

Hướng tới tòa nhà phát thải ròng bằng “0” tại Việt Nam

Lê Thị Huyền¹, Đinh Thị Phương Lan¹, Nguyễn Thành Trung^{1*}

¹ Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

TỪ KHOÁ

Phát thải cacbon
Phát thải ròng bằng “0”
Giảm thiểu phát thải cacbon
Tòa nhà không phát thải cacbon

TÓM TẮT

Biến đổi khí hậu đang trở thành thách thức lớn, trong đó ngành xây dựng chiếm tỷ lệ đáng kể trong tổng lượng phát thải CO₂. Để đạt mục tiêu phát thải ròng bằng “0” theo cam kết COP26, việc xây dựng công trình đạt phát thải ròng cacbon bằng “0” là giải pháp quan trọng trong thời gian từ nay đến 2050. Nghiên cứu đánh giá tổng thể phát thải cacbon trong suốt vòng đời tòa nhà, từ khai thác vật liệu, chế tạo, xây dựng, vận hành đến phá dỡ và phân tích các giải pháp giảm thiểu, bao gồm: sử dụng vật liệu ít cacbon, tối ưu hóa thiết kế, nâng cao hiệu suất năng lượng, tái chế vật liệu và phát triển năng lượng tái tạo. Từ đó đề xuất các giải pháp để thực hiện hóa mục tiêu này đối với Việt Nam là cần nhanh chóng xây dựng tiêu chuẩn Net Zero Carbon Building (NZCB), thử nghiệm công trình thí điểm và thiết lập hệ thống chứng nhận để thúc đẩy công phát thải ròng bằng “0”, góp phần giảm phát thải khí nhà kính và phát triển bền vững.

KEYWORDS

Carbon Emissions
Net Zero Carbon Building
Life Cycle Assessment

ABSTRACT

Climate change has become one of the biggest challenges, with the construction industry accounting for a significant proportion of total CO₂ emissions. To achieve the goal of Net Zero Emissions in line with the COP26 commitment, constructing Net Zero Carbon Buildings (NZCBs) is a crucial solution from the present until 2050. This study evaluates overall carbon emissions throughout a building's lifecycle—from material extraction and manufacturing to construction, operation, and demolition—and analyzes mitigation solutions, including the use of low-carbon materials, design optimization, energy efficiency improvements, material recycling, and renewable energy development. Accordingly, we propose solutions to realize this goal for Vietnam, including the rapid development of NZCB standards, the implementation of pilot projects, and the establishment of a certification system to promote Net Zero Carbon Buildings, there by contributing to reducing greenhouse gas emissions and sustainable development.

1. Đặt vấn đề

Theo báo cáo của Chương trình Môi trường Liên hợp quốc 2022, lĩnh vực tòa nhà và xây dựng chiếm khoảng 37 % tổng lượng phát thải CO₂ toàn cầu và đồng thời cũng tạo ra lượng lớn chất thải rắn [1]. Do đó, việc cắt giảm phát thải từ lĩnh vực tòa nhà đóng vai trò quan trọng trong nỗ lực toàn cầu ứng phó với biến đổi khí hậu. Đặc biệt với các quốc gia tham gia Công ước khung của Liên hợp quốc về biến đổi khí hậu (Hội nghị COP26) về mục tiêu đạt phát thải ròng bằng “0” vào năm 2050, 2060 hay 2070. Theo ngân hàng thế giới, năm 2022, Việt Nam phát thải 344 triệu tấn CO₂/năm, xếp thứ 17 trên toàn cầu, trong đó ngành năng lượng chiếm đến 63,3 % lượng phát thải. Xây dựng là ngành có vai trò quan trọng trong nền kinh tế ở Việt Nam và cũng là ngành tiêu thụ năng lượng và phát thải cacbon tương đối lớn. Chính vì thế để đạt được mục tiêu giảm phát thải cacbon thì giảm phát thải cacbon trong lĩnh vực xây dựng hay xây dựng công trình đạt phát thải ròng bằng “0” là giải pháp quan trọng trong nỗ lực ứng phó với biến đổi khí hậu. Trong NDC cập nhật của Việt Nam 2022, đến năm 2030 Việt Nam sẽ giảm 15 % lượng phát thải so với kịch bản BAU (tương đương 146,3 MtCO₂ tđ), trước đó NDC 2020 là 9 %. Theo tính toán,

nếu có hỗ trợ quốc tế, Việt Nam sẽ giảm phát thải thêm 27,7 % tức là giảm tổng cộng 43,3 % so với kịch bản BAU. Các cam kết này tóm tắt với một số lĩnh vực, tuy nhiên tập trung nhiều vào lĩnh vực năng lượng. Trong đó xây dựng và vận hành tòa nhà là một cấu phần lớn của lĩnh vực tiêu thụ năng lượng, chiếm khoảng 36 % mức tiêu thụ năng lượng toàn cầu [2].

Vương quốc Anh là nước đi đầu trong việc phát triển các công cụ, tiêu chí cho công trình đạt phát thải ròng bằng “0” và cam kết đạt mục tiêu này vào năm 2050. Vương quốc Anh cũng tiên phong trong việc thiết lập các hạn ngạch cacbon ràng buộc về mặt pháp lý, giới hạn lượng khí thải nhà kính tối đa trong từng giai đoạn 5 năm. Hội đồng Công trình xanh – Vương quốc Anh (UKGBC) thiết lập một khuôn khổ trọng tâm chính là đưa ra lộ trình đạt được mục tiêu xây dựng các tòa nhà phát thải cacbon ròng bằng “0” trong cả quá trình xây dựng và vận hành với khái niệm Net zero carbon (NZC) – Construction và Net zero carbon (NZC) – Operational energy, đồng thời bắt đầu đưa ra định hướng để giải quyết vấn đề phát thải cacbon trong toàn bộ vòng đời của công trình [3]. UKGBC cũng đưa ra nghiên cứu khả thi trong thiết kế, phân phối, tính giá thành của một công trình xây mới đạt phát thải ròng bằng “0” tại Anh [4].

*Liên hệ tác giả: trungnt1@nuce.edu.vn

Nhận ngày 06/02/2025, sửa xong ngày 18/02/2025, chấp nhận đăng ngày 20/02/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.01.2025.848>

Bộ kinh tế, Thương mại và Công nghiệp Nhật Bản (METI) ban hành tiêu chuẩn ZEB – Công trình cân bằng năng lượng (net zero energy building). Tiêu chuẩn đưa ra yêu cầu về hiệu quả năng lượng, năng lượng tái tạo và phát thải cacbon cho công trình [5]. Tại Việt Nam, có một số nghiên cứu về phát thải cacbon tòa nhà, kế hoạch giảm phát thải khí nhà kính cho ngành xây dựng như: “Giảm thiểu phát thải cacbon hàm chứa trong lĩnh vực tòa nhà: chính sách, công cụ ở một số quốc gia phát triển và khuyến nghị cho Việt Nam” của Nguyễn Đức Lương, Nguyễn Công Thịnh [6]; “Kinh nghiệm ở một số quốc gia có khí hậu nóng ẩm và khuyến nghị cho Việt Nam” của Nguyễn Đức Lương, Nguyễn Công Thịnh [7]; “Kế hoạch giảm phát thải khí nhà kính ngành xây dựng: của Nguyễn Thị Tâm, Cao Thị Tú Mai [8]. Tuy nhiên chưa có nghiên cứu nào đánh giá toàn diện phát thải cacbon trong toàn bộ vòng đời công trình tòa nhà, cũng như còn thiếu các quy định cụ thể, hướng dẫn trong việc xây dựng công trình để đạt phát thải ròng bằng “0”. Nghiên cứu này sẽ tập trung phân tích toàn diện các yếu tố ảnh hưởng và khả năng giảm phát thải cacbon trong từng giai đoạn của tòa nhà, hướng tới mục tiêu công trình đạt phát thải ròng bằng “0”.

2. Khái niệm về phát thải và định nghĩa tòa nhà phát thải ròng bằng “0”

2.1. Khái niệm về phát thải cacbon của tòa nhà

Cụm từ phát thải cacbon không chỉ đề cập đến mức phát thải khí CO₂, mà trong đó bao gồm đến tất cả các khí nhà kính liên quan (GHG) và sử dụng đơn vị đo lường và lượng phát thải khí CO₂ tương đương (CO₂e). CO₂e bao gồm 7 loại khí nhà kính được định nghĩa trong giao thức Kyoto, gồm: dioxin (CO₂), methane (CH₄), Dinitrogen monoxyl (N₂O), hydrofluorcarbons (HFC), perfluorcarbons (PFC), sulphur hexarluoride (SF₆), nitrogen trifluoride (NF₃). Mỗi loại khí đều có hệ số chuyển đổi sang lượng tương đương của nó.

Theo tiêu chuẩn BS EN 15978 [9] khi xem xét đầy đủ lượng phát thải cacbon của một tòa nhà cần xem xét đầy đủ các giai đoạn trong vòng đời của nó. Việc sử dụng năng lượng và phát thải cacbon xảy ra trong tất cả các giai đoạn khác nhau trong vòng đời của một tòa nhà, có thể được định nghĩa là (I) khai thác vật liệu; (II) xử lý vật liệu và chế tạo thành phần; (III) thi công xây dựng; (IV) giai đoạn vận hành và dịch vụ; và (V) giai đoạn cuối vòng đời tòa nhà và được phân thành hai nhóm là cacbon hàm chứa (embodied carbon) và cacbon vận hành (operation carbon), được mô tả chi tiết như Hình 1.

❖ Phát thải cacbon hàm chứa (embodied carbon)

Trong công trình lượng phát thải cacbon hàm chứa theo định nghĩa bao gồm lượng khí thải cacbon phát sinh trong các giai đoạn I đến III, một phần giai đoạn IV của vòng đời tòa nhà và bao gồm mở rộng cả lượng khí thải cacbon ngoài vòng đời, giai đoạn V.

- Giai đoạn sản xuất cho đến thành phẩm từ modul A₁ –A₃: là lượng khí thải (kgCO₂e) được thải ra trong quá trình khai thác nguyên liệu thô, xử lý, sản xuất và vận chuyển vật liệu cho đến hình thành sản phẩm rời khỏi nhà máy để đưa đến dự án. Việc tính toán phát thải trong

quá trình này được các nhà sản xuất công bố hoặc lấy từ các nguồn dữ liệu được chấp nhận.

- Giai đoạn thi công từ modul A₄-A₅: bao gồm lượng cacbon hàm chứa được giải phóng trong quá trình vận chuyển vật liệu/sản phẩm đến địa điểm (A₄), mức sử dụng năng lượng do các hoạt động tại địa điểm (sử dụng máy móc, v.v.) và lượng khí thải cacbon liên quan đến quá trình sản xuất, vận chuyển và xử lý vật liệu thải ra tại địa điểm (A₅).

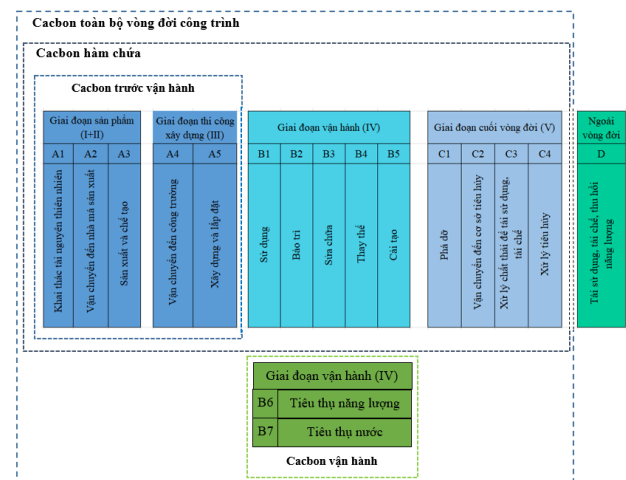
- Giai đoạn vận hành từ modul B₁ – B₅, gồm lượng phát thải từ hoạt động sử dụng các sản phẩm vật liệu xây dựng và/hoặc các loại kết cấu xây dựng, hoạt động bảo trì và sửa chữa.

- Giai đoạn cuối vòng đời từ modul C₁-C₄: gồm lượng phát thải từ hoạt động phá dỡ các sản phẩm vật liệu xây dựng và các loại kết cấu xây dựng của tòa nhà, vận chuyển thải bỏ và xử lý chất thải.

❖ Phát thải cacbon vận hành (operation carbon)

- Giai đoạn vận hành (một phần của giai đoạn IV) bao gồm lượng phát thải cacbon trong quá trình vận hành tiêu thụ năng lượng (B₆) và tiêu thụ nước (B₇).

- Giai đoạn ngoài vòng đời (D) - giai đoạn tái sử dụng, phục hồi, tái chế chất thải xây dựng của công trình. Theo BS EN 15978, modul này được coi là thông tin bổ sung ngoài vòng đời của tòa nhà, tuy nhiên để đạt mục tiêu trung hòa toàn bộ vòng đời thì modul D lại biểu thị cơ hội và lợi ích lớn để đạt mục tiêu. Nếu vật liệu hoặc hệ thống có khả năng tái sử dụng, tái chế thì tín chỉ này đóng góp trong kinh tế tuần hoàn [10].



Hình 1. Các giai đoạn đánh giá vòng đời của công trình xây dựng [9].

2.2. Định nghĩa Tòa nhà phát thải ròng bằng “0”

Hiện nay, có nhiều thuật ngữ được sử dụng để định nghĩa tòa nhà phát thải ròng bằng “0”, bao gồm “(Net) Zero Carbon Building - NZCB” và “(Net) Zero Emission Building - NZEB”. Theo Ủy ban Châu Âu (EU), “tòa nhà phát thải ròng bằng “0” (Net Zero Emission Building) là tòa nhà có hiệu suất năng lượng rất cao, mức tiêu thụ năng lượng thấp và được cung cấp hoàn toàn từ các nguồn năng lượng tái tạo (NLTT) tại chỗ, đồng thời không có phát thải cacbon tại tòa nhà từ các nhiên liệu hóa thạch” [11].

Theo Zero Energy Project [12], tòa nhà không phát thải cacbon (NZCB) là một công trình trung hòa cacbon, được thiết kế để sử dụng càng nhiều vật liệu và quy trình xây dựng có hàm lượng cacbon thấp càng tốt, đồng thời tối ưu hóa hiệu suất năng lượng. Lượng cacbon thải ra trong suốt vòng đời công trình được bù đắp thông qua việc sử dụng năng lượng tái tạo và các vật liệu có khả năng cô lập hoặc lưu trữ cacbon, chẳng hạn như gỗ và các sản phẩm bê tông hấp thụ cacbon. Lớp vỏ công trình, hệ thống HVAC, hệ thống đun nước nóng, chiếu sáng và các thiết bị khác đều có hiệu suất năng lượng cao. Các công trình này có thể tự sản xuất năng lượng tái tạo tại chỗ hoặc nhập khẩu đủ năng lượng tái tạo không cacbon để bù đắp hoàn toàn lượng khí thải nhà kính hàng năm, bao gồm cả lượng phát thải từ vật liệu xây dựng, vận chuyển, sử dụng năng lượng, vận hành và khi công trình ngừng hoạt động. Nói cách khác, công trình này bù đắp toàn bộ lượng khí thải cacbon mà nó tạo ra, khiến nó trở thành một tòa nhà trung hòa cacbon. Trong một số trường hợp, lượng cacbon mà công trình phát thải có thể được bù đắp bằng cách mua các khoản tín chỉ cacbon được chứng nhận và có chất lượng cao từ các bên thứ ba.

Như vậy, theo định nghĩa của EU, nếu một công trình đạt phát thải CO₂ bằng “0” - Net Zero Carbon Building nhưng vẫn có phát thải tại chỗ (và bù đắp bằng tín chỉ cacbon), thì công trình đó không được xem là phát thải ròng bằng “0” - Net Zero Emission Building.

3. Phân tích các yếu tố ảnh hưởng và chiến lược giảm phát thải cacbon trong vòng đời công trình

Khoảng 60 % lượng khí thải cacbon được tạo ra trong suốt vòng đời của một tòa nhà thông thường (trong 50 năm) là lượng khí thải trong quá trình vận hành và gần 40 % là lượng khí thải trong quá trình xây dựng và sản xuất [13]. Theo nghiên cứu của Nässén và cộng sự [14], trung bình gần hai phần ba tổng lượng khí thải cacbon của một công trình đến từ kết cấu chính và lớp vỏ. Đây là yếu tố có tiềm năng lớn nhất trong việc tối ưu hóa tiết kiệm năng lượng, góp phần giảm phát thải cacbon trong suốt vòng đời tòa nhà. Lượng phát thải còn lại chủ yếu là do cung cấp nguyên liệu thô, sản xuất chế tạo và vận chuyển vật liệu xây dựng.

Phương pháp đánh giá vòng đời (LCA) đã trở thành một công cụ quan trọng trong việc đánh giá tác động môi trường của tòa nhà và ngành xây dựng. Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện về phát thải cacbon trong vòng đời của tòa nhà, tuy nhiên, do sự khác biệt về điều kiện biên và phạm vi đánh giá, kết quả giữa các nghiên cứu có sự khác nhau.

Việc tiêu thụ năng lượng và phát thải cacbon diễn ra trong tất cả các giai đoạn (I + II + III + IV + V) của vòng đời một tòa nhà. Dưới đây trình bày các chiến lược và biện pháp cụ thể nhằm giảm phát thải cacbon trong từng giai đoạn của vòng đời tòa nhà.

3.1. Sử dụng vật liệu ít cacbon

Ngay từ khi giai đoạn đầu, các nhà thiết kế có nghĩa vụ phải lựa chọn các vật liệu cho từng thành phần kết cấu và lớp vỏ bao che của

tòa nhà bằng cách xem xét đến hiệu suất của chúng so với các yêu cầu kỹ thuật. Các vật liệu được chọn lọc sau khi sàng lọc dựa trên các yêu cầu kỹ thuật và hiệu suất có thể có những tác động cacbon hàm chứa khác nhau đáng kể đối với các tòa nhà. Cacbon hàm chứa của vật liệu có thể thay đổi đáng kể tùy thuộc vào loại thành phần nguyên liệu thô, vị trí của các mỏ vật liệu và phương thức vận chuyển cần thiết, quá trình khai thác và chế biến, phương pháp xây dựng có thể áp dụng để lắp đặt vật liệu, các hoạt động tái chế và tái sử dụng, nếu có và khoảng cách đến các bãi xử lý tiếp nhận chất thải ở giai đoạn phá dỡ tòa nhà. González và Navarro đã chỉ ra rằng lượng khí thải CO₂ giảm khoảng 30 % khi vật liệu thông thường được thay thế bằng các vật có hàm lượng cacbon thấp hơn trong tòa nhà [15].

Việc lựa chọn vật liệu cacbon thấp lý tưởng nhất cần được xem xét tổng thể bằng cách so sánh tác động của loại vật liệu lên hàm lượng cacbon hàm chứa từ lúc mới xây dựng đến lúc phá dỡ của tòa nhà, có nghĩa là cần tính đến sự thay đổi trong các yêu cầu về vận chuyển, xây dựng và xử lý cuối vòng đời của các vật liệu khác nhau. Hơn nữa, do loại vật liệu có thể ảnh hưởng tới nhu cầu tiêu thụ năng lượng vận hành của một số tòa nhà, nên cũng cần đánh giá tác động của những thay đổi về vật liệu lên lượng cacbon vận hành của tòa nhà trong quá trình lựa chọn.

Đã có nhiều nghiên cứu về tác động của các loại vật liệu lên lượng cacbon hàm chứa của các tòa nhà và khả năng giảm thiểu dấu chân cacbon của tòa nhà thông qua việc lựa chọn các vật liệu ít cacbon. Bằng cách đánh giá lượng cacbon hàm chứa của một số tòa nhà văn phòng được làm bằng các vật liệu khác nhau, Dimoudia và Tompa trong nghiên cứu đã nêu phần năng lượng hàm chứa cao nhất thuộc về các vật liệu trong kết cấu (bê tông và thép), chiếm khoảng 59 % đến 66 % tổng năng lượng hàm chứa của tòa nhà [16]. Thép được sử dụng trong ngành xây dựng chiếm 16 % sản lượng thép toàn cầu [17] và theo báo cáo của Ủy ban liên chính phủ về biến đổi khí hậu IPCC, chứng minh rằng các công ty sản xuất thép đã tạo ra 650 triệu tấn CO₂ mỗi năm (IPCC, 2006). Trong sản xuất bê tông thì sản xuất xi măng là ngành có đóng góp đáng kể vào lượng khí thải trên toàn thế giới, chiếm tới 7 % [18]. Khí thải được tạo ra do quá trình cacbonat hóa đá vôi trong sản xuất clinker (60 % đến 65 %), ngoài ra do đốt nhiên liệu hóa thạch (35 % đến 40 %).

Ji và cộng sự chỉ ra rằng những thay đổi nhỏ trong loại vật liệu có thể ảnh hưởng đáng kể đến lượng cacbon hàm chứa của một công trình và cho thấy rằng, tùy thuộc vào cấp bê tông và cốt thép được sử dụng, lượng cacbon hàm chứa của một công trình bê tông có thể thay đổi tới 40% [18]. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc sử dụng gỗ như một vật liệu xây dựng bền vững và ít cacbon hơn so với bê tông và thép thông thường [19]. Buchanan và Levine tuyên bố rằng, do quy trình sản xuất gỗ tiêu tốn ít năng lượng hơn đáng kể so với các vật liệu xây dựng khác, nên các kết cấu gỗ có lượng cacbon hàm chứa thấp hơn đáng kể so với các tòa nhà được làm bằng các vật liệu xây dựng khác, bao gồm gạch, thép và bê tông. Moussavi và cộng sự đã chỉ ra rằng cacbon hàm chứa của một công trình không chỉ thay đổi theo loại vật liệu được chọn mà còn theo các thông số thiết kế khác như hệ thống kết cấu được chọn, chiều cao của công trình, và lượng vật liệu sử dụng [20].

Do đó, cần nỗ lực thực hiện để (1) giảm lượng cacbon hàm chứa của xi măng và bê tông thông qua việc sử dụng một phần vật liệu xi măng thải/sản phẩm phụ và (2) tìm vật liệu cacbon thấp thay thế cho xi măng và bê tông.

Hiện nay Việt Nam đang trong tiến trình đánh giá kiểm kê lượng phát thải khí nhà kính đối với các cơ sở doanh nghiệp tiêu thụ khoảng 1000 TOE (tấn dầu quy đổi) hoặc phát thải hơn 3000 tấn CO₂ tương đương [21], trong đó các cơ sở sản xuất vật liệu như lĩnh vực xi măng, sắt thép, khai thác quặng đều thuộc danh sách bắt buộc phải kiểm kê khí nhà kính. Là nước sản xuất và xuất khẩu xi măng lớn trên thế giới, năng lực sản xuất đạt 100 triệu tấn/năm, mức phát thải hiện tại là 700 kg CO₂/tấn xi măng, mục tiêu đến 2030 chúng ta sẽ giảm xuống còn 650 kg CO₂/tấn xi măng.

3.2. Giảm thiểu vật liệu sử dụng

Tổng lượng cacbon hàm chứa của một công trình tỷ lệ thuận với lượng vật liệu được sử dụng trong công trình. Do đó, việc so sánh cacbon hàm chứa trong các vật liệu truyền thống và vật liệu thay thế nên được thực hiện bằng cách xem xét tổng lượng cacbon hàm chứa, là tích của cacbon hàm chứa đơn vị và khối lượng vật liệu được sử dụng.

Tuy nhiên việc giảm thiểu vật liệu sử dụng phải được thực hiện trên nguyên tắc đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật và các hiệu suất khác của tòa nhà. Lượng vật liệu được sử dụng trong một công trình có thể bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố bao gồm loại vật liệu được sử dụng, hệ thống kết cấu được chọn cho công trình và chiều cao của công trình [20]. Do đó ngay từ giai đoạn đầu tòa nhà cần lựa chọn thiết kế tối ưu sẽ giảm được đáng kể lượng vật liệu cần sử dụng. Yeو và Gabbi đã chỉ ra rằng việc tối ưu hóa cấu trúc mặt cắt ngang của dầm có thể dẫn đến việc giảm lượng cacbon hàm chứa của dầm khoảng 10 %, nhưng điều này đi kèm với việc tăng chi phí khoảng 5 % so với một thành phần được tối ưu hóa. Ngoài ra, lượng cacbon hàm chứa của công trình cũng đã được chứng minh là bị ảnh hưởng đáng kể bởi lượng chất thải được tạo ra trong quá trình xây dựng tại chỗ và quá trình lắp đặt. Moussavi và cộng sự đã chỉ ra thông qua một nghiên cứu điển hình rằng việc giảm thiểu tổn thất khi cắt cốt thép dẫn đến giảm khoảng 7,7 % và 49,6 % tổng lượng vật liệu được sử dụng và chất thải phát sinh tương ứng [22].

3.3. Tăng cường nguồn cung ứng nguyên vật liệu tại địa phương

Tác động của việc vận chuyển ngay từ giai đoạn sản phẩm đến giai đoạn thi công là một yếu tố quan trọng góp phần tăng thêm lượng cacbon hàm chứa của các tòa nhà. Các yếu tố chính ảnh hưởng đến lượng khí thải phát sinh trong vận chuyển bao gồm số lượng vật liệu cần vận chuyển, kích thước của vật liệu, khoảng cách vận chuyển và phương thức vận chuyển. Ngoài ra cấu trúc của chuỗi cung ứng vật liệu cũng ảnh hưởng đáng kể đến các yêu cầu vận chuyển, từ đó tác động đến lượng phát thải CO₂ khác nhau.

Trong một phân loại chung, vật liệu có thể được phân loại thành các sản phẩm Sản xuất đại trà có sẵn trong kho (MTS), Lắp ráp theo đơn

đặt hàng (ATO), Sản xuất theo đơn đặt hàng (MTO) và Thiết kế theo đơn đặt hàng (ETO), mỗi loại có cấu trúc chuỗi cung ứng khác nhau. Do đó, khi quyết định lựa chọn vật liệu và nhà cung ứng cần tính đến các yếu tố kỹ thuật, kinh tế, xã hội và môi trường.

3.4. Tối ưu hóa kỹ thuật xây dựng

Giai đoạn thi công tòa nhà gồm các modul A₄, A₅ (hình 1) liên quan đến các hoạt động của thiết bị xây dựng và việc sử dụng vật liệu xây dựng tạm thời, đây là giai đoạn phát thải lượng cacbon hàm chứa lớn. Lượng khí thải cacbon trong giai đoạn này có thể được giảm thiểu thông qua giải pháp tối ưu hóa các hoạt động xây dựng như: lựa chọn các thiết bị tối ưu cho hoạt động xây dựng, tối ưu hóa hoạt động của thiết bị (giảm thời gian rảnh rỗi của các thiết bị thi công) và giảm thiểu việc vận chuyển trên công trường (gồm cả vận chuyển theo chiều ngang và chiều đứng) bằng cách tối ưu hóa vị trí các điểm cung và cầu tại công trường xây dựng gần nhau. Trong số các hoạt động xây dựng thì có ba hoạt động chính tạo ra lượng khí thải cacbon lớn, bao gồm: hoạt động san lấp mặt bằng, phối trộn đổ bê tông và nâng hạ trong việc xây dựng nền móng và kết cấu khung của tòa nhà.

❖ Tối ưu hóa kỹ thuật xây dựng nền móng:

Giai đoạn thi công nền móng bao gồm nhiều hoạt động như: đào đất, chuẩn bị mặt bằng, lắp đặt các thành phần kết cấu. Phát thải cacbon trong quá trình này là từ việc sử dụng nhiều máy móc thiết bị xây dựng thi công hạng nặng tiêu thụ nhiều năng lượng (máy đào, máy ủi, giàn khoan và máy đóng cọc), quá trình vận chuyển vật liệu xây dựng và các hoạt động tại công trường. Những máy móc này thường sử dụng nhiều loại nhiên liệu tiêu thụ là dầu diesel, một tác nhân chính gây ra khí thải CO₂ (hệ số phát thải của đốt diesel là 74,1 tấn CO₂/TJ – theo IPCC, 2006). Tuy nhiên, mức tiêu thụ nhiên liệu của các thiết bị này phụ thuộc vào các yếu tố như loại động cơ, kích thước động cơ, hệ số tải, hiệu quả vận hành và thời gian chạy không tải.

Trong giai đoạn xây dựng cơ sở hạ tầng, việc sử dụng các nguyên vật liệu xây dựng, thiết bị máy móc và vận chuyển lần lượt phát thải cacbon chiếm 67 %, 19 % và 14 % vào lượng phát thải khí nhà kính [23]. Nghiên cứu của Xiaojuan Li và cộng sự đã sử dụng phương pháp đánh giá vòng đời (LCA) để nghiên cứu, kết quả cho thấy lượng khí thải cacbon của máy móc xây dựng đạt 73 % tổng lượng khí thải cacbon trong quá trình thi công cọc bê tông đúc sẵn và lượng khí thải của máy móc đóng cọc chiếm hơn một nửa lượng khí thải của máy móc xây dựng [24]. Vì vậy, cần chú ý đến các nghiên cứu giải pháp thi công móng cọc của tòa nhà giúp giảm đáng kể lượng khí thải.

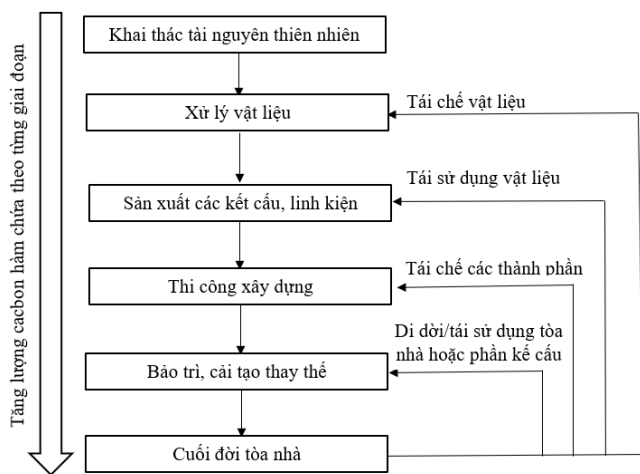
❖ Tối ưu hóa kết cấu xây dựng:

Thiết kế kết cấu đóng vai trò then chốt trong việc giảm chi phí cũng như phát thải cacbon của các tòa nhà. Phần xây dựng kết cấu của tòa nhà chủ yếu bao gồm các kết cấu thép, kết cấu bê tông, kết cấu gỗ và các kết cấu phụ (các khối xây không chịu lực, tường, mái,...). Việc sử dụng các giải pháp kết cấu tiên tiến giúp giảm đáng kể khối lượng vật liệu mà vẫn đảm bảo yêu cầu độ bền và an toàn. Đồng thời cần tính toán lựa chọn tỷ lệ chiều cao, diện tích sàn hợp lý giúp hạn chế chi phí

gia cố móng, cột. Một thiết kế kết cấu hiệu quả không chỉ giúp tiết kiệm chi phí mà còn đảm bảo tiến độ thi công, giúp giảm phát thải cacbon.

3.5. Tái sử dụng và tái chế vật liệu

Lượng cacbon hàm chứa trong tòa nhà gia tăng theo từng giai đoạn của vòng đời công trình, do năng lượng tiêu thụ trong quá trình chuyển đổi từ nguyên liệu thô thành vật liệu xây dựng, từ vật liệu thành các kết cấu, rồi tiếp tục lắp ráp các thành phần riêng lẻ để hình thành khung kết cấu và hoàn thiện tòa nhà. Thêm vào đó là khi công trình kết thúc vòng đời sử dụng, quá trình phá dỡ lại tạo ra lượng lớn chất thải xây dựng, đồng thời việc vận hành máy móc tháo dỡ tiêu tốn nhiên liệu, làm gia tăng phát thải cacbon. Để giảm bớt lượng cacbon hàm chứa trong giai đoạn này, có thể áp dụng các giải pháp tái chế và tái sử dụng vật liệu hoặc cấu kiện, giúp hạn chế lượng chất thải và phát thải liên quan (Hình 2).



Hình 2. Sự gia tăng lượng cacbon hàm chứa của tòa nhà qua các giai đoạn khác nhau của vòng đời và các khả năng tái chế, tái sử dụng để giảm phát thải [25].

Quá trình tái chế và tái sử dụng là một trong những chiến lược bền vững lâu dài nhất để xử lý chất thải xây dựng và phá dỡ công trình. Khả năng tái chế vật liệu và việc triển khai chiến lược này có ảnh hưởng đáng kể đến lượng cacbon hàm chứa của tòa nhà theo nhiều cách khác nhau, do đó cần được xem xét kỹ lưỡng ngay từ giai đoạn lựa chọn vật liệu cho công trình ít cacbon.

+ Tái chế bê tông là một giải pháp giúp giảm phát thải cacbon, cắt giảm chi phí vận chuyển chất thải đến các bãi chôn lấp, hạn chế nhu cầu về không gian chôn lấp và cung cấp nguồn cốt liệu tái chế bền vững cho ngành xây dựng.

+ Lượng khí thải cacbon phát sinh từ quy trình tái chế phụ thuộc vào loại cốt liệu đầu vào và công nghệ tái chế được áp dụng. Việc lựa chọn phương pháp phù hợp có thể tối ưu hóa hiệu suất tái chế và giảm thiểu tác động môi trường.

+ Nếu tòa nhà được thiết kế đúng tiêu chuẩn kỹ thuật ngay từ đầu, nhiều thành phần kết cấu có thể duy trì trạng thái tốt sau khi công trình kết thúc vòng đời sử dụng. Khi đó, các thành phần này có thể được tái sử dụng cho cùng một mục đích hoặc chuyển đổi sang các ứng dụng khác [26]. Như thể hiện trong Hình 2, việc tái sử dụng không chỉ giúp bảo tồn năng lượng và chi phí vốn đầu tư ban đầu mà còn duy trì tài nguyên vật liệu, đồng thời giảm thiểu lượng phát thải cacbon trong toàn bộ vòng đời công trình.

3.6. Giảm thiểu tiêu thụ năng lượng trong giai đoạn vận hành tòa nhà và bù đắp cacbon

Trong giai đoạn vận hành, tòa nhà có thể phát thải cacbon trực tiếp hoặc gián tiếp, đây cũng là giai đoạn đóng góp lượng phát thải lớn nhất trong toàn bộ vòng đời công trình. Phần lớn năng lượng tiêu thụ trong giai đoạn này đến từ các hệ thống kỹ thuật như sưởi ấm, làm mát, thông gió, cấp nước nóng và chiếu sáng. Để đạt được mục tiêu trung hòa cacbon trong vận hành tòa nhà, các quốc gia đang tập trung vào các giải pháp thiết kế và ứng dụng công nghệ nhằm giảm tiêu thụ năng lượng và tiến tới cân bằng năng lượng. Sáu nhóm giải pháp chính bao gồm:

- Thiết kế kiến trúc và lớp vỏ công trình: Ứng dụng thiết kế thụ động với cách nhiệt hiệu quả, hệ thống che nắng, thông gió tự nhiên để giảm nhu cầu sử dụng điều hòa và sưởi ấm; Tận dụng chiếu sáng tự nhiên để hạn chế sử dụng điện cho chiếu sáng nhân tạo;
- Hệ thống thông gió, điều hòa không khí và sưởi ấm (HVAC): Xác định kích thước và hiệu suất tối ưu của hệ thống HVAC, tránh lãng phí năng lượng; Cải tiến hệ thống HVAC với máy bơm nhiệt hiệu suất cao; Tối ưu hóa hệ thống điều chỉnh điểm đặt nhiệt độ và thông gió để giảm mức tiêu thụ điện;
- Chiếu sáng hiệu suất cao: Sử dụng đèn LED và cảm biến ánh sáng thông minh để tối ưu hóa hiệu suất chiếu sáng;
- Thiết bị tiêu thụ điện: Ứng dụng thiết bị tiết kiệm năng lượng đạt chứng nhận ISO 50001 để kiểm soát tiêu thụ điện trong vận hành; Quản lý tải cao điểm để giảm áp lực lên hệ thống điện;
- Tăng cường giám sát và quản lý năng lượng: Triển khai hệ thống quản lý năng lượng thông minh (BEMS) để giám sát và tối ưu vận hành; Kiểm toán năng lượng định kỳ để xác định các cơ hội tiết kiệm điện;
- Sử dụng năng lượng tái tạo tại chỗ và nhập khẩu: Ưu tiên các nguồn năng lượng tái tạo tại chỗ, như hệ thống quang điện (solar PV), bơm nhiệt, địa nhiệt và sinh khối; Tối ưu hóa lưu trữ năng lượng, đảm bảo năng lượng tái tạo sử dụng hiệu quả và giảm thất thoát; Chứng minh tính hợp lệ của nguồn năng lượng tái tạo nhập khẩu, đảm bảo rằng lượng năng lượng này thực sự góp phần vào trung hòa cacbon của công trình.

Trên cơ sở này cần đưa ra các chỉ số đánh giá mức tiêu thụ năng lượng của tòa nhà và đồng thời tính toán chi phí [27]:

- Cường độ sử dụng năng lượng (Energy Use Intensity-EUI), kWh/m²: Đo lường tổng lượng năng lượng tiêu thụ trên mỗi mét vuông

diện tích sàn trong một năm. Chỉ số này giúp đánh giá hiệu suất năng lượng tổng thể của tòa nhà;

- Cường độ nhu cầu năng lượng nhiệt (Thermal Energy Demand Intensity-TEDI), kWh/m²/năm: Đo lượng năng lượng cần thiết để sưởi ấm hoặc làm mát tòa nhà;

- Cường độ khí nhà kính (Greenhouse Gas Intensity-GHGI), kgCO₂/m²: Đánh giá mức độ phát thải khí nhà kính từ việc sử dụng năng lượng của tòa nhà. Chỉ số này giúp xác định mức độ "không carbon" của tòa nhà;

- Năng lượng tái tạo tại chỗ: Đo lượng năng lượng tái tạo (mặt trời, gió, địa nhiệt, sinh khối) được sản xuất tại chỗ để bù đắp mức tiêu thụ năng lượng. Được tính bằng % so với tổng mức tiêu thụ năng lượng;

- Cân bằng năng lượng ròng bằng "0": Xác định bằng cách so sánh tổng năng lượng tiêu thụ và tổng năng lượng tái tạo sản xuất tại chỗ. Nếu sản xuất $\geq$ tiêu thụ, tòa nhà đạt trạng thái Net Zero Energy;

- Phân tích chi phí vòng đời (Life Cycle Cost Analysis-LCCA): Tính toán tổng chi phí từ thiết kế, xây dựng, vận hành, bảo trì, và tháo dỡ tòa nhà. Giúp đánh giá hiệu quả kinh tế của các lựa chọn thiết kế tiết kiệm năng lượng;

- Chi phí tiết kiệm năng lượng (Cost of Energy Savings): So sánh chi phí đầu tư ban đầu của công nghệ tiết kiệm năng lượng với chi phí tiết kiệm được qua các năm. Ví dụ: Hệ thống pin mặt trời có chi phí đầu tư cao nhưng giúp giảm chi phí điện trong dài hạn;

- Thời gian hoàn vốn (Payback Period): Tính thời gian cần thiết để chi phí đầu tư vào công nghệ tiết kiệm năng lượng được hoàn lại thông qua tiền tiết kiệm từ hóa đơn năng lượng;

- Chi phí vốn gia tăng (ICC/m²): sự gia tăng hoặc giảm chi phí xây dựng trên mỗi m² để đạt được mục tiêu không phát thải carbon;

- Chi phí vốn gia tăng trên mỗi tấn CO₂ tương đương tiết kiệm được (ICC/tCO₂e): sự gia tăng hoặc giảm chi phí xây dựng trên mỗi tấn CO₂ tương đương tiết kiệm được để đạt được mức carbon bằng "0".

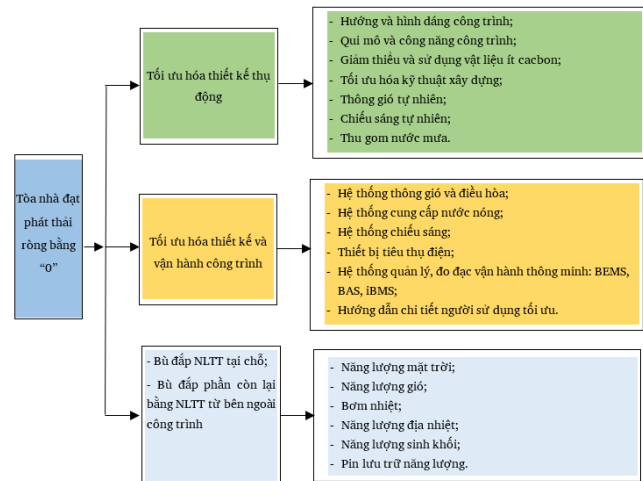
- Chi phí vòng đời gia tăng trên mỗi mét vuông (ILCC/m²): giá trị hiện tại ròng (NPV) của mức tăng hoặc giảm trong tổng chi phí trên mỗi m² cho việc xây dựng, vận hành và bảo trì.

- Chi phí vòng đời gia tăng cho mỗi tấn CO₂ tương đương tiết kiệm được (ILCC/tCO₂e): giá trị hiện tại ròng của mức tăng hoặc giảm trong tổng chi phí cho mỗi tấn CO₂ tương đương tiết kiệm được cho xây dựng, vận hành, bảo trì.

Ngoài ra, giai đoạn này còn bao gồm các hoạt động bảo trì, sửa chữa, cải tạo nâng cấp tòa nhà, đây cũng là nguồn phát thải carbon đáng kể. Lượng khí thải phát sinh chủ yếu từ việc tiêu thụ năng lượng, vận chuyển vật liệu, xử lý chất thải phá dỡ và sử dụng thiết bị xây dựng. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng, sau khi cải tạo hoặc nâng cấp, quá trình này có thể đóng góp từ 4 % đến 16 % tổng lượng khí thải carbon trong suốt vòng đời còn lại của tòa nhà [28]. Tỷ lệ này phụ thuộc vào nhiều yếu tố được quyết định ngay từ giai đoạn thiết kế ban đầu, bao gồm loại vật liệu sử dụng, cấu trúc công trình và giải pháp thi công.

3.7. Tổng hợp giải pháp giảm phát thải carbon toàn bộ vòng đời tòa nhà

Từ những phân tích đánh giá trên đây, để đạt mục tiêu giảm phát thải carbon toàn bộ vòng đời tòa nhà và đạt tòa nhà có phát thải ròng bằng "0", cần áp dụng đồng thời các giải pháp từ lĩnh vực khai thác và sản xuất nguyên vật liệu xây dựng, từ giai đoạn thiết kế đến giai đoạn vận hành và giai đoạn phá dỡ tòa nhà. Các biện pháp này được thể hiện cụ thể trong Hình 3 dưới đây:



Hình 3. Các giải pháp trong thiết kế và vận hành tòa nhà đạt phát thải ròng carbon bằng "0".

4. Giải pháp hướng tới tòa nhà đạt phát thải ròng bằng "0" tại Việt Nam

Từ những phân tích, đánh giá toàn diện các yếu tố ảnh hưởng đến phát thải carbon trên cho thấy tiềm năng giảm thiểu đáng kể lượng khí thải trong từng giai đoạn của vòng đời công trình. Xác định giai đoạn nào có mức phát thải cao nhất là bước quan trọng để tiến tới mục tiêu tòa nhà đạt phát thải ròng bằng "0", góp phần vào nỗ lực giảm phát thải theo cam kết của Việt Nam trong COP26. Trong suốt vòng đời tòa nhà, phát thải carbon được chia thành hai nhóm chính: carbon hàm chứa và carbon vận hành. Tỷ lệ đóng góp của hai loại phát thải này vào tổng lượng carbon vòng đời có thể thay đổi đáng kể, phụ thuộc vào loại hình và chức năng của tòa nhà, đặc điểm vật liệu, kết cấu, cũng như các yếu tố như vị trí địa lý, điều kiện khí hậu, nguồn năng lượng sử dụng, hướng và hình khối công trình. Từ đó đưa ra được chiến lược phù hợp với chính sách và nguồn lực cụ thể từng địa phương, từng dự án và từng công trình cụ thể. Một số giải pháp trước mắt đối với Việt Nam cần thực hiện:

4.1. Xây dựng tiêu chuẩn NZCB cho công trình xây dựng

Việt Nam đã cam kết đạt phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050 theo COP26, đồng nghĩa với việc ngành xây dựng cần có những tiêu

chuẩn cụ thể để giảm phát thải. Hiện tại, QCVN 09:2017/BXD là bộ quy chuẩn chính về hiệu suất năng lượng công trình, nhưng chưa có các tiêu chí rõ ràng về phát thải ròng bằng “0”. Mặc dù QCVN 09:2017/BXD đã đặt ra các yêu cầu tối thiểu về hiệu suất năng lượng trong công trình, nhưng vẫn còn một số hạn chế nếu xét theo hướng NZCB như: mới chỉ giới hạn mức tiêu thụ năng lượng của tòa nhà, chưa hướng tới công trình tự cân bằng năng lượng hoặc sử dụng 100 % năng lượng tái tạo; Không quy định cụ thể về phát thải cacbon; Chưa có yêu cầu về hàm lượng cacbon của vật liệu; Chưa yêu cầu bắt buộc sử dụng năng lượng tái tạo; chưa yêu cầu cụ thể hệ thống quản lý năng lượng.

Việc xây dựng tiêu chuẩn NZCB rất quan trọng nhằm xác định mục tiêu giảm phát thải trong toàn bộ vòng đời công trình; Đưa ra yêu cầu kỹ thuật rõ ràng cho thiết kế, vật liệu, thi công và vận hành; Tạo cơ sở đánh giá và chứng nhận công trình phát thải ròng bằng “0” tại Việt Nam; Phù hợp với cam kết và thông lệ quốc tế giống như các tiêu chuẩn như LEED (Mỹ), BREEAM (Anh), CASBEE (Nhật).

4.2. Nghiên cứu thử nghiệm công trình NZCB thí điểm tại Việt Nam

Song song với việc xây dựng tiêu chuẩn NZCB, và trước khi áp dụng tiêu chuẩn NZCB, cần có các dự án thử nghiệm để đánh giá hiệu quả thực tế của các công nghệ tiết kiệm năng lượng và vật liệu ít cacbon. Việc thử nghiệm công trình thí điểm Net Zero tại Việt Nam là một bước quan trọng để đánh giá tính khả thi, hiệu quả kinh tế và kỹ thuật của các tiêu chuẩn NZCB trước khi triển khai rộng rãi. Các công trình này sẽ đóng vai trò mô hình thực nghiệm, giúp kiểm chứng các công nghệ, vật liệu và phương pháp thiết kế phù hợp với điều kiện khí hậu, kinh tế và chính sách trong nước.

Các công trình này sẽ cung cấp dữ liệu thực nghiệm về hiệu suất năng lượng, phát thải cacbon và chi phí vận hành, giúp điều chỉnh các tiêu chuẩn quốc gia; Thu hút đầu tư và hỗ trợ chính sách, hỗ trợ tài chính, thuế và tín dụng cacbon dựa trên kết quả thử nghiệm; Khi các công trình Net Zero chứng minh được tính khả thi, chúng sẽ tạo động lực cho doanh nghiệp và chủ đầu tư áp dụng rộng rãi hơn. Dựa trên kinh nghiệm quốc tế, các mô hình thử nghiệm Net Zero có thể được triển khai tại Việt Nam gồm: (1) Tòa nhà văn phòng Net Zero; (2) Khu đô thị Net Zero quy mô nhỏ; (3) Nhà ở xã hội Net Zero Carbon.

4.3. Thiết lập cơ chế đánh giá và chứng nhận công trình NZCB

Việc thiết lập cơ chế đánh giá và chứng nhận công trình Net Zero là yếu tố quan trọng giúp đảm bảo tính minh bạch, khả thi và hiệu quả của các công trình hướng đến phát thải ròng bằng “0”. Điều này không chỉ giúp các chủ đầu tư và nhà thầu có định hướng rõ ràng trong thiết kế và thi công mà còn góp phần vào việc chuẩn hóa và thúc đẩy phát triển công trình bền vững tại Việt Nam.

Một hệ thống chứng nhận NZCB giúp xác định liệu một công trình có đáp ứng các tiêu chí về phát thải ròng bằng “0” hay không. Hiện nay, nhiều công trình được thiết kế theo hướng tiết kiệm năng lượng nhưng chưa có một cơ chế cụ thể để đánh giá mức độ Net Zero. Cơ chế chứng

nhận có thể: Định lượng và xác minh lượng phát thải cacbon theo từng giai đoạn của vòng đời tòa nhà; Thiết lập tiêu chuẩn kỹ thuật thống nhất, giúp doanh nghiệp và chủ đầu tư dễ dàng áp dụng. Cung cấp cơ sở để nhận hỗ trợ tài chính, tín chỉ cacbon từ chính phủ hoặc tổ chức quốc tế. Thúc đẩy xu hướng xây dựng bền vững, nâng cao giá trị thương mại và khả năng thu hút đầu tư của công trình. Để xây dựng một hệ thống chứng nhận Net Zero cho công trình tại Việt Nam, có thể cần các tiêu chí cốt lõi như:

- Phát thải ròng bằng “0” trong suốt vòng đời công trình (bao gồm cả phát thải cacbon hàm chứa và cacbon vận hành).
- Tích hợp năng lượng tái tạo tại chỗ (điện mặt trời, điện gió, pin lưu trữ).
- Sử dụng vật liệu có khả năng cô lập/lưu trữ cacbon, hàm lượng cacbon thấp (bê tông hấp thụ cacbon, gỗ kỹ thuật cao).
- Hệ thống quản lý năng lượng thông minh, giảm thiểu tiêu thụ điện từ lưới quốc gia.
- Tái sử dụng và xử lý vật liệu xây dựng theo mô hình kinh tế tuần hoàn.

Ngoài ra có thể cấp chứng nhận công trình NZCB, cần chia thành các cấp độ khác nhau để phản ánh mức độ cam kết của công trình như: công trình thiết kế sẵn sàng đạt Net Zero nhưng chưa đạt 100% (Net Zero Ready); công trình có mức phát thải vận hành bằng “0” (Net Zero Carbon – Operational); Công trình đạt Net Zero trong toàn bộ vòng đời, bao gồm cả cacbon hàm chứa (Net Zero Carbon - Whole Life); Công trình không đạt Net Zero nhưng bù đắp nhiều hơn lượng phát thải (Net Positive Carbon). Các cấp độ này giúp doanh nghiệp tiếp cận từng bước, phù hợp với điều kiện kinh tế và kỹ thuật. Việc xây dựng cơ chế đánh giá và chứng nhận công trình Net Zero tại Việt Nam là yếu tố quan trọng để thúc đẩy phát triển bền vững. Mặt khác, học hỏi từ các hệ thống chứng nhận quốc tế, kết hợp với điều kiện thực tế tại Việt Nam, có thể giúp tạo ra một khung đánh giá minh bạch, hiệu quả và khả thi.

Việc thực hiện đồng bộ các giải pháp này sẽ giúp ngành xây dựng Việt Nam đạt được mục tiêu phát thải ròng bằng “0”, góp phần vào cam kết giảm phát thải khí nhà kính toàn cầu.

Kết luận

Có thể thấy rằng, phát thải cacbon của công trình tòa nhà nằm ở tất cả các giai đoạn trong toàn bộ vòng đời của nó, từ khai thác vật liệu, chế tạo, xây dựng, vận hành đến phá dỡ. Vì vậy để đạt mục tiêu tòa nhà phát thải ròng bằng “0”, mỗi quốc gia cần xây dựng lộ trình cụ thể, từng bước với mục tiêu ngắn hạn, rồi mục tiêu dài hạn. Nhất là đối với Việt Nam là một nước đang phát triển, đang đối mặt với những thách thức lớn về kinh tế, phát triển công nghệ, môi trường và xã hội. Nghiên cứu đã phân tích, đánh giá toàn diện phát thải cacbon toàn bộ vòng đời của tòa nhà. Trên cơ sở đó đề xuất giải pháp áp dụng tại Việt Nam. Điều này giúp cho các nhà hoạch định chính sách có cái nhìn tổng quan để xây dựng lộ trình và các chính sách cụ thể để Việt Nam đạt mục tiêu xây dựng công trình đạt phát thải ròng cacbon bằng “0” vào năm 2050.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Programme, Enviroment (2022), Global Status Report for Buildings and Construction.
- [2]. Santamouris, M and Vasilakopoulou, K (2021), Present and future energy consumption of buildings: Challenges and opportunities towards decarbonisation, *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 1, p. 100002.
- [3]. Twinn, Richard, Desai, Karl, and Box, Philip (2019), Net zero carbon buildings: A framework definition.
- [4]. Building the Case for Net Zero: A feasibility study into the design, delivery and cost of new net zero carbon buildings (2020).
- [5]. Dockery, Douglas W and Pope, C Arden (1994), Acute respiratory effects of particulate air pollution.
- [6]. Nguyễn Đức Lượng, Nguyễn Công Thịnh (2023), Giảm thiểu phát thải cacbon hàm chứa trong lĩnh vực tòa nhà: chính sách, công cụ ở một số quốc gia phát triển và khuyến nghị cho Việt Nam, *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng-Bộ Xây dựng*. 13.02.
- [7]. Nguyễn Đức Lượng, Nguyễn Công Thịnh (2023), Kinh nghiệm ở một số quốc gia có khí hậu nóng ẩm và khuyến nghị cho Việt Nam, *Tạp chí Xây dựng*.
- [8]. Nguyễn, T. T., & Cao, T. T. M, (2024), Kế hoạch giảm phát thải khí nhà kính ngành xây dựng, *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng-Bộ Xây dựng*. 14(02).
- [9]. Norge, Standard (2011), NS-EN 15978: 2011 Sustainability of construction works, Assessment of environmental performance of buildings, Calculation method [Standard], *Standard Norge*.
- [10]. Sturgis, Simon (2017), *Embodied and whole life carbon assessment for architects*, RIBA.
- [11]. EuropeanCommission *Nearly-zero energy and zero-emission buildings*, accessed, from https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-and-zero-emission-buildings_en.
- [12]. ZeroEnergyProject, accessed, from <https://zeroenergyproject.com/2020/04/13/a-zero-carbon-building-primer/>.
- [13]. Grynning, Steinar, et al. (2020), Climate adaptation in maintenance operation and management of buildings, *Buildings*. 10(6), p. 107.
- [14]. Nässén, Jonas, et al. (2007), Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: an input-output analysis, *Energy*. 32(9), pp. 1593-1602.
- [15]. González, María Jesús and Navarro, Justo García (2006), Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact, *Building and environment*. 41(7), pp. 902-909.
- [16]. Dimoudi, A and Tompa, C (2008), Energy and environmental indicators related to construction of office buildings, *Resources, Conservation and Recycling*. 53(1-2), pp. 86-95.
- [17]. Zhang, Xinyu, et al. (2021), A review on low carbon emissions projects of steel industry in the World, *Journal of Cleaner Production*. 306, p. 127259.
- [18]. Ji, Changyoon, Hong, Taehoon, and Park, Hyo Seon (2014), Comparative analysis of decision-making methods for integrating cost and CO2 emission-focus on building structural design-, *Energy and Buildings*. 72, pp. 186-194.
- [19]. Nässén, Jonas, et al. (2012), Concrete vs. wood in buildings-An energy system approach, *Building and environment*. 51, pp. 361-369.
- [20]. Nadoushani, Zahra S Moussavi and Akbarnezhad, Ali (2015), Effects of structural system on the life cycle carbon footprint of buildings, *Energy and Buildings*. 102, pp. 337-346.
- [21]. Quyết định số 01/2022/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ: Ban hành danh mục lĩnh vực, cơ sở phát thải khí nhà kính phải thực hiện kiểm kê khí nhà kính (2022).
- [22]. Nadoushani, Zahra S Moussavi, Hammad, Ahmed W, and Akbarnezhad, Ali (2016), A framework for optimizing lap splice positions within concrete elements to minimize cutting waste of steel bars, *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, IAARC Publications, p. 1.
- [23]. Wang, Guohao, et al. (2024), A comprehensive review of building lifecycle carbon emissions and reduction approaches, *City and Built Environment*. 2(1), p. 12.
- [24]. Li, Xiao-Juan and Zheng, Yan-dan (2020), Using LCA to research carbon footprint for precast concrete piles during the building construction stage: A China study, *Journal of Cleaner Production*. 245, p. 118754.
- [25]. Akbarnezhad, Ali and Xiao, Jianzhuang (2017), Estimation and minimization of embodied carbon of buildings: A review, *Buildings*. 7(1), p. 5.
- [26]. Xiao, Jianzhuang, Ding, Tao, and Zhang, Qingtian (2017), Structural behavior of a new moment-resisting DfD concrete connection, *Engineering Structures*. 132, pp. 1-13.
- [27]. Zhang, Yunbo, et al. (2023), Comparative Study on International Zero-Carbon Building Certification System Under the Vision of Carbon Neutrality, *International Conference on Energy Power and Automation Engineering*, Springer, pp. 275-283.
- [28]. Mastrucci, Alessio, et al. (2020), A spatio-temporal life cycle assessment framework for building renovation scenarios at the urban scale, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 126, p. 109834.