

PHƯƠNG PHÁP TIẾP CẬN MÔ HÌNH CÔNG TRÌNH TRUNG HOÀ CARBON TRONG BỐI CẢNH VIỆT NAM

Nguyễn Thị Khánh Phương^a, Phạm Thị Hải Hà^a, Nguyễn Tuấn Anh^{b,*}, Trịnh Quốc Dũng^c

^aKhoa Kiến trúc & Quy hoạch, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, Phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Kinh tế và Quản lý Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, Phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam

^cKhoa Năng lượng Nhiệt, Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội, 1 Đại Cồ Việt, Phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 07/10/2025, Sửa xong 11/11/2025, Chấp nhận đăng 20/11/2025

Tóm tắt

Bài báo trình bày một phương pháp tích hợp chính sách–dữ liệu–thực hành để phát triển mô hình công trình trung hòa carbon cho Việt Nam. Mô hình này dựa trên đánh giá carbon toàn bộ vòng đời trong khuôn khổ Sáng kiến Mục tiêu Dựa trên Khoa học (SBTi) của Hội đồng Công trình Xanh Thế giới (WGBC). Phương pháp nghiên cứu gồm: tổng hợp kinh nghiệm xây dựng mô hình công trình trung hòa carbon của các nước phát triển như Vương quốc Anh, Úc, Canada; đánh giá khả năng áp dụng các giải pháp giảm carbon theo vòng đời trong điều kiện Việt Nam; và xây dựng sơ đồ tiếp cận mô hình công trình trung hòa carbon làm cơ sở cho lộ trình 2035–2050 trong bối cảnh chưa có định mức sử dụng năng lượng và phát thải khí nhà kính của các loại hình công trình. Phương pháp lập mô hình giúp xác định “giới hạn kép” về phát thải carbon vận hành và carbon hàm chứa. Phân tích tiềm năng giảm phát thải carbon hàm chứa vòng đời của công trình thông qua các giải pháp thiết kế là cơ sở đề xuất xây dựng các định mức kinh tế kỹ thuật, góp phần hiện thực hóa các mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính trong lĩnh vực xây dựng tại Việt Nam.

Từ khoá: công trình trung hòa carbon (NZCB); khí nhà kính (GHG); đánh giá vòng đời (LCA); carbon vận hành; carbon hàm chứa.

APPROACH TO NET ZERO CARBON BUILDING MODEL IN THE CONTEXT OF VIETNAM

Abstract

This paper presents an integrated policy-data-practice approach to developing a carbon-neutral building model for Vietnam. The model is based on a whole life cycle carbon assessment in The Science Based Targets initiative framework (SBTi) of World Green Building Council (WGBC). The research methodology includes: synthesizing the experiences of developed countries such as the United Kingdom, Australia, and Canada in building carbon-neutral models; assessing the applicability of life cycle carbon reduction solutions within the Vietnamese context; and developing a carbon-neutral building model approach to serve as a basis for the 2035–2050 roadmap, especially given the lack of benchmarks for energy consumption and greenhouse gas (GHG) emissions for different building types. The modeling approach proposed will help to establish a “dual limit” for operational emissions and embodied emissions. Analyzing the potential to reduce whole life cycle embodied carbon through design solutions provides a basis for proposing technical-economic benchmarks, contributing to the realization of GHG emission reduction goals in Vietnam’s building sector.

Keywords: net zero carbon building; greenhouse gases; life cycle assessment; operational carbon; embodied carbon.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(4V\)-07](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(4V)-07) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Hiện nay, biến đổi khí hậu đang trở thành một thách thức nghiêm trọng, tác động sâu rộng tới mọi lĩnh vực phát triển, trong đó có ngành xây dựng. Theo báo cáo Hiện trạng toàn cầu về xây dựng và tòa nhà năm 2023 của Chương trình Môi trường Liên Hợp Quốc (UNEP), lĩnh vực xây dựng (bao gồm cả xây dựng và vận hành công trình) chiếm tới 37% tổng lượng phát thải carbon liên quan đến năng lượng toàn cầu trong năm 2022 [1]. Con số này sẽ tiếp tục tăng do tốc độ đô thị hóa và phát triển cơ sở hạ tầng ở mỗi quốc gia, đặc biệt là các nước đang phát triển. Do đó, ngành xây dựng được xem là một trong những lĩnh vực then chốt để đạt được các mục tiêu phát thải ròng bằng “0” theo Thỏa thuận Paris (2015).

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: anhnt3@huce.edu.vn (Anh, N. T.)

Là một quốc gia đang phát triển, mới chỉ trải qua hơn ba thập kỷ công nghiệp hóa và chịu tác động nghiêm trọng của biến đổi khí hậu, Việt Nam đã thể hiện trách nhiệm qua các cam kết quốc tế ứng phó với biến đổi khí hậu. Cụ thể, Luật Bảo vệ môi trường năm 2020 đã dành riêng một chương quy định về ứng phó biến đổi khí hậu. Tại COP26 (2021), Chính phủ Việt Nam cam kết đạt phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050 và sau đó phê duyệt Chiến lược quốc gia về biến đổi khí hậu (2022), ban hành Nghị định 06/2022/NĐ-CP: Quy định giảm nhẹ phát thải khí nhà kính và bảo vệ tầng ô-dôn, và Đóng góp do quốc gia tự quyết định (NDC) năm 2022.

Thực hiện nhiệm vụ được giao từ Chính phủ đối với các cam kết quốc tế, Bộ Xây dựng đã ban hành Quyết định số 385/QĐ-BXD năm 2022 Phê duyệt kế hoạch hành động của ngành xây dựng ứng phó với biến đổi khí hậu giai đoạn 2022-2030, tầm nhìn đến năm 2050. Theo Quyết định này, nghiên cứu xây dựng mô hình công trình xây dựng không phát thải carbon cho một số loại công trình là một trong các nhiệm vụ giảm nhẹ phát thải khí nhà kính của ngành xây dựng trong giai đoạn 2022-2025. Hiện nay, các nỗ lực giảm nhẹ phát thải khí nhà kính cho công trình xây dựng mới dừng ở các giải pháp rời rạc như nâng cao hiệu quả năng lượng, sử dụng vật liệu xanh, tích hợp năng lượng tái tạo hoặc áp dụng chứng chỉ công trình xanh (LEED, LOTUS, EDGE, ...) [2–4], vẫn đang thiếu một cách tiếp cận mang tính hệ thống và liên ngành có thể áp dụng ở quy mô lớn [5–7]. Do đó, nghiên cứu này đề xuất một mô hình công trình trung hòa carbon phù hợp với điều kiện Việt Nam, tích hợp đồng thời ba yếu tố: chính sách, dữ liệu và thực tiễn. Kinh nghiệm từ các quốc gia như Vương quốc Anh (UK), Úc và Canada cho thấy, việc triển khai thành công mô hình công trình trung hòa carbon cần dựa trên phân tích cơ sở dữ liệu theo quan điểm vòng đời (LCA/LCC), các bộ công cụ kỹ thuật chuyên dụng, hệ thống kiểm định carbon, và khung chính sách hỗ trợ. Việt Nam có thể học tập các kinh nghiệm này và điều chỉnh để phù hợp với điều kiện khí hậu, công nghệ kỹ thuật, kinh tế và nguồn lực hiện có nhằm tạo động lực đổi mới ngành xây dựng hướng tới phát triển bền vững.

2. Tổng quan mô hình công trình trung hòa carbon trên thế giới

2.1. Nguyên tắc tiếp cận mô hình công trình trung hòa carbon

Khái niệm “công trình trung hòa carbon” (carbon-neutral building hoặc net-zero carbon building) được hình thành trong thập niên gần đây, gắn liền với xu thế giảm phát thải khí nhà kính và mục tiêu phát thải ròng bằng “0”. Theo Hội đồng Công trình Xanh Thế giới (WGBC, 2019), công trình trung hòa carbon là công trình “có hiệu suất năng lượng cao, được cung cấp hoàn toàn bởi năng lượng tái tạo tại chỗ hoặc ngoài hiện trường, và lượng phát thải carbon còn lại được bù trừ để đạt cân bằng carbon ròng hằng năm”. Định nghĩa này đặt trọng tâm vào carbon vận hành (operational carbon), tuy nhiên gần đây WGBC (2021–2023) đã mở rộng phạm vi sang carbon toàn vòng đời (Whole Life Carbon), bao gồm phát thải từ vật liệu, thi công, bảo trì và tháo dỡ. Tương tự, Hội đồng Công trình Xanh Vương quốc Anh (UKGBC, 2019) định nghĩa công trình trung hòa carbon là “công trình có tổng lượng phát thải carbon bằng 0 hoặc âm trong giai đoạn vận hành hoặc toàn bộ vòng đời, đạt được thông qua kết hợp giữa hiệu quả năng lượng, năng lượng tái tạo và bù trừ carbon”. UKGBC phân tách hai phạm vi rõ ràng: trung hòa carbon năng lượng vận hành và trung hòa carbon trong xây dựng.

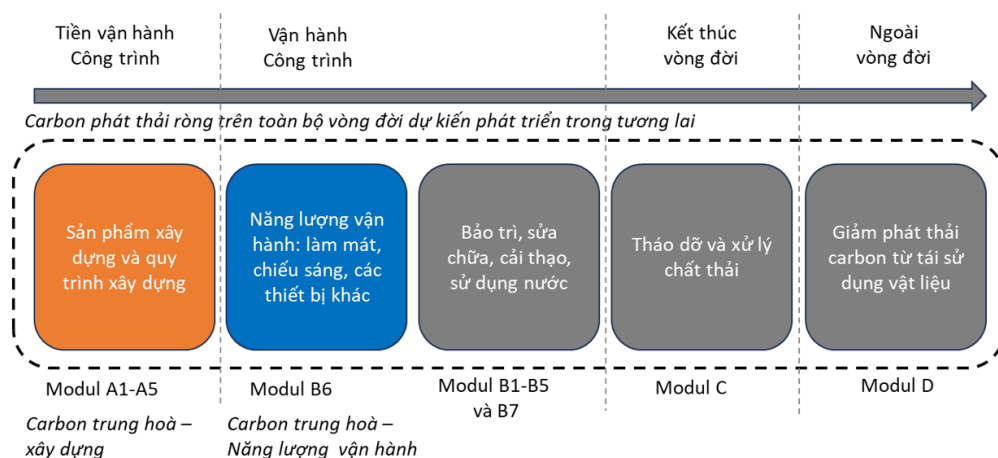
Hệ thống chứng nhận LEED Zero Carbon của Hội đồng Công trình Xanh Hoa Kỳ (USGBC, 2018) xác định công trình trung hòa carbon là công trình có phát thải carbon ròng bằng 0 từ tiêu thụ năng lượng và phương thức di chuyển giao thông của người sử dụng công trình, được chứng minh bằng dữ liệu thực tế trong vòng 12 tháng và được hỗ trợ bởi năng lượng tái tạo cùng các biện pháp bù trừ được thẩm định. Trong khi đó, tổ chức BREEAM/BRE (2021) tiếp cận theo hướng cân bằng giữa lượng carbon phát thải và lượng khí nhà kính loại bỏ khỏi khí quyển, nhấn mạnh yếu tố giảm phát thải sâu và loại bỏ đáng tin cậy, thay vì chỉ dựa vào cơ chế bù trừ carbon.

Tiêu chuẩn ISO 14068-1:2023 định nghĩa trung hòa carbon đạt được khi lượng phát thải khí nhà kính liên quan đến một tổ chức, sản phẩm hoặc hoạt động được cân bằng với lượng loại bỏ tương đương trong một giai đoạn xác định, tuân thủ các nguyên tắc lượng hóa, giảm thiểu, bù trừ và thẩm định độc lập. Nghị định thư khí nhà kính (GHG Protocol) do Viện Tài nguyên Thế giới (WRI) và Hội đồng Doanh nghiệp Thế giới vì Sự phát triển Bền vững (WBCSD) phát triển đã cung cấp cơ sở để xác định phạm vi phát thải, phương pháp tính toán và nguyên tắc báo cáo phát thải, và được sử dụng phổ biến trong tất cả các hệ thống chứng nhận công trình trung hòa carbon hiện nay.

Như vậy, dù có sự khác biệt trong phạm vi và phương pháp tiếp cận, các tổ chức quốc tế đều thống nhất rằng công trình trung hòa carbon phải đáp ứng bốn nguyên tắc cốt lõi: (1) giảm phát thải tại nguồn thông qua tối ưu hóa thiết kế và vật liệu; (2) sử dụng năng lượng tái tạo trong vận hành; (3) bù trừ hoặc loại bỏ lượng carbon còn lại bằng các cơ chế đáng tin cậy; và (4) thẩm định – báo cáo minh bạch theo tiêu chuẩn quốc tế (ISO 14068, GHG Protocol). Nhờ đó, khái niệm “công trình trung hòa carbon” không chỉ là mục tiêu kỹ thuật trong lĩnh vực xây dựng xanh, mà còn là công cụ chiến lược hướng tới quá trình khử carbon toàn ngành xây dựng.

Mô hình công trình trung hòa carbon hiện đang được nhiều quốc gia nghiên cứu và phát triển dựa trên định nghĩa của WGBC. Để đạt được trung hòa carbon trên toàn bộ vòng đời, công trình cần đạt được nỗ lực giảm phát thải carbon vận hành và carbon hàm chứa, sử dụng năng lượng tái tạo tại chỗ và ngoài khu đất xây dựng công trình [8]. WGBC cũng đưa ra các mục tiêu giảm phát thải carbon cho năm 2030 và 2050 (Bảng 1), đồng thời công nhận vai trò của bù trừ carbon như một phần của quá trình chuyển đổi sang không carbon. Theo Tiêu chuẩn Net Zero (2021) của Tổ chức Sáng kiến Mục tiêu dựa trên Khoa học (SBTi) [9], để được công nhận là công trình trung hòa carbon, cần giảm ít nhất 90% tổng lượng phát thải carbon vòng đời, phần còn lại được bù trừ thông qua các dự án loại bỏ carbon. Điều này đòi hỏi phương pháp thiết kế sáng tạo, tối ưu hóa hiệu suất và hợp tác toàn diện trong nhóm dự án [8, 10, 11].

Tiêu chuẩn BS EN 15978:2011 chia phát thải carbon vòng đời công trình theo bốn giai đoạn (Hình 1), bao gồm carbon vận hành (B6–B7) và carbon hàm chứa (A1–A5, B1–B5, C, D). Hiện nay hầu hết các nước trên thế giới đang tập trung giảm carbon hàm chứa ở giai đoạn trước vận hành (A1–A5) và giảm carbon năng lượng vận hành (B6) [12]. Việc tính toán giảm phát thải carbon toàn vòng đời công trình chỉ được xem xét khi chính sách và nền tảng kỹ thuật được hoàn thiện trong tương lai. UKGBC đã công bố lộ trình giảm phát thải trong giai đoạn trước vận hành (A1–A5) và vận hành (B6), đồng thời hướng tới đánh giá phát thải carbon toàn bộ vòng đời công trình.



Hình 1. Ba phạm vi phát thải carbon của công trình theo BS EN 15978:2011 [12]

Bảng 1. Mục tiêu trung hoà carbon cho công trình của WorldGBC [13]

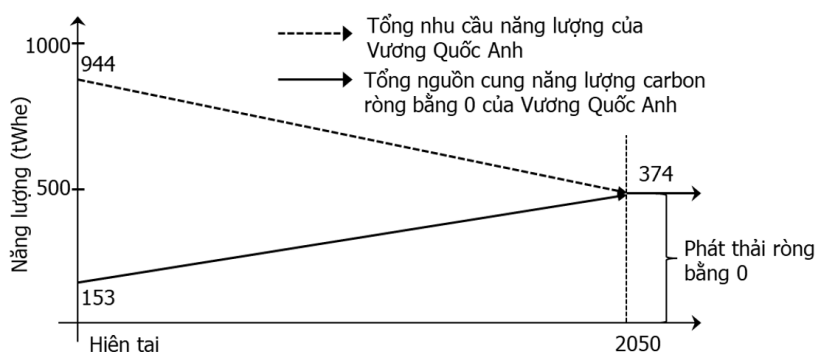
Mốc thời gian	Mục tiêu giảm carbon hàm chứa tiền vận hành	Mục tiêu giảm carbon vận hành
2030	Tất cả các công trình xây mới, công trình cải tạo và hạ tầng giảm ít nhất 40% carbon hàm chứa để giảm carbon trước vận hành (A1-A5).	Tất cả các công trình xây mới đạt “net zero” trong phát thải carbon vận hành.
2050	Tất cả các công trình xây mới, công trình cải tạo và hạ tầng đạt “net zero” trong phát thải carbon hàm chứa.	Tất cả các công trình (bao gồm công trình hiện hữu) đạt “net zero” trong phát thải carbon vận hành.

2.2. Phương pháp Paris Proof xác định giới hạn phát thải carbon vận hành

Phương pháp Paris Proof do Hội đồng Công trình Xanh Hà Lan phát triển. Phương pháp này đưa ra lý thuyết xác định giới hạn phát thải carbon vận hành với giả định rằng đến năm 2050, toàn bộ nền kinh tế sẽ được cung cấp năng lượng carbon thấp (Hình 2), ví dụ: năng lượng tái tạo và hạt nhân với điều kiện:

$$\text{Nhu cầu năng lượng} = \text{Nguồn cung năng lượng carbon thấp sẵn có năm 2050} \quad (1)$$

Như vậy, cần áp dụng các biện pháp tiết kiệm năng lượng để giảm tổng nhu cầu. Phần năng lượng carbon thấp trong tương lai sẽ được phân bổ theo từng lĩnh vực, và cho từng loại hình công trình căn cứ theo tỷ lệ sử dụng năng lượng hiện tại để xác định mức tiêu thụ năng lượng hàng năm tối đa ($\text{kWh/m}^2/\text{năm}$). Phương pháp Paris Proof giả định rằng cơ cấu tiêu thụ năng lượng của từng lĩnh vực sẽ không thay đổi đến 2050, với tác động tăng/giảm được bù trừ bằng biện pháp cải thiện hiệu quả nhờ đổi mới công nghệ. Phương pháp này có thể xác định tỷ lệ mà nền kinh tế cần giảm nhu cầu năng lượng vào năm 2050, như UK sẽ cần giảm khoảng 60%. Dù tồn tại nhiều yếu tố chưa chắc chắn, phương pháp Paris Proof vẫn được áp dụng ở UK và Úc do khả năng tạo khung tham chiếu linh hoạt, kết nối chính sách – quản lý – công nghệ, và điều chỉnh chiến lược năng lượng theo mục tiêu giảm phát thải [14].



Hình 2. Tổng nhu cầu năng lượng của UK sẽ được đảm bảo bởi nguồn năng lượng carbon thấp vào 2050 [13]

2.3. Phương pháp tiếp cận mô hình công trình trung hoà carbon của Canada, UK và Úc

Tại Canada, UK và Úc, mô hình công trình trung hòa carbon được phát triển theo hướng tiếp cận kỹ thuật - ”điển hình hóa” theo quy chuẩn hoặc tiêu chuẩn thiết kế cho từng loại hình. Bảng 2 tổng hợp phân tích phương pháp tiếp cận từ ba quốc gia này.

Bảng 2. So sánh phương pháp luận xây dựng mô hình công trình trung hòa carbon của CaGBC và UKGBC

Quốc gia	Mô tả phương pháp luận	Nhận định
Canada [15]	- Mô hình giả định theo quy mô và số tầng điển hình (7 mẫu thiết kế cho 5 loại công trình) cho 6 vùng khí hậu. Mô hình cơ sở tuân thủ Quy chuẩn quốc gia về năng lượng cho tòa nhà (NECB-2011), vùng khí hậu cơ sở là Toronto. - Với mỗi mẫu điển hình nguyên bản, áp dụng một bộ biện pháp giảm carbon tổng nhất theo các loại hình công trình và không được tối ưu hóa để phản ánh sự khác biệt về thời tiết và cường độ carbon của lưới điện. - Phân tích các mô hình trung hoà năng lượng và hiệu quả kinh tế theo chi phí vòng đời trong 25 năm.	a. Ưu điểm: - Cách tiếp cận này thể hiện nỗ lực tốt nhất với một loại hình công trình, trong một vùng khí hậu nhất định, và không yêu cầu phải tuân thủ mục tiêu phát thải và phân bổ hạn ngạch quốc gia, do đó phù hợp áp dụng khi quốc gia chưa hoàn thiện kiểm kê khí nhà kính cũng như chưa có phân bổ hạn ngạch carbon trong xây dựng. - Phân tích chi tiết chi phí vòng đời giúp nhận biết các nỗ lực trung hòa carbon từ sớm. Nếu triển khai muộn có thể phải gánh thêm chi phí giảm phát thải carbon tăng theo thời gian. b. Nhược điểm: - Các mô hình có thể không hiệu quả cho các vùng khí hậu khác ngoài vùng khí hậu cơ sở (Toronto). - Không tính đến phát thải carbon hàm chứa trước vận hành (A1-A5).
UK theo LETI, RIBA, UKGBC (Paris proof) [14, 16]	- Tiếp cận theo phương pháp TOP-DOWN và BOTTOM UP. - Không theo vùng khí hậu. - Phân tích tập trung vào hai chỉ số: (i) Phát thải carbon trước vận hành và (ii) Phát thải carbon năng lượng vận hành. - Mô hình công trình trung hòa carbon được đánh giá đạt/không đạt theo hai kịch bản biến đổi khí hậu: kịch bản trung gian năm 2025 và mở rộng năm 2030. - Phân tích chi phí vòng đời.	a. Ưu điểm: - Mô hình được xây dựng theo EN15978 và có cơ sở khả thi trong tính toán và thiết kế theo lộ trình. - Mỗi thể loại công trình phản ánh một chiến lược thiết kế riêng phụ thuộc yêu cầu nỗ lực để đạt mục tiêu trung hòa carbon theo hạn ngạch phát thải. b. Nhược điểm: - Khó áp dụng đối với quốc gia chưa hoàn thành kiểm kê khí nhà kính cho công trình xây dựng, chưa thực hiện phân bổ hạn ngạch phát thải khí nhà kính cho từng loại hình công trình.
Úc [17, 18]	Theo phương pháp Whole life carbon assessment của UK [19] - cách tiếp cận mô hình toàn diện (TOP-DOWN và BOTTOM UP) để đưa ra cơ sở định mức giúp định hướng mục tiêu giảm carbon trong ngắn hạn, trung và dài hạn.	Tương tự UK

3. Đề xuất phương pháp tiếp cận mô hình trung hòa carbon cho Việt Nam

3.1. Phân tích tiềm năng phát triển mô hình công trình trung hoà carbon tại Việt Nam

Theo Nghị định 06/2022/NĐ-CP, Việt Nam đặt mục tiêu giảm ít nhất 563,8 triệu tấn CO₂ tương đương CO₂(tđ) vào năm 2030 so với kịch bản thông thường (BAU), trong đó lĩnh vực xây dựng cần giảm 74,3 triệu tấn CO₂(tđ), chủ yếu tập trung vào vật liệu xây dựng, chưa bao gồm các công trình xây dựng. Quyết định 13/2024/QĐ-TTg và Nghị định 119/2025/NĐ-CP đã làm rõ phạm vi kiểm kê khí nhà kính, cơ chế tín chỉ carbon, quy trình đo đạc-báo cáo-thẩm định (MRV) giảm nhẹ phát thải khí nhà kính, tạo nền tảng pháp lý cho triển khai kế hoạch trung hòa carbon ở qui mô quốc gia. Bộ Xây dựng đã ban hành Thông tư 13/2024/TT-BXD qui định kỹ thuật về qui trình kiểm kê khí nhà kính và MRV giảm nhẹ phát thải đối với các cơ sở phát thải khí nhà kính thuộc ngành xây dựng. Đây chính là tiền đề cho việc phát triển các tính toán và phân tích phát thải carbon hàm chứa và carbon vận hành cho các công trình xây dựng tại Việt Nam.

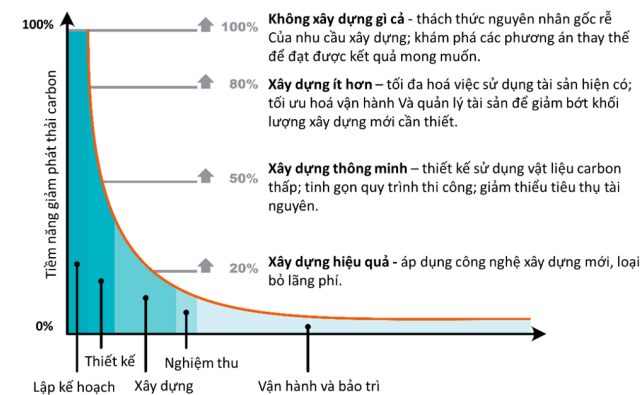
a. Tiềm năng giảm carbon vận hành trong các công trình tại Việt Nam

Phát thải carbon vận hành bao gồm phát thải từ sử dụng năng lượng (B6) và nước (B7), trong đó B6 chiếm tỷ trọng lớn và có tiềm năng giảm đáng kể nếu áp dụng đồng bộ các chiến lược thiết kế thụ động, giải pháp chủ động và tích hợp năng lượng tái tạo. Nghiên cứu [20] cho thấy tối ưu hóa lớp vỏ công trình theo thiết kế thụ động có thể giảm 37–48% nhu cầu năng lượng làm mát tại Hà Nội và TP. HCM. Năng lượng tiêu thụ có thể tiếp tục giảm khi sử dụng các hệ thống và thiết bị hiệu suất cao như sử dụng hệ thống thông gió kép cho phép điều chỉnh nhiệt độ làm mát ở mức cao hơn trong giới hạn tiện nghi nhiệt, kết hợp chiếu sáng nền và chiếu sáng cục bộ với chỉ số LPD thấp, và khai thác tối đa điện mặt trời áp mái. Theo Điều chỉnh Quy hoạch điện VIII, đến năm 2030, 50% tòa nhà công sở và 50% nhà ở sẽ sử dụng điện mặt trời mái nhà tự sản, tự tiêu. Tiềm năng này rất khả quan tại miền Trung và miền Nam, nơi bức xạ mặt trời trung bình đạt khoảng 4,8 kWh/m²/ngày với 2.000–2.600 giờ nắng/năm [21]. Đây là một trong những tiềm năng giảm carbon vận hành trong các công trình xây dựng ở Việt Nam.

b. Tiềm năng giảm carbon hàm chứa trong các công trình xây dựng tại Việt Nam

Theo phương pháp tiếp cận vòng đời WLC [22], phát thải carbon hàm chứa tập trung ở giai đoạn sản xuất vật liệu xây dựng (A1–A3) và thi công (A4, A5). Mức tiềm năng giảm carbon hàm chứa phụ thuộc vào loại hình công trình, vật liệu sử dụng, giải pháp thiết kế và kiểu kết cấu. Các biện pháp gồm: giảm khối lượng xây dựng, giảm vật liệu sử dụng, sử dụng vật liệu phát thải carbon thấp (low-carbon), tái sử dụng cấu kiện, ứng dụng công nghệ thi công mới và giảm rác thải xây dựng (Bảng 3, 4). Việc sử dụng các vật liệu carbon thấp giúp giảm tổng phát thải đến trên 50%; nhưng chỉ khi kết hợp tối đa tái sử dụng tài sản, tối đa vận hành và quản lý để giảm xây dựng mới các cấu kiện thì mới có khả năng giảm tổng phát thải đến hơn 80%, hướng đến trung hoà carbon trong toàn bộ vòng đời (Hình 3).

Để đánh giá tiềm năng giảm phát thải carbon hàm chứa từ vật liệu xây dựng (VLXD) (A1–A3), hai loại hình công trình là văn phòng và trường học đã được phân tích dựa vào các cấu kiện chính được chia thành 6 nhóm gồm: (1) móng và tầng hầm; (2) khung cột, dầm và sàn; (3) lõi cứng và trục giao thông đứng; (4) kết cấu bao che không xuyên sáng; (5) cửa sổ, vách kính và cửa đi; (6) vách ngăn chia không gian trong nhà và vật liệu hoàn thiện. Tiềm năng giảm phát thải A4, A5, B1–5, C và D cũng được phân tích sơ bộ theo “Mức tiềm năng” áp dụng các giải pháp giảm phát thải cho hai loại hình công trình, được xây dựng dựa trên cơ sở “Tiềm năng giảm phát thải carbon hàm chứa ở các giai đoạn khác nhau của một dự án xây dựng” [12] (Bảng 3).



Hình 3. Tiềm năng giảm carbon vòng đời công trình từ các chiến lược/biện pháp giảm khối lượng xây dựng, giảm sử dụng vật liệu, sử dụng vật liệu xanh, ứng dụng công nghệ xây dựng mới và giảm rác thải xây dựng [12]

Bảng 3. Phân tích tiềm năng áp dụng giải pháp giảm phát thải carbon hàm chứa cho loại hình trường học và văn phòng trung hoà carbon tại Việt Nam trong tương lai (theo tiêu chí A1–A5, B, C, D)

Nhóm tiêu chí	Giải pháp cho Nhà văn phòng	Giải pháp cho Trường học	Nhận xét tiềm năng giảm phát thải
A1–A3: Giảm phát thải từ VLXD. Ở Việt Nam đang phát triển các VLXD tái chế [23–26]: thép tái chế từ phế liệu; gỗ kỹ thuật, gạch tái chế từ phế thải xây dựng. Vật liệu hoàn thiện nhẹ, bền cao: tấm thạch cao tái chế, gạch không nung, vật liệu composite sinh học.	- Kết cấu chịu lực, khung: sử dụng bê tông xanh và VLXD tái chế; dầm, sàn ứng dụng gỗ ghép thanh nhiều lớp chéo CLT. - Tường bao che: gạch không nung/tấm bê tông tái chế kết hợp vật liệu sinh học có khả năng cách âm, cách nhiệt. - Cửa và kính: sử dụng kính, khung nhựa lõi thép/gỗ tái chế. - Hoàn thiện: tối giản trang trí hoàn thiện, giảm diện tích trần giả và ốp lát sàn. - Sử dụng vật liệu có Tuyên bố sản phẩm môi trường EPD.	- Kết cấu chịu lực, khung: Nền, móng sử dụng bê tông xanh và VLXD tái chế; dầm, sàn ứng dụng gỗ CLT. - Tường bao che: gạch không nung/tấm bê tông tái chế kết hợp vật liệu sinh học có khả năng cách âm, cách nhiệt. - Cửa & kính: sử dụng kính, nhựa lõi thép/gỗ tái chế. - Hoàn thiện: tối giản lớp trang trí hoàn thiện, giảm diện tích trần giả và ốp lát sàn. - Sử dụng vật liệu có Tuyên bố sản phẩm môi trường EPD.	- Văn phòng: phần kết cấu chịu lực chiếm tỷ trọng phát thải lớn do nhu cầu bê tông và thép cao; việc thay thế bằng gỗ CLT và vật liệu tái chế chỉ mang tính bổ sung, khó áp dụng triệt để. Ngoài ra, văn phòng thường có tầng hầm, gia tăng khối lượng bê tông. Tiềm năng giảm phát thải Trung bình. - Trường học (thấp tầng và nhiều tầng, tải trọng vừa phải): kết cấu đơn giản, thường không cần tầng hầm, dễ thay thế bê tông–thép bằng VLXD xanh, tái chế và vật liệu sinh học địa phương. Tiềm năng giảm phát thải Cao.
A4: Vận chuyển xanh.	- Ưu tiên VLXD địa phương, vận tải bằng xe điện/sinh học. - Phương tiện vận chuyển sử dụng năng lượng xanh (xe điện). - Tối ưu tải chở vật liệu.	- Ưu tiên VLXD địa phương, vận tải bằng xe điện/sinh học. - Phương tiện vận chuyển sử dụng năng lượng xanh (xe điện). - Tối ưu tải chở vật liệu.	- Văn phòng và Trường học có tiềm năng giảm phát thải như nhau với giả thiết đều tập trung ở thành phố lớn.
A5: Thi công lắp đặt sử dụng công nghệ phát thải thấp	- Tối đa áp dụng mô-đun hóa, cấu kiện đúc sẵn. - Giải pháp, công nghệ thi công ít phát thải, tối ưu thời gian thi công.	- Dễ dàng áp dụng cấu kiện mô-đun hóa, cấu kiện đúc sẵn. - Giải pháp, công nghệ thi công ít phát thải, tối ưu thời gian thi công.	- Văn phòng: Khó đồng bộ mô-đun hóa, khó rút ngắn thời gian thi công toàn bộ. Tiềm năng giảm phát thải Trung bình. - Trường học: Cấu trúc mặt bằng và không gian học tập lặp lại, thuận lợi cho mô-đun hóa, đúc sẵn và công nghệ thi công nhanh.

Nhóm tiêu chí	Giải pháp cho Nhà văn phòng	Giải pháp cho Trường học	Nhận xét tiềm năng giảm phát thải
B1–5: Bảo trì, sửa chữa, cải tạo; C1–4: Tháo dỡ và xử lý chất thải xây dựng; D: Giảm phát thải từ tái sử dụng VLXD.	- Sử dụng vật liệu kết cấu chịu lực, khung và lớp vỏ công trình có tuổi thọ cao, ưu tiên vật liệu có khả năng tái sử dụng/tái chế. - Thiết kế không gian linh hoạt, module hóa, dễ dàng thay đổi bố trí nội thất theo nhu cầu mà không cần can thiệp sâu vào kết cấu chính. - Ứng dụng BIM/Digital Twin trong quản lý vận hành để tối ưu quản lý bảo trì, kéo dài tuổi thọ thiết bị và hạn chế phát sinh chất thải xây dựng.	- Thiết kế lớp học và khối chức năng module hóa, có khả năng mở rộng, cải tạo hoặc tháo dỡ dễ dàng, giúp tối ưu tái sử dụng vật liệu. - Ưu tiên vật liệu và kết cấu có tuổi thọ cao, phát thải thấp, phù hợp với tính chất ổn định, ít thay đổi công năng của công trình giáo dục. - Ứng dụng BIM/Digital Twin trong quản lý vòng đời công trình để lên kế hoạch bảo trì định kỳ, giảm hư hỏng vật liệu và phát thải trong quá trình vận hành.	- Trường học: do công năng ổn định, nên tiềm năng giảm phát thải tập trung vào cải tạo và sửa chữa (sử dụng vật liệu hoàn thiện bền, phát thải thấp). Hiệu quả được tăng cường khi áp dụng thiết kế module hóa lớp học, giúp công tác tháo dỡ và tái sử dụng dễ dàng. Ở giai đoạn C1–4, có thể giảm phát thải nhờ tái chế thép, nhựa, kính. - Văn phòng: Do không gian sử dụng thay đổi theo nhu cầu khách hàng, tiềm năng giảm phát thải ở thiết kế nội thất linh hoạt và ưu tiên vật liệu dễ tái chế. Ở giai đoạn C1–4, nhờ quy mô lớn và tỷ lệ sử dụng thép, nhựa, kính cao, nên khả năng thu hồi, tái chế và giảm phát thải rõ rệt.

Bảng 4. Một số tiêu chí thiết kế giảm phát thải carbon (vận hành và hàm chứa) cho công trình tại Việt Nam

Yêu cầu thiết kế	Giải pháp thiết kế chính	Tài liệu, quy định tham chiếu căn cứ	Tiêu chí đánh giá tiện nghi, chất lượng (điều kiện tiên quyết)
a. Giảm carbon vận hành B6 (giới hạn năng lượng vận hành, EUI kWh/m²/năm)			
- Tối đa hiệu quả năng lượng từ thiết kế thụ động	Hình khối tối ưu, chọn hướng nhà, cách nhiệt lớp vỏ công trình, che nắng, WWR tối ưu đảm bảo giảm hấp thụ bức xạ mặt trời và lấy sáng, đảm bảo độ kín khí của kết cấu bao che.	QCVN 09:2017/BXD (OTTV hoặc U-value, SHGC), tiêu chuẩn cách nhiệt, quy định về kín khí; tham chiếu ISO/TS 23764.	Tiện nghi nhiệt, tiện nghi thị giác, đảm bảo chất lượng không khí trong nhà: TCVN 14214:2024, TCVN 13521:2022, TCVN 13983:2024, TCVN 7114-1:2008.
- Tối đa hiệu quả năng lượng từ hệ thống HVAC, chiếu sáng, thang máy, và các thiết bị điện khác	Thiết bị hiệu suất cao, điều khiển BMS/EMS, hồi nhiệt, zoning, VAV, bơm nhiệt (heat pump) khi phù hợp.	QCVN 09:2017/BXD (năng suất làm mát/sưởi ấm, hiệu suất năng lượng tối thiểu); TCVN 5687:2024 (hệ thống thông gió – điều hòa không khí)	Tiện nghi nhiệt, tiện nghi thị giác, đảm bảo chất lượng không khí trong nhà: TCVN 14214:2024, TCVN 13521:2022, TCVN 7114-1:2008.
- Tận dụng năng lượng tái tạo tại chỗ/ngoài khu đất xây dựng	Sử dụng năng lượng tái tạo tại chỗ, tích hợp BIPV, lưu trữ, cơ chế bù trừ điện năng.	Tham chiếu Quy hoạch Điện VIII, VNEEP3; Nghị quyết 55-NQ/TW.	Không yêu cầu tiện nghi bổ sung nhưng đảm bảo an toàn và ổn định cung cấp điện cho thiết bị thiết yếu.
b. Giảm carbon hàm chứa (Embodied carbon — A1–A5, B2–B5, C, D, (kgCO₂(tđ)/m²)			
Căn cứ: BS EN 15978, ISO 14040:2006, và RICS PS. Các số tài liệu thực hành thiết kế: LEED v5, BREEAM, DGNB			
- Giảm carbon trong VLXD (A1–A3).	- Sử dụng vật liệu hiệu quả, xây dựng tinh gọn (lean construction). - Ưu tiên vật liệu nguồn gốc sinh học (gỗ, tre, phụ phẩm nông nghiệp). - Sử dụng vật liệu có thành phần tái chế.	- Chưa có tiêu chuẩn EPD cho thị trường VLXD Việt Nam.	TCVN 13521:2022, QCVN 06:2021/BXD. Yêu cầu an toàn chất lượng không khí trong nhà, phòng chống cháy.

Yêu cầu thiết kế	Giải pháp thiết kế chính	Tài liệu, quy định tham chiếu căn cứ	Tiêu chí đánh giá tiện nghi, chất lượng (điều kiện tiên quyết)
- Giảm carbon hàm chứa trong thi công lắp đặt (A4–A5): + Logistics & vật liệu địa phương (A4). + Thi công nhanh, ít phát thải (A5) (Hình 5).	- Chọn vật liệu sản xuất gần công trình. - Sử dụng cấu kiện/lắp ráp module tiền chế, giảm thời gian thi công. - Giảm bê tông đổ tại chỗ, ưu tiên kết cấu lắp ghép. - Tối ưu logistics công trường, máy móc nhẹ, quản lý bụi/khí thải.	- TCVN 9115:2012 về thi công, nghiệm thu kết cấu bê tông và bê tông cốt thép lắp ghép. - Chưa có quy định hay hướng dẫn giảm phát thải quá trình vận chuyển, logistics xanh...	TCVN 5308:1991 (An toàn thi công).
- Giảm carbon hàm chứa trong giai đoạn vận hành – thay thế, sửa chữa (B1–B5).	- Vật liệu/kết cấu tuổi thọ cao, bảo trì đơn giản. - Dễ tháo lắp thay thế từng phần. - Vật liệu chống ăn mòn, chịu thời tiết tốt. - Tiêu chuẩn hóa vật liệu để dễ thay thế.	- Chỉ có các tiêu chuẩn quy định kỹ thuật thiết kế, xây lắp: QCVN 03:2022/BXD; TCVN 9343:2012. - Tài liệu tham khảo: ISO 15686; BS EN 15978; ISO 14040 / ISO 14044 s. - Chưa có quy định liên quan hạn chế phát thải giai đoạn B1–B5.	
- Giảm carbon hàm chứa trong phá dỡ và xử lý cuối vòng đời (C, D).	- Thiết kế dễ tháo lắp. - Phân loại và tái chế vật liệu tại chỗ. - Tái sử dụng cấu kiện. - Liên kết với cơ sở tái chế.	- Tại Việt Nam mới chỉ có QCVN 18:2021/BXD về phá dỡ công trình xây dựng nhưng nội dung yêu cầu về an toàn. - Các quy định hay hướng dẫn kỹ thuật phá dỡ, quản lý rác thải chưa xét đến mục tiêu giảm phát thải.	QCVN 18:2021/BXD - Quy chuẩn về phá dỡ công trình trong đảm bảo an toàn tại công trường xây dựng.
c. Bù trừ carbon			
- Thị trường tín chỉ carbon, giới hạn thực hiện bù trừ bằng tín chỉ không vượt quá 15% tổng phát thải cơ sở của công trình tính đến 2030.	- Tích hợp không gian xanh, vườn mái, tường cây. - Bề mặt thấm nước, hồ sinh học. - Hợp tác trồng rừng hoặc dự án bù trừ carbon. - Tín chỉ carbon.	- QCVN 07:2023/BXD. - LEED v5 SSc Rainwater Management.	Nghị định 119/2025/NĐ-CP.

3.2. Phương pháp tiếp cận mô hình lý thuyết cho công trình trung hoà carbon tại Việt Nam

Dựa trên các phương pháp tiếp cận quốc tế, mô hình trung hòa carbon cần được chuẩn hoá theo từng loại hình công trình, theo đặc điểm kiến trúc, hệ thống kỹ thuật và lịch vận hành. Giới hạn carbon hàm chứa và carbon vận hành được xác định theo phương pháp LCA và mô phỏng với cấu trúc nguyên mẫu điển hình (prototype). Mỗi mô hình điển hình phải được tính toán theo ba kịch bản: hiện tại, tương lai gần năm 2035 và tương lai mục tiêu năm 2050, nhằm xác định mức giảm năng lượng và carbon hàm chứa về mức trung hoà theo lộ trình quốc gia. Quá trình này cần được tự động hóa và cập nhật thường xuyên theo sự tiến bộ công nghệ xây dựng.

Để tạo lập mô hình điển hình thí điểm cho nhà văn phòng và trường học tại Hà Nội, TP. HCM (mô hình cơ sở - baseline), cần thu thập dữ liệu chi tiết về thiết kế kiến trúc, kết cấu, vật liệu, hệ thống kỹ thuật và định mức kinh tế. Sau đó, xây dựng hai kịch bản thiết kế cho năm 2035 và 2050 nhằm mô

phỏng theo dữ liệu khí hậu tương lai và theo kịch bản biến đổi khí hậu. Kinh nghiệm quốc tế cho thấy, các mô hình công trình trung hòa carbon ưu tiên tối ưu hóa thiết kế kiến trúc, kết cấu và hệ thống kỹ thuật trước khi áp dụng các giải pháp bù trừ từ bên ngoài như năng lượng tái tạo. Cách tiếp cận này giúp khai thác tối đa tiềm năng giảm phát thải nội tại trước khi hạ tầng năng lượng và công nghệ đạt mức sẵn sàng cao hơn.

Kết quả đánh giá thực trạng và tiềm năng áp dụng các giải pháp giảm carbon (Bảng 3 và 4) là cơ sở quan trọng để định hướng các giới hạn và kịch bản thiết kế phù hợp cho từng loại hình công trình, bảo đảm tính khả thi và hiệu quả của mô hình không trình trung hòa carbon tại Việt Nam. Mô hình cần được xác định theo hai mục tiêu chính - (1) giới hạn năng lượng vận hành; (2) giới hạn phát thải carbon hàm chứa:

a. Xác định giới hạn năng lượng vận hành của mô hình trung hoà carbon, KWh/m²/năm

Phương pháp tiếp cận BOTOM-UP được sử dụng để ước tính phát thải giai đoạn B6. Mô hình năng lượng điển hình cho từng loại công trình được thiết lập và mô phỏng theo điều kiện thực tế và các kịch bản khí hậu tương lai, với ba mức thiết kế:

- Mô hình cơ sở (BAU): Tuân thủ tối thiểu QCVN 09:2017/BXD cho lớp vỏ và thiết bị, không sử dụng năng lượng tái tạo.

- Mô hình cải thiện 2035: Áp dụng đầy đủ thiết kế thụ động, thiết bị hiệu suất cao hơn 50% so với năm 2025 và khai thác 50% diện tích mái cho điện mặt trời [27].

- Mô hình nâng cao 2050: Áp dụng đầy đủ thiết kế thụ động, thiết bị hiệu suất cao hơn 80% so với năm 2025 và sử dụng điện mặt trời trên 80% diện tích mái, đồng thời có thể tích hợp lên mặt đứng khi phù hợp.

b. Xác định giới hạn carbon hàm chứa của mô hình trung hoà carbon, kgCO₂(tđ)/m²

Trong khả năng hiện tại (phân tích ở Bảng 4), giới hạn carbon hàm chứa tập trung vào carbon trước vận hành (A1-A5), sử dụng công cụ tính LCA (One Click, SimaPro, Ecoinvent...). Đặc điểm phát thải carbon hàm chứa cho từng loại hình công trình rất khác nhau theo công năng, quy mô, loại vật liệu xây dựng đặc thù, và đặc điểm kết cấu. Các kịch bản thiết kế kết cấu, vật liệu được đề xuất dựa trên cơ sở “Tiềm năng giảm phát thải carbon hàm chứa ở các giai đoạn khác nhau của một dự án xây dựng” [12]:

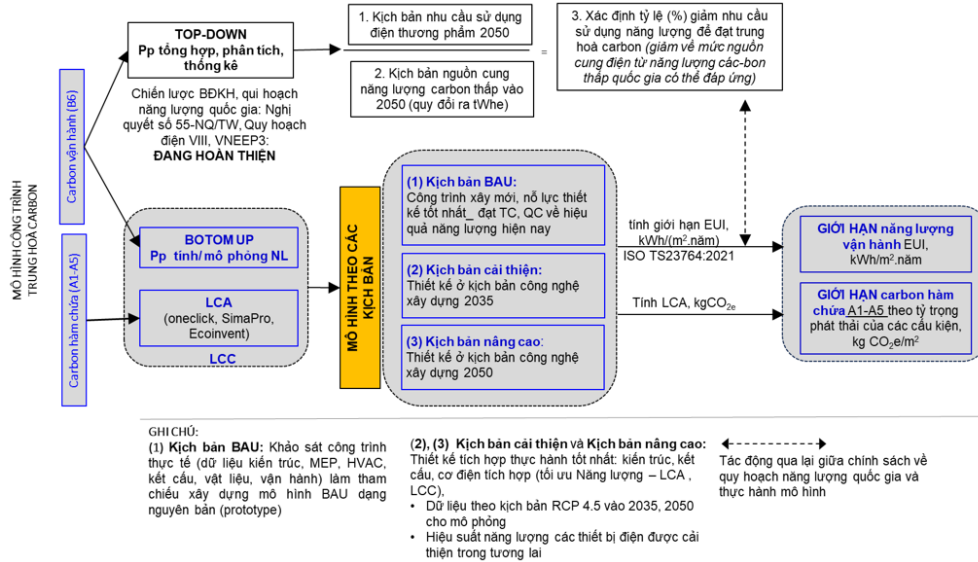
- Mô hình cơ sở (BAU): cấu tạo của lớp vỏ công trình theo các TCVN và QCVN hiện hành với các vật liệu sẵn có trên thị trường, các thiết kế điển hình được tập hợp từ dữ liệu khảo sát để xây dựng mô hình cơ sở.

- Mô hình cải thiện 2035: tăng cường kết cấu khung chịu lực và lớp vỏ công trình với vật liệu phát thải thấp, có khả năng module hoá cao. Giảm thiểu sử dụng trần giả và các chi tiết hoàn thiện nội thất trang trí, ưu tiên vật liệu có khả năng tái chế.

- Mô hình nâng cao 2050: các kết cấu chịu lực và vật liệu hoàn thiện sử dụng gốc tự nhiên phát thải thấp (như gỗ, vật liệu gốc sinh học), tối đa module hoá.

c. Giới hạn carbon bù trừ

Phần carbon chưa thể trung hoà từ các nỗ lực thiết kế và ứng dụng công nghệ kỹ thuật xây dựng sẽ được xử lý theo phương pháp bù trừ (offset carbon) thông qua tín chỉ carbon, được quy định trong Nghị định 119/2025/NĐ-CP [28], và không vượt quá 15% cho đến 2030. Hiệu quả kinh tế tổng thể của mô hình được đánh giá theo phương pháp LCC. Điều này ngụ ý mô hình carbon trong tương lai phải dựa vào các nỗ lực giảm phát thải trực tiếp từ các giải pháp hiệu quả năng lượng và giảm phát thải vật liệu.



Hình 4. Sơ đồ tiếp cận mô hình công trình trung hoà carbon cho Việt Nam theo hai nhóm tiêu chí chính: giới hạn mức năng lượng vận hành và carbon hàm chứa

Trong bối cảnh chưa có định mức sử dụng năng lượng và phát thải của công trình hiện hữu tại Việt Nam, nghiên cứu này sẽ tiếp cận phát triển mô hình công trình trung hoà carbon theo thiết kế các kịch bản thực hành tốt nhất dựa trên các tiêu chí mục 3.1 (Bảng 4). Từ tiếp cận này có thể xác định được mô hình công trình trung hoà carbon dựa vào các chỉ số phát thải đặc trưng cho từng loại hình công trình thông qua mô phỏng năng lượng phạm vi B6 và tính phát thải carbon hàm chứa trong phạm vi A1-A5 theo sơ đồ ở Hình 4. Các chỉ số quan trọng xác định mô hình sẽ được tính toán bao gồm:

- Giới hạn năng lượng vận hành theo vùng khí hậu, kWh/2;
- Giới hạn phát thải carbon hàm chứa theo vùng khí hậu, kgCO₂(tđ);
- Tỷ lệ % giảm carbon vận hành và carbon hàm chứa so với mô hình cơ sở ở hiện tại;
- Tỷ trọng phát thải theo thành phần kết cấu chính của công trình: Tỷ lệ phát thải phần móng; phần khung, lõi; lớp vỏ bao che; vật liệu hoàn thiện nội thất cơ bản.

3.3. Ứng dụng sơ đồ tiếp cận mô hình công trình trung hoà carbon cho Việt Nam

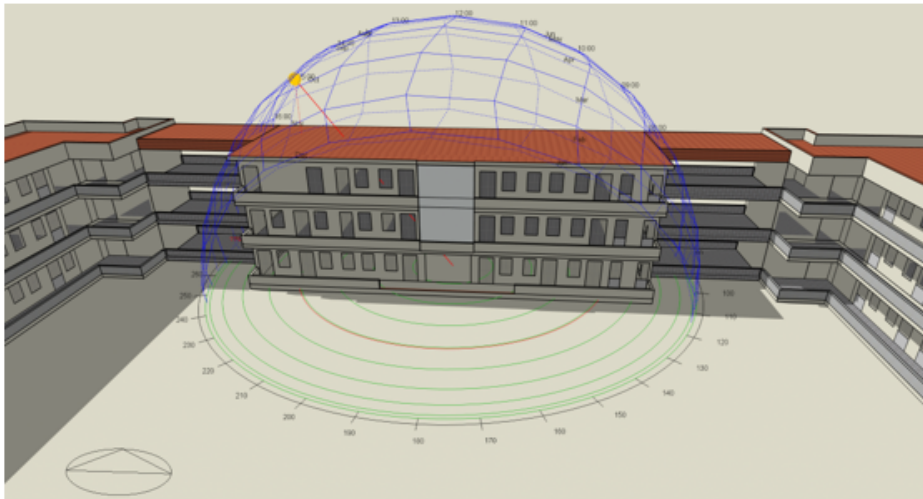
Mô hình công trình điển hình được sử dụng tính thí điểm lấy từ một toà nhà hiệu bộ của một trường học thực tế, với quyền tự do thay đổi tất cả các thông số thiết kế khác để đạt được, hoặc càng gần với mục tiêu hiệu suất phát thải ròng bằng 0 càng tốt. Sơ đồ tiếp cận ở Hình 4 được ứng dụng trong việc thiết lập mô hình nhà hiệu bộ của một trường học 3 tầng, có tổng diện tích sàn 1045,3 m², diện tích mái 330 m². Các thiết lập tính toán năng lượng vận hành và phát thải vật liệu như sau (xem Bảng 5, 6 và 7):

a. Tính năng lượng vận hành

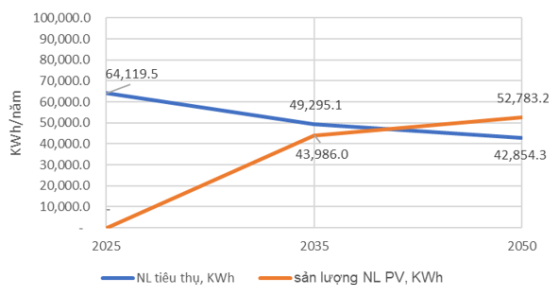
Bảng 5. Đề xuất cải thiện thông số đầu vào theo các kịch bản

Hạng mục	Nội dung	Năm 2025 (QCVN 09:2017/BXD)	Năm 2035	Năm 2050
Kết cấu bao che	OTTV tường (W/m ²)	60	40	25
	OTTV mái (W/m ²)	25	15	10

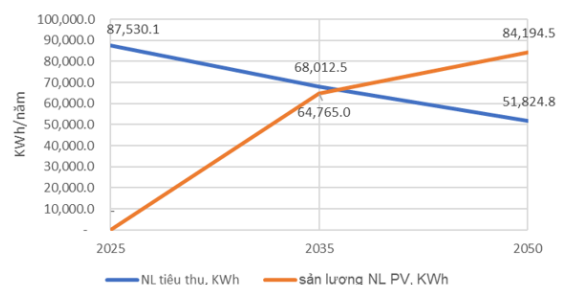
Hạng mục	Nội dung	Năm 2025 (QCVN 09:2017/BXD)	Năm 2035	Năm 2050
Hệ thống kỹ thuật	COP: điều hòa treo tường	3	4,6	6
	LPD	11	7	5
	Pin năng lượng mặt trời		50%	80%
	Lưu lượng gió ngoài	25 m ³ /(h.người) - Theo TCVN 5687:2024		
Tài thiết bị	Mật độ người	8 m ² /người - Theo TCVN 5687:2024		
Lịch trình hoạt động	Ngày, giờ làm việc	Ngày làm việc: Thứ 2 đến Thứ 6. Sáng 7.00-11.30; chiều 12.30-17.00 Ngày nghỉ: Thứ 7, Chủ nhật, 3 tháng hè, lễ, tết theo quy định của nhà nước		
Thông số tính toán trong nhà	Nhiệt độ / độ ẩm	26°C / 60% (Theo TCVN 5687:2024)		



Hình 5. Phối cảnh nhà hiệu bộ của trường học



(a) Hà Nội



(b) TP. Hồ Chí Minh

Hình 6. Năng lượng tiêu thụ và năng lượng PV sản sinh, kWh/năm

Ghi chú: tổng diện tích pin mặt trời áp mái 2035 là 50% (~165 m²); 2050 là 80% (~280 m²)

Bảng 6. Kết quả tính năng lượng tiêu thụ theo kịch bản của nhà hiệu bộ 3 tầng

Năng lượng tiêu thụ	2025	2035	2050
Hà Nội			
Năng lượng tiêu thụ, KWh/năm	64119,45	49295,1	42854,3
Năng lượng sản sinh từ PV, KWh/năm	0	43986,0	52783,2
Tổng năng lượng tiêu thụ bù trừ khi có PV, kWh/năm	64119,45	5309,1	(9928,9)
EUI có tính đến PV, kWh/m ²	61,3	5,1	(9,5)
EUI không tính đến PV, kWh/m ²	61,3	47,2	41,0
TP Hồ Chí Minh			
Năng lượng tiêu thụ, kWh/năm	87530,1	68012,5	51824,8
Năng lượng sản sinh từ PV, kWh/năm	0	64765,0	84194,5
Tổng năng lượng tiêu thụ bù trừ khi có PV, KWh/năm	87530,1	3,247,5	(32369,7)
EUI có tính đến PV, kWh/m ²	83,7	3,1	(31,0)
EUI không tính đến PV, kWh/m ²	83,7	65,1	49,6

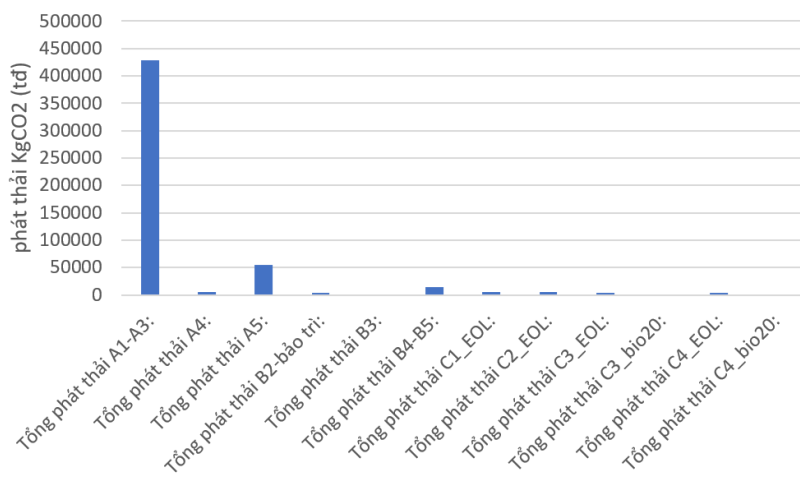
b. Tính carbon hàm chứa

Phương pháp tính dựa trên đánh giá vòng đời (LCA) theo tiêu chuẩn EN 15978, gồm các giai đoạn A1–A5, B1–B7, C1–C4 và D. Quy trình tính toán từ xác lập phạm vi, lập bảng khối lượng vật liệu, tra hệ số phát thải từ cơ sở dữ liệu (EPD, OneClick LCA), tính toán và chuẩn hóa theo diện tích sàn để đánh giá.

Bảng 7. Vật liệu xây dựng thiết kế cho kịch bản năm 2035 và 2050

TT	Hạng mục của công trình	Vật liệu xây dựng (Hiện tại)	Chiến lược vật liệu xây dựng (2035)	Chiến lược vật liệu xây dựng (2050)
1	Kết cấu phần ngầm			
	Móng	Bê tông cốt thép, xi măng Portland Thép gia cường (tái chế 90%)	BTCT với thép tái chế 97%, Bê tông CEM II/A (40% tro bay + xi+ tái chế)	BTCT với thép tái chế 100%, Lean concrete + CEM III/A (50% tro bay + xi+ tái chế)
2	Kết cấu phần thân			
	Khung (dầm, cột), cầu thang, đường dốc, vách thang máy, sàn	Bê tông cốt thép, xi măng Portland Thép gia cường (tái chế 90%)	BTCT với thép tái chế 97%, Bê tông CEM II/A (40% tro bay + xi+ tái chế)	BTCT với thép tái chế 100%, Lean concrete + CEM III/A (50.% tro bay + xi+ tái chế)
3	Lớp vỏ bao che			
	Mái	Bê tông Portland, thép gia cường (tái chế 90%); Vữa lát; Lớp gạch đất nung có khe không khí chống nóng; Vữa lát, Gạch lá nem	BTCT với thép tái chế 97%, Bê tông CEM II/A (40% tro bay + xi+ tái chế) Cách nhiệt Cellulose	BTCT với thép tái chế 100%, Bê tông CEM III/A (50% tro bay + xi+ tái chế) Cách nhiệt Cellulose

TT	Hạng mục của công trình	Vật liệu xây dựng (Hiện tại)	Chiến lược vật liệu xây dựng (2035)	Chiến lược vật liệu xây dựng (2050)
	Tường bao che	Gạch bê tông	Gạch bê tông nhẹ có hàm lượng tái chế bằng bê tông nghiền (47%)	Gạch AAC/ALC (tái chế 70% hoặc tương đương)
	Cửa sổ, cửa đi ngoài nhà	Kính SHGC 0.64, U-value = 5,6 (W/m ² -K); Khung nhôm	Cửa kính khung gỗ	Cửa sổ kính khung gỗ/cửa đi gỗ
4	Vách ngăn và vật liệu hoàn thiện			
	Tường và vách ngăn trong nhà	Gạch bê tông	Gạch bê tông nhẹ có hàm lượng tái chế bằng bê tông nghiền (47%)	Vách gỗ/AAC tái chế (tái chế 70% hoặc tương đương)
	Lớp hoàn thiện sàn	Xi măng portland Sàn gạch ceramic	Vữa tam hợp Sàn vinyl	Vữa tam hợp (tái chế 50%); Sàn gỗ tái sử dụng
	Lớp hoàn thiện trần	Trát vữa 15 mm, lăn sơn + ốp trần giả thạch cao	Sơn màu sáng, trần giả (tái chế 20%) chỉ sử dụng tại vị trí bắt buộc (khu vệ sinh, bếp)	sơn màu sáng, trần giả (tái chế 50%) chỉ sử dụng tại vị trí bắt buộc (khu vệ sinh, bếp)
	Cửa trong nhà	Cửa nhôm kính	Cửa gỗ	Cửa gỗ



Hình 7. Phát thải theo phạm vi vòng đời xây dựng (không tính B6, B7, D)

c. Khả năng trung hoà carbon của công trình nhà hiệu bộ 3 tầng

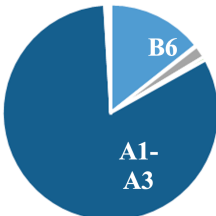
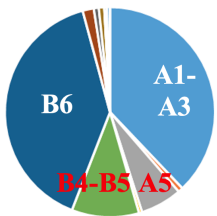
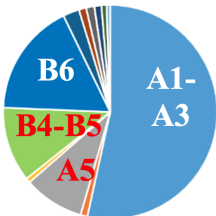
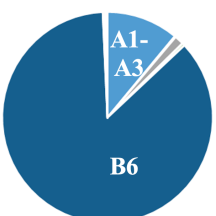
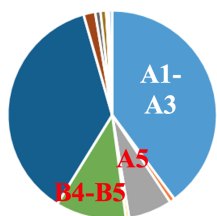
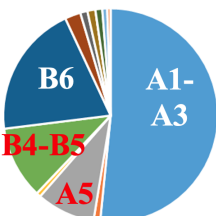
- Phân tích khả năng cân bằng năng lượng vận hành B6: Từ Bảng 6 và Hình 6 có thể cho thấy cả nhu cầu năng lượng và sản lượng điện mặt trời (PV) ở Hà Nội đều thấp hơn TP. HCM. Với việc quy

hoạch 50% và 80% diện tích mái lắp PV vào các mốc 2035 và 2050, nhà hiệu bộ 3 tầng được thiết kế hiệu suất cao có thể đạt cân bằng hoặc “dương” năng lượng. Giới hạn tiêu thụ năng lượng là khoảng 40 kWh/m²/năm tại Hà Nội và 50 kWh/m²/năm tại TP. HCM. Lượng điện PV dư vào năm 2050 có thể tích lũy trong cả vòng đời, giúp bù trừ phát thải carbon hàm chứa trong xây dựng.

- Phân tích khả năng trung hoà carbon hàm chứa xây dựng A1-A5: Kết quả tính cho thấy phát thải phạm vi A1-A3 chiếm hơn 80% tổng phát thải xây dựng, nên việc trung hòa carbon cần tập trung vào vật liệu phát thải thấp. Các kịch bản 2035 và 2050 cho thấy có thể giảm 39–44% phát thải nhờ sử dụng bê tông cốt thép tái chế, giảm vật liệu hoàn thiện hoặc dùng vật liệu sinh học. Phát thải hàm chứa năm 2050 được ước tính ở mức 262,28 kgCO₂e/m².

- Phân tích khả năng trung hoà carbon toàn bộ vòng đời: Từ cơ cấu phát thải vòng đời ở Bảng 8, có thể thấy phát thải carbon từ năng lượng vận hành B6 hiện chiếm tỷ trọng lớn nhất nhưng giảm mạnh trong các kịch bản 2035 và 2050 nhờ PV. Tuy nhiên, A1–A5 và B4–B5 sẽ trở thành thách thức chính do phụ thuộc vào vật liệu, công nghệ thi công và sửa chữa. Hiện tại, tổng phát thải vòng đời khoảng 2828 kgCO₂/m² (Hà Nội) và 3686 kgCO₂/m² (TP. HCM), khác biệt lớn do nhu cầu năng lượng tại TP. HCM cao hơn. Đến 2050, tổng phát thải dự kiến giảm xuống ~450 kgCO₂/m² cho cả hai khu vực, trong đó A1–A5 chiếm tỷ trọng lớn nhất (312 kgCO₂/m²).

Bảng 8. Cơ cấu tỷ trọng phát thải vòng đời carbon vận hành B6 và carbon hàm chứa xây dựng của công trình theo các kịch bản

2025	2035	2050
Hà Nội		
		
Phát thải cả vòng đời A-D/m ² sản: 2828,31 kgCO ₂ /m ²	651,42 kgCO ₂ /m ²	451,81 kgCO ₂ /m ²
B6: 100% phát thải từ lưới điện EUI = 61,3 KWh/m ² A1-A5 = 468,0 kgCO ₂ (tđ)/m ²	B6: 30,8% phát thải từ PV; 69,2% phát thải từ lưới điện. EUI = 47,2 kWh/m ² A1-A5 = 317,18 kgCO ₂ (tđ)/m ²	B6: 100% phát thải từ PV EUI = 41,0 KWh/m ² A1-A5 = 312,1 kgCO ₂ (tđ)/m ²
TP. HCM		
		
Phát thải cả vòng đời A-D/m ² sản: 3685,86 kgCO ₂ /m ²	616,71 kgCO ₂ /m ²	469,42 kgCO ₂ /m ²
B6: 100% phát thải từ lưới điện EUI = 83,7 KWh/m ² A1-A5 = 468,04 kgCO ₂ (tđ)/m ²	B6: 51,7 phát thải từ PV; 48,3 phát thải bù từ lưới điện. EUI = 65,1 kWh/m ² A1-A5 = 317,18 kgCO ₂ (tđ)/m ²	B6: phát thải 100% từ PV EUI = 49,6 kWh/m ² A1-A5 = 312,1 kgCO ₂ (tđ)/ m ²

Dù PV có thể trung hòa carbon vận hành, việc sản xuất và bảo trì hệ thống vẫn phát thải. Nếu điện dư không được hòa lưới hoặc sử dụng hiệu quả, khả năng bù trừ bị hạn chế. Vì vậy, để đạt trung hòa carbon toàn vòng đời, cần ưu tiên các giải pháp giảm carbon hàm chứa, đặc biệt là tái chế và tái sử dụng cấu kiện trong xây dựng.

4. Kết luận

Trước yêu cầu ứng phó biến đổi khí hậu và mục tiêu phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050, việc phát triển mô hình công trình trung hòa carbon trở thành nhiệm vụ chiến lược của ngành xây dựng Việt Nam. Nghiên cứu tổng hợp kinh nghiệm quốc tế, phân tích các phương pháp tiếp cận và chỉ ra các khoảng trống lớn trong dữ liệu phát thải, công cụ đánh giá và hệ thống quy chuẩn – tiêu chuẩn kỹ thuật. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất một phương pháp tiếp cận linh hoạt và có cơ sở khoa học, gồm: (i) phân tích tiềm năng áp dụng các nhóm giải pháp giảm phát thải; (ii) xây dựng tiêu chí thiết kế giảm carbon; và (iii) đánh giá mức độ đáp ứng của hệ thống quy định hiện hành, nhằm định hướng mô hình phù hợp với điều kiện Việt Nam.

Kết quả cho thấy mô hình trung hòa carbon cần được đặc thù hóa theo từng loại hình công trình và gắn với giải pháp thiết kế – công nghệ tương ứng. Về carbon vận hành, tiềm năng giảm chủ yếu đến từ thiết kế thụ động, thiết bị hiệu suất cao, quản lý vận hành tối ưu và khai thác năng lượng tái tạo, đặc biệt điện mặt trời mái nhà; song việc đạt phát thải ròng bằng 0 phụ thuộc mạnh vào quá trình khử carbon lưới điện. Về carbon hàm chứa, thách thức chính là phát triển vật liệu phát thải thấp, thiết kế linh hoạt có thể tháo lắp – tái sử dụng và thúc đẩy chuỗi cung ứng xanh. Trong kịch bản cải thiện (2035), khi vật liệu sinh học chưa phổ biến, cần ưu tiên tái chế – tái sử dụng (A1-A5) và công nghệ thi công (A5), cũng như các giải pháp giảm phát thải trong sửa chữa – thay thế (B4, B5). Bên cạnh đó, hạn chế về bù trừ carbon khiến các giải pháp giảm phát thải trực tiếp thông qua thiết kế hiệu quả năng lượng và giảm phát thải vật liệu trở thành yếu tố then chốt.

Mô hình trung hòa carbon toàn vòng đời đến 2050 là một khung định hướng chiến lược hơn là một bài toán kỹ thuật chi tiết. Nó đặt ra một tầm nhìn dài hạn, tập trung vào những gì có thể làm được ngay, đồng thời tạo động lực cho sự đổi mới công nghệ để giải quyết những thách thức còn lại trong tương lai. Nghiên cứu nhấn mạnh nhu cầu hoàn thiện khung pháp lý, quy chuẩn – tiêu chuẩn và cơ sở dữ liệu phát thải, cùng với một lộ trình linh hoạt để cập nhật giải pháp thiết kế và công nghệ, qua đó từng bước hiện thực hóa mục tiêu trung hòa carbon cho công trình xây dựng vào năm 2050.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ của Nhiệm vụ KHCN cấp Bộ Xây dựng: “Nghiên cứu đề xuất mô hình công trình xây dựng không phát thải các-bon cho một số loại công trình”, mã số RD 8-24.

Tài liệu tham khảo

- [1] United Nations Environment Programme (UNEP) (2023). *Global Status Report for Buildings and Construction*. Accessed 07/03/2024.
- [2] Hiếu, N. T., Hà, L. H., Dũng, T. Q., Tùng, H. N., Tới, P. V., Huyền, C. N. (2024). *Giải pháp cải tạo và vận hành công trình y tế nhằm sử dụng năng lượng hiệu quả: Nghiên cứu điển hình tại một bệnh viện ở Hà Nội*. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 18(2V):13–29.
- [3] Hà, L. H., Dũng, T. Q., Cao, N. V., Khánh, P. Q., Thái, T. Đ. (2021). *Bộ tiêu chí đánh giá thực trạng công trình trường học phục vụ cải tạo nhằm cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng và tiện nghi môi trường trong phòng*. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 15(5V):169–185.
- [4] Võ, T. T. G., Lê, A. T., Phạm, T. P., Phạm, T. T. T. (2025). *Tối ưu hóa hiệu suất năng lượng công trình văn phòng sử dụng kính hiệu suất cao: Solar Control và Low-E*. *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng - Bộ Xây dựng*, 15(03):151–157.

- [5] Thủ tướng Chính phủ (2021). *Chiến lược quốc gia về tăng trưởng xanh giai đoạn 2021-2030, tầm nhìn 2050*. Số 1658/QĐ-TTg.
- [6] Chính phủ (2022). *Quy hoạch tổng thể quốc gia thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050*. Số 138/NQ-CP.
- [7] Le, D.-L., Nguyen, T.-Q., Huu, K. D. (2021). [Life cycle carbon dioxide emissions assessment in the design phase: A case of a green building in Vietnam](#). *Engineering Journal*, 25(7):121–133.
- [8] World Green Building Council. [What is a net zero carbon building](#).
- [9] Science Based Targets initiative (SBTi) (2024). *SBTi corporate NET-ZERO standard V1.2*.
- [10] Bui, T. T. P., MacGregor, C., Domingo, N., Wilkinson, S. (2023). [Collaboration and integration towards zero carbon refurbishment: A New Zealand case study](#). *Energy for Sustainable Development*, 74:361–371.
- [11] N. Ingabo, S., K. Bambang, C., Phichetkunbodee, N., Chan, Y.-C. (2025). [Cluster analysis of consumer characteristics influencing willingness to pay for green buildings and associated energy-efficient purchases in Taiwan](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) - HUCE*, 19(3):1–12.
- [12] UK Green Building Council (2019). *Net zero carbon buildings: A framework definition*.
- [13] World Green Building Council. [Whole life carbon vision](#).
- [14] UK Green Building Council (2020). *Energy performance targets for net zero carbon*.
- [15] Canada Green Building Council (CAGBC) (2019). *Making the case for building to zero carbon*.
- [16] UK Green Building Council (2020). *Building the case for net zero: A feasibility study into the design, delivery and cost of new net zero carbon buildings*.
- [17] Climate Works Australia (2021). *State and territory climate action: Leading policies and programs in Australia*.
- [18] Deo Prasad, M. D., Kuru, A., Oldfield, P., Ding, L., Noller, C., He, B. (2019). *Race to net zero carbon: A climate emergency guide*.
- [19] Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS) (2017). *Whole life carbon assessment for the built environment*.
- [20] Hải Hà, P. T., Khánh Phương, N. T., Công, Đ. T. (2022). [Hướng dẫn thực hành thiết kế thụ động đối với kiến trúc nhiệt đới Việt Nam](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN*, 16 (4V):14–31.
- [21] Ministry of Industry and Trade (MoIT) (2021). [Maps of Solar resource and potential in Vietnam](#).
- [22] Mayor of London (2022). *London plan guidance whole life-cycle carbon assessments*. Greater London Authority.
- [23] Building data (Dữ liệu số ngành VLXD) (2024). [Phát triển vật liệu xây dựng tái chế là yêu cầu cấp thiết](#).
- [24] Cem.info (2025). [100 Công trình tại Hà Nội tiến tới sử dụng vật liệu tái chế từ chất thải rắn xây dựng](#).
- [25] Nguyen, D. C. (2023). *Bản vẽ mô hình vật liệu của dầm bê tông nhẹ sử dụng cốt liệu nhẹ tái chế từ phế thải xây dựng ở Việt Nam*. *Tạp chí Công Thương*, (10):464–469.
- [26] Pham, T. T. (2023). [Đề xuất các dạng sử dụng vật liệu tái chế cho vỏ bao che đa lớp kiến trúc](#). *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng - Bộ Xây dựng*, 13(06):80.
- [27] Thủ tướng Chính phủ (2023). *Phê duyệt Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050*. Số 500/QĐ-TTg.
- [28] Nghị định Chính phủ (2025). *Sửa đổi, bổ sung một số điều của Nghị định số 06/2022/NĐ-CP ngày 07/01/2022 của Chính phủ quy định giảm nhẹ phát thải khí nhà kính và bảo vệ tầng ô-dôn*. Số 119/2025/NĐ-CP.

Phụ lục A. Bảng viết tắt ký hiệu sử dụng trong bài

Ký hiệu	Tiếng Việt	Tiếng Anh
OTTV, W/m ²	Giá trị truyền nhiệt tổng	Overall Thermal Transfer Value
LPD, W/m ²	Mật độ công suất chiếu sáng	Light Power Density
COP	Hệ số hiệu suất năng lượng	Coefficient of Performance
BTCT	Bê tông cốt thép	
HQNL	Hiệu quả năng lượng	
SKH	Sinh khí hậu	
VLXD	Vật liệu xây dựng	
LCA	Đánh giá vòng đời	Life cycle assessment
LCC	Đánh giá chi phí vòng đời	Life cycle cost
BIM	Thông tin công trình	Building information modeling
SHGC	Hệ số hấp thụ nhiệt mặt trời	Solar Heat Gain Coefficient
WWR	Tỷ lệ cửa trên tường	Window to Wall Ratio
HVAC	Hệ thống sưởi ấm, thông gió và điều hòa không khí	Heating, Ventilation, and Air Conditioning
BMS	Hệ thống Quản lý Tòa nhà	Building Management System
EMS	Hệ thống Quản lý Năng lượng	Engineering Management System
BIPV	Pin năng lượng mặt trời tích hợp trong kiến trúc công trình	Building Integrated Photovoltaics