



DOI:10.22144/ctujos.2026.098

ĐÁNH GIÁ TÁC ĐỘNG VÀ CHI PHÍ CỦA VẬT LIỆU VỎ BAO CHE BIỆT THỰ THEO TIÊU CHUẨN EDGE TẠI VĨNH LONG

Lữ Thị Thúy Ái^{1*}, Đặng Thanh Hưng¹ và Võ Thị Lệ Thi²

¹Trường Đại học Kiến trúc Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Bách khoa, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): 23kt01@uah.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 24/02/2026

Sửa bài (Revised): 30/04/2026

Duyệt đăng (Accepted): 19/05/2026

Title: Analysis of impacts and costs of villa envelope materials according to the EDGE standard in Vinh Long

Author(s): Lu Thi Thuy Ai^{1*}, Dang Thanh Hung¹ and Vo Thi Le Thi²

Affiliation(s): ¹University of Architecture Ho Chi Minh City, Viet Nam; ²Faculty of Civil Engineering, College of Engineering, Can Tho University, Viet Nam

TÓM TẮT

Vỏ bao che có tác động trực tiếp đến năng lượng của nhà ở, đặc biệt là biệt thự - loại hình có mức tiêu thụ năng lượng cao. Việc cải thiện vật liệu vỏ bao che không chỉ giúp tiết kiệm năng lượng mà còn hạn chế tác động môi trường từ vật liệu. Một căn biệt thự điển hình tại Vĩnh Long được chọn làm trường hợp để nghiên cứu, đánh giá hiệu quả sử dụng năng lượng và năng lượng tích hợp trong vật liệu thông qua mô phỏng bằng công cụ EDGE App, kết hợp phân tích chi phí đầu tư làm cơ sở để đề xuất các giải pháp phù hợp. Kết quả cho thấy giải pháp cân bằng giữa ba tiêu chí trên có mức tiết kiệm năng lượng tăng 34,93%, năng lượng tích hợp trong vật liệu cải thiện đến 28,02% với chi phí đầu tư gia tăng 2,71% so với công trình hiện trạng. Qua đó, kết quả nghiên cứu góp phần định hướng thiết kế, cải tạo biệt thự theo hướng hiệu quả năng lượng, giảm phát thải và tiến tới mục tiêu phát triển công trình bền vững tại Việt Nam.

Từ khóa: Hiệu quả năng lượng, nhà ở biệt thự, phân tích chi phí, tiêu chuẩn EDGE, vật liệu

ABSTRACT

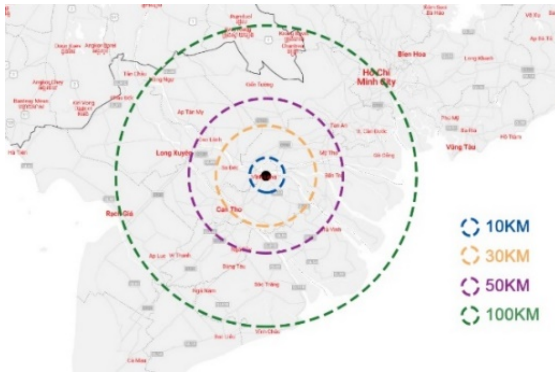
Building envelopes have a direct impact on the energy efficiency of homes, especially villas – a type of housing with high energy consumption. Improving building envelope materials not only saves energy but also limits the environmental impact of the materials. A typical villa in Vinh Long was selected as a case study to evaluate energy use and integrated energy in materials through simulation using the EDGE App, combined with an analysis of investment costs as a basis for producing suitable solutions. The results show that a solution balancing these three criteria has the potential to increase energy savings by 34,93%, and the integrated energy in improved materials by 28,02%, with an investment cost increase of 2,71% compared to the current state. This contributes to guiding the design and improvement of villas towards energy efficiency, reduced emissions, and the development of sustainable tools in Viet Nam.

Keywords: Building envelope materials, cost analysis, energy efficiency, EDGE standard, villa housing

1. GIỚI THIỆU

Biến đổi khí hậu đang trở thành một thách thức toàn cầu khi lượng phát thải CO₂ tiếp tục gia tăng. Trong đó, ngành xây dựng được xem là nguồn phát thải Carbon hàng đầu, chiếm khoảng 39 - 40% tổng lượng phát thải CO₂, đồng thời tiêu thụ gần 1/3 năng lượng và ~40% tài nguyên trên thế giới, góp phần tạo ra khoảng 30% lượng khí nhà kính mỗi năm (IFC, 2023). Trong khi đó, xây dựng xanh có thể cắt giảm 23% lượng carbon của ngành vào năm 2035, đồng thời tiết kiệm năng lượng và hạn chế nóng lên toàn cầu (Khánh, 2023).

Việt Nam chịu tác động của biến đổi khí hậu trong bối cảnh đô thị hóa nhanh và nhu cầu năng lượng gia tăng. Tỷ trọng năng lượng tiêu thụ của các công trình đã tăng từ 22,4% năm 2003 lên 37 - 38% năm 2014 (Hiếu & Liên, 2023). Tốc độ đô thị hóa nhanh, dân số tăng (101 triệu người năm 2024) dẫn đến nhu cầu xây dựng cao, gây áp lực lớn lên phát thải, trong khi Việt Nam đã cam kết đạt phát thải ròng bằng “0” vào năm 2050 tại COP26. Những cam kết và mục tiêu này đặt ra yêu cầu chuyển đổi định hướng phát triển xây dựng theo hướng công trình xanh và tiết kiệm năng lượng.



Hình 1. Bán kính xung quanh Vĩnh Long

Vĩnh Long nằm ở trung tâm vùng Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) (Hình 1), có vị trí chiến lược kết nối các đô thị trong vùng. Những năm gần đây, Vĩnh Long chứng kiến tốc độ đô thị hóa nhanh, tỷ lệ dân số đô thị đã tăng từ 16,6% năm 2020 lên 28,53% vào năm 2023, dự kiến đạt 30 - 35% vào năm 2025 (Duy, 2025). Đặc biệt, sau định hướng sáp nhập tỉnh, Vĩnh Long được xác định là trung tâm phát triển vùng, kéo theo làn sóng dân cư chuyển về sinh sống và làm việc, dẫn đến nhu cầu xây dựng nhà ở tăng mạnh, qua đó làm gia tăng phát thải khí nhà kính. Khu dân cư (KDC) với tính tập trung và quy hoạch đồng bộ cho phép đánh giá hiệu quả của công trình không chỉ ở cấp độ cá thể mà còn ở quy

mô cộng đồng, tạo tiền đề để nhân rộng trên địa bàn tỉnh Vĩnh Long và cả vùng ĐBSCL.

Trong nghiên cứu này, biệt thự trong KDC đã được lựa chọn, do loại hình này có tiềm năng cao trong thúc đẩy nhà ở xanh tại Việt Nam. Biệt thự thường thuộc sở hữu của các hộ gia đình có tiềm lực tài chính và mức độ quan tâm cao đến chất lượng sống, sẵn sàng đầu tư cho giải pháp tiết kiệm năng lượng và thân thiện môi trường, qua đó có khả năng lan tỏa mô hình phát triển bền vững. So với các loại hình nhà ở khác như nhà phố hay chung cư cùng diện tích, biệt thự là loại hình nhà ở có mức tiêu thụ năng lượng cao hơn có tính đồng nhất và quy mô phù hợp hơn để nghiên cứu và ứng dụng.

Vỏ bao che công trình đã được nghiên cứu rộng rãi nhằm nâng cao hiệu quả năng lượng, trong đó nhiều nghiên cứu tập trung vào phân tích năng lượng của vỏ bao che thông qua các công cụ mô phỏng trong điều kiện khí hậu nóng ẩm cho thấy tiềm năng tiết kiệm năng lượng đáng kể. Điển hình, kết quả nghiên cứu tại Colombia của Rizo-Maestre et al. (2025) ghi nhận mức tiết kiệm năng lượng lên đến 50%, với mức tăng chi phí xây dựng tối thiểu ($\leq 1,2\%$ giá trị thương mại) cho nhà ở xã hội. Kết quả nghiên cứu của Cabrera-Garcia et al. (2024) đã kết hợp Autodesk Revit – EDGE ghi nhận mức cải thiện khoảng 30,39% với chi phí tăng 19,94% cho công trình nhà ở. Ngoài ra, trên công trình nghiên cứu giáo dục tại Bangkok, Chiradeja đã sử dụng phần mềm Building Energy Code (BEC); kết quả cho thấy khả năng tiết kiệm năng lượng đến khoảng 65%, với IRR khoảng 15%. Tuy nhiên, việc đánh giá hiệu quả kinh tế thông qua IRR và thời gian hoàn vốn đã được thực hiện trong nghiên cứu này, thay vì xem xét trực tiếp mức gia tăng chi phí đầu tư ban đầu như trong nghiên cứu hiện tại (Chiradeja & Ngaopitakkul, 2019). Nhìn chung, việc tổng hợp các nghiên cứu cho thấy hiệu quả tiết kiệm năng lượng phụ thuộc đáng kể vào bối cảnh khí hậu, loại công trình và công cụ mô phỏng, đồng thời thể hiện sự khác biệt rõ rệt trong cách tiếp cận chi phí và phương pháp đánh giá hiệu quả kinh tế.

So với các nghiên cứu trên, có thể nhận thấy rằng mặc dù đạt mức tiết kiệm năng lượng cao thông qua các giải pháp vỏ bao che, nhưng phần lớn các công trình trước đây chủ yếu tập trung vào hiệu quả vận hành và trong một số trường hợp có xét đến chi phí, trong khi yếu tố năng lượng tích hợp trong vật liệu chưa được đưa vào như một tiêu chí độc lập trong bài toán tối ưu. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm hướng tới việc lập đầy khoảng trống bằng cách thiết lập một khung đánh giá đa tiêu chí

theo chuẩn EDGE cho vỏ bao che của biệt thự trong khu dân cư Phước Thọ, thuộc bối cảnh khí hậu nhiệt đới ẩm vùng Đồng bằng sông Cửu Long: trong đó, khả năng tiết kiệm năng lượng vận hành, cải thiện năng lượng tích hợp trong vật liệu và mức gia tăng chi phí cũng đã được xem xét. Qua đó, các tiêu chí vào một mặt được đặt bằng đánh đổi khắt khe hơn nhằm đề xuất kịch bản cân bằng tối ưu trong điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm tập trung vào việc đánh giá và đề xuất các giải pháp cho vật liệu vỏ bao che (cụ thể là mái, tường, hệ cửa/kính) của biệt thự tại Vĩnh Long nhằm nâng cao hiệu quả năng lượng theo tiêu chuẩn EDGE.

Khu dân cư Phước Thọ nằm tại trung tâm thành phố Vĩnh Long, với tổng diện tích 11,53 ha, được quy hoạch theo định hướng khu đô thị sinh thái ven sông (Hình 2). Trong khuôn khổ Diễn đàn Phát triển bền vững do VCCI tổ chức, KDC Phước Thọ đã được vinh danh “Dự án đáng sống 2024”, cho thấy tiềm năng trở thành mô hình đô thị xanh có thể nhân rộng. KDC Phước Thọ được tổ chức thành hai phân khu chính là Đa Phúc và Đa Lộc (Hình 3, Hình 4), phát triển đa dạng loại hình từ nhà ở đến dịch vụ - thương mại. Dự án với 27 căn biệt thự được bố trí tại hai phân khu đều có hướng nhìn ra sông hoặc kênh rạch nhằm tận dụng lợi thế cảnh quan hiện hữu.



Hình 2. Vị trí khu dân cư Phước Thọ, tỉnh Vĩnh Long



Hình 3. Vị trí các mẫu biệt thự tại phân khu Đa Phúc, khu dân cư Phước Thọ



Hình 4. Vị trí các mẫu biệt thự tại phân khu Đa Lộc, khu dân cư Phước Thọ

Biệt thự tại đây đều cao 3 tầng, mật độ xây dựng khoảng 60%, với sân xung quanh, được thiết kế theo phong cách hiện đại. Mái tôn dốc màu đỏ nâu không những tạo điểm nhấn mà còn thoát nước mưa hiệu quả. Tường được sơn hoàn thiện là các tông trắng – vàng – kem, phối hợp với chi tiết cửa khung sắt đen và phào chỉ, giúp công trình vừa giữ được nét tinh tế vừa tránh cảm giác đơn điệu. Hệ thống cửa sổ lớn, cửa vòm và cửa cong được sử dụng linh hoạt, giúp tăng cường ánh sáng tự nhiên.

Các lô biệt thự được ký hiệu theo dạng BTx-y, trong đó x là số thứ tự khu (BT1, BT2, BT3, BT4,...) và y là số thứ tự căn trong từng khu (1, 2, 3,...) để thuận tiện cho việc thống kê, so sánh và lựa chọn mẫu phân tích (Hình 5).



Hình 5. Phân loại và ký hiệu các biệt thự

Công trình nghiên cứu là mẫu có điều kiện bất lợi nhất về tiện nghi nhiệt và nằm ở vị trí điển hình trong cụm biệt thự, nhằm đảm bảo tính đại diện. Công trình có tổng điểm đánh giá thấp nhất, dựa trên các tiêu chí: mức độ che nắng, bức xạ mặt trời và khả năng đón gió sẽ được chọn nghiên cứu. Cụ thể, nhà xe bên ngoài được xem là yếu tố che nắng được cộng 1 điểm, ngược lại không được tính điểm. Mỗi hướng mặt đứng chịu bức xạ mặt trời bị trừ 1 – 2 điểm (cạnh ngắn trừ 1 điểm, cạnh dài trừ 2 điểm; công trình có mặt bằng vuông trừ 1 điểm cho mỗi cạnh). Đồng thời, mỗi hướng đón gió chủ đạo tại khu vực Vĩnh Long (Tây Nam, Đông Nam, Đông Bắc) được cộng 1 điểm, qua đó mức độ thuận lợi hoặc bất lợi về năng lượng của công trình đã được đánh giá (Hình 6).



Hình 6. Đặc điểm mặt bằng công trình

Từ các tiêu chí trên, BT3 – 6 có tổng điểm = -3, là mức bất lợi nhất về điều kiện nhiệt và đồng thời nằm trong vị trí đại diện, bảo đảm tính điển hình cho nhóm công trình nghiên cứu. Vì vậy, biệt thự BT3 – Lô 6 được chọn làm mô hình mô phỏng (

Bảng 1).

Bảng 1. Đánh giá tác động và lựa chọn mẫu biệt thự mô phỏng

Kí hiệu	Mái hiên	BXMT hướng				Đón gió			Tổng	Vị trí đại diện
		Đông	Tây	Nam	Bắc	Tây -Nam	Đông - Nam	Đông -Bắc		
BT1	1	-1	-1		-2		1	1	-1	
	2		-1	-1			1		-1	
	3		-1	-1	-2	1	1		-2	
BT2	1	-2	-2	-1		1	1		-2	
	2		-1		-1			1	-1	
	3			-1	-1			1	-1	
	4	-1			-1	1		1	0	
	5	1	-2	-2		1			-2	
	6	1		-1	-2		1	1	0	
BT3	1	-1		-2		1	1	1	1	✓
	2	-2	-2				1		-2	✓
	3		-1		-1			1	-1	✓
	4			-1	-1		1	1	0	✓
	5	-1		-1				1	-1	✓
	6	-2	-2			1			-3	✓
	7	1	-1	-2		1	1		0	✓
BT4	1	-1		-2			1	1	0	
	2	-2	-2				1	1	-2	
	3		-1		-1				-2	
	4	-2	-2				1		-3	
	5		-1					1	-1	
	6			-2	-2				-3	
	7	-1		-2	-2	1	1	1	-2	

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Trong các nghiên cứu trước đây, nhiều phương pháp khác nhau đã được áp dụng để đánh giá hiệu quả năng lượng của vỏ bao che công trình. Chiradeja and Ngaopitakkul (2019) đã dùng phương pháp nghiên cứu định lượng với tiếp cận mô phỏng năng

lượng bằng phần mềm Building Energy Code kết hợp phân tích kinh tế dựa trên IRR để đánh giá hiệu quả cải tạo vỏ bao che trường học tại Thái Lan.

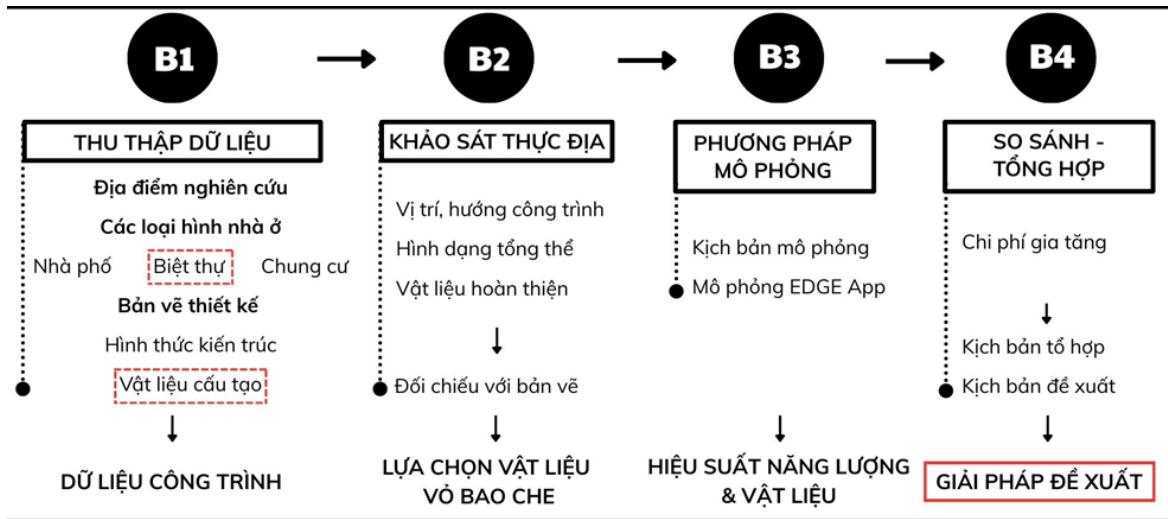
Đối với các nghiên cứu ứng dụng khung đánh giá EDGE, Rizo-Maestre et al. (2026) đã kết hợp EDGE App với dữ liệu khảo sát thực tế để đánh giá

hiệu quả năng lượng của các giải pháp cải tạo vỏ bao che cho nhà ở xã hội trong điều kiện khí hậu nóng ẩm tại Colombia, qua đó đề xuất các giải pháp thiết kế phù hợp với bối cảnh địa phương. Tương tự, Cabrera-Garcia et al. (2024) đã sử dụng EDGE App kết hợp với mô hình thông tin công trình (Revit) để mô phỏng ảnh hưởng của các thành phần vỏ bao che đến hiệu quả năng lượng của nhà ở dân cư. Nghiên cứu được thực hiện tập trung vào việc thay đổi các thông số vật liệu và cấu tạo vỏ, qua đó đánh giá mức độ cải thiện hiệu quả năng lượng đạt được.

Mặt khác, trong số các hệ thống đánh giá công trình xanh, EDGE được xem là tiêu chuẩn quốc tế phù hợp với các quốc gia đang phát triển như Việt Nam. Trên thực tế, kết quả nhiều công trình đạt

chuẩn EDGE đã ghi nhận tiết kiệm được 15 - 30% năng lượng và nước tiêu thụ, giúp cắt giảm đáng kể chi phí vận hành lâu dài (Net Zero Solutions, 2025). Với sự hỗ trợ của IFC và số lượng dự án ngày càng tăng tại Việt Nam, EDGE được xem là tiêu chuẩn khả thi, góp phần nâng cao giá trị công trình và đảm bảo tính hội nhập với xu thế phát triển công trình xanh trên thị trường quốc tế.

Để đánh giá một cách toàn diện và có hệ thống các giải pháp vật liệu vỏ bao che biệt thự, nghiên cứu kế thừa và chọn lọc các phương pháp đã được sử dụng trong các nghiên cứu trước, bao gồm thu thập dữ liệu, khảo sát thực địa, mô phỏng năng lượng và so sánh – tổng hợp để đề xuất nhóm giải pháp phù hợp (Hình 7).



Hình 7. Phương pháp và các bước thực hiện

Cụ thể, phương pháp thu thập dữ liệu gồm việc tổng hợp các thông tin liên quan đến địa điểm nghiên cứu, mẫu biệt thự, cấu tạo vỏ bao che, đặc biệt là bản vẽ thiết kế, làm cơ sở để xác định và lựa chọn nội dung nghiên cứu. Đây là giai đoạn đầu của quá trình nghiên cứu, được thực hiện trước quá trình khảo sát thực địa. Bản vẽ được thu thập từ nhiều nguồn khác nhau, bao gồm các phối cảnh của dự án, file sao lưu gốc của hồ sơ bản vẽ thi công do các bên liên quan cung cấp. Trường hợp bản vẽ thiếu hoặc hiện trạng có thay đổi, nghiên cứu tiến hành bổ sung thông tin thông qua việc khảo sát thực tế để cập nhật.

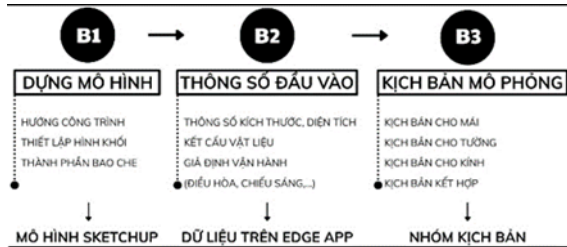
Phương pháp khảo sát thực địa công trình được sử dụng nhằm thu thập các thông tin thực tế của công trình nghiên cứu mà bản vẽ thiết kế không thể hiện đầy đủ hoặc có sự sai lệch so với hiện trạng xây dựng. Đây là phương pháp quan trọng giúp kiểm chứng tính chính xác của bản vẽ thu thập được.

Đồng thời bổ sung, cập nhật lại các dữ liệu thực tế không có trong hồ sơ thiết kế hoặc đã được thay đổi so với thiết kế. Việc khảo sát được tiến hành vào ngày 20/09/2025, sau khi hoàn thành việc thu thập bản vẽ. Kết quả của quá trình khảo sát là dữ liệu hiện trạng công trình đã được kiểm chứng, làm cơ sở cho các bước phân tích và nghiên cứu tiếp theo.

Phương pháp mô phỏng được sử dụng nhằm đánh giá mức tiết kiệm năng lượng và mức tiết kiệm vật liệu (đại diện cho năng lượng tích hợp trong vật liệu) của công trình.

Trong nghiên cứu này, phần mềm Sketchup đã được sử dụng để dựng mô hình dựa trên dữ liệu từ bản vẽ và khảo sát thực địa. Mô hình này cho phép xác định các thông số thiết kế như kích thước, diện tích các thành. Các thông số kỹ thuật chuẩn hóa được nhập vào EDGE App để thiết lập mô hình công trình hiện trạng. Trong đó, các hệ số đặc trưng của

vật liệu được lựa chọn theo các giá trị tham chiếu trong QCVN 09:2017/BXD nhằm đảm bảo tính phù hợp với tiêu chuẩn. Từ mô hình hiện trạng đã thiết lập trên EDGE App, việc xác định các biến mô phỏng liên quan đến lớp vỏ công trình đã được tiến hành, bao gồm các thay đổi về vật liệu của tường, mái và hệ cửa/kính. Các kịch bản mô phỏng được thiết lập thông qua việc thay đổi vật liệu và cấu tạo tường, mái và hệ cửa/kính, phù hợp với khí hậu nhiệt đới ẩm.



Hình 8. Quy trình mô phỏng

Cuối cùng, việc phân tích chi phí gia tăng cho từng kịch bản cũng đã được tiếp tục thực hiện, qua đó việc kết hợp kết quả mô phỏng EDGE đã được tiến hành nhằm so sánh và lựa chọn tổ hợp giải pháp vỏ bao che đáp ứng đồng thời ba tiêu chí: hiệu quả năng lượng, giảm tác động vật liệu đến môi trường với chi phí đầu tư hợp lý.

Phương pháp nghiên cứu này kết hợp ưu điểm của các nghiên cứu trước đây và khắc phục hạn chế của các nghiên cứu chỉ tập trung vào một khía cạnh đơn lẻ, qua đó cung cấp cơ sở khoa học cho việc đề xuất các giải pháp vật liệu vỏ bao che hiệu quả năng lượng và bền vững trong điều kiện địa phương.

3. TÍNH TOÁN VÀ KẾT QUẢ

3.1. Dữ liệu về công trình

3.1.1. Dữ liệu khí hậu

Trong nghiên cứu này, dữ liệu khí hậu được sử dụng cho mô phỏng trong EDGE App được lấy từ bộ dữ liệu khí hậu có sẵn của thành phố Cần Thơ, do phần mềm chỉ cho phép lựa chọn một số đô thị đại diện. Cần Thơ được chọn nhằm phản ánh đặc trưng khí hậu nhiệt đới gió mùa của vùng Đồng bằng sông Cửu Long, tương đồng với khu vực nghiên cứu tại Vĩnh Long. Theo dữ liệu EDGE, lượng mưa trung bình năm khoảng 2.095 mm, độ cao địa hình khoảng 10 m so với mực nước biển, vùng khí hậu được phân loại theo ASHRAE là 4A (nóng ẩm). Nhiệt độ không khí trung bình tháng dao động từ khoảng 31,6 °C đến 35,8 °C, với các giá trị cao tập trung vào các tháng mùa khô và đầu mùa mưa. Độ ẩm tương đối trung bình tháng luôn ở mức cao, phổ

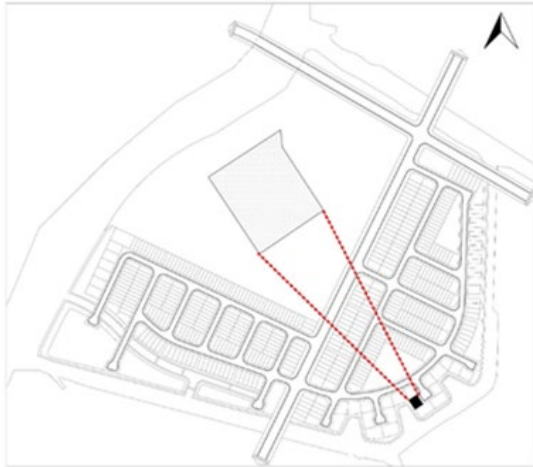
biến trong khoảng 72 – 83%, phản ánh đặc trưng khí hậu nóng ẩm quanh năm. Tốc độ gió trung bình tháng dao động khoảng 1,4 – 2,4 m/s, cho thấy tiềm năng thông gió tự nhiên ở mức trung bình. Bộ dữ liệu này được sử dụng làm đầu vào thống nhất cho các kịch bản đánh giá nhằm đảm bảo tính nhất quán và khả năng so sánh kết quả trong quá trình phân tích hiệu quả năng lượng công trình (Bảng 2).

Bảng 2. Dữ liệu về khí hậu cho công trình (EDGE APP,2025)

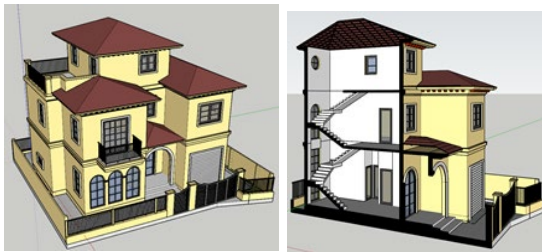
Tháng	Nhiệt độ (°C)		Vùng khí hậu 4A	
	tối đa	tối thiểu	Độ ẩm (%)	Tốc độ gió (m/giây)
	1	31,6	20,0	72,3
2	32,4	21,2	75,3	1,8
3	34,2	22,5	76,7	1,9
4	34,7	23,8	80,2	2,0
5	35,8	23,3	78,2	2,0
6	34,7	22,8	82,5	2,1
7	34,3	22,1	79,8	2,4
8	33,6	22,8	81,8	2,3
9	33,0	22,3	83,3	2,1
10	32,8	22,3	78,7	1,5
11	31,7	21,7	78,0	1,4
12	32,3	20,5	76,4	1,6

3.1.2. Thông số thiết kế

Công trình nghiên cứu là nhà ở biệt thự ở riêng lẻ, trong giai đoạn xây dựng mới, tọa lạc tại khu dân cư Phước Thọ, tỉnh Vĩnh Long. Có diện tích đất 195,7 m² và tổng diện tích sàn xây dựng khoảng 248 m² (Hình 9), gồm 03 tầng trên mặt đất và không có hầm (Hình 10). Các không gian chức năng của công trình gồm bốn phòng ngủ, phòng khách và khu bếp, cơ bản đáp ứng nhu cầu sử dụng cho khoảng 5 người, phù hợp với mô hình hộ gia đình điển hình hiện nay (Hình 11). Chiều cao trung bình mỗi tầng khoảng 3,4 m, kích thước mặt bằng công trình khoảng 10 × 12 m với mặt đứng chính quay về hướng Đông – Bắc (cạnh dài), bảo đảm không gian sử dụng tương đối thông thoáng. Hệ thống ĐHKK được sử dụng cho các không gian chính, phù hợp với điều kiện khí hậu nóng ẩm quanh năm của khu vực nghiên cứu. Nguồn năng lượng được sử dụng cho toàn bộ công trình chủ yếu là điện năng, ngoài ra có máy phát điện sử dụng nhiên liệu dầu diesel nhằm phục vụ nhu cầu dự phòng khi mất điện.



Hình 9. Vị trí căn biệt thự mô phỏng



Hình 10. Hình thức kiến trúc biệt thự mô phỏng



Hình 11. Mặt bằng layout các tầng

Bảng 3. Thông số thiết kế

Thông tin	Thông số	Giá trị	Cách xác định
Quy mô công trình	Số tầng trên mặt đất	3 tầng	Hồ sơ bản vẽ thi công
	Số tầng dưới mặt đất	0	
	Chiều cao các tầng	3,4m	Sketchup Dựa trên số phòng ngủ
	Tổng diện tích sàn	248m ²	
	Số người	5	
Tổng thể tòa nhà	Hướng chính	Đông – Bắc	Hồ sơ bản vẽ thi công
	Đông Bắc	12,080 m	
	Đông Nam	9,780 m	
	Tây Nam	12,080 m	
Diện tích mái	Tây Bắc	9,780 m ²	Sketchup
	Mái dốc	117,15 m ²	
	Mái bằng	15,35 m ²	
	Đông Bắc	95,92 m ²	
	Đông Nam	75,08 m ²	
	Tây Nam	88,47 m ²	
Diện tích cửa	Tây Bắc	80,12 m ²	Sketchup
	Đông Bắc	95,92 m ²	
	Đông Nam	4,7 m ²	
	Tây Nam	21,31 m ²	
Ti lệ kính/tường	Tây Bắc	4,18 m ²	Sketchup
	Toàn công trình	11,3%	
Điều hòa	Phòng ngủ, sinh hoạt	Có	Hồ sơ bản vẽ thi công
	Không gian còn lại	Không	

Lớp vỏ bao che của biệt thự có hệ mái gồm hai loại chính là mái dốc và mái bằng. Mái dốc 117,15 m² chiếm 89% lợp tôn trên hệ li tô và cầu phong thép hộp, đáp ứng yêu cầu che chắn, thoát nước mưa và tạo hình kiến trúc cho công trình. Mái bằng 11% còn lại là ban công phía trên các phòng ngủ, được cấu tạo bằng BTCT dày 150 mm, hoàn thiện bằng gạch ceramic nhám. Tường bao ngoài xây gạch dày khoảng 210 mm, trát vữa xi măng và sơn nước. Hệ cửa gồm cửa cuốn tại gara và các cửa đi, cửa sổ sử dụng khung nhôm dày 1,4 mm kết hợp kính trắng trong dày 6,38 mm. Diện tích cửa kính được thống kê theo từng hướng, với tổng diện tích kính là 43,23 m², trong đó hướng Tây Nam có tỷ lệ cửa lớn hơn so với các hướng còn lại. Tỷ lệ cửa sổ trên tường (WWR) của toàn công trình đạt khoảng 11,3%, nằm ở mức tương đối thấp, phù hợp với điều kiện khí hậu nóng ẩm và có lợi cho việc kiểm soát tải nhiệt mặt đứng trong quá trình vận hành (Bảng 3).

3.1.3. Thông số hiệu năng

Các thông số hiệu năng năng lượng của công trình biệt thự được xác định dựa trên thông số đặc tính nhiệt của vật liệu, hệ thống điều hòa không khí và hệ thống chiếu sáng theo hồ sơ thiết kế, làm cơ sở cho việc thiết lập mô hình năng lượng trong EDGE App.

Từ cấu tạo vật liệu, các thông số đặc trưng về tính năng nhiệt được xác định thông qua hệ số dẫn nhiệt (λ) theo quy định của QCVN 09:2017/BXD làm dữ liệu đầu vào cho mô phỏng năng lượng trong EDGE App. Ảnh hưởng của lớp hoàn thiện bề mặt được xét thông qua chỉ số phản xạ bức xạ mặt trời (SRI), trong đó sơn tường màu vàng nhạt có SRI = 83 và mái tôn màu đỏ đậm có SRI = 40.

Hệ thống điều hòa sử dụng các thiết bị điều hòa cục bộ với nhiều mức công suất khác nhau. Cụ thể,

Bảng 5. Công suất chiếu sáng

Chức năng	Diện tích (m ²)	Loại	Số lượng	Công suất (W/m ²)
Phòng ngủ	69,85	9W	19	2,44
Khu bếp	10,28	9W	3	2,62
Phòng ăn	16,09	9W	6	4,28
Phòng khách	19,65	9W	1	3,44
		9W	6	3,2
		9W	7	
Tiện ích	61,00	9W	11	4,08
		15W	4	
		18W	2	
Ban công	6,65	15W	3	13,53
Cầu thang	28,14	15W	6	1,06
Gara	20,65	9W	2	3,48

Đối với hệ thống chiếu sáng, công trình sử dụng chủ yếu các loại đèn LED, bao gồm đèn LED downlight 9 W, đèn bàn ăn 15 W, đèn ốp trần 18 W và đèn tuýp LED 1,2 m (18 W). Mật độ công suất chiếu sáng (LPD) được tính toán cho từng không gian chức năng trên cơ sở tổng công suất đèn và diện tích phòng. Kết quả cho thấy mật độ chiếu sáng trong các không gian sinh hoạt chính như phòng ngủ, phòng khách, phòng ăn và khu bếp dao động trong khoảng từ 2,4 đến 4,3 W/m², phù hợp với xu hướng sử dụng đèn trong nhà ở. Một số khu vực đặc thù như ban công có mật độ công suất chiếu sáng cao hơn do yêu cầu chiếu sáng ngoài trời (Bảng 5).

3.2. Nghiên cứu lựa chọn kịch bản cải tạo vật liệu vỏ bao che

Hiện trạng (HT) là kịch bản cơ sở của nghiên cứu, bao gồm diện tích, số tầng, chiều cao được thu thập thông qua quá trình khảo sát kết hợp với hồ sơ bản vẽ thi công. Tường ngoài (210 mm) xây gạch

các thiết bị có công suất thiết kế từ 9.000 đến 24.000 BTU/h, với tổng số 6 bộ điều hòa. Hiệu suất năng lượng của các thiết bị được thể hiện thông qua hệ số hiệu quả năng lượng (COP), trong đó COP của từng thiết bị dao động từ 2,8 đến 3,1; COP trung bình của toàn hệ thống đạt khoảng 2,9, phản ánh mức hiệu suất phổ biến của các thiết bị điều hòa dân dụng hiện nay (Bảng 4).

Bảng 4. Hiệu suất hệ thống làm mát

Công suất thiết kế (BTU/h)	Số lượng (Bộ)	Năng suất lạnh (kW)	COP (kW/kW)
9.000	1	2,637	3,1
12.000	2	3,516	3,1
18.000	1	5,274	3
24.000	2	7,032	2,8
COP TRUNG BÌNH (6 bộ)			2,9

rỗng đất sét nung ($\lambda=0,52$) trát 2 mặt và sơn nước hoàn thiện trong – ngoài, mặt ngoài tường sơn màu vàng nhạt. Mái gồm 2 loại: mái tôn ($\lambda=58$) chiếm 89%, với cấu tạo gồm lớp tôn trên hệ cầu phong – li tô; 11% còn lại là mái bằng BTCT ($\lambda=1,55$) dày 150 mm và lát gạch ceramic hoàn thiện. Hệ cửa/kính khung nhôm, kính trắng trong dày 6,38 mm. Kịch bản này được dùng làm cơ sở để so sánh với các kịch bản khác. Các kịch bản cho vật liệu vỏ bao che được sử dụng phù hợp cho vùng ĐBSCL được phân thành 3 nhóm: mái, tường và hệ cửa/kính.

Kịch bản cho mái gồm: (M_1) thêm lớp sơn phản xạ màu trắng với SRI = 90, (M_2) thay thế vật liệu mái tôn ban đầu thành mái ngói, (M_3) thêm lớp gạch rỗng để chống nóng cho mái bằng và cuối cùng là (M_4) dùng xốp cách nhiệt XPS cho cả hai loại mái.

Kịch bản cho tường gồm: (T_1) thêm lớp sơn phản xạ màu trắng với SRI = 90 và thay đổi vật liệu

tường từ gạch rỗng đất sét nung sang: gạch bê tông bọt khí (T_2), gạch bê tông chưng khí áp AAC (T_3), tường Panel (T_4) với chiều dày tường vẫn giữ nguyên cho tất cả các kịch bản.

Hiện trạng hệ cửa/kính đang được sử dụng là khung nhôm, vật liệu có độ bền và khả năng truyền nhiệt thấp hơn so với sắt, thép. Do đó, nghiên cứu được thực hiện chỉ hướng đến việc cải thiện hiệu suất kính. Kịch bản thay đổi vật liệu kính: (C_1)

kính 1 lớp dày 8,38 mm, (C_2) kính 2 lớp dày 8,38 mm có lớp dán và (C_3) kính 2 lớp với lớp khí Argon dày 19 mm.

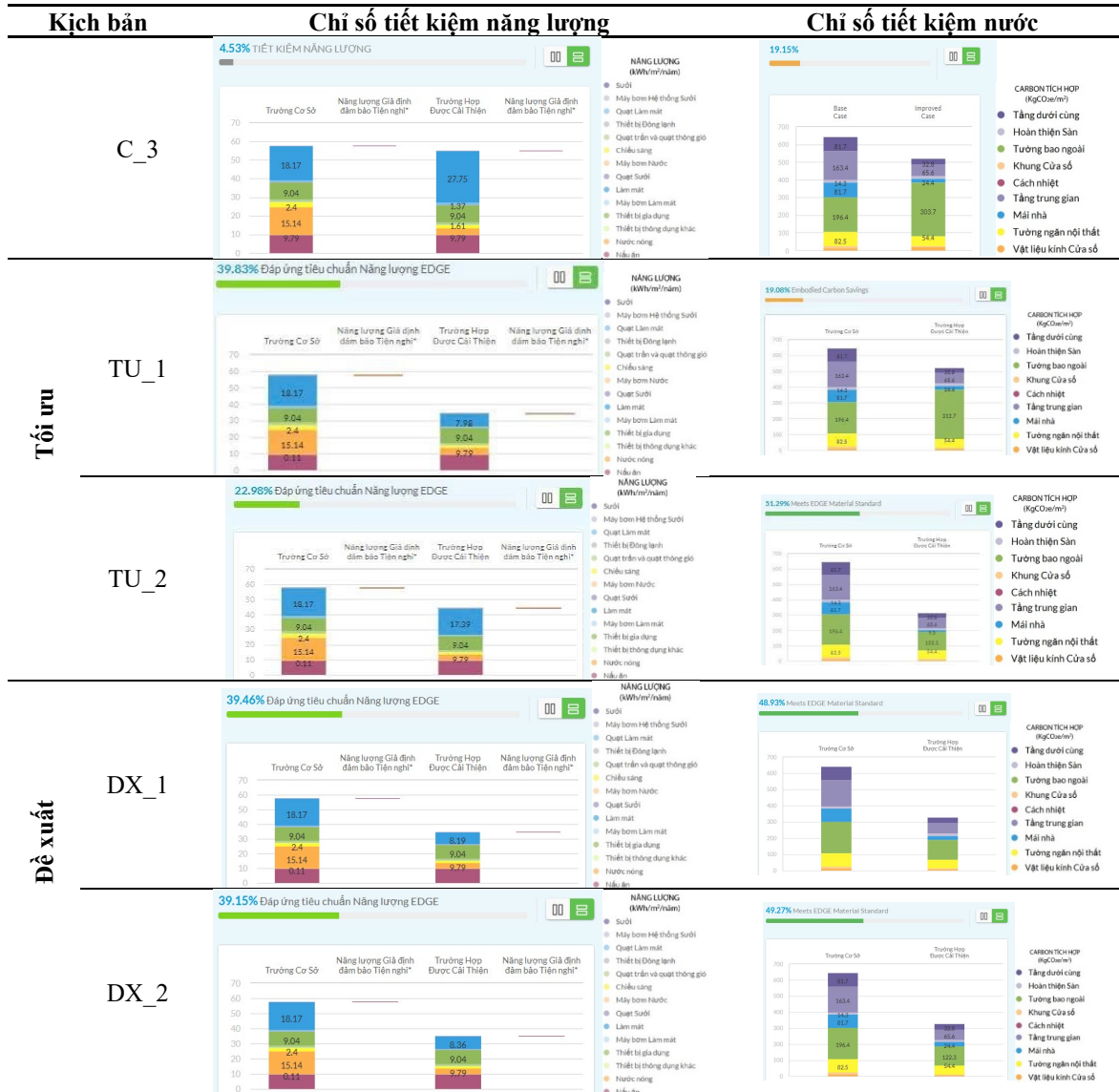
3.3. Mô phỏng khả năng tiết kiệm

Kịch bản hiện trạng (HT) được lựa chọn làm mốc so sánh, với mức tiết kiệm năng lượng đạt 4,22% và tiết kiệm vật liệu đạt 21,25% được đánh giá theo EDGE. Kết quả mô phỏng của các kịch bản được thể hiện ở (Bảng 6).

Bảng 6. Kết quả mô phỏng các kịch bản

Kịch bản	Chỉ số tiết kiệm năng lượng	Chỉ số tiết kiệm nước
Hiện trạng HT	4.22% TIẾT KIỆM NĂNG LƯỢNG NĂNG LƯỢNG (kWh/m ² /năm) Trường Cơ Sở: 18.17, 9.04, 2.4, 15.14, 9.77 Năng lượng Giả định đảm bảo Tiện nghi*: 9.04 Trường Hợp Được Cải Thiện: 27.91, 1.37, 9.04, 1.61, 9.77 Năng lượng Giả định đảm bảo Tiện nghi*: 1.37	21.25% Meets EDGE Material Standard CARBON TÍCH HỢP (kgCO ₂ /m ²) Base Case: 657.7, 163.4, 81.7, 196.4, 82.5 Improved Case: 465.6, 94.4, 300.7, 54.4
M_1	17.05% TIẾT KIỆM NĂNG LƯỢNG NĂNG LƯỢNG (kWh/m ² /năm) Trường Cơ Sở: 18.17, 9.04, 2.4, 15.14, 9.77 Năng lượng Giả định đảm bảo Tiện nghi*: 9.04 Trường Hợp Được Cải Thiện: 20.69, 1.61, 9.04, 1.61, 9.77 Năng lượng Giả định đảm bảo Tiện nghi*: 1.61	21.25% Meets EDGE Material Standard CARBON TÍCH HỢP (kgCO ₂ /m ²) Base Case: 657.7, 163.4, 81.7, 196.4, 82.5 Improved Case: 465.6, 94.4, 300.7, 54.4
M_2	18.62% TIẾT KIỆM NĂNG LƯỢNG NĂNG LƯỢNG (kWh/m ² /năm) Base Case: 18.17, 9.04, 2.4, 15.14, 9.77 Virtual Energy for Comfort: 19.86, 1.37, 9.04, 1.61, 9.77 Improved Case: 19.86, 1.37, 9.04, 1.61, 9.77 Virtual Energy for Comfort: 1.37	23.55% Meets EDGE Material Standard CARBON TÍCH HỢP (kgCO ₂ /m ²) Trường Cơ Sở: 657.7, 163.4, 81.7, 196.4, 82.5 Trường Hợp Được Cải Thiện: 465.6, 94.4, 300.7, 54.4
Mái	4.76% TIẾT KIỆM NĂNG LƯỢNG NĂNG LƯỢNG (kWh/m ² /năm) Trường Cơ Sở: 18.17, 9.04, 2.4, 15.14, 9.77 Năng lượng Giả định đảm bảo Tiện nghi*: 9.04 Trường Hợp Được Cải Thiện: 27.61, 1.37, 9.04, 1.61, 9.77 Năng lượng Giả định đảm bảo Tiện nghi*: 1.37	21.01% Meets EDGE Material Standard CARBON TÍCH HỢP (kgCO ₂ /m ²) Trường Cơ Sở: 657.7, 163.4, 81.7, 196.4, 82.5 Trường Hợp Được Cải Thiện: 465.6, 94.4, 300.7, 54.4
M_3	35.07% Đáp ứng tiêu chuẩn Năng lượng EDGE NĂNG LƯỢNG (kWh/m ² /năm) Trường Cơ Sở: 18.17, 9.04, 2.4, 15.14, 9.77 Năng lượng Giả định đảm bảo Tiện nghi*: 9.04 Trường Hợp Được Cải Thiện: 10.65, 1.37, 9.04, 1.61, 9.77 Năng lượng Giả định đảm bảo Tiện nghi*: 1.37	21.20% Meets EDGE Material Standard CARBON TÍCH HỢP (kgCO ₂ /m ²) Trường Cơ Sở: 657.7, 163.4, 81.7, 196.4, 82.5 Trường Hợp Được Cải Thiện: 465.6, 94.4, 300.7, 54.4
M_4		





3.3.1. Về năng lượng

Kết quả cho thấy các giải pháp thay đổi vật liệu vỏ bao che mang lại mức cải thiện rõ rệt (Bảng 7). Trong đó, chỉ số tiết kiệm năng lượng so với base case Edge là chỉ số của từng kịch bản sau mô phỏng, còn đối với chỉ số tiết kiệm năng lượng so với hiện trạng là chỉ số của từng kịch bản sau khi trừ kịch bản hiện trạng.

Kết quả nghiên cứu cho thấy được các kịch bản cho mái (M) có tác động lớn đến mức tiết kiệm năng lượng, cao nhất là kịch bản (M_4) dùng xốp cách nhiệt XPS tăng 30,85% so với hiện trạng, giúp công trình đạt EDGE Certified ở mức năng lượng theo đánh giá của EDGE, thấp nhất là kịch bản (M_3) thêm lớp gạch rỗng cho 11% mái bằng chỉ tăng thêm

0,54%, các kịch bản (M_1) (M_2) cho thấy khả năng cải thiện ở mức tương đối, tăng 12,83% đối với kịch bản dùng sơn phản xạ (M_1) và tăng 14,40% ở kịch bản mái lợp ngói (M_2).

Ngược lại, các kịch bản cho kính có mức cải thiện không đáng kể, mặc dù mô phỏng cả ba loại kính với các thông số hiệu năng khác nhau nhưng lại cho ra cùng một kết quả tiết kiệm năng lượng là 0,31% cho cả 3 trường hợp (C_1), (C_2) và (C_3). Một phần do đây là công trình biệt thự có diện tích kính không quá lớn nên mặc dù thay đổi kính có hiệu năng hơn vẫn không gây tác động lớn đến khả năng tiết kiệm năng lượng của công trình.

Các kịch bản cho tường mang lại mức tiết kiệm năng lượng không cao như mái. Hiệu quả lớn nhất ở

tường Panel (T_4) với khả năng tiết kiệm tăng 4,39%, có mức tăng xấp xỉ, đó là tường gạch bê tông chung khí áp AAC (T_3) tăng 4,25%. Tường gạch bê tông bọt khí (T_2) chỉ cải thiện thêm 1.36% và thấp nhất là tường sơn phân xạ (tăng 0,57%).

Nhìn chung, kết quả mô phỏng cho thấy sự khác biệt đáng kể giữa các kịch bản. Các giải pháp cải tạo mái, đặc biệt là xốp XPS có tác động lớn nhất đến khả năng tiết kiệm năng lượng tăng 30,85%, tiếp đến là các giải pháp cho tường tăng 0,57% - 4,39% và mang lại hiệu quả tiết kiệm thấp nhất là nhóm giải pháp cho kính chỉ tăng 0,31% ở các kịch bản.

Bảng 7. Tổng hợp – so sánh kết quả mô phỏng năng lượng

Kịch bản	Mô tả	Tiết kiệm năng lượng so với		Mức độ tác động	Tác động hình thức kiến trúc	Chứng nhận EDGE
		Base case Edge	Hiện trạng			
<i>Tường: gạch rỗng đất sét nung</i>						
HT	<i>Mái: 89% mái tôn 11% mái bằng BTCT</i>	4,22%	–	–	–	Chưa đạt
<i>Cửa sổ/kính: Kính 1 lớp 6,38mm</i>						
M_1	<i>Sơn phản xạ SRI=90</i>	17,05%	12,83%	2	Có	Chưa đạt
M_2	<i>89% mái lợp ngói</i>	18,62%	14,40%	3	Có	Chưa đạt
M_3	<i>11% mái BTCT, có gạch rỗng</i>	4,76%	0,54%	4	Không	Chưa đạt
M_4	<i>Xốp cách nhiệt XPS</i>	35,07%	30,85%	1	Không	EDGE Certified
T_1	<i>Sơn phản xạ SRI=90</i>	4,79%	0,57%	4	Có	
T_2	<i>Gạch bê tông bọt khí</i>	5,58%	1,36%	3	Không	Chưa đạt
T_3	<i>Gạch bê tông AAC</i>	8,47%	4,25%	2	Không	
T_4	<i>Tường Panel</i>	8,61%	4,39%	1	Không	
C_1	<i>Kính 1 lớp 8, 38mm</i>	4,53%	0,31%	2	Không	
C_2	<i>Kính 2 lớp dán PVB 8,38mm</i>	4,53%	0,31%	2	Không	Chưa đạt
C_3	<i>Kính 2 lớp có lớp khí Argon 19mm</i>	4,53%	0,31%	2	Không	

3.3.2. Về vật liệu (năng lượng tích hợp trong vật liệu)

Kết quả mô phỏng cho phép phân loại các kịch bản nghiên cứu thành ba nhóm chính dựa trên mức độ ảnh hưởng đến chỉ số tiết kiệm vật liệu so với hiện trạng (Bảng 8). Trong đó, chỉ số tiết kiệm năng lượng so với base case Edge là chỉ số của từng kịch bản sau mô phỏng, còn đối với chỉ số tiết kiệm năng lượng so với hiện trạng là chỉ số của từng kịch bản sau khi trừ kịch bản hiện trạng.

Nhóm các kịch bản không được EDGE ghi nhận trong hạng mục vật liệu. Cụ thể, các kịch bản M_1 (sơn phản xạ cho mái), T_1 (sơn phản xạ cho tường), đều cho kết quả tiết kiệm vật liệu đạt 21,25%, tương đương hiện trạng. Điều này cho thấy các giải pháp sơn phản xạ có hiệu quả đối với năng lượng vận hành, nhưng không tác động đến năng lượng tích hợp trong vật liệu của vỏ bao che.

Nhóm các kịch bản bổ sung lớp vật liệu cấu tạo. Nhóm này bao gồm các giải pháp làm tăng

khối lượng hoặc độ phức tạp của cấu kiện, từ đó làm giảm hiệu quả tiết kiệm vật liệu so với hiện trạng. Cụ thể, kịch bản M_3 và M_4 làm chỉ số tiết kiệm vật liệu lần lượt giảm 0,24%, và 0,05%. Trong khi đó, kịch bản T_4 (tường Panel) cho mức giảm lớn hơn, lên tới 1,79%. Tương tự, các kịch bản kính có chiều dày lớn hơn hiện trạng đều làm giảm hiệu quả vật liệu. Trong đó, C_3 giảm nhiều nhất (tới 2,10%). Kết quả này cho thấy việc bổ sung vật liệu cấu tạo, dù cải thiện cách nhiệt, lại làm tăng lượng carbon tích hợp, do đó làm giảm chỉ số tiết kiệm vật liệu.

Nhóm các kịch bản sử dụng vật liệu hiệu quả về vòng đời, phản ánh rõ nhất cách tiếp cận đánh giá vật liệu của EDGE, trong đó ưu tiên các vật liệu có năng lượng hàm chứa thấp, tuổi thọ cao và ít tác động đến môi trường. Kết quả mô phỏng cho thấy kịch bản M_2 (89% mái lợp ngói) cải thiện chỉ số tiết kiệm vật liệu thêm 2,30% so với hiện trạng. Trong khi đó, các kịch bản thay đổi vật liệu tường đạt hiệu quả vượt trội, với T_2 (tường gạch

bê tông bọt khí) đạt mức tăng 26,39% và T_3 (tường gạch bê tông chung khí áp AAC) tăng cao nhất 28,07%. Điều này cho thấy việc thay thế vật liệu truyền thống có tác động môi trường lớn bằng

các vật liệu nhẹ, thân thiện môi trường và hiệu quả về vòng đời có thể nâng cao đáng kể chỉ số tiết kiệm vật liệu.

Bảng 8. Tổng hợp – so sánh kết quả mô phỏng vật liệu

Kịch bản	Mô tả	Tiết kiệm vật liệu so với		Mức độ tác động	Tác động hình thức kiến trúc	Chứng nhận EDGE
		Base case Edge	Hiện trạng			
<i>Tường: gạch rỗng đất sét nung</i>						
<i>Mái: 89% mái tôn</i>						
HT	11% mái bằng BTCT	21,25%	–	–	–	Chưa đạt
<i>Cửa sổ/kính: Kính 1 lớp 6,38mm</i>						
M_1	Sơn phản xạ SRI=90	21,25%	0,00%	2	Có	Chưa đạt
M_2	89% mái lợp ngói	23,55%	2,30%	1	Có	Chưa đạt
M_3	11% mái BTCT, có gạch rỗng	21,01%	-0,24%	4	Không	Chưa đạt
M_4	Xốp cách nhiệt XPS	21,20%	-0,05%	3	Không	EDGE Certified
T_1	Sơn phản xạ SRI=90	21,25%	0,00%	3	Có	
T_2	Gạch bê tông bọt khí	47,64%	26,39%	2	Không	Chưa đạt
T_3	Gạch bê tông AAC	49,32%	28,07%	1	Không	
T_4	Tường Panel	19,46%	-1,79%	4	Không	
C_1	Kính 1 lớp 8,38mm	20,92%	-0,33%	2	Không	
C_2	Kính 2 lớp dán PVB 8,38mm	20,92%	-0,33%	2	Không	
C_3	Kính 2 lớp có lớp khí Argon 19mm	19,15%	-2,10%	3	Không	Chưa đạt

3.3.3. Tổ hợp nhóm kịch bản tối ưu

Sau khi đánh giá mức độ tác động của từng giải pháp riêng lẻ, việc lựa chọn và kết hợp các giải pháp có hiệu quả cao nhất của từng cấu kiện đã được tiến hành để xây dựng nhóm các kịch bản tối ưu. Trong đó, kịch bản TU_1 (M_4 + T_4 + C_1) được xác định là phương án mang lại hiệu quả tiết kiệm năng lượng tăng lên đến 35,61%, trong khi kịch bản TU_2 (M_2 + T_3 + C_1) cho hiệu quả tiết kiệm vật liệu tăng cao nhất là 30,04%.

3.4. Đề xuất giải pháp

3.4.1. Kịch bản đề xuất

Dữ liệu chi phí trong nghiên cứu được tổng hợp từ đơn giá vật liệu thị trường, suất đầu tư tham khảo và các định mức dự toán hiện hành, phù hợp với điều kiện khu vực Đồng bằng sông Cửu Long. Tất cả chi phí được quy đổi về năm tham chiếu 2025 tại Vĩnh Long nhằm đảm bảo tính thống nhất khi so sánh. Trên cơ sở đó, công trình hiện trạng (HT) được khái toán với tổng chi phí xây dựng là 1.761.574 triệu đồng. Các giả định về khối lượng, nhân công và vận chuyển được áp dụng đồng nhất cho các kịch bản.

Trong phạm vi nghiên cứu này, việc phân tích chi phí vòng đời (LCC) hoặc ước lượng thời gian hoàn vốn cho các kịch bản chưa được triển khai chi tiết do hạn chế về dữ liệu vận hành dài hạn và các giả định liên quan đến biến động giá năng lượng, vòng đời thiết bị. Nội dung này được đề xuất là hướng nghiên cứu tiếp theo nhằm đánh giá toàn diện hơn hiệu quả kinh tế của các giải pháp.

Ở nhóm kịch bản các giải pháp riêng lẻ, chi phí đầu tư cho các kịch bản tăng từ 0,2% đến 5,25%. Cụ thể, nhóm kịch bản cho mái vừa có khả năng tiết kiệm năng lượng cao vừa có chi phí gia tăng thấp. Trong đó, chi phí cao nhất là mái lợp ngói (M_2) tăng 1,18%, các kịch bản còn lại chỉ tăng khoảng 0,17% - 0,54% so với công trình hiện trạng. Các giải pháp cho tường tuy không mang lại hiệu quả về tiết kiệm năng lượng cao như mái nhưng đây lại là các kịch bản có hiệu quả cao về vật liệu cũng như chi phí, trong đó tường Panel tăng đến 5,25%, các kịch bản còn lại có chi phí tăng từ 1,84% đến 2,49%, vẫn ở mức cao so với các kịch bản cho cấu kiện khác. Kịch bản cho kính cũng có chi phí gia tăng đáng kể,

ngoài kịch bản (C_1) chỉ tăng 0,20% thì những kịch bản còn lại tăng từ 1,05% đến 1,90% (Bảng 9).

Bảng 9. Chi phí đầu tư ban đầu các kịch bản riêng lẻ

Kịch bản	Hiệu quả tiết kiệm so với hiện trạng		Chi phí đầu tư ban đầu (đơn vị: triệu vnd)	Chênh lệch	Chi phí gia tăng		
	Năng lượng	Vật liệu					
Tường ngoài: gạch đất nung							
HT	<i>Mái: 89% mái tôn 11% mái BTCT</i>		(4,22%)	(21,25%)	1.761,574	-	-
<i>Cửa sổ: kính 1 lớp 6.38mm</i>							
Kịch bản							
M_1	<i>Sơn phân xạ SRI=90</i>		12,83%	0,00%	1.771,023	9,449	0,54%
M_2	<i>89% mái lợp ngói</i>		14,40%	2,30%	1.782,410	20,836	1,18%
M_3	<i>11% mái BTCT, có gạch rỗng</i>		0,54%	-0,24%	1.764,656	3,082	0,17%
M_4	<i>Xốp cách nhiệt XPS</i>		30,85%	-0,05%	1.765,407	3,833	0,22%
T_1	<i>Sơn phân xạ SRI=90</i>		0,57%	0,00%	1.794.065	32,491	1,84%
T_2	<i>Gạch bê tông bọt khí</i>		1,36%	26,39%	1.805,272	43,698	2,48%
T_3	<i>Gạch bê tông chung khí áp AAC</i>		4,25%	28,07%	1.805,518	43,944	2,49%
T_4	<i>Tường Panel</i>		4,39%	-1,79%	1.853,980	92,406	5,25%
C_1	<i>Kính 1 lớp 8.38mm</i>		0,31%	-0,33%	1.765,027	3,453	0,20%
C_2	<i>Kính 2 lớp dán PVB 8.38mm</i>		0,31%	-0,33%	1.780,076	18,502	1,05%
C_3	<i>Kính hộp 2 lớp có lớp khí Argon 19mm</i>		0,31%	-2,10%	1.795,124	33,550	1,90%

Trên cơ sở các kịch bản tối ưu (TU), các kịch bản đã được đề xuất (DX) nhằm cân bằng giữa năng lượng, vật liệu và chi phí đầu tư. Trong đó, DX_1 (M_4 + T_3 + C_1) có mức tiết kiệm năng lượng tăng 35,24% tương đương kịch bản TU_1 (35,61%), đồng thời đạt khả năng tiết kiệm vật liệu tăng 27,68% gần bằng kịch bản TU_2 (30,04%), nhưng với chi phí đầu tư thấp hơn đáng kể, chỉ tăng 2,91% so với nhóm kịch bản tối ưu (TU) (5,66% ở TU_1 và 3,87% ở TU_2). Điều này cho thấy DX_1 là phương án cân bằng, có thể áp dụng linh hoạt cho tất cả cấu kiện. Bên cạnh đó, DX_2 (M_4 + T_3) là phương án tối giản, tập trung vào các giải pháp có hiệu quả cao nhất về năng lượng, vật liệu với chi phí thấp mà không cần can thiệp toàn bộ lớp vỏ công trình. Khả năng tiết kiệm năng lượng chỉ tăng 34,93%, không cao bằng DX_1, nhưng lại cho hiệu quả cao hơn ở vật liệu 28,02% và chi phí chỉ tăng thêm 2,71% (Bảng 10).

Kết quả mô phỏng cho thấy kịch bản DX_1 và DX_2 đạt khoảng 34,93 – 35,24% tiết kiệm năng lượng và 27,68 – 28,02% tiết kiệm năng lượng tích hợp với chi phí tăng 2,71 – 2,91% đạt trạng thái cân bằng tối ưu do tác động đồng thời đến hệ số truyền nhiệt tổng thể (U-value) của lớp vỏ bao che. Cụ thể, với tấm cách nhiệt XPS dày 50 mm có hệ số dẫn nhiệt thấp ($\lambda \approx 0,028$ W/mK) được bố trí bên dưới

mái tôn giúp giảm đáng kể hệ số truyền nhiệt U-value mái từ 7,06 W/m²K còn 0,52 W/m²K, từ đó cắt giảm phần lớn bức xạ nhiệt xâm nhập. Đối với tường, việc sử dụng gạch AAC với hệ số dẫn nhiệt thấp $\lambda \approx 0,153$ W/mK) giúp giảm U-value tường xuống còn 0,71 W/m²K so với 1,7 W/m²K của tường gạch đất nung. Đồng thời, nhờ cấu trúc rỗng và khối lượng thể tích thấp, hạn chế tích nhiệt và phát nhiệt trở. Trong khi đó, kính 1 lớp vẫn được giữ lại do tỷ lệ tường - cửa sổ/kính ở mức trung bình (11,29%) nên tải nhiệt qua kính không chiếm ưu thế. Nếu thay bằng kính hai lớp (kính có lớp dán hoặc kính hộp) tuy có giúp giảm tải nhiệt nhưng mức cải thiện không đáng kể so với chi phí đầu tư tăng thêm, nên chưa thực sự hiệu quả về mặt kinh tế. Do đó, tổ hợp này tối ưu theo nguyên lý: giảm mạnh U-value ở các cấu kiện diện tích lớn (mái, tường) – nơi quyết định tổng tải nhiệt, vẫn chấp nhận U-value cao hơn ở cấu kiện diện tích nhỏ (kính) để đảm bảo hiệu quả chi phí. Tuy nhiên, điểm tối ưu này có giới hạn. Khi tỷ lệ cửa sổ trên tường (WWR) tăng cao (>40%) hoặc mặt đứng chịu bức xạ lớn (hướng Tây – Tây Nam), tải nhiệt qua kính cao trở thành thành phần chi phối, khi đó cần chuyển sang kính hiệu suất cao. Do đó, giải pháp này phù hợp nhất với nhà ở thấp tầng vùng nóng ẩm có WWR trung bình.

Bảng 10. Chi phí đầu tư ban đầu của các kịch bản tối ưu và đề xuất

	Kịch bản	Hiệu quả tiết kiệm so với hiện trạng		Chi phí đầu tư ban đầu (đơn vị: triệu VNĐ)	Chênh lệch	Tỉ lệ chi phí gia tăng
		Năng lượng	Vật liệu			
HT	<i>Tường ngoài: gạch đất nung</i>					
	<i>Mái: 89% mái tôn 11% mái BTCT Cửa sổ: kính 1 lớp 6,38mm</i>	(4,22%)	(21,25%)	1.761,574	-	-
Kịch bản						
TU_1	<i>Mái: Xốp cách nhiệt XPS Tường: Panel Kính: Kính 1 lớp 8,38mm Mái: 89% mái lợp ngói</i>	35,61%	-2,17%	1.861,266	99,692	5,66%
TU_2	<i>Tường: Gạch bê tông AAC Kính: Kính 1 lớp 8,38mm Mái: Xốp cách nhiệt XPS</i>	18,76%	30,04%	1.829,807	68,233	3,87%
DX_1	<i>Tường: Gạch bê tông AAC Kính: Kính 1 lớp 8,38mm Mái: Xốp cách nhiệt XPS</i>	35,24%	27,68%	1.812,805	51,23	2,91%
DX_2	<i>Tường: Gạch bê tông AAC</i>	34,93%	28,02%	1.809,351	47,78	2,71%

Xét về phát thải CO₂, với mức tiết kiệm khoảng 34,93 – 35,24% năng lượng sử dụng, lượng điện tiêu thụ cho làm mát giảm tương ứng, kéo theo giảm phát thải CO₂ vận hành theo hệ số phát thải lưới điện Việt Nam. Đồng thời, việc giảm khoảng 27,68 – 28,02% năng lượng tích hợp cho thấy tổng năng lượng sử dụng trong vòng đời vật liệu cũng được cắt giảm, từ đó làm giảm phát thải CO₂ tích hợp trong giai đoạn xây dựng. Điều này cho thấy kịch bản không chỉ hiệu quả về năng lượng và chi phí mà còn có ý nghĩa trong giảm phát thải carbon, phù hợp với định hướng công trình hiệu quả năng lượng và mục tiêu Net Zero theo hệ thống EDGE. Do đó, kết quả nghiên cứu góp phần khẳng định rằng việc tối ưu hóa lớp vỏ bao che theo hướng cân bằng giữa hiệu quả năng lượng, chi phí đầu tư và phát thải carbon là hoàn toàn khả thi đối với nhà ở thấp tầng, cụ thể là biệt thự tại khu vực ĐBSCL, đồng thời phù hợp với định hướng công trình hiệu quả năng lượng và mục tiêu giảm phát thải theo các tiêu chí của hệ thống EDGE.

3.4.2. Khả năng áp dụng vào thực tế

Trong kịch bản tổng hợp DX_1 và DX_2, các giải pháp vật liệu bao che gồm mái sử dụng lớp cách nhiệt xốp XPS, tường xây gạch bê tông khí chưng áp (AAC) và hệ cửa kính 1 lớp dày 8,38 mm được

lựa chọn theo nguyên tắc hiệu quả – khả thi – chi phí hợp lý, thay vì tối ưu kỹ thuật thuần túy, không chỉ dựa trên kết quả mô phỏng EDGE mà còn xét đến điều kiện xây dựng thực tế tại khu vực đồng bằng sông Cửu Long. Cụ thể, vật liệu XPS hiện đã được sử dụng tương đối phổ biến trong thị công mái dân dụng, có ưu điểm nhẹ, dễ lắp đặt và phù hợp với các giải pháp cải tạo mà không làm tăng đáng kể tải trọng công trình. Gạch AAC cũng đã có mặt trên thị trường Việt Nam với ưu điểm cách nhiệt tốt và giảm tải trọng kết cấu, tuy nhiên việc thi công đòi hỏi kiểm soát kỹ thuật về liên kết, chống nứt và hoàn thiện bề mặt nhằm hạn chế thấm nước trong điều kiện khí hậu nóng ẩm. Đối với kính đơn 8,38 mm, đây là giải pháp có tính khả thi cao do dễ tiếp cận, chi phí hợp lý và không làm thay đổi đáng kể thiết kế kiến trúc hiện hữu, phù hợp với đặc điểm nhà ở biệt thự trong khu vực nghiên cứu.

Về khía cạnh sử dụng, các giải pháp trong DX1 và DX2 cho thấy tiềm năng cải thiện đáng kể tiện nghi nhiệt trong nhà. Kết quả mô phỏng EDGE cho thấy việc tăng cường cách nhiệt mái bằng cách nhiệt XPS và sử dụng tường AAC giúp giảm hệ số truyền nhiệt của lớp vỏ bao che, từ đó hạn chế dòng nhiệt xâm nhập vào không gian bên trong. Điều này góp phần làm giảm tải làm mát và nhu cầu sử dụng năng

lượng cho điều hòa không khí. Đồng thời, nhiệt độ bề mặt bên trong của mái và tường được cải thiện theo hướng giảm tích nhiệt vào ban ngày và giảm bức xạ nhiệt về phía không gian ở, qua đó nâng cao cảm giác tiện nghi cho người sử dụng. Như vậy, kịch bản DX_1 và DX_2 không chỉ đạt hiệu quả về tiết kiệm năng lượng mà còn có ý nghĩa thực tiễn trong việc nâng cao chất lượng môi trường sống, đồng thời đảm bảo tính khả thi khi áp dụng trong điều kiện xây dựng phổ biến tại địa phương.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả nghiên cứu đã làm rõ vai trò của lớp vỏ bao che, trong đó việc tối ưu vật liệu, đặc biệt là mái và tường góp phần cải thiện đáng kể hiệu quả tiết kiệm năng lượng và năng lượng tích hợp trong vật liệu. Cụ thể, phương án DX_1 đạt mức cải thiện năng lượng 35,24% và vật liệu 27,68% nhưng chi phí đầu tư tăng 2,91%, trong khi phương án DX2 đạt mức cải thiện năng lượng 34,93% và vật liệu 28,02% với chi phí tăng thấp hơn, khoảng 2,71%. Các kết quả này cho thấy các giải pháp kết hợp giữa các thành phần của lớp vỏ mang lại hiệu quả cao hơn so với áp dụng riêng lẻ, tuy nhiên một số phương án tối ưu vẫn đi kèm với chi phí đầu tư ban đầu tăng cao. Trên cơ sở đó, nhóm giải pháp cân bằng giữa hiệu quả năng lượng, tác động vật liệu và chi phí đầu tư đã được đề xuất, góp phần nâng cao tính khả thi trong thực tế.

Kết quả của nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho lựa chọn vật liệu và giải pháp thiết kế lớp vỏ bao

che phù hợp với điều kiện khí hậu, qua đó góp phần giảm tiêu thụ năng lượng, hạ chi phí vận hành và định hướng sử dụng vật liệu thân thiện với môi trường. Đây là cơ sở quan trọng hướng tới phát triển nhà ở bền vững trong bối cảnh Việt Nam hiện nay.

Việc thực hiện nghiên cứu này còn một số hạn chế. Phạm vi khảo sát chỉ dựa trên một mẫu biệt thự điển hình nên chưa phản ánh đầy đủ các loại hình nhà ở. Dữ liệu khí hậu sử dụng trong EDGE App được lấy từ thành phố Cần Thơ – đại diện cho vùng Đồng bằng sông Cửu Long – nhằm phản ánh đặc trưng khí hậu tương đồng với Vĩnh Long; tuy nhiên cách tiếp cận này chưa thể hiện được các biến thiên vi khí hậu cụ thể theo từng vị trí. Ngoài ra, việc xem xét cảm nhận tiện nghi nhiệt của người sử dụng và sự thay đổi trong hành vi vận hành hệ thống điều hòa vẫn chưa được thực hiện, đây là những yếu tố có thể ảnh hưởng đáng kể đến mức tiêu thụ năng lượng thực tế của công trình.

Từ các hạn chế trên, các hướng phát triển tiếp theo được đề xuất bao gồm: việc khảo sát cần được mở rộng trên nhiều mẫu biệt thự và các loại hình nhà ở khác nhằm tăng tính đại diện; dữ liệu khí hậu chi tiết hơn cần được sử dụng, có thể tích hợp dữ liệu đo đạc thực tế hoặc mô hình vi khí hậu địa phương. Đồng thời, việc khảo sát người sử dụng cần được thực hiện để đánh giá tiện nghi nhiệt và hành vi sử dụng năng lượng. Ngoài ra, việc phân tích chi phí – lợi ích theo vòng đời công trình cũng cần được tiến hành để đánh giá toàn diện hơn hiệu quả kinh tế và môi trường của các giải pháp đề xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Cabrera-Garcia, R., Martinez-Ruiz, F., Orozco-Chavez, V., Quijano-Arteaga, N., & Garcia-Troncoso, N. (2024). *Energy Efficiency Analysis of a Residential Project Using Autodesk and EDGE App*. In World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering, 1–8. <https://doi.org/10.11159/icsect24.134>
- Chiradeja, P., & Ngaopitakkul, A. (2019). *Energy and Economic Analysis of Tropical Building Envelope Material in Compliance with Thailand's Building Energy Code*. Sustainability (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su11236872>
- Duy, K. (2025). *Vĩnh Long rộng mở con đường phát triển*. <https://baovinhlong.com.vn/tin-moi/202504/vinh-long-rong-mo-con-duong-phat-trien-cae005d/>
- IFC. (2023). *Building Green: Sustainable Construction in Emerging Markets*. Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/40561>
- Khánh, N. (2023). *Kỳ vọng giảm 23% lượng khí thải carbon của chuỗi giá trị xây dựng vào năm 2035*. <https://tapchixaydung.vn/ky-vong-giam-23-luong-khi-thai-luong-khi-thai-carbon-cua-chuoi-gia-tri-xay-dung-vao-nam-2035>
- Hiếu, L. X., & Liên, P. H. (2023). *Giải pháp thiết kế tích hợp vỏ bao che nhằm nâng cao hiệu quả năng lượng văn phòng cao tầng*. <https://tapchixaydung.vn/tap-chi-xay-dung-so-12-2023-20201224000021107.html>
- Net Zero Solutions. (2025). *Chứng chỉ EDGE – Bước đột phá trong xây dựng bền vững*. <https://nzs.vn/chung-chi-edge/>
- Rizo-Maestre, C., Bracamonte-Vega, R.-A., Pérez-Carramiñana, C., & Echarri-Iribarren, V. (2025). *Methodology for the Rehabilitation and Improvement of Energy Efficiency in Social Housing in a Hot-Humid Climate with the EDGE App: Case Study in Montería, Colombia*. *Sustainability*, 18(1), 243. <https://doi.org/10.3390/su18010243>