

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF CARBON NANOPARTICLES USING THERMAL PLASMA

Tran Van Huynh^{1*}, Le Thi Hong Hiep¹, To Thanh Vu¹,
Tran Thanh Tra², Nguyen Hoang Tung³, Nguyen Thanh Tung^{3,4}

¹University of Fire Prevention and Fighting, ²HoaLu University

³Institute of Materials Science, ⁴Graduate University of Science and Technology

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	03/6/2024	Carbon nanomaterials have been extensively studied in recent years due to their superior characteristics, which allow their versatile applications in various industries such as energy, electronics, environment, automotive, aerospace, biomedicine, and optics. The thermal plasma method is a method of synthesizing nanomaterials with many advantages such as high capacity, high efficiency, and limited use of chemicals. In this study, we synthesize carbon nanoparticles using one-dimensional thermal plasma with nitrogen plasma gas. The carbon nanoparticles are then analyzed to determine particle size, surface area, and purity. The results obtained include carbon nanoparticles of uniform size, with a size of about 100 nm, large surface area, more than 100 m ² /g, and high purity. With such properties, manufactured carbon nanoparticles can be applied in many fields, especially electronics, environment, and biomedicine.
Revised:	10/7/2024	
Published:	11/7/2024	

KEYWORDS

Carbon nanoparticles
Thermal plasma
Nitrogen
Large surface area
High purity

TỔNG HỢP VÀ ĐẶC TRƯNG TÍNH CHẤT CỦA HẠT NANO CARBON BẰNG PLASMA NHIỆT

Trần Văn Huỳnh^{1*}, Lê Thị Hồng Hiệp¹, Tô Thanh Vũ¹,
Trần Thanh Trà², Nguyễn Hoàng Tùng³, Nguyễn Thanh Tùng^{3,4}

¹Trường Đại học Phòng cháy chữa cháy, ²Trường Đại học Hoa Lư

³Viện Khoa học vật liệu, ⁴Học viện Khoa học và công nghệ

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	03/6/2024	Vật liệu nano carbon đã được nghiên cứu rộng rãi trong những năm gần đây do các đặc tính vượt trội của chúng, cho phép chúng được ứng dụng linh hoạt trong các lĩnh vực khác nhau như năng lượng, điện tử, môi trường, ô tô, hàng không vũ trụ, y sinh và quang học. Phương pháp plasma nhiệt là phương pháp tổng hợp vật liệu nano có nhiều ưu điểm như có công suất lớn, hiệu suất cao, hạn chế phải dùng hóa chất. Trong nghiên cứu này, chúng tôi tổng hợp nano carbon bằng plasma nhiệt một chiều sử dụng khí plasma nitrogen. Nano carbon sau đó được phân tích hình ảnh bề mặt để xác định kích thước hạt, được phân tích để xác định diện tích bề mặt và độ tinh khiết. Kết quả thu được nano carbon có kích thước đồng đều, với kích thước khoảng 100 nm, diện tích bề mặt lớn, hơn 100 m ² /g, độ tinh khiết cao. Với các tính chất như vậy, nano carbon chế tạo được có thể ứng dụng trong nhiều lĩnh vực đặc biệt trong lĩnh vực điện tử, môi trường, y sinh.
Ngày hoàn thiện:	10/7/2024	
Ngày đăng:	11/7/2024	

TỪ KHÓA

Nano carbon
Plasma nhiệt
Nitrogen
Diện tích bề mặt lớn
Độ tinh khiết cao

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.10526>

* Corresponding author. Email: tranhuynhsp@gmail.com

1. Giới thiệu

Vật liệu nano đã và đang cho thấy là một loại vật liệu thú vị với nhiều đặc tính tuyệt vời dẫn đến nhiều ứng dụng trong thực tế. Vật liệu được gọi là vật liệu nano nếu kích thước của chúng hoặc một trong các kích thước của chúng nằm trong khoảng từ 1 nm đến 100 nm. Một trong những đặc tính nổi trội của vật liệu nano là diện tích bề mặt riêng lớn hơn nhiều lần so với diện tích bề mặt riêng của vật liệu khối. Vật liệu nano đã cho phép các thiết bị và sản phẩm mới thể hiện hiệu quả tốt hơn so với vật liệu khối thông thường. Lĩnh vực công nghệ nano đã phát triển với tốc độ chưa từng có trong vài thập kỷ qua và một số vật liệu mới đã được phát triển. Hơn nữa, những tiến bộ đáng kể đã được thực hiện trong việc tổng hợp vật liệu nano với khả năng kiểm soát tốt hơn về kích thước, hình dạng và tính chất của chúng [1]. Hạt nano có những ứng dụng quan trọng trong các lĩnh vực khác nhau như môi trường, nông nghiệp, thực phẩm, công nghệ sinh học, y sinh, dược phẩm,... cụ thể như: để xử lý nước thải [2], giám sát môi trường [3], làm phụ gia thực phẩm chức năng và làm chất chống vi trùng [4]. Các hạt nano thường biểu hiện những tính chất đặc biệt phụ thuộc vào kích thước, chủ yếu là do kích thước nhỏ và diện tích bề mặt khổng lồ của chúng. Các điều kiện biên tuần hoàn của hạt tinh thể bị phá hủy khi kích thước của hạt đạt đến kích thước nano với thang chiều dài đặc trưng gần hoặc nhỏ hơn bước sóng de Broglie hoặc bước sóng ánh sáng [5]. Do đó, nhiều đặc tính vật lý của hạt nano khác biệt đáng kể so với các đặc tính vật lý khối, dẫn đến nhiều ứng dụng mới của chúng.

Việc chế tạo vật liệu nano hiện nay đang phải đối mặt với hai thách thức: tính chọn lọc cao đối với các thành phần hóa học hoặc hình thái cụ thể và khả năng sản xuất có thể mở rộng của chúng. Điều này thường đòi hỏi các điều kiện chế tạo khắc nghiệt mới ngoài các phương pháp thông thường. Tia plasma nhiệt là dòng khí bị ion hóa một phần, trong đó nhiệt độ khí và electron đạt đến trạng thái cân bằng khoảng 10 000 K, và do đó cung cấp dòng năng lượng cao và các chất hoạt động hóa học bao gồm electron và ion với độ dốc không gian mạnh của chúng. Những môi trường khắc nghiệt như vậy có thể kích hoạt các phản ứng không thuận lợi về mặt nhiệt động hoặc đòi hỏi các rào cản kích hoạt cao, dẫn đến việc sản xuất các vật liệu có thành phần hoặc cấu trúc hóa học kỳ lạ [6]. Gần đây, các quy trình plasma nhiệt kết hợp cảm ứng đã được sử dụng để sản xuất Li_2S có kích thước nano [7]. Hỗn hợp argon và hydrogen được sử dụng làm khí plasma và quá trình khử carbon nhiệt được thực hiện đối với $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Ngoài ra, các hạt nano Li_2S được phủ carbon đã được tổng hợp bằng cách bơm khí methan ở cuối quá trình. Carbon đã được chứng minh là có khả năng ổn định Li_2S khi tiếp xúc với không khí xung quanh. Các hạt nano Li_2S đã được thử nghiệm điện hóa trong nửa tế bào sử dụng chất điện phân có chứa LiNO_3 hoặc Li_2S_6 làm chất phụ gia [7]. Plasma nhiệt cũng được sử dụng trong quá trình tổng hợp bột MgO và ZnO [8]. Quá trình phóng điện hoạt động ở chế độ xung lặp đi lặp lại với tốc độ lặp lại xung vài chục kHz và thời lượng xung lên tới 12 μs , dòng phóng điện 600 mA và điện áp lên đến 300 V. Các thông số này dẫn đến xói mòn nhiệt của các hạt Mg hoặc Zn. Phương pháp này cho phép chế tạo bột của các oxide kim loại này với kích thước hạt đặc trưng 10–50 nm và hình thành lớp phủ của các vật liệu này trong quy trình một bước [8]. Plasma nhiệt cũng được sử dụng để tổng hợp các vật liệu nano kim loại theo cơ chế tự phối hợp [9]. Sử dụng phóng hồ quang plasma DC để tổng hợp các hạt nano lục giác AlN [10]. Plasma nhiệt cũng được sử dụng để tổng hợp hạt nano nitrit sắt từ ($\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}$) một pha cho các ứng dụng tiến hóa oxygen và siêu tụ điện [11]. Kỹ thuật plasma kết hợp cảm ứng cũng được sử dụng để tổng hợp các hạt nano ZnO [11]. Gần đây các tinh thể nano ZnWO_4 , NiWO_4 cũng được chế tạo bằng plasma nhiệt [12], [13].

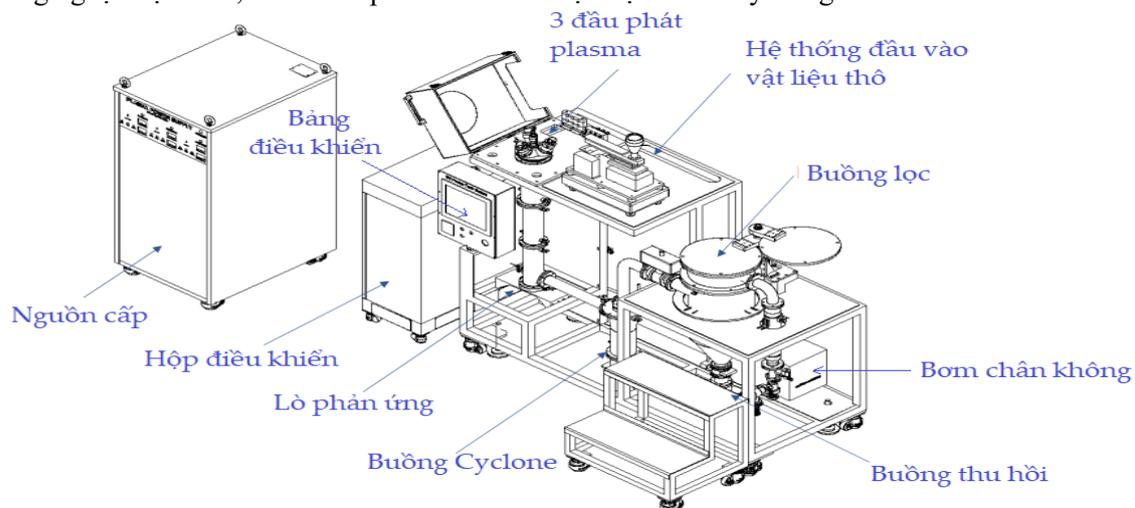
Bên cạnh việc chế tạo các hạt nano kim loại và nano oxide kim loại thì plasma nhiệt cũng nổi lên như một phương pháp hiệu quả để tổng hợp cấu trúc nano carbon mà không cần chất xúc tác cũng như chất nền cụ thể. Các hạt nano carbon sở hữu các đặc tính vật lý, sinh hóa, quang học và điện đặc biệt. Chúng có thể là 0-D, 1-D hoặc 2-D dựa trên kích thước của chúng có liên quan đến quy mô nano và có thể được hình thành bằng một số kỹ thuật và phương pháp xử lý có các đặc tính có thể phân biệt được. Plasma nhiệt kết hợp cảm ứng tần số vô tuyến đã được sử dụng để chế

tạo fullerene (C₆₀, C₇₀,...) bằng cách bay hơi trực tiếp bột carbon được bơm vào plasma [14]. Quá trình tổng hợp các mảnh graphene nano được tạo ra trong hệ thống plasma kết hợp cảm ứng tần số vô tuyến bằng cách bơm CH₄ theo trục vào plasma Ar-H₂ được nghiên cứu ở các điều kiện quy trình khác nhau như công suất tâm, áp suất và tốc độ dòng CH₄ [15]. Các hạt nano carbon được tổng hợp trong lò phản ứng bằng cách sử dụng plasma kết hợp cảm ứng và tiền chất khí. Tổng hợp plasma nhiệt cho phép hình thành các dạng thù hình carbon khác nhau như các hạt nano carbon, các dạng mảnh và ống nano lai, các hạt nano carbon giống như hạt và các viên nang nano grafit đa diện giống như củ hành [16]. Nano carbon hình cầu đang thu hút sự quan tâm đáng kể nhờ một số lợi thế tiềm năng của chúng so với các dạng carbon khác, bao gồm độ bền cơ học đặc biệt, khả năng hấp phụ cao, mật độ khối cao và phân bố kích thước lỗ rỗng được kiểm soát để thu được mật độ năng lượng thể tích cao hơn. Do đó, các hạt nano carbon có nhiều tiềm năng ứng dụng trong công nghiệp cao su [17], hấp phụ trong y sinh [18], pin nhiên liệu sinh học [19], [20]. Trong nghiên cứu này chúng tôi sử dụng plasma nhiệt DC để tổng hợp nano carbon từ bột carbon sử dụng khí plasma là khí nitrogen. Nano carbon tổng hợp được đặc trưng tính chất bằng các kỹ thuật ảnh SEM, BET và phổ tán xạ Raman. Để đánh giá mức độ tinh khiết của nano carbon chế tạo được, kỹ thuật EDX được sử dụng.

2. Thực nghiệm

2.1. Hệ thống plasma nhiệt

Trong nghiên cứu này chúng tôi tiến hành tổng hợp nano carbon bằng plasma nhiệt, hệ plasma nhiệt được sử dụng là hệ plasma nhiệt tại Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm khoa học và công nghệ Việt Nam, các thành phần chính của hệ được trình bày trong Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ cấu tạo của hệ thống plasma nhiệt DC tại Viện Khoa học vật liệu

2.2. Nguyên liệu và hóa chất

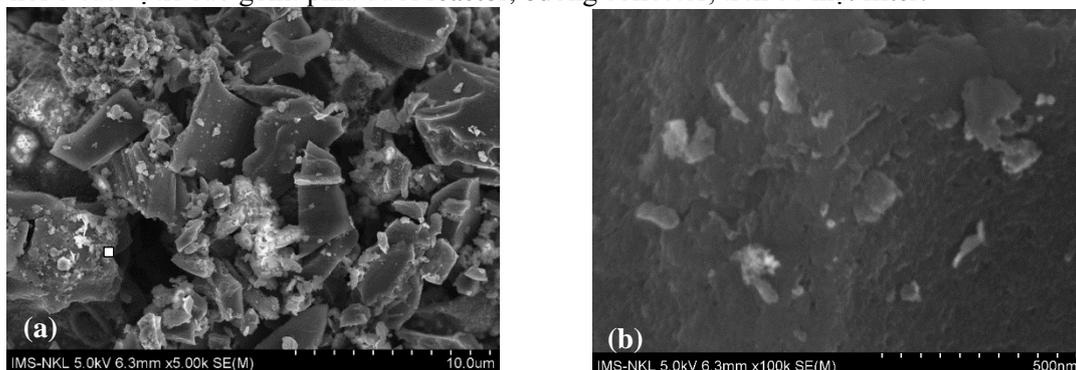
Để chế tạo nano carbon, nguyên liệu đầu vào là bột carbon kích thước khoảng 10 μm , độ tinh khiết trên 95%. Bột carbon được sấy khô ở nhiệt độ 100°C trong thời gian 2 giờ, sau đó được làm toại hạt. Hình 2 trình bày ảnh SEM của bột carbon, có thể thấy bột carbon đầu vào có kích thước từ vài μm đến vài chục μm .

Khí plasma được sử dụng là khí nitrogen (N₂) với độ tinh khiết 99,999% áp suất làm việc 150 bar.

2.3. Quy trình chế tạo

Quy trình chế tạo nano carbon được trình bày trong Hình 3 với các thông số của quá trình thí nghiệm được thể hiện ở Bảng 1. Sau khi kết thúc quá trình plasma, hệ plasma nhiệt được ngắt

nguồn và làm nguội bằng nước tuần hoàn cho đến khi về đến nhiệt độ phòng. Nano carbon được thu hồi ở các vị trí bao gồm: phía dưới reactor, buồng collector, trên bề mặt filter.



Hình 2. Ảnh SEM của bột carbon đầu vào ở độ phóng đại (a) 5000 lần và (b) 100000 lần.

Bảng 1. Các thông số của hệ plasma nhiệt

STT	Thông số	Giá trị
1	Nhiệt độ vùng plasma tối thiểu	> 6000°C
2	Nhiệt độ nước làm mát đầu vào	15°C
3	Áp suất không khí bên trong hệ thống	< 760 torr
4	Áp suất khí N ₂ tối thiểu	3 bar
5	Áp suất khí nén	3 bar
6	Áp suất nước làm mát	3 bar
7	Lưu lượng nước làm mát cho đường ống đưa nguyên liệu đầu vào	2,3 lpm
8	Lưu lượng nước làm mát tối thiểu cho mỗi đầu phát	5 lpm
9	Lưu lượng khí quá trình plasma (bao gồm khí phóng plasma và khí mang) cho mỗi đầu phát	80 lpm
10	Dòng tối đa trên điện cực plasma	150A
11	Dòng plasma hoạt động tối ưu	70-80A
12	Điện áp trên điện cực duy trì ở	200-220V

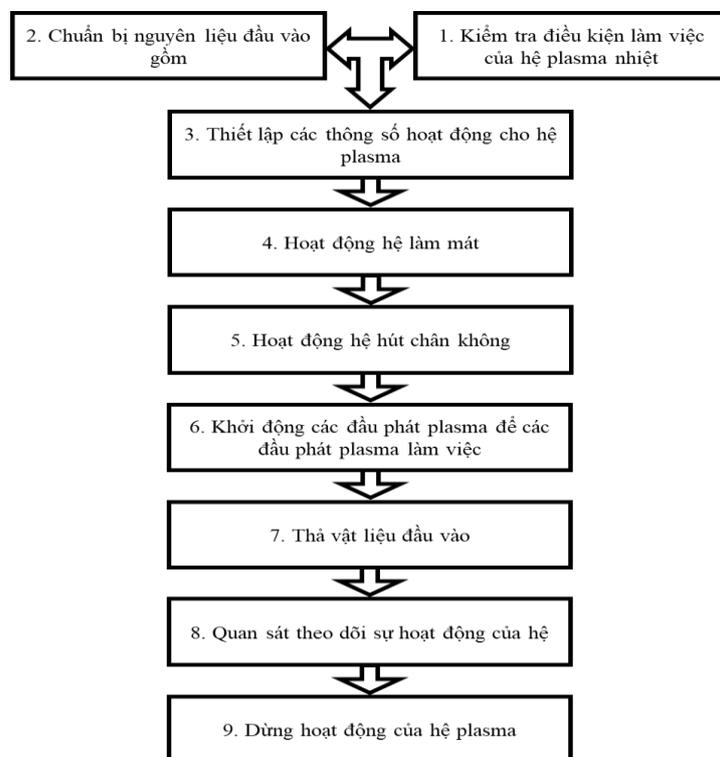
Để tối ưu quy trình chế tạo nano carbon bằng plasma nhiệt với hệ plasma nhiệt DC tại Viện Khoa học vật liệu, chúng tôi tiến hành khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất tổng hợp nano carbon và chất lượng nano carbon gồm số lượng đầu phát plasma nhiệt, công suất đầu vào của các đầu plasma nhiệt, tốc độ thả bột carbon, vị trí thả bột carbon và lưu lượng khí plasma.

3. Kết quả và thảo luận

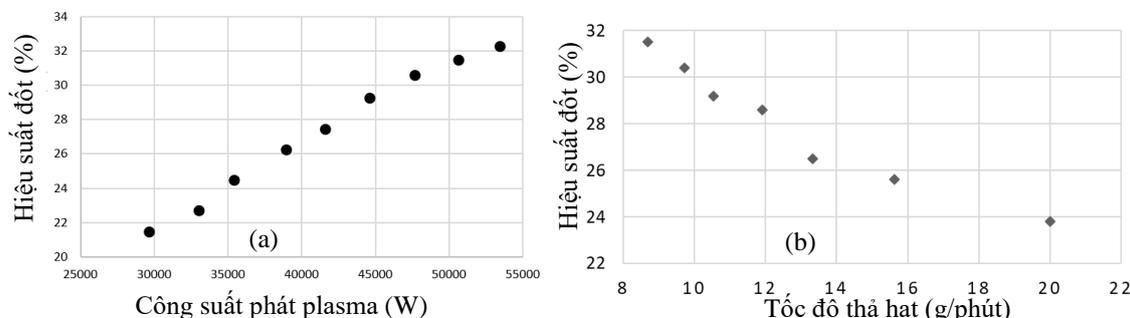
Hình 4 và Hình 5 trình bày kết quả khảo sát sự ảnh hưởng đến hiệu suất tổng hợp nano carbon (hiệu suất đốt) của các yếu tố gồm công suất phát plasma, tốc độ thả hạt, vị trí thả hạt và lưu lượng khí plasma. Từ Hình 4 có thể thấy khi công suất phát plasma tăng thì hiệu suất đốt cũng tăng, khi tốc độ thả hạt tăng thì hiệu suất đốt giảm. Hình 5 cho thấy khi d giảm dần thì hiệu suất đốt tăng dần, trong đó $d = l - r$ với r là khoảng cách từ bề mặt trên của giá gắn các đầu phát plasma đến vị trí thả hạt.

Khi d tăng thì r giảm có nghĩa khoảng cách từ vị trí thả hạt đến bề mặt trên của giá gắn các đầu phát plasma giảm dần đến khoảng cách từ vị trí thả hạt đến tâm ngọn lửa plasma tăng và do đó hiệu suất đốt giảm. Khi lưu lượng khí plasma tăng, kết quả cho thấy hiệu suất đốt tăng. Tuy nhiên công suất phát plasma đối với mỗi đầu plasma chỉ có thể đạt tối đa 20 kW/1 đầu phát, tương đương 60 kW cho cả ba đầu phát. Khoảng cách từ vị trí thả hạt đến tâm ngọn lửa plasma không thể quá nhỏ, khi đưa đầu thả hạt lại gần tâm ngọn lửa plasma nhiệt độ tăng lên nhanh, có thể dẫn đến đánh thủng đầu thả hạt. Khi lưu lượng khí plasma quá lớn có thể dẫn đến ngọn lửa plasma không ổn định. Do đó sau quá trình khảo sát chúng tôi xác định được các thông số tối ưu

của công suất phát plasma, tốc độ thả hạt, vị trí thả hạt và lưu lượng khí plasma và được trình bày trong Bảng 2.



Hình 3. Quy trình chế tạo nano carbon bằng plasma nhiệt



Hình 4. Ảnh hưởng của (a) công suất phát plasma và (b) tốc độ thả hạt đến hiệu suất đốt

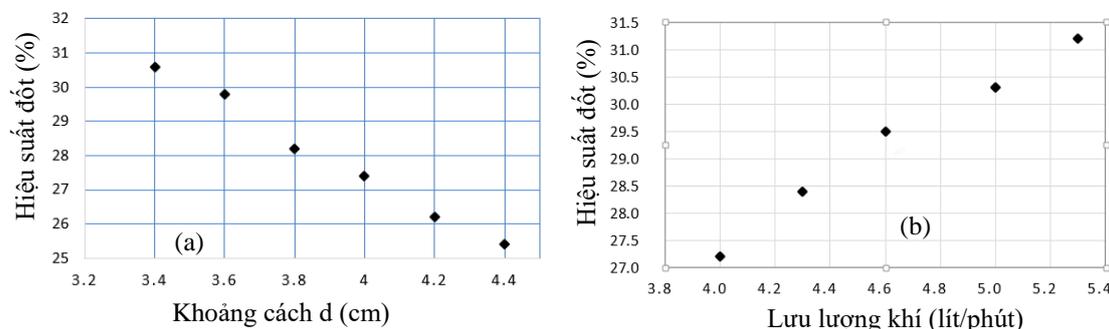
Bảng 2. Các thông số tối ưu của hệ plasma nhiệt DC để tổng hợp nano carbon

Công suất của hệ phát plasma (kW)	Tốc độ thả hạt (g/phút)	Khoảng cách d (cm)	Lưu lượng khí plasma (lít/phút)
51	10	3,5	5

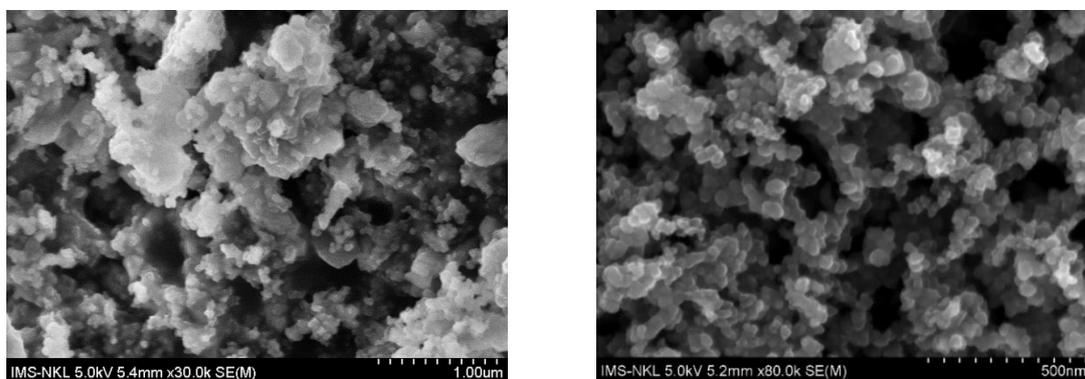
Với các thông số hoạt động của hệ plasma như Bảng 1 hiệu suất đốt nano carbon thu được 30%. Các đặc trưng tính chất của nano carbon được nghiên cứu thông qua kỹ thuật SEM, EDX, BET và phổ tán xạ Raman.

Từ ảnh SEM được trình bày trong Hình 6 và Hình 7 tương ứng nano carbon thu được ở collector và filter có thể thấy các hạt nano carbon thu được có kích thước khá đồng đều và kích thước nằm trong khoảng 100 nm. Tuy nhiên nano carbon thu được ở filter có kích thước hạt đồng đều hơn so với nano carbon thu được ở collector. Kết quả này hoàn toàn phù hợp do các hạt nano

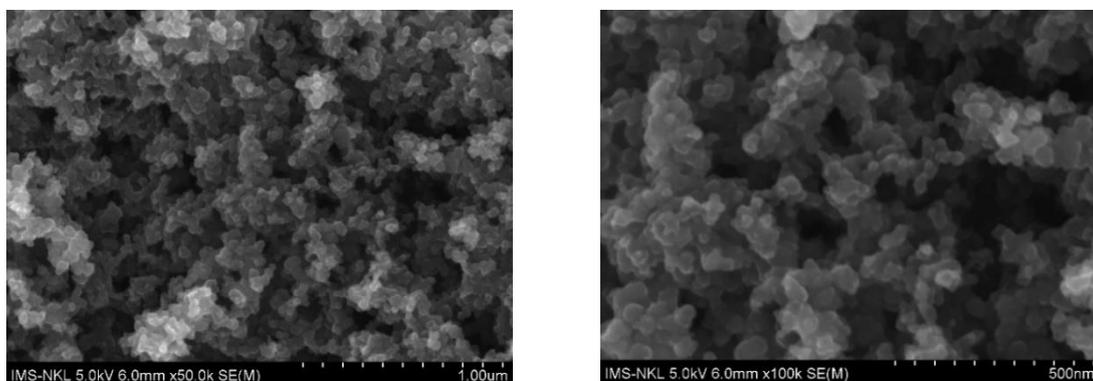
carbon khi đến filter đã di chuyển quãng đường dài hơn, do đó những hạt có kích thước lớn hơn sẽ nặng hơn và bị rơi xuống trong quá trình di chuyển.



Hình 5. Ảnh hưởng của (a) vị trí thả hạt và (b) lưu lượng khí đến hiệu suất đốt



Hình 6. Ảnh SEM của nano carbon thu được ở collector

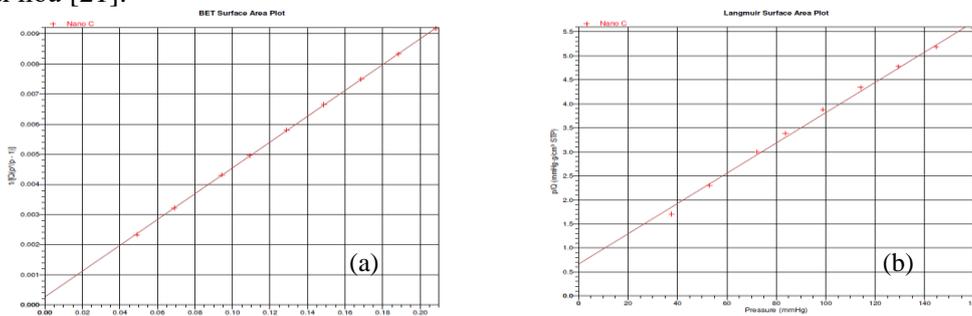


Hình 7. Ảnh SEM của nano carbon thu được ở filter

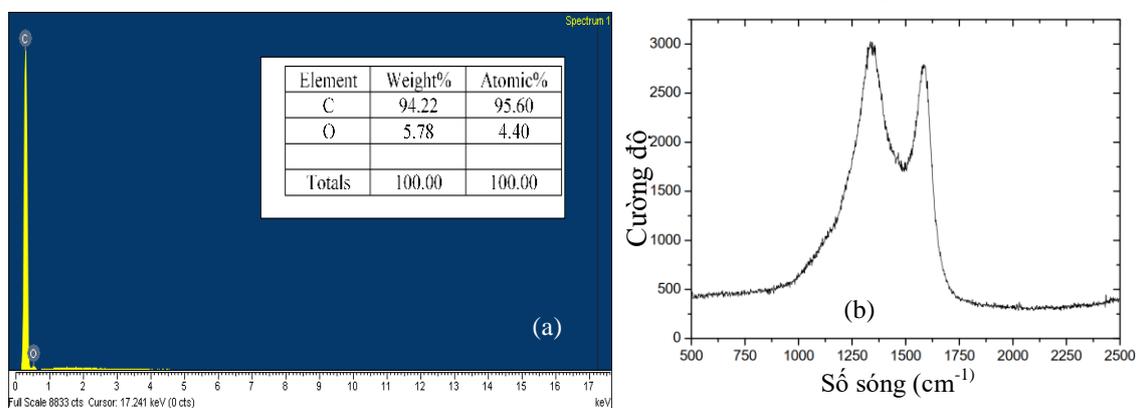
Hình 8 trình bày kết quả phân tích diện tích bề mặt BET và diện tích bề mặt Langmuir ở nhiệt độ 77 K. Kết quả cho thấy sự tuyến tính và dữ liệu phân bố tương đối đồng đều. Kết quả này cho thấy mẫu nano carbon có khả năng hấp phụ và giải hấp ổn định nên diện tích bề mặt cao. Kết quả phân tích cho thấy diện tích bề mặt BET là $101 \text{ m}^2/\text{g}$ và diện tích bề mặt Langmuir là $138 \text{ m}^2/\text{g}$.

Hình 9a trình bày kết quả phân tích EDX mẫu nano carbon thu được ở filter. Kết quả cho thấy nano carbon có độ tinh khiết tương đối cao với 94,22% về khối lượng và 95,6% về nguyên tử. Quan sát phổ có thể thấy xuất hiện đỉnh của carbon với cường độ cao, bên cạnh đó có đỉnh cường độ nhỏ của oxygen tương ứng với 5,78% về khối lượng và 4,4% về nguyên tử. Oxygen xuất hiện trong mẫu nano carbon có thể do nguyên nhân từ đầu vào hoặc do quá trình thu hồi nano carbon từ filter. Để có cái nhìn sâu sắc hơn về cấu trúc vi mô của nano carbon chế tạo được, phân tích

phổ Raman được thực hiện và trình bày trong Hình 9b. Kết quả có thể thấy phổ Raman của nano carbon có hai đỉnh đặc trưng ở 1336 cm^{-1} và 1583 cm^{-1} . Đỉnh ở 1336 cm^{-1} đặc trưng cho sự hiện diện của các khuyết tật trong cấu trúc mạng C-C của nano carbon. Đỉnh thứ hai ở 1583 cm^{-1} là đỉnh đặc trưng của liên kết cấu trúc carbon được graphit hóa trong đó các nguyên tử C sp^2 lai hóa [21].



Hình 8. Kết quả phân tích diện tích bề mặt (a) BET và (b) Langmuir



Hình 9. (a) Kết quả phân tích EDX và (b) phổ tán xạ Raman của mẫu nano carbon thu được ở filter

4. Kết luận

Bằng phương pháp plasma nhiệt DC sử dụng khí plasma là N_2 chúng tôi đã chế tạo thành công nano carbon. Nano carbon được chế tạo với các thông số kỹ thuật đã được tối ưu của hệ plasma nhiệt bao gồm công suất phát plasma, tốc độ thả hạt, vị trí thả hạt và lưu lượng khí plasma. Nano carbon sau đó được phân tích ảnh SEM, phân tích diện tích bề mặt và phân tích EDX. Kết quả cho thấy nano carbon có độ đồng đều cao với kích thước hạt khoảng 100 nm; diện tích bề mặt lớn, diện tích bề mặt BET là $101\text{ m}^2/\text{g}$, diện tích bề mặt Langmuir là $138\text{ m}^2/\text{g}$; độ tinh khiết đạt được 94,22% về mặt khối lượng và 95,6% về mặt nguyên tử. Với các tính chất đạt được nano carbon có khả năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như hấp phụ, điện tử, y sinh.

Lời cảm ơn

Kết quả nghiên cứu được thực hiện bởi sự tài trợ của nhiệm vụ khoa học công nghệ cấp Bộ Công an mã số BCN.2022.T06.08.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. Sajid, "Nanomaterials: types, properties, recent advances, and toxicity concerns," *Current Opinion in Environmental Science & Health*, vol. 25, p. 100319, Feb. 2022.
- [2] Z. Zahra, Z. Habib, S. Chung, and M. A. Badshah, "Exposure Route of TiO₂ NPs from Industrial Applications to Wastewater Treatment and Their Impacts on the Agro-Environment," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 8, p. 1469, Jul. 2020.

- [3] L. Rassaei, F. Marken, M. Sillanpää, M. Amiri, C. M. Cirtiu, and M. Sillanpää, "Nanoparticles in electrochemical sensors for environmental monitoring," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 30, no. 11, pp. 1704–1715, Dec. 2011.
- [4] J. Chen *et al.*, "Emerging Nanoparticles in Food: Sources, Application, and Safety," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 71, no. 8, pp. 3564–3582, Mar. 2023.
- [5] D. Guo, G. Xie, and J. Luo, "Mechanical properties of nanoparticles: basics and applications," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 47, no. 1, p. 013001, Jan. 2014.
- [6] K. S. Kim and T. H. Kim, "Nanofabrication by thermal plasma jets: From nanoparticles to low-dimensional nanomaterials," *Journal of Applied Physics*, vol. 125, no. 7, p. 070901, Feb. 2019.
- [7] J. Nava-Avendaño, M. Nussbaum, and J. Veilleux, "Thermal Plasma Synthesis of Li₂S Nanoparticles for Application in Lithium-Sulfur Batteries," *Plasma Chem Plasma Process*, vol. 41, no. 4, pp. 1149–1167, Jul. 2021.
- [8] K. Savkin *et al.*, "Synthesis of magnesium oxide and zinc oxide powders in a glow discharge plasma at atmospheric pressure," *Ceramics International*, vol. 50, no. 5, pp. 8185–8197, Mar. 2024.
- [9] Y. Zheng, Q. Zhou, H. Liu, P. Hu, and J. Wang, "Transient and scalable synthesis of metal-carbon nanocomposites by thermal plasma with self-coordinated mechanism," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 968, p. 172031, Dec. 2023.
- [10] L. Kumaresan, G. Shanmugavelayutham, S. Surendran, and U. Sim, "Thermal plasma arc discharge method for high-yield production of hexagonal AlN nanoparticles: synthesis and characterization," *J. Korean Ceram. Soc.*, vol. 59, no. 3, pp. 338–349, May 2022.
- [11] L. Kumaresan, G. Shanmugavelayutham, and P. Saravanan, "Single-phase ferromagnetic iron nitride (ϵ -Fe₃N) nanoparticles synthesized by thermal plasma method for oxygen evolution and supercapacitor applications," *Appl. Phys. A*, vol. 128, no. 12, p. 1073, Dec. 2022.
- [12] L. N. M. De Araújo *et al.*, "ZnWO₄ nanocrystals prepared by thermal plasma processing," *J Mater Sci*, vol. 58, no. 16, pp. 6944–6971, Apr. 2023.
- [13] L. N. M. Araújo *et al.*, "Supercapacitor electrode properties of NiWO₄ nanocrystals processed by thermal plasma and deposited on the FTO substrate," *Journal of Energy Storage*, vol. 77, p. 109999, Jan. 2024.
- [14] C. Wang, T. Imahori, Y. Tanaka, T. Sakuta, H. Takikawa, and H. Matsuo, "Synthesis of fullerenes from carbon powder by using high power induction thermal plasma," *Thin Solid Films*, vol. 390, no. 1–2, pp. 31–36, Jun. 2001.
- [15] A. Mohanta, B. Lanfant, and M. Leparoux, "Induction Plasma Synthesis of Graphene Nano-flakes with In Situ Investigation of Ar–H₂–CH₄ Plasma by Optical Emission Spectroscopy," *Plasma Chem Plasma Process*, vol. 39, no. 5, pp. 1161–1179, Sep. 2019.
- [16] F. Casteignau *et al.*, "Synthesis of Carbon Nanohorns by Inductively Coupled Plasma," *Plasma Chem Plasma Process*, vol. 42, no. 3, pp. 465–481, May 2022.
- [17] W. A. Kyei-Manu *et al.*, "Effect of Carbon Black on Heat Build-up and Energy Dissipation in Rubber Materials," in *Advances in Polymer Science*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2024.
- [18] M. Andrade-Guel *et al.*, "Synthesis of Nylon 6/Modified Carbon Black Nanocomposites for Application in Uric Acid Adsorption," *Materials*, vol. 13, no. 22, p. 5173, Nov. 2020.
- [19] S. Singh, P. K. Bairagi, and N. Verma, "Candle soot-derived carbon nanoparticles: An inexpensive and efficient electrode for microbial fuel cells," *Electrochimica Acta*, vol. 264, pp. 119–127, Feb. 2018.
- [20] X. Luo, S. Chen, T. Hu, Y. Chen, and F. Li, "Renewable biomass-derived carbons for electrochemical capacitor applications," *SusMat*, vol. 1, no. 2, pp. 211–240, Jun. 2021.
- [21] M. Youssry, F. Z. Kamand, M. I. Magzoub, and M. S. Nasser, "Aqueous dispersions of carbon black and its hybrid with carbon nanofibers," *RSC Adv.*, vol. 8, no. 56, pp. 32119–32131, 2018.