



Thai Science and Technology Journal

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

Journal Homepage : <http://li01.tci-thaijo.org/index.php/tstj>



ระบบลิฟต์รีเจนเนอเรทีฟเพื่อส่งเสริมระบบอาคารสีเขียว

Elevator Regenerative Function Systems towards Green Building

ปณณ ปริญญารักษ์*, วรรัตน์ ปัตตประกร

สาขาเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

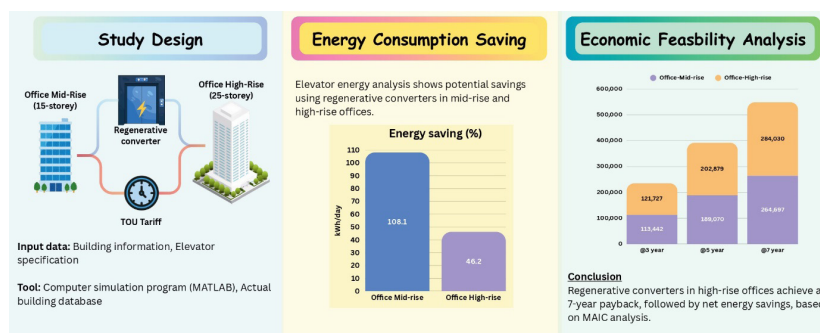
Prin Prinvarux*, Woraratana Pattaraprakorn

Energy and Environmental Technology, Department of Chemical Engineering, Thammasat School of Engineering, Thammasat University, Pathum Thani 12120

Received 15 April 2026; Received in revised 30 June 2026; Accepted 2 July 2026

GRAPHICAL ABSTRACT

ABSTRACT



The elevator regenerative function system is an energy-saving technology that converts kinetic and potential energy generated during elevator operation into electrical energy for recirculation within a building, aligning with green building standards. This study analyzes the energy consumption and energy generation of passenger elevators to determine the maximum allowable

incremental cost (MAIC), which serves as an economic benchmark for investment decisions. Two office building models—a 15-story mid-rise building and a 25-story high-rise building equipped with gearless traction elevators—were used as case studies. The results indicated that, during peak traffic periods, the mid-rise model achieved an energy recovery ratio of 108.1% relative to its motoring energy consumption, exceeding the 46.2% recorded for the high-rise model. However, in terms of the total daily cumulative energy recovered, greater building height and higher traffic volume enabled the high-rise model to return more electricity to the building grid. Consequently, the economic evaluation based on the MAIC demonstrated that high-rise buildings offer greater investment potential and higher allowable investment budgets. A sensitivity analysis of occupancy density, building height, and electricity tariffs was also conducted to support investment decision-making.

คำสำคัญ

ลิฟต์นำพลังงานกลับ; อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้; ต้นทุนเพิ่มที่ยอมรับได้

Keywords

Regenerative function elevator; Time of use (Tariff); Maximum allowable incremental cost (MAIC)

บทคัดย่อ

ระบบฟังก์ชันลิฟต์นำพลังงานกลับเป็นระบบการประหยัดพลังงานในลิฟต์ โดยการเปลี่ยนพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ที่เกิดขึ้นขณะลิฟต์เคลื่อนที่ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อนำกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ภายในอาคาร ซึ่งจะส่งเสริมมาตรการอาคารสีเขียว โดยในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์การใช้และผลิตพลังงานของลิฟต์โดยสาร เพื่อนำไปสู่การคำนวณหาค่าใช้จ่ายส่วนเพิ่มที่ยอมรับได้ (Maximum allowable incremental cost: MAIC) สำหรับการตัดสินใจลงทุนติดตั้งเทคโนโลยีนี้ต่อไป การศึกษาอาศัยกรณีศึกษาอาคารสำนักงาน 2 รูปแบบ คืออาคารขนาดกลาง (Mid-rise) 15 ชั้น และอาคารสูง (High-rise) 25 ชั้น ภายใต้ข้อมูลลิฟต์โดยสารแบบไม่มีเกียร์ (Gearless) ผลการศึกษาพบว่า ในช่วงเวลาที่มีการใช้งานหนาแน่น แบบจำลองอาคารขนาดกลางมีส่วนการกู้คืนพลังงานสูงถึงร้อยละ 108.1 ของพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน ซึ่งสูงกว่าอาคารสูงที่มีสัดส่วนร้อยละ 46.2 แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาปริมาณพลังงานไฟฟ้าสะสมที่ผลิตคืนได้จริงตลอดทั้งวัน พบว่าความสูงของอาคารและปริมาณการสัญจรที่มากกว่า เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อาคารสูงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าคืนสู่ระบบในเชิงสัมบูรณ์ได้มากกว่าอาคารขนาดกลาง ส่งผลให้การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้วยค่า MAIC ระบุว่า อาคารสูงมีศักยภาพและเพดานงบประมาณในการลงทุนที่สูงกว่าอาคารขนาดกลาง พร้อมกันนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) ของตัวแปรความหนาแน่นในการใช้งาน ความสูงของอาคาร และอัตราค่าไฟฟ้าเพื่อประกอบการตัดสินใจด้วยแล้ว

*ผู้รับผิดชอบบทความ: Prin.prin@dome.tu.ac.th

DOI: 10.14456/tstj.2026.27

1. บทนำ

ในยุคปัจจุบันประเทศทั่วโลกกำลังเผชิญกับความท้าทายด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและความมั่นคงทางพลังงาน ภาคธุรกิจอาคารได้กลายเป็นเป้าหมายเชิงยุทธศาสตร์ที่สำคัญในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากมีสัดส่วนการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายสูงถึง 30-40% ของการใช้พลังงานทั่วโลก [1] ประเทศไทยได้กำหนดเป้าหมายระดับชาติในการมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon neutrality) ภายในปี 2050 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net-zero) ภายในปี 2065 ผ่านแผนอนุรักษ์พลังงาน (EEP) ซึ่งมุ่งลดการใช้พลังงานลง 30% ภายในปี 2036 [2] ในอาคารพาณิชย์และอาคารสำนักงานสูงระบบลิฟต์เปรียบเสมือนหัวใจหลักของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนการใช้พลังงาน 2-15% ของการใช้ไฟฟ้าทั้งหมดในอาคาร การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในระบบลิฟต์จึงเป็นจุดสนใจที่มีศักยภาพสูง [3]

เทคโนโลยีลิฟต์ประหยัดพลังงานแบบ Regenerative function ซึ่งสามารถนำพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ที่สูญเสียไปในระหว่างการเบรกกลับมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าใช้ใหม่ (Regenerative braking elevator: RBE) เป็นนวัตกรรมที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถลดการใช้พลังงานของลิฟต์ลงได้ 35-42% [4, 5] แม้ว่าในปัจจุบันจะเริ่มมีการพัฒนาระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery energy storage system: BESS) ร่วมกับลิฟต์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการจัดการพลังงาน แต่อย่างไรก็ตาม ระบบที่มีการติดตั้ง BESS มักตามมาด้วยต้นทุนส่วนเพิ่มที่สูงและการบำรุงรักษาที่ซับซ้อน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาจำเพาะระบบหมุนเวียนพลังงานไฟฟ้ากลับคืนสู่ระบบจ่ายไฟของอาคารโดยตรง (Direct grid-connected) ซึ่งมีความเป็นไปได้เชิงการค้าและการลงทุนในวงกว้างมากกว่า นอกจากเทคโนโลยีดังกล่าวแล้ว เมื่อพิจารณาบริบทของประเทศไทยที่มีโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ (Time-of-use: TOU) ซึ่งอัตราค่าไฟฟ้าในช่วง

เวลา Peak (09:00-22:00 น. ในวันทำการ) สูงกว่าช่วง Off-peak ถึง 2.2 เท่า การนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ในช่วงเวลาเร่งด่วนของการทำงาน (เช้า เทียง และเลิกงาน) จึงยิ่งเพิ่มมูลค่าของพลังงานที่ประหยัดได้อย่างมีนัยสำคัญ [6, 7]

อย่างไรก็ตาม การตัดสินใจลงทุนในเทคโนโลยีดังกล่าวยังคงเผชิญกับอุปสรรคสำคัญ คือ การขาดข้อมูลทางด้านต้นทุนส่วนเพิ่ม (Incremental cost) ของระบบเนื่องจากผู้ผลิตลิฟต์มักจัดเก็บข้อมูลเหล่านี้เป็นความลับทางการค้า ทำให้เจ้าของอาคารและวิศวกรประเมินความคุ้มค่าและระยะเวลาคืนทุน (Payback period) ได้ยาก งานวิจัยนี้จึงนำเสนอกรอบการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วย การกลับสมการ (Reverse engineering in economic analysis) แทนที่จะเริ่มจากต้นทุนเพื่อหา ระยะเวลาคืนทุน งานวิจัยนี้จะกำหนดระยะเวลาคืนทุนเป้าหมายที่ยอมรับได้ที่ 3, 5 และ 7 ปี ซึ่งอ้างอิงจากเกณฑ์ระยะเวลาก่อนทุนที่คุ้มค่ามาตรฐาน [11, 15] สำหรับอาคารพาณิชย์กรรมและระบบประกอบอาคารแล้วคำนวณย้อนกลับเพื่อหา ต้นทุนส่วนเพิ่มสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum allowable incremental cost: MAIC) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิงเชิงเศรษฐศาสตร์ (Economic benchmark) ในการประเมินความเป็นไปได้เบื้องต้น และเป็นกรอบข้อมูลสำหรับการตัดสินใจและเพิ่มอำนาจการต่อรองทางการค้า ทั้งนี้งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การสร้างแบบจำลองทางทฤษฎีเพื่อกำหนดเพดานต้นทุนที่คุ้มค่า ภายใต้ข้อจำกัดด้านข้อมูลราคาของผู้ผลิต ซึ่งจะช่วยลดช่องว่างในการประเมินเทคโนโลยีในสถานะที่ขาดแคลนข้อมูลราคาตลาดจริง

2. วิธีการศึกษา

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Computer-based simulation) ผ่านโปรแกรม MATLAB โดยอาศัยหลักการพลศาสตร์ของการเคลื่อนที่และเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1 กำหนดข้อมูลจำเพาะและตัวแปรสำหรับการสร้างแบบจำลอง

อาคารสำนักงานที่ใช้ศึกษามี 2 ขนาด ได้แก่ อาคารขนาดกลาง (Mid-rise bldg.) 15 ชั้น และอาคารสูง (High-rise bldg.) 25 ชั้น ซึ่งเป็นอาคารสำนักงานที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ของกรุงเทพมหานคร ร่วมกับข้อมูลทางเทคนิคของลิฟต์โดยสารแบบไม่มีเกียร์ (Gearless) ยี่ห้อ Mitsubishi และกำหนดรายละเอียดตัวแปรสำหรับการสร้างแบบจำลองแสดงใน Table 1 และ 2

2.2 การจำลองพฤติกรรมการใช้งาน (Traffic simulation)

สร้างแบบจำลองสำหรับรูปแบบการเดินทางของผู้ใช้งานในอาคารสำนักงาน อ้างอิงตามมาตรฐาน CIBSE

guide D โดยจะแบ่งเป็น 3 ช่วงเวลาเร่งด่วน ได้แก่ ช่วงเช้าระหว่างเวลา 08.00-09.00 น. ช่วงเที่ยงระหว่างเวลา 12.00-13.00 น. และช่วงเลิกงานระหว่างเวลา (Down-peak) 17.00-18.00 น. เพื่อให้แบบจำลองมีความสมบูรณ์และสามารถนำไปปรับใช้กับพฤติกรรมจริงได้ ผู้วิจัยได้กำหนดพารามิเตอร์และขั้นตอนวิธีไว้ดังต่อไปนี้

2.2.1 การแจกแจงอัตราการมาถึงและจุดหมายปลายทาง (Passenger arrival & destination distribution)

รูปแบบการมาถึงของผู้โดยสาร (Passenger arrival rate) จะถูกสุ่มด้วยการแจกแจงแบบปัวซอง (Poisson distribution) เนื่องจากเป็นการแจกแจงที่

Table 1 Building specifications

Parameters	Mid-rise bldg.	High-rise bldg.
Bldg. type	Office	Office
No. floors	15	25
Bldg. height (m)	60.12	93.20
No. employees	1,871	3,082
Office day	242	242

Table 2 Specifications of studied elevator and their physical functions

Parameters	Information
Total load (kg)	1150
Max allowable velocity (m/min)	150
Acceleration (m/s ²)	0.8±0.1
Deceleration (m/s ²)	0.8±0.1
Motor eff. %	92-94

เหมาะสมกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างอิสระในช่วงเวลาหนึ่งๆ ความน่าจะเป็นที่จะมีผู้โดยสารจำนวน n คนมาถึงระบบลิฟต์ในช่วงเวลา t วินาที สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$P(n) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \quad (1)$$

เมื่อ λ คืออัตราการมาถึงของผู้โดยสารเฉลี่ย (คน/วินาที) ซึ่งค่า λ และเมทริกซ์ความน่าจะเป็นของจุดหมายปลายทาง (Destination distribution) จะปรับเปลี่ยนตามพฤติกรรมของทั้ง 3 ช่วงเวลาที่กำหนดไว้

2.2.2 การประเมินการจราจรของอาคาร (Traffic evaluation)

ในการจำลองนี้ ตัวแปรสำคัญที่ใช้ประเมินพฤติกรรมการใช้งานเพื่อนำไปคำนวณการใช้พลังงานโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน CIBSE Guide D ประกอบด้วย

Round trip time (RTT): เวลาที่ลิฟต์เคลื่อนที่ขึ้น-ลงครบ 1 รอบ คำนวณจาก

$$RTT = 2Ht_v + (S+1)t_s + 2Pt_p \quad (2)$$

Handling capacity (HC): ความสามารถในการรับส่งผู้โดยสารภายในช่วงเวลา 5 นาที

$$HC = \frac{300 \times P}{RTT} \quad (3)$$

Average waiting time (AWT): เวลารอคอยเฉลี่ยของผู้โดยสาร

$$AWT \approx \frac{RTT}{2 \times N_{elev}} \quad (4)$$

โดยที่

H ชั้นสูงสุดที่ลิฟต์เคลื่อนที่ขึ้นไป

S จำนวนครั้งที่ลิฟต์จอด (ครั้ง)

t_v เวลาที่ลิฟต์ใช้ในการเดินทางระหว่างชั้น (sec)

t_s เวลาที่สูญเสียในการเปิด-ปิดประตู (sec)

P จำนวนผู้โดยสารต่อเที่ยว (persons)

t_p เวลาเฉลี่ยที่ผู้โดยสารเดินเข้า-ออกตัวลิฟต์ (sec)

N_v จำนวนลิฟต์ที่ใช้ในกลุ่มเดียวกัน (units)

2.2.3 วิธีการดำเนินการในการจำลอง

เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจวิธีการทำงานของแบบจำลอง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อทำซ้ำงานวิจัย (Reproducibility) ของขั้นตอนการทำ Traffic Simulation เป็นไปตามขั้นตอน flow chart แสดงใน Figure 1

2.3 แบบจำลองพลังงานเชิงฟิสิกส์ (Physical energy model)

อาศัยสมการการเคลื่อนที่ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ มวลของตัวลิฟต์ มวลน้ำหนักถ่วง (Counterweight) น้ำหนักบรรทุกจริง แรงเสียดทาน และประสิทธิภาพมอเตอร์เชิงกล ในช่วง 4 สถานะหลัก คือ 1. การเคลื่อนที่ขึ้น/ลง แบบนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้หมายถึงพลังงานไฟฟ้า และ 2. การเคลื่อนที่ขึ้น/ลงแบบผลิตพลังงานไฟฟ้าคืนกลับมา โดยสามารถคำนวณได้จากสมการทั้ง 4 สมการ คือ สมการสมดุลมวลระหว่างมวลของตัวลิฟต์และมวลน้ำหนักของลูกถ่วง แสดงในสมการที่ (5) สมการแรงสุทธิที่ไม่สมดุล (Unbalance force, F_{ub}) เกิดขึ้นในกรณีที่มอเตอร์ต้องออกแรงขับเคลื่อนหรือต้านทาน เกิดจากความแตกต่างของมวลระหว่างมวลตัวลิฟต์และมวลของลูกถ่วงคูณกับความเร่งแรงโน้มถ่วงของโลก แสดงในสมการที่ (6) โดยค่ากำลังไฟฟ้าตามทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้น/ลง แบบนำพลังงานมาใช้ เกิดขึ้นเมื่อน้ำหนักตัวลิฟต์มากกว่าน้ำหนักถ่วง (กรณีทิศทางขึ้น) หรือเมื่อน้ำหนักตัวลิฟต์น้อยกว่าน้ำหนักถ่วง (กรณีทิศทางลง) สามารถอธิบายได้ในสมการที่ (7) และการคำนวณหาพลังงานที่ผลิตคืนสู่ระบบตามทิศทางการเคลื่อนที่ เกิดขึ้นเมื่อน้ำหนักของตัวลิฟต์มากกว่าน้ำหนักลูกถ่วง (กรณีทิศทางลง) หรือ เมื่อน้ำหนักของตัวลิฟต์น้อยกว่าน้ำหนักลูกถ่วง (กรณีทิศทางขึ้น) มอเตอร์จะนำพลังงานที่เหลือใช้คืนกลับสู่ระบบ ดังสมการที่ (8) ทั้งนี้ชุดสมการที่ (5) ถึง (8) ที่ใช้ในการคำนวณแรง กำลังเชิงกล และกำลังไฟฟ้าของระบบลิฟต์ในงานวิจัยนี้ ถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักการพลศาสตร์การเคลื่อนที่ในแนวตั้งตามกฎข้อที่สองของนิวตัน ซึ่งแนวทางในการ

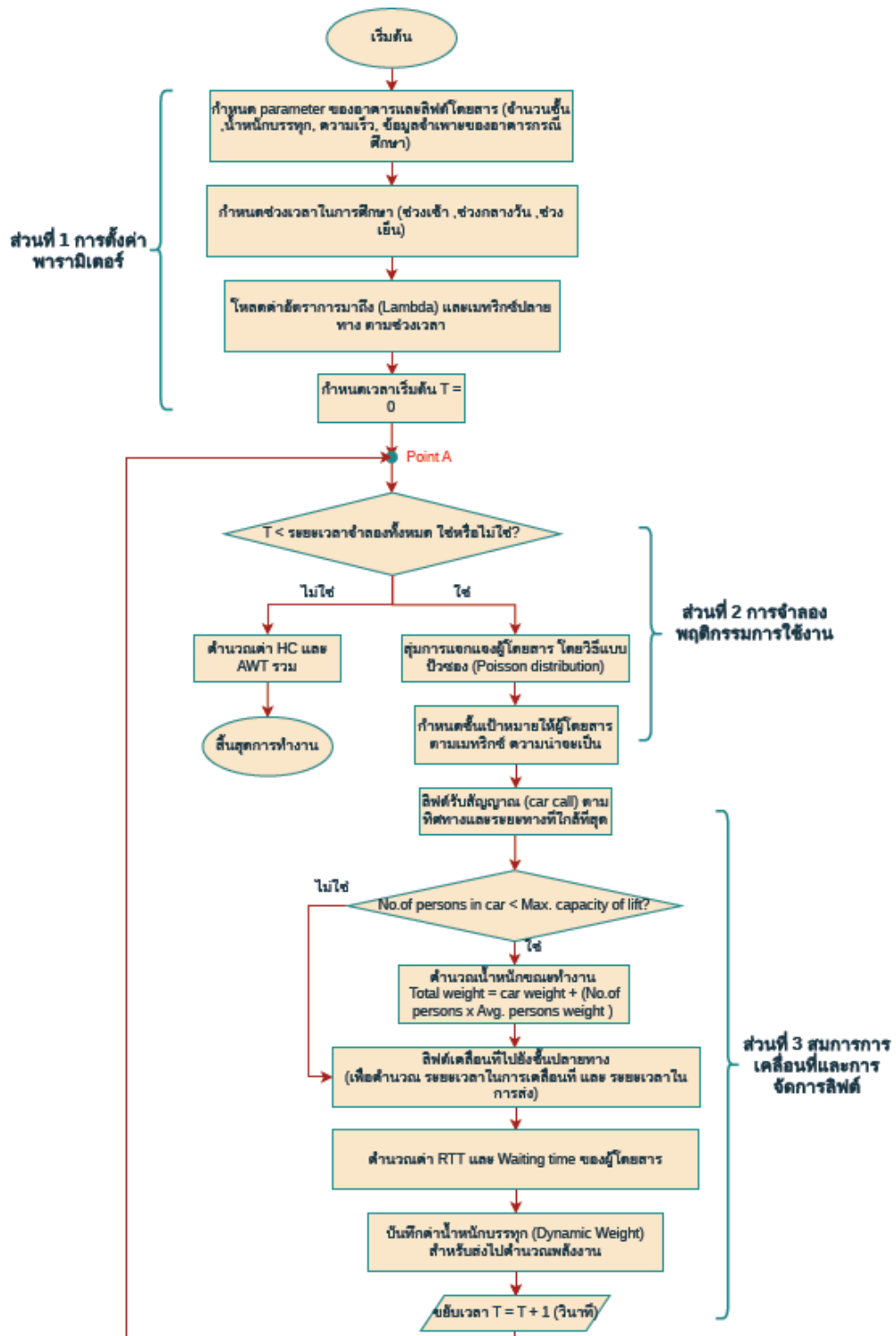


Figure 1 Simulation flowchart.

สร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ชุดแปลงพลังงานกลับของลิฟต์นี้ มีความสอดคล้องกับแบบจำลองระบบควบคุมการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีการศึกษาในประเทศไทย [14] นอกจากนี้การวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลของระบบลิฟต์นี้ (Traction elevator) จะแปรผันตามสัดส่วนน้ำหนักบรรทุกจริง (Load factor) ในแต่ละเที่ยววิ่ง ซึ่งในการคำนวณหาพลังงานรวมและการประเมินประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของระบบขับเคลื่อนแบบคืนพลังงาน (Regenerative drive) งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แนวทางการคำนวณรอบการจำลองการวิ่ง (Traffic profile) ตามมาตรฐาน ISO 25745-2

$$M_{cw} = M_C + (k \times C) \quad (5)$$

$$F_{ub} = (M_C + M_p - M_{cw}) \times g \quad (6)$$

$$P_{elec} = \frac{(|F_{ub}| + F_f) \times V}{\eta_m} \quad (7)$$

$$P_{regen} = (|F_{ub}| - F_f) \times V \times \eta_m \times \eta_{reg} \quad (8)$$

โดยที่

- M_C น้ำหนักของตัวลิฟต์ (kg)
- M_{cw} น้ำหนักของลูกถ่วง (kg)
- C พิกัดบรรทุกสูงสุด (kg)
- k Balancing factor โดยทั่วไปจะตั้งไว้ที่ (45-50%)
- M_p น้ำหนักบรรทุกจริง (kg)
- V ความเร็วของลิฟต์ (m/s)
- η_m ประสิทธิภาพของมอเตอร์เชิงกล สามารถอ้างอิงได้ตามแนวทางของ Dambrauskas และคณะ [8]
- F_{ub} แรงสุทธิที่ไม่สมดุล (Unbalance force) หรือแรงที่มอเตอร์ต้องออกแรงดึง/เบรก (N)
- F_f แรงเสียดทาน (N)
- P_{regen} กำลังไฟฟ้าที่ผลิตคืนกลับสู่ระบบ (kW)
- η_{reg} ประสิทธิภาพของชุดแปลงพลังงานกลับ (Regenerative converter efficiency) โดยกำหนดสมมติฐานประสิทธิภาพการแปลงกระแสไฟฟ้าที่ร้อยละ 85 ตามมาตรฐานสากล ISO25475-2
- P_{elec} กำลังไฟฟ้าที่ระบบดึงจากแหล่งจ่ายไฟมาใช้งาน (kW)

จากการประเมินแบบจำลองพลศาสตร์ในสมการที่ 5-8 ซึ่งจะแสดงผลลัพธ์ในรูปของกำลังไฟฟ้า (kW) งานวิจัยนี้ได้นำกำลังไฟฟ้าที่ได้ไปคำนวณหาพลังงานไฟฟ้า (Energy) ในหน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) เพื่อใช้ในการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยพลังงานไฟฟ้าที่ระบบดึงจากแหล่งจ่ายไฟมาใช้งาน ($E_{consume}$) และพลังงานไฟฟ้าที่นำกลับมาใช้ใหม่ (E_{regen}) จะคำนวณได้จากสมการที่ (9) และ (10) ตามลำดับ

$$E_{regen} = \int P_{regen} dt \quad (9)$$

$$E_{consume} = \int P_{elec} dt \quad (10)$$

โดยที่ $E_{consume}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ระบบดึงจากแหล่งจ่ายไฟ (kWh), E_{regen} คือ พลังงานไฟฟ้าที่นำกลับมาใช้ใหม่ (kWh) และ t คือ เวลาในการทำงานของลิฟต์ (ชั่วโมง)

นอกจากนี้ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ งานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวแปร พลังงานสุทธิ (E_{net}) ซึ่งคำนวณได้จากผลต่างของพลังงานที่ใช้และพลังงานที่กู้คืนกลับมา ดังแสดงในสมการที่ (11)

$$E_{net} = E_{elec} - E_{regen} \quad (11)$$

ทั้งนี้ ในการประเมินผลรายวัน หากค่าพลังงานสุทธิที่บริโภค (E_{net}) มีค่าติดลบ จะแสดงถึงสถานะที่ระบบลิฟต์สามารถคืนพลังงานกลจากแรงโน้มถ่วงกลับมาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าปริมาณพลังงานที่ดึงไปใช้งานจริง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปแบบความถี่ในการใช้งานและสัดส่วนน้ำหนักบรรทุกทุกในรอบวันนั้นๆ

2.4 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

สำหรับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ จะอาศัยอัตราค่าไฟฟ้า TOU ของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ประเภท 4.2.2 ตามแรงดัน 12-24 kV โดยมีอัตรา On-Peak ที่ 4.1839 บาท/kWh (ค่าพลังงาน) และ 132.93 บาท/kW (ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า) โดยอ้างอิงจากประกาศอัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.)

เดือนมกราคม พ.ศ. 2566 โดยการศึกษาทำในช่วงเดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2568 ถึง เมษายน พ.ศ. 2569 ซึ่งการคิดค่าไฟแบบ TOU จะสอดคล้องกับหลักการบริหารจัดการพลังงานแบบอุปสงค์ (Demand-side management: DSM) โดยใช้อัลกอริทึมโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลา นอกจากนี้รูปแบบโครงสร้างค่าไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ย่อมส่งผลต่อความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์เพื่อนำมาใช้จริงกับผู้บริโภค [12,13] นอกจากนี้จะพลังงานที่ผลิตขึ้นได้ในแต่ละช่วงเวลามาแปลงให้เป็นมูลค่าเงินที่ประหยัดได้ต่อปี (Annual monetary saving: S_{base}) แยกตามประเภทอาคาร เพื่อประเมินผลตอบแทนที่คุ้มค่าเนื่องจากข้อมูลราคาจริงของระบบ Regenerative เป็นความลับทางการค้าตามเงื่อนไขของผู้ผลิตแต่ละราย งานวิจัยนี้จึงเปลี่ยนมุมมองจากการคำนวณระยะเวลาคืนทุนจากราคาซื้อ มาเป็นการคำนวณต้นทุนส่วนเพิ่มสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum allowable incremental cost: MAIC) โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของแนวคิดมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value: NPV) ที่กำหนดให้โครงการคุ้มทุนพอดี (NPV = 0) ภายใต้เป้าหมายระยะเวลาคืนทุนคิดลด (Discounted payback period: P) ที่กำหนดไว้คือ 3, 5 และ 7 ปี เพื่อให้สะท้อนอัตราดอกเบี้ยและอัตราเงินเฟ้อในช่วงเวลาที่ศึกษา (กรกฎาคม พ.ศ. 2568 ถึง เมษายน พ.ศ. 2569) ตามสมการที่ (12)

$$MAIC = \sum_{t=1}^P \frac{S_{base}}{(1+r)^t} \quad (12)$$

$$MAIC = \sum_{t=1}^P \frac{S_{varied} \times (1+i_e)^t}{(1+r)^t} \quad (13)$$

โดยที่:

MAIC ต้นทุนสูงสุดที่ยอมรับได้ (บาท/ตัว)

S_{base} มูลค่าการประหยัดพลังงานไฟฟ้ารายปีในสถานะฐาน โดย แยกตามประเภทอาคาร S_{high} สำหรับ High-Rise และ S_{mid} สำหรับ Mid-Rise

r อัตราคิดลด (Discount Rate) อ้างอิงจากอัตราดอกเบี้ยนโยบายเฉลี่ยในช่วงเวลาที่ศึกษา
 P ระยะเวลาคืนทุนเป้าหมาย กำหนดไว้ที่ 3, 5 และ 7 ปี
 i_e อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าไฟฟ้าในอนาคต

นอกจากนี้เพื่อทดสอบความอ่อนไหวของแบบจำลองเมื่อเทียบกับความไม่แน่นอนทางวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis) โดยจำลองการแปรผันของปัจจัยสำคัญ 5 ตัวแปร ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อ (S_{varied}) ในสมการที่ (13) โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

2.4.1 ความหนาแน่นของการใช้ไฟฟ้า: จำลองความผันผวนของจำนวนผู้โดยสารในสภาวะจริงแปรผันในช่วง $\pm 20\%$ ของสภาวะฐาน (ช่วงร้อยละ 80 ถึง 120)

$$S_{varied} = \frac{Traffic\ scale(\%)}{100} \quad (14)$$

2.4.2 ประสิทธิภาพการกักเก็บพลังงาน: คำนวณการแปรผันค่าสัมบูรณ์ของประสิทธิภาพระบบอินเวอร์เตอร์ที่สามารถทำได้จริงในช่วงร้อยละ 80 ถึง 96

$$S_{varied} = \frac{\eta_{range}}{\eta_{base}} \quad (15)$$

2.4.3 อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าไฟฟ้า: จำลองสถานการณ์พลังงานและแนวโน้มค่าไฟฟ้าขาขึ้นในอนาคต โดยแปรผันเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง +30

$$i_e = 1 + \frac{\Delta Price(\%)}{100} \quad (16)$$

2.4.4 ความสูงของอาคาร: จำลองความผันแปรของระยะทางวิ่งที่อาจเกิดขึ้นจากรูปแบบของอาคารที่แตกต่างกัน โดยแปรผันในช่วง $\pm 10\%$

$$S_{varied} = \frac{Height\ valiation(\%)}{100} \quad (17)$$

2.4.5 ความเร็วพิกัด: จำลองผลกระทบเมื่อความเร็วของลิฟต์ลดลงไปจากสเปกเดิม ในช่วง $\pm 10\%$ ซึ่งส่งผลให้เกิดตัวคูณของการลดประสิทธิภาพ (Drop factor) ในสัดส่วนร้อยละ 1 ต่อทุกๆ การลดลงร้อยละ 10

$$S_{varied} = 1 - \left(0.01 \times \frac{|Speed\ variation(\%) - 100|}{10} \right) \quad (18)$$

ทั้งนี้สมการที่ (12) ถึง (18) และเงื่อนไขการแปรผันของตัวแปรทั้ง 5 นี้ จะถูกนำไปประมวลผลร่วมกับแบบจำลองพลังงานเชิงฟิสิกส์ผ่านโปรแกรม MATLAB เพื่อสร้างแบบจำลองต้นทุนในการลงทุนที่แปรผันตามตัวแปรต่างๆ ซึ่งผลลัพธ์และการอภิปรายผลในรายละเอียดจะถูกสรุปไว้ในบทที่ 3 ต่อไป

3. ผลการศึกษา

3.1 พฤติกรรมการใช้พลังงานรายชั่วโมง (Hourly energy profile)

พฤติกรรมการใช้งานของพนักงานของวันทำงานปกติ ในช่วงเช้าถึงเที่ยงและช่วงเลิกงานจะมีค่อนข้างมากตามกิจกรรมที่มากในช่วงเช้า โดยจะเห็นได้ว่าอัตราการใช้พลังงานสำหรับอาคารขนาดกลางและขนาดสูง อยู่ที่ 0.26-14.74 kWh และ 0.18-68.08 kWh ตามลำดับ ขณะที่ระบบ Regenerative ของทั้งสองอาคารสามารถคืนพลังงานกลับมาได้ในปริมาณ 24.41 kWh และ 35.09 kWh ตามลำดับ (ทั้งนี้ ปริมาณงานหรือพลังงานในหน่วย kWh นั้นเป็นผลลัพธ์จากการนำค่ากำลังไฟฟ้า P_{elec} และ P_{regen} ในหน่วย kW มาอินทิเกรตเทียบกับระยะเวลาการทำงานของลิฟต์ในแต่ละช่วงเวลา ตามที่ได้นิยามไว้ในสมการที่ 9)

ทั้งนี้การที่ระบบสามารถผลิตพลังงานคืนกลับมาได้ในอัตราที่สูงมากในช่วงเวลาพักเที่ยง (Lunch-peak) และช่วงเวลาเลิกงาน (Down-peak) สามารถอ้างอิงได้จากหลักการทางฟิสิกส์ของระบบน้ำหนักถ่วง (Counterweight) ซึ่งโดยทั่วไปผู้ผลิตจะตั้งค่า Balance weight ไว้ที่ 50% ของพิกัดน้ำหนักบรรทุก โดยมอเตอร์

ลิฟต์จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อแรงโน้มถ่วงของโลกทำหน้าที่ขับเคลื่อนระบบแทนการนำพลังงานไฟฟ้ามาใช้ ซึ่งจะเกิดขึ้นใน 2 เงื่อนไข คือ 1) เมื่อลิฟต์บรรทุกผู้โดยสารมากกว่า 50% ของพิกัดบรรทุกและมีทิศทางเคลื่อนที่ลง และ 2) เมื่อลิฟต์บรรทุกผู้โดยสารน้อยกว่า 50% ของพิกัดบรรทุก (หรือลิฟต์เปล่า) และมีทิศทางเคลื่อนที่ขึ้น ในช่วงเวลาเลิกงานและพักเที่ยง โดยพฤติกรรมการใช้งานลิฟต์ในอาคารสำนักงานจะมีความไม่สมมาตรอย่างชัดเจน อาทิเช่นจะมีผู้โดยสารใช้งานจำนวนมากและโดยสารลิฟต์ลงพร้อมกัน ทำให้ลิฟต์มีน้ำหนักบรรทุกมากกว่าน้ำหนักถ่วง (ทำให้เกิดการผลิตพลังงานไฟฟ้าคืนในขาลง) ในช่วงเวลาดังกล่าวจากนั้นลิฟต์จะต้องวิ่งลิฟต์เปล่ากลับขึ้นไปรับผู้โดยสารขึ้นบนหรือบรรทุกน้ำหนักที่น้อยกว่าน้ำหนักถ่วง ทั้งนี้กรณีนี้จะทำให้น้ำหนักถ่วงมีน้ำหนักมากกว่าตัวลิฟต์ (จะก่อให้เกิดการผลิตพลังงานไฟฟ้าในขาขึ้นด้วยเช่นกัน) จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่อธิบายว่าเหตุใดระบบถึงสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าสุทธิคืนกลับมาได้มากกว่าช่วงเวลาการทำงานปกติ ซึ่งโพลีโปรไฟล์การใช้และการคืนกลับของพลังงาน ในแต่ละช่วงเวลาแสดงใน Figure 2 และ Figure 3

จะเห็นว่า การคืนกลับของพลังงานของอาคารสูง (High-rise) มีค่าสูงกว่าได้จากอาคารขนาดกลาง (Mid-rise) ซึ่งเกิดจากระยะทางการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานศักย์ ($E_p = mgh$) ที่จะเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้นไปด้วย และเมื่อนำข้อมูลพฤติกรรมการใช้และการคืนพลังงานรายชั่วโมงมาคำนวณรวมตลอดทั้งวัน เพื่อพิจารณาพลังงานสุทธิรายวัน (Daily net energy consumption: E_{net}) พบว่า ระบบ Regenerative ของทั้งสองอาคารสามารถกู้คืนพลังงานกลับมาได้ในปริมาณสูงมากในช่วงเวลาที่มีการใช้งานหนาแน่น (Peak periods) แต่ภาพรวมตลอดทั้งวัน อาคารทั้งสองยังคงมีสถานะพลังงานสุทธิเป็นบวก หรือโดยอาคารขนาดกลางมีค่าพลังงานสุทธิรวมเท่ากับ 10.107 kWh/วัน และอาคารสูงมีค่าเท่ากับ 167.559 kWh/วัน

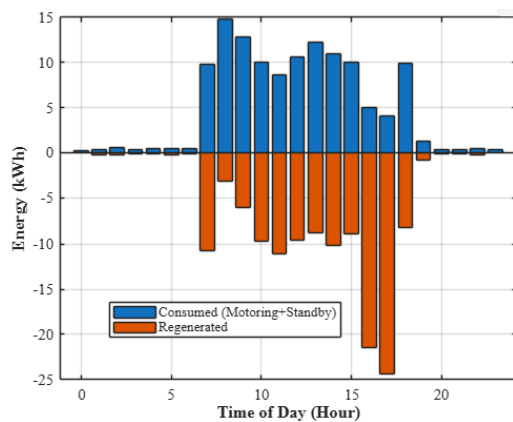


Figure 2 Hourly energy profile (Mid-rise office).

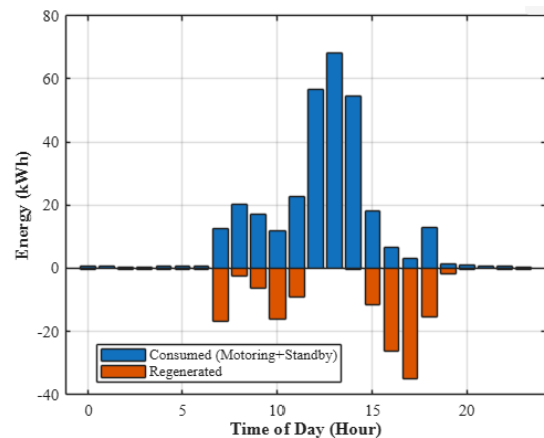


Figure 3 Hourly energy profile (High-rise office).

ทั้งนี้เนื่องจากเกิดพลังงานสูญเสียในระบบขับเคลื่อนเชิงกลและไฟฟ้า รวมถึงการใช้พลังงานในสถานะสแตนด์บาย ของระบบลิฟต์ เช่น ระบบไฟส่องสว่าง พัดลมระบายอากาศ และระบบควบคุม ในช่วงเวลาที่ลิฟต์จอดนิ่งหรือมีการใช้งานน้อย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้พลังงานสะสมคืนกลับมาได้ในรอบวัน ไม่เพียงพอกที่จะหักลบกับพลังงานทั้งหมดที่อาคารใช้ไปได้ ทั้งนี้ การปรับปรุงระบบควบคุมกลุ่มลิฟต์ (Elevator group control system) ด้วยปัญญาประดิษฐ์หรือ Fuzzy logic ถือเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการบริหารจัดการเพื่อลดการใช้พลังงานในสถานะสแตนด์บาย [9]

3.2 การจำลองสถานการณ์ในกรณีศึกษาต่างๆ

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก (Capacity) และพลังงานที่ใช้ (Energy consumption) ในระบบลิฟต์เป็นเรื่องสำคัญมาก เพราะลิฟต์ไม่ได้เคลื่อนที่ด้วยแรงดันเพียงอย่างเดียว แต่ทำงานภายใต้ระบบน้ำหนักถ่วง (Counterweight) เพื่อหาจุดสมดุลประสิทธิภาพเชิงพลังงาน การออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ และความปลอดภัย Figure 4 และ Figure 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Capacity) และพลังงานสุทธิต่อเที่ยวการเคลื่อนที่ (Net energy per trip) จากรูปจะเห็นว่าพลังงานมีค่าเป็นลบ

หมายถึงเกิดการผลิตพลังงานคืนสู่ระบบ เนื่องจากเมื่อลิฟต์บรรทุกน้ำหนัก เกิน 50% (Heavy load) ลิฟต์จะหนักกว่าน้ำหนักถ่วงทำให้เวลาที่ลิฟต์เคลื่อนที่ลง แรงโน้มถ่วงจะดึงตัวลิฟต์ลงด้วยตัวเอง (Gravity-driven) มอเตอร์ไม่ต้องใช้แรงดึง แต่ต้องทำหน้าที่เป็น “เบรก” เพื่อควบคุมความเร็วไม่ให้ตกลงมาเร็วเกินไป ในขณะที่มอเตอร์ทำหน้าที่หน่วง (Braking mode) มันจะเปลี่ยนสถานะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ที่เหลือใช้ ให้กลายเป็นกระแสไฟฟ้าส่งกลับคืนสู่ระบบหรือตัวต้านทานเพื่อระบายความร้อน

จากรูปทั้งสอง ระบุว่าอาคารขนาดกลางจะมีการผลิตพลังงานคืนสู่ระบบ ได้สูงสุดที่ 0.07 kWh/เที่ยว ขณะที่อาคารสูงมีค่าการคืนพลังงานกลับที่ 0.11 kWh/เที่ยว ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยของระยะทางและความเร็วคงที่ กล่าวคือ พลังงานศักย์ (E_p) ที่มีสูงมากในอาคารสูง พลังงานศักย์ที่สะสมอยู่ในตัวลิฟต์ตอนอยู่ชั้นบนสุดก็ยิ่งมาก เมื่อปล่อยลงมาถึงเปลี่ยนเป็นพลังงานคืนกลับได้มากกว่า และความเร็วคงที่ ซึ่งสำหรับอาคารสูงลิฟต์จะมีช่วงเวลาที่วิ่งด้วยความเร็วคงที่นานกว่าอาคารขนาดกลาง ซึ่งช่วงเวลานี้เองที่มอเตอร์จะผลิตกระแสไฟฟ้าคืนกลับได้เสถียรและยาวนานที่สุด

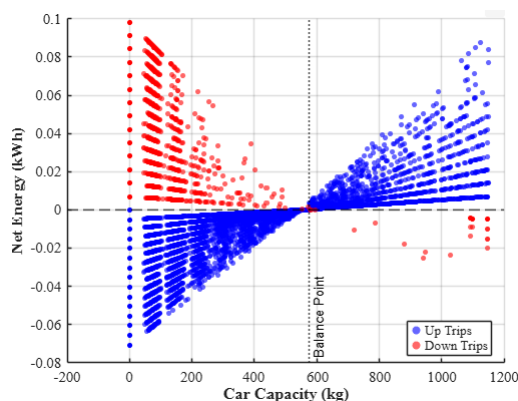


Figure 4 Physics verification mid-rise bldg.

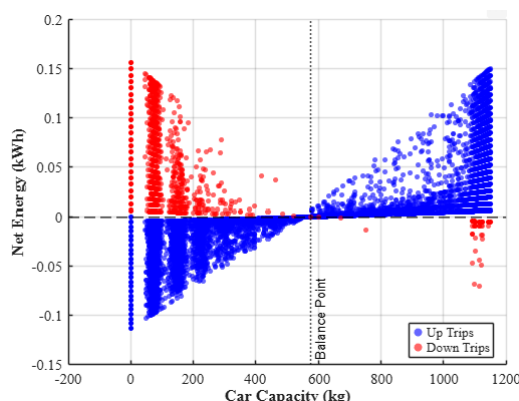


Figure 5 Physics verification high-rise bldg.

3.3 ความคุ้มค่าในการลงทุน

จาก Figure 4 และ 5 เรื่องของการคืนกลับพลังงาน พบว่าทั้งสองประเภทอาคารสามารถคืนกลับพลังงานได้ในสัดส่วนที่สูง เมื่อนำมาพิจารณาพลังงานรายวัน พบว่าอาคารขนาดกลางสามารถผลิตพลังงานคืนกลับมาเพื่อช่วยลดภาระพลังงานที่ถูกใช้ไปในส่วนช่วงเวลาที่อยู่นิ่ง (Stand by) และในขณะที่ยกเลิกที่รวมกันได้สัดส่วนที่ 108.10% โดยสัดส่วนการประหยัดพลังงานนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\% \text{Saving} = \frac{E_{\text{regen}}}{E_{\text{consume}}} \times 100$$

(โดยที่ E_{regen} คือพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตคืนต่อวัน หน่วยเป็น (kWh/day)

และ E_{consume} คือพลังงานไฟฟ้าสุทธิที่ใช้ขับเคลื่อนและสแตนด์บาย หน่วยเป็น (kWh/day)) จากผลประหยัดพลังงานดังกล่าว เมื่อนำมาประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU พบว่าสามารถคิดเป็นมูลค่าการประหยัดพลังงานสำหรับอาคารขนาดกลางได้ที่ 65,613 บาท/ปี-เครื่อง ซึ่งมูลค่าผลประหยัดรายปี (S_{annual}) หน่วยเป็น บาท/ปี-เครื่อง นี้ คำนวณได้จากการนำพลังงานที่ผลิตคืนในแต่ละช่วงเวลา ($E_{\text{regen},t}$) หน่วยเป็น kWh/day คูณกับอัตราค่าไฟฟ้า ณ ช่วงเวลานั้น ($Rate_t$) หน่วยเป็น บาท/kWh และคูณด้วย

จำนวนวันทำงานของอาคารต่อปี (D_{year}) หน่วยเป็น วัน/ปี ดังสมการ

$$S_{\text{annual}} = \sum (E_{\text{regen},t} \times Rate_t) \times D_{\text{year}}$$

แต่สำหรับอาคาร High-rise มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานเป็น 46.20% ซึ่งสามารถคิดเป็นมูลค่าการประหยัดไฟ 66,578 บาท/ปี-เครื่อง ดังแสดงใน Figure 6 และ Figure 7

นอกจากผลประหยัดทางเศรษฐศาสตร์ที่ได้แล้ว ผลลัพธ์จากการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่นี้ยังเข้าข่ายและสอดคล้องกับเกณฑ์การประเมินอาคารเขียว (Green building) ระดับสากล เช่น มาตรฐาน LEED (Leadership in energy and environmental design) และมาตรฐานของไทยอย่าง TREES (Thai's rating of energy and environmental sustainability) โดยเฉพาะในหมวดพลังงานและบรรยากาศ (Energy and atmosphere) เนื่องจากระบบลิฟต์ที่มีฟังก์ชัน Regenerative สามารถลดการใช้พลังงานรวมของอาคาร (Optimize energy performance) ได้อย่างเป็นรูปธรรม นอกจากนี้การปั่นไฟคืนในช่วงเวลาที่มีการใช้งานลิฟต์หนาแน่น ยังช่วยลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Peak demand reduction) ของอาคารได้ ดังนั้น การลงทุนติดตั้งเทคโนโลยีนี้ในทั้งอาคาร Mid-rise และ High-rise จึงเป็นปัจจัยสนับสนุนสำคัญที่ช่วยให้อาคาร

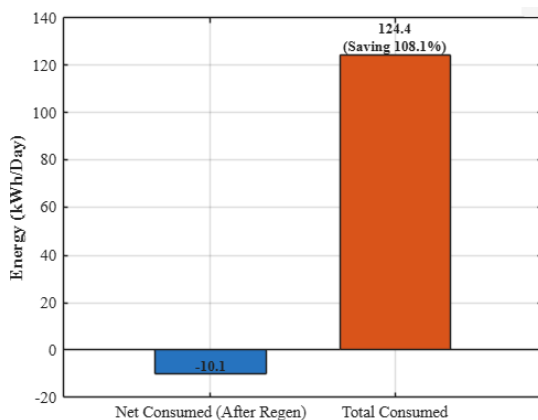


Figure 6 Energy utilized in mid-rise bldg.

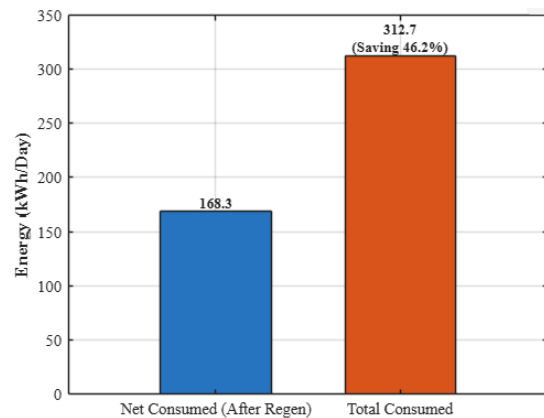


Figure 7 Energy utilized in high-rise bldg.

Table 3 MAIC in function of bldg. type and time period

Bldg. type	MAIC, 3 Y consideration	MAIC, 5 Y consideration	MAIC, 7 Y consideration
Mid-rise bldg.	105,794	170,380	230,588
High-rise bldg.	113,521	182,824	247,429

อาคารสามารถเก็บเครดิตเพื่อชดเชยมาตรฐานอาคารประหยัดพลังงานซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มและการพัฒนาเทคโนโลยีลิฟต์สีเขียว (Green elevators) ในปัจจุบัน [10]

3.4 การวิเคราะห์งบประมาณการลงทุนส่วนเพิ่มสูงสุดที่ยอมรับได้ (MAIC)

จากแนวคิดที่ต้องการกลับสมการเพื่อหา MAIC ในช่วงระยะเวลาตามเป้าหมาย คือพิจารณาที่ 3 5 และ 7 ปี ซึ่งได้ผลลัพธ์ดัง Table 3 จากผลลัพธ์จะเห็นว่าต้นทุนของอาคารทั้ง 2 ประเภท จะมีต้นทุนส่วนเพิ่มที่ยอมรับได้เพิ่มขึ้นตามกำหนดกรอบระยะเวลาคืนทุนเพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดงบประมาณต้นทุนส่วนเพิ่มที่ยอมรับได้ การเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเป็นแนวโน้มเชิงเส้น ตัวอย่างเช่น สำหรับอาคาร High-rise ควรมีการตั้งงบประมาณเพิ่มเติม 247,429 บาทต่อลิฟต์หนึ่งตัว

(สำหรับกรอบการลงทุนระยะเวลา 7 ปี) ซึ่งงบประมาณเท่านี้จะสามารถครอบคลุมราคาต้นทุนของอุปกรณ์ Regenerative converter ได้ ตัวเลขดังกล่าวขึ้นกับความสามารถของเจ้าของโครงการเพื่อการตัดสินใจ

3.5 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis)

การศึกษานี้มีตัวแปรหลากหลายที่มีผลต่อผลการศึกษา จึงได้ทำการทดสอบความอ่อนไหวของตัวแปร 4 ปัจจัยหลัก คือ ความหนาแน่นของการสัญจรประสิทธิภาพระบบ ราคาไฟฟ้า และความเร็วของการเคลื่อนตัวของลิฟต์ ซึ่งเป็นตัวแปรเชิงโครงสร้าง โดยนับความคลาดเคลื่อนจากสมมติฐานหลัก (Base scenario เส้นปะแนวตั้งของแต่ละกราฟ) เพื่อเปรียบเทียบและหาตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อค่า MAIC ดังแสดงผลลัพธ์ใน Figure 8

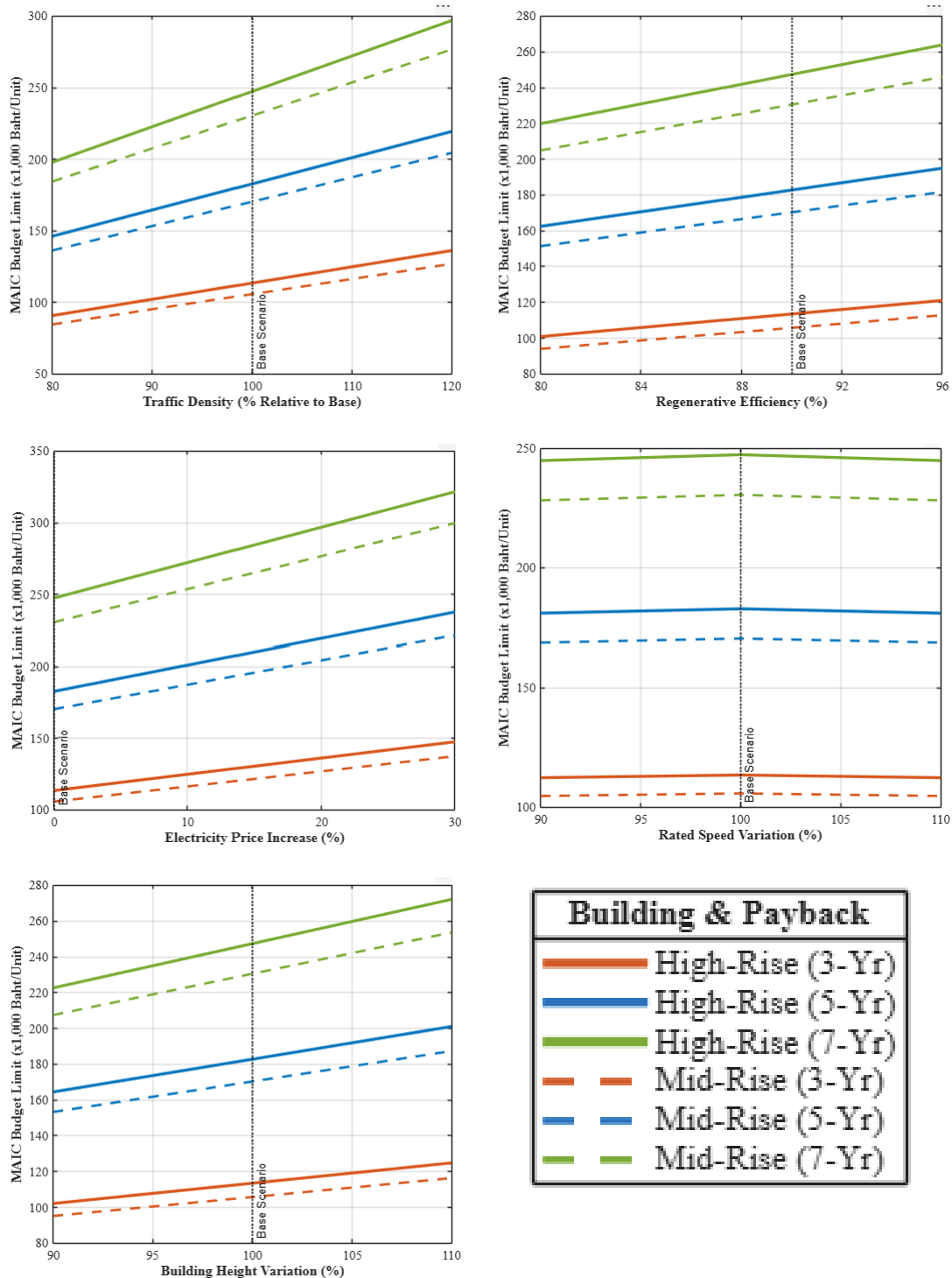


Figure 8 Sensitivity analysis a) Traffic density; b) Regenerative efficiency; c) Electrical price; d) Rated speed e) Bldg. height.

จากการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟในทุกตัวแปรศึกษา สามารถอธิบายในมุมวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ได้ดังนี้ ความหนาแน่นของการสัญจร (Figure 8a) เป็นปัจจัยโดยตรงที่มีอิทธิพลต่อความคุ้มค่าในการลงทุนมากที่สุด รองไปคือความสูงของอาคาร และอัตราค่าไฟฟ้า ตามลำดับ ปัจจัยทั้งสามนี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อปริมาณพลังงานสัมบูรณ์และมูลค่าเงินที่ประหยัดได้ต่อปี ทำให้เส้นกราฟมีความชันเป็นบวกอย่างชัดเจน หากอาคารมีประชากรใช้งานหนาแน่นขึ้นหรือความสูงของอาคาร หรืออัตราค่าไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่เพิ่มขึ้น 10-20% จะส่งผลให้ค่า MAIC จะสูงขึ้นและทำให้ระยะเวลาคืนทุนไวขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ด้วยงานวิจัยนี้ได้ทำการระบุความเร็ว (Rated speed) อัตราค่าไฟ (Electrical price) และความสูงของอาคารศึกษา (Building height) ทำให้กราฟของตัวแปรนี้จะอ้างอิงค่าที่สมมติฐานหลัก (เส้น Base scenario)

อย่างไรก็ตาม ปัจจัยด้านประสิทธิภาพของระบบและความเร็วพิกัดของลิฟต์ จะส่งผลกระทบต่อค่า MAIC เพียงเล็กน้อย (เส้นกราฟมีความชันน้อยเกือบขนานกับแกนแนวนอน) เนื่องจากประสิทธิภาพอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้นมีส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับฐานพลังงานรวมที่ได้ โดยขณะที่ความเร็วลิฟต์ที่เพิ่มขึ้นจะปลดปล่อยเวลาในการทำงานลง ($E = P \times t$) ซึ่งไปหักล้างกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยที่ E คือพลังงานไฟฟ้า, P คือกำลังไฟฟ้า และ t คือระยะเวลาในการทำงาน จึงทำให้พลังงานรวมที่ผลิตได้ต่อเที่ยวอาจไม่เปลี่ยนแปลง

4. สรุป

การใช้ระบบลิฟต์แบบ Regenerative system ภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU สำหรับอาคารสำนักงาน กำลังเป็นที่สนใจ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า อาคารสูง (High-rise) จะมีความเหมาะสมในการลงทุนมากกว่าอาคารสูงกลาง (Mid-rise) เนื่องจากให้มูลค่าการประหยัดพลังงานโดยรวมสูงที่สุด ขณะที่ลงทุนส่วนเพิ่มที่ยอมรับได้ (MAIC) ไม่มาก โดยที่ค่า MAIC จะใช้

เป็นตัวชี้วัดหลักซึ่งสามารถแก้ปัญหาการขาดข้อมูลด้านราคาที่เป็นความลับทางการค้าของผู้จำหน่ายลิฟต์แนวทางนี้ช่วยให้ เจ้าของอาคาร และวิศวกรที่ปรึกษามีกรอบราคาอ้างอิงที่ชัดเจน เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจลงทุนและกำหนดคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของโครงการได้

เพื่อให้ระบบลิฟต์แบบ Regenerative system นี้ถูกใช้งานมากขึ้นตามแนวทางของอาคารสีเขียว จึงควรใช้ MAIC เป็นเกณฑ์อ้างอิงในการตั้งงบประมาณ และภาครัฐควรมีมาตรการส่งเสริมการลงทุน (Incentives) เช่น การให้เงินอุดหนุน หรือสิทธิประโยชน์ทางภาษี สำหรับอาคารที่เลือกใช้เทคโนโลยีลิฟต์ประหยัดพลังงานได้ ทั้งนี้ งานวิจัยนี้เน้นการพิสูจน์เชิงทฤษฎีและแบบจำลอง ส่วนการทดลองทางกายภาพกับอุปกรณ์จริง (Physical validation) จะถูกจัดให้เป็นการทดลองในอนาคต

5. References

- [1] United Nations Environment Programme and Global Alliance for Buildings and Construction, 2024, Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming Sustainable Solutions to Cut Emissions from the Buildings Sector, United Nations Environment Programme, Nairobi.
- [2] Ministry of Energy, 2018, Energy Efficiency Plan: EEP 2018 (2018-2037), Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Thailand. (in Thai)
- [3] Tukia, T., Uimonen, S., Siikonen, M. L., Donghi, C. and Lehtonen, M., 2018, High-resolution modeling of elevator power consumption, J. Build. Eng. 18: 210-219.

- [4] Rashed, A. N. Z., Yarrarapu, M., Prabu, R. T., Antony, G. S. R., Edeswaran, L., Kumar, E. S., Aswitha, K., Snehith, N. and Shaik, H. A., 2024, Connected smart elevator systems for smart power and time saving, *Sci. Rep.* 14(1): Article 19330.
- [5] Cao, Y. and Ming, X., 2025, Digital twin-driven low-carbon service design and modularization in central air conditioning ecosystems: A multi-criteria and co-intelligence approach, *Sustainability.* 17(21): 9877.
- [6] Rahman, A., Aziz, T., Masood, N. A. and Deeba, S. R., 2021, A time of use tariff scheme for demand side management of residential energy consumers in Bangladesh, *Energy Rep.* 7: 3189-3198.
- [7] Tang, H., Zhang, Y. and Zheng, Z., 2025, How time-of-use tariffs and storage costs shape optimal hybrid storage portfolio in buildings, *Buildings.* 16(1): 42.
- [8] Dambrauskas, K., Vanagas, J., Zimnickas, T., Kalvaitis, A. and Ažubalis, M., 2020, A method for efficiency determination of permanent magnet synchronous motor, *Energies.* 13(4): 1004.
- [9] Fernández V., J. R., Cortés, P. and Aparicio, P., 2008, Fuzzy Logic-Based Elevator Group Control System for Energy Optimization Purpose, In 2008 International Conference on Information Technology and Applications pp. 439-444.
- [10] Zrnić, N., Dragović, A., Kosanić, N. and Milovanović, V., 2023, Development and state-of-the art in green elevators technologies: A survey, *Engineering TODAY.* 2(3): 7-24
- [11] Ikhe, Y., Hajare, A., Pandey, D., Lichade, J., Jain, K., Mate, M. and Dahiwade, S., 2025, Regenerative braking in elevators with BESS, *Int. J. Multidiscip. Res. (IJFMR).* 7(6).
- [12] Venizelou, V., Philippou, N., Hadjipanayi, M., Makrides, G., Efthymiou, V. and Georghiou, G. E., 2018, Development of a novel time-of-use tariff algorithm for residential prosumer price-based demand side management, *Energy.* 142: 633-646.
- [13] Badruddin, S., Robertson-Gillis, C. R., Ashworth, J. and Wright, D., 2020, Impact of tariff structure on the economics of behind-the-meter solar microgrids, *Clean. Eng. Technol.* 2: 100039.
- [14] Kantawong, S., 2013, Modelling of Power Generation Controller for Permanent Magnet Motor Elevator by Energy Regenerative Unit (ERU), Master Thesis, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, 171 p. (in Thai)
- [15] Uimonen, S., Tukia, T., Donghi, C. and Lehtonen, M., 2020, Analysis of elevator energy efficiency and regenerative potential in tall buildings, *Energy Build.* 210: 109743.