

SỞ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO HẢI PHÒNG

**CUỘC THI KHOA HỌC KỸ THUẬT CẤP THÀNH PHỐ
DÀNH CHO HỌC SINH TRUNG HỌC NĂM HỌC 2025 - 2026**

TÊN DỰ ÁN:

Gạch tự phục hồi bằng vi khuẩn bacillus subtilis kích hoạt bởi hơi ẩm (for-activated), kết hợp tro/xỉ than tổ ong làm nguồn dinh dưỡng tự nhiên.

**LĨNH VỰC DỰ THI: KHOA HỌC-VẬT LIỆU
LOẠI DỰ ÁN: DỰ ÁN KỸ THUẬT**

MÃ DỰ ÁN:.....

VỊ TRÍ:.....

Hải Phòng, tháng 10 năm 2025

MỤC LỤC

| | |
|--|----|
| VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU..... | 1 |
| 1. Tính cấp thiết của đề tài | 1 |
| 2. Các tiêu chí cho giải pháp..... | 2 |
| II. THIẾT KẾ VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU | 2 |
| 1. Thiết kế nghiên cứu..... | 2 |
| 2. Phương pháp nghiên cứu..... | 4 |
| III. THỰC HIỆN THU THẬP, PHÂN TÍCH VÀ GIẢI THÍCH DỮ LIỆU.. | 4 |
| 1. Thu thập thông tin dữ liệu..... | 4 |
| 2. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết – cơ sở khoa học | 5 |
| 2.1. B. subtilis (Bacillus subtilis)..... | 5 |
| 2.2 Vật liệu bao bọc vi khuẩn | 6 |
| 3. Thiết kế, tạo sản phẩm và kiểm tra..... | 7 |
| 3.1 Nguyên liệu, dụng cụ và thiết bị..... | 7 |
| 3.2 Bố trí thí nghiệm | 7 |
| 3.3. Kết quả thí nghiệm | 9 |
| TÀI LIỆU THAM KHẢO | 13 |

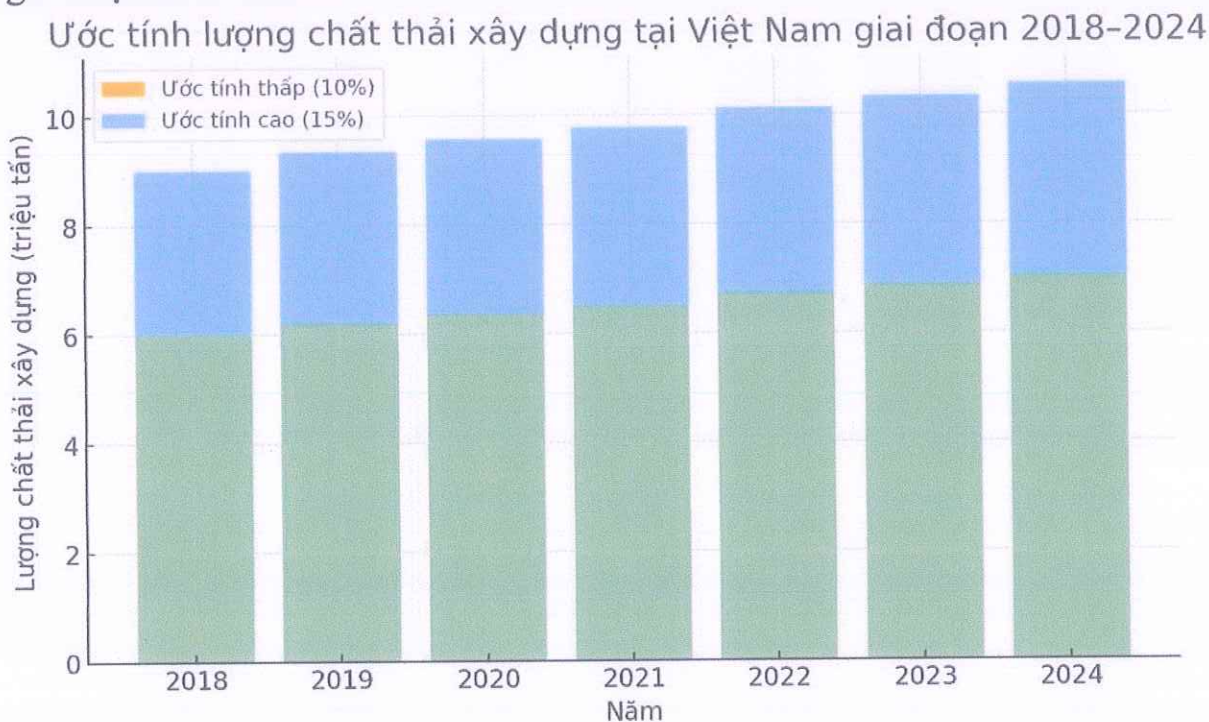
VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Ở Việt Nam, tình trạng xuống cấp nhanh của các công trình xây dựng là một vấn đề đang được quan tâm lớn. Do điều kiện thời tiết nóng ẩm, mưa nhiều, nhiệt độ thay đổi lớn giữa ngày và đêm, các vật liệu xây dựng như xi măng, gạch, bê tông dễ giãn nở và co lại liên tục, dẫn đến nứt bề mặt, chỉ sau vài năm sử dụng, nhiều công trình nhà ở, trường học, đường bê tông, cầu nhỏ ở nông thôn hoặc tường rào dân dụng đã xuất hiện các vết nứt, thấm nước, bong tróc, gây mất an toàn và tốn kém chi phí sửa chữa.

Nhiều hộ dân, đặc biệt ở vùng khó khăn, không có điều kiện sửa chữa thường xuyên, nên các vết nứt nhỏ dần trở thành vết nứt lớn, ảnh hưởng đến kết cấu, thẩm mỹ và tuổi thọ công trình. Trong khi đó, chi phí vật liệu và nhân công sửa chữa ngày càng tăng, gây lãng phí lớn cho người dân và xã hội. Song song với đó, Việt Nam đang phải đối mặt với vấn đề ô nhiễm môi trường từ ngành xây dựng. Mỗi năm, lượng rác thải gạch, bê tông và vật liệu vữa vụn thải ra từ các công trình chiếm một tỷ lệ rất lớn trong tổng lượng chất thải rắn đô thị. Khi gạch hoặc bê tông bị nứt, người ta thường đập bỏ và thay mới, dẫn đến lãng phí tài nguyên, tăng lượng rác thải xây dựng và tổn năng lượng sản xuất vật liệu mới.

Biểu đồ sau đây là thực trạng về lượng chất thải xây dựng tại Việt Nam giai đoạn 2018-2024



Biểu đồ cho thấy lượng chất thải xây dựng ở Việt Nam có xu hướng tăng dần qua các năm, dao động khoảng 6–10 triệu tấn/năm, chiếm khoảng 10–15% tổng lượng chất thải rắn sinh hoạt quốc gia. Xu hướng này phản ánh tốc độ đô thị hóa và phát triển xây dựng tăng nhanh, đặt ra yêu cầu cấp thiết về tái chế, tái sử dụng và quản lý chất thải xây dựng bền vững. Điều này đi ngược lại với xu hướng xây dựng bền vững và phát triển xanh mà Việt Nam đang hướng tới. Bên cạnh đó, nước ta có nhiều nguồn nguyên liệu rẻ và sẵn có như xỉ than, tro bay,

bùn vôi..., có thể tận dụng để tạo ra loại gạch mới thân thiện với môi trường, tiết kiệm chi phí mà vẫn đảm bảo chất lượng.

Nhận thấy tiềm năng ứng dụng thực tế cao, cũng như tính mới mẻ và ý nghĩa của hướng nghiên cứu này, nhóm em quyết định chọn đề tài “**Chế tạo gạch tự phục hồi bằng vi khuẩn bacillus subtilis kích hoạt bởi hơi ẩm (for-activated), kết hợp tro/xỉ than tổ ong làm nguồn dinh dưỡng tự nhiên**” với mong muốn: Tạo ra loại gạch có khả năng tự vá kín các vết nứt nhỏ. Kéo dài tuổi thọ công trình, giảm chi phí sửa chữa và bảo dưỡng. Góp phần bảo vệ môi trường giảm lượng chất thải xây dựng. Ứng dụng được các nguồn nguyên liệu tái chế, thân thiện với môi trường như xỉ than, tro bay phù hợp xu hướng tương lai. Đây là bước tiến hướng tới xây dựng thông minh và phát triển bền vững, phù hợp với mục tiêu quốc gia về kinh tế xanh và tiết kiệm năng lượng.

2. Các tiêu chí cho giải pháp

Việc đề xuất và lựa chọn giải pháp cho gạch tự phục hồi bằng vi khuẩn *Bacillus subtilis* cần dựa trên các tiêu chí toàn diện về kỹ thuật, môi trường, kinh tế và khả năng ứng dụng thực tế. Trước hết, về hiệu quả kỹ thuật, giải pháp phải đảm bảo khả năng tự phục hồi vết nứt rõ rệt, tốc độ phục hồi nhanh, đồng thời duy trì được cường độ cơ học cao và độ bền lâu dài trước tác động của môi trường như thấm nước, mài mòn hay ăn mòn hóa học. Vi khuẩn được sử dụng cần có khả năng sống sót và hoạt hóa ổn định trong môi trường xi măng, đảm bảo quá trình kết tủa CaCO_3 diễn ra hiệu quả.

Tiếp theo, về hiệu quả môi trường, giải pháp phải góp phần giảm phát thải CO_2 , tận dụng được nguồn phế thải công nghiệp như tro, xỉ than tổ ong làm nguyên liệu tái chế, từ đó giảm lượng chất thải xây dựng phát sinh và hạn chế khai thác tài nguyên tự nhiên. Về hiệu quả kinh tế, vật liệu cần có chi phí chế tạo hợp lý, dễ thương mại hóa, giúp giảm chi phí sửa chữa, bảo trì công trình, đồng thời tận dụng được nguồn nguyên liệu sẵn có trong nước. Bên cạnh đó, tính khả thi và khả năng ứng dụng thực tế cũng là tiêu chí quan trọng: quy trình sản xuất phải đơn giản, phù hợp với công nghệ và điều kiện khí hậu Việt Nam, dễ tích hợp vào dây chuyền sản xuất gạch hoặc bê tông hiện có.

Cuối cùng, giải pháp phải đảm bảo an toàn và tuân thủ các tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành, không gây ảnh hưởng đến sức khỏe con người và môi trường, đồng thời đáp ứng yêu cầu của các tiêu chuẩn vật liệu xây dựng như TCVN hoặc ASTM. Tổng thể, giải pháp được đánh giá là tối ưu khi đáp ứng hài hòa các tiêu chí về kỹ thuật, môi trường, kinh tế, tính khả thi và an toàn, hướng tới mục tiêu phát triển bền vững và thân thiện với môi trường trong lĩnh vực xây dựng

II. THIẾT KẾ VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

1. Thiết kế nghiên cứu

Quá trình nghiên cứu được tổ chức theo bốn giai đoạn chính:

- (1) khảo sát, thu thập và tổng hợp tri thức;
- (2) phối trộn vi khuẩn *Bacillus subtilis* với các vật liệu bao bọc khác nhau

- (3) đánh giá, so sánh và lựa chọn giải pháp tối ưu theo các tiêu chí
(4) hiện thực hóa bằng thiết kế mô hình/nguyên mẫu và lập quy trình

Ở giai đoạn đầu, khảo sát và thu thập thông tin, xác định hiện trạng, các công nghệ gạch/bê tông tự phục hồi trên thế giới, đặc tính của vi khuẩn sinh *Bacillus subtilis*, phương pháp bao bọc bảo vệ vi khuẩn, các nguồn phụ gia (tro/xi) và các tiêu chuẩn kỹ thuật liên quan.

Hoạt động: tổng hợp tài liệu (báo cáo, bài báo, bằng sáng chế), khảo sát nhà máy/nơi sản xuất gạch, thu thập thông số kỹ thuật và dữ liệu thực nghiệm tham khảo để làm nền tảng thiết kế thí nghiệm.

-Trong giai đoạn chế tạo gạch tự phục hồi năm nghiệm thức được thiết kế như sau:

+Nhóm A — Giải pháp vi sinh truyền thống: Bào tử *B. subtilis* được trộn trực tiếp vào vữa/bê tông.

+Nhóm B — Bao thể vô cơ (silica gel, bentonite): Bào tử được đóng gói trong hạt silica/bentonite trước khi đưa vào hỗn hợp.

+Nhóm C — Bao thể hữu cơ (polyurethane/tinh bột biến tính): Ổn định cao, giảm tác động cơ học trong quá trình trộn nhưng có chi phí cao hơn.

+Nhóm D — Hệ hỗn hợp tro/xi làm chất dinh dưỡng + bao thể: Kết hợp tận dụng phụ phẩm (tro/xi) làm nguồn dinh dưỡng và cấu trúc mao dẫn cho quá trình kết tủa CaCO_3 .

+Nhóm E — Giải pháp không sinh học (microcapsule chứa chất tạo vữa)

Tiếp theo là so sánh để đánh giá hiệu quả/chi phí của từng giải pháp. Thí nghiệm kiểm chứng ban đầu (pilot lab-scale), kiểm chứng các giả thuyết về hiệu quả phục hồi, tính ổn định sinh học, ảnh hưởng đến cơ chế tạo vết nứt có kích thước chuẩn (0.2–0.5 mm), kích hoạt bằng hơi ẩm, theo dõi tỉ lệ kín vết nứt theo thời gian (3, 7, 14, 28 ngày); đo cường độ nén trước và sau phục hồi; đo độ hút nước và thấm; quan sát vi mô (SEM) và phân tích thành phần (XRD hoặc FTIR nếu có). Phân tích so sánh và lựa chọn giải pháp khả thi.

Và cuối cùng, hiện thực hoá bằng thiết kế mô hình/ nguyên mẫu và lập quy trình chế tạo gạch tự phục hồi

Bước 1 — Chuẩn bị bào tử và vật liệu bao bọc: trộn bào tử *Bacillus subtilis* với dung dịch → tạo hạt → phủ tro/xi nghiền mịn.

Bước 2 — Trộn khô: trộn xi măng, cát, tro/xi theo công thức, thêm hạt bao vi khuẩn ở bước trộn khô cuối cùng để giảm tổn thương cơ học.

Bước 3 — Thêm nước & đúc: thêm nước dần, trộn nhẹ, đổ vào khuôn, đầm nhẹ để tránh vỡ hạt bao bọc vi khuẩn; gạt phẳng, nhẵn mẫu.

Bước 4 — Dưỡng hộ ban đầu: 72 giờ trong khuôn ở nhiệt độ phòng, sau đó tháo khuôn và dưỡng trong môi trường 95% RH, 25–30°C trong 7–28 ngày.

Bước 5 — Kích hoạt & thử nghiệm: tạo vết nứt nhân tạo, kích hoạt bằng phun hơi ẩm/duy trì độ ẩm cao để mô phỏng điều kiện thực tế; theo dõi khả năng tự phục hồi, cường độ nén, tỷ lệ kín vết nứt, độ hút nước, và phân tích vi mô.

2. Phương pháp nghiên cứu

- Phương pháp quan sát – thực nghiệm: Quan sát sự hình thành kết tủa CaCO_3 tại vết nứt sau khi tiếp xúc với nước, ghi nhận sự thay đổi theo thời gian.
- Phương pháp so sánh: So sánh mẫu gạch có chứa vi khuẩn và mẫu gạch không chứa vi khuẩn về khả năng phục hồi, độ bền, và độ thấm nước.
- Phương pháp phân tích – tổng hợp: Tổng hợp kết quả quan sát, hình ảnh, và dữ liệu đo đạc để rút ra nhận xét về khả năng tự phục hồi của gạch.
- Phương pháp thử nghiệm thực tế (ứng dụng): Thử đặt mẫu gạch trong môi trường ngoài trời (nắng, mưa, ẩm) trong thời gian nhất định để kiểm chứng khả năng tự phục hồi trong điều kiện tự nhiên.

III. THỰC HIỆN THU THẬP, PHÂN TÍCH VÀ GIẢI THÍCH DỮ LIỆU

1. Thu thập thông tin dữ liệu

- Khảo sát các công trình hiện nay cho thấy hiện tượng nứt gãy trong gạch hoặc bê tông là tình trạng xuất hiện các vết nứt li ti hoặc khe hở nhỏ trên bề mặt và bên trong cấu trúc vật liệu, làm mất tính toàn khối và giảm cường độ chịu lực của gạch.

+ Các vết nứt này có thể rõ ràng bằng mắt thường hoặc ẩn sâu trong vi cấu trúc, nhưng đều ảnh hưởng nghiêm trọng đến chất lượng và độ bền của công trình.

- Hiện tượng nứt gãy có thể xuất phát từ nhiều nguyên nhân khác nhau, được chia thành hai nhóm chính:

a). Nguyên nhân nội tại (trong quá trình sản xuất và bảo dưỡng gạch)

+ Co ngót do mất nước nhanh: Khi gạch mới đúc mất nước quá sớm (do không được bảo dưỡng ẩm đủ thời gian), thể tích gạch giảm, gây co ngót và hình thành vết nứt nhỏ.

Phản ứng thủy hóa không hoàn toàn: Quá trình kết dính giữa xi măng và nước diễn ra không đồng đều, tạo vùng yếu trong cấu trúc.

+ Tỷ lệ pha trộn sai: Khi lượng nước hoặc xi măng không phù hợp, hỗn hợp dễ bị rỗng, dẫn đến nứt khi khô.

Phân bố hạt không đồng đều: Kích thước và mật độ cốt liệu không cân đối gây ra ứng suất cục bộ.

b). Nguyên nhân ngoại lực (tác động từ môi trường và sử dụng)

Biến đổi nhiệt độ và độ ẩm: Khi nhiệt độ tăng – giảm hoặc khi gặp nước mưa, vật liệu giãn nở và co lại liên tục → gây nứt do chênh lệch ứng suất nhiệt.

+ Tải trọng cơ học: Các lực tác động lớn hoặc không đều (ví dụ: sạt lún nền, rung động, tải trọng mái) có thể làm gạch bị rạn nứt.

Tác động hóa học: Nước mưa, khí CO_2 , SO_2 , hoặc các chất muối có thể xâm nhập vào lỗ rỗng, phản ứng với canxi trong xi măng, gây phân hủy cấu trúc và tạo vết nứt hóa học.

- Hậu quả:

+ Giảm khả năng chịu lực: Vết nứt làm mất tính liên khối, giảm cường độ nén và kéo của gạch.

+ Tăng khả năng thấm nước: Nước và khí xâm nhập sâu vào bên trong, gây ăn mòn và hư hại.

+ Phát triển rêu, nấm mốc: Môi trường ẩm trong vết nứt tạo điều kiện cho vi sinh vật phát triển, ảnh hưởng thẩm mỹ và vệ sinh công trình.

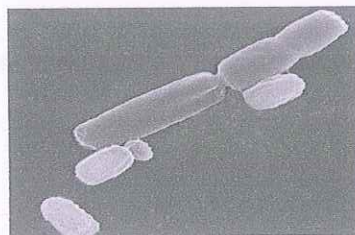
+ Tăng chi phí bảo trì: Phải thường xuyên trát vá, chống thấm, hoặc thay thế vật liệu hư hại.

=> Điều này khiến nhiều công trình xuống cấp chỉ sau 1–3 năm sử dụng, dù tuổi thọ thiết kế ban đầu có thể lên tới 20–30 năm.

2. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết – cơ sở khoa học

2.1. B. subtilis (Bacillus subtilis)

Bacillus subtilis là một loài vi khuẩn Gram dương, có hình dạng trực khuẩn (hình que), thuộc họ Bacillaceae và là một trong những vi sinh vật được nghiên cứu nhiều nhất trong vi sinh học hiện đại. Vi khuẩn này có kích thước trung bình khoảng 0,7–0,8 μm đường kính và 2–3 μm chiều dài, có khả năng di động nhờ các tiên mao (lông roi) bao quanh thân. *B. subtilis* là vi khuẩn hiếu khí bắt buộc, sinh trưởng tốt trong môi trường giàu oxy, ở nhiệt độ tối ưu từ 30 đến 37°C và pH khoảng 6,5–7,5. Một đặc điểm nổi bật của loài này là khả năng tạo bào tử – một dạng tế bào có vỏ dày, giúp chúng tồn tại trong điều kiện khắc nghiệt như nhiệt độ cao, khô hạn hoặc thiếu dinh dưỡng. Nhờ vậy, *B. subtilis* có thể sống sót lâu dài trong môi trường đất, nước, không khí và trên các vật chất hữu cơ đang phân hủy.



Hình ảnh vi sinh vật bacillus subtilis dưới kính hiển vi

Bacillus subtilis thuộc nhóm an toàn sinh học cấp 1 (BSL-1), không gây bệnh cho người, động vật hay thực vật, vì vậy được sử dụng rộng rãi trong các phòng thí nghiệm, cơ sở sản xuất sinh học và công nghiệp vi sinh. Với những đặc điểm nổi bật về sinh lý, di truyền và ứng dụng đa dạng, *Bacillus subtilis* không chỉ là một loài vi khuẩn điển hình cho nghiên cứu cơ bản, mà còn là công cụ sinh học quan trọng trong công nghệ enzyme, nông nghiệp bền vững và sản xuất chế phẩm vi sinh hiện đại.

Cơ chế hoạt động của *B. subtilis* trong gạch tự phục hồi dựa trên khả năng sinh kết tủa canxi cacbonat (CaCO_3) để lấp kín các vết nứt. Trong quá trình sản xuất, các bào tử vi khuẩn cùng nguồn dinh dưỡng (như canxi lactat) được trộn vào hỗn hợp xi măng. Ở trạng thái khô và kiềm cao, các bào tử này ở dạng “ngủ” và có thể tồn tại nhiều năm mà không bị chết. Khi gạch bị nứt và nước xâm nhập vào, điều kiện ẩm ướt sẽ kích hoạt bào tử nảy mầm, chuyển sang dạng vi khuẩn sống. *Bacillus subtilis* khi đó sử dụng nguồn dinh dưỡng sẵn có để trao đổi chất, tạo ra ion cacbonat (CO_3^{2-}) kết hợp với ion canxi (Ca^{2+}) trong xi măng, hình thành kết tủa canxi cacbonat (CaCO_3). Lớp tinh thể này bám vào bề mặt vết nứt, từ từ lấp đầy khe hở và khôi phục độ bền, khả năng chống thấm của vật liệu. Khi vết nứt đã được bịt kín và môi trường trở lại khô, vi khuẩn ngừng hoạt động và trở về trạng thái bào tử, sẵn sàng tái kích hoạt nếu có vết nứt mới xuất hiện. Nhờ cơ chế

này, gạch tự phục hồi chứa *Bacillus subtilis* có khả năng tự liền vết nứt, kéo dài tuổi thọ công trình, giảm chi phí bảo trì và thân thiện với môi trường do vi khuẩn hoàn toàn an toàn, không gây hại cho con người hay sinh vật khác.

2.2 Vật liệu bao bọc vi khuẩn

Vật liệu bao bọc vi khuẩn là các hệ vật liệu thiết kế để bảo vệ tế bào hoặc bào tử vi khuẩn khỏi các điều kiện bất lợi đồng thời cho phép chúng được kích hoạt và giải phóng khi cần. Vật liệu bao bọc có thể là hữu cơ (polyme tự nhiên như alginate, chitosan, gelatin; hoặc polyme tổng hợp như polyurethane, polymethacrylate, epoxy) hoặc vô cơ (silica/sol-gel, đất sét, zeolite, perlite, thậm chí aerogel), hoặc là các hệ composite kết hợp cả hai để tận dụng ưu điểm của mỗi thành phần; chúng có dạng gel, hạt vi cầu (microbeads), vi nang (microcapsules), lớp mỏng phủ theo phương pháp layer-by-layer hoặc vật liệu xốp/giữ ẩm để chứa và bảo vệ vi sinh. Có tính ổn định hóa học trong môi trường kiềm và nhiệt độ cao, khả năng thấm nước và trao đổi khí đủ để kích hoạt vi khuẩn, độ bền cơ học để không bị vỡ sớm nhưng vẫn cho phép giải phóng khi bị nứt hoặc chịu ẩm, khả năng giữ dinh dưỡng và tính tương thích sinh học, không độc hại với chủng vi khuẩn và môi trường xung quanh

Cơ chế hoạt động của vật liệu bao bọc dựa trên nguyên tắc cách ly – bảo vệ – kiểm soát khuếch tán – giải phóng có điều kiện. Ban đầu, lớp bao bọc tạo hàng rào cơ học và hóa học, giúp cách ly vi khuẩn hoặc tác nhân sinh học khỏi các yếu tố bất lợi như pH cao, nhiệt độ hoặc chất độc, đồng thời vẫn cho phép khuếch tán chọn lọc các phân tử nhỏ như nước và oxy. Khi môi trường thay đổi, chẳng hạn có nước hoặc áp lực cơ học, vật liệu bao bọc sẽ trương nở, tan rã hoặc nứt vỡ, kích hoạt quá trình giải phóng vi khuẩn hoặc hợp chất bên trong ra ngoài. Các vật liệu như silica gel, calcium alginate, polymer hoặc zeolite thường được dùng nhờ khả năng chịu kiềm tốt và kiểm soát tốc độ giải phóng hiệu quả. Nhờ cơ chế này, vật liệu bao bọc không chỉ bảo vệ vi khuẩn trong thời gian dài mà còn đảm bảo chúng chỉ hoạt động khi cần thiết, giúp duy trì tính năng tự phục hồi và độ bền của vật liệu một cách ổn định và bền vững

2.3 Tác dụng hội sinh giữa vi khuẩn *Bacillus subtilis* và vật liệu bao bọc

Vật liệu bao bọc này tạo thành một “hàng rào vật lý và hóa học”, giúp cách ly vi khuẩn khỏi môi trường kiềm mạnh, đồng thời giữ ẩm và dinh dưỡng cần thiết để duy trì khả năng sống trong thời gian dài. Trong trạng thái này, vi khuẩn ở dạng “ngủ” – không hoạt động sinh học nhưng vẫn có thể tồn tại ổn định hàng chục năm trong cấu trúc vật liệu. Khi xuất hiện vết nứt hoặc nước thấm vào gạch/bê tông, quá trình kích hoạt và giải phóng bắt đầu. Sự xâm nhập của nước làm thay đổi môi trường vi mô quanh hạt bao bọc: pH giảm nhẹ, độ ẩm tăng, và áp suất cơ học có thể làm lớp bao bọc tan rã hoặc nứt vỡ. Lúc này, vi khuẩn được giải phóng ra khỏi lớp bảo vệ, đồng thời tiếp xúc với nguồn oxy và dinh dưỡng (ví dụ canxi lactat hoặc urê) có sẵn trong cấu trúc vật liệu. Vi khuẩn này mầm và bắt đầu trao đổi chất, tạo ra ion cacbonat (CO_3^{2-}) thông qua các phản ứng oxy hóa – khử. Các ion này kết hợp với ion canxi (Ca^{2+}) có sẵn trong môi trường xi măng để hình thành kết tủa canxi cacbonat (CaCO_3). Lớp tinh thể CaCO_3 phát triển và lấp đầy các khe nứt, gắn kết hai bề mặt vật liệu, từ đó phục hồi cấu trúc cơ học và ngăn

nước thấm tiếp. Khi vết nứt được bịt kín và môi trường trở lại khô, vi khuẩn mất nguồn nước và dinh dưỡng, dần chuyển về trạng thái bất hoạt (bào tử), trong khi lớp vật liệu bao bọc còn sót lại tiếp tục bảo vệ chúng khỏi các yếu tố bên ngoài, duy trì khả năng sống để tái kích hoạt khi có vết nứt mới.



Hình ảnh hạt vi nang bao bọc vi khuẩn do nhóm nghiên cứu chúng em tạo ra

3. Thiết kế, tạo sản phẩm và kiểm tra

3.1 Nguyên liệu, dụng cụ và thiết bị

-Chế phẩm vi sinh: Vi nang chứa bào tử vi khuẩn sinh bacillus subtilis và các chất dinh dưỡng cần thiết

-Nguyên liệu: cát, xi măng, nước, tro/xỉ than tổ ong (nghiên mịn)

-Thiết bị: Thùng nhựa, cân tiểu ly, cốc đong, ống nghiệm, pipet, bình phun nước, thước đo, máy đo pH, khuôn đúc gạch (12x6x4)

3.2 Bố trí thí nghiệm

Bước 1: Tạo vi nang chứa vi khuẩn

Chuẩn bị dung dịch natri alginate 2% bằng cách hòa tan bột alginate trong nước cất, khuấy đều đến khi thu được dung dịch đồng nhất. Bào tử vi khuẩn sau khi thu hồi được phân tán đều trong dung dịch alginate bằng khuấy nhẹ ở tốc độ thấp, nhằm tránh làm vỡ bào tử. Hỗn hợp này được nhỏ giọt từ từ vào dung dịch CaCl_2 0,2 M bằng ống nhỏ giọt hoặc kim tiêm, trong điều kiện khuấy nhẹ. Khi tiếp xúc với ion Ca^{2+} , các giọt alginate ngay lập tức tạo màng rắn, hình thành các hạt cầu nhỏ có đường kính trung bình từ 2mm–4mm — đó chính là các vi nang Ca-alginate chứa vi khuẩn bên trong.

Sau khi tạo hạt, các vi nang được lọc tách ra khỏi dung dịch CaCl_2 , rửa nhẹ bằng nước vô khuẩn ba lần để loại bỏ ion dư, sau đó được làm khô tự nhiên ở 30–35°C trong không khí sạch. Các vi nang khô có bề mặt nhẵn, đàn hồi, giúp bảo vệ bào tử khỏi môi trường kiềm và nhiệt trong quá trình trộn gạch.

Để kiểm tra khả năng sống của vi khuẩn sau khi bao bọc, lấy một phần vi nang chia thành 3 mẫu đặt trong 3 môi trường để giải phóng bào tử ra ngoài gồm A: Không khí khô, B: ẩm ướt (RH>95%), C: môi trường có độ kiềm cao (môi trường xi măng) trong

Bước 2: Chế tạo mẫu gạch

Quá trình chế tạo gạch tự phục hồi được tiến hành nhằm đảm bảo cả độ bền cơ học của gạch và khả năng sống sót của vi khuẩn trong môi trường xi măng. Nguyên liệu gồm xi măng Poóc-lăng PC40, cát mịn đã sấy khô, tro xỉ than tổ ong đã nghiền mịn, nước sạch và vi nang chứa bào tử Bacillus subtilis được chuẩn bị sẵn.

Cát, xi măng và tro xỉ được trộn khô theo tỷ lệ 1:2:0,5 trong khoảng 2 phút để đạt độ đồng đều. Sau đó, vi nang chứa vi khuẩn được bổ sung với tỷ lệ 5–10% khối lượng xi măng và tiếp tục trộn nhẹ để tránh làm vỡ vi nang. Nước sạch được cho

từ từ vào hỗn hợp với tỷ lệ nước/xi măng (w/c) = 0,4, vừa trộn vừa kiểm soát độ dẻo.

Hỗn hợp sau khi đạt yêu cầu được đổ vào khuôn (12x6x4) cm, nén nhẹ hoặc rung đều để loại bỏ bọt khí. Mẫu được để yên trong 72 giờ ở nhiệt độ phòng, sau đó tháo khuôn và chuyển vào buồng dưỡng ẩm ở 25°C, RH ≥ 95% trong 28 ngày.

Quá trình dưỡng hộ giúp gạch đạt cường độ nén ổn định, đồng thời duy trì sự sống của vi khuẩn ở trạng thái “ngủ đông” bên trong các vi nang. Sau 28 ngày, mẫu được phân nhóm để tiến hành các thí nghiệm kiểm tra khả năng tự phục hồi, bao gồm đo cường độ, gây nứt nhân tạo và đánh giá mức độ khép kín vết nứt.

Bước 3: Gây nứt nhân tạo và kích hoạt tự phục hồi

Các mẫu được tạo vết nứt nhân tạo bằng hai phương pháp tùy điều kiện thí nghiệm: cắt cơ học hoặc nén uốn. Trong phương pháp cắt cơ học, lưỡi dao hoặc máy cắt mảnh được sử dụng để tạo vết nứt có độ sâu 2–3 mm và độ rộng trung bình 0,3–0,5 mm, được đo bằng kính hiển vi có độ chính xác 0,01 mm. Trong phương pháp nén uốn, mẫu gạch được đặt trên máy nén, tải trọng tăng dần cho đến khi bề mặt xuất hiện vết nứt rõ ràng trong giới hạn cho phép.

Để kích hoạt cơ chế tự phục hồi, các mẫu gạch chứa vi khuẩn được phun dung dịch Ca-lactate 0,5 M – đây là nguồn dinh dưỡng và cung cấp ion canxi cho quá trình sinh CaCO₃ của vi khuẩn *Bacillus subtilis*. Dung dịch được phun nhẹ đều lên bề mặt vết nứt với lượng khoảng 10 mL cho mỗi mẫu, thực hiện 2 ngày/lần trong suốt thời gian phục hồi. Các mẫu được đặt trong buồng dưỡng ẩm 25 ± 2°C, độ ẩm ≥ 95% để duy trì điều kiện tối ưu cho hoạt động của vi khuẩn.

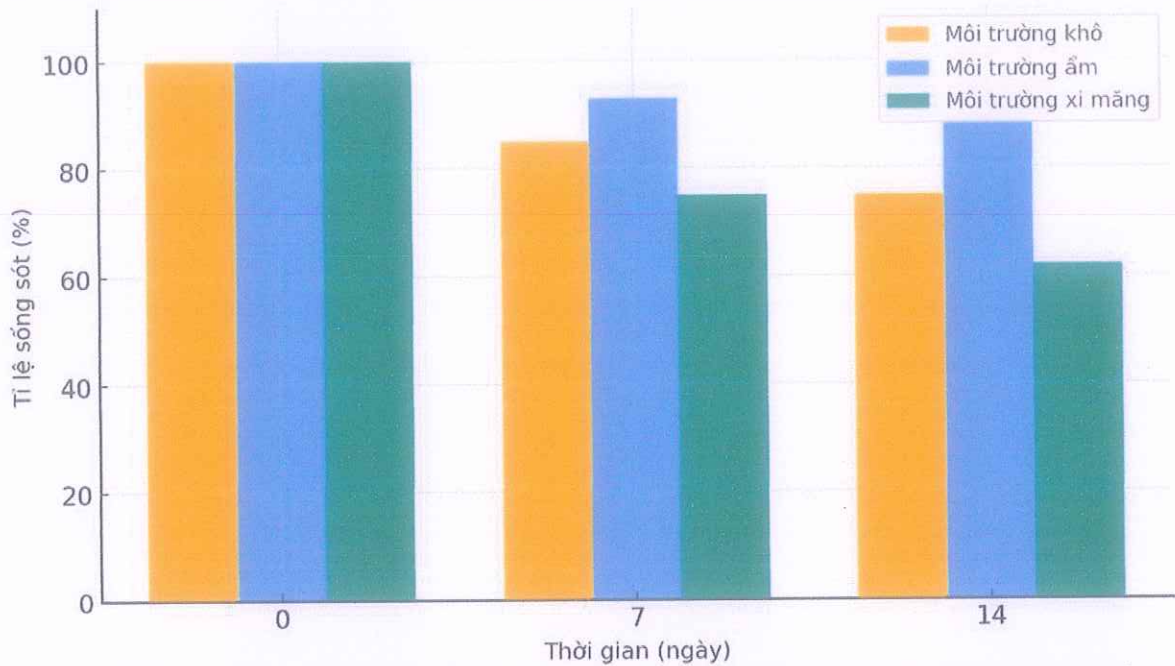
Trong quá trình dưỡng hộ phục hồi, vi khuẩn “thức dậy” từ trạng thái bào tử, sử dụng Ca-lactate làm nguồn năng lượng và kết tủa CaCO₃ tại khu vực vết nứt. Lượng CaCO₃ hình thành dần dần bít kín khe hở, làm giảm độ rộng vết nứt và tăng liên kết cơ học của vật liệu. Các mẫu được quan sát, đo và chụp ảnh vào ngày thứ 0, ngày thứ 7, ngày thứ 14, ngày thứ 21 và ngày thứ 28 để theo dõi tiến trình phục hồi.

Bước 4: phân tích và tổng hợp kết quả

Sau khi thu thập dữ liệu từ các thí nghiệm, quá trình phân tích và tổng hợp kết quả được tiến hành theo phương pháp thống kê mô tả. Các giá trị đo được như độ rộng vết nứt, cường độ nén và độ hút nước được ghi nhận cho từng mẫu tại các mốc thời gian 0, 7, 14, 21 và 28 ngày. Dữ liệu sau đó được xử lý để tính giá trị trung bình và độ lệch chuẩn, giúp đánh giá độ ổn định của phép thử. Từ các số liệu này, nhóm nghiên cứu xác định tỷ lệ khép kín vết nứt (%) và tỷ lệ phục hồi cơ học (%) theo các công thức đã nêu ở phần phương pháp. Kết quả được trình bày dưới dạng bảng tổng hợp và biểu đồ so sánh giữa gạch đối chứng và gạch có vi khuẩn. Ngoài ra, ảnh chụp vết nứt ở các thời điểm khác nhau được sử dụng để đối chiếu định tính, hỗ trợ minh chứng trực quan cho khả năng tự phục hồi.

3.3. Kết quả thí nghiệm

Tỉ lệ sống sót của vi khuẩn *Bacillus subtilis* theo thời gian trong ba môi trường khác nhau

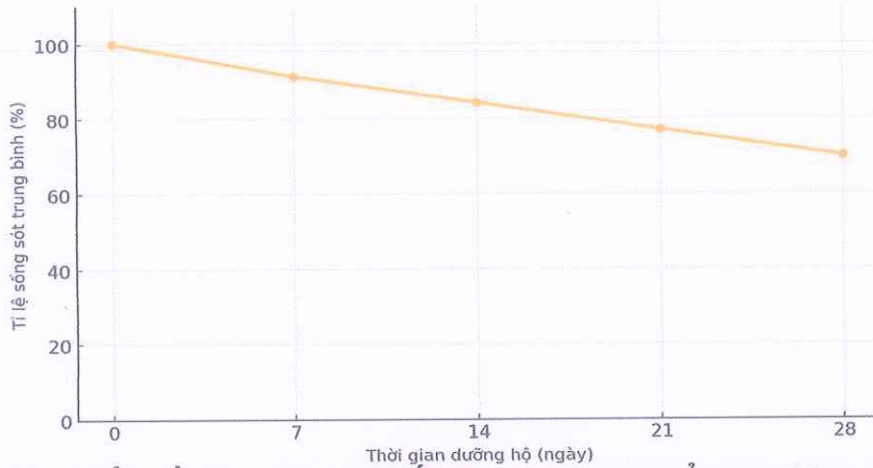


Kết quả theo dõi tỉ lệ sống sót của vi khuẩn *Bacillus subtilis* được thể hiện trong biểu đồ cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa ba môi trường thí nghiệm trong suốt quá trình 14 ngày. Ở ngày thứ 0, mật độ vi khuẩn trong cả ba môi trường đều được coi là 100%, phản ánh điều kiện ban đầu chưa bị tác động. Đến ngày thứ 7, tỉ lệ sống của vi khuẩn giảm nhẹ ở tất cả các môi trường, nhưng vẫn duy trì ở mức cao, đặc biệt là trong môi trường ấm (93%), trong khi môi trường khô đạt 85% và môi trường xi măng còn 75%.

Sau 14 ngày, mức độ suy giảm rõ rệt hơn, với vi khuẩn trong môi trường ấm vẫn sống tới 88%, cho thấy điều kiện độ ẩm cao giúp duy trì hoạt động sinh học của *Bacillus subtilis*. Trong môi trường khô, tỉ lệ sống giảm xuống còn khoảng 75%, chứng tỏ thiếu ẩm làm vi khuẩn mất dần khả năng tồn tại dù vẫn còn được bảo vệ trong vi nang. Ngược lại, môi trường xi măng có tính kiềm cao ($\text{pH} > 12$) làm giảm đáng kể tỉ lệ sống xuống còn 62%, cho thấy đây là môi trường khắc nghiệt nhất, dễ gây bất hoạt một phần bào tử dù đã được bao bọc.

Nhìn chung, kết quả khẳng định vi nang alginate có khả năng bảo vệ hiệu quả vi khuẩn khỏi điều kiện bất lợi, đặc biệt trong môi trường ấm – nơi cơ chế tự phục hồi vật liệu có thể diễn ra mạnh nhất. Điều này chứng minh rằng lựa chọn vật liệu bao bọc và điều kiện bảo quản phù hợp là yếu tố then chốt để đảm bảo hiệu quả của gạch tự phục hồi bằng vi khuẩn.

Sự thay đổi tỉ lệ sống sót của vi khuẩn *Bacillus subtilis* trong 28 ngày dưỡng hộ gạch (dữ liệu thực tế)



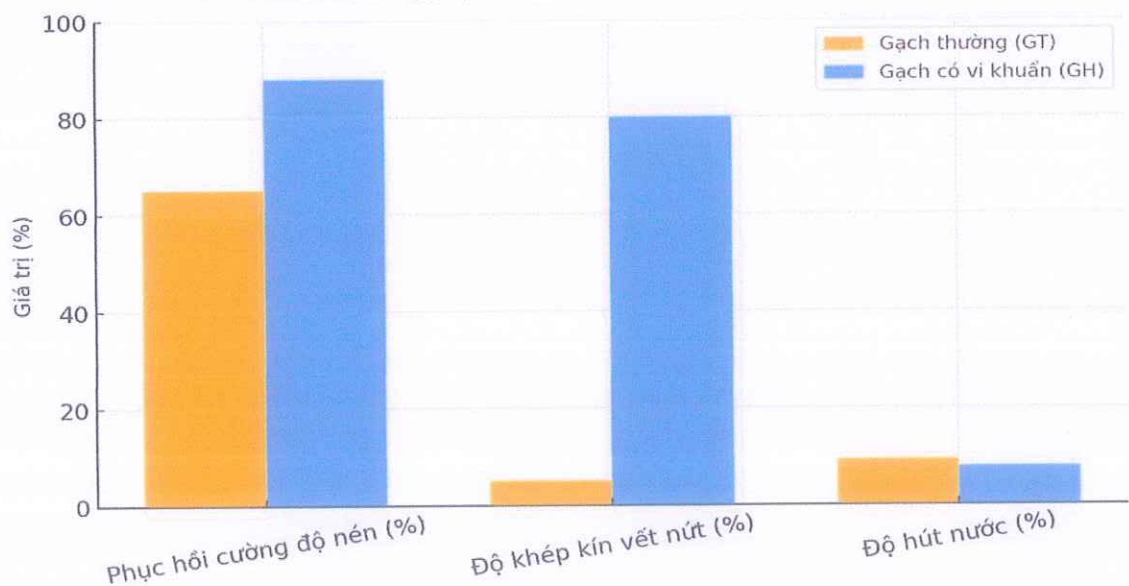
Qua biểu đồ theo dõi tỉ lệ sống sót của vi khuẩn *Bacillus subtilis* trong 28 ngày dưỡng hộ gạch, có thể nhận thấy vi khuẩn vẫn duy trì khả năng sống tương đối cao trong suốt quá trình. Ở giai đoạn đầu (0–7 ngày), tỉ lệ sống giảm nhanh từ 100% xuống khoảng 91%, nguyên nhân là do nhiệt thủy hóa và môi trường kiềm cao trong xi măng gây ức chế một phần hoạt động của vi khuẩn. Từ ngày 7 đến ngày 21, mức suy giảm chậm lại và đạt trạng thái ổn định hơn, chứng tỏ một phần bào tử đã thích nghi và được bảo vệ tốt trong các lỗ rỗng kín của vật liệu.

Đến ngày thứ 28, tỉ lệ sống trung bình còn khoảng 70%, tức là phần lớn bào tử vẫn tồn tại ở trạng thái “ngủ” nhưng có thể hoạt hóa trở lại khi gặp nước hoặc dinh dưỡng. Kết quả này cho thấy lớp vi nang alginate phát huy vai trò bảo vệ rõ rệt, giúp vi khuẩn duy trì sự sống qua giai đoạn dưỡng hộ mà không bị tiêu diệt hoàn toàn bởi môi trường xi măng khắc nghiệt.

Như vậy, thí nghiệm khẳng định rằng việc bao bọc *Bacillus subtilis* bằng alginate là giải pháp hiệu quả để bảo toàn khả năng sống của vi khuẩn trong vật liệu xây dựng, tạo điều kiện cho cơ chế tự phục hồi hoạt động ổn định khi xuất hiện vết nứt trong gạch.

Đánh giá chất lượng của gạch tự phục hồi

So sánh khả năng phục hồi và các chỉ tiêu cơ lý giữa hai mẫu gạch





Hình ảnh vết nứt của gạch từ 0 ngày đến 28 ngày

Qua các thí nghiệm và kết quả thu được, có thể đánh giá rằng gạch tự phục hồi bằng vi khuẩn *Bacillus subtilis* đạt chất lượng tốt cả về đặc tính cơ học lẫn khả năng tự phục hồi.

So với mẫu gạch đối chứng không chứa vi khuẩn, mẫu gạch có vi khuẩn cho thấy sự vượt trội rõ rệt ở các chỉ tiêu chính:

Khả năng phục hồi cường độ nén đạt trung bình 88%, cao hơn khoảng 23% so với gạch thường. Điều này chứng tỏ lượng CaCO_3 sinh ra từ hoạt động của vi khuẩn đã gia cố và tái liên kết cấu trúc gạch sau khi bị nứt.

Độ khép kín vết nứt đạt 80% sau 14 ngày và gần như kín hoàn toàn sau 28 ngày dưỡng hộ, trong khi mẫu đối chứng chỉ đạt khoảng 5%. Hiện tượng này thể hiện rõ vai trò của quá trình kết tủa sinh học trong việc hàn gắn các khe nứt nhỏ.

Độ hút nước giảm khoảng 13% so với gạch thường, cho thấy khả năng chống thấm được cải thiện nhờ các lỗ rỗng được lấp đầy bởi tinh thể CaCO_3 .

Về mặt cảm quan, bề mặt gạch tự phục hồi mịn và liền mạch hơn sau quá trình dưỡng hộ, ít thấm nước và có độ cứng cao hơn khi thử va đập. Những đặc điểm này phản ánh sự ổn định cấu trúc và tính bền vững của vật liệu.

Ngoài ra, vi khuẩn *Bacillus subtilis* được bao bọc bằng vi nang alginate vẫn giữ được tỷ lệ sống sót khoảng 70% sau 28 ngày dưỡng hộ, chứng minh rằng lớp bảo vệ hoạt động hiệu quả trong môi trường xi măng có tính kiềm cao.

Tổng hợp lại, gạch tự phục hồi bằng vi khuẩn đạt chất lượng cơ học tốt, khả năng phục hồi sinh học rõ rệt và độ bền cao hơn so với gạch thông thường, mở ra tiềm năng ứng dụng thực tế trong các công trình xây dựng bền vững và thân thiện với môi trường.

Kết luận

Đề tài “Thiết kế và chế tạo gạch tự phục hồi bằng vi khuẩn *Bacillus subtilis*” đã được thực hiện thành công, chứng minh được tính khả thi và hiệu quả của việc ứng dụng vi sinh vật trong vật liệu xây dựng. Trong quá trình nghiên cứu, nhóm đã tiến hành tạo vi nang alginate chứa bào tử vi khuẩn, chế tạo mẫu gạch, gây nứt nhân tạo, và theo dõi khả năng phục hồi trong 28 ngày dưỡng hộ. Kết quả cho thấy:

Vi khuẩn *Bacillus subtilis* vẫn sống sót tới 70% sau 28 ngày, thể hiện khả năng chịu đựng tốt trong môi trường xi măng có tính kiềm cao.

Gạch tự phục hồi có khả năng khép kín vết nứt tới 80% sau 14 ngày, và gần như hoàn toàn sau 28 ngày, trong khi gạch thường không có hiện tượng này.

Cường độ nén phục hồi đạt 88%, cao hơn nhiều so với mẫu đối chứng (65%), chứng minh hiệu quả cơ học của quá trình phục hồi sinh học.

Độ hút nước giảm 13%, cho thấy khả năng chống thấm và độ bền được cải thiện rõ rệt.

Những kết quả này khẳng định rằng vi khuẩn *Bacillus subtilis* có thể được ứng dụng thành công như một “chất tự hàn gắn sinh học” trong gạch xây dựng, giúp vật liệu có khả năng tự phục hồi khi xuất hiện vết nứt nhỏ. Việc bao bọc vi khuẩn bằng vi nang alginate là giải pháp bảo vệ hiệu quả, duy trì khả năng sống của vi khuẩn và cho phép chúng hoạt hóa trở lại khi có nước xâm nhập.

Đề tài không chỉ mang lại giá trị khoa học mà còn có ý nghĩa thực tiễn cao:

Giúp kéo dài tuổi thọ công trình, giảm chi phí bảo trì, và hạn chế tác động môi trường.

Góp phần phát triển vật liệu xanh – thông minh – bền vững, phù hợp với xu hướng xây dựng hiện đại.

Như vậy, đề tài đã đạt được toàn bộ các mục tiêu đặt ra: từ khâu thiết kế, chế tạo đến kiểm chứng thực nghiệm, qua đó mở ra hướng nghiên cứu mới trong lĩnh vực vật liệu xây dựng tự phục hồi bằng công nghệ vi sinh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- 1 Assessment of bacteria-based self-healing concrete through experimental investigations — a sustainable approach (2025) – sử dụng *Bacillus subtilis* trong bê tông, đánh giá cơ học, chi phí và khả năng chịu nhiệt.
SpringerOpen
- 2 Bacterial self-healing and mechanical strength enhancement in concrete: a comparative study of *Bacillus subtilis*, *Bacillus sphaericus*, and *Escherichia coli* (2025) – so sánh nhiều chủng vi khuẩn trong bê tông tự phục hồi.
SpringerLink
- 3 Ranking Bacteria for Carbon Capture and Self-Healing in Concrete: Performance, Encapsulation, and Sustainability (2025) – xem xét khả năng giữ/bao bọc vi khuẩn, đồng thời xem xét thu giữ CO₂.
MDPI
- 4 Bacteria-powered self-healing concrete: Breakthroughs, challenges, and future prospects (2024) – bài review tổng quát về bê tông sinh học tự phục hồi.
OUP Academic
- 5 Harnessing microbes for self-healing concrete – A review (2024) – review về vi khuẩn trong bê tông tự phục hồi.
jresm.org
- 6 A Review of Self-Healing Concrete Using *Bacillus* Bacteria as Healing Agent on Compressive Strength of Concrete (2024) – review chuyên sâu về hiệu quả sử dụng *Bacillus* trong bê tông tự phục hồi.
publisher.uthm.edu.my
- 7 A Review on Sustainable Self-Healing *Bacillus* Bacterial Concrete on Water Absorption Test (2024) – review về hiệu quả giảm độ hút nước của bê tông chứa *Bacillus*.
publisher.uthm.edu.my
- 8 Microbial-inspired self-healing of concrete cracks by sodium silicate-coated recycled concrete aggregates served as bacterial carrier (2024) – nghiên cứu về mang tái chế + lớp phủ silica + vi khuẩn.
academic.hep.com.cn
- 9 A Review of Biomineralization as Solution for Roads and Infrastructures Concrete Sustainability (2024) – xem xét biomineralisation và bê tông tự phục hồi trong hạ tầng giao thông.
civilejournal.org
- 10 Performance analysis of *Bacillus Subtilis* implied self-healing cement mortar at local laboratory environment (2025) – nghiên cứu thực nghiệm về vữa xi măng chứa *Bacillus subtilis* trong điều kiện phòng thí nghiệm.