

การศึกษาเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนโครงสร้างอาคาร ระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็ก ไม้ และเหล็กรูปพรรณ: กรณีศึกษา บ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4 ของกระทรวงพลังงาน

ภัทร์ แผนสมบูรณ์¹, ศุภรัชชัย วรรัตน์^{1*}, สุรศักดิ์ จันฉาย², ประยุทธ์ ฤทธิเดช¹, ณัฐฐ์ นาคร³

¹หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาการจัดการทางวิศวกรรม

วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

²บริษัท เอ-เวสต์ พร็อพเพอร์ตี้ จำกัด

³การประสานงานภูมิภาคสาขาพญา (ชั้นพิเศษ) ชลบุรี

Received: 9 January 2025

Revised: 24 May 2025

Accepted: 30 May 2025

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในปัจจุบันเกิดจากการสะสมของก๊าซเรือนกระจกซึ่งภาคการก่อสร้างและงานอาคารมีส่วนการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกถึง 37% ของปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด หากสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการก่อสร้างได้จะสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภูมิอากาศได้ ผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงความสำคัญจึงได้ทำการศึกษาและทำการเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของโครงสร้างบ้านพักอาศัยจากชนิดวัสดุก่อสร้างที่แตกต่างกัน 3 ชนิดคือ คอนกรีตเสริมเหล็ก ไม้ และเหล็กรูปพรรณ โดยใช้โครงสร้างบ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4 ของกระทรวงพลังงาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของวัสดุก่อสร้างที่แตกต่างกัน เพื่อใช้เป็นทางเลือกในการออกแบบบ้านพักอาศัยที่สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำที่สุด จากผลการวิจัยพบว่าบ้านโครงสร้างไม้มีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำสุดที่ 583.61 kgCO₂eq/m² รองลงมาคือบ้านโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ 620.82 kgCO₂eq/m² และบ้านโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูงที่สุด 680.80 kgCO₂eq/m² เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างบ้านคอนกรีตเสริมเหล็กกับโครงสร้างไม้และโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ พบว่าสามารถลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้ถึง 14.28% และ 6% ตามลำดับ

คำสำคัญ: การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ บ้านประหยัดพลังงาน คอนกรีตเสริมเหล็ก ไม้ เหล็กรูปพรรณ

*ผู้ประสานงานหลัก; อีเมล: vorarat@dpu.ac.th

Comparing The Carbon Dioxide Emissions from Residential Building Structures with Reinforced Concrete, Wood, and Steel Profiles: A Case Study of The D.D. Rakfa 4 House of The Ministry of Energy

Pat Phansomboon¹, Suparatchai Vorarat^{1,*}, Surasak Janchai²,
Prayuth Rittidatch¹, Nat Nakkorn³

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

²A-West Property Co., Ltd

³Provincial Waterworks Authority, Branch Office Pattaya (Special Level)

Received: 9 January 2025

Revised: 24 May 2025

Accepted: 30 May 2025

Abstract

The accumulation of greenhouse gases is the cause of current climate change, with the construction and building sector accounting for 37% of total greenhouse gas emissions. Reducing greenhouse gas emissions from the construction sector can mitigate the impact of climate change. Realizing the importance of this, the researchers conducted a study comparing the carbon dioxide (CO₂) emissions of residential structures made of three different construction materials: reinforced concrete, wood, and steel. They used the D.D. Rak Fah 4 house structure from the Ministry of Energy. The study's objective was to compare the carbon dioxide (CO₂) emissions of various construction materials, aiming to design residential houses that can reduce CO₂ emissions as much as possible. The results of the research found that wooden-structured houses had the lowest carbon dioxide (CO₂) emissions at 583.61 kgCO₂eq/m², followed by steel-structured houses at 620.82 kgCO₂eq/m², and reinforced concrete-structured houses had the highest at 680.80 kgCO₂eq/m² when comparing reinforced concrete structures with wood and steel structures. The study revealed that it could decrease carbon dioxide (CO₂) emissions by 14.28% and 6%, respectively.

Keywords: CO₂ Emissions, Energy-saving House, Reinforced Concrete, Wood, Steel Structure

*Corresponding Author; E-mail: vorarat@dpu.ac.th

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโลกได้รับผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณการสะสมของก๊าซเรือนกระจกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก (Climate Change) ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบกับการใช้ชีวิตของคนทั่วโลก (Acen et al., 2024) 193 ประเทศในนามสมาชิกสหประชาชาติร่วมกันตกลงประกาศเป้าหมายเกี่ยวกับการลดผลกระทบจากสภาพภูมิอากาศ (Climate Action) ซึ่งเป็นหนึ่งในเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) ขององค์การสหประชาชาติทั้งหมด 17 ข้อ หรือ SDGs 17 (Wallengren et al., 2024) เพื่อให้ผลกระทบที่เกิดขึ้นในอนาคตลดลง รายงานล่าสุดขององค์การสหประชาชาติ The Sustainable development goals report special edition. ปี ค.ศ. 2023 พบว่าการดำเนินการเพื่อแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทั่วโลกยังไม่เพียงพอและไม่รวดเร็วพอที่จะแก้ไขปัญหาเพื่อให้บรรลุเป้าหมายการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ให้ได้ประมาณครึ่งหนึ่ง ภายในปี ค.ศ. 2030 เพื่อให้บรรลุเป้าหมายการจำกัดอุณหภูมิเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น 1.5 °C (UNSD, 2020) จากข้อมูลขององค์การสหประชาชาติพบว่า ภาคการก่อสร้างและงานอาคารปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) คิดเป็น 37% (United Nations Environment Program (2024) Building Materials and the Climate: Constructing a New Future) คิดเป็น 1 ใน 3 ของปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้นทั้งหมด (UNEP, 2024) ดังนั้นการลดผลกระทบจากภาคอุตสาหกรรมก่อสร้างจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ซึ่งพบว่ามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการก่อสร้างเกิดขึ้นมากมาย เริ่มตั้งแต่การออกแบบ การคัดเลือกวัสดุ การขนส่ง การก่อสร้าง การกำจัดของเสีย การลดของเสีย การลดปริมาณวัสดุที่ใช้ การลดปริมาณแรงงาน การลดการใช้น้ำ การลดการใช้ไฟฟ้าของทั้งกระบวนการก่อสร้าง รวมทั้งได้มีการศึกษาถึงการใช้งานตัวอาคารจนถึงจุดสิ้นสุดคือการรื้อถอนหรือการนำมาใช้ใหม่ซึ่งผลที่ได้จะแตกต่างกันไปในสภาวะหรือสถานที่ที่แตกต่างกัน (Ghafoor et al., 2024) เช่น ความแตกต่างของสภาพอากาศที่แตกต่างกันทำให้ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดจากการใช้งานอาคารโดยใช้ชนิดพลังงานที่แตกต่างกัน ความแตกต่างด้านสถานที่ก่อสร้างทำให้ความเหมาะสมของการนำวัสดุมาใช้แตกต่างกันไปด้วย เช่น ชนิดของไม้ที่จะนำมาใช้ก่อสร้างของทางยุโรปเหนือก็จะแตกต่างจากทางเอเชียเหนือหรือเอเชียใต้หรือที่อื่น ๆ เป็นต้น (Syngros et al., 2017) ชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้างมีผลต่อปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยตรง ดังนั้นการเปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้นจากวัสดุก่อสร้างที่แตกต่างกันจึงมีความน่าสนใจ โดยได้มีการศึกษาเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากชนิดวัสดุและชนิดของอาคารที่แตกต่างกันในหลายประเทศ ดังนั้นเพื่อให้เกิดประโยชน์กับประเทศไทยและโลกในแง่การลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้าง จึงควรศึกษาถึงความแตกต่างของปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของวัสดุก่อสร้างที่แตกต่างกัน

จากการทบทวนวรรณกรรม เพื่อศึกษาการเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในการก่อสร้างจากวัสดุที่ต่างชนิดกัน พบว่ามีงานวิจัยเกิดขึ้นหลากหลายโดยแต่ละงานวิจัยมีความแตกต่างกันออกไปทั้งเรื่องของสถานที่ วัสดุที่นำมาเปรียบเทียบ ขนาด และประโยชน์ใช้สอยของอาคาร กรอบระยะเวลาวงจรชีวิต (life cycle) และมาตรฐานที่นำมาใช้อ้างอิง จากงานวิจัยการเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก กับอาคารที่ใช้ไม้ชนิด cross-laminated timber (CLT) และอาคารที่ใช้โครงสร้างผสมกัน (hybrid) ระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กและ CLT ของอาคารสูง 11 ชั้น พบว่าอาคาร CLT และ hybrid CLT มีการปลดปล่อย

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำกว่าอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 15% และ 10.77% ตามลำดับ (Duan et al., 2022) การเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก และ CLT อาคารสูง 8 ชั้น จำนวน 3 สถานที่ใน Australia คือ Melbourne Sydney และ Brisbane พบว่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของอาคาร CLT น้อยกว่าอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ Melbourne Sydney และ Brisbane 30%, 34% และ 29% ตามลำดับ (Jayalath et al., 2020) และพบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีแนวโน้มเดียวกันกับงานวิจัย (Duan et al., 2022) แต่ในการศึกษาวิจัยที่ภูฏานได้เปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) อาคารสูง 4 ชั้น ระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กกับอาคารไม้ พบว่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของอาคารไม้ น้อยกว่าอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กถึง 111% โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาในช่วง product stage และ construction process stage (EN 15978:2011) เท่านั้น ไม่ได้พิจารณาครบหมดทั้งวงจรชีวิต (Thinley and Hengrasmee, 2023) ส่วนงานวิจัยที่เกิดขึ้นที่ North America ได้เปรียบเทียบอาคารโครงสร้างไม้กับอาคารโครงสร้างเหล็กรูปพรรณของอาคารสูง 5 ชั้น และ 12 ชั้น พบว่าอาคารโครงสร้างเหล็กรูปพรรณมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มากกว่าอาคารไม้ 31% และ 41% ตามลำดับ (Allan and Phillips.,2021) และยังมีงานวิจัยที่ประเทศสเปน ได้ศึกษาบ้านพักอาศัยเดี่ยวพื้นที่ใช้สอย 247 m² โดยเป็นบ้านโครงสร้างไม้ CLT ทั้งหมด พบว่ามีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) รวมกับการใช้พลังงานเป็นจำนวน 34 kg CO₂ equivalent/m²/year แต่ในส่วนของโครงสร้างไม้ CLT มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เพียง 2.8 kg CO₂ equivalent/m²/year (Lechón et al., 2021)

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นการศึกษาการเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของอาคารที่มีขนาด ความสูง และชนิดการใช้งานรวมทั้งวัสดุก่อสร้างอาคารที่ต่างชนิดกันในแต่ละประเทศ ซึ่งพบว่าผลการวิจัยที่ได้จากสถานที่และขนาดพื้นที่ที่แตกต่างกันออกไปนั้น มีผลทำให้ค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แตกต่างกันไป ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจเรื่องการเปรียบเทียบชนิดวัสดุการก่อสร้างที่แตกต่างกันในประเทศไทย ซึ่งในบทความนี้จะใช้แบบบ้านประหยัดพลังงานของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (พ.พ.) แบบบ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4 (Ministry of Energy, 2022) เป็นแนวทางในการศึกษาการเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของอาคารในประเทศไทยซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลที่น่าไปพัฒนาให้เกิดการวางแผนการออกแบบการใช้วัสดุก่อสร้างบ้านพักอาศัยเพื่อช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และช่วยลดผลกระทบของภาวะโลกร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้สอดคล้องตามแผนปฏิบัติการ 5 ปี (พ.ศ. 2566 - 2570) ของกรมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม โดยมีค่าเป้าหมายในปี พ.ศ. 2570 ที่จะลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ลง 20% เมื่อเทียบกับการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในกรณีปกติ (Ministry of Natural Resources and Environment, 2023).

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาค่าปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของวัสดุโครงสร้างบ้านประหยัดพลังงานแบบบ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4
2. เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของโครงสร้างบ้านประหยัดพลังงาน 3 ชนิด ระหว่างโครงสร้างบ้านเดิมคือคอนกรีตเสริมเหล็ก เปรียบเทียบกับโครงสร้างไม้และโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โปรแกรมสร้างแบบจำลองและออกแบบโครงสร้างบ้าน

ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Midas Gen (Hu et al., 2012) ซึ่งเป็นโปรแกรมช่วยออกแบบโครงสร้างอาคารที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นที่นิยมใช้ในการออกแบบอาคารเพื่อใช้ในการคำนวณและออกแบบอาคาร เช่น อาคาร Burj Khalifa ที่ดูไบ ประเทศสหรัฐอาหรับเอมิเรตส์, อาคาร National stadium หรือ Bird nest ของประเทศจีน เป็นต้น ผู้วิจัยได้นำโปรแกรมนี้มาช่วยสร้างแบบจำลองโครงสร้าง วิเคราะห์โครงสร้าง และออกแบบขนาดของชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรูปพรรณที่ใช้ในแบบจำลอง รวมทั้งหาปริมาณของวัสดุในแบบจำลอง โดยเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ทำการใส่ข้อมูลน้ำหนักจรรยาที่ตรงการออกแบบลงไปตำแหน่งโครงสร้างต่าง ๆ แล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้างหาแรงกระทำที่เกิดขึ้น (Yin et al., 2019) จากนั้นเริ่มออกแบบโดยทำการเลือกชนิดและขนาดของชิ้นส่วนโครงสร้างแต่ละชิ้นส่วนให้เหมาะสม ทำการเลือกขนาดของชิ้นส่วนจนได้ขนาดชิ้นส่วนที่แข็งแรงเพียงพอและเหมาะสมเมื่อได้ขนาดที่ต้องการแล้วโปรแกรมจะทำการคำนวณหาปริมาณวัสดุออกมา

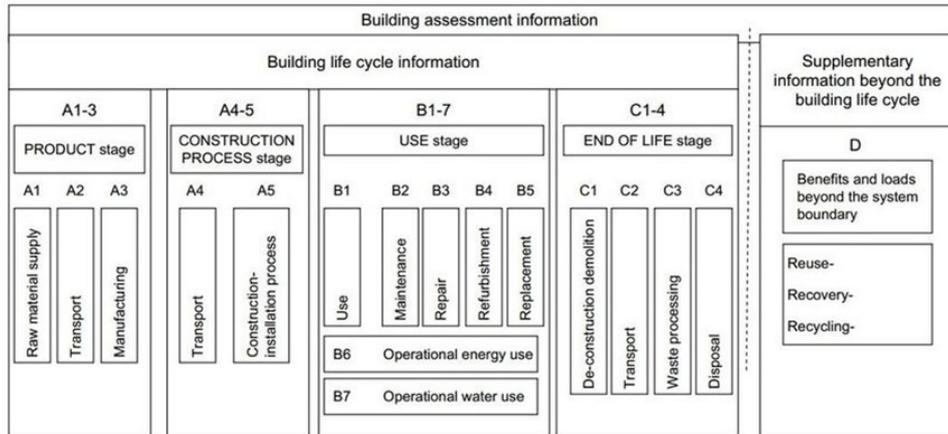
บ้านประหยัดพลังงาน

บ้านประหยัดพลังงานของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานของกระทรวงพลังงาน (พ.พ.) (Ministry of Energy, 2022) คือ แบบบ้านที่ได้รับการออกแบบจากความร่วมมือของคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังกับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานของกระทรวงพลังงาน (พ.พ.) โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะให้ประชาชนได้เข้าใจ และเกิดความเชื่อมั่นในแนวคิดเรื่องบ้านประหยัดพลังงานที่สามารถทำได้จริงและเกิดผลลัพธ์การประหยัดพลังงานอย่างเป็นรูปธรรม สามารถก่อสร้างและอยู่อาศัยได้อย่างสุขสบาย โดยมีแนวความคิดหลักในการออกแบบ (Ascione et al., 2019; Chang et al., 2023; Irfan Sadaq et al., 2023) ดังนี้ 1) การลดพลังงานพื้นฐาน โดยการพยายามปิดบังแสงแดดที่จะส่องเข้าตัวบ้านในช่วงเวลา 9.00 – 15.00 น. 2) การออกแบบพื้นที่ภายในบ้านแยกส่วนตามการใช้พลังงานที่แตกต่างกัน โดยออกแบบให้ห้องที่ต้องใช้เครื่องปรับอากาศอยู่ด้านในสุดหรือได้รับการปกป้องจากความร้อนภายนอกให้มากที่สุด 3) การออกแบบหลังคาลาดเอียง 20° และแยกส่วนโครงสร้าง เพื่อทำการติดตั้งแผงพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ 4) การเลือกใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ในท้องตลาดทั่วไปเป็นหลักเพื่อให้ประชาชนและช่างท้องถิ่นในประเทศไทยสามารถก่อสร้างหรือติดตั้งได้อย่างสะดวก

การเลือกใช้วัสดุก่อสร้างที่แตกต่างกัน โดยการออกแบบต้องเป็นไปตามการคำนวณโครงสร้างของวิศวกรออกแบบ ในส่วนฐานรากอาคารโครงสร้างไม่จำเป็นต้องออกแบบโดยไม่มีการใช้เสาเข็มรองรับน้ำหนักเนื่องจากใช้การออกแบบเป็นฐานรากแบบแผ่ได้ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็กรูปพรรณมีน้ำหนักวัสดุมากกว่าจึงออกแบบฐานรากแบบมีเสาเข็ม โดยพบว่าปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในส่วนของวัสดุโครงสร้างจะมีสัดส่วนเป็น 47.81% ของปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมของบ้าน (Sangsawang et al., 2014)

ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Emission Factor of Material) (TGO, 2023) คือ ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปริมาณของวัสดุแต่ละชนิด เพื่อใช้เป็นตัวเลขอ้างอิงสำหรับการคำนวณปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุแต่ละชนิดต่อไปการหาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุก่อสร้างในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment – LCA) ตามมาตรฐาน EN 15978 โดยแบ่งช่วงวงจรชีวิตหลัก ๆ คือ Product stage,

Construction Process stage, Use stage และ End of life stage โดยทำการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่แหล่งกำเนิดของวัสดุที่นำมาใช้ การขนส่งมาผลิต การผลิต การขนส่งไปยังหน่วยงานก่อสร้าง การก่อสร้าง การใช้งานอาคาร และการรื้อถอนทำลาย (European Committee for Standardization, 2011) ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 Building's LCA stages according to EN 15978
(European Committee for Standardization, 2011)

วิธีการประเมินค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สามารถทำได้โดยการนำปริมาณซึ่งมีหน่วยเป็นหนึ่งหน่วยปริมาณของวัสดุที่ต้องการหาค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุนั้น (TGO, 2023) ดังสมการที่ (1)

$$CO_2 = M_i \times E_f \quad (1)$$

โดยที่

CO₂ คือปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีหน่วยเป็น kgCO₂eq

M_i คือปริมาณของวัสดุที่ต้องการหาค่าปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีหน่วยเป็นปริมาณของวัสดุแต่ละชนิด

E_f คือค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุแต่ละชนิด มีหน่วยเป็น kgCO₂eq ต่อ 1 หน่วยปริมาณวัสดุ โดยวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีค่า E_f แตกต่างกันไป แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุแต่ละชนิด

รายการวัสดุ	หน่วย (unit)	ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซ CO ₂ (kgCO ₂ eq per unit)
เสาเข็มตอก	m ³	273
ทรายหยาบ	kg	0.0037
คอนกรีตหยาบ	m ³	212
คอนกรีตโครงสร้าง	m ³	239
พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป	m ³	482
ไม้แบบ	m ³	547
เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต	kg	0.77
เหล็กรูปพรรณ ขึ้นรูปร้อน	kg	0.69
เหล็กรูปพรรณ ขึ้นรูปเย็น	kg	2.21
ไม้เนื้อแข็ง	kg	0.47
ลวดผูกเหล็ก ตะปู	kg	0.21

กรอบแนวคิดในการวิจัย

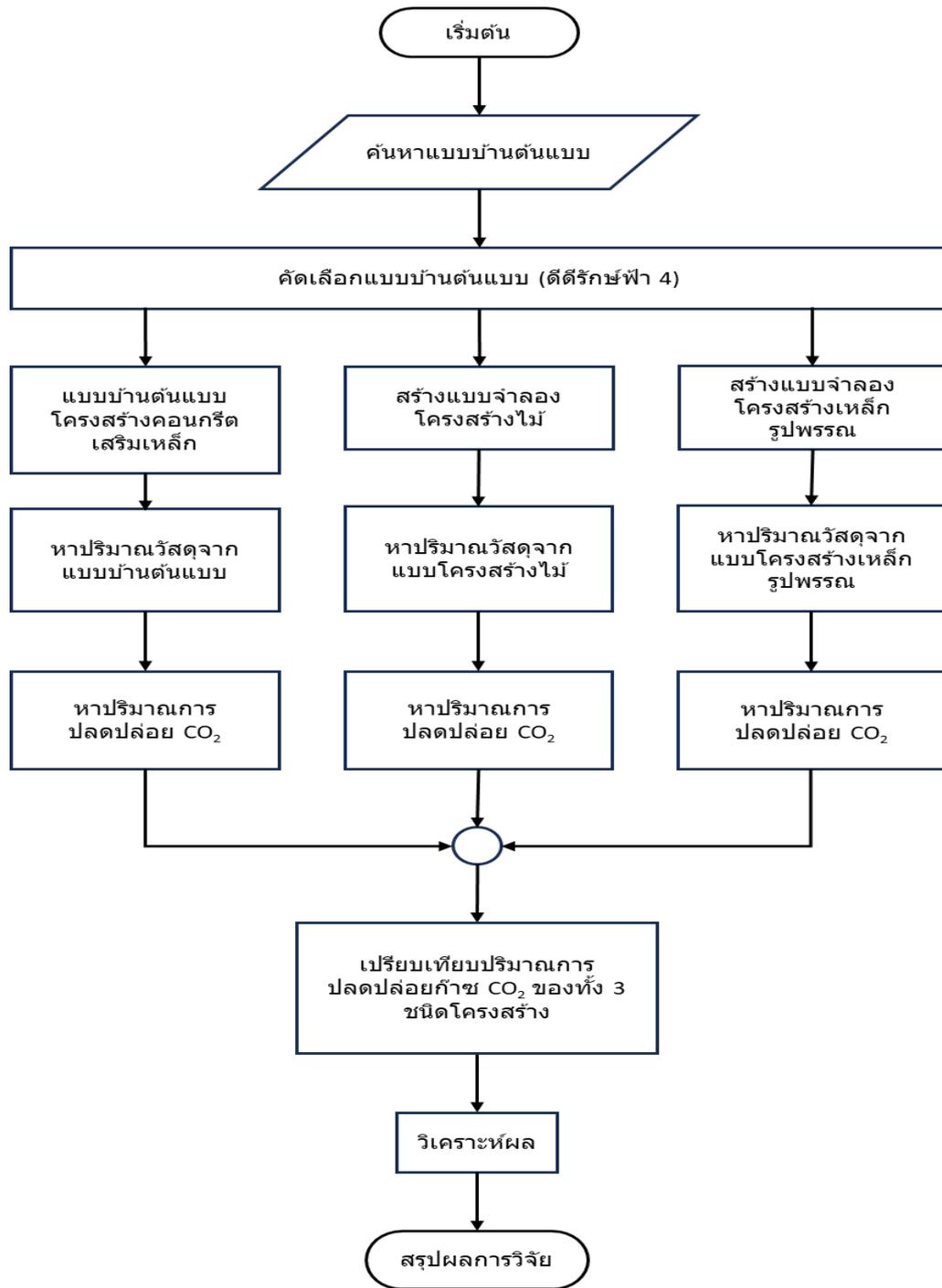
ผู้วิจัยได้ใช้แบบบ้านประหยัดพลังงานของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) มาใช้ในการศึกษาวิจัย จากแบบบ้านของ พพ. ทั้งหมด 12 แบบ ผู้วิจัยได้คัดเลือกแบบบ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4 นำมาเป็นแบบบ้านต้นแบบเพื่อทำการวิจัยเพราะเป็นแบบบ้านที่นิยมสร้างสำหรับสังคมเมือง มีพื้นที่ใช้สอย 161 m² ซึ่งเหมาะสมกับการเป็นตัวแบบบ้านส่วนใหญ่ในเขตชุมชนเมืองปัจจุบัน โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเฉพาะโครงสร้างของอาคารเท่านั้น ประกอบด้วยเสาเข็ม ฐานราก ตอม่อ คานคอดิน เสา คานชั้น 2 เสาชั้น 2 คานรับหลังคา โดยจะยังคงพิจารณาส่วนประกอบอื่น ๆ ของอาคารไว้ตามเดิม เพื่อไม่ให้กระทบกับแนวคิดและประสิทธิภาพของการออกแบบเพื่อการประหยัดพลังงานของแบบบ้านประหยัดพลังงานต้นแบบ และเพื่อให้สามารถใช้งานอาคารในเชิงโครงสร้างไม่เปลี่ยนแปลงไป แม้ชนิดของโครงสร้างจะถูกเปลี่ยนแปลงจากคอนกรีตเสริมเหล็กไปเป็นไม้และเหล็กรูปพรรณ ดังนั้น น้ำหนักจรที่ใช้ในการออกแบบตัวโครงสร้างของอาคารต้องคงที่เท่ากัน (Costa and Beck., 2024) ดังนี้

- 1) น้ำหนักบรรทุกจรพื้นที่หลังคา 50 kg/m²
- 2) น้ำหนักบรรทุกจรทั่วไป 150 kg/m²
- 3) น้ำหนักบรรทุกจรที่จอดรถ 400 kg/m²
- 4) น้ำหนักบรรทุกจรส่วนเพิ่มเติม 120 kg/m²
- 5) แรงลมที่กระทำกับตัวบ้าน 50 kg/m²

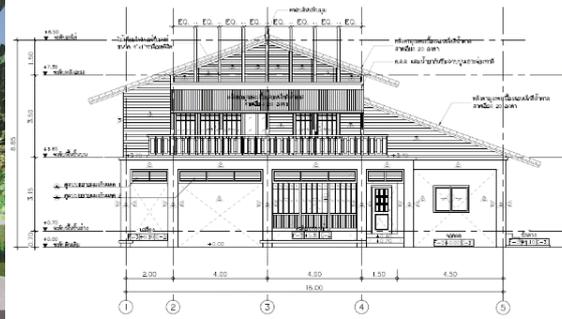
จากนั้นทำการศึกษาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้นในช่วงชีวิต Product Stage คือการพิจารณาจากส่วนของวัสดุก่อสร้างเท่านั้นของโครงสร้างต้นแบบคือคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างไม้ และโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ เพื่อนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบผลต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เริ่มต้นโดยผู้วิจัยได้คัดเลือกแบบบ้านจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (พพ.) คือแบบบ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4 จากนั้นทำตามขั้นตอนดังภาพที่ 2 เมื่อได้แบบบ้านต้นแบบ บ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4 เป็นบ้าน 2 ชั้น มีพื้นที่ใช้สอยรวม 161 m² โครงสร้างบ้านเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นหนึ่งในแบบบ้านประหยัดพลังงาน แบบบ้านดีดี (DEDE) รักษาพลังงานของกระทรวงพลังงาน ดังภาพที่ 3 แสดงแบบบ้านและแบบแปลนงานสถาปัตยกรรมของบ้านตัวอย่าง และภาพที่ 4 แสดงแบบแปลนพื้นที่ใช้สอยบ้านตัวอย่างชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการออกแบบโครงสร้างบ้านใหม่ โดยเปลี่ยนชนิดโครงสร้างจากแบบบ้านต้นแบบที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กเปลี่ยนเป็นโครงสร้างไม้ ดังภาพที่ 5 (ก) และโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ ดังภาพที่ 5 (ข) โดยยังคงใช้ค่าความต้องการการใช้งาน (function) ของการใช้อาคารที่เหมือนเดิมคืออาคารต้องรองรับน้ำหนักจร รองรับแรงลมที่มากระทำได้เท่าเดิม และไม่เปลี่ยนแปลงส่วนประกอบอื่นของอาคาร เช่น ขนาดห้อง ชนิดแผ่นหลังคา ชนิดผนัง ชนิดพื้น จากนั้นทำการถอดแบบหาปริมาณวัสดุที่ใช้เพื่อการก่อสร้างโครงสร้างของแต่ละแบบ ได้แก่ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างไม้ และโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุแต่ละชนิดจากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) (TGO, 2023) และ Inventory of Carbon and Energy, University of Bath (Hammond and Jones, 2008) มาคูณด้วยปริมาณวัสดุ ดังสมการที่ (1)



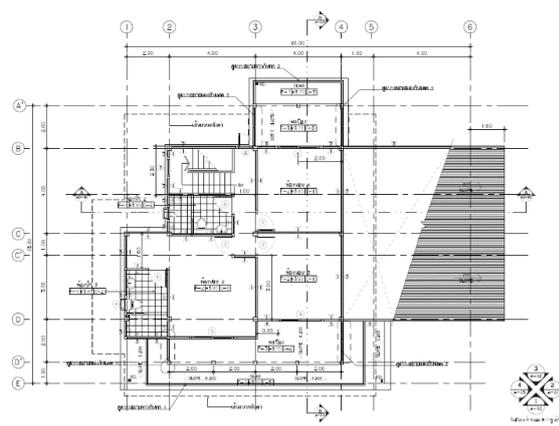
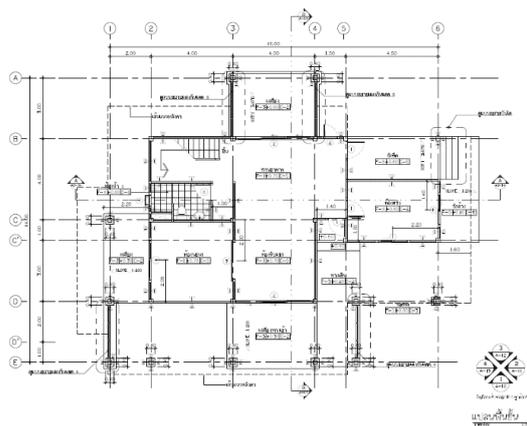
ภาพที่ 2 ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย



(ก) ตัวอย่างบ้านประหยัดพลังงาน

(ข) แบบแปลนงานสถาปัตยกรรม

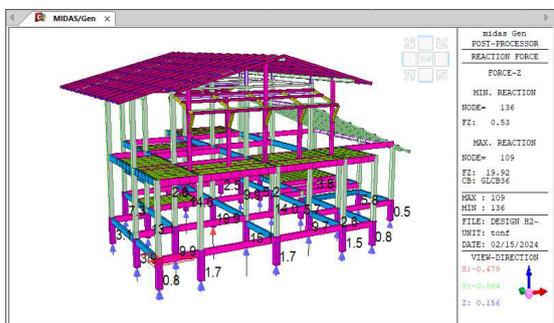
ภาพที่ 3 แบบบ้านประหยัดพลังงานบ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4 (Ministry of Energy, 2022)



(ก) แบบแปลนพื้นที่ชั้นที่ 1

(ข) แบบแปลนพื้นที่ชั้นที่ 2

ภาพที่ 4 แบบแปลนบ้านตัวอย่างพื้นที่ชั้นที่ 1 และพื้นที่ชั้นที่ 2 (Ministry of Energy, 2022)



(ก) แบบแปลนจำลองบ้านโครงสร้างไม้

(ข) แบบแปลนจำลองบ้านโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ

ภาพที่ 5 แบบแปลนจากจำลองบ้านโครงสร้างไม้และโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ

โดยที่กรอบการพิจารณาของงานวิจัยจะอยู่ในช่วง Product Stage คือการพิจารณาจากส่วนของวัสดุ ก่อสร้างเท่านั้น เมื่อได้ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของโครงสร้างแบบบ้านแต่ละชนิดแล้ว นำมาพิจารณาเปรียบเทียบตามขั้นตอนต่อไป

ผลการวิจัย

จากงานวิจัยการเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของโครงสร้างบ้านประหยัดพลังงาน ระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็ก ไม้ และเหล็กรูปพรรณ โดยการเปลี่ยนชนิดวัสดุที่นำมาใช้สร้างโครงสร้างบ้าน จากเดิมที่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนำมาเปรียบเทียบกับโครงสร้างไม้และโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ โดยที่ยังคงสามารถใช้งานอาคารได้เหมือนเดิม โดยมีปริมาณวัสดุหลัก แสดงดังตารางที่ 2 และค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ส่วนของโครงสร้างบ้าน แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 แสดงค่าปริมาณวัสดุหลักของโครงสร้างบ้าน

รายการวัสดุ	หน่วย	ปริมาณวัสดุ		
		คอนกรีตเสริมเหล็ก	ไม้	เหล็กรูปพรรณ
เสาเข็มตอก	m ³	12.10	-	15.78
ทรายหยาบ	kg	6.09	8.03	4.28
คอนกรีตหยาบ	m ³	2.99	4.42	2.12
คอนกรีตโครงสร้าง	m ³	70.04	33.58	27.09
ไม้แบบ	m ³	12.71	2.53	2.51
เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต	kg	8,195.23	3,634.49	3,398.93
เหล็กรูปพรรณ เสา คาน	kg	5,348.19	4,822.80	17,699.87
สีกันสนิม	m ²	213.79	213.79	664.66
ไม้เนื้อแข็ง	kg	-	564.80	-
อื่น ๆ เช่น ลวดผูกเหล็ก ตะปู	kg	411.46	136.14	128.68

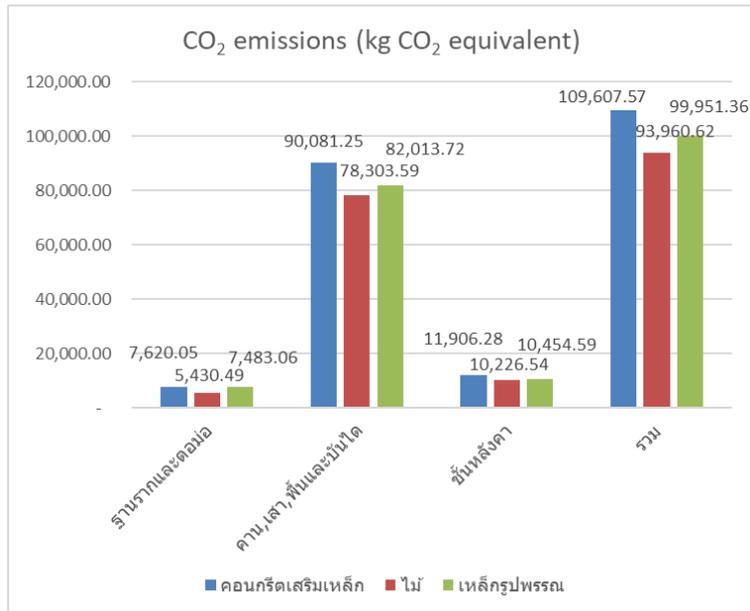
จากตารางที่ 2 แสดงปริมาณของวัสดุหลักของโครงสร้างบ้านแต่ละชนิด โดยพบว่าบ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4 โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีปริมาณคอนกรีตโครงสร้าง 70.04 m³ แต่โครงสร้างไม้และโครงสร้างเหล็กมีปริมาณคอนกรีตโครงสร้างเพียง 33.58 m³ และ 27.09 m³ ตามลำดับ ปริมาณเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตของบ้านชนิดโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือ 8,195.23 kg มากกว่าของโครงสร้างบ้านชนิดไม้และชนิดเหล็กรูปพรรณที่มีปริมาณเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต 3,634.49 kg และ 3,398.93 kg ตามลำดับ ปริมาณเสาเข็มของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็กคือ 12.10 m³ และ 15.78 m³ ตามลำดับ แต่โครงสร้างไม้จะไม่มีเสาเข็มรองรับ เนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้างไม้นั้นสามารถออกแบบบ้านให้รองรับได้โดยใช้ฐานรากแบบแผ่ ไม้ใช้ฐานรากแบบเสาเข็ม และโครงสร้างไม้มีการใช้วัสดุชนิดเหล็กปริมาณรวมน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ

นอกจากนี้การจัดการก่อสร้างบ้านไม้จะมีความซับซ้อนน้อยกว่าการก่อสร้างบ้านคอนกรีตเสริมเหล็กและบ้านโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ ทำให้สามารถลดระยะเวลาการก่อสร้างได้มากถึง 30% เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ (Tighnavard and Marsono, 2017)

ตารางที่ 3 แสดงค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂eq) ส่วนของโครงสร้างบ้าน

ลำดับ	ส่วนของโครงสร้าง	ค่าการปลดปล่อยก๊าซ CO ₂ emissions (kgCO ₂ eq)		
		คอนกรีตเสริมเหล็ก	ไม้	เหล็กรูปพรรณ
1	ฐานรากและตอม่อ	7,620.05	5,430.49	7,483.06
2	คาน เสา พื้นและบันได	90,081.25	78,303.59	82,013.72
3	หลังคา	11,906.28	10,226.54	10,454.59
	รวม	109,607.57	93,960.62	99,951.36

จากตารางที่ 3 ค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (kgCO₂eq) ส่วนของโครงสร้างบ้านแต่ละชนิดพบว่าโครงสร้างไม้มีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำที่สุดเท่ากับ 93,960.62 kgCO₂eq โดยสามารถสรุปรายละเอียดในแต่ละส่วนของโครงสร้างบ้านดังนี้ ส่วนฐานรากและตอม่อ โครงสร้างไม้มีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำที่สุดเท่ากับ 5,430.49 kgCO₂eq ต่ำกว่าชนิดโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็กรูปพรรณอย่างชัดเจนที่ 28.74% และ 27.43% ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างไม้มีน้ำหนักโครงสร้างเบาทำให้การออกแบบฐานรากไม่ต้องใช้เสาเข็มแต่ออกแบบเป็นฐานรากแบบแผ่แทน และในส่วนของโครงสร้างคาน เสา พื้น และบันไดนั้น โครงสร้างไม้มีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำที่สุดเท่ากับ 78,303.59 kgCO₂eq ต่ำกว่าชนิดโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และโครงสร้างเหล็กรูปพรรณที่ 13.07% และ 4.52% ตามลำดับ และในส่วนของโครงสร้างหลังคาพบว่าโครงสร้างไม้มีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำที่สุดเท่ากับ 10,226.54 kgCO₂eq ต่ำกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็กรูปพรรณที่ 14.11% และ 2.18% ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 6

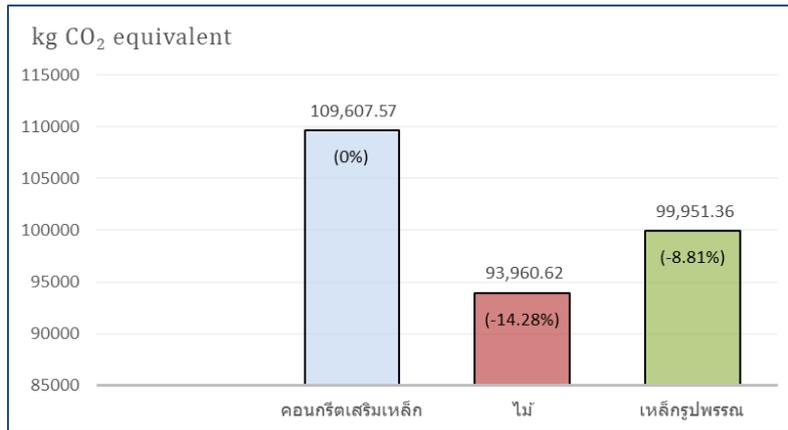


ภาพที่ 6 กราฟเปรียบเทียบข้อมูลการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (kgCO₂eq) ส่วนของโครงสร้างบ้าน

ตารางที่ 4 แสดงค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โครงสร้างบ้านแต่ละชนิด

ลำดับ	ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำ โครงสร้าง	ค่าปริมาณ CO ₂ emissions (kgCO ₂ eq)	% การเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับ คอนกรีตเสริมเหล็ก
1	คอนกรีตเสริมเหล็ก	109,607.57	0%
2	ไม้	93,960.62	-14.28%
3	เหล็กรูปพรรณ	99,951.36	-8.81%

จากตารางที่ 4 พบว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ปริมาณสูงสุด 109,607.57 kgCO₂eq รองลงมาคือโครงสร้างเหล็กรูปพรรณมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) 99,951.36 kgCO₂eq และโครงสร้างไม้มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) 93,960.62 kgCO₂eq โครงสร้างเหล็กรูปพรรณกับโครงสร้างไม้จะมีความแตกต่างของปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ 8.81% และ 14.28% ตามลำดับ โดยโครงสร้างไม้จะมีค่าน้อยกว่าโครงสร้างเหล็กถึง 6% ซึ่งค่าที่ได้นี้อยู่ในทิศทางเดียวกับผลการวิจัย (Duan et al., 2022) และ (Allan and Phillips., 2021) ซึ่งสอดคล้องกัน และค่าเฉลี่ยของปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อพื้นที่ใช้สอย (m²) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเท่ากับ 680.80 kgCO₂eq/m² โครงสร้างไม้เท่ากับ 583.61 kgCO₂eq/m² และโครงสร้างเหล็กรูปพรรณเท่ากับ 620.82 kgCO₂eq/m² ซึ่งจากค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างบ้านไม้มีค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำที่สุด แสดงดังภาพที่ 7 อย่างไรก็ตามยังพบว่ามีการวิจัยบ้านโครงสร้างไม้ชนิด CLT ของประเทศสเปนซึ่งมีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เท่ากับ 140 kgCO₂eq/m² (Lechón et al., 2021) ซึ่งต่ำกว่าโครงสร้างไม้เนื้อแข็ง



ภาพที่ 7 กราฟเปรียบเทียบค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โครงสร้างบ้านแต่ละชนิด

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาในส่วนของ Product stage ของส่วนโครงสร้างบ้านเท่านั้น โดยไม่ได้ทำการเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในส่วนของการตกแต่งบ้านและกระบวนการก่อสร้าง ซึ่งผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาในส่วนอื่นๆ ของบ้านต่อไป เช่น การเปลี่ยนแปลงชนิดผนังของบ้านที่จะส่งผลต่อปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) การก่อสร้างด้วยโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ไม้และเหล็กกรุปรพรรณมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป โดยงานวิจัย Tighnavard and Marsono (2017) พบว่าการก่อสร้างด้วยโครงสร้างไม้นั้นสามารถลดระยะเวลาการก่อสร้างและลดต้นทุนก่อสร้างได้ถึง 30% เมื่อเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็ก ซึ่งข้อเสียของโครงสร้างไม้คือความสามารถในการรับน้ำหนักเมื่อเวลาผ่านไป จะพบการหดตัว การแตกร้าว การเสื่อมสภาพที่คานและเสาไม้ ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพการรับน้ำหนักและการทนทานของโครงสร้างไม้จะช่วยให้สามารถใช้งานโครงสร้างไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งด้านการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ระยะเวลาการก่อสร้างและต้นทุนการก่อสร้างได้

จากการศึกษาการเปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของโครงสร้างบ้านประหยัดพลังงาน แบบบ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4 ของกระทรวงพลังงาน พบว่าโครงสร้างบ้านไม่มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำที่สุดเพียง 583.61 kgCO₂eq/m² รองลงมาคือโครงสร้างเหล็กกรุปรพรรณ และโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) 620.82 kgCO₂eq/m² และ 680.80 kgCO₂eq/m² ตามลำดับ สามารถพิจารณาได้ว่านอกเหนือจากการประหยัดพลังงานที่ได้จากการออกแบบและการทำงานบ้านประหยัดพลังงานนี้ เพื่อให้เกิดประสิทธิผลในการลดสภาวะโลกร้อนมากยิ่งขึ้น โครงสร้างไม้จะสามารถช่วยลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของการก่อสร้างบ้านพักอาศัยได้ถึง 14.28% เมื่อเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และ 6% เมื่อเทียบกับโครงสร้างเหล็กกรุปรพรรณ บ้านโครงสร้างไม้จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบโครงสร้างบ้านเพื่อลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สาเหตุที่ไม่มีมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กและเหล็กเพราะว่ากระบวนการได้มาของไม้นั้นไม่ต้องผ่านการใช้พลังงานในการผลิตและแปรรูปมากเท่ากับการได้มาของคอนกรีตและเหล็ก โดยคอนกรีตและเหล็กนั้นต้องผ่านการระเบิด การถลุง การหลอม การบดอัด ซึ่งต้องใช้พลังงานในการผลิตสูง แต่การผลิตไม้นั้นทำการตัดและแปรรูปให้ได้ขนาดที่ต้องการเท่านั้น

เอกสารอ้างอิง

- Acen, C., Bamisile, O., Cai, D., Ukwuoma, C. C., Obiora, S., Huang, Q., Uzun Ozsahin, D., and Adun, H. (2024). The complementary role of carbon dioxide removal: A catalyst for advancing the COP28 pledges towards the 1.5 °C Paris Agreement target. *Science of The Total Environment*, 947, 174302. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174302>
- Allan, K., and Phillips, A. R. (2021). Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of low and mid-rise mass timber buildings with equivalent structural steel alternatives. *Sustainability*, 13(6), 3401. <https://doi.org/10.3390/su13063401>
- Ascione, F., Bianco, N., Maria Mauro, G., and Napolitano, D. F. (2019). Building envelope design: Multi-objective optimization to minimize energy consumption, global cost and thermal discomfort. Application to different Italian climatic zones. *Energy*, 174, 359–374. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.182>
- Chang, J. H., Huang, K.-T., and Wang, J. C. (2023). Energy performance of school roofing materials in hot and humid climates. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02586. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02586>
- Costa, L. G. L., and Beck, A. T. (2024). A critical review of probabilistic live load models for buildings: Models, surveys, Eurocode statistics and reliability-based calibration. *Structural Safety*, 106, 102411. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2023.102411>
- Duan, Z., Huang, Q., Sun, Q., and Zhang, Q. (2022). Comparative life cycle assessment of a reinforced concrete residential building with equivalent cross laminated timber alternatives in China. *Journal of Building Engineering*, 62, 105357. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105357>
- European Committee for Standardization. (2011). *EN 15978: Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings*. Calculation method.
- Ghafoor, S., Shooshtarian, S., Udawatta, N., Gurmu, A., Karunasena, G., and Maqsood, T. (2024). Cost factors affecting the utilisation of secondary materials in the construction sector: A systematic literature review. *Resources, Conservation and Recycling Advances*, 23, 200230. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2024.200230>
- Hammond, G., and Jones, C. (2008). *Inventory of Carbon and Energy (ICE)*. University of Bath.
- Hu, K., Yang, Y., Mu, S., and Qu, G. (2012). Study on high-rise structure with oblique columns by ETABS, SAP2000, MIDAS/GEN and SATWE. *Procedia Engineering*, 31, 474–480. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1054>

- Irfan Sadaq, S., Nawazish Mehdi, S., and Mohinoddin, M. (2023). Experimental analysis on solar photovoltaic (SPV) panel for diverse slope angles at different wind speeds. *Materials Today: Proceedings*. (in Press). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.265>
- Jayalath, A., Navaratnam, S., Ngo, T., Mendis, P., Hewson, N., and Aye, L. (2020). Life cycle performance of cross laminated timber mid-rise residential buildings in Australia. *Energy and Buildings*, 223, 110091. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110091>
- Lechón, Y., la Rúa, C., de, and Lechón, J. I. (2021). Environmental footprint and life cycle costing of a family house built on CLT structure. Analysis of hotspots and improvement measures. *Journal of Building Engineering*, 39, 102239. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102239>
- Ministry of Energy. (2022). *Good house design guide (DEDE) energy conservation*. [Online]. Retrieved from: <https://www.dede.go.th/>
- Ministry of Natural Resources and Environment. (2023). *Five-year national action plan (2023–2027)*. Bangkok: Department of Climate Change and Environment.
- Sangsawang, T., Sukjit, T., and Surochotiwate, T. (2014). The analysis of carbon footprint in house construction: Case study of a 300 m² residential house. *Khon Kaen University Science Journal*, 42(3), 579–588.
- Syngros, G., Balaras, C. A., and Koubogiannis, D. G. (2017). Embodied CO₂ emissions in building construction materials of Hellenic dwellings. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 500–508. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.113>
- Thinley, J., and Hengrasmee, S. (2023). Innovating Bhutan’s residential construction with mass timber for economic and environmental sustainability. *Journal of Building Engineering*, 78, 107763. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107763>
- Tighnavard, B., A., and Marsono, A. K. B. (n.d.). (2017). Strategies for reducing greenhouse gas emissions from residential sector by proposing new building structures in hot and humid climatic conditions. *Building and Environment*, 124, 357-368.
- TGO. (2023). *Emission factor*. In *Encyclopedic dictionary of polymers*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30160-0_4312
- UNEP. (2024). *Global status report for buildings and construction*. United Nations Environment Programme. [Online]. Retrieved from: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45095>
- UNSD. (2020). *The sustainable development goals report (Vol. 728, Issue 2)*. United Nations. [Online]. Retrieved from: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>

- Wallengren, E., Guthold, R., Newby, H., Moller, A.-B., Marsh, A. D., Fagan, L., Azzopardi, P., Ba, M. G., and Kågesten, A. E. (2024). Relevance of the sustainable development goals (SDGs) to adolescent health measurement: A systematic mapping of the SDG framework and global adolescent health indicators. *Journal of Adolescent Health, 74*(6), S47–S55.
<https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2024.01.004>
- Yin, X., Xu, Z., Yang, Y., Luo, Y., and Wang, J. (2019). Human-induced vibration control with TMDs for Guangzhou Asian Games Comprehensive Museum. *The International Journal of Acoustics and Vibration, 24*(4), 736–743. <https://doi.org/10.20855/ijav.2019.24.41458>