

Bảo dưỡng bên trong cho bê tông xi măng: Cơ chế, vật liệu và tiềm năng ứng dụng trong mặt đường cứng

Nguyễn Đình Thắng^{1,2}, Phạm Ngọc Phương¹, Huỳnh Trọng Phước^{3*}

¹ Khoa Xây dựng Cầu đường, Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng

² Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

³ Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Bách Khoa – Đại học Cần Thơ

TỪ KHOÁ

Bảo dưỡng bên trong
Bê tông xi măng
Mặt đường bê tông xi măng
Polyme siêu hấp thụ (SAP)
Cốt liệu nhẹ (LWA)

TÓM TẮT

Bảo dưỡng là khâu quan trọng quyết định sự phát triển cường độ, độ bền và khả năng làm việc lâu dài của bê tông xi măng (BTXM), đặc biệt đối với mặt đường BTXM có diện tích phơi lộ lớn và dễ mất nước ở tuổi sớm. Tuy nhiên, các phương pháp bảo dưỡng truyền thống chủ yếu tác động từ bên ngoài và phụ thuộc nhiều vào điều kiện thi công, thời tiết và khả năng kiểm soát ngoài hiện trường. Trong bối cảnh đó, bảo dưỡng bên trong (internal curing, IC) được xem là một giải pháp bổ sung có tiềm năng, cho phép cung cấp nước trực tiếp từ bên trong vật liệu thông qua các thành phần có khả năng hấp thụ và giải phóng nước. Bài báo tổng quan cơ chế của IC, các nhóm vật liệu điển hình như polyme siêu hấp thụ (SAP), cốt liệu nhẹ (LWA), vật liệu xốp mịn và vật liệu nguồn gốc cellulose, đồng thời phân tích ảnh hưởng của IC đến một số tính chất chủ yếu của BTXM. Kết quả tổng hợp cho thấy IC có hiệu quả rõ rệt trong việc giảm co ngót, hạn chế nứt ở tuổi sớm và cải thiện cấu trúc vi mô; trong khi ảnh hưởng đến cường độ chịu nén và chịu uốn phụ thuộc vào loại vật liệu, hàm lượng sử dụng và cấp phối bê tông. Ngoài ra, các nghiên cứu thực nghiệm và ứng dụng thực tế cho thấy IC có triển vọng trong việc nâng cao độ bền và tuổi thọ của mặt đường BTXM, đồng thời góp phần giảm chi phí bảo trì. Tuy nhiên, hiệu quả của IC không mang tính tuyệt đối mà phụ thuộc vào khả năng hút-nhả nước, trạng thái bão hòa và sự tương thích của vật liệu với hệ chất kết dính. Vì vậy, cần tiếp tục nghiên cứu để tối ưu hóa vật liệu và cấp phối IC cho điều kiện khí hậu và thi công ở Việt Nam.

KEYWORDS

Cement concrete
Concrete pavement
Internal curing
Lightweight aggregate (LWA)
Superabsorbent polymer (SAP)

ABSTRACT

Curing plays a critical role in the strength development, durability, and long-term performance of Portland cement concrete, particularly for concrete pavements exposed to early-age moisture loss. However, conventional curing methods mainly act from the surface and are highly dependent on construction practices, environmental conditions, and field control. In this context, internal curing (IC) has emerged as a promising complementary approach, enabling water to be supplied directly from within the concrete through materials capable of absorbing and gradually releasing moisture. This paper reviews the mechanisms of IC, the main types of IC materials, including superabsorbent polymers (SAP), lightweight aggregates (LWA), porous fine materials, and cellulose-based materials, and their effects on key properties of cement concrete. The reviewed studies show that IC is particularly effective in reducing shrinkage, mitigating early-age cracking, and improving the microstructure, whereas its influence on compressive and flexural strength depends on material type, dosage, and mixture design. Experimental and field studies also indicate that IC has strong potential to enhance the durability and service life of concrete pavements while reducing maintenance demand. Nevertheless, the effectiveness of IC is strongly governed by the water absorption-release behavior, saturation condition, and compatibility of the IC materials with the cementitious system. Therefore, further studies are needed to optimize IC materials and mixture design, especially under the climatic and construction conditions of Vietnam.

1. Đặt vấn đề

Bảo dưỡng bê tông là một khâu kỹ thuật quan trọng trong quá trình thi công, ảnh hưởng trực tiếp đến sự phát triển cường độ, độ đặc

chắc và chất lượng làm việc lâu dài của BTXM. Về bản chất, công tác bảo dưỡng nhằm duy trì các điều kiện độ ẩm và nhiệt độ phù hợp trong giai đoạn đầu đông rắn, qua đó bảo đảm quá trình thủy hóa của xi măng diễn ra đầy đủ, liên tục và ổn định [1], [2], [3]. Khi bảo dưỡng được

*Liên hệ tác giả: htphuoc@ctu.edu.vn

Nhận ngày 20/03/2026, sửa xong ngày 08/04/2026, chấp nhận đăng ngày 11/05/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2026.1290>

thực hiện đúng kỹ thuật, sự mất nước sớm trong bê tông được hạn chế, từ đó làm giảm nguy cơ co ngót và nứt ở tuổi đầu, đồng thời tạo điều kiện thuận lợi cho sự hình thành cấu trúc vi mô và sự gia tăng cường độ của BTXM [4], [5]. Ở Việt Nam, công tác bảo dưỡng bê tông hiện nay được quy định trong tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 8828:2011 [6] và TCVN 4453:2025 [7]. Những quy định này cho thấy bảo dưỡng không phải là công đoạn phụ trợ, mà là một phần thiết yếu để bảo đảm chất lượng công trình ngay từ giai đoạn đầu thi công.

Trong thực hành, quá trình bảo dưỡng thường được xem xét theo các giai đoạn khác nhau để phù hợp với mức độ phát triển của bê tông sau khi đổ. Theo Armaghani và Zollinger [8], công tác bảo dưỡng có thể chia thành ba giai đoạn chính với mục đích và biện pháp thực hiện khác nhau, từ giai đoạn bảo dưỡng ban đầu ngay sau

khi hoàn thiện bề mặt đến giai đoạn bảo dưỡng cuối cùng khi bê tông đã bắt đầu cứng, như trình bày ở Bảng 1. Cách tiếp cận này cho thấy hiệu quả bảo dưỡng không chỉ phụ thuộc vào việc có bảo dưỡng hay không, mà còn phụ thuộc vào thời điểm bắt đầu, thời gian duy trì và kỹ thuật áp dụng ở từng giai đoạn. Trong điều kiện thi công thực tế, bảo dưỡng đúng kỹ thuật thường có chi phí thấp hơn rất nhiều so với chi phí sửa chữa các hư hỏng phát sinh do mất nước sớm, nứt bề mặt hoặc suy giảm độ bền sau thời gian khai thác [8]. Bên cạnh đó, các chỉ dẫn của tiêu chuẩn Hoa Kỳ như ACI PRC-308-16 [9], ACI SPEC-308.1-23 [10] và ACI PRC 308-213-13(22) [11] cũng cho thấy bảo dưỡng cần được xem như một nội dung kiểm soát chất lượng xuyên suốt, đặc biệt đối với các kết cấu BTXM yêu cầu cao về độ bền và khả năng làm việc lâu dài.

Bảng 1. Các giai đoạn bảo dưỡng bê tông [8].

Giai đoạn	Thời điểm	Biện pháp	Nội dung
Bảo dưỡng ban đầu	Ngay sau khi hoàn thiện bề mặt	Phun sương, dung dịch giảm bay hơi	Ngăn nứt co ngót dẻo, duy trì độ ẩm bề mặt
Bảo dưỡng ở giữa	Sau khi hoàn thiện nhưng trước khi bê tông đông cứng	Duy trì phun sương nhẹ	Tránh hư hỏng bề mặt, giữ quá trình thủy hóa
Bảo dưỡng cuối cùng	Khi bê tông đã bắt đầu cứng	Phun hợp chất tạo màng, phủ vải ẩm hoặc dùng chăn cách nhiệt	Phát triển cường độ, tăng độ bền, ngăn nứt và biến dạng



(a) Tưới nước



(b) Phủ bạt



(c) Phun sương



(d) Tạo màng



(e) Phủ gia



(f) Hấp hơi

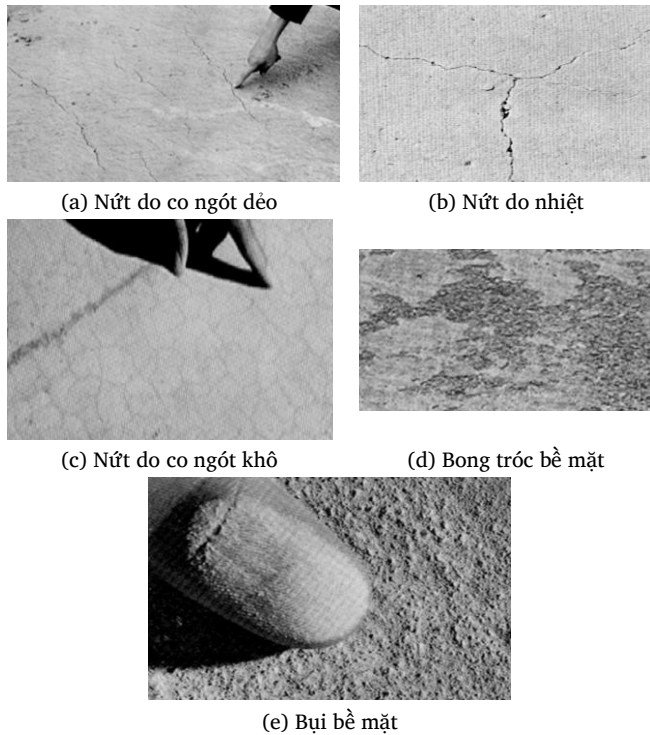
Hình 1. Các kỹ thuật bảo dưỡng bê tông sau thi công [8].

Mặc dù vai trò của bảo dưỡng đã được thừa nhận rộng rãi, hiệu

quả của các biện pháp bảo dưỡng truyền thống trong thực tế vẫn phụ thuộc đáng kể vào điều kiện thời tiết, nguồn nước, năng lực tổ chức thi công và mức độ kiểm soát ngoài hiện trường. Đối với các kết cấu có diện tích bề mặt lớn như mặt đường BTXM, việc duy trì độ ẩm đồng đều trên toàn bộ bề mặt trong thời gian đủ dài thường gặp nhiều khó khăn, nhất là trong điều kiện nắng nóng, gió mạnh hoặc môi trường khô. Khi bảo dưỡng không đầy đủ hoặc không đúng thời điểm, bê tông có thể mất nước nhanh tại lớp bề mặt, làm gia tăng co ngót ở tuổi sớm, xuất hiện vết nứt và dẫn đến suy giảm chất lượng lớp mặt. Đây cũng là lý do mà các kỹ thuật bảo dưỡng ngoài như tưới nước, phủ vật liệu ẩm, phun hợp chất tạo màng hoặc kết hợp nhiều biện pháp khác nhau vẫn luôn được nghiên cứu và hoàn thiện, như khái quát ở Hình 1. Tuy nhiên, xét về bản chất, các biện pháp này chủ yếu tác động từ bên ngoài bề mặt cấu kiện; do đó, khả năng duy trì ẩm bên trong bê tông vẫn chịu ảnh hưởng mạnh của điều kiện môi trường và chế độ bảo dưỡng thực tế.

Đối với mặt đường BTXM, yêu cầu bảo dưỡng càng trở nên nghiêm ngặt hơn vì đây là kết cấu có bề mặt phơi lộ lớn, chịu tác động trực tiếp của nắng, gió và dao động nhiệt độ ngay sau khi thi công. Theo Adlinge và Gupta [12], hư hỏng của mặt đường BTXM có thể bắt nguồn từ nhiều nguyên nhân, bao gồm thiết kế cấp phối [13], tải trọng khai thác [14], kích thước hầm chứa phù hợp [15], [16], cũng như điều kiện khí hậu và môi trường [17], [18], [19]. Tuy nhiên, trong số các dạng hư hỏng thường gặp, nứt ở tuổi sớm được xem là đặc biệt đáng lưu ý vì có thể làm suy giảm chất lượng khai thác ngay từ giai đoạn đầu và tạo điều kiện cho các cơ chế xuống cấp phát triển về sau [17], [20], [21]. Qu và cộng sự [22] cũng cho rằng nứt sớm là một trong những

dạng hư hỏng nghiêm trọng nhất vì xuất hiện ngay trong giai đoạn đầu hình thành vật liệu. Các dạng hư hỏng liên quan đến thiếu hụt bảo dưỡng như nứt co ngót dẻo, nứt do nhiệt, nứt co ngót khô, bong tróc bề mặt hoặc bụi bề mặt đã được tổng hợp trong Hình 2 và cho thấy mối liên hệ khá rõ giữa chất lượng bảo dưỡng với độ bền của mặt đường BTXM [23].



Hình 2. Hư hỏng do bảo dưỡng chưa phù hợp trong quá trình thi công [23].

Trong bối cảnh đó, cùng với các phương pháp bảo dưỡng ngoài đã được áp dụng phổ biến, các hướng tiếp cận hiện đại hơn đã được nghiên cứu nhằm cải thiện hiệu quả duy trì ẩm trong bê tông. Bên cạnh các giải pháp như sử dụng hợp chất tạo màng, bảo dưỡng nhiệt ẩm hoặc phụ gia tự bảo dưỡng, bảo dưỡng bên trong đang được quan tâm nhiều hơn do có khả năng cung cấp nước từ bên trong bê tông trong quá trình thủy hóa [8], [11]. Cách tiếp cận này đặc biệt có ý nghĩa đối với các hệ BTXM có tỷ lệ nước/chất kết dính thấp hoặc các kết cấu khó duy trì bảo dưỡng bề mặt liên tục trên diện rộng. Theo hướng đó, thay vì chỉ hạn chế sự mất nước từ bên ngoài, bảo dưỡng bên trong hướng đến việc dự trữ và giải phóng nước ngay trong hệ vật liệu, từ đó hỗ trợ quá trình thủy hóa, giảm co ngót và hạn chế nứt ở tuổi sớm. Đó là cơ sở để xem xét IC như một giải pháp phù hợp cho BTXM mặt đường trong điều kiện thi công và môi trường ở Việt Nam.

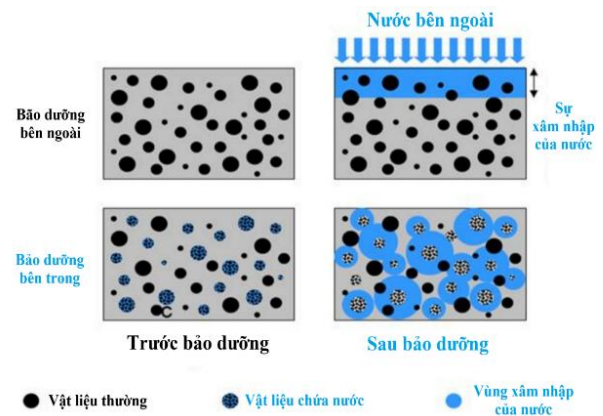
Đối với BTXM, đặc biệt là BTXM mặt đường, hạn chế của bảo dưỡng ngoài trong điều kiện thi công thực tế là cơ sở trực tiếp để xem xét các giải pháp kiểm soát ẩm từ bên trong vật liệu. Đóng góp nổi bật của bài báo này không chỉ là hệ thống hóa cơ chế và các nhóm vật liệu sử dụng cho bảo dưỡng bên trong, mà còn là làm rõ mối liên hệ giữa

cơ chế hút–nhả nước, ảnh hưởng đến các tính chất chủ yếu của BTXM và triển vọng ứng dụng đối với mặt đường BTXM. Theo hướng đó, bài báo tiếp cận IC như một giải pháp kỹ thuật tổng hợp cho BTXM mặt đường, thay vì chỉ xem đây là một biện pháp hỗ trợ thủy hóa hoặc một hướng lựa chọn vật liệu riêng lẻ. Trên cơ sở đó, bài báo này tập trung tổng quan về bảo dưỡng bên trong cho BTXM, bao gồm cơ chế, các nhóm vật liệu đã được nghiên cứu và ảnh hưởng của chúng đến một số tính chất chủ yếu của bê tông, đồng thời thảo luận khả năng ứng dụng đối với mặt đường BTXM.

2. Bảo dưỡng bên trong (IC)

Đối với BTXM, bảo dưỡng luôn là điều kiện cần để bê tông phát triển cường độ theo yêu cầu thiết kế, hạn chế mất nước ở tuổi sớm và giảm nguy cơ nứt do tự khô hoặc co ngót [24]. Tuy nhiên, trong thực tế thi công, việc duy trì bảo dưỡng liên tục từ bên ngoài thường phụ thuộc mạnh vào điều kiện hiện trường, nguồn nước, nhân công và khả năng kiểm soát chất lượng. Hạn chế này càng rõ đối với các kết cấu có diện tích bề mặt lớn hoặc chiều dài thi công lớn như mặt đường BTXM, nơi công tác giữ ẩm đồng đều trong suốt giai đoạn đầu không phải lúc nào cũng được bảo đảm. Từ yêu cầu đó, bảo dưỡng bên trong (internal curing, IC) được nghiên cứu như một hướng tiếp cận bổ sung, trong đó nước không chỉ được cung cấp từ bề mặt mà còn được dự trữ và giải phóng ngay trong cấu trúc vật liệu, nhờ sự có mặt của các thành phần có khả năng hấp thụ và nhả nước trong hỗn hợp bê tông. Cách tiếp cận này làm giảm sự phụ thuộc vào bảo dưỡng ngoài và đặc biệt phù hợp với các hệ bê tông đặc chắc hoặc có tỷ lệ nước/chất kết dính thấp [24], [25], [26], [27].

2.1. Khái niệm và cơ chế của IC



Hình 3. Mô tả phương pháp bảo dưỡng nước thông thường so với IC [3], [25].

IC là phương pháp cung cấp nước từ bên trong bê tông thông qua các vật liệu có khả năng giữ nước và nhả nước theo thời gian, nhằm duy trì quá trình thủy hóa sau khi bê tông bắt đầu đóng rắn [25], [26], [27]. Khác với bảo dưỡng ngoài, trong đó nước chủ yếu tác động

từ bề mặt cấu kiện, IC cho phép nước được phân bố ngay trong chiều dày bê tông nhờ các hạt hoặc sợi chứa nước phân tán trong hỗn hợp. Cơ chế này được minh họa trong Hình 3, cho thấy nước có thể được cung cấp trực tiếp tại những vùng đang thiếu ẩm trong hệ vi cấu trúc thay vì chỉ phụ thuộc vào sự thấm từ ngoài vào trong [3]. Vì vậy, về mặt bản chất, IC không thay thế hoàn toàn bảo dưỡng ngoài trong mọi trường hợp, mà là một giải pháp bổ sung có khả năng cải thiện trạng thái ẩm nội tại của bê tông, đặc biệt trong giai đoạn đầu của quá trình thủy hóa [28], [29], [30], [31].

Khi xi măng thủy hóa, nước trong hệ mao quản giảm dần, đồng thời thể tích sản phẩm thủy hóa tạo thành nhỏ hơn tổng thể tích ban đầu của xi măng và nước, làm xuất hiện hiện tượng co hóa học [32]. Nếu lượng nước trong lỗ rỗng tiếp tục suy giảm mà không được bù lại, bê tông sẽ xảy ra tự khô, độ ẩm tương đối trong hồ xi măng giảm xuống và áp lực mao dẫn âm bắt đầu hình thành trong hệ lỗ rỗng [32]. Chính áp lực mao dẫn này kéo các phần tử rắn lại gần nhau, làm vật liệu co lại và gây ra co ngót tự sinh hoặc co ngót ở tuổi sớm. Trong điều kiện đó, IC có thể phát huy tác dụng thông qua việc giải phóng dần lượng nước đã được dự trữ trong các vật liệu IC vào các vùng hồ xi măng đang bị thiếu ẩm, nhờ đó duy trì độ bão hòa cục bộ, giảm tốc độ suy giảm độ ẩm tương đối trong mao quản và hạn chế sự phát triển của ứng suất kéo nội sinh trong vật liệu [28], [29], [30], [31], [32].

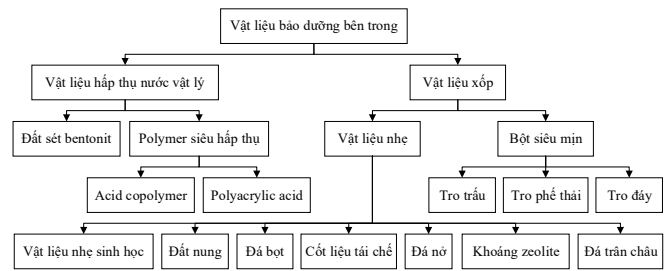
Xét ở góc độ vi mô, hiệu quả của IC phụ thuộc không chỉ vào khả năng chứa nước của vật liệu mà còn vào cơ chế nhả nước, kích thước hạt hoặc hình thái vật liệu, mức độ phân tán trong hỗn hợp và sự tương thích với nền xi măng. Nếu nước được nhả ra đúng thời điểm và đủ lượng, quá trình thủy hóa sẽ được kéo dài hơn, mức độ hydrat hóa tăng lên, cấu trúc vi mô được cải thiện và nguy cơ nứt do mất ẩm sớm được giảm xuống. Ngược lại, nếu vật liệu IC tạo thêm lỗ rỗng lớn, phân bố không đều hoặc nhả nước không phù hợp với nhu cầu thủy hóa, tác động tích cực của IC có thể bị suy giảm. Vì vậy, IC cần được hiểu là cơ chế điều hòa ẩm nội tại có kiểm soát, thay vì cách bổ sung nước đơn thuần vào hỗn hợp bê tông [28], [29], [30], [31], [32].

2.2. Các nhóm vật liệu sử dụng cho IC

Các vật liệu sử dụng cho IC có thể được phân thành nhiều nhóm khác nhau, nhưng đều phải đáp ứng yêu cầu cơ bản là có khả năng hấp thụ, lưu trữ và giải phóng nước theo nhu cầu của quá trình thủy hóa xi măng. Những vật liệu được sử dụng phổ biến gồm polyme siêu hấp thụ (superabsorbent polymer-SAP), cốt liệu nhẹ (lightweight aggregate-LWA), cùng với các vật liệu khác như đá bọt, zeolit, đất sét hoặc đá phiến nở, cốt liệu từ tro bay hoặc xỉ, bột xốp siêu mịn và một số phụ gia hóa học [20], [30], [33], [34].

Về cơ chế làm việc, vật liệu IC có thể chia thành hai nhóm chính như minh họa trong Hình 4: (i) nhóm hấp thụ-nhả nước theo cơ chế polymer (điển hình là SAP), và (ii) nhóm vật liệu xốp (chủ yếu là LWA), trong đó nước được lưu trữ trong hệ lỗ rỗng và giải phóng dần khi độ ẩm trong bê tông giảm [24], [31], [35], [36]. Dù khác nhau về bản chất, cả hai nhóm đều hướng đến mục tiêu duy trì độ ẩm nội tại, hạn

chế tự khô và hỗ trợ quá trình thủy hóa.



Hình 4. Phân loại vật liệu IC [35].

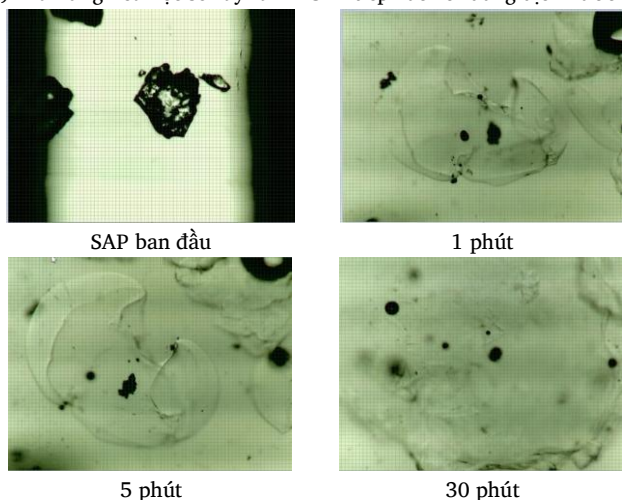
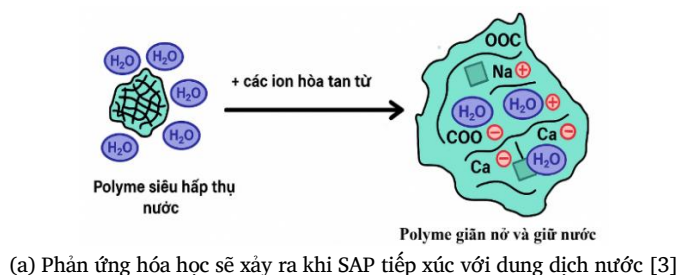
Để vật liệu IC hoạt động hiệu quả, cần thỏa mãn đồng thời yêu cầu về nhiệt động học và động học. Cụ thể, nước trong vật liệu phải có hoạt độ gần 1 (tương đương độ ẩm tương đối cao) để có thể tham gia vào quá trình thủy hóa; đồng thời phải được giải phóng đủ nhanh khi độ ẩm trong hồ xi măng giảm xuống [20], [35], [37]. Ngoài ra, các yếu tố như khả năng hút nước, tốc độ nhả nước, kích thước hạt và mức độ phân tán trong hỗn hợp cũng ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả IC, như khái quát trong Hình 5.



Hình 5. Các tính chất ảnh hưởng đến hiệu quả IC của vật liệu [30].

SAP là nhóm vật liệu được nghiên cứu nhiều nhất nhờ khả năng hấp thụ nước rất lớn. Đây là các polymer có cấu trúc mạng ba chiều, có thể trương nở mạnh khi tiếp xúc với nước do chênh lệch áp suất thẩm thấu. Cơ chế này được thể hiện trong Hình 6, cho thấy SAP chuyển từ trạng thái khô sang trạng thái trương nở khi hấp thụ nước [3], [38], [39], [40]. Trong bê tông, nước được SAP giữ lại sẽ được giải phóng dần khi độ ẩm giảm, giúp duy trì thủy hóa và giảm co ngót. SAP thường được sử dụng với hàm lượng 0–0,5 % khối lượng xi măng. Tuy nhiên, sau khi nhả nước, SAP có thể để lại lỗ rỗng tương đối lớn, do đó hiệu quả cơ học phụ thuộc nhiều vào kích thước hạt và liều lượng sử dụng.

LWA là nhóm vật liệu IC có tính thực tiễn cao do vừa đóng vai trò cốt liệu vừa cung cấp nước nội tại. LWA có cấu trúc xốp, với khối lượng riêng nhỏ hơn 1100–1200 kg/m³ tùy loại [41]. Vật liệu này có thể hấp thụ lượng nước lớn và giải phóng dần trong quá trình thủy hóa, với mức giải phóng đạt 85–98 % trong 24 giờ đầu [3], [42], [43], [20]. Trong thực tế, LWA thường được sử dụng với tỷ lệ khoảng 10–30 % và cần được bão hòa trước khi trộn [44], [45], [46]. So với SAP, LWA có cơ chế nhả nước ổn định hơn nhưng có thể ảnh hưởng đến khối lượng thể tích và độ đặc chắc của bê tông nếu sử dụng ở hàm lượng cao.



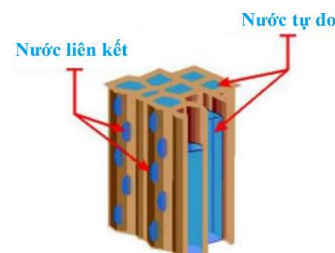
(b) Sự trương nở của SAP khi hấp thụ nước theo thời gian [40]
Hình 6. Mô tả quá trình hấp thụ nước và trương nở của SAP.

Ngoài hai nhóm vật liệu chính, bột xốp siêu mịn cũng được xem là một hướng tiềm năng cho IC. Các hạt này có kích thước nhỏ (khoảng 5–10 μm), diện tích bề mặt lớn và cấu trúc mesoporous, cho phép lưu trữ và giải phóng nước ở cấp độ vi mô [3], [20], [47]. Nhờ khả năng phân tán tốt trong hồ xi măng, nhóm vật liệu này có thể cung cấp nước đồng đều hơn so với LWA, đặc biệt phù hợp với bê tông đặc chắc. Tuy nhiên, ảnh hưởng của chúng đến tính công tác và cấu trúc rỗng vẫn cần được nghiên cứu thêm.

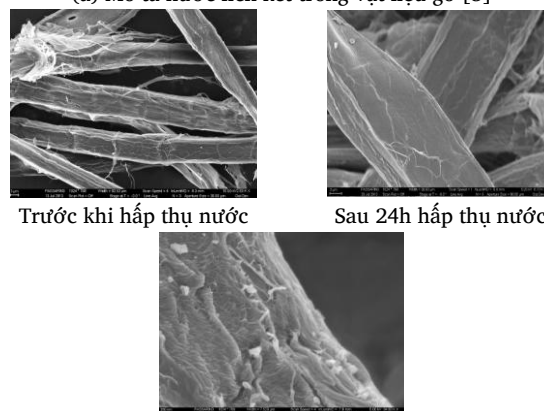
Một hướng vật liệu đáng chú ý khác là sợi tự nhiên, trong đó nhóm vật liệu chứa cellulose được quan tâm nhiều nhất. Nhóm này có khả năng hấp thụ và giải phóng nước, đồng thời có thể góp phần kiểm soát nứt nhờ cơ chế gia cường vi mô. Quá trình hấp thụ nước của sợi được minh họa trong Hình 7. Các kết quả tổng hợp trong Bảng 2 cho thấy nhiều loại vật liệu cellulose như sợi cellulose, bột gỗ, sợi kenaf, sợi abaca đều có khả năng giảm co ngót, tăng độ ẩm nội tại và hạn chế nứt. Ngoài ra, ưu điểm nổi bật của nhóm vật liệu này là nguồn gốc tự nhiên, có thể tận dụng từ phụ phẩm nông-lâm nghiệp, phù hợp với định hướng vật liệu bền vững.

Các kết quả hiện có cho thấy chưa có một loại vật liệu IC nào phù hợp cho mọi hệ BTXM. SAP có ưu điểm về khả năng hút nước lớn nhưng có thể tạo lỗ rỗng; LWA có cơ chế ổn định hơn nhưng ảnh hưởng đến khối lượng thể tích; bột xốp siêu mịn và vật liệu cellulose có tiềm năng cao nhưng cần thêm nghiên cứu hệ thống. Do đó, việc lựa chọn vật liệu IC cần dựa trên mục tiêu thiết kế cụ thể của BTXM, đồng thời cân nhắc

giữa hiệu quả bảo dưỡng nội tại, tính chất cơ học và khả năng ứng dụng thực tế. Xét về bản chất, hiệu quả của IC được quyết định bởi mức độ cân bằng giữa lượng nước nội tại thực sự tham gia hỗ trợ thủy hóa và mức độ thay đổi cấu trúc rỗng do chính vật liệu IC tạo ra. Vì vậy, vật liệu có khả năng hút nước cao chưa chắc đã cho hiệu quả IC tốt nếu cơ chế nhả nước không phù hợp hoặc gây tăng độ rỗng quá mức.



(a) Mô tả nước liên kết trong vật liệu gỗ [3]



Sau 24h hấp thụ hồ xi măng
Hình 7. Quá trình hấp thụ nước của sợi tự nhiên.

2.3. Ý nghĩa của IC đối với BTXM

Từ các cơ sở nêu trên có thể thấy IC là một hướng kỹ thuật có nền tảng khoa học rõ ràng, đặc biệt phù hợp với yêu cầu hạn chế mất ẩm nội tại và giảm nứt ở tuổi sớm của BTXM. So với cách bảo dưỡng chỉ dựa vào bề mặt, IC cho phép tác động trực tiếp hơn đến trạng thái ẩm trong lòng vật liệu, từ đó hỗ trợ quá trình thủy hóa tại những vùng khó được cung cấp nước bằng các phương pháp bảo dưỡng ngoài. Điều này đặc biệt có ý nghĩa đối với các kết cấu thi công trên diện rộng, các hệ bê tông có tỷ lệ nước/chất kết dính thấp và các điều kiện môi trường bất lợi cho việc giữ ẩm liên tục [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32]. Tuy nhiên, hiệu quả của IC không mang tính tuyệt đối mà phụ thuộc chặt chẽ vào loại vật liệu, mức độ bão hòa, lượng nước dự trữ, khả năng nhả nước và sự tương thích của vật liệu IC với cấp phối bê tông. Vì vậy, khi đánh giá tiềm năng ứng dụng của IC, cần xem xét đồng thời cả lợi ích về kiểm soát ẩm nội tại và các tác động phụ có thể phát sinh đối với cấu trúc rỗng, cường độ và độ bền lâu của bê tông. Xét ở góc độ tổng quan, giá trị cốt lõi của IC không nằm ở việc thay thế bảo dưỡng ngoài, mà ở khả năng tái phân phối ẩm trong lòng vật liệu, qua đó làm giảm mức độ nhạy của BTXM đối với tự khô và nứt ở tuổi sớm.

Bảng 2. Hiệu quả sử dụng vật liệu cellulose làm IC.

Loại sợi	Tỷ lệ (%) sử dụng	Đặc tính kỹ thuật	Hiệu quả đạt được	Nguồn
Sợi cellulose bão hòa	1	Hấp thụ và giữ nước, giảm co ngót tự nhiên	Giảm co ngót, tăng độ bền kéo. Kiểm soát vết nứt	[24]
Sợi cellulose tinh khiết	1	Độ bền kéo cao, hấp thụ nước (1,2 lần khối lượng)	Kiểm soát vết nứt; cung cấp nước từ từ trong quá trình IC	[24]
Bột gỗ	0,5–1	Hấp thụ nước cao (245–370 % khối lượng bột khô)	Giảm hiện tượng co khô, tăng quá trình thủy hóa, giảm nứt ở giai đoạn đầu	[49], [48]
Sợi kenaf (ngắn)	0,3–3	Hấp thụ nước tốt, tăng độ ẩm tương đối	Giảm co ngót tự nhiên 12–63 %, tăng độ ẩm 3–30 %	[50]
Sợi kenaf (dài)	0,3–3	Bù trừ độ ẩm trong quá trình thủy hóa	Hiệu quả trong tăng độ ẩm tương đối và giảm nứt	[50]
Sợi bông tai	0,1–0,2	Cấu trúc rỗng, hấp thụ nước vượt trội	Hiệu quả bảo dưỡng nội sinh tăng 17 %, giảm nguy cơ nứt, cải thiện cơ học	[51]
Sợi abaca (chuối)	0,25–1	Cấu trúc ống, hấp thụ nước cao (291 % trọng lượng khô)	Giảm co ngót tự nhiên, tăng cường độ thủy hóa, giảm nguy cơ nứt trong giai đoạn đầu của BTXM	[52]

3. Ảnh hưởng của IC đến tính chất của BTXM

Việc sử dụng các vật liệu có khả năng hấp thụ, dự trữ và giải phóng nước đã tạo ra một hướng tiếp cận hiệu quả để kiểm soát trạng thái ẩm nội tại của BTXM ở giai đoạn đầu đông rắn. Trên cơ sở đó, IC không chỉ được xem là một giải pháp hỗ trợ quá trình thủy hóa của xi măng mà còn là một biện pháp có khả năng tác động đồng thời đến cường độ cơ học, biến dạng co ngót, nguy cơ nứt ở tuổi sớm và một số đặc tính liên quan đến độ bền của BTXM. Tuy nhiên, ảnh hưởng của IC không hoàn toàn giống nhau trong mọi trường hợp. Hiệu quả đạt được phụ thuộc đáng kể vào bản chất vật liệu IC, khả năng hút–nhả nước, trạng thái bão hòa trước khi trộn, hàm lượng sử dụng, đặc điểm của hệ chất kết dính cũng như điều kiện bảo dưỡng và tuổi thí nghiệm [28], [29], [30], [31], [32]. Vì vậy, khi đánh giá hiệu quả của IC đối với BTXM, cần xem xét đồng thời cả mặt tích cực lẫn các ảnh hưởng bất lợi có thể phát sinh nếu lựa chọn vật liệu hoặc cấp phối chưa phù hợp.

3.1. Ảnh hưởng đến cường độ chịu nén

Cường độ chịu nén là chỉ tiêu cơ học cơ bản thường được dùng để đánh giá mức độ phát triển cấu trúc của BTXM và là thông số đầu tiên được xem xét trong hầu hết các nghiên cứu về IC. Kết quả tổng hợp trong bản thảo cho thấy IC không làm tăng cường độ chịu nén trong mọi trường hợp, nhưng trong nhiều nghiên cứu đã được ghi nhận có thể cải thiện sự phát triển cường độ nếu vật liệu IC có khả năng cung cấp nước nội tại đúng thời điểm và với lượng phù hợp. Về bản chất, nước được giải phóng từ vật liệu IC có thể hỗ trợ quá trình thủy hóa tiếp tục diễn ra trong điều kiện độ ẩm bên trong bê tông suy giảm, từ đó làm tăng mức độ hydrat hóa, cải thiện cấu trúc vi mô và hạn chế sự hình thành các vùng hồ xi măng kém phát triển [28], [29], [30], [31], [32].

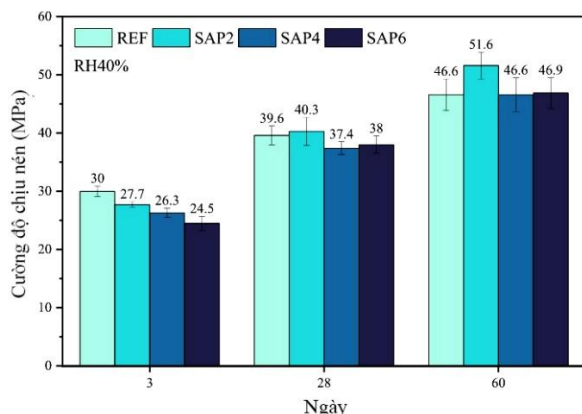
Các kết quả trong Hình 8 cho thấy cường độ chịu nén của BTXM được IC có xu hướng thay đổi theo tuổi và theo loại vật liệu sử dụng.

Ở tuổi sớm, nhất là khi sử dụng SAP, cường độ chịu nén có thể giảm nhẹ so với mẫu đối chứng nếu hàm lượng sử dụng cao hoặc kích thước hạt lớn. Nguyên nhân chủ yếu là sau khi các hạt SAP hấp thụ và sau đó giải phóng nước, chúng để lại các lỗ rỗng tương đối lớn trong nền xi măng, làm giảm độ đặc chắc cục bộ của vật liệu. Tuy nhiên, khi hàm lượng SAP được kiểm soát hợp lý, hiệu quả cung cấp nước nội tại có thể bù lại phần bất lợi do tăng độ rỗng, đặc biệt ở các tuổi muộn khi quá trình thủy hóa kéo dài tạo ra thêm sản phẩm hydrat lấp đầy một phần lỗ rỗng và cải thiện cấu trúc nền [28], [29], [30], [31], [32].

Đối với các hệ sử dụng LWA bão hòa trước, ảnh hưởng đến cường độ chịu nén thường ổn định hơn do cơ chế nhả nước diễn ra từ từ thông qua mạng lỗ rỗng của cốt liệu. Trong trường hợp này, nước nội tại được dự trữ trong mao quản của hạt cốt liệu và được giải phóng dần khi độ ẩm tương đối trong hồ xi măng giảm xuống. Nếu tỷ lệ thay thế ở mức hợp lý, hiệu quả thủy hóa bổ sung có thể giúp cường độ chịu nén của BTXM ở tuổi 28 ngày và các tuổi muộn đạt tương đương hoặc cao hơn mẫu bảo dưỡng thường. Ngược lại, khi sử dụng LWA với tỷ lệ cao, sự gia tăng độ rỗng tổng thể và sự suy giảm mô đun đàn hồi của pha cốt liệu có thể làm cường độ chịu nén giảm [28], [29], [30], [31], [32]. Ngoài SAP và LWA, các vật liệu xốp mịn hoặc phụ phẩm có khả năng giữ nước cũng đã được khảo sát như nguồn nước nội tại cho bê tông. Trong nhiều trường hợp, hiệu quả đối với cường độ chịu nén không chỉ đến từ cơ chế IC mà còn liên quan đến các phản ứng pozzolan hoặc hiệu ứng lấp đầy vi cấu trúc. Điều này cho thấy khi đánh giá kết quả cường độ chịu nén của BTXM có IC, cần phân biệt rõ đâu là tác động do cơ chế nhả nước nội tại và đâu là tác động do thành phần khoáng hay hiệu ứng hình học của vật liệu.

Nhìn chung, từ các nghiên cứu đã tổng hợp có thể nhận xét rằng IC không phải là giải pháp nhằm làm tăng cường độ chịu nén theo cách trực tiếp và chắc chắn trong mọi hệ bê tông. Hiệu quả của nó phụ thuộc vào sự cân bằng giữa hai xu hướng đối lập: một mặt, nước nội tại giúp kéo dài quá trình thủy hóa và cải thiện cấu trúc vi mô; mặt khác, chính

vật liệu IC có thể tạo thêm lỗ rỗng hoặc làm thay đổi cấu trúc của nền nếu lựa chọn và sử dụng chưa phù hợp. Vì vậy, trong thiết kế cấp phối BTXM có IC, việc tối ưu đồng thời loại vật liệu, kích thước, trạng thái bão hòa và hàm lượng sử dụng là điều kiện then chốt để duy trì hoặc nâng cao cường độ chịu nén của bê tông. Hơn nữa, đối với cường độ chịu nén, IC không nên được xem là giải pháp tăng cường cơ học trực tiếp mà là công cụ điều chỉnh quá trình phát triển vi cấu trúc; hiệu quả cơ học chỉ đạt được khi lợi ích thủy hóa bổ sung vượt qua bất lợi do tăng độ rỗng.



Hình 8. Cường độ chịu nén của BTXM được IC [53].

3.2. Ảnh hưởng đến cường độ chịu uốn

So với cường độ chịu nén, cường độ chịu uốn có ý nghĩa thực tế đặc biệt lớn đối với BTXM mặt đường vì đây là chỉ tiêu gần trực tiếp với khả năng làm việc của tấm bê tông dưới tải trọng bánh xe và trạng thái ứng suất uốn trong khai thác. Các kết quả tổng hợp trong bản thảo cho thấy IC có xu hướng cải thiện cường độ chịu uốn rõ hơn trong nhiều trường hợp, đặc biệt khi vật liệu IC góp phần giảm vi nứt ở tuổi sớm và duy trì quá trình thủy hóa ở vùng hồ xi măng tiếp giáp với cốt liệu.

Dữ liệu trong Bảng 3 cho thấy cường độ chịu uốn của BTXM sử dụng vật liệu IC có thể tăng đáng kể so với mẫu đối chứng ở tuổi 28 ngày. Xu hướng này cho thấy lợi ích của IC không chỉ nằm ở việc hỗ trợ cường độ chịu nén mà còn thể hiện rõ ở khả năng cải thiện ứng xử chịu kéo gián tiếp và hạn chế sự phát triển vết nứt vi mô trong nền vật liệu. Trong nhiều nghiên cứu, sự gia tăng cường độ chịu uốn được giải thích bởi việc nước nội tại giúp duy trì độ ẩm trong vùng hồ xi măng, làm giảm co ngót tự sinh và giảm ứng suất kéo sinh ra trong quá trình bê tông tự khô. Nhờ đó, số lượng và kích thước các vi nứt ở tuổi sớm giảm đi, tạo điều kiện cho bê tông làm việc tốt hơn dưới tác dụng của uốn [28], [29], [30], [31], [32]. Cần lưu ý rằng mức tăng cường độ chịu uốn trong Bảng 3 phản ánh một hệ vật liệu và điều kiện thí nghiệm

Bảng 3. Cường độ chịu uốn thay đổi khi có IC [54].

Bê tông siêu tính năng (UHPC)	LWS 00	LWS 12,5	LWS 25	LWS 37,5	LWS 50	LWS 75
Cường độ chịu uốn (MPa)	21	23	24	16	15	9

cụ thể; do đó, kết quả này nên được hiểu như một xu hướng tích cực, không phải là giá trị đại diện chung cho mọi hệ BTXM sử dụng IC.

Đối với các vật liệu IC có dạng sợi, nhất là các sợi có nguồn gốc cellulose hoặc sợi tự nhiên, tác động đến cường độ chịu uốn còn có thể mạnh hơn nhờ sự kết hợp của hai cơ chế. Thứ nhất là cơ chế IC, trong đó sợi hấp thụ nước trước khi trộn và giải phóng dần trong quá trình bê tông mất ẩm. Thứ hai là cơ chế gia cường vi mô, trong đó sợi góp phần bắc cầu qua các vi nứt, làm chậm quá trình mở rộng và lan truyền vết nứt. Đây là lý do vì sao một số loại sợi cellulose, sợi kenaf, sợi abaca hoặc bột gỗ được đánh giá là có triển vọng không chỉ trong việc giảm co ngót mà còn trong việc cải thiện các chỉ tiêu cơ học liên quan đến kéo và uốn của BTXM, như đã tổng hợp trong Bảng 2.

Tuy vậy, cũng cần lưu ý rằng hiệu quả của IC đối với cường độ chịu uốn không phải lúc nào cũng tăng. Nếu vật liệu IC làm tăng đáng kể độ rỗng, phân bố không đều trong hỗn hợp hoặc gây suy giảm độ đồng nhất của nền xi măng, cường độ chịu uốn có thể không cải thiện tương ứng với kỳ vọng. Tương tự như cường độ chịu nén, cường độ chịu uốn của BTXM có IC chỉ đạt hiệu quả tốt khi vật liệu được lựa chọn đúng và cấp phối được thiết kế hợp lý. Như vậy, lợi ích của IC đối với cường độ chịu uốn thường thể hiện rõ hơn trong các hệ vật liệu mà cơ chế giảm vi nứt và cơ chế gia cường vi mô cùng xuất hiện, thay vì chỉ dựa vào hiệu ứng bổ sung nước đơn thuần.

3.3. Ảnh hưởng đến co ngót và khả năng chống nứt

Trong số các lợi ích của IC, khả năng giảm co ngót và hạn chế nứt ở tuổi sớm là ưu điểm nổi bật nhất và cũng là lý do chính khiến phương pháp này được quan tâm nhiều trong các hệ bê tông có tỷ lệ nước/chất kết dính thấp. Khi quá trình thủy hóa diễn ra, nước trong hệ mao quản giảm dần, làm độ ẩm tương đối bên trong hồ xi măng hạ xuống. Điều này dẫn đến sự hình thành áp lực mao dẫn âm, kéo theo co ngót tự sinh và làm tăng nguy cơ xuất hiện vi nứt trước khi bê tông đạt đủ cường độ để kháng lại ứng suất kéo nội sinh. IC được ghi nhận có khả năng làm giảm hiện tượng này thông qua việc cung cấp nước từ bên trong, duy trì trạng thái bão hòa cục bộ trong các vùng hồ xi măng đang thiếu ẩm và làm chậm quá trình suy giảm độ ẩm tương đối [28], [29], [30], [31], [32].

Các kết quả tổng hợp trong Bảng 4 và Bảng 5 cho thấy IC có thể làm giảm đáng kể co ngót của BTXM, đặc biệt trong giai đoạn đầu sau khi đổ. Hiệu quả này càng rõ hơn đối với các hệ bê tông đặc chắc, nơi hiện tượng tự khô diễn ra mạnh và co ngót tự sinh thường là nguyên nhân quan trọng dẫn đến nứt ở tuổi sớm. Việc giảm co ngót không chỉ có ý nghĩa về mặt biến dạng mà còn trực tiếp làm giảm nguy cơ phát sinh vết nứt, qua đó cải thiện độ bền lâu và khả năng làm việc tổng thể của BTXM.

Bảng 4. Các nghiên cứu cho thấy hiệu quả IC sử dụng vật liệu LWA.

Nghiên cứu	Vật liệu sử dụng	Đặc tính đánh giá	Hiệu quả đạt được	Nguồn
Cusson và Hoogeveen	LWA mịn ngâm bão hòa	Co ngót tự do mẫu lớn, điều kiện kín	Giảm rõ nguy cơ nứt do tự co ngót trong bê tông tính năng cao (HPC)	[31]
Henkensiefken và cộng sự	LWA bão hòa trước, tỷ lệ 0–33 % thể tích	Độ ẩm, biến dạng tự sinh, vòng co ngót bị kiểm chế	Độ ẩm tăng, tự co ngót giảm mạnh; thời gian nứt giảm	[25]
	LWA tiền bão hòa trong hỗn hợp cốt liệu mịn, tỷ lệ 0–18 %	ASTM C1579, đo lún và mất nước bay hơi	Với 18 % LWA có thể triệt tiêu nứt co ngót dẻo trong điều kiện thí nghiệm	[55]
Golias và cộng sự	So sánh LWA khô, LWA ngâm 24 giờ	Cường độ, co ngót, hút nước	Các hỗn hợp cho thấy hiệu suất IC tương đối tốt. LWA khô hấp thụ nước 55 % so với LWA ngâm	[56]
Zhutovsky và Kovler	LWA bão hòa kích cỡ 2,36–4,75 mm	Khảo sát HPC ở tỷ lệ nước/xi măng (W/C) từ 0,21 đến 0,33, thấm khí, hút nước, co ngót	Tỷ lệ W/C là 0,33, không gây suy giảm tính bền, giảm xu hướng nứt sớm của HPC	[57]
FHWA/ACI thực nghiệm	LWA mịn bão hòa trước, tỷ lệ 8–12 % thể tích bê tông (178–356 kg/m ³)	Thi công thực địa mặt cầu, theo dõi nứt	Giảm nứt sớm, tăng tuổi thọ khai thác với chi phí tăng không lớn	[58], [59]
Suzuki và cộng sự	LWA bão hòa, tỷ lệ từ 10% đến 40 % theo khối lượng thể tích	Độ co ngót tự nhiên	Mức giảm co ngót đáng kể, phụ thuộc vào tỷ lệ sử dụng	[60]

Bảng 5. Tỷ lệ hiệu quả sử dụng các vật liệu IC [3], [35], [36].

Vật liệu	Tỷ lệ (%) sử dụng	Đặc tính kỹ thuật	Hiệu quả đạt được
SAP	0–0,5	Giảm co ngót; cải thiện độ bền kéo	Cải thiện cường độ uốn và kéo
LWA	10–20	Hấp thụ nước	Tăng cường độ uốn, giảm co ngót tự nhiên
Bột mịn	30	Cấu trúc xốp, giữ và cung cấp nước	Giảm co ngót sau 24 giờ; tăng cường độ chịu nén
Tro trấu	5–10	Pozzolan, giữ nước, giảm co ngót	Cải thiện cường độ chịu nén, giảm độ hút nước và co ngót, tăng khả năng chống nứt
Sợi cellulose	0,5–1	Hấp thụ, giữ nước, cung cấp nước từ từ	Giảm đáng kể co ngót tự nhiên, tăng cường độ kéo, giảm vết nứt ở giai đoạn đầu

Đối với các vật liệu cellulose và sợi tự nhiên, kết quả tổng hợp trong Bảng 2 cho thấy nhóm vật liệu này đặc biệt có triển vọng trong kiểm soát co ngót và nứt. Sợi cellulose bão hòa ở tỷ lệ khoảng 1 % có thể hấp thụ và giữ nước, từ đó làm giảm co ngót tự nhiên, tăng độ bền kéo và kiểm soát vết nứt [24]. Sợi cellulose tinh khiết ở mức 1,0 % có độ bền kéo cao và khả năng hấp thụ nước khoảng 1,2 lần khối lượng, nhờ đó có thể cung cấp nước từ từ trong quá trình IC, đồng thời kiểm soát tốt sự phát triển vết nứt [24]. Bột gỗ ở tỷ lệ 0,5–1 % có khả năng hấp thụ nước rất cao, từ 245 % đến 370 % khối lượng khô, giúp giảm co ngót, tăng mức độ thủy hóa và giảm nứt ở giai đoạn đầu [49], [48]. Sợi kenaf ngắn và dài ở hàm lượng 0,3–3 % cho thấy hiệu quả trong việc tăng độ ẩm tương đối của bê tông, giảm co ngót tự sinh từ 12 % đến 63 % và cải thiện khả năng chống nứt [50]. Tương tự, sợi bông tai ở mức 0,1–0,2 % với cấu trúc rỗng và khả năng hấp thụ nước cao được ghi nhận làm tăng hiệu quả bảo dưỡng nội sinh khoảng 17 %, giảm nguy cơ nứt và cải thiện một số tính chất cơ học [51]. Sợi abaca với

cấu trúc ống và khả năng hấp thụ nước lên đến 291 % trọng lượng khô cũng cho thấy tác dụng rõ trong giảm co ngót, tăng thủy hóa và hạn chế nứt ở giai đoạn đầu của BTXM [52].

Những kết quả này cho thấy IC không chỉ làm giảm biến dạng co ngót theo nghĩa định lượng mà còn tác động sâu đến cơ chế phát sinh và lan truyền nứt trong vật liệu. Khi các vi nứt được hạn chế hình thành ngay từ giai đoạn đầu, khả năng phát triển thành các vết nứt lớn hơn trong quá trình khai thác cũng giảm đi. Điều này có ý nghĩa đặc biệt đối với BTXM mặt đường, nơi các vết nứt sớm có thể trở thành đường dẫn cho nước và các tác nhân xâm thực, làm suy giảm nhanh chất lượng bề mặt và độ bền của kết cấu.

3.4. Nhận xét tổng hợp về hiệu quả của IC đối với BTXM

Từ các nghiên cứu đã tổng hợp có thể thấy IC được ghi nhận có tác động đa chiều đến BTXM, với mức độ ảnh hưởng phụ thuộc vào vật

liệu và điều kiện sử dụng. Bên cạnh các lợi ích đã được ghi nhận, việc áp dụng IC trong thực tế thi công vẫn tồn tại một số hạn chế nhất định. Việc kiểm soát chính xác lượng nước cung cấp từ bên trong phụ thuộc mạnh vào đặc tính hút nước và phân bố của vật liệu IC, do đó có thể dẫn đến sai lệch giữa thiết kế và thực tế. Ngoài ra, sự hiện diện của vật liệu IC có thể ảnh hưởng đến tính công tác và yêu cầu điều chỉnh cấp phối, đặc biệt trong các hệ bê tông có hàm lượng chất kết dính cao. Các yếu tố về chi phí vật liệu, kiểm soát chất lượng và điều kiện thi công cũng cần được xem xét khi triển khai IC ở quy mô thực tế. Về mặt cơ học, IC có thể duy trì hoặc cải thiện cường độ chịu nén và cường độ chịu uốn nếu vật liệu và hàm lượng sử dụng được thiết kế hợp lý. Về mặt biến dạng, đây là giải pháp đặc biệt hiệu quả trong giảm co ngót và hạn chế nứt ở tuổi sớm. Về mặt cơ chế, lợi ích của IC không nằm ở việc “tăng cường” bê tông theo cách trực tiếp, mà chủ yếu ở khả năng điều hòa ẩm nội tại, kéo dài thủy hóa và ổn định cấu trúc vi mô trong giai đoạn đầu phát triển của vật liệu.

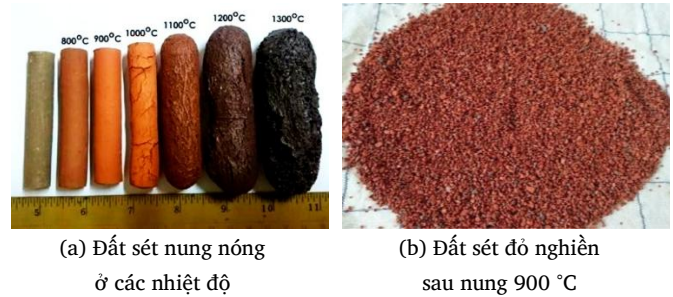
Tuy nhiên, cũng cần nhấn mạnh rằng hiệu quả của IC không mang tính tuyệt đối. Vật liệu IC nếu sử dụng không phù hợp có thể làm tăng độ rỗng, ảnh hưởng đến tính công tác hoặc làm suy giảm cường độ ở một số tuổi. Do đó, IC chỉ phát huy đầy đủ hiệu quả khi được xem như một bộ phận trong thiết kế cấp phối tổng thể, trong đó cần tối ưu đồng thời khả năng hút-nhả nước, trạng thái bão hòa, kích thước vật liệu, phân bố trong hỗn hợp và mức độ tương thích với hệ chất kết dính. Chính đặc điểm này làm cho IC trở thành một hướng nghiên cứu có chiều sâu, đặc biệt phù hợp với các loại BTXM yêu cầu kiểm soát nứt và độ bền cao, trong đó có BTXM mặt đường.

4. Khả năng ứng dụng IC cho BTXM mặt đường

BTXM mặt đường là loại kết cấu đặc biệt nhạy cảm với các biến dạng ở tuổi sớm do có diện tích bề mặt lớn và chịu tác động trực tiếp của môi trường. Trong điều kiện thực tế, việc duy trì bảo dưỡng ngoài liên tục thường gặp khó khăn, đặc biệt với các tuyến đường dài hoặc trong điều kiện thiếu nước. Do đó, IC được xem là một giải pháp bổ sung hiệu quả nhằm duy trì độ ẩm nội tại và kiểm soát nứt sớm cho BTXM mặt đường [25], [61], [62]. Các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy IC có khả năng cải thiện đáng kể trạng thái ẩm bên trong bê tông, từ đó làm giảm co ngót và hạn chế nứt ở giai đoạn đầu. Nghiên cứu của Yang và cộng sự [63] cho thấy việc sử dụng SAP với hàm lượng khoảng 0,145 % giúp duy trì độ ẩm nội tại tốt hơn và giảm rõ rệt co ngót. Cơ chế này phù hợp với đặc tính của SAP là hấp thụ nước trong quá trình trộn và giải phóng dần khi độ ẩm trong bê tông giảm, qua đó hạn chế hiện tượng tự khô.

Bên cạnh SAP, LWA bão hòa trước là một trong những vật liệu IC có tính khả thi cao trong ứng dụng mặt đường. Kết quả trong Hình 9 cho thấy cốt liệu đất sét nung có khả năng hấp thụ nước đáng kể và đóng vai trò như nguồn nước nội tại. Khi thay thế khoảng 25 % cát bằng loại cốt liệu này, bê tông IC cho thấy cải thiện về tính công tác, giảm co ngót và tăng cường độ chịu nén ở các cấp phối khác nhau, như trình bày trong Bảng 6. Điều này cho thấy LWA không chỉ cung cấp

nước nội tại mà còn có thể tích hợp trực tiếp vào cấp phối mà không cần bổ sung vật liệu riêng biệt.

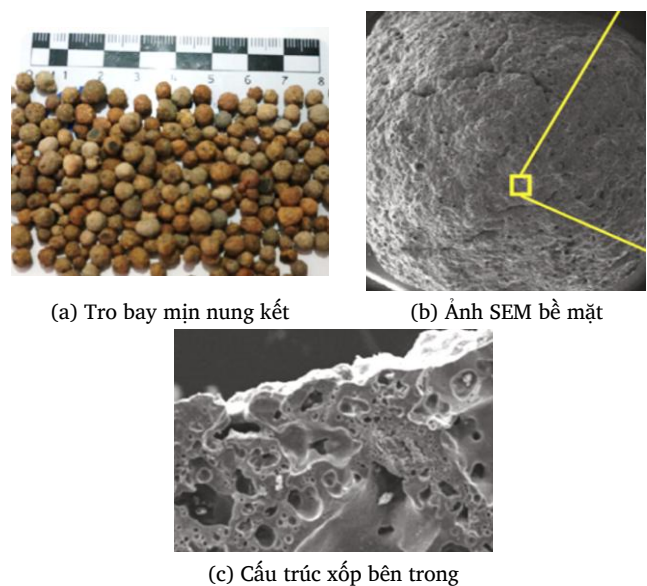


Hình 9. Đất sét đỏ được sử dụng là vật liệu IC trong BTXM mặt đường [61].

Bảng 6. Hiệu quả cường độ chịu nén và độ sụt của bê tông IC [61].

Cấp bê tông	Loại bê tông	Cường độ chịu nén (MPa)		
		7 ngày	14 ngày	28 ngày
25	Bảo dưỡng thường	22,56	26,70	27,88
	IC	19,97	22,91	28,18
30	Bảo dưỡng thường	23,26	29,89	34,52
	IC	22,08	26,44	36,22
35	Bảo dưỡng thường	29,78	35,96	36,43
	IC	28,39	33,80	38,37

Một hướng khác là sử dụng vật liệu xốp nhân tạo từ tro bay hoặc xỉ, như minh họa trong Hình 10. Các vật liệu này có thể duy trì độ ẩm nội tại ở mức rất cao (trên 96 %), gần như loại bỏ co ngót tự sinh trong giai đoạn đầu và hỗ trợ quá trình thủy hóa. Đây là ưu điểm quan trọng đối với BTXM mặt đường, nơi co ngót tự sinh là nguyên nhân chính gây nứt sớm.



Hình 10. Tro bay mịn làm vật liệu IC trong BTXM mặt đường [64].

Ở quy mô ứng dụng thực tế, IC đã được triển khai trong một số dự án đường cao tốc tại khu vực Dallas–Fort Worth (Hoa Kỳ), như thể hiện ở Hình 11(a). Trong các dự án này, khoảng 30 % cát được thay thế bằng LWA bão hòa nước. Sau 7–8 năm khai thác, kết quả cho thấy chi phí bảo trì giảm 6–24 %, chi phí vòng đời giảm 1–8 %, đồng thời có thể giảm chiều dày tấm hoặc kéo dài tuổi thọ khai thác từ 10–15 năm [65]. Những kết quả này cho thấy IC không chỉ có ý nghĩa ở cấp độ vật liệu mà còn có thể chuyển hóa thành lợi ích thiết kế và khai thác ở quy mô công trình, thông qua giảm nhu cầu bảo trì, kéo dài tuổi thọ và tạo khả năng tối ưu chiều dày tấm mặt đường.



(a) BTXM mặt đường IC ở làn đường giữa và ngoài cùng trên (ảnh trên) và hình ảnh lõi bê tông có sử dụng LWA làm IC (phần tối) [65]



(b) Thi công sử dụng vật liệu xi nơ làm vật liệu IC mặt đường BTXM tại Ấn Độ [26]

Hình 11. Một số ứng dụng thực tế của vật liệu IC trong thi công mặt đường BTXM.

Từ góc độ kỹ thuật, lợi ích lớn nhất của IC đối với BTXM mặt đường là khả năng giảm co ngót và hạn chế nứt sớm. Khi các vi nứt được kiểm soát ngay từ đầu, khả năng xâm nhập của nước và các tác nhân xâm thực vào kết cấu cũng giảm, từ đó cải thiện độ bền lâu. Điều này đặc biệt quan trọng trong điều kiện khí hậu nóng ẩm hoặc có dao động nhiệt độ lớn, nơi bê tông dễ bị mất nước nhanh và phát sinh ứng suất kéo ở tuổi sớm. Ngoài ra, IC còn giúp giảm phụ thuộc vào bảo dưỡng ngoài trong điều kiện thi công khó khăn. Tuy nhiên, IC không nên được xem là giải pháp thay thế hoàn toàn, mà phù hợp hơn khi kết hợp với các phương pháp bảo dưỡng truyền thống để nâng cao hiệu quả tổng thể [25], [61], [62].

Mặc dù có nhiều ưu điểm, việc ứng dụng IC trong BTXM mặt

đường vẫn cần được tối ưu hóa. Các yếu tố như loại vật liệu, khả năng hút–nhả nước, trạng thái bão hòa và hàm lượng sử dụng cần được kiểm soát chặt chẽ để tránh làm tăng độ rỗng hoặc ảnh hưởng đến tính công tác và cường độ. Đồng thời, cần đánh giá IC trong mối quan hệ với các yêu cầu khác của bê tông mặt đường như cường độ chịu uốn, độ bền mài mòn và độ bền lâu trong điều kiện thực tế. Nhìn chung, IC là một hướng kỹ thuật có tiềm năng đối với BTXM mặt đường, đặc biệt trong kiểm soát co ngót và nứt sớm. Các kết quả thực nghiệm và thực địa cho thấy IC có thể nâng cao chất lượng và kéo dài tuổi thọ khai thác của công trình. Tuy nhiên, để triển khai rộng rãi, cần có thêm các nghiên cứu hệ thống nhằm tối ưu hóa vật liệu và cấp phối phù hợp với điều kiện cụ thể. Đối với Việt Nam, hướng nghiên cứu này đặc biệt phù hợp với các công trình mặt đường thi công ngoài trời, chịu nắng nóng kéo dài và khó duy trì chế độ bảo dưỡng bề mặt đồng đều trên toàn tuyến.

5. Kết luận

Bài báo đã tổng hợp một cách hệ thống các nghiên cứu về IC cho BTXM, từ cơ chế, vật liệu đến ảnh hưởng đối với các tính chất và khả năng ứng dụng trong mặt đường BTXM. Trên cơ sở phân tích các kết quả đã công bố, có thể rút ra một số nhận định chính như sau:

(i) IC là một cơ chế điều hòa ẩm nội tại hiệu quả, trong đó nước được cung cấp từ bên trong vật liệu nhằm duy trì quá trình thủy hóa và hạn chế hiện tượng tự khô. So với bảo dưỡng ngoài, IC có khả năng tác động trực tiếp đến vùng hồ xi măng, đặc biệt trong các hệ bê tông có tỷ lệ nước/chất kết dính thấp, nơi sự suy giảm độ ẩm nội tại diễn ra nhanh và dễ gây co ngót sớm.

(ii) Các vật liệu IC có thể được phân thành hai nhóm chính theo cơ chế làm việc: nhóm polymer hấp thụ nước (điển hình là SAP) và nhóm vật liệu xốp (như LWA, vật liệu xốp mịn và vật liệu nguồn gốc cellulose). Mỗi nhóm có đặc điểm hút–nhả nước khác nhau, dẫn đến hiệu quả IC khác nhau. Trong đó, SAP có khả năng hấp thụ nước lớn và điều chỉnh linh hoạt nhưng có nguy cơ tạo lỗ rỗng sau khi nhả nước; LWA có cơ chế cung cấp nước ổn định hơn và phù hợp với ứng dụng thực tế; trong khi vật liệu cellulose nổi lên như một hướng tiềm năng nhờ khả năng kết hợp giữa bảo dưỡng nội tại và kiểm soát vi nứt, đồng thời phù hợp với định hướng vật liệu bền vững.

(iii) IC có tác động rõ rệt đến các tính chất của BTXM, trong đó hiệu quả nhất là giảm co ngót và hạn chế nứt ở tuổi sớm thông qua việc duy trì độ ẩm và giảm áp lực mao dẫn. Ngược lại, ảnh hưởng đến cường độ chịu nén và chịu uốn không mang tính đồng nhất mà phụ thuộc vào loại vật liệu, hàm lượng và cách thiết kế cấp phối, phản ánh sự cạnh tranh giữa hiệu ứng tăng thủy hóa và sự gia tăng độ rỗng do vật liệu IC gây ra.

(iv) Đối với BTXM mặt đường, IC cho thấy tiềm năng ứng dụng rõ rệt trong việc kiểm soát nứt sớm, cải thiện độ bền lâu và nâng cao hiệu quả khai thác. Các kết quả thực nghiệm và ứng dụng thực tế cho thấy IC có thể giảm chi phí bảo trì và kéo dài tuổi thọ công trình, đặc biệt trong điều kiện khó duy trì bảo dưỡng ngoài liên tục.

Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện nay vẫn còn một số hạn chế. Cơ

chế hút-nhả nước của vật liệu IC chưa được định lượng đầy đủ theo điều kiện thực tế của bê tông; mối quan hệ giữa đặc trưng vật liệu IC và hiệu quả ở cấp phối chưa được thiết lập một cách hệ thống; và các nghiên cứu ứng dụng quy mô lớn, đặc biệt trong điều kiện khí hậu nhiệt đới, còn hạn chế. Do đó, các hướng nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào (1) định lượng hóa cơ chế cung cấp nước nội tại của từng loại vật liệu IC; (2) tối ưu hóa cấp phối kết hợp giữa hiệu quả IC và tính chất cơ học; và (3) đánh giá dài hạn trong điều kiện khai thác thực tế. Trong đó, phát triển các vật liệu IC từ nguồn tự nhiên hoặc phụ phẩm nông-công nghiệp là hướng nghiên cứu đáng ưu tiên, vì vừa đáp ứng yêu cầu kỹ thuật, vừa phù hợp với xu hướng phát triển vật liệu bền vững.

Tài liệu tham khảo

- [1]. H. N. Khoa và N. H. Cường, “Lựa chọn phương pháp bảo dưỡng bê tông hiệu quả trong điều kiện khí hậu nóng ẩm,” *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, số 9, tr. 33–39, 2011.
- [2]. C. Jabonero, S. W. Ryu, J. Y. Park, Y. H. Cho and I. T. Kim, “The analyses of environmental factors for curing concrete pavements inside tunnels,” *KSCCE Journal of Civil Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 766–773, 2017.
- [3]. N. Hamzah, H. M. Saman, M. Baghban, A. M. Sam, I. Faridmehr, M. M. Sidek, O. Benjeddou and G. Huseien, “A review on the use of self-curing agents and its mechanism in high-performance cementitious materials,” *Buildings*, vol. 12, p. 152, 2022.
- [4]. L. H. Hà, H. N. Khoa, L. V. Thực, V. C. Công và N. N. Thoan, “Bảo dưỡng kết cấu bê tông khối lớn thi công theo phương pháp đổ bê tông liên tục với cấp phối tỏa nhiệt khác nhau,” *Tạp chí Kết cấu & Công nghệ Xây dựng*, số 31, tr. 26–33, 2022.
- [5]. N. T. M. Thịnh, “Bàn về bảo dưỡng bê tông tự lên trong xây dựng ở Việt Nam 2021,” *Tạp chí Công Thương*, số 7, tr. 135–140, 2021.
- [6]. TCVN 8828:2011, Bê tông – Yêu cầu bảo dưỡng.
- [7]. TCVN 4453:2025, Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép toàn khối – Thi công và nghiệm thu.
- [8]. J. Armaghani and D. G. Zollinger, *Curing practices for concrete pavements: A synthesis of highway practice*. Washington, DC: Transportation Research Board, 2023.
- [9]. ACI 308R-16, Guide to external curing of concrete.
- [10]. ACI 308.1-23, External curing of cast-in-place concrete – specification.
- [11]. ACI PRC-308.2-13(22), Report on internally cured concrete using prewetted.
- [12]. S. S. Adlinge and A. K. Gupta, “Pavement deterioration and its causes,” *International Journal of Innovative Research & Development*, pp. 09–15, 2013.
- [13]. N. Q. Vui, “Đánh giá tình trạng hư hỏng mặt đường BTXM nông thôn và đề xuất biện pháp khắc phục trên địa bàn huyện Thăng Bình, tỉnh Quảng Nam,” Luận văn Thạc sĩ kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, 2016.
- [14]. T. V. Tự và N. M. Thiện, “Đánh giá tình trạng hư hỏng mặt đường bê tông xi măng bằng phương pháp PCI,” *Tạp chí Khoa học – Công nghệ*, số 10, tr. 53–57, 2018.
- [15]. H. V. Quân, P. T. Uyết, và T. T. P. Huyền, “Nghiên cứu nguyên nhân hư hỏng, đề xuất giải pháp sửa chữa mặt đường bê tông xi măng trên Quốc lộ 1A – đoạn qua thành phố Quảng Ngãi (km 1052–km 1060),” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, số 12, tr. 37–41, 2019.
- [16]. N. H. Đường, P. Đ. H. Hoàng và N. T. Sang, “Nghiên cứu thực nghiệm vật liệu composite gốc xi măng để sửa chữa mặt đường bê tông xi măng và sân bay,” *Tạp chí Cầu đường Việt Nam*, số 8, tr. 43–47, 2021.
- [17]. T. N. Long, P. Đ. Quốc, P. X. Thục, P. V. Phúc và T. V. Bé, “Đánh giá thực nghiệm biến dạng co ngót bê tông trong điều kiện khí hậu nhiệt đới,” *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, số 3, tr. 27–34, 2023.
- [18]. N. B. Thạch và T. H. Chính, “Nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của tỷ lệ nước/ xi măng đến biến dạng co ngót của bê tông trong điều kiện khí hậu Gia Lai,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, số 11(132), tr. 79–82, 2018.
- [19]. P. N. Phương, N. T. Cường, Đ. N. H. Đắc, N. V. P. Hào và L. Đ. Châu, “Cường độ, khả năng kháng nứt do co ngót dẻo và tính thấm nước của bê tông xi măng mặt đường sử dụng cốt liệu xi thép và cao su,” *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, số 17(2V), tr. 154–166, 2023.
- [20]. J. Liu, C. Shi, X. Ma, K. H. Khayat, J. Zhang and D. Wang, “An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials,” *Construction and Building Materials*, vol. 146, pp. 702–712, 2017.
- [21]. H. D. Khánh và N. S. Nguyên, “Quan điểm của các bên liên quan về vết nứt bề mặt đường bê tông xi măng ở các dự án giao thông nông thôn,” *Tạp chí Xây dựng*, số 5, tr. 74–79, 2024.
- [22]. Z. Qu, Y. Zhang, Z. Liu, R. Si and J. Wu, “A review on early-age cracking of concrete: Causes and control,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 21, p. e03848, 2024.
- [23]. Portland Cement Association, “Concrete slab surface defects: Causes, prevention, repair,” *Skokie, IL, USA: PCA*, pp. 1–14, 2001.
- [24]. S. Kawashima and S. P. Shah, “Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced cementitious materials,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, no. 2, pp. 201–208, 2011.
- [25]. D. P. Bentz and W. J. Weiss, “Internal curing: A 2010 state-of-the-art review,” *National Institute of Standards and Technology, NIST IR 7765*, 2011.
- [26]. J. Weiss, “Internal curing for concrete pavements,” *Tech Brief, FHWA-HIF-16-006*, pp. 1–7, 2016.
- [27]. Y. Guo, X. He, S. Peeta and W. J. Weiss, “Internal curing for concrete bridge decks: Integration of a social cost analysis in evaluation of long-term benefit,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2577, no. 1, pp. 25–34, 2016.
- [28]. S. Zhutovsky and K. Kovler, “Influence of water to cement ratio on the efficiency of internal curing of high-performance concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 144, pp. 311–316, 2017.
- [29]. M. E. Hawary and A. A. Sulily, “Internal curing of recycled aggregates concrete,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 275, p. 122911, 2020.
- [30]. L. Yang, C. Shi, J. Liu and Z. Wu, “Factors affecting the effectiveness of internal curing: A review,” *Construction and Building Materials*, vol. 267, p. 121017, 2021.
- [31]. D. Cusson and T. Hoogeven, “Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking,” *Cement and Concrete Research*, vol. 38, no. 6, pp. 757–765, 2008.
- [32]. L. T. Bình và N. D. Hiếu, “Hiệu quả nội bảo dưỡng vữa xi măng cường độ cao,” *Tạp chí Khoa học Kiến trúc – Xây dựng*, số 45, tr. 90–98, 2022.
- [33]. P. Chen, W. Tan, J. X. Lu, Y. Sun and C. S. Poon, “Enhancing the performance of lightweight high-performance concrete through an alternative pre-wetting method for lightweight aggregates using simulated cement pore solution,” *Construction and Building Materials*, vol. 409, p. 134024, 2023.
- [34]. T. V. An, N. H. Anh và B. L. A. Tuan, “Influence of internal curing on compressive strength and drying shrinkage of super-sulfated cement mortar,” *CTU Journal of Innovation and Sustainable Development*, số 15(1), tr. 41–48, 2023.
- [35]. F. Xu, X. Lin and A. Zhou, “Performance of internal curing materials in high-performance concrete: A review,” *Construction and Building Materials*, vol. 311, p. 125250, 2021.

- [36]. K. Venkateswarlu, S. V. Deo and M. Murmu, "Overview of effects of internal curing agents on low water to binder concretes," *Materials Today: Proceedings*, vol. 32, pp. 752–759, 2020.
- [37]. O. M. Jensen and P. Lura, "Techniques and materials for internal water curing of concrete," *Materials and Structures*, vol. 39, no. 9, tr. 817–825, 2006.
- [38]. C. Schröfl, D. Snoeck and V. Mechtcherine, "A review of characterisation methods for superabsorbent polymer (SAP) samples to be used in cement-based construction materials: Report of the RILEM TC 260–RSC," *Materials and Structures*, vol. 50, no. 4, p. 197, 2017.
- [39]. Y. Li, C. Zhang, Y. Xiang, Y. Chen, T. Li, H. Cui and G. Sun, "Microstructure tailoring of internal curing agents: modified cement particles / superabsorbent polymers composites balancing strength and shrinkage mitigation," *Cement and Concrete Research*, vol. 197, p. 107950, 2025.
- [40]. Z. Lyu, Y. Guo, Z. Chen, A. Shen, X. Qin, J. Yang, M. Zhao and Z. Wang "Research on shrinkage development and fracture properties of internal curing pavement concrete based on humidity compensation," *Construction and Building Materials*, vol. 203, pp. 417–431, 2019.
- [41]. X. Ma, J. Liu and C. Shi, "A review on the use of LWA as an internal curing agent of high performance cement-based materials," *Construction and Building Materials*, vol. 218, pp. 385–393, 2019.
- [42]. J. Castro, L. Keiser, M. Goliass and J. Weiss, "Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures," *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, no. 10, pp. 1001–1008, 2011.
- [43]. K. Liu, R. Yu, Z. Shui, X. Li, X. Ling, W. He, S. Yi and S. Wu, "Effects of pumice-based porous material on hydration characteristics and persistent shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC)," *Materials*, vol. 12, no. 1, p. 11, 2018.
- [44]. A. T. Abdulrasool, L. Sh. Rasheed, L. M. Ridha Mahmmud, S. S. Mohammed and N. R. Kadhim, "Effect of partial replacement of fine aggregate by internal curing materials on mechanical properties of concrete," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 961, no. 1, p. 012042, 2022.
- [45]. P. Lura, M. Wyrzykowski, C. Tang and E. Lehmann, "Internal curing with lightweight aggregate produced from biomass-derived waste," *Cement and Concrete Research*, vol. 59, pp. 24–33, 2014.
- [46]. F. Xu, X. Lin and A. Zhou, "Effect of recycled ceramic aggregate on hydration heat and permeability of high performance concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 137, p. 104930, 2023.
- [47]. F. Liu, J. Wang, X. Qian and J. Hollingsworth, "Internal curing of high performance concrete using cenospheres," *Cement and Concrete Research*, vol. 95, pp. 39–46, 2017.
- [48]. P. Jongvisuttisun, J. Leisen and K. E. Kurtis, "Key mechanisms controlling internal curing performance of natural fibers," *Cement and Concrete Research*, vol. 107, pp. 206–220, 2018.
- [49]. P. Jongvisuttisun and K. E. Kurtis, "The role of hardwood pulp fibers in mitigation of early-age cracking," *Cement and Concrete Composites*, vol. 57, pp. 84–93, 2015.
- [50]. S. Gwon, Y. C. Choi and M. Shin, "Internal curing of cement composites using kenaf cellulose microfibers," *Journal of Building Engineering*, vol. 47, p. 103867, 2022.
- [51]. A. Sabziparvar, D. Taleponga and M. R. Foruzanmehr, "Enhancing hydration and internal curing in cementitious mixes: The impact of pre-treated milkweed fibres," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, p. e03079, 2024.
- [52]. G. W. Lee and Y. C. Choi, "Effect of abaca natural fiber on the setting behavior and autogenous shrinkage of cement composite," *Journal of Building Engineering*, vol. 56, p. 104719, 2022.
- [53]. C. Tang, R. Dong, Z. Tang, G. Long, G. Ma, H. Wang and Y. Huang, "Effect of SAP on the properties and microstructure of cement-based materials in the low humidity environment," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, p. e03001, 2024.
- [54]. W. Meng and K. Khayat, "Effects of saturated lightweight sand content on key characteristics of ultra-high-performance concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 101, pp. 46–54, 2017.
- [55]. R. Henkensiefken, P. Briatka, D. P. Bentz, T. Nantung and J. Weiss, "Plastic shrinkage cracking in internally cured mixtures," *Concrete international*, pp. 49–54, 2010.
- [56]. M. Goliass, J. Castro and J. Weiss, "The influence of the initial moisture content of lightweight aggregate on internal curing," *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 52–62, 2012.
- [57]. S. Zhutovsky and K. Kovler, "Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 42, no. 1, pp. 20–26, 2012.
- [58]. Federal Highway Administration (FHWA), "Internally cured concrete (ICC)," *TechBrief Coordinated Technology Implementation Program*, 2020.
- [59]. ACI 213.2-24, Internal curing using prewetted fine lightweight aggregate – Technote.
- [60]. M. Suzuki, M. Seddik Meddah and R. Sato, "Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 39, no. 5, pp. 373–381, 2009.
- [61]. M. M. H. W. Bandara and W. K. Mamparachchi, "Mitigate the curing problems of concrete pavements by using heated non-expansive clay particles as internal curing agent," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 22, no. 4, pp. 969–982, 2021.
- [62]. A. M. Yasien, M. T. Bassuoni and A. Ghazy, "Phase change material nanocomposites as an internal curing aid for nano-modified concrete under cold weather," *Construction and Building Materials*, vol. 411, p. 134490, 2024.
- [63]. J. Yang, Y. Guo, A. Shen, Z. Chen, X. Qin and M. Zhao, "Research on drying shrinkage deformation and cracking risk of pavement concrete internally cured by SAPs," *Construction and Building Materials*, vol. 227, p. 116705, 2019.
- [64]. Y. Wei, Y. Wang and X. Gao, "Effect of internal curing on moisture gradient distribution and deformation of a concrete pavement slab containing pre-wetted lightweight fine aggregates," *Drying Technology*, vol. 33, no. 3, pp. 355–364, 2015.
- [65]. C. Rao, M. I. Darter and J. Ries, "Evaluation of internally cured concrete for paving applications," *Proceedings – 11th International Conference on Concrete Pavements, San Antonio, Texas*, pp. 1065–1086, 2016.