

SYNTHESIS OF COPPER NANOWIRES BY HYDROTHERMAL METHOD

Nguyen Thi Hong Nhung, Chu Thi Lan Huong, Luu Ba Hoang Anh,

Nguyen Viet Ba, Nguyen Thi Lan, Nguyen Duy Cuong *

Hanoi University of Science and Technology

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	27/5/2024	In this study, we focus on synthesizing copper nanowires through a simple method – the hydrothermal method. The effects of various factors such as the concentration of capping ligand – oleylamine, reducing agent – glucose, hydrothermal temperature, and hydrothermal time, will also be thoroughly investigated on the morphological and electrical properties of the copper nanowires. Based on the survey results, the optimal conditions for fabricating copper nanowires via hydrothermal methods are oleylamine of 8 mM; glucose of 80 mM; a reaction temperature of 120 °C; and a hydrothermal time of 8 hours. The obtained copper nanowires exhibit high aspect ratios, with diameters ranging from 25 to 50 nm, and wire lengths can be up to 150 μm. After filtration, CuNW solution with a 20 mg/ml concentration was dispersed in isopropyl alcohol. This solution has potential applications as conductive ink for transparent conductive electrode fabrication based on copper nanowires.
Revised:	10/7/2024	
Published:	11/7/2024	
KEYWORDS		
Copper nano wires		
Hydrothermal		
Temperature		
Precursor concentration		
Hydrothermal time		

NGHIÊN CỨU TỔNG HỢP DÂY NANO ĐỒNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP THỦY NHIỆT

Nguyễn Thị Hồng Nhung, Chu Thị Lan Hương, Lưu Bá Hoàng Anh,

Nguyễn Việt Bá, Nguyễn Thị Lan, Nguyễn Duy Cường *

Đại học Bách khoa Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	27/5/2024	Trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung tổng hợp dây nano đồng thông qua một phương pháp đơn giản – phương pháp thủy nhiệt. Ảnh hưởng của các yếu tố khác nhau như nồng độ của chất hoạt động bề mặt oleylamine, chất khử glucose, nhiệt độ thủy nhiệt, thời gian thủy nhiệt đến đặc trưng hình thái và tính chất dẫn điện của dây nano đồng cũng sẽ được khảo sát chi tiết. Từ những kết quả khảo sát thu được, điều kiện tối ưu để tổng hợp dây nano đồng bằng phương pháp thủy nhiệt lần lượt là: 8 mM oleylamine; 80 mM glucose; nhiệt độ phản ứng 120 °C; và thời gian thủy nhiệt 8 giờ. Dây nano đồng thu được có tỉ lệ khung hình cao, với đường kính trong khoảng từ 25 đến 50 nm và chiều dài có thể lên đến 150 μm. Sau quá trình lọc, dung dịch dây nano đồng với nồng độ 20 mg/ml được phân tán trong isopropyl alcohol. Chúng có tiềm năng làm mực in cho điện cực trong suốt dựa trên cơ sở dây nano đồng.
Ngày hoàn thiện:	10/7/2024	
Ngày đăng:	11/7/2024	
TỪ KHÓA		
Dây nano đồng		
Thủy nhiệt		
Nhiệt độ		
Nồng độ tiền chất		
Thời gian thủy nhiệt		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.10475>

* Corresponding author. Email: cuong.nguyenduy@hust.edu.vn

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, các dây nano kim loại nói chung và dây nano đồng (CuNW) nói riêng đang được nhiều nhà khoa học trên thế giới quan tâm nghiên cứu nhằm thay thế vật liệu ôxít pha tạp (TCO) (có độ linh hoạt thấp) trong các điện cực dẫn điện trong suốt [1] – [3]. Ưu điểm của CuNW là có độ dẫn điện và tính linh hoạt cao, tiền chất Cu có giá thành thấp. Dây nano kim loại thường được tổng hợp bằng một số phương pháp như phương pháp thủy nhiệt [4], phương pháp polyol [5], phương pháp hóa học [6]. Đối với các dây nano kim loại ứng dụng làm điện cực trong suốt các thông số của dây như chiều dài và đường kính dây là hai thông số quyết định đến tính chất của điện cực [7], [8]. Chiều dài của dây sẽ quyết định đến giá trị điện trở bề mặt và đường kính dây sẽ ảnh hưởng đến độ truyền qua của các điện cực. Trong chế tạo điện cực dựa trên dây nano kim loại thì các dây có chiều dài lớn và đường kính bé sẽ cho đặc trưng của điện cực tốt hơn so với các dây ngắn và đường kính lớn. Việc tổng hợp các dây nano kim loại như CuNW đáp ứng tiêu chuẩn nhằm ứng dụng trong các điện cực trong suốt vẫn đang là vấn đề được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm hiện nay [9] – [12].

Trong nghiên cứu này, CuNW được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt. Mục tiêu của nghiên cứu là tổng hợp được dây nano đồng có đường kính đồng đều và bé, đồng thời chiều dài dây lớn nhằm đáp ứng các tiêu chuẩn ứng dụng trong chế tạo điện cực trong suốt. Để đạt được các yếu tố như trên, trong nghiên cứu này chúng tôi khảo sát chi tiết các yếu tố ảnh hưởng như nhiệt độ, thời gian, nồng độ của các chất lên sự hình thành và các thông số của dây nano đồng.

2. Phương pháp nghiên cứu

Hóa chất: Hóa chất Đồng clorua (CuCl_2) ($\geq 99\%$) của Guangdong Chemical – Trung Quốc, Oleylamine ($\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{N}$) (80 – 90%) của Aladdin – Trung Quốc, Glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) (99%) của Trung Quốc, N-hexane (C_6H_{14}) của Trung Quốc, Isopropyl alcohol – IPA ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$) của Trung Quốc.

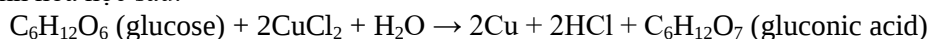
Tổng hợp dây nano đồng: Dây CuNW được tổng hợp thông qua phương pháp thủy nhiệt, với tiền chất là CuCl_2 và được khử thành mầm Cu bằng glucose. Oleylamine (OLA) đóng vai trò làm chất hoạt động bề mặt. Tất cả phản ứng được thực hiện trong môi trường nước, sau đó đưa vào bình thủy nhiệt teflon để thực hiện quá trình thủy nhiệt.

Bước 1: 600 mg CuCl_2 với nồng độ glucose thay đổi từ 40 – 100 mM được hoà tan trong 40 ml nước khử ion, sau đó oleylamine với nồng độ khác nhau từ 4 – 10 mM được thêm vào từ từ cho tới khi hỗn hợp trên hoà tan hết.

Bước 2: Đưa hỗn hợp thu được đi thủy nhiệt tại các nhiệt độ khác nhau lần lượt là 100, 110, 120 và 130 °C trong các thời gian thủy nhiệt khác nhau là 2, 4, 8 và 12 giờ.

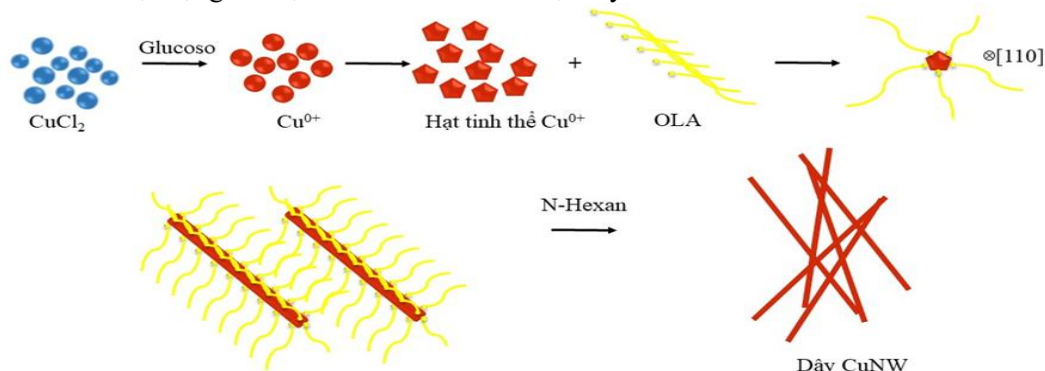
Bước 3: Lọc dây nano đồng bằng cách thêm IPA vào dung dịch CuNW thu được sau quá trình thủy nhiệt với tỉ lệ 1:1, quay ly tâm với tốc độ 5000 rpm trong 15 phút nhằm loại bỏ dung môi và chất hoạt động bề mặt dư thừa, khi đó hỗn hợp dây và hạt nano đồng sẽ lắng xuống dưới. Phân tán lại hỗn hợp bên trên trong n-hexane và quay ly tâm 1000 vòng/phút trong 5 phút để loại bỏ OLA. Dây nano sẽ lắng xuống dưới, các hạt nano đồng lơ lửng bên trên bị loại bỏ, quá trình này thực hiện lặp lại 3 lần nhằm loại bỏ hết hạt nano và chất hoạt động bề mặt trên CuNW.

Cơ chế hình thành CuNW được trình bày như Hình 1. Trong đó, glucose đóng vai trò làm chất khử dung dịch đồng trong quá trình hình thành dây. Cụ thể, CuCl_2 bị khử thành Cu^{2+} , sau đó nó tiếp tục được khử thành Cu^{0+} đóng vai trò làm mầm Cu. Quá trình khử được mô tả thông qua phương trình hoá học sau:



Sau đó, ta cho từ từ OLA vào dung dịch, OLA đóng vai trò làm chất hoạt động bề mặt, có chức năng bao bọc lấy mầm Cu. OLA tạo thành liên kết với nguyên tử đồng nhờ nhóm $-\text{NH}_2$. OLA ưu tiên bám vào mặt mạng (100) do liên kết giữa OLA và mặt (100) lớn hơn đáng kể so với mặt (111). Khi đó, các hạt phân tử, nguyên tử đồng tạo thành trong dung dịch sẽ ưu tiên sắp xếp vào mặt tinh thể (111) giúp dây dài ra, khi đó mầm Cu phát triển dị hướng trở thành dây nano

đồng theo hướng [110]. Cuối cùng, ta lọc dung dịch thu được bằng n-hexane, nó có chức năng loại bỏ chất hoạt động bề mặt OLA bám trên bề mặt dây.

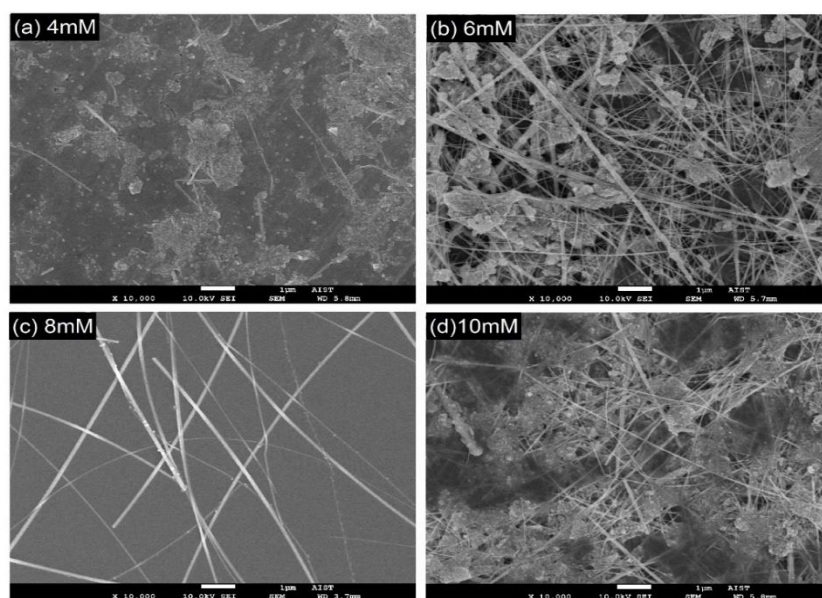


Hình 1. Cơ chế hình thành dây CuNW bằng phương pháp thủy nhiệt

Các phương pháp phân tích: Ta chuẩn bị các mẫu kính đã được quét dây nano đồng bằng phương pháp in gát với kích thước mẫu kính 1x1 cm để đo đặc điểm cấu trúc và thành phần của CuNW bằng giản đồ nhiễu xạ tia X trên máy D8 – Advance, Bruker (Đức) với tia phát xạ Cu-K α có bước sóng $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$, góc quét $2\theta = 20^\circ - 80^\circ$, tốc độ quét 0,015%/s. Kính hiển vi điện tử quét (SEM, Hitachi), cho biết hình thái của dây nano đồng sau khi chế tạo thông qua phương pháp thủy nhiệt.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Ảnh hưởng của nồng độ oleylamine đến hình thái và cấu trúc của CuNW

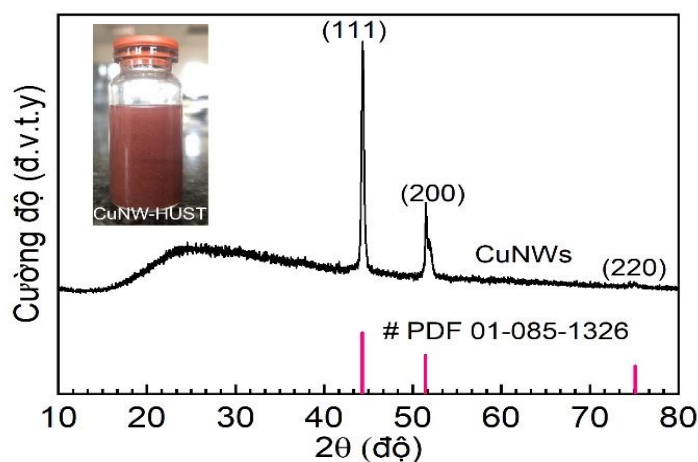


Hình 2. Ảnh SEM của dây CuNW được tổng hợp ở nồng độ oleylamine khác nhau lần lượt là (a) 4 mM, (b) 6 mM, (c) 8 mM, (d) 10 mM. Thời gian và nhiệt độ thủy nhiệt tương ứng là 8 giờ và 120 °C.

Hình 2 thể hiện hình thái và cấu trúc của dây nano đồng tại các nồng độ OLA khác nhau lần lượt là 4, 6, 8, 10 mM. Chất hoạt động bề mặt OLA có vai trò quan trọng trong quyết định hình thái cuối cùng của vật liệu như hạt, thanh, và dây. Khi nồng độ OLA quá thấp, sự hình thành các hạt nano lớn chiếm ưu thế do OLA không đủ để che phủ mặt (100) khiến mầm phát triển đẳng hướng trên các mặt. Do đó, đa số các mầm không thể phát triển thành dây mà hình thành các hạt

nano kết đám lại với nhau (4 mM OLA – Hình 2a). Khi tăng nồng độ OLA lên 6 mM, các hạt nano, thanh nano và các dây CuNW có chiều dài ngắn và đường kính lớn chiếm ưu thế (6 mM OLA – Hình 2b). Ngược lại, khi nồng độ OLA quá cao, các mầm Cu^{0+} được OLA bao bọc toàn bộ mặt (100), bao gồm cả các mặt (111) dẫn đến ngăn chặn mầm phát triển thành dây. Khi đó, vật liệu thu được chủ yếu là hạt nano (10 mM – Hình 2d). Khi nồng độ OLA vừa đủ, OLA ưu tiên bám vào mặt tinh thể (100) và các phân tử/nguyên tử đồng tạo thành trong dung dịch sẽ ưu tiên sắp xếp vào mặt (111) giúp dây nano dài ra mà vẫn giữ được đường kính dây không thay đổi quá lớn so với mầm lúc đầu. Khi đó, dây nano đồng sẽ phát triển từ mặt (111). Hình 2c cho thấy với nồng độ 8 mM OLA, vật liệu thu được chủ yếu là dây CuNW có đường kính trong khoảng từ 25 – 50 nm. Do đó, điều kiện 8 mM OLA sẽ được sử dụng để tiếp tục nghiên cứu tổng hợp dây.

3.2. Phân tích cấu trúc của dây CuNW



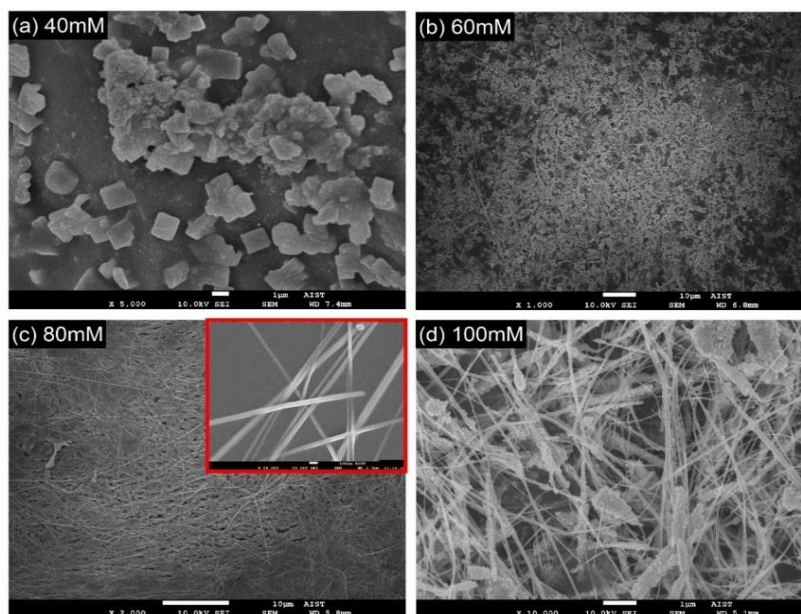
Hình 3. Giản đồ nhiễu xạ tia X của CuNW và dung dịch dây nano đồng được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt với điều kiện tổng hợp tối ưu

Hình 3 là giản đồ nhiễu xạ tia X của dây nano đồng được tổng hợp thông qua phương pháp thủy nhiệt và hình ảnh dung dịch mực in CuNW sau quá trình lọc rửa và được phân tán lại trong dung dịch IPA với nồng độ 20 mg/ml. Dây thu được xuất hiện các đỉnh nhiễu xạ tại các vị trí góc nhiễu xạ $2\theta = 44,34^\circ$; $51,46^\circ$ và $75,02^\circ$ lần lượt tương ứng với các mặt tinh thể (111), (200) và (220) của đồng dựa trên thẻ chuẩn ICSD 64699 (PDF 01-085-1326). Từ giản đồ XRD, dây được phát triển từ mặt (111) dọc theo hướng tinh thể [110] là chủ yếu. Bên cạnh đó, phổ nhiễu xạ tia X không tồn tại các đỉnh nhiễu xạ của các pha thứ cấp như CuO hay Cu_2O , chứng tỏ vật liệu thu được hoàn toàn là đơn pha tinh thể đồng. Hằng số mạng tinh thể của CuNW được xác định theo công thức Debye – Scherrer: $a = (\lambda/2\sin\theta) \cdot (h^2 + k^2 + l^2)^{1/2}$ (1). Trong đó: a là hằng số mạng tinh thể (Å), λ là bước sóng tia X chiếu tới mặt tinh thể ($\lambda = 1,5406$ Å), θ là góc nhiễu xạ Bragg ứng với đỉnh nhiễu xạ cực đại đó. Sử dụng công thức (1) tại mặt tinh thể (111) tương ứng với góc nhiễu xạ $2\theta = 44,34^\circ$, tính toán được hằng số mạng của dây CuNW là $a = 3,53$ Å, kết quả này phù hợp với hằng số mạng tính toán lý thuyết $a = 3,61$ Å của tinh thể đồng.

3.3. Ảnh hưởng của nồng độ glucose đến hình thái và cấu trúc của CuNW

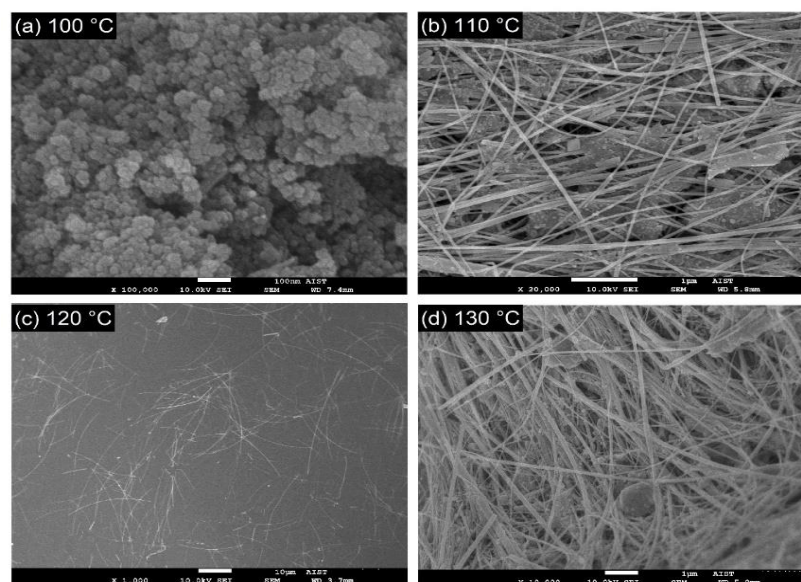
Hình 4 là ảnh SEM của dây nano đồng tại các nồng độ glucose khác nhau lần lượt là 40, 60, 80 và 100 mM. Khi nồng độ chất khử quá thấp, 40 mM glucose, CuCl_2 không được khử thành Cu^0 do đó không thể hình thành dây nano, sản phẩm thu được chủ yếu là các hạt kết đám lại với nhau (Hình 4a). Hình thành các hạt tinh thể CuCl có cấu trúc hình lập phương có kích thước cỡ μm do sự khử không hoàn toàn khi thiếu hụt lượng chất khử glucose. Khi tăng lượng chất khử lên 60 mM, mầm Cu được tạo ra vẫn tương đối ít, sản phẩm thu được bao gồm cả hạt, thanh nano và số lượng ít dây nano (Hình 4b). Khi nồng độ glucose vừa đủ, các mầm được hình thành cũng vừa

đủ, số lượng dây trong sản phẩm thu được cao chứng tỏ hiệu suất hình thành dây tốt (Hình 4c – 80 mM). Tiếp tục tăng nồng độ glucose lên 100 mM, sản phẩm thu được bao gồm cả dây và rất nhiều đám hạt (Hình 4d), điều này là do sự hình thành mầm nhanh với số lượng lớn, các mầm kết đám lại với nhau, từ những đám hạt đó phát triển dị hướng thành dây, do đó sản phẩm thu được có hình dạng như nòng nọc với đầu là các đám hạt, đuôi là dây nano đồng. Vì vậy, nồng độ glucose tối ưu cho việc hình thành dây đồng là 80 mM. Điều kiện này sẽ được cố định để nghiên cứu các điều kiện tiếp theo.



Hình 4. Ảnh SEM của dây CuNW được tổng hợp ở nồng độ glucose khác nhau lần lượt (a) 40, (b) 60, (c) 80 và (d) 100 mM với thời gian và nhiệt độ thủy nhiệt tương ứng là 8 giờ và 120 °C ở nồng độ OLA 8 mM

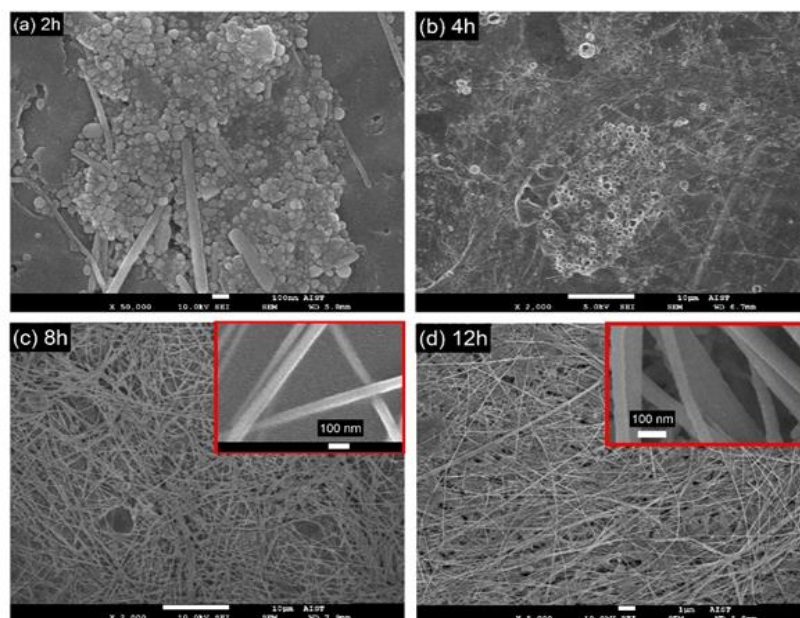
3.4. Ảnh hưởng của nhiệt độ thủy nhiệt đến hình thái và cấu trúc của CuNW



Hình 5. Ảnh SEM của dây nano đồng được tổng hợp tại nhiệt độ thủy nhiệt khác nhau lần lượt (a) 100 °C, (b) 110 °C, (c) 120 °C, (d) 130 °C với thời gian thủy nhiệt, nồng độ OLA và nồng độ glucoso tương ứng là 8 giờ, 8 mM và 80 mM

Nhiệt độ thủy nhiệt cũng là một thông số quan trọng trong quá trình tổng hợp dây nano đồng. Quá trình khử ion đồng tạo thành mầm Cu^{0+} và quá trình hình thành, phát triển dây đều có liên quan chặt chẽ tới nhiệt độ thủy nhiệt. Hình 5 thể hiện sự ảnh hưởng của nhiệt độ tới hình thái, quá trình hình thành, phát triển của CuNW. Từ kết quả SEM thu được, dây đồng không thể phát triển khi nhiệt độ thấp hơn 120°C . Sản phẩm thu được chủ yếu là hạt tại nhiệt độ 100°C (Hình 5a) do khi nhiệt độ thấp sẽ không cung cấp đủ năng lượng cần thiết cho quá trình phát triển của dây. Khi tăng nhiệt độ lên 110°C , các mầm được hình thành và bắt đầu phát triển dị hướng, các cấu trúc hình que, thanh nano bắt đầu xuất hiện với chiều dài từ 1 đến vài μm (Hình 5b). Khi tại nhiệt độ 120°C , nhiệt năng cung cấp cho quá trình hình thành và phát triển dây nano đồng vừa đủ do đó hình thành dây nano với hiệu suất cao, đường kính dây thu được từ 25 – 50 nm (Hình 5c). Tiếp tục tăng nhiệt độ thủy nhiệt lên 130°C , lúc này lượng nhiệt năng dư thừa tạo ra các mầm có kích thước lớn dẫn đến hình thành các dây nano có đường kính lớn ($> 200\text{ nm}$), kèm theo rất nhiều hạt có kích thước lớn (Hình 5d). Như vậy, nhiệt độ tối ưu để tổng hợp CuNW là 120°C , được sử dụng để tổng hợp các mẫu nghiên cứu tiếp theo.

3.5. Ảnh hưởng của thời gian thủy nhiệt đến hình thái và cấu trúc của CuNW



Hình 6. Ảnh SEM của dây nano đồng được tổng hợp tại thời gian thủy nhiệt khác nhau lần lượt (a) 2, (b) 4, (c) 8 và (d) 12 giờ ở nhiệt độ thủy nhiệt 120°C , nồng độ OLA và nồng độ glucose tương ứng là 8 mM và 80 mM

Hình 6 là ảnh SEM mô tả ảnh hưởng của thời gian thủy nhiệt đến sự hình thành và phát triển dây nano đồng từ 2 giờ đến 12 giờ. Với thời gian thủy nhiệt là 2 giờ, sản phẩm thu được chủ yếu là các hạt nano kích cỡ lớn, tuy nhiên vẫn có một số lượng ít thanh nano ngắn được hình thành, nguyên nhân là thời gian phản ứng quá ngắn để mầm có thể phát triển dị hướng thành dây (Hình 6a). Khi tăng thời gian thủy nhiệt lên 4 giờ, một lượng lớn các que/thanh nano được hình thành với chiều dài từ vài μm tới lớn hơn $10\text{ }\mu\text{m}$ (Hình 6b). Khi thời gian thủy nhiệt là 8 giờ, các dây nano hình thành có đường kính trong khoảng 25 – 50 nm và chiều dài dây lên đến $150\text{ }\mu\text{m}$ (Hình 6c, e). Tiếp tục tăng thời gian thủy nhiệt lên 12 giờ, đường kính dây tiếp tục phát triển với kích thước trong khoảng từ 46,7 nm cho đến 123 nm trong khi chiều dài dây tăng không đáng kể (Hình 6d, f). Khi đường kính dây lớn, tiết diện dây tăng lên, điều này làm cho độ truyền qua giảm khi ứng dụng chế tạo TCE. Do đó, đường kính dây nhỏ sẽ được ưu tiên hơn trong chế tạo TCE.

Vì vậy, thời gian thủy nhiệt bằng 8 giờ là điều kiện chuẩn để chế tạo CuNW nhằm chế tạo TCE dựa trên dây nano đồng sau này.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, dây nano đồng đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp thủy nhiệt. CuNW được tổng hợp với điều kiện tối ưu có đường kính trong khoảng 25 – 50 nm và chiều dài dây lên tới 150 μm . Dây được phân tán tốt trong dung môi IPA và có tiềm năng ứng dụng làm mực in trong chế tạo điện cực dẫn điện trong suốt. Nồng độ các chất ban đầu, nhiệt độ, thời gian thủy nhiệt ảnh hưởng rất lớn đến quy trình tổng hợp dây nano. Từ những kết quả đạt được, điều kiện tối ưu để tổng hợp dây thông qua phương pháp thủy nhiệt là: 8 mM oleylamine; 80 mM glucose; nhiệt độ phản ứng 120 $^{\circ}\text{C}$; và thời gian thủy nhiệt 8 giờ. Dây CuNW sau quy trình lọc vẫn còn tồn tại số ít chất hoạt động bề mặt và hạt nano. Để ứng dụng làm điện cực trong suốt thì quy trình lọc dây cần được cải thiện thêm nữa. Chúng tôi sẽ tiếp tục tiến hành cải thiện quy trình lọc để thu được dây CuNW sạch nhất bằng cách bổ sung thêm phương pháp lọc chéo pha.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 103.02-2021.155.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] H. Hwang, A. Kim, Z. Zhong, H. C. Kwon, S. Jeong, and J. Moon, "Reducible-shell-derived pure-copper-nanowire network and its application to transparent conducting electrodes," *Advanced Functional Materials*, vol. 26, no. 36, pp. 6545-6554, 2016.
- [2] S. Yu, J. Li, L. Zhao, B. Gong, and L. Li, "Folding-insensitive, flexible transparent conductive electrodes based on copper nanowires," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 231, p. 111323, 2021.
- [3] B. T. Camic, J. Vapaavuori, and F. Basarir, "Transparent conductive electrode based on LBL deposition of graphene oxide and copper nanowires," *Materials Letters*, vol. 311, p. 131632, 2022.
- [4] H. Liu, S. Wang, Z. Li, R. Zhuo, J. Zhao, Y. Duan, and J. Yang, "Experimental study on the preparation of monodisperse nano-silver by hydrothermal synthesis," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 314, p. 128902, 2024.
- [5] K. Jhansi, N. Thomas, L. Neelakantan, and P. Swaminathan, "Controlling the aspect ratio of silver nanowires in the modified polyol process," *Materials Letters*, vol. 344, p. 134396, 2023.
- [6] G. Zeng, W. Chen, X. Chen, Y. Hu, Y. Chen, B. Zhang, and Y. Li, "Realizing 17.5% efficiency flexible organic solar cells via atomic-level chemical welding of silver nanowire electrodes," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 144, no. 19, pp. 8658-8668, 2022.
- [7] S. Huang, Y. Liu, F. Yang, Y. Wang, T. Yu, and D. Ma, "Metal nanowires for transparent conductive electrodes in flexible chromatic devices: a review," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 20, no. 5, pp. 3005-3037, 2022.
- [8] P. Hsu, S. Wang, H. Wu, V. K. Narasimhan, D. Kong, H. R. Lee, and Y. Cui, "Performance enhancement of metal nanowire transparent conducting electrodes by mesoscale metal wires," *Nature Communications*, vol. 4, no. 1, p. 2522, 2013.
- [9] M. Singh and S. Rana, "Silver and copper nanowire films as cost-effective and robust transparent electrode in energy harvesting through photovoltaic: A review," *Materials Today Communications*, vol. 24, p. 101317, 2020.
- [10] A. S. Hashimi, R. T. Ginting, S. X. Chin, K. S. Lau, M. A. N. M. Nohan, S. Zakaria, and C. H. Chia, "Fast microwave-assisted synthesis of copper nanowires as reusable high-performance transparent conductive electrode," *Current Applied Physics*, vol. 20, no. 1, pp. 205-211, 2020s.
- [11] X. Li, Y. Wang, C. Yin, and Z. Yin, "Copper nanowires in recent electronic applications: progress and perspectives," *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 8, no. 3, pp. 849-872, 2020.
- [12] Q. Xie, Z. Yan, S. Wang, Y. Wang, L. Mei, F. Qin, and R. Jiang, "Transparent, flexible, and stable polyethersulfone/copper-nanowires/polyethylene terephthalate sandwich-structured films for high-performance electromagnetic interference shielding," *Advanced Engineering Materials*, vol. 23, no. 8, p. 2100283, 2021.