



Phản ứng Knoevenagel giữa benzaldehyde và ethyl cyanoacetate trên xúc tác nano-ZIF-90 được tổng hợp từ zinc acetate dihydrate
The Knoevenagel reaction of benzaldehyde with ethyl cyanoacetate on nano-ZIF-90 catalyst synthesized from zinc acetate dihydrate

Tạ Ngọc Thiện Huy^{1,2}, Lê Huyền Trâm², Ninh Thị Phương², Lê Văn Dương²,
Lê Đình Khiêm³, Lê Ngọc Dương⁴, Phạm Thị Hoa⁵, Nguyễn Khánh Diệu Hồng⁶,
Hoàng Như Bình², Đào Quốc Tuy², 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 Viện Kỹ thuật Phòng không – Không quân, Quân chủng Phòng không – Không quân

⁴ Trường Cao đẳng Bách nghệ Hà Nội

⁵ Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

⁶ Viện nghiên cứu Đào tạo và Phát triển Nhân lực, Liên Hiệp Các hội Khoa học và Kỹ thuật Việt Nam

* Email: don.tangoc@hust.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 03/09/2026

Accepted: 28/09/2026

Published: 30/09/2026

Keywords:

Catalyst; Knoevenagel; ZIF-90;
zinc acetate dihydrate;
ethyl (E) α -cyanocinnamate

ABSTRACT

ZIF-90 is a next-generation porous material composed of zinc tetrahedra linked by 2-imidazolecarboxaldehyde (IcaH), exhibiting a Zn–Ica–Zn bond angle (145°) that closely mimics the Si–O–Si linkage in conventional zeolites. Owing to the presence of zinc centers and nitrogen-containing ligands, ZIF-90 possesses both Lewis acidic and basic active sites, making it a promising heterogeneous catalyst. In this study, the catalytic performance of nano-sized ZIF-90, synthesized from zinc acetate dihydrate, was evaluated in the Knoevenagel condensation of benzaldehyde (BA) with ethyl cyanoacetate (ECA) in an aqueous medium. The suitable reaction conditions were established at a 1:1.5 BA:ECA molar ratio, a catalyst loading of 1.5 wt.% (based on BA), a reaction temperature of 70°C , and a reaction time of 6 h. Under these suitable conditions, a BA conversion of 87.21% and an ethyl (E)- α -cyanocinnamate selectivity of 99.15% were achieved.

Giới thiệu

ZIF-90 đã được William Morris và cộng sự [1] tìm ra lần đầu tiên vào năm 2008. Với cấu trúc kiểu SOD (sodalite) tương tự zeolite [2-4], ZIF-90 có mã cấu trúc (CCDC) là 693596, đường kính mao quản bằng 0,35 nm, kích thước hốc lớn của mao quản bằng 1,12 nm [1], chứa cả tâm acid và tâm base [5]. Trên thế giới, ZIF-90 được tổng hợp chủ yếu bằng phương pháp nhiệt dung môi,

sử dụng nguồn kẽm phổ biến là $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [6-14] và $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [15-22], cá biệt sử dụng ZnO [23]. Dung môi chủ yếu là *N,N*-dimethylformamide (DMF) [6,18-20,23], methanol [16,17,21], methanol và DMF [15,22], cùng với chất thêm điển hình là triethylamine (TEA), HCOONa , CH_3ONa [6,9,14].

Trong thời gian gần đây, lần đầu tiên ZIF-90 đã được tổng hợp thành công từ ZnCl_2 [5] và từ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ [24]. ZIF-90 cũng đã được tổng hợp thành công ở Việt

Nam từ $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [15]. Với cấu trúc độc đáo, lại chứa tâm acid và tâm base, nên ZIF-90 được cho là vật liệu mao quản tiên tiến thế hệ mới có nhiều ứng dụng trong thực tiễn, nhất là ứng dụng làm chất xúc tác.

Phản ứng ngưng tụ Knoevenagel đã được tiến hành từ lâu theo phương pháp truyền thống bằng cách sử dụng các chất xúc tác đồng thể như amine, muối amonium, chất lỏng ion, acid amine, acid Lewis và các chất xúc tác cơ kim trong điều kiện đồng thể [25-27]. Tuy nhiên, hệ thống đồng thể thường thực hiện ở nhiệt độ cao, việc thu hồi xúc tác khó khăn, khi tách sản phẩm cần lượng lớn dung môi dẫn đến tạo ra một khối lượng không nhỏ chất thải có nguy cơ gây ô nhiễm môi trường [28]. Về mặt hóa học, phản ứng ngưng tụ Knoevenagel hình thành liên kết $\text{C}=\text{C}$ bằng cách sử dụng các hợp chất methylene hoạt động và aldehyde hoặc ketone làm chất phản ứng. Phản ứng này có thể được tăng tốc nhờ base Brønsted, trong đó, các vị trí base thu hút các proton từ các phân tử methylene bị hấp phụ để tạo thành chất trung gian carbanion. Việc sử dụng các chất xúc tác lưỡng chức năng acid-base trở nên rất hấp dẫn vì các tâm acid và base này có thể kích hoạt đồng thời các điện di và nucleophile [29], có khả năng xúc tác cho các phản ứng nhanh hơn, ít bước hơn và thu được sản phẩm với hiệu suất cao hơn [30].

Trong số các xúc tác dị thể lưỡng chức năng thì xúc tác trên cơ sở ZIFs rất được quan tâm, do trong cấu trúc của ZIFs đã chứa sẵn 2 loại tâm acid và tâm base. Công trình [31] đã thực hiện phản ứng ngưng tụ BA và ECA trên xúc tác nano-ZIF-8 trong các dung môi khác nhau (nước, tetrahydrofuran, hexane, ethanol, DMF, ethyl acetate, toluene và DMSO), cho hiệu suất sản phẩm từ 7-97 % sau 30 phút. Trong đó, hiệu suất sản phẩm Ethyl (E) α -cyanocinnamate (ECC) cao nhất bằng 92 và 97 % tương ứng với dung môi sử dụng là DMSO và DMF. Gần đây, công trình [32] đã khảo sát hoạt tính xúc tác của nano-ZIF-8 trong phản ứng ngưng tụ giữa BA và ECA. Kết quả cho thấy nano-ZIF-8 cho độ chuyển hóa BA trong dung môi nước gần như hoàn toàn sau 3 giờ khi sử dụng xúc tác bằng 5 % khối lượng BA.

Tiếp theo bài báo [15], bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu hoạt tính xúc tác của nano-ZIF-90 được tổng hợp từ zinc acetate dihydrate trong phản ứng ngưng tụ Knoevenagel giữa BA và ECA. Độ bền của xúc tác cũng đã được thảo luận.

Thực nghiệm

Xúc tác và hóa chất

Xúc tác nano-ZIF-90 được tổng hợp theo [15] với các đặc trưng: Bề mặt riêng (BET) bằng $1.051 \text{ m}^2/\text{g}$, kích thước hạt bằng 38 nm (theo SEM), bền nhiệt đến 290

°C, tổng thể tích mao quản bằng $0,472 \text{ cm}^3/\text{g}$, xúc tác có chứa mao quản trung bình tập trung tại 3,7 nm. Hóa chất gồm BA, ECA, ethanol của hãng ADAMAS, Trung Quốc, độ tinh khiết 99 % và nước cất hai lần.

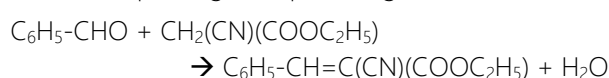
Nghiên cứu xúc tác

Phản ứng ngưng tụ Knoevenagel giữa BA và ECA được thực hiện trong điều kiện có khuấy và gia nhiệt. Cụ thể, tiến hành hòa tan một lượng ECA xác định trong một lượng nước xác định thu được dung dịch A. Tiếp theo, rót một lượng BA xác định vào dung dịch A tạo thành dung dịch B. Dung dịch B được rót vào bình phản ứng chứa sẵn chất xúc tác nano-ZIF-90 và được khuấy trộn ở tốc độ 500 vòng/phút. Tỷ lệ mol BA : ECA bằng 1 : 1,0; 1 : 1,5; 1 : 2,0 và 1 : 2,5. Khối lượng chất xúc tác sử dụng bằng 0; 1,0; 1,5 và 2,0 % (theo khối lượng BA). Nhiệt độ phản ứng bằng 30, 50, 70 và 90 °C. Thời gian phản ứng bằng 4, 6, 8 và 10 giờ. Kết thúc phản ứng, tiến hành lọc tách chất xúc tác, dung dịch cuối cùng được phân tích bằng sắc ký khí – khối phổ (GC-MS). Để nghiên cứu độ bền và tính hiệu quả của xúc tác, sau khi tìm được điều kiện thích hợp, xúc tác được tiến hành liên tiếp trong 7 lần. Sau mỗi lần phản ứng, xúc tác được lọc rửa và sấy khô ở 100 °C trong 3 giờ, phân tích nhiễu xạ tia X (XRD). Xúc tác được phân tích XRD trên máy Siemens D8 Advance–Bruker (Đức), phân tích sản phẩm phản ứng trên máy sắc ký khí Agilent 7890B.

Kết quả và thảo luận

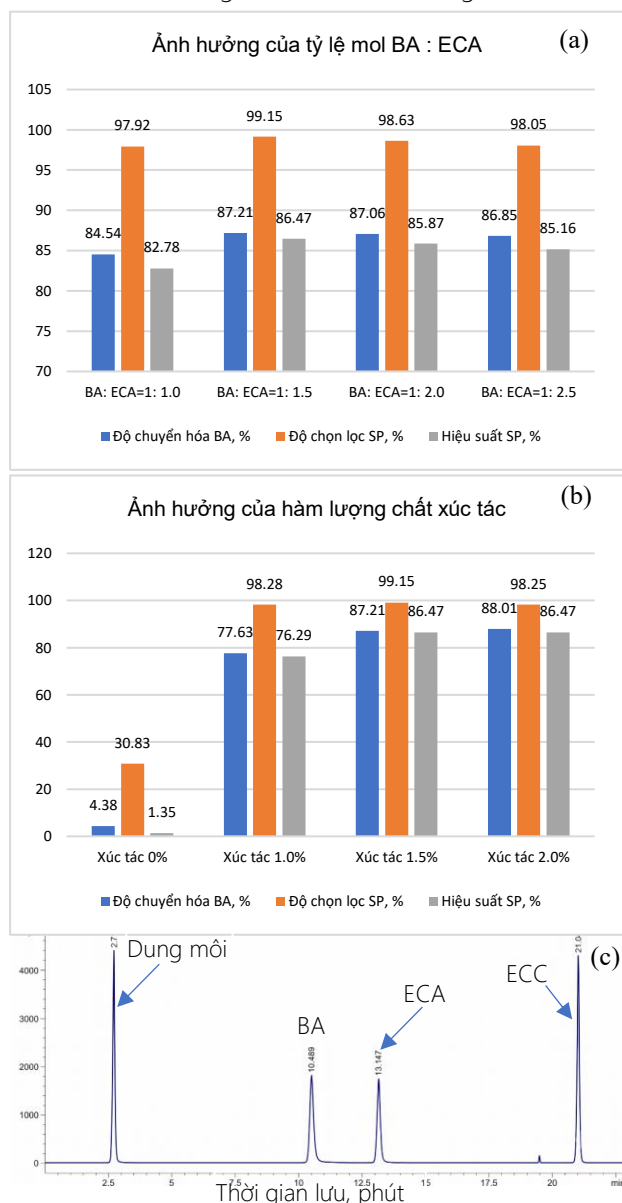
Kết quả nghiên cứu hoạt tính xúc tác

Hoạt tính xúc tác của chất xúc tác nano-ZIF-90 được đánh giá trong phản ứng ngưng tụ Knoevenagel giữa BA và ECA để tạo thành Ethyl (E) α -cyanocinnamate (ECC) theo phương trình phản ứng:



Hình 1a trình bày kết quả khảo sát hoạt tính xúc tác nano-ZIF-90 theo tỷ lệ mol BA : ECA bằng 1 : 1,0; 1 : 1,5; 1 : 2,0 và 1 : 2,5, với các điều kiện khác không thay đổi (khối lượng xúc tác bằng 1,5 % theo khối lượng BA, nhiệt độ phản ứng 70 °C, thời gian phản ứng 6 giờ). Từ hình 1a có thể thấy, khi tỷ lệ mol BA : ECA = 1 : 1,0, độ chuyển hóa BA bằng 84,54 % và đạt cực đại bằng 87,24 % ứng với tỷ lệ mol BA : ECA = 1 : 1,5, giảm nhẹ bằng 87,06 % khi tỷ lệ mol BA : ECA = 1 : 2,0. Đặc biệt, độ chọn lọc ECC lớn nhất (bằng 99,15 %), hiệu suất ECC cũng lớn nhất (bằng 86,47 %) so với các giá trị còn lại ứng với tỷ lệ mol BA : ECA = 1 : 1,5. Kết quả này được cho là tốt hơn khi sử dụng xúc tác ZIF-8 với độ chuyển hóa BA bằng 82 % (25 mg xúc tác, tỷ lệ mol BA : ECA = 7:8, sau

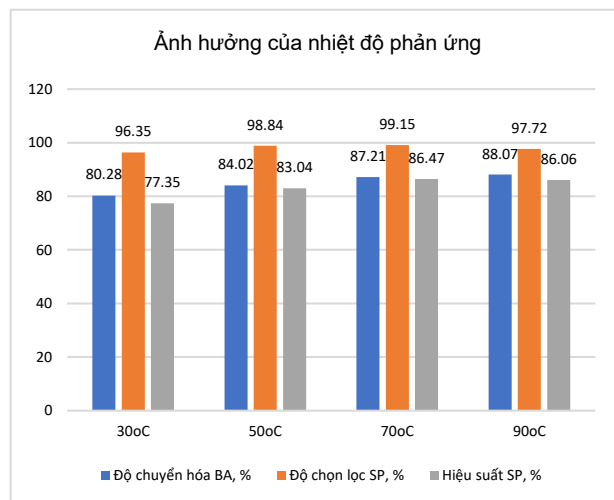
30 phút ở 80 °C trong dung môi H₂O) [33] và bằng 76,5 % (100 mg xúc tác, tỷ lệ mol BA : ECA = 1:1, sau 6 giờ ở 30°C, dung môi toluene) [34]. Kết quả phân tích một mẫu điển hình bằng GC được chỉ ra trong hình 1c.



Hình 1: Ảnh hưởng của tỷ lệ mol BA : ECA (a), hàm lượng chất xúc tác (b) và kết quả phân tích GC một mẫu điển hình (c)

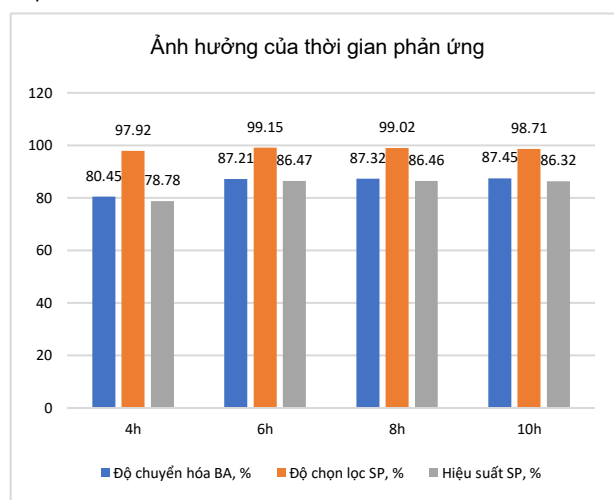
Trên hình 1b, bốn phản ứng thay đổi hàm lượng chất xúc tác bằng 0; 1,0; 1,5 và 2,0 % (so với khối lượng BA), trong khi các điều kiện khác không thay đổi (tỷ lệ mol BA : ECA = 1 : 1,5, 70 °C, 6 giờ) cho độ chuyển hóa BA, độ chọn lọc ECC và hiệu suất ECC thu được khác nhau. Đáng chú ý là khi không sử dụng xúc tác, độ chuyển hóa BA bằng 4,38 %, độ chọn lọc ECC bằng 30,83 %, nên hiệu suất ECC thu được chỉ bằng 1,35 %. Trái lại, cả ba mẫu còn lại sử dụng khối lượng xúc tác bằng 1,0; 1,5 và 2,0 % đều cho kết quả tốt. Tuy nhiên, độ chuyển hóa

BA, độ chọn lọc ECC và hiệu suất ECC tạo thành đạt giá trị cực đại tương ứng bằng 87,21; 99,15 và 86,47 % khi sử dụng khối lượng chất xúc tác bằng 1,5 %.



Hình 2: Ảnh hưởng của nhiệt độ phản ứng

Trên hình 2, ảnh hưởng của nhiệt độ trong phản ứng ngưng tụ BA và ECA cũng đã được khảo sát. Nhiệt độ phản ứng thay đổi bằng 30, 50, 70 và 90 °C trong cùng điều kiện (tỷ lệ mol BA : ECA = 1 : 1,5; 1,5 % xúc tác, 6 giờ), cho độ chuyển hóa BA tăng dần tương ứng bằng 80,28; 84,02; 87,21 và 88,07 %, nhưng độ chọn lọc ECC lại thay đổi không nhiều (tương ứng bằng 96,35; 98,84; 99,15 và 97,72 %), đạt cực đại khi phản ứng được thực hiện ở 70 °C.



Hình 3: Ảnh hưởng của thời gian phản ứng

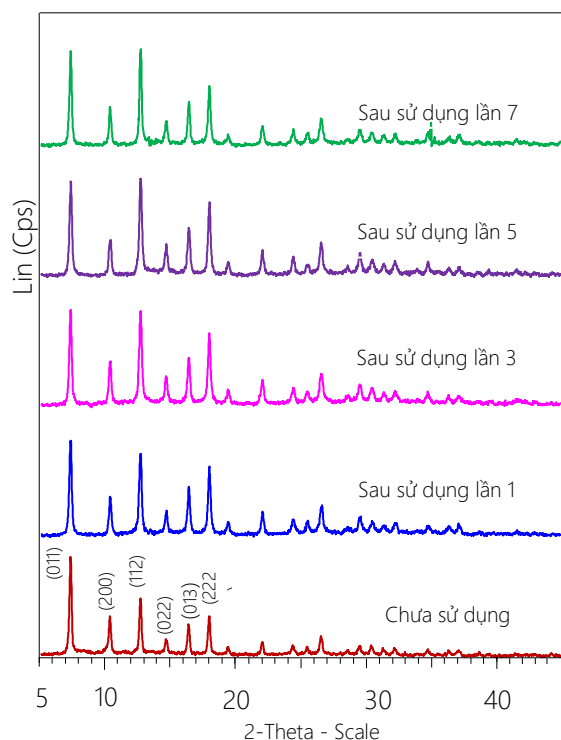
Trên hình 3, khi nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian phản ứng, bốn phản ứng đã được thực hiện trong cùng điều kiện (tỷ lệ mol BA : ECA = 1 : 1,5; 1,5 % xúc tác, 70 °C), với thời gian phản ứng bằng 4, 6, 8 và 10 giờ. Kết quả, trong 4 giờ đầu phản ứng, độ chuyển hóa BA đã tăng nhanh (đến 80,45 %), nhưng tăng chậm sau 6 giờ phản ứng (bằng 87,21 %). Trong những giờ đầu tiên, tốc

độ ngưng tụ BA với ECA gia tăng mạnh mẽ có liên quan đến kích thước hạt nhỏ (38 nm theo SEM) của xúc tác, như đã được thảo luận trong [34].

Trong khoảng thời gian phản ứng 8 và 10 giờ, độ chuyển hóa BA tiếp tục tăng chậm, tương ứng bằng 87,32 và 87,45 %. Tuy vậy, độ chọn lọc ECC lại đạt cực đại bằng 99,15 % trong 6 giờ phản ứng. Kết quả này cho thấy, xúc tác nano-ZIF-90 được sử dụng trong nghiên cứu này, bên cạnh các vi mao quản, còn chứa mao quản trung bình tập trung tại 3,7 nm, đã tạo điều kiện cho các phân tử phản ứng khuếch tán nhanh đến các tâm hoạt tính ngay trong những giờ đầu tiên, phù hợp với nhận định trong [35]. Độ chọn lọc ECC cao và ít thay đổi theo thời gian có thể là do cấu trúc mao quản của xúc tác bền và ổn định trong điều kiện phản ứng đã tiến hành. Như vậy, từ kết quả thu được thông qua 4 thông số đã khảo sát với 16 phản ứng đã được thực hiện trên đây, có thể cho rằng, phản ứng ngưng tụ BA với ECA tỏ ra rất hiệu quả khi sử dụng xúc tác nano-ZIF-90 có hệ thống mao quản phù hợp, và quan trọng là có chứa mao quản trung bình thứ cấp được hình thành bởi sự kết tụ các hạt xúc tác có kích thước nano, nên thuận lợi cho sự hình thành sản phẩm có kích thước cồng kềnh.

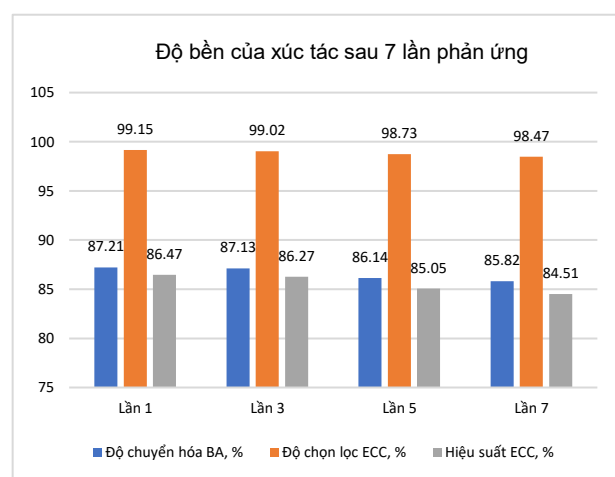
Kết quả kiểm tra độ bền của xúc tác

Để kiểm tra độ bền của xúc tác, chúng tôi đã tiến hành 7 lần phản ứng. Phân tích cấu trúc XRD của chất xúc tác nano-ZIF-90 (pha rắn) và phân tích GC (pha lỏng) sau phản ứng lần 1, lần 3, lần 5 và lần 7.



Hình 4: Giảm đồ XRD của các mẫu xúc tác nano-ZIF-90 chưa sử dụng, sau sử dụng lần 1, lần 3, lần 5 và lần 7.

Hình 4 trình bày giảm đồ XRD của các mẫu xúc tác nano-ZIF-90 chưa sử dụng, xúc tác nano-ZIF-90 sau phản ứng lần 1, lần 3, lần 5 và lần 7, cho thấy cả 5 giảm đồ XRD đều chỉ chứa các pic đặc trưng của ZIF-90, không chứa pha lạ. Điều này chứng tỏ, xúc tác sau mỗi lần phản ứng vẫn bảo toàn cấu trúc ban đầu. Tuy vậy, nếu quan sát kỹ sẽ thấy đường nền của các mẫu xúc tác sau phản ứng đều không phẳng và trơn tru như ZIF-90 ban đầu. Đồng thời, cường độ của 4 pic đặc trưng nhất tại các giá trị $2\theta = 7,4^\circ; 12,8^\circ; 16,5^\circ$ và $18,0^\circ$ sinh ra từ sự phản xạ của các mặt phẳng tinh thể (0 1 1), (1 1 2), (0 1 3) và (2 2 2) trong ZIF-90 [1] đã có sự tăng giảm, nhưng không nhiều.



Hình 5: Hiệu quả sử dụng xúc tác sau 7 lần phản ứng

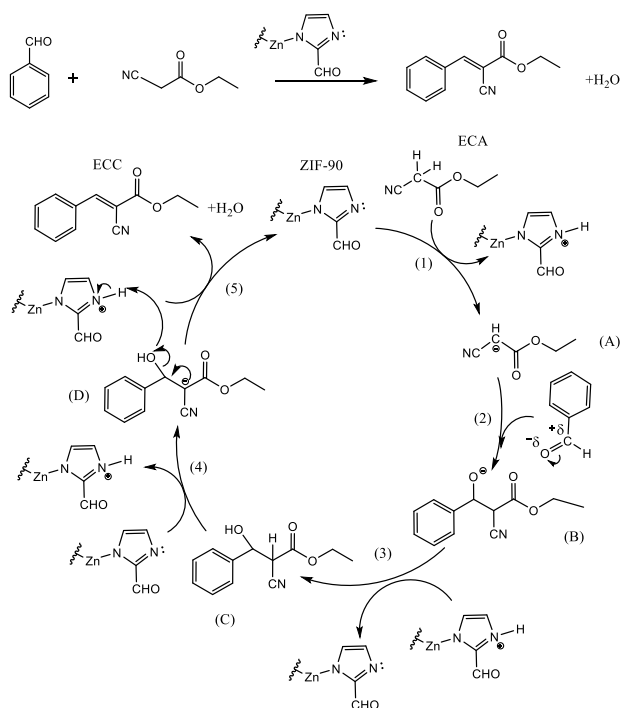
Kết quả phân tích trên hình 5 cho thấy, độ chuyển hóa BA và độ chọn lọc ECC chỉ giảm rất ít sau mỗi lần phản ứng. Xúc tác sau 7 lần phản ứng vẫn cho độ chuyển hóa BA bằng 85,82 % và độ chọn lọc ECC bằng 98,47 %, chứng tỏ đây là xúc tác bền và có thể sử dụng nhiều lần cho phản ứng đã lựa chọn.

Vai trò của xúc tác trong phản ứng

Phản ứng ngưng tụ Knoevenagel giữa BA và ECA trên xúc tác ZIF-90 để tạo thành ECC được dự đoán (hình 6) diễn ra theo 5 giai đoạn sau đây:

- Giai đoạn (1): Trước hết, xúc tác ZIF-90 chứa nguyên tử N có tính base sẽ tách nguyên tử H linh động của nhóm $-CH_2-$ trong ECA tạo ra carbanion trung gian (A).
- Giai đoạn (2): Carbanion trung gian (A) sẽ tấn công vào nguyên tử C mang điện dương trong nhóm $-CH=O$ của BA tạo ra sản phẩm trung gian (B).
- Giai đoạn (3): Sản phẩm trung gian (B) sẽ lấy H^+ từ ZIF-90- H^+ tạo thành aldol (C).
- Giai đoạn (4): Aldol (C) chứa nguyên tử H_α linh động sẽ bị tách ra nhờ tâm base của xúc tác ZIF-90 tạo ra carbanion trung gian (D).

- Giai đoạn (5): H^+ trong ZIF-90- H^+ kết hợp cùng nhóm OH^- trong carbanion trung gian (D) tách ra để tạo thành sản phẩm cuối cùng là ECC và hoàn trả lại xúc tác ZIF-90.



Hình 6: Các giai đoạn phản ứng ngưng tụ Knoevenagel giữa BA và ECA trên xúc tác ZIF-90 đề xuất.

Kết luận

Đã nghiên cứu hoạt tính xúc tác của nano-ZIF-90 được tổng hợp từ zinc acetate dihydrate trong phản ứng ngưng tụ Knoevenagel giữa BA và ECA trong môi trường nước. Kết quả thu được đã chứng tỏ nano-ZIF-90 là xúc tác tốt cho phản ứng này. Trong điều kiện thích hợp với tỷ lệ mol BA : ECA = 1 : 1,5; xúc tác 1,5 % (so với khối lượng BA), nhiệt độ 70 °C, thời gian 6 giờ - phản ứng cho độ chuyển hóa BA đạt 87,21 % và độ chọn lọc sản phẩm ECC bằng 99,15 %.

Kết quả trên cũng chứng minh rằng, xúc tác nano-ZIF-90 bền trong điều kiện phản ứng đã tiến hành và có thể tái sử dụng không ít hơn 7 lần.

Kết quả này mở ra một cơ hội tốt để tổng hợp ECC làm dung môi hữu cơ quan trọng thay thế hàng nhập khẩu tại Việt Nam.

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

- William Morris, Christian J. Doonan, Hiroyasu Furukawa, Rahul Banerjee, Omar M. Yaghi, J. Am. Chem. Soc., 130 (2008) 12626–12627. <https://doi.org/10.1021/ja805222x>
- Ta Ngoc Don, Vu Dao Thang, Pham Thanh Huyen, Pham Minh Hao, Nguyen Khanh Dieu 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)
- Hong K.D. Nguyen, Ngo T. Dinh, Nga L.T. Nguyen, Don Ta Ngoc, J. Porous Mater., 24(2) (2017) 559–566. <https://doi.org/10.1007/s10934-016-0291-z>
- Hong K.D. Nguyen, Ta Ngoc Don, Gopinathan Sankar, Richard A. Catlow, Catal. Commun., 25 (2012) 125–129. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2011.11.016>
- Ta Ngoc Don, Le Van Duong, Nguyen Thi Hong Phuong, Nguyen Thi Thu Huyen, Ta Ngoc Thien Huy, Danh Mo, Bui Thi Thanh Ha, Vy Anh Tran, Can. J. Chem. Eng., 103(1) (2025) 311–322. <https://doi.org/10.1002/cjce.25382>
- Ta Ngoc Don, Le Van Duong, Nguyen Thi Hong Phuong, Nguyen Thi Minh Thu, Nguyen Thi Thu Huyen, Trinh Xuan Bai, Ta Ngoc Thien Huy, Danh Mo, Ngo Trong Nghia, Ha Thi Lan Anh, Nguyen Thi Linh, Bui Thi Thanh Ha, Le Thi Nhu Quynh, Trinh Thi Hai, Vietnam J. Catal. Adsorpt., 12(3) (2023) 1–16. <https://doi.org/10.51316/jca.2023.041>
- Hung-Ying Chen, Chih-Wei Chang, J. Phys. Chem. C, 124(16) (2020) 8854–8860. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c01472>
- Yuting Lei, Guihua Zhang, Qinglan Zhang, Ling Yu, Hua Li, Haili Yu, Yi He, Nat. Commun., 12(1) (2021) 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24830-1>
- Ander Chapartegui-Arias, Anna Raysyan, Ana M. Belenguer, Carsten Jaeger, Teodor Tchopilov, Carsten Prinz, Carlos Abad, Sebastian Beyer, Rudolf J. Schneider, Franziska Emmerling, Chem. Eur. J., 27 (2021) 9414–9421. <https://doi.org/10.1002/chem.202100803>
- Yong Pan, Xi Yu, Sep. Purif. Technol., 237 (2020) 116330. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116330>
- Justyna Rogacka, Agnieszka Seremak, Azahara Luna-Triguero, Filip Formalik, Ismael Matito-Martos, Lucyna Firlej, Sofia Calero, Bogdan Kuchta, Chem. Eng. J., 403 (2021) 126392. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126392>
- Yong Pan, Rui Xie, BaoMing Xu, Chi Chen, Microporous Mesoporous Mater., 320 (2021) 111086. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111086>
- Chaochao Chen, Margarita Vázquez-González, Michael P. O'Hagan, Yu Ouyang, Zhanhui Wang, Itamar Willner, Small, 18(11) (2022) 2104420. <https://doi.org/10.1002/smll.202104420>

14. Kaixun Zhu, Yuncong Li, Zhengyi Li, Yixuan Liu, Hongguo Wu, Hu Li, *Chem. Commun.*, (2022) Advance Article. <https://doi.org/10.1039/D2CC04643A>
15. Ta Ngoc Thien Huy, Le Huyen Tram, Nguyen Van Thanh, Tran Thi Thao Vy, Le Ngoc Duong, Nhu Thi Thao, Bui Thi Thanh Ha, Ninh Thi Phuong, Le Van Duong, Ta Ngoc Don, *Vietnam J. Catal. Adsorpt.*, 14(2) (2025) 71–76. <https://doi.org/10.62239/jca.2025.018>
16. Meizhen Gao, Jing Wang, Zhenghao Rong, Qi Shi, Jinxiang Dong, *RSC Adv.*, 8 (2018) 39627–39634. <https://doi.org/10.1039/C8RA08460B>
17. Qi Shi, Jing Wang, Hua Shang, Honghao Bai, Yu Zhao, Jiangfeng Yang, Jinxiang Dong, Jinping Li, *Sep. Purif. Technol.*, 230 (2020) 115850. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115850>
18. Zemin Ji, Zijin Zhang, Weifeng Lv, Yanyao Shi, Kai Wang, Shumin Ni, Hongchao Ma, Meiwen Cao, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 677 (2023) 132338. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132338>
19. Xianchun Chen, Wenjun Cai, Lu Wang, Bo Wang, *J. Am. Chem. Soc.*, 146(33) (2024) 23138–23145. <https://doi.org/10.1021/jacs.4c05044>
20. Yujie Li, Huining Chai, Zhishuang Yuan, Ziyang Zhang, Yiming Zhao, Kun Yu, Yingjie Sun, Guangyao Zhang, *Talanta*, 276 (2024) 126253. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.126253>
21. Aljaž Škrjanc, Amalija Golobič, Matjaž Mazaj, Matej Huš, Blaž Likozar, Nataša Zabukovec Logar, *Microporous Mesoporous Mater.*, (2025) 113453. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2024.113453>
22. Ciara Byrne, Matjaž Mazaj, Nataša Zabukovec Logar, *Mater. Chem. Phys.*, 332 (2025) 130143. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.130143>
23. Haiwei Li, Xiao Feng, Yuexin Guo, Didi Chen, Rui Li, Xiaoqian Ren, Xin Jiang, Yuping Dong, Bo Wang, *Sci. Rep.*, 4 (2014) 4366. <https://doi.org/10.1038/srep04366>
24. Ta Ngoc Thien Huy, Le Van Duong, Tran Thi Thao Vy, Le Ngoc Duong, Bui Thi Thanh Ha, Trinh Xuan Bai, Nguyen Thi Linh, Nguyen Thi Hong Phuong, Ta Ngoc Don, *Vietnam J. Catal. Adsorpt.*, 14(3) (2025) 139–144. <https://doi.org/10.62239/jca.2025.052>
25. D. Elhamifar, S. Kazempoor, B. Karimi, *Catal. Sci. Technol.*, 6 (2016) 4318–4326. <https://doi.org/10.1039/C5CY01666E>
26. D.K. Dumbre, T. Mozammel, P.R. Selvakannan, S.B.A. Hamid, V.R. Choudhary, S.K. Bhargava, *J. Colloid Interface Sci.*, 441 (2015) 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.11.018>
27. G.B.B. Varadwaj, S. Rana, K.M. Parida, *Dalton Trans.*, 42 (2013) 5122–5129. <https://doi.org/10.1039/C3DT32495H>
28. A. Ying, L. Wang, F. Qiu, H. Hu, J. Yang, C. R. *Chim.*, 18 (2015) 223–232. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2014.05.012>
29. D. Wang, B. Wang, Y. Ding, H. Wu, P. Wu, *Chem. Commun.*, 51 (2016) 12817–12820. <https://doi.org/10.1039/C6CC06779D>
30. P. Li, C.-Y. Cao, Z. Chen, H. Liu, Y. Yu, W.-G. Song, *Chem. Commun.*, 48 (2012) 10541–10543. <https://doi.org/10.1039/C2CC35718F>
31. Y. Zhang, X. Zhang, R. Bai, X. Hou, J. Li, *Catalysts*, 8 (2018) 315. <https://doi.org/10.3390/catal8080315>
32. Sang-Wha Lee, Vy Anh Tran, Le Thi Nhu Quynh, Thu-Thao Thi Vo, Phuc An Nguyen, Ta Ngoc Don, Yasser Vasseghian, Hung Phan, *Environ. Res.*, 204(D) (2022) 112364. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112364>
33. M.N. Timofeeva, I.A. Lukoyanov, V.N. Panchenko, S.H. Jung, *Russ. Chem. Bull.*, 71 (2022) 599–612. <https://doi.org/10.1007/s11172-022-3458-6>
34. P.D. Du, N.V.D. Thanh, N.T. Hieu, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, (2019) 1–8. <https://doi.org/10.1155/2019/6707143>
35. 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>