

NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN TỔ HỢP PHỤ GIA NÂNG CAO TÍNH ĐÀN HỒI, ĐỘ BỀN KÉO, CHỐNG LAN TRUYỀN VẾT NÚT CHO VÀNH ĐÁ XI MĂNG TRÁM GIẾNG KHOAN DẦU KHÍ

Nguyễn Thị Kim Dung¹, Nguyễn Văn Ngọc¹, Đỗ Thành Trung¹, Hoàng Anh Dũng¹, Ngô Thị Nguyên¹, Tạ Văn Thịnh²

¹Công ty TNHH PVChem - Tech

²Viện Nghiên cứu Khoa học và Thiết kế Dầu khí biển, Vietsovpetro

Email: dungntk01@pvchem.com.vn

<https://doi.org/10.47800/PVSI.2025.01-05>

Tóm tắt

Nghiên cứu tập trung phát triển tổ hợp phụ gia nhằm cải thiện tính đàn hồi, độ bền kéo, chống lan truyền vết nứt cho vành đá xi măng trong trám giếng khoan dầu khí. Vật liệu chính được sử dụng là hạt cao su nitrile và sợi thủy tinh bền kiềm, được lựa chọn dựa trên đặc tính phân bố cỡ hạt, kích thước sợi phù hợp để ít ảnh hưởng đến tính lưu biến của vữa xi măng.

Kết quả nghiên cứu đã xác định được tổ hợp phụ gia tối ưu gồm sợi thủy tinh bền kiềm 0,75% và hạt cao su nitrile 6 - 6,5% có khả năng nâng cao tính đàn hồi, độ bền kéo, chống lan truyền vết nứt cho vành xuyên đá xi măng trám giếng khoan dầu khí. Tổ hợp phụ gia sau khi biến tính bề mặt bằng chất phân tán cho thấy khả năng tăng tỷ lệ giữa độ bền kéo và module đàn hồi, giúp đá xi măng chịu được ứng suất lâu dài trong môi trường giếng khoan dầu khí. Đặc biệt, độ bền va đập của vành đá xi măng chứa tổ hợp phụ gia vượt trội hơn so với mẫu không sử dụng phụ gia.

Từ khóa: Công nghệ, khoan khai thác, vật liệu, trám xi măng, phụ gia, sợi, hạt.

1. Giới thiệu

Trong ngành công nghiệp dầu khí, trám xi măng giếng khoan là một quy trình quan trọng nhằm bơm vữa xi măng vào khoảng không vành xuyên giữa các ống chống hoặc không gian giữa ống chống và thành hệ giếng khoan. Sau khi được bơm vào, vữa xi măng sẽ đóng rắn tạo thành vành xuyên đá xi măng có vai trò trong việc gia cố và cách ly. Chức năng gia cố của vành đá xi măng là liên kết các cột ống chống với nhau hoặc cột ống chống với thành hệ giếng khoan đảm bảo độ ổn định cơ học cho toàn bộ hệ thống. Để thực hiện tốt chức năng này, đá xi măng cần có độ bền cơ học nhất định, ít nhất phải đảm bảo cho quá trình thi công giếng không bị kéo dài thời gian chờ và đảm bảo cho khả năng chịu lực trong suốt vòng đời hoạt động của giếng. Ở chức năng cách ly, vành đá xi măng có nhiệm vụ ngăn cách các vỉa chứa dầu, khí với các vỉa khác hoặc chính các vỉa dầu, khí có áp suất khác nhau. Để thực hiện tốt chức năng này, vành đá xi măng

phải có độ thấm thấp và liên kết tốt với bề mặt ống chống hoặc bề mặt thành hệ trong suốt quá trình khai thác.

Trong thời gian xây dựng, khai thác hay sửa chữa giếng khoan, vành đá xi măng trám giếng chịu nhiều tác động như: tác động cơ học của bộ dụng cụ khoan; sự dịch chuyển của các tầng địa chất; giãn nở nhiệt của ống chống dọc theo thân giếng; thoái hóa độ bền do tác động của nhiệt độ; rung lắc của ống chống từ dòng lưu thể chảy qua. Các tác động này, dù xảy ra đơn lẻ hay đồng thời, đều có thể làm cho vành xuyên đá xi măng bị rạn nứt, làm mất liên kết với ống chống, với đá thành hệ, tạo ra các kênh dẫn từ đó làm giảm khả năng gia cố và khả năng cách ly. Do đó, để đáp ứng tốt khả năng gia cố và cách ly bền vững, vành đá xi măng trám giếng phải được thiết kế có khả năng chống chịu được với cả tác động ngắn hạn lẫn dài hạn. Kinh nghiệm thực tế cho thấy, trong 2 tính năng gia cố và cách ly, thì tính năng cách ly cần được quan tâm nhiều hơn trong quá trình vận hành giếng về lâu dài.

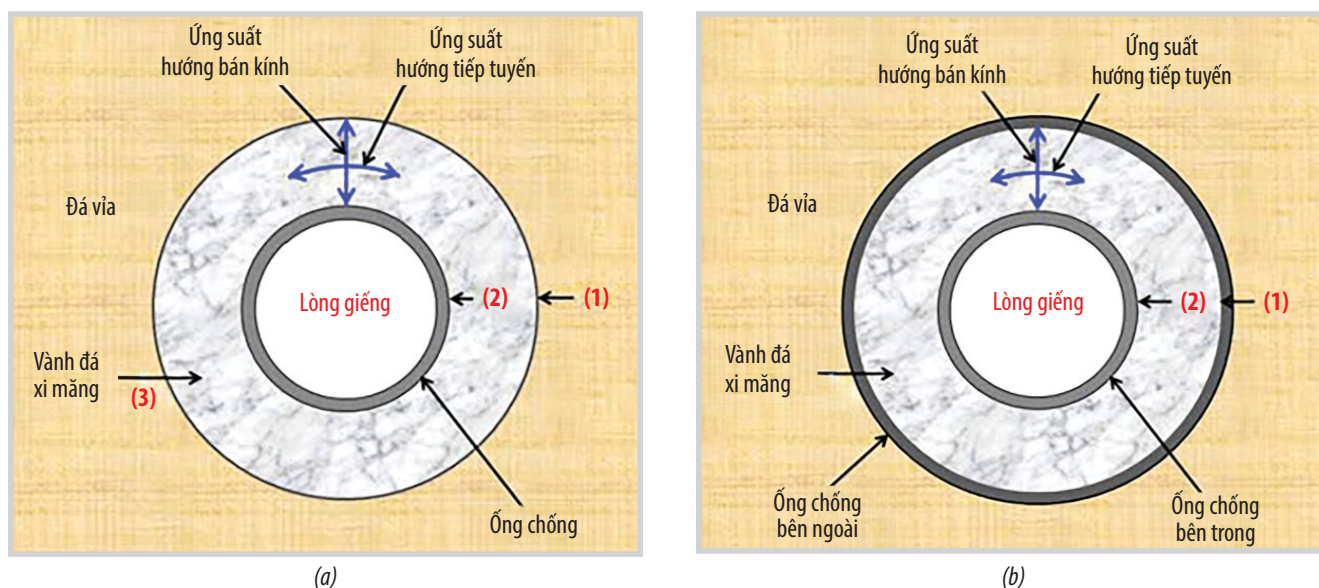
Nghiên cứu [1 - 3] đã cho thấy, khả năng đảm bảo tính cách ly lâu dài của vành đá xi măng phụ thuộc vào tính chất cơ học của vành đá, đá thành hệ, dạng hình học ống



Ngày nhận bài: 11/1/2025.

Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 11/1 - 10/2/2025.

Ngày bài báo được duyệt đăng: 10/2/2025.



Hình 1. Mặt cắt vành đá xi măng trong giếng khoan dầu khí và chiều của ứng suất tác động [4, 5].

chống và điều kiện giếng khoan. Theo khía cạnh khoa học vật liệu, để đá xi măng có thể tồn tại lâu dài trong môi trường chịu ứng suất trong giếng khoan dầu khí, 2 đặc tính cơ học là module đàn hồi và độ bền kéo của vành đá cần đáp ứng: (i) module đàn hồi (module Young) của vành đá xi măng $\leq 0,5$ lần so với module Young của đá thành hệ nơi xi măng được trám, và (ii) đối với môi trường ứng suất lớn hơn, tỷ lệ giữa độ bền kéo và module Young của vành đá xi măng là cao thì tốt hơn.

Việc giảm module đàn hồi của đá xi măng có thể được thực hiện thông qua việc đưa vào vữa trám vật liệu rắn có tính đàn hồi tốt, còn làm tăng độ bền kéo có thể đưa vào vữa vật liệu sợi gia cường. Sự có mặt và phân bố đồng đều của cả vật liệu đàn hồi và sợi gia cường trong đá xi măng cũng tạo ra những bề mặt phân cách pha, giúp ngăn ngừa sự lan truyền vết nứt.

Xuất phát từ thực tế trên, nhóm nghiên cứu đặt ra mục tiêu thiết lập tổ hợp phụ gia nhằm nâng cao tính đàn hồi, độ bền kéo, chống lan truyền vết nứt cho vành xuyên đá xi măng trám giếng khoan dầu khí. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu chọn lựa loại vật liệu phụ gia phù hợp, đánh giá ảnh hưởng của các phụ gia tới các tính chất vữa và đá xi măng giếng khoan, đồng thời thiết lập tổ hợp phụ gia có tác dụng làm giảm module đàn hồi, tăng độ bền kéo và tăng khả năng chống lan truyền vết nứt thông qua tăng độ bền va đập của đá xi măng.

2. Cơ sở lý thuyết và các phương pháp thực hiện

2.1. Cơ sở lý thuyết

Hình 1 minh họa mặt cắt vành đá xi măng trong giếng khoan dầu khí và chiều của ứng suất tác động lên nó trong

quá trình phục vụ. Theo các nghiên cứu [4, 5], những yếu tố có khả năng gây tổn hại tới khả năng cách ly lâu dài của vành đá xi măng có thể gồm:

- Mất, giảm liên kết giữa vành đá xi măng với bề mặt thành giếng hoặc ống chống bên ngoài, tạo ra vành khe hở hẹp (microannulus) phía bên ngoài (outer microannulus) - vị trí (1) trên Hình 1. Nguyên nhân gây hư hỏng chủ yếu gồm: sự co ngót thể tích đá xi măng; khuyết tật để lại do vữa xi măng không thay thế hết dung dịch khoan trong vành xuyên; sự khác biệt về độ cứng giữa đá xi măng và đá thành hệ giếng khoan; sự dao động của nhiệt độ và áp suất dọc theo thân ống chống.

- Mất, giảm liên kết giữa vành đá xi măng với bề mặt ngoài ống chống bên trong tạo ra vành khe hở hẹp bên trong (inner microannulus) - vị trí (2) trên Hình 1. Nguyên nhân gây hư hỏng thường gồm sự khác biệt về độ cứng giữa đá xi măng và ống chống hoặc sự thay đổi (dao động) bất thường của nhiệt độ và áp suất dọc theo thân ống chống.

- Hư hại, nứt vỡ trong chính vành đá xi măng (failure of cement sheath) - vị trí (3) trên Hình 1. Nguyên nhân gây hư hỏng thường gồm: sự thay đổi (dao động) bất thường của nhiệt độ và áp suất; co ngót thể tích đá xi măng; tác động cơ học mang tính đột ngột.

Trong vành đá xi măng, ứng suất gây hư hỏng tồn tại ở 2 hướng chính vuông góc với nhau là ứng suất hướng bán kính và ứng suất hướng tiếp tuyến (Hình 1), ứng suất kéo [1]. Khả năng xuất hiện vết nứt phụ thuộc vào độ lớn của ứng suất tác động, trong đó thường xảy ra khi ứng suất kéo vượt quá độ bền kéo của đá [2, 3]. Đặc biệt, ứng

suất kiểu lặp đi lặp lại với chu kỳ và tần số khác nhau có tác động lớn hơn tới sự lan truyền vết nứt. Đã có kết quả nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm cho thấy kiểu ứng suất này làm tăng mạnh xác suất gây hư hỏng ở vị trí tiếp xúc giữa vành đá xi măng với bề mặt thành hệ giếng khoan [6].

Các nghiên cứu cho thấy khả năng đảm bảo tính cách ly lâu dài của vành đá xi măng phụ thuộc vào tính chất cơ học của vành đá, đá thành hệ, dạng hình học ống chống và điều kiện giếng khoan. Theo kết quả và tổng hợp của nghiên cứu [5], yêu cầu về độ bền kéo đối với vành đá xi măng phụ thuộc rất lớn vào lực tải trọng được áp lên nó trong thời gian hoạt động của giếng và các tính chất cơ học của thành hệ. Module đàn hồi của vành đá xi măng cần nhỏ hơn module đàn hồi của thành hệ để làm giảm nhẹ yêu cầu về độ bền kéo khi áp suất và nhiệt độ tăng. Đối với kiểu vành đá linh hoạt, dễ uốn, ứng lực kéo tiếp tuyến nhỏ hơn và ứng lực nén cao hơn ở vị trí gần nơi tiếp giáp bề mặt giữa xi măng và ống chống. Điều này làm giảm mức yêu cầu với độ bền kéo cho ngăn ngừa vết nứt [1, 7]. Trong khi đó, khi áp suất lòng giếng thấp xuống, yêu cầu về độ bền kéo tăng lên khi module đàn hồi của thành hệ tăng và sự hình thành vết nứt dễ xảy ra khi xi măng được trám ở phần vỉa cứng vì nó làm biến dạng đá xi măng [4]. Với mọi tải trọng có thể đặt lên trong đời vận hành của giếng, điều quan trọng cần lưu tâm là chọn khoảng tối ưu của module đàn hồi tùy thuộc vào những tính chất cơ học của thành hệ [4]. Từ kết quả nghiên cứu, các nhà khoa học rút ra điều kiện cho 2 đặc tính cơ học (module đàn hồi và độ bền kéo) giúp đá xi măng tồn tại lâu dài trong điều kiện chịu ứng suất trong giếng khoan dầu khí như sau:

- Tỷ lệ hợp lý của module đàn hồi của vành đá xi măng so với module đàn hồi của đá thành hệ là $\leq 0,5$ (tức module đàn hồi của vành đá xi măng cần $\leq 0,5$ lần so với module đàn hồi của đá thành hệ nơi xi măng được trám) [7];

- Tỷ lệ hợp lý của độ bền kéo với module đàn hồi của vành đá xi măng: tỷ lệ cao thì tốt hơn cho môi trường ứng suất lớn hơn [3, 7].

Để đảm bảo khả năng cách ly lâu dài của vành đá xi măng, trong thiết kế vỉa trám và xác định các tính chất của đá, cần căn cứ vào những đặc tính của thành hệ cần trám như nhiệt độ, áp suất, tính chất cơ học đá; tuân thủ các yêu cầu về tỷ lệ hợp lý giữa module đàn hồi của vành đá xi măng với thành hệ và tỷ lệ hợp lý của độ bền kéo với module đàn hồi của chính vành đá. Từ tính chất cụ thể của vỉa trám, cần lựa chọn đơn vỉa sao cho tạo được đá có độ

bền kéo và module đàn hồi hợp lý. Để nâng cao khả năng cách ly lâu dài của vành đá xi măng trám giếng khoan dầu khí, cần tìm ra các giải pháp cụ thể giúp tăng tính mềm dẻo, đàn hồi thông qua giảm module đàn hồi, nâng cao độ bền kéo và chống sự lan truyền vết nứt cho vành xuyên đá xi măng.

2.2. Các phương pháp thực hiện

Việc nâng cao tính đàn hồi thông qua giảm module đàn hồi, độ bền kéo và chống lan truyền vết nứt cho đá xi măng có thể thực hiện bằng cách thêm vào thành phần vỉa trám vật liệu dạng hạt có tính đàn hồi tốt, sợi gia cường có khả năng nâng cao độ bền kéo hoặc kết hợp cả hai.

2.2.1. Nâng cao tính đàn hồi cho vành đá xi măng trám giếng khoan: Bổ sung vật liệu dạng hạt có tính dẻo, đàn hồi tốt vào thành phần vỉa trám

Trong trường hợp này, cốt liệu dạng hạt có tính dẻo, đàn hồi tốt được đưa vào vỉa xi măng để sau đóng rắn, đá xi măng tạo ra có tính đàn hồi tốt, module đàn hồi thấp. Khi được phân tán đều trong khối đá xi măng, cốt liệu dạng hạt rắn có tính dẻo còn đóng vai trò chống sự lan truyền vết nứt, cụ thể là, khi vành đá xi măng bị nứt, sự lan truyền vết nứt sẽ bị chặn lại ở vị trí bề mặt phân cách pha giữa xi măng và cốt liệu. Từ kết quả nghiên cứu, tác giả [8] đề xuất đặc tính của cốt liệu dẻo đàn hồi như sau:

- Cỡ hạt $\leq 500 \mu\text{m}$;
- Tỷ trọng $< 1.500 \text{ kg/m}^3$;
- Module đàn hồi $< 5 \text{ GPa}$, tốt hơn là $< 2 \text{ GPa}$;
- Hệ số Poisson $> 0,3$ nhưng $< 0,45$.

Nhiều loại vật liệu polymer đáp ứng yêu cầu trên nhưng không bền nhiệt tốt có thể được sử dụng ở điều kiện nhiệt độ thấp (dưới 100°C) như: polyamide, polypropylene, polyethylene, styrene divinylbenzene hoặc styrene butadiene [8]. Một số vật liệu bền nhiệt hơn có thể sử dụng nhưng chi phí cao như: PEEK, Ryton, PTFE [9]. Theo [9], các vật liệu này bền nhiệt trong môi trường kiểm cao. Tuy nhiên, điều khá đặc biệt là nhiều loại hạt dẻo, đàn hồi khi đưa vào vỉa xi măng có thể tác động làm giảm cả module đàn hồi và độ bền kéo. Do vậy, sẽ tốt hơn nếu tìm được loại vật liệu dẻo, đàn hồi có thể nâng cao tính dẻo và độ bền kéo hoặc tỷ lệ hợp lý của độ bền kéo với module đàn hồi của vành đá xi măng.

Tính đàn hồi của đá xi măng cũng được cải thiện khi tối ưu hóa thành phần cốt liệu dạng hạt rắn để làm tăng

khả năng hấp thụ năng lượng va đập và chống lan truyền vết nứt. Cốt liệu dạng hạt rắn được dùng thường là sự kết hợp của silica từ cát nghiền mịn (silica flour) với silica dạng micro (silica fume) và đôi khi là silica cỡ hạt nano (nano silica). Trong công nghệ này cốt liệu đàn hồi là 1 trong 3 cấu tử dạng rắn với dải cỡ hạt tối ưu theo hướng tạo đá xi măng có tính compact cao và có khả năng hấp thụ năng lượng va đập, chống lan truyền vết nứt.

2.2.2. Nâng cao độ bền kéo cho vành đá xi măng trám giếng khoan: Bổ sung vật liệu gia cường dạng sợi vào thành phần vữa trám

Trong trường hợp đưa thêm vào thành phần vữa cốt liệu dạng sợi, hệ vữa xi măng như vậy gắn với phối liệu của dạng bê tông có tên gọi là bê tông mềm dẻo (flexible concrete). Khi cốt liệu sợi được bổ sung và phân tán đều trong vữa, vành đá tạo ra được gia cường tương tự như cách dùng cốt liệu dạng sợi trong vật liệu tổ hợp (vật liệu composite). Việc gia cường này giúp tăng mạnh đặc tính bền nén, bền va đập, bền kéo, bền uốn của đá xi măng. Ngoài ra, nó cũng có vai trò tích cực trong chống sự lan truyền của các vết nứt (tăng mức chống sốc) cho đá xi măng. Các vật liệu dạng sợi được sử dụng có thể gồm: sợi silica, sợi carbon, sợi amiăng, sợi thủy tinh, sợi bazan, sợi polyvinyl, sợi polyester...

Theo tác giả Narjes Jafariesfad [5], bổ sung vật liệu dạng sợi vào vật liệu xi măng là phương pháp hữu hiệu cho nâng cao đặc tính chịu kéo của vật liệu. Kết quả từ các nghiên cứu [10, 11] cho thấy, tác động của vật liệu dạng sợi lên tính chất cơ học của vật liệu xi măng phụ thuộc nhiều vào kích cỡ của nó. Sợi macro có đường kính > 500 μm có thể cải thiện tính dẻo dai thông qua nối các khe nứt macro. Sợi micro có đường kính < 500 μm nối các khe nứt micro và làm chậm lan truyền vết nứt đó. Trong đa số các nghiên cứu, hàm lượng sợi được dùng dao động trong khoảng 0,2 - 3%.

Để có thể sử dụng cho vữa xi măng trám giếng khoan, các vật liệu thuộc 2 nhóm trên cần đáp ứng các yêu cầu đảm bảo thuận lợi cho công đoạn bơm trám và khả năng phục vụ của vành đá ở điều kiện thực tế dưới giếng khoan như: (i) có khả năng phục vụ ở nhiệt độ cao, áp suất cao đặc trưng cho điều kiện giếng khoan (thường trong khoảng 100 - 180°C); (ii) có tính bền kiềm cao do đá xi măng trám có pH cao (nằm trong khoảng pH = 11 - 12; tác động của phản ứng kiềm trong trường hợp này mạnh hơn nhiều so với khi xảy ra với bê tông xây dựng, vì đá xi măng trám giếng khoan làm việc ở điều kiện nhiệt độ cao). Bền kiềm là để tồn tại lâu dài trong đá xi măng

phục vụ ở điều kiện nhiệt độ cao kèm độ ẩm cao và (iii) không ảnh hưởng lớn tới tính lưu biến (tính chảy) của vữa để đảm bảo quá trình bơm trám được diễn ra với tổn hao áp suất chấp nhận được và không phát sinh các phức tạp.

Từ thực trạng kỹ thuật trên, nhóm tác giả đặt ra nhiệm vụ nghiên cứu thiết lập tổ hợp phụ gia dùng trong nâng cao tính đàn hồi, độ bền kéo, chống lan truyền vết nứt cho vành xuyên đá xi măng trám giếng khoan dầu khí thông qua nghiên cứu thực nghiệm để chọn được chủng loại vật liệu hợp lý, đánh giá ảnh hưởng của vật liệu tới các tính chất của vữa và của đá xi măng, từ đó chọn được hàm lượng tối ưu của tổ hợp phụ gia này.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Nghiên cứu lựa chọn phụ gia dạng hạt và phụ gia dạng sợi đáp ứng yêu cầu bơm trám

Độ nhớt vữa trám giếng khoan, mức ma sát nội của khối vữa, là một chỉ tiêu quan trọng đảm bảo cho khả năng bơm trám - đẩy vữa vào khoảng không vành xuyên hẹp giữa cột ống chống và thành giếng, hoặc giữa các cột ống chống. Chính vì vậy cần lựa chọn các phụ gia dạng rắn ít ảnh hưởng tới các thông số lưu biến vữa. Nhóm tác giả đã tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của một số loại phụ gia dạng hạt và phụ gia dạng sợi tới tính chất vữa xi măng, như các thông số lưu biến và độ chảy tủa, để lựa chọn các phụ gia phù hợp cho các nghiên cứu tiếp theo.

Vữa nền được sử dụng trong nghiên cứu có thành phần chất kết dính gồm 74,07% xi măng chủng loại G theo tiêu chuẩn API 25,93%, cát nghiền và tỷ lệ nước/chất kết dính được dùng là 0,5. Ở nhóm vật liệu dạng hạt, kết quả nhận được cho thấy, 2 loại vật liệu là hạt cao su nitrile và hạt nhựa poly tetra fluoro ethylene (PTFE) có lợi thế hơn. Trong đó, vật liệu hạt cao su nitrile ít ảnh hưởng xấu tới các thông số lưu biến và độ chảy tủa của vữa xi măng; còn vật liệu PTFE có ảnh hưởng tốt tới các thông số lưu biến, nhất là khi dùng ở hàm lượng lớn nhờ vào hiệu ứng trượt tương tự như những viên bi trong vòng bi.

Ở nhóm vật liệu dạng sợi, kết quả cho thấy, sợi thủy tinh bền kiềm và sợi bazan sở hữu lợi thế cao hơn so với nhiều loại sợi khác được đưa vào nghiên cứu. Cụ thể, đa số các loại sợi khác có ảnh hưởng xấu tới lưu biến vữa, trong khi sợi thủy tinh bền kiềm và sợi bazan, ở hàm lượng khoảng < 2,5%, với chiều dài hợp lý, ít ảnh hưởng tới các thông số lưu biến và độ chảy tủa. Nhóm nghiên cứu chọn 2 vật liệu là hạt cao su nitrile và sợi thủy tinh bền kiềm cho các nghiên cứu tiếp theo.

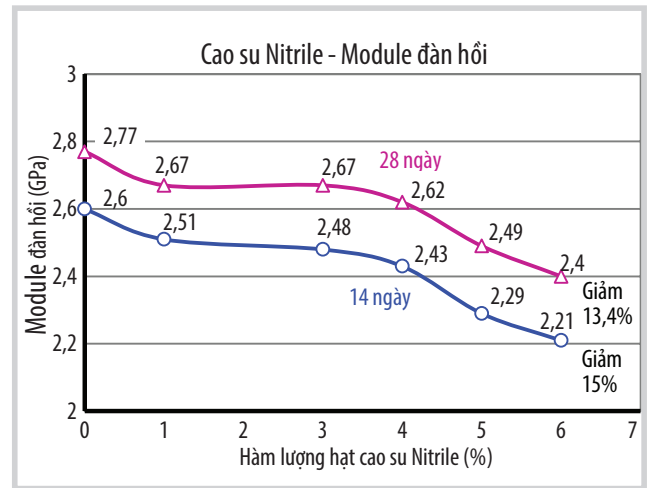
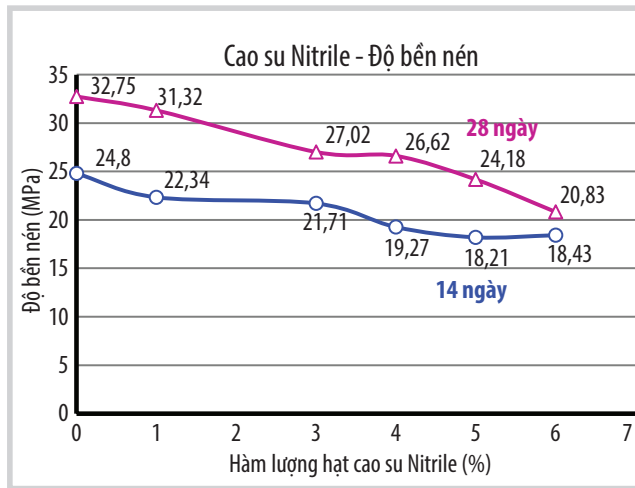
3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng hạt cao su nitrile và sợi thủy tinh bền kiềm tới độ bền nén và module đàn hồi đá xi măng

Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng hạt cao su nitrile tới độ bền nén và module đàn hồi đá xi măng ở tuổi 14 ngày và 28 ngày bảo dưỡng trong môi trường ẩm ở nhiệt độ thường được thể hiện trên Hình 2. Hình 2 cho thấy, theo chiều tăng của hàm lượng hạt cao su nitrile, độ bền nén và module đàn hồi đều giảm xuống. Điều này không mâu thuẫn vì đối với một dạng vật liệu nhất định, độ bền nén thể hiện tính cứng, module đàn hồi thể hiện khả năng biến dạng khi bị nén và module đàn hồi sẽ giảm khi độ cứng giảm. Sự giảm độ bền nén trong trường hợp đá xi măng chứa hạt cao su liên quan mật thiết tới sự giảm tương đối hàm lượng chất kết dính trong một đơn vị thể tích đá xi măng. Về thực chất, thể tích chất kết dính giảm mạnh khi tăng hàm lượng hạt cao su vì cao su có khối

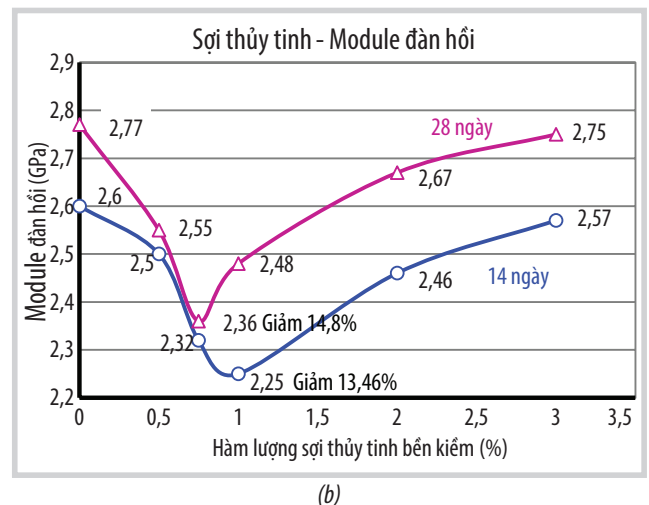
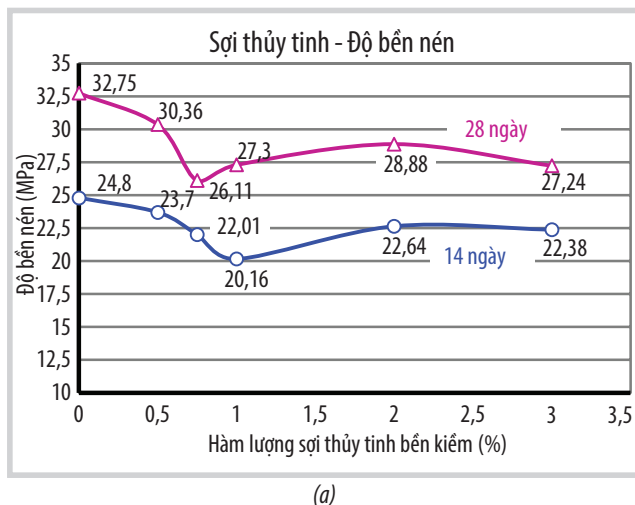
lượng riêng nhẹ hơn rất nhiều ($\approx 1,38 \text{ g/cm}^3$) so với khối lượng riêng chất kết dính ($\approx 3 \text{ g/cm}^3$).

Như vậy, vật liệu hạt cao su nitrile đưa vào nghiên cứu có khả năng làm giảm module đàn hồi đá xi măng và việc bổ sung hàm lượng hạt cao su hợp lý vào vữa hoặc vào thành phần hỗn hợp chất kết dính có thể nhận được đá xi măng có tính đàn hồi tốt hơn. Căn cứ vào mức giảm module đàn hồi nhận được và thực tế vữa sử dụng xi măng G thường có độ bền nén lớn hơn nhiều lần mức cần thiết để đảm bảo chức năng gia cố, nhóm tác giả đề xuất sử dụng hàm lượng hạt cao su $\geq 6\%$ cho các nghiên cứu tiếp theo.

Kết quả ảnh hưởng của hàm lượng sợi thủy tinh bền kiềm tới độ bền nén và module đàn hồi đá xi măng ở tuổi 14 ngày và 28 ngày bảo dưỡng trong môi trường ẩm ở nhiệt độ thường được thể hiện ở Hình 3. Kết quả cho thấy, khi hàm lượng sợi chứa cao, độ bền nén và module đàn



Hình 2. Ảnh hưởng của hàm lượng hạt cao su nitrile tới độ bền nén (a) và module đàn hồi (b) đá xi măng.



Hình 3. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thủy tinh bền kiềm tới độ bền nén (a) và module đàn hồi (b) đá xi măng.

hồi giảm. Nhưng sau khi tăng hàm lượng phụ gia này, độ bền nén và module đàn hồi tăng trở lại. Như vậy, khi ưu tiên tăng tính đàn hồi cho đá xi măng (module đàn hồi giảm) thì hàm lượng sợi thủy tinh bền kiểm cần quan tâm nằm trong khoảng 0,5 - 2%. Do vậy, nhóm tác giả chọn sử dụng hàm lượng sợi thủy tinh bền kiểm 0,75 - 1% cho các nghiên cứu tiếp theo.

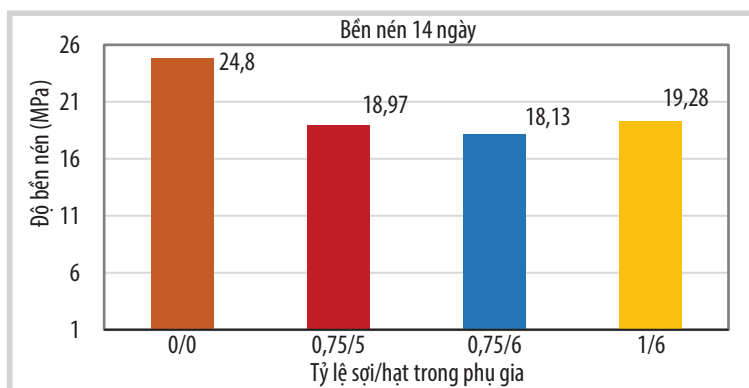
3.3. Nghiên cứu ảnh hưởng đồng thời của phụ gia hạt cao su nitrile và phụ gia sợi thủy tinh bền kiểm tới độ bền nén và module đàn hồi đá xi măng

Nghiên cứu ảnh hưởng đồng thời của 2 phụ gia dạng hạt và dạng sợi tới độ bền nén và module đàn hồi đá xi măng được tiến hành cho một số tổ hợp đã cho kết quả ở tuổi 14 ngày và 28 ngày như Hình 4 và 5. Việc đưa phụ gia vào vữa ở các thử nghiệm này được tiến hành theo phương pháp bổ sung trực tiếp vào vữa đang khuấy.

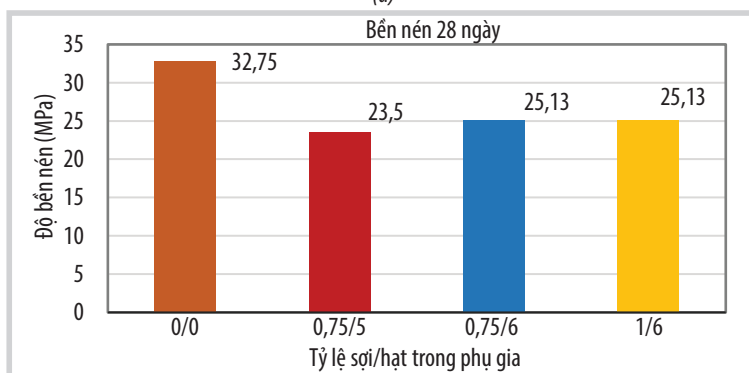
Kết quả Hình 4 và 5 cho thấy, xu hướng chung là sự có mặt của tổ hợp phụ gia sợi và hạt làm giảm đồng thời độ bền nén và module đàn hồi. Kết quả module đàn hồi trên Hình 5 cho thấy, khi giữ nguyên hàm lượng sợi nhưng tăng hàm lượng hạt (ứng với tổ hợp phụ gia 0,75% sợi, 5% hạt và 0,75% sợi, 6% hạt), mức giảm module đàn hồi được cải thiện; còn khi giữ nguyên hàm lượng hạt nhưng tăng hàm lượng sợi (ứng với tổ hợp phụ gia 0,75% sợi, 6% hạt và 1% sợi, 6% hạt), mức giảm module đàn hồi kém đi. Như vậy, để đạt mức giảm module lớn hơn, nên tăng hàm lượng hạt (lên ≥ 6%) và giảm hàm lượng sợi xuống 0,75% ở các nghiên cứu tiếp.

Các kết quả nghiên cứu trình bày ở trên được tiến hành trên vữa nền (74,07% xi măng G + 25,93% cát nghiền; tỷ lệ nước/chất kết dính 0,5). Nghiên cứu tiếp theo sử dụng thành phần vữa được Vietsovetro dùng để trám ống chống khai thác, đảm bảo yêu cầu cao về khả năng ngăn ngừa khí xâm nhập (Bảng 1); vữa được gọi tắt là vữa số 1. Vữa này có chứa bộ phụ gia hóa học được cung cấp bởi Baker Hughes (Mỹ).

Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của 2 tổ hợp phụ gia (0,75% sợi, 6% hạt và 0,75% sợi,

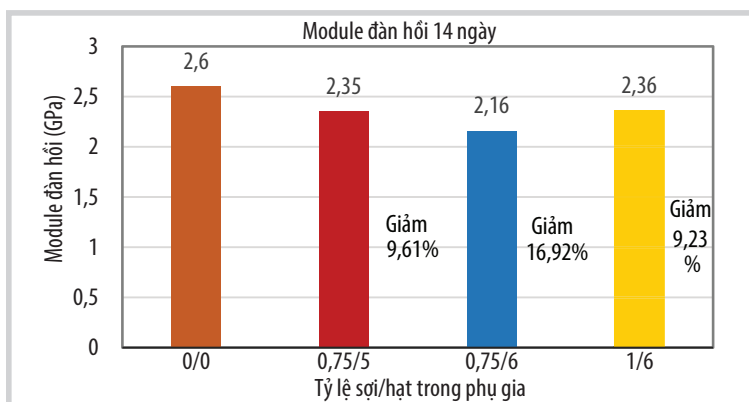


(a)

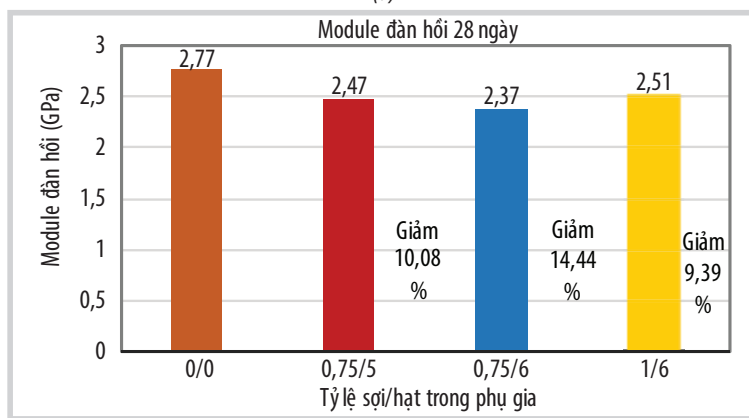


(b)

Hình 4. Ảnh hưởng của một số tổ hợp phụ gia tới độ bền nén đá xi măng ở tuổi 14 ngày và 28 ngày.



(a)



(b)

Hình 5. Ảnh hưởng của một số tổ hợp phụ gia tới module đàn hồi đá xi măng ở tuổi 14 ngày và 28 ngày.

6,5% hạt) dạng khô tới độ bền nén và module đàn hồi vừa xi măng số 1 ở tuổi 14 ngày và 28 ngày được thể hiện trên Hình 6 và 7.

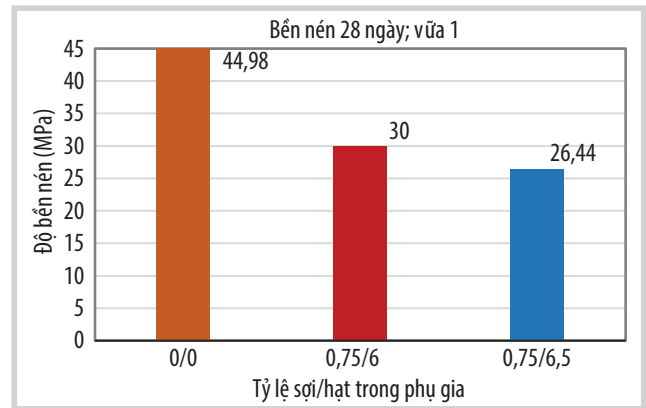
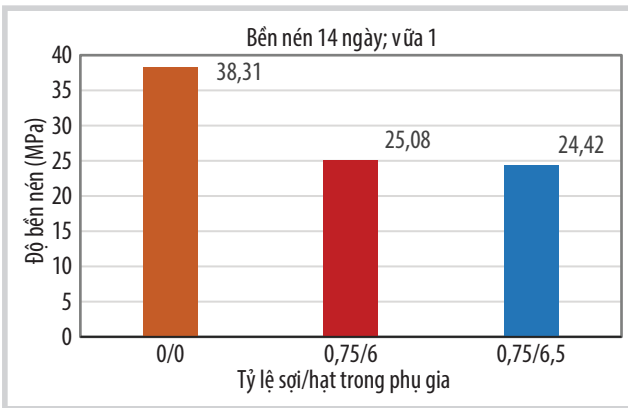
Hình 6 và 7 cho thấy vữa số 1 (chứa bộ phụ gia của Baker-Hughes) thể hiện xu hướng ảnh hưởng của tổ hợp phụ gia sợi và hạt tới độ bền nén và module đàn hồi không có sự khác biệt so với kết quả thử nghiệm trên vữa nền. Tuy nhiên, có thể thấy rằng, khả năng làm giảm module đàn hồi ở vữa chứa bộ phụ gia hóa học Baker-Hughes cao hơn so với trường hợp thử nghiệm trên vữa nền. Điều này liên quan tới việc tổ hợp phụ gia dễ phân tán hơn trong

loại vữa chứa các phụ gia hóa học, trong đó có chất phân tán. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy, khi tập trung vào giảm module đàn hồi, không nên dùng hàm lượng sợi cao (tới 1%) mà chỉ nên dùng hàm lượng 0,75% và khi tăng hàm lượng hạt cao su (từ 6% lên 6,5%) module đàn hồi tiếp tục giảm thêm đáng kể.

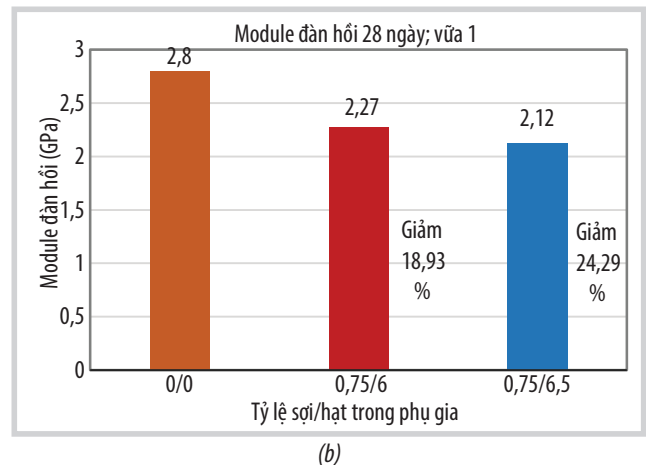
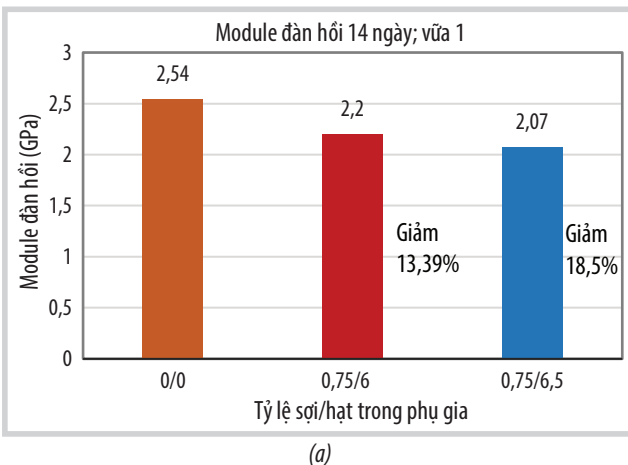
Ngoài ra, nhóm tác giả đã tiến hành đánh giá ảnh hưởng của chiều dài sợi, tỷ lệ nước/xi măng và nano carbon tới một số tính chất của đá xi măng và nhận thấy: (i) độ bền uốn của đá xi măng được cải thiện rõ rệt khi tăng chiều dài sợi thủy tinh từ 4 mm lên 6 mm và 12 mm; (ii)

Bảng 1. Thành phần vữa điển hình cho trạm ống chống khai thác chứa bộ phụ gia hóa học được cung cấp bởi Công ty Baker-Hughes, Mỹ (vữa số 1).

STT	Vật liệu, hóa phẩm	Chức năng chính	Đơn vị	Hàm lượng
1	Xi măng G	Chất kết dính	pps	94
2	Phụ gia tăng bền nhiệt: silica flour	Tăng độ bền nhiệt	bwoc	35
3	Phụ gia khử bọt (defoamer): FP-9L	Khử bọt khí	gps	0,05
4	Phụ gia tăng liên kết, ngăn ngừa sự xâm nhập của khí: BA-58L	Chống sự xâm nhập của khí vào vữa	gps	1,10
5	Phụ gia đa chức năng: Ultra-7L	Giảm độ thải nước	gps	0,28
6	Phụ gia phân tán: CD-33L	Giảm độ nhớt	gps	0,30
7	Phụ gia chậm đông: R-8L	Kéo dài thời gian đặc quánh	gps	0,08
8	Nước biển	Nước trộn	gps	5,2



Hình 6. Ảnh hưởng của các tổ hợp phụ gia dạng khô tới độ bền nén đá xi măng khi thử nghiệm với vữa số 1.



Hình 7. Ảnh hưởng của các tổ hợp phụ gia dạng khô tới module đàn hồi đá xi măng khi thử nghiệm với vữa số 1.

độ bền nén và module đàn hồi đá xi măng giảm nhanh khi tăng tỷ lệ nước/xi măng từ 0,44 lên 0,5 và (iii) nano carbon làm tăng độ bền uốn, nhưng cũng làm tăng module đàn hồi. Để giảm đáng kể module đàn hồi, có thể áp dụng giải pháp hạ khối lượng riêng của vữa, bao gồm sử dụng hoặc tăng tương đối hàm lượng phụ gia dạng hạt có khối lượng riêng thấp. Trong một số trường hợp, nano carbon có thể được bổ sung để cân bằng, cải thiện độ bền uốn và bền kéo của đá xi măng.

Việc nghiên cứu ảnh hưởng của các tổ hợp phụ gia sợi và hạt tới các tính chất của đá xi măng đã cho phép nhóm tác giả kết luận tỷ lệ phù hợp của tổ hợp phụ gia sợi và hạt cho các nghiên cứu tiếp theo là: sợi 0,75% và hạt 6 - 6,5%.

3.4. Ảnh hưởng của tổ hợp phụ gia được biến tính bề mặt, tăng khả năng phân tán, tới độ bền nén, module đàn hồi, độ bền kéo, bền uốn và bền va đập của đá xi măng

Kinh nghiệm sử dụng phụ gia dạng rắn cho vữa xi măng của nhiều hãng cho thấy, để phát huy tốt tác dụng, các phụ gia dạng rắn cần được phân tán tốt vào thể tích khối vữa. Trên thực tế, phụ gia hạt cao su nitrile có bề mặt không ưa nước, nên khó phân tán đều trong vữa. Phụ gia sợi thủy tinh bền kiềm, tuy trở nên ưa nước nhanh hơn trong vữa xi măng có tính kiềm cao, nhưng do có diện tích bề mặt riêng lớn và chịu ảnh hưởng mạnh của hiện tượng tĩnh điện nên thường dính cụm, đan chéo vào nhau, nên rất khó phân tán đều trong vữa. Để khắc phục nhược điểm này, cách tiếp cận tốt nhất là trộn khô các phụ gia vào hỗn hợp chất kết dính (hỗn hợp xi măng G + silica flour) trước công đoạn tạo vữa. Nhóm tác giả đã đưa ra giải pháp chuyển tổ hợp phụ gia khô về dạng ướt bằng cách trộn (làm ướt) tổ hợp này với chính một phần chất phân tán dùng làm ướt tổ hợp phụ gia sẽ được khuấy trừ khi chuẩn bị nước trộn. Khi trộn để tạo vữa, phụ gia ướt được bổ sung trực tiếp vào bể trộn vữa và được hệ thống khuấy trộn cùng bơm tuần hoàn phân tán đều trong vữa.

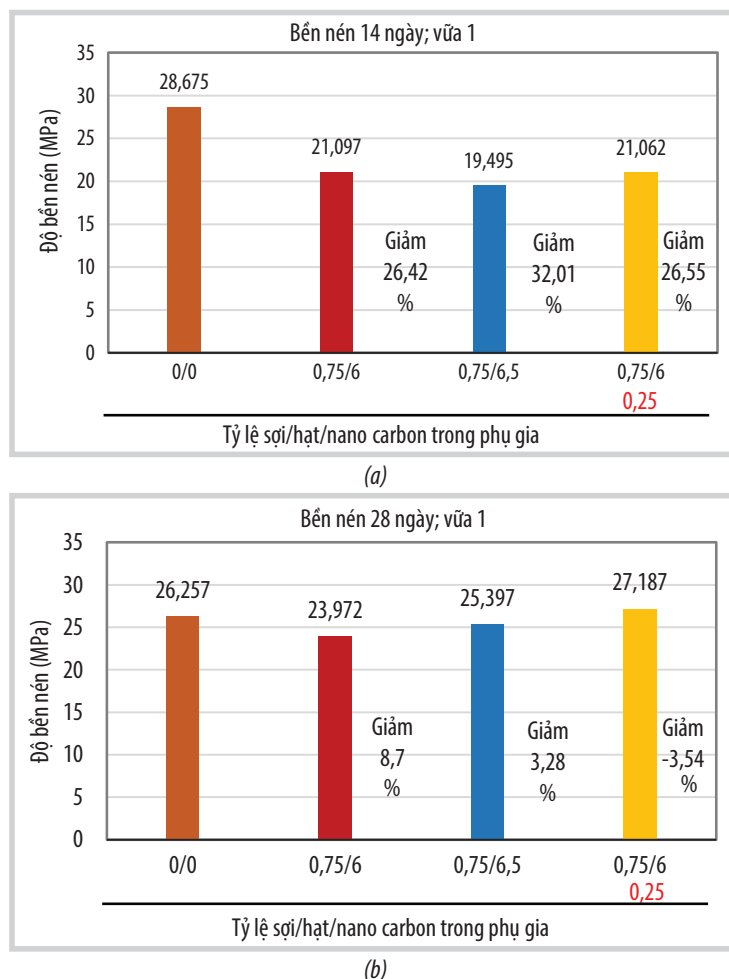
Nhóm tác giả đã tiến hành nghiên cứu, đánh giá ảnh hưởng của 2 tổ hợp phụ gia ướt (thành phần: 0,75/6%; 0,75/6,5%) và tổ hợp phụ gia ướt chứa nano carbon (thành phần: 0,75/6/0,25%)

tới các tính chất cơ học của đá xi măng. Vừa được dùng trong nghiên cứu là vữa số 1 có thành phần chính như Bảng 1. Kết quả ảnh hưởng của thành phần 3 tổ hợp phụ gia biến tính ướt tới độ bền nén và module đàn hồi được thể hiện trên Hình 8 và 9.

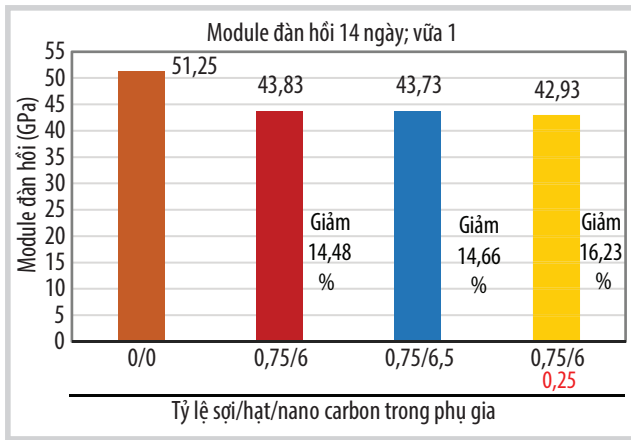
Hình 8a cho thấy, sự có mặt của nano carbon (thành phần: 0,75/6/0,25%) đã cải thiện độ bền nén so với thành phần không chứa nó. Sự cải thiện này cũng được phản ánh qua kết quả giảm module đàn hồi tuổi 28 ngày trên Hình 9b. Kết quả trên Hình 9 cho thấy sự tăng hàm lượng hạt trong tổ hợp phụ gia từ 6% lên 6,5% tiếp tục làm giảm module đàn hồi, tức làm đá xi măng có tính đàn hồi hơn.

Kết quả ảnh hưởng của thành phần 3 tổ hợp phụ gia biến tính ướt tới độ bền kéo, độ bền uốn và độ bền va đập được thể hiện tương ứng trên Hình 10 - 12.

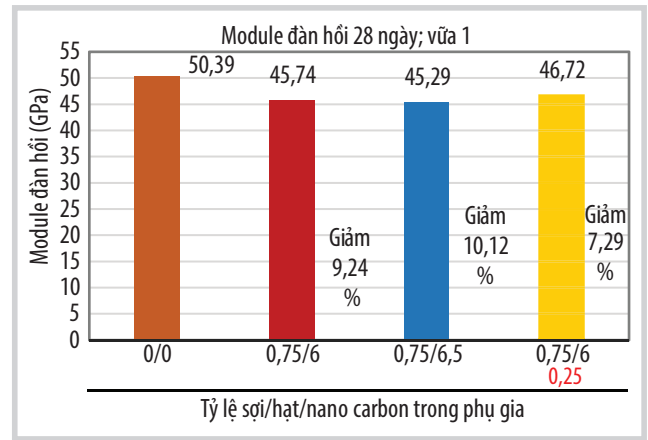
Kết quả Hình 10 cho thấy, sự có mặt của các tổ hợp phụ gia làm tăng mạnh độ bền kéo đá xi măng, nhất là khi có nano carbon. Các tổ hợp phụ gia cũng làm độ bền uốn đá xi măng tăng đáng kể (Hình 11). Độ bền kéo đá xi măng (Hình 10) tăng mạnh và module đàn hồi giảm (Hình 9) cho thấy, đá xi măng chứa các tổ hợp phụ gia đã cùng lúc vừa làm giảm module đàn hồi đá, vừa làm tăng tỷ lệ



Hình 8. Ảnh hưởng của thành phần các tổ hợp phụ gia ướt tới độ bền nén đá xi măng.

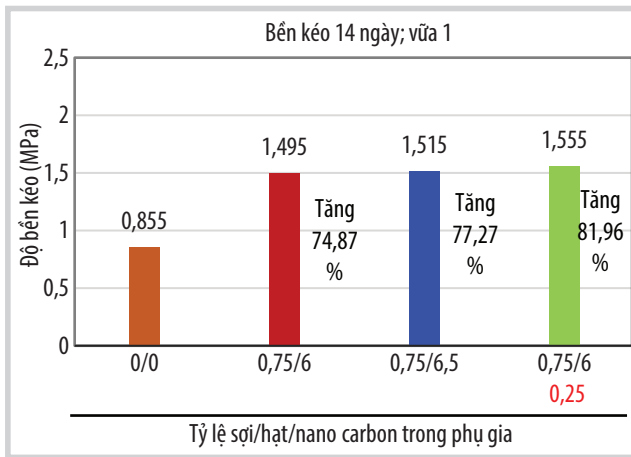


(a)

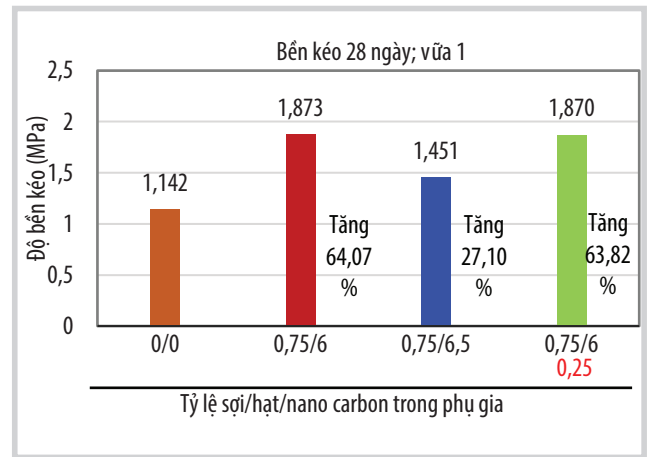


(b)

Hình 9. Ảnh hưởng của thành phần các tổ hợp phụ gia ướt tới module đàn hồi đá xi măng.

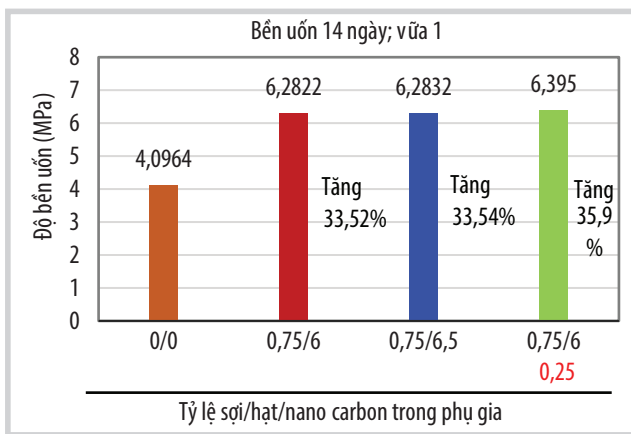


(a)

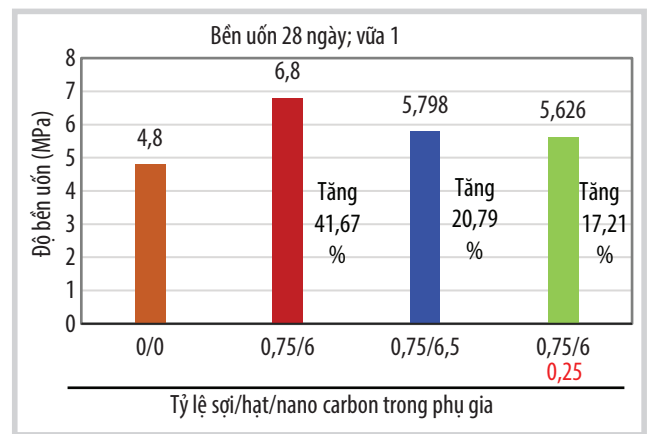


(b)

Hình 10. Ảnh hưởng của thành phần các tổ hợp phụ gia ướt tới độ bền kéo đá xi măng.



(a)



(b)

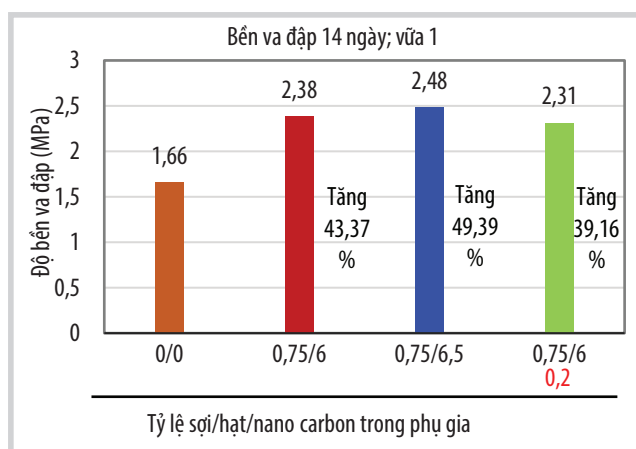
Hình 11. Ảnh hưởng của thành phần các tổ hợp phụ gia ướt tới độ bền uốn đá xi măng.

giữa độ bền kéo và module đàn hồi, đáp ứng tốt hơn đối với yêu cầu đá xi măng tồn tại lâu dài trong điều kiện chịu ứng suất trong giếng khoan dầu khí.

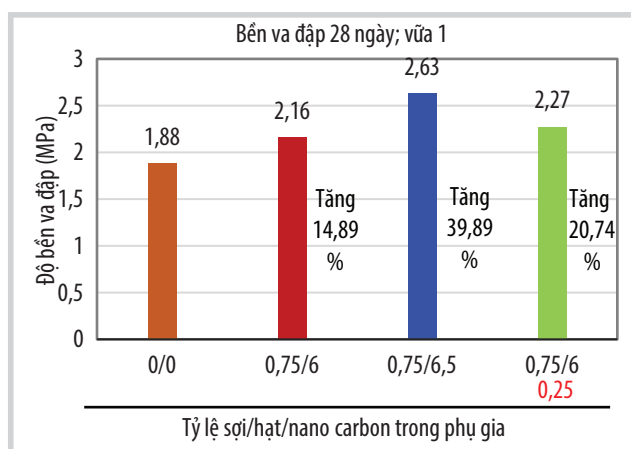
Hình 12 cho thấy độ bền va đập của đá xi măng chứa các tổ hợp phụ gia cao vượt trội so với mẫu đá không chứa tổ hợp phụ gia. Độ bền va đập tăng khi vật liệu đỡ giòn

đi và/hoặc có khả năng hấp thụ năng lượng lớn hơn. Đây là bằng chứng cho thấy đá xi măng chứa các tổ hợp phụ gia đã làm giảm (chống lại) sự lan truyền vết nứt khi bị tác động sốc của lực cơ học.

Nghiên cứu cho thấy thành phần tổ hợp phụ gia sợi và hạt rút ra từ các nghiên cứu ở phần trên (sợi 0,75% và



(a)



(b)

Hình 12. Ảnh hưởng của thành phần các tổ hợp phụ gia tới độ bền và đập đá xi măng.

hạt 6 - 6,5%) đáp ứng yêu cầu nâng cao tính đàn hồi, độ bền kéo, chống lan truyền vết nứt cho đá xi măng trám giếng khoan dầu khí.

4. Kết luận

Từ kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng hạt cao su nitrile, sợi thủy tinh bền kiềm tới độ bền nén và module đàn hồi đá xi măng từ vữa nền trên cơ sở xi măng G và cát nghiền, đã rút ra được khoảng hàm lượng của hạt cao su là $\geq 6\%$ và sợi thủy tinh là 0,75 - 1% để có được tổ hợp phụ gia cần thiết lập.

Nghiên cứu ảnh hưởng đồng thời của phụ gia hạt cao su nitrile và phụ gia sợi thủy tinh (với hàm lượng nằm trong khoảng cần quan tâm, 0,5 - 2%) tới độ bền nén và module đàn hồi đá xi măng (từ vữa nền và vữa điển hình cho trám ống chống khai thác chứa đủ bộ phụ gia hóa học) cho phép rút ra một số kết luận như sau: (i) xu hướng chung là tổ hợp phụ gia sợi và hạt làm giảm đồng thời độ bền nén và module đàn hồi; (ii) để đạt mức giảm module lớn hơn, cần tăng hàm lượng hạt (lên $> 6\%$) và giảm hàm lượng sợi xuống 0,75% và (iii) tỷ lệ phù hợp của tổ hợp phụ gia sợi và hạt là sợi 0,75% và hạt 6 - 6,5%.

Nghiên cứu ảnh hưởng của tổ hợp phụ gia với thành phần đề xuất ở trên, được biến tính bề mặt bằng chất phân tán cho tăng khả năng phân tán, tới một số tính chất cơ học đá xi măng (độ bền nén, module đàn hồi, độ bền kéo, bền uốn và bền va đập) cho phép rút ra các nhận xét sau: (i) sự có mặt của nano carbon hàm lượng 0,25% làm cải thiện độ bền nén, (ii) hàm lượng hạt trong tổ hợp phụ gia tăng từ 6% lên 6,5% tiếp tục làm giảm thêm module đàn hồi (làm đá xi măng có tính đàn hồi hơn) và (iii) đá xi măng chứa các tổ hợp phụ gia vừa làm giảm module đàn hồi, vừa làm tăng tỷ lệ giữa độ bền kéo và module đàn hồi,

đáp ứng tốt hơn yêu cầu đá xi măng tồn tại lâu dài trong điều kiện chịu ứng suất trong giếng khoan dầu khí.

Độ bền va đập của đá xi măng chứa các tổ hợp phụ gia cao vượt trội là bằng chứng cho thấy các tổ hợp phụ gia đã làm giảm (chống lại) sự lan truyền vết nứt khi bị tác động sốc của lực cơ học.

Nhóm tác giả đã thiết lập tổ hợp phụ gia gồm sợi và hạt có khả năng nâng cao tính đàn hồi, độ bền kéo, chống lan truyền vết nứt cho vành đá xi măng trám giếng khoan dầu khí có thành phần phù hợp là sợi 0,75% và hạt 6 - 6,5%.

Tài liệu tham khảo

- [1] M.J. Thiercelin, B. Dargaud, J.F. Baret, and W.J. Rodriguez, "Cement design based on cement mechanical response", *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 5 - 8 October 1997*. DOI: 10.2118/38598-MS.
- [2] Susan Petty, John Gastineau, Daniel L. Bour, and Kris Ravi, "Life cycle modeling of wellbore cement systems used for enhanced geothermal system development", *Proceedings of the 28th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, 27 - 29 January, 2003*.
- [3] Erik B. Nelson and Dominique Guillot, *Well cementing*. Schlumberger, 2006.
- [4] J. Liu and C. Vipulanandan, "Failure modes of oil well cement during service life", 2012.
- [5] Narjes Jafariesfad, Mette Rica Geiker, Yi Gong, Pål Skalle, Zhiliang Zhang, and Jianying He, "Cement sheath modification using nanomaterials for long-term zonal

isolation of oil wells: Review”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 156, pp. 662 - 672, 2017. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.06.047.

[6] Catalin Teodoriu, Christian Kosinowski, Mahmood Amani, Jerome Schubert, and Arash Shadravan, “Wellbore integrity and cement failure at HPHT conditions”, *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, Volume 2, Issue 2, pp.1 - 13, 2013.

[7] H. Williams, D. Khatri, R. Keese, S. Le Roy-Delage, J. Roye, D. Leach, P. Rottler, O. Porcherie, and J. Rodriguez, “Flexible, expanding cement system (FECS) successfully provides zonal isolation across marcellus shale gas trends”, *Canadian Unconventional Resources Conference, Calgary, Alberta, Canada, 15 - 17 November 2011*. DOI: 10.2118/149440-MS.

[8] Sylvaine Le Roy-Delage and Marc Thiercelin, “Cementing compositions and applications of such

compositions for cementing oil wells or the like”, *United States Patent*, US 6742592 B1, 2004.

[9] Sylvaine Le Roy-Delage and Simon James, “Flexible cementing compositions and methods for high-temperature wells”, *United States Patent*, US 7402204 B2, 2008.

[10] Marita L. Berndt, and Aristodimos J. Philippacopoulos, “Incorporation of fibres in geothermal well cements”, *Geothermics*, Volume 31, Issue 6, pp. 643 - 656, 2002. DOI: 10.1016/S0375-6505(02)00028-7.

[11] Zoi S. Metaxa, Maria S. Konsta-Gdoutos, and Surendra P. Shah, “Mechanical properties and nanostructure of cement-based materials reinforced with carbon nanofibers and Polyvinyl Alcohol (PVA) microfibers”, *Advances in the Material Science of Concrete - Session at the ACI Spring 2010 Convention*, pp. 115 - 126, 2010.

STUDY ON THE FORMULATION OF ADDITIVES TO IMPROVE ELASTICITY, TENSILE STRENGTH, AND CRACK PROPAGATION RESISTANCE OF THE CEMENT SHEATH IN OIL AND GAS WELL CEMENTING

Nguyen Thi Kim Dung¹, Nguyen Van Ngo¹, Do Thanh Trung¹, Hoang Anh Dung¹, Ngo Thi Nguyen¹, Ta Van Thinh²

¹PVChem - Tech Co., Ltd.

²NIPI, Vietsovpetro

Email: dungntk01@pvchem.com.vn

Summary

This study focuses on developing a composite additive system to improve the elasticity, tensile strength, and crack propagation resistance of the cement sheath in oil and gas well cementing. The primary materials used are nitrile rubber particles and alkali-resistant glass fibers, selected based on their appropriate particle size distribution and fiber dimensions that minimally affect the rheological properties of cement slurry.

As a result, the study successfully established a composite additive system comprising 0.75% alkali-resistant glass fibers and 6 - 6.5% nitrile rubber particles that effectively enhances the elasticity, tensile strength, and crack propagation resistance of the cement sheath in oil and gas cementing. After surface modification with dispersing agent, the composite additives demonstrated the ability to increase the tensile strength-to-elastic modulus ratio, enabling the cement sheath to better withstand long-term stress in downhole oil and gas well environments. Additionally, the impact strength of the cement sheath containing the composite additives was significantly higher compared to samples without additives.

Key words: Technology, drilling, materials, cement plug, additives, fibers, granules.