

การประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารด้วยแบบจำลองพลังงานในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษา:
กรณีศึกษามหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

Evaluation of Building Envelope Retrofit Measures Using Building Energy Modeling at
Campus Level: A Case Study of Dhurakij Pundit University

ศุภรัชชัย วรรัตน์¹ และ ประยูร ฤทธิเดช^{1*}
Suparatchai Vorarat¹ and Prayuth Rittidatch^{1*}

¹อาจารย์, หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต 10210

¹Lecturer, Graduate Program in Engineering Management, College of Engineering and Technology,
Dhurakij Pundit University, Bangkok, 10210

*Corresponding author E-mail: prayuth.rit@dpu.ac.th

Abstract

This study aimed to construct and validate a Building Energy Model (BEM) and evaluate the effectiveness of building envelope retrofit measures at the campus level. Seven educational buildings at Dhurakij Pundit University, operating under a single electricity meter with a total annual electricity consumption of 2,404,000 kWh/year, were investigated. The building energy model was developed using OpenStudio coupled with EnergyPlus and validated by comparing the simulated results with actual electricity consumption data. The overall deviation between the simulated and actual annual electricity consumption was -0.27%, indicating good agreement between the model and measured annual energy use. Model validation was conducted with reference to the framework of ASHRAE Guideline 14-2014. A sensitivity analysis using a Tornado Diagram was subsequently performed, and twelve building envelope retrofit measures were evaluated, focusing on reducing the U-values of walls and roofs and the Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) of fenestration systems. The sensitivity analysis indicated that reducing the SHGC of fenestration had the greatest influence on energy savings, followed by increasing wall and roof insulation. Among the twelve measures, the integrated retrofit strategy (Measure 12), comprising 65 mm wall insulation, reduced glazing SHGC, and an increase in roof insulation thickness to 150 mm, achieved the highest energy savings. This measure reduced annual electricity consumption by 68,647 kWh/year, equivalent to 2.86%, and reduced carbon dioxide equivalent emissions by 41,092 kgCO₂e/year. The findings demonstrate that a building energy model validated against actual energy consumption data can serve as a decision-support tool for evaluating and selecting building envelope retrofit measures at the campus level and can support the transition toward Near Zero Energy Buildings (NZEB) and Thailand's Carbon Neutrality 2050 target.

Keywords: Building Envelope Retrofit, Building Energy Model, Model Validation, NZEB, Carbon Reduction

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลังงานอาคาร (Building Energy Model: BEM) และประเมินประสิทธิภาพของมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษา โดยศึกษา กลุ่มอาคารจำนวน 7 อาคารภายใต้ระบบมิเตอร์ไฟฟ้าเดียวกันของมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 2,404,000 kWh/year แบบจำลองพลังงานสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม OpenStudio ร่วมกับ EnergyPlus และตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริง พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนรวมระหว่างผลการจำลอง และข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริงเท่ากับ -0.27% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องกับการใช้พลังงานจริงในระดับรายปี โดยการตรวจสอบแบบจำลองอ้างอิงกรอบแนวทางของ ASHRAE Guideline 14-2014 จากนั้นทำการวิเคราะห์ความไวของตัวแปร (Sensitivity Analysis) ด้วย Tornado Diagram และประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารจำนวน 12 แนวทาง โดยมุ่งเน้นการลดค่า U-value ของผนังและหลังคา และค่า Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) ของช่องเปิด ผลการวิเคราะห์ความไวพบว่าค่า SHGC ของช่องเปิดเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการประหยัดพลังงานสูงสุด รองลงมา คือการเพิ่มฉนวนผนังและฉนวนหลังคา ผลการประเมินมาตรการพบว่ามาตรการแบบบูรณาการ (Measure 12) ซึ่ง ประกอบด้วย การเพิ่มฉนวนผนังหนา 65 mm การลดค่า SHGC ของกระจก และการเพิ่มความหนาฉนวนหลังคาเป็น 150 mm ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงสุด โดยสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 68,647 kWh/year หรือ 2.86% และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าได้ 41,092 kgCO₂e/year ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองพลังงานที่ผ่านการตรวจสอบกับข้อมูลการใช้พลังงานจริงสามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการประเมินและคัดเลือกมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษา และสนับสนุนแนวทางการพัฒนาอาคารสู่ Near Zero Energy Building (NZEB) และเป้าหมาย Carbon Neutrality 2050 ของประเทศไทย

คำสำคัญ: การปรับปรุงกรอบอาคาร, แบบจำลองพลังงานอาคาร, การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง, NZEB, การลดการปล่อยคาร์บอน

บทนำ

ภาคอาคารเป็นหนึ่งในภาคส่วนที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงและมีบทบาทสำคัญต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย โดยเฉพาะในเขตภูมิอากาศร้อนชื้นที่ภาระการทำความเย็น (Cooling Load) มีสัดส่วนสูงต่อการใช้พลังงานรวม ภายใต้กรอบแผนพลังงานแห่งชาติ (National Energy Plan: NEP 2024–2037) และเป้าหมาย Carbon Neutrality 2050 [1,2] การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในอาคารจึงเป็นกลยุทธ์สำคัญด้านการจัดการความต้องการพลังงาน (Demand-Side Management) ควบคู่กับการพัฒนาพลังงานหมุนเวียน มาตรการปรับปรุงกรอบอาคาร (Building Envelope Retrofit) เป็นแนวทางเชิงรับ (Passive Strategy) ที่สามารถลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านผนัง หลังคา และช่องเปิด ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศ งานวิจัยก่อนหน้าทั้งในประเทศและต่างประเทศแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อนของกรอบอาคาร เช่น การลดค่า U-value ของผนังและหลังคา หรือการลดค่า Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) ของกระจก สามารถลดการใช้พลังงานได้ประมาณ 2–6% ของการใช้พลังงานรวม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะอาคารและสภาพภูมิอากาศ [3,4] นอกจากนี้ ภาคอาคารยังมีสัดส่วนการใช้พลังงานสูงในระดับโลกและมีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญ [5]

จากการทบทวนวรรณกรรมพบข้อจำกัดสำคัญของการศึกษาด้านการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานของอาคารสถานศึกษาในประเทศไทยสามประการ ประการแรก งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการวิเคราะห์ในระดับอาคารเดี่ยว (Single-Building Analysis) ขณะที่การศึกษาในระดับกลุ่มอาคารหลายหลังภายใต้ระบบมิเตอร์ไฟฟ้าเดียวกันยังมีจำกัด ทั้งที่รูปแบบ

ดังกล่าวสามารถสะท้อนการใช้พลังงานในระดับมหาวิทยาลัยหรือองค์กรได้ใกล้เคียงกับสภาพการดำเนินงานจริงมากกว่า ประการที่สอง งานวิจัยจำนวนมากมุ่งเน้นการรายงานผลการประหยัดพลังงานในหน่วย kWh ขณะที่การเชื่อมโยงผลการประหยัดพลังงานกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยใช้ค่า Emission Factor ที่สอดคล้องกับบริบทของประเทศไทยยังมีจำกัด และประการที่สาม การศึกษาที่รายงานการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลังงาน (Model Validation) โดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลการใช้พลังงานจริงตามแนวทางมาตรฐานสากล เช่น ASHRAE Guideline 14-2014 [6] ยังมีจำนวนจำกัด ทั้งที่กระบวนการดังกล่าวมีความสำคัญต่อการสร้างความน่าเชื่อถือของแบบจำลองก่อนนำไปใช้ประเมิน มาตรการประหยัดพลังงาน

การศึกษานี้เลือกใช้ EnergyPlus ร่วมกับ OpenStudio ในการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองพลังงานอาคาร เนื่องจาก EnergyPlus สามารถจำลองการถ่ายเทความร้อนและการใช้พลังงานของอาคารโดยพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่าง คุณสมบัติทางความร้อนของกรอบอาคาร สภาพภูมิอากาศ ตารางการใช้งาน ภาระความร้อน และระบบปรับอากาศ ขณะที่ OpenStudio สนับสนุนการสร้าง จัดการ และปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของแบบจำลองอย่างเป็นระบบ [7-9] จุดเด่นของการใช้เครื่องมือทั้งสองร่วมกันสำหรับการศึกษานี้ คือความสามารถในการกำหนดกรณีฐานและปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของกรอบอาคารภายใต้เงื่อนไขการจำลองเดียวกัน ทำให้สามารถเปรียบเทียบมาตรการหลายรูปแบบและตรวจสอบผลการจำลองกับ ข้อมูลการใช้พลังงานจริงได้อย่างเป็นระบบ งานวิจัยของ Rittidatch และคณะ [9,10] แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ EnergyPlus ร่วมกับ OpenStudio ในการประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารสถานศึกษา ขณะที่ Chuaewong และ คณะ [2] รายงานว่าการปรับเปลี่ยนวัสดุกรอบอาคารของอาคารสำนักงานภาครัฐมีศักยภาพในการลดการใช้พลังงาน อย่างไรก็ตาม การประเมินในระดับกลุ่มอาคารหลายหลังภายใต้ระบบมิเตอร์เดียวกัน โดยบูรณาการการตรวจสอบแบบจำลองด้วย ข้อมูลการใช้พลังงานจริง การวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ และการประเมินผลด้านการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ยังเป็นประเด็นที่ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติม

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) สร้างและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลังงานสำหรับกลุ่มอาคาร สถานศึกษาจำนวน 7 อาคารภายใต้ระบบมิเตอร์ไฟฟ้าเดียวกัน โดยเปรียบเทียบผลการจำลองจาก OpenStudio และ EnergyPlus กับข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริง และ (2) ประเมินประสิทธิผลของมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารจำนวน 12 แนวทาง โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่า U-value ของผนังและหลังคา และค่า Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) ของช่องเปิด กระบวนการประเมินประกอบด้วยการกำหนดกรณีฐาน การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การจำลอง มาตรการปรับปรุงกรอบอาคาร การวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ด้วย Tornado Diagram และการคำนวณการลดการ ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าโดยใช้ค่า Emission Factor ของประเทศไทย [11,12] ผลการศึกษานี้จะใช้เพื่อระบุ มาตรการและพารามิเตอร์ของกรอบอาคารที่มีศักยภาพสูงในการลดการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเท่า เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดการพลังงานในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษา ตลอดจนสนับสนุนแนว ทางการพัฒนาอาคารสู่ Near Zero Energy Building (NZEB) และเป้าหมาย Carbon Neutrality 2050 ของประเทศไทย

วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารด้วยแบบจำลองพลังงานในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษา โดยใช้มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตเป็นกรณีศึกษา ครอบคลุมอาคารจำนวน 7 อาคารที่อยู่ภายใต้ระบบมิเตอร์ไฟฟ้าเดียวกัน กระบวนการวิจัยประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การรวบรวมข้อมูลด้านกายภาพของอาคารและข้อมูลการใช้พลังงาน ไฟฟ้าจริง (2) การสร้างแบบจำลองพลังงานอาคาร (3) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบผลการ จำลองกับข้อมูลการใช้พลังงานจริง (4) การกำหนดและจำลองมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารจำนวน 12 แนวทาง และ (5) การวิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงาน ความไวของพารามิเตอร์ และการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดย ขั้นตอนการดำเนินงานแสดงดังภาพที่ 1

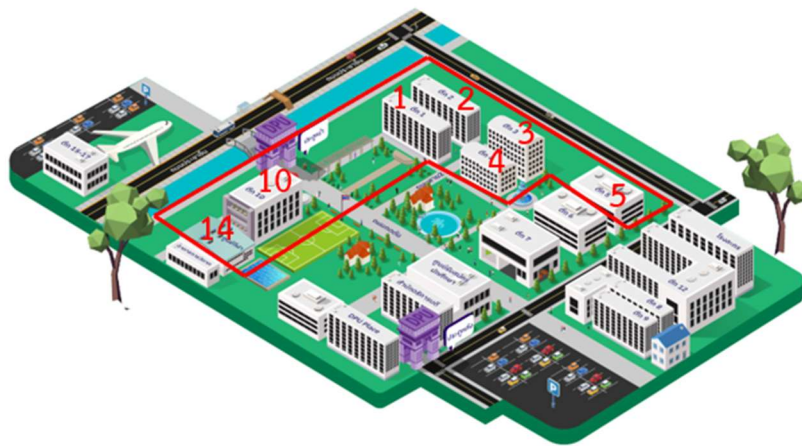


ภาพที่ 1 ขั้นตอนการประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารด้วยแบบจำลองพลังงาน (Energy Retrofit Analysis Workflow)

1. ข้อมูลด้านกายภาพของอาคารและการใช้พลังงานไฟฟ้า

การศึกษาคู่มืออาคารภายในมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตจำนวน 7 อาคาร ได้แก่ อาคาร 1 อาคาร 2 อาคาร 3 อาคาร 4 อาคาร 5 อาคารจอดรถและอเนกประสงค์ และอาคารศูนย์กีฬา ดังแสดงในภาพที่ 2 ข้อมูลที่รวบรวมประกอบด้วยพื้นที่ใช้สอย พื้นที่ปรับอากาศและไม่ปรับอากาศ เวลาเปิดใช้งานอาคาร จำนวนผู้ใช้อาคาร อุปกรณ์ไฟฟ้า ลักษณะและวัสดุของผนังและหลังคา สัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนัง (Window-to-Wall Ratio: WWR) ตลอดจนคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการสร้างแบบจำลอง รายละเอียดข้อมูลทางกายภาพของอาคารแสดงในตารางที่ 1

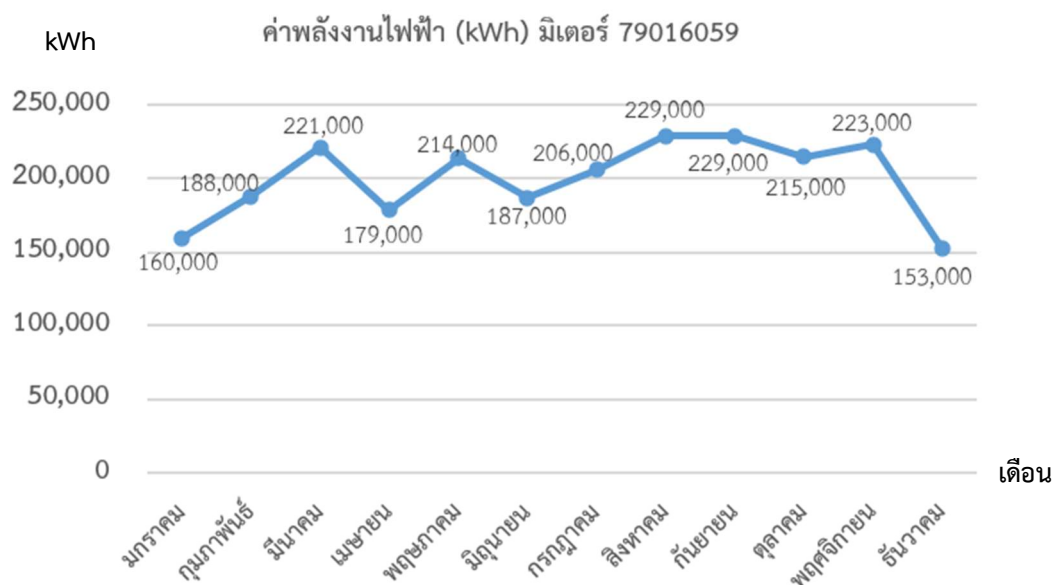
อาคารทั้ง 7 หลังใช้พลังงานไฟฟ้าภายใต้ระบบมิเตอร์เดียวกัน หมายเลข 79016059 ประเภทอัตราค่าไฟฟ้า 4.2.2 (TOU) โดยใช้ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริงรายเดือนตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคมเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง กลุ่มอาคารมีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 2,404,000 kWh/year หรือเฉลี่ย 200,333.33 kWh/month โดยรูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือนแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 The diagram shows the location of buildings within Dhurakij Pundit University

ตารางที่ 1 Physical data of the buildings used to simulate energy consumption in the walls and roofs

Building information	Building 1	Building 2	Building 3	Building 4	Building 5	Parking and multipurpose building	Sports center building
Usable area (m ²)	3590.05	3583.08	7159.43	4257.96	10370.84	23307.40	3642.15
Air-conditioned area (m ²)	3033.03	2400.05	3867.5	2915.59	6076.2	4800.00	2178.00
Non-air-conditioned area (m ²)	476.02	1183.03	3291.93	1342.37	4294.61	18507.4	1464.00
Building walls (materials)	-	-Masonry wall	-Masonry wall	-Masonry wall	-Precast -Glass wall	-Precast -Glass wall	-Masonry wall
-Precast	Masonry wall	-Glass wall	-Glass wall	-Glass wall			-Glass wall
-Masonry wall	-Glass wall						
-Glass wall							
OTTV/RTTV (W/sq.m)	52.60/16	54.80/16	32.40/24	46.60/24	38.90/24	54.20/-	43.60/19.20
Window-to-Wall Ratio (WWR)	North (N)	South (S)	East (E)	West (W)			
	0.234	0.234	0.211	0.211			



ภาพที่ 3 Graph of electricity consumption data for building groups 1-5,10,14 (meter 79016059)

2. การสร้างแบบจำลองพลังงานอาคาร

แบบจำลองพลังงานอาคาร (Building Energy Model: BEM) ของอาคารทั้ง 7 หลังถูกสร้างขึ้นจากข้อมูลทางกายภาพและข้อมูลการใช้งานจริงของอาคาร โดยสร้างรูปทรงเรขาคณิตของอาคารในรูปแบบสามมิติด้วย SketchUp จากนั้นนำข้อมูลเข้าสู่ OpenStudio เพื่อกำหนดพื้นที่ใช้งาน ตารางเวลาใช้งานอาคาร ภาระภายใน และคุณสมบัติทางความร้อนของกรอบอาคาร ก่อนส่งข้อมูลไปยัง EnergyPlus เพื่อคำนวณการใช้พลังงานของอาคาร ตัวแปรด้านกรอบอาคารที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองประกอบด้วยคุณสมบัติทางความร้อนของผนัง กระฉก ฉนวน และหลังคา โดยพิจารณาการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ความหนาแน่น (Density) ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ค่า Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) และค่าการส่งผ่านของกระฉก (Transmittance) ตามชนิดของวัสดุ รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุแสดงในตารางที่ 2 การกำหนดแบบจำลองในลักษณะดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้าง Baseline Model ที่สะท้อนสภาพการใช้งานของกลุ่มอาคารก่อนนำไปตรวจสอบความถูกต้องและใช้เป็นกรณีฐานสำหรับเปรียบเทียบมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 2 Thermal variable properties of the materials used to improve the building frame [13]

List of materials	Thermal Conductivity value (W/m.k)	Density value (kg/m ³)	Specific Heat value (kJ/kg°C)	SHGC value	Transmittance
1. Concrete wall (Precast) 75 mm	0.16	2,350	0.84	-	-
2. Thick clear glass 6 mm	-	-	-	0.72	0.846
3. Heat insulation 65 mm	0.035	24	0.96	-	-
4. Wooden wall 75 mm	0.13	500	1.61	-	-
5. Thick Low-E glass 6 mm	-	-	-	0.55	0.846
6. Double-glazing glass 6 mm	-	-	-	0.74	0.078
7. Solar Tag glass 6 mm	-	-	-	0.41	0.324
8. Clear Float glass	-	-	-	0.82	0.88
9. B4100 film	-	-	-	0.29	0.128
10. Stay Cool roof insulation 150 mm	0.042	12	0.96	-	-

3. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของแบบจำลองก่อนนำไปใช้วิเคราะห์มาตรการปรับปรุงกรอบอาคาร ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation) โดยเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าประจำปีจากการจำลองด้วย OpenStudio และ EnergyPlus (Simulated Energy Use) กับข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริง (Actual Energy Use) ของอาคารทั้ง 7 หลังภายใต้ระบบมิเตอร์เดียวกัน

ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการจำลองและข้อมูลจริงคำนวณตามสมการ (1) [2,14]

$$\text{ความคลาดเคลื่อน (\%)} = \frac{|E_{sim} - E_{actual}|}{E_{actual}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

E_{sim} = พลังงานที่ได้จากแบบจำลอง (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี)

E_{actual} = พลังงานที่ใช้จริง (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี)

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองดำเนินการโดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริง โดยอ้างอิงกรอบแนวทางการตรวจสอบแบบจำลองพลังงานของ ASHRAE Guideline 14-2014 [6] ผลการตรวจสอบใช้สำหรับประเมินความสอดคล้องของแบบจำลองกับการใช้พลังงานจริงก่อนนำแบบจำลองไปใช้เป็นกรณีฐานสำหรับการจำลองมาตรการ M1–M12 ในขั้นตอนต่อไป

4. การกำหนดและจำลองมาตรการปรับปรุงกรอบอาคาร

ภายหลังจากแบบจำลองกรณีฐานผ่านการตรวจสอบความถูกต้องแล้ว ได้กำหนดมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารจำนวน 12 แนวทาง (M1–M12) เพื่อประเมินผลของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางความร้อนของกรอบอาคารต่อการใช้พลังงาน โดยกรณีฐานประกอบด้วยผนังคอนกรีต Precast และ Masonry Wall กระจกใสทั่วไปที่มีค่า SHGC 0.72–0.82 และฉนวนหลังคาหนา 75 mm มาตรการที่ศึกษาจำแนกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ (1) กลุ่มปรับปรุงผนังและช่องเปิด (Wall and Fenestration Retrofit) โดยปรับลดค่า U-value ของผนังและค่า SHGC ของช่องเปิดผ่านการเพิ่มฉนวนผนัง การเปลี่ยนชนิดกระจก และการติดฟิล์มกรองแสง (2) กลุ่มปรับปรุงหลังคา (Roof Insulation Enhancement) โดยเพิ่มความหนาของฉนวนหลังคาจาก 75 เป็น 150 mm เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคา และ (3) กลุ่มมาตรการแบบบูรณาการ (Integrated Envelope Retrofit) โดยรวมการปรับปรุงผนัง ช่องเปิด และหลังคาเข้าด้วยกัน การจำลองแต่ละมาตรการดำเนินการโดยเปลี่ยนเฉพาะพารามิเตอร์ของกรอบอาคารตามเงื่อนไขที่กำหนดใน M1–M12 ขณะที่คงเงื่อนไขพื้นฐานอื่นของแบบจำลองไว้เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานกับ Baseline Model ภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน รายละเอียดค่า U-value ของผนัง ค่า SHGC ของช่องเปิด และค่า U-value ของหลังคาของแต่ละมาตรการแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปเชิงปริมาณของมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารและการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางความร้อน

Measure	Wall U-value (W/m ² K)	Window SHGC	Roof U-value (W/m ² K)	Expected Cooling Load Impact (%)	Literature Support
Baseline	2.13	0.72–0.82	0.56	0	–
M1	0.54	0.72	0.56	5–12	Kumar et al., 2019 [3]
M2	0.54	–	0.56	10–25	Zhang et al., 2020 [4]
M3	2.13	0.72	0.56	3–10	Phdungsilp, 2017 [15]
M4	1.73	0.72	0.56	2–6	Li et al., 2013 [16]
M5	2.13	0.55	0.56	6–15	Zhang et al., 2020 [4]
M6	2.13	≈0.40	0.56	10–20	Kumar et al., 2019 [3]
M7	2.13	0.41	0.56	10–20	Zhang et al., 2020 [4]
M8	2.13	0.82	0.56	0–3	Li et al., 2013 [16]
M9	2.13	0.29	0.56	12–25	Kumar et al., 2019 [3]
M10	0.54	0.29	0.56	15–28	Combined effect

Measure	Wall U-value (W/m ² K)	Window SHGC	Roof U-value (W/m ² K)	Expected Cooling Load Impact (%)	Literature Support
M11	2.13	0.72	0.28	4–10	Kumar et al., 2019 [3]
M12	0.54	0.29	0.28	18–35	Integrated envelope strategy

ช่วงร้อยละของ Expected Cooling Load Impact เป็นค่าประมาณการเชิงกลไกที่อ้างอิงจากงานวิจัยในภูมิอากาศร้อนชื้น ซึ่งรายงานว่าการปรับปรุงค่า U-value ของผนังและหลังคาสามารถลดภาระความเย็นได้ประมาณ 5–15% ของ cooling load ขณะที่การลดค่า SHGC ของกระจกสามารถลดภาระความเย็นได้ในช่วง 10–25% ขึ้นอยู่กับสัดส่วนพื้นที่กระจกและทิศทางอาคาร [3,4,16] ทั้งนี้ค่าร้อยละดังกล่าวใช้เพื่อสนับสนุนการอภิปรายเชิงกลไก (mechanism-based discussion) โดยผลการประหยัดพลังงานที่รายงานในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากผลการจำลองด้วย EnergyPlus เป็นหลัก

5. การประเมินผลการประหยัดพลังงาน การวิเคราะห์ความไว และการลด CO₂e

ผลการจำลองของมาตรการทั้ง 12 แนวทางนำมาเปรียบเทียบกับกรณีฐาน โดยประเมินจาก (1) ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารายปี (kWh/year) (2) ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีฐาน (kWh/year) และ (3) ร้อยละการประหยัดพลังงาน (%) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละมาตรการและระบุมาตรการที่ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงที่สุด นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ด้วย Tornado Diagram เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของพารามิเตอร์ด้านกรอบอาคารต่อการประหยัดพลังงาน โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า SHGC ของช่องเปิด ฉนวนผนัง และฉนวนหลังคา เพื่อระบุพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการลดการใช้พลังงานของกลุ่มอาคาร การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂e) คำนวณจากปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ของแต่ละมาตรการและค่า Emission Factor ของประเทศไทย [11,12] ตามสมการ (2)

$$\text{CO}_2\text{e Reduction} = \text{Energy Saving} \times \text{Emission Factor} \quad (2)$$

โดยที่ CO₂e Reduction มีหน่วยเป็น kgCO₂e/year และ Energy Saving มีหน่วยเป็น kWh/year ผลการประเมินทั้งสามส่วนใช้สำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมาตรการ M1–M12 และระบุมาตรการที่เหมาะสมสำหรับการจัดการพลังงานในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษา

ผลการวิจัย

1. ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลังงาน

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลังงานโดยเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองด้วย OpenStudio และ EnergyPlus กับข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริงของอาคารทั้ง 7 หลัง แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าพลังงานจากแบบจำลองกับค่าการใช้พลังงานจริง

Building	Actual Energy Consumption (kWh/year)	Simulated Energy Consumption(kWh/year)	Margin of Deviation (±%)
อาคาร 1	244,678	252,100	+3.0%
อาคาร 2	177,334	170,900	-3.6%
อาคาร 3	454,762	467,200	+2.7%
อาคาร 4	392,529	386,400	-1.6%
อาคาร 5	617,659	628,700	+1.8%
อาคารจอดรถและเอนกประสงค์	403,931	411,600	+1.9%
อาคารศูนย์กีฬา	83,448	80,900	-3.0%
รวมทั้งหมด	2,404,341	2,397,800	-0.27%

จากตารางที่ 4 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละอาคารอยู่ในช่วง -3.6% ถึง +3.0% ขณะที่ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจริงรวมเท่ากับ 2,404,341 kWh/year และผลการจำลองรวมเท่ากับ 2,397,800 kWh/year คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนรวม -0.27% ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลการใช้พลังงานจริง และสามารถนำแบบจำลองที่ผ่านการตรวจสอบไปใช้เป็นกรณีฐานสำหรับการประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารทั้ง 12 แนวทางในขั้นตอนต่อไป

2. ผลการประหยัดพลังงานจากมาตรการปรับปรุงกรอบอาคาร

ภายหลังจากแบบจำลองพลังงานผ่านการตรวจสอบความถูกต้องแล้ว ได้นำแบบจำลองดังกล่าวมาใช้ประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารจำนวน 12 แนวทาง (M1-M12) โดยเปรียบเทียบผลการใช้พลังงานของแต่ละมาตรการกับกรณีฐานภายใต้เงื่อนไขการใช้งานเดียวกัน ผลการจำลองด้วย OpenStudio และ EnergyPlus พบว่ามาตรการทั้ง 12 แนวทางสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ในช่วง 10,389.52-68,647.10 kWh/year หรือ 0.43-2.86% ของการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของกลุ่มอาคาร ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการประหยัดพลังงานของมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารทั้ง 12 แนวทาง

มาตรการ	Energy Saving (kWh/year)	Energy Saving (%)	CO ₂ e Reduction (kgCO ₂ e/year)
M1	32,221.54	1.34	19,287.81
M2	16,129.71	0.67	9,655.24
M3	10,389.52	0.43	6,219.17

M4	25,519.76	1.06	15,276.13
M5	34,369.47	1.43	20,573.56
M6	54,975.41	2.29	32,908.28
M7	42,313.81	1.76	25,329.05
M8	43,130.42	1.79	25,817.87
M9	50,133.82	2.09	30,010.10
M10	44,438.76	1.85	26,601.04
M11	57,028.06	2.37	34,137.00
M12	68,647.10	2.86	41,092.15

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิผลของแต่ละมาตรการ พบว่า M12 ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงที่สุดเท่ากับ 68,647.10 kWh/year หรือ 2.86% รองลงมาคือ M11 เท่ากับ 57,028.06 kWh/year หรือ 2.37% และ M6 เท่ากับ 54,975.41 kWh/year หรือ 2.29% ตามลำดับ ขณะที่ M3 ให้ผลการประหยัดพลังงานต่ำที่สุดเท่ากับ 10,389.52 kWh/year หรือ 0.43%

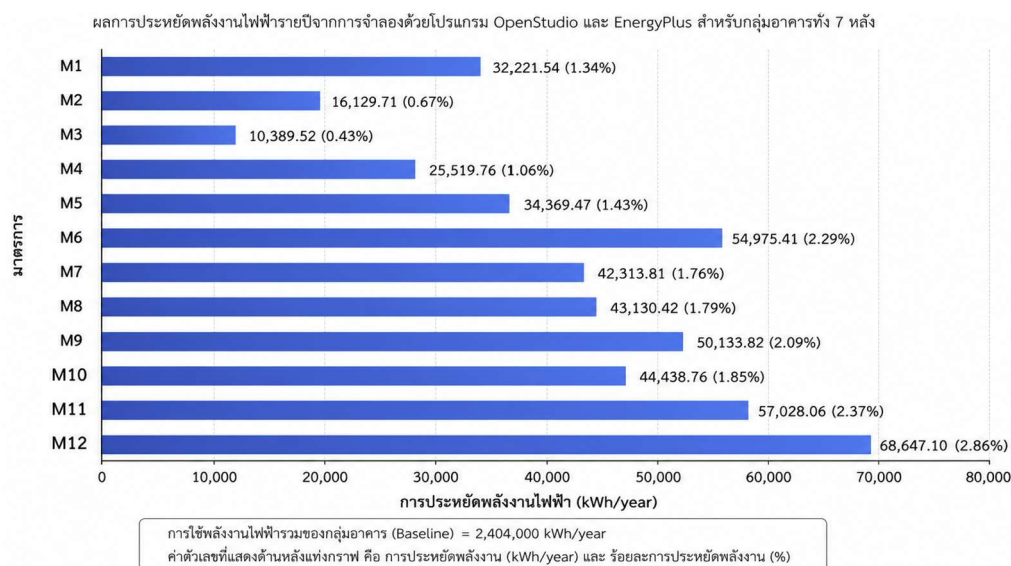
ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพของมาตรการไม่ได้ขึ้นอยู่กับการปรับปรุงองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งเพียงอย่างเดียว แต่สัมพันธ์กับคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุและลักษณะของมาตรการที่นำมาใช้ โดยเฉพาะ M12 ซึ่งเป็นมาตรการแบบบูรณาการ ประกอบด้วย การติดตั้งฉนวนกันความร้อนที่ผนังหนา 65 mm การติดฟิล์มที่กระจก และการเพิ่มความหนาของฉนวนหลังคาเป็น 150 mm สามารถลดการใช้พลังงานได้สูงที่สุด แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการปรับปรุงผนัง ช่องเปิด และหลังคาพร้อมกัน เมื่อเทียบกับมาตรการที่ปรับปรุงองค์ประกอบของกรอบอาคารแยกส่วน

3. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมาตรการ

จากผลการจำลองมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารทั้ง 12 แนวทาง พบว่าประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 10,389.52 ถึง 68,647.10 kWh/year หรือ 0.43–2.86% ของการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของกลุ่มอาคาร ทั้งนี้ M12 ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงที่สุดเท่ากับ 68,647.10 kWh/year (2.86%) รองลงมาคือ M11 เท่ากับ 57,028.06 kWh/year (2.37%) และ M6 เท่ากับ 54,975.41 kWh/year (2.29%) ตามลำดับ เมื่อพิจารณามาตรการด้านผนังและช่องเปิด พบว่าผลการประหยัดพลังงานไม่ได้เพิ่มขึ้นตามลำดับหมายเลขของมาตรการ แต่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่นำมาปรับปรุง โดย M6 สามารถลดการใช้พลังงานได้ 54,975.41 kWh/year (2.29%) ซึ่งสูงกว่า M5, M7 และ M8 ที่สามารถลดได้ 34,369.47 (1.43%), 42,313.81 (1.76%) และ 43,130.42 kWh/year (1.79%) ตามลำดับ ขณะที่ M9 ให้ผลค่อนข้างสูงที่ 50,133.82 kWh/year (2.09%) ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการเลือกคุณสมบัติของวัสดุและช่องเปิดมีผลต่อประสิทธิภาพการลดการใช้พลังงานของกลุ่มอาคาร

สำหรับการปรับปรุงฉนวนหลังคา M11 ซึ่งเพิ่มความหนาของฉนวนจาก 75 เป็น 150 mm สามารถลดการใช้พลังงานได้ 57,028.06 kWh/year หรือ 2.37% ซึ่งเป็นผลการประหยัดสูงเป็นอันดับสองของมาตรการทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าการลดการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีศักยภาพสูงสำหรับกลุ่มอาคารที่ศึกษา

มาตรการ M12 ซึ่งเป็นมาตรการแบบบูรณาการ โดยประกอบด้วย การติดตั้งฉนวนผนังหนา 65 mm การติดฟิล์มที่กระจก และการเพิ่มฉนวนหลังคาเป็น 150 mm ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงที่สุดที่ 68,647.10 kWh/year หรือ 2.86% และสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าได้ 41,092.15 kgCO₂e/year ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ในกรณีศึกษานี้ การปรับปรุงองค์ประกอบของกรอบอาคารร่วมกันให้ผลการลดการใช้พลังงานสูงกว่าการปรับปรุงผนัง ช่องเปิด หรือหลังคาแยกส่วน แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบผลการประหยัดพลังงานของมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารทั้ง 12 แนวทาง (จากการจำลองด้วยโปรแกรม OpenStudio และ EnergyPlus)

เพื่อให้เห็นภาพรวมของประสิทธิภาพมาตรการแต่ละประเภท สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6

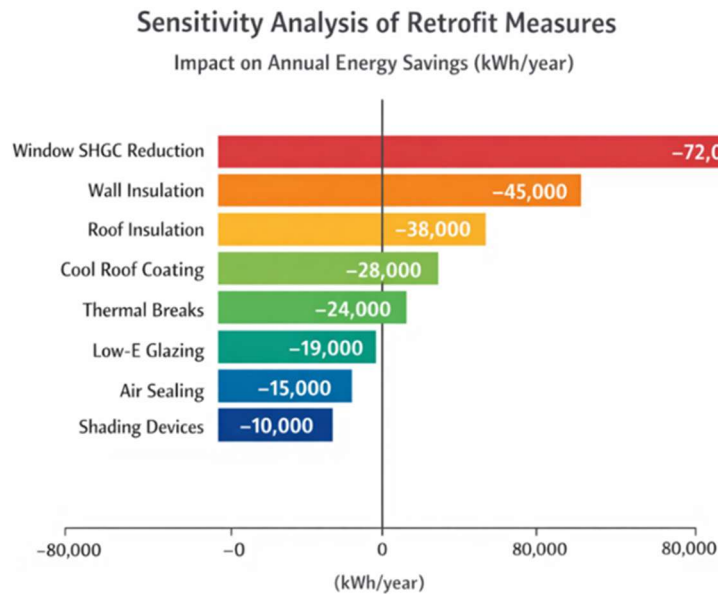
ตารางที่ 6 สรุปผลการประหยัดพลังงานของมาตรการหลัก

Group of Measures	Characteristics	Energy Saving Period (%)	Outcome Trend
ผนัง (Wall)	ลด U-value	0.8–1.8	ปานกลาง
ช่องเปิด (Window/SHGC)	ลด SHGC	1.5–2.5	สูง
หลังคา (Roof)	เพิ่มฉนวน	0.5–1.2	ต่ำ–ปานกลาง
บูรณาการ (Integrated)	รวมทุกองค์ประกอบ	2.5–2.86	สูงที่สุด

จากตารางที่ 6 พบว่ามาตรการลด SHGC มีผลต่อการลดพลังงานมากที่สุดในระดับมาตรการเดียว มาตรการผนังและหลังคามีผลในระดับรอง และการรวมหลายมาตรการให้ผลการประหยัดพลังงานสูงที่สุดอย่างชัดเจน

4. การวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์

การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ดำเนินการเพื่อประเมินอิทธิพลของพารามิเตอร์ด้านกรอบอาคารที่มีต่อการประหยัดพลังงานของกลุ่มอาคาร โดยใช้ Tornado Diagram ในการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของผลการประหยัดพลังงานเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ ค่า Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) ของช่องเปิด ฉนวนผนัง (Wall Insulation) และฉนวนหลังคา (Roof Insulation) ภายใต้เงื่อนไขการจำลองเดียวกัน ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า SHGC ของช่องเปิดเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการประหยัดพลังงานสูงที่สุด โดยมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานประมาณ 72,000 kWh/year รองลงมาคือ ฉนวนผนังประมาณ 45,000 kWh/year และฉนวนหลังคาประมาณ 38,000 kWh/year ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า สำหรับกลุ่มอาคารที่ศึกษา การควบคุมความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ผ่านช่องเปิดมีอิทธิพลต่อการลดการใช้พลังงานมากกว่าการปรับปรุงฉนวนผนังและฉนวนหลังคาเมื่อพิจารณาพารามิเตอร์แยกส่วน แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์รอบอาคารต่อการประหยัดพลังงาน

ผลการวิเคราะห์ความไวยังสอดคล้องกับผลการจำลองมาตรการปรับปรุงรอบอาคาร โดยมาตรการที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติของช่องเปิดร่วมกับองค์ประกอบอื่นของรอบอาคารมีแนวโน้มให้ผลการประหยัดพลังงานสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลของมาตรการไม่ได้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ใดพารามิเตอร์หนึ่งเพียงอย่างเดียว เนื่องจากมาตรการแบบบูรณาการเป็นผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนัง ช่องเปิด และหลังคา ดังเห็นได้จาก M12 ซึ่งเป็นมาตรการแบบบูรณาการและให้ผลการประหยัดพลังงานสูงสุด 68,647.10 kWh/year หรือ 2.86% ดังนั้น ผลการวิเคราะห์ความไวจึงชี้ให้เห็นว่า SHGC เป็นพารามิเตอร์ที่ควรให้ความสำคัญเป็นลำดับแรกในการพิจารณามาตรการปรับปรุงรอบอาคารสำหรับกรณีศึกษา นี้ ขณะที่การปรับปรุงฉนวนผนังและฉนวนหลังคายังคงมีบทบาทสำคัญ และการพิจารณาพารามิเตอร์เหล่านี้ร่วมกันสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการคัดเลือกมาตรการปรับปรุงรอบอาคารที่เหมาะสมในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษา

5. การวิเคราะห์ในระดับรายอาคาร

ผลการวิเคราะห์ในระดับรายอาคารแสดงให้เห็นว่า ศักยภาพในการประหยัดพลังงานของแต่ละอาคารมีความแตกต่างกันตามลักษณะทางกายภาพ พื้นที่ปรับอากาศ และองค์ประกอบของรอบอาคารที่แตกต่างกัน โดยเมื่อพิจารณาผลการจำลองของมาตรการปรับปรุงรอบอาคารในอาคารทั้ง 7 หลัง พบว่าอาคารขนาดใหญ่ เช่น อาคาร 3 และอาคาร 5 มีค่าการลดการใช้พลังงานเชิงปริมาณสูงกว่าอาคารขนาดเล็ก ขณะที่อาคารที่มีสัดส่วนของช่องเปิดและพื้นที่ปรับอากาศแตกต่างกัน มีการตอบสนองต่อมาตรการด้านผนัง ช่องเปิด และหลังคาแตกต่างกันไป

เมื่อพิจารณามาตรการที่ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงสุดในระดับรายอาคาร พบว่า มาตรการแบบบูรณาการ (M12) ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงสุดในทุกอาคารที่ศึกษา โดยเป็นมาตรการที่รวมการเพิ่มฉนวนผนัง การลดค่า SHGC ของช่องเปิด และการเพิ่มฉนวนหลังคา ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการปรับปรุงองค์ประกอบของรอบอาคารร่วมกันมีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานมากกว่าการปรับปรุงองค์ประกอบเพียงส่วนเดียวในบริบทของอาคารกรณีศึกษา อย่างไรก็ตาม ปริมาณพลังงานที่ประหยัดได้ของแต่ละอาคารมีความแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเลือกมาตรการปรับปรุงรอบอาคารควรพิจารณาคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละอาคารร่วมกับผลการจำลอง ไม่ควรกำหนดมาตรการเดียวกันโดยพิจารณาเฉพาะผลรวมในระดับกลุ่มอาคารเท่านั้น การวิเคราะห์ในระดับรายอาคารจึงช่วยสนับสนุนการจัดลำดับความสำคัญของการปรับปรุงอาคาร และช่วยให้การวางแผนจัดการพลังงานในระดับมหาวิทยาลัยมีความเหมาะสมมากขึ้น

6. ผลการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂e)

จากผลการลดการใช้พลังงาน ได้นำมาคำนวณการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂e) โดยใช้ค่า Emission Factor ของประเทศไทย พบว่าแนวโน้มของการลด CO₂e สอดคล้องโดยตรงกับระดับการประหยัดพลังงาน M12 สามารถลดการปล่อยก๊าซได้สูงสุดที่ 41,092 kgCO₂e/year ขณะที่มาตรการเดียวให้ค่าการลดอยู่ในช่วงประมาณ 6,000–34,000 kgCO₂e/year แม้ว่าสัดส่วนการลดพลังงานรวมจะอยู่ในระดับไม่สูงมาก (<3%) แต่เมื่อพิจารณาในระดับกลุ่มอาคาร พบว่าสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างชัดเจนในเชิงปริมาณ และสามารถสนับสนุนเป้าหมายการลดคาร์บอนในระดับองค์กรได้อย่างเป็นรูปธรรม

7. การวิเคราะห์เชิงภาพรวมในระดับกลุ่มอาคาร

การวิเคราะห์ในระดับกลุ่มอาคารภายใต้ระบบมอเตอร์ไฟฟ้าเดียวกันสะท้อนรูปแบบการใช้พลังงานจริงในระดับองค์กร ซึ่งแตกต่างจากการวิเคราะห์อาคารเดี่ยว โดยผลการศึกษาพบว่า 1) การใช้มาตรการพร้อมกันหลายอาคารก่อให้เกิดผลสะสม (cumulative effect) 2) การลด SHGC ส่งผลต่อ Cooling Load อย่างชัดเจน และ 3) การบูรณาการหลายมาตรการให้ผลดีกว่ามาตรการเดี่ยวอย่างชัดเจน ผลลัพธ์ดังกล่าวยืนยันว่า envelope retrofit เป็นกลยุทธ์ด้าน demand-side management ที่มีประสิทธิภาพ และเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในระดับสถาบันการศึกษา

อภิปรายผลการวิจัย

1. ประสิทธิภาพของมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารเชิงกลไก (Mechanism-Based Interpretation)

ผลการจำลองพลังงานแสดงให้เห็นว่ามาตรการที่ 12 ซึ่งเป็นการบูรณาการฉนวนผนังหนา 65 mm การติดฟิล์มกรองแสง และการเพิ่มฉนวนหลังคาเป็น 150 mm ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงสุดที่ 68,647 kWh/year คิดเป็น 2.86% ของการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของกลุ่มอาคาร การลดลงดังกล่าวสะท้อนกลไกการลดการถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร (Envelope Heat Transfer Reduction) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการทำความเย็น (Cooling Load) ของระบบปรับอากาศ ในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น ในบริบทของกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีค่ารังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิภายนอกสูงตลอดปี การลดค่า U-value ของผนังและหลังคา รวมถึงการลดค่า Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) ของกระจก มีผลต่อการลด sensible heat gain อย่างชัดเจน กลไกดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ Kumar [3] และ Zhang [4] ที่รายงานว่าการเพิ่มประสิทธิภาพฉนวนสามารถลดภาระความเย็นได้ 10–25% ของ cooling load ขึ้นอยู่กับลักษณะสัดส่วนกรอบอาคาร (Envelope-to-Floor Ratio) แม้สัดส่วนการประหยัดพลังงานรวมในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 2.86% ของพลังงานรวมทั้งระบบ แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะพลังงานในส่วนของการปรับอากาศ ผลกระทบเชิงสัดส่วนมีแนวโน้มสูงกว่านั้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า envelope retrofit เป็นมาตรการเชิงรับ (passive strategy) ที่มีประสิทธิภาพและไม่เพิ่มภาระพลังงานระบบอื่น

2. การเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า (Comparative Interpretation)

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าในบริบทอาคารสถานศึกษาไทย เช่น Wisawato [17] และ Chuaewong [2] พบว่าระดับการประหยัดพลังงานอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน โดยส่วนใหญ่รายงานผลการลดพลังงานในช่วง 2–6% สำหรับมาตรการ envelope retrofit แบบเดียว อย่างไรก็ตามความแตกต่างสำคัญของงานวิจัยนี้คือการประเมินในระดับ “กลุ่มอาคารหลายอาคารภายใต้ระบบมอเตอร์เดียวกัน” ซึ่งสะท้อนภาพรวมการจัดการพลังงานในระดับองค์กร (Campus-Level Perspective) มากกว่าการวิเคราะห์อาคารเดี่ยว ผลลัพธ์จึงมีความใกล้เคียงกับสภาพการดำเนินงานจริงและสามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจเชิงนโยบายได้มากกว่า นอกจากนี้การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนรวมเพียง -0.27% ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ ซึ่งเป็นประเด็นที่ยังพบไม่มากนักในงานวิจัยด้าน BEM ในประเทศกำลังพัฒนา

3. นโยบายเชิงนโยบายและการลดคาร์บอน (Policy and Carbon Implications)

การลดการใช้พลังงานไฟฟ้า 68,647 kWh/year ส่งผลให้ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าได้ 41,092 kgCO₂e/year ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่ามาตรการเชิงรับของกรอบอาคารสามารถสนับสนุนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับองค์กรได้ หากนำแนวทางดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับกลุ่มอาคารสถานศึกษาในวงกว้าง อาจมีส่วนช่วยสนับสนุนเป้าหมายด้านประสิทธิภาพพลังงานและ Carbon Neutrality 2050 ของประเทศไทย

4. ข้อจำกัดของงานวิจัย

แม้ว่างานวิจัยนี้จะมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามมาตรฐานสากล แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่

- 1) ยังไม่ได้วิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Life Cycle Cost) อย่างละเอียด
- 2) ยังไม่ได้ประเมินคาร์บอนฝังตัว (Embodied Carbon) ของวัสดุฉนวน
- 3) ยังไม่ได้วิเคราะห์ผลกระทบต่อ comfort index เช่น PMV/PPD

ดังนั้นการศึกษารังต่อไปควรบูรณาการการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์และวงจรชีวิตวัสดุ เพื่อประเมินความยั่งยืนในมิติที่ครบถ้วนมากยิ่งขึ้น

5. แนวทางการต่อยอดสู่ NZEB

ผลการศึกษายืนยันว่า envelope retrofit เป็นมาตรการพื้นฐานที่ควรดำเนินการก่อนการติดตั้งระบบพลังงานหมุนเวียน เนื่องจากการลดความต้องการพลังงาน (Energy Demand Reduction) จะช่วยลดขนาดระบบผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ที่ต้องติดตั้งในอนาคต ดังนั้นการบูรณาการมาตรการที่ 12 ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาจทำให้อาคารสามารถก้าวสู่ Near Zero Energy Building (NZEB) ได้ในเชิงปฏิบัติจริง

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้สร้างและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลังงานอาคารสำหรับกลุ่มอาคารสถานศึกษาจำนวน 7 อาคาร ภายใต้ระบบมิเตอร์ไฟฟ้าเดียวกันของมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตฯ โดยใช้ OpenStudio ร่วมกับ EnergyPlus ในการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้า ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริงพบค่าความคลาดเคลื่อนรวม -0.27% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลการใช้พลังงานจริงในระดับรายปี โดยการตรวจสอบแบบจำลองอ้างอิงกรอบแนวทางของ ASHRAE Guideline 14-2014 ก่อนนำแบบจำลองไปใช้เป็นกรณีฐานในการประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคาร ผลการประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารจำนวน 12 แนวทางพบว่า มาตรการแบบบูรณาการ (M12) ซึ่งประกอบด้วย การเพิ่มฉนวนผนังหนา 65 mm การลดค่า SHGC ของช่องเปิด และการเพิ่มความหนาของฉนวนหลังคาเป็น 150 mm ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงสุด โดยสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 68,647 kWh/year หรือ 2.86% และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าได้ 41,092 kgCO₂e/year นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์แสดงให้เห็นว่า ค่า SHGC ของช่องเปิดเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการประหยัดพลังงานสูงสุด รองลงมาคือฉนวนผนังและฉนวนหลังคา ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองที่แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงองค์ประกอบของกรอบอาคารร่วมกันมีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานมากกว่าการพิจารณาองค์ประกอบแยกส่วนในบริบทของกลุ่มอาคารที่ศึกษา

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การใช้แบบจำลองพลังงานที่ตรวจสอบกับข้อมูลการใช้พลังงานจริงสามารถเป็นเครื่องมือสนับสนุนการประเมินและคัดเลือกมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษาได้ แม้ว่าการประหยัดพลังงานสูงสุดของกรณีศึกษานี้จะคิดเป็น 2.86% ของการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม แต่ผลการลดพลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าในระดับกลุ่มอาคารสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการวางแผนจัดการพลังงานในระดับมหาวิทยาลัยได้ ดังนั้น การปรับปรุงกรอบอาคารจึงเป็นหนึ่งในมาตรการเชิงรับที่สามารถนำมาใช้เพื่อลดความต้องการพลังงาน

ของอาคาร และเป็นพื้นฐานสำหรับการพิจารณามาตรการด้านพลังงานอื่นเพิ่มเติมเพื่อสนับสนุนการพัฒนาอาคารสถานศึกษา
สู่ Near Zero Energy Building (NZEB) และเป้าหมาย Carbon Neutrality 2050 ของประเทศไทย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี และฝ่ายซ่อมบำรุงอาคารและ
ยานพาหนะ ที่สนับสนุนข้อมูลด้านอาคาร ข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้า รวมถึงข้อมูลอื่น ๆ ที่เป็นประโยชน์สำหรับการทำวิจัยใน
ครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Srimuang K, Sreshthaputra A, Pinich S. Evaluation of Energy Conservation Measures and Greenhouse Gas Emission Reduction in Office and Residential Condominium Buildings Using Marginal Abatement Cost Curves. *Sarasatr*. 2022; 5(3): 509-522.
- [2] Chuaewong T, Vorarat S, Rittidatch P. Energy improvement of building frames in government office buildings using energy modeling: Case study of Bang Mae Nang Municipality Office. *EAU Heritage J Sci Technol*. 2024 May-Aug; 18(2): 92-106.
- [3] Kumar R, Suman BM, Sharma A. Thermal performance of building envelopes and energy saving potential of insulation materials under warm climatic conditions. *Energy Build*. 2019; 197: 129-144.
- [4] Zhang Y, Zhou X, Lin B. Energy performance optimization of educational buildings in tropical climates using envelope design strategies. *Appl Energy*. 2020; 268: 114956.
- [5] González-Torres M, Pérez-Lombard L, Coronel JF, Maestre IR, Yan D. A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. *Energy Rep*. 2022; 8: 626-637.
- [6] *Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*, ASHRAE Guideline 14-2014, ASHRAE, Atlanta, GA, USA, 2014.
- [7] Brackney L, Parker A, Macumber D, Benne K. *Building Energy Modeling with OpenStudio*. Cham: Springer; 2018.
- [8] Nakkorn N, Vorarat S, Phdungsilp A. Development of Integrated Building Energy Modeling in Pattaya City, Thailand. *EAU Heritage J Sci Technol*. 2023; 17(3): 56-71.
- [9] Rittidatch P, Phdungsilp A, Vorarat S. Evaluation of Energy Renovation Measures of the Building Envelope in Educational Building Using Building Energy Modeling: A Case Study in Dhurakij Pundit University. *J Adv Dev Eng Sci*. 2023; 11(31): 128-142.
- [10] Rittidatch, P., Phdungsilp, A., & Vorarat, S. Evaluation of building envelope retrofitting measures in educational buildings using energy modeling: A case study at Dhurakij Pundit University. *Pathumwan Academic Journal*. 2021; 11(31): 128-142.

- [11] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO). Emission Factor (CFO). Bangkok: TGO; 2024.
p. 2.
- [12] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO). Emission Factor Database, Version 2.
Bangkok: TGO; 2024. Available from: <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/>
- [13] Rittidatch P. Modelling of Energy Demand and Supply Towards Carbon Neutrality in Dhurakij Pundit University, Thailand [Master's thesis]. Bangkok: Dhurakij Pundit University; 2023.
- [14] Anusakdakul W. Guidelines for Development of Net Zero Energy Buildings for Governmental Office Buildings in Thailand [Master's thesis]. Bangkok: Silpakorn University; 2016.
- [15] Phdungsilp A. Projections of Energy Use and Carbon Emissions for Bangkok, Thailand. J Rev Glob Econ. 2017 Jun 9; 6: 248-257.
- [16] Li DHW, Yang L, Lam JC. Impact of climate change on energy use in the built environment: A review. Energy. 2013; 61: 106-114.
- [17] Wisawato K, Phdungsilp A. Analysis of energy performance improvements and economic impacts for discovery learning libraries of Bangkok Metropolitan Administration. Proceedings of the 5th International Electrical Engineering Congress (IEECON); 2017 Mar 8-10; Pattaya, Thailand. p. 277-280.
DOI: 10.1109/IEECON.2017.8075786.