

SELF-HEALING CEMENT MORTAR BASED ON UREA-FORMALDEHYDE/EPOXY CAPSULES

Vo Trung Kien, Huynh Dang Huynh, Ho Viet Thang*

University of Science and Technology - The University of Danang

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 21/7/2025 Revised: 26/11/2025 Published: 26/11/2025	The formation and development of cracks due to environmental impacts is one of the main causes of reduced durability and longevity of building constructions using cement materials. Present crack healing methods are often expensive and complicated. Therefore, the development of cement materials with self-healing ability is a promising research direction. This study presents the fabrication process and evaluation of the effectiveness of self-healing capsules for cement materials. The capsules were successfully synthesized by the polymerization method with a shell/core structure consisting of urea-formaldehyde resin/epoxy resin. The size of the obtained capsules ranges from 0.1 to 2 μm. The crack healing efficiency was investigated by adding capsules to the cement mixture at a content of 1% - 4% compared to the cement mass. The results showed that the cement sample containing 1% capsules showed the highest recovery efficiency in mechanical strength and healing within 14 days. These results confirm the potential application of epoxy capsules in the production of self-healing cement, contributing to improving the longevity and sustainability of building constructions.
KEYWORDS Self-healing cement Capsule Urea-formaldehyde Epoxy Self-healing	

VỮA XI MĂNG TỰ PHỤC HỒI TRÊN CỎ SỞ VIÊN NANG UREA-FORMALDEHYDE/EPOXY

Võ Trung Kiên, Huỳnh Đăng Huỳnh, Hồ Việt Thắng*

Trường Đại học Bách khoa - ĐH Đà Nẵng

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 21/7/2025 Ngày hoàn thiện: 26/11/2025 Ngày đăng: 26/11/2025	Sự hình thành và phát triển của các vết nứt do tác động từ môi trường là một trong những nguyên nhân chính làm giảm độ bền và tuổi thọ của các công trình xây dựng sử dụng vật liệu xi măng. Các phương pháp hàn gắn vết nứt hiện nay thường tốn kém và phức tạp. Do đó, việc phát triển vật liệu xi măng có khả năng tự lành đang là một hướng nghiên cứu đầy hứa hẹn. Nghiên cứu này trình bày quá trình chế tạo và đánh giá hiệu quả của viên nang tự lành cho vật liệu xi măng. Các viên nang được tổng hợp thành công bằng phương pháp polyme hóa với cấu trúc vỏ/lõi gồm nhựa urea-formaldehyde/nhựa epoxy. Các viên nang thu được có kích thước từ 0,1 đến 2 μm. Hiệu quả chữa lành vết nứt được khảo sát bằng cách thêm viên nang vào hỗn hợp xi măng với hàm lượng từ 1% - 4% so với khối lượng xi măng. Kết quả cho thấy mẫu xi măng chứa 1% viên nang thể hiện hiệu quả phục hồi cao nhất về cường độ cơ học và chữa lành trong 14 ngày. Những kết quả này khẳng định tiềm năng ứng dụng của viên nang chứa epoxy trong việc chế tạo xi măng có khả năng tự lành, góp phần nâng cao tuổi thọ và tính bền vững cho các công trình xây dựng.
TỪ KHÓA Xi măng Viên nang Urea-formaldehyde Epoxy Tự lành	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13270>

* Corresponding author. Email: hvthang@dut.udn.vn

1. Giới thiệu

Xi măng là vật liệu xây dựng được sử dụng rộng rãi và phổ biến hiện nay trong các công trình xây dựng từ dân dụng đến các cơ sở hạ tầng lớn như đường cao tốc, tòa nhà chọc trời, sân bay... Mặc dù các công trình xây dựng này sử dụng các chủng loại xi măng có chất lượng tốt, chúng thường hay bị nứt dưới tác động của tải trọng, hoặc do môi trường bên ngoài gây ra. Sự hình thành và phát triển của các vết nứt không chỉ ảnh hưởng đến tính thẩm mỹ của công trình xây dựng mà còn làm giảm độ bền, tuổi thọ của kết cấu bê tông xi măng, thậm chí có thể dẫn đến những sự cố nghiêm trọng nếu không được xử lý kịp thời.

Việc bảo trì và sửa chữa các vết nứt của các công trình xây dựng xi măng là một công việc tốn kém, phức tạp và đôi khi gây khó khăn cho việc sử dụng công trình. Hiện nay, phương pháp sửa chữa các vết nứt thường áp dụng là dùng vữa xi măng để trám kín các vết nứt. Tuy nhiên phương pháp này chỉ áp dụng cho các vết nứt lớn, không thể dùng cho các vết nứt nhỏ. Các vết nứt nhỏ hay vết nứt tế vi nếu không khắc phục kịp thời thì sẽ hình thành nên các vết nứt lớn và gây nguy hại đến công trình. Tuy nhiên, việc sửa chữa các vết nứt tế vi hiện nay vẫn là một vấn đề khó khăn và tốn kém. Do đó, từ vài thập kỉ qua, các nhà khoa học đã và đang nghiên cứu và phát triển các loại vật liệu xây dựng có khả năng tự phục hồi, đặc biệt là xi măng tự phục hồi có khả năng làm lành lại các vết nứt tế vi [1].

Sự tự phục hồi của các vật liệu xi măng là khả năng vật liệu đó tự sửa chữa và tự hàn gắn khi công trình xuất hiện các vết nứt tế vi. Từ đó, giúp kéo dài tuổi thọ của công trình, giảm chi phí bảo trì và sửa chữa, đồng thời nâng cao tính an toàn và độ bền vững của công trình [2].

Nhiều phương pháp tự lành xi măng, bê tông đã được nghiên cứu như sử dụng vi khuẩn, vi sinh vật tự sinh [3]. Tuy nhiên các phương pháp này có nhược điểm là cần chất dinh dưỡng để nuôi vi sinh vật cũng như môi trường tồn tại cho chúng cũng rất hạn chế khi pha trộn trong vữa xi măng. Khác với phương pháp từ vi sinh vật, phương pháp chế tạo xi măng tự lành bằng phương pháp hóa học được xem là có tiềm năng [4], [5]. Trong số các phương pháp tự lành bê tông, việc sử dụng viên nang tổng hợp từ nhựa urea-formaldehyde và nhựa epoxy đang được quan tâm nghiên cứu bởi những ưu điểm vượt trội của chúng. Nhựa epoxy có khả năng thâm sâu vào các vết nứt nhỏ, đóng rắn nhanh chóng và tạo thành lớp màng bảo vệ, ngăn chặn sự xâm nhập của các tác nhân gây hại [6], [7]. Ngoài ra, nhựa epoxy có độ bền cơ học cao, khả năng kết dính tốt và chống ăn mòn hiệu quả, giúp phục hồi khả năng chịu lực của bê tông.

Do đó, chúng tôi nghiên cứu tổng hợp các viên nang tự lành vết nứt tế vi trong vật liệu xi măng dựa trên nhựa urea-formaldehyde và nhựa epoxy. Kết quả cho thấy viên nang này có khả năng tự liền vết nứt và phục hồi cường độ xi măng khi xuất hiện vết nứt. Kết quả này cho thấy đây là hướng đi có nhiều tiềm năng ứng dụng cho các công trình bê tông xi măng nhằm tiết kiệm và đảm bảo độ bền và tuổi thọ của các công trình xây dựng.

2. Nguyên liệu và thực nghiệm

2.1. Xi măng

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng xi măng PCB40 Thịnh Thành (Hình 1) với các chỉ tiêu kỹ thuật của xi măng đáp ứng được các tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 6062:2020.



Hình 1. Xi măng PCB40 Thịnh Thành



Hình 2. Cát tiêu chuẩn ISO

2.2. Cát

Cát được sử dụng trong nghiên cứu này là cát tiêu chuẩn ISO (Hình 2) theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 6227:1996.

2.3. Urea, formaldehyde, epoxy

Các hóa chất và nguyên liệu chính dùng để tổng hợp viên nang urea-formaldehyde/epoxy bao gồm chất để tạo vỏ viên nang là urea tinh khiết ($> 99\%$) (Hình 3) và formaldehyde ($\geq 37\%$) (Hình 4). Các hóa chất này có xuất xứ từ Trung Quốc. Lỗi là chất để tự liền vết nứt là epoxy RB-02 loại A xuất xứ Việt Nam (Hình 5).



Hình 3. Urea



Hình 4. Formaldehyde



Hình 5. Epoxy

2.4. Quy trình chế tạo viên nang urea-formaldehyde/epoxy

Quá trình chế tạo viên nang nhựa urea-formaldehyde/epoxy được thực hiện như sau [8]. Urea và dung dịch formaldehyde 37 wt% được trộn theo tỷ lệ mol 2:3. Sau khi hòa tan hoàn toàn urea, triethanolamine được thêm dần để điều chỉnh pH đến 8–9. Sau đó, hỗn hợp được khuấy ở 70 °C trong 40 phút và làm nguội đến nhiệt độ phòng. Dung dịch natri dodecylbenzene sulfonat 0,5% được pha chế bằng nước cất và điều chỉnh pH đến 7. Dung dịch này được trộn với nhựa epoxy RB - 02 khuấy ở 50 °C trong 1 giờ để tạo thành nhũ tương đồng nhất. Điều chỉnh pH của hỗn hợp dung dịch trên đến 2 – 4 bằng axit sunfuric loãng trong 2 giờ, duy trì nhiệt độ 50 °C. Khi quá trình đồng trùng hợp diễn ra, nhựa urea-formaldehyde kết tủa và lắng đọng trên các giọt nhũ tương, hình thành và làm dày thành viên nang. Hỗn hợp này được duy trì ở 50 °C và khuấy trong 1,5 giờ. Nước khử ion được thêm dần dần để kiểm soát độ nhớt. Các viên nang urea-formaldehyde/epoxy lắng đọng sau đó được lọc, sấy khô và rây để thu được các viên nang như thể hiện ở Hình 6.



Hình 6. Các viên nang sau khi sấy khô



Hình 7. Chất đóng rắn Dicyandiamide

2.5. Chất đóng rắn

Trong nghiên cứu này chúng tôi sử dụng chất đóng rắn Dicyandiamide 99,5% có xuất xứ từ Trung Quốc (Hình 7). Đây là chất kết hợp với epoxy từ viên nang để hàn gắn các vết nứt trong vữa xi măng.

2.6. Đo cấu trúc hình thái viên nang nhựa urea-formaldehyde/epoxy

Cấu trúc hình thái của viên nang nhựa urea-formaldehyde được quan sát dưới kính hiển vi điện tử quét (SEM, JSM – IT800SHL, JEOL, Nhật Bản) với các độ phóng đại khác nhau.

2.7. Đo cấu trúc hóa học viên nang nhựa urea-formaldehyde/epoxy

Để xác định các nhóm chức có trong liên kết đặc trưng của nhựa urea-formaldehyde/epoxy của viên nang, chúng tôi sử dụng máy quang phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR), JASCO, Nhật Bản.

2.8. Chuẩn bị mẫu vữa xi măng

Hỗn hợp xi măng được trộn theo tỷ lệ khối lượng nước:xi măng:cát = 1:2:6 và thực hiện quy trình chuẩn bị theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 6016:2011. Các viên nang nhựa urea-formaldehyde/epoxy được thêm vào hỗn hợp xi măng theo phần trăm khối lượng từ 1 – 4% tính theo khối lượng xi măng, với chất đóng rắn chiếm 50% khối lượng của các viên nang trong cùng một mẻ trộn. Ký hiệu mẫu và thành phần cấp phối của các mẫu vữa xi măng tự lành như thể hiện trong Bảng 1. Hỗn hợp xi măng sau khi được trộn đồng nhất thì được đúc trên khuôn chuẩn có kích thước 40 mm × 40 mm × 160 mm và được dưỡng hộ 24 giờ trong khuôn. Sau đó các mẫu được tháo khuôn và ngâm ngập trong bể nước.

Bảng 1. Ký hiệu mẫu và cấp phối của các mẫu vữa xi măng

Ký hiệu mẫu	Xi măng (g)	Cát (g)	Nước (ml)	Viên nang (g)	Chất đóng rắn (g)
M ₀	450	1350	225	0,00	0,00
M ₁	450	1350	225	4,50	2,25
M ₂	450	1350	225	9,00	4,50
M ₃	450	1350	225	13,50	6,75
M ₄	450	1350	225	18,00	9,00

2.9. Đo cường độ uốn và nén của mẫu vữa xi măng

Các mẫu vữa xi măng sau khi được dưỡng hộ theo 3, 14 và 28 ngày tuổi được mang ra đo cường độ uốn và nén trên máy nén uốn mẫu vữa xi măng 300 kN, Luna, Trung Quốc và thực hiện theo quy trình của tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 6016-2011.

2.10. Đo độ hút nước

Độ hút nước của các mẫu vữa xi măng là khả năng hút và giữ nước ở điều kiện thường, được tính bằng tỷ số giữa khối lượng nước hút vào so với khối lượng mẫu khô.

Mẫu sau khi sấy khô tới khối lượng không đổi, đem đi cân xác định khối lượng (m_0). Tiếp theo đun mẫu trong nước sôi khoảng 3 giờ để bão hòa nước, đem mẫu ra để nguội, lau sạch bề mặt rồi đem đi cân xác định khối lượng (m_1).

Độ hút nước (H%) của mẫu được xác định theo công thức (1):

$$H = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Trong đó: m_0 là khối lượng mẫu sau khi sấy khô (g); m_1 là khối lượng mẫu sau khi ngâm nước đạt trạng thái bão hòa (g).

2.11. Đo hiệu quả phục hồi

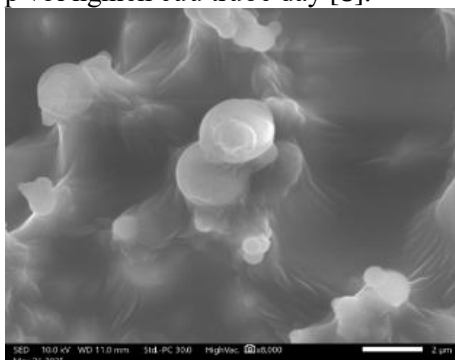
Để đánh giá khả năng tự lành của các viên nang đến quá trình tự lành vết nứt bên trong và khả năng phục hồi tính chất cơ học của các mẫu vữa xi măng, chúng tôi tạo vết nứt tế vi ban đầu cho các mẫu vữa bằng cách nén mẫu với 70% lực nén tối đa phá hủy mẫu. Cường độ nén ban đầu (F_0), cường độ sau khi phục hồi ở 14 ngày (F_{14}) và 28 ngày (F_{28}) đã được đánh giá và ghi lại bằng MPa. Hiệu quả của quá trình phục hồi ở 14 ngày (n_{14}) và 28 ngày (n_{28}) được xác định bằng tỷ lệ phục hồi [8] và được tính theo các công thức (2) và (3):

$$n_{14} = \frac{F_{14}}{F_0} \times 100 (\%) \quad (2) \quad n_{28} = \frac{F_{28}}{F_0} \times 100 (\%) \quad (3)$$

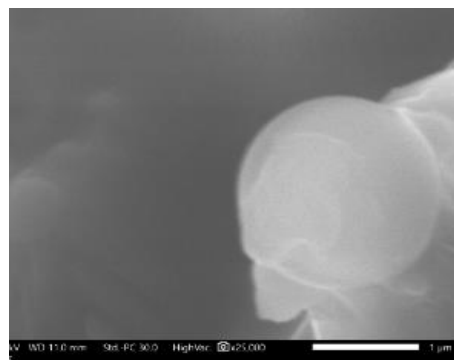
3. Kết quả và thảo luận

3.1. SEM

Để đánh giá cấu trúc hình thái của các viên nang nhựa urea-formaldehyde/epoxy, chúng tôi đã tiến hành quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét truyền qua (SEM) ở hai mức độ phóng đại: 8000 lần (Hình 8) và 25000 lần (Hình 9). Kết quả quan sát SEM cho thấy các viên nang có hình thái dạng cầu với kích thước phân bố trong khoảng 0,1 – 2 μm . Đặc biệt, ở độ phóng đại 25000 lần, bề mặt viên nang được nhận thấy là khá mịn, không có bất kỳ dấu hiệu vỡ hoặc nứt lớn nào khi quan sát dưới kính hiển vi điện tử quét truyền qua. Những kết quả của chúng tôi hoàn toàn phù hợp với nghiên cứu trước đây [8].



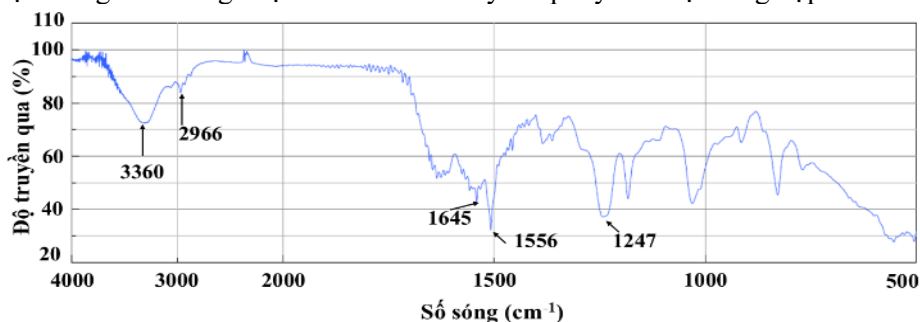
Hình 8. Ảnh SEM của viên nang với độ phóng đại 8000 lần



Hình 9. Ảnh SEM của viên nang với độ phóng đại 25000 lần

3.2. FTIR

Phương pháp phân tích quang phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR) được áp dụng để xác định các nhóm chức hoá học đặc trưng có trong viên nang nhựa urea-formaldehyde/epoxy. Kết quả thu được từ phép đo FTIR của viên nang được thể hiện ở Hình 10. Dựa trên kết quả Hình 10, cho thấy sự xuất hiện các nhóm chức đặc trưng của nhựa urea-formaldehyde và nhựa epoxy. Cụ thể, sự xuất hiện các đỉnh hấp thụ tại các vị trí 3360 cm^{-1} , 2966 cm^{-1} , 1645 cm^{-1} và 1556 cm^{-1} là những đỉnh hấp phụ đại diện lần lượt cho dao động của các nhóm chức N-H, C-H, C=O và C-N. Đây là những nhóm chức đặc trưng có trong liên kết của nhựa urea-formaldehyde [9]. Ngoài ra, sự hiện diện của đỉnh hấp phụ ở 1247 cm^{-1} đặc trưng cho dao động của nhóm chức C-O, nhóm chức phổ biến của nhựa epoxy chưa đóng rắn [10]. Từ các kết quả phân tích phổ FTIR cho thấy sự hiện diện của các nhóm chức đặc trưng của cả nhựa urea-formaldehyde và nhựa epoxy. Điều này khẳng định rằng viên nang nhựa urea-formaldehyde/epoxy đã được tổng hợp thành công.



Hình 10. FTIR của viên nang nhựa urea-formaldehyde/epoxy

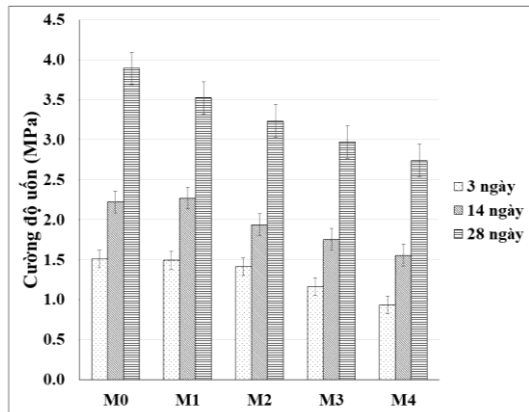
3.3. Cường độ uốn

Kết quả đo cường độ uốn của các mẫu vữa xi măng với tỉ lệ viên nang thêm vào từ 1 – 4% được thể hiện ở Hình 11. Từ kết quả Hình 11 cho thấy, cường độ uốn của các mẫu vữa xi măng

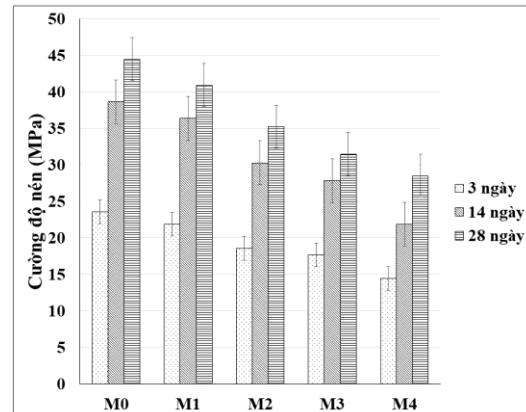
giảm dần khi hàm lượng viên nang thêm vào tăng dần từ 1 – 4%. Cụ thể, cường độ uốn giảm từ 1,51 MPa xuống 0,93 MPa ở 3 ngày. Các mẫu vữa xi măng ở 14 ngày tuy cường độ uốn tăng nhẹ từ 2,22 MPa lên 2,27 MPa ở mẫu có hàm lượng viên nang 1% so với mẫu 0%, sau đó cường độ uốn giảm xuống 1,94 MPa (2% viên nang), 1,75 MPa (3% viên nang) và 1,55 MPa (4% viên nang). Tương tự, cường độ uốn của các mẫu vữa xi măng ở 28 ngày cũng giảm từ 3,89 MPa xuống 2,74 MPa khi hàm lượng viên nang thêm vào tăng dần từ 0-4%. Điều này cho thấy sự có mặt của viên nang ảnh hưởng đến cường độ uốn của các mẫu vữa xi măng.

3.4. Cường độ nén

Cường độ nén là một trong những yếu tố quan trọng của xi măng. Các kết quả đo cường độ nén của mẫu vữa xi măng với tỉ lệ viên nang thêm vào từ 0 – 4% được thể hiện ở Hình 12. Từ kết quả Hình 12 cho thấy, cường độ nén của các mẫu vữa xi măng giảm dần khi hàm lượng viên nang tăng dần từ 1 – 4%. Ở 3, 14 và 28 ngày dưỡng hộ, cường độ nén lần lượt giảm từ 23,76 xuống 14,14 MPa, giảm từ 38,95 xuống 21,50 MPa và giảm từ 44,26 xuống 27,73 MPa. Sự suy giảm cường độ nén của các mẫu xi măng khi tăng hàm lượng viên nang là do các tính chất cơ học của các viên nang kém hơn so với các tính chất của cốt liệu. Các viên nang hoạt động như chất độn, tạo ra nhiều lỗ rỗng bên trong vật liệu [8].



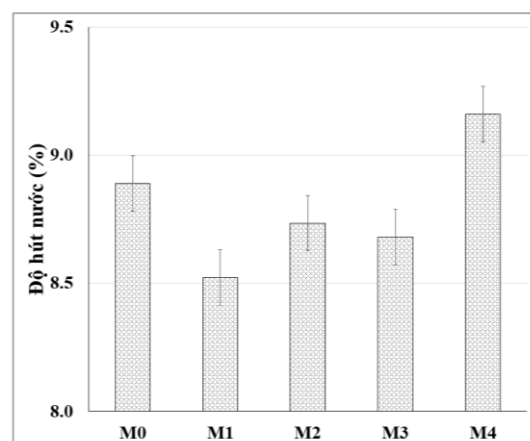
Hình 11. Cường độ uốn của các mẫu vữa xi măng



Hình 12. Cường độ nén của các mẫu vữa xi măng

3.5. Độ hút nước

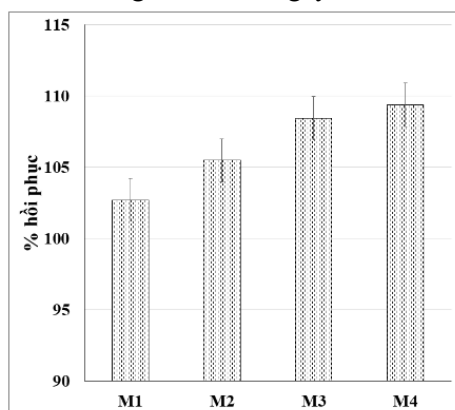
Sự thay đổi độ hút nước của mẫu vữa xi măng khi hàm lượng viên nang thêm vào từ 1 – 4% được thể hiện ở Hình 13. Từ kết quả Hình 13 cho thấy, độ hút nước của mẫu dao động nhẹ khi tăng hàm lượng viên nang. Hầu hết độ hút nước nằm trong khoảng 6,4 – 6,5% khi hàm lượng viên nang tăng dần từ 1 – 3% so với mẫu vữa không có viên nang. Độ hút nước của mẫu vữa xi măng tăng nhẹ lên đến 6,9% khi hàm lượng viên nang thêm vào 4%. Sự tăng độ hút nước của mẫu xi măng khi tăng hàm lượng viên nang có thể là do các viên nang tạo ra nhiều lỗ rỗng trong các mẫu vữa xi măng do sự khác biệt về kích thước của các viên nang và tỷ trọng so với các thành phần khác có trong vữa xi măng.



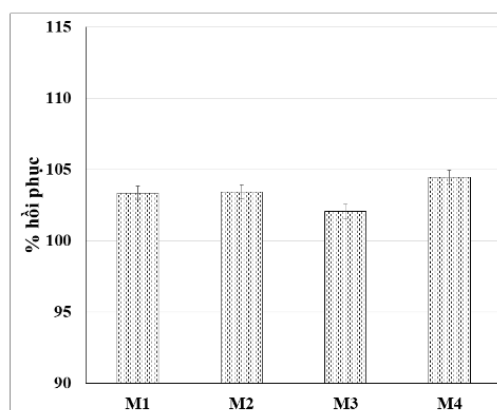
Hình 13. Độ hút nước của các mẫu vữa xi măng

3.6. Độ phục hồi

Để đánh giá khả năng tự lành của các mẫu vữa xi măng, chúng tôi đánh giá sự phục hồi của các mẫu vữa xi măng sau khi tạo vết nứt tế vi lên các mẫu vữa và đánh giá sự phục hồi của các mẫu vữa này qua tỷ lệ phục hồi sau 14 và 28 ngày dưỡng hộ. Tỷ lệ phục hồi của các mẫu xi măng ở 14 và 28 ngày lần lượt được thể hiện ở Hình 14 và Hình 15. Sau 14 ngày, tỉ lệ phục hồi tăng dần từ 102,8 – 106,34% khi hàm lượng viên nang tăng từ 1% đến 4%. Tuy nhiên, tỷ lệ phục hồi hầu như không tăng sau 28 ngày. Tỷ lệ phục hồi giảm từ 101,77% xuống 100,98% khi hàm lượng viên nang tăng từ 1% lên 2%. Sau đó tăng từ 100,98% lên 101,71% khi hàm lượng viên nang tăng từ 2 – 4%. Kết quả này cho thấy các mẫu vữa xi măng có khả năng tự lành các vết nứt và phục hồi cường độ sau 14 ngày.



Hình 14. Mức độ phục hồi của các mẫu vữa xi măng sau 14 ngày tuổi



Hình 15. Mức độ phục hồi của các mẫu vữa xi măng sau 28 ngày tuổi

4. Kết luận

Các viên nang tự phục hồi có cấu trúc vỏ/ lõi sử dụng nhựa urea-formaldehyde/epoxy đã được tổng hợp thành công thông qua quá trình polyme hóa. Các viên nang thu được có cấu trúc hình cầu và phân bố trong dải kích thước từ 0,1 – 2 μm . Kích thước này đảm bảo khả năng phân tán đều trong hỗn hợp xi măng và kích hoạt cơ chế tự lành cho các vết nứt tế vi trong công trình xây dựng.

Với hàm lượng viên nang từ 1% đến 4%, mẫu vữa xi măng có thêm 1% viên nang đã chứng minh được sự tối ưu giữa việc duy trì cường độ cơ học ban đầu và khả năng tự phục hồi vượt trội. Sau 14 ngày kể từ khi xuất hiện các vết nứt tế vi, mẫu vữa này cho thấy sự phục hồi đáng kể về cường độ so với vữa xi măng thông thường không chứa viên nang. Điều này chỉ ra rằng cơ chế tự phục hồi đã được kích hoạt hiệu quả, với nhựa epoxy từ lõi viên nang được giải phóng và lấp đầy các vết nứt, phục hồi lại tính liên tục của vật liệu.

Kết quả nghiên cứu đã khẳng định tiềm năng to lớn của việc ứng dụng các viên nang vỏ/lõi cấu tạo từ nhựa urea-formaldehyde/epoxy trong lĩnh vực xây dựng. Công nghệ này hứa hẹn mang lại giải pháp đột phá cho việc tự chữa lành các vết nứt trong các công trình xi măng và bê tông, từ đó giảm thiểu đáng kể chi phí bảo trì và sửa chữa, đồng thời kéo dài tuổi thọ sử dụng của các kết cấu xây dựng. Việc tự phục hồi vết nứt sẽ giúp duy trì tính toàn vẹn của công trình, giảm thiểu sự xâm nhập của các tác nhân gây hại từ môi trường và nâng cao độ bền vững của cơ sở hạ tầng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] Y. Ge, H. Hu, Q. Zhan, X. Zhang, Y. Su, and J. Zhou, "Study on self-healing effect of cement-based materials cracks based on various inorganic minerals," *Journal of Building Engineering*, vol. 82, Apr. 2024, Art. no. 108202, doi: 10.1016/j.job.2023.108202.
- [2] M. Tripathi, D. Kumar, and P. K. Roy, "Microencapsulation of reactive amine by interfacially engineered epoxy microcapsules for smart applications," *Iran Polym J.*, vol. 26, no. 7, pp. 489–497, Jul. 2017, doi: 10.1007/s13726-017-0537-x.

-
- [3] W. Zhang, Q. Zheng, A. Ashour, and B. Han, "Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review," *Composites Part B: Engineering*, vol. 189, May 2020, Art. no. 107892, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.107892.
- [4] M. A. Reda and S. E. Chidiac, "Performance of capsules in self-healing early-age concrete due to restrained shrinkage," *Construction and Building Materials*, vol. 436, Jul. 2024, Art. no. 136984, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136984.
- [5] S. K. Adhikary, N. Rathod, S. D. Adhikary, A. Kumar, and P. Perumal, "Chemical-based self-healing concrete: a review," *Discov Civ Eng*, vol. 1, no. 1, Nov. 2024, doi: 10.1007/s44290-024-00130-7.
- [6] B. Dong *et al.*, "Self-healing features in cementitious material with urea–formaldehyde/epoxy microcapsules," *Construction and Building Materials*, vol. 106, pp. 608–617, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.140.
- [7] H. Khosravi, E. Mehrazin, and M. Lezgy-Nazargah, "Evaluation of self-healing in reactive powder concrete with urea–formaldehyde/epoxy microcapsules," *Magazine of Concrete Research*, vol. 76, no. 23, pp. 1333–1342, Dec. 2024, doi: 10.1680/jmacr.23.00302.
- [8] H. Mao, X. Cao, M. Guo, C. Jiang, and D. Chen, "Study on the Repair Effect of Self-Healing Cementitious Material with Urea-Formaldehyde Resin/Epoxy Resin Microcapsule," *Buildings*, vol. 14, no. 7, Jul. 2024, Art. no. 7, doi: 10.3390/buildings14072201.
- [9] X. Yan, X. Qian, and Y. Chang, "Preparation and Characterization of Urea Formaldehyde @ Epoxy Resin Microcapsule on Waterborne Wood Coatings," *Coatings*, vol. 9, no. 8, Aug. 2019, Art. no. 8, doi: 10.3390/coatings9080475.
- [10] X. K. D. Hillewaere, R. F. A. Teixeira, L.-T. T. Nguyen, J. A. Ramos, H. Rahier, and F. E. Du Prez, "Autonomous Self-Healing of Epoxy Thermosets with Thiol-Isocyanate Chemistry," *Advanced Functional Materials*, vol. 24, no. 35, pp. 5575–5583, 2014, doi: 10.1002/adfm.201400580.