

Impact of AB-8 Macroporous Adsorption Resin on the Recovery and Antioxidant Activity of Phenolic Compounds Derived From Lignin

Thi My Tam Luu¹⁺, Vinh Tien Nguyen^{2*}

¹Nguyen Tat Thanh University, Vietnam

²Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam

*Corresponding author. Email: tiennv@hcmute.edu.vn

⁺Institute of Interdisciplinary Sciences and Nguyen Tat Thanh University Center for Hi-Tech Development, Sai Gon Hi-Tech Park, Ho Chi Minh City

ARTICLE INFO

Received: 21/08/2025
Revised: 10/09/2025
Accepted: 23/09/2025
Published: 28/11/2025

KEYWORDS

Lignin valorization;
Lignin oxidation;
Phenolic enrichment;
Macroporous AB-8 resin;
Antioxidation.

ABSTRACT

Lignin, a polyphenol-rich byproduct of the wood industry, represents a potential source of natural antioxidants but is limited by its complex structure and inactive impurities. For the first time, AB-8 macroporous adsorption resin was employed as a selective adsorbent to enhance the recovery efficiency and antioxidant activity of phenolic compounds after lignin oxidation with the H_2O_2/Cu^{2+} system. Experiments on model compounds (vanillin, syringaldehyde, and *p*-hydroxybenzaldehyde) demonstrated that AB-8 resin significantly improved recovery yields, particularly for *p*-hydroxybenzaldehyde, which has not been reported in previous studies. This highlights the pivotal role of AB-8 in the purification and enrichment of phenolics. In practical application to oxidized lignin, AB-8-treated extracts exhibited an 8.9% increase in total polyphenol content and superior antioxidant capacity compared with the non-adsorbed sample, with IC_{50} reduced from 18.89 to 13.59 $\mu g/mL$ and the antioxidant activity index (AAI) rising from 1.32 to 1.84, approaching that of Butylated Hydroxytoluene (AAI = 2.51). These results confirm AB-8 as an efficient and scalable adsorbent for the production of natural antioxidants.

Ảnh hưởng của nhựa AB-8 đến hiệu suất và hoạt tính chống oxy hóa của các chất Phenolic từ Lignin

Luu Thị Mỹ Tâm¹⁺, Nguyễn Vinh Tiến^{2*}

¹Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Việt Nam

²Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

*Tác giả liên hệ. Email: tiennv@hcmute.edu.vn

⁺ Viện Khoa học Liên ngành và Trung tâm Phát triển Công nghệ cao Đại học Nguyễn Tất Thành, Khu Công nghệ cao Thành phố Hồ Chí Minh

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 21/08/2025
Ngày hoàn thiện: 10/09/2025
Ngày chấp nhận đăng: 23/09/2025
Ngày đăng: 28/11/2025

TỪ KHÓA

Tăng giá trị lignin;
Oxy hóa lignin;
Làm giàu phenolic;
Nhựa hấp phụ AB-8;
Kháng oxy hóa.

TÓM TẮT

Lignin, phụ phẩm giàu polyphenol từ công nghiệp gỗ, là nguồn tiềm năng cho chất chống oxy hóa tự nhiên nhưng bị hạn chế bởi cấu trúc phức tạp và tạp chất không hoạt tính. Lần đầu tiên, nhựa trao đổi AB-8 được sử dụng làm vật liệu hấp phụ chọn lọc nhằm nâng cao hiệu quả thu hồi và hoạt tính chống oxy hóa của các hợp chất phenolic sau quá trình oxy hóa lignin bằng hệ H_2O_2/Cu^{2+} . Thí nghiệm trên các hợp chất mô hình (vanillin, syringaldehyde, *p*-hydroxybenzaldehyde) cho thấy nhựa AB-8 có khả năng cải thiện đáng kể hiệu suất thu hồi, đặc biệt với *p*-hydroxybenzaldehyde, điều mà chưa được đề cập đến trong những nghiên cứu trước đây. Qua đó khẳng định vai trò then chốt của AB-8 trong việc tinh sạch và làm giàu phenolic. Ứng dụng thực tế cho lignin sau khi oxy hóa, cao chiết có hấp phụ với nhựa AB-8 có tổng hàm lượng polyphenol tăng 8,9% và khả năng chống oxy hóa vượt trội so với mẫu không hấp phụ, với IC_{50} giảm từ 18,89 xuống 13,59 $\mu g/mL$ và chỉ số AAI (hoạt tính chống oxy hóa) tăng từ 1,32 lên 1,84, gần bằng Butylated Hydroxytoluene (AAI = 2,51). Kết quả khẳng

định AB-8 là vật liệu hấp phụ hiệu quả, khả thi ở quy mô lớn cho sản xuất chất chống oxy hóa tự nhiên.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2025.1982>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Trong thế giới ngày càng hướng đến phát triển bền vững, việc tận dụng tối đa nguồn tài nguyên tái tạo trở thành ưu tiên hàng đầu của khoa học và công nghệ. Một trong những nguồn tài nguyên từng bị xem là phụ phẩm ít giá trị – lignin – đang dần được chú ý có vai trò như một "kho báu sinh học" chưa được khai phá đầy đủ [1]. Là loại polymer tự nhiên với trữ lượng lớn thứ hai trên Trái Đất, lignin chứa rất nhiều đơn vị polyphenol trong cấu trúc với nhiều tiềm năng ứng dụng [2]. Tuy nhiên, cấu trúc polymer phân nhánh, chéo nối phức tạp của lignin cũng chính là rào cản lớn nhất khiến việc trích ly và làm giàu các hợp chất hoạt tính từ nó trở nên khó khăn. Hiện nay, các phương pháp phân cắt lignin để tạo ra các monomer phenolic như vanillin (Va), syringaldehyde (Sy) hay *p*-hydroxybenzaldehyde (HBA) đang nhận được sự quan tâm đặc biệt [1], [3], [4]. Trong số các phương pháp được đề xuất, phương pháp oxy hóa bằng hydrogen peroxide (H_2O_2) có xúc tác Cu^{2+} được quan tâm. Đầu tiên, ion Cu^{2+} xúc tác cho quá trình phân hủy H_2O_2 tạo ra gốc hydroxyl ($\bullet OH$) là tác nhân oxy hóa mạnh. Các tác nhân này sẽ tấn công vào liên kết C-C, C-O trong cấu trúc lignin gây ra sự cắt mạch polymer để tạo ra hỗn hợp nhiều sản phẩm khác nhau [3]. Ưu điểm của hệ xúc tác này là thân thiện môi trường, chi phí thấp và dễ ứng dụng ở quy mô lớn so với các hệ xúc tác kim loại quý khác [3], [5]. Tuy nhiên, hỗn hợp sản phẩm sau oxy hóa lignin vẫn tồn tại dưới dạng hỗn hợp với nhiều tạp chất khó loại bỏ như axit hữu cơ, carbohydrate phân hủy, và các hợp chất không mong muốn khác [3]. Điều này đặt ra một câu hỏi mang tính then chốt: Làm thế nào để tinh sạch và làm giàu các hợp chất phenolic mục tiêu một cách hiệu quả, chọn lọc và dễ thực hiện ở quy mô lớn?

Trong bối cảnh đó, công nghệ hấp phụ nổi lên như một giải pháp khả thi. Trong số nhiều vật liệu, nhựa AB-8 nổi bật nhờ sự kết hợp hài hòa giữa đặc tính cấu trúc và hóa lý. Bên cạnh ưu điểm về diện tích bề mặt lớn, độ xốp cao, nhựa AB-8 còn có tính kỵ nước; do đó, nó có khả năng tương tác chọn lọc với polyphenol thông qua tương tác kỵ nước, π - π và lực Van der Waals, giúp nâng cao hiệu suất tách chiết [6], [7]. Điều này giúp nhựa AB-8 có ưu thế hơn so với silica gel. Bên cạnh đó, nhựa AB-8 có độ bền cao, nó có thể tái sinh nhiều lần bằng dung môi thông thường mà không làm suy giảm đáng kể hiệu quả hấp phụ, qua đó giảm chi phí và tăng tính bền vững. Việc kết hợp quá trình oxy hóa lignin với hấp phụ chọn lọc bằng AB-8 mở ra một chuỗi quy trình xanh – sạch – hiệu quả, phù hợp định hướng hóa học xanh và kinh tế tuần hoàn.

Xuất phát từ những nền tảng đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm (i) khảo sát hiệu quả của quá trình hấp phụ – giải hấp bằng nhựa AB-8 trong việc làm giàu các hợp chất phenolic từ lignin đã oxy hóa, (ii) so sánh đặc tính của hai mẫu chiết: có và không sử dụng nhựa hấp phụ và (iii) đánh giá hoạt tính kháng oxy hóa của các mẫu thu được bằng các phương pháp phổ biến như Folin–Ciocalteu và DPPH. Thông qua đó, nghiên cứu không chỉ đề xuất một hướng tiếp cận khả thi trong xử lý lignin theo hướng sinh học, mà còn góp phần mở rộng ứng dụng thực tiễn của lignin trong lĩnh vực dược phẩm và thực phẩm chức năng – những ngành đang ngày càng tìm kiếm các nguồn chất chống oxy hóa từ thiên nhiên, hiệu quả và an toàn.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Khảo sát hấp phụ các aldehyde thơm bằng nhựa AB-8

Quy trình khảo sát được tham khảo từ nghiên cứu [8]. Đầu tiên, dung dịch từng chất chuẩn vanillin (Va), syringaldehyde (Sy), *p*-hydroxybenzaldehyde (HBA) được pha với nồng độ 50 ppm trong nước cất. Thêm 2 g nhựa hấp phụ AB-8 vào mỗi 50 mL dung dịch chuẩn này và lắc đều trên máy lắc tròn với tốc độ 200 vòng/phút, sau mỗi 30 phút lấy mẫu đo hấp thụ UV ở bước sóng 230 nm đối với Va, 216 nm cho Sy và 284 nm cho HBA. Nồng độ còn lại của các aldehyde thơm trong dung dịch được xác định từ phương trình đường chuẩn của ba chất này trong nước.

Quá trình giải hấp với ethanol được thực hiện sau khi nhựa AB-8 đã được lấy ra khỏi dung dịch hấp phụ. Cụ thể, cho toàn bộ nhựa AB-8 đã hấp phụ xong vào erlen mới, thêm vào mỗi erlen 50 mL dung môi ethanol. Các erlen được lắc trên máy lắc tròn với tốc độ 200 vòng/phút, cách mỗi 30 phút thì hút mẫu ra đo UV – vis một lần để kiểm tra khả năng giải hấp của nhựa. Tổng thời gian cho quá trình giải hấp 1 lần và 2 lần lần lượt là 150 phút và 60 phút.

Các hiệu suất hấp phụ (A%) và giải hấp phụ (D%) được xác định theo công thức

$$A (\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$D (\%) = \frac{C_d \times V_d}{(C_0 - C_e) \times V_i} \times 100\% \quad (2)$$

Trong đó,

C_0 là nồng độ ban đầu của dung dịch hấp phụ ($\mu\text{g/mL}$);

C_e là nồng độ cân bằng của dung dịch hấp phụ ($\mu\text{g/mL}$);

C_d là nồng độ cân bằng của dung dịch giải hấp ($\mu\text{g/mL}$);

V_d là thể tích của dung dịch giải hấp (mL);

V_i là thể tích của dung dịch trong erlen sau khi hấp phụ (mL).

Khả năng hấp phụ (Q_e) và khả năng giải hấp (Q_d) của nhựa AB-8 được xác định theo công thức

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V_0}{W} \text{ (mg/g nhựa)} \quad (3)$$

$$Q_d = \frac{C_d \times V_d}{W} \text{ (mg/g nhựa)} \quad (4)$$

Trong đó,

V_0 là thể tích dung dịch ban đầu đưa vào erlen (mL);

W là khối lượng nhựa hấp phụ ở mỗi erlen (g).

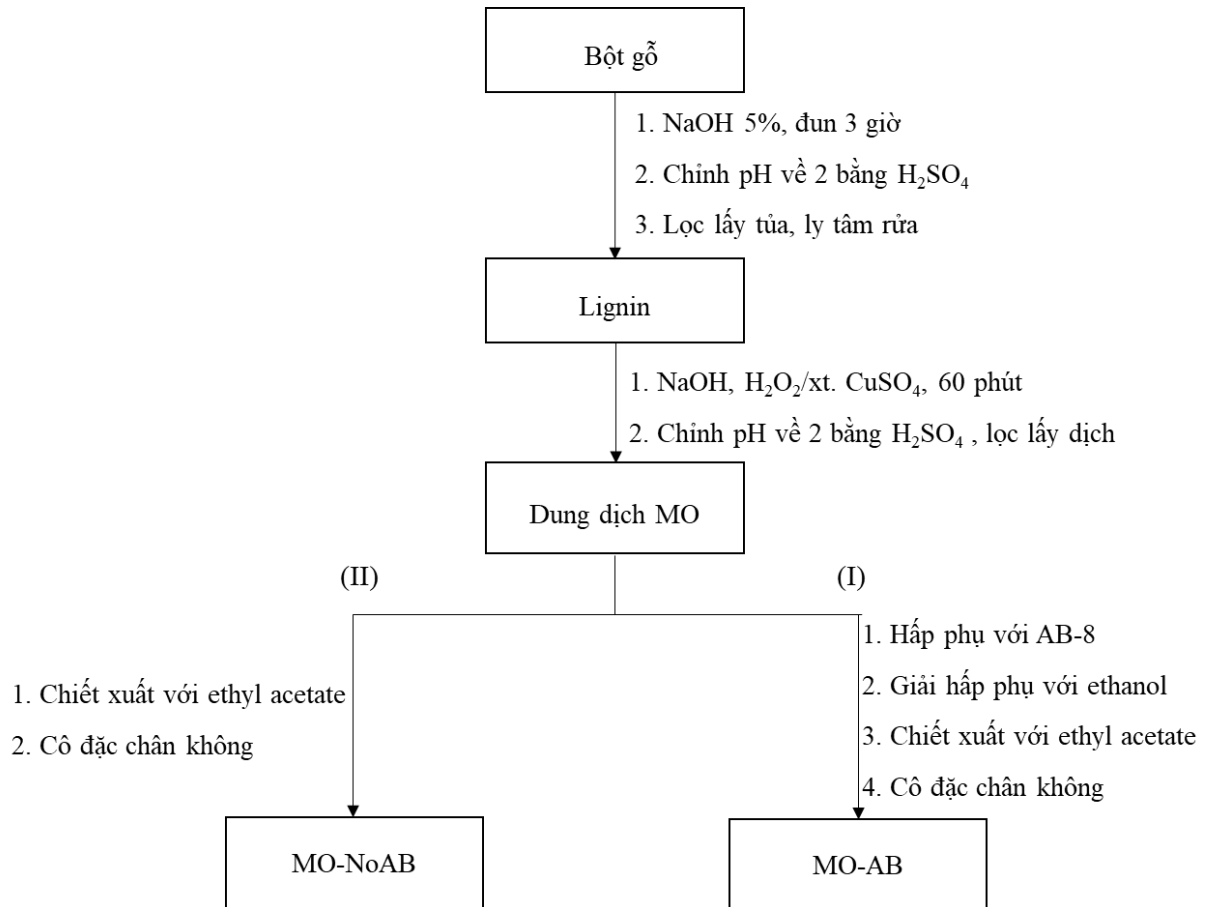
2.2. Điều chế, oxy hóa cắt mạch lignin và xử lý với AB-8

Lignin được điều chế từ bột gỗ của nhà máy sản xuất gỗ tại địa phương. Đầu tiên, ngâm bột gỗ vào dung dịch NaOH 5%, hỗn hợp màu nâu được khuấy gia nhiệt ở 90 °C trong 3 giờ. Sau đó, hỗn hợp được lọc để thu lấy dung dịch kiềm chứa lignin ở dạng hòa tan. Dung dịch này được đem đi chỉnh pH đến 2 bằng acid H₂SO₄ 5 M để thu được kết tủa màu nâu. Kết tủa này sau đó được rửa - ly tâm với nước cất 5 lần với tốc độ 10000 rpm, 10 phút/lần. Cuối cùng, kết tủa được chuyển qua đĩa petri, để khô hoàn toàn ở nhiệt độ phòng.

Quy trình oxy hóa lignin được tham khảo từ nghiên cứu trước đó với một số điều chỉnh để phù hợp với điều kiện thí nghiệm thực tế [9] (Hình 1). Đầu tiên, hòa tan 0,12 g bột lignin trong 60 mL dung dịch NaOH 5% (w/w). Thêm vào hỗn hợp 162 μL dung dịch H₂O₂ 30% (v/v) và 120 μL dung dịch CuSO₄.5H₂O. Đun hồi lưu hỗn hợp trong 60 phút. Sau khi phản ứng kết thúc và dung dịch nguội, điều chỉnh pH về 2 bằng dung dịch H₂SO₄. Lọc hỗn hợp để tách riêng phần tủa và phần dịch. Dịch lọc chứa các monome và oligome lignin oxy hóa được gọi là dung dịch MO. Dung dịch này được định mức thể tích chính xác và chia làm hai phần (I) và (II) để xử lý tiếp theo.

+ Mẫu (I): Dung dịch MO được hấp phụ với nhựa trao đổi ion AB-8. Sau đó, phần nhựa hấp phụ được giải hấp bằng 50 mL ethanol (v/v). Dung dịch ethanol sau giải hấp được cô đặc chân không cho đến khi khô hoàn toàn. Phần cặn rắn thu được được hòa tan trong 25 mL nước cất và xử lý bằng siêu âm. Dung dịch sau đó được chiết lỏng-lỏng bằng 25 mL ethyl acetate/lần. Pha hữu cơ (ethyl acetate) được thu và cô đặc chân không để thu được sản phẩm cuối là cao rắn màu nâu sẫm.

+ Mẫu (II): Dịch MO được xử lý tương tự như mẫu (I) nhưng không thực hiện bước hấp phụ bằng nhựa AB-8 và giải hấp bằng ethanol. Sau khi chiết lỏng-lỏng với ethyl acetate và cô đặc chân không, thu được sản phẩm cao rắn dùng để so sánh hiệu quả hấp phụ.



Hình 1. Sơ đồ điều chế, oxy hóa và xử lý hấp phụ.

2.3. Xác định tổng hàm lượng polyphenol

Hàm lượng polyphenol tổng được xác định bằng phương pháp Folin–Ciocalteu [10]. Cân 5 mg mẫu vào hũ bi, thêm 1 mL ethanol (v/v) và hòa tan hoàn toàn bằng siêu âm. Hút 0,1 mL dung dịch mẫu cho vào ống nghiệm, sau đó lần lượt thêm 3 mL thuốc thử Folin–Ciocalteu 10% (v/v) và 2 mL Na_2CO_3 10% (w/w). Định mức đến 10 mL bằng nước cất, lắc đều và ủ trong bóng tối 30 phút. Mẫu sau đó được đo độ hấp thụ tại bước sóng 760 nm bằng máy UV–Vis.

Tổng hàm lượng polyphenol được nội suy từ phương trình tuyến tính của gallic acid xây dựng từ các nồng độ chuẩn 2; 4; 8; 10 và 20 $\mu\text{g}/\text{mL}$. Phương trình đường chuẩn: $y = 0,0942x + 0,0841$ ($R^2 = 0,9980$). Kết quả đương lượng gallic acid ($\text{mg}_{\text{GAE}}/\text{L}$) dựa trên đường chuẩn được tính theo công thức [11]:

$$\text{GAE} \left(\frac{\text{mg}_{\text{GAE}}}{\text{L}} \right) = \frac{A_m - 0,0841}{0,0942} \quad (5)$$

Trong đó,

GAE là đương lượng gallic acid ($\text{mg}_{\text{GAE}}/\text{L}$);

A_m là độ hấp thụ của mẫu thử.

Tổng hàm lượng polyphenol được tính toán từ đương lượng gallic acid (GAE) và nồng độ mẫu thử, $c_m = 50 \mu\text{g}/\text{mL}$.

$$\text{TPC} (\%) = \frac{\text{GAE}}{50} \times 100\% \quad (6)$$

2.4. Phương pháp loại bỏ gốc tự do DPPH

Hoạt tính loại bỏ gốc tự do DPPH được xác định theo công bố [12] với một số thay đổi cho phù hợp với thực nghiệm. Cân 0,015 g mẫu hòa tan trong 10 mL ethanol 70% (v/v) để thu dung dịch gốc 1500 µg/mL, sau đó pha loãng thành các nồng độ 750; 375; 187,5; 93,25 và 47,875 µg/mL. Dung dịch DPPH được pha ở nồng độ 25 µg/mL trong ethanol 70% (v/v). Tiến hành phản ứng bằng cách trộn 3,9 mL dung dịch DPPH với 0,1 mL dung dịch mẫu thử ở các nồng độ tương ứng, lắc đều và để phản ứng xảy ra trong tối 60 phút ở nhiệt độ phòng. Đo độ hấp thụ tại bước sóng 517 nm. Mẫu blank sử dụng ethanol 70% thay thế dung dịch DPPH, trong khi mẫu control chứa DPPH nhưng thay mẫu thử bằng ethanol 70%.

Phần trăm loại bỏ gốc tự do (I%) được tính từ công thức sau

$$I\% = \frac{A_c - A_s}{A_c} \times 100\% \quad (7)$$

Trong đó,

- ♦ A_c là giá trị mật độ quang của dung dịch không có chất ức chế (control – mẫu đối chứng);
- ♦ A_s là giá trị mật độ quang của dung dịch có chất ức chế.

Giá trị IC_{50} được định nghĩa là nồng độ chất chống oxy hóa cần thiết để trung hòa 50% nồng độ DPPH ban đầu. Giá trị IC_{50} càng nhỏ, chứng tỏ mẫu có khả năng chống oxy hóa mạnh vì chỉ cần một lượng nhỏ đã đạt ức chế 50%. Mặc dù phương pháp DPPH với IC_{50} được ứng dụng rộng rãi, tuy nhiên sự thiếu chuẩn hóa trong cách tính toán khiến việc so sánh hoạt tính giữa các mẫu chiết xuất thực vật và các chất chống oxy hóa gặp nhiều khó khăn. Do đó, chỉ số hoạt tính chống oxy hóa (Antioxidant Activity Index – AAI) đã được đề xuất như một tiêu chí bổ sung cho phương pháp DPPH [13]. Chỉ số AAI được xác định theo công thức:

$$AAI = \frac{C_{DPPH} (\mu\text{g mL}^{-1})}{IC_{50} (\mu\text{g mL}^{-1})} \quad (8)$$

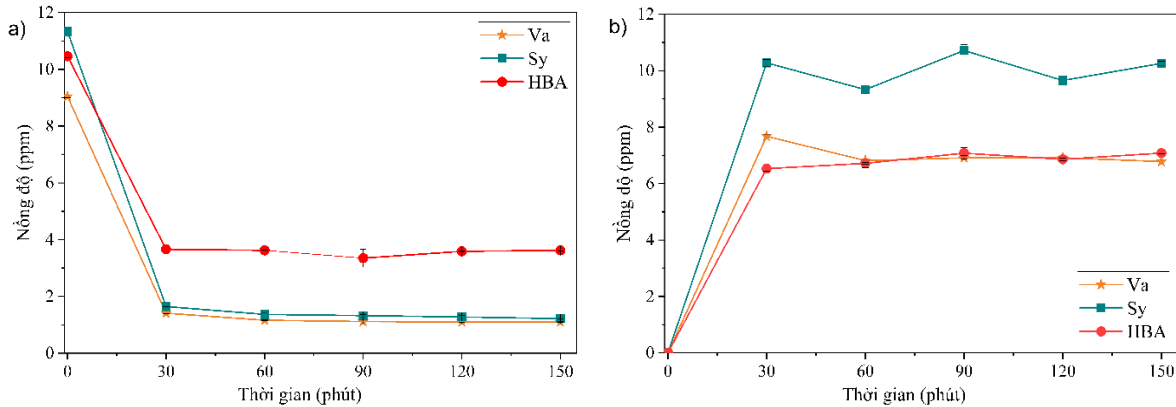
Trong đó, C_{DPPH} là nồng độ DPPH cuối được sử dụng.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Khảo sát thời gian hấp phụ của nhựa AB-8 đối với hợp chất phenolic

Hấp phụ là giai đoạn tiếp theo sau khi đã lọc lấy dung dịch được acid hóa. Mục đích của giai đoạn này giúp thu hồi được các monomer là hợp chất phenolic từ dung dịch lignin đã oxy hóa. Tuy nhiên, trước khi đưa nhựa hấp phụ vào dung dịch lignin thật đã oxy hóa, các thông số về thời gian hấp phụ, khả năng hấp phụ – giải hấp phụ của nhựa AB-8 làm giàu các hợp chất phenolic sẽ được tìm hiểu trước và tập trung vào đối tượng là Va, Sy và HBA. Ngoài ra, để đánh giá hiệu quả của việc hấp phụ nhiều lần, chúng tôi đã thử nghiệm so sánh hiệu quả hấp phụ khi thực hiện một lần trong thời gian dài (150 phút) với thực hiện hai lần trong thời gian ngắn (2×30 phút).

Theo Hình 2(a), sự biến đổi nồng độ dung dịch khảo sát có thể chia làm 3 giai đoạn. Giai đoạn một ở 30 phút đầu, nhựa có khả năng hấp phụ nhanh các chất. Điều này biểu hiện ở nồng độ trong dung dịch giảm xuống rõ rệt. Nồng độ Va, Sy, HBA đều giảm, lần lượt là giảm 84,4%; 85,5% và 65,14%. Giai đoạn thứ hai từ 30 – 60 phút, nồng độ dung dịch giảm chậm. Giai đoạn cuối từ 60 phút trở đi, nồng độ trong 3 mẫu dung dịch hầu như không xảy ra sự biến đổi và đạt trạng thái cân bằng lần lượt ở 1,11 ppm; 1,21 ppm; 3,62 ppm tương ứng với Va, Sy và HBA. Từ kết quả thu được, có thể thấy nhựa AB-8 hấp phụ tốt đối với Va (88,5%) và Sy (90,3%) ở trạng thái cân bằng. Tuy nhiên, hiệu suất hấp phụ của HBA thấp hơn so với hai mẫu còn lại, cụ thể đạt 66,5%. Sự chênh lệch này có thể do sự khác biệt về số lượng nhóm chức trong cấu trúc phân tử. Đối với HBA, trên khung benzene chỉ tồn tại một nhóm aldehyde và một nhóm hydroxyl ở vị trí *para*, trong khi phân tử vanillin chứa thêm một nhóm ether và syringaldehyde chứa nhiều hơn hai nhóm ether so với HBA. Việc bổ sung các nhóm ether có thể đã làm tăng ái lực tương tác giữa nhựa hấp phụ và phân tử phenolic thông qua liên kết Van der Waals hoặc tương tác lưỡng cực-lưỡng cực.



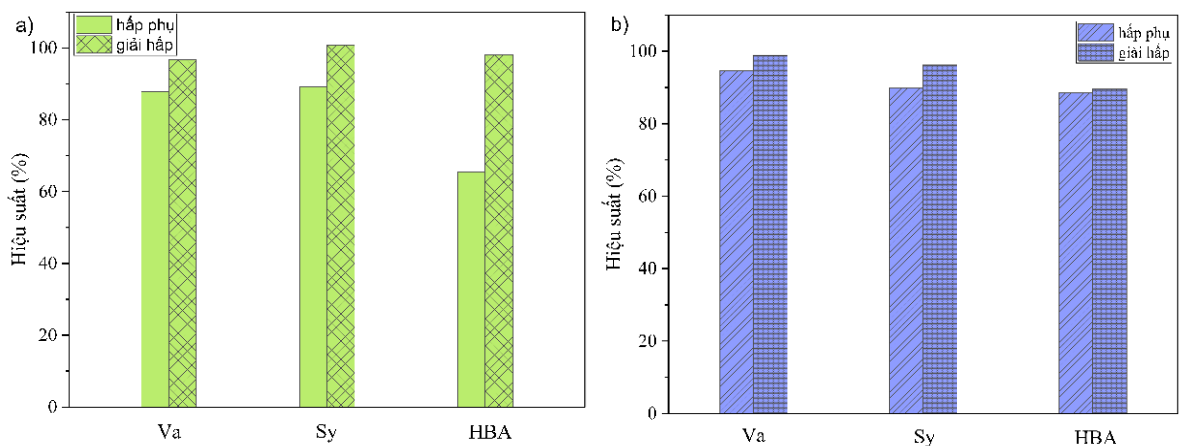
Hình 2. Nồng độ dung dịch Va, Sy và HBA trong quá trình (a) hấp phụ một lần và (b) giải hấp một lần.

Quá trình giải hấp một lần với ethanol trong 150 phút được thể hiện trên Hình 2(b) cho thấy nhựa có khả năng giải hấp nhanh trong 30 phút đầu tiên với hiệu suất giải hấp đối với Va, Sy và HBA lần lượt là 96,64%; 93,45%; 99,29%. Sau 30 phút, hiệu suất giải hấp xảy ra biến động lúc tăng lúc giảm. Điều này xảy ra có thể là do trong 30 phút đầu tiên, nồng độ giải hấp đã đạt cực đại. Sau đó, mẫu tiếp tục lắc thì chất bị khuếch tán ngược lại vào nhựa, cân bằng bị dịch chuyển thì lại giải hấp ra thêm; từ đó mới xảy ra hiện tượng nồng độ chất bị biến động trong dung dịch.

Nhìn chung, AB-8 là một loại nhựa hấp phụ – giải hấp phụ nhanh nên thời gian khảo sát có thể rút ngắn lại. Với quá trình hấp phụ, hiệu suất hấp phụ ở giai đoạn 1 đang khá cao, tuy nhiên hiệu suất ở giai đoạn 2 vẫn còn thấp. Do đó, để làm gia tăng hiệu suất hấp phụ của nhựa AB-8 đối với các mẫu thử ở giai đoạn 2, khảo sát được tiến hành làm lại với thời gian rút ngắn còn 60 phút; sau mỗi 30 phút sẽ thay nhựa mới. Lượng chất có thể hấp phụ – giải hấp phụ sau 2 lần được thể hiện trong Hình 3.

3.2. Đánh giá dung lượng hấp phụ của nhựa AB-8 đối với các hợp chất phenolic

Hình 3 biểu diễn hiệu suất hấp phụ sau một lần và sau hai lần. Kết quả cho thấy quá trình hấp phụ hai lần trong 60 phút của cả 3 mẫu đều cao hơn so với hấp phụ một lần trong 150 phút. Hiệu suất giải hấp thì không có sự thay đổi nhiều. Ngoài ra, khi so sánh giá trị khả năng hấp phụ và giải hấp trong Bảng 1 và Bảng 2, ta thấy giá trị Q_a và Q_d của Va và Sy tăng lên không nhiều. Tuy nhiên, sự thay đổi lớn nhất xảy ra ở HBA; cụ thể là sau 2 lần hấp phụ, hiệu suất hấp phụ đã tăng từ 66,5% lên tới 88,5%. Hiệu suất tăng lên là vì sau lần hấp phụ thứ nhất, lượng chất HBA vẫn còn lại nhiều. Mà sang lần hấp phụ thứ 2, nhựa được thay mới để bắt đầu lại quá trình hấp phụ. Điều này khiến cho HBA thu hồi được nhiều hơn so với quá trình hấp phụ một lần. Từ đó, hiệu suất sẽ tăng như kết quả thực nghiệm.



Hình 3. Hiệu suất hấp phụ – giải hấp phụ (a) một lần và (b) hai lần.

Bảng 1. Khả năng hấp phụ – giải hấp phụ một lần của nhựa AB-8 đối với Va, Sy và HBA.

	Va	Sy	HBA
Khả năng hấp phụ (mg/g nhựa)	0,20 ± 0,0011	0,25 ± 0,0024	0,17 ± 0,0012
Khả năng giải hấp (mg/g nhựa)	0,19 ± 0,0018	0,26 ± 0,0031	0,18 ± 0,0072

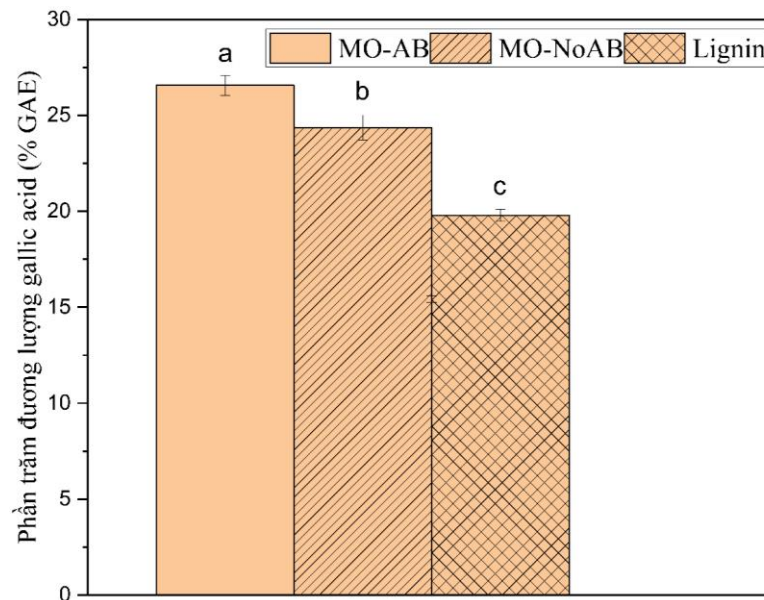
Bảng 2. Khả năng hấp phụ – giải hấp phụ hai lần của nhựa AB-8 đối với Va, Sy và HBA.

		Va	Sy	HBA
Khả năng hấp phụ Q_a (mg/g nhựa)	Lần 1	0,19 ± 0,00032	0,22 ± 0,0025	0,17 ± 0,0012
	Lần 2	0,030 ± 0,0074	0,030 ± 0,017	0,064 ± 0,0013
Khả năng giải hấp Q_a (mg/g nhựa)	Lần 1	0,17 ± 0,0018	0,22 ± 0,00062	0,16 ± 0,0030
	Lần 2	0,040 ± 0,0025	0,037 ± 0,0022	0,049 ± 0,00015

Như vậy, quá trình khảo sát khả năng hấp phụ của nhựa AB-8 đối với từng chất tinh khiết đại diện cho một số sản phẩm monomer hình thành khi oxy hóa lignin gồm có Va, Sy và HBA đã được chứng minh có hiệu quả tốt trong việc làm giàu các hợp chất phenolic trong thời gian 60 phút với 2 lần hấp phụ – giải hấp phụ. Kết quả này được dùng để áp dụng cho hỗn hợp oxy hóa từ lignin. Để kiểm chứng ảnh hưởng của quá trình hấp phụ lên khả năng chống oxy hóa của cao chiết ethyl acetate, nghiên cứu này đã điều chế hai mẫu cao gồm một mẫu sử dụng nhựa AB-8 để hấp phụ trước khi chiết xuất lỏng – lỏng (MO-AB) và mẫu còn lại thì không hấp phụ (MO-NoAB).

3.3. Đánh giá khả năng chống oxy hóa

3.3.1. Tổng hàm lượng polyphenol



Hình 4. Phần trăm đương lượng gallic acid của các mẫu.

Kết quả thể hiện theo giá trị phần trăm đương lượng gallic acid trung bình ± độ lệch chuẩn (n=3) và phân tích phương sai ANOVA oneway chuẩn Bonferroni giữa các mẫu có sự khác biệt a→c (p < 0,05).

Dựa trên Hình 4, hàm lượng nhóm hydroxyl phenolic trong các mẫu MO-AB và MO-NoAB lần lượt cao hơn khoảng 1,34 và 1,23 lần so với lignin ban đầu. Điều này có thể là do sự cắt đứt các chuỗi liên kết ether, điển hình là liên kết β-O-4 trong cấu trúc lignin dẫn đến việc hình thành thêm các nhóm

hydroxyl phenolic ở trong sản phẩm oxy hóa. Đáng chú ý, hàm lượng polyphenol ở mẫu MO-AB cao hơn đáng kể so với mẫu MO-NoAB. Nguyên nhân chủ yếu là do nhựa AB-8 có ái lực chọn lọc cao với các hợp chất polyphenol nhờ vào các cơ chế như tương tác kỵ nước, tương tác π - π , lực Val der Waals. Các liên kết này đều có bản chất là liên kết vật lý, cho thấy quá trình hấp phụ của AB-8 mang tính thuận nghịch, dễ giải hấp và tái sử dụng bằng dung môi hữu cơ trong quy trình tuần hoàn [12], [13]. Quá trình hấp phụ giúp cô lập và làm giàu các hợp chất polyphenol, đồng thời loại bỏ một phần tạp chất cản trở phản ứng đo màu, dẫn đến giá trị TPC chính xác và cao hơn [14]. Đây là bằng chứng cho thấy hấp phụ bằng nhựa AB-8 không những không làm mất polyphenol, mà còn đóng vai trò làm giàu và tinh sạch, phù hợp để ứng dụng trong chiết xuất polyphenol.

3.3.2. Kết quả loại bỏ gốc tự do DPPH

Bảng 3. Giá trị IC_{50} và chỉ số chống oxy hóa (AAI) của các mẫu.

	MO-AB	MO-NoAB	Lignin	BHT
IC_{50} ($\mu\text{g/mL}$)	13,59	18,89	24,85	9,97
AAI	1,84	1,32	1,01	2,51

Kết quả ở Bảng 3 cho thấy ảnh hưởng đáng kể của quá trình xử lý (bao gồm oxy hóa, chiết và hấp phụ) đến khả năng loại bỏ gốc tự do DPPH của lignin. Mẫu lignin ban đầu có giá trị $IC_{50} = 24,85 \mu\text{g/mL}$ và chỉ số $AAI = 1,01$, phản ánh hoạt tính chống oxy hóa yếu. Lý do có thể đến từ hàm lượng thấp của các nhóm hydroxyl phenolic tự do – vốn là các vị trí phản ứng chính trong cơ chế loại bỏ gốc tự do – cũng như sự hiện diện của nhiều tạp chất và cấu trúc polyme phức tạp chưa được phân tách. Khi lignin được oxy hóa bằng các tác nhân H_2O_2 , quá trình này đã làm thay đổi cấu trúc của lignin theo hướng phân cắt một phần liên kết ether, mở vòng, tăng nhóm hydroxyl phenolic và carboxylic, từ đó cải thiện tiềm năng chống oxy hóa [15]-[17]. Dịch chiết sau oxy hóa, không hấp phụ (mẫu MO-NoAB) có giá trị IC_{50} giảm còn $18,89 \mu\text{g/mL}$, AAI tăng lên 1,32 – phản ánh rằng bước oxy hóa đã có hiệu quả trong việc tạo ra các hợp chất có hoạt tính sinh học cao hơn.

Tuy nhiên, mẫu MO-NoAB vẫn có thể chứa một số tạp chất trung tính hoặc bán phân cực không có hoạt tính chống oxy hóa, hoặc có thể cản trở phản ứng đo màu trong phép thử DPPH. Vì vậy, mẫu này tiếp tục được xử lý bằng nhựa hấp phụ AB-8 để tạo thành mẫu MO-AB. Sau hấp phụ, IC_{50} giảm rõ rệt còn $13,59 \mu\text{g/mL}$, trong khi AAI tăng lên 1,84, tiến gần tới mẫu chuẩn BHT ($IC_{50} = 9,97 \mu\text{g/mL}$; $AAI = 2,51$). Kết quả này khẳng định vai trò quan trọng của quá trình hấp phụ trong việc loại bỏ các chất cản trở phản ứng và làm giàu các polyphenol hoạt tính, góp phần đáng kể vào việc nâng cao khả năng chống oxy hóa của dịch chiết. Nhiều nghiên cứu đã chứng minh rằng nhựa AB-8 có tính chọn lọc cao đối với hợp chất polyphenol nhờ vào các tương tác kỵ nước, tương tác π - π giữa vòng thơm của lignin và mạng polymer styren-divinylbenzene [6], [18]. Do đó, mẫu MO-AB sau hấp phụ không chỉ tinh sạch hơn mà còn có mật độ chất hoạt tính cao hơn, giúp phản ứng DPPH diễn ra hiệu quả hơn và dẫn đến giá trị IC_{50} thấp hơn, AAI cao hơn.

Chỉ số $AAI > 1$ được đánh giá là có hoạt tính chống oxy hóa tốt, trong khi $AAI > 2$ là rất mạnh [13]. Do đó, mẫu MO-AB với $AAI = 1,84$ có thể được xem là có tiềm năng ứng dụng đáng kể trong thực phẩm, dược phẩm hoặc mỹ phẩm sinh học như một chất chống oxy hóa tự nhiên, thân thiện hơn so với BHT – vốn bị hạn chế sử dụng ở liều cao do độc tính tích lũy.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã chứng minh rằng việc sử dụng nhựa hấp phụ AB-8 trong quá trình xử lý lignin oxy hóa giúp cải thiện đáng kể hiệu quả làm giàu các hợp chất phenolic. So với mẫu không hấp phụ, mẫu có nhựa hấp phụ cho hàm lượng polyphenol tổng cao hơn và hoạt tính chống oxy hóa mạnh hơn theo đánh giá bằng phép thử DPPH. Như vậy, nhựa AB-8 là vật liệu hấp phụ tiềm năng, góp phần nâng cao giá trị sinh học của sản phẩm thu được từ lignin – một phụ phẩm phổ biến trong công nghiệp. Kết quả mở ra hướng phát triển mới trong việc tái sử dụng lignin theo hướng sinh học và thân thiện với môi trường.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh trong khuôn khổ đề tài mã số 2025.01.175. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

Xung đột lợi ích

Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] P. S. Roy, G. Garnier, F. Allais, and K. J. C. L. Saito, "Effective lignin utilization strategy: major depolymerization technologies, purification process and production of valuable material," *Chem. Lett.*, vol. 50, no. 6, pp. 1123-1130, 2021.
- [2] A. Trezza, L. Mahboob, A. Visibelli, M. Geminiani, and A. Santucci, "Lignin Waste Valorization in the Bioeconomy Era: Toward Sustainable Innovation and Climate Resilience," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 14, p. 8038, 2025.
- [3] J. Dai, G. N. Styles, A. F. Patti, and K. Saito, "CuSO₄/H₂O₂-Catalyzed Lignin Depolymerization under the Irradiation of Microwaves," *ACS Omega*, vol. 3, no. 9, pp. 10433-10441, 2018.
- [4] X.-Z. Wei, J. Liu, and L. Ma, "Cleavage via selective catalytic oxidation of lignin or lignin model compounds into functional chemicals," *ChemEngineering*, vol. 5, no. 4, p. 74, 2021.
- [5] Z. Sheng, L. Shao, L. Zhang, P. Zhan, and Z. J. C. Wu, "Catalytic Oxidative Depolymerization of Sodium Lignosulfonate into Valuable Esters over Cu₂O/m-Sep Catalyst in H₂O Solvent Systems," *ChemistrySelect*, vol. 7, no. 39, p. e202202575, 2022.
- [6] N. Seif Zadeh and G. Zeppa, "Recovery and Concentration of Polyphenols from Roasted Hazelnut Skin Extract Using Macroporous Resins," *Foods*, vol. 11, no. 13, 2022.
- [7] X. Wu, Y. Liu, Y. Liu, and D. Di, "Evaluation on the adsorption capability of chemically modified macroporous adsorption resin with ionic liquid," *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 469, pp. 141-149, 2015.
- [8] J. Ren, Y. Zheng, Z. Lin, X. Han, and W. Liao, "Macroporous resin purification and characterization of flavonoids from *Platycladus orientalis* (L.) Franco and their effects on macrophage inflammatory response," *Food Funct.*, vol. 8, no. 1, pp. 86-95, 2017.
- [9] R. Zhang, R. Maltari, M. Guo, J. Kontro, A. Eronen, and T. Repo, "Facile synthesis of vanillin from fractionated Kraft lignin," *Ind. Crops Prod.*, vol. 145, p. 112095, 2020.
- [10] Y. Sheng, Z. Ma, X. Wang, and Y. Han, "Ethanol organosolv lignin from different agricultural residues: Toward basic structural units and antioxidant activity," *Food Chem.*, vol. 376, p. 131895, 2022.
- [11] J. Rumpf, R. Burger, and M. Schulze, "Statistical evaluation of DPPH, ABTS, FRAP, and Folin-Ciocalteu assays to assess the antioxidant capacity of lignins," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 233, p. 123470, 2023.
- [12] Q. Lu *et al.*, "Investigation of the effects of different organosolv pulping methods on antioxidant capacity and extraction efficiency of lignin," *Food Chem.*, vol. 131, no. 1, pp. 313-317, 2012.
- [13] R. Scherer and H. T. Godoy, "Antioxidant activity index (AAI) by the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl method," *Food Chem.*, vol. 112, no. 3, pp. 654-658, 2009.
- [14] Z. Wang, S. Peng, M. Peng, Z. She, Q. Yang, and T. Huang, "Adsorption and desorption characteristics of polyphenols from *Eucommia ulmoides* Oliv. leaves with macroporous resin and its inhibitory effect on α -amylase and α -glucosidase," *Ann. Transl. Med.*, vol. 8, no. 16, p. 1004, 2020.
- [15] J. Kang, J. Fang, F. Wei, and Y. Yang, "Adsorption equilibrium and kinetics of bamboo flavonoids on AB-8 resin," *Chem. Ind. Eng. Prog.*, vol. 30, no. 10, p. 2158, 2011.
- [16] T. Hu, F. Wang, Z. Zhao, K. Hu, and C. Zhou, "Optimization, purification and antioxidant potential of polyphenol ultrasonic-assisted extraction from pecan 'Shaoxing' green husk," *Food Prod. Process. Nutr.*, vol. 7, no. 1, p. 20, 2025.
- [17] X. Lu, X. Gu, and Y. Shi, "A review on lignin antioxidants: Their sources, isolations, antioxidant activities and various applications," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 210, pp. 716-741, 2022.
- [18] X. Duan, X. Wang, J. Chen, G. Liu, and Y. J. R. a. Liu, "Structural properties and antioxidation activities of lignins isolated from sequential two-step formosolv fractionation," *RSC Adv.*, vol. 12, no. 37, pp. 24242-24251, 2022.
- [19] N. Sun, J. Xie, J. Xie, Y. Chen, X. Hu, and Q. Yu, "Purification, composition and activity of bound polyphenols from mung bean coat dietary fiber," *Food Res. Int.*, vol. 162, p. 111997, 2022.

Thi My Tam Luu received her Bachelor of Engineering in Chemical Engineering from Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Viet Nam. She is currently a scientific research staff at Institute of Interdisciplinary Sciences, Nguyen Tat Thanh University, Viet Nam.

Email: ltmtam@ntt.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5415-9465>.

Vinh Tien Nguyen received his Specialist degree in Chemistry from Tula State University, Russia and the Ph.D. degree in Chemistry from Tula State University, Russia. He is currently a lecturer at Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Viet Nam.

Email: tiennv@hcmute.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1863-4138>.