

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO NANOCOMPOSITE ZnO-Ag/ALGINATE ỨNG DỤNG LÀM VẬT LIỆU KHÁNG KHUẨN

RESEARCH ON THE FABRICATION OF ZnO-Ag/ALGINATE NANOCOMPOSITE AS ANTIBACTERIAL MATERIAL

Vũ Xuân Minh¹, Bùi Văn Cường¹, Nguyễn Thị Lam^{1,2}, Trần Thị Kim Chính¹,
Phan Thị Minh Huyền^{1,2,3}, Nguyễn Trần Hà Anh¹, Nguyễn Tuấn Anh¹, Lê Thị Mỹ Hạnh¹, Phạm Thị Lan^{1,2*}

¹Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

²Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

³Khoa Hóa, Trường Sư phạm, Trường Đại học Vinh

Đến Tòa soạn ngày 12/9/2025, chấp nhận đăng ngày 03/10/2025

Tóm tắt: Trong nghiên cứu này, các hạt nano ZnO-Ag đã được chế tạo thành công bằng phương pháp đồng kết tủa, tạo ra cấu trúc wurtzite ổn định với hạt có dạng lục giác, kích thước đồng đều khoảng 20-25 nm. Trên cơ sở đó, nanocomposite ZnO-Ag/alginate được tổng hợp theo nhiều tỉ lệ khác nhau, trong đó kết quả phân tích quang phổ chứng minh vật liệu thu được giữ nguyên tính chất đặc trưng của cả ZnO-Ag và alginate. Đặc biệt, vật liệu thể hiện hoạt tính kháng khuẩn mạnh đối với vi khuẩn *Escherichia coli* và *Staphylococcus aureus*, với đường kính vòng kháng khuẩn lần lượt đạt giá trị tốt nhất 26 và 30 mm trong khoảng nghiên cứu. Các kết quả này cho thấy vật liệu ZnO-Ag/Alg không chỉ có tính tương thích sinh học mà còn mang lại khả năng diệt khuẩn vượt trội, mở ra triển vọng ứng dụng trong xử lý và khử trùng nước nhiễm khuẩn.

Từ khóa: Alginate, nanocomposite, vật liệu kháng khuẩn, nano lai ZnO-Ag.

Abstract: In this study, ZnO-Ag nanoparticles were successfully synthesized via the co-precipitation method, forming a stable wurtzite structure with uniform hexagonal particles of approximately 20–25 nm. Based on these nanoparticles, ZnO-Ag/alginate nanocomposites were synthesized at different ratios, in which spectroscopic analyses confirmed that the obtained materials retained the characteristic properties of both ZnO-Ag and alginate. In particular, the materials exhibited strong antibacterial activity against *E. coli* and *S. aureus*, with inhibition zone diameters reaching the best values of 26 and 30 mm, respectively, within the studied range. These results demonstrate that ZnO-Ag/alginate materials not only possess biocompatibility but also provide outstanding antibacterial capability, opening up prospects for their application in the treatment and disinfection of contaminated water.

Keywords: Antibacterial material, alginate, nanocomposite, ZnO-Ag hybrid nanoparticle.

1. GIỚI THIỆU

Tài nguyên nước ở Việt Nam đóng vai trò thiết yếu cho đời sống và phát triển kinh tế - xã hội, song hiện đang chịu sức ép nghiêm trọng từ ô nhiễm, khai thác quá mức và biến đổi khí hậu. Mỗi năm cả nước phát sinh khoảng 25 triệu tấn chất thải rắn sinh hoạt, trong đó Hà Nội thải ra 6.000 tấn/ngày với tỷ

lệ chôn lấp tới 90%, còn TP. Hồ Chí Minh khoảng 70%. Hơn 80% khu công nghiệp chưa có hệ thống xử lý nước thải đạt chuẩn, dẫn đến tình trạng ô nhiễm tại nhiều sông hồ, có thể kể đến như sông Nhuệ, sông Tô Lịch, Văn Chương... Khoảng 62% dân số sinh sống ở nông thôn - nơi hạ tầng xử lý còn hạn chế - khiến nguy cơ dịch bệnh từ nguồn nước ô

niễm ngày càng gia tăng [4, 5].

Bên cạnh ô nhiễm hóa học, ô nhiễm vi sinh vật cũng đặc biệt đáng lo ngại. Kết quả khảo sát 15 hồ nội thành Hà Nội giai đoạn 2021-2023 cho thấy nồng độ *E. coli* và tổng *Coliforms* vượt chuẩn hàng trăm lần (IngentaConnect, 2024). Các vi khuẩn gây bệnh như *E. coli*, *Salmonella*, *Vibrio cholerae* và *Shigella* phổ biến trong nước thải chưa xử lý, dễ lây lan qua sinh hoạt, sản xuất và nông nghiệp [1]. Theo WHO (2022), nước không an toàn gây ra khoảng 505.000 ca tử vong/năm do bệnh tiêu chảy, khẳng định tính cấp thiết của việc xử lý và quản lý nguồn nước sạch [4]. Nhiều phương pháp khử trùng nước thải hiện nay như chlorine, ozone, tia UV hay điện hóa đã được áp dụng. Tuy nhiên, chlorine tuy hiệu quả nhưng có thể tạo ra sản phẩm phụ độc hại như THMs và HAAs, trong khi ozone và tia UV an toàn hơn nhưng chi phí cao và hạn chế về hiệu quả xử lý liên tục [8, 9]. Xu hướng mới tập trung vào vật liệu nano, đặc biệt là những hệ có nguồn gốc sinh học và thân thiện môi trường, vừa đảm bảo hiệu quả khử trùng vừa giảm tác động thứ cấp.

Alginate - một polysaccharide tự nhiên chiết xuất từ tảo nâu - có ưu điểm nổi bật về tính an toàn sinh học, khả năng phân hủy và tương thích sinh học. Đặc biệt, alginate đã được chứng minh có khả năng kháng virus, nhất là với các virus có màng bao nhờ cơ chế tương tác điện tích âm, song lại gần như không có hoạt tính kháng khuẩn, làm hạn chế ứng dụng trong y sinh như băng gạc, kỹ thuật mô hay bảo quản sinh học. Do đó, kết hợp alginate với các vật liệu nano như Ag, ZnO, đồng hoặc carbon được xem là chiến lược hiệu quả để tạo ra vật liệu lai vừa có tính kháng virus vừa có tính kháng khuẩn.

Trong số đó, ZnO nano được đánh giá cao nhờ hoạt tính kháng khuẩn rộng trên cả vi khuẩn Gram (+) và Gram (-). Khi kết hợp với bạc, ZnO-Ag cho hiệu quả vượt trội nhờ sự phối hợp giữa tính quang xúc tác của ZnO và khả năng kháng khuẩn mạnh của Ag. Các phương pháp tổng hợp như sol-gel, đồng kết tủa, thủy nhiệt hay sinh học xanh cho phép kiểm soát kích thước, hình thái và mức độ pha tạp Ag^+ , từ đó điều chỉnh tính chất vật liệu.

Việc kết hợp ZnO-Ag với alginate là hướng đi triển vọng nhằm tạo ra nanocomposite vừa mang tính kháng khuẩn mạnh, vừa duy trì đặc tính kháng virus và an toàn sinh học. Bên cạnh ứng dụng trong y sinh, các màng hoặc hạt composite ZnO-Ag/Alg còn được nghiên cứu trong xử lý và khử khuẩn nước nhờ khả năng hấp phụ chất hữu cơ, phân tán hạt nano đều và tiêu diệt vi khuẩn gây bệnh [8-10]. Nhờ những ưu điểm này, hướng nghiên cứu về composite ZnO-Ag/alginate đang mở ra nhiều triển vọng mới, được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực.

2. NGUYÊN LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Nguyên liệu và hóa chất

Kẽm axetat ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$, $\geq 99\%$), bạc nitrat ($AgNO_3$, $\geq 99\%$), axit oxalic ($H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$, $\geq 99,5\%$) được cung cấp bởi Sigma Aldrich.

2.2. Tổng hợp nano lai ZnO-Ag bằng phương pháp đồng kết tủa

Quy trình tổng hợp ZnO-Ag bằng phương pháp đồng kết tủa được tiến hành như sau: Hòa tan 11,002 gam $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ bằng 250 mL nước, thêm tiếp 0,115 gam $AgNO_3$, khuấy cơ trong 15 phút được dung dịch (1); hòa tan 6,3 gam $H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$ vào 250 mL nước được dung dịch (2). Trộn dung dịch (1) và dung dịch (2), khuấy cơ ở tốc độ

cao nhất trong vòng 90 phút. Lọc, rửa lấy phần rắn của hỗn hợp bằng máy lọc hút chân không, sấy ở 100°C đến khô được chất dạng rắn. Nung chất rắn thu được ở 450°C trong 3 giờ, được sản phẩm là bột mịn.

2.3. Tổng hợp vật liệu nanocomposite ZnO-Ag/alginate

Hòa tan 0,2 gam ($C_6H_7NaO_6$)n bằng 20 mL nước cất. Thêm một lượng ZnO-Ag lần lượt là 0,02 gam; 0,1 gam; 0,2 gam và 0,4 gam tương ứng với tỉ lệ m(Alg): m(ZnO-Ag) trong 4 mẫu lần lượt là 0,1%; 0,5%; 1%; 2%. Hỗn hợp được khuấy bằng máy khuấy từ trong 30 phút, rồi mang đi phân tán trong máy ly tâm 15 phút, thu được hỗn hợp có màu xám tím, sánh. Nhỏ hỗn hợp trên vào dung dịch $CaCl_2$ 0,3M thu được các hạt tròn. Ngâm hạt trong dung dịch $CaCl_2$ 0,3M trong 24 tiếng. Sau đó, mang hạt đi rửa nhiều lần bằng nước cất để loại bỏ tạp chất. Hạt được sấy bằng phương pháp đông khô trên thiết bị Epsilon 1-4LSC (Christ, Đức) ở -40°C trong vòng 2 tiếng.

2.4. Các phương pháp nghiên cứu đặc trưng của vật liệu

Phổ hồng ngoại (IR) được dùng phổ biến để xác định các liên kết đặc trưng trong phân tử. Mẫu được đo trong vùng 400-4000 cm^{-1} , kết quả biểu diễn dưới dạng % truyền qua theo số sóng, sau khi hiệu chỉnh phổ nền không khí. Phương pháp kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường (Scanning Electron Microscope, SEM) được sử dụng để xác định hình thái bề mặt và kích thước hạt của các vật liệu chế tạo. Phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD) dùng để xác định dùng để phân tích pha (kiểu và lượng pha có mặt trong mẫu), ô mạng cơ sở, cấu trúc tinh thể, kích thước hạt.

Kích thước tinh thể trung bình được tính theo công thức Debye-Scherrer:

$$d = \frac{(0,9 \cdot \lambda)}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

Trong đó: 2θ là vị trí của đỉnh, đơn vị rad; β là độ rộng nửa chiều cao vạch nhiễu xạ cực đại, đơn vị rad; d là kích thước tinh thể trung bình, đơn vị nm; $\lambda = 0,154056$ nm [16].

2.5. Phương pháp xác định hoạt tính kháng khuẩn

Hoạt tính kháng khuẩn của vật liệu nanocomposite ZnO-Ag/Alg được đánh giá trên vi khuẩn *Escherichia coli* (G-) và *Staphylococcus aureus* (G+) bằng hai phương pháp: khuếch tán giếng thạch và tiếp xúc trực tiếp.

Phương pháp khuếch tán giếng thạch

Phương pháp này sàng lọc ban đầu để chọn vật liệu kháng khuẩn tốt nhất. Dịch vi khuẩn (10^5 CFU/mL) được cấy lên thạch, sáu giếng được đục trên mỗi đĩa, cho 0,1 g nano ZnO-Ag hoặc nanocomposite ZnO-Ag/Alg (nồng độ khác nhau), nước cất làm đối chứng, ủ ở 37°C trong 24 giờ, đo đường kính vòng vô khuẩn để đánh giá hoạt tính kháng khuẩn.

Phương pháp tiếp xúc trực tiếp

Khả năng khử khuẩn của nanocomposite ZnO-Ag/Alginate được đánh giá bằng phương pháp tiếp xúc trực tiếp với *E. coli* [11, 12]. Dịch vi khuẩn (10^2 , 10^3 , 10^5 CFU/mL) được trộn với 1 g vật liệu trong 100 mL dung dịch, khuấy 200 vòng/phút trong thời gian xác định, sau đó pha loãng, cấy thạch và ủ ở 37°C trong 24-48 giờ.

Mật độ vi khuẩn sau xử lý được tính theo công thức sau:

$$N \left(\frac{CFU}{g} \text{ hay } \frac{CFU}{mL} \right) = \frac{(A/V)}{D_f} \quad (2)$$

Trong đó: N là tổng số CFU/g (mL) mẫu cơ chất đem đi phân tích, A là số CFU trung bình trên mỗi đĩa petri ở độ pha loãng nhất định,

V là thể tích mẫu cấy trên mỗi đĩa petri ($V = 100 \mu\text{L}$), D_f là độ pha loãng mẫu (10 lần).

Hiệu suất kháng khuẩn được tính theo công thức sau:

$$H(\%) = \left(1 - \frac{N}{A}\right) \times 100 \quad (3)$$

Trong đó: N là mật độ vi khuẩn sau tiếp xúc, A là mật độ vi khuẩn ban đầu.

Các thí nghiệm được lặp lại ba lần và đồng thời khảo sát ảnh hưởng của mật độ vi khuẩn và thời gian tiếp xúc.

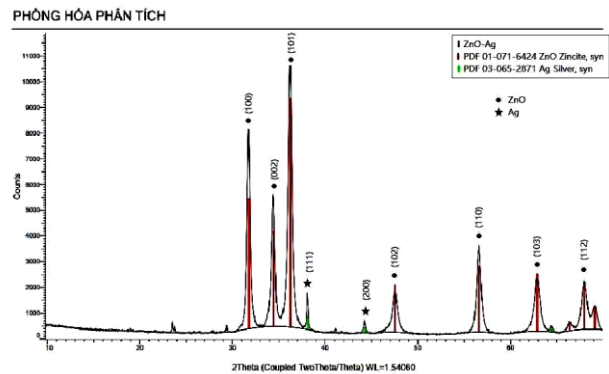
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Nghiên cứu thành phần, cấu trúc nano ZnO-Ag

Kết quả phân tích phổ nhiễu xạ tia X (XRD)

Phổ nhiễu xạ tia X của mẫu vật liệu ZnO-Ag sau khi nung ở 450°C trong 3 giờ được thể hiện trong Hình 1. Các đỉnh nhiễu xạ thu được cho thấy mẫu đơn pha ZnO, với các peaks đặc trưng của góc tán xạ (2θ) $\approx 31,7^\circ$ (100), $34,4^\circ$ (002), $36,2^\circ$ (101), $47,5^\circ$ (102), $56,6^\circ$ (110), $62,8^\circ$ (103), $66,4^\circ$ (200), $68,0^\circ$ (112) và $69,1^\circ$ (201), phù hợp với các công bố trước đây [14]. Các vị trí đỉnh này phù hợp với các mặt tinh thể tương ứng trong cấu trúc lục phương wurtzite của ZnO. Điều này cho thấy quá trình pha tạp Ag vào ZnO không làm thay đổi cấu trúc tinh thể ban đầu của ZnO, đồng thời khẳng định rằng mạng tinh thể lục phương wurtzite được duy trì ổn định sau khi nung và pha tạp.

Bên cạnh các đỉnh nhiễu xạ của ZnO, trên phổ còn quan sát thấy các góc tán xạ (2θ) của bạc kim loại (Ag^0) là $38,1^\circ$; $44,3^\circ$ và $77,4^\circ$, tương ứng với các mặt tinh thể (111), (200), (220) và (311) của Ag kim loại lập phương tâm diện [13]. Sự xuất hiện các đỉnh này cho thấy bạc tồn tại trong mẫu ở dạng pha riêng biệt, không hòa tan hoàn toàn vào mạng tinh thể ZnO.

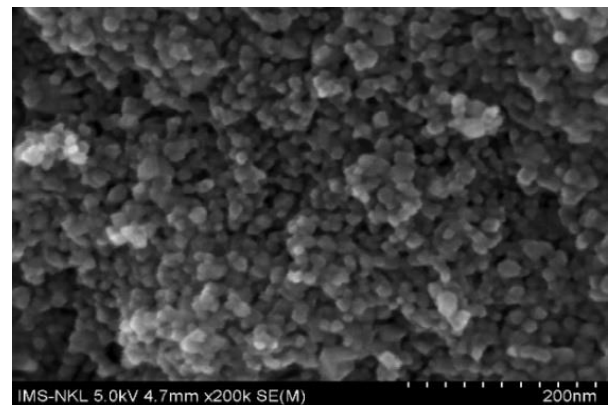


Hình 1. Phổ XRD của ZnO-Ag.

Bạc có thể phân bố dưới dạng hạt nano hoặc cụm phân tử nằm trên bề mặt hoặc giữa các hạt ZnO, góp phần tạo nên các đặc trưng tính chất của vật liệu ZnO-Ag. Điều này khẳng định kết luận được rút ra từ phổ IR khi bạc có tương tác yếu với nguyên tử oxygen ở trong vật liệu.

Áp dụng phương trình Debye-Scherrer tại vị trí góc $2\theta = 36,37^\circ$ (101) ghi nhận FWHM = $0,55293$ rad, tương ứng tính được kích thước tinh thể trung bình $17,85$ nm.

Xác định hình thái cấu trúc của nano ZnO-Ag



Hình 2. Ảnh SEM mẫu ZnO-Ag tổng hợp bằng phương pháp đồng kết tủa với độ phóng đại 20.000 lần

Ảnh FE-SEM (Hình 2) cho thấy các hạt nano có dạng tựa hình lục giác, với kích thước dao động trong khoảng từ 20 đến 25 nm, khá phù hợp với kích thước tính theo Debye-Scherrer ở kết quả phổ XRD. Ngoài ra, ta có thể quan

sát thấy sự phân bố khá đồng đều của các hạt cầu của Ag^0 trên bề mặt ZnO , với sự chênh lệch kích thước giữa các hạt không đáng kể. Điều này đã khẳng định sự có mặt của Ag trong vật liệu.

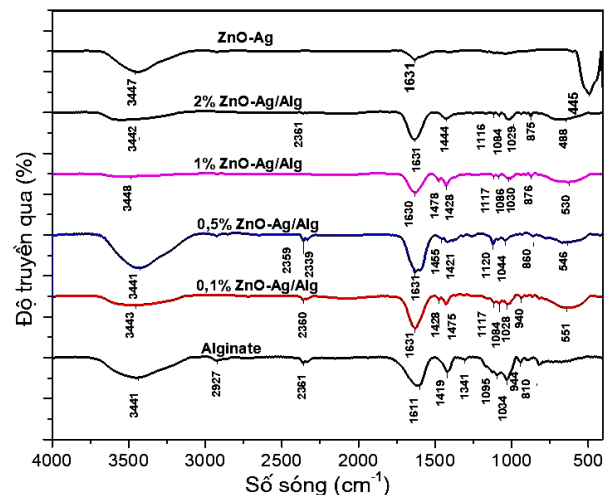
3.2. Vật liệu nanocomposite ZnO-Ag/Alginate

Kết quả phân tích phổ hồng ngoại (FT-IR)

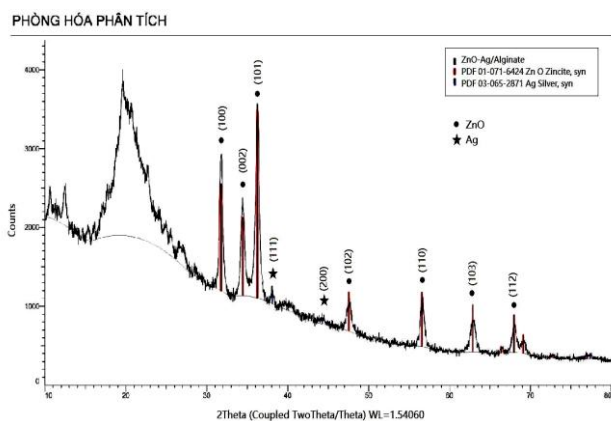
Kết quả ghi phổ hồng ngoại của mẫu alginate; ZnO-Ag ; ZnO-Ag/Alg được hiển thị ở Hình 3. Có thể thấy, trên phổ ZnO-Ag , một vân hấp thụ ở các số sóng 3447 cm^{-1} và 1631 cm^{-1} lần lượt đặc trưng cho dao động hóa trị và dao động biến dạng của nhóm $-\text{OH}$. Dao động của liên kết Zn-O xuất hiện vân hấp thụ ở 445 cm^{-1} [13]. Sự hiện diện của vân phổ này cho thấy sự hiện diện của liên kết giữa kẽm và oxygen trong mẫu phân tích, đặc điểm cấu trúc điển hình của phân tử ZnO . Ngoài ra, dao động đặc trưng của liên kết Ag-O được quan sát trong khoảng $700\text{--}900\text{ cm}^{-1}$ [13]. Các vân đặc trưng của nanocomposite ZnO-Ag/Alg gần như không thay đổi nhiều, chứng tỏ sự có mặt và ổn định của chất mang alginate trong vật liệu nanocomposite. Việc dịch chuyển của vân hấp thụ ở khoảng 445 cm^{-1} trong phổ IR của vật liệu ZnO-Ag lên các số sóng cao hơn trong các vật liệu composite trong khoảng từ $488\text{--}551\text{ cm}^{-1}$, góp phần làm bền vật liệu ZnO-Ag . Điều này được giải thích do alginate có nhiều nhóm chức như $-\text{COO}^-$ và $-\text{OH}$ có khả năng tương tác với bề mặt hạt ZnO-Ag thông qua liên kết hydrogen hoặc phối trí ion kim loại, những tương tác này có thể làm bền liên kết Zn-O [15].

Phổ XRD của mẫu ZnO-Ag/Alginate cho thấy các đỉnh đặc trưng của ZnO cấu trúc wurtzite và Ag cấu trúc lập phương tâm mặt, khẳng định sự hình thành đồng thời của cả hai pha tinh thể trong composite. Nền alginate thể hiện tính chất vô định hình thông qua dải tán

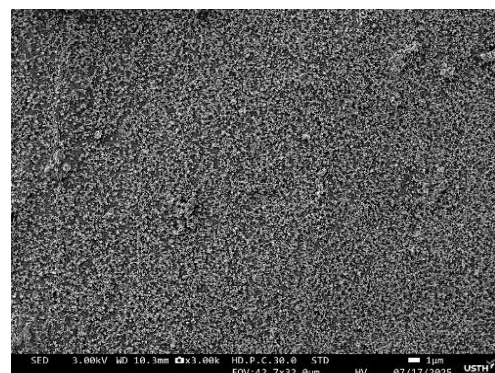
xạ rộng ở vùng góc thấp. Các đỉnh pic có sự dịch chuyển nhẹ về góc 2θ có thể do ảnh hưởng của sự tương tác giữa nano với nền alginate.



Hình 3. Phổ hồng ngoại của ZnO-Ag , alginate và vật liệu nanocomposite ZnO-Ag/alginate



Hình 4. Phổ XRD của ZnO-Ag/Alginate



Hình 5. Ảnh SEM mẫu ZnO-Ag/Alginate

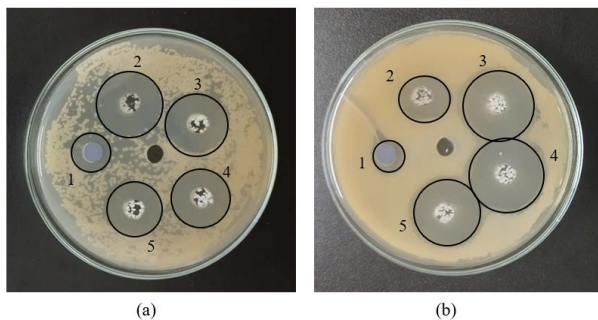
Quan sát ảnh SEM (Hình 5) của mẫu composite chứa 10% nano ZnO-Ag cho thấy

các hạt nano ZnO-Ag được phân tán khá đồng đều trên nền alginate, không xuất hiện nhiều hiện tượng kết tụ lớn. Kích thước hạt tương đối đồng nhất, tạo bề mặt phủ khá liên tục, cho thấy sự tương tác tốt giữa hạt nano và nền polymer, giúp hình thành cấu trúc nanocomposite ổn định.

3.3. Hoạt tính kháng khuẩn của vật liệu ZnO-Ag/Alg

Phương pháp khuếch tán giếng thạch

Hoạt tính kháng khuẩn của các vật liệu được đánh giá bằng phương pháp khuếch tán giếng thạch trên vi khuẩn *E. coli* và *S. aureus*. Kết quả trong hình 6 cho thấy sự hình thành các vòng vô khuẩn với đường kính thay đổi theo hàm lượng ZnO-Ag trong nanocomposite.



Hình 6. Vòng vô khuẩn của *E.coli* (a) và *S.aureus* (b) của các mẫu ZnO-Ag (1); 0,1% ZnO-Ag/Alg (2); 0,5% ZnO-Ag/Alg (3); 1% ZnO-Ag/Alg (4); 2% ZnO-Ag/Alg (5)

Kết quả xác định đường kính vòng kháng khuẩn được trình bày trong Bảng 1. Vật liệu nano ZnO-Ag tạo vòng vô khuẩn với đường kính 15 mm, trong khi ZnO-Ag/Alg tạo vòng lớn hơn, nổi bật mẫu 0,1% đạt 26 mm (tăng 1,7 lần so với mẫu nano lai). Tuy nhiên, khi tăng hàm lượng ZnO-Ag lên 0,5–2% làm đường kính vòng giảm dần. Với *S. aureus*, ta cũng quan sát thấy xu hướng tương tự: việc bổ sung ZnO-Ag vào thành phần nanocomposite làm tăng khả năng kháng khuẩn của vật liệu (gấp 3,5–3,75 lần).

Bảng 1. Đường kính vòng vô khuẩn đối với chủng *E.coli* và *S.aureus* của vật liệu nanocomposite ZnO-Ag

STT	Mẫu thử	Vòng kháng (mm)	
		<i>E.coli</i>	<i>S.aureus</i>
1	ZnO-Ag	15,0	8
2	0,1% ZnO-Ag/Alg	26	20
3	0,5% ZnO-Ag/Alg	24	28
4	1% ZnO-Ag/Alg	22,5	30
5	2% ZnO-Ag/Alg	22	26

Kết quả từ Bảng 2 cho thấy, vật liệu 0,5%ZnO-Ag/Alg được xem là thích hợp nhất trong khoảng nghiên cứu khi khả năng kháng cả hai chủng vi khuẩn Gram âm và Gram dương đạt giá trị tốt nhất. Như vậy, alginate giúp tăng hiệu quả kháng khuẩn hơn hẳn nano lai ở dạng thuần, do khả năng tạo gel phân tán hạt nano, duy trì kích thước nhỏ, tăng tiếp xúc, đồng thời thúc đẩy hình thành các gốc oxy hóa mạnh ($\bullet\text{OH}$, O_2^-) và giải phóng Ag^+ , phá hủy màng, protein và DNA của vi khuẩn [15]. Mẫu vật liệu 0,5%ZnO-Ag/Alg được lựa chọn cho các thí nghiệm tiếp theo.

Phương pháp tiếp xúc trực tiếp

Vật liệu 0,5%ZnO-Ag/Alg được thử nghiệm khả năng tính kháng khuẩn theo phương pháp tiếp xúc trực tiếp với chủng đại diện là *E.coli*. Kết quả xác định mật độ vi khuẩn sau khi xử lý và hiệu suất kháng khuẩn được trình bày trên Bảng 2.

Bảng 2. Hiệu suất loại bỏ vi khuẩn *E.coli* (CFU/mL) của vật liệu 0,5%ZnO-Ag/Alg

Mật độ <i>E.coli</i> (CFU/mL)			Hiệu suất (%)
Ban đầu	Sau xử lý	Bị tiêu diệt	
$1,6 \times 10^2$	0	$1,6 \times 10^2$	100
$2,3 \times 10^3$	$2,0 \times 10^1$	$2,2 \times 10^3$	99
$5,0 \times 10^5$	$2,5 \times 10^3$	$4,9 \times 10^5$	99,5

Kết quả cho thấy, với mật độ vi khuẩn *E.coli* là 10^2 CFU/mL hiệu suất loại bỏ vi khuẩn của vật liệu ZnO-Ag/Alg đạt được giá trị gần như hoàn toàn. Ở mật độ vi khuẩn ban đầu là 10^3 và 10^5 CFU/mL thì hiệu suất kháng khuẩn lên đến 99%. Khả năng diệt khuẩn của vật liệu có thể được giải thích là do lượng ion Ag^+ và các gốc oxy hóa mạnh (như $\bullet OH$, O_2^-) được giải phóng trong quá trình tiếp xúc. Những tác nhân này góp phần trực tiếp vào việc phá hủy màng tế bào và cấu trúc nội bào của vi khuẩn, từ đó nâng cao hiệu quả kháng khuẩn tổng thể của vật liệu.

Trong điều kiện thực tế, mẫu vật liệu có thể được ứng dụng trong xử lý nước thải công nghiệp, với giới hạn *E.coli* cho phép theo QCVN 40:2011/BTNMT là 3000 CFU/100 mL với loại A [2]. Vật liệu có thể đáp ứng yêu cầu xử lý nước thải công nghiệp, nhưng cần có thêm khảo sát để điều chỉnh các thông số lý hóa về ngưỡng phù hợp. Vật liệu tuy thể hiện hiệu quả khử khuẩn cao, nhưng chỉ đáp ứng được quy chuẩn đầu ra nước sinh hoạt khi mật độ vi khuẩn đầu vào thấp (dưới khoảng 10^3 CFU/mL). Khi mật độ vi khuẩn ban đầu cao hơn, dù hiệu suất kháng khuẩn vẫn đạt trên 99%, nhưng lượng vi khuẩn còn lại vượt quá giới hạn 1 CFU/100 mL theo quy chuẩn

sinh hoạt [3]. Để đáp ứng chuẩn nghiêm ngặt của nước sinh hoạt theo thông tư 41/2018/TT-BYT, cần tối ưu thêm về điều kiện xử lý hoặc kết hợp với các phương pháp hỗ trợ nhằm đảm bảo mật độ vi sinh vật sau xử lý dưới 1 CFU/100 mL.

4. KẾT LUẬN

Các hạt nano ZnO-Ag được tổng hợp thành công với dạng hình lục giác, kích thước đồng đều cỡ 20-25 nm, đã được bổ sung vào thành phần chế tạo vật liệu nanocomposite ZnO-Ag/Alg. Vật liệu ZnO-Ag/Alg thể hiện hoạt tính kháng khuẩn đối với chủng *E.coli* và *S.aureus* với đường kính vòng kháng khuẩn trong khoảng 26-30 nm. Vật liệu 0,5%ZnO-Ag/Alg thể hiện khả năng kháng khuẩn tốt nhất trong khoảng nghiên cứu đối với cả hai chủng Gram âm và Gram dương. Các kết quả thu được bước đầu rất khả quan, vật liệu ZnO-Ag/Alg có triển vọng phát triển thành vật liệu có tính kháng khuẩn, ứng dụng trong xử lý khử trùng nước nhiễm khuẩn.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam trong khuôn khổ nhiệm vụ có mã số NCXS 01.01/22-24.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Lê Huy Chính, “Vi sinh vật y học”, Nhà xuất bản Y học (2007).
- [2] Bộ Tài nguyên và Môi trường, Thông tư số 47/2021/TT-BTNMT: Ban hành Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về nước thải công nghiệp (QCVN 40:2011/BTNMT). (2021).
- [3] Bộ Y tế, Thông tư số 41/2018/TT-BYT: Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt. (2018).
- [4] WHO, Drinking-water, World Health Organization (2019).
- [5] WHO/UNICEF, Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2020: Five years into the SDGs. World Health Organization (WHO) and the United Nations Children's Fund (UNICEF) (2021).
- [6] J.d.O. Primo, D.F. Horsth, J.d.S. Correa, A. Das, C. Bittencourt, P. Umek, A.G. Buzanich, M. Radtke, K.V.

- Yusenko, C. Zanette, F. J. Anaissi, "Synthesis and Characterization of Ag/ZnO Nanoparticles for Bacteria Disinfection in Water", *Nanomaterials* 12(10) (2022), 1764. <https://doi.org/10.3390/nano12101764>
- [7] P.K. Jha, C. Pokhum, P. Soison, K.A. Techato, C. Chawengkijwanich, "Comparative study of zinc oxide nanocomposites with different noble metals synthesized by biological method for photocatalytic disinfection of *Escherichia coli* present in hospital wastewater", *Water Sci. & Technol.* 88(6) (2023), 1564–1577. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.272>
- [8] Z. Liu, X. Yu, Z. Zhou, J. Zhou, X. Shuai, Z. Lin, H. Chen, "3D ZnO/Activated Carbon Alginate Beads for the Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes", *Polymers*, 15(9), 2215 (2023). <https://doi.org/10.3390/polym15092215>
- [9] F. Maloofi, A. Dadvand Koohi, "Establishing robust ZnO-sodium alginate nanocomposite for dye wastewater treatment: characterization, RSM methodology, and mechanism evaluation", *Environ Sci Pollut Res* 31 (2024), 64069–64086. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35500-2>
- [10] Giang T. T. Pham, Hoa T. Vu, Tham Thi Pham, Nguyen Ngoc Thanh, Van Ngo Thuy, Hung Quang Tran, Huan V. Doan, Manh B. Nguyen, "Exploring the potential of ZnO–Ag@AgBr/SBA-15 Z-scheme heterostructure for efficient wastewater treatment: synthesis, characterization, and real-world applications", *RSC Adv.* 13 (2023), 12402–12410. <https://doi.org/10.1039/D3RA01856C>
- [11] T. Athamneh, A. Abuawad, T. Odat, A. Alshweiat, R. Obaidat, F. Bani Yaseen, M. A. Al-Najjar, R. Garafat, R. Altarabeen, I. Smirnova, P. Gurikov, "Investigation of the Antibacterial Activity of ZnO-Loaded Alginate/Hyaluronic Acid Aerogels for Wound Dressing Applications", *Polymers* 17(4) (2025), 506. <https://doi.org/10.3390/polym17040506>
- [12] A. Belhachem, O. Douahi, Y. Yahia, Z. Cherifi, A. Amiar, F. Boudia, R. Meghabar, H. Toumi, "Study of the antibacterial activity of hybrid nanocomposites "metal oxide/alginate" synthesized for therapeutic purposes", *Discov Med* 1 (2024), 145. <https://doi.org/10.1007/s44337-024-00147-y>
- [13] A. Rafique, F. Amjad, M. R.S.A. Janjua, S.A.R. Naqvi, S.U. Hassan, H. Abdullah, M.S. Nazir, Z. Ali, A.A. Alshihri, M.A. Momenah, A.A. Mansour, M.A. Bajaber, A.A. Alalwiat, "Chia seed-mediated fabrication of ZnO/Ag/Ag₂O nanocomposites: structural, antioxidant, anticancer, and wound healing studies", *Frontiers in chemistry* 12 (2024), 1405385. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1405385>
- [14] E.V. Ruiz-Duarte, J.P. Molina-Jiménez, D.A. Avila, C.O. Torres, S.D. Horta-Piñeres, "Rapid Synthesis of Highly Crystalline ZnO Nanostructures: Comparative Evaluation of Two Alternative Routes", *Crystals* 15 (2025), 640. <https://doi.org/10.3390/cryst15070640>
- [15] M.N. Siddiqui, H.H. Redhwi, S.I. Al-Resayes, "Alginate-mediated synthesis of hetero-shaped silver nanoparticles and their hydrogen peroxide sensing ability", *Molecules* 25(3) (2020), 435.
- [16] Nguyen MB, Lan PT, Pham XN, Pham THY, Ha NN, Ha NTT, Nguyen T-T-B, Doan HV, Anh NT, and Dai Lam T, "Robust interaction of ZnO and TiO₂ nanoparticles with layered graphitic carbon nitride for enhanced photocatalytic oxidative desulfurization of fuel oil: mechanism, performance and stability". *RSC advances*, 14(35) (2024), 25586–25597. <https://doi.org/10.1039/d4ra04357j>

Thông tin liên hệ: **Phạm Thị Lan**

Điện thoại: 0962184685 - E-mail: ptlan@ims.vast.vn

Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.