

Bê tông phát sáng từ thủy tinh phế thải cho các công trình xanh và an toàn

Nguyễn Thanh Vân ^{2,3}, Nguyễn Võ Châu Nhi ^{1,3}, Huỳnh Tấn Phát ^{2,3}, Nguyễn Ngọc Trí Huỳnh ^{1,3*}

¹ Khoa Công nghệ Vật liệu, Đại học Bách khoa ĐHQG-HCM, 268 đường Lý Thường Kiệt, Quận 10, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

² Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Đại học Bách khoa ĐHQG-HCM, 268 đường Lý Thường Kiệt, Quận 10, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

³ Đại học quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Phường Linh Trung, Thành phố Thủ Đức, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

TỪ KHOÁ

Phát quang
Bê-tông
Thủy tinh tái chế
Môi trường
Tính bền vững

TÓM TẮT

Bê-tông phát quang kết hợp vật liệu phát quang và thủy tinh tái chế đại diện cho một bước tiến mới trong ngành xây dựng, mang lại khả năng tăng cường tầm nhìn trong điều kiện ánh sáng yếu, giảm tiêu thụ năng lượng và nâng cao tính bền vững. Nghiên cứu này khảo sát quá trình phát triển, tính chất và tiềm năng ứng dụng của loại bê-tông này, đặc biệt nhấn mạnh đến hiệu suất phát quang, khả năng chịu lực và lợi ích môi trường. Thông qua việc tối ưu hóa hệ phối liệu và điều kiện dưỡng hộ, việc tích hợp bột phát quang và cốt liệu thủy tinh đã qua xử lý cho thấy khả năng duy trì phát quang kéo dài và mạnh mẽ, đồng thời vẫn đảm bảo cường độ chịu nén phù hợp. Đáng chú ý, việc áp dụng phương pháp xi-măng hóa ứng dụng cơ chế sinh học vi khuẩn (MICP) để phủ lên bề mặt hạt thủy tinh không chỉ cải thiện độ bền mà còn giúp tăng độ ổn định tại vùng tiếp xúc với pha xi-măng. Xử lý này làm tăng khả năng tái sử dụng chất thải công nghiệp và giảm sự phụ thuộc vào hệ thống chiếu sáng nhân tạo. Kết quả cho thấy vật liệu này có thể được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như an toàn giao thông, thiết kế kiến trúc và hạ tầng đô thị, nơi yêu cầu cao về tầm nhìn ban đêm và tính thẩm mỹ. Với những nghiên cứu tiếp theo nhằm tối ưu vật liệu phát quang và nâng cao độ bền, bê-tông phát quang hứa hẹn sẽ trở thành một giải pháp tiên tiến cho các công trình xây dựng bền vững và hiệu quả hơn trong tương lai.

KEYWORDS

Light-emitting
Concrete
Waste glass
Environment
Sustainability

ABSTRACT

The Light-emitting concrete incorporating photoluminescent materials and recycled waste glass represents a novel advancement in the construction industry, offering enhanced visibility in low-light environments, reduced energy consumption, and improved sustainability. This study investigates the development, performance, and potential applications of such concrete, with a particular focus on its luminescent efficiency, mechanical behavior, and environmental benefits. Through a systematic optimization of mix proportions and curing conditions, the integration of photoluminescent powder and treated waste glass aggregates was shown to yield concrete with prolonged and intense light emission, while maintaining acceptable compressive strength. Notably, the application of microbial-induced calcium carbonate precipitation (MICP) to coat glass aggregates not only mitigated durability issues but also contributed to a more stable interface with the cement matrix. This treatment further enhances the material's potential as a sustainable solution by extending the reuse of industrial waste and reducing reliance on artificial lighting. The results suggest broad applicability in areas such as road safety, architectural design, and urban infrastructure, where improved nighttime visibility and aesthetic integration are critical. With continued research into optimizing luminescent materials and extending long-term durability, light-emitting concrete stands as a promising candidate for advancing both the functionality and sustainability of future built environments.

1. Giới thiệu

Bê-tông phát quang là một loại vật liệu đa năng với nhiều ứng dụng, đặc biệt phù hợp trong các lĩnh vực đề cao tính an toàn và thẩm mỹ. Khả năng hấp thụ và phát xạ ánh sáng của vật liệu này mở ra những giải pháp mới trong việc đánh dấu đường, lối đi, trang trí kiến trúc, đồng thời góp phần thúc đẩy xu hướng xây dựng bền vững [1]. Loại bê-tông này có thể được sử dụng cho các vạch phân làn, mép đường và

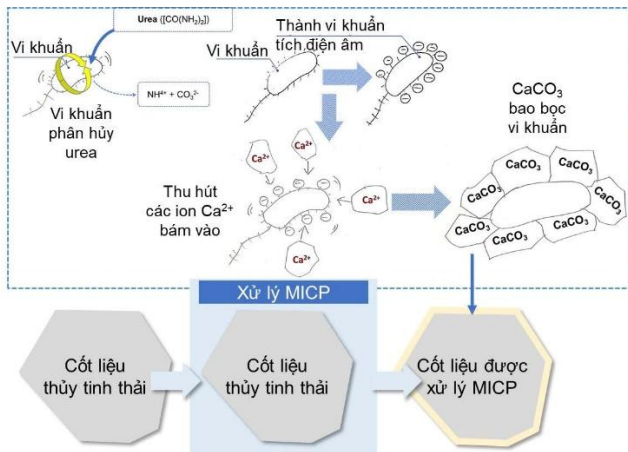
tường hầm, giúp tăng khả năng quan sát vào ban đêm và nâng cao an toàn giao thông mà không cần đến hệ thống chiếu sáng tốn kém. Nhờ đó, nó có tiềm năng cải thiện đáng kể điều kiện lái xe ban đêm và giảm thiểu nguy cơ tai nạn. Tính phát quang cũng khiến bê-tông này trở thành lựa chọn lý tưởng cho các chi tiết trang trí trong công trình, giúp tạo nên các hiệu ứng thiết kế độc đáo và tăng giá trị thẩm mỹ. Việc ứng dụng trong mặt đường, sàn nhà hay các yếu tố cảnh quan có thể tạo nên những hiệu ứng thị giác nổi bật, thay đổi theo điều kiện ánh sáng môi

*Liên hệ tác giả: nnthuynh@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 23/05/2025, sửa xong ngày 28/05/2025, chấp nhận đăng ngày 29/05/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2025.1003>

trường. Đồng thời, bằng cách giảm sự phụ thuộc vào chiếu sáng nhân tạo, bê-tông phát quang góp phần tiết kiệm điện năng và giảm phát thải khí CO₂, qua đó nâng cao tính bền vững môi trường. Việc sử dụng thủy tinh thái làm cốt liệu trong hỗn hợp bê-tông còn giúp giảm lượng rác chôn lấp và bảo tồn tài nguyên thiên nhiên, phù hợp với xu hướng xây dựng xanh hiện nay. Loại vật liệu này đáp ứng được nhu cầu cấp thiết của ngành xây dựng về các vật liệu mới vừa an toàn, vừa có tính thẩm mỹ và thân thiện với môi trường. Cụ thể, nó cải thiện tầm nhìn trong điều kiện thiếu sáng, giảm tiêu thụ năng lượng và thúc đẩy việc tái sử dụng chất thải.



Hình 1. Sử dụng vi sinh vật để tạo lớp kết tủa canxi cacbonat (CaCO₃) trên bề mặt cốt liệu thủy tinh, hình thành lớp phủ đa lớp có chức năng bảo vệ tránh phản ứng kiềm-cốt liệu [4].

Bên cạnh đó, nghiên cứu này còn xem xét các đặc tính, phương pháp chế tạo và ứng dụng của bê-tông phát quang, đồng thời nhấn mạnh lợi ích và tiềm năng của vật liệu trong ngành xây dựng. Cơ chế phát quang – quá trình vật liệu hấp thụ năng lượng ánh sáng rồi phát xạ lại dưới dạng ánh sáng nhìn thấy – chính là nền tảng hoạt động của bê-tông phát quang. Các hợp chất như kẽm sulfua pha tạp đồng và nhôm (ZnS, Al) hoặc strontium aluminate pha đất hiếm đóng vai trò quan trọng trong hiệu suất phát quang của vật liệu [2]. Ngoài ra, việc tái chế thủy tinh thái vào hỗn hợp bê-tông không chỉ nâng cao một số đặc tính mà còn góp phần giảm lượng rác thải chôn lấp. Tuy nhiên, nếu sử dụng lượng lớn thủy tinh có thể làm giảm độ bền lâu dài của bê-tông do nguy cơ xảy ra phản ứng kiềm-cốt liệu. Nghiên cứu này đề xuất áp dụng phương pháp tạo khoáng cacbonat nhờ quá trình MICP (Microbial-induced carbonate precipitation) [3] để xử lý cốt liệu thủy tinh trước khi phối trộn (Hình 1) [4]. Quá trình khoáng hóa sinh học – tức việc sinh vật tạo ra khoáng chất nhằm củng cố cấu trúc – có thể được khai thác để phủ một lớp canxi cacbonat lên bề mặt cốt liệu thủy tinh thông qua cơ chế MICP [5–8]. Lớp phủ CaCO₃ đa lớp này giúp cải thiện cả độ bền cơ học lẫn hiệu suất phát quang của bê-tông. Đồng thời, cũng cải thiện vùng tương tác giữa bề mặt thủy tinh và nền vữa, góp phần hạn chế các vấn đề về độ bền lâu dài. Tóm lại, nghiên cứu này đi sâu vào các khía cạnh liên quan đến bê-tông phát quang khi sử dụng

thủy tinh thái làm cốt liệu trong hỗn hợp bê-tông, tập trung vào ứng dụng thực tiễn và các giải pháp tối ưu hóa hiệu năng. Thông qua việc phân tích toàn diện đặc tính và tiềm năng ứng dụng, nghiên cứu góp phần khẳng định vai trò đổi mới của vật liệu này đối với ngành xây dựng hiện đại.

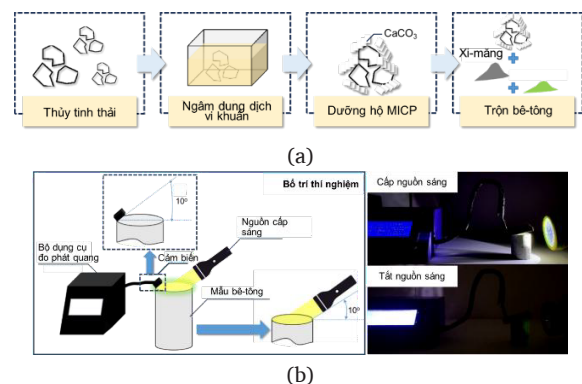
2. Nguyên liệu và thực nghiệm

2.1. Nguyên liệu

Xi-măng Portland loại PC40 được sử dụng làm chất kết dính chính trong hỗn hợp bê-tông. Cốt liệu thủy tinh được thu gom từ các cơ sở tái chế địa phương, sau đó nghiền nhỏ và sàng qua các lưới để thu được kích thước hạt yêu cầu. Cốt liệu thủy tinh này vừa đóng vai trò như cốt liệu chịu lực, vừa góp phần tăng khả năng truyền sáng cho bê-tông. Trong quá trình chuẩn bị mẫu, cốt liệu thủy tinh được phủ đều một lớp calcite dạng nano, sau đó để khô trong khoảng 15 phút. Tiếp theo, cốt liệu được ngâm trong dung dịch MICP (kết tủa canxi cacbonat sinh học) trong vòng 24 giờ (Hình 2a), sau đó được rửa sạch để loại bỏ dung dịch dư. Cốt liệu đã xử lý được trộn với xi-măng Portland và bột phát quang theo tỷ lệ quy định tại Mục 4.2 để tạo thành hỗn hợp bê-tông. Hỗn hợp bê-tông được đổ vào khuôn hình trụ và để đông kết trong thời gian từ 16 đến 24 giờ. Sau khi tháo khuôn, các mẫu được dưỡng hộ trong nước cho đến khi tiến hành thí nghiệm, nhằm đảm bảo quá trình thủy hóa diễn ra đầy đủ và phát triển cường độ ổn định.

2.2. Thực nghiệm

Quá trình nghiên cứu thực nghiệm về mối liên hệ giữa kích thước cốt liệu và các đặc tính phát quang cũng như phản xạ ánh sáng của bê-tông (Hình 2b) đã mang lại những kết quả đáng chú ý. Việc sử dụng hỗn hợp cốt liệu với các kích thước khác nhau không chỉ giúp giảm thiểu các lỗ rỗng giữa các hạt lớn mà còn góp phần cải thiện độ sáng và độ mịn của bề mặt bê-tông. Cách tiếp cận này phản ánh tư duy thiết kế vật liệu một cách hợp lý, cho thấy rằng việc lựa chọn và phân loại cốt liệu một cách cẩn thận có thể tối ưu đồng thời cả tính chất quang học và cơ học của bê-tông phát quang.



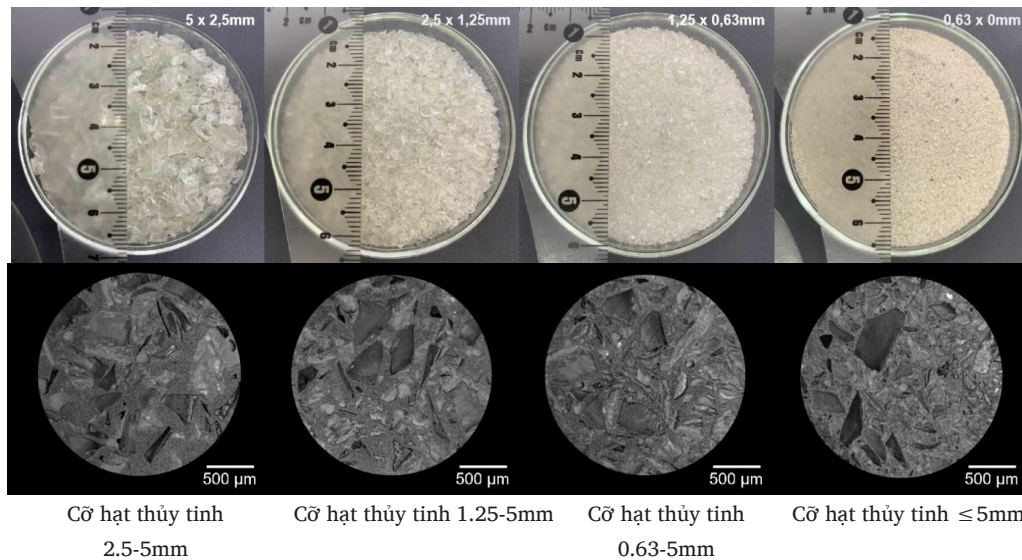
Hình 2. (a) Quy trình xử lý thủy tinh thái bằng MICP và (b) Sơ đồ bố trí thí nghiệm phát quang.

3. Kết quả

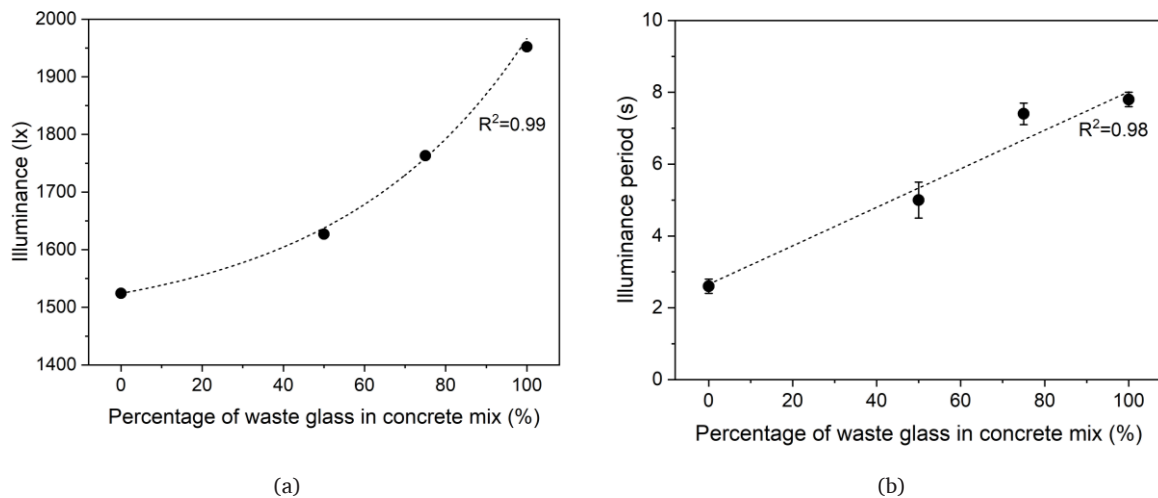
3.1. Ảnh hưởng của thủy tinh thái đến độ chiếu sáng

Sau khi được nghiền bằng máy nghiền bi, thủy tinh thái được sàng qua các cỡ lưới khác nhau: 5.0 mm, 2.5 mm, 1.25 mm, và 0.63 mm (Hình 3). Các thí nghiệm tiếp theo nhằm đánh giá ảnh hưởng của phân bố kích thước cốt liệu đến khả năng phát quang và phản xạ ánh sáng của bê-tông. Kết quả thu được cho thấy việc kết hợp các kích

thước hạt khác nhau giúp cải thiện hiệu quả ánh sáng của vật liệu. Việc xử lý bề mặt mẫu bê-tông cho phép quan sát rõ vùng tiếp xúc giữa cốt liệu thủy tinh và pha vữa xi-măng. Trong các mẫu chỉ dùng cốt liệu thô có kích thước trong khoảng 2.5–5.0 mm, dễ dàng nhận thấy các khoảng rỗng lớn giữa các hạt, sau đó được lấp đầy bởi vữa. Khi thay một phần cốt liệu thô bằng các hạt nhỏ hơn, các khoảng rỗng này được lấp đầy hiệu quả hơn. Việc thay thế này giúp tăng độ đặc chắc của khối bê-tông và giảm lượng vữa cần dùng, tạo ra cấu trúc vi mô chặt chẽ hơn.



Hình 3. Mặt cắt ngang mẫu bê-tông với các cấp phối hạt thủy tinh thái khác nhau



Hình 4. Sự phụ thuộc của độ phát quang vào lượng thủy tinh thái sử dụng

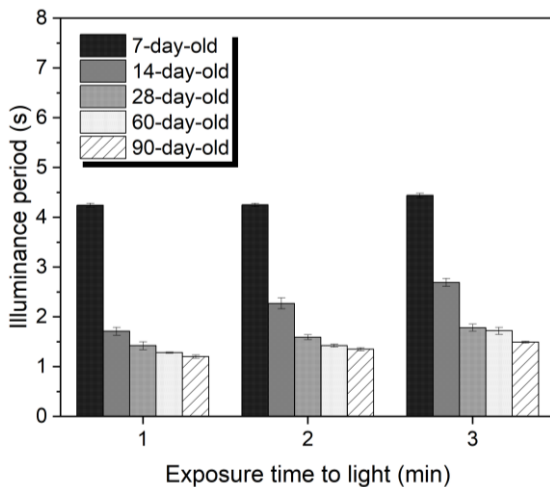
Các mẫu bê-tông sử dụng phối trộn nhiều cỡ hạt cốt liệu cho thấy bề mặt sáng và mịn hơn rõ rệt so với mẫu chỉ dùng một loại cỡ hạt. Mặc dù cảm biến đo cường độ ánh sáng trong thí nghiệm phát quang có độ nhạy không cao và ghi nhận giá trị tương đương nhau (0,83 lx) ở tất cả các mẫu, nhưng thời gian phát quang lại khác nhau tùy theo cách phân bố kích thước cốt liệu. Đáng chú ý, khi tăng tỷ lệ phối trộn

cốt liệu trong cùng một mẫu, thời gian phát quang cũng được kéo dài đáng kể (Hình 4a). Mẫu chỉ sử dụng cốt liệu thô kích thước 5,0 đến 2,5 mm (0 % phối trộn) có thời gian phát quang khoảng 2,6 giây. Trong khi đó, mẫu sử dụng hoàn toàn cốt liệu phối trộn liên tục (từ ≤5 mm) có thời gian phát quang kéo dài gần gấp ba lần. Ngoài ra, dữ liệu thí nghiệm cho thấy mối tương quan tuyến tính rõ ràng giữa độ rộng phân

bổ kích thước cốt liệu và thời gian phát quang (Hình 4b). Hiệu quả này có được nhờ bề mặt bê-tông trở nên đặc chắc hơn khi sử dụng nhiều cỡ hạt, tạo nên một lớp phủ đồng đều và phản xạ ánh sáng tốt từ các hạt thủy tinh. Bề mặt này phản chiếu ánh sáng nhiều hơn so với nền vữa xi-măng có màu xám và ít phản xạ, nhờ đó tạo nên vẻ ngoài trắng sáng và bóng hơn.

3.2. Cường độ và thời gian phát quang

Hiệu suất và độ bền của bê-tông phát quang được đánh giá thông qua các phép đo cường độ ánh sáng và thời gian phát quang theo thời gian. Như thể hiện trong Hình 5, thời gian phát quang có xu hướng giảm dần khi tuổi của mẫu bê-tông tăng. Cụ thể, các mẫu 7 ngày tuổi phát quang trong khoảng 7 giây, trong khi các mẫu 90 ngày tuổi chỉ phát quang khoảng 2 giây. Xu hướng suy giảm này xuất hiện ở tất cả các điều kiện chiếu sáng khác nhau (1, 2 và 3 phút), cho thấy hiệu suất phát quang giảm dần theo thời gian. Nguyên nhân có thể xuất phát từ sự suy giảm dần của các hợp chất phát quang trong môi trường bê-tông hoặc từ những thay đổi trong cấu trúc vi mô, khiến khả năng tích trữ và tái phát xạ ánh sáng bị suy giảm.



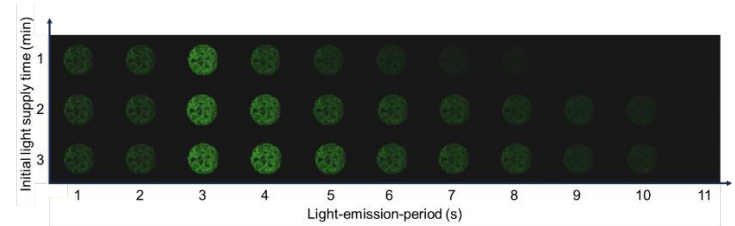
Hình 5. Thời gian phát quang của các mẫu bê-tông với thời gian chiếu sáng 1, 2 và 3 phút.

Hình 5 cho thấy rằng thời gian chiếu sáng ban đầu dài hơn, đặc biệt là 3 phút, giúp kéo dài và tăng cường độ phát quang so với các mẫu chỉ chiếu trong 1 phút. Khi thời gian phát quang kéo dài từ 1 đến 11 giây, độ sáng của các mẫu đều giảm dần. Đáng chú ý, các mẫu được chiếu sáng trong 3 phút vẫn phát ánh sáng nhìn thấy được đến khoảng 7 giây, trong khi các mẫu chiếu 1 phút có độ sáng giảm mạnh chỉ sau khoảng 3 giây. Kết quả này cho thấy khả năng hấp thụ ánh sáng ban đầu đóng vai trò quan trọng trong việc quyết định hiệu quả và thời lượng phát quang sau đó. Khi được chiếu sáng đủ lâu, vật liệu phát quang có thể tích trữ nhiều năng lượng hơn, từ đó kéo dài thời gian phát quang. Việc phát quang giảm theo thời gian cho thấy cần tiếp tục nghiên cứu sâu hơn về độ ổn định lâu dài của các hợp chất phát quang

khi nằm trong nền bê-tông. Hiểu rõ hơn về cơ chế suy giảm sẽ giúp phát triển các công thức phối liệu cải tiến, đảm bảo duy trì hiệu suất trong thời gian dài sử dụng. Ngoài ra, việc tối ưu thời gian chiếu sáng ban đầu cũng là một yếu tố quan trọng để nâng cao hiệu quả tích trữ năng lượng, giúp vật liệu phát huy tốt hơn trong các điều kiện thực tế. Loại bê-tông này có tiềm năng ứng dụng trong các khu vực yêu cầu an toàn cao như đường giao thông, lối đi bộ và hầm. Khả năng phát quang trong điều kiện thiếu sáng giúp giảm sự phụ thuộc vào hệ thống chiếu sáng nhân tạo, từ đó tiết kiệm năng lượng và tăng mức độ an toàn.

Bên cạnh hạ tầng kỹ thuật, bê-tông phát quang cũng mang đến những giải pháp sáng tạo trong thiết kế kiến trúc. Việc sử dụng trong mặt đứng, cảnh quan hoặc không gian nội thất có thể tạo ra các bề mặt thay đổi hiệu ứng ánh sáng theo điều kiện môi trường xung quanh. Dữ liệu thí nghiệm cũng cho thấy một yếu tố ảnh hưởng đến độ sáng theo thời gian là kích thước hạt nhỏ của bột phát quang. Diện tích bề mặt riêng lớn khiến bột phát quang cần nhiều nước hơn để bao phủ trong quá trình trộn, dẫn đến hiện tượng ẩm tích tụ trên bề mặt. Lớp ẩm này cản trở ánh sáng từ bên ngoài đi vào, làm giảm độ sáng của vật liệu. So sánh giữa các mẫu dưỡng hộ ngắn ngày và dài ngày cũng cho thấy sự khác biệt rõ rệt. Với các mẫu dưỡng ngắn, tăng thời gian chiếu sáng không làm thay đổi đáng kể thời gian phát quang. Tuy nhiên, với các mẫu đã dưỡng hộ lâu (đặc biệt sau 14 ngày), thời gian phát quang tăng rõ rệt khi tăng thời gian chiếu. Dù vậy, theo thời gian, thời lượng phát quang vẫn giảm dần. Ở tuổi 28 ngày, các mẫu vẫn giữ được khoảng 30% độ sáng so với mẫu 7 ngày, và vẫn có thể phát quang nhìn thấy được trên 1 giây.

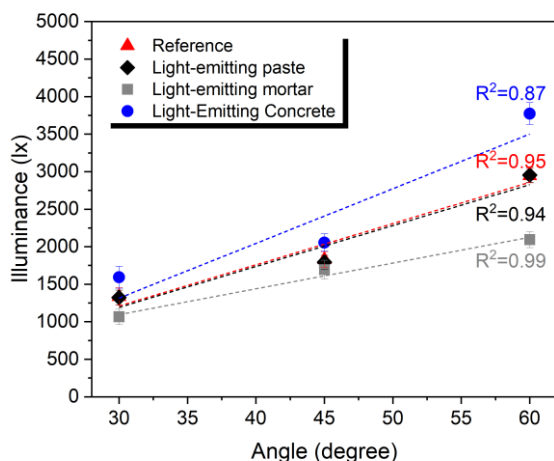
Độ chính xác của phép đo thời gian phát quang trên các mẫu bê-tông bị ảnh hưởng đáng kể bởi giới hạn về độ nhạy của cảm biến và độ trễ của đồng hồ bấm giờ. Để khắc phục điều này, một phép đo bổ sung được thực hiện trong cùng điều kiện thí nghiệm, kết hợp sử dụng camera để quan sát trực quan quá trình phát quang. Kết quả cho thấy rằng, trong điều kiện chiếu sáng đồng nhất và với các mẫu cùng loại, thời gian phát quang ghi nhận bằng camera dài hơn rõ rệt so với số liệu đo bằng cảm biến. Chẳng hạn, ở mẫu bê-tông tuổi 28 ngày được chiếu sáng trong 1 phút, hiệu ứng phát quang vẫn còn được nhìn thấy rõ trong khoảng từ giây thứ 3 đến giây thứ 4 kể từ khi bắt đầu phát quang (Hình 6). Sự chênh lệch này cho thấy cảm biến có độ nhạy không đủ để phát hiện các tín hiệu ánh sáng yếu, dẫn đến việc đánh giá thấp thời gian phát quang thực tế. Thiết bị chỉ ghi nhận được các mức độ ánh sáng mạnh, trong khi các tín hiệu yếu hơn vẫn còn hiện diện nhưng không được ghi lại, gây ra kết quả đo bị rút ngắn so với thực tế mà mắt thường hoặc camera có thể ghi nhận được.



Hình 6. Thời gian phát quang của các mẫu bê-tông đã dưỡng hộ 28 ngày

với các mức thời gian chiếu sáng khác nhau, quan sát bằng camera.

Hình 7 thể hiện độ chiếu sáng của mẫu bê-tông theo các góc tới khác nhau của nguồn sáng. Kết quả cho thấy hiệu quả phản xạ ánh sáng thay đổi đáng kể theo góc chiếu, từ đó khẳng định vai trò của cấu trúc bề mặt và phân bố hạt thủy tinh trong việc tối ưu hóa hiệu ứng phản quang của vật liệu.



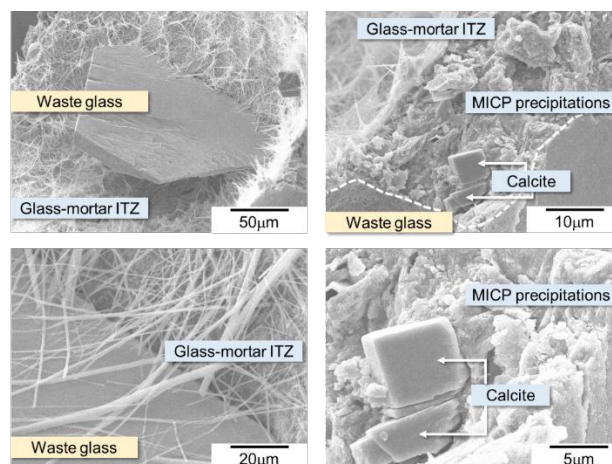
Hình 7. Độ chiếu sáng của mẫu theo các góc tới khác nhau của nguồn sáng.

3.3. Cơ tính và vi cấu trúc

Như thể hiện trong Hình 8, tại vùng tiếp xúc giữa nền vữa xi măng và cốt liệu thủy tinh xuất hiện các tinh thể ettringite phân bố dày đặc, đan xen với bề mặt thủy tinh. Bên cạnh đó, một lớp calcite rõ rệt cũng được quan sát thấy bao phủ trên bề mặt hạt thủy tinh, đóng vai trò như một lớp liên kết giúp thúc đẩy quá trình kết tinh của các pha khoáng thủy hóa. Lớp gel bao quanh các hạt thủy tinh giàu silica có xu hướng trương nở, dễ dẫn đến phản ứng kiềm-cốt liệu (AAR). Tuy nhiên, nghiên cứu này ghi nhận rằng việc áp dụng quá trình MICP, kết hợp với hoạt động của vi khuẩn, đã hỗ trợ hình thành một lớp khoáng bao phủ quanh hạt thủy tinh. Lớp phủ này chủ yếu là calcite, không chỉ giúp hạn chế nguy cơ xảy ra phản ứng AAR mà còn cải thiện độ tương thích tại vùng tiếp xúc. Đáng chú ý, sự tương thích giữa calcite và lớp canxi silicat ngậm nước (C-S-H) cao hơn đáng kể so với giữa calcite và ettringite. Bề mặt giàu canxi và oxy của calcite tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình nucleation và kết tinh nhanh chóng của các pha C-S-H. Quan sát này hoàn toàn phù hợp với các kết quả đã được công bố trong các nghiên cứu về bê-tông tự phục hồi, trong đó nhấn mạnh vai trò tích cực của bề mặt calcite đối với quá trình hình thành sản phẩm thủy hóa xi măng.

Cường độ chịu nén của bê-tông phát quang nhìn chung tương đương với bê-tông thông thường, chỉ giảm nhẹ do sự có mặt của vật liệu phát quang và thủy tinh thái trong cấp phối. Mức giảm này đã được khắc phục hiệu quả thông qua việc tối ưu tỷ lệ phối liệu và chế độ dưỡng hộ. Khi so sánh cường độ chịu nén giữa các loại bê-tông khác nhau, các mẫu có chứa vật liệu phát quang và phản xạ ánh sáng cho giá

trị cường độ thấp hơn so với cả bê-tông tiêu chuẩn và bê-tông sử dụng cốt liệu thiên nhiên phân bố liên tục. Nguyên nhân chủ yếu đến từ đặc tính cơ học của cốt liệu thủy tinh, vốn có độ bền kém hơn so với đá nghiền truyền thống. Do đó, khung chịu lực hình thành từ cốt liệu thủy tinh có khả năng kháng tải kém hơn. Bên cạnh đó, hàm lượng silica cao trong thủy tinh thái làm tăng nguy cơ xảy ra phản ứng kiềm-cốt liệu, gây ảnh hưởng đến liên kết giữa cốt liệu và pha vữa. Phản ứng này hình thành các gel trương nở, tạo ra các vi nứt bên trong cấu trúc bê-tông và làm suy giảm độ bền của vật liệu. Mặc dù tồn tại những thách thức kể trên, các mẫu bê-tông phát quang vẫn đạt được cường độ chịu nén theo yêu cầu thiết kế. Tuy nhiên, trong các ứng dụng quy mô lớn hoặc cấu kiện có kích thước lớn, nguy cơ phát sinh phản ứng ASR và các vấn đề liên quan đến độ bền lâu dài có thể trở nên nghiêm trọng hơn. Để giảm thiểu rủi ro này, quá trình xử lý cốt liệu thủy tinh bằng MICP đã được áp dụng trước khi trộn. Quá trình này tạo ra một lớp khoáng bảo vệ, chủ yếu là calcite, bao phủ bề mặt hạt thủy tinh. Lớp này tiếp tục phát triển theo thời gian, giúp cải thiện sự tương thích tại vùng tiếp xúc giữa cốt liệu và nền xi măng. Kết quả là liên kết giữa thủy tinh và pha xi măng trở nên ổn định và bền chặt hơn, góp phần nâng cao độ bền cơ học và tuổi thọ của bê-tông trong dài hạn.



Hình 8. Ảnh SEM mô tả vi cấu trúc của mẫu bê-tông với thủy tinh tái chế xử lý bằng MICP.

4. Kết luận

Bê-tông phát quang là một bước tiến đầy hứa hẹn trong việc phát triển các vật liệu xây dựng vừa an toàn, thẩm mỹ, vừa thân thiện với môi trường. Kết quả thí nghiệm cho thấy rằng sự phân bố kích thước cốt liệu là yếu tố then chốt ảnh hưởng đến thời gian phát quang. Cụ thể, việc sử dụng hỗn hợp cốt liệu thủy tinh có phân bố hợp lý giúp kéo dài thời gian phát quang gần gấp ba lần so với mẫu chỉ dùng một cỡ hạt đơn lẻ. Phát hiện này có ý nghĩa thực tiễn trong thiết kế và tối ưu cấp phối bê-tông cho các ứng dụng yêu cầu khả năng nhìn thấy tốt trong điều kiện ánh sáng yếu. Ngoài ra, việc quan sát thấy thời gian dưỡng hộ ngắn hơn lại cho thời gian phát quang dài hơn mang đến góc nhìn

mới về mối quan hệ giữa quá trình thủy hóa và đặc tính phát quang của vật liệu. Những hiểu biết này góp phần làm rõ ảnh hưởng của điều kiện dưỡng hộ đến cả tính chất quang học và cơ học của bê-tông. Việc kết hợp vật liệu phát quang với thủy tinh tái chế không chỉ giải quyết vấn đề tiêu thụ năng lượng và đảm bảo an toàn thị giác mà còn góp phần thúc đẩy việc tái sử dụng chất thải công nghiệp. Lợi ích kép này phù hợp với định hướng xây dựng bền vững và thiết kế vật liệu theo vòng tuần hoàn. Tuy nhiên, để phát huy tối đa tiềm năng của bê-tông phát quang, các nghiên cứu tiếp theo là cần thiết nhằm tiếp tục hoàn thiện thành phần phối liệu, nâng cao độ bền lâu dài và mở rộng phạm vi ứng dụng trong cả lĩnh vực hạ tầng kỹ thuật lẫn thiết kế kiến trúc.

Lời cảm ơn

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Han, B., Zhang, L., Ou, J., "Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures", *Springer Singapore*, Vol. 399, 2017, <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4349-9>.
- [2]. Chen, Y.Y., Duh, J.G., Chiou, B.S., Peng, C.G., "Luminescent mechanisms of ZnS: Cu: Cl and ZnS: Cu: Al phosphors", *Thin Solid Films*, 392, 50–55, 2001.
- [3]. Lu, C.-H., Bu, S., Shahin, M.A., Zheng, Y., Cheng, L., "Mitigation of alkali-silica reaction by microbially induced CaCO₃ protective layer on aggregates", *Construction and Building Materials*, 328, 127065, 2022.
- [4]. Huynh, N. N. T., Imamoto, K., Kiyohara, C., "A study on biomineralization using bacillus subtilis natto for repeatability of self-Healing concrete and strength improvement", *Journal of Advanced Concrete Technology*, 17(12), 700-714, 2017, <https://doi.org/10.3151/jact.17.700>.
- [5]. Huynh, N.N.T., Imamoto, K., Kiyohara, C., "Biomineralization Analysis and Hydration Acceleration Effect in Self-healing Concrete using Bacillus subtilis natto", *Journal of Advanced Concrete Technology*, 20, 609–623, 2022, <https://doi.org/10.3151/jact.20.609>.
- [6]. Huynh, N.N.T., Imamoto, K., Kiyohara, C., Huyen, N.P.H., Son, N.K., "Mechanism Analysis and Improvement of Bacterial Bio-Mineralization for Self-healing Concrete Using Bacillus subtilis Natto Immobilized in Lightweight Aggregate". In: CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure: Proceedings of the 6th International Conference on Geotechnics, *Civil Engineering and Structures*, pp. 763–771. Springer (2022).
- [7]. Huynh, N.N.T., Nhu, N.Q., Son, N.K., "Developing the solution of microbially induced CaCO₃ precipitation coating for cement concrete", In: IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*. p. 062006. IOP Publishing (2018).
- [8]. Nguyen, N.T.H., Nguyen, P.H.H., Nguyen, H.T.K., Nguyen, K.S., "Eco-friendly method of biocementation for soil improvement and environmental remediation in the context of Viet Nam: a state-of-the-art review", *Vietnam Journal of Science and Technology*, 61, 917–942, 2023.