

Hoạt hóa bề mặt cát thạch anh bằng plasma không cân bằng nhiệt độ thấp và ảnh hưởng của nó đến tính chất cơ lý của vữa xi măng

Trần Thị Mộng Thu¹, Vũ Kim Diễm^{2*}

¹ Trường Đại học Văn Lang

² Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng

TỪ KHOÁ

Plasma
Cát thạch anh
SEM
Raman
Cường độ nén
Cường độ uốn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của quá trình hoạt hóa bề mặt cát thạch anh bằng plasma không cân bằng nhiệt độ thấp đến tính chất cơ lý của vữa xi măng. Cát thạch anh được xử lý trong môi trường không khí ở áp suất thường bằng thiết bị plasma nhiệt độ thấp, sau đó được sử dụng làm cốt liệu trong cấp phối vữa xi măng. Sự thay đổi đặc trưng của vật liệu trước và sau xử lý được khảo sát thông qua kính hiển vi điện tử quét (SEM), phổ tán xạ Raman, thời gian đông kết và các chỉ tiêu cơ học gồm cường độ nén và cường độ uốn. Kết quả SEM cho thấy xử lý plasma làm tăng độ nhám bề mặt, hình thành nhiều hốc vi mô và các vị trí hoạt tính trên hạt cát. Phân tích Raman ghi nhận sự gia tăng cường độ các đỉnh đặc trưng của liên kết Si-O-Si, chứng tỏ hiệu quả hoạt hóa bề mặt của plasma. Việc sử dụng cát thạch anh xử lý plasma làm giảm thời gian bắt đầu đông kết 13,5% và thời gian kết thúc đông kết 11,9% so với mẫu đối chứng. Đồng thời, cường độ nén và cường độ uốn của vữa đều tăng ở tất cả các tuổi khảo sát; tại 28 ngày, mức tăng lần lượt đạt khoảng 18,5% và 19,4%. Kết quả nghiên cứu khẳng định plasma không cân bằng nhiệt độ thấp là phương pháp hoạt hóa hiệu quả đối với cát thạch anh và mở ra triển vọng ứng dụng trong sản xuất vật liệu xây dựng cường độ cao, phát triển cường độ sớm và thân thiện với môi trường.

KEYWORDS

Plasma
Quartz sand
SEM
Raman
Compressive strength
Flexural strength

ABSTRACT

This study evaluates the effect of low-temperature non-thermal plasma treatment on the surface activation of quartz sand and its influence on the physico-mechanical properties of cement mortar. Quartz sand was treated in air under atmospheric pressure using a low-temperature plasma device and subsequently employed as fine aggregate in cement mortar mixtures. Changes in the material characteristics before and after treatment were investigated through scanning electron microscopy (SEM), Raman spectroscopy, setting time measurements, and mechanical performance tests, including compressive and flexural strength evaluations. SEM observations revealed that plasma treatment increased surface roughness and generated numerous microcavities and active sites on the sand particles. Raman analysis indicated an increase in the intensity of the characteristic Si-O-Si bond peaks, confirming the effectiveness of plasma-induced surface activation. The incorporation of plasma-treated quartz sand reduced the initial and final setting times by 13.5% and 11.9%, respectively, compared with the control mixture. In addition, both compressive and flexural strengths increased at all curing ages investigated; at 28 days, the corresponding improvements reached approximately 18.5% and 19.4%. The results confirm that low-temperature non-thermal plasma is an effective method for activating the surface of quartz sand and demonstrates considerable potential for application in the production of high-strength, early-strength, and environmentally sustainable construction materials.

1. Mở đầu

Trong những năm gần đây, cùng với xu hướng phát triển vật liệu xây dựng bền vững và công nghệ xử lý vật liệu tiên tiến, các phương pháp hoạt hóa bề mặt vật liệu bằng plasma đang thu hút sự quan tâm mạnh mẽ của các nhà khoa học trên thế giới. Plasma được xem là trạng thái thứ tư của vật chất, bao gồm hỗn hợp các electron, ion, nguyên tử và các gốc hoạt tính có năng lượng cao. Trong đó, plasma không cân

bằng nhiệt độ thấp (Low-temperature Non-thermal Plasma) là dạng plasma mà nhiệt độ của electron cao hơn rất nhiều so với nhiệt độ của các ion và hạt trung hòa. Nhờ đặc điểm này, plasma có khả năng tạo ra các phản ứng hóa học và biến đổi bề mặt vật liệu mạnh mẽ mà không làm thay đổi đáng kể cấu trúc khối của vật liệu nền [1-3].

Công nghệ plasma không cân bằng nhiệt độ thấp đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như xử lý môi trường, y sinh học, công nghiệp điện tử, vật liệu polymer và vật liệu xây dựng [2-5]. Các

*Liên hệ tác giả: kimdienxdtb@gmail.com

Nhận ngày 08/05/2026, sửa xong ngày 10/06/2026, chấp nhận đăng ngày 11/06/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2026.1398>

nghiên cứu quốc tế cho thấy quá trình xử lý plasma có khả năng làm sạch bề mặt vật liệu, tăng năng lượng bề mặt, tạo các nhóm chức hoạt tính, gia tăng độ nhám vi mô và cải thiện khả năng tương tác giữa các pha vật liệu. Đối với vật liệu silicat, đặc biệt là cát thạch anh, plasma có thể làm thay đổi trạng thái năng lượng của lớp bề mặt, thúc đẩy quá trình phản ứng với môi trường chất kết dính xi măng và nâng cao khả năng hình thành các sản phẩm thủy hóa.

Trong lĩnh vực vật liệu xây dựng, nhiều nghiên cứu đã chứng minh rằng việc hoạt hóa các vật liệu khoáng bằng plasma giúp cải thiện đáng kể các tính chất công nghệ và cơ học của vật liệu xi măng. Một số nhà nghiên cứu trên thế giới đã ghi nhận sự gia tăng cường độ nén, giảm thời gian đông kết và nâng cao độ bền lâu của bê tông khi sử dụng các loại phụ gia khoáng hoặc cốt liệu được xử lý plasma [4, 6,7]. Những kết quả này cho thấy plasma không chỉ là một công nghệ xử lý bề mặt hiệu quả mà còn là một hướng tiếp cận mới nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng các nguồn vật liệu khoáng sẵn có.

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về plasma chủ yếu tập trung vào lĩnh vực môi trường, xử lý nước, nông nghiệp và y sinh [8-10]. Trong lĩnh vực vật liệu xây dựng, số lượng nghiên cứu về ứng dụng plasma để hoạt hóa cốt liệu hoặc vật liệu khoáng vẫn còn hạn chế [2]. Đặc biệt, các nghiên cứu về xử lý cát thạch anh bằng plasma không cân bằng nhiệt độ thấp nhằm cải thiện tính chất của vật liệu xi măng hiện chưa được công bố nhiều. Trong khi đó, cát thạch anh là loại vật liệu phổ biến, có trữ lượng lớn và được sử dụng rộng rãi trong sản xuất vữa, bê tông và các vật liệu xây dựng khác. Việc nâng cao hoạt tính bề mặt của

loại vật liệu này có thể góp phần cải thiện chất lượng sản phẩm, giảm tiêu hao tài nguyên và mở rộng phạm vi ứng dụng trong thực tiễn xây dựng [11].

Mặt khác, nhu cầu phát triển các vật liệu xây dựng có cường độ cao, thời gian phát triển cường độ nhanh và tuổi thọ bền vững ngày càng trở nên cấp thiết trước yêu cầu hiện đại hóa ngành xây dựng. Do đó, việc nghiên cứu các giải pháp hoạt hóa vật liệu bằng công nghệ tiên tiến, thân thiện môi trường và tiêu thụ năng lượng thấp là hướng đi có ý nghĩa khoa học và thực tiễn quan trọng [12,13].

Từ những phân tích trên, bài báo tập trung nghiên cứu “hoạt hóa bề mặt cát thạch anh bằng plasma không cân bằng nhiệt độ thấp và ảnh hưởng của nó đến tính chất cơ lý của vữa xi măng”. Sự thay đổi của cát thạch anh sau xử lý được đánh giá thông qua SEM, thời gian đông kết, cường độ nén, cường độ uốn và phân tích phổ Raman. Kết quả nghiên cứu góp phần làm sáng tỏ cơ chế hoạt hóa bề mặt của plasma đối với cát thạch anh, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho việc ứng dụng công nghệ plasma trong sản xuất vật liệu xây dựng chất lượng cao.

2. Vật liệu, phương pháp và tỷ lệ hỗn hợp

2.1. Vật liệu

Xi măng Portland không phụ gia (C) loại CEM I 42.5N được sử dụng làm chất kết dính, đáp ứng các yêu cầu của tiêu chuẩn GOST 31108-2020. Các tính chất và đặc trưng của chất kết dính được trình bày trong Bảng 1, 2 và 3.

Bảng 1. Thành phần hóa học của xi măng CEM I 42.5N.

CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Mất khi nung (%)
62,52	22,43	3,44	5,32	2,04	0,64	0,15	3,46

Bảng 2. Thành phần khoáng của xi măng CEM I 42.5N.

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ F	Khác
56,15	22,47	5,14	11,25	4,99

Bảng 3. Tính chất của xi măng CEM I 42.5N.

Tính chất	Giá trị
Khối lượng riêng, g/cm ³	3,10
Diện tích bề mặt riêng, m ² /kg	367
Độ dẻo tiêu chuẩn, %	26,1
Thời gian đông kết: bắt đầu/kết thúc (phút)	115/226
Cường độ nén ở tuổi 28 ngày, MPa	48,2

Ngoài ra, các vật liệu khác bao gồm:

- Cát Thạch anh (SA) có khối lượng riêng 2,64 g/cm³, kích thước hạt từ 0,14 đến 1,25 mm.
- Nước trộn (W) phù hợp với tiêu chuẩn GOST 23732-2011 và TCVN 4506:2012.

2.2. Phương pháp nghiên cứu



Hình 1. Xử lý cát thạch anh bằng plasma nhiệt độ thấp.

Quá trình xử lý cát thạch anh bằng plasma được thực hiện ở áp suất thường và nhiệt độ phòng trong môi trường không khí, sử dụng thiết bị tạo plasma trong phòng thí nghiệm.

Trong quá trình xử lý, cát thạch anh được cấp vào bộ phận anot của thiết bị, tại đó các đầu phun plasma được bố trí tiếp tuyến từ bốn phía với các thông số sau:

- Lưu lượng khí mang: 0,05 l/s
- Lưu lượng vật liệu xử lý: 4,7 kg/h
- Lưu lượng thể tích khí nén (khí tạo plasma): 0,4 l/s
- Công suất nhiệt: 39 kW

Vật liệu sau xử lý plasma được khảo sát bằng kính hiển vi điện tử quét hai chùm tia FEI Quanta 200 3D tích hợp chùm ion hội tụ.

Bảng 4. Thông số của thiết bị plasma nhiệt độ thấp không cân bằng.

STT	Thông số	Giá trị
1	Điện áp đầu vào, V	110 ÷ 220
2	Dòng điện đầu vào, A	1 ÷ 2,5
3	Tốc độ xử lý, m/phút	15 ÷ 30
4	Chiều rộng vùng plasma, mm	350

2.3. Tỷ lệ hỗn hợp

Trong nghiên cứu này, hoạt tính của cát thạch anh trước và sau xử lý plasma nhiệt độ thấp được đánh giá thông qua các cấp phối vữa xi măng, được trình bày trong Bảng 5.

Bảng 5. Thành phần cấp phối vữa xi măng.

STT	Thành phần	C (xi măng)	QS (cát thạch anh)	W (nước)
CP 1	50 % xi măng + 50 % cát thạch anh không xử lý plasma	500	500	324
CP 2	50 % xi măng + 50 % cát thạch anh xử lý plasma	500	500	324

3. Kết quả và thảo luận

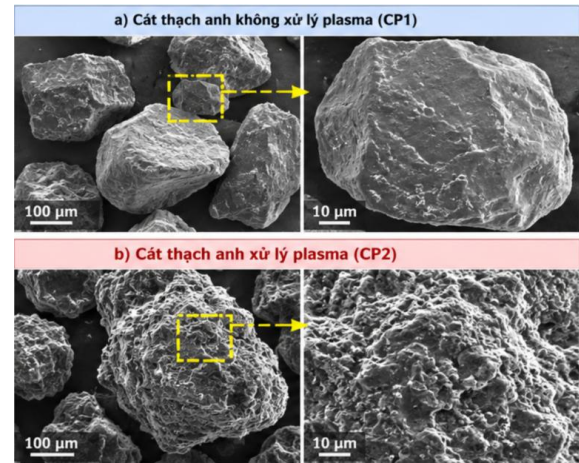
3.1. SEM

Hình 2 cho thấy sự thay đổi đáng kể về hình thái bề mặt của hạt cát thạch anh sau quá trình xử lý bằng plasma không cân bằng nhiệt độ thấp.

Đối với mẫu cát thạch anh không xử lý plasma (CP1), bề mặt hạt tương đối nhẵn, các cạnh hạt khá rõ ràng và ít xuất hiện các khuyết tật bề mặt. Ở độ phóng đại lớn hơn, bề mặt hạt có cấu trúc tương đối đặc chắc, chỉ tồn tại một số rãnh nhỏ và các vị trí gồ ghề cục bộ. Điều này cho thấy diện tích bề mặt riêng và số lượng tâm hoạt tính trên bề mặt hạt còn hạn chế. Đồng thời, sự hiện diện của các lớp hấp phụ hoặc tạp chất vô cơ bám trên bề mặt có thể làm giảm khả năng tương tác giữa cát thạch anh và hồ xi măng trong quá trình thủy hóa.

Ngược lại, mẫu cát thạch anh xử lý plasma (CP2) thể hiện sự thay đổi rõ rệt về cấu trúc bề mặt. Sau xử lý, bề mặt hạt trở nên nhám

hơn, xuất hiện nhiều hốc vi mô, rãnh ăn mòn và các khuyết tật phân bố tương đối đồng đều trên toàn bộ bề mặt. Các cạnh sắc ban đầu bị bào mòn nhẹ, đồng thời hình thành mạng lưới cấu trúc gồ ghề với mật độ vi lỗ rỗng cao hơn. Hiện tượng này là kết quả của sự bắn phá bởi các electron, ion và các gốc hoạt tính có năng lượng cao sinh ra trong vùng plasma, làm phá vỡ các liên kết yếu và loại bỏ lớp vật chất hấp phụ trên bề mặt hạt.



Hình 2. Hình ảnh SEM mẫu cát thạch anh trước và sau xử lý Plasma.

Sự gia tăng độ nhám và mật độ khuyết tật bề mặt sau xử lý plasma có ý nghĩa quan trọng đối với tính chất của vật liệu xi măng. Thứ nhất, diện tích bề mặt riêng của cát thạch anh tăng lên, làm gia tăng khả năng tiếp xúc giữa hạt cát và pha hồ xi măng. Thứ hai, các hốc vi mô và vị trí có năng lượng bề mặt cao đóng vai trò như các tâm kết tinh dị thể, tạo điều kiện thuận lợi cho sự hình thành và phát triển của các sản phẩm thủy hóa như gel C-S-H trên bề mặt hạt. Thứ ba, bề mặt nhám hơn giúp tăng cường liên kết cơ học tại vùng chuyển tiếp giữa cốt liệu và hồ xi măng (ITZ), từ đó nâng cao khả năng truyền ứng suất trong vật liệu.

3.2. Thời gian đông kết

Kết quả xác định thời gian đông kết của các cấp phối được trình bày trong Bảng 6. Có thể nhận thấy việc xử lý cát thạch anh bằng plasma không cân bằng nhiệt độ thấp đã ảnh hưởng rõ rệt đến quá trình đông kết của mẫu vữa xi măng - cát.

Bảng 6. Thời gian đông kết.

STT	Thời gian đông kết	
	Bắt đầu đông kết	Kết thúc đông kết
CP 1	3 giờ 05 phút	5 giờ 35 phút
CP 2	2 giờ 20 phút	4 giờ 55 phút

Đối với mẫu đối chứng (CP1), thời gian bắt đầu đông kết và kết thúc đông kết lần lượt là 185 phút và 335 phút. Trong khi đó, ở mẫu

sử dụng cát thạch anh xử lý plasma (CP2), các giá trị này giảm xuống còn 160 phút và 295 phút. Như vậy, thời gian bắt đầu đông kết giảm 25 phút (13,5 %), còn thời gian kết thúc đông kết giảm 40 phút (11,9 %) so với mẫu đối chứng.

Sự rút ngắn thời gian đông kết cho thấy quá trình xử lý plasma đã làm gia tăng hoạt tính bề mặt của hạt cát thạch anh. Dưới tác động của các electron, ion và gốc hoạt tính có năng lượng cao, bề mặt hạt được làm sạch khỏi các lớp hấp phụ và tạp chất, đồng thời xuất hiện nhiều vị trí có năng lượng bề mặt cao hơn. Điều này làm tăng khả năng thấm ướt của hạt cát trong môi trường hồ xi măng và tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình hình thành các sản phẩm hydrat hóa ban đầu.

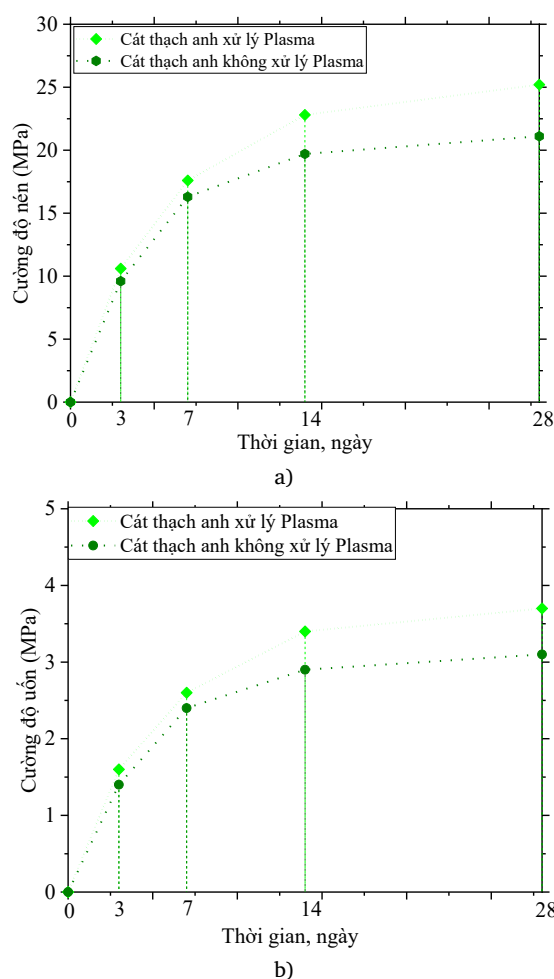
Ngoài ra, các vị trí hoạt tính được tạo thành trên bề mặt cát sau xử lý plasma có thể đóng vai trò là tâm dị thể cho sự kết tinh của các sản phẩm C-S-H và ettringite. Nhờ đó, tốc độ hình thành cấu trúc ban đầu của hệ chất kết dính được đẩy nhanh, dẫn đến sự suy giảm thời gian đông kết quan sát được trong nghiên cứu. Điều này phù hợp với kết quả phân tích ảnh SEM của cát thạch anh trước và sau xử lý plasma không cân bằng nhiệt độ thấp.

3.3. Cường độ nén-uốn

Kết quả xác định cường độ nén và cường độ uốn của các mẫu vữa sử dụng cát thạch anh trước và sau xử lý plasma được trình bày trong Hình 3.

Từ Hình 3a có thể thấy cường độ nén của hai mẫu tăng nhanh trong giai đoạn từ 3 đến 14 ngày và tiếp tục tăng chậm hơn trong khoảng từ 14 đến 28 ngày. Đối với mẫu sử dụng cát thạch anh không xử lý plasma, cường độ nén đạt khoảng 9,5 MPa ở tuổi 3 ngày, tăng lên 16,2 MPa ở tuổi 7 ngày, 19,7 MPa ở tuổi 14 ngày và đạt 21,1 MPa ở tuổi 28 ngày. Trong khi đó, mẫu sử dụng cát thạch anh xử lý plasma đạt các giá trị tương ứng khoảng 10,8 MPa; 17,5 MPa; 22,7 MPa và 25,0 MPa. So với mẫu đối chứng, cường độ nén của mẫu xử lý plasma tăng khoảng 13,7 % ở tuổi 3 ngày, 8,0 % ở tuổi 7 ngày, 15,2 % ở tuổi 14 ngày và 18,5 % ở tuổi 28 ngày. Đặc biệt, mức độ chênh lệch cường độ có xu hướng gia tăng theo thời gian dưỡng hộ, cho thấy hiệu quả của quá trình xử lý plasma không chỉ thể hiện ở giai đoạn đầu mà còn tiếp tục ảnh hưởng đến quá trình phát triển cấu trúc vi mô của vật liệu ở các tuổi sau. Bên cạnh đó, Kết quả cường độ uốn trên Hình 3b cho thấy xu hướng tương tự như cường độ nén. Mẫu đối chứng đạt cường độ uốn khoảng 1,4 MPa, 2,4 MPa, 2,9 MPa và 3,1 MPa tương ứng ở các tuổi 3, 7, 14 và 28 ngày. Đối với mẫu sử dụng cát thạch anh xử lý plasma, các giá trị này lần lượt đạt khoảng 1,6 MPa, 2,6 MPa, 3,4 MPa và 3,7 MPa. Mức tăng cường độ uốn của mẫu xử lý plasma so với mẫu không xử lý đạt khoảng 14,3 % ở tuổi 3 ngày, 8,3 % ở tuổi 7 ngày, 17,2 % ở tuổi 14 ngày và 19,4 % ở tuổi 28 ngày. Điều này chứng tỏ xử lý plasma không chỉ cải thiện khả năng chịu nén mà còn nâng cao khả năng chống nứt và khả năng chịu ứng suất kéo uốn của vật liệu. Sự gia tăng đồng thời cường độ nén và cường độ uốn của mẫu xử lý plasma có thể được giải thích thông qua sự cải thiện đặc tính bề mặt của cát

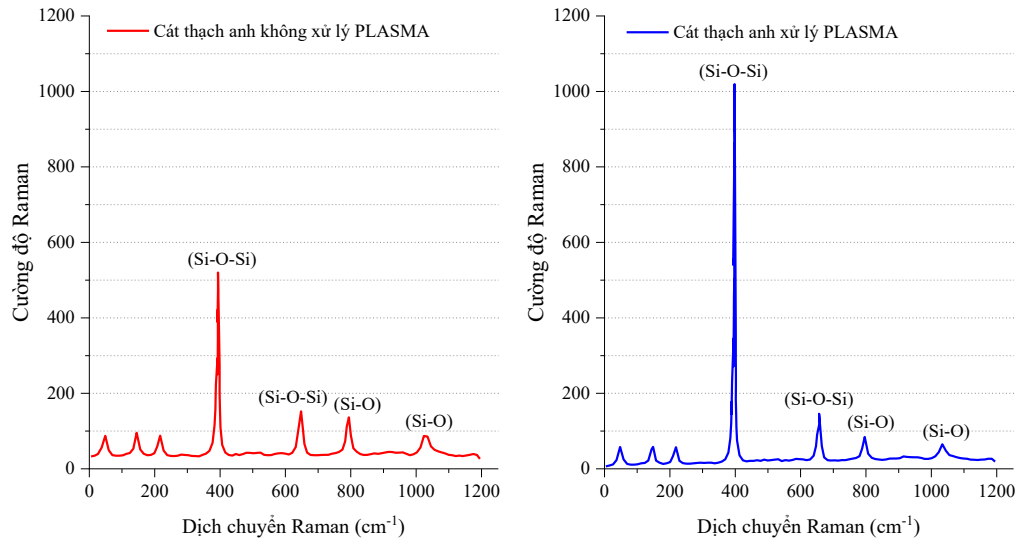
thạch anh. Kết quả SEM cho thấy bề mặt hạt cát sau xử lý xuất hiện nhiều hốc vi mô và độ nhám tăng lên, trong khi phổ Raman ghi nhận sự gia tăng cường độ các đỉnh đặc trưng của liên kết Si-O-Si. Những biến đổi này phản ánh sự gia tăng năng lượng bề mặt và số lượng vị trí hoạt tính trên hạt cát. Khi tiếp xúc với hồ xi măng, các vị trí hoạt tính này đóng vai trò là tâm kết tinh dị thể, thúc đẩy sự hình thành các sản phẩm thủy hóa, đặc biệt là gel C-S-H tại vùng chuyển tiếp giữa cốt liệu và hồ xi măng. Đồng thời, độ nhám bề mặt tăng lên cũng góp phần nâng cao khả năng liên kết cơ học giữa cốt liệu và hồ xi măng. Kết quả là cấu trúc trở nên đặc chắc hơn, khả năng truyền ứng suất được cải thiện, từ đó làm tăng cường độ nén và cường độ uốn của vật liệu.



Hình 3. Quan hệ giữa sự thay đổi cường độ nén (a) và cường độ uốn (b) của mẫu trước và sau xử lý plasma.

3.4. Tán xạ Raman

Phổ Raman của cát thạch anh trước và sau xử lý plasma được trình bày trong Hình 4. Kết quả cho thấy cả hai mẫu đều xuất hiện các đỉnh đặc trưng của cấu trúc thạch anh tinh thể, đặc biệt là đỉnh mạnh tại khoảng 394 cm^{-1} tương ứng với dao động đối xứng của liên kết Si-O-Si.



Hình 4. Phổ tán xạ Raman của cát thạch anh.

Sau xử lý plasma, cường độ đỉnh Raman tại 394 cm^{-1} tăng đáng kể và trở nên sắc nét hơn so với mẫu đối chứng. Đồng thời, các đỉnh phụ trong vùng 148 cm^{-1} , $206\text{--}265\text{ cm}^{-1}$, 665 cm^{-1} và 800 cm^{-1} cũng thể hiện tín hiệu rõ ràng hơn. Điều này cho thấy quá trình xử lý plasma đã làm thay đổi trạng thái bề mặt của vật liệu, nâng cao mức độ trật tự cấu trúc và giảm ảnh hưởng của các lớp hấp phụ hoặc tạp chất trên bề mặt hạt.

Sự gia tăng cường độ các đỉnh Raman chứng minh rằng plasma đã hoạt hóa hiệu quả bề mặt cát thạch anh thông qua cơ chế làm sạch bề mặt, tăng năng lượng bề mặt và tạo thêm các vị trí hoạt tính. Những biến đổi này tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình hình thành sản phẩm hydrat hóa trong hệ xi măng.

Kết quả Raman hoàn toàn phù hợp với các kết quả cơ học thu được. Việc gia tăng hoạt tính bề mặt của cát thạch anh sau xử lý plasma là nguyên nhân dẫn đến sự rút ngắn thời gian đông kết cũng như sự gia tăng cường độ nén và cường độ uốn của vật liệu ở các tuổi khảo sát.

4. Kết Luận

Từ các kết quả thực nghiệm thu được, có thể rút ra một số kết luận chính như sau:

- Kết quả phân tích SEM cho thấy xử lý plasma đã làm thay đổi đáng kể hình thái bề mặt của cát thạch anh. Sau xử lý, bề mặt hạt trở nên nhám hơn, xuất hiện nhiều hốc vi mô, rãnh ăn mòn và các vị trí hoạt tính phân bố trên bề mặt. Những biến đổi này góp phần làm tăng diện tích bề mặt riêng và khả năng tương tác giữa cát thạch anh với pha hồ xi măng.

- Quá trình hoạt hóa bằng plasma làm tăng tốc độ đông kết của hệ vữa xi măng – cát thạch anh. Thời gian bắt đầu đông kết giảm từ 185 phút xuống 160 phút (giảm 13,5 %), trong khi thời gian kết thúc đông kết giảm từ 335 phút xuống 295 phút (giảm 11,9 %) so với mẫu

đối chứng. Kết quả này chứng tỏ xử lý plasma đã thúc đẩy quá trình hình thành các sản phẩm thủy hóa trong giai đoạn đầu.

- Cát thạch anh xử lý plasma giúp cải thiện đáng kể các tính chất cơ học của vữa xi măng. Ở tuổi 28 ngày, cường độ nén tăng từ 21,1 MPa lên 25,0 MPa, tương ứng mức tăng 18,5 %, trong khi cường độ uốn tăng khoảng 19,5 % so với mẫu không xử lý. Sự gia tăng cường độ được ghi nhận ở tất cả các tuổi khảo sát, cho thấy hiệu quả tích cực của plasma đối với quá trình phát triển cấu trúc vật liệu.

- Kết quả phân tích Raman cho thấy sau xử lý plasma, cường độ các đỉnh đặc trưng của liên kết Si–O–Si tăng lên và trở nên sắc nét hơn. Điều này chứng tỏ plasma đã làm sạch và hoạt hóa hiệu quả bề mặt cát thạch anh, đồng thời làm gia tăng năng lượng bề mặt và số lượng vị trí hoạt tính tham gia vào quá trình thủy hóa của xi măng.

- Sự tương đồng giữa các kết quả SEM, Raman, thời gian đông kết và cường độ cơ học cho thấy cơ chế tác động chủ yếu của plasma không cân bằng nhiệt độ thấp là hoạt hóa bề mặt cát thạch anh, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình hình thành và phát triển các sản phẩm hydrat hóa, đồng thời cải thiện liên kết tại vùng chuyển tiếp giữa cốt liệu và hồ xi măng.

Kết quả nghiên cứu khẳng định plasma không cân bằng nhiệt độ thấp là một phương pháp hoạt hóa bề mặt hiệu quả đối với cát thạch anh, góp phần nâng cao chất lượng vật liệu xây dựng. Công nghệ này mở ra triển vọng ứng dụng trong sản xuất vật liệu xây dựng cường độ cao, phát triển cường độ sớm và thân thiện với môi trường.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Kurti, I., Rani, D.A., Boccaccini, A.R., Cheeseman, C. R.: Geopolymers from DC Plasma-Treated Air Pollution Control Residues, Metakaolin, and Granulated Blast Furnace Slag. *Journal of materials in civil engineering*. 23 735-740 (2011) doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000170.
- [2]. Trung, H.T., Hoang, T., Huynh, D., Hung, Q.D., Giang, V.N.: Plasma Treatment and Teos Modification On Wood Flour Applied To Composite Of

- Polyvinyl Chloride/Wood Flour. *Advances in Polymer Technology*. Volume 2019, Article ID 3974347, 8p (2019) <https://doi.org/10.1155/2019/3974347> doi.org/10.1155/2019/3974347.
- [3]. Volokitin, O.G., Volokitin, G.G., Shekhovtsov, V.V: Physicochemical Processes at Plasma Treatment of Quartz-Feldspar Raw Materials. *Advanced Materials Research* Vol 1085, 474-477 (2015) doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1085.474.
- [4]. Volokitin, G., Yu, A., Skripnikova, N., Volokitin, O., Shekhovtsov, V.: X-Ray Diffraction Analysis of Bottom Ash Waste after Plasma Treatment. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 189 012021 (2017) doi:10.1088/1757-899X/189/1/012021.
- [5]. Shustin, E.G., *Plasma Technologies for Material Processing in Nanoelectronics: Problems and Solutions*. Vol. 62, No. 5, 454–465 (2017) DOI: 10.1134/S106422691704012X.
- [6]. Shekhovtsov, V.V., Volokitin, O.G, Kondratyuk, A.A., Vitske, R.E.: Fly Ash Particles Spheroidization Using Low Temperature Plasma Energy. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 156 012043 (2016) doi:10.1088/1757-899X/156/1/012043.
- [7]. Jun, L., Kou, L., Shengjun, Y., Yaojian, L., Dan, H. Application of thermal plasma technology for the treatment of solid wastes in China: An overview. *Waste Management*. Volume 58 260-269 (2016) doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.011.
- [8]. Nguyễn, Đ. H., Phạm, H. L., & Trần, V. C. (2025). Ứng dụng plasma điện hóa trên điện cực sắt xử lý nước thải từ các phân tích xét nghiệm hóa, sinh của bệnh viện. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ nhiệt đới*, 18, 46-51. <https://doi.org/10.58334/vrtc.jtst.n18.05>.
- [9]. Thái Văn Phước and Trần Ngọc Đàm, “Effects of cold-plasma on atmospheric pressure on killing of yeast”, *Journal of Technical Education Science*, vol. 8, no. 2, pp. 57–62, Aug. 2013.
- [10]. Đỗ, H. T. Plasma và ứng dụng trong y học. *Khoa học và đời sống*. Số 9 (2019). Trang 54-55.
- [11]. Bruyako, M.G., Glukhoedov, V.A., Kravtsova, D.V., Smirnov, V., Ushkov V.A.: Plasma Processing in Industry of Building Materials. *Advanced Materials Research* (Volume 1040) 730-734 (2014) doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.730.
- [12]. Fedosov S.V., Akulov, M.V., Tanicheva, M.V., Shutov, D.A.: Investigation of The Effect of Low-Temperature Glow Discharge Plasma on The Hydrophilic Properties of Repair Interlining. *Bulletin of MGSU* 63-67 (2012) DOI: 10.12737/article_5bab4a20598ad9.13288459.
- [13]. Ushkov, V.A., Kalyadin, A.Y., Nalbandyan, G.V., Soloviev, V.G., Bogdanova, A.A.: Plasma Modification of Construction Mortar Components, an Efficient Method of Increasing Their Performance. *Bulletin of MGSU* 548-558 (2019) DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.548-558.