

NGHIÊN CỨU SỬ DỤNG ĐIỆN CỰC NHÔM TRONG HỆ KEO TỤ ĐIỆN HÓA ĐỂ XỬ LÝ COD CỦA NƯỚC RỈ RÁC BÃI RÁC NAM SƠN

Lê Thanh Sơn^{1*}, Lê Cao Khải^{2,3}

¹*Viện Công nghệ môi trường - Viện Hàn lâm Khoa học Công nghệ Việt Nam,*

²*Trường Đại học Sư phạm Hà Nội 2,*

³*Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học Công nghệ Việt Nam*

TÓM TẮT

Nước rỉ rác với hàm lượng các chất ô nhiễm rất cao và thường dao động, không ổn định, thành phần ô nhiễm lại phức tạp nên được xếp vào loại đối tượng ô nhiễm khó xử lý. Một hệ keo tụ điện hóa sử dụng các cặp điện cực bằng nhôm, dung tích 1,8 L và sử dụng nguồn điện một chiều được nghiên cứu trong phòng thí nghiệm để tiền xử lý nước rỉ rác của bãi rác Nam Sơn với mục đích làm giảm đáng kể hàm lượng các chất ô nhiễm hữu cơ, thuận tiện cho các bước xử lý sinh học phía sau... Các kết quả đã chỉ ra rằng cường độ dòng điện, thời gian điện phân, pH, khoảng cách giữa các điện cực là những thông số ảnh hưởng mạnh đến hiệu quả loại bỏ các chất ô nhiễm hữu cơ trong NRR bãi rác Nam Sơn bằng một quá trình EC. Điều kiện tối ưu cho quá trình EC để xử lý COD của NRR bãi rác Nam Sơn là $I = 3A$, $t = 60$ phút, $pH = 7$, khoảng cách giữa các điện cực 1 cm. Tuy nhiên, hiệu quả xử lý COD bằng hệ EC sử dụng điện cực nhôm là không cao, trong các điều kiện tối ưu, hiệu suất xử lý COD chỉ giao động xung quanh 45%.

Từ khóa: Kỹ thuật môi trường; nước rỉ rác; COD; keo tụ điện hóa; điện cực nhôm; hiệu quả xử lý.

Ngày nhận bài: 18/3/2020; Ngày hoàn thiện: 10/4/2020; Ngày đăng: 04/5/2020

STUDY ON USING ALUMINIUM AS ELECTRODES IN AN ELECTRO-COAGULATION SYSTEM IN ORDER TO REMOVE COD OF NAM SON LANDFILL LEACHATE

Le Thanh Sơn^{1*}, Le Cao Khai^{2,3}

¹*Institute of Environmental Technology – VAST,*

²*Hanoi Pedagogical University No 2,* ³*Graduate University of Science and Technology - VAST*

ABSTRACT

Landfill leachate with very high and fluctuant concentrations and complex composition of pollutants, so it was classified as difficult - to- treat pollutant. An electro-coagulation system of volume 1.8 L using 4 pairs of aluminum electrodes (size 110 cm x 100 cm) and a DC power source studied in the laboratory to pre-treat Nam Son landfill leachate in order to significantly reduce the amount of organic compounds, so facilitate the biological post-treatment The results have shown that electrical current, electrolysis time, pH, distance between electrodes were the parameters which strongly influence the organic pollutant removal efficiency in Nam Son landfill leachate by an electro-coagulation process. The COD removal efficiency increased when electrical current, electrolysis time, distance between electrodes decreased and pH in neutral range. The optimum conditions for electro-coagulation process to treat COD of Nam Son landfill leachate were: $I = 3A$, $t = 60$ minutes, $pH = 7$, the distance between electrodes was 1 cm. However, the COD removal efficiency by the EC system using aluminum electrodes is not high, under the optimal conditions, only 45% of COD was removed.

Keywords: Environmental engineer; landfill leachate; color; secondary treatment; electro-fenton; hydroxyl radical; advanced oxidation process.

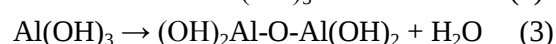
Received: 18/3/2020; Revised: 10/4/2020; Published: 04/5/2020

* Corresponding author. Email: thanhson96.le@gmail.com

1. Mở đầu

Sự phát triển không ngừng của kinh tế, xã hội và gia tăng dân số trong những năm qua đã dẫn tới lượng rác thải sinh hoạt (RTSH) phát sinh ngày càng nhiều về cả số lượng và chủng loại. Theo điều tra của Bộ Tài nguyên và môi trường năm 2019, ở khu vực đô thị, lượng RTSH phát sinh khoảng 37.000 tấn/ngày, trong khi lượng RTSH phát sinh ở nông thôn trung bình khoảng 24.000 tấn/ngày. Lượng RTSH phát sinh nhiều như vậy nên phương pháp xử lý được áp dụng phổ biến ở các địa phương là chôn lấp bởi chi phí thấp và vận hành đơn giản. Tuy nhiên, một nhược điểm lớn của các bãi chôn lấp RTSH là nước rỉ rác (NRR), được sinh ra do sự rò rỉ nước mưa thấm vào trong lòng bãi rác hoặc do độ ẩm sẵn có của RTSH [1]. Với hàm lượng các chất ô nhiễm ở mức rất cao, vượt các quy chuẩn của Việt Nam (QCVN) nhiều lần, thành phần ô nhiễm luôn biến động phức tạp, bao gồm các muối, chất hữu cơ hòa tan, amoni, kim loại nặng, vi sinh vật,... cho nên NRR là đối tượng rất khó để xử lý một cách hiệu quả [2] –[4]. Thường quá trình xử lý NRR gồm nhiều bước, trong đó các quá trình vật lý, hóa lý, hóa học thường dùng ở công đoạn đầu để tiền xử lý, giảm bớt nồng độ các chất ô nhiễm và một số thành phần phức tạp, khó phân hủy sinh học; tiếp theo là các quá trình sinh học để xử lý N, P, amoni, các chất hữu cơ dễ phân hủy sinh học và cuối cùng là quá trình khử trùng để xử lý các vi sinh vật. Quá trình keo tụ được sử dụng phổ biến không chỉ cho quá trình xử lý NRR mà còn cho hầu hết các hệ thống xử lý nước, nước thải để giảm hàm lượng các chất lơ lửng, độ màu, các chất hữu cơ,... Tuy nhiên, quá trình keo tụ hóa học (CC) thường tiêu tốn nhiều hóa chất và tạo ra nhiều bùn thải. Một quá trình keo tụ điện hóa (EC) hoạt động dựa trên nguyên lý dùng nguồn điện một chiều để điện phân, các điện cực làm bằng kim loại chuyển tiếp hoặc nhôm sẽ bị hòa tan theo phương trình phản ứng (PTPU) (1) tạo thành các hydroxit kim loại $M(OH)_x$ (PTPU (2)) có độ xốp lớn, có khả năng hấp phụ mạnh các chất ô nhiễm, loại bỏ chúng ra khỏi nước bằng các quá trình keo tụ và tuyển nổi, có nhiều ưu điểm hơn quá trình keo tụ truyền thống. Thật vậy, quá trình EC

không sử dụng hóa chất đầu vào nên tạo ra ít bùn thải hơn, khả năng keo tụ cũng cao hơn quá trình CC do bề mặt xốp của các $M(OH)_x$ hình thành trong quá trình điện phân có khả năng hấp phụ cao hơn 100 lần so với các $M(OH)_x$ sử dụng trực tiếp trong quá trình CC [5], [6]. Ngoài ra, các hydroxit có thể tham gia vào quá trình polyme hóa (PTPU (3)) và các polyme tạo thành có khả năng hấp phụ, tạo phức hay kết tủa để loại bỏ các chất ô nhiễm [7].



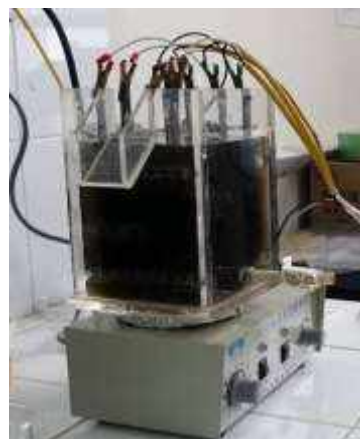
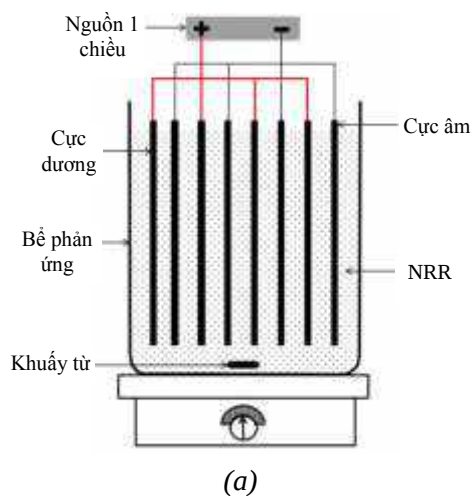
Với NRR của bãi rác Nam Sơn, các nghiên cứu trước đây của cùng tập thể tác giả tập trung chủ yếu sử dụng điện cực sắt cho quá trình EC. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả thử nghiệm sử dụng điện cực nhôm cho hệ EC và tiến hành nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả của quá trình EC trong xử lý COD của NRR bãi rác Nam Sơn.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Hệ keo tụ điện hóa

Hệ EC sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm các bộ phận chính là bể phản ứng, hệ điện cực và nguồn 1 chiều. Bể phản ứng làm bằng thủy tinh hữu cơ trong suốt, kích thước dài x rộng x cao = 14 cm x 14 cm x 21 cm, dung tích thực 2L. Hệ điện cực gồm 4 cặp điện cực mắc song song, cả catot và anot đều làm bằng hợp kim nhôm (hàm lượng nhôm 85 – 97%), kích thước 110 mm x 100 mm x 1 mm (hình 1). Nguồn DC VSP4030 (B & K Precision, CA, Mỹ) cung cấp dòng điện 1 chiều cho hệ phản ứng. Máy khuấy từ (tốc độ 200 vòng/phút⁻¹) được sử dụng để tăng mức độ đồng đều của hệ phản ứng.

Trong các thí nghiệm, 1,8L dung dịch nước rỉ rác được đưa vào bể phản ứng, các điện cực được nối với nguồn một chiều. Axit H_2SO_4 và NaOH được dùng để điều chỉnh pH của NRR đến giá trị pH mong muốn. Khi áp đặt một hiệu điện thế giữa 2 điện cực để tạo ra dòng điện một chiều, quá trình điện phân sẽ diễn ra. Các thí nghiệm diễn ra ở điều kiện áp suất khí quyển và nhiệt độ phòng. Cứ sau mỗi 20 phút phản ứng, lấy mẫu, để lắng sau 60 phút, gạn lấy phần trong để phân tích COD.



Hình 1. Sơ đồ hệ thí nghiệm EC (a) và hình ảnh thực của hệ thí nghiệm EC (b)

2.2. Hoá chất và phương pháp phân tích

NRR sử dụng trong nghiên cứu này được lấy từ hồ chứa NRR tập trung của bãi rác Nam Sơn, Sóc Sơn, Hà Nội vào thời điểm tháng 5 năm 2017 và được bảo quản trong tối ở nhiệt độ 4°C trước mỗi thí nghiệm. Hàm lượng COD ban đầu của NRR giao động trong khoảng 5.500 – 7.000 mg.L⁻¹.

H₂SO₄ (98%, Merck), NaOH (98%, Merck) được dùng để điều chỉnh pH ban đầu của NRR. Các hóa chất dùng để phân tích có độ tinh khiết cao: H₂SO₄ (Merck, 98%), Ag₂SO₄ (Merck, 99,7%), K₂Cr₂O₇ (Merck, 99,8%), HgSO₄ (Merck, 98,5%), C₈H₅KO₄ (Merck, 99%), (NH₄)₂Fe(SO₄)₂.6H₂O (Merck, 99%), C₁₂H₈N₂.H₂O (Merck, 99%).

Giá trị COD của NRR được phân tích theo phương pháp được quy định trong TCVN 6491:1999.

3. Kết quả và thảo luận

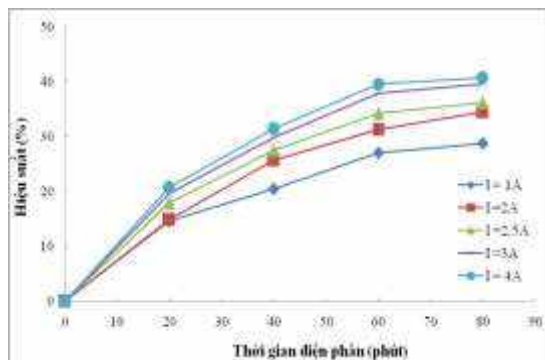
3.1. Ảnh hưởng của cường độ dòng điện và thời gian phản ứng

Để nghiên cứu ảnh hưởng của cường độ dòng điện và thời gian phản ứng, NRR được điện phân bằng hệ EC: 4 cặp điện cực mắc song song, pH ban đầu của NRR bằng 8, khoảng cách điện cực 1 cm, cường độ dòng điện thay đổi từ 1 đến 4A, thời gian lưu nước lần lượt là 0, 20, 40, 60 và 80 phút. Hiệu suất xử lý COD tại mỗi thời điểm được xác định theo công thức sau:

$$H\% = \frac{COD_t - COD_0}{COD_0} \cdot 100\% \quad (4)$$

Trong đó, COD_t và COD₀ lần lượt là giá trị COD của dung dịch tại thời điểm t và thời điểm ban đầu.

Kết quả thu được thể hiện trên hình 2. Có thể thấy rằng hiệu suất xử lý COD tăng dần khi cường độ dòng điện áp đặt lên các điện cực tăng và thời gian điện phân càng lớn. Thật vậy, theo định luật Faraday, lượng chất bị điện phân trên các điện cực tỷ lệ thuận với cường độ dòng điện và thời gian, do đó khi thời gian điện phân càng lớn hoặc cường độ dòng điện càng lớn, lượng nhôm bị điện phân trên anot tạo thành Al³⁺ (PTPU(1)) càng nhiều, dẫn đến lượng hydroxit Al(OH)₃ và polyme được hình thành theo các phản ứng (2) và (3) càng nhiều, đồng nghĩa với việc các chất hấp phụ này sẽ hấp phụ được nhiều chất hữu cơ hơn, do đó hiệu quả xử lý COD tăng. Ngoài ra, cũng theo định luật Faraday, khi cường độ dòng điện hoặc thời gian điện phân tăng, lượng bọt khí H₂ sinh ra trên catot (phản ứng (5)) tăng. Các bọt khí H₂ này sẽ chuyển động đi lên phía trên mặt thoáng, kéo theo các chất ô nhiễm lên bề mặt (quá trình tuyển nổi). Mặt khác, trên bề mặt các điện cực cũng có thể xảy ra các phản ứng oxi hóa – khử, giúp phân hủy một số chất ô nhiễm vô cơ, hữu cơ [6]. Quá trình chuyển hóa một phần điện năng thành nhiệt năng làm nóng dung dịch ở cường độ dòng điện cao cũng có thể là nguyên nhân.



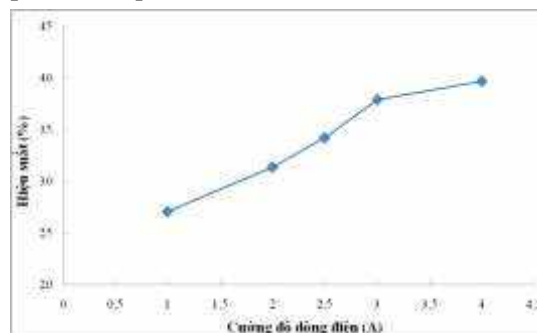
Hình 2. Ảnh hưởng của cường độ dòng điện và thời gian điện phân đến hiệu suất xử lý COD của NRR Nam Sơn

Tuy nhiên, kết quả trên hình 2 cũng chỉ ra rằng, khi cường độ dòng điện trên 3A, hiệu suất xử lý COD cũng tăng nhưng tốc độ tăng chậm lại. Thực vậy, lấy giá trị hiệu suất xử lý COD sau 60 phút điện phân ở các thời điểm khác nhau và biểu diễn trên đồ thị 3 ta thấy, khi cường độ dòng điện tăng từ 3A đến 4A, hiệu suất xử lý COD tăng không đáng kể, từ 37,93% lên 39,68%. Điều này có thể là do khi cường độ dòng điện quá cao, lượng Al^{3+} và do đó lượng hydroxit và polyme tạo ra quá nhiều, một phần bám trên bề mặt điện cực tạo thành lớp màng ngăn cản quá trình trao đổi điện tử trên bề mặt điện cực, dẫn đến quá trình điện phân trên các điện cực sau đó bị giảm đi. Hiện tượng này cũng có thể giải thích cho việc trong khoảng 30 phút đầu tiên của quá trình điện phân ở tất cả các cường độ dòng điện thử nghiệm, tốc độ xử lý COD là nhanh nhất, sau đó giảm dần và sau 60 phút điện phân, COD của NRR có bị suy giảm nhưng tốc độ giảm là không đáng kể do lượng hydroxit và polyme tạo ra nhiều bám trên bề mặt các điện cực. Do đó, để tiết kiệm điện năng, chỉ nên điện phân trong khoảng 60 phút, với cường độ dòng điện không quá 3A.

3.2. Ảnh hưởng của pH

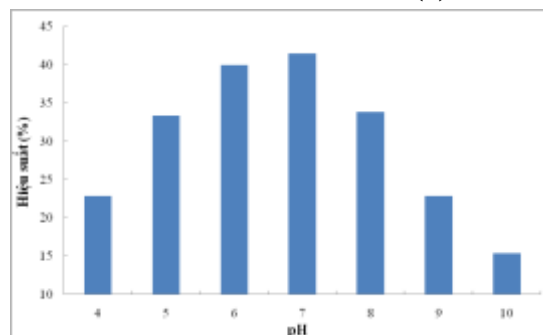
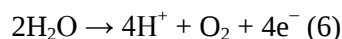
Để nghiên cứu ảnh hưởng của pH, NRR được điện phân bằng hệ EC: 4 cặp điện cực mắc song song, khoảng cách điện cực 1 cm, cường độ dòng điện 3A, pH ban đầu của NRR được

điều chỉnh từ 4 đến 10, thời gian điện phân 60 phút. Kết quả thu được thể hiện trên hình 4.



Hình 3. Hiệu suất xử lý COD của NRR Nam Sơn sau 60 phút điện phân ở các cường độ dòng điện khác nhau

Từ hình 4 có thể thấy rằng pH ban đầu ảnh hưởng mạnh đến hiệu suất xử lý COD của NRR: khi pH tăng từ 4 đến 7, hiệu suất xử lý COD tăng từ 22,8% đến 41,4%, pH tiếp tục tăng từ 7 đến 10, hiệu suất không tăng mà giảm dần xuống còn 15,4% ở giá trị pH = 10. Kết quả này có thể giải thích như sau, muối Al^{3+} hình thành từ phản ứng trên anốt sẽ bị thủy phân và ở pH = 4 bắt đầu xuất hiện kết tủa $\text{Al}(\text{OH})_3$. pH càng tăng, lượng kết tủa tạo thành càng nhiều, do đó lượng chất hữu cơ bị keo tụ càng nhiều, hiệu quả loại bỏ COD càng cao. Mặt khác, trong quá trình EC, trên điện cực catot xảy ra phản ứng điện phân nước tạo khí oxy theo phản ứng (5), sẽ oxy hóa một phần các chất hữu cơ đóng góp vào quá trình xử lý COD [8]. Và ở pH càng cao, phản ứng (6) càng được tạo điều kiện, do đó khi pH tăng từ 4 đến 7, hiệu quả xử lý COD tăng lên rõ rệt như trên đồ thị hình 4.

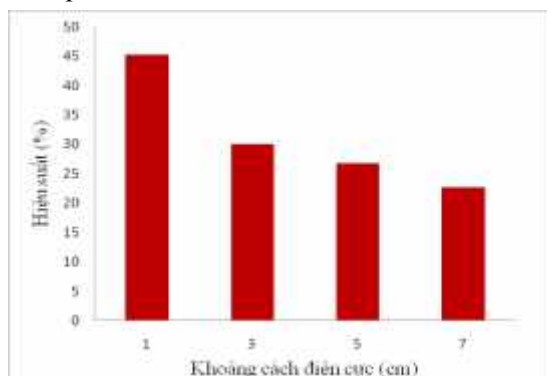


Hình 4. Ảnh hưởng của pH ban đầu của NRR đến hiệu suất xử lý COD

Tuy nhiên, khi môi trường bắt đầu có tính kiềm, $\text{pH} > 7$ thì $\text{Al}(\text{OH})_3$ có thể chuyển dần sang dạng $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ là chất không có khả năng keo tụ các chất hữu cơ [9], [10]. Ngoài ra, có thể oxy tạo ra nhiều ở phản ứng (5) có thể oxy hóa điện cực tạo thành lớp màng oxit nhôm làm thụ động điện cực một phần, làm giảm hiệu quả điện phân ở các điện cực, gián tiếp dẫn đến làm giảm hiệu quả xử lý COD. $\text{pH} = 7$ cũng xấp xỉ bằng pH ban đầu của NRR bãi rác Nam Sơn, do đó nhóm tác giả chọn $\text{pH} = 7$ là điều kiện tối ưu cho quá trình keo tụ điện hóa NRR để ứng dụng trong thực tế không tiêu tốn hóa chất điều chỉnh pH của NRR trước khi đi vào hệ EC.

3.3. Ảnh hưởng của khoảng cách giữa 2 điện cực

Để nghiên cứu ảnh hưởng của pH , NRR được điện phân bằng hệ EC: sử dụng chỉ 1 cặp điện cực, mật độ dòng điện $3,896 \text{ mA.cm}^{-2}$ (bằng mật độ dòng điện tối ưu trong các thí nghiệm trước), thời gian điện phân 60 phút, khoảng cách giữa 2 điện cực thay đổi 1, 3, 5, 7 cm. Kết quả thu được thể hiện trên hình 5.



Hình 5. Ảnh hưởng của khoảng cách giữa 2 điện cực đến hiệu suất xử lý COD của NRR bãi rác Nam Sơn

Có thể thấy rằng, hiệu suất xử lý COD tỷ lệ nghịch với độ lớn khoảng cách điện cực. Hiệu suất xử lý COD đạt được tốt nhất tại khoảng cách điện cực là 1 cm với 45,1% lượng chất hữu cơ được loại bỏ. Khi khoảng cách giữa hai bản điện cực càng xa thì hiệu suất xử lý càng thấp. Cụ thể, hiệu suất xử lý COD chỉ còn 26,7% và 22,7% tương ứng với $d = 5 \text{ cm}$

và $d = 7 \text{ cm}$. Nguyên nhân có thể là do khi khoảng cách giữa các điện cực tăng, quãng đường các ion di chuyển đến các điện cực (để thực hiện phản ứng cho/nhận electron trên các bề mặt điện cực) tăng, dẫn đến trở kháng của dung dịch sẽ làm giảm tốc độ di chuyển của các ion này, nên các phản ứng (1) và (4) bị hạn chế, đồng nghĩa với việc hiệu quả xử lý các chất hữu cơ giảm. Ngoài ra, khi khoảng cách điện cực tăng trong khi I luôn được giữ không đổi sẽ dẫn đến hiệu điện thế giữa 2 điện cực tăng lên theo mối quan hệ tuyến tính trong công thức (6) [11], dẫn đến tiêu thụ điện năng tăng lên.

$$U = I \frac{d}{Ak} \quad (6)$$

trong đó: U - Hiệu điện thế đặt giữa 2 điện cực (V);

I - Cường độ dòng điện (A);

A - Bề mặt hoạt động của các điện cực (m^2);

d - Khoảng cách giữa các bản điện cực (m);

k - Độ dẫn điện (S).

Rodríguez và cộng sự [12], cũng chỉ ra khoảng cách điện cực ảnh hưởng đến sự hình thành các bông keo và hạt keo tụ của phản ứng. Solanki và cộng sự cho rằng khoảng cách quá lớn giữa các điện cực làm giảm đáng kể sự hình thành của bông keo [13]. Cho nên, khoảng cách điện cực nhỏ là lựa chọn tốt cho quá trình keo tụ điện hóa.

Tuy nhiên, trong quá trình nghiên cứu khi thử nghiệm với khoảng cách điện cực $< 1 \text{ cm}$ thấy quá trình điện phân không ổn định (đôi khi còn có hiện tượng đoản mạch) nguyên nhân là do trong NRR có TSS cao. Vì vậy, không thể tiến hành ở khoảng cách điện cực $< 1 \text{ cm}$.

4. Kết luận

Các kết quả của nghiên cứu này đã chỉ ra rằng, cường độ dòng điện, thời gian điện phân, pH , khoảng cách giữa các điện cực là những thông số ảnh hưởng mạnh đến hiệu quả loại bỏ các chất ô nhiễm hữu cơ trong NRR bãi rác Nam Sơn bằng một quá trình

EC. Hiệu suất xử lý COD tăng khi cường độ dòng điện, thời gian điện phân tăng, khoảng cách giữa các điện cực giảm và pH ở giải trung tính. Tuy nhiên, khi cường độ dòng điện hoặc thời gian điện phân quá cao, khoảng cách giữa các điện cực quá nhỏ thì hiệu suất xử lý COD tăng không đáng kể, thậm chí giảm đi, trong khi chi phí điện năng tiêu tốn nhiều hơn. Điều kiện tối ưu cho quá trình EC để xử lý COD của NRR bãi rác Nam Sơn là $I = 3A$, $t = 60$ phút, $pH = 7$, khoảng cách giữa các điện cực 1 cm. Tuy nhiên, hiệu quả xử lý COD bằng hệ EC sử dụng điện cực nhôm là không cao, trong các điều kiện tối ưu chỉ giao động xung quanh 45%.

Lời cảm ơn

Công trình này được ủng hộ bởi đề tài thuộc 7 hướng ưu tiên cấp Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam “Nghiên cứu xử lý nước rỉ rác bằng phương pháp keo tụ điện hóa kết hợp lọc sinh học” (VAST 07.01/16-17).

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1]. G. Hassani, A. Alinejad, A. Sadat, A. Esmaeili, M. Ziaei, A. A. Bazrafshan, and T. Sadat, “Optimization of Landfill Leachate Treatment Process by Electrocoagulation, Electroflotation and Sedimentation Sequential Method,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 11, pp. 6705-6718, 2016.
- [2]. A. Maleki, M. A. Zazouli, H. Izanloo, and R. Rezaee, “Composting plant leachate treatment by coagulation-flocculation process,” *Am. J. Agric. Environ. Sci.*, vol. 5, pp. 638-643, 2009.
- [3]. S. F. Tyrrel, I. Seymour, and J. A. Harris, “Bioremediation of leachate from a green waste composting facility using waste-derived filter media,” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, pp. 7657-7664, 2008.
- [4]. S. Rajabi, and L. Vafajoo, “Investigating the treatability of a compost leachate in a hybrid anaerobic reactor: an experimental study,” *World. Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 61, pp. 1175-1177, 2012.
- [5]. S. I. Chaturvedi, “Electrocoagulation, A novel wastewater treatment method,” *International Journal of Modern Engineering Research*, vol. 3, no. 1, pp. 93-100, 2013.
- [6]. G. Chen, “Electrochemical technologies in wastewater treatment,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 38, pp. 11-41, 2004.
- [7]. P. Drogui, J. F. Blais, and G. Mercier, “Review of electrochemical technologies for environmental applications,” *Recent patents on engineering*, vol. 1, pp. 257-272, 2007.
- [8]. C. Noubactepa, and A. Schöner, “Metallic iron for environmental remediation: Learning from electrocoagulation,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 175, pp. 1075-1080, 2010.
- [9]. P. K. Holt, G. W. Barton, M. Wark, and C. A. Mitchell, “A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation,” *Colloids. Surf. A.*, vol. 221, no. 2-3, pp. 223-248, 2002.
- [10]. C. Wang, W. L. Chou, and Y. M. Kuo, “Removal of COD from laundry wastewater by electrocoagulation/ electroflotation,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 164, pp. 81-86, 2009.
- [11]. D. Gosh, H. Solanki, and M. K. Purkait, “Removal of Fe(II) from tap water by electrocoagulation technique,” *Journal. Hazard. Mater.*, vol. 155, pp. 135-143, 2008.
- [12]. A. Vázquez, I. Rodríguez, and I. Lázaro, “Primary potential and current density distribution analysis: A first approach for designing electrocoagulation reactors,” *Chem. Eng. Journal*, vol. 179, pp. 253-261, 2012.
- [13]. D. Gosh, H. Solanki, and M. K. Purkait, “Removal of Fe(II) from tap water by electrocoagulation technique,” *Journal Hazard. Mater.*, vol. 155, pp. 135-143, 2008.