การศึกษาออกแบบบันไดเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าจากการเดินขึ้นลงบันได โดยใช้กลไกทางกลร่วมกับแผ่นเพียโซอิเล็กทริก*

A STUDY ON THE DESIGN OF AN ENERGY-HARVESTING STAIRCASE FROM HUMAN WALKING USING MECHANICAL MECHANISMS INTEGRATED WITH PIEZOELECTRIC PLATES

ภักดี สิทธิฤทธิ์กวิน[1], บรรยงค์ จงไทยรุ่งเรือง[2], เฉลิมชาติ เมืองทอง[3] และ สมชาย แสงนวล[4]

Pakdee Sittiritkawin[1], Banyong Chongthairungruang[2], Chalermchat Muangthong[3] and Somchai Saengnuan[4]

[1-4]คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย

[1-4]Faculty of Engineering, Chiang Rai College, Thailand

Corresponding Author's Email: pakdee.me@gmail.com

วันที่รับบทความ : 28 มีนาคม 2569; วันแก้ไขบทความ 17 เมษายน 2569; วันตอบรับบทความ : 19 เมษายน 2569

Received 28 March 2026; Revised 17 April 2026; Accepted 19 April 2026

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาการทำงานของระบบการผลิตไฟฟ้าจากการเดินขึ้นลงบันไดแบบกลไลทางกลร่วมกับการติดตั้งอุปกรณ์แผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก 2) ศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์การลงทุนของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากการเดินขึ้นลงบันไดแบบกลไกทางกลร่วมกับการติดตั้งอุปกรณ์แผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยมีเงื่อนไขการทดสอบที่กำหนดน้ำหนักคน 50, 60, 70 kg และมีความเร็วในการก้าว 30, 60, 120 ครั้ง/นาที พบว่าการใช้กลไกแบบข้อเหวี่ยงสามารถทำงานร่วมกับแผ่นเพียโซอิเล็กทริกได้ดี โดยที่น้ำหนักของคนมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าเมื่อน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วยโดยที่คน

Citation:

*ภักดี สิทธิฤทธิ์กวิน, บรรยงค์ จงไทยรุ่งเรือง, เฉลิมชาติ เมืองทอง และ สมชาย แสงนวล. (2569). การศึกษาออกแบบบันไดเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าจากการเดินขึ้นลงบันไดโดยใช้กลไกทางกลร่วมกับแผ่นเพียโซอิเล็กทริก. วารสารสหศาสตร์การพัฒนาสังคม, 4(4), 1181-1197.

Pakdee Sittiritkawin, Banyong Chongthairungruang, Chalermchat Muangthong and Somchai Saengnuan. (2026). A Study On The Design Of An Energy-Harvesting Staircase From Human Walking Using Mechanical Mechanisms Integrated With Piezoelectric Plates. Journal of Interdisciplinary Social Development, 4(4), 1181-1197.;

DOI: https://doi.org/10.

Website: https://so12.tci-thaijo.org/index.php/JISDIADP/

น้ำหนัก 70 kg จะทำให้บันไดผลิตแรงดันไฟฟ้าได้มากที่สุด 7.2 V มีการตอบสนองต่อความเร็วในการก้าวได้ดีทั้งช่วงความเร็วต่ำและความเร็วสูงให้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 2.2 w ต่อขั้นบันได และถ้ามีการติดตั้งใช้งานต่อเนื่อง 8 ชั่วโมงต่อวันจะผลิตไฟฟ้าได้ 403.2 kw.h คิดเป็นเงิน 1,612.8 บาท/เดือน คืนทุนใน 2 ปี 9 เดือน การเก็บพลังงานไฟฟ้าด้วยบันไดเหมาะกับนำไปติดตั้งในพื้นที่ที่คนใช้งานหนาแน่น

คำสำคัญ: บันได, สะสมพลังงาน, ทางกล, เพียโซอิเล็กทริก

Abstract

This research aims to 1) study the operation of a mechanical stair-climbing power generation system combined with the installation of piezoelectric material devices, and 2) study the economic feasibility of investing in a mechanical stair-climbing power generation system combined with the installation of piezoelectric material devices. Experimental tests were performed using three body weights of 50, 60, and 70 kg, with step frequencies of 30, 60, and 120 steps per minute. The results demonstrated that the crank mechanism functioned effectively in conjunction with the piezoelectric plates, and body weight was found to have a significant influence on the output voltage. A maximum voltage of 7.2 V was achieved when a subject with 70 kg body weight walked on the staircase. Furthermore, the system responded well to both low and high stepping frequencies, producing an average output power of 2.2 W per step. When operated continuously for 8 hours per day, the staircase was estimated to generate approximately 403.2 kWh of electricity per month, which is equivalent to a cost saving of about 1,612.8 THB. Based on these results, the estimated payback period for the system was calculated at 2 years and 9 months. Overall, the findings suggest that the energy-harvesting staircase provides a promising alternative renewable energy source and is particularly suitable for installation in high-traffic areas, such as public buildings and transportation hubs.

Keywords: Stairs, Energy storage, Mechanical, Piezoelectric Plates

บทนำ

พลังงานที่มนุษย์ใช้ในการเดินตามปกติ โดยทั่วไปจะถูกใช้ไปกับการเคลื่อนไหวของร่างกายและสูญเสียไปในรูปของความร้อนหรือแรงกดกับพื้นอย่างไรก็ตาม ด้วยความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาแนวคิดในการเปลี่ยนพลังงานจากการเดินให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า แนวคิดดังกล่าวอยู่ภายใต้หลักการของการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ติดตั้งลงบนพื้นทางเดินที่มีผู้คนจำนวนมากเดินผ่านไปมาซึ่งสามารถนำไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปใช้งานกับอุปกรณ์พกพาขนาดเล็ก เช่น ไฟ LED เซนเซอร์ หรือชาร์จแบตเตอรี่ในสภาวะที่ไม่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากการวางระบบเพียโซอิเล็กทริกเพื่อให้สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้ จากการศึกษาพบว่าถ้าใช้ชุดอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกด้วยเงินลงทุน 1,614,600 บาท มีอายุการใช้งาน 20 ปี คาดว่าจะผลิตไฟฟ้าได้เฉลี่ยปีละ 114,819 kw/hr ผลการวิเคราะห์ระยะเวลาในการคืนทุนของโครงการเท่ากับ 3.27 ปี (ไตรรัตนา วงค์คร้าย, 2564). และยังมีการศึกษาทบทวนเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเดินโดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกโดยศึกษาวิธีการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเดินของมนุษย์เปรียบเทียบเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่ใช้ในการแปลงพลังงานจากการเดินให้เป็นไฟฟ้าระบุเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการแปลงพลังงานจากการเดินเป็นไฟฟ้า พบว่า การฝังวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในพื้นทางเดิน เพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงกดของการเดินผ่านให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด เนื่องจากสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้จากผู้ใช้หลายคนพร้อมกัน และไม่รบกวนการเคลื่อนไหวของผู้ใช้ (Maghsoudi et al., 2017) นอกจากนั้นมีการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ฝังอยู่ใต้พื้นทางเดินเพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเดินของมนุษย์ โดยพบว่าระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยปริมาณพลังงานที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของผู้เดินและความถี่ของการเดิน โดยพลังงานที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้สามารถเก็บสะสมไว้ในซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการพลังงานขนาดเล็ก (Karmakar et al., 2022)

การพัฒนาแผ่นพื้นเพียโซอิเล็กทริกเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถเปลี่ยนพลังงานกลจากการก้าวเดินของมนุษย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้า งานวิจัยหลายชิ้นได้ยืนยันถึงศักยภาพของเทคโนโลยีนี้ เช่น งานการออกแบบกระเบื้องเพียโซขนาด 455×405 มม. และพบว่าสามารถเก็บพลังงานได้สูงสุดประมาณ 246 mw ต่อกระเบื้อง ภายใต้แรงก้าวเดินมนุษย์ ซึ่งเหมาะสมต่อการใช้งานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าต่ำ

เช่น อุปกรณ์ IoT และระบบเซ็นเซอร์ (Maiti et al., 2024) อีกด้านหนึ่งยังพบงานวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบการต่อแผ่นเพียโซดิสก์จำนวน 1–12 แผ่น พบว่าการเพิ่มจำนวนแผ่นต่ออนุกรมช่วยเพิ่มแรงดันและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยแผ่นเดียวให้แรงดันเพียง 2.8 V และกำลังไฟฟ้า 0.019 mw แต่เมื่อเพิ่มเป็น 10 แผ่นสามารถผลิตแรงดัน 11.59 V และกำลังสูงถึง 105.5 mw และเมื่อใช้ 12 แผ่นเพิ่มกำลังเป็น 128.7 mw (Ahmed et al.,2020)

นอกจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการแล้ว ยังมีการติดตั้งจริงในสถานีรถไฟ Shibuya, Tokyo ซึ่งสามารถผลิตพลังงานได้ประมาณ 0.1 w ต่อก้าว (Power-generating flooring converts footsteps into electricity, 2008) และในระดับระบบอาคาร งานศึกษาที่มหาวิทยาลัย Macquarie, Sydney พบว่าการติดตั้งพื้นเพียโซเพียง 3.1% ของพื้นที่ทางเดินสามารถผลิตพลังงานได้กว่า 1.1 Mwh ต่อปี หรือคิดเป็นราว 0.5% ของการใช้พลังงานทั้งหมดของอาคารแสดงให้เห็นว่าพลังงานจากพื้นเพียโซมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้งานจริง แม้จะยังไม่สามารถทดแทนแหล่งพลังงานหลักได้ แต่มีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลังต่ำ

นอกจากใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกนำมาใช้เป็นพื้นทางเดินเพื่อเก็บพลังงานแต่การใช้กลไกทางกลร่วมกับเฟืองเชื่อมต่อกับเจนเนอเรเตอร์ซึ่งเปลี่ยนพลังงานกลจากการหมุนเป็นพลังงานไฟฟ้าก็จะมีข้อได้เปรียบกว่าในแง่ของความทนทานเมื่อต้องเจอกับแรงกดหรือแรงกระแทกจากการเดินใช้กลไกที่สามารถแปลงแรงกดที่เกิดขึ้นระหว่างการเดินจากฝ่าเท้าผ่านพื้นรองเท้าโดยออกแบบรองเท้าผลิตไฟฟ้าจากการเดินของคนสำหรับใช้ในชีวิตประจำวันโดยใช้อุปกรณ์เสริมใส่เข้าไปในรองเท้าพบว่าปริมาณไฟฟ้าที่ได้จากการเหยียบชุดกลไกสามารถวัดผลได้ประมาณ 0.127 w.s โดยใช้จำนวนครั้งที่เหยียบต่อชุดกลไกเฉลี่ย 193 ครั้ง ได้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ประมาณ 11 V กระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุจ่ายได้สูงสุดมีค่าประมาณ 12.7 mA (ทศพร ผิวผ่องและคณะ, 2559) แต่ยังพบอุปสรรคการใช้งานที่ไม่สะดวกมากนักซึ่งการติดตั้งอุปกรณ์เป็นชุดอยู่กับที่อาจจะเหมาะสมมากกว่าอย่างเช่นการใช้กลไกเฟืองสะพานแบบฟันตรง (rack and pinion) ติดตั้งบนขั้นบันไดเพื่อแปลงแรงกดจากการเดินเป็นการเคลื่อนไหวแบบหมุนขับเจนเนอเรเตอร์ในการผลิตไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพซึ่งระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 2 V ต่อหนึ่งก้าวเดิน โดยอาศัยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยความเร็ว 66 rpm และรางเฟืองที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 6.22 cm/s (Al-Qadhi et al., 2018) และยังพบว่าการออกแบบบันไดที่ติดตั้งกลไกข้อเหวี่ยงและสะสมพลังงานในล้อช่วยแรง (Flywheel) เพื่อแปลงแรงกดจากการเดินเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านเจนเนอเรเตอร์ โดยเน้นการใช้งานในพื้นที่ที่มีการสัญจรสูง

ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดกับแรงดันไฟเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกันจากโหลดก็เพิ่มขึ้นจาก 12.5 เป็น 13 kg แรงดันไฟที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงจาก 4.3V เป็น 4.82V ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดและแรงดันไฟจะเป็นแบบเส้นตรง (Upadhyaya, 2016) นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยอีกหลายชิ้นที่มีการออกแบบใช้ข้อเหวี่ยงร่วมกับมูลเล่ขนาดใหญ่ ติดตั้งเข้ากับขั้นบันไดจำนวน 1 ขั้นเพื่อเก็บพลังงานจากการเดินสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 12 V (Raja & Mathew, 2014).

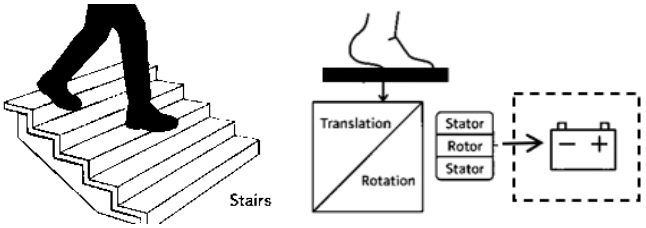
จากข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้อุปกรณ์เก็บพลังงานจากการเดินแบบกลไกทางกลร่วมกับเจนเนอเรเตอร์มีข้อได้เปรียบเรื่องความทนทานรับแรงกระกดกระแทกได้ดี โดยเฉพาะการขึ้นลงบันได เนื่องจากพลังงานในการขึ้นและลงบันไดจะต้องใช้พลังงานมากกว่าการเดินปกติทั่วไปโดยเฉพาะขณะลงบันไดจะมีแรงกดจากเท้าถ่ายเทลงสู่ขั้นบันไดมากกว่าปกติ ทำให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น ถึงแม้ระบบดังกล่าวจะมีข้อเปรียบกว่าการใช้อุปกณ์แผ่นเพียโซอิเล็กทริคในแง่ความทนทานและปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้มากกว่าเมื่อคิดต่อหนึ่งพื้นที่ที่รับแรงเท่ากัน แต่การทำงานของกลไกก็มีข้อจำกัดในด้านการเคลื่อนไหวของชิ้นส่วนของกลไกที่มีแรงเฉื่อยและแรงเสียดทานในจุดหมุนต่าง ๆ ซึ่งอาจจะทำให้ตอบสนองต่อแรงกดได้ไม่ดีในช่วงที่แรงกดมีจำนวนครั้งต่อนาทีมาก เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงเลือกใช้แผ่นเพียโซอิเล็กทริคติดตั้งเสริมลงบนแป้นเหยียบของขั้นบันได ซึ่งตัวแผ่นจะทำงานได้ดีเมื่อมีแรงกดมากจากการเดินขึ้นลงบันได

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการทำงานของระบบการผลิตไฟฟ้าจากการเดินลงบันไดแบบกลไลทางกลร่วมกับการติดตั้งอุปกรณ์แผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

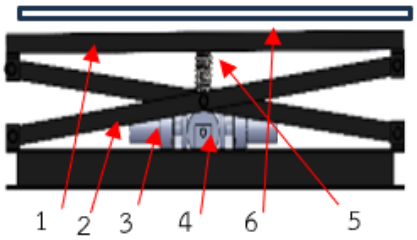
2. เพื่อศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์การลงทุนของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากการเดินลงบันไดแบบกลไลทางกลร่วมกับการติดตั้งอุปกรณ์แผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

การทบทวนวรรณกรรม



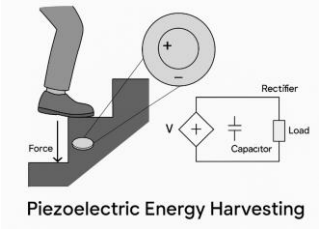
ภาพที่ 1 แนวคิดการเก็บพลังงานจากเดินขึ้นลงบันได

หลักการทำงานของขั้นบันไดแสดงดังภาพที่ 1 จะมีแผ่นรับน้ำหนักที่ ขั้นบันไดที่สามารถกดลงได้เล็กน้อยเมื่อน้ำหนักของผู้ใช้กดลงมา แผ่นนี้เชื่อมต่อกับระบบเฟืองและเจนเนอเรเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ใต้บันไดและเมื่อมีคนก้าวลงบันไดแรงกดจากเท้าจะทำให้แผ่นขยับขับให้เฟืองหมุนซึ่งเชื่อมต่อกับเจนเนอเรเตอร์ซึ่งเปลี่ยนพลังงานกลจากการหมุนเป็นพลังงานไฟฟ้าจะถูกส่งไปยังแบตเตอรี่จากนั้นเมื่อเท้าถูกยกออกจากบันไดแป้นพื้นรับน้ำหนักของบันไดจะคืนกลับในตำแหน่งเริ่มต้นอีกครั้งด้วยสปริง ในระหว่างนั้นกลไกเฟืองจะทำให้เจนเนอเรเตอร์หมุนผลิตไฟฟ้าได้อีก 1 ครั้ง ระบบจึงทำงานครบหนึ่งรอบ แสดงรายละเอียดอุปกรณ์ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ระบบการผลิตไฟฟ้าจากการเดินลงบันไดประกอบด้วย 1. พื้นรับน้ำหนัก 2. เหล็กประคองพื้นรับน้ำหนัก 3. เจนเนอเรเตอร์ 4. ชุดเกียร์ 5. สปริง 6. ชุดรับแรงกดจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

ชุดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแสดงลักษณะการติดตั้งดังภาพที่ 2 หลักการทำงานของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเป็นตัวผลิตไฟฟ้าจะอาศัยหลักการว่าเมื่อวัสดุ ถูกกด บิด ดัด หรือสั่น โครงสร้างผลึกภายในจะเสียสมดุลประจุไฟฟ้าเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltage) และประจุจะสะสมที่ผิวหน้าของวัสดุนำไปต่อวงจรภายนอกเพื่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าผ่านวงจรไฟฟ้าเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอร์รี่ แสดงดังภาพที่ 3 โดยติดตั้งชุดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกลงบนขั้นบันไดและเมื่อมีคนเดินขึ้นลงบันไดก็จะเหยียบลงบนชุดแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

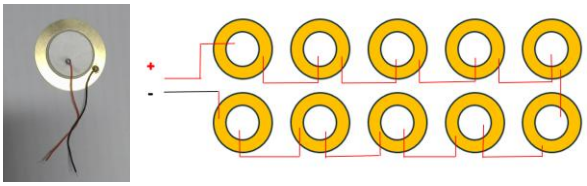


ภาพที่ 3 การเก็บพลังงานจากเดินจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric)

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาออกแบบอุปกรณ์ขั้นบันไดผลิตไฟฟ้าจากการเดินลงบันไดเพื่อไม่ให้รู้สึกสูญเสียการทรงตัวเวลาเหยียบโดยกำหนดระยะยุบ 20 mm ส่งผ่านกลไกแบบข้อเหวี่ยง (crank mechanism) ขับเฟืองส่งกำลังจากการเหยียบให้เข้าสู่เจนเนอเรเตอร์จำนวน 2 ตัว ขนาด 5 – 24 V ให้พลังงานสูงสุด 20 W ใช้จำนวนขั้นบันได 4 ขั้น จากนั้นนำพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกเก็บเข้าไว้ที่แบตเตอร์รี่ลิเธียมไอออน ขนาด 3.6 V ความจุ 1800 mA

2. การติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้ (KD-35B-28EC135G ของ Kailitech) Resonant Frequency: 2.8 ± 0.5 kHz Impedance (เรโซแนนซ์): สูงสุด 300 Ω Static Capacitance: 40.0 nF ± 30% (วัดที่ 100 Hz) แรงดันใช้งานสูงสุด: 30 Vp-p อุณหภูมิใช้งาน: –20 ถึง +70 °C, เก็บได้ –30 ถึง +80 °C เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นโลหะ: 35.0 ± 0.1 มม จำนวน 10 แผ่น ต่ออนุกรม แสดงดังภาพที่ 4 ใช้วงจรเก็บพลังงานไฟฟ้าแยกอิสระออกจากระบบกลไกข้อเหวี่ยง โดยไฟฟ้าถูกเก็บเข้าไว้ที่แบตเตอร์รี่ลิเธียมไอออน ขนาด 3.6 V ความจุ 1800 mA จำนวน 1 ก้อน



ภาพที่ 4 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้งานวิจัยและการติดตั้งต่อแบบอนุกรมจำนวน 10 แผ่น

3. การทดสอบการทำงานของชุดแผ่นเพียโซอิเล็กทริค

3.1 หาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนแผ่นกับน้ำหนักกด โดยใช้แรงกดคงที่ 40 kg แล้วเพิ่มจำนวนแผ่นที่อนุกรมกันได้แก่ 1, 2, 4, 6, 8, 10 แผ่นตามลำดับ บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟ

3.2 หาความสัมพันธ์ระหว่างชุดแผ่นเพียโซอิเล็กทริคจำนวน 10 แผ่นที่ต่ออนุกรมกับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจาก 20 kg เพิ่มขึ้นครั้ง 10 kg จนถึง 70 kg ตามลำดับ บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟ

4. การทดสอบการทำงานของชุดกลไกข้อเหวี่ยงผลิตไฟฟ้าจะใช้น้ำหนักคนทดสอบโดยใช้คนที่มีน้ำหนักที่ 50, 60, 70 kg ตามลำดับและการกำหนดใช้ความเร็วในการเดินขึ้นลงบันไดเป็น 3 ระดับได้แก่ 30, 60, 120 ครั้ง/นาที จากนั้นทำการเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า

5. การทดสอบระบบให้ทำงานร่วมกันทั้งชุดกลไกข้อเหวี่ยงและชุดแผ่นเพียโซอิเล็กทริค โดยใช้เงื่อนไขการทดสอบเดียวกันกับข้อที่ 4 ทุกการทดสอบจะทำซ้ำ 3 ครั้ง

6. ศึกษาวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตการอุปกรณ์

ผลการวิจัย

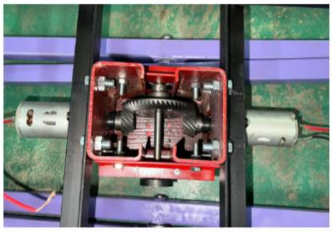
1. การออกแบบบันไดเก็บพลังงาน

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณเฉพาะชุดกลไกข้อเหวี่ยงที่ได้จากการเดินขึ้นลงบันไดต่อ 1 ขั้น เมื่อคนมีน้ำหนัก 70 kg

รายการคำนวณ	ผลการคำนวณ
1. พลังงานกลที่เกิดจากการเหยียบ 1 ขั้น แรงที่เท้ากดบนขั้นบันได	686.7 N
2. พลังงานไฟฟ้าจริงที่สามารถนำมาใช้ (ประสิทธิภาพ 50%)	13.73 J
3.กำลังไฟฟ้า (Watt) ที่ผลิตได้	13.72
4.กระแสไฟฟ้า (I) ที่เกิดขึ้นที่แรงดัน 12 V	1.06 mA

จากข้อมูลในตารางที่ 1 นำคำนวณหาความจุแบตเตอร์รี่ที่ต้องการพบว่าหากมีจำนวนการเดินขึ้นลงผ่านบันได 1 ขั้น โดยที่บันไดถูกกดด้วยจำนวน 60 ครั้ง/นาที ทำงาน 12 ชม/วัน จะทำให้ได้พลังงานชาร์จเข้าแบตเตอรี่ 763.2 mAh เพียงพอสำหรับชาร์จแบตเตอรี่เล็ก ๆ เช่น Power bank ขนาดเล็กทีละน้อยจึงเลือกแบตเตอร์รี่ลิเธียมขนาด 3.6 V ความจุ 1800 mAh

จากการออกแบบจนนำมาสร้างชุดบันไดเก็บพลังงานทำให้ได้ขั้นบันไดจำนวน 4 ชุด แสดงดังภาพที่ 5 และเริ่มต้นทดสอบจากการเหยียบขั้นบันไดมีระยะยุบ 20 mm ผ่านกลไกเฟืองขับส่งกำลังแบบ Slider Crank ขับเฟืองอัตราทด 1 : 6 ให้หมุนเจนเนอเรเตอร์จำนวน 2 ตัว ทำให้การเหยียบ 1 ครั้ง จะได้รอบการทำงาน 2 ครั้ง (ยุบตัวและคืนตัวด้วยแรงสปริง) สามารถผลิตกระแสไฟได้ 0.25 A



(a)



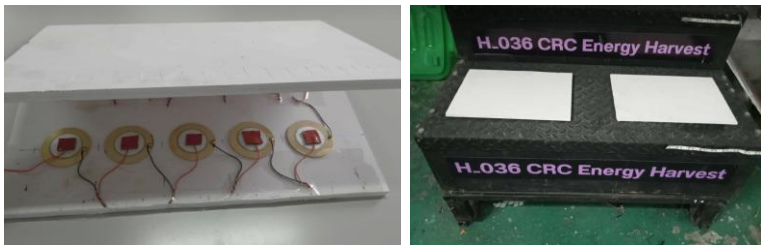
(b)

ภาพที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์ในขั้นบันไดที่ออกแบบ a.ติดตั้งเจนเนอเรเตอร์ในชุดข้อเหวี่ยง b.ติดตั้งชุดข้อเหวี่ยงผลิตไฟฟ้า

2. การทดสอบการทำงานของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

จากการทดทสอบการทำงานในตารางที่ 1 และ 2 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ได้แก่ จำนวนแผ่นที่ต่ออนุกรม และ น้ำหนักที่กดลงบนแผ่น โดยมีรายละเอียดดังนี้

ผลของจำนวนแผ่นเพียโซอิเล็กทริก (ตารางที่ 1) การเพิ่มจำนวนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ต่ออนุกรมตั้งแต่ 1–10 แผ่นแสดงการติดตั้งดังภาพที่ 6 ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จาก 2.51 V ที่จำนวน 1 แผ่น เป็น 11.68 V ที่จำนวน 10 แผ่น ในขณะที่ค่ากระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอยู่ในช่วง 5.7–8.8 mA ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการต่ออนุกรมที่แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนแผ่น ขณะที่กระแสไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนแผ่น โดยสูงสุดที่ 102.51 mw เมื่อใช้ 10 แผ่น



ภาพที่ 6 การติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกและการประกอบแผ่นรับน้ำหนักลงบนบันได

ตารางที่ 2 การทดสอบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่จำนวนแตกต่างกัน

จำนวนแผ่น	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแส (mA)	กำลังวัตต์ (mw)
1	2.51 ± 0.78	5.7	16.91
2	3.84 ± 1.22	8.1	25.44
4	5.11 ± 0.45	7.7	34.75
6	6.42 ± 1.11	8.3	55.12
8	9.48 ± 0.88	8.8	80.74
10	11.68 ± 0.98	7.7	102.51

ผลของน้ำหนักที่กดลงบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริค (ตารางที่ 2) การเพิ่มน้ำหนักที่กดลงบนชุดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 10 แผ่น พบว่าทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นพร้อมกัน โดยแรงดันเพิ่มจาก 10.5 V ที่น้ำหนัก 20 kg เป็น 13.5 V ที่น้ำหนัก 70 kg ส่วนกระแสเพิ่มจาก 7.1 mA เป็น 9.7 mA ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 74.55 mw เป็น 130.95 mw แสดงให้เห็นว่าแรงกดมีอิทธิพลโดยตรงต่อการผลิตพลังงานของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากแรงกดที่มากขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนภาพของผลึกมากขึ้น และสร้างประจุไฟฟ้าได้มากขึ้น

ตารางที่ 3 การทดสอบชุดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่น้ำหนักกดแตกต่างกันจำนวน 1 ชุด (10 ชิ้น)

น้ำหนัก (kg)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแส (mA)	กำลังวัตต์ (mw)
20	10.5 ± 0.66	7.1	74.55
30	10.8 ± 0.74	7.8	84.24
40	11.2 ± 0.64	7.8	87.36
50	11.8 ± 0.81	7.9	93.22
60	12.2 ± 0.98	8.7	106.14
70	13.5 ± 0.87	9.7	130.95

โดยสรุปแล้วการเพิ่มจำนวนแผ่นช่วยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่ส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าอย่างชัดเจน ส่วนการเพิ่มน้ำหนักกด ช่วยเพิ่มทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด พบว่าในตารางที่ 1 ได้ 102.51 mw ที่จำนวน 10 แผ่น ส่วนตารางที่ 2 ได้สูงถึง 130.95 mw ที่น้ำหนัก 70 kg ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า แรงกดหรือน้ำหนัก เป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเด่นชัดมากกว่าจำนวนแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

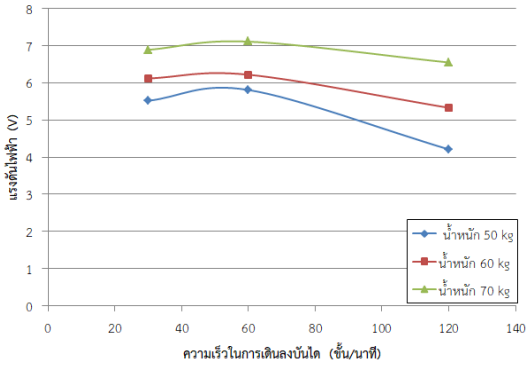
3. การทดสอบการทำงานบันไดเก็บพลังงาน



ภาพที่ 7 การติดตั้งและการทดสอบขั้นบันไดที่ใช้เก็บพลังงาน

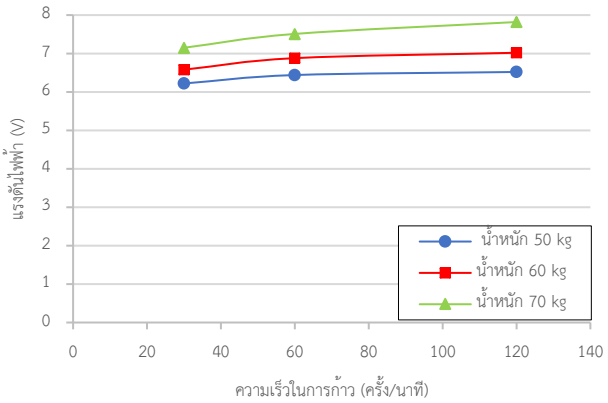
กรณีที่ 1 ทดสอบเฉพาะขั้นบันไดที่ไม่ติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริค

จากการทดสอบบันไดเก็บพลังงานโดยใช้คนจำนวน 3 คน ที่มีน้ำหนักตัวประมาณ 50, 60, 70 kg ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 6 โดยแต่ละคนจะทำการทดสอบการก้าวขึ้นลงบันไดที่ใช้ความเร็วในก้าว 3 ระดับ ได้แก่ 30, 60, 120 ครั้ง/นาที โดยเฉลี่ย ตามลำดับ พบว่าน้ำหนักของคนมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าเมื่อน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วยโดยที่คนน้ำหนัก 70 kg จะทำให้บันไดผลิตแรงดันไฟฟ้าได้มากที่สุด 7.2 V และยังทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตให้สูงขึ้นตามไปด้วย โดยที่คนน้ำหนัก 70 kg ได้กำลังไฟฟ้า 2.2 w แสดงดังภาพที่ 8 เนื่องจากน้ำหนักที่มากขึ้นจะเพิ่มแรงกดไปที่บันไดส่งผลให้เจนเนอเรเตอร์หมุนได้ความเร็วสูงขึ้นผลิตแรงดันไฟฟ้าได้มากตามไปด้วยซึ่งสอดคล้องกับพลังงานศักย์



ภาพที่ 8 ความเร็วในการเดินลงบันไดกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากบันไดผลิตไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักที่กด

ในส่วนของผลจากความเร็วในก้าวขึ้นลงบันได 3 ระดับพบว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจะทำให้อุปกรณ์สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้มากขึ้นเล็กน้อยทุกระดับน้ำหนักเช่น ที่คนน้ำหนัก 50 kg มีความเร็วในการก้าว 30 ครั้ง/นาที ระบบจะผลิตไฟฟ้าได้ 5.5 V และเมื่อมีเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 60 ครั้ง/นาที ระบบจะผลิตไฟฟ้าสูงขึ้นเป็น 5.8 V ตามลำดับ ยกเว้นที่ความเร็วสูงขึ้นเป็น 120 ครั้ง/นาที แรงดันไฟฟ้าลดลงอย่างชัดเจนเหลืออยู่ที่ 4.1 V ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความเร็วในการก้าวสูงมากขึ้นทำให้การตอบสนองของขั้นบันไดที่มีแรงเฉื่อยจากถูกแรงเหยียบกดในครั้งแรก แป้นบันไดไม่สามารถดันตัวคืนจากแรงยืดของสริงให้กลับมาในสภาวะเริ่มต้นได้ทันและถูกแรงกดซ้ำจึงทำให้เจนเนอเรเตอร์ไม่สามารถหมุนผลิตไฟฟ้าได้ตามการออกแบบจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ในช่วงนี้ลดต่ำลงและจะส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อยลงด้วยเช่นกัน แสดงดังภาพที่ 8 อย่างเช่นที่ 120 ครั้ง/นาที ผลิตกำลังไฟได้ 1.88 w น้อยกว่าที่ 60 ครั้ง/นาที ที่สามารถผลิตกำลังไฟได้ 2.32 w



ภาพที่ 9 ความเร็วในการเดินลงบันไดกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากบันไดผลิตไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักที่กดร่วมกับแผ่นเพียโซอิเล็กทริค

กรณที่ 2 ทดสอบเฉพาะขั้นบันไดร่วมกับแผ่นเพียโซอิเล็กทริค

จากผลการทดลองในภาพที่ 9 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเดินลงบันไดกับแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากบันไดที่ติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก โดยใช้แรงกดจากน้ำหนัก 50, 60 และ 70 kg พบว่าเมื่อความเร็วในการเดินเพิ่มขึ้นจาก 40 เป็น 120 ครั้ง/นาที ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกระดับน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของ

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ให้ปริมาณประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อมีแรงกดและการเปลี่ยนแปลงแรงกดที่รวดเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละกรณี พบว่า ที่น้ำหนัก 50 kg ค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 5.2–5.7 V และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความเร็วการเดินที่น้ำหนัก 60 kg ค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 5.7–6.2 V แสดงการเพิ่มขึ้นที่ชัดเจนกว่าน้ำหนัก 50 kg ที่น้ำหนัก 70 kg ค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 6.9–7.8 V และสูงที่สุดในทุกเงื่อนไขการทดลอง แสดงถึงอิทธิพลของแรงกดที่มากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดจากการทำงานของบันไดเก็บสะสมพลังงานทั้งสองกรณี พบว่าน้ำหนักที่มากขึ้นส่งผลเชิงบวกต่อแรงดันและกำลังไฟฟ้าเหมือนกันทั้งสองกรณี แต่ต่างจากผลจากความเร็วการก้าว (ครั้ง/นาที) พบว่ากรณีที่ 1 ที่ไม่ติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริคมีจุดเหมาะสมที่ความเร็วปานกลาง 60 ครั้ง/นาที แต่เมื่อเร็วเกินไปกลับทำให้แรงดันและกำลังลดลง ซึ่งต่างจากกรณีที่ 2 ที่ติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริค พบว่าเมื่อความเร็วสูงขึ้นยิ่งได้แรงดันมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริคสามารถผลิตไฟฟ้าได้ต่อเนื่องไม่มีปัญหาจากความเฉื่อยการเคลื่อนของกลไกจึงเข้ามาช่วยเสริมการทำงานของบันไดที่ใช้เฉพาะกลไกข้อเหวี่ยงเพียงอย่างเดียวได้ ระบบนี้จึงเหมาะกับการเก็บพลังงานจากการเดินจริงที่มีจังหวะก้าวหลากหลาย โดยรวมขั้นบันไดที่ติดตั้งเพียโซอิเล็กทริกให้ประสิทธิภาพสม่ำเสมอและตอบสนองต่อความเร็วได้ดีกว่า ส่วนระบบกลไก เจนเนอเรเตอร์แม้ผลิตกำลังไฟได้สูง แต่มีข้อจำกัดเมื่อความเร็วเกินกว่าค่าที่ออกแบบไว้

4. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

โดยกำหนด เงื่อนไขการทำงานของบันไดดั้งนี้ คนน้ำหนักเฉลี่ยที่เดินผ่าน 60 kg จำนวนคนที่เดินเหยียบผ่านบันได 60 คน/นาที จากการทดลองบันไดสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 2.8 w/ขั้น ซึ่งสูงกว่างานที่ติดตั้งแผ่นแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเพียงอย่างเดียวบนทางเดินในสถานีรถไฟที่ประเทศญี่ปุ่น (Shibuya Station) สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 0.1 w/ก้าว เนื่องจากใช้กลไกข้อเหวี่ยงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพติดตั้งบันไดเก็บพลังงานจำนวน 10 ขั้นพร้อมติดตั้งชุดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกครบทุกขั้น ใช้งาน 8 ชม./วัน ค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้า 4 บาท/หน่วยดังนี้

ลำดับ	รายการ	จำนวน
1	ต้นทุนสำหรับบันไดเก็บพลังงานที่ทำงานร่วมกับแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 10 ขั้น (บาท)	40,000
2	ค่าบำรุงรักษารายปี (บาท)	400
3	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ใน 1 วัน (2.8 w/ขั้น x 10 ขั้น x 60 นาที x 8 ชม.)	13.44
4	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ใน 1 เดือน (kw.h)	403.2
5	หากคิดจากค่าไฟจากการไฟฟ้า บันไดจะผลิตไฟฟ้าได้ (บาท/เดือน)	1,612.8

ผลเงินที่ประหยัดได้ = 1,612.8−400 = 1,212.8 บาท

ระยะเวลาคืนทุน ≈ $\frac{\text{ต้นทุนสำหรับบันได}}{\text{ผลเงินที่ประหยัดได้ต่อเดือน}}$ ≈ $\frac{40,000}{1,212.8 \text{ บาท/เดือน}}$ ≈ 33 เดือน

อภิปรายผล

ผลจากการวิจัยวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 พบว่าบันไดเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าที่ได้จัดทำขึ้นสามารถผลิตไฟฟ้าเฉลี่ย 2.2 w ต่อขั้นหนึ่งขั้นบันได โดยที่น้ำหนักของคนที่กดลงบนแผ่น และความเร็วในการเดินลงบันได เป็นปัจจัยที่ส่งผลเชิงบวกต่อการผลิตแรงดันไฟฟ้า โดยเฉพาะน้ำหนักที่มากขึ้นซึ่งช่วยเพิ่มการเปลี่ยนภาพของผลึกเพียโซอิเล็กทริก ขณะที่ความเร็วในการก้าวที่สูงขึ้นเพิ่มอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงกด ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงกว่างานวิจัยของ Al-Qadhi et al (2018) ที่ใช้กลไก rack & pinion เพียงอย่างเดียวที่ให้แรงดันไฟฟ้าเพียง 2 V / ก้าว ซึ่งกลไกข้อเหวี่ยงในงานวิจัยนี้ให้ 7.2 V มีประสิทธิภาพสูงกว่า เนื่องจากออกแบบให้ได้สองรอบ/ก้าว (ลงและคืนตัว)

ผลจากการวิจัยวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 พบว่าระยะเวลาคืนทุนของขั้นบันไดเก็บสะสมพลังงานอยู่ 33 เดือน หรือ 2 ปี 9 เดือน และเมื่อเทียบกับอายุการใช้งานของอุปกรณ์กลไกที่ใช้โลหะเป็นส่วนใหญ่จะมีอายุการใช้งานนานกว่า 10 ปี เมื่อมีการซ่อมบำรุงอย่างถูกต้อง และเมื่อเปรียบเทียบผลกับงานของ ไตรรัตนา วงค์คร้าย (2564) ที่ศึกษาความเป็นไปได้ของการนำเทคโนโลยีเพียโซอิเล็กทริกมาใช้งานจริงในมหาวิทยาลัยมีการวิเคราะห์ความคุ้มค่าระบบ

พื้นเพียโซ ใช้ทุน 1.6 ล้าน บาท คืนทุน 3.27 ปีซึ่งพบว่าในงานวิจัยฉบับนี้ให้ผลคุ้มค่ากว่า เนื่องจากใช้กลไกร่วมกับแผ่นเพียโซอิเล็กทริกลดต้นทุนต่อหน่วยพลังงานได้ดีกว่า

สรุป/ข้อเสนอแนะ

บันไดเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าโดยใช้กลไกทางกลแบบข้อเหวี่ยงทำงานร่วมกับแผ่นเพียโซอิเล็กทริกสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างสม่ำเสมอโดยที่น้ำหนักของคนมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าเมื่อน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วยโดยที่คนน้ำหนัก 70 kg จะทำให้บันไดผลิตแรงดันไฟฟ้าได้มากที่สุด 7.2 V มีการตอบสนองต่อความเร็วในการก้าวได้ดีทั้งช่วงความเร็วต่ำและความเร็วเร็วสูง ให้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 2.2 w ต่อขั้นบันได และถ้ามีการติดตั้งใช้งานต่อเนื่องทั้งวันจะผลิตไฟฟ้าได้ 403.2 kw.h คิดเป็นเงิน 1,612.8 บาท/เดือน คืนทุนใน 2 ปี 9 เดือน การเก็บพลังงานด้วยบันไดอาจให้พลังงานน้อย แต่ระบบสปริง-ข้อเหวี่ยงและแผ่นเพียโซอิเล็กทริคความทนทานสูงใช้ได้นานจึงมีความคุ้มค่าในการลงทุนระยะยาวเกิน 3 ปีขึ้นไป เหมาะกับการนำไปติดตั้งในพื้นที่ที่คนใช้งานหนาแน่นเช่นสถานศึกษา สถานีรถไฟฟ้า ศูนย์การค้าเป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณวิทยาลัยเชียงรายที่สนับสนุนทุนในการวิจัยในครั้งนี้ ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

ไตรรัตนา วงค์คร้าย. (2564). การศึกษาความเป็นไปได้ของการนำเทคโนโลยีเพียโซอิเล็กทริกมาใช้ในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. ใน วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ทศพร ผิวผ่อง, ธีรพงษ์ อุทธวังและปรมินทร์ ฉันทนันรัตน์. (2559). รองเท้าผลิตไฟฟ้า. ในปริญญานิพนธ์ในหลักสูตรวิศวกรรศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล. มหาวิทยาลัยบูรพา.

Ahmed, N., Muhammad, M. & Bhatti, Z. (2020). Human Footsteps for Energy Generation by Using Piezoelectric Tiles. ResearchGate. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/

Al-Qadhi, T., Al-Baser, A., Sammani, F., Elsayed M. & Jamil, T. (2018). Energy Harvesting and Power Generation from Stairs, 6 TH International Conference on Production, Energy and Reliability 2018: World Engineering Science & Technology Congress (ESTCON) 13–14 August 2018, Kuala Lumpur, Malaysia.

Karmakar, D., Majumdar, K., Pal, M., Roy, P.K. & Machavarapu, S. (2022). Energy Harvesting From Pedestrian Movement Using Piezoelectric Material. Materials Today: Proceedings, 57, 391-397.

Maghsoudi, Nia E., Amila Wan Abdullah Zawawi, N. & Singh Mahinder Singh, B. (2017). A Review of Walking Energy Harvesting Using PIezoelectric Materials. in International Conference on Architecture and Civil Engineering. 8-9 May 2017, Petaling Jaya, Malaysia, 2017, 1-7.

Maiti, R., Dutta, A., Bhunia, C. T. & Banerjee, S. (2024). Energy Harvesting Floor Tile Using Piezoelectric Patches for Low-power Applications. Journal of The Institution of Engineers (India): Series B.

Power-Generating Flooring Converts Footsteps Into Electricity. (2008) Wired, Dec. 4, 2008. [Online]. Available: https://www.wired.com/2008/12/power-generatin.

Raja, R. & Mathew, S. (2014). Power Generation From Staircase (Steps). International Journal of Innovative Research in Science. Engineering and Technology. 3(1) Special Issue, February 2014, 1200-1205.

Upadhyaya, A. & Upadhyaya, S. (2016). A Proposed Method to Generate Electricity Through Power Stair. American Journal of Engineering Research (AJER). 5(6), 20-23.