

การศึกษาการใช้พลังงานหมุนเวียนในอาคารอัจฉริยะ: การวิเคราะห์แนวทางสู่ Net Zero Energy Building

Study of Renewable Energy Utilization in Smart Buildings: An Analysis of Pathways to Net Zero Energy Building

สันติ การิสันต์^{1*} และสิทธิศักดิ์ ไรจชยะ²

Santi Karisan^{1*} and Sittisak Rojchaya²

Received: March 25, 2025; Revised: July 3, 2025; Accepted: July 7, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการบูรณาการพลังงานหมุนเวียนในระบบไฟฟ้าของอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มุ่งสู่การเป็นอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (NZEB) โดยวิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงาน ออกแบบระบบพลังงานหมุนเวียน และจัดการพลังงานอัจฉริยะโดยอ้างอิงข้อมูลจริง ผลการศึกษาพบว่าการติดตั้งระบบ Solar PV ขนาด 125 kWp และแบตเตอรี่ 250 kWh ช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้าได้ 65 % และคืนทุนภายใน 8 ปี อาคารใช้พลังงานเฉลี่ย 47,264.27 วัตต์ต่อวัน โดยปัจจัยสำคัญคือ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย 0.58) และอุณหภูมิภายนอก (>30 °C) ระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะช่วยลดพลังงานรวม 24 % โดยปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (ลดสูญเสีย 12 %) และใช้ระบบควบคุมแสงสว่างอัตโนมัติ (ลดพลังงาน 25 %) ส่งผลให้ลดการปล่อย CO₂ ได้ 118.5 ตัน/ปี งานวิจัยนี้ให้แนวทางแก่สถาบันและภาคอุตสาหกรรม เพื่อพัฒนาอาคารที่ยั่งยืนโดยใช้พลังงานหมุนเวียนร่วมกับระบบอัจฉริยะ

คำสำคัญ : พลังงานหมุนเวียน; อาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (NZEB); การจัดการพลังงานอัจฉริยะ; การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

¹ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding Author, Tel. 08 9924 1322, E - mail: santi.k@rmutsv.ac.th

Abstract

This research examines the integration of renewable energy into the electrical system of the Industrial Technician School Building at the College of Industrial Technology and Management, aiming to achieve a Net Zero Energy Building (NZEB). The study analyzes energy consumption patterns, designs an optimal renewable energy system, and implements smart energy management based on real consumption data. The findings indicate that installing a 125 kWp Solar PV system and a 250 kWh battery storage can reduce reliance on the public grid by 65 %, with a payback period of eight years. The building's average energy consumption is 47,264.27 W/day, with key influencing factors including power factor (average 0.58) and external temperatures above 30 °C. Smart energy management reduces total energy consumption by 24 %, primarily through power factor correction (12 % loss reduction) and automated lighting control (25 % energy savings), leading to a CO₂ reduction of 118.5 tons/year. This study provides practical recommendations for educational institutions and industries to develop sustainable buildings by integrating renewable energy with smart management systems.

Keywords: Renewable Energy; Net Zero Energy Building (NZEB); Smart Energy Management; Greenhouse Gas Emission Reduction

บทนำ

ในปัจจุบันภาคอาคารเป็นหนึ่งในภาคส่วนที่มีการใช้พลังงานสูงและเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญของโลก โดยเฉพาะในประเทศไทยที่อาคารพาณิชย์และที่อยู่อาศัยมีการใช้พลังงานคิดเป็นสัดส่วนมากกว่า 40 % ของการใช้พลังงานทั้งหมดของประเทศ ทำให้การพัฒนาอาคารที่มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญอย่างยิ่ง (Hongvityakorn et al., 2024; Mengesha et al., 2024) แนวคิดอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building: NZEB) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในฐานะแนวทางสำคัญในการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Noh et al., 2024; Wang et al., 2024) NZEB เป็นอาคารที่สามารถผลิตพลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนได้เท่ากับหรือมากกว่าพลังงานที่ใช้ในแต่ละปี (Hanifi, 2024) แนวทางนี้ไม่เพียงช่วยลดต้นทุนด้านพลังงาน แต่ยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมทั้งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Latief et al., 2017; Bedi et al., 2025) อย่างไรก็ตาม การบรรลุเป้าหมาย NZEB ต้องอาศัยองค์ประกอบสำคัญหลายประการ เช่น (1) การวิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงานของอาคาร เพื่อลดความสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (2) การออกแบบระบบพลังงานหมุนเวียนที่เหมาะสม ซึ่งสามารถรองรับความต้องการพลังงานของอาคารได้อย่างสมดุล (3) การใช้ระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ (Smart Energy Management System) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความเสถียรของระบบไฟฟ้า (Pan et al., 2015; Hanifi, 2024)

การวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับการผสมผสานพลังงานหมุนเวียนระบบไฟฟ้าในอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เพื่อบรรลุเป้าหมาย NZEB โดยใช้ข้อมูลการใช้พลังงานจริง วิเคราะห์แนวทางที่เหมาะสมในการติดตั้งระบบพลังงานหมุนเวียนและนำเสนอแนวทางในการจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ข้อมูลการใช้พลังงานถูกเก็บรวบรวมผ่านระบบตรวจวัดพลังงานแบบเรียลไทม์ที่ใช้เทคโนโลยี IoT เพื่อบันทึกข้อมูลกระแสไฟฟ้า แรงดัน และพลังงานในแต่ละช่วงเวลา ข้อมูลเหล่านี้ถูกนำมาวิเคราะห์และประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ HOMER Pro ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับการจำลอง และวิเคราะห์ระบบพลังงานไฮบริด โดยนำข้อมูลโหลดจริง อัตราค่าไฟฟ้า และศักยภาพพลังงานหมุนเวียนมาป้อนเพื่อจำลองระบบและประเมินความเหมาะสมทั้งในเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ ผลลัพธ์ที่ได้ช่วยให้สามารถกำหนด

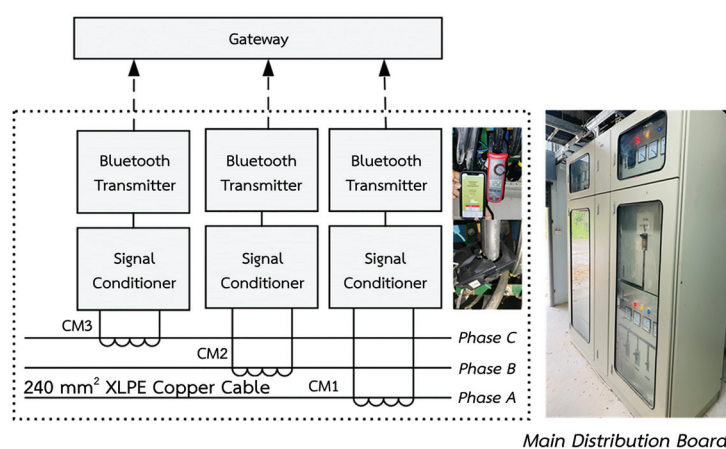
ขนาดระบบพลังงานหมุนเวียน ต้นทุน และประสิทธิภาพที่เหมาะสมสำหรับอาคารเรียนดังกล่าว ผลการศึกษานี้ไม่เพียงให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับวิศวกร นักวิจัย และนักพัฒนาอาคารเท่านั้น แต่ยังเป็นแนวทางสำคัญสำหรับนักวางแผนนโยบายและภาคอุตสาหกรรมในการขับเคลื่อนอาคารประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย และทั่วโลก (Wikipedia Contributors, 2011.; IES, 2023)

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการตามกระบวนการวิเคราะห์และนำเสนอข้อมูล เพื่อประกอบการปรับปรุงระบบไฟฟ้าในอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรมให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงาน (2) การวิเคราะห์และจำลองระบบพลังงานหมุนเวียน (3) การพัฒนาระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ และ (4) การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

1. การเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงาน

เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำเกี่ยวกับรูปแบบการใช้พลังงานของอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย งานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบตรวจวัดและเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ (Real-Time Monitoring System) ซึ่งติดตั้งที่สายเมนหลักในตู้ MDB ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอาคารระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ถึงมกราคม พ.ศ. 2568 โดยทำการวัดกระแสไฟฟ้า การใช้พลังงาน และอุณหภูมิที่สายเมนหลัก และบันทึกข้อมูลเพื่อแสดงผลผ่านระบบ IoT แบบเรียลไทม์ เพื่อให้สามารถติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างทันเวลาและแม่นยำ



รูปที่ 1 ระบบติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยเซนเซอร์กระแสไฟฟ้าและระบบ IoT

จากรูปที่ 1 แสดงระบบบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานจากตู้ MDB โดยใช้ Clamp Meter (CM) วัดค่ากระแสไฟฟ้าและส่งสัญญาณผ่านกระบวนการปรับสัญญาณไปยัง Gateway ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางสื่อสารกับอินเทอร์เน็ตผ่าน Bluetooth ข้อมูลที่บันทึกจะถูกอัปโหลดเข้าสู่ Data Center ทุก 1 นาที และสามารถดาวน์โหลดในรูปแบบ CSV ผ่าน Browser Engine ได้ ระบบนี้ทำการบันทึกข้อมูลต่อเนื่องตั้งแต่เดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ถึงมกราคม พ.ศ. 2568 เพื่อนำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเกิดกระแสไม่สมดุล (Unbalance Current)



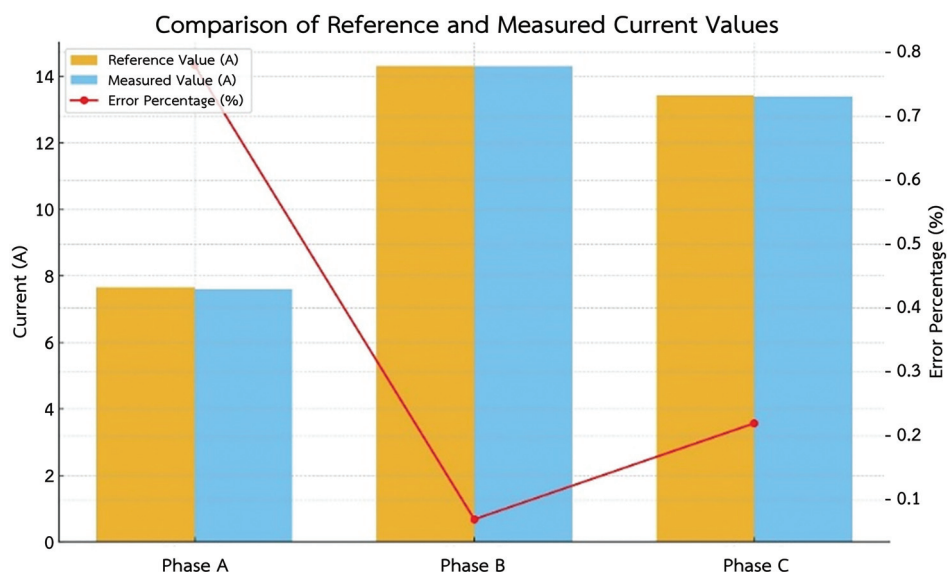
รูปที่ 2 การทดสอบประสิทธิภาพและความแม่นยำของระบบ

จากรูปที่ 2 การทดสอบเปรียบเทียบความแม่นยำของระบบ เพื่อยืนยันความถูกต้องของระบบเก็บข้อมูล ได้ทำการเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน Clip AM และคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเชิงเปอร์เซ็นต์ (Error Percentage) ผลการประเมินพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.07 - 0.78 % ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างระบบและเครื่องมือวัด (เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด)

Phase	Reference Value (A)	Measured Value (A)	Error Percentage %
Phase A	7.66	7.6	0.78
Phase B	14.31	14.3	0.07
Phase C	13.43	13.4	0.22

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ระหว่างเครื่องมืออ้างอิงมาตรฐาน (Reference Value) กับค่าที่วัดได้จากระบบต้นแบบ (Measured Value) ในแต่ละเฟส โดยคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเป็นร้อยละ (Error Percentage) ผลการวิเคราะห์พบว่า เฟส A มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.78 % เฟส B มีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดที่ 0.07 % เฟส C มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.22 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบต้นแบบมีความแม่นยำในการวัดกระแสไฟฟ้าในระดับที่น่าเชื่อถือ (ค่าความคลาดเคลื่อน < 1 %)



รูปที่ 3 ร้อยละของความคลาดเคลื่อน

จากรูปที่ 3 พบว่าเฟส A (7.6 A) วัดได้ 7.66 A (+0.78 %) เฟส B (14.3 A) วัดได้ 14.31 A (+0.07 %) และ เฟส C (13.4 A) วัดได้ 13.43 A (+0.22 %) ค่าที่วัดได้ใกล้เคียงค่ามาตรฐาน ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.07 - 0.78 %

2. การวิเคราะห์และจำลองระบบพลังงานหมุนเวียน

เมื่อได้ข้อมูลการใช้พลังงานของอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ HOMER Pro เพื่อจำลองและออกแบบระบบพลังงานหมุนเวียนที่เหมาะสม โดยขั้นตอนประกอบด้วย

2.1 การจำลองขนาดระบบพลังงานหมุนเวียน วิเคราะห์ความต้องการพลังงานของอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรมในแต่ละช่วงเวลา เลือกขนาดแผงโซลาร์เซลล์ (Solar PV System) และระบบกักเก็บพลังงาน (Battery Storage System) วิเคราะห์การติดตั้งระบบในรูปแบบต่าง ๆ เช่น Grid-Connected Off-Grid และ Hybrid System คำนวณกำลังการผลิต (kWh/ปี) และอัตราการลดการพึ่งพาพลังงานจาก Grid (%)

2.2 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าและอายุการใช้งานของอุปกรณ์ คำนวณต้นทุนการติดตั้งและบำรุงรักษาของระบบพลังงานหมุนเวียน ประเมินอายุการใช้งานของแผงโซลาร์เซลล์และแบตเตอรี่ คำนวณค่า Capacity Factor ของแผงโซลาร์เซลล์ภายใต้สภาพแวดล้อมจริง วิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ของแต่ละทางเลือก

3. ระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ

ระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ (Smart Energy Management System: SEMS) มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดต้นทุนด้านพลังงาน และสนับสนุนการใช้พลังงานหมุนเวียน ระบบนี้ใช้เทคโนโลยี IoT ปัญญาประดิษฐ์ (AI) และ Big Data Analytics ในการตรวจสอบ วิเคราะห์ และควบคุมการใช้พลังงานแบบเรียลไทม์ โดยมีองค์ประกอบหลักของระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ

3.1 เซนเซอร์และอุปกรณ์ตรวจวัด (IoT Sensors and Meters) ตรวจวัดพารามิเตอร์สำคัญ เช่น กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า พลังงานที่ใช้ อุณหภูมิ และโหลดไฟฟ้า ส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ไปยังระบบกลาง

3.2 แพลตฟอร์มวิเคราะห์ข้อมูลพลังงาน (Energy Analytics Platform) วิเคราะห์แนวโน้มการใช้พลังงาน ใช้ Machine Learning หรือ Clustering เพื่อระบุพฤติกรรมโหลดผิดปกติ

3.3 ระบบควบคุมและบริหารพลังงาน (Energy Control and Management System) ควบคุม โหลดไฟฟ้าอัตโนมัติ เช่น การเปิด/ปิดอุปกรณ์ตามโหลดไฟฟ้า บูรณาการแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น Solar PV และแบตเตอรี่

3.4 ส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface & Dashboard) แสดงข้อมูลพลังงานในรูปแบบกราฟหรือแดชบอร์ด แจ้งเตือนเมื่อมีการใช้พลังงานผิดปกติ

4. การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

เพื่อตรวจสอบความคุ้มค่าและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ และการวิเคราะห์วงจรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) โดยมีขั้นตอนดังนี้

4.1 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ คำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) ประเมินอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) วิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break-even Analysis) ศึกษาความอ่อนไหวของโครงการ (Sensitivity Analysis) ต่อปัจจัย เช่น ราคาติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์และอัตราค่าไฟฟ้า

4.2 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม คำนวณปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG Emission Reduction) ในแต่ละปีเปรียบเทียบกับปริมาณการปล่อยก๊าซก่อนและหลังติดตั้งระบบ วิเคราะห์ผลกระทบด้านการใช้ทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมในแต่ละทางเลือก

ผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ดำเนินการตามขั้นตอนที่วางแผนไว้และได้ผลการศึกษาที่สำคัญใน 4 ด้านหลัก ได้แก่ (1) การวิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงาน (2) ผลการจำลองระบบพลังงานหมุนเวียน (3) ผลของการใช้ระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ และ (4) การประเมินผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

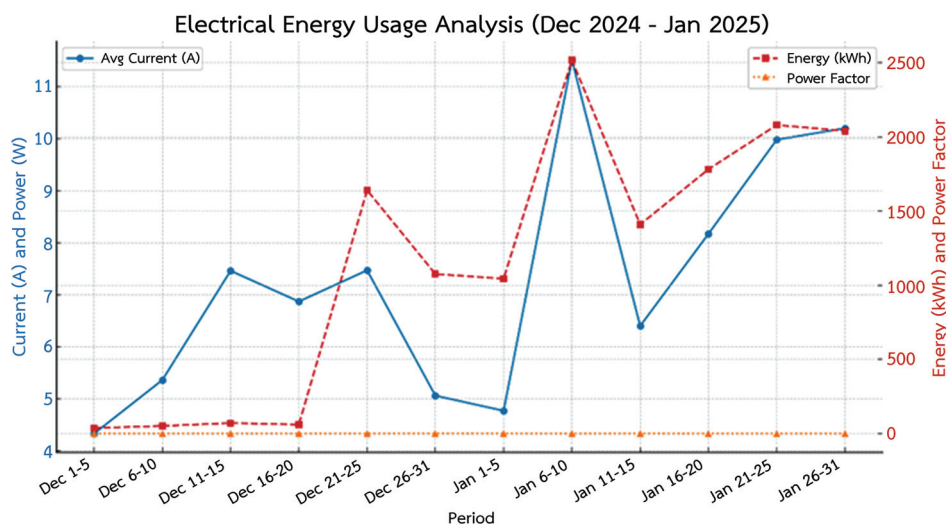
1. การวิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงานจากข้อมูลที่เก็บรวบรวมระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ถึง มกราคม พ.ศ. 2568 ช่วยให้เข้าใจแนวโน้มและพัฒนาแนวทางการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2 แสดงค่ากำลังไฟฟ้า (kW) และพลังงานไฟฟ้า (kWh) ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือ IoT Energy Meter ที่บันทึกค่าทุก 1 นาทีตลอด 24 ชั่วโมง โดยคำนวณพลังงานจากการรวมกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละนาทียกใช้การประมาณค่า จะระบุช่วงเวลาและชั่วโมงที่ใช้ในการคำนวณอย่างชัดเจน เพื่อความถูกต้องในการวิเคราะห์พลังงานและต้นทุน

ตารางที่ 2 ข้อมูลและการวิเคราะห์การใช้พลังงาน

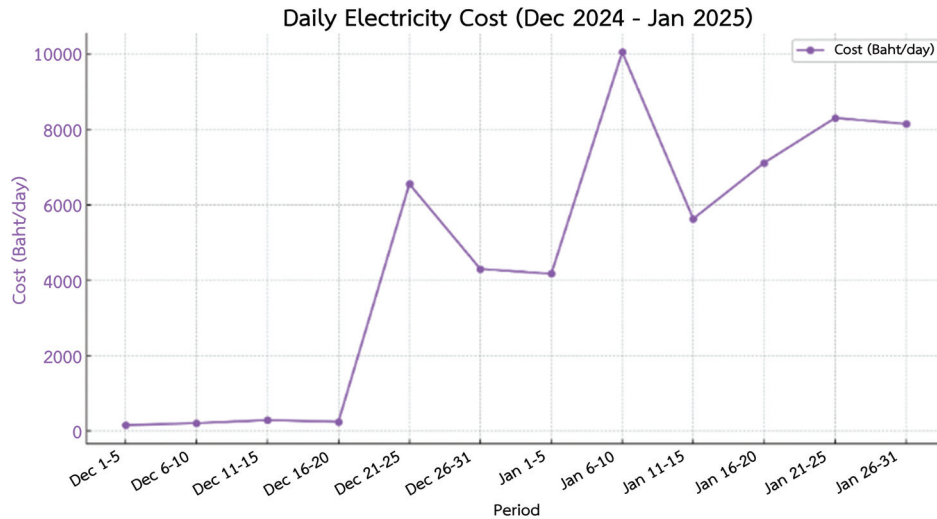
Period	Average Current (A)	Average Power (W)	Power Factor (PF)	Energy Consumption (kWh/day)	Cost (Baht/day)*
Dec 1-5, 2024	4.33	1601.35	0.56	38.43	153.73
Dec 6-10, 2024	5.36	2179.05	0.54	52.30	209.19
Dec 11-15, 2024	7.46	2986.57	0.51	71.68	286.71
Dec 16-20, 2024	6.87	2554.90	0.52	61.32	245.27
Dec 21-25, 2024	7.47	68312.40	0.66	1,639.50	6,557.99
Dec 26-31, 2024	5.06	44815.08	0.80	1,075.56	4,302.25
Jan 1-5, 2025	4.77	43482.35	0.73	1,043.58	4,174.30
Jan 6-10, 2025	11.51	104817.09	0.44	2,515.61	10,062.44
Jan 11-15, 2025	6.40	58698.36	0.69	1,408.76	5,635.05
Jan 16-20, 2025	8.17	74187.84	0.51	1,780.51	7,122.03
Jan 21-25, 2025	9.98	86584.38	0.48	2,078.03	8,312.10
Jan 26-31, 2025	10.20	84954.82	0.47	2,038.92	8,155.66
Average	7.30	47,264.27	0.58	1,150.38	4,601.39

หมายเหตุ: ค่าใช้จ่ายคำนวณตามอัตราค่าไฟฟ้าท้องถิ่น



(ก) แนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

รูปที่ 4 ข้อมูลและการวิเคราะห์การใช้พลังงาน



(ข) ต้นทุน

รูปที่ 4 ข้อมูลและการวิเคราะห์การใช้พลังงาน (ต่อ)

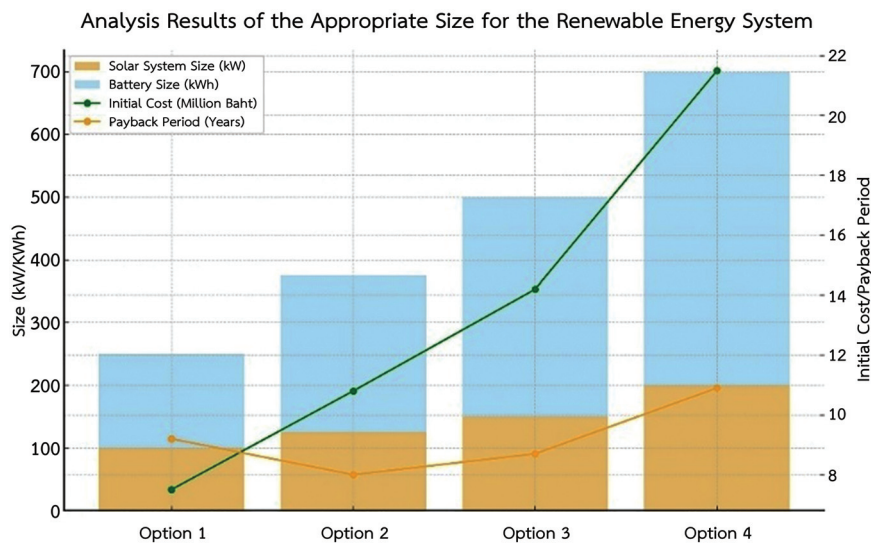
จากรูปที่ 4(ก) กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (Average Current, A) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.30 A ตลอดช่วงเวลาการศึกษา ช่วงที่กระแสไฟฟ้าต่ำสุดคือ 4.33 A (1 - 5 ธันวาคม พ.ศ. 2567) และสูงสุดที่ 11.51 A (6 - 10 มกราคม พ.ศ. 2568) พบว่าแนวโน้มกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในเดือนมกราคม โดยเฉพาะช่วง 6 - 10 มกราคม พ.ศ. 2568 ซึ่งอาจเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของโหลดไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (Energy Consumption, kWh/day) ค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อวันอยู่ที่ 1,150.38 kWh/day ช่วงที่มีการใช้พลังงานต่ำสุดคือ 38.43 kWh/day (1 - 5 ธันวาคม พ.ศ. 2567) การใช้พลังงานสูงสุด พบในช่วง 6 - 10 มกราคม พ.ศ. 2568 ที่ 2,515.61 kWh/day ซึ่งมากกว่าค่าเฉลี่ยเกือบ 2.19 เท่า ค่า Power Factor (PF) ค่าเฉลี่ยของ Power Factor อยู่ที่ 0.58 ตลอดช่วงเวลาการศึกษา พบว่าช่วงที่ Power Factor ต่ำสุดคือ 0.44 (6 - 10 มกราคม พ.ศ. 2568) และสูงสุดที่ 0.80 (26 - 31 ธันวาคม 2567) ค่า Power Factor ต่ำกว่า 0.5 ในหลายช่วงเวลา ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ยังไม่ดี ควรมีการปรับปรุงโหลดไฟฟ้าเพื่อเพิ่มค่า PF ส่วนรูปที่ 4(ข) พบว่า ค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 153.73 บาท/วัน เป็น 10,062.44 บาท/วัน (เพิ่มขึ้นกว่า 65 เท่า) ช่วง 6 - 10 มกราคม พ.ศ. 2568 เป็นจุด Peak ของการใช้พลังงานและค่าไฟ ก่อนลดลงเล็กน้อยหลังจากนั้น มีความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยและปริมาณการใช้พลังงาน

2. ผลการจำลองระบบพลังงานหมุนเวียน

การจำลองระบบพลังงานหมุนเวียนโดยใช้ซอฟต์แวร์ HOMER Pro พบว่าทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด คือ การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 125 kWp พร้อมระบบกักเก็บพลังงาน (Battery Storage) ขนาด 250 kWh ตามรายละเอียดตารางที่ 3 ระบบนี้สามารถผลิตพลังงานได้ประมาณ 175,000 kWh/ปี ซึ่งครอบคลุม 65 % ของความต้องการพลังงานทั้งหมดของอาคาร ค่า Capacity Factor ของระบบพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ที่ 17.2 % ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนถึงความสมดุลระหว่างขนาดระบบพลังงาน แบตเตอรี่ และความคุ้มค่าในการลงทุน

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ขนาดที่เหมาะสมของระบบพลังงานหมุนเวียน

Option	Solar System Size (kW)	Battery Size (kWh)	Energy Demand Coverage (%)	Initial Cost (Million Baht)	Payback Period (Years)
Option 1	100	150	48 %	7.5	9.2
Option 2	125	250	65 %	10.8	8.0
Option 3	150	350	78 %	14.2	8.7
Option 4	200	500	95 %	21.5	10.9



รูปที่ 5 การวิเคราะห์ขนาดที่เหมาะสมสำหรับระบบพลังงานหมุนเวียน

จากรูปที่ 5 พบว่า ขนาดระบบโซลาร์ และขนาดแบตเตอรี่ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับของทางเลือกที่สูงขึ้น การครอบคลุมพลังงาน (%) เพิ่มขึ้นตามขนาดของระบบโซลาร์และแบตเตอรี่ โดยมีลักษณะเป็นเส้นกราฟที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทางเลือกที่ 4 ให้ค่าการครอบคลุมพลังงานสูงสุด (~100 %) และมีขนาดระบบใหญ่ที่สุด ต้นทุนเริ่มต้นเพิ่มขึ้นตามทางเลือกที่สูงขึ้น โดยทางเลือกที่ 4 มีต้นทุนสูงสุด ระยะเวลาคืนทุนมีแนวโน้มเป็นรูปตัวยู (U-shape) โดยทางเลือกที่ 2 มีระยะเวลาคืนทุนต่ำสุด และเพิ่มขึ้นในทางเลือกที่ 3 และ 4 แม้ต้นทุนเพิ่มขึ้น แต่ระยะเวลาคืนทุนไม่ได้ลดลงเสมอไป

3. ผลของการใช้ระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ

ในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ถึงมกราคม พ.ศ. 2568 ได้มีการติดตั้งและทดลองใช้งานระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ (SEMS) ภายในอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดภาระโหลดไฟฟ้า ในช่วงเวลาที่ไม่จำเป็น และปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าโดยรวมของอาคาร ระบบ SEMS ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ เซนเซอร์ และมีเตอร์ IoT ที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าหลักของอาคาร เพื่อวัดพารามิเตอร์สำคัญ เช่น กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า พลังงานที่ใช้ และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) แบบเรียลไทม์ ข้อมูลจากเซนเซอร์จะถูกส่งเข้าสู่แพลตฟอร์มวิเคราะห์ข้อมูล (Energy Analytics Platform) ที่ใช้เทคนิค Machine Learning ในการตรวจจับและวิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงาน รวมทั้งระบุช่วงเวลาที่มิโหลดไฟฟ้าสูงผิดปกติ ผลการวิเคราะห์ช่วยให้ระบบควบคุมและบริหารจัดการ พลังงาน (Energy Control and Management System) สามารถดำเนินการปรับโหลดอัตโนมัติ เช่น การเปิด-ปิดอุปกรณ์ไฟฟ้า รวมถึงระบบแสงสว่างอัตโนมัติและการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้น เพื่อลดการสูญเสียพลังงานในระบบ นอกจากนี้ระบบยังบูรณาการกับแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น Solar PV และ แบตเตอรี่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานทดแทนในอาคาร

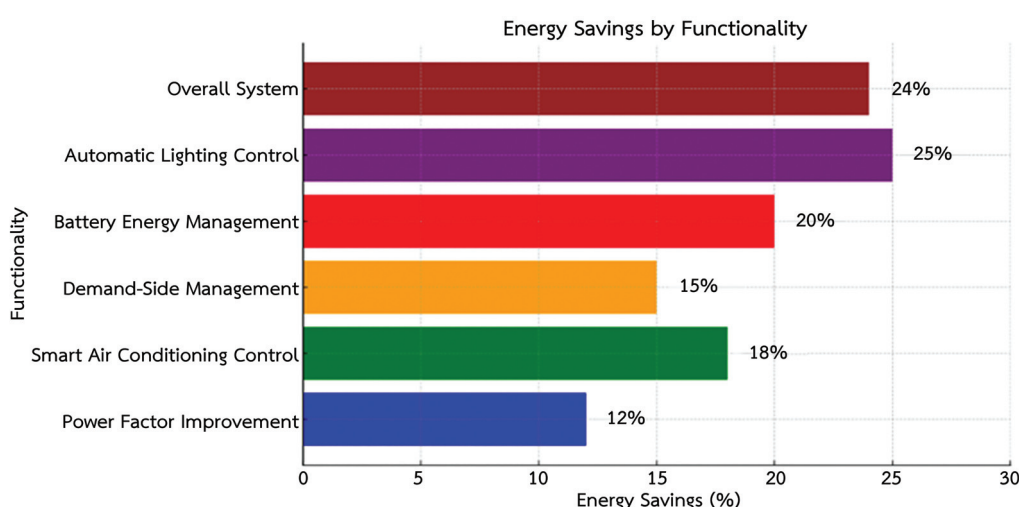
ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพของระบบการจัดการพลังงานอัจฉริยะ

Functionality	Energy Savings (%)	Benefits
Power Factor Improvement	12 %	Reduce electricity cost, reduce power loss
Smart Air Conditioning Control	18 %	Reduce energy usage, increase comfort
Demand-Side Management	15 %	Reduce electricity cost during Peak Demand
Battery Energy Management	20 %	Increase use of renewable energy

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพของระบบการจัดการพลังงานอัจฉริยะ (ต่อ)

Functionality	Energy Savings (%)	Benefits
Automatic Lighting Control	25 %	Reduce lighting energy usage
Overall System	24 %	Reduce total energy usage

ตารางที่ 4 แสดงข้อมูลผลการใช้พลังงานจริงที่เก็บรวบรวมจากระบบเซนเซอร์ IoT ในอาคารระหว่างช่วงเวลาที่ทำการทดลอง (ธันวาคม พ.ศ. 2567 - มกราคม พ.ศ. 2568) โดยค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh) และตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็นข้อมูล ที่วัดจริง ไม่ใช่ค่าจากการจำลองโปรแกรมใด ๆ การแสดงผลในตารางจึงสะท้อนการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงาน และประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นจริงจากการนำ SEMS มาใช้ โดยแสดงให้เห็นการลดโหลดไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ไม่จำเป็น และการเพิ่มตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ทำให้ลดการสูญเสียพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 6 สัดส่วนการประหยัดพลังงาน

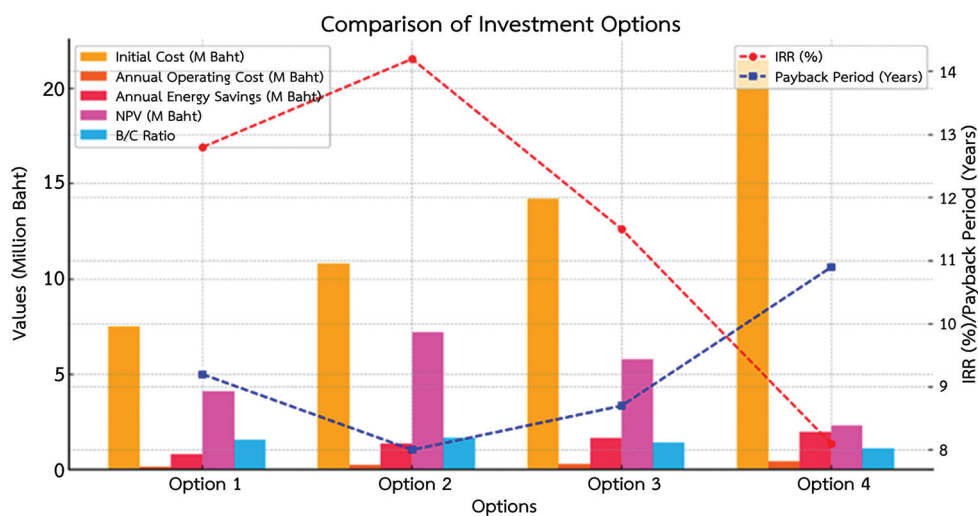
จากรูปที่ 6 พบว่า การจัดการความต้องการไฟฟ้ามีส่วนสูงสุด (25 %) แสดงถึงความสำคัญของการควบคุมและบริหารโหลดไฟฟ้า การบริหารการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ (20 %) เป็นอีกแนวทางสำคัญที่ช่วยลดการใช้พลังงานจากระบบหลัก การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (18 %) และการควบคุมแสงสว่างอัตโนมัติ (15 %) เป็นมาตรการเสริมที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ การควบคุมระบบปรับอากาศอัจฉริยะ (12 %) มีสัดส่วนน้อยที่สุด แต่ยังคงเป็นส่วนหนึ่ง ที่ช่วยลดการใช้พลังงาน

4. การประเมินผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

4.1 การวิเคราะห์ความคุ้มค่า ตารางที่ 5 เปรียบเทียบทางเลือกการลงทุนระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ 4 แบบ (Option 1 - 4) โดยพิจารณาต้นทุนเริ่มต้น ต้นทุนดำเนินงาน การประหยัดพลังงาน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ระยะเวลาคืนทุน และอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C Ratio) ราคาของแต่ละทางเลือก ประเมินจากค่าใช้จ่ายจริงในตลาด ทั้งต้นทุนอุปกรณ์ การติดตั้ง และบำรุงรักษา ความแตกต่างของแต่ละ Option เกิดจากขนาดและชนิดของอุปกรณ์ ระดับการบูรณาการกับพลังงานหมุนเวียน และขอบเขตการควบคุม โหลดไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม บทความควรระบุที่มาของราคาและสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณแต่ละ Option ให้ชัดเจน เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความสมบูรณ์ของการวิเคราะห์

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐกิจของแต่ละทางเลือก

Item	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Initial Cost (Million Baht)	7.5	10.8	14.2	21.5
Annual Operating Cost (Million Baht)	0.15	0.22	0.28	0.43
Annual Energy Savings (Million Baht)	0.82	1.35	1.63	1.97
Net Present Value (NPV) (Million Baht)	4.1	7.2	5.8	2.3
Internal Rate of Return (IRR) (%)	12.8 %	14.2 %	11.5 %	8.1 %
Payback Period (Years)	9.2	8.0	8.7	10.9
Benefit-Cost Ratio (B/C Ratio)	1.54	1.67	1.41	1.11



รูปที่ 7 การวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจของแต่ละตัวเลือก

จากรูปที่ 7 พบว่า ค่าใช้จ่ายและผลประโยชน์หลักต้นทุนเริ่มต้น Option 4 มีต้นทุนสูงสุด (~21.5M Baht) Option 1 มีต้นทุนต่ำสุด (~7.5M Baht) ค่าใช้จ่ายดำเนินงานรายปีเพิ่มขึ้นตามขนาดของโครงการ โดย Option 4 สูงสุด (~0.43M Baht) การประหยัดพลังงานรายปี สูงขึ้นตาม Option โดย Option 4 ประหยัดพลังงานได้มากที่สุด (~1.97M Baht) ตัวชี้วัดทางการเงินมูลค่าปัจจุบันสุทธิ Option 2 มี NPV สูงสุด (~7.2M Baht) Option 4 มี NPV ต่ำสุด (~2.3M Baht) อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน สูงสุดที่ Option 2 (~1.67) แสดงว่ามีความคุ้มค่ามากที่สุด การคืนทุนและอัตราผลตอบแทน IRR (%) สูงสุดที่ Option 2 (~14.2 %) ต่ำสุดที่ Option 4 (~8.1 %) แสดงว่าไม่คุ้มค่ามากนัก ระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุดที่ Option 2 (~8 ปี) ยาวที่สุดที่ Option 4 (~10.9 ปี) บทสรุป Option 2 มีความคุ้มค่าทางการเงินสูงสุด เพราะ NPV และ B/C Ratio สูง และ IRR ดีที่สุด พร้อมระยะเวลาคืนทุนที่สั้น Option 4 ไม่คุ้มค่าเท่าไร เนื่องจากต้นทุนสูงมากและคืนทุนช้า Option 1 และ 3 อาจเป็นตัวเลือกที่ดี หากต้องการสมดุลระหว่างต้นทุนและผลตอบแทน

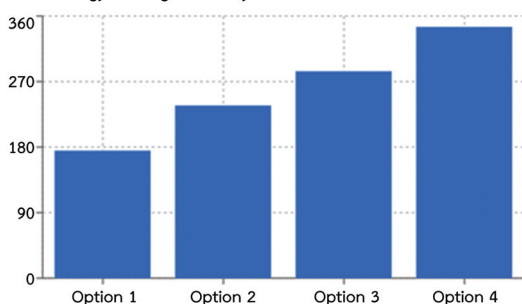
4.2 การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ตารางที่ 6 วิเคราะห์ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas Emission Reduction) ของแต่ละทางเลือก โดยคำนวณจากพลังงานที่ประหยัดได้ (Energy Savings) และตัวคูณการปล่อยคาร์บอน (Emission Factor = 0.5 kg/kWh) ซึ่งเป็นค่าประมาณการของระบบผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย

ตารางที่ 6 การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของแต่ละทางเลือก

Option	Energy Savings from the System (MWh/year)	Emission Reduction (tons/year)	Emission Reduction over the Project Lifetime (25 years) (tons)
Option 1	175	87.5	2,187.5
Option 2	237	118.5	2,962.5
Option 3	284	142.0	3,550.0
Option 4	345	172.5	4,312.5

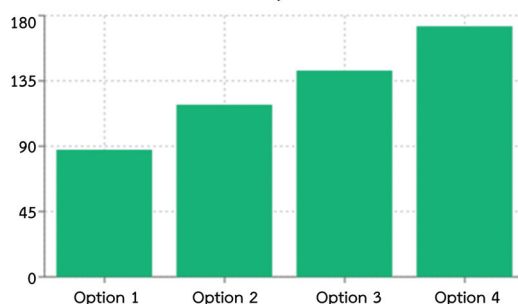
หมายเหตุ: คำนวณโดยอิงค่าปัจจัยการปล่อยก๊าซ 0.5 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย

Annual Energy Savings (MWh/year)



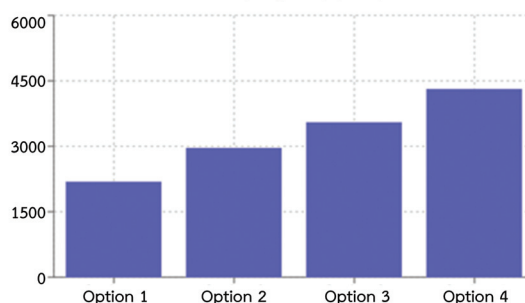
(ก) การประหยัดพลังงาน

Annual Emission Reduction (tons/year)



(ข) การลดการปล่อยมลพิษ

Lifetime Emission Reduction (25 years) (tons)



(ค) การลดการปล่อยมลพิษตลอดอายุโครงการ

รูปที่ 8 การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

จากรูปที่ 8(ก) พบว่า กราฟการประหยัดพลังงานรายปี (MWh/ปี) แสดงปริมาณพลังงานที่ประหยัดได้ต่อปีของแต่ละทางเลือก โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับจาก Option 1 (175 MWh/ปี) ถึง Option 4 (345 MWh/ปี) แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างแต่ละทางเลือก โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นประมาณ 56 - 62 MWh/ปี ระหว่างแต่ละทางเลือกที่ต่อเนื่องกัน รูปที่ 8(ข) กราฟการลดการปล่อยมลพิษรายปี (ตัน/ปี) สะท้อนถึงปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อปี ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณการประหยัดพลังงาน โดยค่าเพิ่มขึ้นจาก Option 1 (87.5 ตัน/ปี) ถึง Option 4 (172.5 ตัน/ปี) โดยมีอัตราส่วนคงที่ระหว่างการประหยัดพลังงานและการลดมลพิษที่ประมาณ 2:1 (MWh:ตัน) รูปที่ 8(ค) กราฟการลดการปล่อยมลพิษตลอดอายุโครงการ 25 ปี (ตัน) แสดงผลกระทบสะสมของการลดมลพิษตลอดระยะเวลาโครงการ 25 ปี มีค่าเพิ่มขึ้นจาก Option 1 (2,187.5 ตัน) ถึง Option 4 (4,312.5 ตัน) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลระยะยาวที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดย Option 4 สามารถลดการปล่อย

มลพิษได้มากกว่า Option 1 เกือบสองเท่า สรุปจากข้อมูลกราฟทั้งสามแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างลำดับของทางเลือกกับประสิทธิภาพในการลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม โดย Option 4 แสดงค่าประสิทธิภาพสูงสุดในทุกพารามิเตอร์ที่วัด ซึ่งสามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจเชิงนโยบายด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีนัยสำคัญ

การอภิปรายผล

จากผลการศึกษาพบว่า การบูรณาการพลังงานหมุนเวียนร่วมกับระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะมีศักยภาพสูงในการลดการพึ่งพาโครงข่ายไฟฟ้าสาธารณะ โดยสามารถรองรับความต้องการพลังงานของอาคารได้ถึง 65 % และลดการใช้พลังงานรวมได้ 24 % ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ระบบควบคุมแสงสว่างอัตโนมัติและการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (Hongvityakorn et al., 2024; Mengesha et al., 2024) การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor: PF) มีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยค่า PF ที่ต่ำกว่า 0.85 ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่ไม่จำเป็น (Latief et al., 2017) นอกจากนี้ การใช้พลังงานมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอุณหภูมิภายนอกอาคาร โดยเฉพาะในช่วงที่อุณหภูมิสูงกว่า 30 °C มีแนวโน้มที่อัตราการใช้พลังงานจะเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการใช้งานเครื่องปรับอากาศและระบบระบายอากาศที่มากขึ้น (Noh et al., 2024) ปัจจุบันนี้ชี้ถึง ความจำเป็นในการเพิ่มประสิทธิภาพระบบทำความเย็น หรือพิจารณาใช้วัสดุที่ช่วยลดความร้อนในอาคารเพื่อลดภาระโหลดพลังงาน (Wang et al., 2024) ในด้านเศรษฐศาสตร์การลงทุน พบว่าระบบพลังงานหมุนเวียนร่วมกับระบบ กักเก็บพลังงานมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 8 ปี และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 14.2 % ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่คุ้มค่าเมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของอุตสาหกรรม (Hanifi, 2024) อย่างไรก็ตาม หากเลือกติดตั้งระบบที่สามารถรองรับพลังงานได้มากขึ้น เช่น 78 - 95 % ของความต้องการพลังงานของอาคาร จะทำให้ต้นทุนเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาคืนทุนยาวนานขึ้น ดังนั้น แนวทางที่เหมาะสมควรเป็นการผสมผสานระหว่างพลังงานหมุนเวียนและการจัดการโหลดไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ (Bedi et al., 2025)

ผลจากการศึกษานี้ตอกย้ำว่า การพัฒนาอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building: NZEB) ไม่สามารถอาศัยเพียงพลังงานหมุนเวียนเท่านั้น แต่ต้องมีระบบจัดการพลังงานที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดการสูญเสีย และปรับสมดุลระหว่างการผลิตและการใช้พลังงานได้อย่างเหมาะสม (Mengesha et al., 2024) นอกจากนี้ การวิจัยยังแสดงให้เห็นว่า การนำเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) และปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้ในระบบจัดการพลังงาน สามารถช่วยให้การวางแผนและการปรับโหลดพลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Pan et al., 2015) โดยสรุป งานวิจัยนี้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการออกแบบระบบพลังงานที่มีการบูรณาการอย่างสมดุลระหว่างพลังงานหมุนเวียน ระบบกักเก็บพลังงาน และระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนด้านพลังงาน แต่ยังลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาอาคารที่ยั่งยืนในอนาคต (Wikipedia Contributors, 2011; IES, 2023)

สรุป

งานวิจัยนี้เสนอแนวทางพัฒนาอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ให้เป็นอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building: NZEB) ด้วยการบูรณาการพลังงานหมุนเวียนและระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากโครงข่าย และลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม อาคารมีการใช้พลังงานเฉลี่ย 47,264.27 วัตต์/วัน โดย Peak สูงสุดที่ 104,817.09 วัตต์ในต้นเดือนมกราคม พ.ศ. 2568 การติดตั้ง Solar PV ขนาด 125 kWp และ Battery Storage 250 kWh ลดการพึ่งพาไฟฟ้าได้ถึง 65 % ขณะเดียวกัน SEMS ช่วยลดพลังงานรวม 24 % โดยระบบปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าลดการสูญเสียได้ 12 % และระบบควบคุมแสงสว่างลดได้ 25 % การประเมินทางเศรษฐศาสตร์พบว่า ระบบมีระยะเวลาคืนทุน 8 ปี อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 14.2 % และลดค่าไฟฟ้าได้กว่า 65 % ส่วนด้านสิ่งแวดล้อม

สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 118.5 ตัน/ปี และรวม 2,962.5 ตันตลอดอายุโครงการ อย่างไรก็ตามควรเพิ่มเติมการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้าน Life Cycle Assessment (LCA) เช่น ผลกระทบจากการผลิตอุปกรณ์และการจัดการของเสีย จากแบตเตอรี่ รวมถึงระบุข้อจำกัดของการศึกษา เช่น ผลกระทบจากฤดูกาล และความไม่แน่นอนของต้นทุน นอกจากนี้ควรเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นในประเทศหรือภูมิภาค เพื่อแสดงบริบทท้องถิ่นและระดับความก้าวหน้า

References

- Bedi, A., Ramprabhakar, J., Anand, R. and Hameed, I.A. (2025). Empowering Net Zero Energy Grids: A Comprehensive Review of Virtual Power Plants, Challenges, Applications, and Blockchain Integration. *Discover Applied Sciences*, 7, <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06691-1>
- Hanifi, H. (2024). *Concepts and Methods for Designing Net Zero Energy Buildings* [Unpublished Master's Thesis]. Islamic Azad University, Shahre Qods Branch.
- Hongvityakorn, B., Jaruwasupant, N., Khongphinitbunjong, K. and Aggarangsi, P. (2024). Achieving Nearly Zero-Energy Buildings through Renewable Energy Production-Storage Optimization: A Study Based on Monitoring Data from a Thai Office Building. *Energies*, 17(19), 4845. <https://doi.org/10.3390/en17194845>
- IES. (2023, 1 May). *IES Performance Digital Twin Finds Additional Energy Savings for Super-Efficient Green Mark Platinum Keppel Bay Tower*. IES. <https://www.iesve.com/discoveries/view/34254/keppel-bay-tower>
- Latief, Y., Berawi, M.A., Supriadi, L., Koesalamwardi, A.B., Petroceany, J. and Herzanita, A. (2017). Integration of Net Zero Energy Building with Smart Grid to Improve Regional Electrification Ratio Towards Sustainable Development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 109(1), <https://doi.org/10.1088/1755-1315/109/1/012041>
- Mengesha, M.A., Mengesha, W.J. and Madessa, H.B. (2024). Recent Progress in Net-Zero-Energy Buildings in Tropical Climates: A Review of the Challenges and Opportunities. In: Kioumars, M., Shafei, B. (Eds.), *The 1st International Conference on Net-Zero Built Environment*. NTZR 2024. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol 237. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69626-8_84
- Noh, Y., Jafarinejad, S. and Anand, P. (2024). A Review on Harnessing Renewable Energy Synergies for Achieving Urban Net Zero Energy Buildings: Technologies, Performance Evaluation, Policies, Challenges, and Future Directions. *Sustainability*, 16(8), 3444. <https://doi.org/10.3390/su16083444>
- Pan, J., Jain, R., Paul, S., Vu, T., Saifullah, A. and Sha, M. (2015). An Internet of Things Framework for Smart Energy in Buildings: Designs, Prototype, and Experiments. *IEEE Internet of Things Journal*, 2(6), 527-537. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2413397>
- Wang, Y., Hu, B., Meng, X. and Xiao, R. (2024). A Comprehensive Review on Technologies for Achieving Zero-Energy Building. *Sustainability*, 16(24), 10941. <https://doi.org/10.3390/su162410941>
- Wikipedia Contributors. (2011). *Pearl River Tower*. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Pearl_River_Tower