

DOI: <https://doi.org/10.59294/HIUJS.KHTT.2026.054>

VẬT LIỆU CÁCH NHIỆT SINH HỌC CHO VÙNG NHIỆT ĐỚI: ỨNG DỤNG SỢI DỪA, SỢI TRE VÀ RƠM RẠ

Luu Thanh Tài*

Trường Đại học Quốc tế Hồng Bàng

TÓM TẮT

Nghiên cứu thực hiện tổng hợp và phân tích hệ thống dữ liệu (Systematic Review) nhằm tối ưu hóa vật liệu cách nhiệt từ phụ phẩm nông nghiệp (sợi dừa, tre, rơm rạ) ứng dụng cho nhà ở nhiệt đới tại Việt Nam. Dù sở hữu hệ số dẫn nhiệt thấp, phù hợp cho mục đích cách nhiệt ($\lambda = 0.045 - 0.07 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), nhóm vật liệu này vẫn gặp rào cản về khả năng chống cháy và độ bền ẩm dưới tác động của khí hậu đặc thù. Thông qua việc đối chiếu các mô hình thực nghiệm thực tế, nghiên cứu đề xuất giải pháp xử lý kỹ thuật cho ĐBSCL và miền Trung. Giải pháp không chỉ giúp tiết kiệm năng lượng làm mát, giảm lượng phát thải khí nhà kính (CO_2) hoặc hệ số phát thải carbon mà còn thúc đẩy kinh tế cộng đồng địa phương, hướng tới mô hình cư trú bền vững và chủ động thích ứng trước biến đổi khí hậu.

Từ khóa: vật liệu cách nhiệt sinh học, phụ phẩm nông nghiệp, vật liệu composite lai tre - đất sét, nhà ở nông thôn bền vững, thích ứng biến đổi khí hậu

BIO-INSULATION MATERIALS FOR TROPICAL REGIONS: UTILIZATION OF COCONUT FIBER, BAMBOO FIBER, AND RICE STRAW

Luu Thanh Tai

ABSTRACT

This research conducts a systematic review to optimize thermal insulation materials derived from agricultural by-products (coconut fiber, bamboo, rice straw) for tropical housing in Vietnam. Despite possessing low thermal conductivity coefficients suitable for insulation purposes ($\lambda = 0.045 - 0.07 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), these natural materials still face significant barriers regarding fire resistance and moisture durability under specific climatic impacts. By cross-referencing practical experimental models, the study proposes technical treatment solutions tailored for the Mekong Delta and Central Vietnam. These solutions not only reduce cooling energy consumption and minimize greenhouse gas (CO_2) emissions or carbon footprints but also bolster the local community economy, aiming toward sustainable housing models and proactive adaptation to climate change.

Keywords: bio-insulation materials, agricultural by-products, bamboo-clay hybrid composite, sustainable rural housing, climate change adaptation

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhà ở nông thôn Việt Nam đang đối mặt với thách thức kép từ biến đổi khí hậu và nhu cầu phát triển bền vững. Theo IPCC [1], Đông Nam Á đang chịu các đợt nắng nóng cực đoan; đặc biệt tại Đồng bằng sông Cửu Long, nhiệt độ bên trong nhà mái tôn hoặc ngói thường cao hơn môi trường ngoài từ 3 - 5°C, gây ảnh hưởng trực tiếp đến sức khỏe của các nhóm đối tượng yếu thế bao gồm người cao tuổi, trẻ em và các hộ gia đình có thu nhập thấp - những người thường không có đủ điều kiện kinh tế

* Tác giả liên hệ: Luu Thanh Tài, Email: tailt@hiu.vn

(Ngày nhận bài: 24/12/2025; Ngày nhận bản sửa: 08/4/2026; Ngày duyệt đăng: 10/4/2026)

để lắp đặt hoặc chi trả cho việc vận hành các thiết bị làm mát cơ điện liên tục trong các đợt nắng nóng cực đoan [1]. Hệ quả tất yếu là sự gia tăng phụ thuộc vào thiết bị làm mát điện năng - vốn chiếm tới 30 - 40% chi phí hộ gia đình. Sự gia tăng này gia tăng phát thải carbon vì phần lớn điện năng tiêu thụ vẫn dựa trên nguồn năng lượng hóa thạch [2]; đồng thời, việc sản xuất các vật liệu công nghiệp như PU Foam đòi hỏi mức năng lượng nhúng (embodied energy) rất lớn, gián tiếp làm tăng dấu chân carbon của ngành xây dựng [3], các phụ phẩm nông nghiệp như sợi dừa, tre và rơm rạ lại sở hữu hiệu năng tối ưu về khả năng tái tạo nhanh cùng hệ số dẫn nhiệt cạnh tranh ($\lambda = 0.045 - 0.07 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) [3]. Tuy nhiên, để chuyên hóa những vật liệu thô này thành giải pháp thương mại hiệu quả, việc nghiên cứu quy trình xử lý đạt chuẩn TCVN là cơ sở quan trọng nhằm thúc đẩy kinh tế tuần hoàn và hiện thực hóa mục tiêu Net Zero vào năm 2050.

Mặc dù tiềm năng của vật liệu sinh học đã được thừa nhận, việc thương mại hóa tại Việt Nam vẫn tồn tại những khoảng trống nghiên cứu đáng kể. Rào cản lớn nhất hiện nay là sự thiếu hụt hệ thống tiêu chuẩn kỹ thuật (TCVN) và các tiêu chí định lượng cụ thể về khả năng chống cháy (theo QCVN 06:2022/BXD) [4], độ bền và tính chịu ẩm. Sự thiếu sót pháp lý này khiến các sản phẩm từ phụ phẩm nông nghiệp khó được chứng nhận để đưa vào các dự án xây dựng chính quy. Bên cạnh đó, một thách thức khác nằm ở sự thiếu hụt về quy trình công nghiệp hóa; các nghiên cứu hiện nay phần lớn vẫn dừng lại ở quy mô phòng thí nghiệm, chưa có mô hình kiểm soát chất lượng (QC) đồng nhất cho nguồn nguyên liệu đầu vào phân tán. Song song với những vấn đề kỹ thuật, việc thiếu các phân tích chuyên sâu về chi phí vòng đời (LCC) [5] và mô hình liên kết giữa vùng nguyên liệu nông thôn với thị trường cũng gây khó khăn cho việc tối ưu giá thành. Chính vì vậy, nghiên cứu này tập trung phân tích hệ thống dữ liệu để đề xuất các giải pháp kỹ thuật và mô hình ứng dụng thực tiễn, làm cơ sở khoa học cho lộ trình ban hành tiêu chuẩn và thúc đẩy thương mại hóa vật liệu sinh học tại Việt Nam.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng và mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu nghiên cứu: Nghiên cứu tập trung đánh giá các đặc tính kỹ thuật cốt lõi bao gồm hệ số dẫn nhiệt (λ) nhiệt trở (R) cùng các chỉ số về độ bền cơ học, khả năng chống cháy và kháng ẩm của vật liệu thành phẩm từ sợi dừa, tre và rơm rạ. Thông qua việc so sánh đối chiếu với các loại vật liệu công nghiệp phổ biến, đề tài xác định tính ưu việt đồng thời đề xuất quy trình xử lý tối ưu nhằm khắc phục nhược điểm tự nhiên của vật liệu sinh học, hướng tới đáp ứng các quy chuẩn về an toàn cháy như QCVN 06:2022/BXD (đạt ngưỡng kháng cháy B1 hoặc B2) và các tiêu chuẩn kỹ thuật về độ bền vật lý như TCVN 7777:2007 (kiểm soát độ hút nước không quá 10 - 15%). Việc xác định các quy chuẩn cụ thể này là cơ sở để khắc phục "khoảng trống pháp lý" đã nêu tại mục 1.2, giúp vật liệu sinh học đủ điều kiện được chứng nhận và đưa vào các dự án xây dựng chính quy. Bên cạnh đó, nghiên cứu tiến hành phân tích hiệu quả kinh tế thông qua chi phí vòng đời (LCC) nhằm xây dựng mô hình chuỗi cung ứng và các giải pháp thực tiễn như tấm panel lắp ghép hay composite tre-đất sét, góp phần phát triển mô hình nhà ở nông thôn bền vững và thích ứng hiệu quả với biến đổi khí hậu.

Đối tượng nghiên cứu trọng tâm là các dòng vật liệu cách nhiệt được chế tạo từ phụ phẩm nông nghiệp sẵn có tại Việt Nam, cụ thể là sợi dừa (coir), sợi tre (bamboo fiber) và rơm rạ (rice straw). Nhóm sợi này được tác giả định nghĩa là có "tiềm năng tái tạo cao" dựa trên hai tiêu chí định lượng: Một là chu kỳ sinh trưởng ngắn (dưới 1 năm đối với rơm rạ và 3 - 5 năm đối với tre); hai là trữ lượng sinh khối dồi dào chưa được khai thác hiệu quả với hàng triệu tấn phụ phẩm mỗi vụ mùa tại khu vực Đồng bằng sông Cửu Long và miền Trung. Phạm vi nghiên cứu giới hạn trong loại hình nhà ở dân dụng nông thôn tại vùng khí hậu nhiệt đới, với trọng tâm khảo sát là khu vực Đồng bằng sông Cửu Long và miền Trung. Đây là những khu vực trọng điểm có nguồn nguyên liệu dồi dào, đồng thời chịu tác động mạnh mẽ bởi các đợt nắng nóng cực đoan, đòi hỏi các giải pháp kiến trúc có khả năng tự điều hòa nhiệt độ hiệu quả và tiết kiệm năng lượng.

Về phương pháp nghiên cứu, tác giả thực hiện Tổng hợp và Phân tích hệ thống dữ liệu (Systematic Review) theo quy trình ba bước chặt chẽ: (1) Thu thập và sàng lọc dữ liệu từ các kho lưu trữ uy tín

như ScienceDirect, Scopus và MDPI; (2) Kiểm chứng chéo các thông số kỹ thuật thực nghiệm từ nhiều nguồn độc lập; (3) Mô phỏng đối chiếu để xác thực hiệu quả tiết kiệm điện năng trong bối cảnh nhiệt đới. Thông qua quy trình này, tác giả đề xuất các giải pháp xử lý tối ưu nhằm hướng tới đáp ứng các quy chuẩn hiện hành về an toàn cháy như QCVN 06:2022/BXD (đạt ngưỡng kháng cháy B1 hoặc B2) và tiêu chuẩn kỹ thuật về độ bền vật lý như TCVN 7777:2007 (kiểm soát độ hút nước không quá 10 - 15%). Việc bám sát các quy chuẩn cụ thể này là cơ sở để tác giả giải quyết "khoảng trống pháp lý" đã nêu tại mục 1.2, giúp vật liệu sinh học đủ điều kiện được chứng nhận và ứng dụng vào các công trình chính quy.

2.2. Phương pháp hệ thống hóa dữ liệu (systematic review)

Để đảm bảo tính minh bạch và khả năng tái lập, quy trình rà soát hệ thống được thực hiện theo các giai đoạn cụ thể:

Chiến lược truy vấn: Sử dụng tổ hợp từ khóa và toán tử Boolean [("Bio-insulation" OR "Natural fiber") AND ("Coconut fiber" OR "Bamboo" OR "Rice straw") AND ("Thermal conductivity" OR "Fire resistance")] trên các cơ sở dữ liệu ScienceDirect, Scopus và MDPI trong giai đoạn 2015 - 2026. Tuy nhiên, giai đoạn 2012 - 2014 được đưa thêm vào nhằm khái quát nền tảng hình thành nghiên cứu này

Tiêu chí sàng lọc: Nghiên cứu lựa chọn các bài báo khoa học đã qua phản biện (peer-reviewed) công bố dữ liệu thực nghiệm định lượng về hệ số λ , nhiệt trở R hoặc các chỉ số kháng cháy/âm. Các nghiên cứu thiếu thông số kỹ thuật kiểm chứng hoặc không phù hợp với đặc thù khí hậu nóng ẩm bị loại bỏ.

Quy trình tổng hợp và định lượng được thực hiện qua các giai đoạn cụ thể: bắt đầu từ việc nhận diện tổng cộng 52 hồ sơ từ các cơ sở dữ liệu sơ bộ. Sau bước rà soát tiêu đề và tóm tắt, tác giả tiến hành loại bỏ 12 bài trùng lặp và 14 bài không phù hợp với phạm vi nghiên cứu. Tiếp theo, quá trình phân tích toàn văn và đối chiếu chéo dữ liệu được thực hiện trên 26 bài báo tiềm năng. Kết quả cuối cùng xác định chính xác 16 nguồn tài liệu hội đủ các tiêu chuẩn kỹ thuật khắt khe để trích xuất dữ liệu vào Bảng 1, làm cơ sở tin cậy cho các phân tích về chi phí vòng đời (LCC) và đánh giá tác động môi trường (LCA) trong các phần tiếp theo của nghiên cứu.

Đánh giá chất lượng (Quality Assessment): Các tài liệu được thẩm định dựa trên: (1) Tính chuẩn hóa của thiết bị đo (ISO 8301); (2) Sự tương thích với độ ẩm nhiệt đới (> 80%); (3) Kiểm chứng chéo giữa các nguồn độc lập; (4) Khả năng đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành (QCVN 06:2022/BXD và TCVN 7777:2007).

3. CƠ SỞ LÝ LUẬN VÀ KINH NGHIỆM QUỐC TẾ

3.1. Khái niệm và cơ chế cách nhiệt

Vật liệu cách nhiệt là những vật liệu có cấu trúc đặc thù nhằm giảm thiểu sự trao đổi nhiệt giữa không gian bên trong và môi trường bên ngoài, góp phần ổn định vi khí hậu nội thất và tiết kiệm năng lượng. Theo Çengel & Ghajar, cơ chế của chúng dựa trên việc ngăn cản ba hình thức truyền nhiệt: dẫn nhiệt qua pha rắn, đối lưu trong các khoang rỗng và bức xạ nhiệt giữa các bề mặt [6].

Hầu hết vật liệu cách nhiệt hiện nay tận dụng cấu trúc xốp chứa các lỗ hổng khí siêu nhỏ để triệt tiêu dòng đối lưu, dựa trên nguyên lý không khí ở trạng thái tĩnh là môi trường có khả năng dẫn nhiệt cực thấp. Hiệu quả của quá trình này được định lượng qua hệ số dẫn nhiệt λ (W/m·K). Trong quá trình thiết kế công trình hoặc trong thực tiễn thiết kế, để đánh giá tổng thể khả năng chống mất nhiệt của một lớp cấu tạo, các kỹ sư sử dụng đại lượng nhiệt trở R (m².K/W), được xác định bằng công thức: $R = d/\lambda$.

Trong đó d là độ dày vật liệu (m). Giá trị R càng lớn, khả năng chống truyền nhiệt của Độ cao của lớp vỏ bao che hoặc Tỷ lệ diện tích bề mặt bao che. Bên cạnh các chỉ số nhiệt học, tính khả thi của vật liệu còn được xét qua các tiêu chí về độ bền cơ học, khả năng kháng ẩm, chống cháy và tính tro sinh hóa. Theo các tiêu chuẩn công trình xanh hiện đại (như LEED hay LOTUS), vật liệu có "năng lượng nhúng" (Embodied Energy) thấp và khả năng tái chế cao đang trở thành ưu tiên hàng đầu để giảm thiểu tác động môi trường ngay từ giai đoạn sản xuất.

3.2. Tiềm năng tự nhiên

Việc khai thác phụ phẩm nông nghiệp như sợi dừa, rơm rạ và tre đang trở thành tâm điểm trong xây dựng hiện đại nhờ đặc tính tái tạo nhanh và khả năng giảm thiểu năng lượng nhúng (Embodied Energy) [5]. Việc chuyển hóa các nguồn sợi này thành vật liệu cách nhiệt không chỉ biến công trình thành một "kho lưu trữ carbon" (carbon sink) hiệu quả mà còn là giải pháp trọng tâm để đạt mục tiêu Net Zero. Minh chứng là mỗi tấn vật liệu từ sợi tự nhiên có khả năng cô lập khoảng 1.4 - 1.6 tấn CO₂ hấp thụ được trong quá trình quang hợp, giúp giảm dấu chân carbon của công trình lên đến 60% so với vật liệu tổng hợp.

Sợi tre (Bamboo fiber) đóng vai trò là "khung xương" chịu lực nhờ độ bền kéo cao (140 - 280 MPa) và mô-đun đàn hồi lớn (11 - 17 GPa). Điểm khác biệt của tre nằm ở khả năng tạo ra độ trễ nhiệt (Thermal Lag) lý tưởng khi kết hợp với vật liệu có mật độ cao như đất sét hoặc xi măng nhẹ. Sự kết hợp này tạo ra độ trễ nhiệt từ 6 - 8 giờ, giúp ổn định vi khí hậu với mức chênh lệch nhiệt độ nội thất duy trì ở mức thấp (2 - 4°C). Các nguồn sợi này mang lại độ bền cơ học và khả năng kháng ẩm tự nhiên vượt trội nhờ hàm lượng Lignin cao (Sợi dừa: 40 - 45% [8], rơm rạ: 12 - 15% [9], sợi tre: 20 - 30% [7, 14]). Hàm lượng Lignin và lớp sáp tự nhiên giúp sợi tre duy trì tỷ lệ trương nở thấp (dưới 5%) ngay cả trong điều kiện nóng ẩm.

Sợi dừa (Coir) nổi bật với hàm lượng lignin cao (32 - 45%), mang lại độ bền cơ học và khả năng kháng ẩm tự nhiên vượt trội nhờ hàm lượng Lignin cao - một polymer sinh học có đặc tính kỵ nước (hydrophobic), giúp bảo vệ cấu trúc sợi trong môi trường độ ẩm cao. Cụ thể, sợi dừa chứa khoảng 40 - 45% Lignin [8], rơm rạ chứa khoảng 12 - 15% [9], và sợi tre sở hữu hàm lượng Lignin đáng kể từ 20 - 30% [13]. Chính cấu trúc thành tế bào dày và sự hiện diện của lớp sáp tự nhiên trên bề mặt sợi tre giúp nó duy trì độ ổn định kích thước tốt hơn các loại sợi cellulose thông thường.

Đặc tính chịu lực và kháng ẩm của ba loại sợi này đã được xác thực qua nhiều nghiên cứu thực nghiệm độc lập: sợi dừa với khả năng chống phân hủy trong môi trường nước mặn [8]; rơm rạ với cấu trúc rỗng giúp tối ưu hóa khả năng cách nhiệt sau khi được xử lý bề mặt [9]; và đặc biệt, sợi tre đã được chứng minh có độ bền kéo ngang ngửa với thép nhẹ nếu xét trên cùng một đơn vị khối lượng, đồng thời có tỷ lệ trương nở khi ngâm nước thấp (dưới 5%) sau khi được tách sợi đúng quy chuẩn [7]. Với hệ số dẫn nhiệt λ thấp (0.045 - 0.055 W/m·K), sợi dừa khi được chế tạo thành tấm panel có khả năng cải thiện nhiệt trở (R-value) thêm 7 - 8% so với vật liệu truyền thống mà còn tạo ra mạng lưới liên kết vi mô bền vững [8]. Cấu trúc này giúp triệt tiêu hiện tượng nứt vỡ do ứng suất nhiệt, đặc biệt hiệu quả trong việc bảo vệ lớp vỏ bao che công trình.

Rơm rạ (Rice Straw) tận dụng cấu trúc ống rỗng đặc trưng tạo thành các bẫy khí tự nhiên, đạt hệ số dẫn nhiệt λ tương đương với các vật liệu công nghiệp như EPS hay bông khoáng (0.046 - 0.056 W/m·K). Để khắc phục nhược điểm ưa ẩm và dễ cháy do độ rỗng cao, các nghiên cứu hiện đại đã áp dụng giải pháp phủ nano-silica hoặc ép mật độ cao kết hợp phụ gia sinh học. Quy trình này giúp bít kín các lỗ hổng mao quản, từ đó ngăn chặn sự xâm nhập của nấm mốc và nâng cao giới hạn chịu lửa cho vật liệu [9].

Sợi tre (Bamboo fiber) đóng vai trò là "khung xương" chịu lực trong các cấu trúc composite hybrid nhờ độ bền kéo cao (140 - 280 MPa) và mô-đun đàn hồi lớn (11 - 17 GPa). Điểm khác biệt của tre nằm ở khả năng tạo ra độ trễ nhiệt (Thermal Lag) lý tưởng khi kết hợp với vật liệu có mật độ cao như đất sét hoặc xi măng nhẹ. Sự kết hợp này có thể tạo ra độ trễ nhiệt từ 6 đến 8 giờ, giúp định nhiệt buổi trưa chỉ tác động vào nhà khi nhiệt độ môi trường đã giảm. Cơ chế này giúp ổn định vi khí hậu với mức chênh lệch nhiệt độ nội thất duy trì ở mức thấp (2 - 4°C), giúp điều hòa nhiệt độ nội thất mà không cần tiêu tốn nhiều năng lượng nhân tạo.

Nhìn chung, nhóm vật liệu sinh học không chỉ sở hữu các chỉ số nhiệt học (λ , R) cạnh tranh với vật liệu nhân tạo mà còn cung cấp các giá trị gia tăng về độ bền cơ học và khả năng điều hòa nhiệt tự nhiên. Tuy nhiên, hiệu quả sử dụng thực tế phụ thuộc hoàn toàn vào các quy trình tiền xử lý hóa-lý để khắc phục nhược điểm về độ bền sinh học (nấm mốc, mối mọt) và tính dễ cháy.

3.3. Kinh nghiệm quốc tế

Sự khác biệt đặc thù về điều kiện khí hậu dẫn đến những triết lý riêng biệt trong việc lựa chọn và ứng dụng vật liệu sinh học giữa các vùng địa lý:

Tại các quốc gia ôn đới (Đức, Pháp), chiến lược trọng tâm là "giữ nhiệt". Với mùa đông lạnh sâu, các vật liệu như sợi gai dầu hay len gỗ được ưu tiên để tạo ra lớp vỏ bao che kín khít tuyệt đối (Airtightness) theo tiêu chuẩn Passivhaus. Mục tiêu cốt lõi là ngăn chặn sự thất thoát năng lượng sưởi ấm từ bên trong ra ngoài, duy trì sự ấm áp cho không gian nội thất.

Ngược lại, tại các quốc gia nhiệt đới (Đông Nam Á), chiến lược chủ đạo là "ngăn bức xạ và thoát ẩm". Thay vì tập trung quá mức vào độ dày lớp cách nhiệt để giữ ấm, các quốc gia như Thái Lan hay Philippines ưu tiên các giải pháp xử lý sinh hóa (như tấm borat, nano-silica) để vật liệu có thể chịu đựng độ ẩm trên 90%. Đặc biệt, ứng dụng tại vùng nhiệt đới chú trọng vào việc tối ưu hóa mật độ nén để tăng cường độ trễ nhiệt, giúp trì hoãn đỉnh nhiệt lượng từ mặt trời xâm nhập vào không gian sống vào giữa trưa.

Bài học cho Việt Nam nằm ở việc chuyên hóa công nghệ ép nén của phương Tây thành các giải pháp phù hợp với đặc thù nóng ẩm địa phương. Về mặt kinh tế, việc tận dụng phụ phẩm nông nghiệp không chỉ giúp giảm chi phí điện năng làm mát ước tính theo kịch bản (scenario estimate) từ 25 - 35% mà còn thiết lập một chuỗi giá trị mới từ phế phẩm nông nghiệp, tạo sinh kế bền vững cho vùng nông thôn. Mức tiết kiệm này tương đồng với các kết quả mô phỏng hiệu năng công trình tại vùng nhiệt đới của N. Llantoy và cộng sự [10], khẳng định tính khả thi của kịch bản khi áp dụng vào biểu giá điện bậc thang tại Việt Nam. Sự kết hợp giữa khả năng kháng ẩm, chống nấm mốc và tối ưu hóa độ trễ nhiệt chính là lộ trình để Việt Nam phát triển hệ thống bao che bền vững, thích ứng hoàn hảo với các chu kỳ nồm ẩm và bức xạ gay gắt.

Có thể thấy, sự đối chiếu quốc tế chỉ ra rằng công nghệ vật liệu sinh học cần được "nhiệt đới hóa" thay vì áp dụng rập khuôn. Giải pháp then chốt thành công cho Việt Nam nằm ở sự cân bằng giữa hiệu suất cách nhiệt thuần túy và các đặc tính kháng môi trường nóng ẩm, nhằm đảm bảo cả hai mục tiêu: hiệu quả năng lượng cho công trình và giá trị kinh tế bền vững cho cộng đồng. Sự cân bằng này đã được xác thực qua các đối chiếu thực nghiệm, cho thấy vật liệu sinh học không chỉ tối ưu về nhiệt mà còn là một tài sản kinh tế có khả năng sinh lời thông qua việc cắt giảm chi phí vận hành dài hạn.

4. PHÂN TÍCH KHẢ THI KINH TẾ - XÃ HỘI VÀ ỨNG DỤNG THỰC TẾ

4.1. Đối chiếu kỹ thuật

Việc chuyển đổi từ phụ phẩm nông nghiệp thô sang vật liệu xây dựng công nghiệp đòi hỏi sự hiểu biết sâu sắc về sự tương tác giữa các chỉ số nhiệt lượng, đặc tính cơ học và khả năng thích ứng môi trường. Trong bối cảnh ngành xây dựng đang nỗ lực giảm phát thải carbon, việc xác định ngưỡng khả thi của vật liệu sinh học so với các vật liệu truyền thống như xốp EPS hay bông khoáng là vô cùng cần thiết.

Thực tế nghiên cứu cho thấy, vật liệu sinh học tối ưu hóa (sợi dừa, rom rạ nén) sở hữu hệ số dẫn nhiệt λ dao động từ 0.045 - 0.070 W/m·K. Mặc dù chỉ số này có sự chênh lệch so với các vật liệu tổng hợp, nhưng khi xét đến tổng hòa các đặc tính nhiệt môi trường, vật liệu sinh học lại cho thấy những ưu điểm vượt trội về quán tính nhiệt và khả năng điều hòa ẩm.

Bảng 1. So sánh đặc tính lý - nhiệt giữa vật liệu sinh học và vật liệu cách nhiệt truyền thống

Tiêu chí đối sánh	Đơn vị	Vật liệu sinh học (Dừa/Tre/Rơm)	Xốp cách nhiệt (EPS/XPS)	Bông khoáng (Rockwool)	Nguồn trích dẫn
Hệ số dẫn nhiệt (λ)	W/m·K	0.045 ÷ 0.070	0.030 ÷ 0.040	0.035 ÷ 0.045	[3, 8, 9]
Nhiệt trở (R tại d = 50 mm)	m ² ·K/W	0.71 ÷ 1.11	1.25 ÷ 1.66	1.11 ÷ 1.42	[5, 9]

Tiêu chí đối sánh	Đơn vị	Vật liệu sinh học (Dừa/Tre/Rơm)	Xốp cách nhiệt (EPS/XPS)	Bông khoáng (Rockwool)	Nguồn trích dẫn
Độ trễ nhiệt (Time Lag)	Giờ	6 ÷ 10	2 ÷ 4	3 ÷ 5	[8, 9]
Khả năng điều tiết ẩm (RH _{int})	%	Tốt (50 ÷ 60%) (ngưỡng tiện nghi)	Không (Kín khí)	Thấp (Dễ ngậm nước)	[8, 11, 13]
Năng lượng nhúng	MJ/kg	Rất thấp	Rất cao	Cao	[3, 11]

Ghi chú: Các thông số về hệ số dẫn nhiệt tiêu chuẩn λ được tổng hợp từ nghiên cứu hệ thống của Asdrubali và cộng sự; L. Ba và cộng sự [5]. Các thông số thực nghiệm đối chiếu tại môi trường nóng ẩm Việt Nam được tác giả phân tích và hệ thống hóa từ các báo cáo thử nghiệm thực tế của N. Llantoy và cộng sự [10] và Lê Thị Kim Oanh [11].

Dựa trên kết quả đối chiếu tại Bảng 1, lợi thế cốt lõi của vật liệu sinh học không chỉ dừng lại ở khả năng cản trở dòng nhiệt đơn thuần đồng thời bao gồm đặc tính điều tiết vi khí hậu nội thất. Khác với vật liệu tổng hợp vốn có cấu trúc ô kín gây bí bách, sợi thực vật sở hữu cấu trúc mao quản rộng tự nhiên, tạo ra khả năng "thở" thông qua cơ chế hút ẩm (Hygroscopic property). Cơ chế này cho phép vật liệu tự động hấp thụ hơi nước khi độ ẩm môi trường tăng cao và giải phóng khi không khí khô hanh, giúp duy trì độ ẩm nội thất ổn định ở mức lý tưởng RH_{int} = 50% - 60%.

Bên cạnh đó, thông số về độ trễ nhiệt (Thermal Lag) đóng vai trò then chốt trong giải pháp thiết kế cho vùng nhiệt đới. Các tấm panel sợi dừa và rơm nén có khả năng kéo dài thời gian truyền nhiệt từ mặt ngoài vào trong nhà lên đến 10 giờ, giúp đỉnh nhiệt trong phòng xuất hiện vào buổi đêm khi nhiệt độ ngoài trời đã hạ, thay vì trùng với đỉnh nắng nóng ban ngày. Sự cộng hưởng giữa khả năng cách nhiệt và quán tính nhiệt này khẳng định vị thế của vật liệu sinh học như một giải pháp thay thế khả thi và hiệu quả, hạn chế tối đa các tác động tiêu cực đến môi trường so với các vật liệu polymer truyền thống.

Mỗi loại phụ phẩm sau xử lý mang lại những ưu thế kỹ thuật riêng biệt, đáp ứng các yêu cầu khắt khe của công trình nhiệt đới. Nếu rơm rạ nén được xác định là vật liệu có khả năng cách nhiệt ưu việt nhất nhờ cấu trúc ống rỗng tạo bẫy khí tĩnh, thì sợi dừa với hàm lượng Lignin cao (32 - 45%) lại chiếm tỷ trọng chủ yếu về kháng ẩm và ổn định kích thước. Trong khi đó, sợi tre đóng vai trò là "vật liệu gia cường sinh học" nhờ độ bền kéo và độ cứng vượt trội, giúp cấu kiện vững chắc trước áp lực gió bão. Việc phối hợp các nhóm vật liệu này theo cấu trúc phức hợp (Hybrid Sandwich) - với lớp ngoài kháng ẩm từ dừa, lõi cách nhiệt rơm và khung chịu lực tre - tạo ra hệ thống bao che vừa cách nhiệt, vừa có khả năng chịu lực tự thân. Sự cộng hưởng này không chỉ tối ưu hóa giá trị kinh tế mà còn củng cố tính khả thi của vật liệu sinh học trong việc thay thế một phần các vật liệu truyền thống, góp phần cải thiện đáng kể nhược điểm kém bền vững môi trường của các vật liệu truyền thống như xốp EPS.

4.2. Giải pháp “nhiệt đới hóa” và tối ưu hóa kỹ thuật

Việc chuyển đổi nguyên liệu sợi thực vật sang vật liệu xây dựng đòi hỏi các giải pháp kỹ thuật nhằm khắc phục hạn chế tự nhiên và nâng cao hiệu quả sử dụng trong khí hậu nhiệt đới. Với rơm rạ, thách thức chính là tính dễ cháy do cấu trúc rỗng chứa nhiều không khí. Giải pháp là nén ở mật độ 90 - 120 kg/m³ để giảm độ rỗng và hạn chế lưu thông không khí, kết hợp xử lý bằng borax hoặc axit boric. Các muối borat này hoạt động như chất chống cháy thụ động, giúp thúc đẩy tạo lớp than và làm chậm quá trình phân hủy nhiệt của vật liệu [13]. Quy trình này giúp vật liệu đáp ứng ngưỡng phân nhóm kháng cháy B1 hoặc B2 theo QCVN 06:2022/BXD (thông qua các phép thử về tốc độ lan truyền lửa và khả năng bắt cháy) mà vẫn đảm bảo an toàn sức khỏe.

Song song với việc chống cháy, bài toán cải thiện liên kết bề mặt giữa sợi thực vật và ma trận kết dính cũng được giải quyết thông qua quy trình kiềm hóa (Alkalization), đặc biệt hiệu quả với sợi dừa. Bằng cách sử dụng dung dịch NaOH nồng độ thấp, các lớp sáp, hemicellulose và tạp chất bám trên bề mặt

sợi sẽ bị loại bỏ hoàn toàn. Quá trình này không chỉ làm tăng độ nhám bề mặt, tạo "ngàm" cơ học tốt hơn mà còn làm lộ ra các nhóm hydroxyl tự do, giúp tăng cường liên kết hydro với ma trận polymer hoặc vữa. Kết quả là các tấm panel composite sợi dừa không chỉ sở hữu độ bền uốn cao hơn mà còn giảm thiểu khả năng hút nước thông qua mao dẫn. Để tăng tính chuyển giao, vật liệu cần đạt ngưỡng đánh giá về độ hút nước sau 24h không vượt quá 10 - 15% (theo chuẩn thử TCVN 7777:2007), từ đó duy trì hệ số dẫn nhiệt λ ổn định ngay cả trong điều kiện độ ẩm bão hòa của mùa nồm hay mùa mưa tại Việt Nam. Đối với sợi tre, do có mật độ đặc cao dẫn đến hệ số dẫn nhiệt lớn hơn rơm rạ, việc tối ưu hóa được thực hiện thông qua các kết cấu Hybrid như Tre-Đất sét hoặc Tre-Bê tông nhẹ. Trong mô hình này, nan tre được xử lý áp lực để loại bỏ đường và tinh bột nhằm ngăn chặn triệt để mối mọt, đóng vai trò là "cốt thép sinh học" chịu lực kéo và uốn chính. Các lớp vữa nhẹ hoặc đất sét trộn sợi dừa bao quanh sẽ đóng vai trò là lớp vỏ cách nhiệt và điều hòa độ ẩm. Sự cộng hưởng này tạo ra một hệ tường có quán tính nhiệt lớn, giúp trì hoãn dòng nhiệt xuyên phòng (Thermal Lag), hấp thụ bức xạ mặt trời gay gắt ban ngày và giải phóng chậm vào ban đêm. Những can thiệp kỹ thuật này chính là giải pháp then chốt để "nhiệt đới hóa" vật liệu, nâng cao độ bền vòng đời và còn tồn tại một số hạn chế của vật liệu sinh học trong việc thay thế các vật liệu phát thải carbon cao trong ngành xây dựng hiện đại.

Tóm lại, việc tối ưu hóa kỹ thuật thực chất là quá trình "nhiệt đới hóa" toàn diện, giúp chuyển đổi các nhóm vật liệu sinh học vốn nhạy cảm với môi trường thành các cấu kiện có độ bền tương đương vật liệu truyền thống. Việc sử dụng các phụ gia sinh học bền vững như Borax hay quy trình kiểm hóa không chỉ nâng cao đáng kể khả năng kháng cháy và chống nấm mốc, đáp ứng các yêu cầu khắt khe của quy chuẩn xây dựng mà còn giữ vững triết lý xây dựng xanh. Những can thiệp này chính là tiền đề then chốt để nâng cao vòng đời công trình (durability), giảm chi phí bảo trì và khẳng định tính khả thi của hệ sinh thái vật liệu tự nhiên trong dòng chảy của kiến trúc hiện đại tại Việt Nam.

4.3. Khả năng ứng dụng thực tế và chiến lược triển khai theo địa lý đặc thù

Lộ trình triển khai vật liệu sinh học tại Việt Nam cần chuyển dịch mạnh mẽ từ quy mô sản xuất thủ công sang quy trình công nghiệp có kiểm soát chất lượng theo hệ thống tiêu chuẩn quốc gia (TCVN). Chiến lược áp dụng được phân hóa dựa trên đặc thù địa lý nhằm giải quyết trực tiếp bài toán sinh kế và năng lực thích ứng thiên tai tại địa phương.

Tại khu vực Đồng bằng sông Cửu Long, trọng tâm là phát triển các dòng panel từ rơm rạ và sợi dừa dưới dạng module lắp ghép. Với ưu thế trọng lượng nhẹ, giải pháp này hỗ trợ xây dựng trên nền đất yếu và tạo ra cấu trúc nhà ở linh hoạt, dễ dàng tháo dỡ hoặc nâng cao sàn để đối phó với kịch bản nước biển dâng. Việc tận dụng phụ phẩm nông nghiệp sau mỗi vụ mùa không chỉ thiết lập vòng lặp kinh tế tuần hoàn, tăng thu nhập cho nông dân mà còn góp phần giảm thiểu đáng kể tình trạng đốt phụ phẩm nông nghiệp ngoài đồng ruộng.

Đối với khu vực Miền Trung, giải pháp tập trung vào kết cấu Composite Hybrid Tre - Sợi sinh học. Bằng cách tận dụng độ bền kéo của nan tre và khả năng cách nhiệt của sợi dừa, công trình gia tăng khả năng chống chọi gió bão và ổn định vi khí hậu trong mùa khô hạn. Việc huy động nguồn nguyên liệu và kỹ năng thủ công tại chỗ mang ý nghĩa xã hội sâu sắc, giúp thúc đẩy tính tự chủ hạ tầng cho các cộng đồng ven biển thường xuyên chịu ảnh hưởng của thiên tai.

Tại khu vực Miền Bắc, chiến lược tập trung vào việc xử lý vật liệu đa năng nhằm thích ứng với chu kỳ nhiệt ẩm phân hóa rõ rệt. Các cải tiến về màng chống thấm và lớp phủ nano giúp cải thiện chất lượng sống trong mùa nồm ẩm. Sự chuyển dịch sang các vật liệu từ cellulose rơm rạ mở ra triển vọng ứng dụng cho các công trình xanh đô thị, nơi ưu tiên các giá trị bền vững và thân thiện với môi trường.

Đánh giá tính khả thi và rào cản thực tế: Việc phân hóa chiến lược theo địa lý giúp tối ưu hóa giá trị của sợi tự nhiên trong việc giải quyết bài toán an sinh xã hội. Tuy nhiên, thách thức lớn nhất hiện nay là việc chuẩn hóa quy trình kiểm soát chất lượng đồng nhất và hoàn thiện hệ thống hành lang pháp lý về tiêu chuẩn an toàn. Lộ trình khả thi nhất là thiết lập liên kết chặt chẽ giữa vùng nguyên liệu và các cơ sở sản xuất để tạo niềm tin cho các đơn vị tư vấn thiết kế và nhà thầu.

4.4. Phân tích tài chính và Chi phí vòng đời (LCC)

Thông qua phương pháp tổng hợp dữ liệu từ các mô hình tài chính thực nghiệm, việc đánh giá Chi phí vòng đời (Life Cycle Costing - LCC) không chỉ dừng lại ở giá mua vật liệu ban đầu mà phải xét trên toàn bộ chu trình vận hành của công trình, thường kéo dài từ 20 đến 50 năm. Bằng chứng hệ thống cho thấy đây là cơ sở khoa học then chốt để thay đổi tư duy từ việc lựa chọn "giá mua thấp nhất" sang mục tiêu đạt được "giá trị sử dụng cao nhất" trên mỗi đơn vị chi phí đầu tư. Cách tiếp cận dựa trên phân tích dữ liệu thứ cấp này giúp chủ đầu tư nhìn nhận vật liệu sinh học không phải là một khoản chi phí đắt đỏ, mà là một tài sản có khả năng sinh lời thông qua việc tiết kiệm tài nguyên và giảm thiểu rủi ro vận hành trong dài hạn.

Dữ liệu đối chiếu từ các nghiên cứu thực nghiệm tại khu vực Đông Nam Á cho thấy, dù giá thành sản xuất tấm panel từ phụ phẩm nông nghiệp sau xử lý có thể cao hơn vật liệu thô từ 1.5 đến 2 lần, nhưng vẫn thấp hơn các loại vật liệu cách nhiệt tổng hợp nhập khẩu (như PU hay Rockwool) khoảng 15 - 25%. Kết quả phân tích từ các nguồn tài liệu uy tín xác nhận rằng, nhờ khả năng giảm nhu cầu điện năng làm mát ước tính theo kịch bản (scenario estimate) từ 25% đến 35% [10]. Dựa trên mô hình giả định LCC, thời gian hoàn vốn đầu tư (Payback Period) tại Việt Nam cho phân chênh lệch chi phí vật liệu cách nhiệt thường ước tính theo kịch bản (scenario estimate) khoảng 3,5 đến 5 năm.

Trong điều kiện khí hậu nóng ẩm, việc tối ưu hóa lớp vỏ bao che bằng vật liệu sinh học cho thấy tiềm năng tiết kiệm năng lượng đáng kể. Thực tế triển khai cho thấy, giải pháp này giúp duy trì nhiệt độ trong nhà ổn định, giảm tải cho hệ thống điều hòa không khí ước tính theo kịch bản (scenario estimate) từ 25% đến 35% [10]. Với biểu giá điện sinh hoạt bậc thang tại Việt Nam, thời gian hoàn vốn đầu tư (Payback Period) cho phân chênh lệch chi phí vật liệu cách nhiệt thường chỉ rơi vào khoảng 3.5 đến 5 năm. Sau cột mốc này, toàn bộ số tiền điện tiết kiệm được chính là lợi nhuận trực tiếp giúp cắt giảm chi phí sinh hoạt cho hộ gia đình và tối ưu hóa chi phí quản lý vận hành cho các đơn vị khai thác bất động sản.

Một khía cạnh quan trọng khác của LCC là chi phí bảo trì và giá trị tại thời điểm cuối vòng đời của công trình [11]. Vật liệu sinh học sau khi được tối ưu hóa bằng màng nano và phụ gia kháng ẩm có độ bền ổn định, giúp giảm thiểu đáng kể chi phí bảo dưỡng hệ thống bao che trước các tác động tiêu cực của nấm ẩm và nấm mốc. Đặc biệt, tại giai đoạn tháo dỡ công trình, trong khi các vật liệu polymer gây tổn kém chi phí xử lý rác thải nguy hại, vật liệu sinh học lại có ưu thế về khả năng tái chế hoàn toàn hoặc tự phân hủy sinh học. Điều này không chỉ giúp chủ đầu tư tránh được các khoản phí môi trường tiềm tàng trong tương lai mà còn góp phần giảm thiểu chi phí xã hội trong công tác quản lý chất thải rắn đô thị. Tổng kết lại, phân tích LCC khẳng định rằng vật liệu sinh học là một khoản đầu tư thông minh, nơi sự chênh lệch chi phí ban đầu được bù đắp nhanh chóng bởi hiệu suất nhiệt vượt trội và lộ trình tài chính tối ưu cho các công trình xanh tại Việt Nam.

4.5. Tổng kết lợi ích chiến lược & đánh giá khả thi

Việc ứng dụng vật liệu sinh học (Bio-based materials) đã qua tối ưu hóa không chỉ đơn thuần là một giải pháp kỹ thuật thay thế, mà còn là mắt xích chiến lược nhằm giải quyết mâu thuẫn giữa tốc độ đô thị hóa nhanh chóng và yêu cầu bảo tồn hệ sinh thái. Tại Việt Nam, giải pháp này mang lại bốn nhóm lợi ích cốt lõi bắt đầu từ việc tối ưu hóa kinh tế ở cả hai cấp độ. Ở cấp độ vi mô, khả năng cách nhiệt vượt trội giúp cắt giảm trung bình từ 25% đến 35% chi phí điện năng làm mát, tạo ra giá trị thặng dư trực tiếp cho người sử dụng. Ở cấp độ vĩ mô, việc chuyển đổi phế phẩm nông nghiệp thành hàng hóa thông qua mô hình hợp tác xã xanh giúp tăng thu nhập ròng cho nông dân từ 5% đến 10% mỗi vụ, đồng thời góp phần giảm thiểu sự lệ thuộc vào các loại vật liệu xây dựng nhập khẩu đắt đỏ.

Tiếp đến là chiến lược môi trường và lộ trình tiến tới Net Zero thông qua cơ chế quản lý phế phẩm và lưu trữ phát thải. Việc tận dụng khoảng 20% lượng rơm rạ thay vì đốt đồng trực tiếp sẽ giúp giảm thiểu hàng triệu tấn bụi mịn PM2.5 [12], cải thiện trực tiếp chất lượng không khí tại các vùng nông nghiệp xung quanh đô thị. Đặc biệt, cơ chế thu giữ carbon (Carbon Sequestration) cho phép mỗi tấn vật liệu sinh học "khóa" tương đương 1.5 tấn CO₂, tạo điều kiện tiền đề để ngành xây dựng Việt Nam

tiếp cận và khai thác thị trường tín chỉ carbon quốc tế trong tương lai gần. Bên cạnh đó, giá trị về an sinh xã hội và sức khỏe cộng đồng cũng được củng cố nhờ đặc tính điều tiết ẩm tự nhiên, giúp duy trì độ ẩm lý tưởng trong không gian sống từ 50% đến 60%. Khả năng này giúp ngành xây dựng tự chủ nguồn cung vật liệu, nắm mốc và giảm đáng kể căng thẳng nhiệt cho các nhóm đối tượng yếu thế như người già và trẻ em, từ đó nâng cao chất lượng sống và giảm áp lực lên hệ thống y tế công cộng trước các hiện tượng thời tiết cực đoan.

Cuối cùng, mô hình kinh tế tuần hoàn và khả năng tự chủ hạ tầng được hiện thực hóa thông qua việc thiết lập chuỗi cung ứng khép kín từ nguồn cung nông nghiệp nội địa đến công nghệ chế biến hiện đại. Việc làm chủ công nghệ "nhiệt đới hóa" như kiềm hóa hoặc hybrid hóa giúp sợi tự nhiên đáp ứng đầy đủ các tiêu chuẩn khắt khe về độ bền vật lý và an toàn cháy nổ, giúp ngành xây dựng tự chủ nguồn cung vật liệu trước những biến động phức tạp của chuỗi cung ứng toàn cầu. Tóm lại, vật liệu sinh học không chỉ là giải pháp kỹ thuật mà còn là một chiến lược hội tụ đủ ba giá trị cốt lõi bao gồm đột phá về công nghệ, trách nhiệm với môi trường và tính nhân văn trong an sinh xã hội. Đây chính là một trong những giải pháp tiềm năng để ngành xây dựng Việt Nam thích ứng với biến đổi khí hậu và thực hiện hiệu quả các cam kết quốc tế về giảm phát thải bền vững.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

5.1. Kết luận

Kết quả nghiên cứu khẳng định tiềm năng to lớn của vật liệu sinh học trong việc kiến tạo các mô hình nhà ở bền vững tại Việt Nam. Về mặt kỹ thuật, rom rạ nén sau khi được tối ưu hóa đã đạt hiệu suất cách nhiệt tương đương với các tiêu chuẩn công nghiệp, có tiềm năng thay thế hiệu quả cho các loại vật liệu tổng hợp hiện có trên thị trường. Đặc biệt, giải pháp Hybrid kết hợp sợi tre chịu lực và sợi dừa kháng ẩm đã tạo ra các dòng tấm Panel có độ bền cơ lý vượt trội, thích ứng tốt với điều kiện môi trường nhiệt đới ẩm đặc thù. Quá trình xử lý hóa lý thông qua phương pháp tẩm muối Borat được xác định là được khuyến nghị để sản phẩm đạt tiêu chuẩn kháng cháy và đảm bảo sự đồng nhất về chất lượng đầu ra. Về mặt kinh tế và môi trường, việc ứng dụng rộng rãi các vật liệu này không chỉ giúp giảm ước tính theo kịch bản (scenario estimate) từ 25% đến 35% chi phí điện năng làm mát mà còn đóng góp trực tiếp vào lộ trình Net Zero 2050. Điều này được thực hiện thông qua cơ chế thu giữ carbon trong cấu kiện công trình thay vì đốt bỏ phế phẩm nông nghiệp, biến nguồn tài nguyên bản địa thành giải pháp bảo vệ khí hậu bền vững.

5.2. Kiến nghị chính sách và nghiên cứu tiếp theo

Dựa trên các kết quả phân tích và nhằm thúc đẩy quá trình thương mại hóa vật liệu sinh học, nghiên cứu đưa ra các kiến nghị trọng tâm bắt đầu từ việc hoàn thiện hệ thống tiêu chuẩn kỹ thuật. Đề xuất Bộ Xây dựng ưu tiên ban hành hệ thống Tiêu chuẩn Kỹ thuật Việt Nam (TCVN) chuyên biệt cho các vật liệu cách nhiệt chế tạo từ phụ phẩm nông nghiệp, nhằm thiết lập hành lang pháp lý giúp các sản phẩm Panel sinh học được chứng nhận chính thức và đưa vào sử dụng trong các dự án quy mô lớn. Song song với đó, Chính phủ cần triển khai các chương trình thí điểm quốc gia tại các khu vực trọng điểm như Đồng bằng sông Cửu Long, tập trung vào phân khúc nhà ở xã hội hoặc công trình công cộng để minh chứng hiệu quả thực tế và tạo sức lan tỏa cho cộng đồng.

Để hỗ trợ các doanh nghiệp trong chuỗi giá trị, cần áp dụng các chính sách "thuế xanh" và các gói tín dụng ưu đãi cho cả đơn vị sản xuất lẫn hộ gia đình lựa chọn giải pháp vật liệu xanh. Về mặt kỹ thuật chuyên sâu, việc thiết lập các phòng thí nghiệm trọng điểm là cần thiết để tiếp tục tối ưu hóa tỷ lệ phụ gia cho từng loại sợi thực vật đặc thù theo từng vùng miền. Đồng thời, việc xây dựng hệ sinh thái cung ứng bền vững thông qua mô hình hợp tác xã tại các địa phương như Bến Tre hay Đồng Tháp sẽ đảm bảo nguồn nguyên liệu ổn định, góp phần thúc đẩy kinh tế tuần hoàn và nâng cao sinh kế cho cư dân nông thôn. Hành trình dịch chuyển từ phế thải nông nghiệp đến ngôi nhà xanh chỉ có thể thành công khi có sự cộng hưởng từ chính sách pháp lý, đột phá kỹ thuật và sự thay đổi trong tư duy tiêu dùng, hướng tới một tương lai an toàn và bền vững cho thế hệ mai sau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] IPCC, "Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report," *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2023.
- [2] M. Santamouris, "Cooling the buildings - past, present and future," *Energy and Buildings*, vol. 128, pp. 617-627, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.07.034.
- [3] N. Jannat, A. Hussien, B. Abdullah, and A. Cotgrave, "A comparative simulation study of the thermal performances of the building envelope wall materials in the tropics," *Sustainability*, vol. 12, no. 12, p. 4892, 2020, doi: 10.3390/su12124892.
- [4] Bộ Xây dựng, "QCVN 06:2022/BXD - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về An toàn cháy cho nhà và công trình," NXB Xây dựng, 2022.
- [5] L. Ba, A. Trabelsi, T. T. Ngo, P. Pliya, I. El Abbassi, and C. S. E. Kane, "Thermal performance of bio-based materials for sustainable building insulation: A numerical study," *Fibers*, vol. 13, no. 5, p. 52, 2025, doi: 10.3390/fib13050052.
- [6] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 5th ed., New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015.
- [7] S. R. Mousavi, M. H. Zamani, S. Estaji, M. I. Tayouri, M. Arjmand, S. H. Jafari, S. Nouranian, and H. A. Khonakdar, "Mechanical properties of bamboo fiber-reinforced polymer composites: a review of recent case studies," *J. Mater. Sci.*, vol. 57, no. 5, pp. 3143-3167, Jan. 2022, doi: 10.1007/s10853-021-06721-6
- [8] H. Bui, N. Sebaibi, M. Boutouil, and D. Levacher, "Determination and review of physical and mechanical properties of raw and treated coconut fibers for their recycling in construction materials," *Fibers*, vol. 8, no. 6, p. 37, 2020, doi: 10.3390/fib8060037.
- [9] Olivia Myntti, H. Emre Ilgin, Markku Karjalainen, "Integrating prefabricated straw bale panels into timber framed housing in cold climate urban contexts," *Discover Sustainability*, vol. 6, art. no. 948, 2025, doi: 10.1007/s43621-025-01881-8.
- [10] N. Llantoy, M. Chàfer, and L. F. Cabeza, "A comparative life cycle assessment (LCA) of different insulation materials for buildings in the continental Mediterranean climate," *Energy and Buildings*, vol. 225, Art. no. 110323, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110323
- [11] L. T. K. Oanh, "Đánh giá vòng đời (LCA) vật liệu sinh học trong điều kiện biến đổi khí hậu tại Việt Nam," *Tạp chí Môi trường*, số 8, tr. 20-23, 2023
- [12] Viet Nam News, "Rice straw emerges as key resource in Viet Nam's net-zero push, experts say," Jan. 21, 2026. [Online]. Available: <https://vietnamnews.vn/economy/1764214/rice-straw-emerges-as-key-resource-in-viet-nam-s-net-zero-push-experts-say.html>. [Accessed: Mar. 29, 2026].
- [13] F. Jahan and M. Soni, "Effects of chemical treatment on mechanical properties of various natural fiber reinforced composite: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, part 15, pp. 6708-6711, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.175
- [14] H. P. S. Abdul Khalil, I. U. H. Bhat, M. Jawaid, A. Zaidon, D. Hermawan, and Y. S. Hadi, "Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review," *Materials & Design*, vol. 42, pp. 353-368, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2012.06.015.