

GREEN SYNTHESIS AND ANTIOXIDANT ACTIVITY OF NANO ZINC OXIDE NANOPARTICLES USING POLYPHENOL EXTRACT FROM GREEN TEA LEAVES IN THAI NGUYEN

Khieu Thi Tam

TNU - University of Sciences

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	13/3/2025	Green tea (<i>Camellia sinensis</i>) is a widely cultivated plant in Thai Nguyen, with polyphenols as its main components, exhibiting strong antioxidant properties. The synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) using plant extracts has been extensively studied for biomedical applications. In this study, for the first time, ZnO NPs were synthesized using the polyphenol extract derived from tea leaves, and their antioxidant activity was evaluated. The characteristic properties of ZnO NPs were determined using UV-Vis DRS, FTIR, XRD, and TEM analyses. The ZnO NPs exhibited a hexagonal wurtzite crystal structure, spherical shape, with their surfaces functionalized by phytochemical groups present in the polyphenol extract. The ZnO NPs demonstrated significant DPPH free radical scavenging activity, with an IC_{50} value of $12.62 \pm 0.25 \mu\text{g/mL}$. These findings confirm the potential of ZnO NPs synthesized using polyphenol-rich tea leaf extracts and their promising applications in antioxidant activity.
Revised:	08/4/2025	
Published:	12/4/2025	
KEYWORDS		
Green tea		
Polyphenol		
Green synthesis		
Zinc oxide nanoparticles		
Antioxidant activity		

TỔNG HỢP XANH VÀ HOẠT TÍNH CHỐNG OXY HÓA CỦA NANO ZINC OXIDE SỬ DỤNG DỊCH CHIẾT POLYPHENOL TỪ LÁ CHÈ XANH THÁI NGUYÊN

Khiếu Thị Tâm

Trường Đại học Khoa học – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	13/3/2025	Chè là cây trồng phổ biến ở Thái Nguyên, chứa thành phần chính là các polyphenol, có tác dụng chống oxy hóa mạnh. Việc tổng hợp nano kẽm oxide sử dụng dịch chiết thực vật đã được nghiên cứu rộng rãi để ứng dụng trong y sinh. Trong nghiên cứu này, lần đầu tiên nano zinc oxide được tổng hợp sử dụng dịch chiết polyphenol được chiết xuất từ lá chè và đánh giá hoạt tính oxy hóa của chúng. Tính chất đặc trưng của hạt nano zinc oxide được xác định bằng phân tích phổ FTIR, XRD, SEM. Nano zinc oxide có cấu trúc tinh thể wurtzite lục giác, có dạng hình cầu và bề mặt của hạt nano zinc oxide được liên kết với các nhóm chức có trong dịch chiết polyphenol. Nano k zinc oxide thể hiện hoạt tính chống oxy hóa DPPH đáng kể với giá trị IC_{50} là $12,62 \pm 0,25 \mu\text{g/mL}$. Kết quả này khẳng định tiềm năng của nano zinc oxide được tổng hợp sử dụng dịch chiết polyphenol từ lá chè xanh và ứng dụng của chúng trong hoạt tính chống oxy hóa.
Ngày hoàn thiện:	08/4/2025	
Ngày đăng:	12/4/2025	
TỪ KHÓA		
Lá chè xanh		
Polyphenol		
Tổng hợp xanh		
Nano kẽm oxide		
Hoạt tính chống oxy hóa		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12301>

Email: tamkt@tnus.edu.vn

<http://jst.tnu.edu.vn>

72

Email: jst@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu

Chè (*Camellia sinensis*) là một dược liệu quý dùng để chữa trị nhiều căn bệnh như chống xơ vữa động mạch, phục hồi não bộ, phòng chống ung thư, chống lão hoá, tiêu chảy, tả, diệt khuẩn với hơn 4000 hợp chất có hoạt tính trong đó một phần lớn là hợp chất polyphenol [1]-[3]. Các polyphenol được phân lập nhiều từ lá chè bao gồm các catechin đã được ứng dụng rộng rãi trong ngành dược phẩm và thực phẩm. Epicatechin gallate (ECG), epicatechin (EC), epigallocatechin (EGC) và epigallocatechin gallate (EGCG) là các catechin chính trong cây chè trong đó epigallocatechin-3-gallate (EGCG) là thành phần phổ biến và có nhiều hoạt tính nhất trong chè xanh [3]-[5]. Đây là nhóm chất có nhiều hoạt tính có lợi cho sức khỏe của con người như tác dụng chống ung thư, chống béo phì, chống oxy hóa, và kháng virus [6]. Ở Việt Nam, cây chè được trồng ở khắp cả nước, nhiều nhất là ở các tỉnh Thái Nguyên, Phú Thọ, Tuyên Quang, Hà Giang, Yên Bái, Hòa Bình, Quảng Nam, Lâm Đồng. Thái Nguyên một trong những tỉnh đứng đầu cả nước về diện tích canh tác, số lượng, chất lượng sản phẩm từ cây chè [7].

Trong những năm gần đây, cùng với sự phát triển vượt bậc của công nghệ nano, các hạt nano kim loại đặc biệt là nano zinc oxide thu hút sự quan tâm của nhiều nhà khoa học do chúng có tính chất lý hóa độc đáo và được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực [8]. Các hạt nano zinc oxide có các đặc tính quang học, điện tử, từ tính và hóa học cũng như hoạt tính sinh học và độc tính thấp nên được ứng dụng nhiều trong lĩnh vực y dược [8] - [10]. Nano zinc oxide có thể được tổng hợp bằng các phương pháp như phương pháp sol-gel, đồng kết tủa và phương pháp thủy nhiệt, tuy nhiên, giới hạn của các phương pháp này là chi phí cao, dụng cụ phức tạp và gây ô nhiễm môi trường [10], [11]. Trong khi đó, các hạt nano kẽm oxide có thể được tổng hợp xanh sử dụng dịch chiết thực vật, được xem là phương pháp an toàn, sinh khả dụng cao, không gây độc cho môi trường, đơn giản và chi phí thấp [8], [12], [13]. Thực vật là đóng vai trò như một nhà máy sinh học giúp tổng hợp các hạt nano kim loại và oxide kim loại theo phương pháp xanh do chúng chứa các thành phần hóa học như polyphenol, alkaloid, terpenoid và steroid, tham gia vào quá trình khử ion kim loại và bền hóa các hạt nano tạo thành [14]. Hơn nữa, nano kẽm oxide được tổng hợp xanh sử dụng dịch chiết thực vật thể hiện hoạt tính chống oxy hóa cao nên được ứng dụng trong các loại mỹ phẩm [15], [16]. Các công bố cho thấy ZnO NPs được tổng hợp xanh sử dụng dịch chiết lá của cây chè [17] - [21] thể hiện hoạt tính chống oxy hóa mạnh. Tuy nhiên, cho đến nay chưa có một công bố nào về tổng hợp ZnO NPs sử dụng dịch chiết polyphenol của lá chè xanh Thái Nguyên. Trong nghiên cứu này, ZnO NPs được tổng hợp xanh sử dụng dịch chiết polyphenol nhằm đánh giá hoạt tính chống oxy hóa của chúng.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu

Các dung môi gồm *n*-hexane (99,5%), chloroform (99%), ethylacetate (99,5%), methanol (99,9%), dimethyl sulfoxide (DMSO) (99,5%) và các hóa chất khác gồm $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ (99,5%), NaOH (99,5%), 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) (100%), formic acid (99,8%) của hãng Merck. Lá chè được thu hái ở Thái Nguyên vào tháng 4 năm 2024.

2.2. Chiết polyphenol từ lá chè xanh

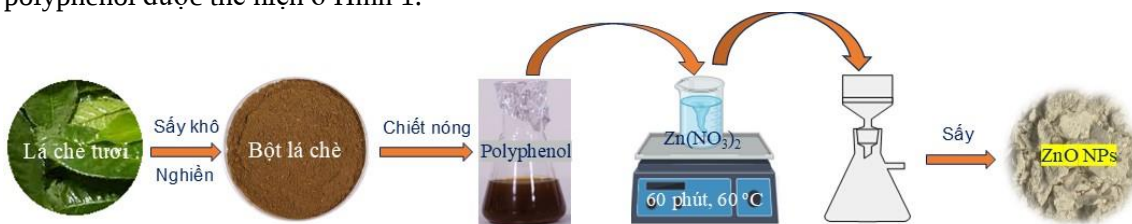
Lá chè sau khi thu hái được rửa sạch và sấy ở nhiệt độ 50 °C đến khối lượng không đổi. Sau đó, lá chè khô được say nhỏ và được sàng qua rây có đường kính 0,5 mm thành bột mịn dùng để chiết polyphenol. Polyphenol được chiết theo phương pháp chiết nóng: 0,5 kg bột lá chè được chiết nóng, siêu âm ở nhiệt độ 80 °C trong thời gian 2 giờ. Cao polyphenol thô thu được bằng cách cất quay chân không để loại dịch chiết thu được sau khi lọc. Dịch chiết polyphenol thô được loại tạp chất bằng các dung môi *n*-hexane, chloroform, ethylacetate thu được dịch chiết polyphenol sạch. Cao polyphenol thu được bằng cách cô quay chân không để loại bỏ nước của dịch chiết polyphenol.

2.3. Xác định thành phần hóa học của dịch chiết polyphenol từ lá chè xanh

Thành phần hóa học của dịch chiết polyphenol được xác định bằng phương pháp sắc ký lỏng hiệu năng cao (HPLC). Hòa tan 250 mg các hợp chất hữu cơ gồm rutin, epi-catechin, quercetin và isoquercetin trong 50 mL methanol thu được dung dịch gốc có nồng độ 5 mg/mL. Các dung dịch chuẩn được lọc bằng màng lọc 0,22 μm trước khi chạy HPLC. 0,1 g cao polyphenol trong 10 mL MeOH: H₂O (9:1, v/v) được rung siêu âm trong thời gian 15 phút ở nhiệt độ 50 °C. Dịch polyphenol thu được bằng cách lọc qua màng lọc 0,22 μm và được pha loãng 10 lần dùng để chạy HPLC. Pha động cho quá trình chạy HPLC bao gồm 0,1% formic acid (dung môi A) và methanol (dung môi B), tốc độ dòng chảy của pha động là 0,5 mL/phút và thể tích tiêm là 10 μL , chạy gradient với 2 phút đầu hệ dung môi rửa giải là 80% A và 20% B, 16 phút sau đó dung môi rửa giải là 20% A và 80% B, 5 phút tiếp theo dung môi rửa giải là 100% B, 12 phút cuối chạy hệ dung môi 80% A và 20% B. Pha tĩnh là cột silica gel C₁₈ (25 cm x 4,6 mm, 5 μm), Detector PDA phát hiện các hợp chất chuẩn và các hợp chất trong cao polyphenol tại bước sóng 270 nm. Các hợp chất trong phép phân tích sắc ký được xác định bằng cách so sánh với các hợp chất tiêu chuẩn sử dụng thời gian lưu và thông số phổ hấp thụ.

2.4. Chế tạo nano zinc oxide

Nano zinc oxide được tổng hợp sử dụng dịch chiết polyphenol từ lá chè xanh theo quy trình của Vieira [18] và có sự cải tiến: Nhỏ từ từ 10 mL dịch chiết polyphenol vào cốc đựng 100 mL dung dịch Zn(NO₃)₂ 0,1M, sau đó dùng dung dịch NaOH 1 M để chỉnh pH của hỗn hợp phản ứng đến 12. Hỗn hợp phản ứng khuấy liên tục trong thời gian 60 phút ở nhiệt độ 60 °C. Kết tủa xuất hiện sau một thời gian phản ứng. Hỗn hợp sau phản ứng được lọc và được rửa nhiều lần bằng nước cất 2 lần đến pH bằng 7 để loại bỏ tạp chất. Quy trình chế tạo nano zinc oxide sử dụng dịch polyphenol được thể hiện ở Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ tổng hợp ZnO NPs sử dụng dịch chiết polyphenol từ lá chè xanh

2.5. Đánh giá tính chất đặc trưng của nano zinc oxide

Tính chất đặc trưng của ZnO NPs được đánh giá bằng các phương pháp phổ phản xạ khuếch tán (UV-Vis DRS), phổ hồng ngoại (FTIR), nhiễu xạ tia X (XRD) và kính hiển vi điện tử truyền qua (TEM). Tính chất quang của ZnO NPs được xác định dựa trên phân tích phổ UV-Vis DRS với bước sóng từ 300 đến 800 nm được đo trên thiết bị UV-Vis (DRS Agilent, Cary 5000). Nhiễu xạ tia X được thực hiện trên thiết bị nhiễu xạ tia X (Bruker, Nhật Bản) hoạt động ở 30 kV với bức xạ Cu-K α , bước sóng bằng 0,154056 với góc quét 2 theta từ 20 đến 80° để xác định mức độ tinh thể của ZnO NPs. Liên kết trên bề mặt của hạt nano zinc oxide được đánh giá dựa vào phân tích phổ FTIR được đo trên thiết bị Perkin Elmer Spectrum Two với số sóng từ 4000 cm⁻¹ đến 450 cm⁻¹. Hình thái và cấu trúc của ZnO NPs được xác định bằng cách phân tích hình ảnh TEM được đo trên thiết bị HRTEM-JEOL 2100F.

2.6. Hoạt tính chống oxy hóa

Hoạt tính chống oxy hóa của ZnO NPs được đánh giá bằng phương pháp thử khả năng khử gốc tự do 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH). Dung dịch DPPH được chuẩn bị ở nồng độ 1 mM trong methanol. Các mẫu thử được hòa tan trong dimethyl sulfoxide (DMSO) với các nồng

độ từ 1,25 đến 20,00 $\mu\text{g/mL}$. Độ hấp thụ của gốc tự do DPPH sau khi phản ứng với các mẫu thử được đo bằng máy quang phổ Biotek ở bước sóng 515 nm. Phần trăm hoạt tính khử gốc tự do DPPH được tính theo phương trình (1) sau đây:

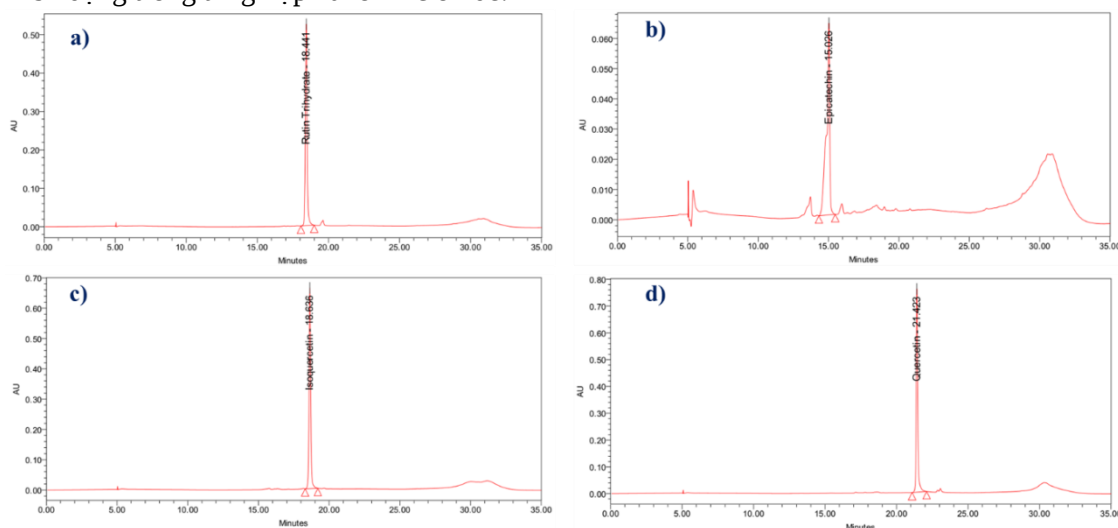
$$\% \text{ ứ c chế} = \frac{\text{OD}_c - \text{OD}_s}{\text{OD}_c} \times 100 \quad (1)$$

Trong đó, OD_c là độ hấp thụ của mẫu đối chứng, OD_s là độ hấp thụ của mẫu.

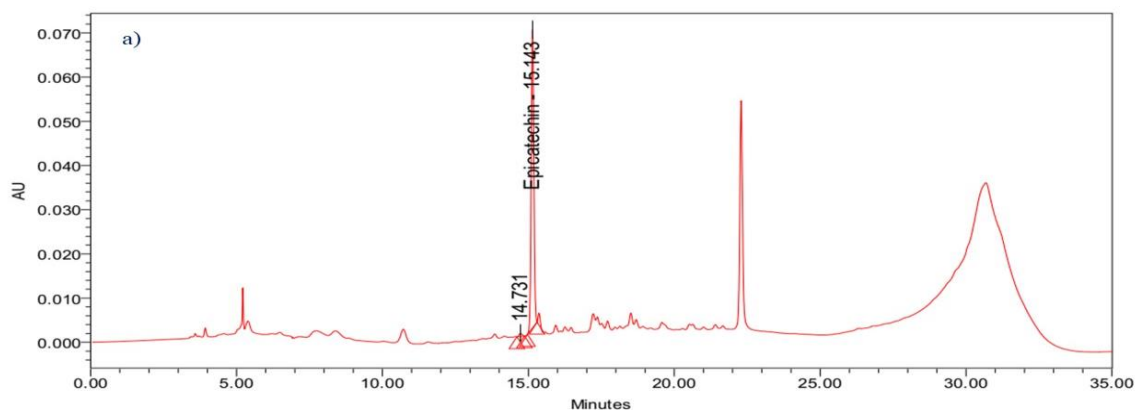
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Thành phần hóa học của dịch chiết polyphenol trong lá chè xanh

Thành phần hoá học của polyphenol được chiết xuất từ lá chè xanh Thái Nguyên được xác định bằng sắc ký lỏng hiệu năng cao (HPLC). Phân tích HPLC của dịch chiết polyphenol chỉ ra sự có mặt của các hợp chất gồm rutin, epicatechin, isoquercetin và quercetin như thể hiện ở Hình 2, Hình 3. Kết quả này cũng cho thấy polyphenol được chiết xuất từ lá chè xanh Thái Nguyên có thành phần chính là epicatechin. Các hợp chất này có các nhóm hydroxyl có thể tham gia khử trực tiếp Zn^{2+} thành Zn sau đó Zn kết hợp với oxygen hòa tan trong dung dịch để hình thành ZnO [22], đồng thời chúng cũng đóng vai trò như tác nhân bền hóa ngăn sự keo tụ của các hạt nano [18]. Do đó, dịch chiết polyphenol là giải pháp hấp dẫn để tổng hợp ZnO có cấu trúc nano. Hơn nữa, các hợp chất này thể hiện hoạt tính chống oxy hoá tốt [23], [24]. Do đó, dịch polyphenol có thể sử dụng trong tổng hợp nano zinc oxide.



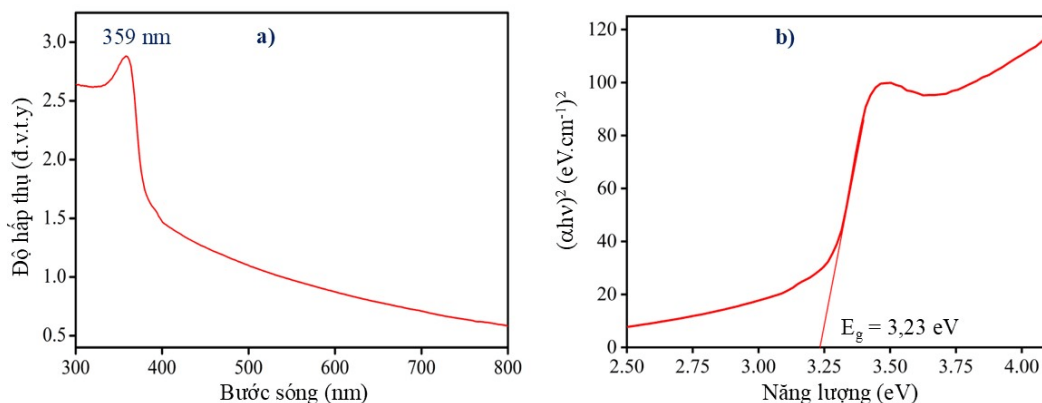
Hình 2. Sắc ký đồ HPLC của chất chuẩn: a) rutin, b) epi-catechin, c) isoquercetin, d) quercetin



Hình 3. Sắc phổ đồ HPLC của cao polyphenol từ lá chè

3.2. Đặc trưng của nano zinc oxide

Tính chất quang của ZnO NPs được phân tích sử dụng phổ UV-Vis DRS với vùng bước sóng từ 300 đến 800 nm và được thể hiện ở Hình 4a. Phổ UV-Vis xuất hiện 1 đỉnh hấp thụ mạnh ở bước sóng 359 nm nằm trong dải đặc trưng của ZnO. Năng lượng vùng cấm của ZnO NPs được xác định theo phương trình (2) có giá trị là 3,23 eV (Hình 4b). Giá trị năng lượng vùng cấm của ZnO NPs trong nghiên cứu này tương đương với giá trị năng lượng vùng cấm của ZnO NPs được tổng hợp sử dụng dịch chiết lá chè là 3,21 eV [18] và 3,40 eV [25]. Kết quả này chỉ ra rằng ZnO NPs có thể hấp thụ mạnh trong vùng tử ngoại, điều này hữu ích cho ứng dụng về quang xúc tác, cảm biến quang và thiết bị quang điện.



Hình 4. a) Phổ UV-Vis DRS của ZnO NPs; b) đồ thị Tauc của ZnO NPs

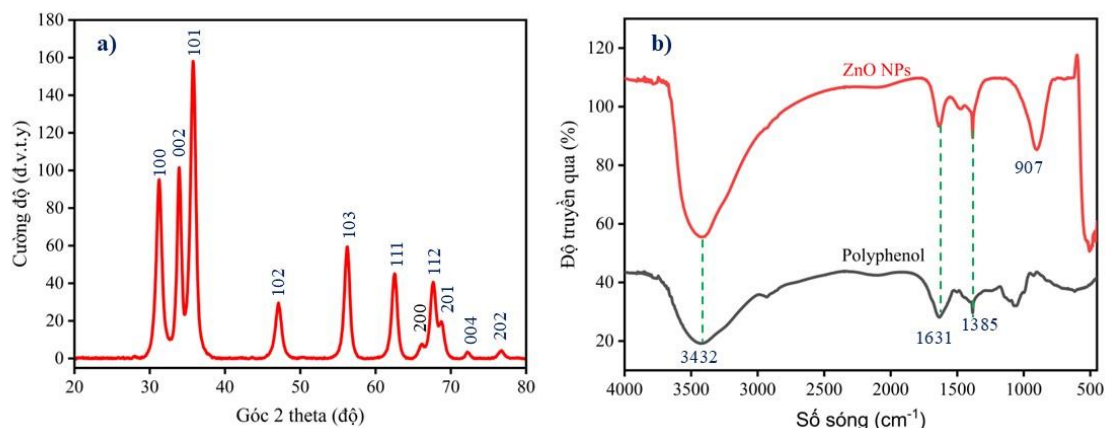
Kết quả phân tích giản đồ nhiễu xạ tia X ZnO NPs được thể hiện ở Hình 5a chỉ ra rằng chúng có cấu trúc tinh thể dạng wurtzite lục giác với các thông số mạng được so sánh với thẻ PDF chuẩn (JCPDS, No. 790205 của ZnO). Mười một đỉnh chính xuất hiện ở các góc 2θ tương ứng; $2\theta=31,25; 33,94; 35,76; 47,10; 56,21; 62,51; 66,26; 67,65; 68,75; 72,25$ và $76,69$ tương ứng các mặt tinh thể (100); (002); (101); (102); (110); (103); (200); (112); (201); (004) và (202). Các đỉnh tại các mặt tinh thể cho thấy có cường độ mạnh và sắc nét, hẹp chứng tỏ các vật liệu ZnO thu được có độ kết tinh cao, không có các đỉnh khác xuất hiện trong khoảng góc 2θ từ 20° đến 80° khẳng định rằng vật liệu thu được có độ sạch cao. Từ độ bán rộng của các đỉnh trong giản đồ XRD, kích thước tinh thể (D) được tính theo công thức DebyeScherrer (2):

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2)$$

Với $k = 0,9$ là hằng số Scherrer, $\lambda = 0,154056$ nm là bước sóng của tia X, β là độ bán rộng của đỉnh phổ (đơn vị radian) và θ là góc nhiễu xạ của đỉnh tương ứng. Hạt nano zinc oxide có kích thước tinh thể trung bình là $10,81 \pm 0,24$ nm.

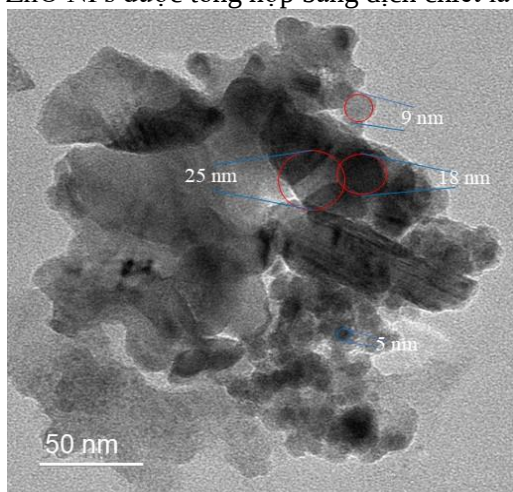
Để đánh giá liên kết của các nhóm chức hữu cơ với hạt nano zinc oxide trên bề mặt của chúng, việc phân tích phổ FTIR của dịch chiết polyphenol và ZnO NPs là rất quan trọng. Hình 5b thể hiện phổ FTIR của dịch chiết polyphenol và ZnO NPs. Phổ FTIR của dịch chiết polyphenol xuất hiện đỉnh hấp thụ rộng ở 3432 cm^{-1} đặc trưng cho dao động hóa trị của liên kết O-H. Các đỉnh hấp thụ ở $1631, 1385 \text{ cm}^{-1}$ lần lượt đặc trưng cho các dao động hóa trị của các liên kết C=O, dao động biến dạng của liên kết O-H và dao động biến dạng ngoài mặt phẳng của liên kết C-O-H. Ngoài ra, phổ FTIR của dịch chiết polyphenol còn xuất hiện các đỉnh hấp thụ tại số sóng 1068 cm^{-1} đặc trưng cho dao động hóa trị của liên kết C-O. Kết quả này phù hợp với kết quả về thành phần hóa học của polyphenol được chiết xuất từ lá chè xanh trong đó các liên kết của các nhóm chức đặc trưng của hợp chất epi-catechin xuất hiện trên phổ FTIR của dịch chiết polyphenol. So sánh phổ FTIR của dịch chiết polyphenol và ZnO NPs cho thấy phổ FTIR của ZnO NPs có đỉnh hấp thụ đặc trưng cho các liên kết của các nhóm chức có trong dịch chiết polyphenol; tuy nhiên vị trí của các đỉnh hấp thụ

bị chuyển dịch trong đó cường độ của đỉnh hấp thụ ở 1068 cm^{-1} đặc trưng cho dao động hóa trị của liên kết C-O chuyển dịch về 907 cm^{-1} và cường độ hấp thụ mạnh lên, điều này có thể do sự hình thành liên kết của Zn^{2+} với OH. Đỉnh hấp thụ ở 490 cm^{-1} đặc trưng cho dao động của liên kết Zn-O. Kết quả này chứng tỏ các nhóm chức này tham gia bền hóa, bao bọc các hạt nano zinc oxide do các nhóm chức này có ái lực tương tác với các hạt nano zinc oxide.

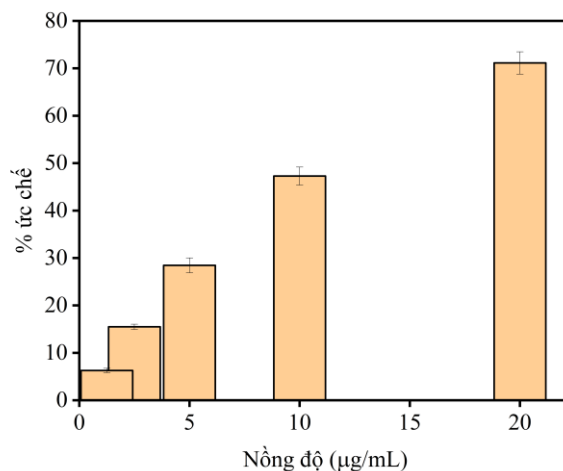


Hình 5. a) Giản đồ nhiễu xạ tia X của ZnO NPs; b) phổ FTIR của ZnO NPs và dịch chiết polyphenol

Hình thái và kích thước hạt của các hạt nano zinc oxide được quan sát bằng kính hiển vi điện tử truyền qua như thể hiện ở Hình 6. Các hạt nano zinc oxide có dạng hình cầu với kích thước khoảng 5-25 nm. Kích thước hạt của ZnO NPs tổng hợp được nhỏ hơn so với kích thước hạt của ZnO NPs được tổng hợp bằng dịch chiết lá chè (215 nm) [18].



Hình 6. Hình ảnh TEM của ZnO NPs



Hình 7. Hoạt tính chống oxy hóa của ZnO NPs

3.3. Hoạt tính chống oxy hóa

Hoạt tính chống oxy hóa của ZnO NPs, dịch chiết polyphenol từ lá chè xanh được thể hiện ở Hình 7. Kết quả cho thấy hoạt tính bắt gốc tự do DPPH của ZnO NPs phụ thuộc nồng độ. Ở các nồng độ của ZnO NPs từ 1,25 đến 20,00 $\mu\text{g/mL}$ thì phần trăm ức chế gốc tự do được tính theo công thức 1 lần lượt dao động từ 6,28 đến 71,13% với giá trị IC_{50} là $12,62 \pm 0,25\text{ }\mu\text{g/mL}$, thể hiện khả năng chống oxy hóa mạnh hơn so với ZnO NPs được tổng hợp sử dụng dịch chiết lá chè xanh với giá trị IC_{50} là 74,6 $\mu\text{g/mL}$ [18].

Nhìn chung, các hợp chất polyphenol có mặt trong các loài thực vật với tỷ lệ khác nhau và có vai trò như các chất khử sinh học của ion kim loại đồng thời thể hiện hoạt tính chống oxy hóa mạnh. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra sự có mặt của các nhóm OH trong hợp chất phenolic có vai trò

quan trọng trong quá trình hình thành và ổn định các hạt nano kim loại và oxide kim loại. Kết quả này cho thấy tiềm năng ứng dụng của polyphenol và ZnO NPs trong dược phẩm và mỹ phẩm.

4. Kết luận

Tóm lại, nghiên cứu đã tổng hợp thành công nano zinc oxide sử dụng dịch chiết polyphenol với thành phần chính là epicatechin từ lá chè xanh Thái Nguyên. Các hạt nano zinc oxide thu được có cấu trúc tinh thể lục giác, có dạng hình cầu, có kích thước hạt trong khoảng 5-25 nm, bề mặt liên kết với các nhóm chức có mặt trong dịch chiết polyphenol và tính chất quang học cho thấy năng lượng cấm là 3,23 eV. Nano zinc oxide có khả năng chống oxy hóa tốt với giá trị IC_{50} là $12,62 \pm 0,25 \mu\text{g/mL}$. Kết quả này không chỉ tổng hợp được nano zinc oxide thân thiện với môi trường mà còn mở ra tiềm năng ứng dụng trong dược phẩm và mỹ phẩm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. Reto, M. E. Figueira, H. M. Filipe, and C. M. Almeida, "Chemical composition of green tea (*Camellia sinensis*) infusions commercialized in Portugal," *Plant Foods for Human Nutrition*, vol. 62, pp. 139-144, 2007.
- [2] H. Vishnoi, R. B. Bodla, R. Kant, and R. Bodla, "Green Tea (*Camellia sinensis*) and its antioxidant property: A review," *Int. J. Pharm. Sci. Res.*, vol. 9, no. 5, pp. 1723-1736, 2018.
- [3] T. Zhao, C. Li, S. Wang, and X. Song, "Green tea (*Camellia sinensis*): A review of its phytochemistry, pharmacology, and toxicology," *Molecules*, vol. 27, no. 12, 2022, Art. no. 3909.
- [4] L. Paiva, C. Rego, E. Lima, M. Marcone, and J. Baptista, "Comparative analysis of the polyphenols, caffeine, and antioxidant activities of green tea, white tea, and flowers from Azorean *Camellia sinensis* varieties affected by different harvested and processing conditions," *Antioxidants*, vol. 10, no. 2, pp. 1-16, 2021.
- [5] Q. Luo *et al.*, "Green extraction of antioxidant polyphenols from green tea (*Camellia sinensis*)," *Antioxidants*, vol. 9, no. 9, pp. 1-15, 2020.
- [6] C. S. Dzah *et al.*, "The effects of ultrasound assisted extraction on yield, antioxidant, anticancer and antimicrobial activity of polyphenol extracts: A review," *Food bioscience*, vol. 35, pp. 1-9, 2020.
- [7] H. T. M. Bui and T. H. Nguyen, "analysis of economic efficiency of tea plant of farmers in thai nguyen province," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 188, no. 12/3, pp. 21-25, 2018.
- [8] M. Mahajan *et al.*, "Green synthesis of ZnO nanoparticles using *Justicia adhatoda* for photocatalytic degradation of malachite green and reduction of 4-nitrophenol," *RSC Advances*, vol. 15, no. 4, pp. 2958-2980, 2025.
- [9] V. Kalpana and V. D. Rajeswari, "A review on green synthesis, biomedical applications, and toxicity studies of ZnO NPs," *Bioinorganic Chemistry and Applications*, vol. 2018, no. 1, 2018, Art. no. 3569758.
- [10] G. Madhumitha, G. Elango, and S. M. Roopan, "Biotechnological aspects of ZnO nanoparticles: overview on synthesis and its applications," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 100, pp. 571-581, 2016.
- [11] A. A. Barzinjy, "Structure, synthesis and applications of ZnO nanoparticles: A review," *Jordan Journal of Physics*, vol. 13, no. 2, pp. 123-135, 2020.
- [12] M. Y. Al-darwesh, S. S. Ibrahim, and M. A. Mohammed, "A review on plant extract mediated green synthesis of zinc oxide nanoparticles and their biomedical applications," *Results in Chemistry*, vol. 7, 2024, Art. no. 101368.
- [13] J. A. Alvarado, G. S. A. Conzalez, A. Arce-Plaza, and S. Reyes-Carmona, "New approach in effective and reproducible green synthesis of pure ZnO nanoparticles using lemon juice with less solvent and without strong base chemical precursor," *Ceramics International*, vol. 51, pp. 4737-4749, 2025.
- [14] Z. Villagrán *et al.*, "Plant-based extracts as reducing, capping, and stabilizing agents for the green synthesis of inorganic nanoparticles," *Resources*, vol. 13, no. 6, pp. 1-24, 2024.
- [15] G. Sharmila, M. Thirumarimurugan, and C. Muthukumaran, "Green synthesis of ZnO nanoparticles using *Tecoma castanifolia* leaf extract: Characterization and evaluation of its antioxidant, bactericidal and anticancer activities," *Microchem. J.*, vol. 145, pp. 578-587, 2019.
- [16] A. S. Abdelbaky, T. A. Abd El-Mageed, A. O. Babalghith, S. Selim, and A. M. Mohamed, "Green synthesis and characterization of ZnO nanoparticles using *Pelargonium odoratissimum* (L.) aqueous

- leaf extract and their antioxidant, antibacterial and anti-inflammatory activities," *Antioxidants*, vol. 11, no. 8, pp. 1-25, 2022.
- [17] S. Al-Ghamdi *et al.*, "Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using *Camellia sinensis* tea leaf extract and their antioxidant, anti-bactericidal and anticancer efficacy," *Research on Chemical Intermediates*, vol. 48, no. 11, pp. 4769-4783, 2022.
- [18] I. R. S. Vieira *et al.*, "Eco-friendly synthesis of ZnO nanomaterial from green tea extract: photocatalytic, antibacterial and antioxidant potential," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 14, no. 19, pp. 24317-24331, 2024.
- [19] D. Suresh, P. Nethravathi, K. Lingaraju, H. Rajanaika, S. Sharma, and H. Nagabhushana, "EGCG assisted green synthesis of ZnO nanopowders: Photodegradative, antimicrobial and antioxidant activities," *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 136, pp. 1467-1474, 2015.
- [20] S. Joseph *et al.*, "An in vitro evaluation of anti-oxidant properties of novel nano-composite material containing titanium oxide, zinc oxide and green tea extract," *The Medical journal of Malaysia*, vol. 80, no. Suppl 1, pp. 52-58, 2025.
- [21] N. Abbes, I. Bekri, M. Cheng, N. Sejri, M. Cheikhrouhou, and X. Jun, "Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using mulberry fruit and their antioxidant activity," *Materials Science*, vol. 28, no. 2, pp. 144-150, 2022.
- [22] A. G. Assefa, T. Demeke, M. Tefera, M. Mulu, and S. Tesfaye, "Biosynthesis and characterization of ZnO NPs using aqueous extract of *Zehneria scabra* L. leaf for comparing antibacterial activities and the efficacies of antioxidant activities," *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 52, pp. 40-47, 2025.
- [23] N. El-Desouky, K. Shoueir, I. El-Mehasseb, and M. El-Kemary, "Synthesis of silver nanoparticles using bio valorization coffee waste extract: photocatalytic flow-rate performance, antibacterial activity, and electrochemical investigation," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol.13, pp. 15871-15885, 2022.
- [24] D. Mangindaan, G.-Y. Lin, C.-J. Kuo, and H.-W. Chien, "Biosynthesis of silver nanoparticles as catalyst by spent coffee ground/recycled poly (ethylene terephthalate) composites," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 121, pp. 193-201, 2020.
- [25] A. C. Dhanmozhi, V. Rajeswari, and S. Sathyajothi, "Green synthesis of zinc oxide nanoparticle using green tea leaf extract for supercapacitor application," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, pp. 660-667, 2017.