



## Xử lý thuốc nhuộm azo trong môi trường nước sử dụng vật liệu hấp phụ than sinh học chế tạo từ vỏ trấu được biến tính bề mặt bằng protein

### Removal of azo dye in water using novel adsorbent based on rice husk biochar with surface modification by protein

Trần Thanh Hương<sup>1</sup>, Đinh Thị Hoàng Đan<sup>2</sup>, Đinh Thị Dịu<sup>2</sup>, Đặng Văn Long<sup>1</sup>,  
 Vũ Duy Tùng<sup>1</sup>, Lê Thanh Sơn<sup>1,\*</sup>, Phạm Tiến Đức<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Khoa Hóa học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, 19 Lê Thánh Tông, Cửa Nam, Hà Nội

<sup>2</sup> Khoa Môi trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, 334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội

\* Email: [tienducpham@hus.edu.vn](mailto:tienducpham@hus.edu.vn) and [lethanhsong@hus.edu.vn](mailto:lethanhsong@hus.edu.vn)

#### ARTICLE INFO

Received: 09/11/2025

Accepted: 13/12/2025

Published: 30/12/2025

#### Keywords:

anionic dye;  
 lysozyme protein;  
 biochar; water treatment

#### ABSTRACT

In the present study, rice husk biochar was modified with protein lysozyme to enhance the removal of toxic organic dye, Acid Orange 7 (AO7) in water. Surface modification of rice husk biochar with lysozyme increased the removal efficiency of AO7 significantly compared with bare biochar. The maximum removal of AO7 using lysozyme modified biochar exceeded 97.9% at pH 3. Adsorption isotherms of AO7 were in good agreement with Langmuir model while adsorption kinetics were well fitted by pseudo-second-order model. Under selected conditions, adsorption capacity of AO7 on lysozyme modified biochar reached 24.63 mg/g. The adsorbent was applicable for regeneration with high efficiency of greater than 80%. The removal efficiencies of AO7 in actual water samples were higher than 75%. Our study highlights the potential of bio-adsorbent based on protein modified for removal of organic dye from water environment.

#### Mở đầu

Sự phát triển của ngành công nghiệp dệt may có vai trò quan trọng đối với xã hội nhưng cũng gây ra hệ lụy là lượng lớn nước thải chứa các chất ô nhiễm phức tạp và khó phân hủy, trong đó thuốc nhuộm tổng hợp chiếm một tỉ lệ đáng kể [1]. Thuốc nhuộm azo được sử dụng rộng rãi nhất, chiếm hơn 60% tổng số thuốc nhuộm thương mại do tính hiệu quả về chi phí, và độ bền màu [2]. Tuy nhiên, nhiều thuốc nhuộm azo phân hủy sinh học kém, rất bền trong các hệ sinh thái thủy sinh, cản trở ánh sáng mặt trời truyền qua môi trường nước, phá vỡ hoạt động quang hợp và gây ô nhiễm môi trường nước nghiêm trọng [3]. Ngoài ra, nhiều thuốc nhuộm azo và các sản phẩm phân hủy thuốc nhuộm có độc tính cao, khả năng gây đột biến và ung thư, đe dọa

nghiêm trọng đến cân bằng sinh thái và sức khỏe con người và động vật. Trong số các thuốc nhuộm azo, Acid Orange 7 (AO7) được sử dụng khá phổ biến trong công nghiệp, tuy nhiên tồn dư AO7 gây ô nhiễm môi trường nước nghiêm trọng [4].

Hiện nay, nhiều phương pháp xử lý thuốc nhuộm trong môi trường nước đã được nghiên cứu và phát triển bao gồm các quá trình oxi hóa tiên tiến [5], keo tụ [6] hoặc lọc qua màng [7], và hấp phụ. Trong đó, hấp phụ là một phương pháp có hiệu quả cao, thân thiện với môi trường và phù hợp với các nước đang phát triển khi sử dụng các vật liệu rẻ tiền và chi phí thấp [8, 9]. Việc tận dụng phụ phẩm nông nghiệp sẵn có như vỏ trấu, chế tạo thành than sinh học (biochar) để làm vật liệu hấp phụ xử lý môi trường phù hợp với mục tiêu phát triển bền vững [10]. Than sinh học từ vỏ trấu (RHB) có cấu

trúc xoắn, diện tích bề mặt lớn và các nhóm chức trên bề mặt hoạt tính cao được coi là một vật liệu hấp phụ triển vọng [10, 11]. Tuy nhiên, một hạn chế cơ bản của than sinh học, là điện tích bề mặt âm do sự khử proton của các nhóm carboxyl và phenolic. Vì vậy, khả năng hấp phụ các thuốc nhuộm anion như AO7 khó khăn do lực đẩy tĩnh điện. Do đó, việc biến tính bề mặt vật liệu để thay đổi điện tích bề mặt là cần thiết. Protein lysozyme với điểm đẳng điện cao (pI ~12.0) đã được nghiên cứu để loại bỏ chất hữu cơ gây ô nhiễm [3, 12]. Tuy nhiên, biến tính bề mặt than sinh học từ vỏ trấu bằng lysozyme để xử lý thuốc nhuộm azo trong môi trường nước chưa được công bố trong và ngoài nước.

Trong nghiên cứu này, than sinh học chế tạo từ vỏ trấu được biến tính bằng lysozyme để xử lý thuốc nhuộm AO7. Các yếu tố ảnh hưởng tới hấp phụ được nghiên cứu một cách có hệ thống trong khi khả năng tái sử dụng của vật liệu hấp phụ và hiệu suất xử lý trong các mẫu nước thực tế cũng được đánh giá để khẳng định tiềm năng ứng dụng thực tế của vật liệu. Nghiên cứu chứng tỏ than sinh học biến tính với protein là vật liệu hiệu quả, an toàn cho việc xử lý nước bị ô nhiễm có chứa thuốc nhuộm hữu cơ.

## Thực nghiệm

### Vật liệu

Thuốc nhuộm Acid Orange 7 (AO7, độ tinh khiết  $\geq 85\%$ ) được cung cấp bởi Merck Darmstadt, Đức và protein lysozyme lòng trắng trứng gà được mua từ Gletham, Anh được sử dụng để biến tính bề mặt than sinh học. KCl, HCl và KOH có độ tinh khiết phân tích và được mua từ Merck. Nước cất hai lần được sử dụng để chuẩn bị tất cả các dung dịch. Vỏ trấu thô rửa kỹ bằng nước máy và nước cất để loại bỏ bụi bẩn và tạp chất, và sau đó sấy khô trong tủ sấy ở 80 °C trong 24 giờ trước khi sử dụng.

### Chế tạo than sinh học từ vỏ trấu

Vỏ trấu khô được nghiền và rây đến kích thước đồng nhất. Quá trình tro hóa được thực hiện trong lò nung ống có dòng khí N<sub>2</sub> liên tục thổi qua ống nung (1,0 mL/phút) để đảm bảo môi trường không có oxy. Nhiệt độ được nâng lên với tốc độ 10 °C/phút đến nhiệt độ cuối cùng là 700 °C và giữ trong 2 giờ [3]. Than sinh học thu được ký hiệu là RHB700, được để nguội đến nhiệt độ phòng trong khí N<sub>2</sub>, sau đó nghiền thành bột mịn và bảo quản trong bình hút ẩm.

Các nhóm chức bề mặt được xác định bằng phổ hồng ngoại chuyển đổi Fourier (FT-IR, Shimadzu) trong khoảng số sóng 400–4000 cm<sup>-1</sup>. Điện tích bề mặt được xác định bằng cách đo điện thế zeta sử dụng thiết bị Zetasizer Nano ZS (Malvern Panalytical) trong khoảng pH từ 3–6.

<https://doi.org/10.62239/jca.2025.069>

### Biến tính bề mặt than sinh học bằng hấp phụ protein

Cân 0,02 g vật liệu than sinh học cho vào ống falcon 15 mL sạch, khô. Thêm lượng protein Lysozyme với nồng độ 1.000 mg/L, tiếp theo 1 mL KCl 0.1 M. Định mức bằng nước cất 2 lần và chỉnh pH = 10 bằng KOH 0,1 M sao cho thể tích trong falcon bằng 10 mL. Đem lắc trong 2 h. Sau đó, li tâm với tốc độ 8.000 rpm, thu lấy vật liệu hấp phụ được rắn và rửa bằng nước cất 2 lần để loại bỏ phần Lysozyme có thể còn trong dung dịch. Vật liệu than sinh học đã biến tính với Lysozyme được sử dụng để xử lý kháng sinh thuốc nhuộm AO7.

### Nghiên cứu hấp phụ xử lý AO7

Nồng độ của AO7 trong dung dịch được xác định bằng thiết bị quang phổ UV-Vis (UV-1650-PC, Shimadzu) ở bước sóng 484 nm. Đường chuẩn xác định AO7 bằng phương pháp UV-Vis được xây dựng hàng ngày tại các điều kiện khảo sát với khoảng nồng độ 2 - 4 - 6 - 8 - 10 - 12 mg/L với hệ số tương quan tối thiểu 0,999. Hiệu suất loại bỏ thuốc nhuộm (H, %) và dung lượng hấp phụ tại thời điểm t (q<sub>t</sub>, mg/g) và tại trạng thái cân bằng (q<sub>e</sub>, mg/g) được tính dựa vào nồng độ AO7 tại thời gian t và khi cân bằng.

Hiệu suất xử lý AO7 (% H) tính theo phương trình (1).

$$\% H = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100\% \quad (1)$$

Dung lượng hấp phụ, q<sub>e</sub> (mg/g) của protein trên than sinh học và thuốc nhuộm AO7 trên than sinh học biến tính được tính bằng phương trình (2),

$$q = \frac{C_i - C_e}{m} \times 1000 \quad (2)$$

Trong đó C<sub>i</sub> (mg/L) và C<sub>e</sub> (mg/L) là nồng độ ban đầu và nồng độ cân bằng; m (mg/mL) là lượng chất hấp phụ. Động học hấp phụ: Các nghiên cứu động học hấp phụ được thực hiện ở pH tối ưu với lượng vật liệu hấp phụ 2 mg/mL và nồng độ AO7 ban đầu là 20, 100 và 200 mg/L. Các mẫu được đo tại các khoảng thời gian xác định từ 0 đến 180 phút. Hấp phụ động học được mô tả bằng mô hình giả bậc một và giả bậc hai [13].

Đẳng nhiệt hấp phụ: Các thí nghiệm được tiến hành ở pH tối ưu và thời gian hấp phụ 120 phút, trong khi nồng độ AO7 ban đầu thay đổi từ 10 đến 400 mg/L. Ảnh hưởng của lực ion được nghiên cứu bằng cách thêm KCl với các nồng độ 1, 10 và 100 mM. Hấp phụ đẳng nhiệt được mô tả bằng mô hình Langmuir và Freundlich [14].

### Tái sử dụng vật liệu hấp phụ

Khả năng tái sử dụng được đánh giá trong năm chu kỳ hấp phụ-giải hấp liên tiếp. Quá trình giải hấp được thực hiện bằng cách sử dụng dung dịch NaOH 0,1 M và EDTA 0,1M. Sau khi giải hấp, vật liệu được rửa lại bằng nước cất 2 lần sau đó được biến tính lại bằng hấp phụ sử dụng

dung dịch Lysozyme còn lại ở lần biến tính trước và tiến hành hấp phụ xử lý AO7 trong các điều kiện tối ưu

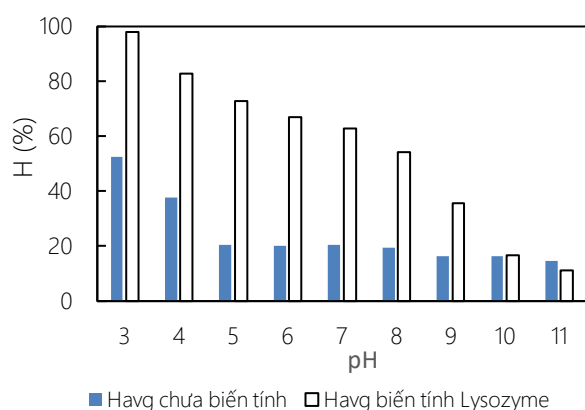
Khả năng ứng dụng thực tế được đánh giá bằng cách xử lý thử nghiệm sử dụng của vật liệu hấp phụ trong các mẫu nước thực tế (nước máy, nước sông và nước hồ) được thêm dung dịch chuẩn AO7 với nồng độ 20 mg/L.

## Kết quả và thảo luận

### Hấp phụ AO7 trên than sinh học biến tính với protein

#### Ảnh hưởng của pH

Môi trường pH có ảnh hưởng lớn tới khả năng hấp phụ xử lý thuốc nhuộm vì pH ảnh hưởng tới điện tích bề mặt vật liệu trong khi thuốc nhuộm AO7 mang điện âm mạnh với đặc tính điện tích không phụ thuộc vào pH.



Hình 1. Ảnh hưởng của pH đến khả năng xử lý thuốc nhuộm AO7 sử dụng than sinh học có biến tính và chưa biến tính với Lysozyme (Ci, AO7 = 20 mg/L, lượng vật liệu 2 mg/mL, thời gian hấp phụ 120 phút)

Hình 1 cho thấy hiệu suất xử lý AO7 bằng vật liệu than sinh học có biến tính với protein luôn cao hơn so với vật liệu chưa biến tính. Hiệu suất xử lý giảm dần khi tăng pH do giảm lực tương tác tĩnh điện giữa AO7 và vật liệu than sinh học biến tính với lysozyme. Hiệu suất xử lý đạt cực đại lên đến 97,9 % ở pH 3. Hiệu suất xử lý giảm dần khi pH tăng, giảm xuống chỉ còn 11,2% ở pH 11. Sự phụ thuộc pH này có thể được giải thích do ở pH axit, bề mặt của than sinh học được biến tính bằng lysozyme mang điện dương, trong khi các phân tử AO7 tồn tại ở dạng anion. Lực hút điện tĩnh mạnh giữa phân tử thuốc nhuộm mang điện âm và bề mặt vật liệu mang điện dương thúc đẩy hiệu suất xử lý tăng cao. Khi pH tăng, mức độ proton hóa của các nhóm amin bề mặt giảm, làm giảm điện tích dương của bề mặt vật liệu hấp phụ, do đó làm giảm lực điện tĩnh cho sự hấp phụ AO7. Ở pH cao, bề mặt than sinh học mang điện âm nên lực đẩy tĩnh điện tĩnh cản trở hấp phụ AO7 trên vật liệu hấp phụ nên hiệu suất xử lý giảm mạnh.

### Hấp phụ động học và hấp phụ đẳng nhiệt

Kết quả động học cho thấy hấp phụ đạt tới 80% trong 30 phút đầu tiên và cân bằng hấp phụ được thiết lập sau khoảng 120 phút. Cân bằng nhanh được thiết lập là đặc trưng của sự hấp phụ bị chi phối bởi các tương tác bề mặt mạnh như tĩnh điện hoặc tạo liên kết hóa học bền hơn là quá trình khuếch tán trên bề mặt.

Bảng 1. Các thông số hấp phụ động học của AO7 trên vật liệu than sinh học biến tính bằng protein lysozyme (pH =3, lượng vật liệu 2 mg/mL)

Ci (mg/L)	qe thực nghiệm (mg/g)	Mô hình giả bậc 1		Mô hình giả bậc 2	
		qe tính toán (mg/g)	R <sup>2</sup>	qe tính toán (mg/g)	R <sup>2</sup>
20	9,29	2,41	0,885	9,40	0,999
100	19,5	17,8	0,943	19,9	0,998
200	31,8	28,5	0,971	32,5	0,999

Kết quả trên Bảng 1 cho thấy mô hình động học giả bậc hai (PSO) với hệ số tương quan R<sup>2</sup> > 0,99 trong khi mô hình động học giả bậc nhất (PFO) cho kết quả kém phù hợp hơn (R<sup>2</sup> < 0,97). Kết quả này chỉ ra rằng quá trình hấp phụ có thể liên quan đến lực hút điện tĩnh giữa các phân tử thuốc nhuộm và các vị trí hoạt động của vật liệu hấp phụ than sinh học mang điện trái dấu [15].

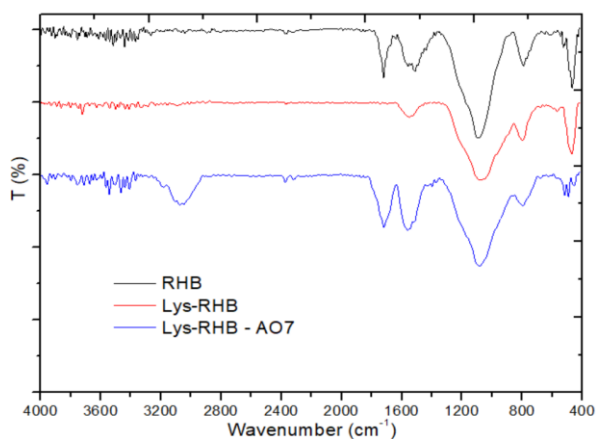
Đẳng nhiệt hấp phụ được sử dụng để xác định dung lượng hấp phụ cực đại và đề xuất cơ chế hấp phụ (không đưa chi tiết). Kết quả cho thấy mô hình Langmuir phù hợp hơn (R<sup>2</sup> = 0,977) so với mô hình Freundlich (R<sup>2</sup> = 0,95), chứng tỏ sự hấp phụ có thể là đơn lớp trên một bề mặt chứa các vị trí hấp phụ đồng nhất. Dung lượng hấp phụ cực đại (q<sub>max</sub>) xác định dựa vào mô hình là 24,63 mg/g. Dung lượng hấp phụ này cao hơn gần 5 lần so với vật liệu RHB700 chưa biến tính (khoảng 5 mg/g), chứng tỏ vai trò quan trọng của việc biến tính bề mặt than sinh học với protein

#### Cơ chế hấp phụ

Cơ chế hấp phụ được đề xuất trên cơ sở đánh giá sự thay đổi nhóm chức và điện tích bề mặt.

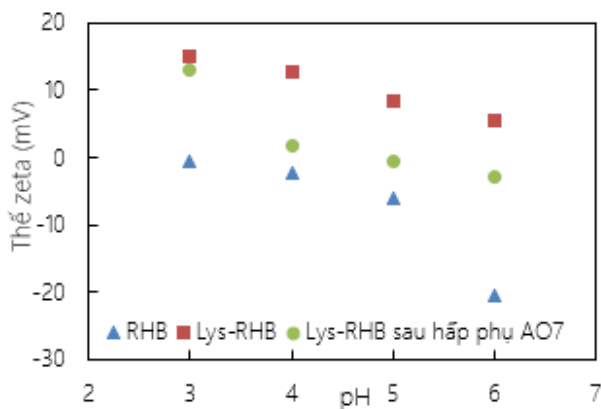
Phổ hồng ngoại FT-IR cho thấy sự nhóm chức bề mặt Phổ IR của RHB700 thể hiện các dải phổ đặc trưng tín hiệu thấp ở vùng phổ khoảng 3430 cm<sup>-1</sup> (dao động hóa trị O-H), ~1630 cm<sup>-1</sup> (dao động hóa trị C=O của nhóm carboxyl) và khoảng 1100 cm<sup>-1</sup> (dao động C-O) [11]. Trong khi đó, phổ của Lys-RHB700 hiển thị hai đỉnh hấp thụ mới ở 1638 cm<sup>-1</sup> và 1547 cm<sup>-1</sup>, tương ứng với dao động của nhóm C=O (amide I) và dao động biến dạng N-H và C-N (amide II) của khung peptide [16]. Các kết quả này chứng tỏ protein đã hấp phụ trên bề mặt than

sinh học và quá trình hấp phụ đã hình thành các liên kết tĩnh điện và tương tác kỵ nước ổn định với bề mặt than sinh học. Tuy nhiên, sau khi hấp phụ AO7, phổ FT-IR của vật liệu Lys-RHB700 có thay đổi lớn. Xuất hiện tín hiệu của nhóm -OH tại số sóng  $3200\text{ cm}^{-1}$  và của giao động của nhóm-NH trong khoảng phổ  $1620\text{ cm}^{-1}$ ,  $1800\text{ cm}^{-1}$ . Sự xuất hiện thêm các đỉnh đặc trưng tương tự phổ của RHB700 chứng tỏ các liên kết của lysozyme đã tương tác với nhóm sulfonic của phân tử AO7.



Hình 2. Phổ FT-IR của vật liệu than sinh học RHB, than sinh học biến tính với lysozyme Lys-RHB và Lys-RHB sau khi hấp phụ AO7.

Phân tích sự thay đổi điện tích bề mặt thông qua điện thế zeta (Hình 3) cho thấy vật liệu RHB700 không biến tính mang điện tích bề mặt âm trong toàn bộ dải pH nghiên cứu (từ -0,7 mV ở pH 3 đến -20,5 mV ở pH 11). Ngược lại, Lys-RHB700 có sự biến đổi rõ rệt khi mang điện dương tại pH thấp (+15,0 mV ở pH 3). Sự đảo chiều điện tích do lysozyme được hấp phụ lên bề mặt than sinh học [17]. Ở các giá trị pH < pI, các nhóm amin (được proton hóa ( $-\text{NH}_3^+$ ), tạo ra một điện tích dương lên bề mặt vật liệu. Kết quả này minh chứng cho thành công quá trình biến tính bề mặt than bằng lysozyme.

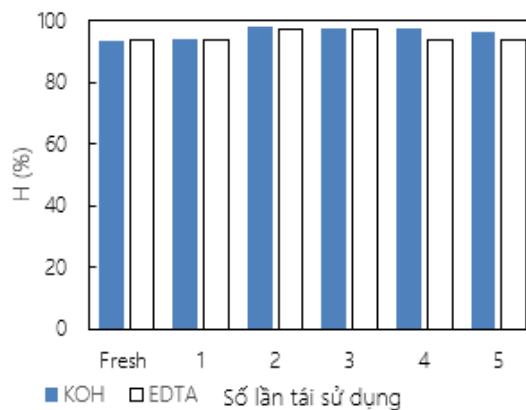


Hình 3. Thế zeta của vật liệu than sinh học RHB, than sinh học biến tính với lysozyme Lys-RHB và Lys-RHB sau khi hấp phụ AO7.

Tuy nhiên, sau khi hấp phụ AO7, thế zeta giảm, đặc biệt ở pH > 4 khi có sự khác biệt lớn về điện tích bề mặt vật liệu và quá trình giải hấp lysozyme ra khỏi bề mặt than. Các kết quả phân tích phổ FT-IR và thế zeta chứng tỏ hấp phụ thuốc nhuộm AO7 trên than sinh học biến tính bằng lysozyme chủ yếu do lực tương tác tĩnh điện.

### Khả năng tái sử dụng và xử lý mẫu thực

Khả năng tái sử dụng được đánh giá trong năm chu kỳ hấp phụ-giải hấp. Quá trình giải hấp được thực hiện bằng cách sử dụng dung dịch KOH 0,1 M và EDTA 0,1M. KOH là một kiềm mạnh trong khi EDTA là một đa axit yếu tan tốt trong nước và có khả năng giải hấp tốt các thuốc nhuộm do tương tác tạo phức. Khả năng ứng dụng thực tế được đánh giá bằng cách xử lý trên mẫu thực (nước máy, nước sông và nước hồ), thêm chuẩn AO7 sử dụng vật liệu hấp phụ Lys-RHB700 trong điều kiện tối ưu.



Hình 4. Hiệu suất xử lý AO7 của than sinh học biến tính với lysozyme sau 5 lần tái sử dụng bằng KOH và EDTA (Ci, AO7 = 20 mg/L, lượng vật liệu 2 mg/mL, thời gian hấp phụ 120 phút, pH = 3)

Khả năng tái sử dụng là một yếu tố quyết định hiệu năng của vật liệu. Sau năm chu kỳ hấp phụ-giải hấp liên tiếp sử dụng KOH 0,1 M, hiệu suất xử lý vẫn đạt trên 96% (Hình 4), chứng tỏ vật liệu bền, rằng cấu trúc của vật liệu hấp phụ không thay đổi do đó có khả năng tái sử dụng tốt.

Hiệu suất của Lys-RHB700 trong các môi trường nước thực tế khẳng định hiệu năng của vật liệu. Mặc dù hiệu suất xử lý có giảm xuống 75% với mẫu nước hồ và nước sông. Nhưng vật liệu hấp phụ vẫn loại bỏ một lượng đáng kể AO7. Sự giảm này chủ yếu được quy cho hiệu ứng cạnh tranh của các anion vô cơ phổ biến ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) có trong mẫu nước thực, cạnh tranh với AO7 cho các vị trí hấp phụ trên Lys-RHB700. Kết quả này đặt ra một cách thực tế hiệu suất của vật liệu hấp phụ và cung cấp thông tin để phát triển hệ thống xử lý mẫu thực tế.

Bảng 2 chỉ ra dung lượng hấp phụ cực đại AO7 trên vật liệu than sinh học biến tính bằng protein lysozyme so sánh một số vật liệu hấp phụ khác trong đó vật liệu Lys-RHB700 có dung lượng hấp phụ cực đại cao nhất trong điều kiện hấp phụ môi trường pH axit và trung tính. Ngoài ra, dung lượng hấp phụ cực đại cũng cho thấy vai trò quan trọng của protein đã làm tăng cường khả năng hấp phụ AO7 lên gần 3 lần.

Bảng 2. So sánh dung lượng hấp phụ AO7 trên vật liệu than sinh học biến tính bằng protein lysozyme và một số vật liệu hấp phụ khác.

Vật liệu	$q_{max}$ (mg/g)	Điều kiện tối ưu	Tài liệu tham khảo
Lys-RHB700	24,63	pH=3; 25°C	Nghiên cứu này
Mekgeolli lees	20,41	pH=7; 30°C	[18]
Essential oil solid	19,39	pH=1,2; 20°C	[19]
Than sinh học	16,0	pH=2; 25°C	[3]

## Kết luận

Công trình nghiên cứu sử dụng vật liệu than sinh học từ vỏ trấu được biến tính bề mặt với protein lysozyme để xử lý thuốc nhuộm azo mang điện âm AO7. Vật liệu than sinh học sau khi biến tính với lysozyme cho hiệu năng vượt trội với hiệu suất xử lý cực đại gấp gần 2 lần lên đến 97,9 % so với vật liệu chưa biến tính tại pH tối ưu bằng 3. Hấp phụ đẳng nhiệt AO7 phù hợp với mô hình Langmuir trong khi hấp phụ động học tuân theo mô hình động học giả bậc hai. Dung lượng hấp phụ cực đại của vật liệu hấp phụ thu được là 24,63 mg/g cao hơn nhiều so với các vật liệu hấp phụ thông dụng khác. Hấp phụ AO7 trên sinh học biến tính với lysozyme chủ yếu do lực tương tác tĩnh điện. Vật liệu hấp phụ than sinh học có khả năng tái sử dụng tốt, sau 5 lần tái sử dụng hiệu suất hấp phụ vẫn đạt trên 80% trong khi hiệu suất xử lý với mẫu nước hồ đạt trên 75%. Nghiên cứu chứng tỏ vật liệu than sinh học biến tính với protein là vật liệu hiệu năng cao, thân thiện với môi trường, phù hợp để xử lý thuốc nhuộm hữu cơ trong môi trường nước.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Hà Nội trong đề tài mã số QG.23.77

## Tài liệu tham khảo

1. E. Forgacs, T. Cserhádi, G. Oros, *Environ. Int.*, 30(7) (2004) 953-971. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.001>
2. S.A. Bahadi, Q.A. Drmosh, S.A. Onaizi, *Sep. Purif. Technol.*, 337 (2024) 126402. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126402>
3. T.K.C. Tran, T.T.T. Truong, A.L. Le, D.A.M. Do, T.G. Nguyen, T.D. Tran, T.D. Pham, *Environ. Technol. Innov.*, 37 (2025) 104037. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104037>
4. J.P. Silva, S. Sousa, J. Rodrigues, H. Antunes, J.J. Porter, I. Gonçalves, S. Ferreira-Dias, *Sep. Purif. Technol.*, 40(3) (2004) 309-315. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2004.03.010>
5. B. Cuiping, X. Xianfeng, W. Guo, D. Fu, X. Mo, Z. Guo, N. Xiao, *Desalination*, 278(1-3) (2011) 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.05.009>
6. T.S. Vo, T.T.B.C. Vo, J.W. Suk, K. Kim, *Nano Convergence*, 7 (2020) 4. <https://doi.org/10.1186/s40580-019-0215-0>
7. G.M.K. Tolba, A.M. Bastaweesy, E.A. Ashour, W. Abdelmoez, K.A. Khalil, N.A.M. Barakat, *Arab. J. Chem.*, 9(2) (2016) 287-296. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.05.009>
8. T.M.V. Ngo, T.H.L. Nguyen, X.T. Mai, T.H.N. Pham, T.T.T. Nguyen, T.D. Pham, *J. Environ. Chem. Eng.*, 9(2) (2021) 105135. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105135>
9. N. Suhaimi, M.R.R. Kooh, C.M. Lim, C.-T. Chou Chao, Y.-F. Chou Chau, A.H. Mahadi, H.-P. Chiang, N.H. Haji Hassan, R. Thotagamuge, *Adsorpt. Sci. Technol.*, 2022 (2022) 8245797. <https://doi.org/10.1155/2022/8245797>
10. S. Aziz, B. Uzair, M.I. Ali, S. Anbreen, F. Umber, M. Khalid, A.A.A. Aljabali, Y. Mishra, V. Mishra, Á. Serrano-Aroca, S.S. Sharma, V. Kumar, K. Goyal, *Environ. Res.*, 238 (2023) 116909. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116909>
11. K. Herrera, L.F. Morales, N.A. Tarazona, R. Aguado, J.F. Saldarriaga, *ACS Omega*, 7(9) (2022) 7625-7637. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06147>
12. T.N. Vu, P.H.P. Le, T.T.T. Truong, P.T. Nguyen, T.D. Dinh, T.K. Tran, T.H. Hoang, T.D. Pham, *J. Mol. Liq.*, 382 (2023) 121903. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121903>
13. A. Zorro, G. Maffei, R. Lavecchia, *J. Environ. Chem. Eng.*, 5(4) (2017) 4121-4127. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.07.078>
14. K.Y. Foo, B.H. Hameed, *Chem. Eng. J.*, 156(1) (2010) 2-10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
15. F. Tomul, Y. Arslan, B. Kabak, D. Trak, E. Kendüzler, E.C. Lima, H.N. Tran, *Sci. Total Environ.*, 726 (2020) 137828. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137828>
16. R. Luo, X. Zhou, Y. Xiu, H. Wang, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 87(3) (2018) 584-592. <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4753-4>
17. A. Yamaguchi, M. Kobayashi, *Colloid Polym. Sci.*, 294(6) (2016) 1019-1026. <https://doi.org/10.1007/s00396-016-3852-4>
18. N.K. Van, S. Kim, J.J. Ryoo, *Bull. Korean Chem. Soc.*, 45(8) (2024) 770-777. <https://doi.org/10.1002/bkcs.12892>
19. I. Hambarliyska, D. Manousakis, G. Marovska, A. Bylianova, A.A. Slavov, *Food Sci. Appl. Biotechnol.*, 8(1) (2025) 147-155. <https://doi.org/10.30721/fsab2025.v8.i1.479>