

การพัฒนาแบบจำลองพลังงานเพื่อประเมินการใช้พลังงานและการลดการปลดปล่อย คาร์บอนไดออกไซด์ กรณีศึกษาอาคารที่พักอาศัยขนาดใหญ่

Development of Energy Models to Assess Energy Use and Reduce Carbon Dioxide Emissions for a Case Study in a Large Residential Building

สุรศักดิ์ จันทน์ฉาย¹ ณัฐ นาคกร^{2*} ศุภรัชชัย วรรัตน์³ และประยุทธ์ ฤทธิเดช³

Surasak Janchai¹, Nat Nakkorn^{2*}, Suparatchai Vorarat³ and Prayuth Rittidatch³

¹บริษัท เอ-เวสต์ พร็อพเพอร์ตี้ จำกัด ชลบุรี

¹A-West Property Co., Ltd, Chonburi

²การประปาส่วนภูมิภาคสาขาพัทยา (ชั้นพิเศษ) ชลบุรี

²Provincial Waterworks Authority, Branch Office Pattaya (Special Level)

³วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

³College of Innovative Technology and Engineering, Dhurakij Pundit University

*Corresponding author E-mail: natnakkorn@gmail.com

Received: November 27, 2024

Revised: January 16, 2025

Accepted: January 23, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองพลังงานสามมิติสำหรับอาคารที่พักอาศัยขนาดใหญ่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการใช้พลังงานและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ผ่านการปรับปรุงมาตรการพลังงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกัน ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการส่งเสริมและสนับสนุนเป้าหมายในการลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในภาคอาคาร และการบรรลุเป้าหมายในการพัฒนาที่ยั่งยืน งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากอาคารที่พักอาศัยต้นแบบ 5 ประเภทในประเทศไทย ที่มีพื้นที่ใช้สอยมากกว่า 300 m² นำมาสร้างแบบจำลองพลังงานสามมิติด้วยโปรแกรม SketchUp และ OpenStudio พร้อมวิเคราะห์การใช้พลังงานด้วย EnergyPlus และนำมาตรการพลังงานพลังงานจำนวน 25 รูปแบบ ครอบคลุมทั้งการออกแบบทางกายภาพ เช่น การเลือกใช้กระจกผนังและวัสดุฉนวนกันความร้อน และการจัดการพื้นที่สีเขียวโดยการติดตั้งหลังคาเขียว (Green Roof) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า มาตรการพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ได้แก่ มาตรการกระจก Double IGU with Low-E (4W₄) + ผนังอิฐมวลเบา AAC (8F₃) + ฉนวนกันความร้อน PU Foam (13I₃) + หลังคาไวนิล (17R₂) + Green Roof 50 cm (25P₅) สามารถลดการใช้พลังงานและลดการปล่อย CO₂ ได้เฉลี่ยสูงสุดถึงร้อยละ 58 เมื่อเทียบกับอาคารต้นแบบก่อนการปรับปรุง ในเชิงเศรษฐศาสตร์ การลดการใช้พลังงานและลดการปล่อย CO₂ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในระยะยาวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในกรณีการปรับใช้มาตรการที่เหมาะสมกับบริบทของอาคาร เช่น การเลือกวัสดุและเทคโนโลยีที่มีต้นทุนเริ่มต้นไม่สูงแต่มีประสิทธิภาพยาวนานในระยะเวลาดำเนินงาน นอกจากนี้ มาตรการดังกล่าวยังช่วยเพิ่มความสบายในอาคาร ลดภาระค่าใช้จ่ายในครัวเรือน และส่งเสริมคุณภาพชีวิตของผู้อยู่อาศัย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดบางประการ เช่น การสร้างแบบจำลองพลังงานอาจขึ้นอยู่กับสมมติฐานด้านพฤติกรรมการใช้งานและลักษณะอาคารที่เก็บข้อมูลมาจากอาคารในประเทศไทย ซึ่งอาจไม่ครอบคลุมถึงอาคารประเภทอื่น ๆ หรืออาคารในภูมิภาคอื่นที่มีสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน ผลการวิจัยนี้สามารถช่วยผู้มีส่วนได้ส่วน

เสีย ผู้กำหนดนโยบายด้านพลังงาน และภาคเอกชนที่สนใจเรื่องอาคารประหยัดพลังงาน ในการนำข้อมูลไปใช้สนับสนุนในการตัดสินใจเพื่อออกแบบและปรับปรุงอาคารให้สอดคล้องกับมาตรฐานการใช้พลังงานขั้นสูง (HEPS) และก้าวสู่เป้าหมายการสร้างอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building) ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการส่งเสริมความยั่งยืนของภาคอาคารในอนาคตได้ต่อไป

คำสำคัญ: การจำลองพลังงานในอาคาร อาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ หลังคาเขียว ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Abstract

This research aims to develop a three-dimensional (3D) energy model for large-scale residential buildings to evaluate energy consumption and reduce carbon dioxide (CO₂) emissions by implementing interconnected energy-saving measures. Such efforts are highly significant in supporting and promoting environmental impact mitigation within the building sector and in achieving sustainable development goals. Data from five prototype residential buildings in Thailand, each with a usable area exceeding 300 m², were utilized. A 3D energy model was created using SketchUp and OpenStudio, and energy consumption was analyzed using EnergyPlus. A total of 25 energy measures were incorporated, covering both physical design approaches, such as the selection of glazing and thermal insulation materials, and green space management through the installation of green roofs (Green Roof). The findings indicate that the most effective energy measures, specifically Double IGU with Low-E (4W₄), AAC wall (8F₃), PU Foam insulation (13I₃), vinyl roofing (17R₂), and a 50-cm green roof (25P₅), can reduce energy consumption and CO₂ emissions by an average of up to 58% compared to the baseline prototype buildings. From an economic perspective, these reductions CO₂ substantially lower long-term energy costs, especially when employing measures suited to the specific context of a building, such as materials and technologies with moderate initial costs but long-lasting performance. Furthermore, these measures enhance indoor comfort, decrease household expenditures, and improve the occupants' quality of life. However, there are certain limitations to this study. The energy modelling process relies on assumptions regarding occupant behaviour and building characteristics derived from Thai buildings, which may not apply to other types of buildings or regions with different climatic conditions. Nevertheless, the findings of this research provide valuable insights for stakeholders, energy policymakers, and private sector entities interested in energy-efficient buildings, supporting informed decision-making for designing and retrofitting buildings to meet High Energy Performance Standards (HEPS) and to progress toward Net Zero Energy Buildings, an essential path toward promoting sustainability in the building sector in the future.

Keywords: building energy simulation, Net Zero Energy Building, Green Roof, carbon dioxide emission reductions



บทนำ

ปัจจุบันโลกและประเทศไทยกำลังเผชิญกับการขยายตัวของชุมชนเมือง (urbanization) ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของประชากรจากชนบทสู่เมืองอย่างรวดเร็ว (Bunnag, 2022) ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงนี้ได้แก่ การเติบโตทางเศรษฐกิจ ความต้องการเข้าถึงบริการด้านการศึกษา สาธารณสุข ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี การเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมและภูมิอากาศ รวมถึงการโยกย้ายถิ่นฐานของประชากรที่แสวงหาโอกาสในการทำงาน และคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นในเมืองใหญ่ (Yangtianzheng & Ying, 2024) ในประเทศไทย การเติบโตของเมืองเช่น กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ ขอนแก่น ชลบุรี และภูเก็ต เป็นตัวอย่างสำคัญของการขยายตัวของชุมชนเมืองที่เห็นได้ชัด ซึ่งส่งผลให้เกิดการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ รวมถึงการก่อสร้างอาคารที่พักอาศัย สำนักงาน คอนโดมิเนียม และห้างสรรพสินค้า เพื่อรองรับจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การขยายตัวเหล่านี้ทำให้ความต้องการใช้พลังงานของโลกเพิ่มขึ้น โดยสำนักงานพลังงานระหว่างประเทศ (IEA) รายงานว่า การใช้พลังงานเฉลี่ยต่อประชากรอยู่ที่ 22,000 kWh ต่อปี และคาดว่าในอนาคตประชากรจะเพิ่มสูงขึ้นไปอีก (Sani et al., 2020) และมีสัดส่วนการใช้พลังงานของภาคอาคารคิดเป็นประมาณร้อยละ 25–30 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย (final energy consumption) และมีการปล่อย CO₂ ประมาณร้อยละ 15–20 ของการปล่อย CO₂ ทั้งหมดในประเทศ (Ministry of Energy, 2020) ภาคการก่อสร้างก็เป็นภาคอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานสูง โดยในส่วนของภาคอาคารใช้พลังงานมากกว่าภาคอุตสาหกรรมและการขนส่งในสหภาพยุโรปและสหรัฐอเมริกา (Bland, Khzouz, Statheros & Gkanas, 2017) ร้อยละ 85 ของพลังงานที่ใช้ในภาคอาคารมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยเฉพาะการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินซึ่งคิดเป็นร้อยละ 40 ของพลังงานทั้งหมด ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณมาก (Behzadi et al., 2022) ในการประชุม COP 28 ณ เมืองดูไบ ประเทศสหรัฐอาหรับเอมิเรตส์ ผู้นำจากกว่า 190 ประเทศได้หารือเกี่ยวกับภัยคุกคามจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และเน้นย้ำถึงเป้าหมายในการจำกัดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกไม่ให้เกิน 1.5 องศาเซลเซียส โดยเรียกร้อง

ให้ลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ได้อย่างน้อยร้อยละ 43 ภายในปี 2030 และร้อยละ 84 ภายในปี 2050 (United Nations Climate Change, 2023)

ประเทศไทยมีสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น ส่งผลให้การลดอุณหภูมิภายในอาคารในช่วงฤดูร้อนเป็นความจำเป็นที่สำคัญสำหรับผู้พักอาศัย การพัฒนาประสิทธิภาพการป้องกันความร้อน ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และมาตรการอนุรักษ์พลังงานในอาคารที่พักอาศัยจึงเป็นสิ่งสำคัญ (Yu, Guo, Wang, & Chang, 2020) การปรับปรุงอาคารเดิมหรือการออกแบบอาคารใหม่เพื่อลดการใช้พลังงานและเข้าสู่เกณฑ์อาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (net Zero Energy Building) เป็นเป้าหมายสำคัญในการสร้างสังคมคาร์บอนต่ำในอนาคต โดยมีมาตรการต่าง ๆ ที่สามารถดำเนินการได้ เช่น การใช้กรอบหน้าต่างและกระจก Low-E ที่ลดการถ่ายเทความร้อนจากแสงแดด (Nur-E-Alam et al., 2024) การติดฟิล์มกันความร้อนบนกระจกหน้าต่างและประตูเพื่อลดการใช้พลังงานจากเครื่องปรับอากาศ (Chi, Gao, Zhang, & He, 2023) การติดตั้งฉนวนกันความร้อนในผนัง หลังคา และพื้นอาคารเพื่อลดการใช้พลังงานในการปรับอากาศ (Qian, Tang, Wang & Fang, 2017) การใช้ระบบปรับอากาศประสิทธิภาพสูง เช่น ระบบ Variable Refrigerant Flow: VRF (Wang, Lu, Adetola & Louie, 2024) การเปลี่ยนมาใช้หลอดไฟ LED ที่ประหยัดพลังงาน (Al Rashdi et al., 2022) การออกแบบพื้นที่สีเขียวรอบอาคารเพื่อลดความร้อนและเพิ่มความสบาย (Zhong, Schröder & Bekkering, 2024) และการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างที่ปล่อยคาร์บอนต่ำ เช่น วัสดุรีไซเคิลหรือวัสดุที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ มาตรการเหล่านี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคาร ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอน และส่งเสริมความยั่งยืนในระยะยาว

การประเมินและจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในอาคารนั้นเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากสามารถช่วยให้ผู้กำหนดนโยบายด้านพลังงาน สามารถคาดการณ์การใช้พลังงานภายใต้สถานการณ์ที่หลากหลายได้ (Sarmiento et al., 2024) โปรแกรม Energy Plus เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพและใช้งานง่ายในการสร้างแบบจำลองการใช้พลังงานภายในอาคาร โดยสามารถจำลองการใช้พลังงาน

ได้อย่างละเอียด โดยคำนึงถึงปัจจัยหลายประการ เช่น สภาพภูมิอากาศ โครงสร้างอาคาร ระบบพลังงาน และกิจกรรมภายในอาคาร (Shabunko, Lim & Mathew, 2018) โดยโปรแกรม Energy Plus ถูกพัฒนาโดยกระทรวงพลังงานสหรัฐ ฯ (U.S. Department of Energy) เป็นเครื่องมือสำหรับสร้างแบบจำลองพลังงานภายในอาคารที่ช่วยในการทดลอง และลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างจริง โดยการสร้างแบบจำลองพลังงานที่มีประสิทธิภาพสำหรับอาคารที่พักอาศัยนั้นควรครอบคลุมตัวแปรสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิภายในภายนอกอาคาร การใช้พลังงาน ความชื้น และการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ ซึ่งการรวมข้อมูลเหล่านี้จะช่วยให้สามารถคาดการณ์การใช้พลังงานในอนาคตได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น (Ramirez, Nagarsheth, Ramirez, Henao & Agbossou, 2024)

หลังจากวิกฤตการณ์ Covid-19 ผู้คนในหลายประเทศมีรายได้และความมั่งคั่งเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความต้องการที่พักอาศัยที่มีความสะดวกสบายและพื้นที่กว้างขวางเพื่อให้สอดคล้องกับวิถีชีวิตที่เปลี่ยนไป นอกจากนี้การใช้พื้นที่ภายในอาคารที่พักอาศัยยังมีการปรับเปลี่ยนวัตถุประสงค์โดยเฉพาะการใช้เป็นพื้นที่ทำงานที่บ้าน ห้องออกกำลังกาย ห้องดูหนัง หรือห้องสำหรับไลฟ์สดขายของออนไลน์ (Wolday & Böcker, 2023) อีกทั้งปัจจัยทางวัฒนธรรมก็มีบทบาทสำคัญ โดยการมีบ้านขนาดใหญ่ถูกมองว่าเป็นสัญลักษณ์ของความสำเร็จและสถานะทางสังคม ส่งผลให้ในปัจจุบันมีแนวโน้มการสร้างบ้านพักอาศัยขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

จากเหตุผลข้างต้น ผู้วิจัยจึงสนใจในการประเมินการใช้พลังงานของอาคารที่พักอาศัยขนาดใหญ่และนำเสนอมาตรการลดการใช้พลังงานเพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานการใช้พลังงานขั้นสูงของเทคโนโลยีปัจจุบัน (High Energy Performance Standard: HEPS) (Ministry of Energy, 2020) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดให้มีการใช้พลังงานในอาคารให้น้อยที่สุด โดยมีเกณฑ์ที่ชัดเจน เช่น ค่าการใช้พลังงานรวม (EUI) OTTV/RTTV SEER หรือ COP ของอุปกรณ์ และการใช้พลังงานหมุนเวียน อย่างไรก็ตาม แบบจำลองพลังงานในปัจจุบันมักขาดข้อมูลที่เพียงพอ เช่น ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับพฤติกรรมการใช้งานในช่วงเวลาต่าง ๆ และคุณสมบัติของวัสดุเฉพาะท้องถิ่น อีกทั้งการจัดการพลังงาน

ยังขาดการใช้ระบบวิเคราะห์และเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การคาดการณ์พลังงานและการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมไม่สะท้อนความเป็นจริง ทำให้นักวิจัยนี้แตกต่างจากงานวิจัยอื่น ๆ โดยเน้นการพัฒนาแบบจำลองพลังงานที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย และรวมมาตรการปรับปรุงพลังงานที่สามารถนำไปปฏิบัติได้จริงเพื่อตอบสนองต่อความต้องการในระดับท้องถิ่น และลดปัญหาการจัดการข้อมูลพลังงานที่มักถูกละเลย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการประเมินและวางแผนพลังงานในอนาคตอย่างมีประสิทธิภาพ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองพลังงานสามมิติสำหรับประเมินการใช้พลังงานในอาคารที่พักอาศัยขนาดใหญ่ โดยเลือกอาคารตัวอย่างจำนวน 5 อาคารที่มีพื้นที่ใช้สอยมากกว่า 300 m² การวิจัยครอบคลุมถึงการประเมินปริมาณการใช้พลังงานในอาคารเหล่านี้ รวมถึงการนำเสนอมาตรการลดการใช้พลังงานและการลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์

วัตถุประสงค์การศึกษาวิจัย

1. พัฒนาและสร้างแบบจำลองพลังงานต้นแบบในอาคารที่พักอาศัยขนาดใหญ่ในรูปแบบสามมิติ
2. ประเมินการใช้พลังงานภายในอาคารต้นแบบและเสนอแนวทางลดการใช้พลังงาน เพื่อให้สอดคล้องกับเกณฑ์การใช้พลังงานขั้นสูง (HEPS)
3. ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้พลังงานในอาคารที่พักอาศัยขนาดใหญ่

แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบอาคารแบบเชิงรับ (passive design) เป็นหนึ่งในกลยุทธ์ที่ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคาร โดยใช้ประโยชน์จากธรรมชาติและสภาพแวดล้อมโดยรอบเพื่อให้เกิดสภาพแวดล้อมที่สะดวกสบายและประหยัดพลังงานมากขึ้น (Uddin, Wei, Chi & Ni, 2019) แนวทางในการออกแบบเชิงรับประกอบด้วย การเลือกรูปแบบของอาคาร การจัดการการระบายอากาศ การติดตั้งอุปกรณ์บังแดด การกำหนดอัตราส่วนหน้าต่างต่อผนัง และ

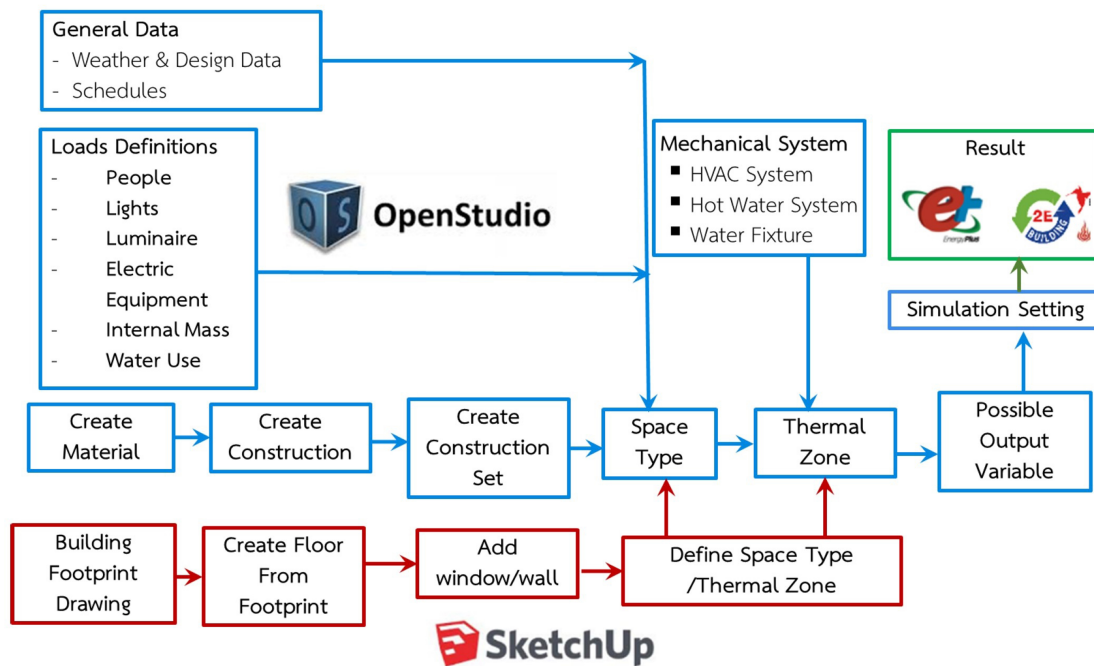
การจัดวางแนวของอาคาร (Altan, Hajibandeh, Tabet Aoul & Deep, 2016) โดยเฉพาะการเลือกรูปทรงและการวางแนวของอาคารมีผลต่อการปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมโดยรอบ และสามารถช่วยปรับปรุงอุณหภูมิภายในอาคารได้ (Raof, 2017) การเจาะช่องระบายอากาศก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สามารถช่วยลดการถ่ายเทความร้อนภายในอาคารได้ รวมถึงการออกแบบเปลือกอาคาร (façade) (Lapisa, 2019) ซึ่งประกอบด้วยผนังและหลังคาที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร (Ziaemehr, Jandaghian, Ge, Lacasse & Moore, 2023) โดยแนวทางในการสร้างแบบจำลองพลังงานต้นแบบสำหรับอาคารที่พักอาศัยขนาดใหญ่ในรูปแบบสามมิติของงานวิจัยนี้ เริ่มจากการสำรวจรูปแบบอาคารที่พักอาศัยในประเทศไทยที่มีพื้นที่ใช้สอยตั้งแต่ 300 ตารางเมตรขึ้นไปและมี 2 ชั้น จากนั้นเลือกอาคารตัวแทนจำนวน 5 อาคารเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการประเมินการใช้พลังงาน งานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากงานวิจัยอื่นในหลายด้าน (Polkhuntod & Chamsa-ard, 2021) เนื่องจากมุ่งเน้นการประเมินการใช้พลังงานของอาคารที่พักอาศัยขนาดใหญ่ในบริบทของประเทศไทย และมีการวิเคราะห์มาตรการประหยัดพลังงานถึง 25 รูปแบบ อีกทั้งยังใช้ข้อมูลเฉพาะเจาะจง เช่น สภาพภูมิอากาศ ความชื้น อุณหภูมิ และลักษณะการก่อสร้างในประเทศไทย

โดยเก็บรวบรวมข้อมูลพื้นฐาน เช่น สภาพอาคาร แผนผัง ข้อมูลวัสดุ ขนาด และพื้นที่ต่อมา สำรวจข้อมูลการใช้งานอาคาร ได้แก่ ตารางการใช้อาคาร จำนวนผู้ใช้อาคาร การใช้ไฟฟ้าในระบบแสงสว่าง อุปกรณ์ไฟฟ้า และระบบปรับอากาศ หลังจากรวบรวมข้อมูลเหล่านี้แล้ว กำหนดข้อมูลสภาพอากาศ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลม และรังสีดวงอาทิตย์ โดยใช้ข้อมูลสภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย จากฐานข้อมูลสภาพภูมิอากาศ (Weather Data) บนเว็บไซต์ EnergyPlus (U.S. Department of Energy's (DOE), 2023) ขั้นตอนต่อมาเป็นการสร้างแบบจำลองพลังงานต้นแบบของอาคารที่พักอาศัย โดยใช้แบบแปลนของอาคารต้นแบบทั้ง 5 แบบ เพื่อสร้างโมเดลสามมิติในโปรแกรม SketchUp โดยกำหนดขนาดความกว้าง ยาว และสูงของอาคาร พร้อมทั้งกำหนดอัตราส่วนพื้นที่ผนังโปร่งแสงต่อพื้นที่ผนังทั้งหมด (Window to Wall Ratio: WWR) เมื่อกรอบอาคารสามมิติเสร็จ

สมบูรณ์แล้ว จะกำหนด Space Type และ Thermal Zone ของห้องภายในอาคารผ่านปลั๊กอิน OpenStudio ตามภาพที่แสดงในภาพ 1 (Ministry of Energy, 2018)

การสร้างแบบจำลองพลังงานของอาคารต้นแบบสามารถทำได้โดยใช้ปลั๊กอิน OpenStudio ร่วมกับโปรแกรม EnergyPlus ซึ่งพัฒนาโดย National Renewable Energy Laboratory ภายใต้กระทรวงพลังงานของสหรัฐอเมริกา (U.S. Department of Energy's (DOE), 2024) EnergyPlus เป็นหนึ่งในเครื่องมือด้านการจำลองพลังงานอาคาร (Building Energy Simulation: BES) ที่มีความสามารถในการคำนวณภาระความร้อนและกำหนดปริมาณความร้อนและความเย็นที่อาคารต้องการ อีกทั้งยังสามารถประเมินการใช้พลังงานภายในอาคารได้ โดยมักใช้เพื่อสร้างแบบจำลองพลังงานและเปรียบเทียบการใช้พลังงานกับอาคารประเภทอื่น ๆ (Ono et al., 2024)

การสร้างแบบจำลองพลังงานด้วยโปรแกรม EnergyPlus อ้างอิงทฤษฎีและแนวคิดสำคัญหลายประการที่ช่วยในการวิเคราะห์และประเมินการใช้พลังงานในอาคารและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน แนวคิดหลักที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ (1) การถ่ายเทความร้อน (heat transfer) (Chen, Wang & Xie, 2019) (2) การควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (thermal and moisture control) (Wang & Lu, 2022) (3) การจำลองสมรรถนะอาคาร (building performance simulation) (Ahmed, Sezer, Ouf, Wang & Hassan, 2023) (4) การควบคุมการใช้พลังงาน (energy management and control) (Ferahtia et al., 2024) และ (5) การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (energy efficiency) (Mandel & Pató, 2024) จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งหมดการคำนวณการใช้พลังงานในอาคารนั้นส่วนใหญ่ตั้งอยู่บนหลักการสมดุลทางความร้อน รวมถึงสมดุลความร้อนที่พื้นผิว สมดุลความร้อนในอากาศ และการจำลองระบบอาคาร โดยการคำนวณสมดุลความร้อนได้แสดงไว้ในสมการ (1) ถึงสมการ (4) (Kampelis et al., 2020)



ภาพ 1 Workflow การทำงานของการสร้างแบบจำลองพลังงานสามมิติ

Note. From BESM building energy simulation program manual, by Ministry of Energy, 2020, Copyright 2018 by Ministry of Energy.

$$\dot{q}''_{\text{sol}} + \dot{q}''_{\text{LWR}} + \dot{q}''_{\text{conv}} - \dot{q}''_{\text{ko}} = 0 \quad (1)$$

โดยที่

$\dot{q}''_{\text{sol}}$ = ปริมาณความร้อนที่พื้นผิวได้รับจากการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ (W/m^2)

$\dot{q}''_{\text{LWR}}$ = ปริมาณความร้อนจากการแผ่รังสีในช่วงคลื่นยาว (W/m^2)

$\dot{q}''_{\text{conv}}$ = ปริมาณความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อน (W/m^2)

$\dot{q}''_{\text{ko}}$ = ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกจากพื้นผิว (W/m^2)

โดยที่ $\dot{q}''_{\text{sol}}$ ได้รับอิทธิพลจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ตำแหน่ง มุมและความเอียงของพื้นผิว วัสดุพื้นผิว และสภาพอากาศ $\dot{q}''_{\text{LWR}}$ ถูกกำหนดโดยการแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างพื้นผิวกับพื้นดิน ท้องฟ้าและอากาศ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$\begin{aligned} \dot{q}''_{\text{LWR}} = & \epsilon \sigma F_{\text{gnd}} (T_{\text{gnd}}^4 - T_{\text{surf}}^4) \\ & + \epsilon \sigma F_{\text{sky}} (T_{\text{sky}}^4 - T_{\text{surf}}^4) \\ & + \epsilon \sigma F_{\text{air}} (T_{\text{air}}^4 - T_{\text{surf}}^4) \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่

ϵ = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของพื้นผิว

σ = ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann ($\text{W/m}^2\text{K}^4$)

F_{gnd} = ปัจจัยของพื้นผิวผนังกับอุณหภูมิพื้นผิวพื้นดิน

F_{sky} = ปัจจัยของพื้นผิวผนังกับอุณหภูมิของท้องฟ้า

F_{air} = ปัจจัยของพื้นผิวผนังต่ออุณหภูมิอากาศ

T_{surf} = อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก (K)

T_{gnd} = อุณหภูมิพื้นผิวดิน (K)

T_{sky} = อุณหภูมิท้องฟ้า (K)

T_{air} = อุณหภูมิของอากาศ (K)

การคำนวณความร้อนจากการพาความร้อนของแบบจำลองสามารถทำได้ตามสมการที่ 3

$$q''_{conv} = h_{c,ext} (T_{surf} - T_{air}) \quad (3)$$

โดยที่

$h_{c,ext}$ = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอก

T_{surf} = อุณหภูมิพื้นผิว (K)

T_{air} = อุณหภูมิอากาศภายนอก (K)

การคำนวณค่าการนำความร้อนสู่ผนังสามารถหาได้ตามสมการที่ 4

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{(o,t-j\delta)} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{(i,t-j\delta)} \quad (4)$$

โดยที่

T = อุณหภูมิ (K)

T_o = อุณหภูมิขององค์ประกอบภายนอกของอาคาร (K)

T_i = อุณหภูมิขององค์ประกอบภายในของอาคาร (K)

i = องค์ประกอบภายในของอาคาร

o = องค์ประกอบภายนอกของอาคาร

X, Y = ปัจจัยตอบสนอง (W/K)

การลดการใช้พลังงานในอาคารสามารถทำได้โดยผ่านมาตรการต่าง ๆ ที่เน้นการออกแบบและการใช้เทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการพลังงานที่ดี โดยมีแนวทาง ดังนี้

1) การออกแบบอาคารให้มีประสิทธิภาพ ทำได้โดยการกำหนดทิศทางและที่ตั้งของอาคาร การเลือกใช้วัสดุป้องกันความร้อน การออกแบบอัตราส่วนพื้นที่ผนังโปร่งแสง (WWR) พร้อมการใช้กระจกที่สะท้อนแสง UV และมีค่าการนำความร้อนต่ำ (Kishore, Selvam, Didwania & Augenbroe, 2022)

2) การปรับปรุงระบบเครื่องปรับอากาศ โดยการใช้ระบบ HVAC ที่มีประสิทธิภาพสูง รวมถึงการบำรุงรักษาระบบ HVAC และการใช้ระบบระบายอากาศแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เช่น ระบบระบายอากาศแบบ Heat Recovery Ventilation: HRV (Nguyen et al., 2024)

3) การใช้พลังงานสะอาดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิล สามารถทำได้โดยการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (solar panels) (Amin Mirjalili, Aslani & Zahedi, 2023) และ การใช้พลังงานจากลม (wind energy) (Hussain, Sharma & Lal, 2024)

4) การปรับปรุงระบบแสงสว่าง โดยการใช้หลอดไฟ LED และระบบควบคุมแสงสว่างอัตโนมัติ เช่น เซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหวและระบบเปิด-ปิดไฟตามความเข้มของแสงธรรมชาติ (Lee, Choi, Yoon & Kim, 2023)

5) การปรับปรุงพื้นที่ภายนอกอาคาร โดยการปลูกต้นไม้และสร้างพื้นที่สีเขียว รวมถึงการใช้วัสดุผนังหลังคาและผนังที่สะท้อนแสงเพื่อลดความร้อนสะสม (Sun, 2024)

6) การปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้พลังงาน โดยการรณรงค์ให้ปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อไม่ใช้งาน ตั้งอุณหภูมิปรับอากาศที่เหมาะสม และเลือกใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีฉลากประหยัดพลังงาน

แนวทางในการกำหนดมาตรการพลังงานเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อลดการใช้พลังงานในอาคารและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระยะยาว นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดต้นทุนการดำเนินงานและส่งเสริมความยั่งยืนต่อสิ่งแวดล้อม แนวทางเหล่านี้ยังสามารถปรับใช้ให้เหมาะสมกับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นทั้งในระดับอำเภอและจังหวัดได้ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้คัดเลือกอาคารที่พักอาศัยขนาดใหญ่ที่มีพื้นที่ใช้สอยตั้งแต่ 300 m² ขึ้นไป โดยวิธีการสุ่มคัดเลือกอาคารที่ก่อสร้างด้วยวัสดุผนังอิฐมวลเบาในภูมิภาค (ภาคกลาง) เพื่อใช้เป็นตัวแทนของอาคารประเภทนี้ โดยคัดเลือกตัวอย่างอาคาร 5 รูปแบบ และทำการเก็บข้อมูลจากการสำรวจภาคสนามและใช้ Google Map เข้าช่วยในการสำรวจเก็บข้อมูลอีกด้วย จากนั้นนำข้อมูลพื้นฐานมาสร้างแบบจำลองสามมิติในโปรแกรม OpenStudio ตามมาตรฐาน ASHRAE 90.1-2010 (Lee & Lim, 2024) ซึ่งครอบคลุมพฤติกรรมการใช้อาคาร การใช้ไฟฟ้าสำหรับแสงสว่าง เครื่องใช้ไฟฟ้า และระบบปรับอากาศ (HVAC) จากนั้น ทำการประเมินการใช้พลังงานรายปีของอาคารแต่ละรูปแบบในโปรแกรม EnergyPlus และเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานต่อพื้นที่ตามแผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี (2554-2573) ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (Ministry of Energy, 2020) ขึ้นตอนถัดไป ทำการปรับปรุงอาคารตามมาตรการพลังงานที่กำหนดเพื่อให้อาคารมีความสามารถในการประหยัดพลังงานและลดการปล่อยก๊าซ CO₂ โดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ในโปรแกรม OpenStudio และ EnergyPlus เพื่อให้ผู้กำหนดมาตรการพลังงานและผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

สามารถทราบถึงมาตรการหรือทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการลดการใช้พลังงานและลดการปล่อยก๊าซ CO₂ สำหรับอาคารแต่ละรูปแบบ และในขั้นตอนสุดท้ายของการศึกษานำผลการใช้พลังงานภายในอาคารก่อนและหลังการปรับใช้มาตรการพลังงานมาเปรียบเทียบเพื่อประเมินว่ามาตรการใดมีประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานและลดการปล่อยก๊าซ CO₂ ได้ดีที่สุด มาตรการพลังงานที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย (1) การปรับเปลี่ยนประเภทกระจกภายนอกอาคาร (2) การปรับเปลี่ยนประเภทผนังอาคาร (3) การติดตั้งฉนวนกันความร้อนเหนือฝ้าเพดาน (4) การปรับเปลี่ยนประเภทหลังคา และ (5) การติดตั้งหลังคาเขียว (green roof) โดยรายละเอียดของประเภทวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในแต่ละมาตรการแสดงไว้ในตาราง 1 ซึ่งมาตรการต่าง ๆ ได้ถูกกำหนดด้วยหมายเลขเฉพาะ เช่น Double IGU (3W₃) ซึ่งหมายถึงมาตรการที่ 3 ที่ใช้กระจกแบบ Double IGU ในการปรับปรุงอาคาร หลังจากการปรับปรุงตามมาตรการที่กำหนด อาคารต้นแบบทั้ง 5 รูปแบบจะได้รับการประเมินการใช้พลังงานอีกครั้งด้วยโปรแกรม EnergyPlus จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์การใช้พลังงานก่อนและหลังการปรับใช้มาตรการพลังงานเพื่อระบุว่ามาตรการใดมีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการใช้พลังงานรวมและสามารถเข้าเกณฑ์ระดับการใช้พลังงานขั้นสูง (HPES) การวิเคราะห์และเปรียบเทียบแบบจำลองพลังงานสามมิติที่ผ่านการปรับใช้มาตรการต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังภาพ 2

ผลการวิจัย

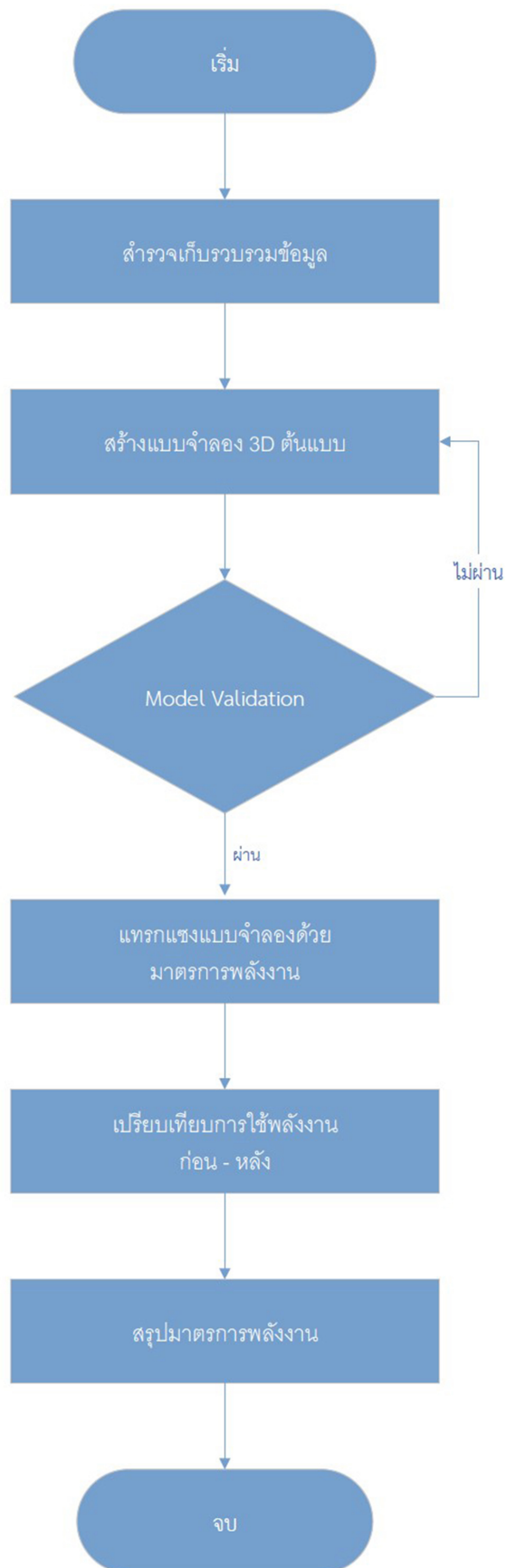
1. ผลการเก็บข้อมูล

การศึกษาและวิจัยในการพัฒนาแบบจำลองการใช้พลังงานในอาคารที่พักอาศัยขนาดใหญ่โดยใช้รูปแบบอาคาร 3 มิติ ได้เริ่มต้นจากการเก็บรวบรวมข้อมูล (ในช่วงเดือน พ.ค. 67 – ก.ค. 67) และวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานจากอาคารทั้งหมด 5 รูปแบบ โดยใช้ข้อกำหนดลักษณะสำคัญในระดับของอาคารเดี่ยว (Lee & Lim, 2024) ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลทางกายภาพและการใช้พลังงาน ได้แก่ ความกว้าง ความยาว ความสูง จำนวนชั้น จำนวนห้อง ขนาดประตู ขนาดหน้าต่าง จำนวนผู้พักอาศัย พฤติกรรมการใช้อาคาร การใช้อุปกรณ์แสงสว่าง การใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า ระบบปรับอากาศ (HVAC) และประเภทของวัสดุ ดังนั้นจึงสามารถสรุปรายละเอียดของคุณสมบัติหลัก ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติของทั้ง 5 รูปแบบอาคารได้ดังต่อไปนี้ (1) ขนาดของพื้นที่ใช้สอยในแต่ละอาคาร (m²) (2) จำนวนชั้นในอาคารมีผลต่อการกระจายของแสงสว่าง

และระบบระบายความร้อน (ชั้น) (3) ประเภทวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างผนังมีผลต่อการป้องกันความร้อนเข้าภายในอาคาร (4) Glazing area (%) มีผลต่อการใช้แสงธรรมชาติและการสูญเสียพลังงานการนำความร้อนจากภายนอกเข้าสู่อาคาร (5) U-value (W/m²°C) มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของวัสดุผนัง ซึ่งมีผลต่อการเก็บรักษาพลังงานภายในอาคาร (6) Insulation (J/kg.m) มีคุณสมบัติของวัสดุที่ช่วยลดการนำความร้อนเข้าสู่อาคาร (7) Lighting load (W/m) พลังงานที่ใช้ในการให้แสงสว่างในอาคาร (8) Equipment (W/m²) พลังงานที่ใช้สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าในอาคาร และ (9) HVAC equipment ค่าประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศ (COP) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการใช้พลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของอาคารโดยคุณสมบัติหลักเหล่านี้แสดงได้ดังตาราง 2

หลังจากกำหนดคุณสมบัติหลักของอาคารต้นแบบทั้ง 5 รูปแบบแล้ว ได้มีการศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับมาตรการที่สามารถใช้เพื่อลดการใช้พลังงานในอาคารที่พักอาศัยขนาดใหญ่ โดยเน้นไปที่การใช้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานตามมาตรฐาน HEPS ซึ่งเป็นเกณฑ์ขั้นสูงในปัจจุบัน การเก็บข้อมูลนี้ครอบคลุมคุณสมบัติสำคัญของแต่ละมาตรการเพื่อลดการใช้พลังงาน โดยมีรายละเอียดการเก็บข้อมูลและคุณสมบัติของแต่ละมาตรการแสดงได้ดังต่อไปนี้

- 1) คุณสมบัติของกระจกที่ใช้ในอาคาร (ตาราง 3)
- 2) คุณสมบัติของผนังที่ใช้ในอาคาร (ตาราง 4)
- 3) คุณสมบัติของประเภทของหลังคา (ตาราง 4)
- 4) คุณสมบัติของฉนวนกันความร้อนที่ติดตั้งภายใต้หลังคาเหนือฝ้าเพดาน (ตาราง 4)
- 5) คุณสมบัติของหลังคาเขียว (green roof) มาตรการหลังคาเขียวที่นำมาใช้เพื่อช่วยควบคุมความร้อนของอาคารผ่านชั้นดินแห้ง (dry soil) ซึ่งมีค่า Conductivity เท่ากับ 0.35 W/m.K ความหนาแน่น (density) เท่ากับ 1,100 kg/m³ และค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat) เท่ากับ 1,200 J/kg.K โดยมีความสูงของพืชที่ปลูกบนหลังคาตามมาตรการในระดับ 10 15 20 25 และ 30 เซนติเมตรตามลำดับ ทั้งนี้ Green Roof สามารถช่วยลดอุณหภูมิและปรับปรุงการใช้พลังงานในอาคารผ่านการสะสมความเย็นและการระเหยของน้ำ



ภาพ 2 Flow Chart ขั้นตอนการวิเคราะห์และเปรียบเทียบแบบจำลองพลังงานสามมิติ

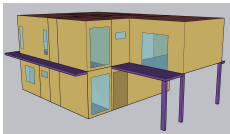
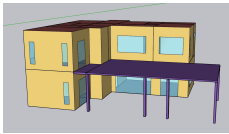
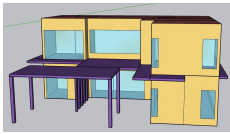
ตาราง 1

ข้อมูลมาตรการทางเลือกเพื่อลดการใช้พลังงานในอาคารที่พักอาศัยขนาดใหญ่

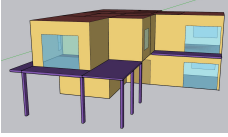
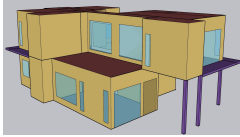
มาตรการพลังงาน	Case I	Case II	Case III	Case IV	Case V
มาตรการเปลี่ยนกระจก	Single (1W ₁)	Laminated (2W ₂)	Double IGU (3W ₃)	Double IGU with Low-E (4W ₄)	Film (5W ₅)
มาตรการเปลี่ยนผนัง	อิฐมอญ (6F ₁)	อิฐมวลเบาCLC (7F ₂)	อิฐมวลเบา AAC (8F ₃)	อิฐบล็อกซีเมนต์ (9F ₄)	คอนกรีตสำเร็จรูป (10F ₅)
มาตรการติดตั้งฉนวนกัน	ใยแก้ว (11I ₁)	ใยหิน (12I ₂)	PU Foam (13I ₃)	PE Foam (14I ₄)	PS Foam (15I ₅)
ความร้อน					
มาตรการเปลี่ยนหลังคา	หลังคาเหล็ก (16R ₁)	หลังคาไวนิล (17R ₂)	หลังคากระเบื้อง (18R ₃)	หลังคาแอลสโพลต์ (19R ₄)	หลังคาคอนกรีต (20R ₅)
มาตรการติดตั้งหลังคาเขียว	พืช 10 cm (21P ₁)	พืช 15 cm (22P ₂)	พืช 20 cm (23P ₃)	พืช 25 cm (24P ₄)	พืช 30 cm (25P ₅)

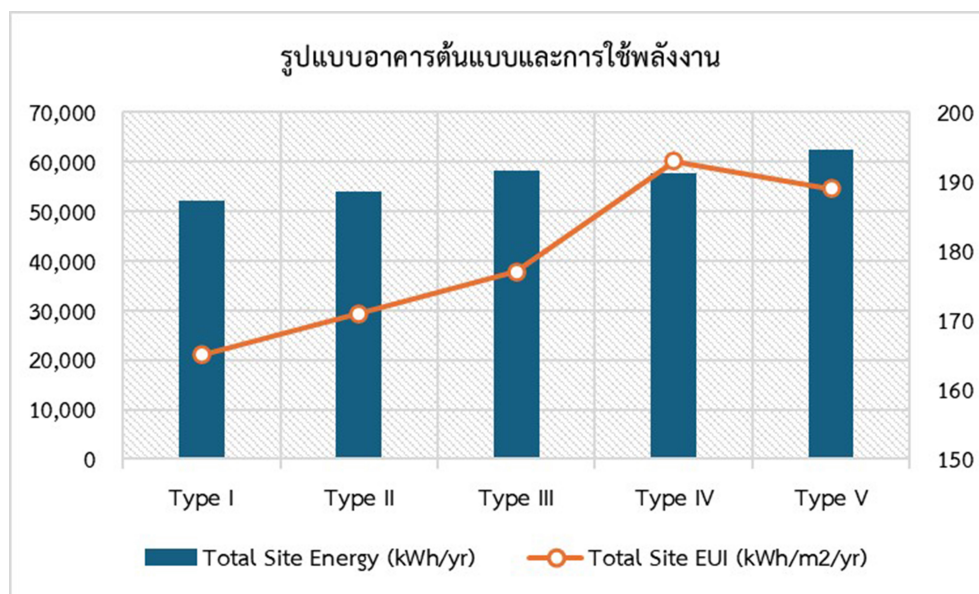
ตาราง 2

ข้อมูลอาคารแต่ละรูปแบบและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

รูปแบบของอาคาร	Type I	Type II	Type III
โมเดลอาคารต้นแบบ			
พื้นที่ (m ²)	315	315	330
จำนวนชั้น	2	2	2
ประเภทผนัง	อิฐมอญ	อิฐมอญ	อิฐมอญ
Glazing area (%)	20	25	20
U-value (W/m ² °C)	5.74	5.74	5.74
Insulation (J/kg.m)	850-1,100	850-1,100	850-1,100
Lighting load (W/m ²)	8-12	8-12	8-12
Equipment (W/m ²)	8-12	8-12	8-12
HVAC equipment (COP)	3.0	3.0	3.0

ตาราง 2 (ต่อ)

รูปแบบของอาคาร	Type IV	Type V
โมเดลอาคารต้นแบบ		
พื้นที่ (m ²)	300	330
จำนวนชั้น	2	2
ประเภทผนัง	อิฐมวลเบา	อิฐมวลเบา
Glazing area (%)	20	25
U-value (W/m ² °C)	5.74	5.74
Insulation (J/kg.m)	850-1,100	850-1,100
Lighting load (W/m ²)	8-12	8-12
Equipment (W/m ²)	8-12	8-12
HVAC equipment (COP)	3.2	3.2



ภาพ 3 การใช้พลังงานของอาคารต้นแบบ

ตาราง 3

ข้อมูลคุณสมบัติกระจก

ประเภท	U-value(W/m ² .K)	SHGC	VLT
Single	5.80	0.56	0.70
Laminated	5.70	0.73	0.71
Double IGU	2.50	0.44	0.62
Double IGU with Low-E	1.80	0.32	0.49
Film	5.60	0.44	0.07

ตาราง 4

ข้อมูลคุณสมบัติผนัง หลังคา และฉนวนกันความร้อน

ประเภท	Conductivity (W/m.K)	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/kg.k)
อิฐมวลเบา	0.60	1,600	800
อิฐมวลเบา CLC	0.12	600	1,000
อิฐมวลเบา AAC	0.09	500	900
อิฐบล็อกซีเมนต์	0.50	1,800	840
คอนกรีต	1.40	2,200	840
หลังคาเหล็ก	45.00	7,800	460
หลังคาไวนิล	0.16	1,400	900
หลังคากระเบื้อง	0.80	1,600	800
หลังคาแอสฟัลต์	0.20	1,100	900
หลังคาคอนกรีต	1.40	2,200	840
ใยแก้ว	0.03	10.00	670
ใยหิน	0.03	40.00	800
PU Foam	0.02	30.00	1,000
PE Foam	0.03	25.00	1,800
PS Foam	0.03	10.00	1,200

2. ผลการจำลองการใช้พลังงาน

การประเมินการใช้พลังงานในอาคารที่พักอาศัยขนาดใหญ่ได้ดำเนินการโดยการสร้างแบบจำลองพลังงานของอาคารต้นแบบทั้ง 5 รูปแบบ โดยการนำข้อมูลคุณสมบัติพื้นฐานของแต่ละอาคารไปสร้างแบบจำลองสามมิติในโปรแกรม SketchUp และ OpenStudio จากนั้นทำการวิเคราะห์และประเมินผลการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม EnergyPlus ซึ่งให้ผลลัพธ์การใช้พลังงานในแต่ละอาคารตามที่แสดงดังภาพ 3 ซึ่งการใช้พลังงานภายในอาคารของทั้ง 5 รูปแบบอยู่ในเกณฑ์ตามค่าการใช้พลังงานสุทธิจากแบบจำลองของอาคารแต่ละประเภท (Ministry of Energy, 2020) โดยผลการศึกษาพบว่า รูปแบบอาคาร Type V มีการใช้พลังงานต่อปีสูงที่สุดที่ 62,555 kWh/yr รองลงมาคือ อาคาร Type III ซึ่งมีการใช้พลังงานเท่ากับ 58,325 kWh/yr ทั้งนี้แม้ว่าทั้งสองอาคารจะมีพื้นที่ใช้สอยเท่ากัน

แต่เนื่องจากมีอัตราส่วนพื้นที่กระจกต่อผนัง (WWR) ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้รูปแบบอาคาร Type V ใช้พลังงานต่อปีมากกว่ารูปแบบ Type VII ในทางกลับกัน รูปแบบอาคารที่ใช้พลังงานน้อยที่สุดต่อปีเป็นรูปแบบที่ได้รับการออกแบบด้วยค่าประสิทธิภาพที่เหมาะสม ทั้งในแง่ของการลดพื้นที่กระจก การใช้ฉนวนกันความร้อนที่เหมาะสม และวัสดุก่อสร้างที่มีค่า U-value ต่ำ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้การใช้พลังงานของอาคารลดลง

3. ผลการจำลองตามมาตรการพลังงาน

การนำเทคโนโลยีและวัสดุอุปกรณ์ชนิดใหม่ ๆ เข้ามามีส่วนร่วมในการออกแบบและการก่อสร้างอาคาร รวมถึงการปรับปรุงอาคารเพื่อให้อาคารเหล่านั้นมีความสามารถในการป้องกันความร้อนจากภายนอกอาคารเข้าสู่ตัวอาคารนั้นเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยให้สามารถ

ลดการใช้พลังงานภายในอาคารและส่งผลให้อาคารเหล่านั้นเป็นอาคาร HEPS ซึ่งในการศึกษาและวิจัยนี้มีการนำวัสดุเข้ามาช่วยในการประเมินการใช้พลังงานภายในอาคาร หลังจากการปรับปรุงอาคารด้วยมาตรการต่าง ๆ พบว่าประเภทของวัสดุที่มีความสามารถช่วยลดการใช้พลังงานในอาคารได้ดีที่สุดเมื่อนำจัดเรียงตามประเภทของวัสดุโดยการให้คะแนนเรียงจากมากไปหาน้อย (คะแนน 5 คือ วัสดุที่มีความสามารถช่วยลดการใช้พลังงานในอาคารได้มากที่สุด และคะแนน 1 วัสดุที่มีความสามารถช่วยลดการใช้พลังงานในอาคารได้น้อยที่สุด) ได้ดังตาราง 5

เมื่อได้ผลลัพธ์ของการใช้พลังงานภายในของอาคารทั้ง 5 รูปแบบแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การปรับปรุงอาคารต้นแบบทั้ง 5 รูปแบบ โดยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร ตามมาตรการประหยัดพลังงานที่กำหนดไว้ในตาราง 1 ซึ่งประกอบด้วยทั้งหมด 25 มาตรการ การปรับปรุงเหล่านี้มุ่งเน้นไปที่การลดปริมาณความร้อนที่เข้าสู่อาคาร มาตรการเหล่านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการพึ่งพาการใช้พลังงานจากระบบปรับอากาศ (HVAC) ซึ่งคาดว่าจะส่งผลให้การใช้พลังงานโดยรวมของอาคารที่พักอาศัยขนาดใหญ่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยมาตรการที่ดำเนินการนี้มีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ช่วยให้สามารถลดภาระการทำงานของระบบ HVAC และส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างยั่งยืนในอาคาร ผลการใช้พลังงานของแต่ละมาตรการภายหลังการปรับปรุงแบบจำลองพลังงานสามมิติด้วยโปรแกรม OpenStudio และ EnergyPlus ได้ถูกนำเสนอในตาราง 6 ซึ่งในตารางจะระบุรูปแบบของอาคารแต่ละประเภทพร้อมข้อมูลการใช้พลังงานรวมรายปีตามแต่ละมาตรการ

โดยลำดับของมาตรการพลังงานจะปรากฏหลังข้อมูลการใช้พลังงานรวมรายปี ตัวอย่างเช่น ค่าใช้พลังงานรวมของอาคารประเภทที่ 1 ในช่องที่ 1 มีค่าเท่ากับ 52,056 (1) ซึ่งหมายถึง การใช้พลังงานรวมของอาคารภายใต้การดำเนินการมาตรการที่ (1W₁) ส่วน (25) หลังข้อมูลการใช้พลังงานรายปีในอาคารจะหมายถึงมาตรการที่ (25P₅) ตามที่ระบุไว้ในตาราง 1

4. ผลการประเมินการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂e)

ผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เกิดจากการปลดปล่อยก๊าซ CO₂ เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งการใช้ไฟฟ้าในอาคารก็เป็นภาคส่วนหนึ่งที่เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซ CO₂ เนื่องจากระบบการผลิตไฟฟ้าที่มีส่วนมากในปัจจุบันยังพึ่งพาแหล่งพลังงานฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ การคำนวณการปลดปล่อยก๊าซ CO₂ จากการใช้ไฟฟ้าภายในอาคารที่อยู่อาศัยนั้นเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สามารถช่วยในการวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการวางแผนเพื่อการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยการคำนวณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂e) ในการศึกษาและวิจัยนี้ ใช้การคำนวณจากปริมาณการใช้ไฟฟ้าในอาคารหน่วยเป็น kWh นำมาคูณกับค่า Emission Factor ขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกข้อมูลปี 2024 (TGO) (TGO, 2024) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases: GHGs) ที่ถูกปลดปล่อยออกมาในกระบวนการผลิตหรือการใช้พลังงานต่อหนึ่งหน่วย แสดงได้ดังสมการที่ 5

$$CO_2 emis = Electricity Sum \times EF \quad (5)$$

โดยที่

CO₂emis = การปลดปล่อยก๊าซ CO₂e

Electricity Sum = ปริมาณการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด

EF = Emission Factor จาก TGO

ตาราง 5

จัดลำดับประเภทวัสดุที่มีความสามารถช่วยลดการใช้พลังงานในอาคาร

ประเภท	มาตรการ	คะแนน
1. กระจก		
1.1 Single	1W ₁	2
1.2 Laminated	2W ₂	1
1.3 Double IGU	3W ₃	4
1.4 Double IGU with Low-E	4W ₄	5
1.5 Film	5W ₅	3
2. ผนัง		
2.1 อิฐมวลเบา	6F ₁	2
2.2 อิฐมวลเบา CLC	7F ₂	4
2.3 อิฐมวลเบา AAC	8F ₃	5
2.4 อิฐบล็อกซีเมนต์	9F ₄	3
2.5 คอนกรีต	10F ₅	1
3. ฉนวนกันความร้อน		
3.1 โยแกว	11I ₁	2
3.2 โยหิน	12I ₂	1
3.3 PU Foam	13I ₃	5
3.4 PE Foam	14I ₄	4
3.5 PS Foam	15I ₅	3
4. หลังคา		
4.1 หลังคาเหล็ก	16R ₁	3
4.2 หลังคาไวนิล	17R ₂	5
4.3 หลังคากระเบื้อง	18R ₃	1
4.4 หลังคาเอสฟัลต์	19R ₄	4
4.5 หลังคาคอนกรีต	20R ₅	2
5. Green Roof		
5.1 พืช 10 cm	21P ₁	1
5.2 พืช 15 cm	22P ₂	2
5.3 พืช 20 cm	23P ₃	3
5.4 พืช 25 cm	24P ₄	4
5.5 พืช 30 cm	25P ₅	5

จากตาราง 6 ผลการสรุปการใช้พลังงานของอาคาร แยกตามมาตรการพลังงานที่ได้ผลลัพธ์มาจากการวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม EnergyPlus สามารถนำมาคำนวณค่าการปลดปล่อยก๊าซ CO₂e จากมาตรการพลังงานต่าง ๆ ได้ตาม สมการที่ 5 (ค่า EF จาก TGO = 0.5986) โดยสามารถ แสดงผลการลดการปลดปล่อยก๊าซ CO₂e ที่ดีที่สุดของ อาคารแต่ละรูปแบบที่ดำเนินการตามมาตรการพลังงาน เปรียบเทียบกับอาคารต้นแบบเดิม โดยเรียงผลลัพธ์ตาม แต่ละประเภทของวัสดุที่สามารถลดการใช้พลังงานได้สูงสุด ของแต่ละประเภทอาคารแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. ประเภทวัสดุกระจก ในมาตรการที่ 4W4 กระจก Double IGU with Low-E สามารถลดการใช้พลังงานได้สูง ที่สุดเมื่อทำการติดตั้งในอาคารที่พักอาศัย Type V มีการ ใช้พลังงานเท่ากับ 62,555 kWh/yr หลังจากการปรับปรุง มีการใช้พลังงานอยู่ที่ 57,586 kWh/yr ส่งผลให้สามารถ ลดการใช้พลังงานได้ 4,969 kWh/yr คิดเป็นร้อยละ 7.94 และลดการปลดปล่อยก๊าซ CO₂e ได้เท่ากับ 2,974 kgCO₂e

2. ประเภทวัสดุผนัง ในมาตรการที่ 8F3 ผนังที่ถูกร ้างด้วยอิฐมวลเบา AAC สามารถลดการใช้พลังงานได้สูง ที่สุดเมื่อทำการติดตั้งในอาคารที่พักอาศัย Type III มีการใช้ พลังงานอยู่ที่ 58,325 kWh/yr หลังจากการปรับปรุงมีการ ใช้พลังงานอยู่ที่ 52,503 kWh/yr ส่งผลให้สามารถลดการ ใช้พลังงานได้ 5,822 kWh/yr คิดเป็นร้อยละ 9.98 และ ลดการปลดปล่อยก๊าซ CO₂e ได้เท่ากับ 3,485 kgCO₂e

3. ประเภทวัสดุฉนวนกันความร้อน ในมาตรการ ที่ 13I₃ การติดตั้งฉนวนกันความร้อน PU Foam สามารถ ลดการใช้พลังงานได้สูงที่สุดเมื่อทำการติดตั้งในอาคารที่พั กอาศัย Type V มีการใช้พลังงานอยู่ที่ 62,555 kWh/yr หลัง จากการปรับปรุงมีการใช้พลังงานอยู่ที่ 49,361 kWh/yr ส่ งผลให้สามารถลดการใช้พลังงานได้ 13,194 kWh/yr คิด เป็นร้อยละ 21.09 และลดการปลดปล่อยก๊าซ CO₂e ได้ เท่ากับ 7,898 kgCO₂e

4. ประเภทวัสดุหลังคา ในมาตรการที่ 17R2 การ ติดตั้งหลังคาโวนิล สามารถลดการใช้พลังงานได้สูงที่สุด เมื่อทำการติดตั้งในอาคารที่พักอาศัย Type IV มีการใช้ พลังงานอยู่ที่ 57,819 kWh/yr หลังจากการปรับปรุงมีการ ใช้พลังงานอยู่ที่ 53,617 kWh/yr ส่งผลให้สามารถลดการ ใช้พลังงานได้ 4,202 kWh/yr คิดเป็นร้อยละ 7.27 และ ลดการปลดปล่อยก๊าซ CO₂e ได้เท่ากับ 2,515 kgCO₂e

5. ประเภทวัสดุ Green Roof ในมาตรการที่ 25P₅ การปลูกต้นไม้หลังคา Green Roof สามารถลดการ ใช้พลังงานได้สูงที่สุดเมื่อทำการติดตั้งในอาคารที่พักอาศัย Type IV มีการใช้พลังงานอยู่ที่ 57,819 kWh/yr หลังจก การปรับปรุงมีการใช้พลังงานอยู่ที่ 53,617 kWh/yr ส่ ง ผลให้สามารถลดการใช้พลังงานได้ 7,930 kWh/yr คิด เป็นร้อยละ 13.72 และลดการปลดปล่อยก๊าซ CO₂e ได้ เท่ากับ 4,747 kgCO₂e

จากผลการพัฒนาฐานข้อมูลและแบบจำลอง พลังงานอาคารสามมิติสำหรับอาคารที่พักอาศัยขนาด ใหญ่จำนวน 5 ประเภท แสดงให้เห็นว่ามาตรการต่าง ๆ ที่ สามารถช่วยลดการใช้พลังงานในแต่ละมาตรการ สามารถส่ง ผลต่อการลดการใช้พลังงานที่แตกต่างกันในแต่ละประเภท อาคาร ซึ่งอาจให้ประสิทธิผลที่สูงกว่าในอาคารประเภท หนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอีกประเภทหนึ่ง ฐานข้อมูลและ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือใน การศึกษาและจัดการพลังงานในอาคารที่พักอาศัย รวมถึง ใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับผู้สนใจในการสร้างแบบจำลองอาคาร สามมิติ นักวิจัย ผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย และผู้กำหนดนโยบาย ด้านพลังงาน โดยข้อมูลดังกล่าวสามารถช่วยในการประเมิน การใช้พลังงานของอาคารที่พักอาศัย และสนับสนุนการนำ เสนอมาตรการลดการใช้พลังงานในระดับอำเภอ ระดับ จังหวัด และระดับประเทศได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

สรุปและอภิปรายผล

การศึกษาและวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและสร้างแบบจำลองพลังงานต้นแบบในอาคารที่พักอาศัยขนาดใหญ่ในรูปแบบอาคารสามมิติ รวมถึงนำเสนอมาตรการอนุรักษ์พลังงานและลดการปล่อยก๊าซ CO₂e เพื่อยกระดับมาตรฐานของอาคารที่อยู่อาศัยขนาดใหญ่ในประเทศไทยให้เป็นอาคารที่มีระดับการใช้พลังงานตามเกณฑ์ขั้นสูง (HPES) โดยมีขั้นตอนในการพัฒนาแบบจำลองและการกำหนดมาตรการพลังงานประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้ (1) พัฒนาและสร้างแบบจำลองพลังงานของอาคารที่พักอาศัยทั้ง 5 รูปแบบอาคารด้วยโปรแกรม SketchUp และ OpenStudio (2) กำหนดมาตรการพลังงานและแนวทางที่เป็นไปได้ในการนำวัสดุประเภทต่าง ๆ หรือการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการปรับปรุงอาคารเพื่อให้เป็นอาคารที่มีระดับการใช้พลังงานตามเกณฑ์ขั้นสูง (HPES) (3) สรุปและวิเคราะห์ผลของการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซ CO₂e ที่ลดลงหลังจากดำเนินการตามมาตรการพลังงาน โดยผลลัพธ์ของแบบจำลองพลังงานที่ได้ผลมาจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม EnergyPlus สามารถสรุปรวมทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำวัสดุและอุปกรณ์มาใช้ในอาคารที่อยู่อาศัยขนาดใหญ่ให้มีความสามารถในการลดการใช้พลังงานได้สูงสุดได้ดังนี้ คือ

- มาตรการ กระจก Double IGU with Low-E (4W₄) + ผนังอิฐมวลเบา AAC (8F₃) + ฉนวนกันความร้อน PU Foam (13I₃) + หลังคาโวนิล (17R₂) + Green Roof 50 cm (25P₅)

โดยมาตรการพลังงานเหล่านี้เป็นมาตรการที่สามารถช่วยส่งเสริมการอนุรักษ์การใช้พลังงานและลดการปลดปล่อยก๊าซ CO₂e ได้สูงสุด ส่งผลทำให้อาคารที่อยู่อาศัยขนาดใหญ่ต้นแบบทั้ง 5 รูปแบบอาคารสามารถพัฒนาให้เป็นอาคารที่มีระดับการใช้พลังงานตามเกณฑ์ขั้นสูง (HPES) ที่สามารถลดการใช้พลังงานจากอาคาร Reference (Ministry of Energy, 2018) อยู่ที่ย้อยละ 35 – 40 แสดงได้ดังตาราง

7 แต่จากมาตรการดังกล่าวไม่สามารถทำให้อาคารมีการใช้พลังงานอยู่ในเกณฑ์อาคารที่ประหยัดพลังงานได้มากขึ้น ด้วยเทคโนโลยีขั้นสูง Econ (economic building) หรือเกณฑ์อาคารที่มีการใช้พลังงานเป็นศูนย์ ZEB (net Zero Energy Building) ได้ซึ่งมีสัดส่วนการใช้พลังงานที่ลดลงต่อพื้นที่เมื่อเปรียบเทียบกับอาคาร Reference Building อยู่ที่ย้อยละ 60 และร้อยละ 70 ขึ้นไปตามลำดับ โดยเกณฑ์พลังงานเป็นศูนย์ ZEB (net Zero Energy Building) ต้องเป็นอาคารที่มีความสมดุลระหว่างพลังงานใช้งานในอาคารและพลังงานที่ผลิตได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียนโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือระบบพลังงานในระยะยาว

โดยผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับ Yu et al. (2020) ที่ระบุว่าการออกแบบ Passive Design และการใช้วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำสามารถลดการใช้พลังงานในอาคารในภูมิอากาศร้อนชื้นได้ อีกทั้งการใช้แบบจำลองพลังงานด้วยโปรแกรม EnergyPlus เป็นแนวทางที่คล้ายกับ Shabunko et al. (2018) ที่ทำการพัฒนาการจำลองพลังงานในอาคารเชิงพาณิชย์ในเขตร้อน

ดังนั้นการใช้มาตรการด้านพลังงานและแนวทางที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาและวิจัยนี้จะสามารถช่วยให้ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียและผู้กำหนดนโยบาย มีฐานข้อมูลที่สำคัญที่สามารถช่วยในการตัดสินใจและดำเนินการอย่างมีประสิทธิภาพในการกำหนดนโยบายทางด้านพลังงานที่ยั่งยืน เพื่อให้บรรลุเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (carbon neutrality) และสามารถเปลี่ยนผ่านไปสู่สังคมคาร์บอนต่ำได้อย่างสำเร็จได้ต่อไปในอนาคต

ตาราง 6

การใช้พลังงานของอาคารแยกตามมาตรการพลังงาน

มาตรการ	อาคาร Type I (kWh/yr)	อาคาร Type II (kWh/yr)	อาคาร Type III (kWh/yr)	อาคาร Type IV (kWh/yr)	อาคาร Type V (kWh/yr)
1W ₁	52,056	54,117	58,325	57,819	62,555
2W ₂	52,520	55,117	58,864	58,167	62,769
3W ₃	49,992	51,647	56,453	56,014	59,056
4W ₄	49,222	50,317	55,567	55,236	57,586
5W ₅	51,278	53,061	57,636	57,244	61,592
6F ₁	52,056	54,117	58,325	57,819	62,555
7F ₂	48,736	49,772	53,283	54,617	58,775
8F ₃	48,417	49,389	52,503	54,217	58,453
9F ₄	50,797	52,428	58,520	57,728	61,353
10F ₅	52,544	54,531	62,208	60,306	63,414
11I ₁	44,939	46,775	46,258	46,386	49,489
12I ₂	44,953	46,781	46,286	46,389	49,503
13I ₃	44,883	46,703	46,069	46,267	49,361
14I ₄	44,950	46,767	46,297	46,381	49,475
15I ₅	44,945	46,781	46,264	46,389	49,500
16R ₁	52,056	54,117	58,325	57,819	62,555
17R ₂	50,567	52,147	54,617	53,617	58,556
18R ₃	54,544	56,019	60,789	60,506	65,083
19R ₄	51,192	52,758	55,606	54,778	59,569
20R ₅	53,003	54,036	57,514	57,172	61,594
21P ₁	46,336	49,822	50,822	49,897	54,561
22P ₂	46,314	49,800	50,789	49,906	54,517
23P ₃	46,270	49,756	50,719	49,894	54,433
24P ₄	46,235	49,720	50,667	49,903	54,364
25P ₅	46,197	49,681	50,608	49,889	54,294

ตาราง 7

ผลสรุปการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซ CO_2e ดำเนินการตามมาตรการที่ $4W_4 + 8F_3 + 13I_3 + 17R_2 + 25P_5$

รูปแบบอาคาร	Total Energy (1) (kWh/yr)	Total Scenario (2) (kWh/yr)	% ผลต่าง [(1)/(2)]	CO ₂ e Emission [(2)*0.5986] (kgCO ₂ e)
Type I	52,056	34,189	34.32	20,466
Type II	54,117	32,275	40.36	19,320
Type III	58,325	32,469	44.33	19,436
Type IV	57,819	32,861	43.17	16,671
Type V	62,555	32,747	47.65	16,602

ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาและวิจัยนี้ หากต้องการทำการวิจัยเพิ่มเติมต่อไปในอนาคตควรพิจารณาประเด็นดังต่อไปนี้

1) ควรมีการพัฒนาและวิเคราะห์เชิงลึกเพื่อปรับปรุงแบบจำลองให้มีประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานได้สูงขึ้นเพื่อเข้าเกณฑ์อาคารที่มีระดับการใช้พลังงานจากระบบอุปกรณ์ที่มีเทคโนโลยีที่สูงขึ้น Econ หรือเกณฑ์อาคารที่มีการใช้พลังงานเป็นศูนย์ ZEB

2) ควรมีการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของอัตราการลงทุนและความคุ้มค่าในการดำเนินการตามมาตรการด้านพลังงานต่าง ๆ

3) ควรมีการศึกษาและสร้างแบบจำลองต้นแบบของอาคารที่พิกอาศัยประเภทอื่น ๆ เช่น บ้านชั้นเดียว ตึกแถว อาคารพาณิชย์ คอนโดมิเนียมและโรงแรม



References

- Ahmed, O., Sezer, N., Ouf, M., Wang, L. (Leon), & Hassan, I. G. (2023). State-of-the-art review of occupant behavior modeling and implementation in building performance simulation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 185, 113558. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113558>
- Al Rashdi, S. A., Sudhir, C. V., Basha, J. S., Saleel, C. A., Soudagar, M. E. M., Yusuf, A. A., & Afzal, A. (2022). A case study on the electrical energy auditing and saving techniques in an educational institution (IMCO, Sohar, Oman). *Case Studies in Thermal Engineering*, 31, 101820. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101820>
- Altan, H., Hajibandeh, M., Tabet Aoul, K. A., & Deep, A. (2016). Passive design. In M. Noguchi, (Eds.), *ZEMCH: Toward the delivery of zero energy mass custom homes. Springer Tracts in Civil Engineering* (pp. 209–236). Cham: Springer.
- Amin Mirjalili, S. M., Aslani, A., & Zahedi, R. (2023). Towards sustainable commercial-office buildings: Harnessing the power of solar panels, electric vehicles, and smart charging for enhanced energy efficiency and environmental responsibility. *Case Studies in Thermal Engineering*, 52, 103696. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103696>

- Behzadi, A., Holmberg, S., Duwig, C., Haghighat, F., Ooka, R., & Sadrizadeh, S. (2022). Smart design and control of thermal energy storage in low-temperature heating and high-temperature cooling systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, 112625. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112625>
- Bland, A., Khzouz, M., Statheros, T., & Gkanas, E. (2017). PCMs for residential building applications: A short review focused on disadvantages and proposals for future development. *Buildings*, 7(3), 78. <https://doi.org/10.3390/buildings7030078>
- Bunnag, N. (2022). *Sustainable urbanization*. Retrieved from <https://www.sdgmove.com/2021/07/22/sdg-vocab-37-sustainable-urbanization/>
- Chen, J., Wang, H., & Xie, P. (2019). Pavement temperature prediction: Theoretical models and critical affecting factors. *Applied Thermal Engineering*, 158, 113755. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113755>
- Chi, F., Gao, K., Zhang, S., & He, L. (2023). Thermal performance regulation and optimization for rooms of residential buildings via using radiative cooling and solar heating system. *Journal of Cleaner Production*, 430, 139605. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139605>
- Ferahtia, S., Houari, A., Cioara, T., Bouznit, M., Rezk, H., & Djerioui, A. (2024). Recent advances on energy management and control of direct current microgrid for smart cities and industry: A Survey. *Applied Energy*, 368, 123501. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123501>
- Hussain, S., Sharma, S. K., & Lal, S. (2024). Feasible synergy between hybrid solar PV and wind system for energy supply of a green building in Kota (India): A case study using iHOGA. *Energy Conversion and Management*, 315, 118783. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118783>
- Kampelis, N., Papayiannis, G. I., Kolokotsa, D., Galanis, G. N., Isidori, D., Cristalli, C., & Yannacopoulos, A. N. (2020). An Integrated Energy Simulation Model for Buildings. *Energies*, 13(5), 1170. <https://doi.org/10.3390/en13051170>
- Kishore, P., Selvam, N., Didwania, S., & Augenbroe, G. (2022). Understanding BIPV performance with respect to WWR for energy efficient buildings. *Energy Reports*, 8, 1073–1083. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.371>
- Lapisa, R. (2019). The effect of building geometric shape and orientation on its energy performance in various climate regions. *International Journal of GEOMATE*, 16(53), 113–119. <https://doi.org/10.21660/2019.53.94984>
- Lee, K., & Lim, H. (2024). Correlation analysis of building parameters according to ASHRAE Standard 90.1. *Journal of Building Engineering*, 82, 108130. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108130>
- Lee, R., Choi, M., Yoon, J., & Kim, D. (2023). Impacts of lighting and plug load variations on residential building energy consumption targeting zero energy building goals. *Journal of Building Engineering*, 75, 106962. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106962>

- Mandel, T., & Pató, Z. (2024). Towards effective implementation of the energy efficiency first principle: a theory-based classification and analysis of policy instruments. *Energy Research & Social Science*, 115, 103613. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103613>
- Ministry of Energy. (2018). *BESM building energy simulation program manual*. Bangkok: Ministry of Energy (in Thai)
- Ministry of Energy. (2020). *Energy efficiency plan*. Bangkok: Ministry of Energy. (in Thai)
- Nguyen, A. T., Pham, D. H., Oo, B. L., Santamouris, M., Ahn, Y., & Lim, B. T. H. (2024). Modelling building HVAC control strategies using a deep reinforcement learning approach. *Energy and Buildings*, 310, 114065. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114065>
- Nur-E-Alam, M., Vasiliev, M., Yap, B. K., Islam, M. A., Fouad, Y., & Kiong, T. S. (2024). Design, fabrication, and physical properties analysis of laminated Low-E coated glass for retrofit window solutions. *Energy and Buildings*, 318, 114427. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114427>
- Ono, E., Tekler, Z. D., Lam, K. P., Jin, Y., Yan, D., & Chong, A. (2024). Evaluating the sensitivity and robustness of occupancy models for building energy simulation during design. *Building and Environment*, 261, 111739. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111739>
- Polkhuntod, A., & Chamsa-ard, W. (2021). *Design of a prototype for zero net energy smart office building*. Phitsanulok: Naresuan University. (in Thai)
- Qian, H., Tang, M., Wang, D., & Fang, J. (2017). Effect of insulation ground on anti-condensation in rural residence. *Procedia Engineering*, 180, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.168>
- Ramirez, J. P. D., Nagarsheth, S. H., Ramirez, C. E. D., Henao, N., & Agbossou, K. (2024). Synthetic dataset generation of energy consumption for residential apartment building in cold weather considering the building's aging. *Data in Brief*, 54, 110445. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110445>
- Raof, B. (2017). The correlation between building shape and building energy performance. *International Journal of Advanced Research*, 5(5), 552–561. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/4145>
- Sani, S. B., Celvakumaran, P., Ramachandramurthy, V. K., Walker, S., Alrazi, B., Ying, Y. J., & Rahman, M. H. A. (2020). Energy storage system policies: Way forward and opportunities for emerging economies. *Journal of Energy Storage*, 32, 101902. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101902>
- Sarmiento, E. M. de M., Ribeiro, I. F., Marciano, P. R. N., Neris, Y. G., Rocha, H. R. de O., Mota, V. F. S., & Villaça, R. da S. (2024). Forecasting energy power consumption using federated learning in edge computing devices. *Internet of Things*, 25, 101050. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.101050>
- Shabunko, V., Lim, C. M., & Mathew, S. (2018). EnergyPlus models for the benchmarking of residential buildings in Brunei Darussalam. *Energy and Buildings*, 169, 507–516. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.039>
- Sun, Y. (2024). The impact of green buildings on CO₂ emissions: Evidence from commercial and residential buildings. *Journal of Cleaner Production*, 469, 143168. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143168>

- TGO. (2024). *Emission factors*. Retrieved from <https://www.tgo.or.th/2023/index.php/th/> (in Thai)
- U.S. Department of Energy's (DOE). (2023). *Weather data*. Retrieved from <https://energyplus.net/weather>
- U.S. Department of Energy's (DOE). (2024). *EnergyPlus*. Retrieved from <https://energyplus.net/>
- Uddin, M. N., Wei, H. H., Chi, H. L., & Ni, M. (2019). An inquisition of envelope fabric for building energy performance using prominent BIM-BPS tools—A case study in sub-tropical climate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 354(1), 012129. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/354/1/012129>
- United Nations Climate Change. (2023). *Summary of global climate action at COP28. Global Climate Action, 1–16*. Retrieved from https://unfccc.int/sites/default/files/resource/GCA_COP27_Summary_o
- Wang, J., Lu, X., Adetola, V., & Louie, E. (2024). Modeling Variable Refrigerant Flow (VRF) systems in building applications: A comprehensive review. *Energy and Buildings*, 311, 114128. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114128>
- Wang, M., & Lu, Z. (2022). Thermal and moisture coupling performances of poplar fiber inorganic humidity control brick. *Construction and Building Materials*, 348, 128656. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128656>
- Wolday, F., & Böcker, L. (2023). Exploring changes in residential preference during COVID-19: Implications to contemporary urban planning. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 50(5), 1280–1297. <https://doi.org/10.1177/23998083231164398>
- Yangtianzheng, Z., & Ying, G. (2024). Spatial patterns and trends of inter-city population mobility in China—Based on Baidu migration big data. *Cities*, 151, 105124. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105124>
- Yu, C.-R., Guo, H.-S., Wang, Q.-C., & Chang, R.-D. (2020). Revealing the Impacts of Passive Cooling Techniques on Building Energy Performance: A Residential Case in Hong Kong. *Applied Sciences*, 10(12), 4188. <https://doi.org/10.3390/app10124188>
- Zhong, W., Schröder, T., & Bekkering, J. (2024). Implementing biophilic design in architecture through three-dimensional green spaces: Guidelines for building technologies, plant selection, and maintenance. *Journal of Building Engineering*, 92, 109648. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109648>
- Ziaemehr, B., Jandaghian, Z., Ge, H., Lacasse, M., & Moore, T. (2023). Increasing solar reflectivity of building envelope materials to mitigate urban heat islands: State-of-the-art review. *Buildings*, 13(11), 2868. <https://doi.org/10.3390/buildings13112868>

