



NGHIÊN CỨU LỌC NƯỚC LỢ BẰNG CÔNG NGHỆ KHỬ ION ĐIỆN DUNG (CDI)

Lưu Thế Anh, Đỗ Quang Trung^{*1}

Hoàng Trung Kiên²

TÓM TẮT

Nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của các điều kiện vận hành quy mô phòng thí nghiệm đến hiệu suất hấp thụ điện và tiêu thụ năng lượng của lõi lọc khử ion điện dung (CDI) với các điện cực than hoạt tính. Hiệu suất loại bỏ hấp thụ điện tỷ lệ nghịch với nhiệt độ dung dịch cấp, tổng nồng độ muối hòa tan (TDS) ban đầu và tốc độ dòng chảy được áp dụng. Mức tiêu thụ năng lượng CDI liên quan trực tiếp đến nồng độ TDS và tỷ lệ nghịch với tốc độ dòng chảy.

Từ khóa: Khử ion điện dung, lọc nước lợi, tổng độ muối hòa tan, hấp thụ điện.

Nhận bài: 5/5/2022; Sửa chữa: 23/5/2022; Duyệt đăng: 26/5/2022.

1. Đặt vấn đề

Hầu hết dân số trên toàn thế giới đều bị thiếu nước, với 4 tỷ người phải đối mặt với tình trạng khan hiếm nước nghiêm trọng ít nhất 1 tháng trong năm và nửa tỷ người sống trong tình trạng khan hiếm nước nghiêm trọng trong cả năm. Các công nghệ khử muối thông thường bao gồm ED và MD đòi hỏi chi phí vốn cao và tiêu thụ năng lượng không thể cạnh tranh với RO là công nghệ chính để khử mặn nước biển. Tuy nhiên, tắc nghẽn và áp suất cao hạn chế ứng dụng của RO, đặc biệt là khi được sử dụng để xử lý nước có độ cứng cao, vì vậy việc thay thế màng RO thường xuyên và nhu cầu sử dụng máy bơm cao áp làm tăng vốn và chi phí vận hành [1].

Khử muối điện dung (CDI) là một công nghệ khử muối bằng điện hấp thụ có khả năng tránh được hầu hết các vấn đề quan trọng mà các công nghệ khác phải đối mặt, đó là tiêu thụ năng lượng cao và tắc nghẽn màng [2]. CDI hoạt động ở điện áp tương đối thấp (thường 0,8 - 2,0 V) để loại bỏ các ion [3]. Hơn nữa, CDI không yêu cầu màng điều khiển áp suất hoặc máy bơm áp suất cao, do đó tránh được các vấn đề đóng cặn nghiêm trọng xảy ra với các công nghệ khử muối dựa trên màng thông thường [4]. Trong công nghệ CDI, dung dịch cấp chảy qua các điện cực điện dung cao được làm từ vật liệu xốp dẫn điện, trong đó các cation và anion từ dung dịch cấp được hấp phụ trên các điện cực tích điện trái dấu. Sau một thời gian hoạt động, các điện cực bão hòa với các ion và độ mặn của nước thải tăng lên. Sau đó, tái sinh các điện cực bằng cách đặt một điện thế ngược để giải phóng các ion bị hấp phụ vào dòng chất thải [5]. Công nghệ CDI đã đạt được nhiều tiến bộ. Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn phải

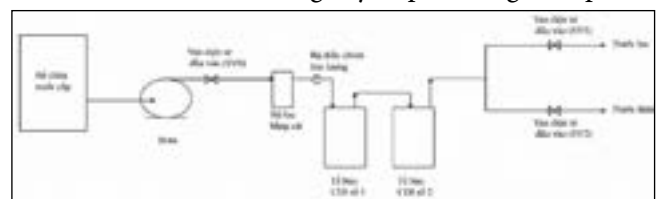
được thực hiện trước khi nó có thể được sử dụng như một công nghệ thương mại. Nói chung, các điện cực điện dung có hiệu suất hấp thụ điện khác nhau đối với các ion khác nhau, phụ thuộc vào khối lượng nguyên tử, điện tích và bán kính ion ngâm nước [6].

Trong bài báo này, các thí nghiệm hấp thụ điện được thực hiện bằng cách sử dụng tế bào CDI được nghiên cứu và phát triển bởi Viện TN&MT và Công ty TNHH Vietdream để đánh giá ảnh hưởng của các điều kiện vận hành trong quy mô phòng thí nghiệm đến hiệu quả xử lý nước lợi và tiêu thụ năng lượng của tế bào CDI. Kết quả nghiên cứu cung cấp đánh giá về hiệu suất khử muối của công nghệ CDI này và góp phần vào khả năng vận hành thực tế tại hiện trường để khử mặn nước lợi tại Việt Nam.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình thí nghiệm với CDI trong điều kiện phòng thí nghiệm

Mô hình thí nghiệm với CDI được sử dụng trong nghiên cứu này do Viện TN&MT phát triển. Hình 1 mô tả sơ đồ thí nghiệm của đơn vị CDI được sử dụng. Nước đầu vào được bơm từ bể chứa qua bộ lọc cát để xử lý sơ bộ và đi qua thiết bị đo dòng chảy đầu vào để vào hai tế bào điện cực các bon mắc nối tiếp. Hệ thống CDI được kết nối với nguồn điện một pha 240 VAC, 10 A. Điện thế hoạt động một chiều xấp xỉ 1,5 V trên mỗi tế bào CDI, sao cho không xảy ra phản ứng điện phân.



▲ Hình 1. Sơ đồ thí nghiệm sử dụng lõi lọc CDI

¹ Viện Tài nguyên và Môi trường, Đại học Quốc gia Hà Nội

² Công ty TNHH Vietdream

Chu kỳ hoạt động của CDI mất 2,5 phút và bao gồm hai bước chính: bước chế độ tái sinh và bước chế độ lọc. Bước tái sinh bắt đầu sau 30 giây, khi van điện từ nước thải đầu ra (SV1) và van điện từ đầu vào (SV0) được đóng và nguồn điện tắt, tiếp theo là 30 giây nữa khi van điện từ nước thải đầu ra (SV2) và van điện từ đầu vào (SV0) được mở và nguồn được bật với điện áp ngược chiều là 1,5 VDC. Bước tái sinh kết thúc sau 60 s. Bước lọc bắt đầu ngay sau đó và mất 90 giây để làm sạch dung dịch cấp liệu. Tại đây, van điện từ đầu vào (SV0) và van điện từ đầu ra (SV1) được mở và nguồn được bật với điện áp đặt lên các điện cực là 1,5 VDC. Một bộ gia nhiệt được lắp vào thùng cấp liệu để duy trì nhiệt độ cần thiết cho dung dịch cấp liệu.

Trong suốt quá trình thử nghiệm ở quy mô thí nghiệm, mỗi thử nghiệm được thực hiện bằng cách áp dụng 72 chu kỳ liên tiếp trong cùng các điều kiện hoạt động. Trước khi bắt đầu bất kỳ thử nghiệm mới nào, nước đã khử ion được cấp vào thiết bị CDI trong 30 phút để loại bỏ bất kỳ muối nào còn sót lại trên các điện cực. Kết quả thảo luận dựa trên giá trị trung bình của các chu kỳ xử lý và tái sinh.

2.2. Vật liệu điện cực và thành phần của tế bào CDI

Tế bào CDI bao gồm các bộ thu dòng điện bằng than chì và các điện cực than hoạt tính xốp có nguồn gốc từ vỏ dừa với diện tích riêng là 800 m²/g [7]. Các bộ thu dòng điện bằng than chì được thay đổi theo phân cực dương hoặc âm. Mỗi cặp điện cực than hoạt tính được ngăn cách bởi một màng cao phân tử không dẫn điện để tránh hiện tượng đoản mạch. Các điện cực than hoạt tính được phủ bằng các màng trao đổi ion. Các màng trao đổi ion cải thiện sự hấp phụ/giải hấp các ion trên bề mặt điện cực.

Mỗi tế bào CDI chứa 200 tấm than hoạt tính (100 cực âm và 100 cực dương) với kích thước 156 mm × 172 mm × 0,3 mm và tổng khối lượng là 1352 g than hoạt tính. Các điện cực này được kết nối với hai bên của nguồn điện một chiều. Hai tế bào CDI đã được sử dụng trong nghiên cứu này.

2.3. Đánh giá ảnh hưởng của các điều kiện hoạt động đến hiệu quả loại bỏ muối và tiêu thụ năng lượng của tế bào CDI

Các thí nghiệm này được tiến hành bao gồm: (1) nồng độ TDS của dung dịch cấp được tăng dần từ 500 - 3500 mg/l ở nhiệt độ 24 °C và tốc độ dòng chảy là 2 l/phút; (2) tốc độ dòng chảy được tăng dần từ 1 - 4,5 l/phút ở nồng độ TDS 1000 mg/l và nhiệt độ 24 °C; (3) nhiệt độ của dòng cấp được tăng dần từ 20 - 50 °C với tốc độ dòng 2 l/phút và nồng độ TDS là 1000 mg/l.

Dung dịch nước cấp được sử dụng trong tất cả các thí nghiệm chỉ được bơm qua đơn vị CDI một lần và độ dẫn điện của nước cấp và nước lọc đầu ra được đo bằng máy đo độ dẫn điện (HACH, HQ40d Digital Meter). Kết quả thu được cho thấy, hiệu suất hấp thụ điện tức thời tại bất kỳ thời điểm nào trong thời gian thí

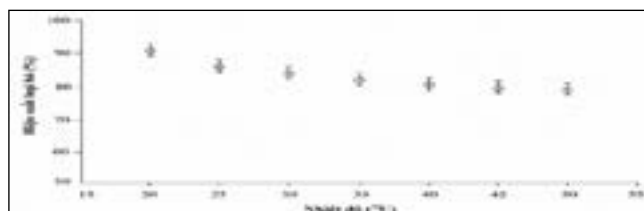
nghiệm, chứ không phải là hiệu suất hấp thụ tích lũy. Trong các thí nghiệm này, natri clorua (NaCl) được sử dụng để chuẩn bị dung dịch cấp với nồng độ cần thiết. Mức tiêu thụ năng lượng điện (kWh) của đơn vị CDI được đo bằng đồng hồ đo điện (Todae, MS6115).

Trong thí nghiệm này, hiệu suất loại bỏ hấp thụ điện được tính như sau: Hiệu suất loại bỏ hấp thụ điện (%) = $[(C_0 - C)/C_0] \times 100$. Trong đó C_0 và C (mg/l) đại diện cho nồng độ TDS của dòng vào và dòng ra đã được xử lý tương ứng.

3. Kết quả nghiên cứu

3.1. Nhiệt độ dung dịch cấp ảnh hưởng đến khả năng hấp thụ điện của điện cực CDI

Hiệu quả loại bỏ bằng hấp thụ điện của đơn vị CDI ở các nhiệt độ khác nhau (20, 25, 30, 35, 40, 45 và 50 °C) được thể hiện trong Hình 2.



▲ Hình 2. Hiệu quả loại bỏ bằng hấp thụ điện ở các nhiệt độ dung dịch cấp khác nhau với tốc độ dòng chảy 2 l/phút và nồng độ TDS là 1000 mg/l.

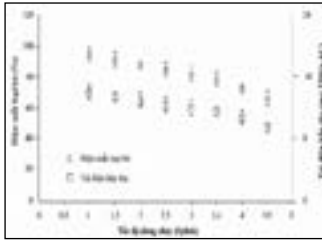
Nồng độ TDS của dòng nước lọc có thể tăng dần khi nhiệt độ dung dịch cấp tăng. Hơn nữa, hiệu suất hấp thụ điện theo xu hướng giảm từ 90,4% - 79,2% khi tăng nhiệt độ dung dịch từ 20 °C - 50 °C. Do đó, có thể nói rằng hiệu suất khử hấp thụ điện tỷ lệ nghịch với nhiệt độ dung dịch. Xu hướng hấp phụ này phù hợp với kết quả được công bố bởi Li và cộng sự [8]. Các kết quả hấp phụ điện thu được có thể tuân theo quá trình hấp phụ vật lý dưới các nhiệt độ khác nhau, có thể được mô tả bằng các đường đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir hoặc Freundlich. Hiện tượng này có thể do khả năng hấp phụ của than hoạt tính giảm khi tăng nhiệt độ theo các đường đẳng nhiệt hấp phụ. Hơn nữa, việc tăng nhiệt độ của dung dịch nước cấp làm tăng xu hướng của các ion kim loại thoát ra khỏi bề mặt điện cực vào pha dung dịch, dẫn đến giảm hấp phụ khi nhiệt độ tăng. Một lý do khác có thể liên quan đến sự xuất hiện của quá trình chuyển đổi kỵ nước-ưa nước trong cấu trúc của nước bề mặt bằng do giảm nhiệt độ của dung dịch, điều này tăng cường ái lực giữa than hoạt tính và các ion ngậm nước trên bề mặt [9]. Kết quả là, hiệu quả loại bỏ hấp thụ điện cao hơn ở nhiệt độ thấp hơn có thể liên quan đến quá trình chuyển đổi từ kỵ nước sang ưa nước trên bề mặt của than hoạt tính.

3.2. Ảnh hưởng của tốc độ dòng chảy đến hiệu suất hấp thụ điện và tiêu thụ năng lượng

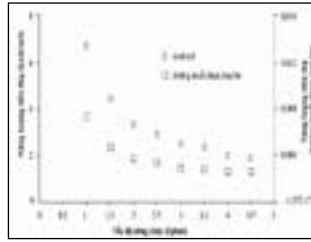
Hình 3 mô tả sự thay đổi của hiệu suất loại bỏ bằng hấp thụ điện và tải điện động trên các điện cực carbon



(nghĩa là, thể tích nguồn cấp $\times$ TDS loại bỏ/khối lượng điện cực) ở các tốc độ dòng chảy khác nhau (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5 l/phút).



▲ Hình 3. Hiệu suất loại bỏ bằng hấp thụ điện và tải điện hấp thụ trên các điện cực than hoạt tính ở các tốc độ dòng chảy khác nhau với nồng độ TDS 1000 mg/l và nhiệt độ 24°C



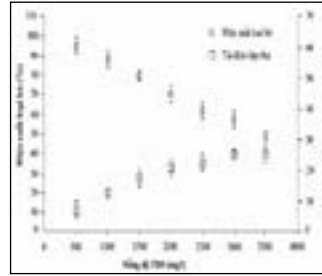
▲ Hình 4. Ảnh hưởng của tốc độ dòng chảy đến mức tiêu thụ năng lượng ở nồng độ TDS 1000 mg/l và nhiệt độ 24°C

Kết quả nghiên cứu cho thấy, nồng độ TDS trong dòng nước lọc tăng dần khi tăng tốc độ dòng chảy. Hiệu suất loại bỏ bằng hấp thụ điện theo xu hướng giảm từ 93,5% -64,2% khi tốc độ dòng chảy tăng từ 1 - 4,5 l/phút. Tải điện động theo cùng xu hướng giảm dần của hiệu suất loại bỏ bằng hấp thụ điện. Tải điện động trên điện cực cacbon giảm dần từ 13,62 - 9,82 mg TDS trên mỗi than hoạt tính với sự gia tăng tốc độ dòng chảy từ 1 đến 4,5 l/phút. Những kết quả này chỉ ra rằng tốc độ dòng chảy càng cao, giá trị TDS trong dòng nước lọc thu được càng cao, do thời gian còn lại của dung dịch bên trong tế bào thấp, điều này tạo ra ít thời gian chuyển khối cần thiết cho quá trình tinh chế dung dịch.

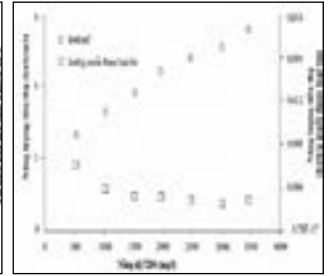
Hình 4 cho thấy, ảnh hưởng của các tốc độ dòng chảy khác nhau đến mức tiêu thụ năng lượng điện theo kWh/m³ và kWh/g TDS được loại bỏ. Kết quả cho thấy khi tốc độ dòng chảy tăng lên, năng lượng tiêu thụ giảm. Mức tiêu thụ năng lượng tính theo kWh/m³ nước tinh khiết đã giảm từ 6,65 xuống 1,83 kWh/m³ nước tinh khiết bằng cách tăng tốc độ dòng chảy từ 1 đến 4,5 l/phút. Lưu lượng đơn vị của nước mỗi giờ cao hơn ở tốc độ dòng chảy cao; điều này dẫn đến mức tiêu thụ năng lượng thấp hơn tính theo kWh/m³. Hơn nữa, mức tiêu thụ năng lượng tính theo kWh/g muối đã loại bỏ giảm từ $7,35 \times 10^{-3}$ xuống $2,79 \times 10^{-3}$ khi tăng tốc độ dòng chảy từ 1 đến 4,5 l/phút. Điều này có thể là do tốc độ hấp thụ của các ion cao hơn khi tốc độ dòng chảy cao hơn. Do đó, cả hiệu quả loại bỏ hấp thụ điện và tiêu thụ năng lượng cần được xem xét khi chọn tốc độ dòng hoạt động tối ưu. Trong nghiên cứu này, tốc độ dòng chảy tối ưu là 4,5 l/phút vì nó tiêu thụ năng lượng thấp nhất so với các tốc độ dòng chảy khác và nồng độ TDS của dòng tinh khiết vẫn duy trì dưới mức cho phép (dưới 500 mg/l) [10].

3.3. Ảnh hưởng của TDS dung dịch cấp đến hiệu suất hấp thụ điện và tiêu thụ năng lượng

Sự phụ thuộc của hiệu quả loại bỏ muối và tải trọng hấp thụ điện vào nồng độ TDS nước cấp ban đầu (500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 mg/l) ở tốc độ dòng chảy không đổi là 2 l/phút và nhiệt độ 24 °C được thể hiện trong Hình 5.



▲ Hình 5. Hiệu suất loại bỏ bằng hấp thụ điện và tải điện hấp thụ trên các điện cực than đến tiêu thụ năng lượng ở hoạt tính ở các TDS cấp ban đầu tốc độ dòng chảy 2 l/phút và nhiệt độ 24°C



▲ Hình 6. Ảnh hưởng của nồng độ TDS trong nước cấp phụ trên các điện cực than đến tiêu thụ năng lượng ở hoạt tính ở các TDS cấp ban đầu tốc độ dòng chảy 2 l/phút và nhiệt độ 24°C

Kết quả cho thấy, hiệu quả loại bỏ TDS giảm dần khi tăng TDS cấp ban đầu. Hiệu quả loại bỏ TDS là 94,7% và 54,2% khi sử dụng các giá trị TDS cấp ban đầu lần lượt là 500 và 3500 mg/l. Sự gia tăng TDS của nguồn cấp ban đầu tương ứng với sự gia tăng tuyến tính ban đầu của tải hấp thụ điện trên các điện cực than hoạt tính. Sau khi TDS cấp ban đầu đạt 3000 mg/l, khả năng hấp thụ điện không đổi, đạt 25,3 mg TDS trên một gam than hoạt tính. Điều này cho thấy rằng các điện cực đã đạt đến độ bão hòa; nghĩa là, khả năng hấp thụ điện của chúng đã đạt đến giá trị cực đại. Dung lượng khuếch tán hai lớp là một trong những yếu tố có vai trò quan trọng trong việc nâng cao và cải thiện khả năng biến đổi điện của điện cực. Dung lượng của lớp khuếch tán phụ thuộc chủ yếu vào nồng độ dung dịch điện ly [11]. Dung lượng khuếch tán hai lớp tăng lên khi nồng độ dung dịch điện ly tăng lên [5]. Do đó, khả năng chứa muối của điện cực xấp xỉ tăng lên khi nồng độ dung dịch điện phân tăng [12]. Nghiên cứu hiện tại xác nhận rằng việc tăng nồng độ TDS trong thức ăn có thể tăng cường khả năng hấp thụ điện của than hoạt tính thông qua việc cải thiện khả năng khuếch tán hai lớp.

Hình 6 cho thấy, ảnh hưởng của nồng độ TDS cấp ban đầu lên mức tiêu thụ năng lượng của đơn vị CDI tính theo kWh/m³ và kWh/g TDS bị loại bỏ. Kết quả cho thấy mức tiêu thụ năng lượng CDI tăng dần từ 2,61 lên 5,53 kWh/m³ nước tinh khiết khi TDS cấp ban đầu tăng từ 500 lên 3500 mg/l ở tốc độ dòng chảy 2 l/phút. Điều này có thể liên quan đến hoạt động điện phân cao hơn do tăng nồng độ TDS của dung dịch cấp, vì vậy ảnh hưởng đến mức tiêu thụ năng lượng của đơn vị CDI. Ngược lại, mức tiêu thụ năng lượng CDI tính theo kWh/g TDS loại bỏ giảm dần từ $5,51 \times 10^{-3}$ xuống $2,84 \times 10^{-3}$ khi tăng nồng độ TDS đầu vào từ 500 lên 3500 mg/l. Điều này xảy ra do điện trở của chất điện phân

giảm khi nồng độ dung dịch tăng lên. Do đó, tốc độ hấp phụ tăng khi nồng độ tăng. Điều này chứng tỏ khi chọn công suất xử lý của thiết bị CDI, điều quan trọng là phải xem xét cả nồng độ TDS của nguồn cấp và mức tiêu thụ điện năng, vì thiết bị sẽ chỉ hiệu quả về mặt chi phí khi TDS nguồn cấp và mức tiêu thụ điện năng nằm trong phạm vi tối ưu.

4. Kết luận

Kết quả cho thấy, hiệu quả loại bỏ hấp thụ điện tỷ lệ nghịch với nhiệt độ dung dịch, nồng độ TDS ban đầu và tốc độ dòng chảy. Ngoài ra, mức tiêu thụ năng lượng của đơn vị CDI (tính bằng kWh/m³) liên quan trực tiếp đến nồng độ nguồn cấp TDS và tỷ lệ nghịch

với tốc độ dòng chảy. Khả năng biến đổi điện của than hoạt tính (theo nồng độ khối lượng của các ion) trong nước xử lý phụ thuộc chủ yếu vào nồng độ của các ion trong dòng nước cấp. Các kết quả nghiên cứu chứng tỏ phải chọn công suất xử lý của CDI phù hợp với nồng độ TDS của dung dịch cấp và điện năng tiêu thụ để đạt được hiệu quả chi phí khi sử dụng CDI trong khử mặn và xử lý nước.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tiến hành trong khuôn khổ nhiệm vụ KHCN “Nghiên cứu hoàn thiện quy trình công nghệ siêu hấp thụ (CDI) ứng dụng trong xử lý nước sinh hoạt” do Viện TN&MT, Đại học Quốc gia Hà Nội chủ trì■

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Park, K., Kim, J., Yang, D.R., Hong, S., 2020. Towards a low-energy seawater reverse osmosis desalination plant: a review and theoretical analysis for future directions. *J. Membr. Sci.* 595, 117607.
2. Li, L., Zou, L., Song, H., Morris, G., 2009. Ordered mesoporous carbons synthesized by a modified sol-gel process for electrosorptive removal of sodium chloride. *Carbon* 47, 775–781.
3. Anderson, M.A., Cudero, A.L., Palma, J., 2010. Capacitive deionization as an electrochemical means of saving energy and delivering clean water. Comparison to present desalination practices: will it compete? *Electrochim. Acta* 55, 3845–3856.
4. Seo, S.J., Jeon, H., Lee, J.K., Kim, G.Y., Park, D., Nojima, H., Lee, J., Moon, S.H., 2010. Investigation on removal of hardness ions by capacitive deionization (CDI) for water softening applications. *Water Res.* 44, 2267–2275.
5. Li, H., Gao, Y., Pan, L., Zhang, Y., Chen, Y., Sun, Z., 2008. Electrosorptive desalination by carbon nanotubes and nanofibers electrodes and ion-exchange membranes. *Water Res.* 42, 4923–4928.
6. Gao, Y., Pan, L., Li, H., Zhang, Y., Zhang, Z., Chen, Y., Sun, Z., 2009. Electrosorption behavior of cations with carbon nanotubes and carbon nanofibers composite film electrodes. *Thin Solid Films* 517, 1616–1619.
7. Aqua EWP, 2000. *Electronic Water Purifier Operation and Maintenance Manual*, US.
8. Li, H., Pan, L., Zhang, Y., Zou, L., Sun, C., Zhan, Y., Sun, Z., 2010. Kinetics and thermodynamics study for electrosorption of NaCl onto carbon nanotubes and carbon nanofibers electrodes. *Chem. Phys. Lett.* 485, 161–166.
9. Wang, H.J., Xi, X.K., Kleinhammes, A., Wu, Y., 2008. Temperature-induced hydrophobic–hydrophilic transition observed by water adsorption. *Science* 322, 80–83.
10. EPA, 2006. *National drinking water standards*, United States Environmental Protection Agency, US.
11. Delahay, P., 1966. *Double layer and electrode kinetics*, Interscience/Wiley, New York.
12. Biesheuvel, P.M., Bazant, M.Z., 2010. Nonlinear dynamics of capacitive charging and desalination by porous electrodes. *Phys. Rev. E* 81, 1–12.

A STUDY OF BRACKISH WATER PURIFICATION BY CAPACITIVE DEIONIZATION (CDI) TECHNOLOGY

Luu The Anh, Do Quang Trung

Institute of Natural Resources and Environment, Vietnam National University, Hanoi

Hoang Trung Kien

Vietdream Co., Ltd

ABSTRACT

This study investigated the effect of operational conditions on the CDI electrosorption efficiency and energy consumption of capacitive deionization (CDI) filter units with activated carbon electrodes. The electrosorption removal efficiency was inversely related to the feed solution temperature, the initial total dissolved salts (TDS) concentration, and the applied flow rate. CDI energy consumption was directly related to the TDS concentration and inversely related to the flow rate.

Key words: *Capacitance deionization, brackish water filtration, total dissolved salt, electricity absorption*