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

https://jca.edu.vn

Chế tạo nano-ZIF-90 từ zinc acetate dihydrate
Preparation of nano-ZIF-90 from zinc acetate dihydrate

Tạ Ngọc Thiện Huy[1,2], Lê Huyền Trâm[2], Nguyễn Văn Thành[1], Trần Thị Thảo Vy[3], Lê Ngọc Dương[4], Nhữ Thị Thảo[2], Bùi Thị Thanh Hà[5], Ninh Thị Phương[2], Lê Văn Dương[2], Tạ Ngọc Đôn[2*]

[1] *Trường Đại học Kiên Giang*
[2] *Trường Hóa và Khoa học sự sống, Đại học Bách khoa Hà Nội*
[3] *Trường Đại học Nha Trang*
[4] *Trường Đại học Đông Đô*
[5] *Trường Đại học Dược Hà Nội*
* *Email: don.tangoc@hust.edu.vn*

ARTICLE INFO

Received: 09/06/2025
Accepted: 24/06/2025
Published: 30/06/2025

Keywords:
ZIF-90; zinc acetate dihydrate; synthesis; characterization

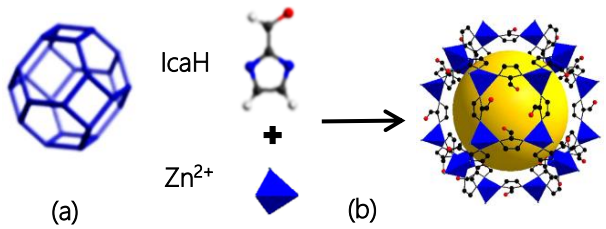
ABSTRACT

Nanometer-sized ZIF-90 has been preparatied from zinc acetate dihydrate. XRD, F-TIR, SEM, TEM, BET, DTA methods were used to characterize the research samples. The results have shown that the formed ZIF-90 has crystallinity of 100 %, BET specific surface reaches 1,051 m^2/g, of which the external surface reaches 292 m^2/g, total capillary volume reaches 0.472 cm^3/g, average crystal size of 38 nm (according to SEM), heat stable up to 285 °C and efficiency of 78.2 %.

1. Giới thiệu chung

Vật liệu khung imidazole cấu trúc zeolite (ZIFs) là một phân nhóm của họ vật liệu khung hữu cơ – kim loại (MOFs). Với cấu trúc không gian ba chiều, ZIFs được hình thành từ liên kết giữa các trung tâm kim loại và các imidazolate [1,2]. Do cấu trúc tương tự zeolite nên ZIFs có độ xốp cao, cỡ hạt đồng đều, bền nhiệt, bền thủy nhiệt và bền hóa học [2,3].

ZIF-90 là một trong những vật liệu tiêu biểu của phân nhóm ZIFs, đã được W. Morris và cộng sự [4] tìm ra lần đầu tiên vào năm 2008. Theo đó, ZIF-90 kết tinh ở dạng cubic, nhóm không gian *I*-43*m*, thông số mạng a = b = c = 17,2715 Å và α = β = γ = 90°. Cấu trúc của ZIF-90 kiểu SOD (sodalite) vòng 6 cạnh tương tự zeolite kiểu FAU [5], được xây dựng từ các tứ diện Zn^{2+} qua cầu nối là 2-imidazole carboxaldehyde (IcaH), tương tự như các tứ diện SiO_4 và AlO_4^- trong cấu trúc của zeolites [6,7], với góc Zn – Ica – Zn gần giống góc Si – O – Si trong zeolite và xấp xỉ 145° [8]. ZIF-90 có đường kính mao quản bằng 3,5 Å và kích thước hốc lớn của mao quản bằng 11,2 Å [4] đã được nhiều nhóm nghiên cứu trên thế giới quan tâm tổng hợp, đặc trưng và ứng dụng [8-15].



Hình 1: Lồng sodalite (a) và sự ghép nối tứ diện Zn^{2+} với cầu nối IcaH tạo ra ZIF-90 (b) [16]

ZIF-90 được tổng hợp chủ yếu bằng phương pháp nhiệt dung môi. Cho đến nay, thành phần tiền chất thứ nhất là nguồn cung cấp Zn^{2+} cho tổng hợp ZIF-90 chủ yếu là $Zn(NO_3)_2.6H_2O$ [7,9,10,17] và $Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$ [16,18-26], cá biệt sử dụng ZnO [27]. Tiền chất Zn^{2+} thường

©2025 by the authors. Licensee Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).
https://doi.org/10.62239/jca.2025.018

được hòa tan riêng rẽ trong dung môi hữu cơ [23,25] trước khi tạo hỗn hợp phản ứng với dung dịch chứa linker IcaH để tổng hợp ZIF-90.

Tiền chất thứ hai không thể thiếu để tạo ra liên kết trong ZIF-90 là linker IacH. Trong cấu trúc ZIF-90, mỗi phân tử IcaH liên kết với 2 cation Zn^{2+} thông qua nguyên tử N (Zn – Ica – Zn). IcaH thường được hòa tan trong dung môi hay hòa tan trong chất thêm trước khi tạo hỗn hợp phản ứng với dung dịch chứa Zn^{2+} để tổng hợp ZIF-90. Quá trình hòa tan có thể có tác dụng của nhiệt độ [5,10,23,25] hoặc khuấy trộn [6,23].

Bên cạnh các tiền chất Zn^{2+} và HicA, dung môi có vai trò thiết yếu là đồng nhất hoặc xúc tiến việc ghép nối Zn^{2+} với IcaH để hình thành cấu trúc kiểu SOD của ZIF-90. Kể từ khi ZIF-90 được tổng hợp cho đến nay, dung môi được sử dụng chủ yếu là dung môi hữu cơ và rất đa dạng, nhiều nhất là *N,N*-dimethylformamide (DMF) và methanol (CH_3OH). Các công trình [4,8,11,23,25] sử dụng dung môi DMF là chất lỏng duy nhất để hòa tan các tiền chất Zn^{2+} và IcaH, đồng thời là môi trường tạo mầm và lớn lên của tinh thể ZIF-90. Ngoài việc sử dụng DMF là dung môi chính, một số công trình nghiên cứu còn bổ sung thêm dung môi CH_3OH [28-30] hay dimethyl sulfoxide (DMSO) [18] hoặc chỉ thêm triethylamine (TEA) [31], trioctylamine (TOA) [32] hoặc thêm đồng thời cả TEA và *n*-hexane [4].

Khi tổng hợp ZIF-90, tỷ lệ mol IcaH : Zn^{2+} = 2 : 1 là đúng tỷ lệ mol tạo nên cấu trúc ZIF-90. Tuy nhiên, thực tế các công trình tổng hợp ZIF-90 đã công bố cho thấy tỷ lệ mol IcaH : Zn^{2+} = 2 : 1 [25,27] không nhiều, thường bằng 4 : 1 [6,33,34] để dư IcaH, cá biệt công trình [35] thực hiện với tỷ lệ mol IcaH : Zn^{2+} = 8 : 1. Ngoài ra, một số công trình tổng hợp ZIF-90 lại lấy dư Zn^{2+} khi lựa chọn tỷ lệ mol IcaH : Zn^{2+} < 2 : 1 [5]. Đối với tỷ lệ mol dung môi : Zn^{2+} lại rất khác biệt, dao động từ 127 : 1 đến trên 2.000 : 1 [27,32,33].

Kết quả tổng hợp ZIF-90 sử dụng nguồn Zn^{2+} là $Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$ với bề mặt riêng BET được công bố từ 920-1.597 m^2/g [16,18-21]. Trong đó, BET lớn hơn 1.300 m^2/g có các báo cáo [16,21] và chủ yếu được tiến hành trong dung môi duy nhất là DMF [36].

Về độ bền nhiệt, cấu trúc của ZIF-90 trong các báo cáo đã công bố chịu được nhiệt độ đến 140 °C [37], cao nhất đến 320 °C [16]. Kích thước tinh thể ZIF-90 dao động trong khoảng rất rộng, từ 0,275 µm [8] đến 55,7 µm [38], một số báo cáo tổng hợp được ZIF-90 có kích thước < 100 nm và đều được tổng hợp trong dung môi DMF [23,32,35], cá biệt trong hệ dung môi DMF/DMSO [18].

Hiệu suất ZIF-90 rất ít được công bố. Theo [29,35], khi tổng hợp ZIF-90 từ $Zn(NO_3)_2.6H_2O$ cho hiệu suất tổng hợp ZIF-90 tương ứng bằng 30 và 11 % tính theo Zn^{2+}. Tiếp theo hai công trình tổng quan về MOFs và ZIF-90 [36,39], bài báo này trình bày kết quả tổng hợp ZIF-90 từ $Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$ trong dung môi DMF và CH_3OH cho hiệu suất cao trong điều kiện tổng hợp êm dịu.

2. Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Sử dụng hóa chất gồm $Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$ và CH_3OH của hãng JHD, Trung Quốc có độ tinh khiết 98 %, HicA của hãng ADAMAS, Trung Quốc có độ tinh khiết 97 %, DMF của hãng Zhanyun, Trung Quốc có độ tinh khiết 98 % và nước cất hai lần.

Tiền chất Zn^{2+} được hòa tan hoàn toàn vào CH_3OH theo tỷ lệ mol Zn^{2+} : CH_3OH = 1 : 200 thu được dung dịch A. Linker HicA được hoàn tan hoàn toàn vào DMF theo tỷ lệ mol HicA : DMF = 3 : 100 thu được dung dịch B. Tiếp theo, rót dung dịch A vào dung dịch B. Hỗn hợp này sau đó được kết tinh trong 6 giờ tại nhiệt độ 60 °C, không khuấy trộn để tạo thành ZIF-90. Bột ZIF-90 thu được bằng cách rửa với nước cất nhiều lần và sấy chân không trong 5 giờ ở 150 °C.

Mẫu tổng hợp được đặc trưng bởi phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD) trên máy D8 ADVANCE-Bruker (Đức); phổ hấp thụ hồng ngoại (F-TIR) trên máy IMPACT FTIR 410 (Đức); chụp ảnh hiển vi điện tử (SEM) trên máy S-4800 (Nhật), chụp ảnh hiển vi điện tử truyền qua trên máy JEM 1010 (Nhật); xác định bề mặt riêng (BET) trên hệ Micromeritics Gemini VII 2390 (Mỹ); ghi giản đồ TG/DTA trên máy STA 409PC-NETZCH (Đức).

Sử dụng phương trình Scherrer để tính kích thước tinh thể từ giản đồ XRD [40]:

$$L = K.\lambda/(\beta.\cos\theta)$$

Trong đó: L là kích thước tinh thể (nm), K là hằng số (0,96), λ là bước sóng tia X (nm), β là chiều rộng tại một nửa pic có cường độ cực đại (FWHM) (radian) và θ là góc nhiễu xạ (radian).

Hiệu suất của phản ứng tạo thành ZIF-90 được xác định là tỷ lệ giữa khối lượng chất rắn ZIF-90 thực tế thu được (Mtt) so với khối lượng ZIF-90 tối đa có thể được tạo ra theo lý thuyết (Mlt) bởi phương trình:

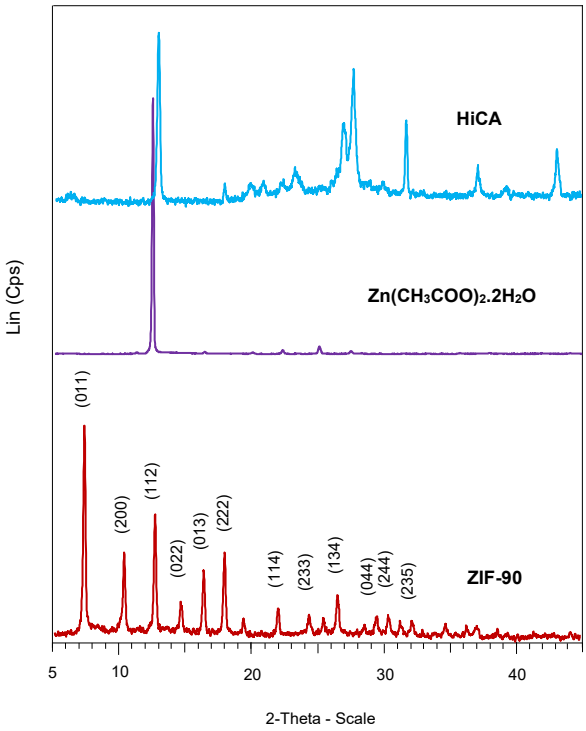
$$Y\ (\%) = (Mtt/Mlt).100$$

3. Kết quả và thảo luận

Hình 2 trình bày giản đồ XRD của các tiền chất HicA, $Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$ và ZIF-90 tổng hợp được ghi trong

https://doi.org/10.62239/jca.2025.018

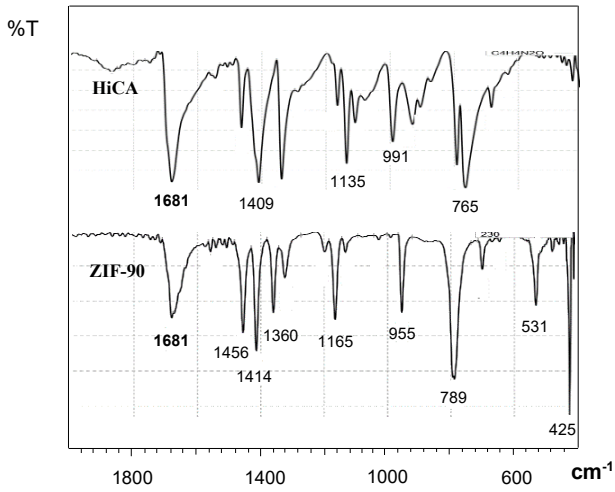
cùng điều kiện. Có thể quan sát thấy cả 3 mẫu này có các pic đặc trưng hoàn toàn khác biệt, chỉ có một pha tinh thể duy nhất, đường nền phẳng, không lẫn pha vô định hình chứng tỏ độ tinh khiết cao.



Hình 2: Nhiễu xạ tia X của HicA, $Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$ và ZIF-90 tổng hợp

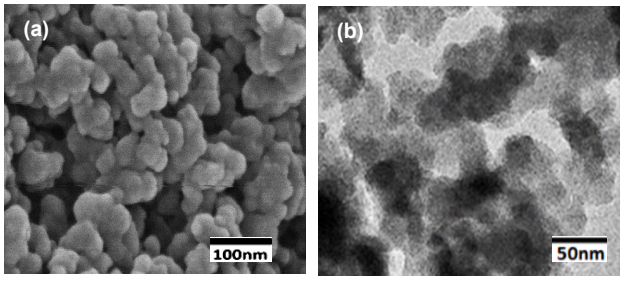
Trên giản đồ XRD của mẫu ZIF-90 tổng hợp, các pic nhiễu xạ xuất hiện trùng khớp với giản đồ XRD được mô phỏng cho cấu trúc tinh thể ZIF-90 (CCDC693596) [4]. Các đỉnh nhiễu xạ quan sát được ở góc 2θ = 7,4°, 10,4°, 12,8°, 14,7°, 16,5°, 18,0°, 22,1°, 24,5°, 26,7°, 29,7°, 30,5° và 32,4° sinh ra từ sự phản xạ của các mặt phẳng tinh thể (0 1 1), (2 0 0), (1 1 2), (0 2 2), (0 1 3), (2 2 2), (1 1 4),(2 3 3), (1 3 4), (0 4 4), (2 4 4) và (2 3 5) trong ZIF-90 [41-43]. Đáng lưu ý là giản đồ XRD của ZIF-90 có độ rộng chân pic đặc trưng (FWHM) khá lớn, chứng tỏ mẫu này có kích thước nhỏ. Kết quả từ XRD chứng tỏ rằng, ZIF-90 đã được tổng hợp thành công với độ kết tinh tốt.

Hình 3 mô tả kết quả ghi phổ hấp thụ hồng ngoại (F-TIR) của mẫu HicA và ZIF-90 tổng hợp. Có thể quan sát thấy đám phổ xung quanh 1681 cm^{-1} xuất hiện với cường độ mạnh trong cả hai giản đồ. Đây là đám phổ đặc trưng cho dao động kéo dài của liên kết C=O và sự tồn tại của nó đã chứng minh sự có mặt của các nhóm aldehyde trong tinh thể ZIF-90 [44,45]. Các đám phổ xung quanh vùng 1456, 1414 và 1360 cm^{-1} tương ứng đặc trưng cho dao động uốn của liên kết C-H, C=C, C=N trong vòng imidazolate [46]. Các đám phổ xung quanh vùng 955 và 789 cm^{-1} tương ứng đặc trưng cho dao động uốn trong và ngoài mặt phẳng của vòng imidazolate [44]. Trong khi đó, các đám phổ xung quanh vùng 531 và 425 cm^{-1} đặc trưng cho dao động kéo dài của liên kết Zn-N [47]. Việc xuất hiện đầy đủ các đỉnh hấp thụ hồng ngoại tại các bước sóng trên hình 3 đã xác nhận sự tồn tại cấu trúc ZIF-90 trong mẫu tổng hợp.



Hình 3: Phổ F-TIR của HicA và ZIF-90 tổng hợp

Ảnh SEM và ảnh TEM của mẫu ZIF-90 tổng hợp được trình bày trên hình 4. Quan sát thấy các tinh thể tạo thành đồng đều và cấu trúc hình khối khép kín, tương tự như [48]. Kích thước tinh thể trung bình đo được bằng 38 nm theo SEM và bằng 32 nm theo TEM. Sử dụng phương pháp XRD đo được kích thước trung bình của tinh thể ZIF-90 bằng 30 nm. Ba phương pháp này đều cho kích thước tinh thể trung bình khá gần nhau, chứng tỏ các tinh thể tạo thành khá đồng đều và có mật độ dày đặc.

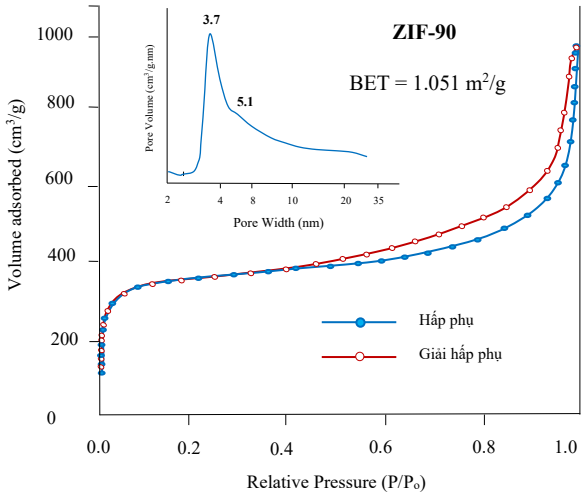


Hình 4: Ảnh SEM (a) và ảnh TEM (b) của ZIF-90 tổng hợp

Trên hình 5, đường đẳng nhiệt hấp phụ và giải hấp phụ N_2 của mẫu ZIF-90 tổng hợp thuộc đường đẳng nhiệt loại I [49]. Sự hấp phụ N_2 rất mạnh ở vùng áp suất tương

https://doi.org/10.62239/jca.2025.018

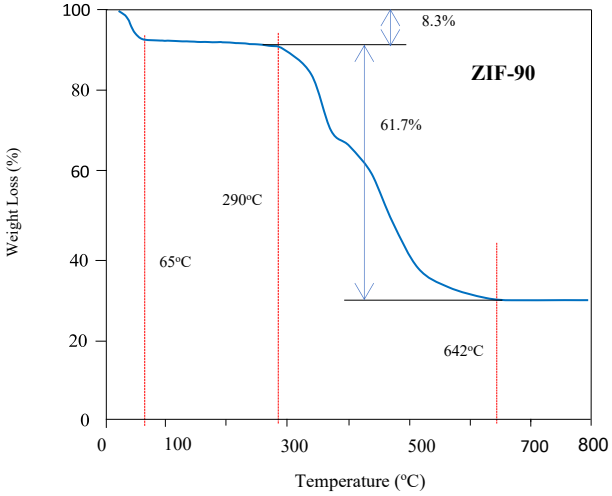
đối rất thấp (P/Po = 0-0,01) là do sự hiện diện của các vi mao quản, trong khi sự hấp phụ ở vùng áp suất tương đối cao (P/Po = 0,42-0,99) với vòng trễ khá lớn là do sự tồn tại của các mao quản trung bình thứ cấp, được hình thành bởi quá trình kế tụ các tinh thể có kích thước nanomet [50]. Hình chèn nhỏ trên hình 5 ghi nhận, phân bố mao quản trung bình tập trung chủ yếu ở vùng 3.7 nm với pic có cường độ mạnh, ngoài ra còn xuất hiện mao quản lớn ở vùng 5,1 nm nhưng cường độ yếu. Sự tồn tại mao quản lớn đã làm cho đường cong hấp phụ và giải hấp phụ có độ dốc khá lớn ở vùng áp suất tương đối cao (P/Po = 0,98-0,99) đối với vật liệu có kích thước nano, tương tự như [16].



Hình 5: Đường đẳng nhiệt hấp phụ và giải hấp phụ N_2 của mẫu ZIF-90 tổng hợp và phân bố lỗ xốp vùng mao quản trung bình, mao quản lớn (hình chèn nhỏ)

Mẫu ZIF-90 tổng hợp có diện tích bề mặt riêng bằng 1.051 m^2/g (theo BET), bằng 1/398 m^2/g (theo Langmuir), trong đó diện tích bề mặt ngoài bằng 292 m^2/g. Tổng thể tích mao quản được xác định bằng 0,427 cm^3/g, trong đó thể tích vi mao quản bằng 0,359 cm^3/g.

Hình 6 biểu diễn giản đồ mất khối lượng của mẫu ZIF-90 tổng hợp. Từ hình 6 thấy rõ, giản đồ TG của mẫu ZIF-90 xuất hiện hai giai đoạn mất khối lượng rõ rệt, hình dạng đường cong tương tự như các báo cáo [4,16]. Theo đó, giai đoạn thứ nhất ở khoảng 25-65 °C mất 8,3 % khối lượng là do quá trình mất nước hấp phụ trong mao quản. Giai đoạn thứ hai ở khoảng 290-642 °C mất 61,7 % khối lượng và xuất hiện hai điểm uốn, cho thấy giai đoạn đầu có thể là do sự phân hủy các nhóm aldehyde trong vòng imidazolate của ZIF-90, và giai đoạn sau là sự phá hủy khung cấu trúc ZIF-90. Tổng khối lượng mất đi bằng 70,0 % là rất lớn, chứng tỏ mẫu ZIF-90 tổng hợp có độ xốp cao và ghi nhận độ bền nhiệt đến 290 °C. Sau 642 °C đường cong TG không thay đổi khối lượng do chuyển thành ZnO, với 30 % khối lượng còn lại.



Hình 6: Đường cong TG của mẫu ZIF-90 tổng hợp

Hiệu suất ZIF-90 tạo thành được được tính toán dựa trên lượng chất rắn ZIF-90 thực tế thu được so với lượng ZIF-90 tính theo lý thuyết, bằng 78,2 %. So với một số công trình đã công bố, hiệu suất ZIF-90 tạo thành (tính theo Zn^{2+}) bằng 11-30 % [29,35] thì kết quả thu được từ báo cáo này là rất đáng ghi nhận.

Kết luận

Đã tổng hợp thành công ZIF-90 từ zinc acetate dihydrate với hiệu suất 78,2 % bằng phương pháp nhiệt dung môi. ZIF-90 tạo thành có bề mặt riêng BET bằng 1.051 m^2/g, thể tích lỗ xốp bằng 0,472 cm^3/g, chứa mao quản trung bình tập trung ở 3,7 nm. ZIF-90 được tổng hợp có độ tinh thể 100 %, kích thước trung bình bằng 38 nm (theo SEM), bền nhiệt đến 290 °C. Điều kiện tổng hợp: tỷ lệ mol Zn^{2+} : HicA : DMF : CH_3OH = 1 : 3 : 100 : 200. Phản ứng được tiến hành trong 6 giờ ở nhiệt độ 60 °C, không khuấy trộn.

Kết quả này mở ra một cơ hội tốt để tổng hợp ZIF-90 từ zinc acetate dihydrate trong điều kiện đơn giản, chất lượng tốt nên có thể dễ dàng được thương mại hóa.

Lời cảm ơn

Các tác giả xin chân thành cảm ơn Đại học Bách khoa Hà Nội đã tài trợ kinh phí thông qua đề tài T2024-PC-072.

Tài liệu tham khảo

1. A. Phan, C.J. Doonan, F.J. Uribe-Romo, C.B. Knobler, M. O'Keeffe, O.M. Yaghi, Acc. Chem. Res., 43(1) (2010) 58–67. https://doi.org/10.1021/ar900116g
2. R. Banerjee, A. Phan, B. Wang, C. Knobler, H. Furukawa, M. O'Keeffe, O.M. Yaghi, Science, 319(5865) (2008) 939–943. https://doi.org/10.1126/science.1152516
3. K.S. Park, Z. Ni, A.P. Cote, J.Y. Choi, R. Huang, F.J. Uribe-Romo, H.K. Chae, M. O'Keeffe, O.M. Yaghi, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 103(27) (2006) 10186–10191. https://doi.org/10.1073/pnas.0602439103
4. W. Morris, C.J. Doonan, H. Furukawa, R. Banerjee, O.M. Yaghi, J. Am. Chem. Soc., 130(38) (2008) 12626–12627. https://doi.org/10.1021/ja805222x
5. H.K.D. Nguyen, D.N. Ta, H.N. Ta, J. Appl. Chem., 6(1) (2017) 50–68. [Không có DOI; đường dẫn PDF cung cấp]
6. T.N. Don, V.D. Thang, P.T. Huyen, P.M. Hao, K.D. Hong, Stud. Surf. Sci. Catal., 159 (2006) 197–200. https://doi.org/10.1016/S0167-2991(06)81567-3
7. T.N. Don, T.N. Hung, P.T. Huyen, T.X. Bai, H.T.T. Huong, N.T. Linh, L.V. Duong, M.-H. Pham, Indian J. Chem. Technol., 23 (2016) 392–399. [PDF online; không DOI]
8. F.-K. Shieh, S.-C. Wang, S.-Y. Leo, K.C.-W. Wu, Chemistry, 19(34) (2013) 11139–11142. https://doi.org/10.1002/chem.201301560
9. X. Li, B. Tang, W. Huang, H. Yu, Z. Anorg. Allg. Chem., 645(1) (2019) 73–78. https://doi.org/10.1002/zaac.201800303
10. H.-Y. Chen, C.-W. Chang, J. Phys. Chem. C, 124(17) (2020) 8854–8860. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c01472
11. T. Taghizadeh, A. Ameri, A.T. Kiakalaieh, S. Mojtabavi, A. Ameri, H. Forootanfar, S. Tarighi, M.A. Faramarzi, Int. J. Biol. Macromol., 166 (2021) 1301–1311. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.11.011
12. X. Li, B. Yan, W. Huang, H. Bian, X. Wang, J. Zhu, S. Dong, Y. Wang, W. Chen, Chem. Eng. J., 428(–) (2022) 132501. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132501
13. H. Yin, A. Alkaş, Y. Zhang, Y. Zhang, S.G. Telfer, J. Membr. Sci., 609 (2020) 118245. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118245
14. Y. Zhong, P. Liao, J. Kang, Q. Liu, S. Wang, S. Li, X. Liu, G. Li, J. Am. Chem. Soc., 145(8) (2023) 4659–4666. https://doi.org/10.1021/jacs.2c12590
15. Y. Wang, D. Zhang, Y. Sun, Y. Zeng, P. Qi, ACS Appl. Mater. Interfaces, 15(6) (2023) 8424–8435. https://doi.org/10.1021/acsami.2c22682
16. H. Jin, Y. Li, X. Liu, Y. Ban, Y. Peng, W. Jiao, W. Yang, Chem. Eng. Sci., 124 (2015) 170–178. https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.07.017
17. B. Soleimani, A.H. Asl, B. Khoshandam, K. Hooshyari, Sci. Rep., 13(1) (2023) 8238. https://doi.org/10.1038/s41598-023-34953-8
18. Z. Jiang, Y. Wang, L. Sun, B. Yuan, Y. Tian, L. Xiang, Y. Li, Y. Li, J. Li, A. Wu, Biomaterials, 197 (2019) 41–50. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2019.01.001
19. J. Li, Y. Weng, C. Shen, J. Luo, D. Yu, Z. Cao, Anal. Methods, 13 (2021) 2981–2988. https://doi.org/10.1039/D1AY00841B
20. Q. Shi, J. Wang, H. Shang, H. Bai, Y. Zhao, J. Yang, J. Dong, J. Li, Sep. Purif. Technol., 230 (2020) 115850. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115850
21. Z. Zhang, C. Li, Y. Bian, Y. Han, G. Wang, Photochem. Photobiol. Sci., 21(10) (2022) 2193–2203. https://doi.org/10.1007/s43630-022-00288-y
22. M. Gao, J. Wang, Z. Rong, Q. Shi, J. Dong, RSC Adv., 8(67) (2018) 39627–39634. https://doi.org/10.1039/C8RA08460B
23. D. Hua, Y.K. Ong, Y. Wang, T. Yang, T.-S. Chung, J. Membr. Sci., 453 (2014) 155–167. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.10.059
24. I.S. Flyagina, E.M. Mahdi, K. Titov, J.-C. Tan, APL Mater., 5(8) (2017) 086104. https://doi.org/10.1063/1.4986565
25. S. Xu, H. Zhang, F. Yu, X. Zhao, Y. Wang, Sep. Purif. Technol., 206 (2018) 80–89. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.05.056
26. L. Mengwen, S. Ao, L. Yueqi, Z. Hao, H. Xiaohui, L. Xueliang, X. Xinchao, Y. Yunxu, Anal. Methods, 12(–) (2020) 3748–3755. https://doi.org/10.1039/D0AY00493F
27. H. Li, X. Feng, Y. Guo, D. Chen, R. Li, X. Ren, X. Jiang, Y. Dong, B. Wang, Sci. Rep., 4(1) (2014) 4366. https://doi.org/10.1038/srep04366
28. Y. Pan, X. Yu, Sep. Purif. Technol., 237(–) (2020) 116330. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116330
29. J. Rogacka, A. Seremak, A. Luna-Triguero, F. Formalik, I. Matito-Martos, L. Firlej, S. Calero, B. Kuchta, Chem. Eng. J., 403 (2021) 126392. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126392
30. Y. Pan, R. Xie, B.M. Xu, C. Chen, Microporous Mesoporous Mater., 320 (2021) 111086. https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111086
31. K. Zhu, Y. Li, Z. Li, Y. Liu, H. Wu, H. Li, Chem. Commun., 58 (2022) D2CC04643A. https://doi.org/10.1039/D2CC04643A
32. C.G. Jones, V. Stavila, M.A. Conroy, P. Feng, B.V. Slaughter, C.E. Ashley, M.D. Allendorf, ACS Appl. Mater. Interfaces, 8(12) (2016) 7623–7630. https://doi.org/10.1021/acsami.5b11760
33. S. Bhattacharyya, R. Han, J.N. Joshi, G. Zhu, R.P. Lively, K.S. Walton, D.S. Sholl, S. Nair, J. Phys. Chem. C, 123(4) (2019) 2336–2346. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b11377
34. C. Chen, M. Vázquez-González, M.P. O'Hagan, Y. Ouyang, Z. Wang, I. Willner, Small, 18(11) (2022) 2104420. https://doi.org/10.1002/smll.202104420
35. T. Yang, T.-S. Chung, J. Mater. Chem. A, 1(18) (2013) 6081–6089. https://doi.org/10.1039/c3ta10928c
36. T.N. Don, N.T.H. Phuong, N.T.M. Thu, N.T.T. Huyen, T.X. Bai, T.N.T. Huy, D. Mo, N.T. Nghia, H.T.L. Anh, N.T. Linh, B.T.T. Ha, T.T. Hai, Viet. J. Catal. Adsorpt., 12(3) (2023) 1–16. https://doi.org/10.51316/jca.2023.041

37. I.S. Liu, J. Dai, Y. Ji, B. Shen, X. Zhang, R.J. Linhardt, Sens. Actuators B Chem., 341(–) (2021) 129934. https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129934
38. S. Nair, K. Eum, F. Rashidi, C.W. Jones, J.H. Drese, US Patent 2016/0130199 A1.
39. V.A. Tran, V.D. Doan, V.T. Le, T.Q. Nguyen, T.N. Don, V. Vien, N.T. Luan, G.N.L. Vo, Ind. Eng. Chem. Res., 62(11) (2023) 4738–4753. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c04399
40. L. Paseta, M. Malankowska, C. Téllez, J. Coronas, Mater. Chem. Phys., 295(–) (2023) 127039. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.127039
41. F.K. Shieh, S.C. Wang, S.Y. Leo, K.C.W. Wu, Chem. Eur. J., 19(34) (2013) 11139–11142. https://doi.org/10.1002/chem.201301560
42. J. Jose, Y. Hwang, D.W. Kim, M.I. Kim, D.W. Park, Catal. Today, 245(–) (2015) 61–67. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2014.05.022
43. T. Tharun, K.M. Bhin, R. Roshan, D.W. Kim, A.C. Kathalikkattil, R. Babu, et al., Green Chem., 18(–) (2016) 2479–2487. https://doi.org/10.1039/c5gc02153g
44. W. Xie, F. Wan, Energy Convers. Manage., 198(–) (2019) 111922. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111922
45. G. Moral, A. Ortiz, D. Gorri, I. Ortiz, Int. J. Hydrogen Energy, 51(D) (2024) 210–224. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.368
46. J. Dou, W. Bian, X. Zheng, Q. Yue, Q. Song, S.H. Deng, L. Wang, W. Tan, W. Li, B. Zhou, Mater. Chem. Phys., 297(–) (2023) 127345. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127345
47. Y. Xin, D. Zhang, Y. Zeng, P. Qi, Anal. Biochem., 663(–) (2023) 115021. https://doi.org/10.1016/j.ab.2022.115021
48. L. Mengwen, S. Ao, L. Yueqi, Z. Hao, H. Xiaohui, L. Xueliang, X. Xinchao, Y. Yunxu, Anal. Methods, 12(–) (2020) 3748–3755. https://doi.org/10.1039/D0AY00493F
49. K.S.W. Sing, D.H. Everett, R.A.W. Haul, L. Moscou, R.A. Pierotti, J. Rouquerol, T. Siemieniewska, Pure Appl. Chem., 57(4) (1985) 603–619. https://doi.org/10.1351/pac198557040603
50. J. Cravillon, R. Nayuk, S. Springer, A. Feldhoff, K. Huber, M. Wiebcke, Chem. Mater., 23(8) (2011) 2130–2141. https://doi.org/10.1021/cm103571y