

Research Article**Evaluation of the ability to control ammonium, nitrate and nitrite in water using membrane filtration technology****Dinh Tung Duong, Pham Thu Thao, Do Khac Uan****School of Chemistry and Life Sciences, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam**(Received: 04 Jun 2025; Revised: 22 Jun 2025; Accepted: 26 Jun 2025)***Abstract**

Domestic water sources in rural areas could be polluted by ammonium, nitrite and nitrate. These compounds affected to human health. Therefore, development of membrane filtration system to control the above pollution parameters is essential. In this study, a lab-scale membrane filtration system was operated under various conditions to evaluate the removal efficiency of ammonium, nitrite, nitrate. Several operating parameters such as flow, pressure and membrane resistance were also determined. The obtained results showed that the membrane filtration system achieved stability at the permeation and concentrated recovery ratio of 40%/60%. The removal efficiencies of ammonium, nitrate and nitrite were found at about 72.8%, 85%, and over 90%, respectively. The treated water could be met national regulation (QCVN 01-1:2024/BYT) for domestic purpose. In conclusion, developing a small-scale membrane filtration system could be suitable for households in rural areas which were lack of water treatment infrastructure.

Keywords: Ammonium, membrane filtration, nitrite, nitrate, domestic water.

*Corresponding author: Do Khac Uan (E-mail: uan.dokhac@hust.edu.vn)

<https://doi.org/10.47866/2615-9252/vjfc.4541>

Copyright © 2025 The author(s). This article is licensed under [CC BY-NC 4.0](#)

Đánh giá khả năng kiểm soát amoni, nitrat và nitrit trong nước bằng công nghệ lọc màng

Đinh Tùng Dương, Phạm Thu Thảo, Đỗ Khắc Uẩn

Trường Hóa và Khoa học Sự sống, Đại học Bách khoa Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

Tóm tắt

Nguồn nước sinh hoạt tại các khu vực nông thôn đang đối mặt với tình trạng ô nhiễm của amoni, nitrit và nitrat. Các hợp chất này gây ra nhiều nguy cơ nghiêm trọng đối với sức khỏe con người. Do đó, nghiên cứu phát triển hệ thống lọc màng với khả năng kiểm soát hiệu quả các thông số ô nhiễm trên là rất cần thiết. Hệ thống lọc màng được vận hành ở nhiều điều kiện khác nhau để đánh giá hiệu quả loại bỏ amoni, nitrit, nitrat và xác định thông số vận hành ổn định (lưu lượng, áp suất và trở lực màng lọc). Kết quả nghiên cứu cho thấy, hệ thống lọc màng đạt được sự ổn định cao khi kiểm soát tỷ lệ thu hồi dòng sản phẩm/dòng thải là 40%/60%. Hệ thống có khả năng loại bỏ amoni với hiệu suất đạt đến 72,8%, nitrat lên tới 85%, và đặc biệt nitrit được loại bỏ ổn định trên 90%. Hệ thống có khả năng kiểm soát các thông số trên đạt yêu cầu về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt (QCVN 01-1:2024/BYT). Do đó, phát triển hệ thống lọc màng quy mô nhỏ phù hợp với các hộ gia đình ở khu vực nông thôn thiếu hạ tầng xử lý nước.

Từ khóa: Amoni, lọc màng, nitrit, nitrat, nước sinh hoạt.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tình trạng sử dụng lạm dụng phân bón hóa học và thuốc bảo vệ thực vật trong sản xuất nông nghiệp gây ra hiện tượng rửa trôi các chất ô nhiễm vào môi trường nước.

Bên cạnh đó, việc xả thải trực tiếp hoặc xử lý không hiệu quả nước thải chăn nuôi tiếp tục làm gia tăng mức độ ô nhiễm. Các dòng ô nhiễm này di chuyển theo dòng chảy bề mặt, xâm nhập vào hệ thống kênh mương, sông, suối - những nguồn cung cấp nước thiết yếu cho sinh hoạt của cả khu vực đô thị và nông thôn [1]. Tình trạng này ảnh hưởng nghiêm trọng đến chất lượng nguồn nước đầu vào cho các nhà máy xử lý nước sinh hoạt, đặc biệt là tại các vùng nông thôn, nơi mà công nghệ xử lý nước còn lạc hậu, chưa đủ khả năng loại bỏ hiệu quả các hợp chất chứa nitơ như amoni, nitrit và nitrat. Nitrat và nitrit là những hợp chất có khả năng hòa tan cao trong nước và tồn tại phổ biến trong môi trường như một phần của chu trình nitơ. Nhiều nghiên cứu đã ghi nhận tác động tiêu cực của các hợp chất này đối với sức khỏe con người. Nitrat vào cơ thể người gần như được hấp thụ hoàn toàn vào máu từ ruột non và khoảng 25% lượng nitrat trong huyết tương phân bố vào tuyến nước bọt, trong đó khoảng 20% lượng nitrat bị khử thành nitrit bởi các Enzyme reductase của vi khuẩn trong khoang miệng. Sau khi hấp thụ vào máu, nitrit có thể oxy hóa sắt ferrous (Fe^{2+}) trong hemoglobin – chất chịu trách nhiệm vận chuyển oxy thành sắt ferric (Fe^{3+}), tạo thành methemoglobin, một dạng hemoglobin không có khả năng vận chuyển oxy hiệu quả và đồng thời giải phóng oxit nitric [2].

Trong điều kiện bình thường, methemoglobin chiếm dưới 1% tổng lượng hemoglobin, nhưng khi nồng độ này tăng lên, việc vận chuyển oxy đến các mô bị suy giảm rõ rệt. Ở mức methemoglobin 3 - 15%, da thường xuất hiện hiện tượng tím tái; hầu hết người khỏe mạnh vẫn chịu đựng được đến 10% mà không có triệu chứng nghiêm trọng. Tuy nhiên, khi mức này lên 10 - 20%, có thể gặp nhịp tim nhanh, suy nhược và các dấu hiệu thiếu oxy mô; vượt quá 20%, xuất hiện đau đầu, chóng mặt, mệt mỏi, khó thở và buồn nôn; khi vượt 70%, nguy cơ tử vong rất cao [2]. Trẻ sơ sinh đặc biệt nhạy cảm do hemoglobin của trẻ dễ bị oxy hóa hơn và hệ enzyme khử methemoglobin còn yếu, “hội chứng baby blues” (methemoglobin ở trẻ sơ sinh) xảy ra khi trẻ nhỏ dùng nước chứa nitrat vượt quá 10 mg/L, ảnh hưởng đến sự phát triển của đứa trẻ, gây ra xanh xao ở da, chậm lớn và gầy yếu [2]. Việc con người tiếp xúc với nitrat và nitrit từ nước uống, có nguy cơ phát triển 17 loại ung thư khác nhau, có thể kể đến ung thư đại tràng, ung thư dạ dày, ung thư thận, ung thư não, ung thư bàng quang [3].

Chất lượng cuộc sống được nâng cao cũng khiến cho nhu cầu tiêu dùng nói chung, trong đó nhu cầu sử dụng nước nói riêng tăng lên [1]. Nhu cầu về nước sạch phục vụ ăn uống, sinh hoạt và sản xuất của người dân tại các vùng nông thôn trên cả nước là rất lớn, chỉ có 51% hộ gia đình nông thôn được sử dụng nước sạch đáp ứng tiêu chuẩn chất lượng nước QCVN 01-1:2018/BYT của Bộ Y tế [4]. Về mặt kỹ thuật, các hợp chất chứa nitơ có thể được xử lý bằng các phương pháp hóa học, sinh học và lọc màng. Những năm gần đây, công nghệ màng đã được nghiên cứu và phát triển mạnh mẽ. Các hệ thống lọc màng hiện nay thường được thiết kế để loại

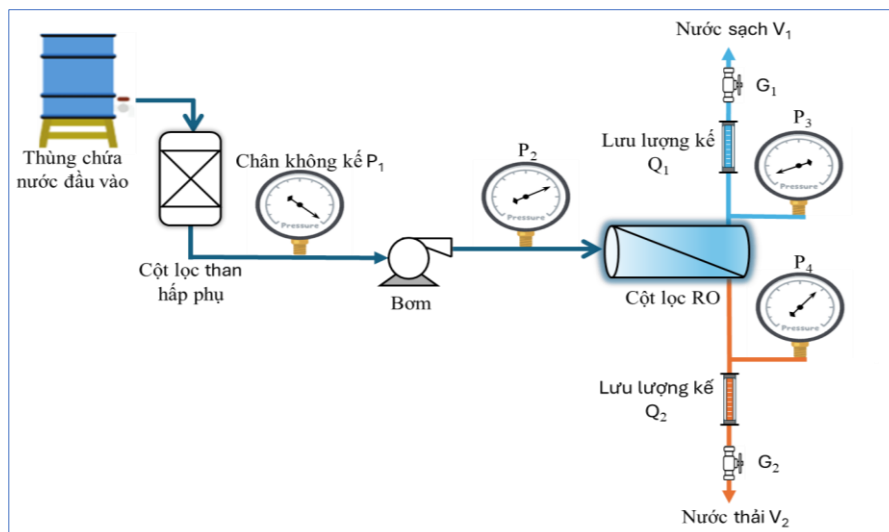
bỏ nhiều thông số đồng thời, mà không đề cập đến việc loại bỏ chuyên biệt các hợp chất chứa nitơ như amoni, nitrat, nitrit. Các công nghệ lọc màng được ứng dụng phổ biến trong xử lý nước, nước thải bao gồm: Màng lọc Nano, màng thẩm thấu ngược và màng trao đổi ion. Các công nghệ lọc màng có những đặc tính riêng biệt và hiệu quả khác nhau đối với từng loại chất gây ô nhiễm nitơ [3]. Thẩm thấu ngược (RO) thường cho thấy hiệu suất loại bỏ cao và ổn định nhất đối với các ion nitrat và amoni (dạng ion), tuy nhiên đi kèm với chi phí năng lượng cao và lượng nước thải đáng kể. Lọc màng nanofiltration (NF) cung cấp một giải pháp cân bằng hơn, với áp suất vận hành thấp hơn và khả năng giữ lại một số khoáng chất có lợi, nhưng hiệu suất loại bỏ các hợp chất nitơ có thể biến động [4]. Công nghệ trao đổi ion nổi bật với khả năng loại bỏ chọn lọc các ion cụ thể, đặc biệt là nitrat và amoni, nhưng lại nhạy cảm với sự cạnh tranh của các ion khác và tạo ra chất thải tái sinh cần xử lý.

Do đó, nghiên cứu phát triển hệ thống lọc màng để kiểm soát các thông số, đặc biệt là kiểm soát nitrit là rất cần thiết. Mục tiêu chính của nghiên cứu là đánh giá khả năng loại bỏ các thông số ô nhiễm như amoni, nitrit và nitrat để đảm bảo đạt Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước phục vụ cho mục đích sinh hoạt. Thông qua nghiên cứu để hoàn thiện một hệ thống công nghệ màng có khả năng xử lý hiệu quả các hợp chất chứa nitơ, có tính khả thi cao trong thương mại hóa và dễ dàng triển khai ở quy mô hộ gia đình hoặc cụm dân cư nhỏ.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Hệ thống thí nghiệm

Hệ thống lọc sử dụng công nghệ màng RO kiểm soát nitrit được triển khai tại tầng 1 phòng thí nghiệm C5-10, Đại học Bách khoa Hà Nội (**Hình 1**). Loại màng RO sử dụng trong nghiên cứu này được chế tạo từ vật liệu TFC (Thin Film Composite – Polyamide), là sản phẩm của hãng MCM Co., LTD, Hàn Quốc. Modul màng RO có công suất lọc khoảng 7,56 L/phút; với áp suất làm việc tối đa khoảng 8,75 at. Quy trình vận hành của hệ thống bắt đầu từ việc tiếp nhận nguồn nước cần xử lý từ thùng chứa. Dưới tác động kết hợp giữa lực trọng trường (dòng chảy tự nhiên) và áp suất âm do bơm tạo ra, nước được dẫn qua hệ thống ống đến cột lọc than hoạt tính. Cột lọc này có hình trụ đứng, sử dụng than hoạt tính dạng hạt (GAC) với kích thước hạt 1-2 mm, đóng vai trò quan trọng trong việc loại bỏ cặn lơ lửng, từ đó ngăn ngừa hiện tượng bám cặn trên bề mặt màng RO. Việc kiểm soát hiện tượng bám cặn giúp duy trì hiệu suất lọc, kéo dài tuổi thọ màng và hạn chế tiêu thụ năng lượng trong quá trình vận hành.



Hình 1. Sơ đồ quy trình của hệ thống công nghệ lọc màng dùng trong nghiên cứu

Sau khi được xử lý sơ bộ, nước được bơm cưỡng bức đến cột lọc màng RO bằng bơm Diaphragm Booster (24V DC, 1A). Màng RO cho phép loại bỏ hiệu quả các chất hòa tan. Quá trình lọc diễn ra theo cơ chế lọc chéo dòng, trong đó nước di chuyển theo hướng tiếp tuyến với màng và được phân thành hai dòng: dòng thẩm thấu (nước sạch) và dòng thải có các chất ô nhiễm. Các hợp chất dạng ion hòa tan như amoni (NH_4^+), nitrit (NO_2^-),

và nitrat (NO_3^-) được loại bỏ chủ yếu thông cơ chế khuếch tán - hòa tan. Kết quả sau quá trình lọc là hai dòng riêng biệt: dòng sản phẩm chứa nước sạch và dòng thải có nồng độ cao các chất ô nhiễm.

Đồng hồ đo áp suất (KK Gauges, được gắn nhãn P_1 , P_2 , P_3 , P_4 trong **Hình 1**) được đặt ở đường ống hút, đường ống đẩy của bơm và trên 2 dòng nước sản phẩm, dòng nước thải. Thiết bị đo lưu lượng (LZB-10WB, được gắn nhãn Q_1 , Q_2 trong **Hình 1**) hiển thị lưu lượng của 2 dòng nước sau khi đi qua hệ thống công nghệ màng. Đồng thời để quan sát diễn biến sự dao động của lưu lượng hay trường hợp lưu lượng vượt ngoài phạm vi hoạt động của lưu lượng kế, các ống đồng thể tích được sử dụng để xác định lưu lượng nước cấp, nước thẩm thấu và cô đặc. Tất cả các thông số này được quan sát và được ghi chép trên các thiết bị đo trong khoảng thời gian mỗi 30 giây vào biểu mẫu ghi chép số liệu, minh họa ở **Hình 1**. Các thông số màng lọc, khả năng loại bỏ thông số ô nhiễm được tính toán bằng các công thức, phương trình sau:

Trở lực của màng lọc được xác định như sau [7].

$$TMP = \frac{(P_4 + P_2)}{2} - P_3 = \frac{(P_4 + P_2)}{2} \quad (1)$$

(do van G_1 mở hoàn toàn, $P_3 = 0$)

Tỷ lệ dòng sản phẩm/dòng thải là:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (2)$$

Khả năng giữ lại thông số ô nhiễm có thể tính được theo công thức [8]:

$$R = \left(1 - \frac{C_{\text{dòng sản phẩm}}}{C_{\text{dòng vào}}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

Nghiên cứu tiến hành thử nghiệm trên các điều kiện khác nhau đối với các thông số vận hành (lưu lượng, áp suất, trở lực) để làm cơ sở lựa chọn điều kiện ổn định của hệ thống. Các điều kiện (**Bảng 1**) được thiết lập khi vận hành thử nghiệm của hệ thống là với độ mở van nước sản phẩm G_1 (180° , mở van hoàn toàn) và độ mở van nước thải G_2 ở các giá trị lần lượt 180° ; 150° ; 130° ; 120° ; 115° ; 110° là các điều kiện được kí hiệu như sau (1) 180-180; (2) 180-150; (3) 180-130; (4) 180-120; (5) 180-115; (6) 180-110.

Bảng 1. Điều kiện mở van tương ứng với tỷ lệ thu hồi sản phẩm/dòng thải

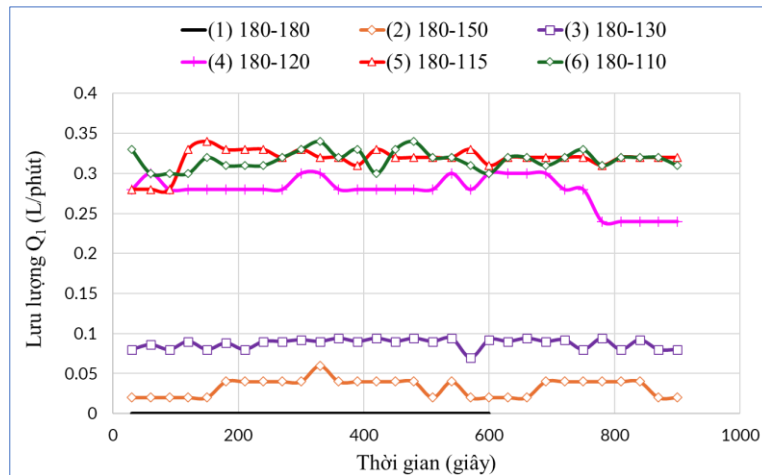
TT	Điều kiện mở van		Tỷ lệ thu hồi trung bình sản phẩm/dòng thải	Kí hiệu
	Độ mở van dòng sản phẩm (G_1)	Độ mở van dòng nước thải (G_2)		
1	180°	180°	~0%/100%	(1) 180-180
2		150°	~2%/98%	(2) 180-150
3		130°	~8%/92%	(3) 180-130
4		120°	~25%/75%	(4) 180-120
5		115°	~40%/60%	(5) 180-115
6		110°	~60%/40%	(6) 180-110

Nguồn nước dùng cho nghiên cứu được lấy từ vòi nước máy tại tầng 1, khu nhà vệ sinh tòa nhà C4-5, số 1 Đại Cồ Việt, Hà Nội. Nguồn nước được chứa vào thùng dung tích 20 L và được sử dụng cho các thí nghiệm nhằm đánh giá các thông số vận hành trên từng điều kiện đã thiết lập. Kết quả phân tích cho thấy nồng độ đầu vào của các thông số như sau amoni (0,75 mg/L), nitrat (20 mg/L) và nitrit (0,75 mg/L). Trong quá trình này, các thông số vận hành được ghi nhận mỗi 30 giây, với thời gian vận hành kéo dài tối thiểu từ 30 phút đến 1 giờ để đảm bảo độ ổn định và đại diện.

3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

3.1. Sự ổn định về lưu lượng dòng nước sản phẩm

Lưu lượng dòng sản phẩm (Q_1) được lựa chọn là thông số vận hành đầu tiên cần đánh giá và được minh họa trong **Hình 2**.

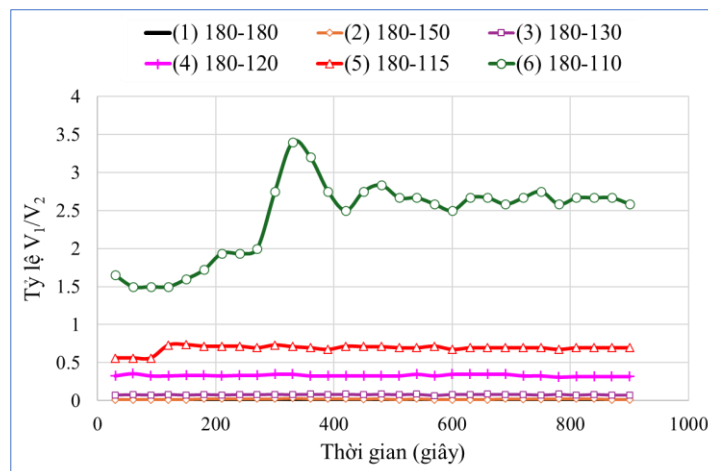


Hình 2. Biến thiên lưu lượng dòng sản phẩm theo thời gian

Giá trị lưu lượng được ghi nhận với chu kỳ 30 giây/lần, dưới điều kiện cấp nước không đổi. Kết quả cho thấy, tại điều kiện vận hành (1) với trường hợp mở van $G_1 - G_2$ là $180^\circ - 180^\circ$, hệ thống hầu như không tạo ra dòng nước thẩm thấu. Chỉ khi van G_2 bắt đầu được đóng một phần ở điều kiện (2) - tức $180^\circ - 150^\circ$, dòng nước sản phẩm mới bắt đầu xuất hiện, phản ánh sự vượt ngưỡng áp suất thẩm thấu cần thiết cho quá trình lọc qua màng RO. Trong tổng số 6 điều kiện vận hành được khảo sát, ngoại trừ điều kiện (1), bốn trường hợp (2), (3), (5) và (6) thể hiện sự ổn định tương đối cao về lưu lượng dòng sản phẩm. Đây là yếu tố quan trọng giúp xác định các thông số vận hành tối ưu, hướng tới việc nâng cao hiệu suất hoạt động và tính ổn định của hệ thống trong thực tế.

3.2. Đánh giá khả năng thu hồi dòng nước sản phẩm

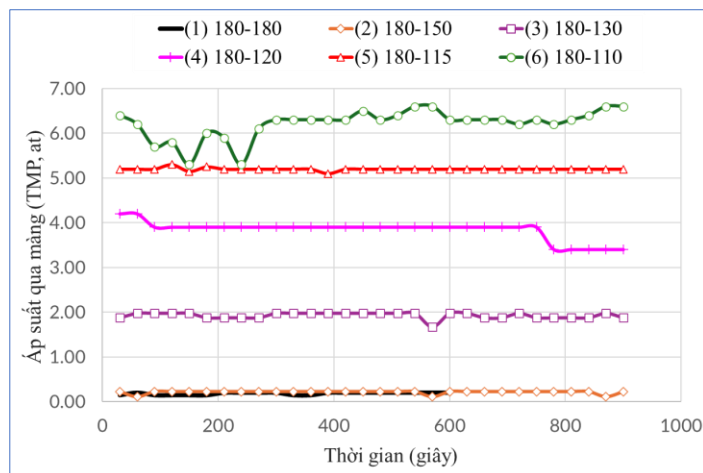
Trong từng điều kiện vận hành, tỷ lệ giữa lưu lượng dòng sản phẩm và dòng thải (V_1/V_2) đóng vai trò là chỉ số đánh giá hiệu suất quan trọng của hệ thống. Thông số này không chỉ phản ánh mức độ thu hồi nước sạch mà còn cho thấy lượng nước thải phát sinh trong quá trình vận hành. Theo quan sát từ **Hình 3**, điều kiện vận hành (6) cho thấy tỷ lệ thu hồi nước sản phẩm cao nhất. Tuy nhiên, điều này đạt được đồng thời với áp suất lọc màng cao nhất, đặt ra yêu cầu cần đánh giá thêm về chi phí năng lượng và nồng độ chất ô nhiễm trong dòng thải. Việc lựa chọn điều kiện vận hành tối ưu cần cân nhắc đến nhu cầu sử dụng nước thực tế của hộ gia đình hoặc cụm dân cư nhỏ, đồng thời đảm bảo cân bằng giữa hiệu suất thu hồi, chi phí vận hành và khả năng xử lý dòng thải. Dòng nước thải với nồng độ ô nhiễm không quá cao có thể được tận dụng cho các mục đích thứ cấp như tưới cây hoặc vệ sinh, hoặc được xả thải vào hệ thống thu gom nước thải sinh hoạt một cách an toàn. Hệ thống rất linh hoạt trong việc thay đổi tỷ lệ dòng thu hồi, trong khi các nghiên cứu khác thường chỉ giữ ở tỷ lệ cố định, thông thường tỷ lệ thu hồi 50% [5].



Hình 3. Biến thiên tỷ lệ V_1/V_2 theo thời gian

3.3. Trở lực của màng lọc

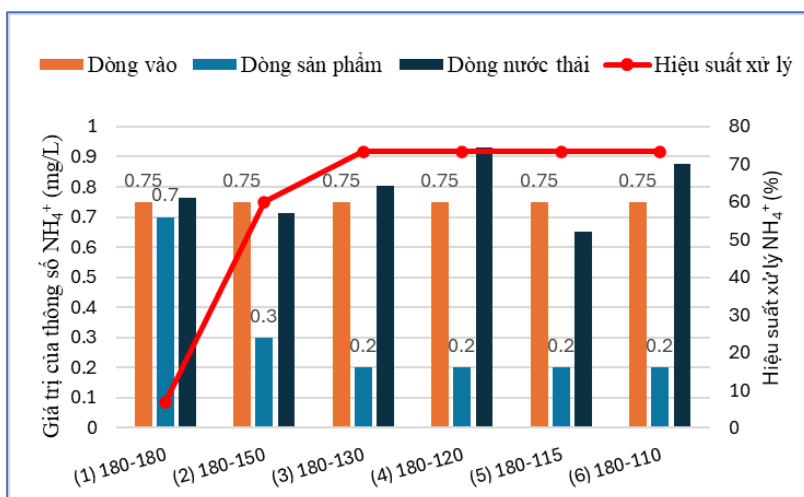
Một đặc điểm nổi bật của hệ thống được thể hiện qua sự biến thiên trở lực của màng lọc (Transmembrane Pressure – TMP), như trình bày trong **Hình 4**. Giá trị TMP có xu hướng tăng dần tương ứng với việc giảm độ mở của van xả dòng thải (G_2). Đặc biệt, sự chênh lệch áp suất gia tăng rõ rệt trong các điều kiện từ (3) đến (6) so với hai điều kiện đầu tiên (1) và (2), đồng thời đi kèm với sự gia tăng lưu lượng dòng nước sản phẩm. Kết quả này cho phép xác định rằng hệ thống bắt đầu tạo ra lượng nước thẩm thấu đáng kể khi TMP vượt ngưỡng 3,5 at, với lưu lượng $Q_1 > 0,2$ L/phút. Nhìn chung, hệ thống đạt hiệu suất lọc ban đầu ở mức áp suất thấp (< 7 at), thấp hơn so với nhiều nghiên cứu trước đây áp dụng công nghệ màng RO. Cụ thể, nghiên cứu tại Nam Phi ghi nhận giá trị TMP vào khoảng 13,75 at [5]; nghiên cứu tại Ma-rốc báo cáo TMP tối ưu ở mức 10,2 at [6]; trong khi đó nghiên cứu của Epsztein và cộng sự đạt hiệu suất ở mức 8,15 at [7]. Trong nghiên cứu này, điều kiện vận hành (5) được đánh giá là mang lại mức TMP ổn định nhất, hài hòa giữa hiệu suất lọc và áp suất vận hành. Một trong những thách thức lớn nhất đối với hệ thống thẩm thấu ngược (RO) trong vận hành lâu dài là hiện tượng tắc nghẽn màng lọc [8]. Vấn đề này không chỉ làm suy giảm hiệu suất màng mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến tuổi thọ thiết bị và chi phí vận hành. Về cơ chế, hiện tượng tắc nghẽn có thể được phân loại thành bốn nhóm chính: tắc nghẽn sinh học - sự hình thành lớp màng sinh học do vi sinh vật, tắc nghẽn hữu cơ - do chất hữu cơ gây ra, bám cặn vô cơ - các chất vô cơ lắng đọng trên bề mặt màng hoặc bên trong các lỗ màng và tắc nghẽn do hạt keo. Để duy trì tính ổn định lâu dài của công đoạn màng lọc RO, hệ thống đã bố trí áp dụng biện pháp kiểm soát nguồn nước bằng tích hợp lọc than hoạt tính và màng vi lọc [9]. Quá trình tiền xử lý nhờ khả năng hấp phụ và quá trình tách lọc sẽ hoạt động hiệu quả trong việc ngăn ngừa các hạt keo hoặc các hạt nhỏ lắng đọng, đồng thời cũng có thể làm nâng cao hiệu quả xử lý về các hợp chất của nitơ, sẽ được phân tích cụ thể trong các nghiên cứu thời gian tới. Hiện tượng tắc nghẽn còn có thể xảy ra ở công đoạn tiền xử lý, để theo dõi tình trạng này, trong thiết kế của hệ thống đã bố trí đồng hồ đo chân không kế (P1) và đồng hồ đo áp kế (P2) để theo dõi sự biến thiên áp suất của dòng chảy qua các công đoạn, từ đó sẽ xác định được thời điểm cần bảo trì, tuổi thọ của màng lọc, đưa ra khuyến cáo cho người sử dụng hệ thống.



Hình 4. Biến thiên trở lực màng lọc theo thời gian

3.4. Khả năng loại bỏ amoni

Kết quả nghiên cứu thể hiện trên **Hình 5** cho thấy hệ thống có khả năng loại bỏ amoni hiệu quả, với hiệu suất dao động từ 66,7% đến 72,8% qua năm trên sáu điều kiện vận hành được khảo sát. Trong đó, các điều kiện (3), (4), (5), (6) đều cho thấy hiệu suất ở mức cao (72,8%), cho thấy đây những thông số vận hành tối ưu cho quá trình xử lý amoni. Hiệu suất loại bỏ amoni của hệ thống hiện tại (66,7% - 72,8%) kém hơn so với các kết quả nghiên cứu khác. Một nghiên cứu ghi nhận hiệu quả loại bỏ 96,9% - 99,8% cho thông số ô nhiễm amoni [8].

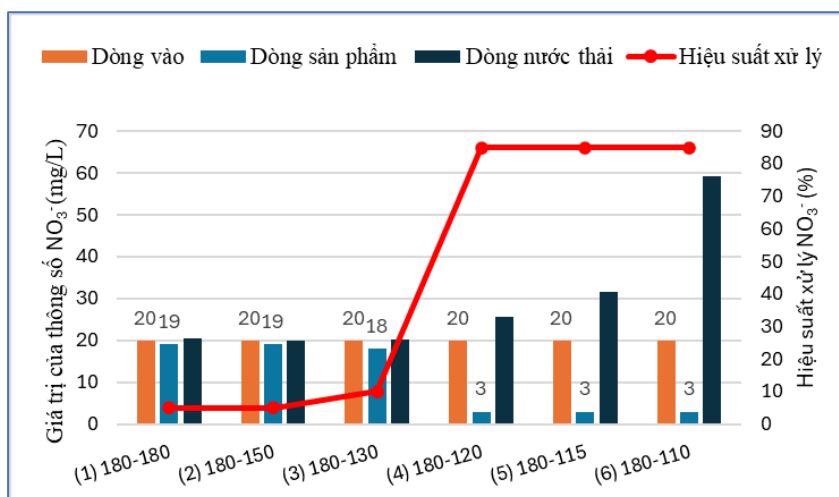


Hình 5. Giá trị của NH_4^+ trong các mẫu nước ở các điều kiện vận hành

Mặc dù vậy, so với mức loại bỏ amoni khoảng 76% được báo cáo trong một số nghiên cứu, hiệu suất 72,8% của hệ thống hiện tại là tương đương hoặc chỉ thấp hơn một chút [9]. Nguyên nhân giải thích sự khác biệt về hiệu suất của hệ thống RO trong loại bỏ amoni là nồng độ đầu vào của nguồn nước cấp. Nồng độ nước đầu vào cao hơn ($> 5 \text{ mg/L}$) dẫn đến hiệu suất loại bỏ lớn hơn trong khoảng từ 85 đến 95%, trong khi nồng độ nước đầu vào thấp hơn ($< 2 \text{ mg/L}$) dẫn đến hiệu suất loại bỏ trong khoảng từ 50 đến 79% [10]. Trong nghiên cứu này, hiệu suất loại bỏ amoni trong hệ thống màng RO chỉ đạt mức 66,7 - 72,8%, thấp hơn đáng kể so với một số công bố quốc tế đạt hiệu suất tới 95 - 99%. Sự chênh lệch này có thể bắt nguồn từ nhiều nguyên nhân khác nhau, trong đó đáng chú ý là nồng độ amoni đầu vào. Nồng độ đầu vào thấp ($< 0,75 \text{ mg/L}$) của amoni trong nước nguồn có thể là một yếu tố gây nhiễu trong quá trình đánh giá hiệu suất xử lý. Khi nồng độ amoni trong nước đầu vào ở mức thấp (thường dưới 1 mg/L), sai số tương đối trong phép đo đầu ra khi sử dụng bộ kit so màu của hãng Sera GmbH sẽ lớn hơn, khiến hiệu suất tính toán có thể không phản ánh đầy đủ khả năng loại bỏ thực tế của màng. Nghiên cứu trước đó cũng đã đưa ra kết quả trong khi nồng độ nước đầu vào thấp hơn ($< 2 \text{ mg/L}$) dẫn đến hiệu suất loại bỏ trong khoảng từ 50 đến 79% [11].

3.5. Khả năng loại bỏ nitrat

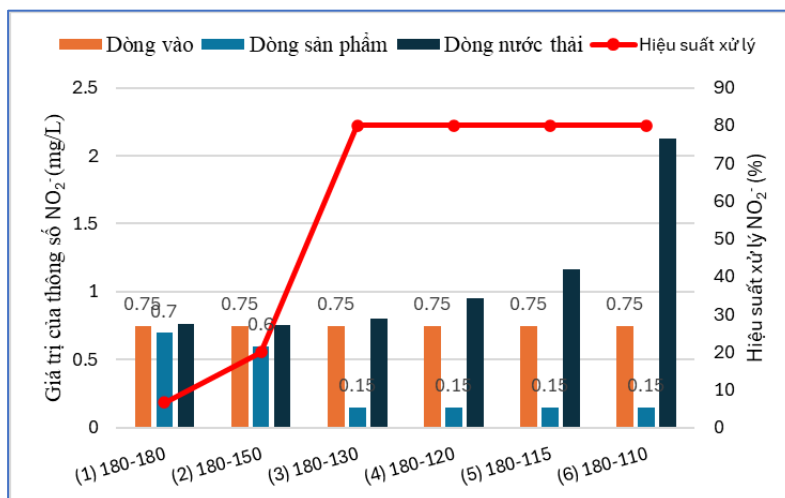
Từ quan sát kết quả thể hiện ở **Hình 6**, có thể thấy rõ sự khác biệt về nồng độ nitrat giữa dòng sản phẩm và dòng nước thải trong các điều kiện vận hành khác nhau. Trong ba điều kiện đầu tiên từ (1) đến (3), sự khác biệt giữa dòng sản phẩm và dòng nước thải không đáng kể, phản ánh hiệu suất loại bỏ nitrat còn thấp, chỉ dao động quanh mức 10 - 20%. Tuy nhiên, kể từ điều kiện vận hành (4) trở đi – đặc biệt là ở các thông số (4) 180–120, (5) 180115 và (6) 180 - 110 - hiệu suất loại bỏ tăng mạnh, đạt từ 75% đến 85%. Điều này cho thấy sự cải thiện đáng kể trong quá trình tách nitrat nhờ tối ưu hóa điều kiện vận hành như áp suất và lưu lượng dòng. Về mặt cơ chế tách loại, hệ thống RO loại bỏ nitrat chủ yếu dựa trên nguyên lý chặn theo kích thước phân tử (size exclusion). Bán kính khi ngậm nước của các ion lần lượt là: nitrat 0,340 nm; nitrit 0,330 nm; và amoni 0,331 nm [11]. Dựa vào bán kính ngậm nước của các ion và kích thước lỗ mao quản của màng lọc ($< 0,1 \text{ nm}$), đã lý giải hệ thống có khả năng giữ lại đối tượng nitrit tốt hơn so với amoni phù hợp với kết quả nghiên cứu thực nghiệm. Nghiên cứu cho thấy màng lọc có thể đạt hiệu suất loại bỏ nitrat tới 95,3% ở áp suất 10,2 at hoặc thậm chí lên đến 98% ở áp suất 8,2 at [12, 14]. Tuy nhiên, điều đáng chú ý là hệ thống trong nghiên cứu này vẫn đạt tới 85% hiệu suất ở mức áp suất thấp hơn (4 - 7 at), điều này cho thấy tiềm năng tiết kiệm năng lượng lớn và hiệu quả kinh tế cao khi triển khai thực tế.



Hình 6. Giá trị của số NO_3^- trong các mẫu nước ở các điều kiện vận hành

3.6. Khả năng loại bỏ nitrit

Kết quả nghiên cứu được trình bày tại **Hình 7** cho thấy hệ thống lọc màng có khả năng loại bỏ nitrit hiệu quả và ổn định trong hầu hết các điều kiện vận hành. Đáng chú ý, sự chênh lệch nồng độ rõ rệt giữa dòng sản phẩm và dòng nước thải bắt đầu xuất hiện từ điều kiện (3) (180 - 130), trong đó nồng độ nitrit trong dòng sản phẩm được duy trì ở mức thấp (hiệu suất loại bỏ chỉ đạt khoảng 22%), trong khi giá trị tương ứng ở dòng nước thải có xu hướng tăng. Điều này phản ánh rõ rệt khả năng giữ lại nitrit vượt trội của màng RO và cho thấy hệ thống đang vận hành với hiệu suất tách chất ô nhiễm cao. Hiệu suất loại bỏ nitrit đạt trên 90% ở bốn trong sáu điều kiện khảo sát, khẳng định tính ổn định và độ tin cậy của công nghệ màng trong ứng dụng xử lý nitrit. Mức hiệu suất này cũng tương đương với kết quả 95,7% được ghi nhận trong các nghiên cứu trước đó, cho thấy hệ thống hiện tại đáp ứng tốt các yêu cầu về hiệu quả xử lý nitrit trong thực tiễn [9, 14].



Hình 7. Biến thiên của NO_2^- trong các mẫu nước ở các điều kiện vận hành

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng và phát triển hệ thống công nghệ lọc màng nhằm mục tiêu xử lý hiệu quả các hợp chất chứa nitơ (amoni, nitrit, nitrat) trong nước cấp có quy mô nhỏ. Nghiên cứu đã xác định các điều kiện vận hành hệ thống, bao gồm: áp suất xuyên màng (TMP), lưu lượng dòng sản phẩm và chất lượng nước đầu ra một cách ổn định và ít biến động. Từ các điều kiện vận hành đã khảo sát cho thấy điều chỉnh độ mở van dòng sản phẩm (G1) ở 180° và độ mở van dòng nước thải (G2) ở 115° có tỷ lệ thu hồi trung bình sản phẩm/dòng thải khoảng 40%/60%. Ở điều kiện này, hệ thống làm việc ổn định, với trở lực màng lọc duy trì dưới 7 at mà vẫn đảm bảo dòng nước sạch đạt trên 40%. Việc phát triển các mô hình xử lý nước sinh hoạt quy mô nhỏ bằng

công nghệ lọc màng có khả năng đáp ứng tốt yêu cầu về chất lượng nước đầu ra. Hệ thống nhỏ gọn sẽ đảm bảo tính linh hoạt và khả năng nhân rộng trong các cộng đồng dân cư có điều kiện hạn chế về hạ tầng xử lý nước.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách khoa Hà Nội (HUST) trong đề tài mã số T2024-TĐ-001.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Ministry of Natural Resources and Environment, “Report on the current state of the national environment in 2018, topic: Water environment in river basins,” Hanoi, 2018 [In Vietnamese].
- [2]. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, “Toxicological Profile for Nitrate and Nitrite,” US, 2017.
- [3]. Roberto Picetti, Megan Deeney, Silvia Pastorino, Mark R. Miller, Anoop Shah, David A. Leon, Alan D. Dangour, Rosemary Green, “Nitrate and nitrite contamination in drinking water and cancer risk: A systematic review with meta-analysis,” *Environmental Research*, vol. 210, p. 112988, 2022.
- [4]. Directorate of Water Resources, “National strategy for rural clean water supply and sanitation to 2030, with a vision to 2045,” 2020 [In Vietnamese].
- [5]. J.J. Schoeman; A. Steyn, “Nitrate removal with reverse osmosis in a rural area in South Africa,” *Desalination*, vol. 155, pp. 15-26, 2003.
- [6]. H. Elmrabet; S. Kitanou; F.Z. Addar; A. Moukhtari; M. Tahaikt; M. Taky; A. Elmidaouia, “Response surface methodological approach for optimizing nitrate removal by nanofiltration and reverse osmosis processes,” *Desalination and Water Treatment*, no. 316, pp. 791-801, 2023.
- [7]. Razi Epsztein; Oded Nir; Ori Lahav; Michal Green, “Selective nitrate removal from groundwater using a hybrid nanofiltration–reverse osmosis filtration scheme,” *Chemical Engineering Journal*, no. 279, pp. 372-378, 2015.
- [8]. Chungheon Shin, Aleksandra Szczuka, Renjing Jiang, William A. Mitch, Craig S. Criddle, “Optimization of reverse osmosis operational conditions to maximize ammonia removal from the effluent of an anaerobic membrane bioreactor,” *Environmental Science: Water Research & Technology*, no. 4, 2021.
- [9]. Murthy Kasi, Mitchell Swanson, Halis Simsek, Steve Ahlschlager, Kent Ritterman, Jim Hausauer, Jeff Hoff, Eakalak Khan, “Total Nitrogen Removal by Reverse Osmosis: Role of Biodegradable Dissolved Organic Nitrogen,” *Proceedings of the Water Environment Federation*, vol.19, pp. 242-256., 2013
- [10]. Rion Merlo, Joe Wong, Victoocciano, Kyle Sandera, Anil Pai, Seval Sen, Jose Jimenez, Denny Parker, John Burcham, “Analysis of organic nitrogen removal in municipal wastewater by reverse osmosis,” *Water Environment Research*, vol. 84, no. 7, pp. 588-595, 2012.
- [11]. Alena Popova, Radamanee Rattanacom, Zhi-Qiang Yu, Zhuolin Li, Kei Nakagawa, Takahiro Fujioka, “Evaluating the potential of nanofiltration membranes for removing ammonium, nitrate, and nitrite in drinking water sources,” *Water Research*, vol. 244, p. 120484, 2023.
- [12]. Sakina Belhamidi, Soufian El-Ghzizel, Mohamed Taky, Azzeddine Elmidaoui, “Nitrate removal of groundwater by reverse osmosis, nanofiltration and electrodialysis: performances and cost comparison,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 262, pp. 338-346, 2022.