



## Tổng hợp ZIF-94 quy mô lớn với bề mặt riêng cao từ zinc chloride Large-scale synthesis of ZIF-94 with large specific surface area from zinc chloride

Trịnh Thị Hải<sup>1</sup>, Phạm Thị Mai Hương<sup>1</sup>, Lê Văn Dương<sup>2</sup>, Phạm Thanh Huyền<sup>2</sup>,  
 Tạ Ngọc Thiện Huy<sup>2,3</sup>, Nguyễn Khánh Diệu Hồng<sup>4</sup>, Ninh Thị Phương<sup>2</sup>, Tạ Ngọc Đôn<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

<sup>2</sup> Trường Hóa và Khoa học sự sống, Đại học Bách khoa Hà Nội

<sup>3</sup> Trường Đại học Kiên Giang

<sup>4</sup> Liên hiệp các Hội KHKT Việt Nam

\* Email: [don.tangoc@hust.edu.vn](mailto:don.tangoc@hust.edu.vn)

### ARTICLE INFO

Received: 13/07/2025

Accepted: 13/12/2025

Published: 30/12/2025

#### Keywords:

ZIF-94; zinc chloride;  
 synthesis; characterization;  
 large-scale

### ABSTRACT

ZIF-94 is a zeolitic imidazolate framework with a sodalite structure. The pore system in ZIF-94 is formed from  $Zn^{2+}$  tetrahedra linked together through imidazole 4-methyl-5-imidazolecarboxaldehyde, similar to the linkage of  $SiO_4^-$  and  $AlO_4^-$  tetrahedra in zeolites. ZIF-94 contains acid and base sites, the pore diameter is about 0.3 nm connected to large cavities of 0.91 nm. Therefore, ZIF-94 is considered a new generation advanced material with great potential for applications in catalysis and adsorption. Up to now, synthesized ZIF-94 has a low specific surface area, there has been no report synthesizing ZIF-94 from  $ZnCl_2$  on a large-scale. Therefore, this paper presents the first research results on the synthesis of ZIF-94 with the highest specific surface area (BET) reaching  $1.128 \text{ m}^2/\text{g}$ , and is also the first time to report the synthesis results of ZIF-94 from  $ZnCl_2$  on a large-scale. ZIF-94 exhibits a crystallinity of 100%, an average crystal size of 85 nm, thermal stability up to  $280 \text{ }^\circ\text{C}$ , and a yield of 73%.

### Giới thiệu chung

ZIF-94 là một trong số các vật liệu khung imidazolate – kim loại (ZIFs) mà tiền thân của nó là SIM-1 đã được S. Aguado và cộng sự đã tìm ra lần đầu tiên vào năm 2010 [1]. Hệ mao quản trong ZIF-94 được hình thành từ các tứ diện  $Zn^{2+}$  liên kết với nhau thông qua imidazole 4-methyl-5-imidazolecarboxaldehyde (HalmIM) [1,2], tương tự như liên kết của các tứ diện  $SiO_4$  và  $AlO_4^-$  trong zeolite [3-5]. Khung ZIF-94 được tạo nên bởi cấu trúc sodalite (SOD) với vòng liên kết 6 cạnh tương tự zeolite

Y [6,7], đường kính mao quản khoảng 0,3 nm nối thông với các hốc lớn có kích thước 0,91 nm [1,2]. Ngoài ra, do khoảng cách Zn-Zn trong ZIFs gần gấp đôi khoảng cách Si-Si trong zeolite có cùng kiểu cấu trúc liên kết, nên thể tích mao quản của ZIFs lớn hơn thể tích mao quản của zeolite tương ứng có cùng kiểu cấu trúc [8]. Với đặc điểm này, ZIF-94 được cho là vật liệu tiên tiến thế hệ mới có tiềm năng ứng dụng tốt trong lĩnh vực xúc tác và hấp phụ.

Hơn 10 năm qua, ZIF-94 đã được nghiên cứu về cấu trúc một cách khá toàn diện như đã được trình bày trong các

báo cáo [1,2,9], tiếp đến là nghiên cứu điều chỉnh chế độ công nghệ để ZIF-94 được tạo ra có hiệu quả cao nhất như đã được đề cập trong báo cáo [10]. ZIF-94 cũng đã được nghiên cứu tổng hợp ở quy mô lớn [11,12] nhằm mục đích ổn định quy trình công nghệ để có thể thương mại hóa. Cho đến nay, mới chỉ có ZIF-8 đã được thương mại hóa bởi hãng BASF (Đức) dưới tên gọi Basolite@1200. Việc thương mại hóa các loại ZIFs khác, trong đó có ZIF-94 vẫn đang là một thách thức. Bên cạnh đó, ZIF-94 được tổng hợp có bề mặt riêng (BET) cao nhất được biết đến nay chỉ bằng 709 m<sup>2</sup>/g [13]. Tiếp theo các bài báo [8,13-15], bài báo này báo cáo kết quả nghiên cứu tổng hợp ZIF-94 có bề mặt riêng lớn nhất từ trước đến nay, sử dụng tiền chất ZnCl<sub>2</sub> lần đầu tiên ở quy mô lớn, với độ lặp lại tin cậy.

## Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

### Hóa chất

Hóa chất sử dụng gồm: ZnCl<sub>2</sub> độ tinh khiết 98% của hãng JHD, Trung Quốc. Dung dịch NH<sub>4</sub>OH 25%, trimethylamine (TMA), triethylamine (TEA), HalmIM, N,N-dimethylformamide (DMF), ethanol (EtOH), methanol (MeOH) độ tinh khiết 97-99% của hãng ADAMAS, Trung Quốc và nước cất hai lần.

### Nghiên cứu độ lặp lại của quy trình tổng hợp ZIF-94 từ ZnCl<sub>2</sub> ở quy mô lớn

Thực nghiệm tổng hợp ZIF-94 lượng nhỏ (khối lượng ZnCl<sub>2</sub> bằng 0,436 g, ký hiệu ZIF-94-Small) đã được trình bày trong [15]. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng kết quả XRD của mẫu ZIF-94-Small được tổng hợp theo [15] để so sánh với mẫu ZIF-94 quy mô lớn (ký hiệu ZIF-94-Large) trong nghiên cứu này. Hiệu suất và các đặc trưng của mẫu ZIF-94-Small về SEM, TEM, FT-IR, DTA/TGA, hấp phụ và giải hấp phụ N<sub>2</sub> chưa được báo cáo trong [15] sẽ được trình bày trong bài báo này.

Trong nghiên cứu này, mẫu có khối lượng lớn với quy mô lớn hơn mẫu có khối lượng nhỏ 30 lần (khối lượng ZnCl<sub>2</sub> bằng 13 g) được tiến hành trong các điều kiện tương tự như tổng hợp mẫu có khối lượng nhỏ [15]. Cụ thể, tiền chất ZnCl<sub>2</sub> được hòa tan vào dung môi EtOH (dung dịch A), HalmIM được hoàn tan vào dung môi EtOH và chất thêm TMA (dung dịch B). Tiếp đến, rót dung dịch A vào dung dịch B và hỗn hợp này được kết tinh trong thời gian 6 giờ tại nhiệt độ 90 °C, không khuấy trộn. Kết thúc thời gian kết tinh, mẫu được lọc hết dung môi, phân tán chất rắn 3 lần bằng MeOH (mỗi lần 30 ml MeOH sạch), sau đó ly tâm, lọc và sau 3 lần phân tán, <https://doi.org/10.62239/jca.2025.068>

chất rắn được sấy chân không trong 5 giờ ở nhiệt độ 120 °C. Chất rắn là ZIF-94 được cân và bảo quản trong lọ kín.

### Đặc trưng

Các mẫu tổng hợp ZIF-94-Small và ZIF-94-Large được đặc trưng trong các điều kiện như nhau bởi phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD) trên máy D8 ADVANCE-Bruker (Đức); ghi phổ hấp thụ hồng ngoại (FT-IR) trên máy IMPACT FTIR 410 (Đức); chụp ảnh hiển vi điện tử quét (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).

Kích thước tinh thể được tính toán từ giản đồ XRD theo phương trình Scherrer [16-18]:

$$L \text{ (nm)} = K \times \lambda / (\beta \times \cos\theta) \quad (1)$$

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).

Độ tinh thể tương đối của ZIF-94 được xác định là tỷ lệ giữa tổng diện tích của các pic ZIF-94 (S<sub>1</sub>) so với tổng diện tích pic của tất cả các pha tinh thể trong mẫu (S<sub>2</sub>) bởi phương trình [17]:

$$C \text{ (%) } = (S_1/S_2) \times 100 \quad (2)$$

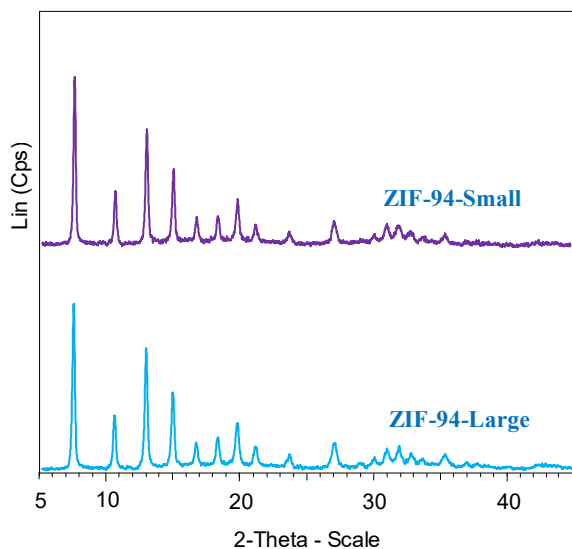
Hiệu suất của phản ứng được tính toán dựa trên tỷ lệ giữa khối lượng ZIF-94 thực tế thu được (M<sub>tt</sub>) so với khối lượng ZIF-94 tối đa có thể được tạo ra theo lý thuyết (M<sub>lt</sub>) theo phương trình [16,18]:

$$Y \text{ (%) } = (M_{tt}/M_{lt}) \times 100 \quad (3)$$

## Kết quả và thảo luận

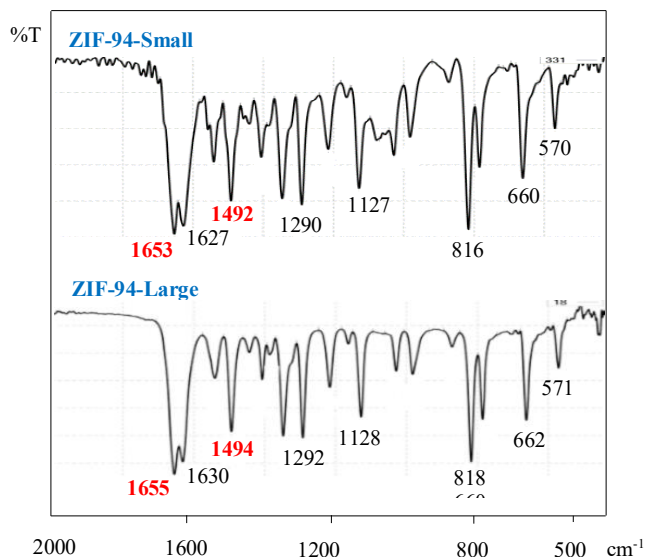
Hình 1 trình bày giản đồ XRD của mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large. Dễ dàng quan sát thấy hai giản đồ này cho một mức độ đồng dạng tốt. Tất cả các pic đặc trưng cho ZIF-94 đã xuất hiện trên các giản đồ với cường độ mạnh, sắc nét, không lẫn pha lạ. Cả hai bộ pic đều có đường nền phẳng, cho thấy không có pha vô định hình, tinh khiết. Nhiễu xạ tia X của hai mẫu rất phù hợp với dữ liệu mô phỏng đơn tinh thể ZIF-94 đã được mô tả trong các báo cáo [19,20] và đã được thảo luận trong báo cáo [14]. Đáng chú ý là pic đặc trưng mạnh nhất tại mặt phản xạ (110) ứng với giá trị 2θ = 7,467° (d = 11,829) có cường độ mạnh, độ rộng chân pic khá lớn cho thấy

tinh thể ZIF-94 tạo thành có kích thước nhỏ, phù hợp với kết quả xác định kích thước trung bình của tinh thể theo phương trình Scherrer tương ứng bằng 68 và 70 nm đối với mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large.



Hình 1: Giản đồ XRD của mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large

Hình 2 mô tả phổ hấp thụ hồng ngoại của mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large. Hình dáng phổ được cho là tương tự nhau, đặc biệt là các đám phổ đặc trưng cho dao động của nhóm chức và dao động của các liên kết trong vật liệu tạo thành.

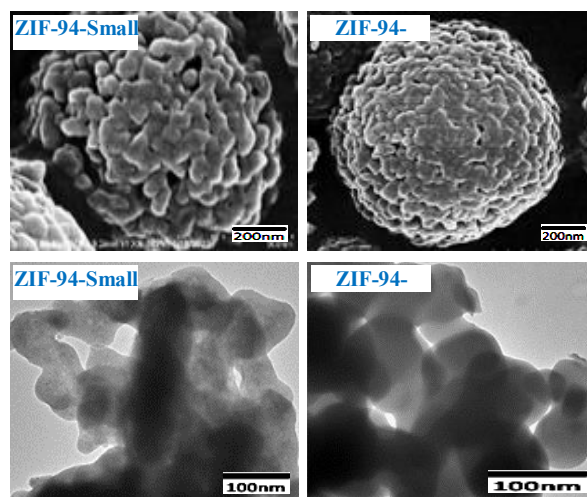


Hình 2: Phổ FT-IR của mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large

Cụ thể, đám phổ ở vùng 1655-1653  $\text{cm}^{-1}$  đặc trưng cho dao động của nhóm aldehyde (-CHO) [21] và đám phổ ở vùng 1494-1492  $\text{cm}^{-1}$  đặc trưng cho dao động của liên kết đôi C=C [22,23] xuất hiện với cường độ mạnh, cho

thấy trong cả hai mẫu này đều chứa liên kết imidazolate có nguồn gốc từ tiền chất hữu cơ HalmIM. Kết quả phân tích phổ FT-IR trên đây phù hợp với báo cáo tổng hợp nano-ZIF-94 từ  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  [14].

Kết quả chụp ảnh SEM và ảnh TEM của mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large được trình bày trên hình 3. Quan sát hai ảnh SEM (phía trên hình 3) có thể thấy các tinh thể tạo thành có kích thước nhỏ, nhưng kết tụ lại thành các hình cầu có kích thước lớn. Điều này chỉ xảy ra khi tinh thể có kích thước nanomet, do hiệu ứng kết tụ của các hạt có kích thước nanomet mà tạo nên. Kích thước hạt tinh thể trung bình tương ứng bằng 80 và 85 nm trong mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large, khi kết tụ lại thành các hình cầu có kích thước trung bình tương ứng bằng 0,94 và 0,92  $\mu\text{m}$ .



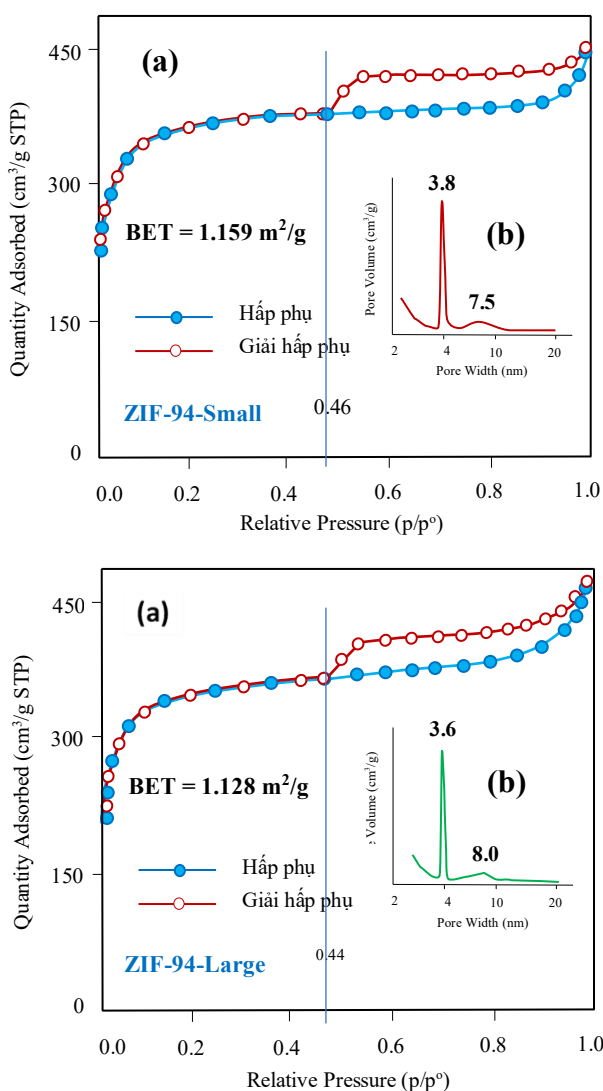
Hình 3: Ảnh SEM (trên) và TEM (dưới) của mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large

Từ ảnh TEM của mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large trên hình 3 (phía dưới), quan sát thấy các tinh thể được tạo thành khá đồng đều, được cho là khá giống nhau. Kích thước tinh thể trung bình được xác định bằng phương pháp TEM trong mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large tương ứng bằng 78 và 82 nm.

Điều đáng chú ý là, cả ba phương pháp XRD, TEM, SEM đều cho kết quả xác định độ tinh thể ZIF-94 trong mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large cho một sự tương quan rất tốt. Kích thước tinh thể trung bình được xác định sắp xếp theo trật tự XRD < TEM < SEM (tương ứng bằng 68, 78, 80 nm trong mẫu ZIF-94-Small; bằng 70, 82, 85 nm trong mẫu ZIF-94-Large). Sai số nhỏ giữa các phương pháp này cũng chứng tỏ các tinh thể tạo thành rất đồng đều.

Hình 4a trình bày giản đồ hấp phụ và giải hấp phụ nitơ, phân bố lỗ xốp vùng mao quản trung bình của mẫu ZIF-94-Small (phía trên) và ZIF-94-Large (phía dưới). Có thể

cho rằng, hai giản đồ này không có sự khác biệt đáng kể. Cả hai mẫu đều có dung lượng hấp phụ rất cao ở vùng áp suất tương đối  $p/p_0$  rất thấp ( $\leq 0,01$ ), chứng tỏ chúng đều chứa một lượng lớn vi mao quản. Sự xuất hiện vòng trễ khá lớn tại vùng  $p/p_0 = 0,46-0,99$  (đối với mẫu ZIF-94-Small) và  $0,44-0,99$  (đối với mẫu ZIF-94-Large) chứng tỏ đã xảy ra hiện tượng ngưng tụ trong các mao quản trung bình trong hệ thống mao quản của chúng. Đường đẳng nhiệt hấp phụ này thuộc kiểu IV, khác biệt hoàn toàn với đường đẳng nhiệt hấp phụ kiểu I của ZIF-94 đã được báo cáo [11,12,23,24], nhưng khá giống với kết quả đã được thảo luận trong báo cáo [14].



Hình 4: Giản đồ hấp phụ và giải hấp phụ N<sub>2</sub> (a) và phân bố lỗ xốp vùng mao quản trung bình (b) của mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large

Mao quản trung bình xuất hiện trong cấu trúc ZIF-94 được tổng hợp trong bài báo này được cho là từ khe hở của các hạt có kích thước lớn tạo thành do sự kết tụ của các hạt có kích thước nanomet. Rõ ràng, mao quản

trung bình như vậy được gọi là mao quản trung bình thứ cấp. Một điều đáng lưu ý là tại vùng áp suất tương đối  $p/p_0 \geq 0,98$ , giản đồ hấp phụ và giải hấp phụ nitơ của cả hai mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large đều có độ dốc rất thấp, chứng minh cả hai mẫu này đều không chứa mao quản lớn như đã được thảo luận trong [25].

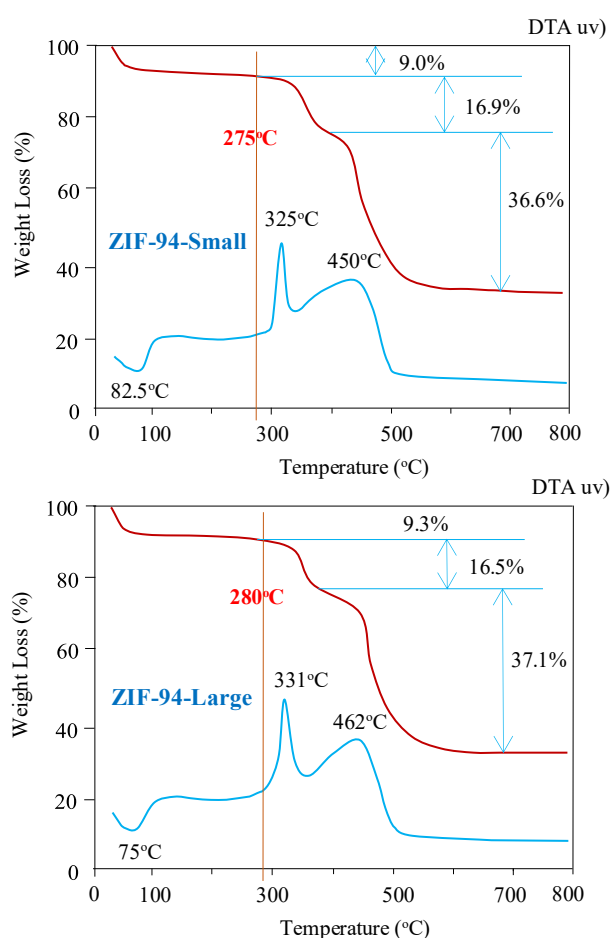
Bề mặt riêng theo BET và Langmuir của mẫu ZIF-94-Small được xác định tương ứng bằng 1.159 và 1.660 m<sup>2</sup>/g, trong khi của mẫu ZIF-94-Large được xác định tương ứng bằng 1.128 và 1.615 m<sup>2</sup>/g. Diện tích bề mặt ngoài đối với mẫu ZIF-94-Small bằng 527 m<sup>2</sup>/g và đối với mẫu ZIF-94-Large được xác định bằng 510 m<sup>2</sup>/g. Diện tích bề mặt ngoài bằng 45,2-45,5% tổng diện tích BET cho thấy các mẫu tổng hợp này có kích thước rất nhỏ và rất đồng đều, như đã thảo luận ở trên. Diện tích cao như vậy chưa từng được bộc lộ trước khi bài báo này được công bố. Nếu như việc tổng hợp ZIF-94 có bề mặt riêng BET cao nhất được ghi nhận bằng 709 m<sup>2</sup>/g [13], thì bề mặt riêng của ZIF-94 được tổng hợp trong báo cáo này rất đáng được ghi nhận, như một đóng góp tích cực vào thành tựu của những người nghiên cứu về vật liệu mao quản tiên tiến thế hệ mới trên thế giới.

Quan sát phân bố mao quản vùng mao quản trung bình trên hình chèn nhỏ (4b) có thể thấy, mao quản trung bình rất tập trung tại vùng 3.8 nm (đối với mẫu ZIF-94-Small) và 3.6 nm (đối với mẫu ZIF-94-Large) với pic cao, sắc nhọn. Bên cạnh đó, cả hai mẫu còn xuất hiện một pic rất yếu ở vùng mao quản trung bình tương ứng tại 7,8 và 8,0 nm.

Tổng thể tích mao quản và thể tích vi mao quản của mẫu ZIF-94-Small tương ứng bằng 0,564 và 0,282 cm<sup>3</sup>/g, của mẫu ZIF-94-Large tương ứng bằng 0,549 và 0,274 cm<sup>3</sup>/g. Rõ ràng thể tích đóng góp từ mao quản trung bình là rất lớn, hứa hẹn sẽ có nhiều ứng dụng trong xúc tác và hấp phụ đối với các phân tử có kích thước lớn.

Hình 5 trình bày giản đồ DTA/TGA của mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large được ghi từ nhiệt độ phòng đến 800 °C. Hai giản đồ này được quan sát thấy có hình dạng rất giống nhau. Cả hai giản đồ DTA này đều xuất hiện một điểm thu nhiệt và hai điểm tỏa nhiệt. Điểm thu nhiệt đặc trưng cho sự mất nước hấp phụ hoặc dung môi còn dư từ các mao quản và các hốc mao quản của vật liệu. Trong giai đoạn thu nhiệt, đường cong TGA ghi nhận mất 9,0 % khối lượng đối với mẫu ZIF-94-Small và 9,3 % khối lượng đối với mẫu ZIF-94-Large. Điểm tỏa nhiệt thứ nhất xung quanh 325 °C đối với mẫu ZIF-94-Small và xung quanh 331 °C đối với mẫu ZIF-94-Large đặc trưng cho sự phân hủy của imidazolone almIM<sup>+</sup>. Điểm tỏa nhiệt thứ hai xung quanh 450 và 462 °C tương

ứng với mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large đặc trưng cho sự phá vỡ cấu trúc khung của ZIF-94. Từ khoảng 600 °C trở đi, giản đồ TGA hầu như không có sự thay đổi khối lượng. Tổng khối lượng mẫu mất đi trong giai đoạn tỏa nhiệt của mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large tương ứng bằng 53,5 và 53,6 %. Như vậy, tổng khối lượng mất đi bởi nhiệt của mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large tương ứng bằng 62,5 và 62,9 %. Khối lượng tưng ứng còn lại bằng 37,5 và 37,1 % được cho là của ZnO không bị phân hủy, phù hợp với các công trình đã báo cáo [11,18,21,26]. Độ bền cấu trúc theo nhiệt độ của mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large tương ứng được xác định bằng 275 và 280 °C.



Hình 5: Giản đồ nhiệt vi sai và nhiệt khối lượng của mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large

Kết quả đặc trưng mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large theo các phương pháp khác nhau được thống kê trong bảng 1. Hiệu suất ZIF-94 tạo thành trong mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large được xác định tương ứng bằng 72,2 và 73,0 %.

Cho đến nay, ZIF-94 được tổng hợp quy mô lớn (khối lượng mẫu 52,8 g) đã được công bố đi từ tiền chất  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  trong dung môi  $CH_3OH$  và THF. ZIF-94 thu được có bề mặt riêng BET bằng  $415 \text{ m}^2/\text{g}$ , tinh thể có kích thước trung bình bằng 275 nm [12]. Rõ

ràng, kết quả thu được từ công trình này vượt trội hơn các kết quả đã công bố trước đây.

Bảng 1: Đặc trưng của mẫu ZIF-94-Small và ZIF-94-Large

Ký hiệu mẫu	ZIF-94-Small	ZIF-94-Large
Độ tinh thể ZIF-94 theo XRD (%)	100	100
Hiệu suất ZIF-94 (theo $Zn^{2+}$ )	72,2	73,0
Kích thước tinh thể (nm)	Theo XRD: 68 Theo TEM: 78 Theo SEM: 80	70 82 85
Bề mặt riêng theo BET, $\text{m}^2/\text{g}$	1.159	1.128
Bề mặt riêng theo Langmuir, $\text{m}^2/\text{g}$	1.660	1.615
Diện tích bề mặt ngoài, $\text{m}^2/\text{g}$	527	510
Tổng thể tích mao quản, $\text{cm}^3/\text{g}$	0,564	0,549
Thể tích vi mao quản, $\text{cm}^3/\text{g}$	0,282	0,274
Phân bố mao quản trung bình tập trung, nm	3,8 (rất mạnh), 7,5 (rất yếu)	3,6 (rất mạnh), 8,0 (rất yếu)
Độ bền nhiệt, °C	275	280

## Kết luận

Vật liệu nano-ZIF-94 lần đầu tiên được tổng hợp từ  $ZnCl_2$  ở quy mô lớn, có bề mặt riêng lớn nhất, trong dung môi ethanol có mặt trimethylamine. Sản phẩm có các chỉ tiêu kỹ thuật: Độ tinh thể bằng 100 %, bề mặt riêng BET bằng  $1.128 \text{ m}^2/\text{g}$ , bề mặt ngoài bằng  $510 \text{ m}^2/\text{g}$ , phân bố mao quản trung bình tập trung tại 3,6 nm, kích thước tinh thể bằng 82 nm (theo TEM), bền nhiệt đến 280 °C, hiệu suất tổng hợp bằng 73,0 %. Quy trình tổng hợp nano-ZIF-94 từ  $ZnCl_2$  ở quy mô lớn trên đây cho độ lặp lại tin cậy, có thể áp dụng để mở rộng quy mô sản xuất, hướng đến thương mại hóa sản phẩm vào thực tiễn.

## Lời cảm ơn

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn Bộ Khoa học và Công nghệ, Quỹ Nafosted và Đại học Bách Khoa Hà Nội đã tài trợ kinh phí nghiên cứu thông qua đề tài NCUD.02-2023.05.

## Tài liệu tham khảo

- S. Aguado, J. Canivet, D. Farrusseng, *Chem. Commun.*, 46(42) (2010) 7999–8001. <https://doi.org/10.1039/C0CC02045A>
- W. Morris, N. He, K.G. Ray, P. Klonowski, H. Furukawa, I.N. Daniels, Y.A. Houndonougbo, M. Asta, O.M. Yaghi, B.B. Laird, *J. Phys. Chem. C*, 116(45) (2012) 24084–24090. <https://doi.org/10.1021/jp307170a>
- T.N. Don, V.D. Thang, P.T. Huyen, P.M. Hao, N.K.D. Hong, *Stud. Surf. Sci. Catal.*, 159 (2006) 197–200. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(06\)81567-3](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(06)81567-3)
- H.K.D. Nguyen, N.T. Dinh, N.L.T. Nguyen, T.N. Don, *J. Porous Mater.*, 24(2) (2017) 559–566. <https://doi.org/10.1007/s10934-016-0291-z>
- H.K.D. Nguyen, T.N. Don, G. Sankar, R.A. Catlow, *Catal. Commun.*, 25 (2012) 125–129. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2011.11.016>
- 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(5) (2016) 392–399. <http://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/35507>
- H.K.D. Nguyen, D.N. Ta, H.N. Ta, *J. Appl. Chem.*, 6(1) (2017) 50–68.
- T.N. Don, L.V. Duong, 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, L.T.N. Quynh, T.T. Hai, *Vietnam J. Catal. Adsorpt.*, 12(3) (2023) 1–16. <https://doi.org/10.51316/jca.2023.041>
- M. Baias, A. Lesage, S. Aguado, J. Canivet, V. Moizan-Basle, N. Audebrand, D. Farrusseng, L. Emsley, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 54(20) (2015) 5971–5976. <https://doi.org/10.1002/anie.201500518>
- T.N. Don, L.V. Duong, N.T.H. Phuong, N.T.M. Thu, N.T.T. Huyen, T.N.T. Huy, N.V. Thanh, D. Mu, N.T. Nghia, P.T.M. Huong, N.T. Linh, H.T.L. Anh, B.T.T. Ha, T.A. Vy, T.T. Hai, *Vietnam J. Catal. Adsorpt.*, 12(4) (2023) 1–18. <https://doi.org/10.62239/jca.2023.060>
- M. Etxebarria-Benavides, O. David, T. Johnson, M.M. Łozińska, A. Orsi, P.A. Wright, S. Mastel, R. Hillenbrand, F. Kapteijn, J. Gascon, *J. Membr. Sci.*, 550 (2018) 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.12.033>
- T. Johnson, M.M. Łozińska, A.F. Orsi, P.A. Wright, S. Hindocha, S. Poulston, *Green Chem.*, 21(20) (2019) 5665–5674. <https://doi.org/10.1039/c9gc00783k>
- T.T. Hai, P.T.M. Huong, T.N.T. Huy, H.T.L. Anh, D.N. Lam, P.Q. Huy, T.N. Don, *Vietnam J. Catal. Adsorpt.*, 13(4) (2024) 79–84. <https://doi.org/10.62239/jca.2024.078>
- T.T. Hai, T.T.T. Vy, L.N. Duong, N.T. Thao, P.T.M. Huong, T.N.T. Huy, L.N.T. Long, N.T.M. Thu, L.V. Duong, T.N. Don, *Vietnam J. Catal. Adsorpt.*, 14(2) (2025) 38–42. <https://doi.org/10.62239/jca.2025.022>
- T.T. Hai, P.T.M. Huong, L.V. Duong, T.N.T. Huy, H.T.L. Anh, L.T.N. Quynh, N.V. Quang, T.A. Vy, T.N. Don, *Vietnam J. Catal. Adsorpt.*, 14(3) (2025) 111–117. <https://doi.org/10.62239/jca.2025.047>
- L. Pasetta, M. Malankowska, C. Téllez, J. Coronas, *Mater. Chem. Phys.*, 295 (2023) 127039. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.127039>
- T.N. Don, L.V. Duong, N.T.H. Phuong, N.T.T. Huyen, T.N.T. Huy, D. Mo, B.T.T. Ha, V.A. Tran, *Can. J. Chem. Eng.*, 103(1) (2025) 311–322. <https://doi.org/10.1002/cjce.25382>
- M.R. Hasan, L. Pasetta, M. Malankowska, C. Téllez, J. Coronas, *Adv. Sustain. Syst.*, 6(3) (2022) 2100317. <https://doi.org/10.1002/adsu.202100317>
- Mercury - The Cambridge Crystallographic Data Centre (CCDC), <https://www.ccdc.cam.ac.uk/solutions/csd-system/components/mercury/> (truy cập ngày 09/05/2020).
- CCDC Structures, <https://www.ccdc.cam.ac.uk/structures/> (truy cập ngày 09/05/2020).
- F. Cacho-Bailo, M. Etxebarria-Benavides, O. Karvan, C. Téllez, J. Coronas, *CrystEngComm*, 19(12) (2017) 1545–1554. <https://doi.org/10.1039/C7CE00086C>
- L. Martínez-Izquierdo, C. Téllez, J. Coronas, *J. Mater. Chem. A*, 10(35) (2022) 18822–18833. <https://doi.org/10.1039/d2ta03958c>
- V. Berned-Samatán, L. Martínez-Izquierdo, E. Abás, C. Téllez, J. Coronas, *Chem. Commun.*, 58(83) (2022) 11681–11684. <https://doi.org/10.1039/d2cc03661d>
- M. Gao, J. Wang, Z. Rong, Q. Shi, J. Dong, *RSC Adv.*, 8(69) (2018) 39627–39632. <https://doi.org/10.1039/c8ra08460b>
- D.N. Ta, H.K.D. Nguyen, B.X. Trinh, Q.T.N. Le, H.N. Ta, H.T. Nguyen, *Can. J. Chem. Eng.*, 96(7) (2018) 1518–1531. <https://doi.org/10.1002/cjce.23155>
- D. Madhav, M. Malankowska, J. Coronas, *New J. Chem.*, 44(47) (2020) 20449–20457. <https://doi.org/10.1039/D0NJ04402D>