Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption
Tạp chí xúc tác và hấp phụ Việt Nam

https://jca.edu.vn

Ảnh hưởng của thông số tổng hợp xanh tới sự hình thành hạt nano đồng (Cu NPs)

Influence of green synthesis factors on formed of copper nanoparticles (Cu NPs)

Lê Mạnh Cường[1,*], Nguyễn Đình Sửu[2], Lưu Thị Lan Anh[2]

[1] *Khoa Vật liệu xây dựng, Đại học Xây dựng Hà Nội, Số 55 Giải Phóng, Đồng Tâm, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*
[2] *Khoa Vật lý Kỹ thuật, Đại học Bách Khoa Hà Nội, số 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*
** Email: cuonglm@huce.edu.vn*

ARTICLE INFO

Received: 31/05/2025
Accepted: 19/06/2025
Published: 30/06/2025

Keywords:
Green method;
Copper nanoparticles;
Clitoria ternatea

ABSTRACT

This study presents a green synthesis method for copper nanoparticles (Cu NPs) using butterfly pea flower (Clitoria ternatea) extract as a reducing and stabilizing agent. The effects of different copper salts ($CuSO_4$, $CuCl_2$, $Cu(CH_3COO)_2$, $Cu(NO_3)_2$) and the volume ratio between the plant extract and copper salt solution on CuNPs formation were investigated. XRD analysis confirmed the formation of face-centered cubic crystalline CuNPs with crystallite sizes ranging from 30 to 40 nm. FESEM images revealed non-uniform particle morphology with sizes ranging from several hundred nanometers to approximately 1µm. FTIR and Raman spectroscopy demonstrated the role of functional groups in the reduction and stabilization processes. Among the salts examined, $Cu(NO_3)_2$ produced smaller and more uniform nanoparticles, especially at a plant extract-to-salt volume ratio of 2:1. This work contributes to the development of eco-friendly nanomaterials using plant-based synthesis routes.

Giới thiệu chung

Vật liệu nano kim loại có ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau, bao gồm chuyển đổi và tích trữ năng lượng, sản xuất hóa chất, ứng dụng trong dược và sinh học và công nghệ môi trường [1-5]. Các hạt nano kim loại này thường thể hiện hoạt động khác với hoạt động của các vật liệu khối tương ứng do kích thước và hình dạng khác nhau của chúng, tạo ra các tính chất lượng tử riêng biệt [6-8]. Trong bối cảnh này, các hạt Cu NPs đặc biệt hấp dẫn vì đồng có nhiều trong tự nhiên và giá thành thấp, cũng như có thể sử dụng nhiều phương pháp đơn giản để chế tạo [9-11]. Mặc dù đồng dạng khối ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như quang học, điện tử, ..., nhưng việc sử dụng hạt Cu NPs bị hạn chế bởi tính không ổn định vốn có của Cu trong điều kiện khí quyển, khiến nó dễ bị oxy hóa. Nhiều nỗ lực nhằm phát triển các phương pháp và vật liệu hỗ trợ giúp tăng độ ổn định của hạt Cu NPs bằng cách thay đổi độ nhạy của chúng với oxy, nước và các thành phần hóa học khác đã khuyến khích việc khám phá các hạt nano trên cơ sở Cu thay thế có cấu trúc phức tạp hơn, chẳng hạn như hạt Cu NPs lõi/vỏ hoặc các hệ vật liệu dựa trên oxit đồng.

Về cơ bản có ba nhóm phương pháp tổng hợp hạt nano: vật lý, hóa học và sinh học. Quá trình tổng hợp hạt nano bằng phương pháp hóa học dựa trên các phản ứng hóa học cơ bản. Các phản ứng này là kết tủa, oxy hóa, thủy phân, nhiệt phân, trùng hợp và ngưng tụ. Tùy thuộc vào các phản ứng, một số phương pháp hóa học được ưa chuộng để tổng hợp nổi bật như điện phân, chiếu xạ tia γ , kết tủa, thủy nhiệt, nhiệt dung môi, vi sóng, oxy hóa nhiệt ,... [12]. Mặc dù các phương pháp tổng hợp hóa học và vật lý đã được sử dụng rộng rãi để sản xuất các hạt nano [12,13], tuy nhiên, chúng đã được chứng minh là nguy hiểm cho cả môi trường và sức khỏe con người vì các hóa chất độc hại được sử dụng.

https://doi.org/10.62239/jca.2025.025

"Tổng hợp xanh" là phương pháp sinh thái, tiết kiệm và an toàn, thân thiện với môi trường và dễ tổng hợp, sử dụng các vật liệu sinh học như nuôi cấy tế bào vi khuẩn, nấm và thực vật [14,15]. "Tổng hợp xanh" kiểm soát kích thước và hình dạng cũng như tạo thành các vật liệu nano ổn định mà không có thuốc thử gây hại. Một số yếu tố ảnh hưởng đến phương pháp này, bao gồm nhiệt độ, độ pH, thời gian phản ứng, tiền chất, nồng độ tiền chất và thể tích chiết xuất sinh học. Sự tương tác của các yếu tố này rất quan trọng để xác định hình dạng và kích thước của các hạt nano tổng hợp. Nhiều loại thực vật và các bộ phận của chúng là những tác nhân khử, tác nhân tạo phức và tác nhân ổn đinh tuyệt vời tổng hợp các hạt Cu NPs, chẳng hạn như chiết xuất quả của Citrus aurantium L., chiết xuất từ các bộ phận của cây E. alata, và hoa Cynara scolymus L. [8,16,17]. Các loại thực vật này có sẵn, dễ chiết xuất, chúng rất giàu thành phần dược lý đóng vai trò là chất khử và chất ổn định trong quá trình tổng hợp [8,16]. Đánh giá tài liệu cho thấy các hạt Cu NPs tổng hợp sinh học bằng cách sử dụng chiết xuất thực vật vẫn còn ít được khám phá.

Mặc dù đã có một số nghiên cứu sử dụng chiết xuất hoa đậu biếc tổng hợp xanh hạt nano đồng hay oxit đồng [18-21] nhưng các nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào khảo sát các tính chất như kháng khuẩn, kháng oxi hóa,... của vật liệu mà chưa nghiên cứu sau về sự hình thành hạt nano đồng. Ngoài ra, các nghiên cứu này chưa đánh giá kỹ vai trò của nhóm chức trong cơ chế khử và ổn định.

Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của các yếu tố tổng hợp xanh như nguồn muối đồng sử dụng và tỉ lệ giữa dịch chiết hoa đậu biếc và muối đồng đến sự hình thành của hạt Cu NPs đã được khảo sát và thảo luận.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Thực nghiệm

Hoá chất được sử dụng trong nghiên cứu này gồm có Bột hoa đậu biếc là sản phẩm thương mại của Việt Nam (Công Ty Cổ phần Chợ Quê Việt Nam). Đồng nitrat, đồng sunfat, đồng clorua và đồng axetat có độ tinh khiết tới 99.8% của hãng Xilong, Trung Quốc. Nước cất thu được từ hệ Aquatron A4000D sử dụng làm dung môi trong suốt quá trình tổng hợp.

Chiết xuất hoa đậu biếc theo tài liệu [22]. Chi tiết quá trình như sau: 2g hoa đậu biếc khô trong 100 mL nước cất, khuấy và gia nhiệt ở 70°C trong thời gian 60 phút để quá trình chiết các hoạt chất sinh học trong hoa đậu biếc là tối ưu. Hỗn hợp thu được được lọc sử dụng hệ lọc chân không và giấy lọc Whatman số 1. Cuối cùng thu được dịch chiết có màu xanh.

Thực nghiệm tổng hợp hạt Cu NPs tiến hành như sau:

Cân m(g) muối đồng vào cốc 2500 ml chứa 100 (ml) dung dịch chiết hoa đậu biếc và khuấy từ trong thời gian t = 15 phút cho tan hết muối đồng, cho dung dịch vào bình nhiệt thủy phân rồi tiến hành phản ứng 180°C và thời gian 48h. Sau khi đã thủy nhiệt xong, ta tiến hành đổ dung dịch sau khi thủy nhiệt ra cốc, lọc rửa phần kết tủa bằng phương pháp quay ly tâm 3 lần mỗi lần 5 phút bằng nước cất 2 lần với tốc độ quay 12000 vòng/phút, tiếp tục cho vào tủ sấy mẫu ở nhiệt độ T = 60°C trong thời gian t = 24 giờ. Cuối cùng ta tiến hành nghiền mịn mẫu bột bằng cối chày mã não rồi cho vào ống nghiệm để phân tích và sử dụng mẫu.

Bốn loại muối đồng bao gồm $CuSO_4{\cdot}5H_2O$, $CuCl_2{\cdot}2H_2O$ $Cu(CH_3COO)_2$ và $Cu(NO_3)_2{\cdot}3H_2O$ được sử dụng để tổng hợp CuNPs. Lượng muối đồng sử dụng cố định 1,25 g.

Tỉ lệ thể tích giữa dịch chiết hoa đậu biếc lần lượt là 0,5g bột hoa đậu biếc/50 mL, 1,0g/50 mL, 2,0g/50 mL, 3,0g/50 mL, và 4,0g/50 mL và muối đồng .

Trong quá trình khảo sát, các thông số khác như nhiệt độ, thời gian phản ứng và nồng độ muối được giữ cố định để đánh giá ảnh hưởng riêng biệt của loại muối đồng và tỷ lệ thể tích dịch chiết đến sự hình thành của hạt nano.

Phương pháp nghiên cứu

Phổ hấp thụ UV-Vis được đo sử dụng hệ quang phổ Carry 100 UV-Vis (VARIAN). Cấu trúc tinh thể và pha thu được bằng phân tích nhiễu xạ tia X mẫu bột sử dụng hệ đo X'pert Pro (PANalytical) MPD với CuK-α1 (= 1,54056 Å) ở tốc độ quét 0,03°/2s trong khoảng 2θ từ 20° đến 80°. Đặc trưng dao động của các nhóm chức hữu cơ được nghiên cứu bởi phổ tán xạ Raman nghiên cứu trên hệ Renishaw Invia Raman Microscope sử dụng laser 514nm và quang phổ FTIR được đo bằng máy FT/IR-4600typeA (JASCO) với số sóng từ 500 cm^{-1} đến 4000 cm^{-1}.

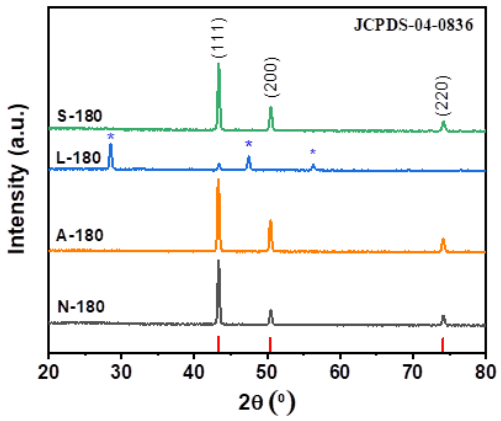
Kết quả và thảo luận

Tiền chất sử dụng ảnh hưởng lớn tới sự hình thành của hạt nano. Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của các anion muối đồng đã được nghiên cứu. Hình 1 là giản đồ nhiễu xạ tia X mẫu bột của các mẫu tổng hợp từ các nguồn muối đồng $Cu(CH_3COO)_2$, $CuSO_4$, $Cu(NO_3)_2$ và $CuCl_2$; Phản ứng nhiệt thủy phân ở nhiệt độ 180oC trong thời gian 48h. Các mẫu được ký hiệu lần lượt là A-180, S-180,N-180 và L-180 tương ứng với các muối đồng $Cu(CH_3COO)_2$, $CuSO_4$, $Cu(NO_3)_2$ và $CuCl_2$;

Từ giản đồ 3.3, chúng ta đều quan sát thấy các đỉnh nhiễu xạ xuất hiện ở các góc 2θ lần lượt là $43,3^0$; $50,4^0$

https://doi.org/10.62239/jca.2025.025

và 74.2^0 ứng với các mặt mạng (111), (200) và (220) phù hợp với dữ liệu chuẩn của hạt Cu NPs cấu trúc tinh thể dạng lập phương (JCPDS số 04-0836) ngoại trừ mẫu L-180. Hơn nữa, trong giản đồ XRD không phát hiện các đỉnh đặc trưng của các tạp chất khác cho thấy các mẫu tổng hợp với các tiền chất chứa các anion axetat, sunfat và nitrat là tinh khiết. Tuy nhiên khi sử dụng muối chứa gốc clorua (L-180) thì lượng đồng được tạo ra rất ít, xuất hiện các đỉnh nhiễu xạ lạ (*) quy cho là đỉnh nhiễu xạ XRD của muối CuCl, ứng với các góc 2θ là 28,5^0; 47,4^0 và 56,2^0 phù hợp với dữ liệu chuẩn JCPDS số 96-901-3926 của CuCl.



Hình 1: Giản đồ nhiễu xạ XRD của các mẫu sử dụng nguồn muối đồng khác nhau (A-180, S-180, N-180, L-180)

Để phân tích kỹ hơn ảnh hưởng của anion muối đồng, kích thước tinh thể trung bình của các hạt Cu NPs đã được tính sử dụng phương trình Williamson-Hall [26]:

$$\beta \cos\theta = \frac{k\lambda}{d} + 2\varepsilon \sin\theta$$

với: λ độ dài bước sóng của tia X được sử dụng (thường là Cu Kα); β là độ bán rộng vạch nhiễu xạ; θ là góc nhiễu xạ Bragg; k thừa số hình dạng (lấy 0,9; dạng lập phương nên k trong khoảng 0,83-0,91); λ=0,15406 nm. Kích thước tinh thể trung bình ngoại suy và vi ứng suất của các mẫu đã được tính và trình bày trong bảng 1.

Bảng 1: Kích thước tinh thể trung bình và vi ứng suất các mẫu được ngoại suy từ dữ liệu XRD bằng phương trình Williamson-Hall

Mẫu	d (nm)	ε	R^2
N-180	44.83	0.0007	0.804
A-180	38.21	0.0007	0.802
L-180	32.62	0.0004	0.804
S-180	36.29	0.0006	0.960

Ghi chú: D là kích thước tinh thể trung bình tính theo phương pháp Scherrer (nm); ε là vi ứng suất tinh thể; R^2 là hệ số tương quan của đường hồi quy tuyến tính khi áp dụng mô hình Williamson-Hall.

Từ bảng 1, có thể thấy giá trị R^2 đều lớn hơn 0.8 nên kết quả fit hàm theo phương trình Williamson-Hall là tin cậy. Kích thước tinh thể trung bình của các mẫu trong khoảng từ 32,6 nm tới 44,8 nm. Cụ thể mẫu L-180 có kích thước tinh thể trung bình nhỏ nhất và bằng khoảng 32,6 nm; mẫu S-180 là 36,3 nm; mẫu A-180 là 38,2 nm và kích thước tinh thể đạt lớn nhất là 44,8 nm ở mẫu N-180. Nhìn chung kích thước tinh thể trung bình không chênh lệch nhiều khi sử dụng các tiền chất muối đồng khác nhau. Vi ứng suất có giá trị trong khoảng 0,0004 đến 0,0007 cho thấy thành phần hữu cơ trong mẫu ảnh hưởng không đáng kể đến cấu trúc tinh thể của hạt Cu NPs.

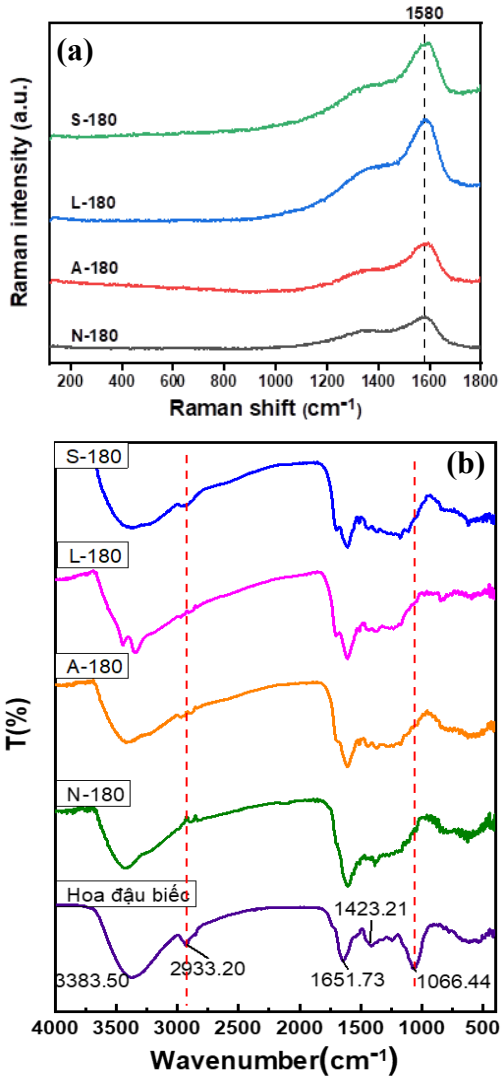
Để nghiên cứu ảnh hưởng của của các nhóm chức hữu cơ đến sự hình thành hạt Cu NPs. Phổ tán xạ Raman và FTIR đã được sử dụng. Hình 2 là kết quả đo phổ tán xạ Raman của các mẫu tổng hợp theo các anion muối đồng. Có thể thấy, trong cả 04 mẫu đều không nhận thấy xuất hiện các đỉnh đặc trưng của hạt Cu NPs, tuy nhiên tại raman shift khoảng 1580 cm^{-1} xuất hiện đỉnh đặc trưng của thành phần hữu cơ có trong mẫu, cụ thể là do sự có mặt của liên kết π trong nhóm chức C=C [23]. Điều này cho thấy các mẫu chế tạo có một lớp màng bọc hữu cơ bên ngoài các hạt nano và kết quả này cũng cho thấy tính chất cộng hưởng plasmon của các hạt nano.

Phổ FTIR của các mẫu trình bày trên Hình 2b. So sánh phổ FTIR của các mẫu với phổ FTIR của dịch chiết hoa đậu biếc, ta nhận thấy các số sóng: 1066 cm^{-1} và 1423 cm^{-1} của dung dịch chiết hoa đậu biếc bị mất đi, nguyên nhân là do các thành phần hữu cơ như các dao động hóa trị của ketone (1066 cm^{-1}), dao động biến dạng O-H (alcohol/ carboxylic acid). Sự mất đi hoặc giảm cường độ của các đỉnh tại 1066 cm^{-1} (liên kết C–O) và 1423 cm^{-1} (nhóm COO^-) cho thấy các nhóm chức này đã tham gia vào quá trình khử Cu^{2+} và ổn định hạt CuNPs. Nhóm hydroxyl (–OH) và carbonyl (C=O) trong các hợp chất flavonoid và anthocyanin có trong chiết xuất hoa đậu biếc hoạt động như chất khử, chuyển Cu^{2+} thành Cu^0, đồng thời tạo liên kết bề mặt với hạt nano để ngăn ngừa kết tụ. Điều này góp phần tạo ra hạt CuNPs bền và phân bố đều trong dung dịch tổng hợp.

Trong quá trình phản ứng nhiệt thủy phân, các gốc này tham gia vào quá trình oxi hóa từ alcohol bị oxy hóa thành ketone, ketone bị oxi hóa thành acid cacboxylic, song song với quá trình oxy hóa của alcohol thì xảy ra quá trình khử của đồng từ $Cu^{2+} \rightarrow Cu^{+} \rightarrow Cu^{o}$.

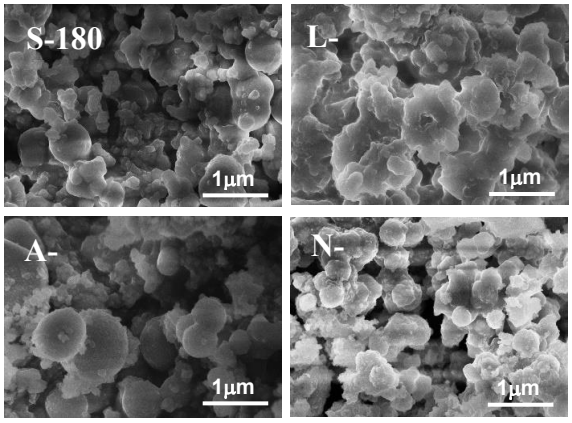
Như vậy, có thể kết luận các hợp chất hữu cơ trong dịch chiết là tác nhân khử mạnh có thể khử ion Cu^{2+} thành Cu^{o}. Hơn nữa, các chất này còn có tác dụng như chất ổn định nên hạt Cu NPs tạo thành có kích thước trung bình nhỏ hơn 45nm

https://doi.org/10.62239/jca.2025.025



Hình 2: (a) Phổ tán xạ Raman và (b) Phổ FTIR của các mẫu sử dụng nguồn muối đồng khác nhau

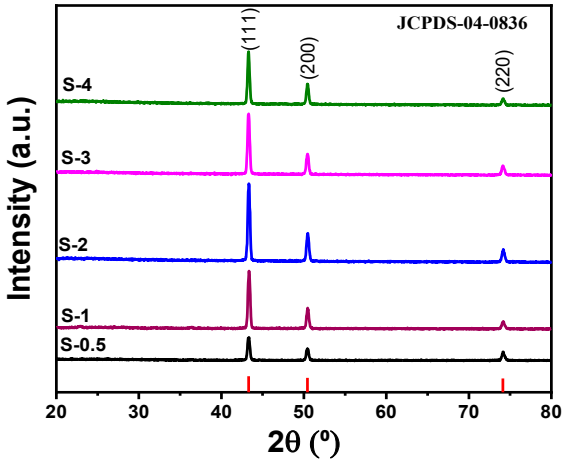
Hình 3 thể hiện ảnh FESEM của các mẫu sử dụng nguồi muối đồng khác nhau. Có thể dễ dàng nhận thấy các hạt Cu NPs có hình thái bề mặt khác nhau. Điều này chứng tỏ nguồn muối đồng sử dụng có ảnh hưởng tới hình thái bề mặt của mẫu tổng hợp.



Hình 3: Ảnh FESEM của các mẫu sử dụng nguồn muối đồng khác nhau

Sự khác biệt về kích thước và độ đồng đều của hạt CuNPs tổng hợp từ các muối khác nhau có thể được giải thích qua ảnh hưởng của anion. Anion NO_3^- từ $Cu(NO_3)_2$ là anion oxi hóa mạnh, dễ bị phân ly và không hình thành phức bền với Cu^{2+} trong dung dịch, tạo điều kiện thuận lợi cho phản ứng khử Cu^{2+} về Cu^0 xảy ra nhanh chóng và đồng đều. Trong khi đó, anion SO_4^{2-} (từ $CuSO_4$) và Cl^- (từ $CuCl_2$) có xu hướng tạo các phức chất với Cu^{2+}, làm giảm tốc độ khử và dẫn đến sự hình thành hạt Cu không đồng đều hoặc kết tụ mạnh hơn. Điều này giải thích tại sao $Cu(NO_3)_2$ cho ra các hạt nhỏ và phân bố kích thước đồng đều hơn. Mặt khác, có thể thấy, kích thước hạt tính theo ảnh FESEM cỡ vài trăm nanomet và kích thước này thường lớn hơn so với kết quả đo XRD. Như chúng ta đã biết kích thước trung bình của tinh thể được tính toán từ giản đồ XRD thường tính theo mặt tinh thể còn kích thước quan sát trên ảnh FESEM là kích thước của đám hạt. Vì vậy, sự chênh lệch giữa kích thước từ XRD (30–40 nm) và kích thước quan sát bằng SEM (vài trăm nm đến µm) là hợp lý và phản ánh đúng bản chất cấu trúc của CuNPs tổng hợp được.

Tỉ lệ thể tích giữa dịch chiết và muối đồng cũng ảnh hưởng đến sự hình thành của hạt Cu NPs. Để nghiên cứu ảnh hưởng của thông số này, muối tiền chất đồng chọn là muối sunfat. Giản đồ nhiễu xạ XRD của các mẫu tổng hợp với hàm lượng dịch chiết là 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 và 4,0g /V= 50 ml. Phản ứng nhiệt độ ở 180°C trong thời gian 48h chỉ ra trong hình 4. Các mẫu được ký hiệu tương ứng là S-0.5; S-1; S-2; S-3; S-4.

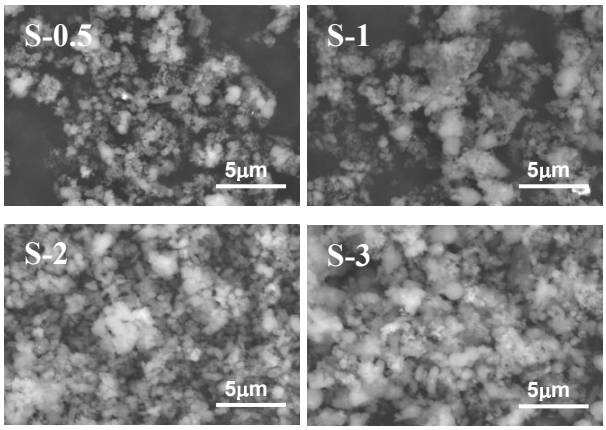


Hình 4: Giản đồ nhiễu xạ tia X của các mẫu tổng hợp theo hàm lượng dịch chiết hoa đậu biếc

Có thể nhận thấy, trong tất cả các trường hợp đều nhận thấy sự xuất hiện của các đỉnh nhiễu xạ đặc trưng của hạt Cu NPs. Mặt khác, khi tăng hàm lượng dịch chiết thì cường độ đỉnh nhiễu xạ tăng và đạt max tại 2,0g/50ml và sau đó giảm dần. Điều này có nghĩa là với hàm lượng dịch chiết 2g/50ml hệ đạt tỉ lệ hợp thức. Kích thước tinh

https://doi.org/10.62239/jca.2025.025

thể trung bình cũng được tính từ phương trình Williamson-Hall. Kích thước tinh thể trung bình tăng từ 24,5 lên 52,9 nm, vi ứng suất tăng từ 0,0001 tới 0,0012 tương ứng với các mẫu có hàm lượng dịch chiết từ 0,5g/50ml tới 4,0g/50ml, điều này chứng tỏ kích thước tinh thể và vi ứng suất tăng khi chúng ta tăng hàm lượng dung dịch chiết hoa đậu biếc trong quá trình tổng hợp vật liệu. Điều này chỉ ra rằng nồng độ dung dịch chiết hoa đậu biếc đã ảnh hưởng đến cấu trúc mạng tinh thể, cùng với vi ứng suất tăng dần, hạt nano được bao bọc bởi một lớp vỏ bọc hữu cơ từ dung dịch chiết hoa đậu biếc.



Hình 5: Ảnh SEM của các mẫu tổng hợp theo hàm lượng dịch chiết hoa đậu biếc

Ảnh SEM của các mẫu tổng hợp theo hàm lượng dịch chiết hoa đậu biếc trình bày trên hình 5. Cũng dễ nhận thấy, với hàm lượng dịch chiết thấp 0,5g/50 mL lượng đồng hình thành thấp. Khi tăng hàm lượng dịch chiết hạt CuNPs hình thành nhiều hơn. Khi hàm lượng dịch chiết càng tăng thì sự hình thành hạt Cu NPs càng tăng và chúng có xu hướng kết tụ lại. Hơn nữa, có thể thấy, ở hàm lượng 2,0g/50 mL cho thấy hạt CuNPs phân bố đồng đều hơn, ít kết tụ, phù hợp với sự gia tăng nồng độ chất khử từ dịch chiết. Bên cạnh đó, phổ FTIR tại tỷ lệ này (hình 2a) cũng ghi nhận tín hiệu giảm rõ rệt của nhóm –OH và C=O, phản ánh vai trò tích cực của các hợp chất phenolic trong quá trình khử Cu^{2+}. Điều này hỗ trợ cho kết luận rằng hàm lượng dịch chiết tối ưu là 2,0g/50 mL tối ưu cho sự hình thành và ổn định của hạt CuNPs.

Kết luận

Trong nghiên cứu này, các hạt nano đồng (CuNPs) đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp xanh sử dụng chiết xuất từ hoa đậu biếc, đóng vai trò vừa là chất khử, vừa là chất ổn định. Phản ứng được thực hiện theo phương pháp nhiệt thủy phân ở nhiệt độ 180 °C trong thời gian 48h. Kết quả thực nghiệm cho thấy:

1) Tiền chất $Cu(NO_3)_2$ cho hiệu suất tạo hạt tốt nhất, với hạt có kích thước trung bình khoảng 32 nm và phân bố khá đồng đều.
2) Ảnh hưởng của loại muối đồng đến đặc điểm hình thái và kích thước hạt là rõ rệt; $CuSO_4$ tạo hạt lớn hơn và kết tụ mạnh hơn so với $Cu(NO_3)_2$.
3) Hàm lượng hoa đậu biếc cũng ảnh hưởng đến quá trình hình thành hạt CuNPs; Hàm lượng dịch chiết 2,0g/50 mL là tối ưu cho sự hình thành và ổn định hạt CuNPs.

Phương pháp này không sử dụng dung môi độc hại, không yêu cầu thiết bị phức tạp, dễ mở rộng quy mô và thân thiện môi trường, phù hợp với xu hướng công nghệ xanh. Các Cu NPs thu được hứa hẹn có thể ứng dụng trong vật liệu kháng khuẩn, xử lý nước hoặc cảm biến sinh học.

Lời cảm ơn

Công trình này được Bộ Giáo dục và Đào tạo hỗ trợ theo số tài trợ B2023-BKA-04.

Tài liệu tham khảo

1. M. Rafique, et al., Nano, 12(1) (2017) 0436. https://doi.org/10.1142/S1793292017500436
2. Istiqola, A. Syafiuddin, J. Chinese Chem. Soc., 67(11) (2020) 1942–1956. https://doi.org/10.1002/jccs.202000179
3. Z. Pan, W. Ding, H. Chen, H. Ji, Chinese Chem. Lett., 35(1) (2023) 108567. https://doi.org/10.1016/j.cclet.2023.108567
4. G.D. Schmid, Met. Nanoclusters Catal. Mater. Sci. Issue Size Control, Elsevier, (2008) 3–20. https://doi.org/10.1016/B978-044453057-8.50003-9
5. R. Velmurugan, A. Incharoensakdi, Nanoparticles and Organic Matter: Process and Impact, Vol. 1, Elsevier, (2018) Chapter 18. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811487-2.00018-9
6. S.M. Badawy, R.A. El-Khashab, A.A., Bull. Chem. React. Eng. Catal., 10(2) (2015) 169–174. http://dx.doi.org/10.9767/bcrec.10.2.7984.169-174
7. N.A.N. Mohamad, et al., IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 358(1) (2018) 012063. https://doi.org/10.1088/1757-899X/358/1/012063
8. S. Sampaio, J.C. Viana, Mater. Sci. Eng. B, 263(1) (2021) 114807. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114807
9. K. Godini, et al., Environ. Sci. Pollut. Res., 27(3) (2020) 2691–2706. https://doi.org/10.1007/s11356-019-07165-9
10. E. Alp, Powder Technol., 394(1) (2021) 1111–1120. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.09.031
11. S. Ali, A. Razzaq, H. Kim, S.I. In, Chem. Eng. J., 429(1) (2022) 131579. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131579
12. N.A.I. Md Ishak, S.K. Kamarudin, S.N. Timmiati, Mater. Res. Express, 6(11) (2019) 1150. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab4458

13. W. Li, et al., J. Mater., (2020) Article ID unknown. https://doi.org/10.1016/j.jmat.2020.02.003
14. D.K. Becerra-Paniagua, et al., Mater. Sci. Semicond. Process., 162(1) (2023) 107485. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107485
15. Atri, et al., Heliyon, 9(1) (2023) e13484. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13484
16. J. Jahan, F. Erci, I. Isildak, J. Drug Deliv. Sci. Technol., 61(1) (2021) 102172. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2020.102172
17. M.B. Mosbah, et al., Water (Switzerland), 14(9) (2022) 1509. https://doi.org/10.3390/w14091509
18. S.R. Singh, et al., Hybrid Adv., 8(1) (2025) 100359. https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100359
19. S. George, A. Rajasekar, S. Rajeshkumar, J. Pharm. Res. Int., 33(63b) (2021) 351–360. https://doi.org/10.9734/jpri/2021/v33i63b35646
20. R. Shaik, A. Buggana, V. Thalari, R.E. Sandhya, K. Bandari, N. Golla, Int. J. Nano Dimens., 16(1) (2025) 1–12. https://doi.org/10.57647/j.ijnd.2025.1601.05
21. S. Prabhu, T.D. Thangadurai, P.V. Bharathy, P. Kalugasalam, Iran. J. Catal., 12(1) (2022) 1–11. https://doi.org/10.30495/ijc.2022.689547
22. L.A. Luu Thi, et al., Adv. Mater. Sci. Eng., 2021(1) (2021) 6651633. https://doi.org/10.1155/2021/6651633
23. N.A. Ludin, et al., Int. J. Electrochem. Sci., 13(1) (2018) 7451–7465. https://doi.org/10.20964/2018.08.04