



Nghiên cứu phát triển vật liệu composite trên nền epoxy gia cường bằng SiO₂ ứng dụng trong xử lý áp suất giữa các cột ống chống

Development of SiO₂ reinforced epoxy composites for treatment of annular casing pressure (ACP) in oil and gas production wells

Lê Văn Chung^{1*}, Dương Quốc Trung¹, Tăng Đức Nhiên¹, Trần Viết Hoàng², Đào Quốc Tuy¹

¹ Khoa Kỹ thuật Hóa học, Trường Hóa và Khoa học Sự sống, Đại học Bách Khoa Hà Nội, số 1 Đại Cồ Việt, Hà Nội, Việt Nam

² Công ty TNHH PVChem-Tech, Tòa nhà Viện Dầu khí, 167 Trung Kính, Phường Yên Hòa, Hà Nội, Việt Nam

* Email: chung.lv252868M@sis.hust.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 12/08/2026

Accepted: 31/08/2026

Published: 30/09/2026

Keywords:

Epoxy composite; SiO₂; ACP; compressive strength; well squeeze.

ABSTRACT

This study develops a cycloaliphatic epoxy (EEC)/PACM composite reinforced with amorphous SiO₂ for treating annular casing pressure (ACP) in oil and gas wells. The epoxy equivalent weight of EEC, measured by HBr/CH₃COOH titration, was 190.06 g/eq, yielding a stoichiometric EEC:PACM mass ratio of 100:27.67. Four formulations (ES0–ES3) varied SiO₂ content (0, 5, 10 wt%) and 2-ethyl-4-methylimidazole (2E4MI) accelerator (0, 2 phr). Materials were characterized by FT-IR, XRD, SEM and DSC/TGA; rheology, thickening time and compressive strength were assessed at 110 °C, 47 MPa using a Fann Model 35, HPHT consistometer and UCA. Formulation ES2 (5 wt% SiO₂ + 2 phr 2E4MI) proved optimal within the range studied, with a thickening time of 4h40 matching miocene squeeze operations and a 24 hour compressive strength of 19.7 MPa, nearly four times that of neat epoxy (5.1 MPa). These results support the composite as a promising alternative to conventional cement and polymer gel systems for ACP remediation.

Giới thiệu chung

Áp suất bất thường trong khoảng không vành xuyên giữa các cột ống chống là vấn đề nghiêm trọng ảnh hưởng đến toàn vẹn giếng khoan dầu trong công tác khai thác và huỷ giếng. Hiện tượng này xảy ra dòng chảy áp suất cao (khí, dầu, nước vỉa) di chuyển qua khe nứt vi mô trong lớp xi măng trám hoặc khuyết tật cột ống chống, tích tụ trong vành xuyên và làm gia tăng nguy cơ mất kiểm soát giếng. Riêng khu vực Vịnh Mexico đã ghi nhận trên 11.000 cột ống chống của hơn 8.000 giếng bị ACP, ~30% phải xin miễn trừ đặc biệt để tiếp tục khai

thác [1]. Tại Việt Nam, nhiều mỏ dầu khí bước vào giai đoạn khai thác cuối đời, số giếng bị ACP tăng nhanh, Bộ Công thương đã quy định nghiêm ngặt về triệt huỷ áp suất giữa các cột ống chống, vấn đề này đặt ra yêu cầu cấp bách phát triển giải pháp trám xử lý hiệu quả về kỹ thuật, kinh tế và an toàn dài hạn.

Các giải pháp truyền thống dựa trên bơm ép xi măng Portland Loại G, xi măng siêu mịn và gel polymer qua kỹ thuật squeeze đều có hạn chế [2]. Xi măng Portland (kích thước hạt 30–100 µm) không xâm nhập được khe nứt vi mô dưới 120 µm, con đường rò rỉ chính của ACP [3]. Xi măng siêu mịn (d₅₀ = 3–7 µm) xâm nhập tốt hơn

nhưng giá thành cao, độ nhớt tăng nhanh ở đáy giếng và độ bền kém khiến lớp trám dễ nứt lại dưới tải trọng, ngoài ra còn nhanh bị co ngót [4]. Gel polymer có tính linh động tốt song độ bền cơ học thấp, khó duy trì hiệu quả bít nứt dài hạn [5]. Khi cần trám toàn bộ chiều dài vành xuyên (không chỉ khe nứt cục bộ), khối lượng hóa phẩm có thể lên 2 m³/giếng, đẩy chi phí lên rất cao [6]. Hệ composite trên nền epoxy gia cường SiO₂ ra đời là hướng tiềm năng đáp ứng đồng thời 3 yêu cầu trên. Epoxy sau đóng rắn có độ bền cơ học cao, co ngót thấp, bám dính tốt với thép và đá vữa, kháng hóa chất và chịu nhiệt tốt [4, 5]. SiO₂ dạng silica fume với diện tích bề mặt riêng lớn và mật độ nhóm silanol (–Si–OH) bề mặt cao tạo tương tác lý hóa mạnh với nền epoxy amine [7]. Việc bổ sung SiO₂ ở tỉ lệ phù hợp không chỉ nâng cao độ bền nén và mô-đun đàn hồi mà còn cho phép điều chỉnh độ nhớt, thời gian đặc quánh và cấu trúc xốp của khối trám vừa đủ độ đàn hồi chịu tải trọng chu kỳ, vừa giữ tính xốp để có thể khoan phá về sau bằng lưỡi khoan thông thường cân bằng mà xi măng Portland vốn cứng và giòn không đáp ứng đồng thời [8].

So với các loại hạt rắn vô cơ khác (Al₂O₃, TiO₂, CaCO₃, đất sét, CNT, graphene), SiO₂ có nhiều ưu điểm nổi bật: nhẹ hơn Al₂O₃/TiO₂ (2,2 vs ~4,0 g/cm³), phân tán tốt trong nền hữu cơ; kiểm soát độ nhớt tốt hơn đất sét lớp mỏng ở hàm lượng cao; giá thành thấp hơn các nano carbon, trơ điện (không gây nhiễu phép đo giám sát giếng) và trơ hóa học với dung dịch khoan gốc nước/dầu [8]. Silica fume sản phẩm phụ công nghiệp luyện ferrosilicon còn có giá thành thấp và sẵn có tại thị trường trong nước.

Sự kết hợp giữa epoxy cycloaliphatic và SiO₂ vì thế đại diện cho một hướng nghiên cứu mới, quan trọng và có tính khả thi cao ở Việt Nam trong lĩnh vực vật liệu trám xử lý ACP đáp ứng đồng thời 3 yêu cầu then chốt: (i) khả năng bơm ép và xâm nhập cao nhờ độ nhớt thấp; (ii) độ bền cơ học và độ bền hóa học vượt trội so với xi măng, chịu được môi trường vữa; (iii) khả năng khoan phá về sau nhờ kiểm soát được cấu trúc vi xốp qua hàm lượng SiO₂. Các nghiên cứu trên thế giới cho thấy composite epoxy/SiO₂ có thể đạt độ bền nén cao và tăng đáng kể so với epoxy thông thường, duy trì độ bền nén và ổn định nhiệt tốt trong dải 80–150 °C tương ứng các tầng địa chất trong cấu trúc các giếng tại Việt Nam [7, 9, 10].

Hệ epoxy được lựa chọn là loại cycloaliphatic (EEC) đóng rắn bằng amine cycloaliphatic PACM, với chất xúc tiến 2-ethyl-4-methylimidazole (2E4MI). So với DGEBA truyền thống, EEC có độ nhớt ban đầu thấp (~15–20 cP) cho phép bơm ép qua đường ống nhỏ; không chứa nhân thơm và nhóm hydroxyl bậc 2, nên kháng UV/nhiệt/hóa chất vượt trội, T_g sau đóng rắn cao phù hợp đáy giếng nhiệt độ cao; cho phép điều chỉnh cân

bằng độ cứng/dẻo dai qua hàm lượng SiO₂. EEC hiện đang được nghiên cứu rộng rãi làm nền cho các composite epoxy trong ứng dụng công nghiệp và điện, hướng phát triển mới sử dụng trong công nghiệp dầu khí còn ít, vì vậy nghiên cứu trên cơ sở tổng quan và phát triển từ cơ sở đóng rắn của epoxy để chế tạo được hệ vật liệu vừa chịu tải tốt vừa dễ khoan phá về sau [11, 12]. Nghiên cứu này tập trung: (i) xác định EEW thực tế của EEC để tính chính xác tỉ lệ pha; (ii) khảo sát ảnh hưởng độc lập của SiO₂ và 2E4MI qua bốn đơn phối trộn; (iii) xác lập đơn tối ưu cho công tác trám ép ACP cho đối tượng miocen trên và miocen dưới. So với các hệ epoxy sealant xử lý toàn vẹn giếng đã được công bố gần đây, phần lớn cũng dựa trên nền nhựa DGEBA có thể ở dạng nguyên bản đóng rắn bằng amine thơm [3], hoặc biến tính thêm bằng dầu thực vật epoxy hóa để cải thiện tính chất [5], hệ EEC/PACM/SiO₂ trong nghiên cứu này có ưu thế về độ nhớt ban đầu thấp và khả năng điều chỉnh độ bền nén qua hàm lượng SiO₂, nhưng việc so sánh định lượng trực tiếp về độ bền nén, độ bền hóa học và độ bền lâu dài vẫn cần các nghiên cứu đối chứng trên cùng điều kiện thử nghiệm để làm rõ hơn tính mới của vật liệu.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Hóa chất và tỷ lệ phối trộn

Các hóa chất sử dụng liệt kê tại Bảng 1. Tỉ lệ pha EEC/PACM được xác định trên cơ sở cân bằng đương lượng hóa học 1:1 giữa nhóm epoxide và hydro hoạt tính: PACM/EEC = AHEW/EEW = 52,58/190,06 ≈ 0,2767, tức 100 g EEC pha với 27,67 g PACM.

Bảng 1: Danh mục và đặc điểm của các hóa chất sử dụng trong nghiên cứu

Vai trò	Tên hóa học (viết tắt)	Đặc điểm chính (ở 25 °C)
Epoxy nền	3,4-Epoxy cyclohexylmethyl-3',4'-epoxycyclohexane carboxylate (EEC, C ₁₄ H ₂₀ O ₄)	η = 19 cP; ρ = 1,14 g/cm ³ ; EEW = 190,06 g/eq
Chất đóng rắn	4,4'-Diaminodicyclohexylmethane (PACM, C ₁₃ H ₂₆ N ₂)	η = 12 cP; ρ = 0,93 g/cm ³ ; AHEW ≈ 52,58 g/eq
Chất xúc tiến	2-Ethyl-4-methylimidazole (2E4MI, C ₆ H ₁₀ N ₂)	Cố định 2 phr so với khối lượng epoxy
Bột rắn vô cơ	SiO ₂ (Silica fume)	Kích thước hạt 50–200 nm; khảo sát 0, 5, 10 wt%

Chất xúc tiến 2E4MI cố định ở 2 phr. SiO₂ dạng silica

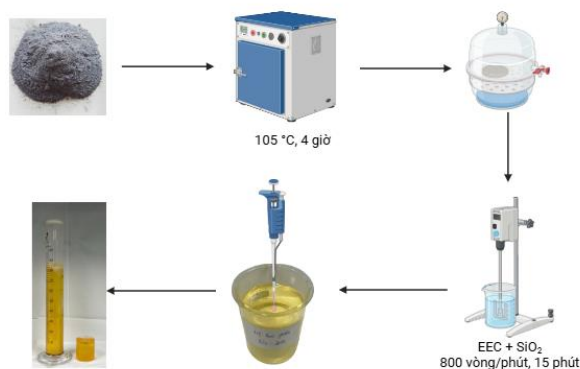
fume vô định hình (hạt sơ cấp 50–200 nm, xác nhận SEM ở Hình 2c) được khảo sát ở 0, 5 và 10 wt% so với tổng khối lượng epoxy + PACM.

Bảng 2: Tỷ lệ cấp phối các mẫu composite

Ký hiệu	EEC (g)	PACM (g)	2E4MI (phr)	SiO ₂ (wt%)
ES0	100	27,67	0	0
ES1	100	27,67	0	5
ES2	100	27,67	2	5
ES3	100	27,67	2	10

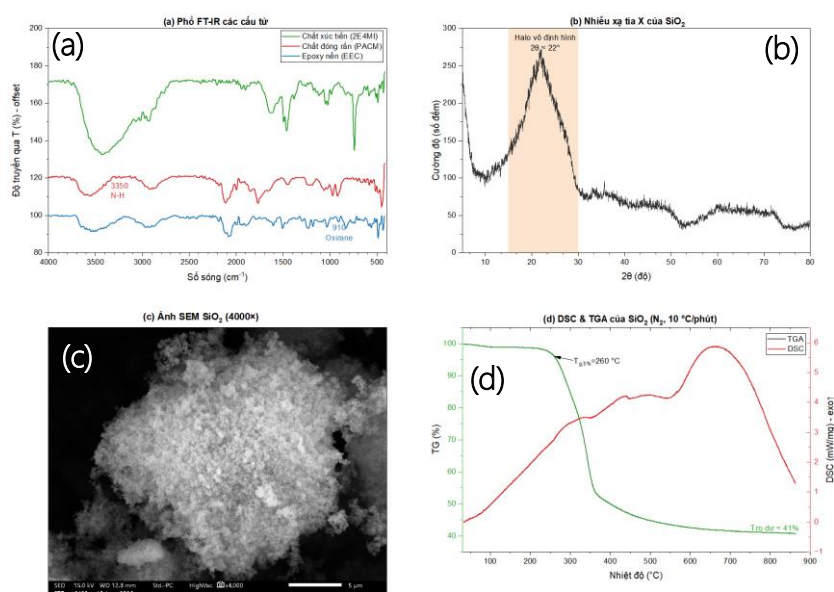
Quy trình thực nghiệm

SiO₂ được sấy ở 105 °C/4 giờ, bảo quản kín ẩm. Cân EEC và SiO₂, khuấy cơ học 800 vòng/phút trong 15 phút, sau đó phân tán đồng đều SiO₂ trong nền epoxy. Bổ sung PACM và 2E4MI đã cân sẵn, khuấy nhẹ 300 vòng/phút trong 10 phút.



Hình 1: Quy trình chế tạo composite epoxy/SiO₂ (ES0-ES3)

Các phương pháp nghiên cứu



Hình 2: Đặc trưng SiO₂ và các cấu tử: (a) FT-IR của EEC, PACM, 2E4MI; (b) XRD SiO₂; (c) SEM SiO₂ ở x4000; (d)

Nguyên liệu và vật liệu được đặc trưng cấu trúc và hình thái bằng phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FT-IR) xác định các nhóm chức đặc trưng của các cấu tử (nhóm oxirane của EEC, amine của PACM), qua đó kiểm soát độ tinh khiết hóa học trước khi phối trộn, nhiễu xạ tia X (XRD) xác nhận cấu trúc pha của bột rắn vô cơ SiO₂, kính hiển vi điện tử quét (SEM) quan sát hình thái bề mặt, phân tích kích thước hạt sơ cấp của SiO₂, phân tích nhiệt vi sai kết hợp nhiệt trọng lượng (DSC/TGA) đánh giá độ ổn định nhiệt và định lượng hàm lượng tạp chất/chất rắn dư trong SiO₂ [13].

Trên cơ sở kết quả đặc trưng, các mẫu composite được đánh giá đặc tính của vật liệu thông qua mô phỏng trên thiết bị: đặc tính lưu biến trước đóng rắn (Fann Model 35, 27 °C), thời gian đặc quánh (HPHT Consistometer Con282) và sự phát triển độ bền nén theo thời gian (UCA) [14]. Ở nghiên cứu này, thời gian đặc quánh (thickening time) được xác định là thời gian hệ epoxy đạt 100 Bc trên HPHT Consistometer, tương ứng với giới hạn mà hệ hóa phẩm không còn khả năng bơm ép. Thời gian đóng rắn (curing time) được hiểu là thời gian cần thiết để vật liệu phát triển và đạt cường độ cơ học yêu cầu. Do đó, 2 thông số được sử dụng để đánh giá lần lượt khả năng bơm ép và mức độ phát triển cường độ của hệ epoxy. Các phép đo thời gian đặc quánh và độ bền nén đều được thực hiện ở điều kiện nhiệt độ cao, áp suất cao (110 °C, 47 MPa).

Kết quả và thảo luận

Đặc trưng cấu trúc, hình thái và tính chất nhiệt của các cấu tử được trình bày tại Hình 2.

đường DSC và TGA của SiO₂ trong N₂, 10 °C/phút.

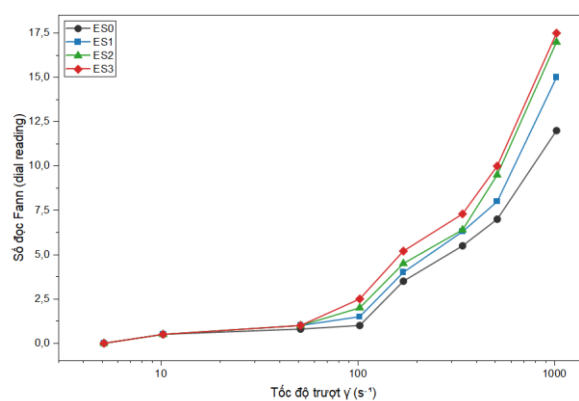
Phổ FT-IR 3 cấu tử (Hình 2a) khẳng định độ tinh khiết hóa học: EEC có đầy đủ dải đặc trưng C–H (2925, 2857 cm⁻¹), C=O ester (1725 cm⁻¹), C–O–C (1180, 1075 cm⁻¹) và đặc biệt là oxirane ở ~910 cm⁻¹; PACM cho hai dải N–H đối xứng/bất đối xứng tại 3350 và 3280 cm⁻¹, C–H cyclohexyl tại 2920 và 2848 cm⁻¹, N–H uốn ~1600 cm⁻¹; 2E4MI có dải mạnh vòng imidazole 1520–1580 cm⁻¹ và N–H tại 3120 cm⁻¹. Không xuất hiện dải lạ xác nhận nguyên liệu đủ tinh khiết cho phối trộn định lượng.

Giản đồ XRD (Hình 2b) chỉ có halo rộng tại $2\theta \approx 22^\circ$, không có đỉnh nhọn đặc trưng SiO₂ vô định hình, loại trừ pha quartz tinh thể gây giòn vật liệu và bụi silica tinh thể nguy hiểm khi khoan phá. Ảnh SEM x4000 (Hình 2c) cho thấy SiO₂ tồn tại ở dạng cluster xốp 2-5 μm , hình thành từ hạt; cấu trúc này tương tác bề mặt với nền epoxy qua nhóm silanol và tạo xốp cục bộ trong composite góp phần cho khả năng khoan phá khi cần thiết [7].

Đường TGA (Hình 2d) cho thấy mất khối lượng 4 giai đoạn: <200 °C mất ~1,1% (nước hấp phụ vật lý); 200–330 °C mất ~17,5% (nước hóa học và chất hữu cơ bay hơi); 330–430 °C mất 30,2% với đỉnh DTG cực đại, tương ứng quá trình phân hủy nhiệt của carbon dư và các hợp chất hữu cơ còn sót lại trong môi trường khí trơ N₂ (tạp chất phổ biến trong silica fume công nghiệp từ luyện ferrosilicon); sau 540 °C ổn định ở ~41% (phần khối lượng còn lại, sơ bộ quy cho SiO₂ và tro dư). Do phép đo được thực hiện trong khí N₂ (môi trường trơ, không có oxy), quá trình mất khối lượng này về bản chất là phân hủy nhiệt chứ không phải cháy.

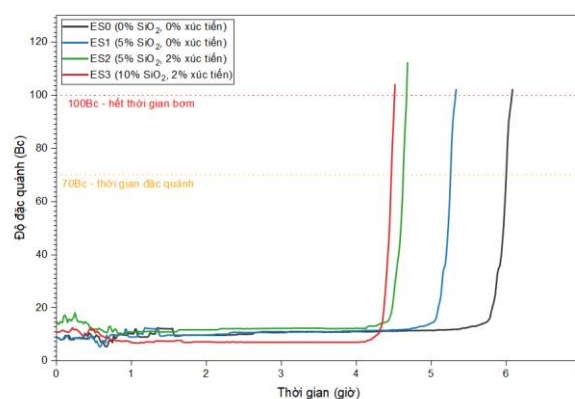
Đường DSC có đỉnh tỏa nhiệt tại ~667 °C, phù hợp với quá trình phân hủy nhiệt của carbon dư hoặc chuyển pha của tạp chất còn lại trong silica fume dưới điều kiện khí trơ N₂; do phép đo thực hiện trong N₂ (không có oxy), đây không phải là quá trình cháy theo đúng nghĩa hóa học, mà là phân hủy/chuyển hóa nhiệt trong môi trường trơ. Trên cơ sở đó, hàm lượng SiO₂ thực có thể chỉ chiếm khoảng 41% khối lượng silica fume sử dụng, tức các con số 5 và 10 wt% khảo sát trong nghiên cứu này ứng với silica fume thô ở dạng cấp thương mại. Ước tính này dựa trên TGA/DSC đơn thuần và mang tính sơ bộ; để khẳng định chắc chắn thành phần hóa học và định lượng chính xác tỉ lệ tạp chất, cần bổ sung các phân tích như XRF hoặc ICP trong nghiên cứu tiếp theo. Kết quả cho thấy cần nung tiền xử lý silica fume (500 °C, không khí, 2 giờ) để loại tạp chất trước khi phối trộn; tuy nhiên việc hệ vẫn đạt độ bền nén 19,7 MPa với silica fume chưa qua xử lý cho thấy ưu điểm về mặt công nghiệp không yêu cầu bước tiền xử lý tốn kém.

Đặc tính lưu biến ở 27 °C của 4 đơn (Hình 3) cho thấy cả bốn mẫu ứng xử gần Newtonian ở tốc độ trượt trung bình cao ($\dot{\gamma} > 100 \text{ s}^{-1}$), và thể hiện tính phi Newtonian nhẹ ở tốc độ thấp. Số đọc Fann tại 300 vòng/phút tăng đều theo hàm lượng SiO₂ và có mặt chất xúc tiến: ES0 = 7; ES1 = 8 (do 5 wt% SiO₂); ES2 = 9,5 (do bổ sung 2 phr 2E4MI); ES3 = 10 (do tăng SiO₂ lên 10 wt%). Độ nhớt dẻo PV = $\theta_{600} - \theta_{300}$ và ứng suất trượt tới hạn YP = $2\theta_{300} - \theta_{600}$ theo mô hình Bingham lần lượt là ES0 (5 cP; 2,0 lb/100 ft²), ES1 (7; 1,0), ES2 (7,5; 2,0), ES3 (7,5; 2,5). Các giá trị này thấp hơn nhiều so với xi măng Portland Loại G ở điều kiện tương tự công bố, cho thấy hệ composite có khả năng bơm ép rất tốt vào các khe nứt nhỏ và khe nứt lớn hơn, đây là ưu điểm quan trọng so với xi măng truyền thống.



Hình 3: Đồ thị lưu biến của các hỗn hợp epoxy/SiO₂ trước đông rắn (Fann Model 35, 27 °C).

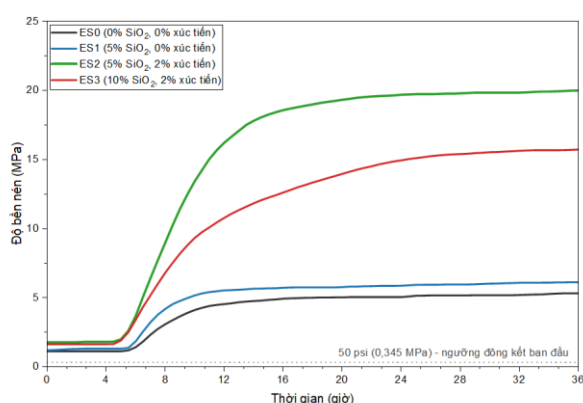
Xu hướng tăng nhẹ PV theo hàm lượng SiO₂ phản ánh sự gia tăng ma sát nội tại do hạt gia cường. Biến đổi lưu biến giữa ES2 và ES3 tương đối nhỏ ($\Delta YP = 0,5 \text{ lb}/100 \text{ ft}^2$), tuy chưa đủ khẳng định hiện tượng kết tụ, nhưng tỉ lệ thuận với xu hướng giảm độ bền cơ học ở ES3 sẽ trình bày ở phần thảo luận UCA dưới đây.



Hình 4: Sự phát triển độ đặc quánh của bốn đơn ở điều kiện nhiệt độ cao, áp suất cao (110 °C, 47 MPa).

Hình 4 cho thấy diễn biến độ đặc quánh của 4 đơn ở 110 °C, 47 MPa. Các đường cong đều có giai đoạn đầu kéo dài dưới 12 Bc (thuận lợi cho bơm ép), tiếp theo là chuyển tiếp nhanh vượt qua các mức 30, 70, 100 Bc trong vài chục phút. Thời gian đạt 100 Bc lần lượt: ES0 = 6h04, ES1 = 5h19, ES2 = 4h40 và ES3 = 4h30.

So sánh ES0/ES1 cho thấy SiO₂ cũng rút ngắn thời gian đặc quánh ~45 phút, có thể do nhóm silanol bề mặt xúc tác nhẹ phản ứng mở vòng epoxide amine [6]; tuy nhiên đây là suy luận gián tiếp từ số liệu công nghệ (thời gian đặc quánh), chưa có bằng chứng trực tiếp (ví dụ DSC trước/sau đóng rắn, FT-IR sau đóng rắn, hoặc phân tích gel fraction) về mức độ chuyển hóa epoxy hay động học đóng rắn; đây là hướng cần bổ sung trong nghiên cứu tiếp theo. Tác động chính đến từ 2E4MI: ES1 → ES2 (cùng 5 wt% SiO₂, khác 2E4MI) rút ngắn thêm 39 phút; tăng SiO₂ 5 → 10 wt% (ES2 → ES3) chỉ giảm thêm 10 phút. Yêu cầu thực tế trám ép tầng miocen đòi hỏi thời gian đặc quánh dưới 5 giờ để đảm bảo bơm hết khối lượng nhưng không quá ngắn gây rủi ro đông kết sớm trong đường ống; đơn ES2 (4h40) nằm đúng cửa sổ công nghệ, ES0 (6h04) quá dài, ES1 (5h19) nằm ở cận trên rủi ro [15].



Hình 5: Sự phát triển độ bền nén của 4 đơn composite trên UCA (Fann, 110 °C).

Đường cong UCA (Hình 5) có dạng sigmoid 3 giai đoạn: độ nhớt thấp 5–7 giờ, tăng dốc (tốc độ hình thành mạng lưới cực đại), ổn định. Độ bền nén sau 24 giờ theo thứ tự ES2 (19,7 MPa) > ES3 (14,9 MPa) > ES1 (5,9 MPa) ≈ ES0 (5,1 MPa). Bản chất được thể hiện thông qua 3 cơ chế như sau:

(i) Ảnh hưởng của SiO₂ (ES0 → ES1, không xúc tiến) chỉ cải thiện ~16%. Điều này cho thấy nếu không có xúc tiến, phản ứng EEC/PACM ở 110 °C chưa hoàn tất trong 24 giờ để phát huy gia cường; mạng polymer chưa đủ đặc để ‘khóa’ hạt SiO₂ vào pha nền, làm hạn chế cơ chế cải thiện tải trọng thông qua dạng polymer/silica [8].

(ii) Tác dụng của 2E4MI là quyết định: ES1 → ES2 (cùng 5 wt% SiO₂, chỉ khác 2E4MI) làm độ bền nén tăng 3,3 lần (5,9 → 19,7 MPa) - 2E4MI vừa rút ngắn thời gian đóng rắn (đã trình bày ở phần Thời gian đặc quánh) vừa

được suy luận là góp phần thúc đẩy mật độ khâu mạch đủ cao trong 24 giờ, qua đó có thể góp phần vào ba cơ chế gia cường thường được ghi nhận trong tài liệu tham khảo: (a) truyền tải trọng qua giao diện bám dính chặt, (b) hạn chế chuyển động phân tử mạch polymer vùng gần bề mặt hạt, (c) chuyển hướng vết nứt khi có tác động cơ học [7, 9].

(iii) Tăng SiO₂ 5 → 10 wt% (ES2 → ES3) làm giảm độ bền nén 24% (19,7 → 14,9 MPa). Ở hàm lượng cao, sự phân tán không hoàn hảo dẫn đến kết tụ cục bộ, tạo khuyết tật và ứng suất tập trung làm giảm hiệu quả truyền tải trọng. Trong phạm vi hàm lượng khảo sát (0, 5, 10 wt%), 5 wt% do đó là điểm cân bằng tối ưu giữa gia cường và độ đồng nhất phân tán, phù hợp với xu hướng chung ghi nhận cho composite epoxy/SiO₂ [7, 9].

Trong bối cảnh ứng dụng: so với epoxy nền không gia cường (5,1 MPa), đơn ES2 đạt độ bền cơ học cao hơn rõ rệt (gần 4 lần), đồng thời duy trì độ nhớt bơm ép thấp và thời gian đặc quánh nằm trong cửa sổ công nghệ được xác định là đơn tối ưu trong phạm vi các điều kiện khảo sát cho công nghệ trám ép xử lý bơm ép vào khoảng không gian vành xuyên cho đối tượng trám là miocen.

Độ bền nén 19,7 MPa đạt được ở mức khối lượng silica fume là 5 wt%, tương ứng SiO₂ thực ước tính chỉ khoảng 2 wt%, dựa trên kết quả TGA sơ bộ cho thấy silica fume có thể chứa đến ~59% tạp chất (cần xác nhận thêm bằng XRF/ICP như đã nêu ở trên). Hiệu quả gia cường trên đơn vị khối lượng SiO₂ thực rất cao nếu sử dụng silica fume đã nung tiền xử lý loại tạp chất, độ bền nén tiếp tục tăng đáng kể. Đây là hướng đầy hứa hẹn cho các nghiên cứu tiếp theo, đồng thời khẳng định tiềm năng ứng dụng thực tế của hệ composite epoxy/SiO₂ trong công nghệ trám xử lý ACP cho các mỏ dầu khí Việt Nam.

Kết luận

Đã chế tạo thành công hệ composite trên nền epoxy cycloaliphatic (EEC)/PACM gia cường bằng SiO₂ vô định hình nhằm ứng dụng trong xử lý áp suất giữa các cột ống chống (ACP) tại các giếng khai thác dầu khí. Kết quả phân tích đặc trưng nguyên liệu cho thấy EEC có EEW = 190,06 g/eq (xác định bằng chuẩn độ HBr/CH₃COOH), cho phép thiết lập tỉ lệ pha EEC:PACM = 100:27,67 theo cân bằng đương lượng chính xác. SiO₂ sử dụng thuộc dạng vô định hình (XRD tại 2θ ≈ 22°), kết tụ thành các cluster xếp.

Cả 4 đơn phối trộn ES0–ES3 được khảo sát ở điều kiện mô phỏng đáy giếng (110 °C, 47 MPa) theo tiêu chuẩn API. Kết quả thử nghiệm cho thấy đơn ES2 (5 wt% SiO₂ + 2 phr 2E4MI) đạt độ bền nén 24 giờ là 19,7 MPa, cao gấp 3,3 lần so với hệ không có xúc tiến (ES1: 5,9 MPa); thời gian đặc

quánh 4h40 nằm trong trám ép tầng miocen; độ nhớt thấp, phù hợp yêu cầu xâm nhập vành xuyên [15].

Với độ bền nén cao cùng với việc duy trì tính linh động trong giai đoạn bơm ép, hệ ES2 được lựa chọn là đơn tối ưu trong phạm vi các điều kiện khảo sát, có tiềm năng ứng dụng trong công nghệ trám xử lý ACP tại các giếng khai thác dầu khí ở Việt Nam. Nghiên cứu tiếp theo cần theo dõi sự phát triển cường độ theo thời gian (ví dụ 7, 14, 28 ngày), đánh giá độ bền sau lão hóa nhiệt và trong môi trường nước muối, khả năng ngăn dòng/độ thấm, khả năng chịu chu kỳ nhiệt-áp suất, so sánh trực tiếp với xi măng G ở cùng điều kiện 110 °C, 47 MPa để đánh giá khách quan hiệu quả của hệ composite so với vật liệu truyền thống, cũng như ảnh hưởng khi có sự nhiễm bẩn với dung dịch khoan, đánh giá độ bền lâu dài trong môi trường vỉa thực tế chứa H_2S/CO_2 [16].

Tài liệu tham khảo

1. Y. Jing, T. Wang, B. Zhang, Y. Zheng, X. Li, N. Lu, Chem. Technol. Fuels Oils, 61(1) (2025) 110–119. <https://doi.org/10.1007/s10553-025-01844-9>
2. V.H. Tran, Q.T. Dao, M.H. Le, Vietnam J. Catal. Adsorpt., 14(3) (2025) 145–149. <https://doi.org/10.62239/jca.2025.053>
3. M. Alkhamis, A. Imqam, M. Milad, Proceedings of the SPE Symposium: Decommissioning and Abandonment, SPE (2019). <https://doi.org/10.2118/199184-MS>
4. S. Ab Rahman, A.L. Pang, A. Arsad, A. Sidek, A. Saidu, N. Awang, R. Mohsin, M. Abdurrahman, Rev. Chem. Eng., 39(5) (2023) 857–873. <https://doi.org/10.1515/revce-2022-0003>
5. Y. Tian, Y. Liu, H. Dong, X. Liu, J. Huang, Gels, 11(7) (2025) 482. <https://doi.org/10.3390/gels11070482>
6. M. Alkhamis, A. Imqam, J. Pet. Explor. Prod. Technol., 11 (2021) 2791–2804. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01218-x>
7. P. Uniyal, P. Gaur, J. Yadav, N.A. Bhalla, T. Khan, H. Junaedi, T.A. Sebaey, ACS Omega, 10 (2025) 15810–15839. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c10073>
8. A.A. Rajhi, Polymers, 14(22) (2022) 4852. <https://doi.org/10.3390/polym14224852>
9. W. Chen, Y. Liu, Z. Jiang, L. Tang, Z. Liu, L. Zhou, Materials, 12(23) (2019) 3897. <https://doi.org/10.3390/ma12233897>
10. R. Xia, J. Xi, Z. Zhang, Y. He, Z. Yu, Polymers, 15(7) (2023) 1756. <https://doi.org/10.3390/polym15071756>
11. Y. Qin, S. Zhang, S. Han, T. Xu, C. Liu, M. Xi, X. Yu, N. Li, Z. Wang, ACS Omega, 6(23) (2021) 15523–15531. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02108>
12. J. Liu, J. Qin, X. Cui, M. Shi, D. Wang, Y. Zhu, W. Li, L. Liang, C. Yang, Ind. Eng. Chem. Res., 63(13) (2024) 5977–5985. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c04663>
13. G. Nikolic, S. Zlatkovic, M. Cakic, S. Cakic, C. Lacnjevac, Z. Rajic, Sensors, 10(1) (2010) 684–696. <https://doi.org/10.3390/s100100684>
14. A. Anya, S. Emadibaladehi, M. Watson, J. Pet. Sci. Eng., 183 (2019) 106387. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106387>
15. T.Y. Hoang, D.D. Pham, H.Y.T. Le, T.H. Vu, X.H. Tran, Q.T. Dao, Vietnam J. Catal. Adsorpt., 14(2) (2025) 98–103. <https://doi.org/10.62239/jca.2025.028>
16. M.C.M. Nasvi, P.G. Ranjith, J. Sanjayan, Appl. Energy, 102 (2013) 1391–1398. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.004>