และมีการทำงานอย่างต่อเนื่องในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เป็นการทำให้เพียโซอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบสามารถแสดงประสิทธิภาพที่ดีที่สุดออกมา ในการประดิษฐ์นี้เป็นการประดิษฐ์อุปกรณ์ทดสอบเพียโซอิเล็กทริกแบบสั่นต่อเนื่อง โดยมีการออกแบบกลไกที่จะทำให้เพียโซอิเล็กทริกเกิดการสั่นโดยเริ่มที่ความถี่ค่าหนึ่งจนหยุดนิ่ง ทำให้ได้ลูกสัญญาณ 1 ชุดข้อมูลนำมาวิเคราะห์หาค่าพลังงาน และค่ากำลังได้ และหากกลไกทำซ้ำจะทำให้สามารถวิเคราะห์ค่าความคงทนของเพียโซอิเล็กทริกได้ ทำให้การเลือกใช้เพียโซอิเล็กทริกในงานออกแบบ งานวิจัย หรืองานทางด้านอุตสาหกรรม ในส่วนของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ลักษณะและความมุ่งหมายของการประดิษฐ์

อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้วิธีการแบบสั่นต่อเนื่อง ตามการประดิษฐ์นี้เป็นการออกแบบการทำงานให้คล้ายกับการจำลองสถานการณ์จริงของเพียโซอิเล็กทริกเมื่ออยู่ในอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบสั่นต่อเนื่อง โดยออกแบบให้มีมอเตอร์หมุน ลูกเบี้ยวกดแผ่นโครงสร้างที่มีแท่งเหล็กเคลื่อนที่ลงมาแตะก้อนมวลแม่เหล็กที่ติดอยู่ปลายแผ่นเพียโซอิเล็กทริก เมื่อลูกเบี้ยวเลื่อนผ่าน แผ่นโครงสร้างเคลื่อนที่กลับมวลแม่เหล็กที่ติดกับปลายเพียโซอิเล็กทริกจะจากออกอย่างรวดเร็ว ทำให้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกสั่นเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง ทำการจับค่าสัญญาณในขณะที่กลไกทำงานตั้งแต่เริ่มจนสิ้นสุดกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกแบบสันต่อเนื่อง หลังจากทำการทดสอบ สามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าพลังงาน ค่ากำลัง ค่าความคงทน ค่าประสิทธิภาพในการโอนถ่ายพลังงาน และทราบค่าโหนดที่เหมาะสมที่สุดของเพียโซอิเล็กทริกได้ โดยค่าต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้จากอุปกรณ์ทดสอบนี้ สามารถนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งในการพิจารณาเลือกใช้เพียโซอิเล็กทริกจากแหล่งที่เหมาะสมได้ ก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดแก่อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานต่อไป

การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้วิธีการแบบสันต่อเนื่อง ตามการประดิษฐ์นี้สามารถนำไปใช้กับการทดสอบเพียโซอิเล็กทริกได้หลากหลายยี่ห้อและหลากหลายรุ่น

- ตามรูปที่ 1 แสดงภาพโดยรวมของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้วิธีการแบบสันต่อเนื่อง ประกอบด้วย โครงสร้างหลักส่วนฐาน (1a) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับยึดอุปกรณ์เข้ากับส่วนประกอบอื่น และที่ส่วนบนของโครงสร้างหลักส่วนฐาน (1a) สามารถถอดประกอบเข้ากับโครงสร้างรูปตัวแอล (2) ด้วยน็อตยึด ที่ด้านข้างของโครงสร้างรูปตัวแอล (2) ยึดติดเข้ากับมอเตอร์ (3) ที่มีความเร็วรอบตั้งแต่ 5-100 รอบต่อนาที ใช้แรงดัน 12-24 โวลต์ โดยมอเตอร์ (3) ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังและส่งผ่านลูกเบี้ยว (4) ที่ยึดเข้ากับแกนหมุนมอเตอร์ (3) ที่เจาะทะลุผ่านมาอีกข้างหนึ่งของโครงสร้างรูปตัวแอล (2) กำลังที่ได้จากมอเตอร์ (3) จะทำให้ลูกเบี้ยว (4) เคลื่อนที่มากกระทบกับแท่น (5a) ที่ภายในบรรจุตุลลับลูกปืน (6) เพื่อกดให้แผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) เคลื่อนที่ลง โดยที่ตุลลับลูกปืน (6) จะช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างลูกเบี้ยว (4) และแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) ไม่ให้เกิดไม่การบิดหรืออตัวของแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b)

- ตามรูปที่ 2-4 แสดงภาพมุมมองส่วนข้าง ส่วนบน และโครงสร้างภายในของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้วิธีการแบบสันต่อเนื่อง ซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างหลักส่วนฐานรูปตัวยู (1b) สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามขนาดของเพียโซอิเล็กทริก (9) ที่นำมาใช้ทดสอบ โดยให้มีขนาดกว้างพอที่จะรองรับการยึดเข้ากับอุปกรณ์อื่น และที่ส่วนบนของโครงสร้างหลักส่วนฐานรูปตัวยู (1b) มีฐานรองรับรางคู่ (12) จำนวนสองอัน ที่จัดวางในตำแหน่งขนานกัน ระยะห่างระหว่างฐานรองรับรางคู่ (12) มีระยะห่างไม่น้อยกว่าขนาดของแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) ที่ส่วนบนของฐานรองรับรางคู่ (12) ถูกยึดติดเข้ากับคานหยุด (10) โดยที่ตำแหน่งกึ่งกลางของคานหยุด (10) มีร่องสำหรับติดตั้งหมุดหยุด (11) ซึ่งคานหยุด (10) และหมุดหยุด (11) จะเคลื่อนที่ไปตามฐานรองรับรางคู่ (12) ที่สามารถเลื่อนปรับระยะได้ตามขนาดความยาวของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียโซอิเล็กทริก (9) เพื่อให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม สำหรับตัวหมุดหยุด (11) จะเป็นตัวกำหนดระยะโค้งงอ
ของเพียโซอิเล็กทริก (9) ที่ปลายด้านหนึ่งของเพียโซอิเล็กทริก (9) ยึดเข้ากับแผ่นขั้วไฟฟ้า (13a) ที่ประกบ
รวมอยู่เข้ากับขั้วนำไฟฟ้า (13b) ด้วยน็อตยึดขั้วไฟฟ้า โดยที่แผ่นขั้วไฟฟ้างกล่าวจะต่อเชื่อมเข้ากับอุปกรณ์
วัดทางไฟฟ้า (16) และที่ปลายอีกด้านหนึ่งของเพียโซอิเล็กทริก (9) ยึดติดเข้ากับแท่นยึดแม่เหล็ก (15)
5 แท่นยึดแม่เหล็กดังกล่าวจะติดเข้ากับแม่เหล็ก (14) ด้วยสารยึดติด ซึ่งแม่เหล็ก (14) จะทำหน้าที่ดูดติดเข้ากับ
แท่งโลหะเหนียวน้ำ (7)

ตามรูปที่ 5 แสดงภาพแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) มีลักษณะเป็นแผ่น ที่มุมทั้งสี่ของแผ่นตาม
ลูกเบี้ยว (Follower) (5b) ถูกเจาะให้เป็นรูสำหรับใส่ น็อต โดยมีสปริง (8a) (8b) สวมทับน็อตอีกชั้นหนึ่ง
เมื่อจะใช้งาน ให้นำแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) ประกบเข้ากับโครงสร้างฐานรูปตัวยู (1b) จะมีสปริง
10 (8a) (8b) ทำหน้าที่รองรับแรงกดและแรงตืด และที่ส่วนบนของแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) ยึดติด
เข้ากับแท่น (5a) ที่ภายในบรรจุตุลึงลูกปืน (6) ในตำแหน่งตรงกับจุดกลางที่ลูกเบี้ยว (4) กระทำ ส่วนที่ด้านข้าง
ตามแนวยาวของแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) ทั้งสองข้าง ถูกทำให้เป็นร่อง ให้ระยะห่างจากขอบแผ่น
ถึงร่อง มีระยะเดียวกันกับตำแหน่งของฐานรองรับรางคู่ (12) ที่ด้านล่างของแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b)
มีแท่งโลหะเหนียวน้ำ (7) ยึดติดเข้ากันด้วยน็อตยึด ขนาดความยาวของแท่งโลหะเหนียวน้ำ (7) จะมีขนาด
15 เดียวกันกับขนาดความกว้างของแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) และที่แท่งโลหะเหนียวน้ำ (7) ถูกเจาะให้
เป็นรู โดยตำแหน่งของรูจะเป็นตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งร่องของแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b)

แท่งโลหะเหนียวน้ำ (7) สามารถปรับเลื่อนให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับแม่เหล็ก (14) โดยการ
เหนียวน้ำทางแม่เหล็กจะเกิดขึ้นระหว่างแท่งโลหะเหนียวน้ำ (7) ที่ยึดอยู่ใต้แผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b)
กับแม่เหล็ก (14) ที่ซึ่งติดอยู่ด้านบนแท่นยึดแม่เหล็ก (15) เมื่อแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) ถูกกดลงมา
20 ด้วยลูกเบี้ยว (4) ในตำแหน่งต่ำที่สุด แม่เหล็ก (14) จะออกแรงดูดที่เพียงพอจะทำให้ด้านปลายของ
แผ่นเพียโซอิเล็กทริก (9) ที่มีแม่เหล็ก (14) ติดอยู่ เกิดการงอตัวเข้าหาแท่งโลหะเหนียวน้ำ (7) และเมื่อ
แผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) กลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว จะเกิดลักษณะสำคัญทางเทคนิคคือ
แผ่นเพียโซอิเล็กทริก (9) ดึงกลับไปเป็นความถี่ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยสัญญาณทางไฟฟ้าที่เพียโซอิเล็กทริก
สร้างออกมาจากการสั่นจะสามารถนำมาวิเคราะห์หาแรงดัน กระแส พลังงาน กำลัง ประสิทธิภาพ และความถี่
25 สั่นพ้องของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก (9) ได้

ตัวอย่างการทดสอบ

ในการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกแบบสันต่อเนื่องนี้ ได้ทำการทดสอบตัวอย่างแผ่นเพียโซอิเล็กทริก PZT-5H รุ่น T220-H4-503X ของบริษัท Piezo Systems, Inc. โดยได้ลูกสัญญาณ 1 ชุด สำหรับนำไปวิเคราะห์ข้อมูล ตามรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าแผ่นเพียโซอิเล็กทริก มีการสันต่อเนื่องหลังจากที่ถูกกระตุ้นแล้วเป็นว่าต่อเนื่องอีก 0.87 วินาที โดยแผ่นเพียโซอิเล็กทริกนี้ สามารถกำเนิดแรงดันทางไฟฟ้าได้สูงสุด 84.7 Vpp ในการวัดแบบวงจรเปิด และมีความถี่สั่นพ้องที่ 20.83 Hz เมื่อนำแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบนี้ ทำการการปรับโหนดตัวต้านทานที่ต่อกับขั้วทั้งสองของ แผ่นเพียโซอิเล็กทริกและสั่งให้อุปกรณ์ทดสอบทำงานค่าละ 1 ครั้ง จะได้ชุดข้อมูล ของแต่ละค่าโหนดตัวต้านทาน โดยกลุ่มของชุดข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณหาค่ากำลังและพลังงานสูงสุดของได้ดังนี้ สามารถให้กำลังสูงสุดที่ 578.28 μW ตามรูปที่ 7 และพลังงานสูงสุดที่ 537.33 μJ ตามรูปที่ 8 ที่ความต้านทาน โดยประมาณ 99 k Ω และมีประสิทธิภาพสูงสุดดังรูปที่ 9 ที่ 32.42%

คำอธิบายรูปเขียนโดยย่อ

- รูปที่ 1 แสดงภาพโดยรวมของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้วิธีการแบบสันต่อเนื่อง
- รูปที่ 2 แสดงภาพมุมมองส่วนข้างของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้วิธีการแบบสันต่อเนื่อง
- รูปที่ 3 แสดงภาพมุมมองส่วนบนของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้วิธีการแบบสันต่อเนื่อง
- รูปที่ 4 แสดงภาพโครงสร้างภายในของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้วิธีการแบบสันต่อเนื่อง
- รูปที่ 5 แสดงภาพชุดแผ่นตามลูกเบี้ยวของอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้วิธีการแบบสันต่อเนื่อง
- รูปที่ 6 แสดงภาพลูกสัญญาณไฟฟ้าของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก รุ่น T220-H4-503X จากการกระตุ้น 1 ครั้งด้วยอุปกรณ์ทดสอบเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้วิธีการแบบสันต่อเนื่อง
- รูปที่ 7 แสดงภาพค่ากำลังที่เพียโซอิเล็กทริกสามารถผลิตได้ของโหนดความต้านทานแต่ละค่า

รูปที่ 8 แสดงภาพผลการทดสอบค่าพลังงานที่สูงสุดที่เพียโซอิเล็กทริกผลิตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการแข่งขันเท่านั้น เมื่อผู้เขียนได้เห็นใบใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 9 แสดงภาพค่าประสิทธิภาพของเพียโซอิเล็กทริกที่สามารถผลิตได้ของโพลความดันทานแต่ละค่าแสดงค่าประสิทธิภาพของเพียโซอิเล็กทริกสามารถผลิตได้ของโพลความดันทานแต่ละค่า

วิธีการในการประดิษฐ์ที่ดีที่สุด

- 5 เหมือนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อการเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อถ้อยสิทธิ

1. อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกโดยวิธีการแบบสั่นต่อเนื่อง ประกอบด้วย

- โครงสร้างหลักส่วนฐาน (1a) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวประกอบเข้ากับโครงสร้างรูปตัวแอล (2) และมีมอเตอร์ (3) ยึดติดเข้ากับโครงสร้างรูปตัวแอล (2) เพื่อทำหน้าที่เป็นต้นกำลังและส่งผ่านลูกเบี้ยว (4) ที่ยึดเข้ากับแกนหมุนมอเตอร์ (3) ให้เคลื่อนที่มากระทบกับแท่น (5a) ที่ภายในบรรจุตุลลับลูกปืน (6) เพื่อกดให้แผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) เคลื่อนที่ลง

- โครงสร้างหลักส่วนฐานรูปตัวยู (1b) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วย ฐานรองรับรางคู่ (12) ที่ส่วนบนของฐานรองรับรางคู่ (12) ยึดติดเข้ากับคานหยุด (10) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของคานหยุด (10) มีร่องสำหรับติดตั้งหมุดหยุด (11) และที่ปลายด้านหนึ่งของเพียโซอิเล็กทริก (9) ยึดเข้ากับแผ่นขั้วไฟฟ้า (13a) ที่ประกบรวมอยู่เข้ากับขั้วนำไฟฟ้า (13b) ด้วยน็อตยึดขั้วไฟฟ้า โดยที่แผ่นขั้วไฟฟ้างกล่าวจะต่อเชื่อมเข้ากับอุปกรณ์วัดทางไฟฟ้า (16) และที่ปลายอีกด้านหนึ่งของของเพียโซอิเล็กทริก (9) ยึดติดเข้ากับแท่นยึดแม่เหล็ก (15) ซึ่งที่แท่นยึดแม่เหล็กดังกล่าวจะติดเข้ากับแม่เหล็ก (14) เพื่อทำหน้าที่ดูดติดเข้ากับแท่งโลหะเหนียวนำ (7)

โดยมีลักษณะเฉพาะคือ

15 แผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) ถูกเจาะใส่น็อต และสวมสปริง (8a) (8b) ทับน็อตอีกชั้นหนึ่ง เพื่อทำหน้าที่รองรับแรงกดและแรงตีด ที่ส่วนบนของแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) ยึดติดเข้ากับแท่น (5a) ที่ภายในบรรจุตุลลับลูกปืน (6) ในตำแหน่งตรงกับจุดกลางที่ลูกเบี้ยว (4) กระทำ ส่วนที่ด้านข้างตามแนวยาวของแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) ทั้งสองข้าง ถูกทำให้เป็นร่อง ให้ระยะห่างจากขอบแผ่นถึงร่องมีระยะเดียวกันกับตำแหน่งของฐานรองรับรางคู่ (12) ซึ่งฐานรองรับรางคู่ดังกล่าวจะมีระยะห่างระหว่างกัน 20 ไม่น้อยกว่าขนาดของแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) ที่ด้านล่างของแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) มีแท่งโลหะเหนียวนำ (7) ยึดติดเข้ากัน โดยขนาดความยาวของแท่งโลหะเหนียวนำ (7) จะมีขนาดเดียวกันกับขนาดความกว้างของแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5)

แท่งโลหะเหนียวนำ (7) สามารถปรับเลื่อนให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับแม่เหล็ก (14) โดยการเหนียวนำทางแม่เหล็กจะเกิดขึ้นระหว่างแท่งโลหะเหนียวนำ (7) ที่ยึดอยู่กับแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) 25 กับแม่เหล็ก (14) ที่ซึ่งติดอยู่ด้านบนแท่นยึดแม่เหล็ก (15) เมื่อแผ่นตามลูกเบี้ยว (Follower) (5b) ถูกกดลงมา

เอก ด้วยลูกเบี้ยว (4) ในตำแหน่งต่ำที่สุดแม่เหล็ก (14) จะออกแรงดูดที่เพียงพอจะทำให้ด้านปลายของแผ่นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

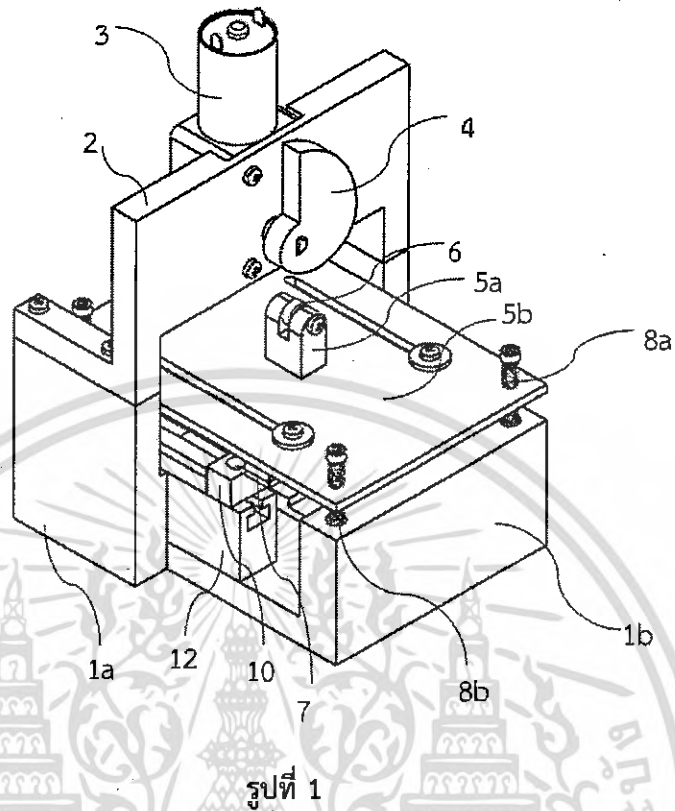
เพ็ชช็อเล็กทริก (9) ทีมีแม่เหล็ก (14) ดัดอยู่ เกิดการรอดตัวเข้าหาแท่งโลหะเหน็ยวนำ (7) และเมื่อแผ่นตามลูกเบ็ยว (Follower) (5) กลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว จะเกิดลักษณะสำคัญทางเทคนิคคือแผ่นเพ็ชช็อเล็กทริก (9) ดัดกลับไปเป็นความถี่ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง และนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์

2. อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพ็ชช็อเล็กทริกแบบสันต่อเนื่อง ตามข้อถ็อสิทธิ 1 ทีซึ่ง โครงสร้างหลักส่วนฐานรูปตัวยู (1b) สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามขนาดของเพ็ชช็อเล็กทริก (9) ทีนำมาใช้ทดสอบ โดยให้ มีขนาดกว้างพอทีจะรองรับการยึดเข้ากับอุปกรณ์อื่น

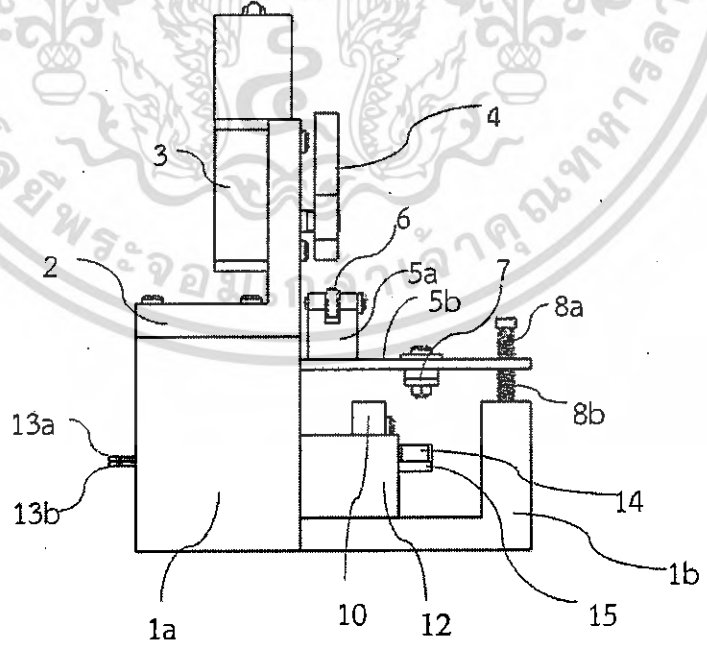
3. อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพ็ชช็อเล็กทริกแบบสันต่อเนื่อง ตามข้อถ็อสิทธิ 1 ทีซึ่ง ฐานรองรับรางคู่ (12) สามารถเลื่อนปรับระยะได้ตามขนาดความยาวของเพ็ชช็อเล็กทริก (9) เพื่อให้อยู่ในตำแหน่งทีเหมาะสม

10



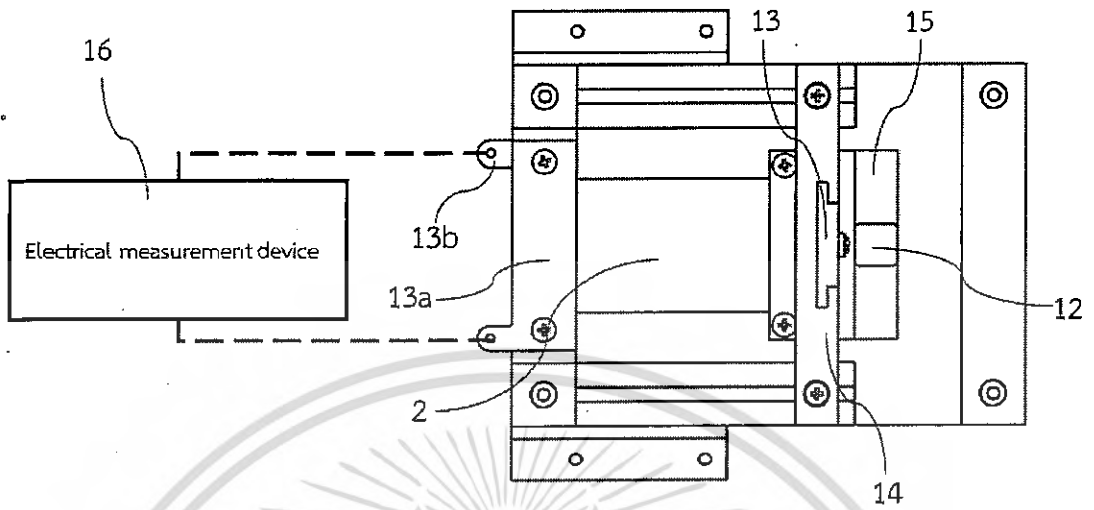


รูปที่ 1

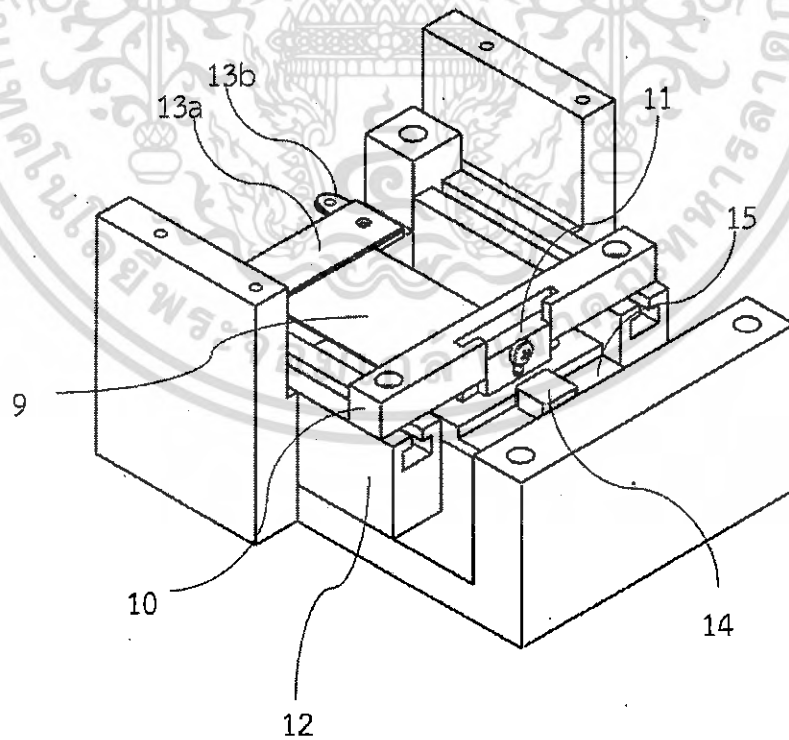


รูปที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

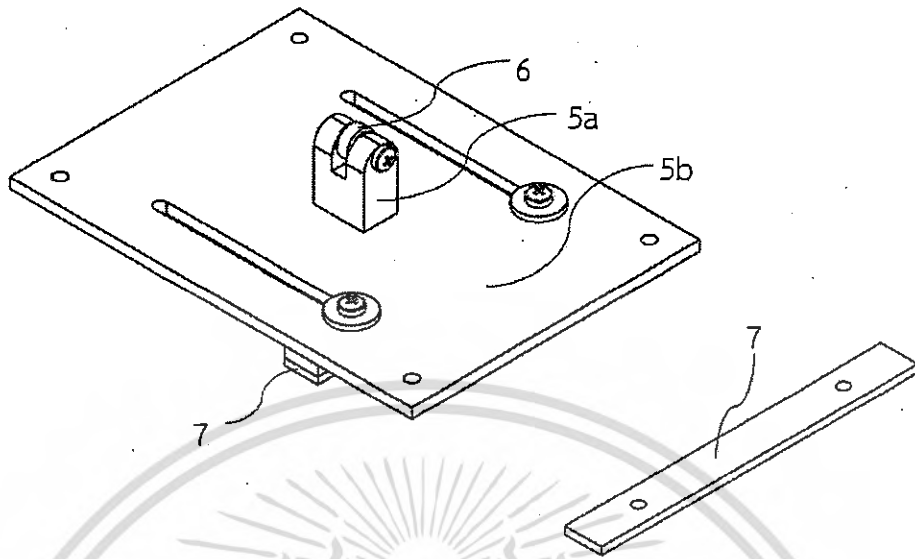


รูปที่ 3

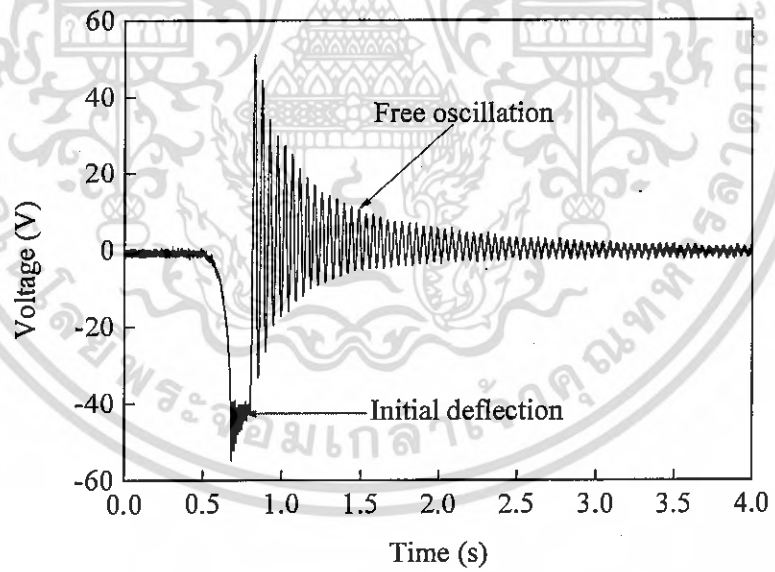


รูปที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

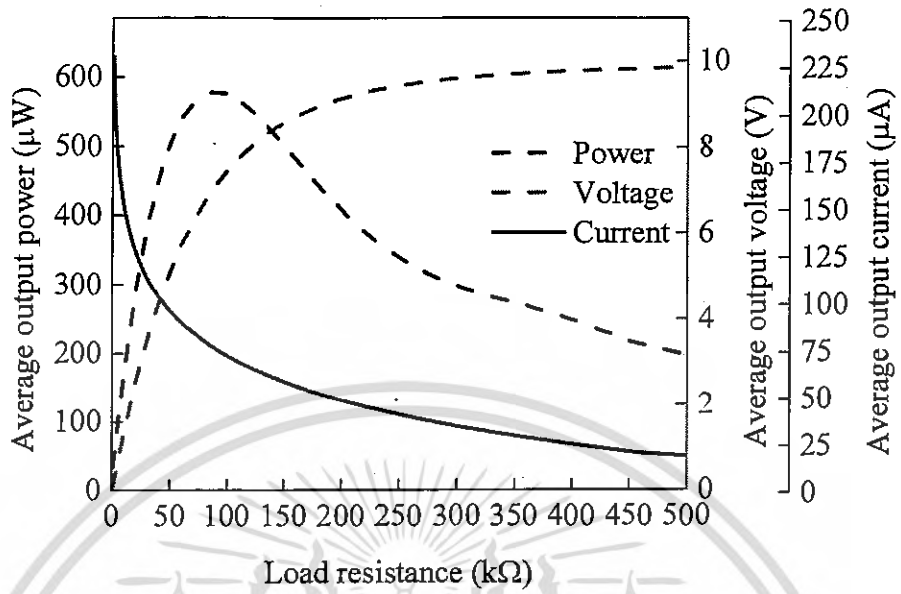


รูปที่ 5

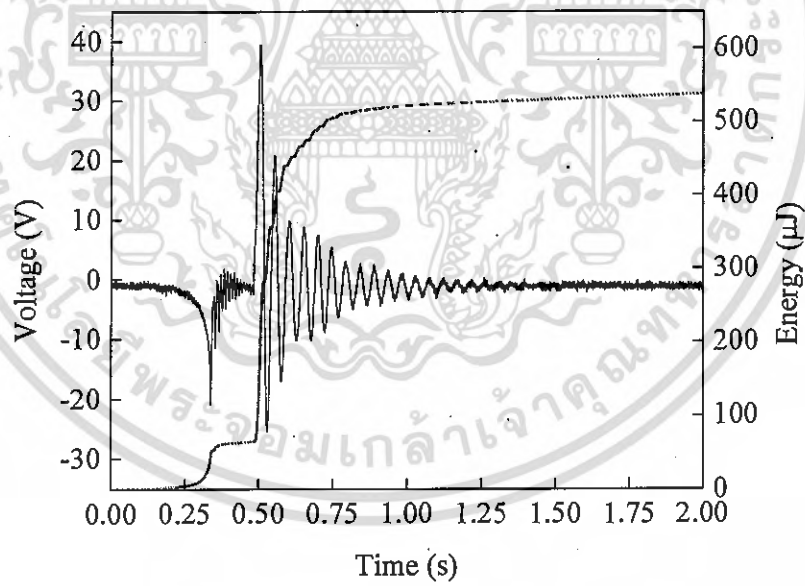


รูปที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

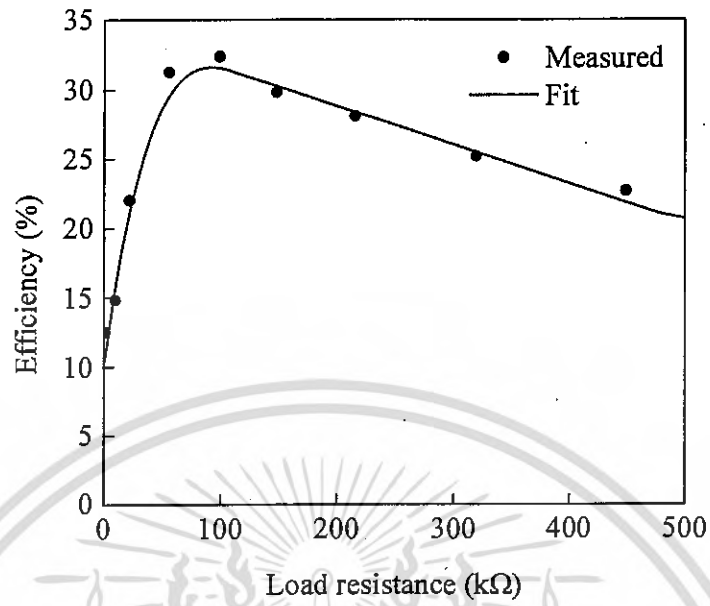


รูปที่ 7



รูปที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทสรุปการประดิษฐ์

อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้วิธีการสั่นแบบต่อเนื่องตามการประดิษฐ์นี้เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบการทำงานให้คล้ายคลึงกับเครื่องมือหรืออุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก ออกแบบกลไกโดยใช้หลักการเพิ่มความถี่ ที่ทำให้เพียโซอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบเกิดการสั่น โดยเริ่มที่ความถี่ 5 ค่าหนึ่งจนหยุดนิ่ง วิธีนี้ทำให้ได้ลูกสัญญาณ 1 ชุดข้อมูล สามารถนำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์หาค่าพลังงาน และค่ากำลังได้ และหากกลไกทำซ้ำ จะทำให้สามารถวิเคราะห์ค่าความคงทนของเพียโซอิเล็กทริกได้ ทำให้การเลือกใช้เพียโซอิเล็กทริกมีประสิทธิภาพสูงที่สุด





อนุสิทธิบัตร

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

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สำหรับการประดิษฐ์ตามรายละเอียดการประดิษฐ์ ข้อถ้อยสิทธิ และรูปเขียน (ถ้ามี)
ที่ปรากฏในอนุสิทธิบัตรนี้

เลขที่คำขอ 1803001351
ขอรับอนุสิทธิบัตร 14 มิถุนายน 2561
ประดิษฐ์ นายดอน อิศรางกูร และ นายโพธิ์ ปานทองสี
แสดงถึงการประดิษฐ์ อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริก
โดยใช้วิธีการแบบสั้นต่อเนื่อง

ให้ผู้ทรงอนุสิทธิและหน้าที่ตามกฎหมายว่าด้วยสิทธิบัตรทุกประการ

ออกให้ ณ วันที่ 16 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2561

หมดอายุ ณ วันที่ 13 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2567



(ลงชื่อ).....

(นายดิเรก บุญแท้)

รองอธิบดีกรมทรัพย์สินทางปัญญา ปฏิบัติราชการแทน

อธิบดีกรมทรัพย์สินทางปัญญา

ผู้ออกอนุสิทธิบัตร



พนักงานเจ้าหน้าที่

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