

KHẢO SÁT HẤP PHỤ *p*-NITROPHENOL TRÊN CETYL TRIMETYLAMONI BROMUA BIẾN TÍNH BENTONIT

TS. Bùi Văn Thắng¹
CN. Trần Thị Xuân Mai²

TÓM TẮT

Tính chất của bentonit biến tính bởi cetyl trimetylamoni bromua được khảo sát bởi phổ XRD dựa trên sự thay đổi khoảng cách lớp cơ bản *d*. Sự tăng khoảng cách lớp cơ bản *d* là do tác nhân hoạt động bề mặt thêm vào và hai mô hình sắp xếp mạch anky trong khoảng cách lớp xen giữa của bentonit được đưa ra. Ảnh hưởng của nồng độ, pH, thời gian và nhiệt độ đến khả năng hấp phụ được khảo sát. Kết quả cho thấy, khả năng hấp phụ tăng khi pH tăng. Động học hấp phụ phù hợp với mô hình động học biểu kiến bậc 2 và mô hình đẳng nhiệt Langmuir mô tả dữ kiện thực nghiệm tốt hơn mô hình đẳng nhiệt Freundlich.

Từ khóa: Bentonite, modified bentonite, *p*-nitrophenol, kinetics, isotherms

1. Đặt vấn đề

p-Nitrophenol và các hợp chất nitrophenol đều là những chất có độc tính cao. Hợp chất *p*-nitrophenol gây bong khi tiếp xúc với da, vồng mạc và đường hô hấp tương tự hiện tượng bong phenol. Chúng tương tác với hemoglobin trong máu hình thành methaemoglobin là nguyên nhân gây ra bầm tím cục bộ, rối loạn tuần hoàn máu hoặc gây bất tỉnh. Nếu nhiễm độc *p*-nitrophenol theo đường tiêu hóa gây đau bụng, nôn mửa, tiếp xúc thời gian dài gây ra dị ứng da [1]. Xử lý các hợp chất nitrophenol là trường hợp riêng của quá trình xử lý các hợp chất hữu cơ ô nhiễm trong nước. Một số phương pháp thường được sử dụng để loại bỏ *p*-nitrophenol trong nước là hấp phụ, phân hủy sinh học, oxi hóa,... Trong đó, hấp phụ là phương pháp đơn giản, dễ triển khai, rẻ tiền và thích hợp với khoảng điều kiện hóa lý rộng [2-4].

Bentonit là khoáng đất sét có sẵn, rẻ tiền và hàm lượng phong phú trong tự nhiên. Trong tự nhiên, bentonit thường có sự thay thế đồng hình của các nguyên tử trong tám tứ diện và tám bát diện, dẫn đến sự thiếu hụt điện tích âm trên bề mặt lớp cơ sở và được cân bằng bởi các cation kim loại kiềm và kiềm thổ hydrat (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , ...) chiếm giữ khoảng không gian giữa các lớp này [1, 5]. Khoáng bentonit ưa nước bởi vì cation cân bằng lớp giữa của chúng dễ bị hydrat hóa, do vậy làm hạn chế ứng dụng trong hấp phụ các hợp chất hữu cơ ô nhiễm. Để làm thay đổi tính chất này của sét bentonit là chuyển từ dạng ưa nước sang dạng ưa hữu cơ bằng cách trao đổi cation cân bằng hydrat lớp giữa bằng cation hữu cơ. Sét bentonit biến tính bằng các cation hữu cơ thường được gọi là bentonit hữu cơ.

Cation hữu cơ thường được sử dụng để biến tính sét bentonit là cation amin

^{1,2} Trường Đại học Đồng Tháp

bậc bốn với công thức chung $[(\text{CH}_3)_3\text{NR}^+]$ hoặc $[(\text{CH}_3)_2\text{NR}_2]^+$, trong đó R là gốc hydrocarbon vòng hoặc hydrocarbon béo. Tác nhân amin bậc 4 thường được sử dụng để điều chế bentonit hữu cơ là cetyl trimetylamoni bromua (CTAB) [3, 5]. Quá trình biến tính sét bentonit bằng cation hữu cơ làm tăng khả năng ứng dụng của chúng trong xử lý và phục hồi nguồn nước bị ô nhiễm bởi các chất hữu cơ độc hại [1, 2].

Trong nghiên cứu này, bentonit hữu cơ được điều chế bằng cách biến tính bentonit bằng tác nhân cetyl trimetylamoni bromua với nồng độ khác nhau. Khảo sát một số yếu tố ảnh hưởng đến khả năng hấp phụ *p*-nitrophenol của bentonit hữu cơ như ảnh hưởng của nồng độ tác nhân biến tính, pH, thời gian và nhiệt độ được nghiên cứu.

2. Thục nghiệm

2.1. Hóa chất, dụng cụ và thiết bị

Bentonit nguyên liệu sử dụng trong điều chế bentonit hữu cơ là bentonit kiềm (Bình Thuận) có hàm lượng montmorillonit $\geq 80\%$ (Bent). Mẫu quặng sau khi làm giàu, được nghiền mịn và sàng qua rây 100 mesh. Dung lượng trao đổi cation là 75 meq/100 g. Tác nhân biến tính sử dụng trong nghiên cứu này là cetyl trimetylamoni bromua (Sigma–Aldrich). Các hóa chất 4-nitrophenol, AgNO_3 , NaOH , HCl là những hóa chất sạch phân tích (Trung Quốc) và một số tác nhân cần thiết khác.

2.2. Điều chế vật liệu bentonit hữu cơ

Quá trình điều chế bentonit hữu cơ được tiến hành như sau: lấy 4 gam bentonit Bình Thuận (Bent) phân tán trong 400 ml nước cất dưới điều kiện khuấy mạnh trên máy khuấy từ gia nhiệt với tốc độ 600 vòng/phút trong 2 giờ. Dung dịch CTAB thêm chậm vào huyền phù sét bentonit ở 70°C . Nồng độ CTAB sử dụng lần lượt là 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5 và 2,0 lần so với CEC của sét bentonit. Hỗn hợp phản ứng tiếp tục khuấy mạnh ở 70°C trong 4 giờ, sau đó giữ ở nhiệt độ phòng trong 24 giờ. Sau phản ứng huyền phù được lọc tách và rửa bằng nước cất vài lần để loại bỏ hết ion Br^- dư (thử bằng AgNO_3 0,01M) và phần rắn được sấy ở 110°C trong 10 giờ thu được vật liệu bentonit hữu cơ. Mẫu được ký hiệu theo nồng độ tác nhân CTAB, ví dụ, mẫu 0,25C-Bent được điều chế với nồng độ CTAB là 0,25CEC của bentonit.

Xác định khoảng cách lớp cơ bản của vật liệu bentonit biến tính bằng phổ XRD trên máy D8 Advance-Bruker (Đức) sử dụng bức xạ 40 kV, 300 mA, quét từ $1-10^\circ$, khoảng cách lớp được xác định bởi XRD là đỉnh 001.

2.3. Khảo sát hấp phụ

Quá trình hấp phụ được tiến hành như sau: cân 0,1 gam bentonit hữu cơ cho vào 100 ml dung dịch *p*-nitrophenol có nồng độ xác định. Điều chỉnh pH bằng dung dịch NaOH 1M (hoặc HNO_3 1M). Tiến hành khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố như thời gian hấp phụ, pH dung dịch, nhiệt độ đến khả năng hấp

phụ *p*-nitrophenol của bentonit hữu cơ. Sau khi hấp phụ, huyền phù lọc qua giấy lọc (0,45 μm) và phân tích nồng độ *p*-nitrophenol còn lại trong dung dịch bằng phổ UV-Vis ở bước sóng 317 nm.

Dung lượng hấp phụ (q_t) được tính từ công thức (1) [5]:

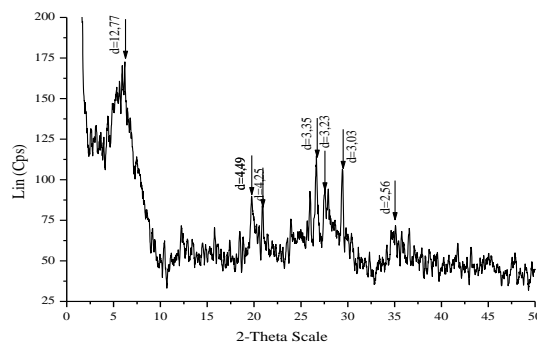
$$q_t = \frac{(C_o - C_t) \cdot V}{m} \quad (1)$$

Trong đó C_o , C_t (mg/L) là nồng độ ban đầu và ở thời điểm t (phút), V là thể tích dung dịch (lít), m là khối lượng chất hấp phụ (g).

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đặc trưng của vật liệu bentonit hữu cơ

Kết quả phân tích XRD của mẫu bentonit Bình Thuận (Bent) dùng làm nguyên liệu điều chế vật liệu bentonit hữu cơ được trình bày trong hình 1 cho thấy, đỉnh phổ đặc trưng của montmorillonit ở $d = 12,77$ Å, 4,49 Å và 2,56 Å. Từ giá trị d cho biết, sét bentonit Bình Thuận thuộc loại bentonit kiềm chứa chủ yếu cation hidrat bù ở lớp giữa là Na^+ và K^+ . Bên cạnh các đỉnh phổ đặc trưng của montmorillonit còn có một số đỉnh phổ của các tạp chất khác như quartz với $d = 4,25$ Å và 3,35 Å; microline với $d = 3,23$ Å; albit với $d = 3,19$ Å và canxit với $d = 3,03$ Å.



Hình 1: Giản đồ XRD của mẫu Bent

Khi cation vô cơ hidrat ở lớp giữa của sét bentonit được thay thế bằng tác nhân CTAB làm tăng khoảng cách lớp giữa của bentonit hữu cơ. Giản đồ XRD của mẫu bentonit hữu cơ biến tính bằng tác nhân CTAB được chỉ ra trong hình 2 cho thấy, giá trị d_{001} của các mẫu bentonit hữu cơ điều chế với nồng độ CTAB là 0,25CEC của sét bentonit chỉ thu được 1 đỉnh phổ nằm ở 15,06 Å. Khoảng cách lớp cơ bản của các mẫu 0,50C-Bent; 0,75C-Bent và 1,00C-Bent lần lượt là 17,62 Å; 19,81 Å và 20,12 Å. Khi nồng độ CTAB > 1,0CEC của sét bentonit thì xuất hiện 2 đỉnh phổ ở khoảng 19,6 Å và 41 Å.

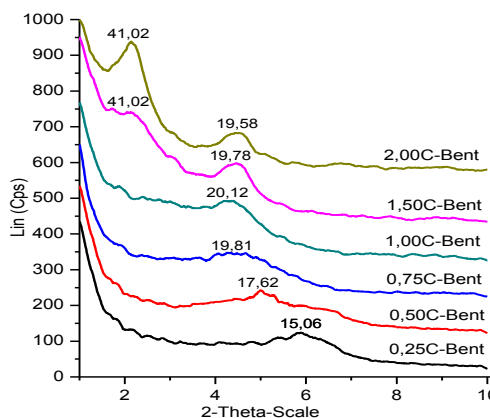
Giá trị d_{001} của mẫu 0,25C-Bent là 15,06 Å gần với tổng chiều cao của đầu amin phân cực (5,1 Å) và bề dày 1 lớp sét bentonit (9,6 Å) chỉ ra rằng, mạch ankyl sắp xếp kiểu đơn lớp trong khoảng không gian ở lớp xen giữa của sét bentonit.

Khoảng cách lớp cơ bản của mẫu 0,50C-Bent là 17,62 Å gần với tổng chiều cao của đầu amin phân cực (6,7 Å) và bề dày 1 lớp sét bentonit (9,6 Å) cho thấy rằng, mạch ankyl sắp xếp

kiểu đơn lớp trong khoảng không gian lớp xen giữa của sét bentonit. Giá trị d_{001} của mẫu 0,75C-Bent là 19,81 Å gần với tổng chiều cao của đầu amin phân cực (5,1 Å), bề dày 1 lớp sét bentonit (9,6 Å) và chiều cao của đuôi ankyl (4,6 Å) chỉ ra rằng, mạch ankyl sắp xếp kiểu hai lớp trong khoảng không gian lớp xen giữa của bentonit hữu cơ. Mạch ankyl của phân tử CTAB sắp xếp kiểu đơn lớp parafin và góc hợp giữa mạch ankyl của phân tử CTAB với lớp sét bentonit, α , được tính toán từ phương trình (2) như sau:

$$\sin \alpha = (d - h)/l \quad (2)$$

Trong đó: d là khoảng cách lớp cơ bản, h là bề dày lớp sét bentonit (9,6 Å) và l là chiều dài của phân tử CTAB (25,3 Å) [6].



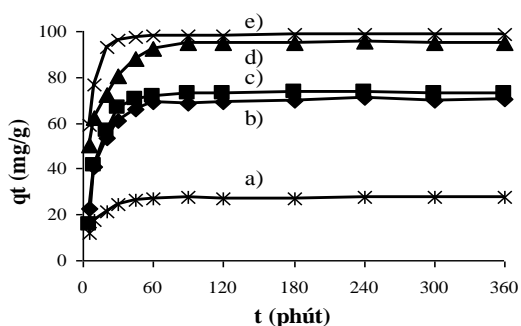
Hình 2: *Giản đồ XRD của mẫu bentonit hữu cơ điều chế ở nồng độ CTAB khác nhau*

Áp dụng phương trình (2) tính được giá trị α của mẫu 1,00C-Bent là 24° . Khoảng cách lớp cơ bản của các mẫu điều chế với nồng độ CTAB > 1,0CEC

của sét bentonit thì xuất hiện thêm đỉnh phổ ở khoảng 41 Å chỉ ra rằng, mạch ankyl có thể sắp xếp kiểu hai lớp parafin với góc α là 36° . Kết quả này cũng phù hợp với một số báo cáo đã công bố trước đây [4, 6].

3.2. Xác định thời gian đạt cân bằng hấp phụ

Mối quan hệ giữa thời gian và dung lượng hấp phụ của *p*-nitrophenol trên mẫu bentonit và bentonit hữu cơ được chỉ ra trong hình 3.



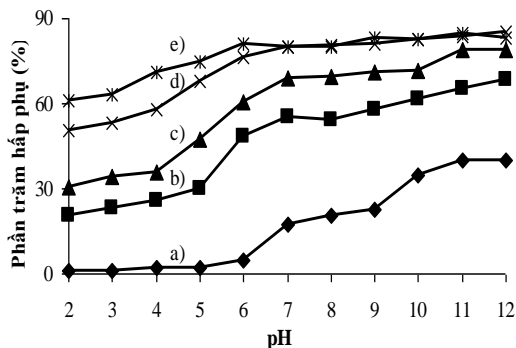
Hình 3: *Sự phụ thuộc của dung lượng hấp phụ p-nitrophenol của bentonit hữu cơ theo thời gian: a) Bent; b) 0,5C-Bent; c) 0,75C-Bent; d) 1,0C-Bent và e) 2,0C-Bent.*

Từ hình 3 cho thấy, có ba bước hấp phụ xảy ra trong khoảng thời gian khảo sát. Giai đoạn xảy ra nhanh trong 30 phút đầu là do sự tấn công của *p*-nitrophenol đến bề mặt hoặc lớp xen giữa của chất hấp phụ. Giai đoạn hấp phụ xảy ra chậm hơn trong khoảng thời gian từ 30 phút đến 120 phút là do tương tác đẩy của chất đã bị hấp phụ và chất bị hấp phụ trong dung dịch. Giai đoạn 3 là giai đoạn cân bằng giữa chất bị hấp phụ và chất hấp phụ trong dung dịch.

Bentonit chưa biến tính dùng làm nguyên liệu để điều chế bentonit hữu cơ có khả năng hấp phụ *p*-nitrophenol thấp. Trong khi đó, bentonit hữu cơ có khả năng hấp phụ *p*-nitrophenol lớn hơn nhiều so với bentonit nguyên liệu, bởi vì số tâm hấp phụ trong bentonit hữu cơ tăng lên khi tác nhân CTAB được đưa vào giữa lớp của sét bentonit thông qua quá trình trao đổi giữa chúng với các cation vô cơ hydrat lớp giữa. Kết quả này cũng tương tự như nghiên cứu của một số tác giả trước đó [1, 5]. Thời gian cần thiết để hấp phụ *p*-nitrophenol trên vật liệu bentonit hữu cơ là 60 phút, tuy nhiên, để đảm bảo cân bằng thí nghiệm cần tiến hành thí nghiệm trong 2 giờ.

3.3. Ảnh hưởng của pH

Phần trăm hấp phụ *p*-nitrophenol của bentonit hữu cơ ở pH khác nhau được chỉ ra trong hình 4.



Hình 4: Sự phụ thuộc của phần trăm hấp phụ *p*-nitrophenol của bentonit hữu cơ vào pH dung dịch: a) Bent; b) 0,5C-Bent; c) 0,75C-Bent; d) 1,0C-Bent và e) 2,0C-Bent.

Từ hình 4 cho thấy, phần trăm loại bỏ *p*-nitrophenol tăng khi pH dung dịch tăng trong khoảng $\text{pH} < \text{pK}_a$ và $\text{pH} >$

pK_a . Nhưng trong khoảng pH từ 7 đến 8, phần trăm hấp phụ gần như không đổi trong tất cả các mẫu khảo sát. *p*-Nitrophenol có thể tồn tại dạng phân tử khi $\text{pH} < \text{pK}_a$ hoặc ion khi $\text{pH} > \text{pK}_a$ [3, 6], do đó, khả năng hấp phụ bị ảnh hưởng bởi sự cạnh tranh ngày càng tăng lên giữa ion *p*-nitrophenol và phức ion – phân tử *p*-nitrophenol.

Có hai cơ chế hấp phụ của *p*-nitrophenol trên vật liệu bentonit và bentonit hữu cơ: (i) cơ chế tương tác tĩnh điện khi *p*-nitrophenol tồn tại dạng anion và (ii) cơ chế hấp phụ khi *p*-nitrophenol tồn tại dạng phân tử do tương tác yếu giữa phân tử *p*-nitrophenol và tác nhân CTAB của bentonit hữu cơ.

Tuy nhiên, trong hình 4 cho thấy, phần trăm hấp phụ *p*-nitrophenol vẫn tăng khi $\text{pH} > 9$, điều này có thể giải thích dựa vào phương trình (3) [4], trong đó mức độ ion của *p*-nitrophenol tăng khi giá trị pH dung dịch tăng và φ_{ion} là mức độ ion hóa của *p*-nitrophenol được chỉ ra trong bảng 1.

$$\varphi_{\text{ion}} = \frac{1}{1 + 10^{(\text{pK}_a - \text{pH})}} \quad (3)$$

Từ kết quả hấp phụ cho thấy rằng, khả năng hấp phụ *p*-nitrophenol cực đại xuất hiện trong khoảng pH xấp xỉ bằng giá trị pK_a của ion *p*-nitrophenol ứng với phản ứng tách proton. Nhiều báo cáo đã được công bố trước đây về ảnh hưởng của pH đến khả năng hấp phụ *p*-nitrophenol khác nhau phụ thuộc vào điều kiện thực nghiệm [2, 4].

Bảng 1: Mức độ ion của *p*-nitrophenol ở pH khác nhau

pH	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ϕ_{ion}	$6,92 \times 10^{-5}$	$6,91 \times 10^{-4}$	$6,87 \times 10^{-3}$	0,065	0,41	0,87	0,98	0,999	1	1

3.4. Động học hấp phụ

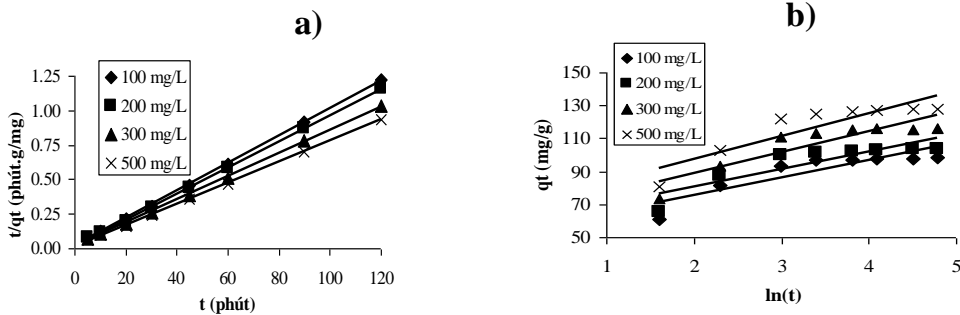
Mô hình động học biểu kiến bậc 2 (4) và mô hình Elovich (5) thường được sử dụng mô tả động học hấp phụ *p*-nitrophenol trên bentonit hữu cơ [4, 5]. Dạng tuyến tính của phương trình động học biểu kiến bậc 2 và phương trình Elovich được viết như sau:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e} t + \frac{1}{k \cdot q_e^2} \quad (4)$$

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln \alpha \beta + \frac{1}{\beta} \ln t \quad (5)$$

Trong đó q_e là dung lượng hấp phụ ở trạng thái cân bằng (mg/g), k là hằng số tốc độ hấp phụ (g/mg.phút), t là thời gian (phút). α là tốc độ hấp phụ ban đầu (mg/g.giây), β là hằng số khử hấp phụ (g/mg) trong bất kỳ thí nghiệm nào.

Đồ thị tuyến tính theo mô hình biểu kiến bậc 2, mô hình Elovich được chỉ ra trong hình 5 và tính toán các tham số đặc trưng từ hình 5 được trình bày trong bảng 2.



Hình 5: Động học hấp phụ *p*-nitrophenol của bentonit hữu cơ:

a) Dạng tuyến tính của phương trình động học biểu kiến bậc 2 và b) Dạng tuyến tính của phương trình Elovich

Từ kết quả cho trong bảng 2 nhận thấy rằng, tất cả các hệ số tương quan (R^2) của phương trình động học biểu kiến bậc 2 đều lớn hơn mô hình Elovich, điều đó có nghĩa là phương trình động học biểu kiến bậc 2 mô tả tốt quy luật động học hấp phụ *p*-nitrophenol trên bentonit hữu cơ ở 30°C với hệ số tương quan cao ($R^2 > 0,999$).

Kết quả này phù hợp với nghiên cứu động học hấp phụ *p*-nitrophenol trên bentonit hữu cơ của một số tác giả [2, 4]. Hằng số tốc độ hấp phụ, k , tăng khi nồng độ *p*-nitrophenol tăng từ 100 mg/L lên 500 mg/L, tuy nhiên, sự tăng này cũng không đáng kể cho thấy ảnh hưởng của nồng độ đến hằng số tốc độ không nhiều.

Bảng 2: Các tham số động học hấp phụ *p*-nitrophenol của bentonit hữu cơ

Nồng độ <i>p</i> -nitrophenol	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e} t + \frac{1}{kq_e^2}$			$q_t = \frac{1}{\beta} \ln t + \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta)$		
	<i>k</i> (g/mg.phút)	<i>q_e</i> (mg/g)	<i>R</i> ²	<i>α</i> (mg/g.phút)	<i>β</i> (g/mg)	<i>R</i> ²
100 mg/L	0,0053	100,00	0,9997	1847	0,0949	0,7686
200 mg/L	0,0052	105,26	0,9997	2739	0,0938	0,7556
300 mg/L	0,0042	119,05	0,9997	1919	0,0792	0,7990
500 mg/L	0,0037	131,58	0,9997	2105	0,0719	0,8002

3.5. Đường đẳng nhiệt hấp phụ

Đẳng nhiệt hấp phụ *p*-nitrophenol trên bentonit hữu cơ thường được mô tả theo phương trình Langmuir (6) và phương trình Freundlich (7) [4] được thể hiện như sau:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{K_L q_m} \quad (6)$$

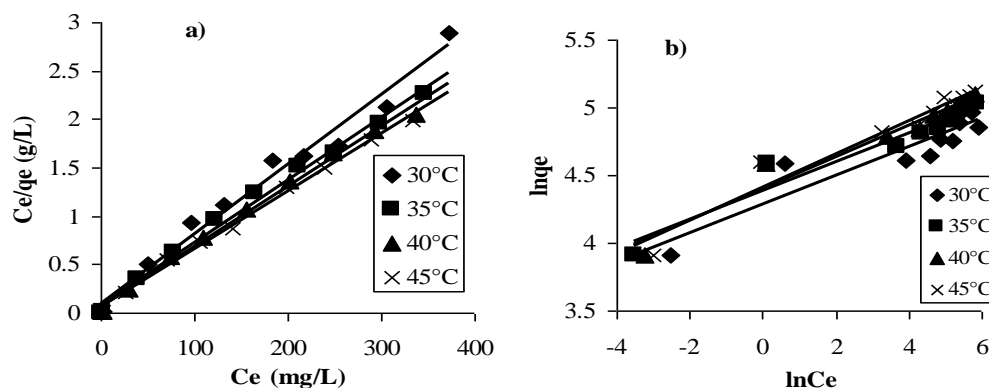
$$\ln q_e = \frac{1}{n} \ln C_e + \ln K_F \quad (7)$$

Trong đó *C_e* (mg/L) và *q_e* (mg/g) là nồng độ *p*-nitrophenol cân bằng trong dung dịch và trong pha rắn, *q_m* là dung lượng hấp phụ cực đại (mg/g), *K_L* là hằng số hấp phụ Langmuir, *K_F* và *1/n* là các hằng số Freundlich.

Đồ thị tuyến tính theo phương trình Langmuir và Freundlich được chỉ ra trong hình 6 và tính toán các tham số đặc trưng được trình bày trong bảng 3.

Hệ số tương quan trong Bảng 3 cho thấy, phương trình đẳng nhiệt Langmuir (*R*² = 0,99) mô tả tốt hơn phương trình Freundlich (*R*² = 0,85) đối với quá trình hấp phụ *p*-nitrophenol bằng bentonit hữu cơ ở trong khoảng nhiệt độ từ 30 đến 45°C.

Từ kết quả chỉ ra trong Bảng 3 cho thấy, dung lượng hấp phụ bão hoà đơn lớp (*q_m*) tỉ lệ thuận với nhiệt độ, nghĩa là dung lượng hấp phụ *p*-nitrophenol trên bentonit hữu cơ tăng khi nhiệt độ tăng và quá trình hấp phụ là thu nhiệt. Dung lượng hấp phụ tăng đi kèm với nhu cầu năng lượng cao cho quá trình hấp phụ *p*-nitrophenol trên vật liệu hấp phụ khảo sát. Kết quả này phù hợp với báo cáo trước đó về sự hấp phụ *p*-nitrophenol trên bentonit hữu cơ [3, 4].



Hình 6: Dạng tuyến tính theo phương trình đẳng nhiệt của quá trình hấp phụ *p*-nitrophenol của bentonit hữu cơ: a) Langmuir và b) Freundlich

Bảng 3: Các tham số phương trình Langmuir và Freundlich của quá trình hấp phụ *p*-nitrophenol trên bentonit hữu cơ ở 30°C, 35°C, 40°C và 45°C

Nhiệt độ	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{K_L \cdot q_m}$			$\ln q_e = \left(\frac{1}{n}\right) \ln C_e + \ln K_F$		
	K_L (L/mg)	q_m (mg/g)	R^2	$1/n$	K_F (L/g)	R^2
30°C	0,0769	138,89	0,9801	0,105	72,60	0,8563
35°C	0,0791	153,85	0,9930	0,107	80,00	0,9399
40°C	0,0973	161,29	0,9947	0,116	81,04	0,9531
45°C	0,1119	166,67	0,9958	0,122	81,86	0,9469

4. Kết luận

Phổ XRD được sử dụng để khảo sát sự thay đổi khoảng cách lớp cơ bản của sét bentonit và bentonit biến tính bằng tác nhân CTAB. Đối với mẫu 0,25C-Bent và 0,50C-Bent có cấu trúc sắp xếp kiểu đơn lớp trong khoảng không gian lớp xen giữa bentonit hữu cơ. Mô hình sắp xếp của mẫu 0,75C-Bent phù hợp với kiểu hai lớp đơn, còn mẫu 1,00C-Bent thì mô hình sắp xếp kiểu đơn lớp parafin với góc $\alpha = 24^\circ$ và mẫu bentonit hữu cơ biến tính với nồng độ CTAB >

1,0 CEC của sét bentonit phù hợp với mô hình sắp xếp kiểu hai lớp parafin với góc $\alpha = 36^\circ$.

Ảnh hưởng của pH, thời gian hấp phụ và nhiệt độ được khảo sát. Phần trăm hấp phụ *p*-nitrophenol tăng khi pH tăng, dung lượng hấp phụ tăng nhanh trong thời gian đầu và đạt cân bằng sau 120 phút. Động học hấp phụ *p*-nitrophenol của bentonit hữu cơ phù hợp với mô hình động học biểu kiến bậc 2 với hệ số tương quan cao ($R^2 > 0,999$). Phương trình đẳng nhiệt

Langmuir mô tả quá trình hấp phụ *p*-nitrophenol của bentonit hữu cơ tốt hơn so với phương trình Freundlich trong khoảng nhiệt độ khảo sát từ 30°C đến 45°C.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Y. Park, G.A. Ayoko, R.L. Frost (2011), *Journal of Colloid and Interface Science*, 360, 440–456
2. G. Xue, M. Gao, Z. Gu, Z. Luo, Z. Hu (2013), *Chemical Engineering Journal*, 218, 223–231
3. Q. Zhou, R.L. Frost, H. He, Y. Xi, H. Liu (2007), *Journal of Colloid and Interface Science*, 307, 357–363
4. Q. Zhou, H.P. He, J.X. Zhu, W. Shen, R.L. Frost, P. Yuan (2008), *Journal of Hazardous Materials*, 154, 1025–1032
5. H. Koyuncua, N. Yıldız, U. Salgın, F. Koroğlu, A. Çalimli (2011), *Journal of Hazardous Materials*, 185, 1332–1339
6. Z. Hu, G. he, Y. Liu, C. Dong, X. Wu, W. Zhao (2013), *Applied Clay Science*, 75–76, 134–140

AN INVESTIGATION OF *p*-NITROPHENOL ADSORPTION BY CETYL TRIMETHYLAMMONIUM BROMUA MODIFIED BENTONITE

ABSTRACT

Cetyl trimethylammonium bromide modified bentonite clay property was studied by X-ray diffraction through the changes of basic d-spacing. The d-spacing first increases with increase in the amount of added surfactant, two kinds of novel arrangement of alkyl chains in interlayer of bentonite were proposed. The effects of the concentration of modified agent, pH, contact time and temperature were investigated in details. The results revealed that the adsorption of p-nitrophenol increases with an increase in pH. The adsorption kinetics was found to follow the pseudo-second-order kinetic model and the equilibrium data fitted the Langmuir equation better than Freundlich equation.

Keywords: bentonite, modified bentonite, *p*-nitrophenol, kinetics, isotherms