

บทความวิจัย (Research Article)

การออกแบบและสร้างชิ้นบันไดเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากการเดินด้วยกลไกสไลเดอร์แรงค์

เฉลิมชาติ เมฆเมืองทอง^{1,*}, สมชาย แสงนวล¹ และ ภักดี สิทธิฤทธิ์กวิน¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย

* ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: Chalermchat.me@gmail.com โทรศัพท์: 0875647371

(รับบทความ: 27 มีนาคม 2568; แก้ไขบทความ: 13 พฤษภาคม 2568; ตอรับบทความ: 19 พฤษภาคม 2568)

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างระบบชิ้นบันไดสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากการเดินในชีวิตประจำวัน ซึ่งใช้กลไกสไลเดอร์แรงค์ร่วมกับเฟืองบายศรีและการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ระบบถูกออกแบบให้ยุบตัวได้ 1.8 เซนติเมตร เพื่อไม่รบกวนการทรงตัวของผู้ใช้งาน และสามารถถ่ายทอดแรงเพื่อหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทดสอบแบ่งเป็นสองส่วน ได้แก่ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ และการติดตั้งใช้งานจริงกับชิ้นบันไดจำนวน 4 ชั้น ผลการทดสอบในช่วงเวลา 10.00–14.00 น. เป็นระยะเวลา 7 วัน พบว่าระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เฉลี่ย 628.89 จูลต่อวัน จากจำนวนการเหยียบเฉลี่ย 141.43 ครั้ง โดยมีแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 3.70 โวลต์ และ กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 0.30 แอมแปร์ ผลการวิเคราะห์เพิ่มเติมพบว่าน้ำหนักของผู้ใช้งานมีผลต่อพลังงานที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อคำนวณพลังงานกลที่เข้าสู่ระบบ โดยคำนึงถึงแรงกระแทกจากการเดินจริง พบว่าระบบมีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 31.3 ซึ่งสูงกว่าเทคโนโลยีอื่น เช่น แผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 10–15 และรีเวอร์สอิเล็กโทรเวตติงที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าร้อยละ 25 นอกจากนี้ ระบบยังสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งในจังหวะเหยียบลงและจังหวะคืนตัวของสปริง ช่วยเพิ่มโอกาสในการเก็บเกี่ยวพลังงานได้มากขึ้น สรุปผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบนี้มีความเป็นไปได้ในการนำไปติดตั้งในอาคารเรียน สถานีส่ง หรือพื้นที่ที่มีการใช้งานบันไดอย่างต่อเนื่องเพื่อผลิตพลังงานสำหรับระบบไฟส่องสว่างหรืออุปกรณ์ IoT รวมถึงสามารถพัฒนาเป็นระบบโมดูลาร์เพื่อรองรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่หลากหลายได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การเก็บเกี่ยวพลังงาน ชิ้นบันไดผลิตพลังงาน กลไกสไลเดอร์แรงค์ การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานจากการเคลื่อนไหว

การอ้างอิงบทความ: เฉลิมชาติ เมฆเมืองทอง, สมชาย แสงนวล และ ภักดี สิทธิฤทธิ์กวิน, "การออกแบบและสร้างชิ้นบันไดเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากการเดินด้วยกลไกสไลเดอร์แรงค์," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 3, ฉบับที่ 3, หน้า 54-68, 2568.

บทความวิจัย (Research Article)

Design and Build of Energy-Harvesting Stairs from Walking Using Slider-Crank Mechanism

Chalermchat Mekmuangthong^{1,*}, Somchai Saengnual¹ and Pakdee Sittiritkawin¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Rai College

* Corresponding Author: Chalermchat.me@gmail.com, Tel: 0875647371

(Received: March 27, 2025; Revised: May 13, 2025; Accepted: May 19, 2025)

Abstract

This research aims to design and develop a staircase system capable of harvesting electrical energy from everyday walking activities. The system utilizes a slider-crank mechanism combined with bevel gears and electromagnetic induction. It is designed to compress by 1.8 centimeters to avoid disturbing the user's balance while efficiently transmitting force to rotate the generator. The testing was divided into two parts laboratory experiments and real-world installation using four stair steps. The results from field testing, conducted between 10:00 a.m. and 2:00 p.m. over a period of 7 days, revealed that the system could generate an average of 628.89 joules of electrical energy per day from an average of 141.43 footsteps. The system produced an average voltage of 3.70 volts and an average current of 0.30 amperes. Further analysis indicated that the user's body weight significantly affected the amount of harvested energy. When considering the actual impact forces from walking, the system achieved an average energy harvesting efficiency of 31.3%, which is higher than other technologies such as piezoelectric plates (approximately 10–15% efficiency) and reverse electrowetting (less than 25% efficiency). Moreover, the system can generate electrical energy during both the footstep impact and the spring's return stroke, thereby increasing the opportunity for energy harvesting. The findings demonstrate the potential of this system to be installed in educational buildings, transportation hubs, or areas with frequent stair usage for powering lighting systems or IoT devices. Additionally, it can be developed as a modular system to support sustainable applications in diverse environments.

Keywords: Energy Harvesting, Stair Power Generation, Slider-Crank Mechanism, Electromagnetic Induction, Motion Energy

Please cite this article as: C. Mekmuangthong, S. Saengnual and P. Sittiritkawin, "Design and Build of Energy-Harvesting Stairs from Walking Using Slider-Crank Mechanism," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 3, no. 3, pp. 54-68, 2025.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและคุณภาพชีวิตของมนุษย์ในยุคปัจจุบัน ตามรายงานของหน่วยงานพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency, IEA) ความต้องการใช้พลังงานทั่วโลกคาดว่าจะเพิ่มขึ้นถึง 25% ภายในสองทศวรรษข้างหน้า [1] การพึ่งพาพลังงานฟอสซิลส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง ส่งผลให้พลังงานหมุนเวียนกลายเป็นทางเลือกที่มีความสำคัญยิ่งขึ้นในด้านความยั่งยืนและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก [2] ในขณะที่พลังงานหมุนเวียนจากแหล่งธรรมชาติ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ลม และน้ำ มีข้อดีด้านความยั่งยืน แต่กลับเผชิญข้อจำกัดด้านต้นทุน การลงทุนเริ่มต้นสูง และ ความไม่แน่นอนตามสภาพภูมิอากาศ [3] ในขณะที่พลังงานจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเดินก้าวขึ้นหรือลงบันได เป็นอีกแหล่งพลังงานที่มีเสถียรภาพ สามารถคาดการณ์และควบคุมได้ง่ายกว่าพลังงานหมุนเวียนประเภทอื่น พลังงานจลน์ที่สูญเสียไปในการเคลื่อนไหวของร่างกายสามารถนำมาเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ผ่านเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting) ซึ่งมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยใช้วัสดุและกลไกเฉพาะ เช่น เพียโซอิเล็กทริก การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า อะคริลิกอีลาสโตเมอร์ และรีเวอร์สอิเล็กโทรเว็ตติง

Gothwal et al. [4] เสนอแผ่นพื้นเพียโซอิเล็กทริกแบบ PZT จัดวางเป็นอาร์เรย์ 6×6 (36 แผ่น) เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm บนพื้นที่ 300×300 mm² แล้วเพิ่มประสิทธิภาพด้วย Response Surface Methodology พบว่ากำลังอยู่ที่ 3.62 mW ต่อ ก้าว

ภายใต้แรงกดประมาณ 85 kg และให้พลังงานได้ 0.9 mW ในการเคาะความถี่สูง 30 ก้าว เน้นว่าการจัดอาร์เรย์และพารามิเตอร์ทางกลเป็นตัวชี้ขาดสมรรถนะของพื้นเพียโซในภาคสนาม

Zhong et al. [5] พัฒนาพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานแบบชักกระยะสั้น (small-stroke) ใช้ คานเพียโซหลายชั้น จัดวางแบบ interdigitated เพื่อลดระยะยุบตัวของพื้นและเพิ่มความทนทาน เหมาะกับการฝังในพื้นที่สาธารณะที่ต้องการความสบายเท้าและสัญญาณไฟฟ้าที่สม่ำเสมอโดยไม่ต้องเพิ่มระยะชักมาก งานนี้เป็นการเปรียบเทียบเชิงโครงสร้างและกลศาสตร์ เพื่อชี้แนวทางออกแบบให้พร้อมใช้งานจริง

Di et al. [6] ทบทวน dielectric elastomer generators (DEG) ซึ่งมีจุดเด่นที่ ความยืดหยุ่น น้ำหนักเบา และรองรับความถี่ต่ำ โดยรายงานขีดจำกัดเชิงทฤษฎีของประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงถึง 80–90% และ ความหนาแน่นพลังงานสูงสุดเชิงทฤษฎี 1.7 J ต่อกรัม จึงเป็นอีกทางเลือกสำหรับเป็นอุปกรณ์สวมใส่ หรือ พื้นอัจฉริยะที่ต้องการโครงสร้างบางและยืดหยุ่น

Jintanawan et al. [7] นำเสนอพื้น แม่เหล็กไฟฟ้า ชื่อ Genpath ที่แปลงแรงกดเป็นการหมุนของโรเตอร์ผ่านกลไกสกรู พร้อมแบบจำลองอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อจูนพารามิเตอร์ ผลต้นแบบ Genpath prototype-II ให้พลังงานเฉลี่ย ประมาณ 0.702 J ต่อ ก้าว ซึ่งเหมาะกับจุดติดตั้งที่มีการสั่นไหวแน่นอนและต้องการเอาต์พุตที่เสถียรและต่อเนื่อง

Zou et al. [8] เสนอพื้นแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ bidirectional ที่มี กลไก sustained-release regulation ปรับพลังงานพัลส์จากการก้าวให้ไหลออก

บทความวิจัย (Research Article)

อย่างต่อเนื่องขึ้น การทดสอบรายงานแรงดันสูงสุดประมาณ 51.2 V และพลังงานรวมต่อการเดินที่ความเร็วราว 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ประมาณ 5.4 J สะท้อนศักยภาพด้านความเสถียรของเอาต์พุตสำหรับงานจราจรในสนามจริง

Selim et al. [9] สาธิตแผ่นพื้นเพียโซอิเล็กทริกที่จัดการพลังงานด้วยวงจรเรียงกระแส และ DC-DC buck คุ่มเอาต์พุตคงที่ 5 V ต้นแบบขนาด 455×405 mm ให้แรงดันสูงสุด 33.7 V และระบุ กำลังสูงสุดที่สกัดได้ประมาณ 249.6 mW มีต้นทุนวัสดุราว 10.2 ดอลลาร์สหรัฐฯ ซึ่งการ จับคู่โหลดให้สอดคล้องกับวงจรจัดการพลังงาน มีผลอย่างมากต่อขีดจำกัดสมรรถนะของพื้นที่ใช้เทคโนโลยีเพียโซอิเล็กทริก

Thainiramit et al. [10] พัฒนาแผ่นพื้น triboelectric (TENG) โดยสำรวจพารามิเตอร์ต่างๆ ในโลกจริง เช่น ความหนา PTFE และ ช่องว่างการยุบพบว่า PTFE 0.2 mm ให้พลังงานสะสมต่อก้าวสูงสุดประมาณ 7.69 mJ ที่ 2 Hz ส่วน PTFE 0.1 มม. ให้พลังงานสะสมต่อก้าวสูงสุดประมาณ 3.81 mJ และสามารถจ่ายไฟ ให้หลอด LED 100–150 ดวง ได้เหมาะกับโหนด IoT กำลังต่ำเมื่อมีวงจรเก็บพลังงานและวงจรแปลงพลังงานที่

อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันยังไม่มีระบบใดที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและต้นทุนต่ำพร้อมกัน จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ในการออกแบบและพัฒนาระบบขึ้นบันไดผลิตพลังงานไฟฟ้า ซึ่งตอบโจทย์ด้านประสิทธิภาพ ความเสถียรของพลังงาน และ ความคุ้มค่าในการลงทุน เพื่อสนับสนุนการใช้พลังงานอย่างยั่งยืนในพื้นที่เมือง อาคารเรียน และสถานขนส่ง

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์และคำอธิบาย

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
W/m ²	วัตต์ต่อตารางเมตร
Hz	เฮิรตซ์
N	นิวตัน
T	เทสลา
mW	มิลลิวัตต์
W	วัตต์
m/s	เมตรต่อวินาที
mL/s	มิลลิลิตรต่อวินาที
m ²	ตารางเมตร
kg	กิโลกรัม
cm	เซนติเมตร
mJ	มิลลิจูล
J	จูล
m/s ²	เมตรต่อวินาทียกกำลังสอง
mm	มิลลิเมตร
m	เมตร
V	โวลต์
RPM	รอบต่อนาที
N.mm	นิวตันมิลลิเมตร
A	แอมแปร์
Ah	แอมแปร์-ชั่วโมง
VDC	โวลต์กระแสตรง

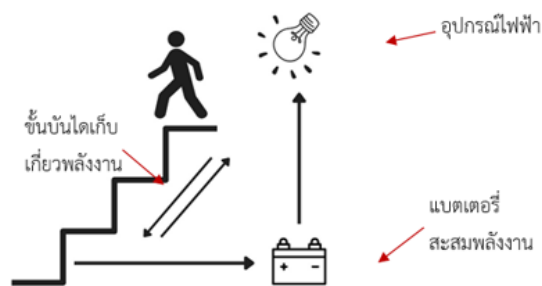
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวิธีการดำเนินการวิจัย

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวิธีการดำเนินการวิจัย มุ่งเน้นศึกษาหลักการแปลงพลังงานจลน์จากการเคลื่อนไหวของมนุษย์เป็นพลังงาน ผ่านกลไกทางวิศวกรรมมีประสิทธิภาพ

บทความวิจัย (Research Article)

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 กรอบแนวคิดพื้นฐาน

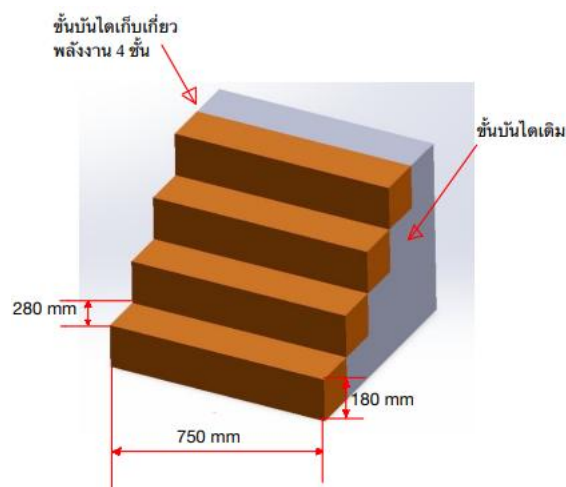


รูปที่ 1 กรอบแนวคิดพื้นฐาน

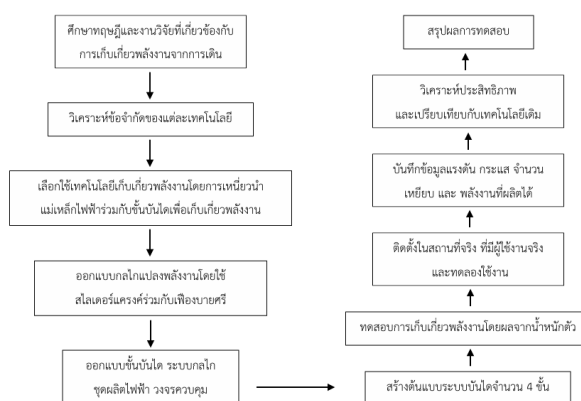
ในงานวิจัยนี้ได้มีกรอบแนวคิดพื้นฐานคือ การก้าวขึ้นและลงบันได จะมีบันไดที่ถูกออกแบบให้สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้ และนำพลังงานเหล่านั้นไปใช้ประโยชน์ต่ออุปกรณ์ขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 1 และมีการกำหนดขอบเขตการออกแบบ โดยเลือกขนาดให้สามารถประกอบเข้ากับชั้นบันไดเดิมได้ เพื่อให้สามารถนำไปประกอบใช้กับชั้นบันไดที่มีอยู่ โดยเลือกใช้บันไดโรงอาหารของวิทยาลัยเชียงราย มีความกว้างของบันได (Tread) 28 cm ความสูงชั้นบันได (Riser) 18 cm และ ยาว (Width) 75 cm ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยไม่ให้ผู้ใช้งานก้าวขึ้น-ลง สวนทางกัน กำหนดระยะยุบตัวของชั้นบันไดไม่เกิน 2 cm เพื่อป้องกันการสูญเสียการทรงตัวเมื่อเดินขึ้น หรือ ลง บันได ซึ่งมีทั้งหมด 4 ชั้น หลังจากนั้นได้ดำเนินการวิจัยดังแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 3

2.2.2 การคำนวณความเป็นไปได้ในการผลิตพลังงาน

ในการเริ่มต้นได้มีการคำนวณความเป็นไปได้ในการผลิตพลังงานและพลังงานที่คาดว่าจะสามารถผลิตได้สำหรับชั้นบันไดเก็บเกี่ยวพลัง ซึ่งเริ่มจากการ



รูปที่ 2 รูปจำลองบันไดโรงอาหารวิทยาลัยเชียงราย



รูปที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

การวิเคราะห์พลังงานจากการก้าวขึ้นหรือลงบันไดของมนุษย์ การเดินเป็นวัฏจักรของการยกเท้า (พลังงานจลน์) และการลงเท้า (พลังงานศักย์) โดยพลังงานกล (Mechanical Energy) คือ ผลรวมของพลังงานทั้งสอง ในขณะที่ลงเท้าแรงที่กดพื้นจะเท่ากับ 1.3 เท่าของน้ำหนักตัวและโดยทั่วไปจะมีแรงกด 2 ครั้งต่อการลงเท้าหนึ่งครั้ง (ส้นเท้าและปลายเท้า) ในกรณีที่เหยียบลงบนพื้นเรียบ [11] แต่สำหรับการเหยียบลงเพื่อให้บันไดยุบตัวจะมีแรงกดในการเหยียบ

บทความวิจัย (Research Article)

เป็น 1 ครั้ง เมื่อพัฒนารวมกับสมการพลังงานศักย์
จะสามารถคำนวณพลังงานที่ได้จากสมการที่ (1)

$$E_{\text{harvest}} = 1.3mghf \quad (1)$$

เมื่อ	E_{harvest}	คือ พลังงานจากการก้าวเดิน (J)
	m	คือ น้ำหนักตัว (kg)
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ของโลก (m/s^2)
	h	คือ ระยะยวบของขั้นบันได (m)
	f	คือ ความถี่ของแรงกดที่เท้า (Hz)

โดยในการเดิน 1 ก้าว สำหรับหญิงไทยที่หนักเฉลี่ย
57.4 kg จะมีพลังงาน 14.64 W ชายไทยน้ำหนักเฉลี่ย
68.83 kg จะมีพลังงาน 17.55 W

2.1.3 การเลือกเจนเนอเรเตอร์ (Generator)

ในการสร้างขั้นบันไดเก็บเกี่ยวพลังงาน ได้กำหนด
สมมติฐานสำคัญในการเลือกเจนเนอเรเตอร์
(Generator) เพื่อตอบสนองต่อความต้องการทาง
เทคนิคและการใช้งานจริง โดยเลือกใช้เจนเนอเรเตอร์
ที่สามารถหมุนได้ด้วยแรงบิดต่ำ สามารถรองรับ
ผู้ใช้งานที่มีน้ำหนักไม่มาก ต้องหาซื้อได้ง่าย เพื่อความ
สะดวกในการบำรุงรักษาและการหาอะไหล่ ต้องใช้
งานได้ที่ความเร็วรอบในการต่ำ เพื่อให้เหมาะสมกับ
ความเร็วในการเคลื่อนที่ และเจนเนอเรเตอร์ต้อง
สามารถให้กำลังไฟฟ้าน้อยสุดไม่ต่ำกว่า 3 VDC
เนื่องจากกำหนดการสร้างบันไดทั้งหมด 4 ชั้น ผลรวม
ของแรงดันที่ใช้งานต่ำสุดที่ต้องการ คือ 12 V
ซึ่งเหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้าส่วน
ใหญ่ หรือ ระบบแบตเตอรี่สำรอง เพื่อให้สามารถใช้
พลังงานที่ผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเลือกใช้

เจนเนอเรเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งสามารถสร้าง
ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 24 V กำลังไฟฟ้าสูงสุด 20 W



รูปที่ 4 เจนเนอเรเตอร์ที่เลือกใช้งาน

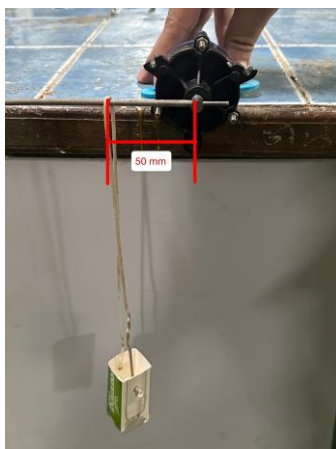
เมื่อนำเจนเนอเรเตอร์มาทดสอบเพิ่มเติมพบว่า
เจนเนอเรเตอร์หมุนได้ด้วยแรงบิดน้อยสุดซึ่งสามารถ
คำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$T = FL \quad (2)$$

เมื่อ	T	คือ แรงบิด (N.mm)
	F	คือ แรง (N)
	L	คือ ระยะจากแรงถึงจุดหมุน (mm)

ผลที่ได้คือ แรงบิดน้อยสุดที่สามารถหมุน
เจนเนอเรเตอร์ได้คือ 89.325 N.mm ใช้การทดสอบ
หาแรงบิดโดยการเพิ่มน้ำหนักที่ห้อยกับแกนของ
เจนเนอเรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5 และทดสอบ
ความเร็วรอบของการหมุนที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้า
ได้มากกว่า 3 V โดยหมุนเจนเนอเรเตอร์ในความเร็ว
รอบต่าง ๆ พบว่าต้องใช้ความเร็วรอบมากกว่า
150 RPM ดังแสดงในตารางที่ 2

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 5 การหาแรงกดที่ทำให้เจนเนอเรเตอร์หมุน

ตารางที่ 2 ความเร็วรอบและแรงดันไฟฟ้า

ความเร็วรอบ (RPM)	แรงดันไฟฟ้า (V)
150	3.07
160	3.28
170	3.45
180	3.67
190	3.90
200	4.09
210	4.28

2.1.4 การออกแบบกลไก

ในการออกแบบกลไกเก็บเกี่ยวพลังงานจากชั้นบันได กลไกสไลเดอร์แครงค์ (Slider-Crank Mechanism) ถูกเลือกใช้ร่วมกับเฟืองบายศรี (Bevel Gear) เพื่อแปลงการเคลื่อนที่เชิงเส้นจากการยุบตัวของชั้นบันไดให้เป็นการหมุนของเจนเนอเรเตอร์ผลิตไฟฟ้า การตัดสินใจนี้มีเหตุผลจากการประเมินข้อดีข้อเสียของกลไกทางเลือกอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อจำกัดด้านระยะยุบตัวที่ 20 mm เป็นเงื่อนไข

สำคัญเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเดินขึ้นลงได้โดยไม่สูญเสียการทรงตัว

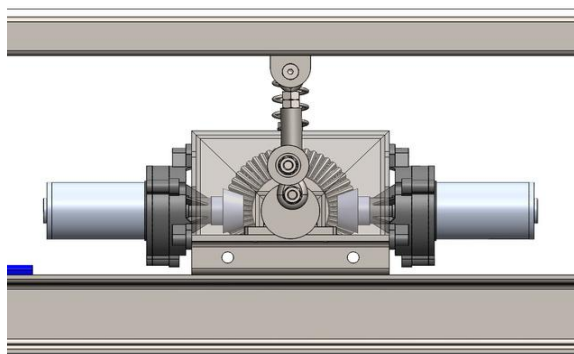
กลไกแร็คแอนด์พินเนียน (Rack and Pinion) ถูกตัดออกจากตัวเลือกเนื่องจากระยะการเคลื่อนที่ของแร็คจะถูกจำกัดอยู่ที่ 20 mm เช่นกัน ทำให้ไม่สามารถสร้างความเร็วรอบที่เพียงพอต่อการขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ ในขณะที่กลไกลีดสกรู (Lead-Screw) แม้จะสามารถแปลงการเคลื่อนที่เชิงเส้นเป็นการหมุนได้ แต่เนื่องจากระยะเคลื่อนที่สั้น การเพิ่มความเร็วยังจะต้องแลกมาด้วยแรงเสียดทานที่สูงขึ้นอย่างมาก ซึ่งจะลดทอนประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ

การใช้เฟืองบายศรีร่วมกับสไลเดอร์แครงค์จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม เนื่องจากสามารถใช้ประโยชน์จากอัตราทด (Gear Ratio) ของเฟืองเพื่อเพิ่มความเร็วยังมอเตอร์ได้โดยไม่ต้องเพิ่มระยะยุบตัวของชั้นบันได การที่เฟืองบายศรีสามารถส่งกำลังในแนวแกนที่ทำมุมกันได้ ยังทำให้การจัดวางตำแหน่งของเจนเนอเรเตอร์มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในการออกแบบให้ระบบมีขนาดกะทัดรัด นอกจากนี้ การใช้เฟืองบายศรียังมีแนวโน้มที่จะลดแรงเสียดทานเมื่อเทียบกับลีดสกรู และยังสามารถทำให้การออกแบบสามารถใช้เจนเนอเรเตอร์ 2 ตัวในชั้นบันไดชั้นเดียวได้ เมื่อพิจารณาพร้อมกับแรงบิดน้อยสุดที่สามารถหมุนเจนเนอเรเตอร์ได้

การเลือกใช้แครงค์เลือกขนาดใหญ่ที่สุดที่สามารถเป็นไปได้คือเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm เท่ากับระยะยุบของบันได ดังแสดงใน รูปที่ 6

บทความวิจัย (Research Article)

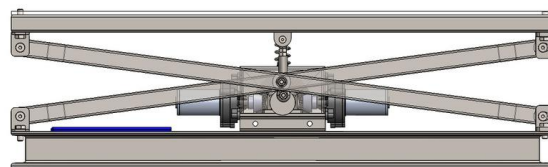
ส่วนของการเลือกอัตราทดของเฟืองบายสี ใช้การสำรวจจากคู่เฟืองหาได้ง่ายโดยเลือกใช้เฟืองของเครื่องเจียร์มือ ซึ่งใช้เฟืองใหญ่เป็นเฟืองขับและเฟืองเล็กเป็นเฟืองตาม ซึ่งมีขนาดเฟืองเล็กที่เล็กที่สุดที่ 16 ฟัน คู่กับเฟืองใหญ่ขนาด 59 ฟัน มีอัตราทด 1 : 3.69 หมายความว่า ถ้าเฟืองใหญ่หมุนครบรอบเฟืองเล็กจะหมุน 1.85 รอบ จากงานวิจัย [12] พบว่า ได้มีการวัดอัตราการเดินขึ้นบันไดว่าคนทั่วไปเดินขึ้นบันไดด้วยอัตราเฉลี่ยประมาณ 90-110 ก้าวต่อนาที ดังนั้นความถี่ของการเหยียบขึ้นบันไดจะเป็น 0.54 วินาทีต่อ 1 ก้าว ดังนั้นในความเร็วรอบของเจนเนอเรเตอร์จะมีค่า 221.4 RPM ซึ่งเมื่อเทียบตามตาราง 2 จะสามารถสร้างศักย์ไฟฟ้าใช้งานได้มากกว่า 4.28 VDC



รูปที่ 6 กลไกของขึ้นบันไดเก็บเกี่ยวพลังงาน

การของการออกแบบโครงสร้างเลือกใช้กลไกกรรไกร (Scissor Mechanism) ซึ่งเป็นชนิดของกลไกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการออกแบบที่ต้องการการขยายหรือยุบตัวในแนวตั้งหรือแนวราบ ซึ่งกลไกนี้มีข้อดีคือไม่จำเป็นต้องสร้างไกด์ตัวนำ อีกทั้งยังป้องกันการเอนเอียงของโครงสร้างที่ให้ความรู้สึกไม่มั่นคงสำหรับการยุบตัวและคืนตัวในแนวตั้ง

สามารถคืนตัวได้ด้วยการติดตั้งสปริงเพียงเดียว แสดงได้ดังในรูปที่ 7



รูปที่ 7 กลไกโครงขึ้นบันไดเก็บเกี่ยวพลังงาน

2.1.5 การเลือกใช้แบตเตอรี่และการออกแบบวงจรประจุกระแสไฟฟ้า

เลือกใช้แบตเตอรี่ที่มีขายทั่วไปโดยเลือกใช้แบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตด้วยเหตุผลที่ทำให้เป็นตัวเลือกที่เหมาะสม ประกอบไปด้วย ความทนทานและความปลอดภัยสูง ช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดไฟไหม้ การระเบิดที่อาจเกิดขึ้นจากการชาร์จหรือการใช้งานที่ผิดพลาด [13] นอกจากนี้ยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน โดยสามารถรองรับการชาร์จและปล่อยกระแสไฟฟ้าได้หลายพันรอบโดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพ [14] แบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตยังต้องการการบำรุงรักษาต่ำ เนื่องจากมีการปล่อยพลังงานตัวเองต่ำทำให้สามารถเก็บรักษาพลังงานไว้ได้นาน มีการหดตัวของแรงดันที่ต่ำในขณะที่ปล่อยกระแส ช่วยให้เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการประสิทธิภาพสูงและมีความเสถียร [15] นอกจากนี้ แบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น ด้วยการใช้วัสดุที่ไม่เป็นพิษและ การรีไซเคิลที่ง่ายกว่า [16] จากการทดสอบเจนเนอเรเตอร์ ทำให้ทราบความเร็วรอบและศักย์ไฟฟ้าที่ได้ ความเร็วรอบสูงสุดจากการเหยียบขึ้นบันไดคือ 221.4 RPM จากตารางที่ 2 สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้

บทความวิจัย (Research Article)

มากกว่า 4.28 V จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นจึงเลือกใช้แบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟต ศักย์ไฟฟ้า 3.2 V สามารถหาค่าพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าด้วยกฎของโอห์มเมื่อความต้านทานในเจนเนอเรเตอร์คงที่ ดังสมการที่ (3)

$$\frac{P_1}{V_1^2} = \frac{P_2}{V_2^2} \quad (3)$$

เมื่อ	P_1	คือ กำลังไฟฟ้าที่สภาวะที่ 1 (W)
	V_1	คือ ศักย์ไฟฟ้าที่สภาวะที่ 1 (V)
	P_2	คือ กำลังไฟฟ้าที่สภาวะที่ 2 (W)
	V_2	คือ ศักย์ไฟฟ้าที่สภาวะที่ 2 (V)

โดยอ้างอิงจากข้อมูลของเจนเนอเรเตอร์ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 24 V กำลังไฟฟ้าสูงสุด 20 W และ ศักย์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ 3.2 V จะได้กำลังไฟฟ้า 0.36 W ดังนั้นในการเหยียบขึ้นบันได 1 วิวัฏจักรขึ้น-ลง เจนเนอเรเตอร์ 2 ตัวจะสามารถให้กำลังไฟฟ้าได้ 1.44 W ต่อขึ้นบันได 1 ขั้น และสามารถหาความจุของแบตเตอรี่ได้จากสมการที่ (4) ดังนี้

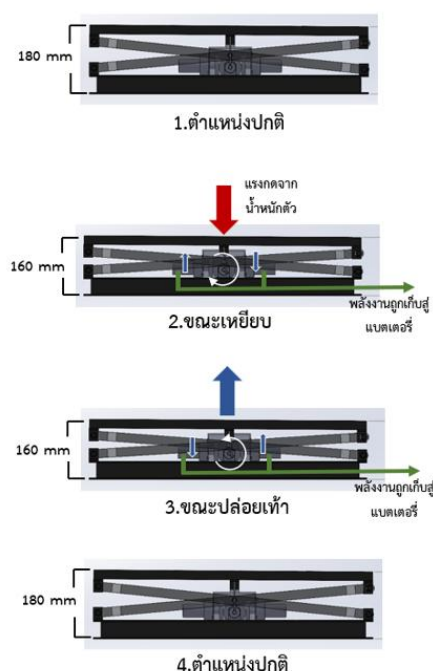
$$P=IV \quad (4)$$

เมื่อ	P	คือ กำลังไฟฟ้า (W)
	V	คือ ศักย์ไฟฟ้า (V)
	I	คือ กระแสไฟฟ้า (A)

กำหนดข้อมูลเบื้องต้นว่ามีผู้ใช้งานเดินขึ้นลงบันไดในอัตราชั่วโมงละ 50 คน เป็นเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน สามารถหาความจุของแบตเตอรี่ได้ 90 Ah จึงเลือกใช้แบตเตอรี่สำหรับขึ้นบันไดแต่ละขั้น ขนาด 3.2 V 100 Ah

ในส่วนของการออกแบบวงจรประจุกระแสจากการติดตั้งเจนเนอเรเตอร์ 2 ตัว ซึ่งต่อแบบขนาน

ทำให้เจนเนอเรเตอร์ 2 ตัว หมุนตรงข้ามกัน หากไม่มีวงจรใด ๆ เข้าช่วยในการจัดเรียงกระแสจะทำให้เจนเนอเรเตอร์ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์และเกิดแรงต้านการหมุน ทำให้บันไดไม่สามารถยุบตัวจากแรงเหยียบได้ อีกทั้งในการเหยียบลง เมื่อยกเท้าขึ้นกลไกจะทำให้เจนเนอเรเตอร์หมุนกลับด้าน เนื่องจาก ถูกสปริงดันกลับ ส่งผลให้บันไดที่มีเจนเนอเรเตอร์กระแสตรง แสดงพฤติกรรมการปล่อยกระแสไฟฟ้าคล้ายกับเป็นเจนเนอเรเตอร์กระแสสลับ เพื่อการจะให้เจนเนอเรเตอร์ปล่อยกระแสไฟฟ้าไปในทิศทางเดียวกัน จำเป็นต้องมีการออกแบบวงจรสำหรับการจัดเรียงกระแสและวงจรประจุกระแสลงแบตเตอรี่ ซึ่งในการออกแบบวงจรดังกล่าว สามารถทำให้การเหยียบขึ้นบันได 1 ครั้ง ไม่เกิดแรงต้านของเจนเนอเรเตอร์จากกระแสไฟฟ้าย้อนกลับ และยังสามารถผลิตพลังงานได้ทั้งขณะเหยียบลงและขณะยกเท้าขึ้นเมื่อสปริงติดบันไดกลับคืนสู่ตำแหน่งเริ่มต้น แสดงดังรูปที่ 8

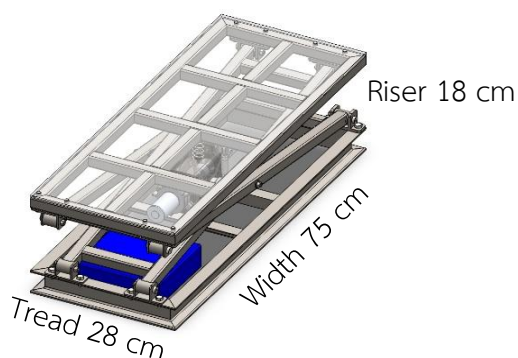


รูปที่ 8 การทำงานของบันไดเก็บพลังงาน

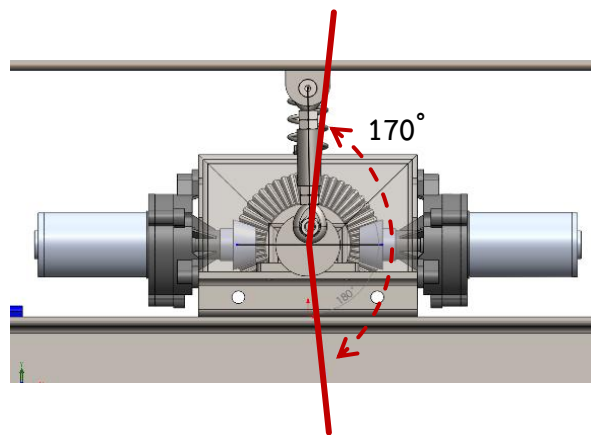
บทความวิจัย (Research Article)

2.2 การประกอบติดตั้งเพื่อทำการทดสอบ

เมื่อออกแบบสร้างชั้นบันไดเก็บเกี่ยวพลังงานเสร็จเรียบร้อยแล้ว ได้ทำการประกอบรวมบันไดเข้าด้วยกันทั้งหมด 4 ชั้น ซึ่งทำให้ระบบรวมเป็นระบบไฟฟ้า 12.8 V ความจุ 400 Ah มีน้ำหนักรวมชั้นละ 18 kg ขนาดความกว้างของบันได (Tread) 28 cm ความสูงชั้นบันได (Riser) 18 cm และ ยาว (Width) 75 cm ดังแสดงในรูปที่ 9 และมีระยะยุบเพียง 1.8 cm เนื่องจากกลไกสไลด์เตอร์แครงค์ของบันไดเก็บเกี่ยวพลังงาน สามารถมีแครงค์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด 2 cm เนื่องจากกำหนดระยะยุบไม่เกิน 2 cm ผู้ใช้งานจะไม่รู้สึกสูญเสียการทรงตัว แต่หากทำให้ระยะในแนวดิ่งเป็น 2 cm ตัวแครงค์จะต้องหมุนด้วยมุม 180 องศา ทำให้กลไกเกิด Dead Centers ขึ้นบริเวณจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของแครงค์ ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนไหวได้ในการสร้างจริง จึงมีการกำหนดให้การหมุนของแครงค์หมุน 170 องศา เพื่อเว้นช่วงของมุมบนและล่างด้านละ 5 องศา เพื่อป้องกันการเกิด Dead Centers ของกลไก ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 9 ภาพรวมการออกแบบที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 10 แผนภาพตำแหน่งกลไกสไลด์เตอร์แครงค์

2.3 การทดสอบ

ในการศึกษาได้กำหนดวิธีการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของชั้นบันไดเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากการเดิน ซึ่งอาศัยกลไกสไลด์เตอร์แครงค์ร่วมกับเฟืองบายศรีและการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า วิธีการทดลองนี้มุ่งเน้นการเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพลังงานที่สามารถผลิตได้ในสภาวะการใช้งานจริงโดยมีสามประเด็นหลัก ดังนี้

2.3.1 ความสามารถในการผลิตพลังงาน

โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักของผู้ใช้งาน ทำการทดสอบโดยให้ผู้ใช้งานที่มีน้ำหนักแตกต่างกัน ซึ่งผู้ทดสอบมีน้ำหนัก 54, 62 และ 73 กิโลกรัม ก้าวเหยียบผ่านบนชั้นบันไดจำนวน 1 ชั้น คนละ 100 รอบ บันทึกค่าความต่างศักย์ (V) และ กระแสไฟฟ้า (I) ที่เกิดขึ้นจากเจนเนอเรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 11 ข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาหาค่ากำลังไฟฟ้า และ เปรียบเทียบพลังงานกับน้ำหนักของผู้ใช้งาน

2.3.2 การทดสอบพลังงาน

การทดสอบพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้จริงในแต่ละวัน โดยใช้เวลาทั้งหมด 7 วัน เก็บข้อมูลช่วงเวลา 10.00 -

บทความวิจัย (Research Article)

14.00 น. เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มิใช่ใช้งานอย่างต่อเนื่อง การทดลองเริ่มต้นจากการติดตั้งชั้นบันไดเก็บเกี่ยวพลังงานที่ผ่านกระบวนการออกแบบและผลิตเรียบร้อยแล้วจำนวน 4 ชั้น โดยมีการติดตั้งเครื่องมือวัดสำหรับวัดค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ระบบเก็บข้อมูลจะบันทึกค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละครั้งที่มิใช่ผู้ใช้เดินขึ้นและลงบันได ซึ่งแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งจะถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และทำการเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ได้จริงกับการคำนวณเชิงทฤษฎี

2.3.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของชั้นบันไดหนึ่งชั้น และประสิทธิภาพโดยรวมของระบบบันไดทั้ง 4 ชั้น โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง 2.3.1 และ 2.3.2 มาวิเคราะห์ประสิทธิภาพโดยใช้สมการที่ (5)

$$\eta = \frac{E_{\text{output}}}{E_{\text{input}}} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพโดยรวม
 E_{output} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (J)
 E_{input} คือ พลังงานศักย์ที่คำนวณจาก
 น้ำหนักของผู้เดินและ
 ระยะยวบของบันได (J)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การเก็บข้อมูลโดยให้ผู้ทดสอบที่มีน้ำหนักต่างกัน ขึ้นลงบันได 1 ชั้น จำนวน 100 ครั้ง เก็บข้อมูลความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่ได้ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยทั้งหมด จะเห็นได้ว่า น้ำหนักของผู้ใช้งานมีผลต่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้อย่างชัดเจน โดยเมื่อ

น้ำหนักของผู้ทดสอบเพิ่มขึ้น ทำให้แรงกดที่กลไกบันไดมีมากขึ้น ส่งผลให้เจนเนอเรเตอร์หมุนได้เร็วขึ้น ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงได้ดังตารางที่ 3



รูปที่ 11 การทดสอบบันได 1 ชั้น



รูปที่ 12 อุปกรณ์บันทึกค่าและชั้นบันไดที่สำเร็จ

ผู้ที่มีน้ำหนัก 54 kg สามารถผลิตพลังงานได้ประมาณ 1.44 W ในขณะที่ผู้ที่มีน้ำหนัก 73 kg สามารถผลิตพลังงานได้ถึง 1.78 W คิดเป็นความ

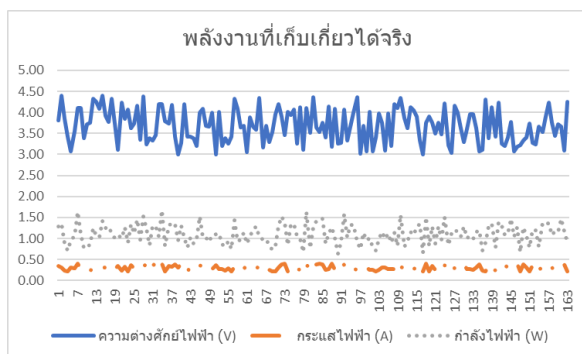
บทความวิจัย (Research Article)

แตกต่างกันประมาณ 23.6% แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักที่มากกว่าสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 ผลของน้ำหนักต่อการเก็บเกี่ยวพลังงาน

ลำดับ	น้ำหนัก (Kg)	ความต่างศักย์ (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	54	4.12	0.35	1.44
2	62	4.28	0.38	1.63
3	73	4.45	0.4	1.78

การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ไม่ใช่แบบพุ่งหรืออัมตั่ว ซึ่งแสดงว่าโครงสร้างกลไกของชั้นบันไดยังสามารถรับแรงที่จากน้ำหนักที่สูงขึ้นได้อีก



รูปที่ 14 ผลการทดสอบของบันได 1 ชั้น ใน 1 วัน

การทดลองในช่วงเวลา 10.00 – 14.00 น. ของบันได 1 ชั้น ใน 1 วัน พบว่า ระบบสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องในระหว่างการใช้งานจริง จากรูปที่ 14 แสดงตัวอย่างข้อมูล พบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากระบบมีช่วงคงที่ โดยอยู่ในช่วง 3.5 – 4.5 V ตลอดช่วงเวลาทดลอง แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ

กลไกส่งกำลังที่สามารถหมุนเจนเนอเรเตอร์ได้อย่างสม่ำเสมอ ไม่ว่าจะมีความแรงมากหรือน้อย

สำหรับกระแสไฟฟ้า มีความผันผวนมากกว่า โดยมีค่าในช่วงประมาณ 0.25 – 0.35 A ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างของแรงกดในแต่ละครั้งของผู้ใช้งานที่เดินผ่านชั้นบันได โดยเฉพาะในช่วงที่มีน้ำหนักมากหรือเหยียบด้วยแรงมาก จะเกิดกระแสสูงกว่าปกติ

เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้า ซึ่งได้จากการคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า พบว่า มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 1.2 – 1.6 W ต่อครั้งของการเหยียบ โดยมีลักษณะเป็นกราฟเส้นประที่ขึ้นลงตามจังหวะแรงกด ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบบันไดเก็บเกี่ยวพลังงาน

วันที่	จำนวนเหยียบ (ครั้ง)	ความต่างศักย์เฉลี่ย (V)	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (A)	พลังงานรวม (W)
1	143	3.70	0.30	639.08
2	152	3.72	0.29	661.24
3	135	3.70	0.30	596.48
4	163	3.69	0.30	720.92
5	172	3.70	0.30	766.44
6	121	3.74	0.30	544.92
7	104	3.66	0.31	473.16
เฉลี่ย	141.43	3.70	0.30	628.89

จากตารางที่ 4 การทดลองเก็บข้อมูลการใช้งานชั้นบันไดเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าในสถานการณ์จริงดำเนินต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 7 วัน โดยเริ่มวันจันทร์-วันอาทิตย์ ระหว่างเวลา 10.00 – 14.00 น. โดยวัดผลจากจำนวนการเหยียบชั้นบันไดในแต่ละวัน

บทความวิจัย (Research Article)

พร้อมทั้งบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รวมในแต่ละวัน

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า จำนวนครั้งในการเหยียบขึ้นบันไดในแต่ละวันอยู่ในช่วง 104 – 172 ครั้งต่อวัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 141.43 ครั้งต่อวัน ซึ่งสะท้อนถึงพฤติกรรมการใช้งานของผู้คนในพื้นที่เป้าหมายที่มีความเหมาะสมระดับหนึ่ง ซึ่งจะน้อยลงในช่วงวันหยุด เสาร์-อาทิตย์ คือ วันที่ 6 และวันที่ 7 ซึ่งจะมีจำนวนผู้ใช้งานน้อยกว่าวันปกติ

ในด้านการผลิตพลังงาน พบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยที่วัดได้อยู่ในช่วง 3.66 – 3.74 V โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.70 V ส่วน ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.29 – 0.31 A โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 0.30 A แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรักษาระดับแรงดันและกระแสได้อย่างเสถียร แม้จะมีจำนวนผู้ใช้งานและแรงกดที่แตกต่างกันในแต่ละวัน

เมื่อคำนวณ พลังงานรวมที่ผลิตได้ในแต่ละวัน พบว่า มีค่าตั้งแต่ 473.16 W (วันที่ 7) ไปจนถึง 766.44 W (วันที่ 5) โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 628.89 W ต่อวัน ซึ่งแสดงถึงศักยภาพในการใช้งานจริงในระบบขนาดเล็ก เช่น ไฟส่องสว่าง LED ระบบชาร์จแบตเตอรี่ขนาดเล็ก หรือ อุปกรณ์ IoT ได้

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบและสร้างระบบขึ้นบันไดเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าด้วยกลไกสไลเดอร์แรงกดและการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้ในสภาพแวดล้อมจริงโดยไม่กระทบต่อพฤติกรรมของผู้ใช้งานและ

สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจากการทดลองต่อเนื่อง 7 วัน ในช่วงเวลา 10.00 – 14.00 น. ระบบสามารถผลิตพลังงานได้เฉลี่ย 628.89 วัตต์ต่อวัน จากจำนวนการเหยียบเฉลี่ย 141.43 ครั้งต่อวัน โดยให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย 3.70 V และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 0.30 A ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่า น้ำหนักของผู้ใช้งานมีผลต่อพลังงานที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยน้ำหนักที่มากขึ้นจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงถึงความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างแรงกดและพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากกลไกแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าว

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นในสาขาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเดิน เช่น งานของ Wang และคณะ (2023) ที่ใช้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกซึ่งสามารถผลิตพลังงานได้ประมาณ 1–2 W/m² แต่มีประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 10–15 และมีต้นทุนต่อหน่วยสูง หรือผลงานของ Chen และคณะ (2020) ที่ใช้เทคโนโลยี Reverse Electrowetting ซึ่งแม้จะให้พลังงานสูงแต่ต้องการพื้นที่และการดูแลรักษาสูง

ระบบบันไดในงานวิจัยฉบับนี้มีความได้เปรียบในด้านของต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า การดูแลรักษาง่าย และสามารถผลิตพลังงานได้ 1.44–1.78 วัตต์ต่อครั้งที่เหยียบ ผลการทดลองเมื่อคำนวณประสิทธิภาพของระบบโดยงานกลจากแรงกดที่รวมทั้งน้ำหนักตัวและแรงกระแทกจากการเดิน พบว่าระบบสามารถแปลงพลังงานกลที่เข้าสู่ระบบให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้เฉลี่ยประมาณ 31.3% ตลอดระยะเวลาทดลอง 7 วัน โดยมีพลังงานกลเฉลี่ยที่เข้าสู่ระบบ จากการคำนวณด้วยสมการที่ 1 ประมาณ 2,012.86 จูลต่อวัน และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงเฉลี่ย 628.89 จูลต่อวัน

บทความวิจัย (Research Article)

ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานแบบอื่น ๆ ที่มักมีประสิทธิภาพเฉลี่ยต่ำกว่า 30% ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่ากลไกที่ออกแบบมีความเหมาะสมในการรับแรงกดและแรงเคลื่อนที่จากการเดินของผู้ใช้งานจริง และสามารถนำพลังงานดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ได้ภายใต้สภาพแวดล้อมการใช้งานจริงในชีวิตประจำวัน

เพื่อการพัฒนาต่อยอดในอนาคต ระบบขั้นบันไดเก็บเกี่ยวพลังงานนี้สามารถนำไปติดตั้งในพื้นที่ใช้งานจริงสามารถเพิ่มเติมจากขั้นบันไดเดิมได้ เช่น อาคารเรียน โรงพยาบาล หรือ สถานีขนส่งที่มีการใช้งานบันไดอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังสามารถออกแบบให้เป็นโมดูลาร์ (Modular System) เพื่อความยืดหยุ่นในการติดตั้ง ปรับแต่งจำนวนขั้นให้เหมาะกับแต่ละพื้นที่ นอกจากนี้ยังสามารถผนวกกับระบบแบตเตอรี่หรืออุปกรณ์ IoT เพื่อเก็บพลังงานไว้ใช้กับระบบแสงสว่างระบบวัดจำนวนผู้ใช้งาน หรือเซนเซอร์ไร้สายต่าง ๆ ได้ อีกทั้งสามารถพัฒนาอัตราทดของเฟือง หรือปรับปรุงวัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางกลและลดแรงเสียดทาน รวมถึงควรศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้งานกับระบบเพื่อให้มั่นใจว่าระบบไม่ส่งผลกระทบต่อความรู้สึกขณะเดิน หรือความปลอดภัยของผู้ใช้งานในระยะยาว

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] International Energy Agency (IEA), "Global Energy Review 2025," Paris: IEA, Mar. 24, 2025.
- [2] REN21, *Renewables 2024 Global Status Report (GSR 2024)*, 2024.
- [3] V. J. Reddy, N. P. Hariram, M. F. Ghazali, S. Kumarasamy, "Pathway to Sustainability: An Overview of Renewable Energy Sources in Building Systems," *Sustainability*, vol. 16, no. 2, 638, 2024.
- [4] P. Gothwal, A. Kumar, D. Rathore, R. Mukherji, T. Vetrivel, and S. Anandan, "Response Surface Methodology Analysis of Energy Harvesting System over Pathway Tiles," *Materials*, vol. 16, no. 3, pp. 1146, 2023.
- [5] X. Zhong, H. Wang, L. Chen, and M. Guan, "Design and Comparative Study of a Small-Stroke Energy Harvesting Floor Based on a Multi-Layer Piezoelectric Beam Structure," *Micromachines*, vol. 13, no. 5, pp. 736, 2022.
- [6] K. Di, K. Bao, H. Chen, X. Xie, J. Tan, Y. Shao, Y. Li, W. Xia, Z. Xu, and S. E., "Dielectric Elastomer Generator for Electromechanical Energy Conversion: A Mini Review," *Sustainability*, vol. 13, no. 17, pp. 9881, 2021.
- [7] T. Jintanawan, G. Phanomchoeng, S. Suwankawin, P. Kreepoke, P. Chetchatree, and C. U-viengchai, "Design of Kinetic-Energy Harvesting Floors," *Energies*, vol. 13, no. 20, pp. 5419, 2020.

บทความวิจัย (Research Article)

- [8] H.-X. Zou, Q.-W. Zhu, J.-Y. He, L.-C. Zhao, K.-X. Wei, W.-M. Zhang, R.-H. Du, and S. Liu, “Energy harvesting floor using sustained-release regulation mechanism for self-powered traffic management,” *Applied Energy*, vol. 353, 2024.
- [9] K. K. Selim, I. H. Smaili, H. M. Yehia, M. M. R. Ahmed, and D. A. Saleeb, “Piezoelectric Sensors Pressed by Human Footsteps for Energy Harvesting,” *Energies*, vol. 17, no. 10, pp. 2297, May 2024.
- [10] P. Thainiramit, S. Watcharasatien, and K. Kerdtongmee, “Triboelectric Energy-Harvesting Floor Tile,” *Materials*, vol. 15, no. 24, pp. 8852, 2022.
- [11] E. Warmerdam, L.-M. Burger, D. F. Mergen, M. Orth, T. Pohlemann, B. Ganse, “The walking surface influences vertical ground reaction force and centre of pressure data obtained with pressure-sensing insoles” *Frontiers in Digital Health*, 2024.
- [12] R. M. Neuman and N. P. Fey, “There are unique kinematics during locomotor transitions between level ground and stair ambulation that persist with increasing stair grade,” *Scientific Reports*, vol. 13, pp. 8576, 2023.
- [13] L. Wang, H. Chen, Y. Zhang, J. Liu, and L. Peng, “Research Progress in Strategies for Enhancing the Conductivity and Conductive Mechanism of LiFePO_4 Cathode Materials,” *Molecules*, vol. 29, no. 22, pp. 5250, Nov. 2024.
- [14] S.-P. Chen, D. Lv, J. Chen, Y.-H. Zhang, and F.-N. Shi, “Review on Defects and Modification Methods of LiFePO_4 Cathode Material for Lithium-Ion Batteries,” *Energy & Fuels*, vol. 36, no. 3, pp. 1232–1251, 2022.
- [15] P. Liu, C. Liu, K. Yang, M. Zhang, F. Gao, B. Mao, H. Li, Q. Duan, and Q. Wang, “Thermal runaway and fire behaviors of lithium iron phosphate battery induced by over heating,” *Journal of Energy Storage*, vol. 31, 2020.
- [16] N. Nasajpour-Esfahani, H. Garmestani, M. Bagheritabar, D. J. Jasim, D. Toghraie, S. Dadkhah, and H. Firoozeh, “Comprehensive review of lithium-ion battery materials and development challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 203, 2024.