CHẾ TẠO VẬT LIỆU NANO LAI GO/Fe3O4 ĐỊNH HƯỚNG ỨNG DỤNG LOẠI BỎ KIM LOẠI NẶNG TRONG NƯỚC Ô NHIễM

Nguyễn Văn Hảo^{1*}, Chu Thị Anh Xuân¹, Nguyễn Ngọc Anh², Phạm Văn Trình²

¹Trường Đại học Khoa học – ĐH Thái Nguyên, ²Viện Khoa học Vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

TÓM TẮT

Chúng tôi trình bày việc chế tạo vật liệu nano lai GO/ Fe₃O₄ bằng phương pháp đồng kết tủa. Các tính chất cấu trúc, hình thái và lý hóa của vật liệu nano lai được đặc trưng bởi phương pháp XRD, ảnh SEM, FTIR và Raman. Kết quả chỉ ra, các hạt nano Fe₃O₄ với kích thước nhỏ, có tính xốp và gắn kết tốt với các tấm graphene của GO. Hiệu suất hấp phụ As(III) lên tới 95.24 % và dung lượng hấp phụ cực đại có thể đạt được lên tới 112,2 mg/g. Số liệu thực nghiệm fit tốt với mô hình Langmuir ($R^2 = 0.9983$). Đây được coi là một vật liệu có tiềm năng lớn trong việc xử lý nước thải chứa kim loại nặng trong môi trường nước.

Từ khóa: Vật liệu nano lai; GO/ Fe₃O₄; hấp phụ As(III); xử lý nước thải; kim loại nặng

Ngày nhận bài: 26/10/2020; Ngày hoàn thiện: 30/11/2020; Ngày đăng: 30/11/2020

SYNTHESIS OF GO/Fe₃O₄ HYBRID NANOMATERIALS ORIENTED TO THE APPLICATION OF HEAVY METAL REMOVAL IN POLLUTED WATER

Nguyen Van Hao^{1*}, Chu Thi Anh Xuan¹, Nguyen Ngoc Anh², Pham Van Trinh² ¹TNU - University of Sciences,

²Institute of Materials Science - Vietnam Academy of Science and Technology

ABSTRACT

The paper presents the synthesis of GO/Fe₃O₄ hybrid nanomaterials by the co-precipitation method. The structural, morphological and physicochemical properties of hybrid nanomaterials were characterized by XRD, SEM, FTIR and Raman methods. The results showed that Fe₃O₄ nanoparticles with small size, porosity and good bonding with graphene sheets of GO. As(III) adsorption efficiency of GO/Fe₃O₄ was up to 95.24% and the maximum adsorption capacity could reach up to 112.2 mg/g. Experimental data fit well with Langmuir model (R² = 0.9983). This is considered a material with great potential in treating heavy-metal containing wastewater in water environment.

Keywords: *Hybrid nanomaterials; GO/ Fe*₃ O_4 ; *As*(*III*) *adsorption; waste water treatment; heavy metal*

Received: 26/10/2020; Revised: 30/11/2020; Published: 30/11/2020

* Corresponding author. Email:haonv@tnus.edu.vn

http://jst.tnu.edu.vn; Email: jst@tnu.edu.vn

1. Mở đầu

Nước sạch là một trong những nhu cầu thiết yếu nhất trong đời sống con người. Nó có vai trò vô cùng quan trọng trong việc bảo vệ sức khỏe cộng đồng, góp phần duy trì và phát triển an sinh xã hội. Ô nhiễm nguồn nước là một trong những vấn đề nghiêm trọng nhất của toàn thế giới, đặc biệt là sự ô nhiễm các kim loại độc hại [1], [2]. Các ion kim loại độc hại được thải ra từ các khu công nghiệp như luyện kim, mạ điện, khai thác khoáng sản.... theo các dòng chảy tác động trực tiếp tới hệ sinh thái môi trường và sức khỏe con người, động vật...

Hiện nay có nhiều kỹ thuật khác nhau để loại bỏ ion kim loai năng ra khỏi nguồn nước như kết tủa hóa học, trao đối ion, màng lọc, hập phu,... Mỗi phương pháp đều có những ưu điểm riêng, tuy nhiên, hấp phu được cho là một phương pháp đơn giản, dễ thực hiện, hiệu quả và rẻ tiền nhất [3], [4]. Cho tới nay, có nhiều vật liệu như các bon hoạt tính, khoáng sét, zeolite, polyme... đã được áp dung rông rãi để xử lý nước thải [5]-[8]. Tuy nhiên, hầu hết các vật liệu này đều gặp phải vấn đề về khả năng hấp phụ thấp hoặc không ổn định ở các giá trị pH thấp hoặc cao. Trong những năm gần đây, Graphene oxit (GO) là một trong những vật liệu nano carbon tiêu biểu nhờ khả năng hấp phụ cao và diện tích bề mặt lớn, đã thu hút được nhiều sự quan tâm nghiên cứu của các nhà khoa học [9], [10]. Mặc dù vậy, GO vẫn có những hạn chế, chẳng hạn như không dễ dàng tách khỏi dung dịch nước vì khả năng phân tán cao trong nước và kích thước nhỏ; do đó, làm hạn chế các ứng dung của GO. Để giải quyết vấn đề này, các nhà khoa học đã cố gắng để chế tạo các vật liệu nano-hybrid giữa GO và oxit từ tính [11], [12]. Môt trong những oxit từ tính có nhiều ưu điểm trong y sinh học và xử lý môi trường là Fe₃O₄. Các vật liệu hybrid GO/ Fe₃O₄ từ tính đã được nghiên cứu để chiết tách cadimi(II), loai bỏ kim loai năng như Cu, Ni, As, Pb hay hấp phu thuốc nhuôm khác nhau [13]-[15]. Tuy nhiên, khả năng hấp phụ các kim loại nặng của vật liệu hybrid GO/ Fe₃O₄ trong các báo cáo trước đó chưa được cao. Trong bài báo này, chúng tôi báo cáo việc chế tạo vật liệu nano lai GO/ Fe₃O₄ bằng phương pháp đồng kết tủa để định hướng ứng dụng xử lý kim loại độc hại trong nước.

2. Thực nghiệm

2.1. Vật liệu và hóa chất

Các hóa chất được sử dụng trong công việc này bao gồm FeCl₂.4H₂O, FeCl₃.6H₂O, NH₄OH, NaOH, HCl, HNO₃ và H₂SO₄ được cung cấp bởi Aladdin Chemical (Trung Quốc). NaAsO₂ được cung cấp bởi Fluka (Hà Lan).

2.2. Chế tạo vật liệu lai GO/ Fe₃O₄

Graphene oxide (GO) sử dụng trong thí nghiệm này được cung cấp từ graphen thương mại bởi phương pháp biến tính sử dụng axit HNO₃ và H₂SO₄. Để tổng hợp vật liệu lại GO/Fe₃O₄, 0,1 g GO đã được phân tán trong 50 ml nước cất hai lần và được rung siêu âm trong 45 phút. Tiếp đó, 0,49 g FeCl₂.4H₂O và 1,35 g FeCl₃.6H₂O được phân tán trong 50 ml nước cất 2 lần và được trộn với dung dịch GO ở trên. Sau đó, hỗn hợp được khuẩy từ ở 80 °C trong 40 phút rồi được nhỏ từ từ NH4OH cho tới khi pH của dung dịch đạt giá tri 11. Sau đó 30 phút, kết tủa màu đen thu được được làm nguội ở nhiệt độ phòng và được rửa lai bằng nước cất vài lần cho tới khi đat đô pH trung tính. Cuối cùng mẫu được sấy khô ở 60 °C trong thời gian 2h.

2.3. Các đặc trưng của vật liệu

Cấu trúc và hình thái học của vật liệu chế tạo được đo bởi máy nhiễu xạ tia X (XRD – D8 ADVANCE), kính hiển vi điện tử quét SEM (Hitachi S-4800). Các tính chất lý - hóa được đặc trưng bởi máy quang phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR 6300) và quang phổ Raman (XploRA, Horiba Jobin-Yvon).

2.4. Thực nghiệm hấp phụ

Thực nghiệm hấp phụ được thực hiện bằng cách trộn vật liệu hấp phụ với dung dịch As(III) trong bình tam giác. Hiệu ứng của độ pH được thực hiện với lượng chất hấp phụ 0,5 mg/mL trong thể tích 40 ml dung dịch As(III) ở nồng độ 10 mg/L. Độ pH được điều chỉnh bằng cách sử dụng axit dung dịch HCl 0,1M và bazo NaOH 0,1M. Hiệu ứng của nồng độ As(III) được thực hiện bằng cách thay đổi nồng độ As(III) từ 5 mg/L tới 300 mg/L với nồng độ chất hấp phụ 0,5 mg/mL. Dung dịch được lắc theo thời gian ở nhiệt độ phòng bởi máy lắc (MaxQ 4000). Sau quá trình lắc, chất hấp phụ được tách ra và nồng độ As(III) được đo bởi máy quang phổ AAS (Hitachi).

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Các đặc trưng của vật liệu lai GO/ Fe₃O₄

3.1.1. Phân tích cấu trúc và hình thái học của vật liệu

Mẫu XRD của vật liệu lai GO/Fe₃O₄ được trình bày trong Hình 1. Kết quả chỉ ra, đỉnh đặc trưng của GO ở góc $2\theta = 10,7^{\circ}$ ứng với mặt phẳng (002), trong khi các đỉnh đặc trưng cho Fe₃O₄ xuất hiện ở các góc $2\theta = 30,22^{\circ}$; 35.64° ; $43,12^{\circ}$; $53,80^{\circ}$; $57,13^{\circ}$ và $62,80^{\circ}$ tương ứng với các mặt phẳng phản xạ (220), (311), (400), (442), (511) và (440). Các đỉnh này phù hợp với cấu trúc lập phương tâm mặt của tinh thể spinel Fe₃O₄ (JCPDS file số 19-0629) [16].



Hình 1. Phố XRD của vật liệu lai GO/ Fe₃O₄ Để khảo sát cấu trúc và hình thái của vật liệu lai GO/ Fe₃O₄, ảnh SEM của vật liệu chế tạo đã được sử dụng cho việc quan sát. Hình 2 chỉ ra ảnh SEM của vật liệu lai GO/ Fe₃O₄. Kết quả cho thấy, các hạt nano Fe₃O₄ có dạng tựa cầu với kích thước trung bình nhỏ (< 20 nm) (Hình 2a) đã được gắn chặt trên bề mặt của các tấm GO (Hình 2b). Quan sát ảnh SEM cũng cho thấy, vật liệu chế tạo được có tính xốp và tạo ra nhiều lỗ rỗng. Ngoài ra, nhờ có các tấm GO nên các hạt nano Fe₃O₄ đã không bị kết đám lại. Điều này giúp cho vật liệu có khả năng thích ứng tốt cho các ứng dụng trong xử lý môi trường.



Hình 2. Anh SEM của vật liệu $Fe_3O_4(a)$ và $GO/Fe_3O_4(b)$

3.1.2. Phân tích các đặc trưng liên kết của vật liệu

Để khảo sát các liên kết hóa học trong vật liệu, phổ FTIR và Raman đã được sử dụng. Hình 3a chỉ ra phổ FTIR của vật liệu lai GO/ Fe₃O₄. Kết quả chỉ ra, phổ FTIR của GO/ Fe₃O₄ gồm một vùng rộng với đỉnh hấp thụ ở 3424 cm⁻¹ tương ứng với các liên kết O-H. Đỉnh hấp thụ xuất hiện ở 2361 cm⁻¹ và 1566 cm⁻¹ được quy cho sự dao động kéo của nhóm –C=C và C=C, trong khi các đỉnh ở 1331 cm⁻¹ và 1213 cm⁻¹ liên quan tới các nhóm chức COO- và C-O trên bề mặt của GO tương ứng. Đỉnh xuất hiện ở 576 cm⁻¹ đặc trưng cho liên kết Fe-O giữa các hạt nano Fe₃O₄ và GO [17].



Hình 4. Đường đẳng nhiệt hấp phụ của As(III) (a) và đường đẳng nhiệt Langmuir cho sự hấp phụ As(III) (b) lên GO/ Fe₃O₄ (ở 25 °C, pH = 7, lượng chất hấp phụ 0,5 mg/mL)

Ngoài ra, để hiểu rõ hơn về các mode dao động, phổ Raman đã được đo ở bước sóng 532 nm nhờ sử dụng máy quang phổ Raman XploRA. Hình 3b chỉ ra phổ Raman của vật liệu lai GO/ Fe₃O₄. Kết quả cho thấy, hai đỉnh ở 1347 cm⁻¹ và 1590 cm⁻¹ xuất hiện tương ứng với vùng D (đặc trưng cho mode dao động A_{1g} của các sai hỏng của các nguyên tử carbon sp³ và cạnh của mặt mạng) và vùng G (đặc trưng cho các phonon E_{2g} của các nguyên tử carbon sp²) [18]. Các đỉnh xuất hiện ở 219 cm⁻¹, 278 cm⁻¹ và 390 cm⁻¹ tương ứng với mode dao động E_g , trong khi đỉnh 591 cm⁻¹ được quy cho mode dao động A_{1g} của Fe₃O₄ [19].

3.2. Ứng dụng xử lý As(III) của vật liệu lai GO/ Fe₃O₄

3.2.1. Hấp phụ đẳng nhiệt

Thực nghiệm hấp phụ As(III) đã được thực hiện để khảo sát hiệu suất hấp phụ của vật liệu lai GO/ Fe₃O₄. Dung lượng hấp phụ cân bằng đối với chất hấp phụ (q_e) có thể được tính toán bởi nồng độ của As(III) trước và sau xử lý:

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{m} V \tag{1}$$

Để xác định dung lượng hấp phụ cực đại của chất hấp phụ, mô hình đẳng nhiệt Langmuir đã được sử dụng theo biểu thức sau:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{k_L q_{\max}} + \frac{C_e}{q_{\max}}$$
(2)

Với m (g) và C_e (mg/L) là khối lượng và nồng độ ở trạng thái cân bằng của chất hấp phụ, V (mL) là thể tích của dung dịch, k_L (L/mg) là hằng số và q_{max} (mg/g) là dung lượng hấp phụ cực đại.

Đường đẳng nhiệt hấp phụ của GO/ Fe₃O₄ được chỉ ra trong Hình 4a. Để fit các số liệu thực nghiệm trong cân bằng hấp phụ, mô hình đẳng nhiệt Langmuir đã được sử dụng (Hình 4b). Bảng 1 chỉ ra các tham số của mô hình đẳng nhiệt Langmuir. Kết quả cho thấy, mô hình Langmuir ($R^2 = 0.9983$) phù hợp tốt với các số liệu thực nghiệm thu được và dung lượng hấp phụ cực đại của GO/ Fe₃O₄ đạt được có thể lên tới 112,2 mg/g. Đây là một giá trị cao hơn so với một số công bố trước đó [20]-[22].

http://jst.tnu.edu.vn; Email: jst@tnu.edu.vn

Bång 1. Các tham s	ổ đẳng nhiệt	hấp phụ của mớ	hình Langmuir
--------------------	--------------	----------------	---------------

\mathbb{R}^2	q_{max} (mg/g)	k _L (L/mg)
0,9983	112,2	0,015
1?		12. 44: 112.2

3.2.2. Ảnh hưởng của độ pH

Ảnh hưởng của độ pH dung dịch lên sự hấp phu As(III) bởi GO/ Fe₃O₄ ở các giá tri pH 2 – 10 được trình bày trong Hình 5. Kết quả cho thầy, sự hập phụ As(III) lên GO/ Fe₃O₄ phụ thuộc vào độ pH của dung dịch. Khi độ pH của dung dịch tăng từ 2 tới 10 thì hiệu suất loai bỏ As(III) tăng đáng kế và khi pH đat giá trị 6 thì hiệu suất hấp phụ đạt giá trị cực đại, sau đó đô hấp phu giảm dần từ pH 8. Ở pH 6-8, hiệu suất loại bỏ As(III) cực đại của GO/ Fe₃O₄ đạt được là 95,24 %. Ảnh hưởng của độ pH lên sự loại bỏ As(III) có thể do nhiều yếu tố cạnh tranh nhau, trong đó có lực hấp dẫn hút hoặc đẩy do tượng tác tĩnh điện giữa ion As(III) và bề mặt của vật liệu hấp phụ [23], [24].



Hình 5. Ảnh hưởng của độ pH lên khả năng hấp phụ As(III) của GO/ Fe₃O₄

4. Kết luận

Chúng tôi đã chế tạo thành công vật liệu nano lai GO/ Fe₃O₄ bằng phương pháp đồng kết tủa. Kết quả chỉ ra, vật liệu nano lai có đầy đủ đặc trưng của vật liệu composit với tính xốp, kích thước hạt Fe₃O₄ nhỏ và liên kết chặt chẽ với GO. Kết quả hấp phụ As(III) chỉ ra vật liệu chế tạo được cho khả năng hấp phụ đạt hiệu quả cao (lên tới 95,24 %) và dung lượng hấp phụ phụ thuộc mạnh vào độ pH của dung dịch. Số liệu thực nghiệm fit tốt với mô hình Langmuir ($\mathbb{R}^2 = 0.9983$) và cho cực đại hấp phụ lên tới 112.2 mg/g. Điều này đã chứng tỏ rằng vật liệu chế tạo được như một chất hấp phụ hiệu quả mà có thể sử dụng để xử lý các ion kim loại nặng ra khỏi môi trường nước.

Lời cảm ơn

Các tác giả xin cảm ơn sự hỗ trợ kinh phí từ đề tài KHCN cấp Bộ (mã số B2019-TNA-15).

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1]. Y. Wu, H. Pang, W. Yao, X. Wang, S. Yu, Z. Yu, and X. Wang, "Synthesis of novel rodlike metal-organic framework (MOF-5) nanomaterial for efficient removal of U(VI): batch experiments and spectroscopy study," *Science Bulletin.*, vol.63, p. 831e839, 2018.
- [2]. Y. Wu, H. Pang, Y. Liu, X. Wang, S. Yu, D. Fu, and X. Wang, "Environmental remediation of heavy metal ions by novelnanomaterials: a review," *Environmental Pollution*, vol. 246, p. 608e620, 2019.
- [3]. X. Li, Y. Liu, C. Zhang, T. Wen, L. Zhuang, X. Wang, and X. Wang, "Porous Fe₂O₃ microcubes derived from metal organic frameworks for efficient elimination of organic pollutants and heavy metal ions," *Chemical Engineering Journal*, vol. 336, p. 241e252, 2018.
- [4]. S. Yu, L. Yin, H. Pang, Y. Wu, X. Wang, P. Zhang, B. Hu, Z. Chen, and X. Wang, "Constructing sphere-like cobaltmolybdenum-nickel ternary hydroxide and calcined ternary oxide nanocomposites for efficient removal of U(VI) from aqueous solutions," *Chemical Engineering Journal*, vol. 352, p. 360e370, 2018.
- [5]. X. Ren, J. Li, X. Tan, and X. Wang, "Comparative study of graphene oxide, activated carbon and carbon nanotubes as adsorbents for copper decontamination," *Dalton Transactions*, vol. 42, p. 5266e5274, 2013.
- [6]. G. Zhao, H. Zhang, Q. Fan, X. Ren, J. Li, Y. Chen, and X. Wang, "Sorption of copper(II) onto super-adsorbent of bentonitepolyacrylamide composites," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 173, p. 661-668, 2010.
- [7]. Y. Huang, J. Li, X. Chen, and X. Wang, "Applications of conjugated polymer based

http://jst.tnu.edu.vn; Email: jst@tnu.edu.vn

composites in wastewater purification," *RSC Advances.*, vol. 4, p. 62160-62178, 2014.

- [8]. S. Gupta, and K. Bhattacharyya, "Adsorption of heavy metals on kaolinite and montmorillonite: a review," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 14, p. 6698-6723, 2012.
- [9]. S. Yu, J. Wang, S. Song, K. Sun, J. Li, X. Wang, Z. Chen, and X. Wang, "One-pot synthesis of graphene oxide and Ni-Al layered double hydroxides nanocomposites for the efficient removal of U(VI) from wastewater," *Science China Chemistry.*, vol. 60, p. 415-422, 2017.
- [10]. X. Liu, R. Ma, X. Wang, Y. Ma, Y. Yang, L. Zhuang, S. Zhang, R. Jehan, J. Chen, and X. Wang, "Graphene oxide-based materials for efficient removal of heavy metal ions from aqueous solution: A review," *Environmental Pollution*, vol. 252, p. 62-73, 2019.
- [11]. J. Li, C. Chen, R. Zhang, and K. Wang, "Reductive immobilization of Re(VII) by graphene modified nanoscale zero-valent iron particles using a plasma technique," *Science China Chemistry.*, vol. 59, pp. 150-158, 2016.
- [12]. M. Liu, C. Chen, J. Hu, X. Wu, and X. Wang, "Removal of Cu(II) and fulvic acid bygraphene oxide nanosheets decorated with Fe₃O₄ nanoparticles," ACS Applied Materials & Interfaces, vol. 4, pp. 4991-5000, 2012.
- [13]. G. H. Le, A. Q. Ha, Q. K. Nguyen, K. T. Nguyen, P. T. Dang, H. T. K Tran, L. D. Vu, T. V. Nguyen, G. D. Lee, and T. A. Vu, "Removal of Cd^{2+} and Cu^{2+} ions from aqueous solution by using Fe–Fe₃O₄/graphene oxide as a novel and efficient adsorbent," *Materials Research Express*, vol. 3, p. 105603, 2016.
- [14]. G. Ur Rahman, A. F. Ismail, P. S. Goh, M. R.-D. Arzhandi, and N. IsmailJurnal, "Aptes and teos modified binary recyclable hybrid Fe₃O₄@GO nanocomposite for photocatalytic dye removal," *Teknologi (Sciences & Engineering)*, vol. 80, no. 4, pp. 157-164, 2018.
- [15]. T. V. H. Nguyen, T. A. T. Nguyen, V. D. Hoang, D. C. Nguyen, Q. K. Dinh, and V. Vo. "Fe₃O₄/Reduced Graphene Oxide Nanocomposite: Synthesis and Its Application for Toxic Metal Ion Removal," *Journal of Chemistry*. vol. 2016, 10 pages, 2016, Article ID 2418172.

- [16]. W. Wu, X. H. Xiao, S. F. Zhang, H. Li, X. D. Zhou, and C. Z. Jiang, "One-pot reaction and subsequent annealing to synthesis hollow spherical magnetite and maghemite nanocages," *Nanoscale Research Letters*, vol. 4, pp. 926-931, 2009.
- [17]. K. Yang, H. B. Peng, Y. H. Wen, and N. Li, "Re-examination of characteristic FTIR spectrum of secondary layer in bilayer oleic acid-coated Fe₃O₄ nanoparticles," *Applied Surface Science*, vol. 256, pp. 3093-3097, 2010.
- [18]. A. C. Ferrari, and J. Robertson, "Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon," *Physical review. B, Condensed matter*, vol. 61, pp. 14095-14107, 2000.
- [19]. E. Mitchell, R. K. Gupta, K. Mensah-Darkwa, D. Kumar, K. Ramasamy, B.K. Gupta, and P. Kahol, "Facile synthesis and morphogenesis of superparamagnetic iron oxide nanoparticles for high-performance supercapacitor applications," *New Journal of Chemistry*, vol. 38, no. 9, pp. 4344-4350, 2014.
- [20]. Y. Yoon, W. K. Park, T.-M. Hwangc, D. H. Yoon, W. S. Yang, J.-W. Kang, "Comparative evaluation of magnetite– graphene oxide and magnetite-reduced graphene oxide composite for As(III) and As(V) removal," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 304, pp. 196-204, 2016.
- [21]. A. I. A. Sherlala, A. A. A. Raman Icon, and M. M. Bello, "Synthesis and characterization of magnetic graphene oxide for arsenic removal from aqueous solution," *Environmental Technology*, vol. 40, no. 12, pp. 1508-1516, 2019.
- [22]. X. Ge, D. Xie, and Y. Zhang, "A 3D porous carbon foam loaded with Fe₃O₄/graphene oxide for highly effective As(III) removal," *New Journal of Chemistry*, vol. 44, pp. 12926-12931, 2020.
- [23]. Q. Chang, W. Lin, and W. Ying, "Preparation of iron-impregnated granular activated carbon for arsenic removal from drinking water," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 184, pp. 515-522, 2010.
- [24]. H. Zhu, Y. Jia, X. Wu, and H. Wang, "Removal of arsenic from water by supported nano zero-valent iron on activated carbon," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 172, pp. 1591-1596, 2009.