



VẬT LIỆU NANOCOMPOSITE Ag-ZnO/CHITOSAN: TIỀM NĂNG QUANG XÚC TÁC VÀ ỨNG DỤNG TRONG XỬ LÝ CHẤT HỮU CƠ KHÓ PHÂN HỦY TRONG NƯỚC THẢI

PHAN THỊ MINH HUYỀN^{1,2*}, PHẠM THỊ THÀNH¹, NGUYỄN MINH HẰNG¹,
TRẦN THỊ MINH ANH¹, NGUYỄN VĂN ĐẠT¹, TRẦN ĐỨC MINH³, NGUYỄN XUÂN ĐỨC¹

¹Khoa Hóa học, Trường Sư phạm, Trường Đại học Vinh

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

³Sở Xây dựng tỉnh Phú Thọ

Tóm tắt

Ô nhiễm nước do các hợp chất hữu cơ khó phân hủy như thuốc nhuộm hay kháng sinh đang đặt ra yêu cầu phát triển các vật liệu xử lý hiệu quả và bền vững. Trong bối cảnh đó, việc hệ thống hóa và đánh giá các công nghệ vật liệu mới, các thách thức, các khoảng trống nghiên cứu là cần thiết để định hướng cho các nghiên cứu ứng dụng. Bài báo này tổng quan và đánh giá toàn diện hệ vật liệu nanocomposite Ag-ZnO/chitosan trong giai đoạn 2015-2025. Các tài liệu được thu thập và sàng lọc từ các cơ sở dữ liệu khoa học quốc tế theo các tiêu chí lựa chọn xác định trước nhằm bảo đảm tính đại diện và độ tin cậy của nguồn dữ liệu. Trên cơ sở đó, nghiên cứu làm rõ cơ chế hoạt động quang xúc tác, đánh giá hiệu quả xử lý và xác định các khoảng trống nghiên cứu. Tổng quan tài liệu cho thấy vật liệu có hiệu suất phân hủy chất hữu cơ cao (70–95%), nhưng vẫn cần giải quyết các thách thức liên quan đến rửa trôi ion Ag⁺, độ bền cơ học của vật liệu và khả năng mở rộng quy mô để có thể tạo được hệ vật liệu an toàn, bền vững, có thể xử lý các chất hữu cơ ở quy mô công nghiệp.

Từ khóa: Ag-ZnO, chitosan, nanocomposite, quang xúc tác, xử lý nước.

Ngày nhận bài: 25/5/2026; Ngày sửa chữa: 8/6/2026; Ngày duyệt đăng: 22/6/2026.

Ag-ZnO/chitosan nanocomposites: Photocatalytic potential and applications for the removal of recalcitrant organic pollutants from wastewater

Abstract

Water pollution caused by persistent organic contaminants, such as dyes and antibiotics, has created an urgent demand for efficient and sustainable treatment materials. In this context, systematically reviewing and evaluating emerging material technologies, associated challenges, and existing research gaps is essential for guiding future studies and practical applications. This paper provides a comprehensive review of Ag-ZnO/chitosan nanocomposites published during the period 2015–2025, with the aim of elucidating their photocatalytic mechanisms, assessing their pollutant removal performance, and identifying current research gaps. Relevant publications were collected and screened from international scientific databases according to predefined selection criteria to ensure the representativeness and reliability of the reviewed data. The literature survey indicates that these materials exhibit high degradation efficiencies toward organic pollutants (typically 70–95%) through the synergistic effects of adsorption and photocatalysis. Nevertheless, several challenges remain, including Ag⁺ ion leaching, limited mechanical stability, and difficulties in large-scale implementation. Addressing these issues is crucial for developing safe, sustainable, and industrially applicable materials for the treatment of refractory organic contaminants in wastewater.

Keywords: Ag-ZnO, chitosan, nanocomposite, photocatalysis, water treatment.

JEL Classifications: Q53, Q55, Q57

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ô nhiễm môi trường nước do thuốc nhuộm, thuốc bảo vệ thực vật và đặc biệt là dư lượng kháng sinh đang trở thành vấn đề nghiêm trọng trên toàn cầu (Amangelsin et al., 2023; Halim et al., 2025). Các phương pháp xử lý truyền thống như hấp phụ, keo tụ hay xử lý sinh học thường gặp hạn chế về hiệu quả

xử lý triệt để và khả năng tái ô nhiễm thứ cấp (Crini and Lichtfouse, 2019). Trong bối cảnh đó, công nghệ quang xúc tác sử dụng vật liệu bán dẫn nano được xem là hướng tiếp cận tiềm năng nhờ khả năng phân hủy các hợp chất hữu cơ thành các chất ít độc hại hơn dưới tác dụng của ánh sáng (Aina et al., 2025; Mohamed et al., 2023).

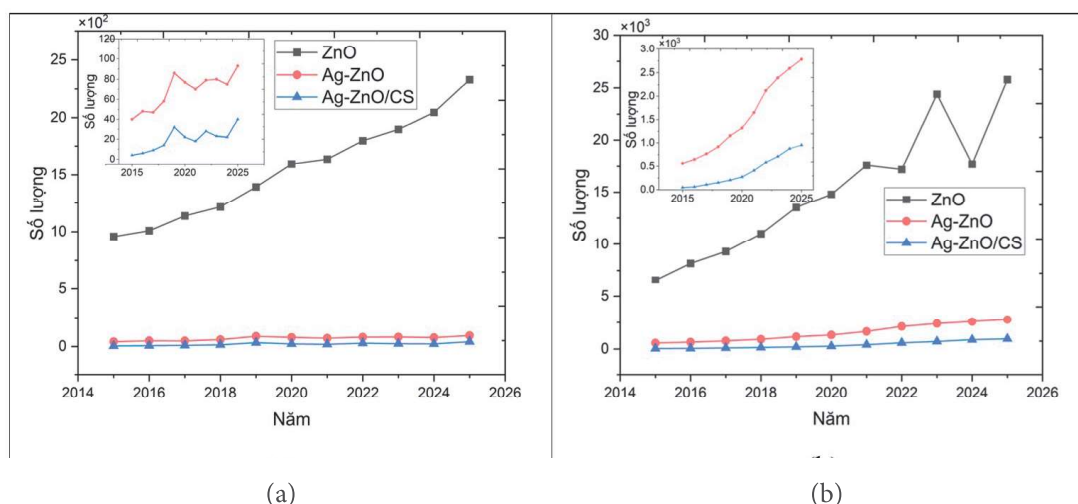


Trong số các vật liệu quang xúc tác, ZnO được nghiên cứu rộng rãi nhờ giá thành thấp, khả năng oxy hóa mạnh và độ ổn định tương đối cao. Tuy nhiên, ZnO tinh khiết có vùng cấm rộng ($\sim 3,2$ eV), chủ yếu hoạt động dưới ánh sáng tử ngoại và dễ xảy ra hiện tượng tái kết hợp electron–lỗ trống, làm giảm hiệu suất quang xúc tác (Aina et al., 2025; Hezam et al., 2022). Từ khoảng năm 2015 đến nay, xu hướng nghiên cứu vật liệu quang xúc tác trên thế giới đã có sự dịch chuyển mạnh mẽ từ vật liệu vô cơ đơn sang vật liệu lai thân thiện môi trường. Giai đoạn đầu tập trung vào cải thiện hoạt tính quang xúc tác của ZnO bằng pha tạp Ag (Aina et al., 2025; Hezam et al., 2022), trong khi các nghiên cứu gần đây chuyển sang phát triển vật liệu composite trên nền polymer sinh học nhằm nâng cao khả năng thu hồi, tái sử dụng và giảm nguy cơ phát tán hạt nano ra môi trường. Sự dịch chuyển xu hướng công nghệ xúc tác xử lý nước thải được minh chứng rõ nét qua kết quả phân tích trắc lượng thư mục (bibliometric) trên hai cơ sở dữ liệu Scopus và Google Scholar trong giai đoạn 2015–2025 (Hình 1). Kết quả thống kê cho thấy ba giai đoạn phát triển mang tính kế thừa của vật liệu với sự chênh lệch rõ rệt về tốc độ tăng trưởng.

Hệ vật liệu có nền tảng ZnO tiếp tục duy trì số lượng công bố áp đảo (đạt mức 2.331 bài trên Scopus và 25.800 tài liệu trên Scholar vào năm 2025). Tuy nhiên, để khắc phục những hạn chế cố hữu về vùng cấm, xu hướng nghiên cứu đang dịch chuyển mạnh mẽ sang các hệ vật liệu cải tiến. Cụ thể, trong một thập kỉ, số lượng công bố về vật liệu pha tạp kim loại quý (Ag-ZnO) duy trì đà tăng trưởng vững chắc, tăng hơn gấp đôi trên Scopus và tăng gần gấp 5 lần trên hệ thống Scholar.

Đặc biệt đáng chú ý nhất là sự bứt phá của hệ vật liệu lai đa thành phần Ag-ZnO cố định trên nền chitosan (Ag-ZnO/CS). Mặc dù là một ngách hẹp của nghiên cứu mới chuyên biệt, phân tích dữ liệu cho thấy sự gia tăng theo cấp số nhân. Trong vòng một thập kỷ, số lượng công bố về Ag-ZnO/CS trên Scopus đã tăng gấp 10 lần (từ 4 bài năm 2015 lên 40 bài năm 2025). Dữ liệu từ Google Scholar càng khẳng định mạnh mẽ sức nóng của chủ đề này khi ghi nhận mức tăng trưởng hơn 21 lần, từ 45 tài liệu (năm 2015) lên đến 954 tài liệu (năm 2025). Sự tăng trưởng vượt bậc này cho thấy tính thời sự của hướng nghiên cứu cố định hệ hạt nano Ag-ZnO lên nền polymer sinh học chitosan. Các tiếp cận này giúp tăng cường khả năng hấp phụ, ổn định hạt nano, hạn chế sự kết tụ hạt và tạo hiệu ứng hiệp đồng trong xử lý môi trường (Dejene and Abtew, 2025) (Hình 1).

Mặc dù hệ vật liệu nanocomposite Ag-ZnO/chitosan đã cho thấy nhiều đặc tính ưu việt trong lĩnh vực xử lý môi trường, các nghiên cứu hiện tại vẫn tồn tại nhiều khoảng trống cần được tiếp tục làm rõ. Phần lớn các nghiên cứu hiện nay mới chỉ dừng lại ở quy mô phòng thí nghiệm (môi trường tĩnh, thể tích nhỏ) và sử dụng các dung dịch mô hình đơn lẻ của các chất ô nhiễm. Thông tin về độ bền cơ học dài hạn của nền polymer trong điều kiện dòng chảy thực tế, độ bền hoạt tính sau nhiều chu kỳ hay quy trình thu hồi ở quy mô lớn vẫn còn rời rạc. Chính thực trạng và sự phân tán của các luồng dữ liệu này đòi hỏi cần có một nghiên cứu tổng quan hệ thống nhằm đánh giá toàn diện bức tranh công nghệ hiện tại. Việc hệ thống hóa tài liệu không nhằm giải quyết trực tiếp các lỗ hổng thực nghiệm, mà đóng vai trò làm cơ sở khoa học để định hướng cho các nghiên cứu thực nghiệm tiếp theo.



Hình 1: Số liệu các nghiên cứu vật liệu quang xúc tác có nền ZnO, vật liệu lai Ag-ZnO, Ag-ZnO/CS theo dữ liệu Scopus (a) và Google Scholar (b)

Xuất phát từ thực trạng trên, bài viết này thực hiện một nghiên cứu tổng quan hệ thống nhằm ba mục tiêu cốt lõi: làm rõ mối liên hệ giữa đặc trưng cấu trúc và cơ chế xúc tác hiệp đồng ba thành phần Ag-ZnO/chitosan; đánh giá về thực trạng hiệu quả xử lý nước thải hữu cơ khó phân hủy sinh học và những hạn chế trong nghiên cứu hiện nay về hệ vật liệu này; và phân tích chi tiết các thách thức trong nghiên cứu ứng dụng cũng như các định hướng nghiên cứu trong tương lai liên quan đến sự rửa trôi ion Ag^+ , ảnh hưởng từ các yếu tố đa dạng của nước thải thực tế, từ đó đề xuất định hướng tổng hợp xanh và phát triển màng đa chức năng phục vụ cho các công nghệ xử lý môi trường bền vững.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN

Nghiên cứu tổng quan này được thực hiện dựa trên phương pháp tiếp cận phân tầng, kết hợp giữa đánh giá tổng quan tường thuật và phân tích trắc lượng thư mục (bibliometric analysis) nhằm đảm bảo tính toàn diện và độ tin cậy khoa học cao nhất. Quá trình thu thập, sàng lọc và phân tích dữ liệu được tiến hành theo các tiêu chí cụ thể như sau:

2.1. Cơ sở dữ liệu và phạm vi thời gian

Việc tìm kiếm và đánh giá tài liệu trong phạm vi thời gian từ năm 2015 đến 2025 nhằm cập nhật chính xác các tiến bộ công nghệ vật liệu mới nhất. Các tài liệu cốt lõi được truy xuất từ các hệ thống cơ sở dữ liệu học thuật quốc tế: Scopus, Web of Science, ScienceDirect và tham khảo thêm ở Google Scholar.

2.2. Phương thức tìm kiếm

Quá trình thu thập được thực hiện thông qua các chuỗi cấu trúc lệnh logic (Boolean operators), chuỗi thống kê số lượng nghiên cứu được thực hiện theo các câu lệnh: ("ZnO") AND ("photocataly*" OR "photodegradation"); ("Ag-ZnO" OR "Ag/ZnO" OR "Silver-doped ZnO" OR "Ag doped ZnO") AND ("photocataly*" OR "photodegradation"); ("Ag-ZnO" OR "Ag/ZnO" OR "Silver-doped ZnO") AND ("chitosan" OR "CS") AND ("photocataly*" OR "photodegradation") trên hệ thống dữ liệu Scopus và Google Scholar. Các tổ hợp từ khóa trọng tâm được sử dụng ("ZnO", "Ag-ZnO", "Ag-ZnO/chitosan nanocomposite", "biopolymer catalysts", "photocatalytic degradation", "wastewater treatment", "organic pollutant").

2.3. Tiêu chí lựa chọn và đánh giá chất lượng

Các tài liệu thu về trải qua quá trình sàng lọc dựa trên hai hệ tiêu chí:

- *Tiêu chí chất lượng (Quality criteria)*: Bài viết ưu tiên sử dụng các bài báo nghiên cứu gốc (research article) và tổng quan (review) đã qua phản biện kín. Các tài liệu được trích dẫn chủ yếu thuộc danh mục các tạp chí uy tín, có hệ số ảnh hưởng cao, được xếp hạng Q1 và Q2 trên hệ thống Scopus, Web of Science.

- *Tiêu chí nội dung (Inclusion criteria)*: Tài liệu chứa dữ liệu thực nghiệm về quá trình tổng hợp, đặc trưng hóa lý của vật liệu ZnO, Ag-ZnO, Ag-ZnO cố định trên nền chitosan, tổng quan về chất ô nhiễm hữu cơ; đồng thời có đánh giá hiệu năng xử lý các chất hữu cơ khó phân hủy (thuốc nhuộm, kháng sinh).

Dựa trên các tiêu chí trên, hơn 40 tài liệu chất lượng, sát với định hướng đề tài nhất đã được đưa vào danh mục tham khảo chính thức. Số liệu từ các công bố này được trích xuất để xây dựng các bảng biểu so sánh đặc trưng cấu trúc và làm cơ sở luận giải cơ chế phản ứng. Biểu đồ mô tả xu hướng phát triển vật liệu được trích xuất từ dữ liệu thống kê ẩn bản từ hệ thống Scopus và Google Scholar cung cấp minh chứng định lượng khách quan cho sự dịch chuyển của công nghệ vật liệu Ag-ZnO/chitosan trong những năm gần đây.

3. KẾT QUẢ TỔNG QUAN VÀ THẢO LUẬN

3.1. Tổng quan nghiên cứu về hệ vật liệu Ag-ZnO/chitosan

Các nghiên cứu giai đoạn đầu chủ yếu tập trung vào ZnO đơn thuần dưới dạng hạt nano, thanh nano hoặc màng mỏng chỉ hấp thụ hiệu quả ánh sáng tử ngoại (Aina et al., 2025). Để khắc phục các hạn chế này, nhiều nghiên cứu tiếp theo đã tập trung vào việc pha tạp ZnO bằng các kim loại quý như Ag, Au hoặc Pt. Trong số đó, Ag được xem là một trong những nguyên tố pha tạp hiệu quả nhất nhờ sự thay thế vị trí Zn^{2+} trong mạng tinh thể, làm thay đổi nồng độ khuyết tật oxy và tạo ra các mức năng lượng trung gian trong vùng cấm (Hussain et al., 2024) hoặc tạo các hạt Ag^0 kim loại bám trên bề mặt ZnO tạo tiếp xúc dị thể (heterojunction) (Zhu et al., 2021) và khả năng tạo hiệu ứng cộng hưởng plasmon bề mặt (SPR) (Zhou et al., 2012), giúp tăng hấp thụ ánh sáng vùng khả kiến và thúc đẩy quá trình tách electron-lỗ trống, "bẫy electron", hạn chế sự tái kết hợp điện tích và sinh ra các gốc oxy hóa mạnh như $\cdot OH$ và $O_2\cdot^-$ trong quá trình quang xúc tác (Boudechiche et al., 2024; Hussain et al., 2024). Tuy nhiên, các hạt nano lơ lửng và dễ kết tụ.

Từ khoảng sau năm 2015, số lượng công bố liên quan đến Ag-ZnO tăng nhanh, đặc biệt trong các nghiên cứu xử lý nước bằng ánh sáng khả kiến hoặc LED [Aina et al., 2022]. Song song với đó, xu hướng phát triển vật liệu thân thiện với môi trường đã thúc đẩy việc kết hợp Ag-ZnO với các polymer sinh học, đặc biệt là chitosan. Trong hệ này, chitosan đóng vai trò là khung polymer bền cơ học và có khả năng tạo liên kết với hạt Ag-ZnO thông qua nhóm $-NH_2$ và $-OH$, giúp phân tán đều các hạt nano và hạn chế hiện tượng kết tụ (Goktas and Goktas, 2021; Mohd Adnan et al., 2020). Một số công trình nghiên cứu về hệ Ag-



Bảng 1. Đặc điểm của composite Ag-ZnO/chitosan theo hình thái vật liệu

Dạng vật liệu	Đặc điểm cấu trúc	Vai trò của chitosan	Ưu điểm chính	Hạn chế	Ứng dụng điển hình
Ag-ZnO/CS dạng bột (Tanuj et al., 2024)	Hạt nano Ag-ZnO phân tán trên nền CS (≈ 50 nm)	Chất mang và chất ổn định hạt nano	Diện tích bề mặt lớn, hoạt tính cao	Khó thu hồi sau xử lý	Chất màu (EBT và murexide)
Ag-ZnO/CS dạng hạt (beads)	Hạt cầu CS chứa Ag-ZnO	Cố định xúc tác	Dễ thu hồi và tái sử dụng	Hạn chế tiếp xúc chất ô nhiễm	Xử lý nước liên tục
Ag-ZnO/CS dạng màng (film) (Ali et al., 2022)	Ag-ZnO phân bố trong mạng polymer	Tạo cấu trúc cơ học	Dễ thu hồi và tái sử dụng	Độ bền cơ học chưa cao	Màng quang xúc tác (Phân hủy MO)
Ag-ZnO/CS liên kết chéo (Abu Zaman et al., 2025)	CS được gia cường bằng glutaraldehyde	Tăng độ bền hóa học và cơ học	Hoạt động ổn định nhiều chu kỳ	Tổng hợp phức tạp	Nước thải công nghiệp được (diclofenac)

ZnO/chitosan được tóm lược trong Bảng 1 cho thấy ưu thế cũng như các vấn đề còn tồn tại của hệ vật liệu này.

Những năm gần đây, các nghiên cứu còn tập trung vào hướng tổng hợp xanh (green synthesis) sử dụng dịch chiết thực vật hoặc các hợp chất sinh học nhằm thay thế các hóa chất độc hại trong quá trình chế tạo vật liệu nano (K. Sali et al., 2021; Phan et al., 2026). Đây được xem là xu hướng phù hợp với định hướng phát triển bền vững và ứng dụng trong lĩnh vực nông nghiệp, thực phẩm và môi trường.

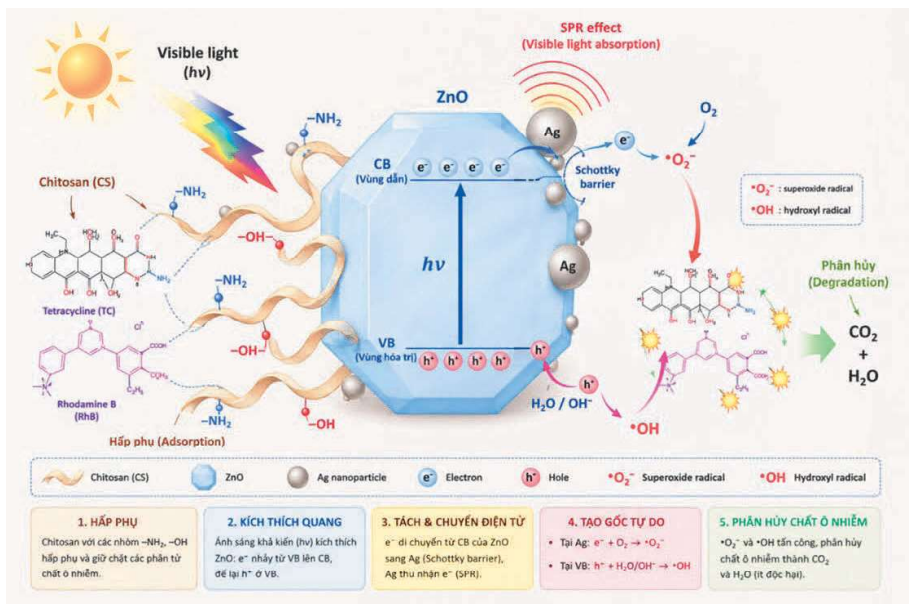
3.2. Cơ sở lý luận và cơ chế hoạt động quang xúc tác của hệ nanocomposite Ag-ZnO/chitosan

Hoạt động quang xúc tác và hấp phụ của các dạng vật liệu được so sánh ở Bảng 2.

Hoạt tính của vật liệu Ag-ZnO/chitosan phụ thuộc vào sự tương tác hiệp đồng giữa các thành phần trong hệ composite. ZnO đóng vai trò là chất bán dẫn quang xúc tác, tạo ra các cặp electron-lỗ trống dưới tác dụng của ánh sáng và hình thành các gốc oxy hóa mạnh như $\bullet\text{OH}$ và $\text{O}_2\bullet^-$ để phân hủy các chất hữu cơ

Bảng 2. So sánh các đặc tính quang xúc tác và hấp phụ của ZnO, Ag-ZnO và Ag-ZnO/CS

Vật liệu	Hấp thụ ánh sáng	Tách e^-/h^+	Tái tổ hợp e^-/h^+	Tạo ROS ($\bullet\text{OH}$ và $\text{O}_2\bullet^-$)	Hấp phụ
ZnO	UV	Thấp	Cao	Trung bình	Thấp
Ag-ZnO	UV-vis	Tốt	Thấp	Cao	Thấp
Ag-ZnO/CS	UV-vis	Tốt	Thấp	Cao	Cao



Hình 2. Cơ chế quang xúc tác phân hủy tetracyclin của hệ vật liệu Ag-ZnO/chitosan

(Aina et al., 2025). Việc pha tạp Ag giúp mở rộng khả năng hấp thụ sang vùng khả kiến, đồng thời đóng vai trò bẫy electron, làm giảm sự tái tổ hợp electron - lỗ trống và nâng cao hiệu suất quang xúc tác (Goktas and Goktas, 2021). Trong khi đó, chitosan cung cấp các nhóm chức $-NH_2$ và $-OH$ giúp tăng khả năng hấp phụ chất ô nhiễm, hỗ trợ phân tán các hạt Ag-ZnO và cải thiện khả năng thu hồi vật liệu sau sử dụng (Goktas and Goktas, 2021). Nhờ hiệu ứng hiệp đồng giữa Ag, ZnO và chitosan, hệ nanocomposite Ag-ZnO/chitosan thể hiện hoạt tính quang xúc tác và hấp phụ vượt trội so với ZnO hoặc Ag-ZnO riêng lẻ (Mohd Adnan et al., 2020).

Mô hình cơ chế quang xúc tác được trình bày ở Hình 2. Hiệu quả quang xúc tác của hệ Ag-ZnO/chitosan là kết quả của hiệu ứng hiệp đồng giữa các thành phần trong composite. Trong đó, ZnO đóng vai trò là chất bán dẫn quang xúc tác chính, tạo ra các cặp electron - lỗ trống dưới tác dụng của ánh sáng. Các điện tích quang sinh này tiếp tục tham gia tạo thành các gốc oxy hóa mạnh như $\bullet OH$ và $O_2\bullet^-$ có khả năng phân hủy các hợp chất hữu cơ (Aina et al., 2025).

Việc pha tạp Ag giúp cải thiện đáng kể hoạt tính của ZnO thông qua hiệu ứng cộng hưởng plasmon bề mặt và khả năng nhận electron, từ đó làm giảm sự tái kết hợp electron - lỗ trống và tăng hấp thụ ánh sáng khả kiến (Goktas and Goktas, 2021). Trong khi đó, chitosan đóng vai trò chất nền sinh học giúp phân tán ổn định các hạt nano Ag-ZnO và tăng khả năng hấp phụ chất ô nhiễm thông qua các nhóm $-NH_2$ và $-OH$ (Mohd Adnan et al., 2020).

Nhờ sự phối hợp giữa ZnO, Ag và chitosan, hệ composite Ag-ZnO/chitosan cho hiệu quả quang xúc

tác, độ ổn định và khả năng tái sử dụng cao hơn so với ZnO hoặc Ag-ZnO đơn thuần. Tuy nhiên, để vật liệu quang xúc tác hoạt động hiệu quả, cần khảo sát và kiểm soát tốt các yếu tố ảnh hưởng.

Các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả xử lý chất hữu cơ khó phân hủy trong nước:

- *pH dung dịch*: Quyết định điện tích bề mặt của chitosan và trạng thái phân ly của chất ô nhiễm (Mohamed et al., 2023; Zulfiqar et al., 2024). Môi trường axit nhẹ thường hỗ trợ hút bám tĩnh điện với thuốc nhuộm anion (Kumawat et al., 2026; Zeid and Leprince-Wang, 2024).

- *Hàm lượng Ag*: Vượt quá ngưỡng tối ưu (thường $> 5-7\%$ wt) sẽ gây che khuất bề mặt ZnO, biến Ag thành tâm tái tổ hợp điện tích, làm giảm hiệu suất (Fakhrutdinova et al., 2024; Kusdianto et al., 2025).

- *Liều lượng xúc tác và bước sóng, cường độ ánh sáng*: Ảnh hưởng trực tiếp đến số lượng photon được hấp thụ và tâm hoạt tính được kích hoạt trên hệ màng [Mohan G et al., 2025].

3.3. Đánh giá thực trạng xử lý nước thải

3.3.1. Hiệu quả xử lý nước thải của vật liệu Ag-ZnO/chitosan

Các nghiên cứu gần đây cho thấy vật liệu Ag-ZnO/chitosan là một trong những hệ nanocomposite có tiềm năng ứng dụng trong xử lý nước thải chứa các chất ô nhiễm hữu cơ khó phân hủy sinh học. Vật liệu đã được khảo sát trên nhiều đối tượng ô nhiễm khác nhau như thuốc nhuộm, kháng sinh và các hợp chất hữu cơ độc hại. Hiệu suất xử lý ghi nhận trong các nghiên cứu thường đạt từ khoảng 75–98%, tùy thuộc vào bản chất chất ô nhiễm, thành phần vật liệu và điều kiện vận hành (Halim et al., 2025). Một số kết quả tiêu biểu được tổng hợp trong Bảng 3.

Bảng 3. Hiệu quả xử lý các chất ô nhiễm hữu cơ trong nước của vật liệu ZnO, Ag-ZnO và Ag-ZnO/chitosan theo các nghiên cứu đã công bố

Nhóm chất ô nhiễm	Vật liệu	Chất ô nhiễm mô hình	Nguồn sáng	Hiệu suất (%)	Cơ chế cải thiện và Nhận xét	Trích dẫn
Thuốc nhuộm	ZnO	Methylene Blue (MB)	UV	~75	Hoạt tính cơ bản : Vùng cấm rộng (3.2 eV), chỉ kích hoạt mạnh dưới UV. Tốc độ tái tổ hợp e^-/h^+ nhanh khiến hiệu suất bị giới hạn.	(Zhu et al., 2021)
	Ag-ZnO	Rhodamine B (RhB)	UV-Vis	96,5	Hiệu ứng plasma : tăng hấp thụ khả kiến, bẫy e^- , giảm tái tổ hợp.	(Fakhrutdinova et al., 2024)
	Ag-ZnO/CS	EBT, Murexide	Vis/ Mặt trời	>98	Hiệp đồng đa năng : Chitosan hút bám tĩnh điện cực mạnh thuốc nhuộm anion/cation. Độ bền cấu trúc cao, tái sử dụng hiệu quả >8 chu kỳ.	(Tanuj et al., 2024)



Kháng sinh	Ag-ZnO/CS	Diclofenac	Mặt trời	~90	Ổn định cấu trúc: Chitosan liên kết chéo (crosslinked) bảo vệ cụm Ag/ZnO không bị rửa trôi, xử lý hiệu quả kháng sinh dưới ánh sáng tự nhiên.	(Abu Zaman et al., 2025)
	Ag-ZnO	Tetracycline	Vis	94,2	Phân hủy vòng bền vững: Ag thúc đẩy gia tăng mật độ gốc tự do ($\bullet\text{OH}$, $\text{O}_2\bullet^-$), bề gãy nhanh chóng cấu trúc vòng của kháng sinh.	(Fakhrutdinova et al., 2024; Kumawat et al., 2026)
Hợp chất hữu cơ độc hại	Ag-ZnO	Phenol	UV-Vis	95	Oxy hóa: Xúc tác dị thể giúp phân hủy triệt để vòng benzen thành CO_2 và H_2O . Điều kiện tối ưu qua mô hình RSM/ANOVA.	(Mohan et al., 2025)
Thuốc nhuộm (Hệ tham chiếu)	TiO_2	Rhodamine B (RhB)	Vis	~30	Hoạt tính yếu: Đơn pha TiO_2 , ánh sáng khả kiến hoạt tính yếu. Hiệu suất được cải thiện khi thêm chất oxy hóa hoặc pha tạp thành phần Fe.	(Rezaeifard et al., 2023)
	Chitosan/ $\text{ZnO-Fe}_3\text{O}_4$	Cationic & Anionic Dyes	Vis	>90	Giải quyết vấn đề thu hồi: Bổ sung lõi từ tính Fe_3O_4 vào nền chitosan giúp thu hồi xúc tác dễ dàng bằng từ trường ngoài sau khi xử lý.	(M. Quy et al., 2025)

Từ các kết quả tổng hợp có thể nhận thấy rằng việc pha tạp Ag vào ZnO giúp cải thiện đáng kể hoạt tính quang xúc tác so với ZnO thuần. Trong khi ZnO nguyên chất chủ yếu hoạt động hiệu quả dưới ánh sáng UV và cho hiệu suất xử lý còn hạn chế do sự tái tổ hợp nhanh của các cặp electron-lỗ trống (Zhu et al., 2021), việc bổ sung Ag đã góp phần mở rộng khả năng hấp thụ ánh sáng khả kiến thông qua hiệu ứng plasmon bề mặt và thúc đẩy quá trình tách điện tích, từ đó nâng cao hiệu suất xử lý các chất ô nhiễm hữu cơ như thuốc nhuộm, kháng sinh và phenol (Fakhrutdinova et al., 2024; Kumawat et al., 2026).

Bên cạnh đó, sự kết hợp giữa Ag-ZnO và chitosan tạo ra hiệu ứng hiệp đồng giữa quá trình hấp phụ và quang xúc tác. Các nhóm chức amino và hydroxyl trên mạch chitosan có khả năng tương tác với nhiều loại chất ô nhiễm, góp phần làm tăng nồng độ chất ô nhiễm tại vùng hoạt tính của xúc tác và hỗ trợ quá trình phân hủy diễn ra hiệu quả hơn. Nhờ cơ chế này, nhiều hệ Ag-ZnO/chitosan đã đạt hiệu suất xử lý thuốc nhuộm và các hợp chất hữu cơ ở mức rất cao (Abu Zaman et al., 2025; Tanuj et al., 2024).

Ngoài việc nâng cao hiệu suất xử lý, nền chitosan còn đóng vai trò cố định các hạt nano Ag-ZnO, giúp

hạn chế hiện tượng kết tụ và thất thoát vật liệu trong quá trình sử dụng (Kraskouski et al., 2026). Các nghiên cứu cho thấy việc tạo composite trên nền chitosan giúp cải thiện độ ổn định của xúc tác, thuận lợi cho quá trình thu hồi và tái sử dụng so với các hệ nano dạng bột phân tán trong dung dịch (Abu Zaman et al., 2025). Xu hướng này cũng được ghi nhận ở các vật liệu trên nền chitosan kết hợp với pha từ tính Fe_3O_4 nhằm nâng cao khả năng thu hồi sau xử lý (M. Quy et al., 2025).

Nhìn chung, các kết quả đã công bố cho thấy vật liệu Ag-ZnO/chitosan không chỉ cải thiện hoạt tính quang xúc tác mà còn góp phần nâng cao tính ổn định và khả năng ứng dụng thực tế của hệ vật liệu trong xử lý nước thải (Arif, 2026; Lehocký, 2025). Đây cũng là cơ sở quan trọng cho việc tiếp tục nghiên cứu các hệ composite Ag-ZnO/chitosan có cấu trúc và thành phần tối ưu nhằm xử lý hiệu quả các chất ô nhiễm kháng sinh trong môi trường nước.

3.3.2. Những hạn chế trong nghiên cứu hiện nay

Mặc dù hệ vật liệu Ag-ZnO/chitosan cho thấy nhiều tiềm năng trong xử lý nước bằng quang xúc tác, hiện vẫn còn tồn tại một số hạn chế cần tiếp tục nghiên cứu và tìm giải pháp khắc phục (Bảng 4) (Jabeen et al., 2025; Sak, 2026). Ngoài ra, sự khác biệt về phương

Bảng 4. Tổng hợp các hạn chế của hệ vật liệu Ag-ZnO/chitosan trong nghiên cứu hiện nay và đề xuất khắc phục

Các hạn chế	Nguyên nhân chính	Ảnh hưởng	Đề xuất hướng khắc phục
1. Hạn chế trong nghiên cứu với nước thải thực tế	Phần lớn các nghiên cứu chỉ sử dụng dung dịch mô hình chứa chất ô nhiễm đơn lẻ (thuốc nhuộm, kháng sinh)	Không phản ánh đúng hiệu quả thực tế do nước thải thực chứa nhiều tạp chất, chất hữu cơ phức tạp và ion cạnh tranh	Tiến hành đánh giá vật liệu trực tiếp trên các mẫu nước thải thực tế đa thành phần
2. Nguy cơ giải phóng ion Ag⁺ vào môi trường	Liên kết giữa Ag và nền ZnO/chitosan có thể bị phá vỡ dưới tác động của tia UV và môi trường nước	Gây ô nhiễm thứ cấp, ảnh hưởng độc tính đến hệ sinh thái thủy sinh và làm hao hụt lượng xúc tác	Cải tiến phương pháp cố định Ag; sử dụng các tác nhân tạo liên kết chéo (cross-linking) bền vững hơn
3. Độ bền cơ học và sự suy giảm hoạt tính	Đặc tính dễ trương nở của màng chitosan và sự rửa trôi các hạt nano trong hệ dòng chảy liên tục sau nhiều chu kỳ	Giảm tuổi thọ của vật liệu, cản trở việc ứng dụng vào các hệ thống xử lý nước liên tục	Chế tạo vật liệu dưới dạng cấu trúc xốp 3D (aerogel/hydrogel) hoặc tăng mật độ liên kết chéo của nền chitosan
4. Chi phí sản xuất ở quy mô công nghiệp	Các phương pháp tổng hợp hiện tại đòi hỏi hóa chất tinh khiết, thiết bị phức tạp và tiêu tốn nhiều năng lượng	Đẩy giá thành lên cao, khó mở rộng quy mô từ phòng thí nghiệm sang sản xuất hàng loạt.	Nghiên cứu các phương pháp tổng hợp “xanh”, tối ưu hóa quy trình ở điều kiện thường với nguyên liệu giá rẻ
5. Thiếu thông tin về cơ chế phản ứng và độ an toàn	Các nghiên cứu chủ yếu do hiệu suất phân hủy, ít đánh giá khả năng khoáng hóa và phân tích sản phẩm phụ trung gian	Chưa đảm bảo các chất ô nhiễm bị phân hủy hoàn toàn thành CO ₂ và H ₂ O hay biến đổi thành chất độc hơn	Đẩy mạnh sử dụng các phương pháp phân tích sâu (LC-MS) để xác định chuỗi sản phẩm trung gian và cơ chế khoáng hóa (Paiu et al., 2025)

pháp tổng hợp, hàm lượng Ag, tỷ lệ ZnO/chitosan và hình thái vật liệu giữa các nghiên cứu khiến việc so sánh hiệu quả quang xúc tác còn thiếu tính thống nhất. Mỗi liên hệ giữa cấu trúc vật liệu, khả năng hấp phụ và hoạt tính quang xúc tác vẫn chưa được làm rõ đầy đủ (Bhupkar and Bhame, 2024) (Bảng 4).

4. THÁCH THỨC VÀ ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU CỦA VẬT LIỆU AG-ZNO/CHITOSAN TRONG XỬ LÝ NƯỚC THẢI

4.1. Những thách thức trong nghiên cứu và ứng dụng

Mặc dù vật liệu nanocomposite Ag-ZnO/chitosan có khả năng quang xúc tác vượt trội, việc chuyển giao công nghệ từ phòng thí nghiệm ra quy mô công nghiệp đang vấp phải những rào cản kỹ thuật và kinh tế đáng kể. Thách thức cốt lõi nằm ở sự đánh đổi giữa hiệu suất xúc tác và độ bền vật liệu. Để tăng hiệu quả quang xúc tác, các hạt nano cần diện tích bề mặt tiếp xúc lớn; tuy nhiên, điều này lại làm tăng nguy cơ rửa trôi, kết tụ hạt nano và đặc biệt là sự giải phóng ion Ag⁺ vào môi trường nước. Sự rò rỉ này không chỉ làm suy giảm hoạt tính sau nhiều chu kỳ mà còn tiềm ẩn rủi ro độc tính sinh thái đối với hệ vi sinh vật thủy sinh (Bui et al., 2017; Umer et al., 2026; Vasconcelos et al., 2026; Zhang et al., 2022).

Bên cạnh đó, rào cản về thương mại hóa và ứng dụng trong xử lý nước thải công nghiệp vẫn còn lớn. Nước thải thực tế (như dệt nhuộm, xi mạ) thường có ma trận phức tạp với nhu cầu oxy hóa học (COD) cao, độ mặn lớn và pH biến động khắc nghiệt.

Những yếu tố này trực tiếp tấn công mạng lưới polymer sinh học, làm cấu trúc chitosan dễ trương nở và phân hủy cơ học (Oliveira et al., 2022). Hơn nữa, chi phí cho tiền chất Ag và quá trình tinh chế chitosan chất lượng cao vẫn là một rào cản khiến vật liệu này khó cạnh tranh về giá so với các phương pháp xử lý truyền thống.

4.2. Định hướng nghiên cứu phát triển trong tương lai

Để hệ vật liệu Ag-ZnO/chitosan thực sự trở thành một giải pháp xử lý môi trường thực tiễn và bền vững, các định hướng nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào giải quyết các vấn đề còn tồn tại bằng các giải pháp cốt lõi.

Thứ nhất, tối ưu hóa cấu trúc và năng lượng vận hành: Cần đẩy mạnh kỹ thuật biến tính liên kết chéo (sử dụng epichlorohydrin (Xu et al., 2011), sodium tripolyphosphate (Sacco et al., 2014)) để tạo ra các màng/hydrogel 3D có độ bền cơ học cao, chống chịu tốt trong hệ dòng chảy liên tục của nước thải công nghiệp (Pandey, 2021). Đồng thời, định hướng phát triển vật liệu có khả năng quang xúc tác mạnh dưới ánh sáng khả kiến hoặc ánh sáng mặt trời tự nhiên (Truc et al., 2023; Zhang et al., 2022) là cần thiết để giảm thiểu chi phí tiêu thụ điện năng (so với đèn UV), qua đó nâng cao tính khả thi về mặt kinh tế.

Thứ hai, tính khả thi và tiềm năng thương mại hóa tại Việt Nam: Việt Nam sở hữu lợi thế tuyệt đối về nguồn nguyên liệu khi là một trong những quốc gia xuất khẩu thủy sản hàng đầu, cung cấp lượng lớn phụ



phẩm vỏ tôm, cua – nguồn chiết xuất chitin/chitosan dồi dào và giá rẻ. Việc kết hợp nguồn chitosan nội địa này với công nghệ tổng hợp xanh (sử dụng dịch chiết thực vật, phụ phẩm nông nghiệp nội địa làm tác nhân khử (Alazaiza et al., 2026; Soltys et al., 2021; V. Jagadeeswar et al., 2023) sẽ là giải pháp tối ưu chi phí sản xuất. Hướng đi này không chỉ mở ra con đường thương mại hóa vật liệu với giá thành cạnh tranh mà còn đáp ứng tốt mô hình kinh tế tuần hoàn.

Thứ ba, triển vọng ứng dụng công nghiệp: Thay vì thử nghiệm trên dung dịch mô hình, các nghiên cứu tiếp theo cần nhắm thẳng vào việc tích hợp hệ vật liệu Ag-ZnO/chitosan vào các hệ thống lọc hoặc hệ thống phản ứng quang xúc tác liên tục để xử lý dòng thải đặc thù tại Việt Nam (như nước thải dệt nhuộm khó phân hủy sinh học hoặc nước thải nuôi trồng thủy sản cần kháng khuẩn). Việc có dữ liệu đánh giá vòng đời (LCA) và an toàn sinh học ở quy mô pilot sẽ là bước đệm quyết định để đưa vật liệu này vào ứng dụng công nghiệp.

5. KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

5.1. Kết luận

Qua tổng hợp tài liệu, nanocomposite Ag-ZnO/chitosan đã được khẳng định là vật liệu quang xúc tác mang lại hiệu năng cao nhờ sự kết hợp hiệp đồng đa thành phần. Hệ vật liệu này đạt hiệu suất phân hủy ấn tượng (từ 75–98%) đối với các nhóm thuốc nhuộm và kháng sinh dưới điều kiện ánh sáng khả kiến, đồng thời thể hiện khả năng thu hồi và tái sử dụng tốt. Mặc dù vậy, khoảng trống nghiên cứu lớn nhất hiện nay là hầu hết các công trình mới chỉ dừng lại ở quy mô phòng thí nghiệm với các dung dịch mô hình. Các nghiên cứu hiện tại đang thiếu hụt nghiêm trọng dữ liệu thực nghiệm về độ bền cơ học của nền polymer trong hệ thống dòng chảy liên tục, sự suy giảm hoạt tính do rò rỉ ion Ag^+ , các rủi ro về độc tính sinh thái, cũng như khả năng đáp ứng của vật liệu trước các ma trận nước thải đa thành phần phức tạp.

5.2. Khuyến nghị giải pháp cho các nhà quản lý và doanh nghiệp

Để vượt qua các rào cản kỹ thuật và tiến tới quy mô hóa ứng dụng, các nghiên cứu trong tương lai cần ưu tiên giải quyết các vấn đề sau:

Thử nghiệm thực tế và đánh giá an toàn sinh thái: Chuyển thử nghiệm từ dung dịch đơn chất sang nước thải công nghiệp thực tế trực tiếp trên các hệ thống dòng chảy liên tục. Cần kết hợp phân tích sâu (như LC-MS) để xác định chuỗi sản phẩm trung gian, cơ chế khoáng hóa và đánh giá toàn diện chu trình vòng đời (LCA) của hệ vật liệu.

Nâng cao độ bền cấu trúc: Tập trung phát triển các kỹ thuật liên kết chéo bền vững hoặc chế tạo vật liệu dưới dạng cấu trúc xốp 3D giúp gia tăng độ bền cơ học

cho hệ màng lọc, ngăn ngừa sự trương nở và sự rửa trôi của hạt nano Ag-ZnO vào môi trường nước.

Tối ưu hóa tổng hợp xanh và thương mại hóa: Ứng dụng công nghệ tổng hợp xanh kết hợp việc tận dụng các nguồn nguyên liệu nội địa sẵn có, điển hình như nguồn chitosan chiết xuất từ phụ phẩm chế biến thủy sản. Định hướng này không chỉ góp phần tối ưu hóa chi phí sản xuất ở quy mô công nghiệp mà còn hoàn thiện mô hình kinh tế tuần hoàn trong lĩnh vực công nghệ môi trường.

Lời cảm ơn: Công trình này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo Việt Nam theo đề tài mã số B2024-TDV-10■

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Abu Zaman, M.F., Mokhtar, Z., Hasan, M., 2025. Removal of diclofenac by solar photocatalysis utilizing crosslinked chitosan/oil-palm ash embedded Ag/ZnO nanoparticle. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 1548, 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1548/1/012031>
2. Aina, A.R.N., Patel, H., Aich, S., Roy, B., Samanta, N.S., Pal, B., 2025. Recent advances in ZnO based photocatalysts for industrial dye degradation. *Discov. Appl. Sci.* 7, 977. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07530-z>
3. Alazaiza, M.Y.D., Mokaizh, A.A.B., Atta, M.R., Al-Mahmodi, A.F., Nassani, D.E., Lawati, M.A., Abushammala, M.F.M., 2026. Global Research Evolution in Catalytic Water and Wastewater Treatment: A Bibliometric Analysis Toward Sustainable and Resilient Technologies. *Catalysts* 16. <https://doi.org/10.3390/catal16040291>
4. Ali, H., Ismail, A.M., Menazea, A.A., 2022. Multifunctional Ag/ZnO/chitosan ternary bio-nanocomposites synthesized via laser ablation with enhanced optical, antibacterial, and catalytic characteristics. *J. Water Process Eng.* 49, 102940. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102940>
5. Amangelsin, Y., Semenova, Y., Dadar, M., Aljofan, M., Björklund, G., 2023. The Impact of Tetracycline Pollution on the Aquatic Environment and Removal Strategies. *Antibiotics* 12, 440. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12030440>
6. Arif, M., 2026. Photocatalytic degradation of dyes by metal sulfide–chitosan based composites: a comprehensive review. *RSC Adv.* 16, 5353–5373. <https://doi.org/10.1039/D5RA07777J>
7. Bhapkar, A.R., Bhame, S., 2024. A review on ZnO and its modifications for photocatalytic degradation of prominent textile effluents: Synthesis, mechanisms, and future directions. *J. Environ. Chem. Eng.* 12, 112553. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112553>
8. Boudechiche, N., Morante, N., Sannino, D., Monzillo, K., Trari, M., Sadaoui, Z., 2024. Enhanced Visible-Light Photocatalysis Activity of TiO₂/Ag Nanocomposites

- Prepared by the Ultrasound-Assisted Sol–Gel Method: Characterization and Degradation–Mineralization of Cationic and Anionic Dyes. *Catalysts* 14. <https://doi.org/10.3390/catal14120883>
9. Bui, V.K.H., Park, D., Lee, Y.-C., 2017. Chitosan Combined with ZnO, TiO₂ and Ag Nanoparticles for Antimicrobial Wound Healing Applications: A Mini Review of the Research Trends. *Polymers* 9. <https://doi.org/10.3390/polym9010021>
 10. Crini, G., Lichtfouse, E., 2019. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environ. Chem. Lett.* 17, 145–155. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
 11. Dejene, B.K., Abteu, M.A., 2025. Chitosan/zinc oxide (ZnO) nanocomposites: A critical review of emerging multifunctional applications in food preservation and biomedical systems. *Int. J. Biol. Macromol.* 316, 144773. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.144773>
 12. Fakhrutdinova, E.D., Volokitina, A.V., Kulinich, S.A., Goncharova, D.A., Kharlamova, T.S., Svetlichnyi, V.A., 2024. Plasmonic Nanocomposites of ZnO-Ag Produced by Laser Ablation and Their Photocatalytic Destruction of Rhodamine, Tetracycline and Phenol. *Materials* 17. <https://doi.org/10.3390/ma17020527>
 13. Goktas, S., Goktas, A., 2021. A comparative study on recent progress in efficient ZnO based nanocomposite and heterojunction photocatalysts: A review. *J. Alloys Compd.* 863, 158734. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158734>
 14. Halim, O.M.A., Mustapha, N.H., Mohd Fudzi, S.N., Azhar, R., Zanal, N.I.N., Nazua, N.F., Nordin, A.H., Mohd Azami, M.S., Mohd Ishak, M.A., Ismail, W.I.N.W., Ahmad, Z., 2025. A review on modified ZnO for the effective degradation of methylene blue and rhodamine B. *Results Surf. Interfaces* 18, 100408. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100408>
 15. Hezam, A., Drmash, Q.A., Ponnammma, D., Bajiri, M.A., Qamar, M., Namratha, K., Zare, M., Nayan, M.B., Onaizi, S.A., Byrappa, K., 2022. Strategies to Enhance ZnO Photocatalyst's Performance for Water Treatment: A Comprehensive Review. *Chem. Rec.* 22, e202100299. <https://doi.org/10.1002/tcr.202100299>
 16. Hussain, A., Fiaz, S., Almohammadi, A., Waqar, A., 2024. Optimizing photocatalytic performance with Ag-doped ZnO nanoparticles: Synthesis and characterization. *Heliyon* 10, e35725. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35725>
 17. Jabeen, N., Naseem, A., Sarfraz, M., Murtaza, M., Ali, T., Haq, M., Farooq, M., Shabbir, A., Hameed, F., Khan, W.Z., 2025. Cross-Disciplinary Research Gaps in Physical, Chemical, and Environmental Sciences: An Integrative Review from Nanotechnology to Wastewater Treatment, Renewable Energy, Artificial Intelligence, and Biomedical Engineering. *Sch. J. Phys. Math. Stat.* 12, 369–388. <https://doi.org/10.36347/sjpms.2025.v12i09.001>
 18. K. Sali, R., S. Pujar, M., Patil, S., H. Sidarai, A., 2021. Green Synthesis of ZnO and Ag-ZnO Nanoparticles using *Macrotyloma Uniflorum*: Evaluation of Antibacterial Activity. *Adv. Mater. Lett.* 12, 1–7. <https://doi.org/10.5185/amlett.2021.071645>
 19. Kraskouski, A., Nealy, S., Kharlampieva, E., 2026. Polymer/Titania Composites for the Remediation of Water from Pharmaceuticals: A Review. *ACS Omega* 11, 6848–6882. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c09526>
 20. Kumawat, A., Chhichholiya, S., Devi Sharma, M., Kumari, P., Kumar Meena, R., Fageria, P., 2026. Enhanced visible-light photocatalysis by Au and Ag decorated ZnO for the simultaneous degradation of tetracycline and methylene blue. *Nanoscale Adv.* 8, 1686–1711. <https://doi.org/10.1039/D5NA00878F>
 21. Kusdianto, K., Puri, N.R., Shimada, M., Madhania, S., Winardi, S., 2025. Synergistic Effect of Calcination Temperature and Silver Doping on Photocatalytic Performance of ZnO Material. *Materials* 18. <https://doi.org/10.3390/ma18143362>
 22. Lehocý, M., 2025. Environmental Applications of Chitosan Derivatives and Chitosan Composites. *Polymers* 17, 2583. <https://doi.org/10.3390/polym17192583>
 23. Mohamed, K.M., Benitto, J.J., Vijaya, J.J., Bououdina, M., 2023. Recent Advances in ZnO-Based Nanostructures for the Photocatalytic Degradation of Hazardous, Non-Biodegradable Medicines. *Crystals* 13, 329. <https://doi.org/10.3390/cryst13020329>
 24. Mohan G., Meenachi S., Kiruthika K., Kirthiga D., 2025. Unveiling Optimal Conditions for Phenol Degradation: Response Surface Methodology and ANOVA Analysis of ZnO and Ag-Doped ZnO Photocatalysts. *Nat. Environ. Pollut. Technol.* 24, 293. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2025.v24iS1.022>
 25. Mohd Adnan, M.A., Phoon, B.L., Muhd Julkapli, N., 2020. Mitigation of pollutants by chitosan/metallic oxide photocatalyst: A review. *J. Clean. Prod.* 261, 121190. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121190>
 26. M. Quy, B., N. Thu, N.T., T. Xuan, V., H. Hoa, N.T., N. Linh, N.T., Q. Tung, V., T. Le, V.T., T. Thao, T., K. Ngan, N.T., T. Tho, P., M. Hung, N., T. Ha, L., 2025. Photocatalytic degradation performance of a chitosan/ZnO-Fe₃O₄ nanocomposite over cationic and anionic dyes under visible-light irradiation. *RSC Adv.* 15, 1590–1603. <https://doi.org/10.1039/D4RA08262A>
 27. Oliveira, A.E. de, Visioli, L.J., Enzweiler, H., 2022. Photocatalytic reactors and their scale up: literature review. *Conjecturas* 22, 509–530. <https://doi.org/10.53660/CONJ-1071-Q11>



28. Paiu, M., Lutic, D., Favier, L., Gavrilescu, M., 2025. Heterogeneous Photocatalysis for Advanced Water Treatment: Materials, Mechanisms, Reactor Configurations, and Emerging Applications. *Appl. Sci.* 15. <https://doi.org/10.3390/app15105681>
29. Pandey, A., 2021. Cyclodextrin-based nanoparticles for pharmaceutical applications: a review. *Environ. Chem. Lett.* 19, 4297–4310. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01275-y>
30. Phan, T.M.H., Nguyen, T.L., Bui, V.C., Vu, X.M., Le, T.M.H., Nguyen, M.D., Usacheva, T.R., Pham, T.D.H., Pham, T.L., 2026. Green synthesis and characteristics of Ag-ZnO doped nanoparticles utilizing plant extracts as reducing agents. *Hybrid Adv.* 12, 100613. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2026.100613>
31. Photocatalytic degradation performance of a chitosan/ZnO-Fe₃O₄ nanocomposite over cationic and anionic dyes under visible-light irradiation, 2025. *RSC Adv.* 15, 1590–1603. <https://doi.org/10.1039/d4ra08262a>
32. Rezaeifard, A., Rezaei, M., Keikha, N., Jafarpour, M., Chen, P., Jiang, H., 2023. Enhanced Visible-Light-Induced Photocatalytic Activity in M(III)Salophen-Decorated TiO₂ Nanoparticles for Heterogeneous Degradation of Organic Dyes. *ACS Omega* 8, 3821–3834. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05971>
33. Sacco, P., Borgogna, M., Travan, A., Marsich, E., Paoletti, S., Asaro, F., Grassi, M., Donati, I., 2014. Polysaccharide-Based Networks from Homogeneous Chitosan-Tripolyphosphate Hydrogels: Synthesis and Characterization. *Biomacromolecules* 15, 3396–3405. <https://doi.org/10.1021/bm500909n>
34. Sak, G., 2026. Organic Pollutant Degradation Through Photocatalysis: Progress, Challenges, and Sustainable Solutions (Mini Review) - ProQuest [WWW Document]. URL <https://www.proquest.com/openview/6321dbb8a28f8db6108f7ae7dd671e77/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2032433> (accessed 5.11.26).
35. Soltys, L., Olkhovyy, O., Tatarchuk, T., Naushad, M., 2021. Green Synthesis of Metal and Metal Oxide Nanoparticles: Principles of Green Chemistry and Raw Materials. *Magnetochemistry* 7. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry7110145>
36. Tanuj, null, Kumar, R., Kumar, S., Kalra, N., Sharma, S., Montañó, V.E.A., Singh, A., 2024. Sustainable and facile fabrication of chitosan-coated silver-doped zinc oxide nanocomposites exploiting *Bergera koenigii* foliage for enhanced photocatalysis and antibacterial activity. *Int. J. Biol. Macromol.* 279, 135162. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135162>
37. Truc, V.D., Nguyen, T.V., Vu, T.V., Nguyen, T.A., Ngo, T.D., Le, T.T., Le, T.L., Pham, L.T., Tran, L.D., 2023. ZnO–Ag Hybrid Nanoparticles Used in the Antimicrobial Solvent-Based Coatings: Antibacterial Studies in the Darkness and Under Visible-Light Irradiation. *ChemistrySelect* 8, e202204966. <https://doi.org/10.1002/slct.202204966>
38. Umer, A., Sulivany, B.A., Jamshed, M., Yasin, R., Ahmad, M., Malik, I.U., Tauqeer, M., Akhtar, M.S., Tauhidi, M., Owais, M., Samiullah, K., Fazal, R.M., 2026. Ecological effects and environmental fate of silver nanoparticles in soil and in the water ecosystem: a review. *Sci. J. Univ. Zakho* 14, 33–42. <https://doi.org/10.25271/sjuoz.2026.14.1.1838>
39. V. Jagadeeswar, Dhinesh, V., Roopan, S.M., Samuel, E.J.J., 2023. Plant Extract-Mediated Synthesis of Ag-Doped ZnO: Eco-Friendly Nanomaterial for Environmental Restoration, Microbial Inhibition, Cell Toxicity, Antioxidant Potential, and Sensing. *Colloid J.* 85, 827–845. <https://doi.org/10.1134/S1061933X23600513>
40. Vasconcelos, A. dos S., Aguiar, L.V.B. de, Pessoa, V.A., Carmo, I.B. do, Soares, L.B. do N., Lima-Silva, G., Pereira, D.B., Nascimento, P.C. do, Pereira, J.L.S., Sales-Campos, C., Chevreuil, L.R., Martínez-Burgos, W.J., Pozzan, R., 2026. Toxicological and Environmental Risk Assessment of Biopolymeric Coatings for Horticultural Produce: A Comprehensive Review on Biosafety, Degradation, and Ecological Risks. *Coatings* 16. <https://doi.org/10.3390/coatings16040452>
41. Xu, L., Zhao, D., Song, J., Xu, Z., Zhou, J., 2011. Preparation of Epichlorohydrine-Modified Chitosan Microsphere Functionalized Materials and Adsorption Characterization Toward Olaquinox. *Int. J. Polym. Anal. Charact.* 16, 118–126. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2011.541636>
42. Zeid, S.A., Leprince-Wang, Y., 2024. Advancements in ZnO-Based Photocatalysts for Water Treatment: A Comprehensive Review. *Crystals* 14. <https://doi.org/10.3390/cryst14070611>
43. Zhang, Q., Li, J., Xu, M., 2022. Ag-decorated ZnO-based nanocomposites for visible light-driven photocatalytic degradation: basic understanding and outlook. *J. Phys. Appl. Phys.* 55, 483001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac941a>
44. Zhou, X., Liu, G., Yu, J., Fan, W., 2012. Surface plasmon resonance-mediated photocatalysis by noble metal-based composites under visible light. *J. Mater. Chem.* 22, 21337–21354. <https://doi.org/10.1039/C2JM31902K>
45. Zhu, X., Wang, J., Yang, D., Liu, J., He, L., Tang, M., Feng, W., Wu, X., 2021. Fabrication, characterization and high photocatalytic activity of Ag–ZnO heterojunctions under UV-visible light. *RSC Adv.* 11, 27257–27266. <https://doi.org/10.1039/D1RA05060E>
46. Zulfiqar, N., Nadeem, R., Musaimi, O.A., 2024. Photocatalytic Degradation of Antibiotics via Exploitation of a Magnetic Nanocomposite: A Green Nanotechnology Approach toward Drug-Contaminated Wastewater Reclamation. *ACS Omega* 9, 7986–8004. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08116>