



Khảo sát điều kiện tổng hợp vật liệu $(\text{NH}_4)_{0.5}\text{V}_2\text{O}_5$ và định hướng ứng dụng cho pin potassium-ion (KIBs)

Investigation of synthesis conditions for $(\text{NH}_4)_{0.5}\text{V}_2\text{O}_5$ and its potential application in potassium-ion batteries (KIBS)

Võ Thị Kiều Anh^{1,2}, Lê Tấn Pháp³, Bùi Trọng Thảo³, Trần Văn Nghĩa³, Nguyễn Trúc Diệp³,
Nguyễn Hoàng Bảo Trân³, Nguyễn Thị Thu Trang³, Phạm Xuân Tài^{4,5}, Huỳnh Lê Thanh Nguyên^{4,5}

¹ Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

² Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

³ Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh, TP Hồ Chí Minh

⁴ Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, TP Hồ Chí Minh

⁵ Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

* Email: hltnguyen@hcmus.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 31/07/2025

Accepted: 24/09/2025

Published: 30/09/2025

Keywords:

$(\text{NH}_4)_{0.5}\text{V}_2\text{O}_5$;

potassium-ion batteries;

KIBs; XRD; SEM; CV

ABSTRACT

Potassium-ion batteries (KIBs) have gained considerable attention as promising alternatives to lithium-ion batteries (LIBs), due to the abundant resource of potassium, low cost, and low redox potential. Developing electrode materials with stable structure and reversible K^+ intercalation remains a significant challenge. In this study, $(\text{NH}_4)_{0.5}\text{V}_2\text{O}_5$ was synthesized via hydrothermal method under various conditions to investigate the effects of temperature and duration on its structure and electrochemical performance. The materials were characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). Electrochemical behavior was evaluated through cyclic voltammetry (CV), cycling stability, and Coulombic efficiency. The optimized $(\text{NH}_4)_{0.5}\text{V}_2\text{O}_5$ sample revealed reversible K^+ intercalation with a specific capacity of $130 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ at C/10 over a voltage window of 1.5–4.0 V (vs. K^+/K), demonstrating its potential as a high-performance cathode material for KIBs.

Giới thiệu chung

Cùng với sự phát triển mạnh mẽ về khoa học công nghệ trên thế giới, nhu cầu sử dụng năng lượng ngày càng tăng. Do đó, các loại vật liệu lưu trữ năng lượng có hiệu suất cao, chi phí thấp ngày càng được quan tâm. Trong những năm gần đây, pin Lithium-ion (LIBs) được sử dụng với quy mô lớn cho các ứng dụng khác nhau bởi các tính năng độc đáo của nó. Tuy nhiên, các nhà nghiên cứu mong muốn tìm kiếm các nguồn dự

trữ năng lượng mới thay thế cho LIBs do sự khan hiếm và phân bố địa lý không đồng đều của các nguồn tài nguyên lithium [1]. Ngoài ra, LIBs còn có nguy cơ cháy nổ cao nếu không được thiết kế và sử dụng đúng cách [2]. Hơn nữa, điện cực dương được sử dụng trong pin Lithium-ion dựa trên Co và Ni, khiến giá thành của LIBs trở nên cao hơn và ảnh hưởng đến sức khỏe của người sử dụng [3]. Gần đây, pin Potassium-ion (KIBs) đang nổi lên như một ứng cử viên sáng giá để thay thế cho LIBs do potassium có trữ lượng lớn hơn, giá thành thấp

hơn nhiều so với lithium. Hơn nữa, kết quả thực nghiệm chứng minh rằng thế điện cực chuẩn của K^+/K là âm nhất trong số các kim loại kiềm khi sử dụng dung môi PC là $-3,002V$, trong khi Li^+/Li có giá trị là $-2,906V$ theo nghiên cứu của Anoopkumar và cộng sự [3].

Hiện tại, đã có một số vật liệu điện cực được ứng dụng cho KIBs có thể kể đến như K_xMO_2 ($M = Mn, Co, Fe, Ni...$), Prussian Blue Analogues (PABs), Carbon-based materials.... Vật liệu ammonium vanadate $(NH_4)_{0,5}V_2O_5$ (NVO) thu hút sự quan tâm nhờ cấu trúc lớp ổn định, trong đó các lớp V_4O_{10} chứa ion NH_4^+ và được hình thành từ hai đơn vị V_2O_5 liên kết qua nhóm $V=O$ (1,6–1,7 Å). Khoảng cách giữa các lớp $\sim 9,4$ Å cho phép đan cài các ion kích thước lớn như K^+ . Nhờ tính linh hoạt mạng tinh thể, NVO thể hiện khả năng đan cài K^+ hiệu quả, giúp cải thiện dung lượng và tốc độ sạc của pin [5-8].

Trong pin K-ion, điện áp hoạt động tối đa của cặp K^+/K đạt khoảng 4,4 V, cao hơn so với khoảng 4,3 V của Li^+/Li trong pin Li-ion và 4,0 V của Na^+/Na trong pin Na-ion [6]. Nghiên cứu này tập trung khảo sát ảnh hưởng của thời gian và nhiệt độ đến quá trình tổng hợp NVO. Trên cơ sở mẫu thu được trong điều kiện tối ưu từ giai đoạn khảo sát, cấu trúc và tính chất điện hóa của vật liệu $(NH_4)_{0,5}V_2O_5$ được phân tích nhằm định hướng ứng dụng trong pin potassium-ion.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Thực nghiệm

Hóa chất

V_2O_5 ($\geq 98\%$, Sigma Aldrich, USA), NH_4OH (10%, AR, Xilong, Trung Quốc), $HCOOH$ (98%, Fisher), HCl (36%, AR, Xilong, Trung Quốc), Polyvinylidene flouride (PVdF, Sigma Aldrich, USA)

Tổng hợp vật liệu

Cho từ từ 354,72 mg V_2O_5 ($\geq 98\%$, Sigma Aldrich, USA) vào becher 25 mL đựng sẵn 5,66 mL dung dịch NH_4OH (10%, AR, Xilong, Trung Quốc) đặt trên máy khuấy từ. Khuấy liên tục hỗn hợp đến khi bột rắn trong dung dịch chuyển từ màu vàng sang màu trắng. Thêm từ từ 10,8 ml dung dịch $HCOOH$ (98%, Fisher) 0,133 M vào hệ đồng thời gia nhiệt hệ phản ứng lên tới $60^\circ C$. Sau đó, cho thêm dung dịch HCl (36%, AR, Xilong, Trung Quốc) vào để hạ pH=3. Hệ dung dịch xuất hiện màu đỏ cam thì khuấy thêm khoảng 10 phút. Cuối cùng, cho hỗn hợp thu được vào ống teflon 40 mL, sau đó cho vào autoclave và tiến hành thủy nhiệt. Phản ứng thủy nhiệt được thực hiện ở các điều kiện nhiệt độ và thời gian khác nhau nhằm khảo sát ảnh

hưởng đến cấu trúc và độ kết tinh của sản phẩm. Điều kiện thời gian và nhiệt độ thủy nhiệt của các mẫu được biểu thị bởi Bảng 1.

Bảng 1. Thời gian và nhiệt độ tổng hợp mẫu

Mẫu	Thời gian (giờ)	Nhiệt độ ($^\circ C$)
(A)	12	160
(B)	36	160
(C)	24	200
(D)	12	240
(E)	36	240

Chế tạo màng vật liệu

Màng điện cực được chế tạo bằng phương pháp doctor-blade. Vật liệu $(NH_4)_{0,5}V_2O_5$ được phối trộn với carbon dẫn và dung dịch PVdF theo tỉ lệ khối lượng là 75:15:10. Điện cực sau khi được tạo màng trên điện cực dẫn nhôm được sấy trong vòng 12 giờ ở $80^\circ C$.

Nghiên cứu hình thái và cấu trúc vật liệu $(NH_4)_{0,5}V_2O_5$

Vật liệu $(NH_4)_{0,5}V_2O_5$ được phân tích bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD, Unisantis XMD-300) với nguồn bức xạ $K\alpha$ ($\lambda = 0,154$ nm) với góc quét từ 10° đến 60° nhằm xác định các thông số của vật liệu và thành phần pha. Hình thái bề mặt và kích thước hạt của vật liệu được phân tích thông qua phương pháp SEM (Scanning electron microscope) sử dụng thiết bị JSM-7500F (Mỹ) điện thế gia tốc 10 kV.

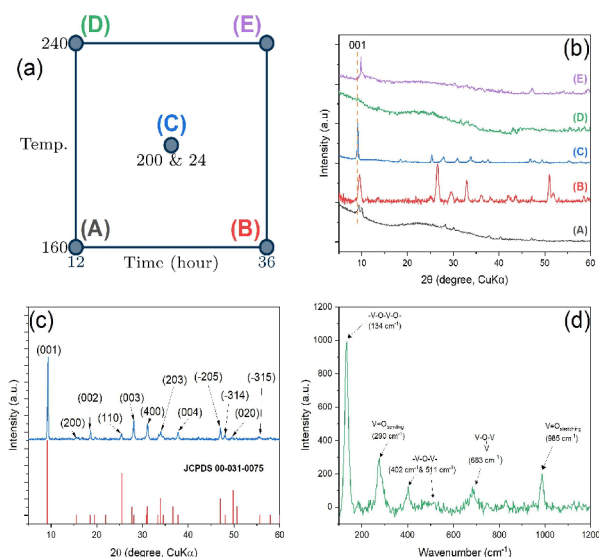
Nghiên cứu các tính chất điện hóa của vật liệu $(NH_4)_{0,5}V_2O_5$

Vật liệu $(NH_4)_{0,5}V_2O_5$ được nghiên cứu tính chất điện hóa bằng phương pháp quét thế vòng tuần hoàn (CV) được đo ở khoảng thế từ 1,5 V – 4,0 V (vs. K^+/K), với tốc độ quét là tốc độ quét từ 0,01 đến 0,1 $mV \cdot s^{-1}$ trên thiết bị OPENSENS [9]. Phương pháp phóng sạc dòng cố định (GCD) được đo ở khoảng thế từ 1,5 đến 4,0 V (vs. K^+/K) và khảo sát độ bền chu kỳ của vật liệu thông qua việc đánh giá hiệu suất của vật liệu ở các tốc độ dòng khác nhau.

Kết quả và thảo luận

Hình thái và cấu trúc

Hình 1 trình bày các điều kiện tổng hợp vật liệu $(NH_4)_{0,5}V_2O_5$ theo mô hình quy hoạch hai yếu tố nhiệt độ và thời gian(a), cùng với giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD) tương ứng (b) nhằm đánh giá cấu trúc thu được từ quá trình phản ứng.



Hình 1. (a) Điều kiện nhiệt độ khảo sát, (b) Giản đồ XRD của các mẫu được khảo sát ở nhiệt độ khác nhau, (c) Giản đồ XRD của mẫu chuẩn, (d) phổ Raman của mẫu (C)

Vật liệu thu được khi thủy nhiệt ở 160°C trong 12 giờ (mẫu A), chưa hình thành cấu trúc tinh thể đặc trưng khi so sánh với phổ chuẩn JCPDS 031-0075. Khi giữ nguyên nhiệt độ và kéo dài thời gian phản ứng lên 36 giờ (mẫu B), vật liệu bắt đầu xuất hiện đỉnh đặc trưng tại mặt phẳng (001), tuy nhiên giản đồ XRD vẫn chứa nhiều tín hiệu nhiễu, cho thấy quá trình kết tinh chưa hoàn toàn. Nâng nhiệt độ lên 200°C và giữ trong 24 giờ Mẫu (A), các đỉnh nhiễu xạ trùng khớp rõ ràng với giản đồ chuẩn, bao gồm các mặt (001), (002), (110), (003) và (004), cho thấy vật liệu kết tinh tốt. Ngược lại, khi tăng nhiệt độ lên 240°C, dù trong 12 giờ hay 36 giờ (mẫu D và E), các giản đồ XRD thu được không còn trùng với phổ chuẩn, có thể do cấu trúc ban đầu của vật liệu bị phá vỡ hoặc đã chuyển hóa thành pha khác.

Đối với mẫu C (điều kiện tổng hợp 200°C và 24 giờ) cho kết quả sản phẩm phù hợp với giản đồ chuẩn tương tự các họ vật liệu bronze V_2O_5 khác như $K_{0.5}V_2O_5$ và $V_2O_5 \cdot nH_2O$ [10-12]. Khi phân tích giản đồ XRD, các mũi nhiễu xạ phù hợp với các mặt mạng của vật liệu $(NH_4)_{0.5}V_2O_5$, đỉnh nhiễu xạ mặt mạng (001) xuất hiện tại góc $2\theta \approx 9,3^\circ$, có cường độ cao nhất, cho thấy vật liệu phát triển cấu trúc theo hướng $[VO_6]$. Khoảng cách giữa các lớp – tương ứng với khoảng cách giữa các mặt (001) – đóng vai trò quan trọng trong cơ chế đan cài ion của NVO trong quá trình phóng sạc. Do đó, việc điều chỉnh và mở rộng khoảng cách lớp đang là một hướng nghiên cứu chính nhằm cải thiện hiệu suất và dung lượng của pin. Giản đồ XRD trên Hình 1(c) xác nhận vật liệu $(NH_4)_{0.5}V_2O_5$ có xu hướng phát triển theo hướng mặt (001), phản ánh rõ

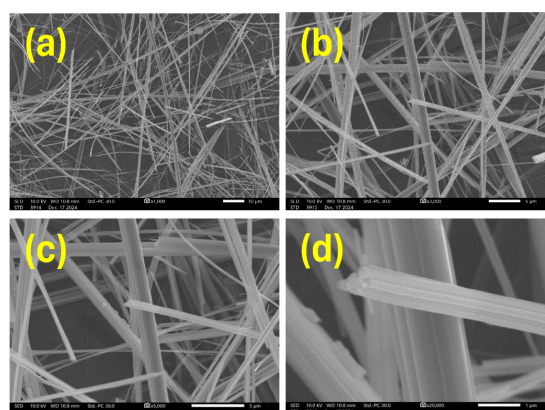
<https://doi.org/10.62239/jca.2025.039>

đặc trưng lớp của cấu trúc. Dựa vào định luật Bragg khoảng cách các lớp được tính toán như sau:

$$d_{(hkl)} = \frac{n\lambda}{2\sin\theta}$$

Kết quả thu được cho thấy vật liệu được tổng hợp có $d_{(001)} = 9,6$ Å lớn gấp đôi so với vật liệu $\alpha-V_2O_5$ ($d_{\text{spacing}} = 4,6$ Å) chứng tỏ các cation dễ dàng đi vào cấu trúc vật liệu $(NH_4)_{0.5}V_2O_5$ tốt hơn so với vật liệu $\alpha-V_2O_5$.

Phổ tán xạ Raman của mẫu (C) được thể hiện trong Hình 1. (d). Đỉnh tín hiệu dao động mạnh nhất nằm trong khoảng 134 cm^{-1} được cho là dao động biến dạng của chuỗi liên kết -V-O-V-O-. Bên cạnh đó, tại đỉnh 402 cm^{-1} và 511 cm^{-1} được xem là các dao động hóa trị và tạo thành dải liên kết -V-O-V-. Tại đỉnh 683 cm^{-1} được cho là sự tạo liên kết của nguyên tử vanadium với ba nguyên tử oxygen. Dao động hóa trị của V=O xuất hiện tại 290 cm^{-1} và 985 cm^{-1} được lí giải bởi sự kéo dài của liên kết, điều này phù hợp với giả thiết về khoảng cách giữa các lớp được mở rộng, so sánh tại [7].

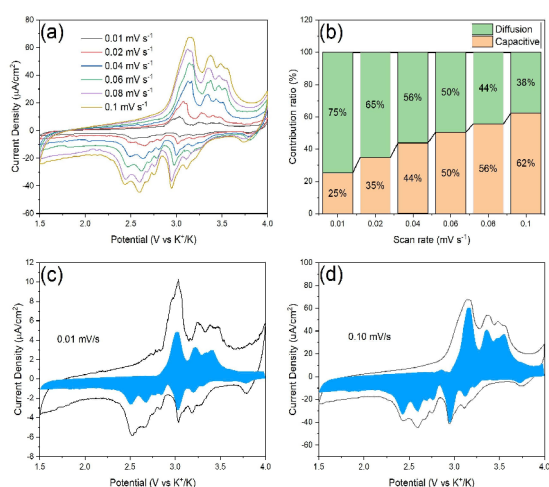


Hình 2: Ảnh SEM của vật liệu

Cấu trúc bề mặt của vật liệu NVO được phân tích thông qua kính hiển vi điện tử quét (SEM) ở các độ phóng đại khác nhau, kết quả được minh họa trong Hình 2. Quan sát cho thấy vật liệu có dạng thanh với chiều dài trong khoảng 9 – 10 μm và chiều rộng dao động từ 1 – 1,5 μm . Sự sắp xếp định hướng của các tinh thể nhỏ dọc theo chiều dài sợi có thể là nguyên nhân hình thành cấu trúc sợi dài trong vật liệu NVO. Kết quả này phù hợp với đánh giá về độ kết tinh của vật liệu trên giản đồ XRD theo tài liệu tham khảo [8]. Từ kết quả XRD và SEM, chúng tôi nhận thấy rằng ở điều kiện khảo sát là 200°C trong 24 giờ thì vật liệu (C) hình thành cấu trúc tinh thể tốt và có độ kết tinh cao. Chính vì thế, chúng tôi đã chọn mẫu (C) để khảo sát một số tính chất điện hóa của vật liệu.

Tính chất điện hóa

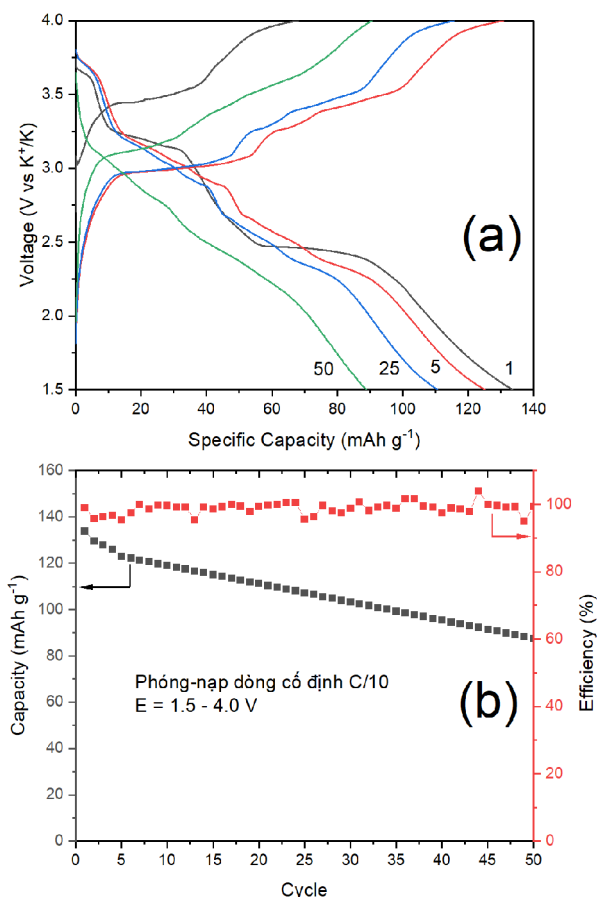
Khả năng đan cài ion của vật liệu NVO được đánh giá bằng phương pháp quét thế vòng tuần hoàn (CV) và phương pháp phóng nạp dòng cố định trong vùng thế 1,5 – 4 V (vs. K^+/K). Hình 3(a) thể hiện đường cong CV của vật liệu NVO được khảo sát với tốc độ quét từ 0,01 đến 0,10 $mV \cdot s^{-1}$. Quá trình oxy hóa quan sát thấy các mũi tín hiệu xuất hiện tại khoảng 3,2 V và V đặc trưng cho quá trình oxy hóa của $V^{+4} \rightarrow V^{+5}$. Đối với quá trình khử, các mũi khử rõ ràng tại khoảng 3,1 V và 2,6 V, phản ánh sự chuyển hóa thuận nghịch từ $V^{+5} \rightarrow V^{+4}$. Kết quả phân tích CV cho thấy cơ chế đan cài ion K^+ thuận nghịch của vật liệu $(NH_4)_{0.5}V_2O_5$.



Hình 3. (a) Đường cong CV của vật liệu, (b) Điện dung của mẫu ở các tốc độ quét khác nhau, (c) Đường cong CV của vật liệu với tốc độ quét 0,01 mV/s , (d) Đường cong CV của vật liệu với tốc độ quét 0,1 mV/s

Hình 3(b) thể hiện tỉ lệ đóng góp điện dung tăng từ 25% lên 62% khi tốc độ quét tăng từ 0,01 đến 0,1 mV/s , đồng thời phần khuếch tán giảm từ 75% xuống còn 38%. Điều này chỉ ra rằng ở tốc độ quét thấp, ion K^+ có đủ thời gian để khuếch tán sâu vào vật liệu, trong khi ở tốc độ cao, phản ứng xảy ra chủ yếu tại hoặc gần bề mặt điện cực thông qua các cơ chế giống điện dung. Điều đó được thể hiện rõ qua Hình 3(c-d) trong đó vùng màu xanh dương biểu thị phần đóng góp điện dung tại hai tốc độ đại diện: 0,01 và 0,1 mV/s . Ở tốc độ quét 0,01 trong Hình 3(c), phần đóng góp điện dung chỉ chiếm một phần nhỏ trong tổng dòng, phản ánh rõ vai trò của quá trình khuếch tán ion K^+ đặc trưng cho quá trình Faraday. Tuy nhiên, tại tốc độ cao 0,1 mV/s trong Hình 3(d), vùng đóng góp điện dung mở rộng đáng kể, cho thấy quá trình lưu trữ chủ yếu xảy ra tại vùng bề mặt thông qua cơ chế giống như tụ điện giả đặc trưng cho quá trình non-Faraday. Kết quả trên cho thấy cơ chế lưu trữ năng lượng vật liệu NVO đối với ion K^+ thông qua cả hai cơ chế Faraday (đan cài

ion) và cơ chế non-Faraday, kết quả này phù hợp với nghiên cứu đã công bố của Xu et al. [5].



Hình 4: Độ bền theo chu kỳ của vật liệu NVO khi đo ở mật độ dòng C/10

Dung lượng riêng của vật liệu NVO đối với quá trình lưu trữ ion K^+ được đánh giá qua phương pháp phóng sạc dòng cố định tại chế độ C/10 tương ứng quá trình đai cài 1 ion K^+ trong 10 giờ. Kết quả cho thấy dung lượng riêng ban đầu đạt khoảng 130 $mAh \cdot g^{-1}$ tương đương quá trình đan cài 0,9 ion K^+ cho 1 mol NVO ở Hình 4(a). Tuy nhiên, qua các chu kỳ, giá trị này giảm dần và chỉ còn khoảng 125 $mAh \cdot g^{-1}$ ở chu kỳ thứ 5, 110 $mAh \cdot g^{-1}$ ở chu kỳ thứ 25 và 88 $mAh \cdot g^{-1}$ ở chu kỳ thứ 50. Điều này phản ánh hiện tượng suy giảm dung lượng do sự thay đổi cấu trúc. Ngoài ra trong quá trình oxy hóa, một phần ion NH_4^+ bị đẩy ra bên ngoài làm cho khoảng cách giữa các lớp không còn như ban đầu nữa dẫn đến việc đan cài ion K^+ diễn ra khó khăn hơn. Mặc dù dung lượng suy giảm theo chu kỳ, hiệu suất Coulomb vẫn ổn định ~95%, cho thấy phản ứng điện hóa thuận nghịch và vật liệu duy trì độ ổn định tương đối trong suốt quá trình sạc-xả. Kết quả các nghiên cứu sử dụng vật liệu vanadate cùng họ hoặc tương tự, ứng dụng trong các hệ ắc-quy khác nhau được tóm lược trong Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả các nghiên cứu đã công bố về dung lượng riêng và hiệu suất Coulomb của vật liệu vanadat lớp trong các hệ pin.

Vật liệu	Loại pin	Dung lượng	Hiệu suất Coulomb	
$(\text{NH}_4)_{0.5}\text{V}_2\text{O}_5$	Lithium battery	$150 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ tại tốc độ C/15	81,9%	[13]
$\text{NH}_4\text{V}_4\text{O}_{10}$	Magnesium battery	$174,8 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ tại tốc độ C/5	-	[7]
$\text{NH}_4\text{V}_4\text{O}_{10}$	Potassium battery	$50 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ tại tốc độ C/3	90%	[5]
$(\text{NH}_4)_{0.5}\text{V}_2\text{O}_5$	Sodium battery	$95 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ tại tốc độ C/5	-	[4]

So sánh với các kết quả đã công bố ở Bảng 2 cho thấy: dung lượng ở chế độ dòng thấp của $(\text{NH}_4)_{0.5}\text{V}_2\text{O}_5$ -KIB vượt các nghiên cứu về KIB trên $\text{NH}_4\text{V}_4\text{O}_{10}$ và cao hơn SIB trên cùng họ vật liệu, nhưng vẫn thấp hơn các hệ Li/Mg. Nhìn chung, vật liệu thể hiện triển vọng cho KIB; tuy nhiên độ bền dung lượng theo chu kỳ còn hạn chế và cần được cải thiện thêm.

Kết luận

Trong phạm vi nghiên cứu, chúng tôi đã tổng hợp thành công vật liệu $(\text{NH}_4)_{0.5}\text{V}_2\text{O}_5$ bằng phương pháp thủy nhiệt tại nhiệt độ 200°C trong 24 giờ. Thông qua các phương pháp phân tích cấu trúc, hình thái vật liệu xác định rằng, $(\text{NH}_4)_{0.5}\text{V}_2\text{O}_5$ được tổng hợp có cấu trúc đa lớp với khoảng cách giữa các lớp $\sim 9,6 \text{ \AA}$, vật liệu có dạng các thanh dài và mỏng, có cấu trúc ổn định. Kết quả của quét thể vòng tuần hoàn chứng khả năng đan cài thuận nghịch ion K^+ và diễn ra đồng thời bởi cơ chế Faraday và non-Faraday. Điều đó được thể hiện ra thông qua các đỉnh đặc trưng cho quá trình oxy hóa từ $\text{V}^{+4} \rightarrow \text{V}^{+5}$ và quá trình khử từ $\text{V}^{+5} \rightarrow \text{V}^{+4}$. Ngoài ra, dung lượng riêng đạt $130 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ và hiệu suất Coulomb tương đối cao của vật liệu trong suốt 50 chu kỳ cho thấy sự thuận nghịch trong quá trình đan cài ion K^+ của vật liệu $(\text{NH}_4)_{0.5}\text{V}_2\text{O}_5$.

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 104.06-2023.38. Tác giả Võ Thị Kiều Anh cảm ơn đề tài cơ sở dành cho cán bộ trẻ năm 2025 của Viện Khoa học vật liệu.

Tài liệu tham khảo

1. S. Kim, V. Soundharrajan, S. Kim, B. Sambandam, V. Mathew, J.-Y. Hwang, J. Kim, *Nanomaterials*, 11(8) (2021) 1905. <https://doi.org/10.3390/nano11081905>
2. M. Henriksen, K. Vaagsaether, J. Lundberg, S. Forseth, D. Bjerketvedt, J. Hazard. Mater., 371 (2019) 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.108>
3. V. Anoopkumar, B. John, T. D. Mercy, *ACS Appl. Energy Mater.*, 3(10) (2020) 9478–9492. <https://doi.org/10.1021/acs.aem.0c01574>
4. L. T. N. Huynh, *Tạp chí Phân tích Hóa, Lý và Sinh học*, 3 (2023) 96–101.
5. Y. Xu, H. Dong, M. Zhou, C. Zhang, Y. Wu, W. Li, Y. Dong, Y. Lei, *Small Methods*, 3(8) (2019) 1800349. <https://doi.org/10.1002/smt.201800349>
6. K. Kubota, M. Dahbi, T. Hosaka, S. Kumakura, S. Komaba, *Chem. Rec.*, 18(4) (2018) 459–479. <https://doi.org/10.1002/tcr.201700057>
7. E. A. Esparcia Jr, M. S. Chae, J. D. Ocon, S. T. Hong, *Chem. Mater.*, 30(11) (2018) 3690–3696. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b00462>
8. X. Wu, Y. Tao, L. Dong, J. Hong, J. Mater. Chem., 14(5) (2004) 901–904. <https://doi.org/10.1039/B314775D>
9. V. D. Trinh, M. K. Le, P. L. Le, A. T. Ho, H. A. Nguyen, T. T. Thai, T. B. T. Hoang, T. T. H. Nguyen, L. T. N. Huynh, D. C. Huynh, *J. Appl. Electrochem.*, 54(4) (2024) 783–789. <https://doi.org/10.1007/s10800-023-02004-9>
10. T. H. L. Dang, H. V. Nguyen, N. T. T. Nguyen, T. V. Nguyen, *Mater. Sci. Eng. B*, 311 (2025) 117793. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117793>
11. R. Baddour-Hadjean, L. T. N. Huynh, D. Batyrbekuly, S. Bach, J.-P. Pereira-Ramos, *ChemSusChem*, 12(23) (2019) 5192–5198. <https://doi.org/10.1002/cssc.201902093>
12. L. T. N. Huynh, *Vietnam J. Sci. Technol.*, 55(1B) (2017) 20–24.
13. H. Wang, K. Huang, J. Li, Y. Chen, Z. Wang, *J. Power Sources*, 196 (2011) 5645–5650. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.02.046>