# การพัฒนาแบบจำลองพลังงานแบบบูรณาการของอาคารในเมืองพัทยา ประเทศไทย
# Development of Integrated Building Energy Modeling in Pattaya City, Thailand

ณัฏฐ์ นาคกร[1] ศุภรัชชัย วรรัตน์[1]* และอำนาจ ผดุงศิลป์[2]
Nat Nakkorn[1], Suparatchai Vorarat[1]* and Aumnad Phdungsilp[2]
[1]วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
[1]College of Innovative Technology and Engineering, Dhurakij Pundit University
[2]คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[2]School of Energy, Environment and Materials King Mongkut's,
University of Technology Thonburi
*Corresponding author E-mail: vorarat@gmail.com
Received: February 22, 2023
Revised: March 29, 2023
Accepted: April 5, 2023

**บทคัดย่อ**

การเปลี่ยนผ่านระบบพลังงานไปสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนนั้นจำเป็นที่จะต้องมีแนวความคิดหรือนวัตกรรมใหม่ ๆ สิ่งเหล่านี้สามารถเข้ามาช่วยสนับสนุนให้รัฐบาลท้องถิ่นและผู้ที่มีส่วนได้เสียในการกำหนดนโยบายด้านพลังงาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและนำเสนอวิธีการในการสร้างแบบจำลองพลังงานอาคารแบบบูรณาการรวมถึงการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานในเขตเมือง ในงานวิจัยได้ใช้เมืองพัทยาในประเทศไทยเป็นกรณีศึกษา โดยมีขอบเขตเฉพาะอาคารประเภทที่อยู่อาศัยเท่านั้น ผลการวิจัยพบว่า จากอาคารทั้ง 6 ประเภทอาคาร คือ (1) บ้านเดี่ยว (2) อาคารเดี่ยว (3) บ้านสองชั้น (4) ทาวน์เฮ้าส์ (5) อาคารพาณิชย์ และ (6) โรงแรมและคอนโดมิเนียม ในกรณีอ้างอิงมีการใช้พลังงานรวม 44,176,062 MWh/yr และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวม 25,714,886 $tCO_2e$/yr การวิเคราะห์มาตรการการลดการใช้พลังงาน พบว่า การเปลี่ยนกระจกสองชั้นด้วยการเคลือบแบบ Low-E การติดตั้งฉนวนกันความร้อนที่ผนังและหลังคา ฟิล์มกันความร้อน และการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนชั้นดาดฟ้ามีศักยภาพสูงในการประหยัดพลังงานและลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้พลังงาน มาตรการเหล่านี้นำไปสู่การประหยัดพลังงานรวม 12,908,646 MWh/yr และลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 7,514,123 $tCO_2e$/yr โดยวิธีการที่นำเสนอใช้สำหรับการตัดสินใจทางด้านพลังงานและความเป็นกลางทางคาร์บอนในเมืองจะเป็นประโยชน์ต่อรัฐบาลท้องถิ่นและผู้กำหนดนโยบายด้านพลังงาน

**คำสำคัญ**: อนุรักษ์พลังงาน ประสิทธิภาพพลังงาน การจำลองพลังงานในอาคาร ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

## Abstract

Transitioning energy systems towards carbon neutrality is necessary to have creative initiatives or new innovations. These enable local governments and stakeholders to provide energy policies. This research aims to develop and present a method for integrated building energy modeling. This includes the analysis of energy conservation measures and energy-related $CO_2$ emissions in an urban area. The research used Pattaya city in Thailand as a case study. The scope of the building type covers only residential buildings. The results show that the total energy use and energy-related $CO_2$ emissions in the six building types, including (1) single houses, (2) single buildings, (3) two-story houses, (4) townhouses, (5) commercial buildings, and (6) hotels and condominiums, are 44,176,062 MWh/yr and 25,714,886 $tCO_2e$/yr. The analysis of energy conservation measures revealed that replacing glazing areas with Double IGU with Low-E, installing wall and roof insulation, thermal film, and solar photovoltaic rooftops have high potential for energy-savings and energy-related $CO_2$ emission reductions. These measures led to total energy savings of 12,908,646 MWh/yr and energy-related $CO_2$ emission reductions of 7,514,123 $tCO_2e$/yr. Local governments and stakeholders would benefit from the proposed method for energy and carbon-neutral decision-making in cities.

**Keywords**: Energy conservation, Energy efficiency, Building energy simulation, $CO_2$ emission reductions

## บทนำ

ในปัจจุบันโลกมีสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างมากเนื่องจากการขยายตัวของชุมชนเมือง และประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้การกำหนดนโยบายทางด้านพลังงานและการพัฒนาผังเมืองให้มีประสิทธิภาพและยั่งยืนนั้นทำได้ยากมากยิ่งขึ้น โดยมีการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเพียงร้อยละ 19 โดยส่วนมากประชากรของโลกทั้งหมดจะอาศัยอยู่ในเขตพื้นที่เมือง คิดเป็นประมาณร้อยละ 55 และคาดการณ์ว่า ในอนาคตตัวเลขของประชากรของโลกจะเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 68 ภายในปี 2050 (UN DESA, 2018) นั่นหมายความว่า มีความต้องการใช้พลังงานในทุก ๆ ด้านเพิ่มสูงขึ้นเช่นกันส่งผลโดยตรงให้มีการเพิ่มขึ้นของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas--GHG) เขตพื้นที่อาศัยในเขตชุมชนเมืองมีการใช้พลังงานถึงร้อยละ70 และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 66 (Alhamwi, Medjroubi, Vogt & Agert, 2019) การใช้พลังงานในเขตพื้นที่ชุมชนเมืองนั้นมีความเกี่ยวข้องกับทรัพยากรและสภาพภูมิอากาศอย่างเป็นนัยสำคัญเนื่องจากพื้นที่ชุมชนเมืองนั้นใช้พลังงานจากไฟฟ้าเป็นหลัก หากสามารถลดการใช้พลังงานจากไฟฟ้าเปลี่ยนมาเป็นการใช้พลังงานจากพลังงานหมุนเวียนแทน เช่น การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ การติดตั้งกังหันลม การใช้พลังงานชีวมวล และอื่น ๆ เพื่อรองรับความต้องการในการใช้พลังงานภายในอาคารที่พักอาศัยหรืออาคารสาธารณะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแผงโซลาร์เซลล์นั้น สามารถติดตั้งกับหลังคาและผนังของอาคารที่มีอยู่เดิมได้ ประชาชนโดยทั่วไปสามารถหาซื้อและนำมาใช้ได้อย่างทั่วถึง (Li et al., 2020) และยังมีอีกหนึ่งมาตรการที่สามารถลดการใช้พลังงานภายในอาคารได้อย่างยั่งยืนโดยทำการปรับปรุงอาคารเดิมหรือออกแบบอาคารใหม่ให้เข้าสู่เกณฑ์อาคารที่ใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์ ไม่ว่าจะเป็นการปรับเปลี่ยนกรอบหน้าต่างอาคาร การติดฟิล์มกันความร้อนภายในอาคาร การติดตั้งฉนวนกันความร้อน การปรับเปลี่ยนระบบปรับอากาศที่เน้นไปทางด้านลดการใช้พลังงานไฟฟ้า การปรับเปลี่ยนหลอด

ไฟประหยัดพลังงาน และอื่น ๆ นั้นล้วนแต่เป็นมาตรการเชิงรุกที่มุ่งไปสู่สังคมคาร์บอนต่ำได้ในอนาคต

สำหรับอาคารที่มีการผสมผสานรวมกับแผงโซลาร์เซลล์ หากต้องการวางแผนการใช้พลังงานในอาคารให้มีประสิทธิภาพสูงนั้น การวิเคราะห์และรวบรวมข้อมูลให้เป็นระบบระเบียบ เป็นกลยุทธ์หนึ่งที่เป็นไปได้และมีประสิทธิภาพในการจัดการข้อมูลที่เป็นจำนวนมาก คือ การใช้แบบจำลองระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Geographic Information System--GIS) เพื่อทำการตรวจสอบข้อมูลพลังงานทางด้านภูมิศาสตร์และสภาพแวดล้อมโดยรอบ (Li, 2018) ทำให้การแสดงข้อมูลเชิงพื้นที่ขนาดใหญ่นั้นชัดเจนและเข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น ในการวางแผนพลังงาน ข้อมูลด้านสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS) นั้นสามารถช่วยเป็นทางเลือกในการเลือกมาตรการพลังงานที่เกี่ยวกับการใช้พลังงานของอาคารได้ ซึ่งสามารถทำได้หลังจากการวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมหาศาลเท่านั้น (Ali, Shamsi, Hoare & O'donnell, 2018) อย่างไรก็ตามความยากลำบากในการสำรวจและการเก็บข้อมูลเชิงลึก รวมถึงข้อมูลจำเพาะส่วนบุคคล บางครั้งอาจขัดขวางในการเก็บบันทึกข้อมูลเพื่อใช้ในการสร้างฐานข้อมูลของอาคารต้นแบบของแต่ละประเภทของโครงสร้างอาคารได้ (Ali, Haris Shamsi, Hoare, Mangina & O'Donnell, 2019) และเพื่อที่จะวิเคราะห์การใช้พลังงานในอาคารโดยรวมโดยใช้ข้อมูลเพียงเล็กน้อยนั้น แนวทางที่เป็นที่นิยมและเข้าถึงข้อมูลได้โดยง่าย คือ การสร้างแบบจำลองพลังงานต้นแบบของอาคารแต่ละประเภท (Reinhart & Davila, 2016)

หน่วยงานท้องถิ่น นักวางผังเมือง และผู้กำหนดนโยบายด้านพลังงานมักจะทำการวางแผนและวิเคราะห์ข้อมูลด้านพลังงานด้วยข้อมูลในพื้นที่ของตัวเองอีกทั้งเป็นข้อมูลที่จำกัดเข้าถึงข้อมูลได้ลำบาก และยังขาดการเก็บรวบรวมข้อมูล การสร้างฐานข้อมูลของอาคารต้นแบบที่มีรายละเอียดเฉพาะในแต่ละท้องที่ โดยรัฐบาลหรือหน่วยงานระดับประเทศก็อาจจะประสบปัญหาในการจัดระเบียบของแหล่งข้อมูลเชิงลึกของแต่ละบุคคล อันเนื่องมาจากการวิเคราะห์ข้อมูลด้านพลังงานที่เน้นเฉพาะภาพรวมในระดับชาติหรือระดับนานาชาติเท่านั้น (Nutkiewicz, Yang & Jain, 2018) โดยการศึกษาแบบจำลองพลังงานในอาคารที่มีอยู่ส่วนใหญ่นั้นไม่ได้ใช้วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลของอาคารเหล่านี้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากการวางแผนด้านพลังงานนั้นไม่ค่อยได้รับการจัดการที่เหมาะสมโดยเฉพาะในระดับท้องถิ่น ดังนั้นรัฐบาลท้องถิ่นจึงขาดข้อมูลที่สำคัญที่จำเป็นที่ช่วยในการกำหนดนโยบายด้านพลังงานต่าง ๆ ซึ่งวิธีการสร้างแบบจำลองพลังงานในปัจจุบันไม่ได้ให้ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการศึกษาข้อมูลเชิงลึก รวมถึงข้อมูลการใช้พลังงานในอาคารในรูปแบบของข้อมูลสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS)

## ขอบเขตการศึกษาวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาวิธีการในการสร้างแบบจำลองพลังงานในอาคารแบบบูรณาการและการวิเคราะห์เปรียบเทียบ อาคารทั้ง 6 ประเภท ได้แก่ (1) บ้านเดี่ยว (2) อาคารเดี่ยว (3) บ้านสองชั้น (4) ทาวน์เฮ้าส์ (5) อาคารพาณิชย์ และ (6) โรงแรมและคอนโดมิเนียม ตามมาตรการการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งรวมถึงการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคา เพื่อนำไปใช้ในมาตรการการลดการใช้พลังงานในอาคารที่พักอาศัย ในการวิจัยนี้จะใช้พื้นที่เมืองพัทยาซึ่งเป็นเมืองท่องเที่ยวขนาดใหญ่ของประเทศไทยเป็นกรณีศึกษา

## วัตถุประสงค์การวิจัย

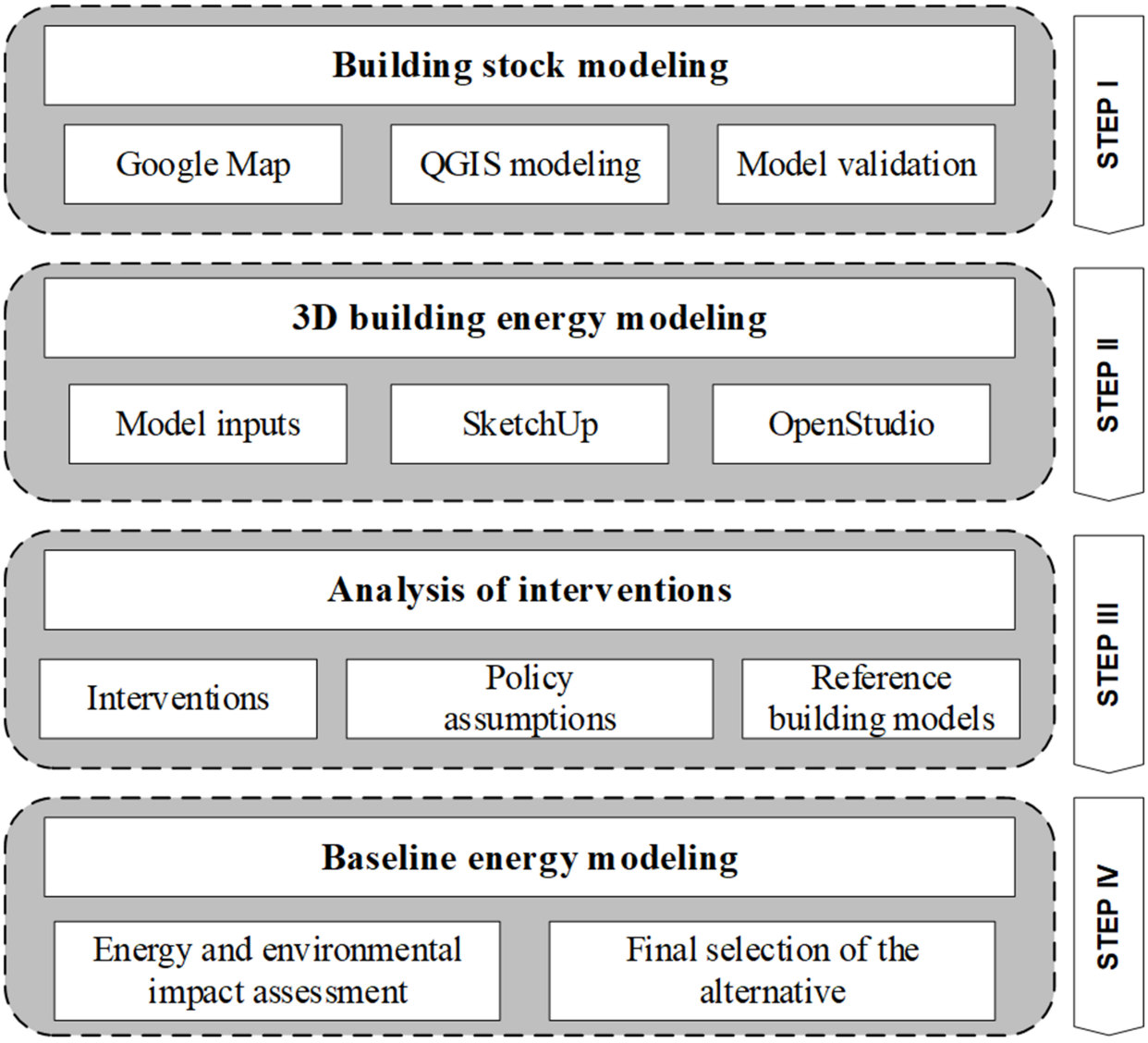
1. เพื่อพัฒนาและนำเสนอวิธีการในการสร้างแบบจำลองพลังงานอาคารแบบบูรณาการ

2. เพื่อสร้างแบบจำลองพลังงานอาคารและวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรณีศึกษา เมืองพัทยา

## แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แนวทางในสร้างแบบจำลองพลังงานแบบบูรณาการในเขตพื้นที่ศึกษาเมืองพัทยาจะแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ๆ โดยจะแสดงไว้ในภาพ 1 และขั้นตอนสำคัญในการวิเคราะห์และเก็บรวมรวบข้อมูลด้วยเทคนิควิธีการต่าง ๆ ในการสร้างแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. ฐานข้อมูลอาคารแบบสองมิติ การสร้างฐานข้อมูลของอาคารที่พักอาศัยทั้ง 6 ประเภทในรูปแบบแผนที่ดิจิตัลแบบสองมิติ นั้นจะสามารถทำให้แสดงภาพรวมของอาคารที่อยู่อาศัยทั้งหมดภายในพื้นที่ที่ต้องการศึกษาได้และง่ายต่อการแบ่งแยกประเภทอาคาร ขนาดพื้นที่ดิน ลักษณะอาคาร จำนวนอาคารในพื้นที่ศึกษา และอื่น ๆ โดยในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม QGIS version 3.28 ช่วยให้ผู้ใช้สามารถสร้างการค้นหาเชิงโต้ตอบ จัดเก็บข้อมูล อัปเดตข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ จากนั้นจึงแสดงการค้นพบในรูปของตารางคุณลักษณะและแผนที่ดิจิทัล ด้วยเหตุนี้ ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) จึงเป็นวิธีการและเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองเชิงพื้นที่แบบสองมิติของชุมชนเมือง แผนภูมิระดับความสูงของอาคารในรูปแบบ สองมิติ และสามมิติสามารถทำได้ด้วยซอฟต์แวร์ QGIS นี้ (Sola, Corchero, Salom & Sanmarti, 2018) ซึ่งการใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) สร้างฐานข้อมูลดิจิทัล อาจเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดมาตรการด้านพลังงานได้ในอนาคต




**ภาพ 1** กรอบแนวความคิดการวางแผนพลังงานของอาคารที่พักอาศัยแบบบูรณาการ

2. การสร้างแบบจำลองพลังงานอาคารแบบสามมิติ ในขั้นตอนนี้จะเป็นการสร้างแบบจำลองแบบสามมิติของอาคารตัวแทนของทั้ง 6 ประเภทอาคาร เพื่อเป็นอาคารต้นแบบที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์มาตรการในลดการใช้พลังงานด้านต่าง ๆ โดยแบบจำลองของอาคารต้นแบบสามารถดำเนินการได้โดยใช้ปลั๊กอินโปรแกรม OpenStudio ร่วมกับ โปรแกรม EnergyPlus เพื่อจำลองการใช้พลังงานของอาคาร EnergyPlus สร้างขึ้น โดย National Renewable Energy Laboratory ของกระทรวงพลังงานของสหรัฐอเมริกา เป็นหนึ่งในเครื่องมือ ด้าน Building Energy Simulation--BES (DOE, 2021) EnergyPlus เป็นโปรแกรมจำลองภาระความร้อนและโปรแกรมการวิเคราะห์พลังงาน สามารถใช้กำหนดปริมาณความร้อนและความเย็นที่ต้องการสำหรับอาคารได้ ซึ่งโดยส่วนมากโปรแกรม EnergyPlus ในบทความที่ตีพิมพ์ในหลาย ๆ ฉบับจะถูกนำไปใช้เพื่อสร้างข้อมูลทางด้านพลังงานเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับอาคารประเภท ต่าง ๆ (Stadler, Firestone & Curtil, 2006) โดยโปรแกรม EnergyPlus จะใช้ลักษณะข้อมูลทางกายภาพของอาคาร สภาพทางภูมิศาสตร์ สภาพอากาศ และระบบอาคารต่าง ๆ เช่น ระบบทำความเย็นและระบายอากาศ เป็นต้น

ในการสร้างแบบจำลองอาคารต้นแบบได้ทำการสำรวจโดยใช้เครื่องมือคำนวณพื้นที่ใน Google Maps เพื่อดูขนาดของอาคารโดยทั่วไป นอกจากนี้ พารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความสูงของอาคารและความครอบคลุมของหน้าต่างจะถูกประเมินด้วยโปรแกรม Google Street View เพื่อใช้ในกระบวนการสร้างแบบจำลอง แบบจำลองจะถูกแสดงเป็นรูปทรงเมตริก ต้นแบบจะถูกสร้างขึ้นเพื่อแสดงผลลัพธ์ของการใช้พลังงาน ตัวอย่างเช่น จำนวนชั้น ตารางเวลา บุคคล กิจกรรม และรายละเอียดอุปกรณ์ภายในของแต่ละชั้น โดยเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้งานจากสถานการณ์จริง จากนั้นจะนำข้อมูลที่เก็บรวบรวมทั้งหมดมาใส่ในโปรแกรม OpenStudio โดยการคำนวณการใช้พลังงานในอาคารนั้นตั้งอยู่บนหลักการสมดุลทางความร้อน รวมถึงสมดุลความร้อนที่พื้นผิว สมดุลความร้อนในอากาศ และการจำลองระบบอาคาร โดยการคำนวณสมดุลความร้อนได้แสดงไว้ในสมการ (1) ถึงสมการ (4) (Kampelis et al., 2020)

$$q^{"}_{\propto sol}+q^{"}_{LWR}+q^{"}_{conv}-q^{"}_{ko}=0 \qquad (1)$$

โดยที่

$q^{"}_{\alpha sol}$ = รังสีแสงอาทิตย์ที่ดูดซับโดยตรงและกระจาย (ความยาวคลื่นสั้น) และฟลั๊กความร้อน

$q^{"}_{LWR}$ = การแลกเปลี่ยนฟลั๊กการแผ่รังสีความยาวคลื่นสุทธิ (ความร้อน) กับอากาศและสภาพแวดล้อม

$q^{"}_{conv}$ = การแลกเปลี่ยนฟลั๊กหมุนเวียนกับอากาศภายนอก

$q^{"}_{ko}$ = ค่าการนำความร้อน (q/A) สู่ผนัง

โดยที่ $q^{"}_{\alpha sol}$ ได้รับอิทธิพลจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ตำแหน่ง มุมและความเอียงของพื้นผิว วัสดุพื้นผิว และสภาพอากาศ $q^{"}_{LWR}$ ถูกกำหนดโดยการแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างพื้นผิวกับพื้นดิน ท้องฟ้าและอากาศ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$\begin{aligned} q^{"}_{LWR} = {} & \varepsilon\sigma F_{gnd}\left(T^4_{gnd}-T^4_{surf}\right) \\ & +\varepsilon\sigma F_{sky}\left(T^4_{sky}-T^4_{surf}\right) \\ & +\varepsilon\sigma F_{air}\left(T^4_{air}-T^4_{surf}\right) \end{aligned} \qquad (2)$$

โดยที่

$\varepsilon$ = การปล่อยคลื่นยาวของพื้นผิว

$\sigma$ = ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann

$F_{gnd}$ = ปัจจัยของพื้นผิวผนังกับอุณหภูมิพื้นผิวพื้นดิน

$F_{sky}$ = ปัจจัยของพื้นผิวผนังกับอุณหภูมิของท้องฟ้า

$F_{air}$ = ปัจจัยของพื้นผิวผนังต่ออุณหภูมิอากาศ

$T_{surf}$ = อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก

$T_{gnd}$ = อุณหภูมิพื้นผิวดิน

$T_{sky}$ = อุณหภูมิท้องฟ้า

$T_{air}$ = อุณหภูมิของอากาศ

การคำนวณความร้อนจากการพาความร้อนของแบบจำลองสามารถหาได้ตามสมการที่ 3

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

โดยที่

$h_{c,ext}$ = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอก

$T_{surf}$ = อุณหภูมิพื้นที่ผิว

$T_{air}$ = อุณหภูมิอากาศภายนอก

การคำนวณค่าการนำความร้อนสู่ผนังสามารถหาได้ตามสมการที่ 4

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

โดยที่

$T$ = อุณหภูมิ

$T_o$ = อุณหภูมิขององค์ประกอบภายนอกของอาคาร

$T_i$ = อุณหภูมิขององค์ประกอบภายในของอาคาร

$i$ = องค์ประกอบภายในของอาคาร

$o$ = องค์ประกอบภายนอกของอาคาร

$X, Y$ = ปัจจัยตอบสนอง

3. มาตรการทางเลือกลดการใช้พลังงาน ในการวิเคราะห์หามาตรการทางเลือกในการลดการใช้พลังงานนั้นเป็นผลลัพธ์ที่ได้มาจากการเก็บรวบรวมข้อมูลของอาคารที่และจากทบทวนวรรณกรรมเช่นการสร้างแบบจำลองอาคารต้นแบบ (Building Energy Models--BEM) เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคาร (Reinhart & Davila, 2016) การติดฟิล์มและหน้าต่างลดพลังงานความร้อนที่แสงอาทิตย์ส่งผ่าน ทำให้อุณหภูมิภายในอาคารลดลง (Marina et al., 2019) การใช้พลังงานหมุนเวียนทดแทนการใช้พลังงานจากไฟฟ้าเป็นหลัก และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคาและอื่น ๆ (Li, Ding, Liu & Wang, 2016) จากนั้นนำมาสร้างแบบจำลองอาคารต้นแบบเพื่อนำมาวิเคราะห์การใช้พลังงานในอาคารของอาคารแต่ละประเภท โดยจะนำมาตรการต่าง ๆ มาวิเคราะห์และปรับให้เหมาะกับแต่ละประเภทอาคารเพื่อทำการเปรียบเทียบมาตรการแต่ละประเภทว่ามาตรการใดเป็นมาตรการที่ดีสุดที่โดยจะแบ่งมาตรการในการลดการใช้พลังงานในอาคารที่พักอาศัยได้เป็น 4 ประเภทหลัก ๆ ดังต่อไปนี้ (1) การติดตั้งกระจกประหยัดพลังงานเพื่อลดความร้อนในอาคาร (2) การติดตั้งฉนวนกันความร้อนหลังคา (3) การติดฟิล์มลดความร้อนภายในอาคาร และ (4) การติดตั้งแผงโซล่าร์เซลล์บนหลังคา ซึ่งมาตรการดังกล่าวเป็นการผสมผสานสิ่งที่ค้นพบเข้ากับกลยุทธ์ด้านพลังงาน โดยปรับให้เหมาะกับระดับท้องถิ่นหรือระดับภูมิภาค

4. การเลือกมาตรการด้านพลังงานของอาคารต้นแบบ ในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่สามารถช่วยให้ผู้กำหนดมาตรการหรือผู้ที่มีส่วนได้เสียทราบถึงมาตรการและทางเลือกทางด้านพลังงานว่า มาตรการใดที่สามารถลดการใช้พลังงานภายในอาคารและเหมาะสมกับอาคารที่พักอาศัยทั้ง 6 ประเภทได้ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะนำมาจากการวิเคราะห์การใช้พลังงานรวมของอาคารแต่ละประเภท จากนั้นนำมาตรการทั้ง 5 มาตรการหลัก ๆ มาจำลองในแบบจำลองอาคารต้นแบบและพิจารณาเปรียบระหว่างแบบจำลองอาคารต้นแบบกับแบบจำลองอาคารที่ได้รับการเพิ่มมาตรการต่าง ๆ เข้าไปในแบบจำลอง จากนั้นทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยรวมของอาคารที่พักอาศัยทั้ง 6 ประเภท ภายในพื้นที่ศึกษาทั้งหมด ตามมาตรการต่าง ๆ ซึ่งรวมถึงการคำนวณค่าปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยในขั้นตอนสุดท้ายนี้จะได้ฐานข้อมูลแบบจำลองอาคารที่อยู่อาศัยทั้ง 6 ประเภท แบบสามมิติ ฐานข้อมูลการใช้พลังงานโดยรวมในอาคาร และฐานข้อมูลค่าการใช้พลังงานที่ลดลงตามมาตรการต่าง ๆ ซึ่งสามารถช่วยให้ผู้ที่กำหนดนโยบายด้านพลังงานนำข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้นำไปช่วยในการตัดสินใจในการกำหนดนโยบายด้านพลังงานได้ต่อไปในอนาคต

4. มาตรการการลดการใช้พลังงาน

4.1 กระจกภายนอกอาคารแบบทั่วไปที่ได้ทำการปรับปรุงใหม่โดยใช้วัสดุเคลือบผิวกระจกจะทำให้การใช้พลังงานภายในอาคารนั้นลดลงอย่างมีประสิทธิภาพ และ

เป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการจัดการรังสีจากแสงอาทิตย์ เข้าสู่ตัวอาคาร ตัวอย่างหนึ่ง คือ การเคลือบผิวกระจกแบบมาตรฐานด้วยโลหะเงิน (low emissivity) อิเล็กโตรโครมิก เทอร์โมโครมิก และซัสเพนเด็ด พาร์ทิเคิล (Marina et al., 2019) การปรับปรุงประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของกระจกบานหน้าต่างที่ติดตั้งในอาคารเดิม คือ การติดตั้งวัสดุที่มีค่า E ต่ำ เพื่อที่จะช่วยลดการแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์เข้าไปในห้อง (Zhai et al., 2017) กระจกที่มีการเคลือบผิวกระจกแบบมาตรฐานด้วยโลหะเงิน (low-E) และฟิล์มกรองแสง (cooling film) จะได้รับเลือกเป็นมาตรการลดการใช้พลังงานในอาคาร

4.2 ฉนวนกันความร้อนของหลังคาและผนังนั้นเป็นอีกหนึ่งมาตรการที่เป็นทางเลือกในการลดการใช้พลังงานในอาคาร ข้อดีของฉนวนกันความร้อนคือง่ายต่อการติดตั้งและการใช้งานเนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถปรับเปลี่ยนเข้ากับโครงสร้างอาคารได้โดยง่าย ป้องกันความร้อนไม่ให้ส่งผ่านไปยังส่วนอื่น ๆ ได้ดี โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้ (1) Thickness = 0.15 เมตร (2) Thermal Conductivity = 0.038 W/m.K (3) Density = 12.00 kg/m3 และ (4) Specific Heat = 960 J/kg.K

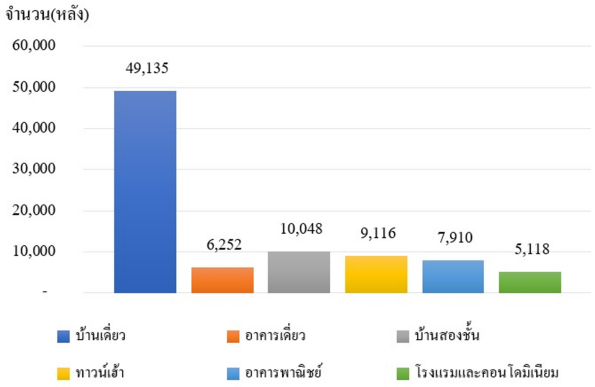
4.3 การติดตั้งแผงโซล่าร์เซลล์นั้นโดยปกติจะนิยมติดตั้งบนหลังคาเพราะเป็นตำแหน่งที่ดีและง่ายต่อการติดตั้ง (Li et al., 2016) การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคานั้นหากต้องการให้ผลิตกระแสไฟฟ้าให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดนั้นค่อนข้างเป็นได้ยากหากติดตั้งในเขตพื้นที่เมืองและเนื่องจากมีพื้นที่ของหลังคาจำกัดที่สามารถเข้าถึงมุมที่ดีที่สุดในการรวบรวมแสงแดดจากดวงอาทิตย์และในบางพื้นที่อาจถูกบดบังจากเงาของโครงสร้างอาคารสูง ซึ่งงานวิจัยที่มีอยู่โดยส่วนมากนั้นได้พยายามที่จะประเมินศักยภาพของโซลาร์เซลล์ทั้งในระดับภูมิภาคและในระดับประเทศ (Zhang, Ren, Pu & Wang, 2020) งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Helioscope เพื่อจำลองการติดตั้งโซลาร์เซลล์ในพื้นที่ต่าง ๆ และคำนวนประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยกำหนดความจุหรือพื้นที่ของโซลาร์เซลล์ตลอดจนปัจจัยต่าง ๆ เช่น มุมยกระดับของโซลาร์เซลล์ ทิศทางที่โซลาร์เซลล์ ได้รับแสง ความสูญเสียต่าง ๆ เป็นต้น

## วิธีดำเนินการวิจัย

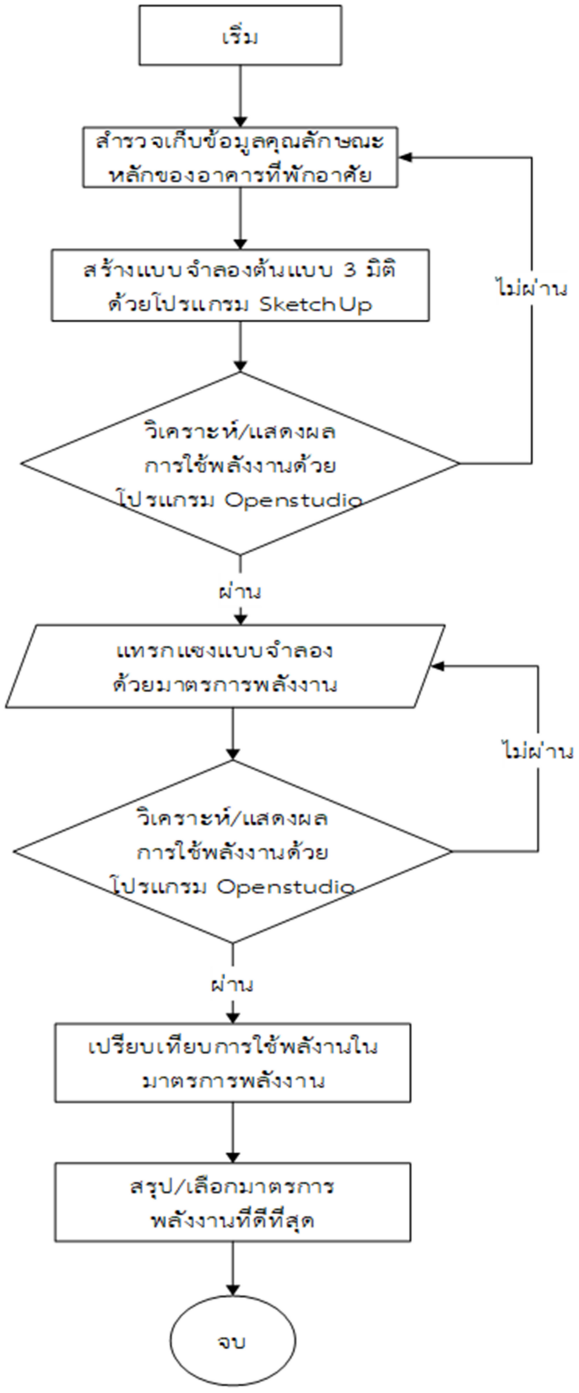
งานวิจัยนี้จะใช้เมืองพัทยาเป็นกรณีศึกษา เมืองพัทยาเป็นเขตการปกครองเฉพาะในจังหวัดชลบุรี พิกัดละติจูด 13 องศาเหนือ และลองจิจูด 101 องศาตะวันตก มีพื้นที่ดินประมาณ 53.44 ตารางกิโลเมตร การใช้ที่ดินเป็นที่อยู่อาศัยคิดเป็นร้อยละ 12.47 ของพื้นที่โดยรวมของพัทยา และมีที่อยู่อาศัย 87,579 แห่ง (Pattaya City, 2019) จากข้อมูลข้างต้นของอาคารในแต่ละประเภท จะสามารถนำมากำหนดประเภทของอาคารที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองอาคารที่พักอาศัยในพื้นที่ศึกษาเมืองพัทยา รายละเอียดการแบ่งอาคารแต่ละประเภทอาคารและจำนวนของแต่ละอาคารที่ใช้ศึกษาสามารถแสดงดังภาพ 2 และขั้นตอนในการวิเคราะห์เปรียบเทียบการใช้พลังงานในแต่ละประเภทอาคารแสดงได้ดังภาพ 3

1. การเก็บข้อมูลและจำแนกอาคารในรูปแบบอาคาร 2 มิติ

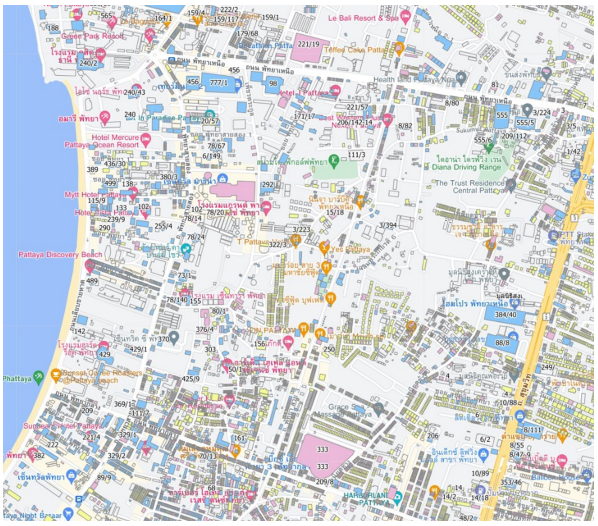
ในขั้นตอนนี้เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลประเภทอาคารที่พักอาศัยในรูปแบบข้อมูล 2 มิติ โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในการเก็บรวบรวมข้อมูลและสร้างฐานข้อมูลของประเภทอาคาร จำนวนอาคาร ความกว้าง ความยาว และอื่น ๆ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลสำมะโนครัว ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ และเรขาคณิตของอาคาร ในกระบวนการทำแผนที่สารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS) ข้อมูลจะถูกรวบรวมจากแผนที่ดาวเทียมของ Google Earth เพื่อสร้างฐานข้อมูลทางเรขาคณิตและที่ไม่ใช่เรขาคณิต ซึ่งจากข้อมูลการแบ่งประเภทอาคารของเมืองพัทยาจะสามารถบันทึกฐานข้อมูลในระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS) โดยการศึกษานี้จะช่วยให้นักวางแผนนโยบายด้านพลังงานมีการตัดสินใจอย่างมีข้อมูล แสดงได้ดังภาพ 4




**ภาพ 2** ประเภทและจำนวนอาคารที่พักอาศัยในเมืองพัทยา




**ภาพ 3** Flow Chart ขั้นตอนวิเคราะห์และเปรียบเทียบแบบจำลองอาคาร



**ภาพ 4** แผนที่ GIS แบ่งประเภทอาคารที่พักอาศัย (2มิติ)

2. การเก็บข้อมูลและจำแนกอาคารในรูปแบบอาคาร 3 มิติ

อาคารต้นแบบในพื้นที่ศึกษาเมืองพัทยา จะแบ่งประเภทอาคารเป็นทั้งหมด 6 ประเภท ได้แก่ (1) บ้านเดี่ยว (2) อาคารเดี่ยว (3) บ้านสองชั้น (4) ทาวน์เฮ้าส์ (5) อาคารพาณิชย์ และ (6) โรงแรมและคอนโดมิเนียม ซึ่งประเภทอาคารดังกล่าวจะได้รับการตรวจสอบโดยใช้เครื่องมือคำนวณพื้นที่ของ Google Maps เพื่อกำหนดข้อมูลโดยทั่วไป นอกจากนี้พารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความสูง และความครอบคลุมของหน้าต่างยังถูกประเมินด้วยความช่วยเหลือของ Google Street View โดยแบบจำลองสามมิติจะแสดงกรอบอาคารในรูปแบบรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานเพื่ออำนวยความสะดวกในกระบวนการสร้างแบบจำลอง ผลลัพธ์ของแบบจำลองได้รับอิทธิพลมาจากตารางเวลา และลักษณะการใช้งานในอาคาร ในการศึกษานี้ได้ใช้มาตรฐาน ASHRAE 90.1-2010 (ASHRAE, 2010) เป็นหลักในการอ้างอิง สำหรับอาคารประเภทต่าง ๆ แบบจำลองได้ให้ข้อมูลมากมายเกี่ยวกับการใช้ไฟฟ้าและ Heating Ventilation and Air-conditioning-HVAC Systems ของสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ

3. ในขั้นตอนนี้จะเป็นการนำสถิติข้อมูลจำนวนอาคารและข้อมูลพื้นฐานของอาคารแต่ละประเภท เช่น ความกว้าง ความยาว ความสูง จำนวนชั้น อุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์ส่องสว่าง จำนวนผู้ใช้อาคาร ลักษณะการใช้อาคาร

และระยะเวลาในการใช้อาคาร นำมาใส่โปรแกรม OpenStudio ซึ่งเป็นโปรแกรม API--Application Programming Interface ที่ใช้งานร่วมกับโปรแกรม EnergyPlus เพื่อแสดงผลการใช้พลังงานรวมของอาคารต้นแบบแต่ละประเภท จากนั้นจะนำมาตรการด้านพลังงานต่าง ๆ เข้ามาแทรกแซงแบบจำลองเพื่อเปรียบว่ามาตรการใดสามารถลดการใช้พลังงานรวมในอาคารได้ที่ที่สุด

## ผลการวิจัย

### 1. ผลการเก็บข้อมูล

แบบจำลองพลังงานอาคารที่พักอาศัยได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ข้อกำหนดในระดับอาคารเดี่ยว โดยมีคุณลักษณะหลักของทั้ง 6 อาคารสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้ (1) ขนาดของพื้นที่ ($m^2$) (2) จำนวนชั้น (3) ประเภทผนัง (4) External wall ($W/m^2$ °C) (5) Glazing area (%) (6) U-value ($W/m^2$ °C) (7)Lighting load (W/m) (8) Equipment ($W/m^2$) (9) HVAC equipment (COP) และ (10) จำนวนอาคาร (หลัง) คุณลักษณะเหล่านี้แสดงได้ดังตาราง 1 เมื่อได้คุณลักษณะหลักของทั้ง 6 อาคารแล้วจากนั้นจะเป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลในเรื่องของกระจกหน้าต่างที่ใช้ในส่วนภายนอกของอาคาร แสดงดังตาราง 2 โดยจะพิจารณาว่าการติดตั้งกระจก Low-E และการติดตั้ง Cooling Film แบบใดในพื้นที่ศึกษาเมืองพัทยาจะคุ้มค่าที่สุดในด้านการประหยัดพลังงานรวมภายในอาคาร และในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการเก็บข้อมูลของโซลาร์เซลล์ ซึ่งจะถูกวางไว้บนหลังคาของอาคารที่อยู่อาศัยทั้ง 6 ประเภทอาคาร เพื่อใช้เป็นพลังงานทางเลือกและวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าจากการติดตั้งโซลาร์เซลล์ โดยแบบจำลองการติดตั้งโซลาร์เซลล์บนอาคาร 6 ประเภทในเขตเมืองพัทยาสามารถแสดงได้ในตาราง 3

### 2. ผลการจัดประเภทอาคาร

ในขั้นตอนนี้เมื่อได้แบบจำลองพลังงานอาคารที่พักอาศัยและคุณลักษณะต่าง ๆ ของอาคารแล้ว จากนั้นทำการจำลองอาคารแต่ละประเภทด้วยโปรแกรม OpenStudio โดยผลการใช้พลังงานของอาคารที่พักอาศัยของอาคารต้นแบบ ทั้ง 6 ประเภท สามารถแสดงได้ดังตาราง 4 ผลการศึกษาพบว่า การใช้พลังงานของอาคารใน 1 หน่วยอาคาร โรงแรมและคอนโดมิเนียมจะใช้พลังงานมากที่สุดถึง 8,382,758 kWh/yr รองลงมาคือ อาคารพาณิชย์และทาวน์เฮ้าส์ ใช้พลังงาน 63,682 kWh/yr และ 29,994 kWh/yr ตามลำดับ

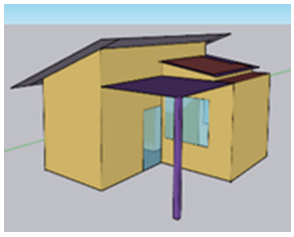
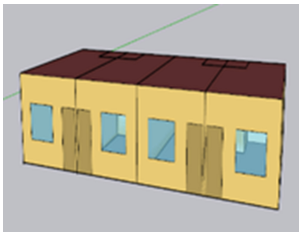
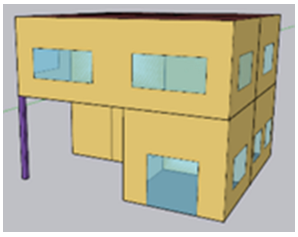
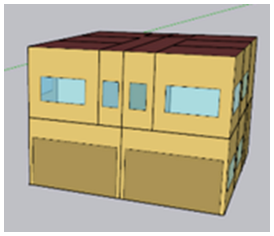
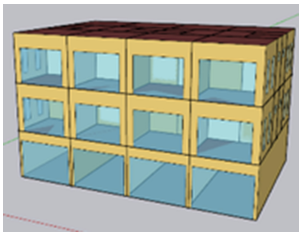
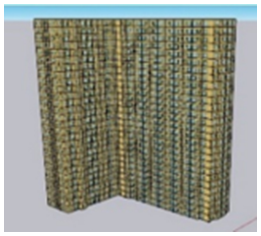
### 3. ผลการพัฒนาแบบจำลองตามประเภทอาคาร

เมื่อได้แบบจำลองต้นแบบของอาคารที่พักอาศัยทั้ง 6 ประเภทแล้ว ต่อมาจะทำการเพิ่มความสามารถในการป้องกันความร้อน ซึ่งจะช่วยให้ลดการใช้พลังงานจากเครื่องปรับอากาศลงได้ และส่งผลให้การใช้พลังงานโดยรวมของอาคารที่พักอาศัยนั้นลดลงอย่างเป็นนัยสำคัญ สามารถนำมากำหนดมาตรการในการลดการใช้พลังงานของอาคารที่พักอาศัยได้ แสดงดังตาราง 5 โดยมาตรการลดการใช้พลังงานของอาคารที่พักอาศัยทั้ง 8 รูปแบบ ตามตาราง 5 จะสามารถนำมาวิเคราะห์พลังงานรวมของอาคารที่พักอาศัยทั้ง 6 ประเภท จำนวน 87,579 อาคาร ในเขตพื้นที่เมืองพัทยา โดยจะนำมาตรการพื้นฐานทั้ง 8 รูปแบบมากำหนดมาตรการเพิ่มเติมเพื่อวิเคราะห์ว่ามาตรการใดที่สามารถลดการใช้พลังงานในอาคารที่พักอาศัยในเขตพื้นที่เมืองพัทยาได้สูงสุดผลการจำลองของอาคารทั้งหมดแยกตามแต่ละมาตรการแสดงไว้ดังตาราง 6 โดยในตารางจะแสดงลำดับมาตรการอยู่ท้ายจากข้อมูลการใช้พลังงานยกตัวอย่างเช่นในช่องที่ 1 การใช้พลังงานรวมในอาคารทั้ง 6 ประเภทอาคารเท่ากับ 44,176,062 (1) โดย (1) หมายถึงมาตรการที่ 1

การใช้พลังงานโดยรวมของอาคารทุกประเภท รวมถึงการติดตั้ง Solar PV โดยในงานวิจัยนี้ ตามมาตรการที่ 40 Double IGU with Low-E G W4+A+B+C+D เป็นมาตรการที่ดีที่สุด กรณีอาคารเดิมใช้พลังงาน 44,176,062 MWh/yr ดำเนินการตามมาตรการ 40 ใช้พลังงาน 31,267,417 MWh/yr ทำให้พลังงานรวมของอาคารใช้น้อยลงกว่าเดิม 12,908,645 MWh/yr สำหรับประเภทอาคารที่ได้รับการปรับปรุงใหม่ด้วยกระจก Double IGU with Low-E Green 6 มิลลิเมตร (W4) ตามมาตรการที่ 16 ใช้พลังงาน 41,925,466 MWh/yr กระจกหน้าต่างประเภทนี้ช่วยประหยัดพลังงานได้มากที่สุดในบรรดาตัวเลือกของกระจกทั้งหมด

**ตาราง 1**

*ข้อมูลอาคารแต่ละประเภทและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ*

| **ประเภทของอาคาร** | **บ้านเดี่ยว** | **อาคารเดี่ยว** | **บ้านสองชั้น** |
|---|---|---|---|
| **โมเดลอาคารต้นแบบ** |  |  |  |
| พื้นที่ ($m^2$) | 55 | 133 | 128 |
| จำนวนชั้น | 1 | 1 | 2 |
| ประเภทผนัง | คอนกรีตสำเร็จรูป | คอนกรีตสำเร็จรูป | คอนกรีตสำเร็จรูป |
| External wall ($W/m^2{}^oC$) | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Glazing area (%) | 30 | 20 | 40 |
| U-value ($W/m^2\ ^oC$) | 5.74 | 5.74 | 5.74 |
| 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 |
| จำนวนอาคาร | 49,135 | 6,252 | 10,048 |
| **ประเภทของอาคาร** | **ทาวน์เฮ้าส์** | **อาคารพาณิชย์** | **โรงแรมและคอนโดมิเนียม** |
| **โมเดลอาคารต้นแบบ** |  |  |  |
| พื้นที่ ($m^2$) | 210 | 648 | 30,625 |
| จำนวนชั้น | 2 | 3 | 25 |
| ประเภทผนัง | คอนกรีตสำเร็จรูป | คอนกรีตสำเร็จรูป | คอนกรีตสำเร็จรูป |
| External wall ($W/m^2\ ^oC$) | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Glazing area (%) | 35 | 50 | 50 |
| U-value ($W/m^2\ ^oC$) | 5.74 | 5.74 | 5.74 |
| Lighting load ($W/m^2$) | 8-12 | 8-12 | 8-12 |
| Equipment ($W/m^2$) | 8-12 | 8-12 | 8-12 |
| HVAC equipment (COP) | 3.2 | 3.2 | 3.2 |
| จำนวนอาคาร | 9,116 | 7,910 | 5,118 |

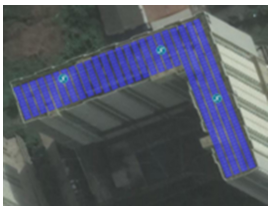
**ตาราง 2**

*ประเภทพารามิเตอร์และประเภทกระจก*

| พารามิเตอร์ | Single Monolithic | Single Monolithic | Laminated | Double Glazing IGU | Double Glazing IGU with Low-E |
|---|---|---|---|---|---|
| สี | Green | Film BK | Green | Green | Green |
| ความหนา | 6 มม | 6 มม | 6.38 มม | 6 /12 มม | 6 /12 มม |
| U-value | 5.80 | 5.67 | 5.70 | 2.50 | 1.80 |
| SHGC | 0.56 | 0.44 | 0.73 | 0.44 | 0.32 |
| VLT | 0.7 | 0.07 | 0.71 | 0.62 | 0.49 |

**ตาราง 3**

*รูปแบบการติดตั้งโซล่าร์เซลล์บนหลังคาอาคารที่พักอาศัยทั้ง 6 ประเภท*

| ประเภทของอาคาร | บ้านเดี่ยว | อาคารเดี่ยว | บ้านสองชั้น |
|---|---|---|---|
| โมเดลอาคารต้นแบบ |  |  |  |
| Annual Production (MWh) | 20.10 | 6.826 | 13.21 |
| Performance Ratio (%) | 74.5 | 73.5 | 71.9 |
| Inverters | 1 (17KTL) | 1 (5KTL) | 1 (10KTL) |
| Module | 36 (450W) | 12 (450W) | 32 (335W) |
| **ประเภทของอาคาร** | **ทาวน์เฮ้าส์** | **อาคารพาณิชย์** | **โรงแรมและคอนโดมิเนียม** |
| โมเดลอาคารต้นแบบ |  |  |  |
| Annual Production (MWh) | 13.39 | 12.94 | 248.2 |
| Performance Ratio (%) | 77.7 | 77.4 | 79.5 |
| Inverters | 1 (10KTL) | 1 (10KTL) | 3 (60KTL) |
| Module | 22 (450W) | 21 (450W) | 394 (450W) |

**ตาราง 4**

*ประเภทของอาคารต้นแบบและการใช้พลังงาน*

| ประเภทของอาคาร | Total Site Energy (kWh/yr) | Total Site EUI (kWh/m2/yr) | Total Building Energy (MWh/yr) |
|---|---|---|---|
| บ้านเดี่ยว | 11,420 | 208 | 561,122 |
| อาคารเดี่ยว | 4,837 | 199 | 30,241 |
| บ้าน 2 ชั้น | 26,473 | 151 | 266,001 |
| ทาวน์เฮ้าส์ | 29,994 | 187 | 273,425 |
| อาคารพาณิชย์ | 63,682 | 185 | 503,725 |
| โรงแรม&คอนโดมิเนียม | 8,382,758 | 273 | 42,902,955 |
| Total Residential Energy | | | 44,537,469 |

โดยรายละเอียด การใช้พลังงานและปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดของพื้นที่ศึกษาของอาคารแต่ละประเภทสามารถแสดงได้ตาราง 7 ซึ่งพบว่าอาคารที่ใช้พลังงานมากที่สุด คือ โรงแรมและคอนโดมิเนียม ปริมาณพลังงานทั้งหมดที่ใช้โดยอาคารทั้งหลัง คือ 42,902,955 MWh/yr ในทางกลับกัน ประเภทที่มีจำนวนอาคารมากที่สุดคือบ้านเดี่ยว ซึ่งใช้พลังงานรวม 561,122 MWh/yr หากดำเนินการตามมาตรการที่ 40 (W4+A+B+C+D) ใช้พลังงานรวม -763,823 MWh/yr (ค่าติดลบเนื่องจากการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า การผลิตไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์) ทำให้การใช้พลังงานรวมของอาคารประเภทบ้านเดี่ยวลดลงได้ 1,324,943 MWh/yr และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง 771,249 tCO2e/yr การใช้มาตรการดังกล่าวทำให้ปริมาณการใช้พลังงานรวมของอาคารประเภทบ้านเดี่ยวนั้นลดลงอย่างชัดเจนหากเปรียบเทียบกับอาคารประเภทอื่น ๆ เพราะเป็นอาคารที่มีจำนวนมากที่สุดในพื้นที่ศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาฐานข้อมูลแบบสองมิติ GIS & แบบสามมิติ Modeling ของที่อยู่อาศัยทั้ง 6 ประเภทอาคารพื้นที่ศึกษา เมืองพัทยา จังหวัด ชลบุรี เพื่อเป็นแนวทางการศึกษาในการจัดการพลังงานหรือใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับผู้ที่สนใจสร้างแบบจำลองการจัดการพลังงานสำหรับพื้นที่อื่น ๆ

## สรุปและอธิปายผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการสำหรับการสร้างแบบจำลองพลังงานอาคารแบบบูรณาการวิเคราะห์อิทธิพลของมาตรการการอนุรักษ์พลังงาน และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กรณีศึกษา เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี อาคารต้นแบบ 6 อาคารจะถูก ใช้เพื่อแสดงอาคารที่อยู่อาศัยภายในพื้นที่ศึกษาทั้งหมด (รวมถึงคอนโดและโรงแรม) โดยวิธีการที่นำเสนอประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้ (1) การพัฒนาแบบจำลองต้นแบบอาคารของแต่ละประเภทอาคารในรูปแบบ 2 มิติโดยใช้ซอฟต์แวร์ QGIS (2) การสร้างและจำลองการใช้พลังงานในอาคารของอาคารอ้างอิง 6 ประเภทโดยใช้ซอฟต์แวร์ OpenStudio และ EnergyPlus (3) ดำเนินการหามาตรการทางเลือกของมาตรการอนุรักษ์พลังงานและแนวทางที่เป็นไปได้เพื่อให้เกิดความเป็นกลางทางคาร์บอน และ (4) การวิเคราะห์การใช้พลังงานที่ลดลงและปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การจำลองของอาคารจะถูกเรียกใช้ด้วยแบบจำลองพลังงานโปรแกรม OpenStudio ซึ่งใช้เป็นต้นแบบของตัวแทนของอาคารของทั้งพื้นที่ศึกษาโดยใช้เป็นกรณีอ้างอิงเพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารผลลัพธ์โดยโปรแกรม EnergyPlus จะแสดงให้เห็นว่าทางเลือกการใช้พลังงานที่เหมาะสมและลดการใช้พลังงานได้สูงสุด 3 อันดับแรก คือ

(1) มาตรการ 25 Single 6 mm ($W_1$) + Insulation Roof + Insulation Wall + Film RL 01 BK + Solar Rooftop สามารถลดการใช้พลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารต้นแบบได้ 9,466,016 MWh/yr และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง 5,510,168 $tCO_2e/yr$

(2) มาตรการ 35 Double IGU with Low-E ($W_3$) + Insulation Roof + Insulation Wall + Film RL 01 BK + Solar Rooftop สามารถลดการใช้พลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารต้นแบบได้ 12,113,180 MWh/yr และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง 7,051,082 $tCO_2e/yr$

(3) มาตรการ 40 Double IGU with Low-E ($W_4$) + Insulation Roof + Insulation Wall + Film RL 01 BK + Solar Rooftop สามารถลดการใช้พลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารต้นแบบได้ 12,908,646 MWh/yr และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง 7,514,123 $tCO_2e/yr$

การเลือกใช้ กระจก Glazing with Low-E coatings Insulation Roof + Insulation Wall + Film RL 01 BK และ การติดตั้ง Solar Rooftop ถูกระบุว่า เป็นมาตรการการอนุรักษ์พลังงานที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานและลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหรือผู้กำหนดนโยบายด้านพลังงานสามารถนำแนวทางวิธีการที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ไปช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) และการเปลี่ยนผ่านไปสู่สังคมคาร์บอนต่ำได้ต่อไป

**ตาราง 5**

*มาตรการทางด้านพลังงาน*

| มาตรการ | รายละเอียด | สัญลักษณ์ |
|---|---|---|
| 1 | Single 6 mm | $W_1$ |
| 2 | Laminated 6.38 mm | $W_2$ |
| 3 | Double IGU 6mm 12 mm 6 mm | $W_3$ |
| 4 | Double IGU with Low-E | $W_4$ |
| 5 | Insulation Roof | A |
| 6 | Insulation Wall | B |
| 7 | Film RL 01 BK | C |
| 8 | Solar Rooftop | D |

**ตาราง 6**

*การใช้พลังงานรวมของอาคารทั้งหมดในเมืองพัทยาแยกตามมาตรการพลังงาน*

| Renovate window | Glazing (MWh/yr) | Glazing+A (MWh/yr) | Glazing+B (MWh/yr) | Glazing+C (MWh/yr) | Glazing+D (MWh/yr) |
|---|---|---|---|---|---|
| Single 6 mm ($W_1$) | 44,176,062 (1) | 40,251,965 (2) | 41,506,250 (3) | 43,641,187 (4) | 41,518,332 (5) |
| Laminated 6.38 mm ($W_2$) | 44,647,987 (6) | 40,733,055 (7) | 42,024,441 (8) | 44,290,552 (9) | 41,990,257 (10) |
| Double IGU 6 mm 12 mm 6 mm ($W_3$) | 42,622,581 (11) | 38,565,328 (12) | 39,808,032 (13) | 42,021,041 (14) | 39,964,851 (15) |
| Double IGU with Low-E ($W_4$) | 41,925,466 (16) | 37,826,368 (17) | 39,025,817 (18) | 41,320,937 (19) | 39,267,736 (20) |
| **Renovate window** | **Glazing+A+B (MWh/yr)** | **Glazing+A+C (MWh/yr)** | **Glazing+A+D (MWh/yr)** | **Glazing+A+B+C (MWh/yr)** | **Glazing+A+B+C+D (MWh/yr)** |
| Single 6 mm ($W_1$) | 37,248,273 (21) | 39,699,964 (22) | 37,594,235 (23) | 36,662,458 (24) | 34,004,728 (25) |
| Laminated 6.38 mm ($W_2$) | 37,766,810 (26) | 40,365,150 (27) | 38,075,325 (28) | 37,367,776 (29) | 34,710,046 (30) |
| Double IGU 6 mm 12 mm 6 mm ($W_3$) | 35,456,734 (31) | 37,944,900 (32) | 35,907,598 (33) | 34,720,612 (34) | 32,062,882 (35) |
| Double IGU with Low-E ($W_4$) | 34,594,175 (36) | 37,184,777 (37) | 35,168,638 (38) | 33,925,146 (39) | 31,267,417 (40) |

**ตาราง 7**

*การใช้พลังงานและปริมาณการปล่อย $CO_2$ ของอาคารทุกประเภทตามมาตรการที่ 40*

| Type of Building | Original Building (MWh/yr) | $CO_2$ Emissions ($tCO_2e$/yr) | มาตรการที่ 40 W4+A+B+C+D (MWh/yr) | $CO_2$ Emissions ($tCO_2e$/yr) | Energy Savings (MWh/yr) | $CO_2$ Emission Reductions ($tCO_2e$/yr) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| บ้านเดี่ยว | 561,122 | 326,628 | -763,823 | -444,621 | 1,324,943 | 771,249 |
| อาคารเดี่ยว | 30,241 | 17,605 | -28,005 | -16,302 | 58,248 | 33,907 |
| บ้าน2ชั้น | 266,001 | 154,838 | -21,641 | -12,597 | 287,639 | 167,435 |
| ทาวน์เฮ้าส์ | 273,425 | 103,906 | -42,694 | -24,852 | 221,195 | 128,758 |
| อาคารพาณิชย์ | 503,725 | 138,103 | 1,081 | 629 | 236,169 | 137,473 |
| โรงแรมและคอนโดมิเนียม | 42,902,955 | 24,973,810 | 32,122,496 | 18,698,505 | 10,780,458 | 6,275,305 |
| **รวม** | 44,537,469 | 25,714,886 | 31,267,417 | 18,200,763 | 12,908,645 | 7,514,123 |

**ข้อเสนอแนะ**

ในการวิจัยนี้ แบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นนั้นสร้างโดยใช้ข้อมูลที่จำกัด และหากต้องการทำการวิจัยเพิ่มเติมต่อไปในอนาคตควรพิจารณาประเด็นดังต่อไปนี้

1) การวิเคราะห์เชิงลึกของต้นแบบอาคารจำเป็นต้องมีความครอบคลุมมากขึ้น เพื่อปรับปรุงแบบจำลองให้มีประสิทธิภาพและใกล้เคียงกับความจริงมากที่สุดซึ่งจะมีการรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติม เช่น ข้อมูลเกี่ยวกับขนาดของอาคาร ลักษณะอาคาร ความลาดเอียง และข้อมูลพื้นที่ของแต่ละชั้นโดยละเอียด

2) การรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์อาคารต้นแบบควรที่จะศึกษาและเก็บข้อมูลเพิ่มเติมในเมืองท่องเที่ยวอื่น ๆ เพิ่มเติม

3) ควรมีการศึกษาและสร้างแบบจำลองต้นแบบของอาคารที่พักอาศัยประเภทคอนโดและโรงแรมเพิ่มเติม โดยแบ่งตามขนาด พื้นที่ จำนวนชั้น และจำนวนห้องพัก

4) ควรมีการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของอัตราการลงทุนและความคุ้มค่าในการดำเนินการตามมาตรการด้านพลังงานต่าง ๆ

## References


Alhamwi, A., Medjroubi, W., Vogt, T., & Agert, C. (2019). Development of a GIS-Based platform for the allocation and optimisation of distributed storage in Urban Energy Systems. *Applied Energy, 251*, 113360. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113360

Ali, U., Haris Shamsi, M., Hoare, C., Mangina, E., & O'Donnell, J. (2019). A data-driven approach for multi-scale building archetypes development. *Energy and Buildings, 202*, 109364. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109364

Ali, U., Shamsi, M. H., Hoare, C., & O'donnell, J. (2018). GIS-Based residential building energy modeling at district scale. *Proceedings of BSO 2018: 4th Building Simulation and Optimization Conference, Cambridge, UK: 11-12 September 2018* (pp. 153-160). UK: International Building Performance Simulation Association. http://www.ibpsa.org/proceedings/BSO2018/2B-2.pdf

ASHRAE. (2010). *ASHRAE 90.1 appendix G: Building performance rating method*. U.S.A.: ASHRAE

DOE. (2021). *EnergyPlus, department of energy, energy.Gov*. Retrieved from https://www.energy.gov/eere/buildings/articles/energyplus

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

Li, C. (2018). *GIS for urban energy analysis. In Comprehensive Geographic Information Systems Vol. 3 (pp. 187–195)*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

Li, G., Xuan, Q., Akram, M. W., Akhlaghi, Y. G., Liu, H., & Shittu, S. (2020). Building integrated solar concentrating systems: A review. *Applied Energy, 260*, 114288. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114288

Li, Y., Ding, D., Liu, C., & Wang, C. (2016). A pixel-based approach to estimation of solar energy potential on building roofs. *Energy and Buildings, 129*, 563–573. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.025

Marina, A., Soebarto, V., Williamson, T., Liang, R., Ebendorff-Heidepriem, H., & Wu, Y. (2019). Thermochromic smart window technologies for building application: A review. *Applied Energy, 255*, 113522. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113522

Nutkiewicz, A., Yang, Z., & Jain, R. K. (2018). Data-driven Urban Energy Simulation (DUE-S): A framework for integrating engineering simulation and machine learning methods in a multi-scale urban energy modeling workflow. *Applied Energy, 225*, 1176-1189. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.023

Reinhart, C. F., & Davila, C. C. (2016). Urban building energy modeling–A review of a nascent field. *Building and Environment, 97*, 196-202. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001

Pattaya City. (2019). *Translation of Pattaya City yearly report 2019*. Pattaya: Pattaya City. (in Thai)

Sola, A., Corchero, C., Salom, J., & Sanmarti, M. (2018). Simulation tools to build urban-scale energy models: A review. *Energies, 11*(12), 3269. https://doi.org/10.3390/en11123269

Stadler, M., Firestone, R., & Curtil, D. (2006). *On-site generation simulation with energyplus for commercial buildings*. Retrieved from https://escholarship.org/uc/item/7cf5g36q

UN DESA. (2018). *68% of the world population projected to live in urban areas by 2050, says UN. United Nations*. Retrieved from https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html

Zhai, Y., Ma, Y., David, S. N., Zhao, D., Lou, R., Tan, G., Yang, R., & Yin, X. (2017). Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling. *Science (New York, N.Y.), 355*(6329), 1062–1066. https://doi.org/10.1126/science.aai7899

Zhang, Y., Ren, J., Pu, Y., & Wang, P. (2020). Solar energy potential assessment: A framework to integrate geographic, technological, and economic indices for a potential analysis. *Renewable Energy, 149*, 577–86. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.071