



## Nghiên cứu quá trình hấp phụ Congo đỏ (Congo Red – CR) trên vật liệu graphen oxit/polyvinyl alcohol/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

### Study on the adsorption of Congo Red (CR) onto graphene oxide/ polyvinyl alcohol/ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

Lê Diệu Thu<sup>1\*</sup>, Trần Vĩnh Hoàng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Viện Kỹ thuật Hóa học, Đại học Bách Khoa Hà Nội*

*Số 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội*

*\*Email: thu.ledieu@hust.edu.vn*

#### ARTICLE INFO

Received: 15/4/2021

Accepted: 15/7/2021

Published: 15/10/2021

#### Keywords:

graphene oxide, congo red, adsorption

#### ABSTRACT

Graphene oxide/polyvinyl alcohol/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (GPF) nanocomposites, which have been synthesized successfully in the previous study [6], have been investigated the removal of Congo Red (CR) from aqueous solution. The results show that, the adsorption process get equilibrium state after 80 min., the optimal amount of adsorbent is 0.01 g and this process is favorable at low temperature. The Congo red adsorption is better described by the Langmuir model ( $R^2 = 0.991$ ) than by the Freundlich model ( $R^2 = 0.957$ ). So, it can be presumed that Congo red was adsorbed in a single monolayer with the maximum adsorption capacity of 23.31 mg/g.

#### Giới thiệu chung

May mặc là một nhu cầu thiết yếu của con người. Cùng với sự phát triển của xã hội, nhu cầu làm đẹp và thời trang là những nhu cầu cơ bản của xã hội hiện đại. Theo ước tính, trung bình mỗi người chi khoảng 20 % thu nhập hàng tháng cho thời trang may mặc (theo số liệu khảo sát năm 2014 dựa trên nguồn VITAS 2014 cung cấp). Tuy nhiên, ngành dệt may lại là một trong những ngành gây ô nhiễm môi trường nghiêm trọng. Thông thường, để tạo ra 1 kg sợi cần tiêu tốn 200 lít nước. Lượng lớn nước được sử dụng và thải ra trong quá trình sản xuất là nguyên nhân làm nhiễm độc cho sinh vật sống trong nước ngay từ nguồn, bao gồm các hóa chất hữu cơ độc hại, các anion độc hại, muối, kim loại ion, các phức hợp kim loại, các bioxit, và các chất hoạt tính bề mặt. Bên cạnh đó, ngành dệt

may còn gây ô nhiễm môi trường khí (khí CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> trong quá trình đốt tạo năng lượng...) và ô nhiễm chất thải rắn (như các xơ vải thừa, sấp, kim loại phế thải...).

Một trong các giải pháp hữu hiệu là tái chế sợi vải giúp giảm đáng kể nhu cầu sản xuất sợi vải. Tuy nhiên, chi phí cho quá trình tái chế là tương đối cao cũng như đòi hỏi công nghệ hiện đại. Quá trình xử lý nước thải từ các nhà máy nhuộm vẫn đang là giải pháp song song và không thể thiếu trong công nghiệp dệt, nhuộm nói riêng và xử lý nước thải công nghiệp nói chung.

Chất màu Congo đỏ (CR) - 3,3'-([1,1'-biphenyl]-4,4'-diyl)bis(4-aminonaphthalene-1-sulfonic acid) - là phẩm nhuộm axit nhóm diazo, trước đây thường được sử dụng để nhuộm vải bông. Hiện nay, nó vẫn được sử dụng nhiều trong lĩnh vực sinh học, hóa học và mô

học. Do dễ dàng hòa tan trong nước, rất ổn định trong môi trường, khi đi vào cơ thể con người, congo đỏ có thể chuyển hóa thành benzidin – một chất gây ung thư và gây nên các đột biến được biết đến nhiều ở người<sup>[1]</sup> nên nó đã thu hút sự quan tâm, nghiên cứu của đông đảo các nhà khoa học trên thế giới nhằm loại bỏ chúng khỏi nước thải.

Một số phương pháp thường được sử dụng để loại bỏ chất màu hữu cơ trong dung dịch như: hấp phụ, oxy hóa cải tiến, phân hủy sinh học hay sa lắng...<sup>[2-4]</sup> So với các phương pháp khác, hấp phụ được coi là một trong các giải pháp hữu hiệu do sử dụng công nghệ đơn giản, chi phí thấp, hiệu quả quá trình tương đối cao. Chất hấp phụ thường được sử dụng để hấp phụ Congo đỏ là các sản phẩm trên cơ sở cacbon (cacbon hoạt tính, graphene, graphene oxit, graphene oxit khử...), các hợp chất silica, vật liệu cellulose... trong đó, do các ưu điểm vượt trội như: dung lượng hấp phụ lớn, lượng chất hấp phụ sử dụng tương đối ít, không có tính chọn lọc..., các sản phẩm trên cơ sở cacbon được sử dụng khá phổ biến trong quá trình hấp phụ. Nhược điểm của các chất hấp phụ dạng này (đặc biệt là graphene, graphen oxit) là khả năng phân tán khá tốt trong môi trường chất lỏng, tuy nhiên, do tỷ trọng nhẹ khiến khả năng thu hồi chúng gặp khó khăn. Vì vậy, xu hướng kết hợp graphen/graphene oxit lên các vật liệu polymer đồng thời chứa thêm vật liệu có từ tính (như Fe hoặc Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) để có thể sử dụng từ trường ngoài gom/thu vật liệu dễ dàng là xu hướng nhận được nhiều quan tâm nghiên cứu. Trong nghiên cứu này, vật liệu GPF sử dụng graphen oxit kết hợp với polymer PVA và sắt từ sẽ được sử dụng và khảo sát khả năng hấp phụ chất màu CR trong điều kiện phòng. Các kết quả được trình bày cụ thể dưới đây.

## Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

### Nguyên liệu

Congo đỏ, FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O và FeCl<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O là các hóa chất tinh khiết dạng AR được sử dụng ngay mà không cần qua bất cứ khâu xử lý nào.

### Thực nghiệm

Vật liệu GO/PVA/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (GPF) được tổng hợp bằng cách trộn lẫn 0,1 g GO với dung dịch chứa 0,2 g PVA đã được hòa tan ở nhiệt độ cao và hỗn hợp chứa 1,6 g dung dịch FeCl<sub>2</sub> và FeCl<sub>3</sub> trong môi trường kiềm. Quy trình tổng hợp vật liệu cũng như các đặc trưng vật lý của vật liệu tổng hợp được đã được trình bày cụ thể trong nghiên cứu trước đây.<sup>[5]</sup> Theo đó, vật liệu có diện

tích bề mặt BET là 82 m<sup>2</sup>/g, các hạt nano Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> che phủ bề mặt màng GO và PVA trên ảnh SEM và tồn tại các đỉnh đặc trưng của GO, PVA và liên kết kim loại - oxi trong vật liệu trên ảnh FT-IR.

Dung dịch gốc Congo đỏ được chuẩn bị bằng cách hòa tan 0,5 g Congo đỏ trong bình định mức 500 mL bằng nước cất để thu được dung dịch gốc có nồng độ 500 mg/L.

Để khảo sát khả năng hấp phụ của vật liệu, 0,01 g chất hấp phụ GPF được cho vào bình chứa 10 mL dung dịch CR. Sau những khoảng thời gian nhất định, mẫu được lấy ra và tiến hành đo phổ UV-Vis liên tục tại bước sóng 497 nm trên thiết bị đo Agilent 8453 UV Vis. Các thí nghiệm được tiến hành lặp lại ít nhất hai lần để đánh giá độ chính xác của phép đo.

Để xác định thời gian bão hòa của quá trình hấp phụ CR trên vật liệu GPF, nồng độ ban đầu của dung dịch CR được sử dụng là 50 mg/L. Sau những khoảng thời gian nhất định, một lượng nhỏ mẫu được lấy ra và xác định nồng độ CR còn lại theo thời gian cho đến khi thu được các giá trị gần như không đổi về nồng độ CR. Trong suốt quá trình thí nghiệm, lượng mẫu sau khi đo sẽ được hoàn nguyên lại hỗn hợp ban đầu.

Dung lượng hấp phụ cực đại của CR trên vật liệu GPF sẽ được xác định bằng cách sử dụng các nồng độ CR ban đầu khác nhau (từ 50-100 mg/L) trong khoảng thời gian bão hòa đã được xác định trước đó. Lượng CR không bị hấp phụ được tính toán dựa vào đường chuẩn về quan hệ giữa độ hấp thụ A và nồng độ dung dịch CR (hình 1).

Độ hấp phụ q (mg/g) được xác định theo công thức:

$$q = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (1)$$

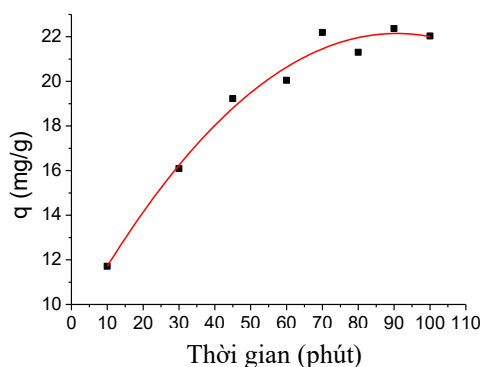
trong đó: C<sub>0</sub> là nồng độ ban đầu của dung dịch CR (mg/L); C<sub>e</sub> là nồng độ dung dịch CR sau hấp phụ tại thời điểm t (mg/L); V là thể tích dung dịch CR đem sử dụng (L) và m là khối lượng chất hấp phụ sử dụng (g).

## Kết quả và thảo luận

### Khảo sát thời gian tiếp xúc

Để xác định thời điểm quá trình hấp phụ đạt cân bằng, thí nghiệm được tiến hành ở nhiệt độ 25 °C (nhiệt độ phòng), pH = 7, lượng chất hấp phụ là 0,01 g và đo độ hấp thụ dung dịch trong các khoảng thời gian khác nhau. Kết quả được chỉ ra trên hình 1. Theo đó, cường độ hấp phụ q ở những thời điểm ban đầu tăng rất nhanh. Điều này có thể được giải thích là do tại thời điểm ban đầu, các tâm hấp phụ trên vật liệu nhiều,

quá trình hấp phụ diễn ra thuận lợi. Sau 80 phút, dung lượng hấp phụ thay đổi không đáng kể và có xu hướng đạt cân bằng. Nguyên nhân có thể được giải thích là do các tâm hấp phụ sau một khoảng thời gian đã bị chiếm bởi chất màu CR, lúc này, lượng tâm hấp phụ còn lại rất ít nên quá trình hấp phụ chất màu lên vật liệu khó diễn ra hơn. Kết quả rằng, dung lượng hấp phụ có xu hướng đạt bão hòa và gần như không đổi sau 80 phút. Vậy, thời gian bão hòa cho quá trình hấp phụ CR lên trên vật liệu GPF là 80 phút, độ hấp phụ  $q$  ngoại suy từ đồ thị là 21,5 mg/g.



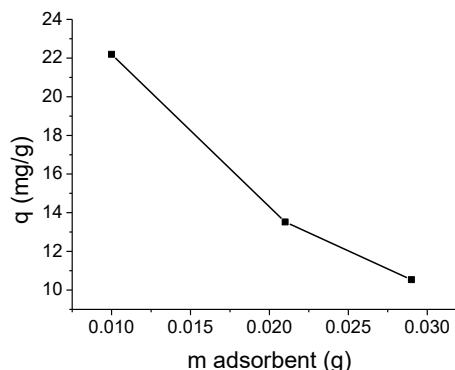
Hình 1: Ảnh hưởng của thời gian tiếp xúc đến độ hấp phụ của vật liệu. Điều kiện thí nghiệm:  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $m$  chất hấp phụ = 0,01 g,  $\text{pH} = 7$

### Ảnh hưởng của lượng chất hấp phụ

Lượng chất hấp phụ ảnh hưởng khá lớn đến quá trình hấp phụ. Nếu sử dụng lượng chất hấp phụ quá ít, quá trình hấp phụ có thể chưa diễn ra triệt để dẫn đến hiệu suất quá trình thấp, kém hiệu quả. Ngược lại, nếu sử dụng một lượng chất hấp phụ lớn có thể dẫn đến việc xác định thời gian bão hòa bị sai do số lượng tâm hấp phụ ban đầu lớn tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình hấp phụ trong một khoảng thời gian ngắn. Ngoài ra, việc sử dụng nhiều chất hấp phụ còn gây nên tình trạng lãng phí. Trong nghiên cứu này, lượng chất hấp phụ sử dụng để khảo sát được thay đổi từ 0,01g đến 0,03 g (việc sử dụng lượng chất hấp phụ nhỏ hơn có thể được nghiên cứu nhưng sẽ gặp phải một số sai số như: lượng mẫu quá nhỏ, dung tích mẫu đo lớn...).

Ảnh hưởng của lượng chất hấp phụ đến khả năng hấp phụ chất màu lên vật liệu được chỉ ra trên hình 2. Theo đó, cùng với sự tăng lượng chất hấp phụ thì dung lượng hấp phụ lại giảm dần. Điều này có thể được giải thích là do, khi tăng lượng chất hấp phụ, số lượng tâm hấp phụ lớn. Về lý thuyết, lượng tâm hấp phụ lớn sẽ tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình hấp phụ. Tuy nhiên, với lượng dung dịch sử dụng nhỏ (10 mL), có thể các tâm hấp phụ này đã bị che lẫn nhau, tương tác

lẫn nhau nên quá trình hấp phụ diễn ra kém hiệu quả dẫn đến dung lượng hấp phụ giảm. Vậy, lượng chất hấp phụ tối ưu trong điều kiện thí nghiệm này là 0,01 g.



Hình 2: Ảnh hưởng của lượng chất hấp phụ đến khả năng hấp phụ CR trên vật liệu GPF ( $C_0 = 50\text{ mg/L}$ ,  $T = 298\text{K}$ ,  $\text{pH} = 7$ , thời gian bão hòa = 80 phút)

### Ảnh hưởng của nhiệt độ

Để khảo sát và tính toán các thông số nhiệt động của quá trình hấp phụ CR trên vật liệu GPF, ảnh hưởng của nhiệt được khảo sát nghiên cứu. Để thay đổi nhiệt độ, các mẫu sẽ được ngâm trong bình điều nhiệt ở các nhiệt độ từ  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  đến  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sau 80 phút, các mẫu được lấy ra khỏi bình điều nhiệt và đo độ hấp phụ A. Kết quả được chỉ ra trên hình 3.

Từ hình 3 ta thấy, nhiệt độ càng cao thì độ hấp phụ  $q$  càng giảm. Độ hấp phụ đạt giá trị cao nhất ở nhiệt độ thấp ( $298\text{ K}$ ). Điều này có thể được giải thích là do (i) nhiệt độ cao là điều kiện không thuận lợi cho quá trình hấp phụ do thành phần của mẫu chứa polymer PVA, có thể ở những nhiệt độ cao, polymer dễ bị ảnh hưởng đến đặc tính cơ, lý hóa (ii) ở nhiệt độ cao, lực hút tĩnh điện giữa các ion trái dấu (các nhóm chức trên bề mặt vật liệu và nhóm chức trên chất màu CR) bị suy giảm đi làm giảm khả năng hấp phụ của vật liệu [6]. Như vậy, ta có thể dự đoán là quá trình hấp phụ CR trên GPF là quá trình thích hợp ở nhiệt độ thấp, quá trình tỏa nhiệt. Các dữ liệu nhiệt động học như hằng số cân bằng hóa học  $K$ , nhiệt phản ứng  $\Delta H^{\circ}$  (kJ/mol), entropy của quá trình nhằm xác định độ hỗn loạn của quá trình  $\Delta S^{\circ}$  (J/mol.K) và năng lượng tự do Gibbs  $\Delta G^{\circ}$  (kJ/mol – nhằm xác định tiêu chuẩn tự diễn biến của quá trình) được tính toán theo các công thức sau:

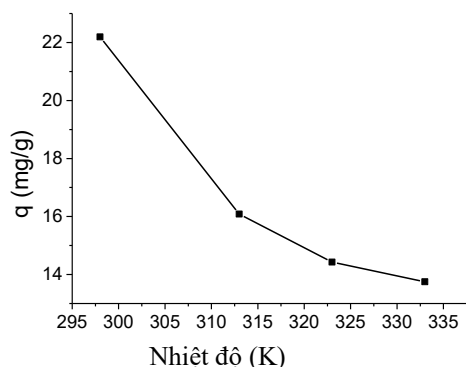
$$\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T \cdot \Delta S^{\circ} \quad (2)$$

$$\Delta G^{\circ} = -RT \ln \frac{q_e}{C_e} \quad (3)$$

$$\ln K = \ln \frac{q_e}{C_e} = \frac{-\Delta H^{\circ}}{R} \cdot \frac{1}{T} + \frac{\Delta S^{\circ}}{R} \quad (4)$$

trong đó  $R$  là hằng số khí ( $R = 8,314\text{ J/mol.K}$ ),  $T$  là

hiệu độ Kelvin,  $q_e$ : độ hấp phụ tại thời điểm cân bằng (mg/g). Giá trị  $-\Delta H^\circ/R$  tính được từ độ dốc của phương trình  $\ln K - 1/T$ , từ đó tính được các giá trị  $\Delta H^\circ$  và  $\Delta S^\circ$  (bảng 1).  $\Delta G^\circ$  tính theo công thức (2) có kết quả âm chứng tỏ quá trình hấp phụ CR trên vật liệu là quá trình tự diễn biến. Các giá trị âm của  $\Delta H^\circ$  và dương của  $\Delta S^\circ$  chỉ ra quá trình trên là tỏa nhiệt và tăng độ hỗn loạn của hệ. Kết quả này phù hợp với các dự đoán nêu trên.



Hình 3: Ảnh hưởng của nhiệt độ đến quá trình hấp phụ CR trên GPF ( $C_0 = 50$  mg/L,  $m = 0,01$  g, pH = 7, thời gian bão hòa = 80 phút)

Bảng 1: Các thông số nhiệt động của quá trình hấp phụ CR trên vật liệu GPF

$\Delta G^\circ$ (kJ/mol)				$\Delta H^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta S^\circ$ (J/mol.K)
298K	313K	323K	333K		
-32,77	-31,48	-31,09	-30,93	-17,86	49,47

Để khảo sát các đặc trưng của quá trình hấp phụ Congo đỏ lên vật liệu GPF, hai mô hình hấp phụ đẳng nhiệt được sử dụng là Langmuir và Freundlich. Mô hình Langmuir giả thiết quá trình hấp phụ là đơn lớp trong đó không xảy ra sự tương tác giữa các phân tử chất bị hấp phụ. Trong khi đó, mô hình Freundlich giả thiết quá trình hấp phụ là đa lớp. Các phương trình toán học mô tả quá trình hấp phụ theo mô hình Langmuir và Freundlich lần lượt như sau:

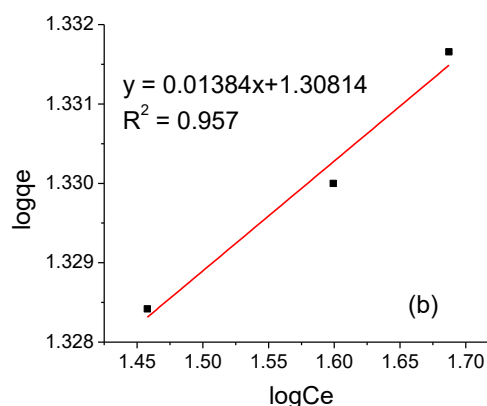
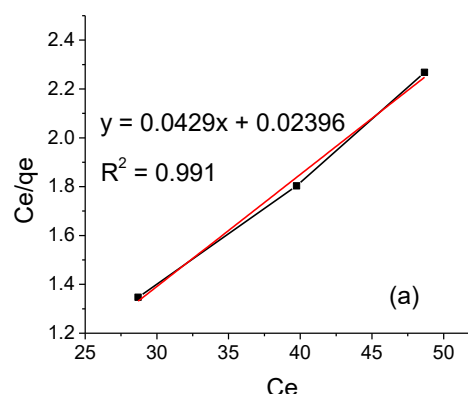
$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L \cdot q_{max}} + \frac{1}{q_{max}} \cdot C_e \quad (5)$$

$$\lg q_e = \lg K_F + \frac{1}{n} \cdot \lg C_e \quad (6)$$

trong đó:  $q_e$  (mg/g) là lượng Congo đỏ bị hấp phụ tại thời điểm cân bằng,  $q_m$  (mg/g) là dung lượng hấp phụ cực đại của vật liệu GPF với chất màu Congo đỏ,  $C_e$  (mg/L) là nồng độ dung dịch CR tại thời điểm cân bằng và  $K_L$  (L/mg),  $K_F$  (mg/g).(L/mg)<sup>1/n</sup> là hằng số Langmuir và Freundlich.

Đường đẳng nhiệt hấp phụ CR trên vật liệu GPF theo

Langmuir và Freundlich được chỉ ra trên hình 4. Các thông số tính toán từ mô hình Langmuir và Freundlich thu được được chỉ ra trong bảng 2. Các kết quả này chỉ ra rằng quá trình hấp phụ Congo đỏ tuân theo phương trình đẳng nhiệt Langmuir với hệ số tương quan  $R^2 = 0,991$  lớn hơn hệ số tương quan trong mô hình Freundlich ( $R^2 = 0,957$ ). Do vậy, ta có thể giả thiết rằng quá trình hấp phụ Congo đỏ lên vật liệu graphene oxit/polyvinyl alcohol/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> là đơn lớp với độ hấp phụ cực đại là 23,31 mg/g.



Hình 4: Đường đẳng nhiệt hấp phụ a) Langmuir và b) Freundlich

Bảng 2: Các thông số đường đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir và Freundlich

Langmuir			Freundlich		
$q_m$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$R^2$	$K_F$ (mg/g).(L/mg) <sup>1/n</sup>	n	$R^2$
23,31	1,79	0,991	20,33	72,2	0,957

So sánh độ hấp phụ cực đại này với một vài chất hấp phụ cùng kiểu khác được chỉ ra trên bảng 3. Các kết quả cho thấy vật liệu GPF cho giá trị độ hấp phụ cực đại không thực sự cao. Nhằm có cái nhìn rõ hơn về ảnh hưởng của thành phần đến khả năng hấp phụ CR, 0,01g mẫu chỉ chứa Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> được đem sử dụng để hấp

phụ 10 ml dung dịch CR 50 mg/L. Kết quả cho thấy, sau 80 phút hấp phụ, dung lượng hấp phụ của  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  đạt 18 mg/g (với mẫu GPF là 21,5 mg/g). Điều này đưa ra giả thiết rằng thành phần chính tạo nên hiệu quả của quá trình hấp phụ CR trong vật liệu GPF là  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Điều này có thể được giải thích một phần là do lượng PVA và GO sử dụng cho mẫu nhỏ hơn rất nhiều lượng  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (0,1 g GO và 0,2 g PVA trong tổng số 1,6 g  $\text{Fe}^{2+}$  và  $\text{Fe}^{3+}$ ). Hơn nữa, các hạt nano sắt từ che phủ bề mặt các tấm phẳng của GO và PVA nên có thể đã ngăn cản một phần sự tiếp xúc của 2 thành phần này vào quá trình hấp phụ CR, kết quả là độ hấp phụ chưa đạt hiệu quả cao. Tuy nhiên, cần thiết phải có các nghiên cứu sâu hơn về cơ chế của quá trình hấp phụ CR để đưa ra các kết luận chính xác.

Bảng 3: Độ hấp phụ cực đại Congo đỏ của một vài chất hấp phụ

Chất hấp phụ	qm (mg/g)	Tài liệu tham khảo
Chitosan/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$	42.62	[6]
Graphene oxide/poly(amidoamine)	198	[7]
GO	546,1	[8]
Magnetic chitosan	1,8257	[9]
GO/PVA/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$	23,31	Nghiên cứu này

## Kết luận

Đã khảo sát khả năng hấp phụ của chất màu Congo đỏ lên vật liệu graphen oxit/polyvinyl alcohol/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (GPF). Kết quả thu được cho thấy, với thời gian tiếp xúc là 80 phút thì quá trình đạt cân bằng, lượng chất hấp phụ tối ưu cho quá trình hấp phụ là 0.01 g và quá trình hấp phụ CR thích hợp ở điều kiện nhiệt độ thấp. Các số liệu đẳng nhiệt hấp phụ cho thấy, quá trình hấp phụ CR lên vật liệu GPF phù hợp với mô hình Langmuir với dung lượng hấp phụ cực đại

là 23,31 mg/g. Với các kết quả trên cho thấy, vật liệu có khả năng xử lý chất màu hữu cơ trong nước thải.

## Lời cảm ơn

Bài báo được thực hiện dưới sự hỗ trợ của đề tài cấp Bộ GD&ĐT mã số B2020 – BKA - 15.

## Tài liệu tham khảo

1. R. M. Christie. Environmental Aspects of Textile Dyeing, Woodhead Publishing Limited, UK, 2007, p.149.
2. Y. Zheng, B. Cheng, W. You, J. Yua, and W. Ho, Journal of Hazardous Materials 369 (2019) 214–225. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.013>
3. H. Patel, Scientific Report, 10 (2020) 16895. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72583-6>
4. Y. Geng, J. Zhang, J. Zhou, J. Lei, Royal Society of Chemistry 8 (2018) 32799–32807. <https://doi.org/10.1039/C8RA05946B>
5. T.D.Le, L.T.Tran, H.T.M.Dang, T.T.H.Tran, H.V.Tran, Journal of Analytical Methods in Chemistry 2021 (2021) 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2021/6670913>
6. X. Liang, J. Duan. Q. Xua, X.Wei, A.Lu, L.Zhang, Chemical Engineering Journal 317 (2017) 766–776. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.089>
7. M. Rafi, B. Samiey, C.H.Cheng, Material (Basel) 11 (2018) 496. <https://doi.org/10.3390/ma11040496>
8. S. Debnath, A. Maity, K. Pillay, Journal of Environmental Chemical Engineering 2 (2014) 260–272. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.12.018>
9. J. Jumadi, A. Kamari, N.A.Rahim, S.T.S.Wong, S.N.M.Yusoff, S. Ishak, M.M. Abdulrasool, S.Kumaran, Journal of Physics: Conference Series 1397 (2019) 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1397/1/012027>