

# Nghiên cứu ứng dụng BIM vào đánh giá công trình xanh tại Việt Nam hiện nay

## Application of BIM in Green Building Assessment in Vietnam

> NGUYỄN THẾ ANH

Khoa Xây dựng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM  
Email: Ntanh@hcmute.edu.vn

### TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung phân tích quy trình, đánh giá những thuận lợi và thách thức khi ứng dụng BIM trong đánh giá công trình xanh (CTX) tại Việt Nam. Kết quả nghiên cứu cho thấy BIM mang lại nhiều lợi ích như: hỗ trợ so sánh hiệu suất năng lượng, lựa chọn vật liệu bền vững, tính toán và mô phỏng sử dụng năng lượng tự nhiên, tối ưu hệ thống cấp và thoát nước, tái sử dụng nước xám, phân tích thông gió, và tối ưu ánh sáng tự nhiên. Tuy vậy, việc ứng dụng BIM vào đánh giá CTX vẫn bị cản trở bởi nhiều yếu tố như: thiếu hệ thống tiêu chuẩn, hạn chế về phần mềm chuyên dụng, khó khăn trong việc lựa chọn phần mềm và thiết lập thông số, cũng như sự không đồng nhất về định dạng dữ liệu... Để nâng cao hiệu quả ứng dụng BIM trong đánh giá công trình xanh, cần có sự phối hợp giữa các bên nhằm từng bước khắc phục các rào cản hiện tại, hướng tới phát triển bền vững trong ngành Xây dựng Việt Nam.

**Từ khóa:** BIM, đánh giá công trình xanh, xây dựng bền vững.

### ABSTRACT

This study focuses on analyzing the process and identifying the advantages and difficulties when using BIM in GBA in Vietnam. The results show that applying BIM gives many benefits, such as helping to compare energy performance, choose sustainable materials, calculate and simulate natural energy use, optimize water supply and drainage systems, reuse greywater, analyze ventilation, optimize natural light... However, there are still many barriers such as the lack of standards, limited specialized software, difficulty in choosing the right tools and setting technical parameters, inconsistent data formats... To improve the effectiveness of BIM in green building assessment, cooperation among stakeholders is needed to overcome these barriers and support sustainable development in the Vietnamese construction industry.

**Keywords:** BIM, green building assessment, sustainable construction.

### 1. TỔNG QUAN

Hiện nay mô hình thông tin công trình (BIM) đã và đang chứng minh được vai trò quan trọng trong việc nâng cao năng suất và chất lượng của các dự án xây dựng và được ứng dụng rộng rãi trên toàn thế giới, bao gồm cả Việt Nam. Tuy nhiên, việc tích hợp BIM vào các hoạt động xây dựng bền vững, đặc biệt là trong công tác đánh giá CTX vẫn còn gặp nhiều khó khăn và hạn chế. Trên thế giới, nhiều nghiên cứu gần đây đã xem xét đến những lợi ích và khó khăn của việc áp dụng BIM để đánh giá CTX theo các tiêu chí khác nhau. [1] đã chỉ ra rằng BIM giúp tối ưu hóa quy trình thiết kế và quản lý CTX thông qua việc sử dụng mô hình 3D. Điều này không chỉ giảm thiểu thời gian thiết kế mà còn cải thiện hiệu quả quản lý dự án bằng cách cung cấp dữ liệu đa chiều và khả năng tương tác giữa các bên liên quan trong dự án.

Sự kết hợp BIM và một hệ thống đánh giá CTX phổ biến như Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) đã được đề cập đánh giá trong [2]. Nghiên cứu này đã xem xét tới ứng dụng công nghệ máy chủ BIM triển khai trên đám mây (cloud-BIM) và giải pháp phần mềm dưới dạng dịch vụ SaaS (Software as a Service); từ đó đề xuất một phương thức mới để các bên có thể tận dụng công nghệ vượt qua các hạn chế về khả năng giao tiếp của máy tính

truyền thống để triển khai các dự án bền vững LEED một cách hiệu quả. Bên cạnh đó, [3] [4] đã đánh giá một vài khó khăn khi áp dụng BIM kết hợp đánh giá CTX như định dạng dữ liệu không đồng nhất, quyền sở hữu không rõ ràng, đào tạo BIM khó khăn cho các bên liên quan... Những khó khăn này có thể khắc phục được với sự phát triển của khoa học kỹ thuật và việc sử dụng BIM tích hợp các tiêu chí xanh có thể được áp dụng từ giai đoạn tiền xây dựng đến giai đoạn sau xây dựng các tòa nhà xanh; điều này sẽ giúp đưa ra các quyết định thiết kế phù hợp với tiêu chí bền vững và tiết kiệm chi phí trong vòng đời dự án.

Tại Việt Nam những năm gần đây BIM và CTX cũng đang được triển khai rộng rãi nhưng chưa có nhiều nghiên cứu trình bày về sự kết nối giữa chúng. Trong [5], tác giả Ngô Ngọc Trí và cộng sự đã nghiên cứu sử dụng BIM kết hợp công cụ phân tích năng lượng đám mây (Autodesk Insight, Green Building Studio) để mô phỏng sơ bộ ảnh hưởng của các lớp vỏ đến năng lượng công trình, kết quả cho thấy khi sử dụng BIM cho phương án thiết kế giảm 5.66% chi phí điện với phương án gốc. [6] thông qua khảo sát ý kiến chuyên gia đã chỉ ra rằng việc áp dụng BIM vào phân tích CTX tại một số dự án cụ thể đang có nhiều khó khăn (42.64%) hơn so với thuận lợi (26.72%) dẫn tới các bên tham gia chưa sẵn sàng cho mô hình BIM

tích hợp các tiêu chí xanh ngay từ giai đoạn chuẩn bị dự án. Trong bài báo này, tác giả nghiên cứu những hiệu quả, khó khăn khi áp dụng BIM vào đánh giá CTX tại Việt Nam nhằm đưa ra giải pháp nâng cao hiệu quả của chúng trong các dự án xây dựng trong thời gian tới.

**2. BIM VÀ CÔNG TRÌNH XANH**

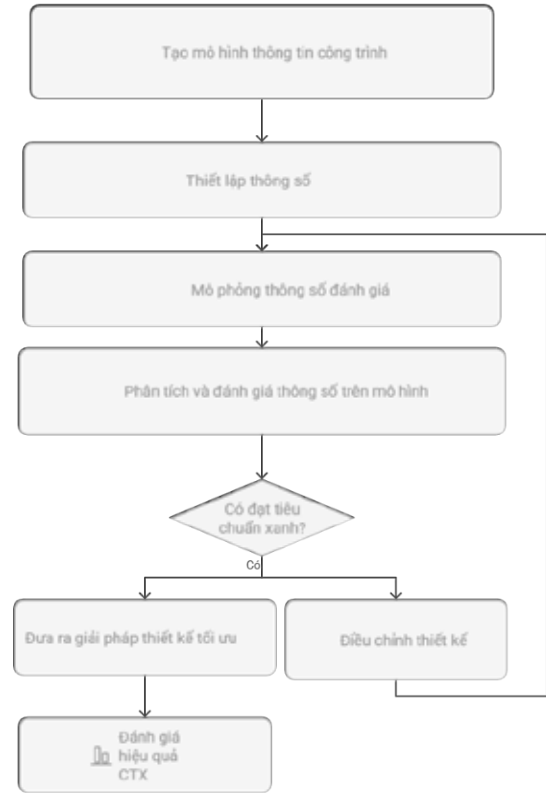
Hiệu quả, khó khăn khi áp dụng BIM với các cấp độ BIM 3D, BIM 4D và BIM 5D trong các dự án xây dựng tại Việt Nam đã được tác giả phân tích và trình bày trong [7]. Gần đây, sự cấp thiết áp dụng BIM thể hiện rõ khi Thủ tướng Chính phủ ký Quyết định 258/QĐ-TTg phê duyệt lộ trình áp dụng BIM và nhà nước ban hành bộ tiêu chuẩn quốc gia TCVN 14177:2024 về tổ chức và số hóa thông tin công trình xây dựng, đặc biệt tập trung vào mô hình hóa thông tin công trình.

CTX là công trình được thiết kế, xây dựng và vận hành nhằm sử dụng hiệu quả tài nguyên và giảm thiểu tác động đến môi trường cũng như sức khỏe con người [8]. Hiện nay, các CTX được đánh giá theo các hệ thống khác nhau ở trên thế giới. Tại Việt Nam, phổ biến là Lotus của VGBC - Việt Nam, Leed của USGBC - Hoa Kỳ và EDGE của IFC - World bank. Điểm chung các hệ thống là đều tập trung vào việc giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường, nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên và cải thiện chất lượng sống cho người sử dụng. Ví dụ, Lotus đánh giá các công trình dựa trên các tiêu chí chính như: Năng lượng (E), nước (W), nạt liệu (MR), môi trường và tiện nghi (HC), địa điểm và hệ sinh thái (SE), quản lý vận hành (Man).

Theo [6], quy trình ứng dụng BIM vào CTX phải phù hợp với hệ thống đánh giá, đối với Lotus/Leed, quy trình được [6] đề xuất như trong Hình 1. Với quy trình này, người dùng sẽ có 2 khó khăn cần đối mặt là xác định thông số đánh giá tiêu chí xanh bằng mô hình và lựa chọn phần mềm phân tích năng lượng.

Hầu hết các kiến trúc sư và kỹ sư (AEC) đều mong muốn dùng 1 phần mềm để thực 2 nhiệm vụ là mô hình hóa (MHH) và phân tích chỉ tiêu (PTCT) nhằm đơn giản quá trình cũng như giảm chi phí và thời gian. Nhưng thực tế, thường bắt buộc kết hợp một công cụ

MHH và một (hoặc nhiều) công cụ PTCT có thể tích hợp vào mô hình. Điều này là do các phần mềm sở hữu cả tính năng MHH và PTCT có chi phí cao, sử dụng phức tạp (như AECosim Building Design) hoặc không chuyên sâu khi phân tích (Autodesk Revit)... Bảng 1 trình bày các phần mềm PTCT phổ biến trên thế giới những năm gần đây.



Hình 1. Quy trình tổng thể ứng dụng BIM vào đánh giá CTX.

Bảng 1. Các phần mềm phân tích năng lượng phổ biến

Phần mềm	MHH	PTCT	Tích hợp BIM	Yêu cầu cấu hình	Miễn phí	Không phổ biến ở VN
Autodesk Revit	X	X	X			
Autodesk Insight		X	X	X		
Green Building Studio		X	X	X		
Design Builder		X	X	X		
eQUEST		X			X	X
IES VE		X	X	X		X
BIM Energy		X	X			X
AECosim Building Designer	X	X	X	X		X

Việc lựa chọn tiêu chí đánh giá thông qua mô hình BIM phụ thuộc nhiều vào hệ thống đánh giá và mục tiêu định nghĩa CTX của dự án. Ví dụ hệ thống Lotus có nhiều mức độ đánh giá CTX được định nghĩa khác nhau, dự án có thể lựa chọn các tiêu chí tiên quyết (số lượng ít) hoặc hướng tới mục tiêu cao hơn với nhiều tiêu chí đầy đủ hơn. Hơn nữa, nhiều thông số có thể thông qua BIM để tính toán định lượng nhưng có những tiêu chí khó đánh giá thông qua mô hình mà cần trực quan của người thiết kế cũng như người đánh giá như H-PR-1, Man-PR-1, Man-PR-2. Do đó, để quá trình ứng dụng BIM vào đánh giá CTX

được thuận lợi, các bên tham gia cần có cách tiếp cận và thống nhất ngay từ lúc đầu để lựa chọn các thông số sẽ đánh giá thông qua mô hình từ đó thiết kế mô hình đầy đủ các yêu cầu.

**3. KẾT QUẢ**

**3.1. Hiệu quả**

Kết quả cho thấy khi thực hiện mô phỏng với BIM, các AEC có thể so sánh hiệu suất năng lượng của các phương án thiết kế khác nhau, từ đó đưa ra các quyết định thiết kế tối ưu (Hình 2.a), kết luận này tương tự [5] khi BIM cho phương án thiết kế

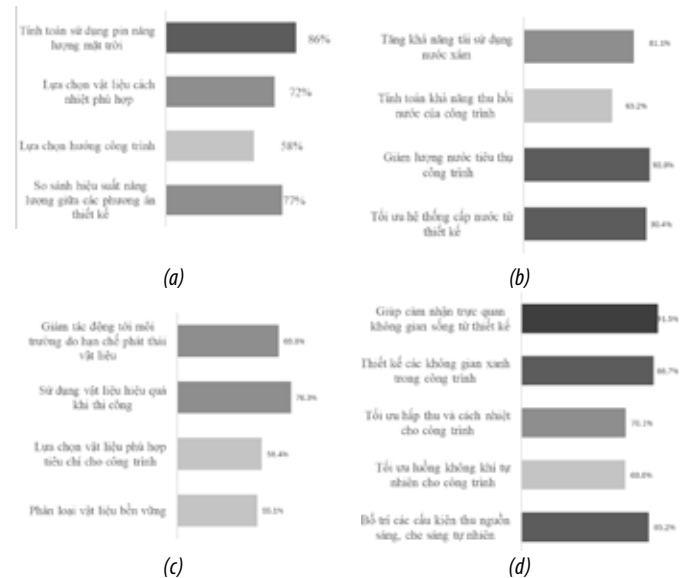
giảm 5.66% chi phí điện với phương án gốc. Hình 2 cũng chỉ ra rằng khả năng mô phỏng và phân tích hiệu suất năng lượng của BIM từ giai đoạn thiết kế ban đầu sẽ giúp đưa ra các quyết định sáng suốt, đảm bảo tiêu chí về đánh giá năng lượng. 58.4% chuyên gia cho rằng BIM cũng giúp xác định hướng công trình tối ưu để tận dụng tối đa ánh sáng tự nhiên, giảm nhu cầu sử dụng hệ thống chiếu sáng, 72.2% đồng ý rằng việc lựa chọn vật liệu cách nhiệt hiệu quả và thiết kế hệ thống HVAC phù hợp cũng được hỗ trợ bởi BIM và 86% cho rằng thiết kế mô hình giúp họ dễ dàng tính toán vị trí, diện tích bố trí phù hợp trong thiết kế cho các loại năng lượng tái tạo như tấm pin năng lượng mặt trời. Dựa vào đó chúng ta có thể kết luận BIM dễ dàng đánh giá và đảm bảo các tiêu chí năng lượng CTX.

BIM MEP cho phép mô phỏng, tính toán lưu lượng và nhu cầu nước, hỗ trợ lựa chọn thiết bị tiết kiệm và tối ưu hệ thống cấp giúp giảm đáng kể mức tiêu thụ nước trong công trình, điều này thể hiện rõ qua sự nhất trí cao của các chuyên gia (92.8%, Hình 2.b) và cũng tương tự kết quả của các nghiên cứu trước đó [9]. Ngoài ra 65.2% ý kiến cũng đồng ý BIM hỗ trợ mô hình hệ thống thu gom và tái sử dụng nước mưa, giúp phân tích nhiều tham số như diện tích mái, lượng mưa, nhu cầu tiêu thụ để tính toán tiềm năng thu nước mưa từ công trình nhằm đảm bảo tiêu chí tái sử dụng nước xám phù hợp với Lotus hay Leed [9] [10].

Về tiêu chí vật liệu (MR), 58.4% chuyên gia nhận định BIM giúp lựa chọn các vật liệu bền vững từ khâu thiết kế do có thể liên kết với các cơ sở dữ liệu chứa thông tin về tác động môi trường của vật liệu. Tuy nhiên, 41.6% còn lại cho rằng, tại Việt Nam sự hỗ trợ của BIM trong trường hợp này là không cao khi các cơ sở dữ liệu về vật liệu còn hạn chế. Mặt khác, khả năng thống kê vật liệu chính xác [11], phát hiện và giải quyết các xung đột trong giai đoạn thiết kế [7] [12] của BIM giúp giảm yêu cầu làm lại trong thi công, tránh gây ra lãng phí vật liệu, ảnh hưởng tới môi trường từ đó đảm bảo tiêu chí MR từ giai đoạn hồ sơ (Hình 2.c).

Báo cáo năm 2024 của WalterAEC (Mỹ) về vai trò BIM trong phát triển bền vững cho thấy BIM có thể mô phỏng và phân tích luồng ánh sáng tự nhiên trong không gian, tối ưu hóa vị trí cấu kiện lấy sáng (cửa, cửa sổ, giếng trời) và các thiết bị che nắng để giảm nhu cầu chiếu sáng nhân tạo. Nó cũng hỗ trợ mô phỏng luồng không khí và thông gió để đảm bảo chất lượng không khí trong nhà, giảm phụ thuộc vào hệ thống thông gió nhân tạo. Hơn nữa, phản ứng nhiệt của công trình cũng có thể được mô phỏng để tối ưu hóa khả năng cách nhiệt, giảm sự thất thoát nhiệt mùa lạnh hoặc hấp thụ nhiệt mùa nóng giúp cải thiện cảm giác người sử dụng. Tại Việt Nam các chuyên gia BIM đồng ý với các quan điểm này (Hình 2.d). Điều này cho thấy, khả năng mô phỏng tiên tiến của BIM cho phép các nhà thiết kế đánh giá hiệu suất môi trường của thiết kế một cách toàn diện và chính xác, dẫn đến các giải pháp công trình xanh tối ưu hóa đảm bảo tiêu chí đánh giá về môi trường.

Đối với hai tiêu chí hệ sinh thái (SE) và quản lý (Man), [13] đã chỉ ra rằng bằng cách tích hợp với các công cụ LCA (Life Cycle Assessment), BIM cho phép hiểu toàn diện về tác động môi trường của một dự án trong suốt vòng đời của nó, từ đó cung cấp hỗ trợ đánh giá hiệu quả đối với các tiêu chí. Mặc dù vậy, hơn 80.4% AEC được khảo sát trong nghiên cứu này còn phân vân bởi các thông số về các tiêu chí này được đánh giá là khó phân tích và xếp loại trực tiếp bằng các chỉ số định lượng trên mô hình mà cần sự đánh giá trực quan từ các bên liên quan.



Hình 2. Mức độ đồng ý (%) của khảo sát chuyên gia về tác dụng của BIM với tiêu chí năng lượng công trình E (a), nước W (b), vật liệu bền vững MR (c) và môi trường tiện nghi (HC) (d).

### 3.2. Khó khăn

Việc áp dụng BIM vào đánh giá CTX mang lại nhiều lợi ích nhưng cũng đi kèm với không ít thách thức, rào cản. Khó khăn lớn nhất mà các bên AEC nhận định đó là thiếu tiêu chuẩn và hướng dẫn liên quan tới vận dụng BIM vào đánh giá công trình xanh (Bảng 2). Ý kiến này phản ánh rõ thực tế tại Việt Nam hiện nay khi các tiêu chuẩn, hướng dẫn hiện hành như TCVN 14177:2024, ISO 19650 chưa đề cập đến các yếu tố bền vững hay quy trình, tiêu chí cụ thể dẫn đến việc áp dụng BIM vào quy trình đánh giá CTX dự án còn nhiều hạn chế.

Hiện nay, thị trường thiếu các phần mềm BIM chuyên dụng phục vụ cho việc thiết kế và quản lý CTX; việc cần sử dụng quá nhiều công cụ để phân tích, mô phỏng các tiêu chí bên cạnh một công cụ mô hình hóa gây rất nhiều khó khăn cho các bên kỹ sư, kiến trúc sư (Bảng 2). Ngoài ra, vấn đề này cũng là một trong những nguyên nhân làm tăng chi phí đầu tư vào phần mềm, máy tính, đào tạo ảnh hưởng tới động lực của các doanh nghiệp, chủ đầu tư và cơ quan quản lý khi lo ngại về tương quan giữa chi phí và lợi ích đem lại chưa thực sự rõ ràng để phải thay đổi so với phương thức truyền thống. Bên cạnh đó, sự thiếu thống nhất trong định dạng dữ liệu và khả năng tương thích hạn chế giữa các phần mềm khác nhau đã tạo ra rào cản đáng kể trong việc chia sẻ và quản lý dữ liệu một cách hiệu quả. Hệ quả là quá trình ra quyết định trở nên thiếu đồng bộ và chậm trễ, ảnh hưởng trực tiếp đến việc lựa chọn vật liệu và giải pháp thiết kế nhằm đáp ứng các tiêu chí CTX một cách tối ưu.

Theo [14], một trong những thách thức khi áp dụng BIM vào đánh giá CTX là việc lựa chọn các thông số phù hợp để phân tích. Hơn nữa, mỗi loại thông số có thể yêu cầu một công cụ phân tích chuyên biệt, dẫn đến việc lựa chọn không phù hợp sẽ làm giảm hiệu quả của quy trình đồng thời làm gia tăng khó khăn trong việc lựa chọn phần mềm đã nêu trước đó.

Cuối cùng, một rào cản đáng kể hạn chế việc áp dụng rộng rãi mô hình thông tin công trình (BIM) trong các dự án CTX là sự khác biệt về mức độ quan tâm, mức độ sẵn sàng, kỳ vọng, cũng như kiến thức và kỹ năng liên quan đến BIM giữa các bên liên quan. Sự không đồng đều này dẫn đến những mâu thuẫn trong quá trình ra quyết định, làm giảm tính phối hợp và hiệu quả hợp

tác giữa các bên. Từ đó ảnh hưởng tiêu cực đến cam kết triển khai BIM trong các dự án CTX tại Việt Nam. Cụ thể, chỉ 10,3% ý kiến cho biết công ty họ đã sẵn sàng triển khai BIM vào CTX, trong khi tới 89,7% còn phân vân. Đồng thời, 71% không chắc

chắn liệu công ty mình có nhận thức được lợi ích từ việc áp dụng BIM trong trường hợp này hay không. Điều này cho thấy mức độ sẵn sàng và kỳ vọng giữa các bên liên quan còn rất khác biệt.

Bảng 2. Các khó khăn cản trở AEC áp dụng BIM vào đánh giá CTX.

STT	Rào cản áp dụng BIM vào CTX	Đồng ý (%)	Không đồng ý (%)	Phân vân (%)
1	Chưa có tiêu chuẩn hướng dẫn	100	0	0
2	Khó khăn trong việc lựa chọn thông số đưa vào phân tích	85.1	0	14.9
3	Khó khăn trong việc lựa chọn phần mềm mô hình hóa	65.3	12.5	22.2
4	Khó khăn trong việc lựa chọn công cụ phân tích thông số	75.2	3	21.8
5	Không có định dạng dữ liệu thống nhất/ không tương thích giữa các phần mềm	61.3	24.7	14
6	Có thể phải sử dụng quá nhiều phần mềm, công cụ phân tích	82.3	0	17.7
7	Chi phí bỏ ra cao so với phương pháp truyền thống	29.3	62.1	8.6
8	Thiếu sự phối hợp giữa các bên /có bên không sẵn lòng áp dụng BIM	54.7	40.2	5.1
9	Thiếu tài nguyên (máy tính, nhân lực...)	20.3	45.5	34.2
10	Công ty đã thấy được lợi ích khi áp dụng BIM vào CTX	14.5	14.5	71
11	Công ty đã sẵn sàng áp dụng BIM vào CTX	10.3	0	89.7

#### 4. KẾT LUẬN VÀ THẢO LUẬN

Bài báo này thông qua việc phân tích lợi ích và thách thức BIM trong quy trình đánh giá CTX cho thấy mặc dù có những thiếu sót ở giai đoạn hiện tại nhưng BIM đem lại những lợi ích và cải tiến tiềm năng đáng kể cho thiết kế, xây dựng và quản lý các dự án xanh. Việc đạt được các chứng nhận CTX là một quá trình phức tạp, đòi hỏi nhiều tài liệu, xác minh và BIM là một sự hỗ trợ hiệu quả khi giúp đơn giản hóa đáng kể quá trình này. Thông qua đó nghiên cứu hướng tới mục đích thúc đẩy, khuyến khích các bên AEC vượt qua những rào cản để tăng cường việc sử dụng BIM tại các dự án xanh tại Việt Nam trong giai đoạn tới.

Ngoài những đóng góp đã đề cập ở trên, nghiên cứu này cũng có một số hạn chế như số lượng chuyên gia BIM tham gia khảo sát còn hạn chế, không đồng đều tất cả các bên trong dự án, các mô phỏng trong dự án thực tế còn hạn chế do điều kiện triển khai chưa cho phép...; những hạn chế này sẽ được khắc phục trong các nghiên cứu tiếp theo.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. N. K. N. M. A. Yu Cao, "Green Building Construction: A Systematic Review of," Buildings, vol. 12, p. 1025, 2022.
- [2]. R. I. Wei W, " Leveraging cloud-BIM for LEED Automation," Electronic Journal of Information Technology in Construction, 2012.
- [3]. B. Huang, J. Lei, F. Ren, Y. Chen, Q. Zhao, S. Li and Y. Lin, "Contribution and obstacle analysis of applying BIM in promoting green buildings," Journal of Cleaner Production, vol. 278, 2021.
- [4]. K. Guo, Q. Li, L. Zhang and X. Wu, "BIM-based green building evaluation and optimization: A case study," Journal of Cleaner Production, vol. 320, 2021.
- [5]. N. N. Trí, "Phân tích năng lượng trong tòa nhà sử dụng mô hình thông tin công trình hướng đến sự bền vững," Tạp chí Khoa học & CN - Đại học Đà Nẵng, 2020.
- [6]. P. L. N.V.Đào, "Ứng dụng mô hình thông tin công trình trong thiết kế công trình xanh theo tiêu chuẩn LEED và Lotus," Vietnam journal of construction, vol. 6, 2018.
- [7]. N. T. Anh, "Effectiveness of building information modelling (bim) for small and medium construction buildings in Viet Nam," Journal of materials & construction, 2022.
- [8]. "www.vgbc.vn," Hội đồng công trình xanh Việt Nam, 2025. [Online].

[9]. C. Z. Y. G. M. O. a. P. D. Zhen Liu, "ABuilding Information Modelling (BIM) based Water Efficiency (BWe) Framework for Sustainable Building Design and Construction Management," Electronics , vol. 8, p. 599, 2019.

[10]. A. Maqsoom, B. Aslam, S. Ismail, M. Thaheem, F. Ullah, H. Zahoor, M. Musarat and N. Vatin, "Assessing Rainwater Harvesting Potential in Urban Areas: A Building Information Modelling (BIM) Approach," Sustainability, vol. 13, p. 12583, 2021.

[11]. G. Johansen, "ICS Project: Cost estimating and BIM," ICIS International construction information society , 2018.

[12]. N. T. T. Đan and N. H. Năng, "Ứng dụng mô hình thông tin công trình trong thiết kế công trình hiện nay (BIM)," Tạp chí Kiến trúc, vol. 12, 2018.

[13]. P. A. F. J. V. L. S. Angeliki Kylii, "Integration of Building Information Modelling (BIM) and Life Cycle Assessment (LCA) for sustainable constructions," urnal of Sustainable ,Vol. 4, No. 13, 2015.

[14]. G. H. H. & C. L. Meng, "The application obstacles of BIM technology in green building project and its key role path analysis.," Scientific reports, 14(1), 30330. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81360-8>, 2024.