

การประเมินผลมาตรการประหยัดพลังงานและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก
ในอาคารสำนักงานและคอนโดมิเนียมพักอาศัย ด้วยการประเมินต้นทุนส่วนเพิ่มสุทธิ
ของการลดการปล่อยคาร์บอน

Evaluation of Energy Conservation Measures and Greenhouse Gas
Emission Reduction in Office and Residential Condominium Buildings
Using Marginal Abatement Cost Curves

รับบทความ 08/05/2022
แก้ไขบทความ 05/06/2022
ยอมรับบทความ 06/06/2022

กันตพงศ์ ศรีเมือง อรรถนัย เศรษฐบุตร สริน พินิจ
ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Kantaphong Srimuang, Atch Sreshthaputra, Sarin Pinich
Department of Architecture, Faculty of Architecture, Chulalongkorn University
kantaphong1872@gmail.com, Atch.s@chula.ac.th, Sarin.pi@chula.ac.th

บทคัดย่อ

การใช้พลังงานของอาคารในช่วงการก่อสร้างและช่วงใช้งานอาคาร เป็นปัจจัยสำคัญที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้กับชั้นบรรยากาศโลก งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เพื่อประเมินความคุ้มค่าของมาตรการที่มีในปัจจุบัน ในแง่ของสัดส่วนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคาร

งานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลอาคารสำนักงานและอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัย ในกรุงเทพมหานคร เพื่อใช้เป็นแบบอาคารอ้างอิง โดยศึกษามาตรการในกลุ่มการออกแบบอาคารให้สอดคล้องกับสิ่งแวดล้อม กลุ่มวัสดุฉนวนผนัง กลุ่มวัสดุฉนวนหลังคา กลุ่มพลังงานทดแทน กลุ่มประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศ รวมถึงกลุ่มระบบไฟฟ้าแสงสว่าง โดยศึกษาจากฐานข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ICE Version 2 และค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ปีพ.ศ. 2563 ของประเทศไทย จากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก โดยนำเสนอการประเมินต้นทุนส่วนเพิ่มสุทธิของการลดการปล่อยคาร์บอน

จากการศึกษาในช่วงอายุอาคาร 60 ปี พบว่า ในอาคารสำนักงาน มาตรการมีประสิทธิภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยระบบควบคุมแสงธรรมชาติอัตโนมัติ เป็นทางเลือกที่คุ้มค่ามากที่สุด เนื่องจากสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลงร้อยละ 14.77 และมีค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคารลดลงร้อยละ 13.85 ในอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัย มาตรการมีประสิทธิภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ยกเว้นกลุ่มวัสดุฉนวนหลังคา ส่วนการติดตั้งโซล่าเซลล์เป็นปริมาณ 20% ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในอาคาร เป็นทางเลือกที่คุ้มค่ามากที่สุด เนื่องจากสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลงร้อยละ 18.17 และมีค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคารลดลงร้อยละ 7.17

คำสำคัญ: การประเมินต้นทุนส่วนเพิ่มสุทธิของการลดการปล่อยคาร์บอน คาร์บอนฟุตพริ้นท์ พลังงาน วัสดุอาคาร ค่าใช้จ่ายตลอดช่วงอายุอาคาร

Abstract

Energy consumption during the Cradle-to-Gate and Use-Phase is still the main factor in the production of CO₂ in the atmosphere. This research aims to study the effectiveness of various energy conservation measure related to the building to assess the cost-effectiveness of existing energy conservation measures in terms of the proportion of CO₂ emission reductions to life cycle costs.

Also, data collected on office and residential condominium buildings in Bangkok was as a baseline to study the energy conservation measures building design : orientation, wall insulation, roof insulation, solar cell, air conditioning system efficiency, electrical systems, and lighting. Estimation of greenhouse gas emission factors based on ICE Version 2, and Thailand Greenhouse Gas Management Organization in 2020 by using Marginal Abatement Cost Curves.

Among studying during the age of the 60 years building, it was found that in the office building, all energy conservation measures are effective to reduce CO₂ emissions. Automatic Daylighting Controls is the most cost-effective option due to the ability to reduce the amount of CO₂ emissions in the amount of 14.77% and reduce life cycle costs by 13.85%. In a residential condominium building, all energy conservation measures are effective in reducing CO₂ emission except the roof insulation. Energy conservation measure to install solar cells 20% of the total energy used in the building, is the most cost-effective choice. It is the most cost-effective option as reduce CO₂ emissions by 18.17% and reduce life cycle costs by 7.17%.

keywords: *Marginal abatement cost curve, Carbon Footprint, Embodied Energy, Building Materials, Life Cycle Cost*

บทนำ

จากสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโลกที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้การประชุมรัฐภาคีอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (UNFCCC) สมัยที่ 26 (COP 26) มีการหารือเกี่ยวกับ แนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ได้ 45% ภายในปีค.ศ. 2030 และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์ (Net Zero carbon) ภายในปีค.ศ. 2050 เพื่อให้สอดคล้องกับข้อตกลงดังกล่าว ประเทศไทยจึงตั้งเป้าที่จะลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปีค.ศ. 2030 โดยมีเป้าหมายที่จะมุ่งไปสู่การปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้เหลือศูนย์โดยเร็วที่สุด และมุ่งสู่ความเป็นกลางของคาร์บอน (carbon neutrality) ภายในปีค.ศ. 2065 (United Nations Development Programme, 2021)

อย่างไรก็ดี ในปีพ.ศ. 2564 Climate Action Tracker หรือ CAT ซึ่งเป็นโครงการภายใต้ความร่วมมือขององค์กรวิจัยนานาชาติเพื่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสภาพภูมิอากาศ แสดงให้เห็นว่า ผลการดำเนินงานด้านสภาพอากาศของประเทศไทย ยังไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากมีแนวโน้มของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มสูงขึ้นทุก ๆ ปี และคาดว่าจะยังไม่บรรลุเป้าหมายภายใต้อนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หากประเทศไทยไม่ดำเนินการเพิ่มเติมเกี่ยวกับนโยบายในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การก่อสร้างและการใช้สอยอาคารเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมาก ตั้งแต่การขุดค้นหาวัตถุดิบ การแปรรูปวัตถุดิบ การขนส่ง รวมถึงกิจกรรมการก่อสร้างจนสำเร็จออกมาเป็นอาคารหนึ่งหลัง หลังจากอาคารก่อสร้างแล้วเสร็จ การใช้พลังงานตลอดช่วงชีวิตของอาคารยังต้องใช้พลังงาน การก่อสร้างอาคารจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศโลก โดยคิดเป็นร้อยละ 30 ของก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศโลก ตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบในการก่อสร้าง (cradle-to-gate) การก่อสร้าง (gate-to-gate) และการใช้งานอาคาร (use-phase) (อรรถน ศรีสมบูรณ์, 2555)

ประสิทธิภาพของมาตรการต่าง ๆ เป็นปัจจัยสำคัญในการนำไปสู่การแก้ปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เมื่อพิจารณาควบคู่กับการประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ จะทำให้เห็นถึงลำดับความคุ้มค่าในแต่ละมาตรการ ในการสรุปผลจึงใช้วิธีการประเมินต้นทุนส่วนเพิ่มสุทธิของการลดการปล่อยคาร์บอน (Marginal Abatement Cost Curve) หรือที่เรียกว่า MACC ซึ่งเป็นวิธีการประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ ที่ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกในปีค.ศ. 1992 โดย Alan Kevin Meier และกลายเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ด้านสภาพภูมิอากาศ ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย (Kesicki & Strachan, 2011)

จากที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้เห็นถึงปัญหาและความสำคัญของก๊าซเรือนกระจก ซึ่งส่งผลให้เกิดการศึกษามาตรการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับอาคารตามมา โดยในแต่ละมาตรการ ส่งผลต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและลำดับความคุ้มค่าที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ จึงนำไปสู่การตั้งคำถามในงานวิจัยว่า “มาตรการใด ที่ส่งผลต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมีความคุ้มค่ามากที่สุด” ซึ่งเป็นการสนับสนุนแนวทาง การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย โดยเลือกวิธีการนำเสนอผ่าน MACC ในการเปรียบเทียบและนำเสนอผล รวมถึงได้มีการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของมาตรการ ในอาคารที่มีการใช้งานแตกต่างกัน โดยศึกษาในอาคารสำนักงาน และอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงที่มาและความสำคัญของมาตรการ ที่มีผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของอาคารสำนักงานและอาคารชุดพักอาศัย
2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพด้านการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและค่าใช้จ่ายตลอดช่วงอายุอาคาร ในแต่ละมาตรการกับแบบอาคารอ้างอิง (baseline) ในช่วงอายุอาคาร 20 ปี 40 ปี และ 60 ปี โดยนำเสนอด้วยวิธีการประเมินต้นทุนส่วนเพิ่มสุทธิของการลดการปล่อยคาร์บอน (MACC)
3. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและค่าใช้จ่ายตลอดช่วงอายุอาคาร ในประเภทอาคาร ที่มีการใช้งานแตกต่างกัน

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาในอาคารสำนักงานและอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัยที่มีพื้นที่ไม่เกิน 10,000 ตร.ม. และสูงไม่เกิน 23 ม. ในกรุงเทพมหานคร
2. ศึกษาต้นทุนในการลดก๊าซเรือนกระจก เฉพาะในช่วงการก่อสร้าง (cradle-to-gate) และช่วงใช้งานอาคาร (use-phase) โดยไม่รวมการรื้อถอนทำลาย (disposal)

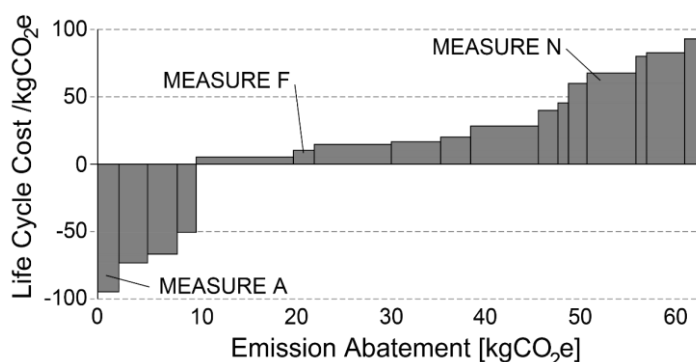
การทบทวนวรรณกรรม

แนวคิดเกี่ยวกับ MACC

จากการศึกษางานวิจัยของ Peng, Fan และ Xu (2016) ใช้วิธีประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ โดยแสดงออกมาในรูปแบบของ MACC ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (1)

$$\text{CO}_2 \text{ emissions abatement cost} = \frac{\text{Incremental full cost of abatement option to baseline option}}{\text{CO}_2 \text{ emission reduction of abatement option to baseline option}} \quad (1)$$

MACC ถูกกำหนดเป็นแผนภาพที่แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบระหว่างต้นทุน และปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยแสดงค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคาร (life cycle cost) ในแกน Y ซึ่งแสดงเป็นสกุลเงินที่นำมาวิเคราะห์ และแสดงปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแกน X ซึ่งแสดงออกมาเป็นหน่วยกิโลกรัมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (kgCO_2e) โดยข้อมูลของแต่ละชุด แสดงถึงมาตรการที่นำมาใช้ในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเรียงตามลำดับความคุ้มค่าของแต่ละมาตรการ (Kesicki & Strachan, 2011) ลักษณะของ MACC ที่แสดง life cycle cost/ kgCO_2e เป็นบวก หมายถึงมี eco-efficiency ต่ำ หากแสดงเป็นลบ หมายถึงมี eco-efficiency สูง แสดงในภาพ 1



ภาพ 1 แนวความคิดในการนำเสนอผลการประเมิน โดยใช้ MACC

การศึกษางานวิจัยของ ณัฏฐ์วิภา รุ่งเรืองธนาผล (2560) เป็นตัวอย่างในการศึกษามาตรการประหยัดพลังงาน ในอาคารพักอาศัย ซึ่งได้ศึกษาในด้านการลดก๊าซเรือนกระจกจากวัสดุและการใช้งานของอาคาร รวมถึงต้นทุนในการลดก๊าซเรือนกระจก โดยการเปลี่ยนวัสดุผนังเป็นคอนกรีตมวลเบา เปลี่ยนหลังคาเป็นกระเบื้องดินเผา เปลี่ยนกระจกเป็นกระจกตัดแสง และใส่ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว เข้าไปเพิ่มเติมที่ฝ้าเพดาน จากการศึกษาพบว่า อาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัย 4 ชั้น มีมูลค่าการก่อสร้างเพิ่มขึ้นจากแบบอาคารอ้างอิงร้อยละ 6.53 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลงร้อยละ 7.11 ต่อปี

การศึกษางานวิจัยของ Timilsina et al. (2017) เป็นตัวอย่างในการศึกษาต้นทุนของการลดก๊าซเรือนกระจก ในประเทศจอร์เจีย และอาร์เมเนีย โดยการนำ MACC เป็นเครื่องมือในการประเมิน สำหรับการศึกษาในอาคารพาณิชย์และอาคารพักอาศัย จากการศึกษาพบว่า การปรับเปลี่ยนดวงโคม จากหลอดไส้เป็นหลอดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เป็นทางเลือกที่คุ้มค่าที่สุด เมื่อเทียบกับมาตรการอื่น ๆ เช่น วัสดุฉนวนผนัง วัสดุฉนวนหลังคา เป็นต้น

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า มีการนำ MACC มาใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินด้านสภาพภูมิอากาศอย่างแพร่หลาย เช่น การประเมินแนวโน้มปัญหาก๊าซเรือนกระจกของโลก แต่การใช้ประเมินมาตรการที่เกี่ยวข้องกับอาคาร ยังไม่ครอบคลุมในทุก ๆ ด้าน จึงนำประเด็นดังกล่าวมาเป็นแนวทางในการศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้

หลักการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

คณะกรรมการระหว่างรัฐบาลด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate [IPCC]) (2006) ได้จัดทำคู่มือในการคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อนำไปปรับใช้อย่างหลากหลายและปรับเปลี่ยนตัวแปรได้ เพื่อให้แต่ละประเทศที่มีความแตกต่างกันในด้านของข้อมูล สามารถใช้มาตรฐานเดียวกันในการคำนวณวิธีการคำนวณจึงถูกพัฒนาให้อยู่ในรูปแบบของสมการที่ (2) ดังนี้

$$Greenhouse = Activity \times Emission Factor(EF) \quad (2)$$

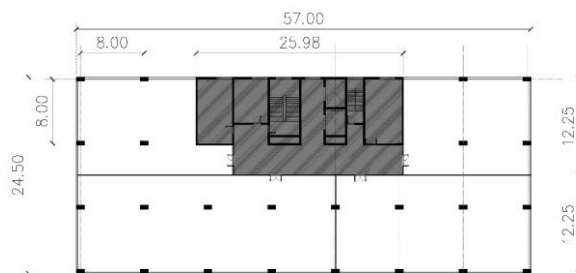
ข้อมูลกิจกรรม (activity data) เป็นค่าที่ได้มาจากกิจกรรมซึ่งก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกประเภทต่าง ๆ ซึ่งข้อมูลกิจกรรมนี้อาจจะมีหน่วยที่แตกต่างกัน การนำข้อมูลกิจกรรมมาใช้นั้น จึงจะต้องนำมาแปลงหน่วย เพื่อให้สามารถนำมาใช้คำนวณในสมการข้างต้นได้ ในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (emission factor) เป็นค่าที่แสดงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยของข้อมูลกิจกรรม ซึ่งค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับกิจกรรมการผลิตพลังงานของแต่ละประเทศ

วิธีการคำนวณหาปริมาณก๊าซเรือนกระจก ใช้เทียบกับฐานข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ICE Version 2 ของปี.ศ. 2011 เนื่องจากฐานข้อมูลดังกล่าวสำหรับประเทศไทยยังไม่มีการจัดทำและเปิดเผยอย่างเป็นทางการ การแปลงค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า เป็นค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ใช้ค่าที่จัดทำโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกแห่งประเทศไทย (อรรถน์ เศรษฐบุตร, 2555) ซึ่งในปี.ศ. 2563 มีการกำหนดค่า emission factor เท่ากับ 0.5986 kgCO₂e/kWh (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกแห่งประเทศไทย, 2564) ทั้งนี้ ได้กำหนดให้พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานเชื้อเพลิงความร้อนมีค่า 1 Mj เท่ากับ 0.28 kWh (สุธรรม ปทุมสวัสดิ์, 2553)

วิธีดำเนินการวิจัย

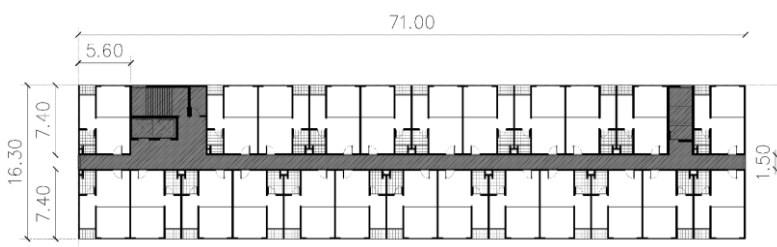
การศึกษาลักษณะแบบอาคารอ้างอิงของสำนักงานและอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัย

งานวิจัยนี้ สร้างแบบอาคารอ้างอิง จากค่าเฉลี่ยสัดส่วนของอาคาร (กว้างxยาว) สัดส่วนพื้นที่ Core ต่อพื้นที่ขาย และสัดส่วนพื้นที่ของหน้าต่าง และ/หรือของผนังโปร่งแสงต่อพื้นที่ผนังทั้งหมด (Window to Wall Ratio) หรือที่เรียกว่า WWR จากการเก็บข้อมูลแบบอาคารสำนักงานในกรุงเทพมหานครในสื่ออินเทอร์เน็ตจำนวน 32 อาคาร และแบบอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัยจำนวน 21 อาคาร ซึ่งเป็นอาคารที่มีการก่อสร้างในช่วงปีพ.ศ. 2551-2563 พบว่าผังอาคารส่วนใหญ่ มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยพบในอาคารสำนักงาน ร้อยละ 56.30 และในอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัย ร้อยละ 61.90



ภาพ 2 แบบแปลนอาคารสำนักงาน อ้างอิงในการศึกษา

สำหรับการศึกษาในแบบอาคารสำนักงานอ้างอิง ใช้การจำลองสภาพแวดล้อมในการศึกษาให้เป็นอาคารที่มี WWR ร้อยละ 60 สัดส่วนของอาคารเป็น 1 ต่อ 2.3 สัดส่วนพื้นที่ Core ต่อพื้นที่ชายเป็น 1 ต่อ 4.5 ระบบปรับอากาศเป็นระบบแบบแยกส่วน (split type) มีการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 25°C พลังงานไฟฟ้าแสงสว่างเท่ากับ 10.00 วัตต์/ตร.ม. (กระทรวงพลังงาน, 2564) พลังงานไฟฟ้าอุปกรณ์สำนักงานเท่ากับ 16.00 วัตต์/ตร.ม. (อรุณจัน เศรษฐบุตร, 2555) มีตารางการใช้งานทุกวันจันทร์-ศุกร์ เวลา 7.00 น.-22.00 น. และไม่มีการใช้งานในวันเสาร์-อาทิตย์ รวมถึงวันหยุดนักขัตฤกษ์ แสดงในภาพ 2



ภาพ 3 แบบแปลนอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัย อ้างอิงในการศึกษา

สำหรับการศึกษาในแบบอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัยอ้างอิง ใช้การจำลองสภาพแวดล้อมในการศึกษาให้เป็นอาคารที่มี WWR ร้อยละ 40 สัดส่วนของอาคารเป็น 1 ต่อ 4.3 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่อ้างอิงถึงระยะห่างของบันไดหนีไฟตามกฎหมาย สัดส่วนพื้นที่ Core ต่อพื้นที่ชายเป็น 1 ต่อ 6.3 ระบบปรับอากาศเป็นระบบแบบแยกส่วน มีการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 25 °C พลังงานไฟฟ้าแสงสว่างเท่ากับ 8.13 วัตต์/ตร.ม. พลังงานไฟฟ้าอุปกรณ์สำนักงานเท่ากับ 8.96 วัตต์/ตร.ม. (อภิญา บุญมา, 2555) มีตารางการใช้งานทุกวัน ตลอด 24 ชม. แสดงในภาพ 3

การเลือกมาตรการประหยัดพลังงาน

การเลือกมาตรการในการศึกษา เลือกจากมาตรการที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน และยังมีแนวโน้มการใช้งานต่อไปในอนาคต โดยแบ่งออกเป็น 6 กลุ่ม ประกอบด้วย

1. กลุ่มการออกแบบอาคารให้สอดคล้องกับสิ่งแวดล้อม (orientation) ศึกษาในมาตรการที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคารให้สัมพันธ์กับทิศทางของแสงแดด การติดตั้งแผงกันแดด และการปรับลดอัตราส่วนพื้นที่ผนังโปร่งแสงต่อพื้นที่ผนังทั้งหมด (Window to Wall Ratio : WWR)
2. กลุ่มวัสดุฉนวนผนัง (Wall insulation) ศึกษาในมาตรการปรับเปลี่ยนวัสดุผนังของอาคารอ้างอิงเดิม ซึ่งเป็นผนังสำเร็จรูป (precast wall) เป็นผนังคอนกรีตมวลเบาก่อชั้นเดียว และก่อ 2 ชั้น มีช่องอากาศตรงกลาง การปรับเปลี่ยนวัสดุกระจก เป็นกระจกฉนวนกันความร้อน (IGU) รวมถึงการเพิ่มฉนวนให้กับผนังเดิม ในมาตรการเพิ่มฉนวนใยแก้ว และมาตรการเพิ่มวัสดุไม้ปาลูกกรทุบผนังภายนอกอาคาร
3. กลุ่มวัสดุฉนวนหลังคา (Roof insulation) ศึกษาในวัสดุฉนวนที่มีการใช้งานทั่วไป ติดตั้งเหนือหลังคาของอาคารอ้างอิงเดิม ประกอบด้วย ฉนวนใยแก้ว ฉนวนโพนโพลียูรีเทน ฉนวนโพนโพลีเอทิลีน และฉนวนโพนโพลีสไตรีน
4. กลุ่มพลังงานทดแทน (Solar cell) ศึกษาพลังงานทดแทนจากโซลาร์เซลล์ ในปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอาคาร
5. กลุ่มประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศ (Cooling system) ศึกษาโดยการปรับเปลี่ยนระบบปรับอากาศเดิมของอาคารอ้างอิง เป็นระบบปรับอากาศประหยัดไฟเบอร์ 5 ที่มีประสิทธิภาพแตกต่างกัน รวมถึงการใช้โซลาร์เซลล์ ผลิตพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบปรับอากาศโดยตรง (DC Solar air)
6. กลุ่มระบบไฟฟ้าแสงสว่าง (Lighting) ศึกษาในมาตรการ ที่เกี่ยวกับการติดตั้งเซนเซอร์ควบคุมแสงอัตโนมัติ และเซนเซอร์ตรวจจับการใช้งาน รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของหลอดไฟให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในช่วงการก่อสร้าง

จากแบบอาคารอ้างอิง สามารถนำไปศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในช่วงการก่อสร้าง โดยการถอดปริมาณวัสดุของอาคาร และใช้ปริมาณวัสดุแต่ละชนิด เทียบกับฐานข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ICE Version 2 ของมหาวิทยาลัยบาร์ท ประเทศอังกฤษ ซึ่งจะได้เป็นพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานเชื้อเพลิงความร้อน จากนั้นแปลงเป็นค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า แล้วจึงแปลค่าเป็นปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยการเทียบกับค่า emission factor ของไทย ซึ่งจะได้ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดของวัสดุก่อสร้าง ในส่วนของมาตรการที่เกี่ยวข้องกับพลังงานทดแทน จะอ้างอิงถึงการศึกษาของ Chris (2021) ซึ่งระบุว่า กระบวนการผลิตโซลาร์เซลล์ 1 kW ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 500-600 kgCO₂e ในส่วนของไม้เป็นส่วนประกอบในการตกแต่งเปลือกอาคาร ใช้ค่าเฉลี่ยในการดูดซับก๊าซเรือนกระจก 1.65 kgCO₂e/kg (Kaltimber, 2017)

การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในช่วงใช้งานอาคาร

จากแบบอาคารอ้างอิง สามารถนำไปศึกษาการใช้พลังงาน ในอาคารช่วงใช้งานอาคาร ผ่านโปรแกรม VisualDOE 4.0 โดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร การแทนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของวัสดุในโปรแกรม ใช้วิธีการคำนวณจากสมการการถ่ายเทความร้อน ของประกาศกระทรวง จากนั้นจึงทำการจำลองพลังงาน (simulation) โดยหาค่าเฉลี่ยใช้พลังงานไฟฟ้าจากการหมุนอาคารทั้ง 8 ทิศ และนำไปเทียบกับค่า emission factor ของไทย เพื่อหาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดจากการใช้พลังงานไฟฟ้า ในส่วนของมาตรการที่เกี่ยวข้องกับพลังงานทดแทน จะศึกษาโดยใช้ฐานข้อมูลของ PVWATTS ซึ่งเป็นระบบประมาณค่าการผลิตกระแสไฟฟ้าและค่าใช้จ่าย ที่ทำงานผ่าน <http://pvwatts.nrel.gov> ซึ่งจัดทำโดย NREL : National Renewable Energy Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา ในส่วนมาตรการที่เกี่ยวข้องกับ Occupancy Sensor จะอ้างอิงจาก ASHRAE Standard 90.1 2010

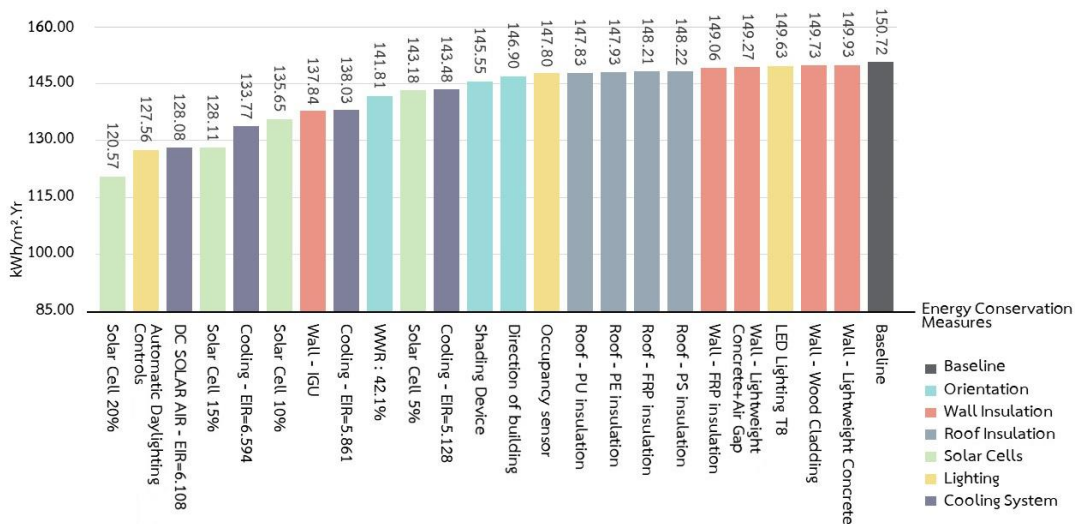
การคำนวณต้นทุน

การศึกษาราคาวัสดุก่อสร้างและค่าก่อสร้างในช่วงการก่อสร้าง อ้างอิงจาก แนวทางวิธีปฏิบัติและรายละเอียดประกอบการถอดแบบคำนวณราคากลางงานก่อสร้าง กรมบัญชีกลาง ปีพ.ศ. 2560 บัญชีราคาก่อสร้างและค่าแรงกระทรวงศึกษาธิการ ปีพ.ศ. 2564 และราคาจากผู้ผลิต ปีพ.ศ. 2564 ในส่วนของอัตราค่าไฟในช่วงการใช้งานอาคาร ของอาคารที่ประกอบกิจการขนาดกลาง มีอัตราปกติ ของค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.1471 บาท/หน่วย (การไฟฟ้านครหลวง, 2561)

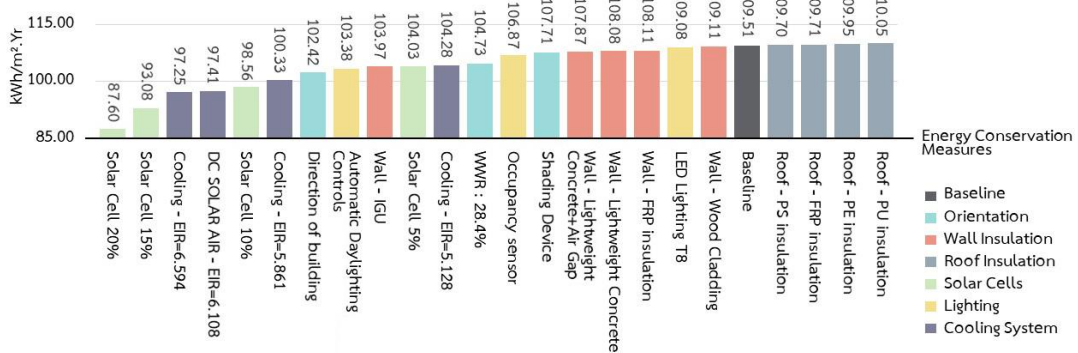
ผลการศึกษา

ผลจากการจำลองพลังงานของแบบอาคารอ้างอิง ใน 1 ปี พบว่า อาคารสำนักงานและอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัย มีสัดส่วนการใช้พลังงานที่ต่างกัน โดยในอาคารสำนักงาน มีค่าดัชนีการใช้พลังงาน (Operation Energy Use Index) หรือที่เรียกว่า EUI ในช่วงการใช้งานอาคาร เท่ากับ 150.72 kWh/m².Yr ในส่วนของอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัย มีค่า EUI เท่ากับ 109.51 kWh/m².Yr แสดงในภาพ 4 และภาพ 5

นอกจากนี้ ในแต่ละมาตรการ ยังส่งผลต่อประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานที่ต่างกัน โดยทั้ง 2 ประเภทอาคาร มีมาตรการพลังงานทดแทนจากโซลาร์เซลล์เป็นปริมาณ 20% เป็นมาตรการที่มีประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานของอาคารได้ดีที่สุด ในทางกลับกัน มาตรการในกลุ่มของวัสดุฉนวนหลังคา ในอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัย เป็นมาตรการที่ไม่ส่งผลต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากในการจำลองนี้ มีการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศ ในเวลากลางคืนเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นเวลาส่วนใหญ่ทั้งปีจึงไม่ได้รับประโยชน์จากฉนวนกันความร้อนของหลังคา แสดงในภาพ 4 และภาพ 5



ภาพ 4 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 ปี ของแต่ละมาตรการ ในอาคารสำนักงาน

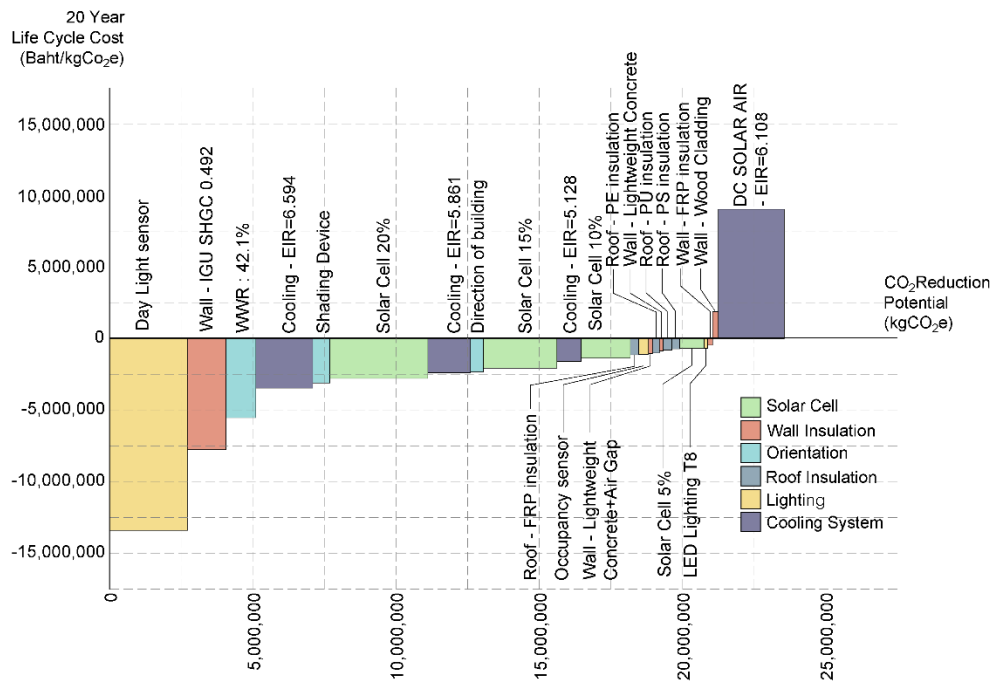


ภาพ 5 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 ปี ของแต่ละมาตรการ ในอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัย

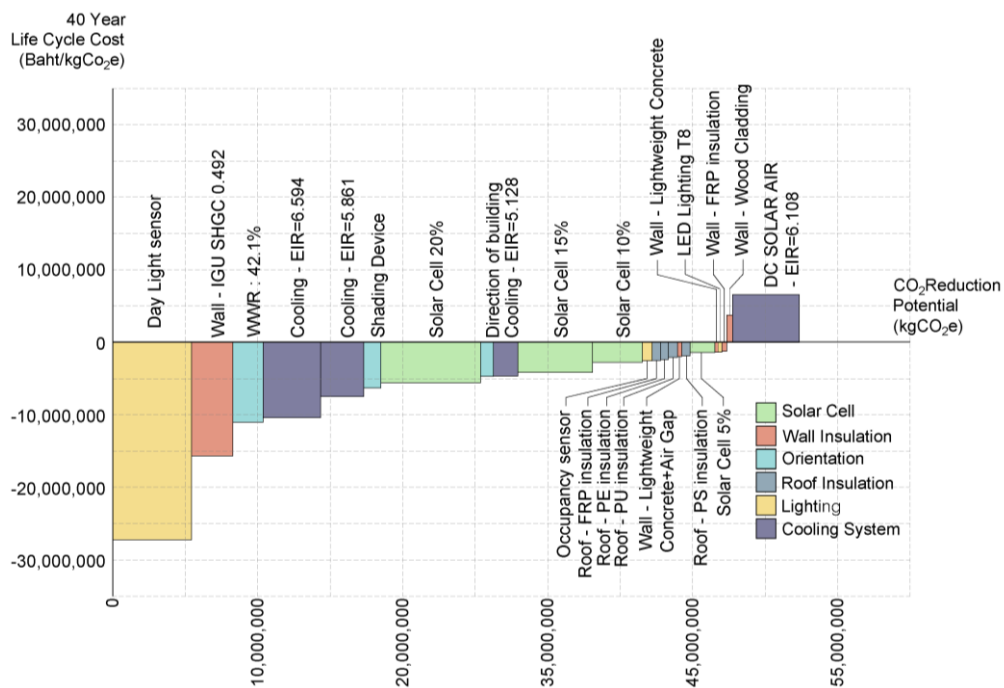
เมื่อประเมินประสิทธิภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคาร ทำให้สามารถแสดงเป็น MACC ในช่วงชีวิตอาคาร 20 ปี 40 ปี และ 60 ปี โดยอาคารสำนักงาน ตามที่แสดงในภาพ 6 - ภาพ 8 พบว่าตลอดช่วงอายุอาคาร 60 ปี มาตรการระบบควบคุมแสงธรรมชาติอัตโนมัติ (Automatic Daylighting Controls) เป็นมาตรการที่ลดค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคารได้ดีที่สุด แต่หากมองถึงประสิทธิภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก พบว่าการใช้พลังงานทดแทนจากโซลาร์เซลล์เป็นปริมาณ 20% เป็นมาตรการที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ดีที่สุดในทุกช่วงอายุอาคาร มาตรการในกลุ่มของวัสดุฉนวนผนัง เป็นกลุ่มที่ส่งผลกระทบต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกค่อนข้างน้อย เนื่องจากอาคารสำนักงานมี WWR 60% การใส่ฉนวนให้กับผนังทึบ ซึ่งมีเพียง 40% จึงส่งผลกระทบต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกไม่มากนัก เว้นแต่การเพิ่มประสิทธิภาพของกระจก ซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ของผนัง โดยการลดค่า Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) ลงจาก 0.851 ในแบบอาคารอ้างอิง เหลือ 0.492 ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคารได้ดีเป็นลำดับที่ 2 ในช่วงอายุอาคาร 20 ปี - 40 ปี แสดงในภาพ 6 และภาพ 7 และเป็นลำดับที่ 3 ในช่วงอายุอาคาร 60 ปี แสดงในภาพ 8

มาตรการในการใช้ไม้เป็นวัสดุเปลือกอาคาร โดยการติดตั้งพื้นผนังเดิม มีประสิทธิภาพลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกไม่มากนัก อีกทั้งยังมีราคาสูง และมีอายุในการใช้งานที่สั้น โดยในงานวิจัยนี้ ระบุช่วงอายุของไม้ที่ 10 ปี ตลอดช่วงอาคาร 60 ปี มาตรการในการใช้ไม้เป็นวัสดุเปลือกอาคารจึงมีค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคารสูงกว่ามาตรการอื่น ๆ ยกเว้นการใช้ DC Solar air ซึ่งเป็นมาตรการที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้เป็นอย่างดี เพียงแต่ราคาของอุปกรณ์เหล่านี้ในปัจจุบัน ยังคงมีราคาสูง อีกทั้งยังผลิตไฟฟ้าให้กับระบบปรับอากาศได้เพียงช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเป็นเวลาประมาณ 5 ชั่วโมงต่อวันเท่านั้น ใน

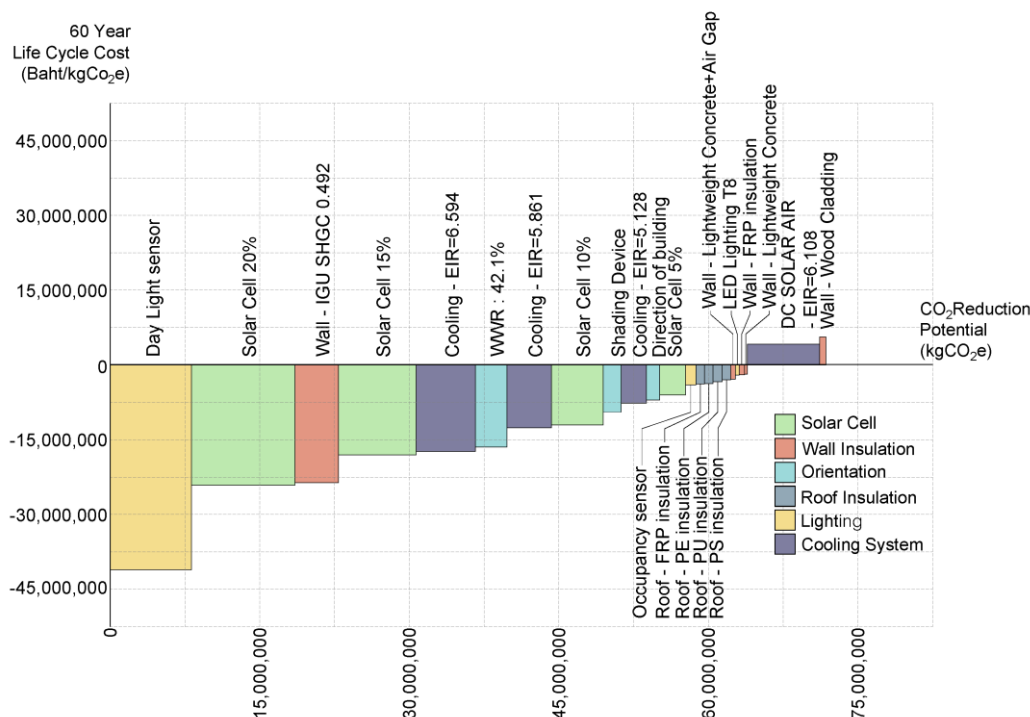
ตอนกลางคืน ระบบจะต้องใช้ระบบไฟฟ้าของอาคาร ทำให้มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคารสูงกว่ามาตรการทั้งหมด แต่จะลดลงในทุก ๆ ช่วงอายุอาคารที่เพิ่มขึ้น แสดงในภาพ 6 - ภาพ 8



ภาพ 6 MACC ของอาคารสำนักงาน ในช่วงอายุอาคาร 20 ปี



ภาพ 7 MACC ของอาคารสำนักงาน ในช่วงอายุอาคาร 40 ปี

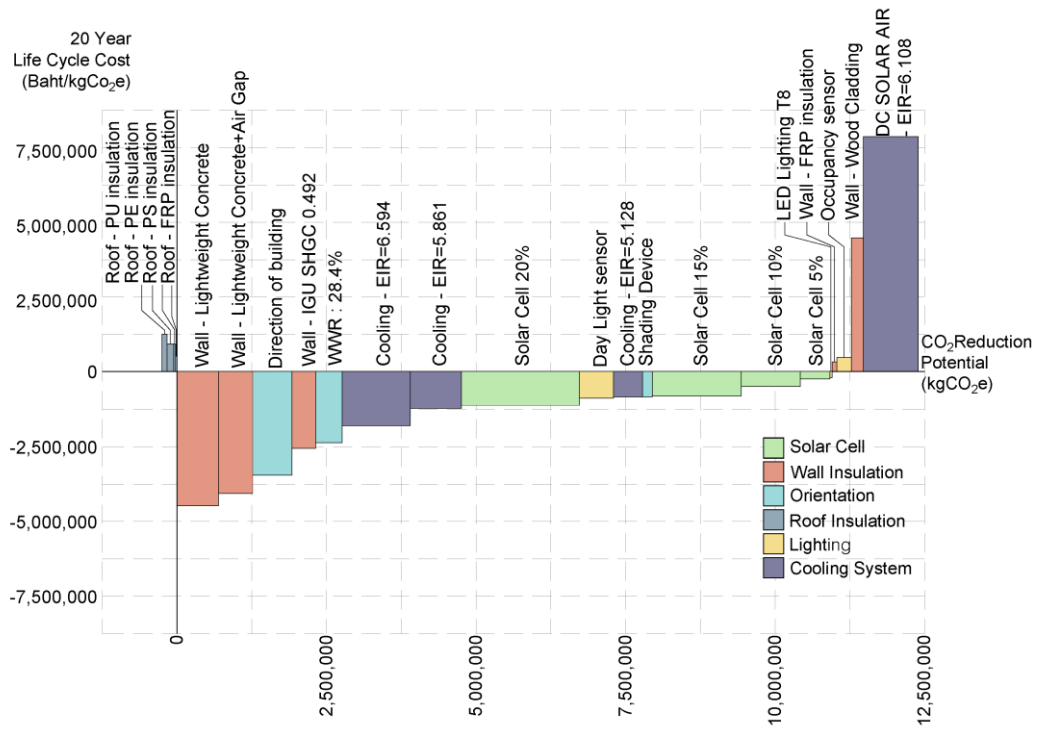


ภาพ 8 MACC ของอาคารสำนักงาน ในช่วงอายุอาคาร 60 ปี

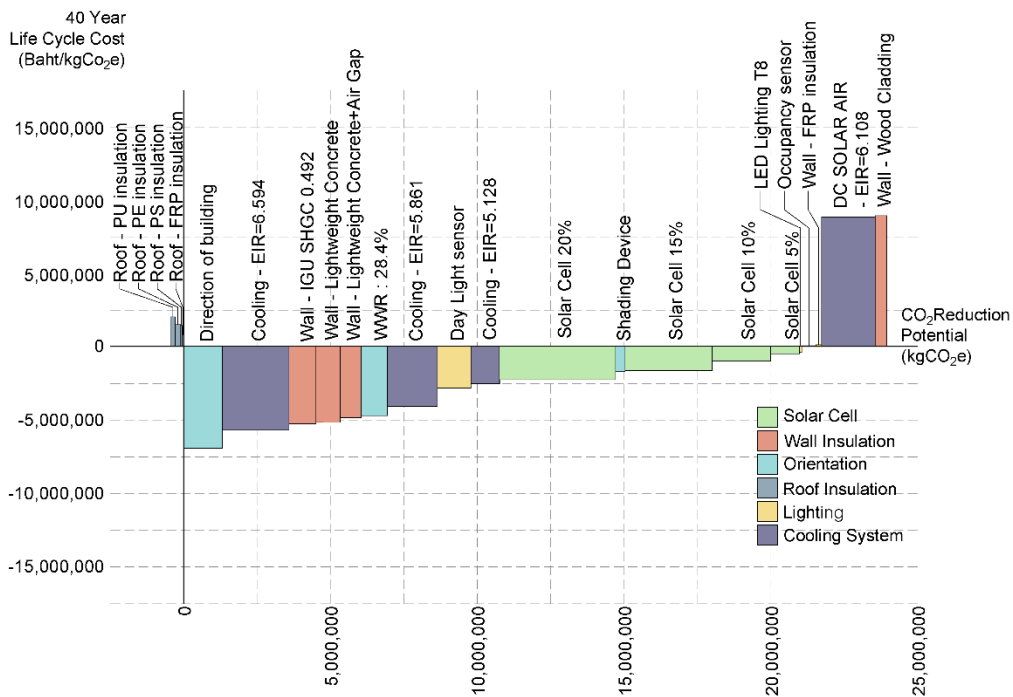
ในส่วนของการประเมินต้นทุนการดำเนินงาน ตามที่แสดงในภาพ 9 - ภาพ 11 พบว่าตลอดช่วงอายุอาคาร 60 ปี มาตรการที่คุ้มค่าที่สุดจะแตกต่างกัน ในช่วงอายุอาคาร 20 ปี พบว่ากลุ่มของวัสดุฉนวนผนัง เป็นมาตรการที่ลดค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคารได้ดีที่สุด เว้นแต่การใส่ฉนวนใยแก้วร่วมกับผนังเดิม ไม่ส่งผลต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากนัก และมีค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคารสูง เนื่องจากอาคารมีการใช้งานส่วนใหญ่เป็นเวลากลางคืน อีกทั้งช่วงอายุการใช้งานยังสั้นกว่า การใช้คอนกรีตมวลเบาหรือกระจก IGU ในช่วงอายุอาคาร 40 ปี จะพบว่า มาตรการในการออกแบบการวางผังของอาคารให้สัมพันธ์กับทิศทางของแดด เป็นมาตรการที่ลดค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคารได้ดีที่สุด เนื่องจากเป็นมาตรการที่ไม่ต้องมีการลงทุน อีกทั้งยังสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้กับอาคารได้เป็นอย่างดี ในช่วงอายุอาคาร 60 ปี จะพบว่ามาตรการของพลังงานทดแทนจากโซลาร์เซลล์เป็นปริมาณ 20% เป็นมาตรการที่ลดค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคารได้ดีที่สุด และเป็นมาตรการที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ดีที่สุดในทุกช่วงอายุของอาคาร

มาตรการในกลุ่มวัสดุฉนวนหลังคา เป็นกลุ่มที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมีค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคารสูงในทุกช่วงอายุอาคาร อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในช่วงกระบวนการผลิตอีกด้วย เนื่องจากอาคารมีการใช้งานส่วนใหญ่เป็นเวลากลางคืน และมีอายุการใช้งานของวัสดุค่อนข้างสั้น ต้องมีการปรับเปลี่ยนทุก ๆ 15 ปี

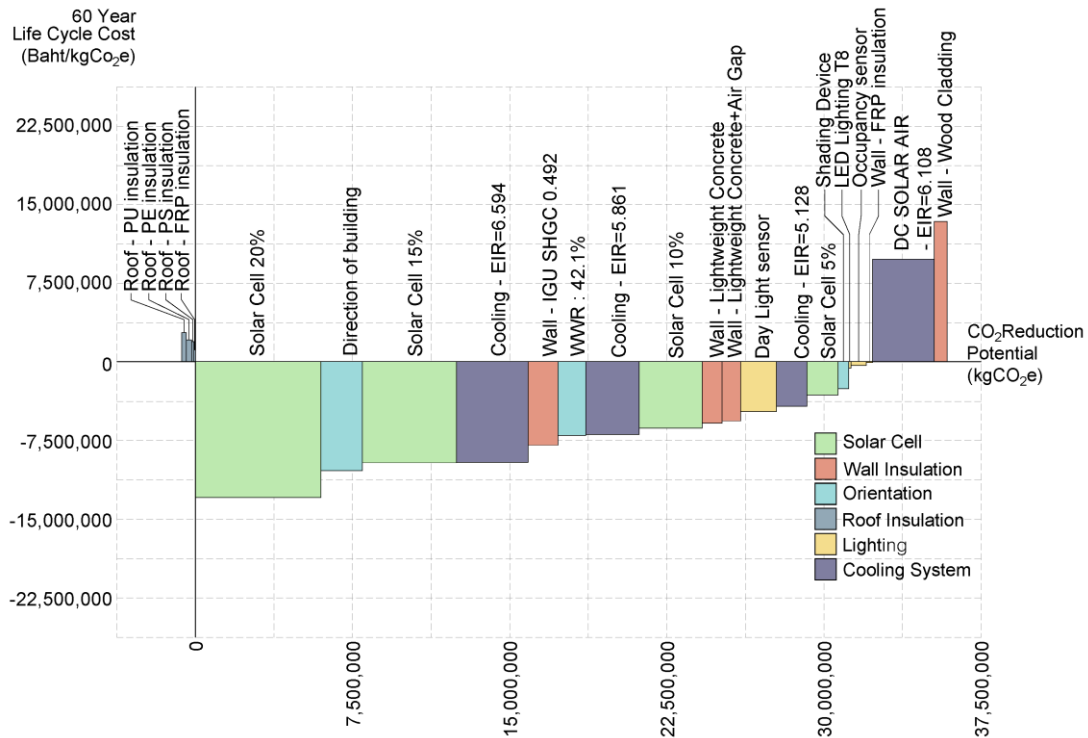
มาตรการในการใช้ไม้เป็นวัสดุเปลือกอาคาร และมาตรการในการใช้ระบบ DC Solar air แสดงในภาพ 9 - ภาพ 11 ยังคงเป็นมาตรการที่ไม่เกิดความคุ้มค่าในช่วงอายุอาคาร 60 ปี เช่นเดียวกับการนำไปใช้ในอาคารสำนักงาน ในกลุ่มระบบไฟฟ้าแสงสว่าง โดยเฉพาะมาตรการที่เกี่ยวข้องกับระบบเซนเซอร์ต่าง ๆ มีประสิทธิภาพลดลง เมื่อเทียบกับการนำไปใช้กับอาคารสำนักงาน เนื่องจากอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กอาคาร มีการกันห้องเป็นหลาย ๆ ห้อง ทำให้ต้องมีการติดตั้งเซนเซอร์ในทุก ๆ ห้อง แต่ในอาคารสำนักงาน มีการจัดผังแบบเปิดโล่ง ทำให้ใช้จำนวนเซนเซอร์น้อยกว่า



ภาพ 9 MACC ของอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัย ในช่วงอายุอาคาร 20 ปี



ภาพ 10 MACC ของอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัย ในช่วงอายุอาคาร 40 ปี



ภาพ 11 MACC ของอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัย ในช่วงอายุอาคาร 60 ปี

อภิปรายผล

มาตรการต่าง ๆ มี eco-efficiency แตกต่างกัน ตลอดช่วงอายุอาคาร 60 ปี ในอาคารสำนักงาน มาตรการที่คุ้มค่ามากที่สุดในการลงทุนเพื่อก๊าซเรือนกระจก คือ ระบบควบคุมแสงธรรมชาติอัตโนมัติ เนื่องจากสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณ 8,131,391 kgCO₂e หรือร้อยละ 14.77 และลดค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคาร จำนวน 41,070,253 บาท หรือร้อยละ 13.85 มาตรการที่คุ้มค่าที่สุดในแง่ของการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก คือ มาตรการของพลังงานทดแทนจากโซลาร์เซลล์เป็นปริมาณ 20% เนื่องจากสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณ 10,394,054 kgCO₂e หรือร้อยละ 18.88 และลดค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคาร จำนวน 24,128,896 บาท หรือร้อยละ 8.13 มาตรการในกลุ่มของฉนวนผนังและวัสดุหลังคา ส่งผลต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกค่อนข้างน้อย เว้นแต่การเพิ่มประสิทธิภาพของกระจก ซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ของผนัง โดยสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 4,370,313 kgCO₂e หรือร้อยละ 7.93 และลดค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคาร จำนวน 23,603,260 บาท หรือร้อยละ 7.96 แสดงในภาพ 6 - ภาพ 8

ในอาคารคอนโดมิเนียมพักอาศัย มาตรการที่คุ้มค่ามากที่สุดในแง่การลงทุนเพื่อก๊าซเรือนกระจก จะแตกต่างกันออกไป ตามช่วงอายุอาคาร โดยในช่วงอายุอาคาร 60 ปี การติดตั้งโซลาร์เซลล์เป็นปริมาณ 20% เป็นมาตรการที่คุ้มค่าที่สุด ทั้งในแง่การลงทุนเพื่อลดก๊าซเรือนกระจก และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากสามารถลดค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคาร จำนวน 12,963,811 บาท หรือร้อยละ 7.17 และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 5,990,404 kgCO₂e หรือร้อยละ 18.17 แสดงในภาพ 9 - ภาพ 11

อย่างไรก็ดี ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้คำนวณหาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ยังไม่มีการจัดทำและเปิดเผยอย่างเป็นทางการ จึงต้องใช้ค่าของต่างประเทศ ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของเทศนั้น ๆ จึงอาจส่งผลให้ผลการศึกษามีความคลาดเคลื่อนได้ การจัดทำค่าสัมประสิทธิ์เฉพาะของประเทศไทย จึงเป็นส่วนสำคัญในการศึกษามาตรการประหยัดพลังงาน

บรรณานุกรม

- การไฟฟ้านครหลวง. (2561). *อัตราตามช่วงเวลาของวัน (Time of Day Tariff : TOD Tariff)*. สืบค้นเมื่อ 19 สิงหาคม 2564, จาก <https://www.mea.or.th/profile/109/114>
- ณัฐวิภา รุ่งเรืองธนาพล. (2559). *การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัสดุและการใช้งานของอาคารพักอาศัยต้นแบบในโครงการบ้านประชารัฐ การเคหะแห่งชาติ*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
- ประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณในการออกแบบอาคารแต่ละระบบการใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่าง ๆ ของอาคาร พ.ศ. 2564. (2564, 24 ธันวาคม). *ราชกิจจานุเบกษา*. เล่ม 138 ตอนพิเศษ 315 ง หน้า 9.
- สุดาภรณ์ สุดประเสริฐ. (2561). การศึกษาแบบจำลองค่าพลังงานไฟฟ้าการปรับอากาศและระยะเวลาการคืนทุนของการใช้ฉนวนกันความร้อนในกรอบอาคารพักอาศัยประเภทบ้านเดี่ยว. *วารสารวิชาการคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สจล.*, 27, 193-204.
- สุธรรม ปทุมสวัสดิ์. (2553). *การศึกษาและกำหนดค่า Carbon Intensity ของอุตสาหกรรมพลังงาน (โรงไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล)*. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- องค์กรจัดการก๊าซเรือนกระจกแห่งประเทศไทย. (2564). *ค่า Emission Factor แบ่งตามประเภทกลุ่มอุตสาหกรรม*. กรุงเทพมหานคร: องค์กรบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก.
- อรุณ ศรีบุญบุตร. (2555). *ค่าดัชนีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวของผู้ใช้อาคารในประเทศไทย*. กรุงเทพฯ: คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อภิญา บุญมา. (2555). *ผลกระทบจากการกำหนดค่าการใช้พลังงานรวมของอาคารตามกฎหมายที่มีต่อการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
- Chris, W. (2021). *The rapid fall of solar's embodied carbon*. Retrieved March 3, 2022, from <https://www.linkedin.com/pulse/rapid-fall-solars-embodied-carbon-chris-worboys>
- Intergovernmental Panel on Climate [IPCC]. (2006). *Revised 1996 guidelines for national greenhouse gas inventories: Reference manual*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate.
- Kaltimber. (2017). *How much CO2 is stored in 1 kg of wood*. Retrieved March 3, 2022, from <https://www.kaltimber.com/blog/2017/6/19/how-much-co2-is-stored-in-1-kg-of-wood>
- Katherine Madden. (2006). *Eco-efficiency learning module*. [N.p.]: The World Business Council for Sustainable Development.
- Kesicki, F., & Strachan, N. (2011). Marginal Abatement Cost (MAC) curves: Confronting theory and practice. *Environmental Science & Policy*, 14(8), 1195-1204.
- The National Renewable Energy Laboratory [NREL]. *PVWatts® calculator*. Retrieved February 2, 2022, from <https://pvwatts.nrel.gov/index.php>
- Peng, B. B., Fan, Y., & Xu, J. H. (2016). Integrated assessment of energy efficiency technologies and CO2 abatement cost curves in China's road passenger car sector. *Energy Conversion and Management*, 109, 195-212.

- Timilsina, G. R., Sikharulidze, A., Karapoghosyan, E., & Shatvoryan, S. (2017). Development of marginal abatement cost curves for the building sector in Armenia and Georgia. *Energy Policy*, 108, 29-43.
- United Nations Development Programme. (2021). *Mid-century, long-term low greenhouse gas emission development strategy*. Glasgow: United Nations Climate Change.