



NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VẬT LIỆU ĐỒNG XỐP GIA CƯỜNG ỐNG CARBON NANO ĐỊNH HƯỚNG ỨNG DỤNG TRONG CHUYỂN HÓA QUANG NHIỆT

Nguyễn Phan Đức Nghĩa¹, Nguyễn Thị Minh Hiền¹, Mai Thị Phượng¹,
Nguyễn Thị Vân Anh¹, Trần Văn Hậu¹, Trần Bảo Trung¹, Đoàn Đình Phương¹,
Oleg Smorygo², Bùi Hùng Thắng¹

¹ Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, Phường
Nghĩa Đô, Quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

² Viện Luyện kim bột O.V. Roman, Viện Hàn lâm Khoa học Quốc gia Belarus 41, Platonov Street, Minsk,
Belarus

Tóm tắt. Trong nghiên cứu này, tập thể nghiên cứu đã tổng hợp vật liệu đồng xốp ống carbon nano (Cu-CNT) bằng phương pháp lắng đọng hơi hóa học (CVD). Kết quả cho thấy, độ bao phủ carbon nano (CNT) tăng lên đáng kể với thời gian lắng đọng tăng lên. Quang phổ Raman cho thấy hỗn hợp này có đỉnh đặc trưng của CNT. Với thời gian CVD 30 phút, sự phát triển của CNT đáng kể hơn, mật độ dày hơn và bao phủ toàn bộ bề mặt Cu xốp. So với các mẫu khác, vật liệu tổng hợp có thời gian phát triển 30 phút có khả năng hấp thụ ánh sáng cao nhất trong phổ khả kiến. Mức độ hấp thụ trung bình của mẫu là 93,2%, cao hơn 15,1% so với các mẫu Cu-CNT 15 phút, 36,9% so với đồng xốp và 57,6% so với đồng rắn. Những kết quả sơ bộ này cho thấy tiềm năng ứng dụng của vật liệu tổng hợp Cu-CNT trong chuyển hóa quang nhiệt.

Từ khóa: Cu xốp, ống carbon nano, Cu-CNT, chuyển hóa quang nhiệt

Research on manufacturing porous copper materials reinforced with carbon nanotubes for application in photothermal conversion

Nguyễn Phan Đức Nghĩa¹, Nguyễn Thị Minh Hiền¹, Mai Thị Phượng¹,
Nguyễn Thị Vân Anh¹, Trần Văn Hậu¹, Trần Bảo Trung¹, Đoàn Đình Phương¹,
Oleg Smorygo², Bùi Hùng Thắng¹

¹ Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet Street,
Hanoi, Vietnam

² O V Roman Powder Metallurgy Institute (RPMI), National Academy of Sciences of Belarus (NASB), 41
Platonov Street, Minsk, Belarus

Abstract. In this study, we successfully synthesized a porous copper carbon nanotube (Cu-CNT) composite using the chemical vapor deposition (CVD) method. The results showed that increasing deposition time significantly enhanced the carbon nanotube coverage. Raman spectroscopy indicated the presence of characteristic carbon peaks in the CNT. With a CVD time of 30 minutes, the CNT growth was more significant, denser, and covered the entire surface of the porous copper. Compared to other samples, the composite synthesized with a 30-minute growth time exhibited the highest light absorption capacity in the visible range. This composite exhibited superior light absorption capabilities in the visible spectrum, with an average absorption rate of 93.2%. This is a remarkable improvement, being 15.1% higher than the 15-minute Cu-CNT samples, 36.9% higher than porous copper, and 57.6% higher than solid copper. These promising results highlight the potential of Cu-CNT composites for applications in photothermal conversion.

Keywords: porous copper, carbon nanotubes, Cu-CNT, light absorption

1 Giới thiệu

Carbon là một nguyên tố đa năng, đặc trưng khả năng liên kết linh hoạt với nhiều nguyên tố khác tạo thành các hợp chất khác nhau với tính chất đa dạng. Do đó, carbon đã thu hút sự quan tâm của các nhà khoa học thuộc nhiều ngành khác nhau. Trong khoa học vật liệu, nghiên cứu về carbon được tập trung vào các dạng thù hình khác nhau của nó, như kim cương, graphite, ống carbon nano (CNT), graphene,... Các vật liệu carbon nano, đặc biệt là CNT và graphene, đang được nghiên cứu mạnh mẽ do các đặc tính vật lý và hóa học ưu việt của chúng [1-4]. Đặc biệt, độ dẫn nhiệt của CNT và graphene rất cao, có thể đạt tới 4000-5000 W/mK [5-6]. Độ dẫn nhiệt cao hơn nhiều so với các cấu hình khác của carbon (kim cương ở mức 2000 W/mK) và vượt trội hơn hẳn so với hầu hết các kim loại dẫn nhiệt (đồng ở mức 483 W/mK) [7]. Với những đặc tính vượt trội như vậy, CNT là vật liệu có tiềm năng ứng dụng trong quang nhiệt [8-9].

Tuy nhiên ứng dụng của CNT đang phải đối mặt với những thách thức lớn, chủ yếu bị hạn chế trong sản xuất quy mô lớn [10-11]. Các vấn đề như năng suất thấp, tạp chất cao và thời gian sản xuất dài khiến việc sản xuất CNT và graphene công nghiệp trở nên tốn kém và phức tạp. Giải pháp cho vấn đề này phát triển vật liệu tổng hợp CNT/graphene với các kim loại khác. Bằng cách sử dụng các phương pháp như thiêu kết tia lửa plasma (SPS), lắng đọng hơi hóa học (CVD) và lắng đọng điện, việc tổng hợp CNT/graphene-kim loại trở nên khả thi [12-14]. Những vật liệu này có thể mang lại nhiều tính chất vượt trội hơn so với kim loại cơ bản, bao gồm độ bền cao hơn, khả năng dẫn nhiệt tốt hơn và khả năng chống ăn mòn cao. Một ví dụ rõ ràng là nghiên cứu của Guanyu Chen và cộng sự đã chế tạo thành công vật liệu tổng hợp carbon và kim loại Cu. Kim loại Cu này với cấu trúc xốp có thể điều chỉnh được bằng phương pháp thủy nhiệt ứng dụng chuyển đổi quang nhiệt, kết quả cho thấy mẫu thu được ở 500°C đạt hiệu suất chuyển đổi quang nhiệt cao nhất lên tới 64,42% dưới tác động của bức xạ laser cao 808 nm [15]. Tương tự, trong môi trường bức xạ laser này, nghiên cứu của Yangziwan Weng và nhóm nghiên cứu đã nung nóng

tiền chất vật liệu MOF ở nhiệt độ 400-900°C thu được khối đa diện carbon xốp với hạt nano đồng (Cu@CPP-t) đạt hiệu suất chuyển đổi quang nhiệt cao nhất là 48,5% [16].

Mặc dù vậy, vật liệu tổng hợp cũng có thể có một số nhược điểm, chẳng hạn như hiệu suất nhiệt kém do sự phân cụm của carbon nano hoặc độ xốp lớn [12]. Do đó, cần có những nghiên cứu phát triển để cải thiện các tính chất của vật liệu tổng hợp CNT-kim loại. Độ xốp của kim loại, có thể dẫn đến hiệu ứng xạ bẫy ánh sáng tốt hơn và nâng cao khả năng hấp thụ nhiệt. Ngoài ra, sắc tố tối được tạo ra từ màu CNT là yếu tố hấp thụ nhiệt tối và phản xạ. Chính vì vậy, việc chế tạo hiệu quả các vật liệu tổng hợp này đòi hỏi giảm thiểu ảnh hưởng sự kết tụ và độ xốp dư thừa.

Trong bài báo này, tập thể nghiên cứu lựa chọn kim loại Cu như vật liệu chủ chốt để sản xuất vật liệu tổng hợp carbon nano, với mục đích có giá thành hợp lý đồng thời đảm bảo tính dẫn nhiệt và điện tốt [7,17]. Đặc biệt, sự kết hợp giữa tính dẫn nhiệt cao của đồng và đặc tính quang nhiệt tuyệt vời của CNT làm cho Cu-CNT xốp trở thành máy tạo nhiệt hiệu quả dưới bức xạ ánh sáng. Khả năng tạo nhiệt hiệu quả của vật liệu tổng hợp Cu-CNT xốp phát sinh từ các đặc điểm cấu trúc độc đáo của chúng, định vị chúng là vật liệu nổi bật cho các ứng dụng yêu cầu chuyển đổi quang nhiệt hiệu quả. Hơn nữa, vật liệu tổng hợp Cu-CNT có tiềm năng được ứng dụng giảm ma sát điện, giúp cải thiện hiệu suất của các thiết bị điện tử [18].

2 Thực nghiệm

2.1 Chế tạo Cu xốp

Để chế tạo vật liệu Cu xốp, sử dụng 5 g bột Cu hình cầu có đường kính dao động từ 150-200 μm và độ tinh khiết 99,5% được cung cấp bởi công ty Xilong (Trung Quốc). Bột Cu này sau đó được đổ vào khuôn thép không gỉ có đường kính bên trong 20 mm. Quá trình thiêu kết bắt đầu ở nhiệt độ phòng với tốc độ gia nhiệt 7 $^{\circ}\text{C}/\text{phút}$ đưa nhiệt độ lên 950 $^{\circ}\text{C}$. Mẫu Cu được giữ nhiệt trong 2 giờ, dưới tác động liên tục của dòng hydro. Sau quá trình thiêu kết hoàn thành, mẫu Cu xốp thu được để tự nguội xuống nhiệt độ phòng. Kết quả cho thấy, mẫu Cu xốp có độ dày khoảng 2,5 mm và độ xốp 52,5%. Điều này là kết quả của sự kết hợp chặt chẽ giữa các hạt Cu trong quá trình chế tạo, tạo ra một cấu trúc xốp rắn với nhiều đặc tính cải thiện.

2.2 Chế tạo Cu-CNT

Mẫu Cu xốp sau khi chế tạo thành công được sử dụng để tiến hành chế tạo vật liệu tổng hợp Cu-CNT bằng phương pháp lắng đọng hóa học pha hơi ở áp suất khí quyển (APCVD). Mẫu Cu xốp được đặt vào khay gốm và đưa vào ống thạch anh của hệ CVD. Vì khí O_2 dư có thể gây ảnh hưởng đến quá trình hình thành CNT. Để loại bỏ lượng khí O_2 dư bên trong ống thạch anh, khí N_2 được cấp vào trong hệ CVD với lưu lượng 400 sccm trong 60 phút. Nhiệt độ lò được tăng từ nhiệt độ phòng lên 500 $^{\circ}\text{C}$ trong 30 phút. Tiếp theo, đưa khí H_2 vào hệ thống với lưu lượng

400sccm trong 60 phút để khử mẫu Cu xốp. Quá trình khử giúp loại bỏ các tạp chất trên bề mặt mẫu Cu, tạo điều kiện thuận lợi cho sự hình thành CNT. Sau khi khử mẫu Cu, tiếp tục đưa khí C_2H_2 với lưu lượng 60 sccm và khí H_2 với lưu lượng 420 sccm vào hệ CVD để duy trì sự hình thành của CNT. Quá trình lắng đọng CNT diễn ra trong thời gian 15 - 30 phút ở nhiệt độ $700^\circ C$. Sau khi hình thành CNT, ngừng cấp khí C_2H_2 và H_2 , tiếp tục duy trì khí N_2 trong 30 phút để đẩy các khí còn lại ra khỏi ống thạch anh. Cuối cùng, tắt lò nhiệt và để mẫu Cu-CNT nguội về nhiệt độ phòng.

2.3 Khảo sát FESEM, EDX và Raman

Kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FESEM) Hitachi S-4800, tia X phân tán năng lượng (EDX), quang phổ Raman Micro-Raman LABRAM-1B từ Jobin-Yvon, lần lượt được sử dụng để nghiên cứu hình thái bề mặt, thành phần hóa học và sự thay đổi cấu trúc của hỗn hợp.

2.4 Đo độ hấp thụ quang nhiệt

Độ hấp thụ ánh sáng của các mẫu được đo bằng hệ thống máy quang phổ UV-VIS tại Viện Đo lường Việt Nam với quy trình hiệu chuẩn V11.M-07.10.

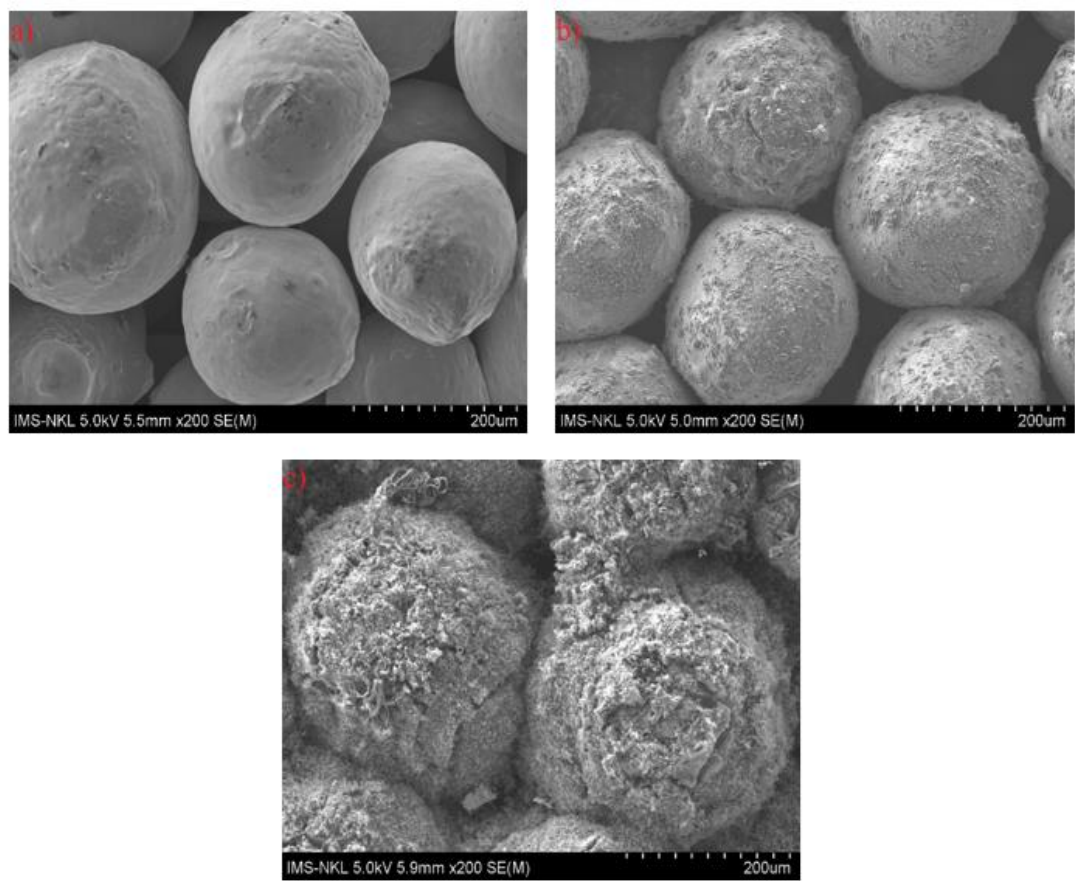
3 Kết quả và thảo luận

3.1 Khảo sát hình thái bề mặt và cấu trúc (SEM, EDX, Raman)

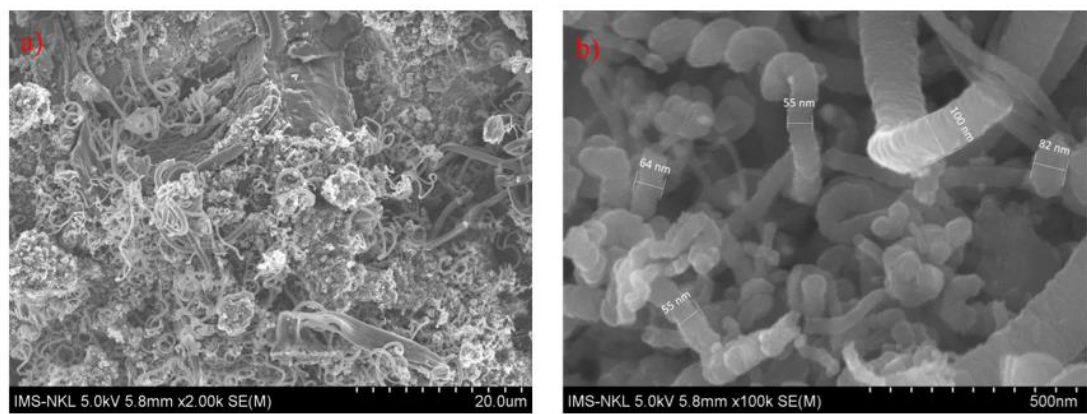
Hình 1 sử dụng kính hiển vi điện tử quét trường (FESEM) để xác định phạm vi bao phủ của CNT trên mẫu trước và sau quá trình CVD. Kết quả cho thấy, với Hình 1a và 1b làm nổi bật sự tiến triển của quá trình CVD trên mẫu Cu xốp. Sau 15 phút CVD, một số chấm đen xuất hiện trên bề mặt đồng, điều này cho thấy có sự hình thành vật liệu CNT và mật độ thấp trên bề mặt mẫu. Sau 30 phút CVD, các quả cầu đồng hầu hết được bao phủ hoàn toàn bởi màu tối của CNT, thể hiện sự phát triển đáng kể của quá trình CVD.

Để đánh giá sự hiện diện của CNT, Hình 2 hiển thị kết quả FESEM ở độ phân giải cao hơn. Kết quả mẫu Cu-CNT sau 30 phút cho thấy sự phát triển đáng kể và độ phủ gần như hoàn toàn của CNT trên bề mặt vật liệu Cu xốp. Trong Hình 2b, sự phân bố của CNT được làm nổi bật, cho thấy phạm vi đường kính dao động trong khoảng 55-100 nm.

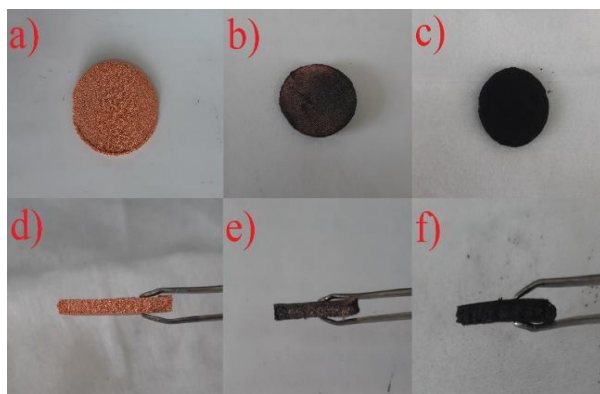
Hình 3 cho thấy sự khác nhau về sự phát triển của CNT ở các thời điểm khác nhau trong quá trình CVD. Quan sát trực quan cho thấy, mẫu Cu-CNT sau 30 phút CVD có màu đen đồng đều bao phủ toàn bộ mẫu, thể hiện sự phát triển đồng đều và mật độ cao của CNT. Trong khi đó, mẫu Cu-CNT sau 15 phút CVD cho thấy sự xuất hiện của CNT với mật độ thấp thể hiện qua sự xuất hiện những vùng đen nhạt xen kẽ trên bề mặt mẫu.



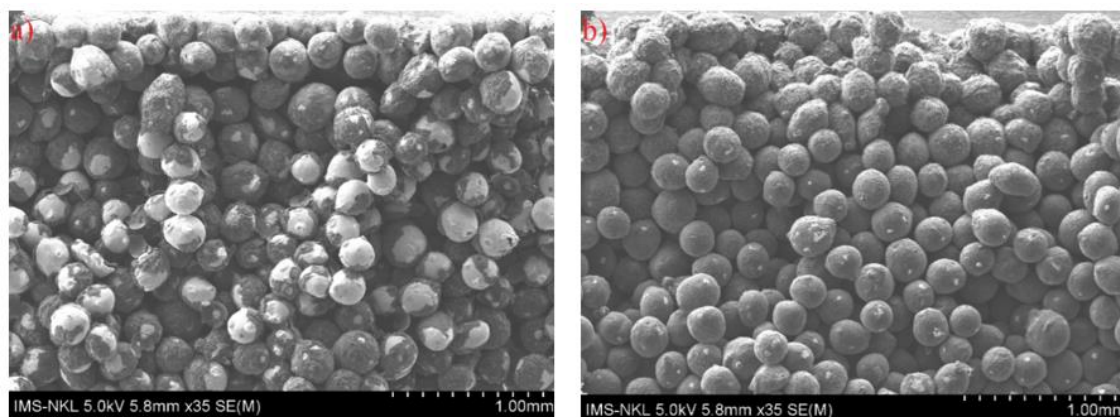
Hình 1. Ảnh FESEM của (a) Xốp đồng, (b) Cu-CNT sau 15 phút lắng động và (c) Cu-CNT sau 30 phút lắng động



Hình 2. Ảnh FESEM của Cu-CNT sau 30 phút lắng động

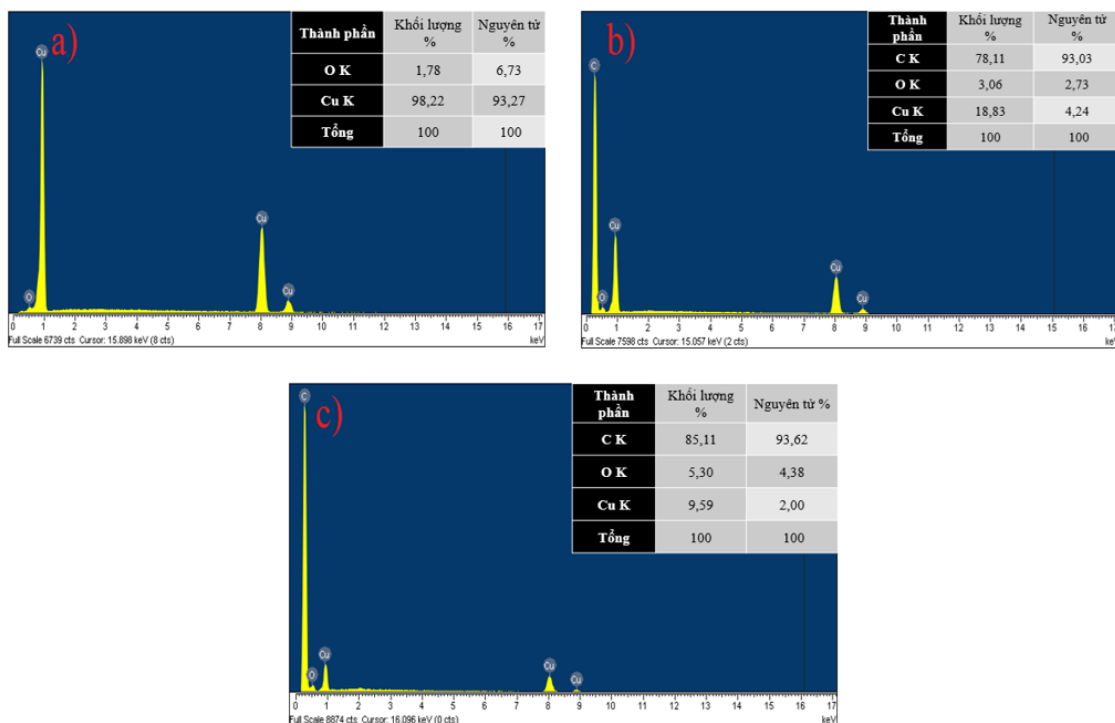


Hình 3. Hình ảnh của (a) Xốp đồng, (b) Cu-CNT 15 phút, (c) Cu-CNT 30 phút, (d) Mặt cắt ngang của xốp đồng, (e) Mặt cắt ngang của Cu-CNT 15 phút và (f) Mặt cắt ngang của Cu-CNT 30 phút



Hình 4. Hình ảnh mặt cắt ngang FESEM của (a) Cu-CNT sau 15 phút lắng đọng và (b) Cu-CNT sau 30 phút lắng đọng

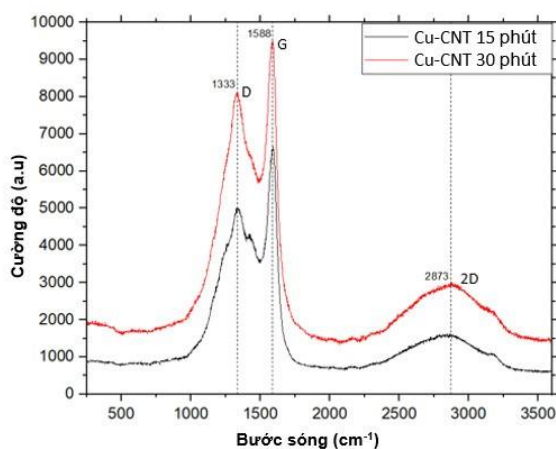
Ảnh SEM mặt cắt ngang trong Hình 4 cho thấy sự phân bố của CNT trong mẫu 15 phút kém đồng đều hơn so với mẫu 30 phút. Trong mẫu 30 phút, CNT phát triển ở các quả cầu Cu ở phía trên, trong khi các quả cầu Cu phía dưới CNT phân bố với mật độ thấp hơn. Điều này cho thấy lượng CNT hình thành phía trong mẫu Cu xốp ít hơn, hiện tượng này được giải thích là do các khí CVD ở phía trên bề mặt mẫu xốp dễ dàng và tập trung nhiều hơn, trong khi những khí này gặp khó khăn khi thâm nhập vào bên trong mẫu Cu xốp điều này, làm giảm mật độ của CNT hình thành bên trong mẫu Cu xốp.



Hình 5. Các phép đo EDX cắt ngang của (a) Đồng xốp, (b) Cu-CNT sau 15 phút lắng đọng và (c) Cu-CNT sau 30 phút lắng đọng

Các phép đo EDX được thực hiện để xác định độ bao phủ của CNT trên bề mặt Cu xốp. CNT được tổng hợp thông qua phương pháp CVD tương tác và biến tính trên bề mặt của các quả cầu đồng xốp. Vì vậy, kết quả EDX về hàm lượng Cu thực tế có thể phản ánh mức độ bao phủ của CNT trên bề mặt hạt cầu đồng. Nhìn chung, mẫu có thời gian phát triển CNT 30 phút có hàm lượng carbon cao hơn đáng kể so với mẫu có thời gian phát triển CNT 15 phút. Kết quả phân tích phổ EDX của mẫu 30 phút cho thấy cường độ đỉnh phổ đặc trưng của Cu rất nhỏ, điều này chứng tỏ sự bao phủ gần như hoàn toàn của CNT. Hàm lượng Cu trên bề mặt mẫu 30 phút là khoảng 9,59%, thấp hơn so với 18,83% của mẫu 15 phút và 98,22% của mẫu đồng xốp. Sự giảm mạnh thành phần Cu cho thấy độ bao phủ của vật liệu ống carbon nano trên bề mặt kim loại Cu là lớn, qua đó giúp cải thiện hiệu quả hấp thụ quang nhiệt của vật liệu.

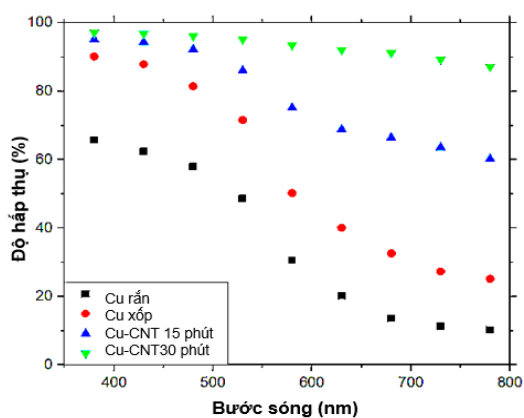
Kết quả Raman ở Hình 6 thể hiện các đỉnh đặc trưng về CNT. Cụ thể, dải D, đặc trưng cho các khuyết tật trong CNT, nằm ở số sóng khoảng 1333 cm^{-1} . Dải G, đặc trưng cho các dao động trong carbon sp^2 , nằm ở số sóng khoảng 1588 cm^{-1} [19-20]. Dải 2D nằm ở số sóng khoảng 2700 cm^{-1} đặc trưng cho các nguyên tử carbon định hướng lục giác của graphene.



Hình 6. Phổ Raman của vật liệu Cu-CNT 15 phút CVD và Cu-CNT 30 phút CVD

3.2 Hiệu suất quang nhiệt

Hiệu suất quang nhiệt của mẫu cũng được xác định thông qua các phép đo quang phổ. Hình 7 trình bày các phép đo độ hấp thụ ánh sáng của Cu rắn, Cu xốp, Cu-CNT 15 phút và Cu-CNT 30 phút, trong khoảng bước sóng 380 nm đến 780 nm. Vật liệu tổng hợp có thời gian phát triển 30 phút có khả năng hấp thụ ánh sáng cao hơn trong phổ khả kiến. Điều này được thể hiện qua kết quả đo quang phổ của mẫu Cu-CNT 30 phút, với độ hấp thụ ánh sáng trung bình là 93,2%. Mức độ hấp thụ này cao hơn đáng kể so với mẫu Cu-CNT 15 phút (15,1%), mẫu đồng xốp (36,9%) và mẫu đồng rắn (57,6%). Điều này cho thấy rằng việc tăng cường CNT góp phần quan trọng trong việc cải thiện khả năng hấp thụ ánh sáng của cả hai vật liệu tổng hợp so với Cu xốp, đặc biệt là ở phổ nhìn thấy phía trên (lớn hơn 580 nm).



Hình 7. Kết quả hiệu suất quang nhiệt của Cu rắn, Cu xốp, Cu-CNT 15 phút và Cu-CNT 30 phút

4 Kết luận

Tập thể nghiên cứu đã thành công chế tạo và khảo sát vật liệu composite Cu-CNT bằng phương pháp CVD. Các phép đo FESEM và EDX cho thấy phạm vi bao phủ CNT tăng lên với thời gian CVD tăng lên. Quang phổ Raman chỉ ra rằng vật liệu tổng hợp xuất hiện các đỉnh đặc trưng của CNT. Hơn nữa, sự gia tăng cường độ Raman cùng với sự phát triển của CNT trong quá trình CVD 30 phút cho thấy độ bao phủ CNT trên Cu xoắn tăng lên. Kết quả hiệu suất quang nhiệt cho thấy khả năng hấp thụ ánh sáng trong vùng khả kiến lần lượt là 93,2% (Cu-CNT 30 phút); 78,1% (Cu-CNT 15 phút); 56,3% (Cu xoắn); 35,6% (Cu rắn). Điều này, cho thấy vật liệu tổng hợp có thời gian phát triển 30 phút có khả năng hấp thụ ánh sáng cao hơn đáng kể so với mẫu 15 phút (15,1%), mẫu Cu xoắn (36,9%) và Cu rắn (57,6%). Các kết quả sơ bộ cho thấy Cu xoắn được tăng cường CNT có khả năng hấp thụ ánh sáng được cải thiện, cho thấy tiềm năng của nó trong các ứng dụng quang nhiệt.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được hỗ trợ tài chính từ Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam với nhiệm vụ mã số dự án QTBY01.04/22-23.

Tài liệu tham khảo

1. Rahman G, Najaf Z, Mehmood A, Bilal S, Shah AHA, Mian SA, Ali G. An Overview of the Recent Progress in the Synthesis and Applications of Carbon Nanotubes. 2019;5(1):3.
2. Coville NJ, Mhlanga SD, Nxumalo EN, Shaikjee A. A Review of Shaped Carbon Nanomaterials. South African Journal of Science. 2011;107(3/4).
3. Anzar N, Hasan R, Tyagi M, Yadav N, Narang J. Carbon Nanotube - a Review on Synthesis, Properties and Plethora of Applications in the Field of Biomedical Science. Sensors International. 2020;1:100003.
4. Urade AR, Lahiri I, Suresh KS. Graphene Properties Synthesis and Applications: A Review. JOM. 2022;75(3):614–630.
5. Chen S, Wu Q, Mishra C, Kang J, Zhang H, Cho K, Cai W, Balandin AA, Ruoff RS. Thermal Conductivity of Isotopically Modified Graphene. Nature Materials. 2012;11(3):203–207.
6. Balandin AA, Ghosh S, Bao W, Calizo I, Teweldebrhan D, Miao F, Lau CN. Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene. Nano Letters. 2008;8(3):902–907.
7. Han Z, Fina A. Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene. Nano Letters. 2008;8(3):902–907.
8. Liu Y, Lin Z, Wang P, Huang F, Sun JL. Measurement of the photothermal conversion efficiency of CNT films utilizing a Raman spectrum. Nanomaterials. 2022;12(7):1101.

9. Leahu G, Li Voti R, Larciprete MC, Sibilia C, Bertolotti M, Nefedov I, Anoshkin IV. Thermal characterization of carbon nanotubes by photothermal techniques. *International Journal of Thermophysics*. 2015;36:1349-1357.
10. Huang JQ, Zhang Q, Zhao MQ, Wei F. A Review of the Large-Scale Production of Carbon Nanotubes: The Practice of Nanoscale Process Engineering. *Chinese Science Bulletin*. 2011;57(2-3):157-166.
11. Li Y, Chopra N. Progress in Large-Scale Production of Graphene. Part 1: Chemical Methods. *JOM*. 2014;67(1):34-43.
12. Chu K, Wu Q, Jia C, Liang X, Nie J, Tian W, Gai G, Guo H. Fabrication and Effective Thermal Conductivity of Multi-Walled Carbon Nanotubes Reinforced Cu Matrix Composites for Heat Sink Applications. *Composites Science and Technology*. 2010;70(2):298-304.
13. Hidalgo-Manrique P, Lei X, Xu R, Zhou M, Kinloch IA, Young RJ. Copper/Graphene Composites: A Review. *Journal of Materials Science*. 2019;54(19):12236-12289.
14. Sundaram RM, Sekiguchi A, Sekiya M, Yamada T, Hata K. Copper/Carbon Nanotube Composites: Research Trends and Outlook. *Royal Society Open Science*. 2018;5(11):180814.
15. Chen G, Jiang Z, Li A, Chen X, Ma Z, Song, H. Cu-based MOF-derived porous carbon with highly efficient photothermal conversion performance for solar steam evaporation. *Journal of Materials Chemistry A*. 2021;9(31): 16805-16813.
16. Weng Y, Guan S, Wang L, Lu H, Meng X, Waterhouse GI, Zhou S. (2020). Defective porous carbon polyhedra decorated with copper nanoparticles for enhanced NIR-driven photothermal cancer therapy. *Small*. 2020;16(1):1905184.
17. Tsakiris V, Kappel W, Alecu G. Solid State Diffusion Welding of Cu-Fe/Al/Ag and Al-Ni Dissimilar Metals. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2011;9 (13):1176.
18. Jagannadham K. Electrical Conductivity of Copper-Graphene Composite Films Synthesized by Electrochemical Deposition with Exfoliated Graphene Platelets. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*. 2012;30(3).
19. Cho S, Kikuchi K, Miyazaki T, Takagi K, Kawasaki A, Tsukada T. Multiwalled Carbon Nanotubes as a Contributing Reinforcement Phase for the Improvement of Thermal Conductivity in Copper Matrix Composites. *Scripta Materialia*. 2010;63(4):375-378.
20. Jorio A, Saito R. Raman Spectroscopy for Carbon Nanotube Applications. *Journal of Applied Physics*. 2021;129(2):021102.