NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG LỌC MÀNG TỰ CHẢY TIẾT KIỆM NĂNG LƯỢNG

DEVELOPMENT OF SAVING ENERGY MEMBRANE FILTRATION SYSTEM

Đỗ Khắc Uẩn, Nguyễn Văn Hoàng

Khoa Khoa học và Công nghệ môi trường, Trường Hóa và Khoa học sự sống, Đại học Bách khoa Hà Nội

Đến Tòa soạn ngày 21/5/2025, chấp nhận đăng ngày 18/7/2025

Tóm tắt: Trong những năm gần đây, nhu cầu nước sạch ngày càng cấp thiết, đặc biệt tại vùng nông thôn, miền núi và nơi chưa có hạ tầng cấp nước đầy đủ. Công nghệ màng vi lọc (Microfiltration - MF) được xem là giải pháp hiệu quả cho xử lý nước sinh hoạt quy mô nhỏ nhờ khả năng loại bỏ chất rắn lơ lửng, vi khuẩn và vi sinh vật kích thước lớn. Tuy nhiên, đa số hệ thống MF hiện nay cần máy bơm tạo áp, dẫn đến chi phí đầu tư, vận hành và bảo trì cao – là rào cản tại các khu vực hạn chế nguồn lực. Nghiên cứu này đề xuất một hệ thống MF hoạt động hoàn toàn theo nguyên lý tự chảy nhờ áp suất thủy tĩnh, kết hợp thiết bị tăng áp tự chế dựa trên nguyên lý hai bình thông nhau để nâng áp mà không cần bơm. Mô hình được thiết kế, lắp đặt và thử nghiệm trong điều kiện thực tế với các tiêu chí đánh giá: độ ổn định dòng chảy, khả năng duy trì áp lực và chất lượng nước sau lọc. Kết quả cho thấy hệ thống này là giải pháp đơn giản, tiết kiệm năng lượng và hiệu quả, phù hợp với điều kiện tự nhiên và có tiềm năng nhân rộng trong thực tiễn.

Từ khóa: Màng lọc, vi lọc, xử lý nước, tiết kiệm năng lượng, hệ thống.

Abstract: In recent years, clean water has become increasingly urgent, especially in rural, mountainous areas. Microfiltration membrane technology (MF) is considered an effective solution for small-scale domestic water treatment thanks to its ability to remove suspended solids, bacteria and large microorganisms. However, most current MF systems require pressure pumps, leading to high investment, operation and maintenance costs - a barrier in areas with limited resources. This study proposes an MF system that could be operated based on the principle of hydrostatic pressure, without the need for a pump. The model is designed, installed and tested under real conditions with the following evaluation criteria: flow stability, pressure maintenance ability and water quality after filtration. The results show that this system is a simple, energy-saving and effective solution, suitable for natural conditions and has the potential to be replicated in practice.

Keywords: Microfiltration, membrane, water, saving energy, system.

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, vấn đề ô nhiễm nguồn nước tại Việt Nam và nhiều quốc gia đang phát triển ngày càng trở nên nghiêm trọng do sự gia tăng dân số, công nghiệp hóa và đô thị hóa nhanh chóng. Chất lượng nước mặt và nước ngầm đều đang bị suy giảm do chịu ảnh hưởng của nước thải sinh hoạt, nước thải công nghiệp, thuốc bảo vệ thực vật và phân bón từ sản xuất nông nghiệp. Điều này đã và đang đặt ra những thách thức lớn trong việc đảm bảo nguồn nước sạch phục vụ cho sinh hoạt và sản xuất [1].

Cùng với đó, nhu cầu sử dụng nước sạch ngày càng tăng cao, đặc biệt tại các khu vực nông thôn, vùng sâu vùng xa, nơi hạ tầng cấp nước

còn hạn chế và người dân chủ yếu sử dụng nguồn nước mặt chưa qua xử lý hoặc xử lý sơ sài. Các giải pháp xử lý nước hiện nay như khử trùng bằng clo, lọc RO… tuy hiệu quả nhưng thường yêu cầu chi phí đầu tư và vận hành cao, đặc biệt là tiêu tốn năng lượng điện lớn, không phù hợp với các vùng còn khó khăn về điều kiện hạ tầng [2].

Trong bối cảnh đó, các công nghệ xử lý nước tiết kiệm năng lượng, chi phí thấp, dễ triển khai và dễ vận hành đang nhận được sự quan tâm lớn từ các nhà nghiên cứu và các tổ chức hoạt động trong lĩnh vực nước sạch. Một trong những hướng tiếp cận tiềm năng là ứng dụng công nghệ màng lọc vi mô (Microfiltration – MF) theo nguyên lý tự chảy, tức sử dụng áp lực trọng lực tự nhiên thay vì sử dụng các bơm áp lực như trong các hệ thống truyền thống [3].

Công nghệ màng MF là một dạng lọc cơ học sử dụng các màng bán thấm có kích thước lỗ từ 0,1 đến 10 µm, có khả năng loại bỏ hiệu quả các chất rắn lơ lửng, vi khuẩn, tảo và các tạp chất lớn trong nước. Khi kết hợp với nguyên lý tự chảy, hệ thống màng lọc không cần dùng đến bơm cao áp, nhờ vậy tiết kiệm điện năng và vận hành đơn giản hơn [4]. Tuy nhiên, một trong những điểm hạn chế của hệ thống màng tự chảy là áp lực thấp, dẫn đến lưu lượng lọc nhỏ và giảm hiệu suất khi vận hành trong thời gian dài. Trong thực tế, áp suất thủy tĩnh tạo ra từ chiều cao cột nước thường không đủ để duy trì tốc độ lọc ổn định, đặc biệt khi màng bắt đầu bám cặn. Để giải quyết vấn đề này, nghiên cứu này đề xuất kết hợp thêm thiết bị tăng áp cỡ nhỏ trong hệ thống lọc tự chảy, nhằm duy trì áp lực vừa đủ giúp tăng hiệu suất lọc mà không làm mất đi ưu điểm về tiết kiệm năng lượng giúp tối ưu hóa điện năng tiêu thụ và kéo dài tuổi thọ màng [5].

Nghiên cứu nhằm đánh giá khả năng xử lý nước của hệ thống màng MF hoạt động theo nguyên lý tự chảy, đồng thời khảo sát hiệu quả của việc tích hợp thiết bị hỗ trợ tăng áp trong việc nâng cao hiệu quả xử lý nước mà vẫn giữ được tính năng tiết kiệm năng lượng.

Các mục đích cụ thể của nghiên cứu bao gồm: Thiết kế và xây dựng mô hình hệ thống lọc nước sử dụng công nghệ màng MF tự chảy. Tích hợp thiết bị hỗ trợ tăng áp nhằm cải thiện hiệu suất màng lọc trong điều kiện tiết kiệm năng lượng. Đề xuất khả năng ứng dụng thực tiễn và tiềm năng nhân rộng mô hình tại các khu vực khó tiếp cận với hệ thống cấp nước trung tâm, vùng nông thôn.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cở sở lý thuyết

Trong hệ thống màng tự chảy, chuyển động của dòng nước được duy trì bằng áp suất thủy tĩnh sinh ra do sự chênh lệch chiều cao giữa mực nước trong bồn chứa và đầu vào màng lọc. Áp suất thỷ tĩnh được tính theo công thức:

$$P=\rho \cdot g \cdot h \qquad [1]$$

Trong đó:

P: áp suất thủy tĩnh (Pa);
ρ: khối lượng riêng của nước (~1000 kg/m³);
g: gia tốc trọng trường (~9,81 m/s²);
h: chiều cao cột nước (m).

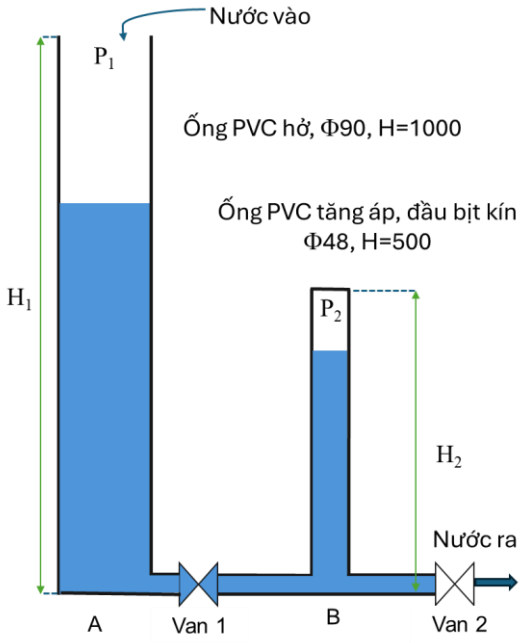
Kết hợp với phương trình Bernoulli trong trường hợp dòng chất lỏng lý tưởng:

$$P + \frac{1}{2}\rho w^2 + pgh = const \qquad [1]$$

Phương trình cho thấy rằng, khi nước chảy từ vị trí cao xuống thấp, thế năng chuyển hóa thành động năng, tức tốc độ dòng chảy *w(m/s)* tăng lên. Điều này lý giải khả năng vận hành của hệ thống màng mà không cần sử dụng bơm.

Nguyên lý hai bình thông nhau [2] là hiện tượng vật lý mô tả sự phân bố mực nước giữa hai bình được nối với nhau bởi một ống dẫn chất lỏng. Ở trạng thái cân bằng, nếu cả hai bình đều mở ra khí quyển, mực nước ở hai bình sẽ ngang bằng nhau do áp suất tác dụng lên bề mặt chất lỏng ở cả hai đầu là như nhau (bằng áp suất khí quyển). Tuy nhiên, trong trường hợp một bình hở (tiếp xúc khí quyển) và một bình kín (không tiếp xúc khí quyển), mực nước ở hai bình sẽ không bằng nhau do sự khác biệt về áp suất tác động lên bề mặt chất lỏng. Đây chính là hiện tượng được ứng dụng trong thiết kế của thiết bị tăng áp trong hệ thống lọc màng tự chảy.

Ống A là ống hở, chứa nước thô, đặt ở vị trí cao và tiếp xúc trực tiếp với khí quyển, áp suất tác dụng lên bề mặt chất lỏng là $P_1=P_{atm}$. Ống B là một khoang kín (thiết bị tăng áp), không tiếp xúc với khí quyển. Áp suất tại đây là P_2. Hai ống được nối bằng hệ thống ống dẫn có các van điều khiển (van 1 và van 2). Dòng nước chảy từ A sang B dưới tác dụng của áp suất thủy tĩnh. Khi thiết bị tăng áp khởi động, van được mở nước chảy từ A sang B và sẽ nén không khí trong khoang kín (ống B). Phần không khí này không thoát ra ngoài mà bị nén dần theo thời gian, làm áp suất trong khoang kín tăng lên. Do được nối với đường ống chính, phần áp suất khí này sẽ tác động ngược lại dòng nước. Nguyên lý hoạt động được mô tả trong hình 1. Quá trình nén khí này làm tăng áp suất P_2 trong ống B. Sự hỗ trợ của thiết bị tăng áp dựa trên nguyên lý hai bình thông nhau giúp tăng thêm áp lực nhờ phần không khí bị nén trong khoang kín, tạo ra áp suất phụ (P_k) . Khi đó tổng áp suất tác động lên màng là $P_t = P + P_k$ giúp tạo thêm lực đẩy bổ sung cho nước chảy qua màng. Thiết bị hoạt động hoàn toàn không dùng điện, không dùng bơm.



Hình 1. Sơ đồ hệ thống thí nghiệm

2.2. Các bước thực nghiệm

Quy trình thực nghiệm được tiến hành nhằm đánh giá hiệu quả hoạt động của hệ thống màng lọc MF vận hành bằng cơ chế tự chảy, và đặc biệt là hiệu quả hỗ trợ của thiết bị tăng áp.

Ống A (ống hở) nhựa PVC Ø90 chứa nước thô, được đặt cao hơn hệ thống lọc, chiều cao cột nước 1,0 m. Thiết bị tăng áp là một đoạn ống (nhựa PVC Ø48 dài 0,5 m) đứng dạng khoang kín, đặt song song và nối nhánh vào đường ống chính giữa hai van. Phần đáy của thiết bị nối với ống dẫn, phần trên bị bịt kín, không thông khí ra ngoài (có gắn đồ hồ áp suất bên trên đầu bị). Van 1 và van 2 (nhựa PVC Ø21) được dùng để điều khiển chế độ chảy của dòng nước trong hệ thống. Màng lọc MF được lắp trong buồng lọc kín sau thiết bị tăng áp kết nối với van 2, để thu nước sau lọc đầu ra.

Thí nghiệm với chế độ không tăng áp: Khóa nhánh dẫn vào thiết bị tăng áp chỉ để nước trực tiếp chảy ra. Mở van 1 đo lưu lượng đầu ra và thời gian chảy.

Thí nghiệm với chế độ có tăng áp: Mở van 1 và đóng van 2 để nước dẫn vào thiết bị tăng áp, không khí bị nén khi nước dâng vào khoang kín. Sau đó mở van 2 để nước vào chảy qua màng. Ghi nhận lưu lượng đầu ra, thời gian chảy, khả năng duy trì lưu lượng ở các mức H_1 khác nhau.

Thực nghiệm được lặp lại với các mức nước và chế độ van khác nhau để đánh giá ảnh hưởng của chiều cao cột nước tới lưu lượng lọc và hiệu quả tăng áp.

2.3. Phương pháp đo đạc

Lưu lượng nước trong hệ thống được xác định bằng phương pháp đo thể tích nước chảy qua trong một khoảng thời gian nhất định. Cụ thể, thể tích nước được chứa trong ống A, sau đó thời gian nước chảy đầy bình được xác định bằng cách sử dụng đồng hồ bấm giây như minh họa ở hình 2(c). Lưu lượng nước Q sẽ được tính theo công thức:

$$Q = \frac{V}{t} \qquad [1]$$

Trong đó:

Q: Lưu lượng (m^3/s);

V: Thể tích nước (L);

t: Thời gian (s).

Áp suất tại thiết bị tăng áp được đo bằng đồng hồ đo áp suất trong hình 2(a), cho phép xác định áp lực vận hành của hệ thống khi tăng cường dòng chảy. Đồng thời, chiều cao cột nước H_1 (từ đáy ống đến mặt nước trong ống A) và độ dài của dòng nước L thoát khỏi hệ thống thông qua van 2 được đo bằng thước mét như hình 2(b). Các thông số này đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá đặc tính thủy lực của hệ thống và kiểm tra hiệu suất của thiết bị tăng áp.



(a) (b) (c)

Hình 2. Các thiết bị kiểm tra: (a) Đồng hồ đo áp suất (1 atm); (b) Thước mét (5 m); (c) Đồng hồ bấm giây

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đánh giá khả năng thoát nước ở thành ống và đáy ống

Từ kết quả thực nghiệm thu được, các thông số kỹ thuật liên quan đến quá trình thoát nước tại thành ống và đáy ống đã được tổng hợp và so sánh, thể hiện trong Bảng 1 [2].

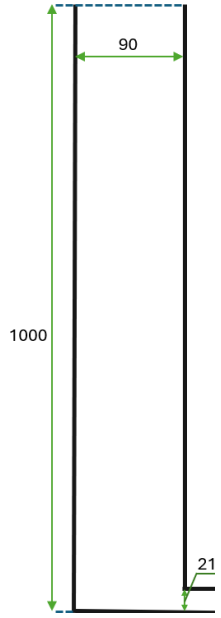
Bảng 1. So sánh sự thoát nước ở thành ống và đáy ống

Thông số	Thoát nước ở thành ống	Thoát nước ở đáy ống
Lưu lượng Q (m^3/s)	0,13	0,18
Vận tốc thoát *w(m/s)*	0,42	0,57
Tổn thất năng lượng do dòng xoáy, phân tán	Phân tán áp lực và lưu lượng đều hơn	Dễ tạo dòng xoáy vì tập trung áp lực ở đáy
Khả năng tận dụng cột áp	Chỉ đạt 80%	Tận dụng 100%

Từ bảng 1, có thể thấy rằng cả hai phương án thoát nước ở thành ống và đáy ống đều có những ưu và nhược điểm riêng biệt. Phương án thoát đáy giúp tận dụng triệt để cột nước và cho vận tốc dòng chảy lớn hơn, tuy nhiên lại dễ tạo xoáy và tập trung áp lực tại một điểm, có thể gây hư hỏng hoặc tắc nghẽn nếu không được thiết kế hợp lý. Trong khi đó, phương án thoát nước qua thành ống lại cho phép phân bố áp lực và lưu lượng đều hơn dọc chiều cao ống, giúp giảm áp suất cục bộ và phù hợp với

các hệ thống vận hành theo nguyên lý tự chảy.

Để tối ưu hiệu quả thoát nước trong hệ thống, đồng thời tận dụng ưu điểm của cả hai phương án trên, lựa chọn cấu hình cho nước thoát ra từ thành ống nhưng đặt sát với đáy. Cách bố trí này cho phép giữ được khả năng khai thác áp lực gần như tương đương với thoát đáy, nhưng vẫn đảm bảo tính ổn định của dòng chảy, dễ kiểm soát lưu lượng và giảm thiểu hiện tượng xoáy cục bộ trong lòng ống. Cụ thể, trong mô hình thực nghiệm, sử dụng ống nhựa PVC đường kính ngoài Ø90 mm, chiều cao ống 1000 mm (1 m), và bố trí một lỗ thoát nước tại thành ống gần sát đáy, với đường kính lỗ Ø21 mm được mô tả trong hình 3. Thiết kế này cho thấy vừa đảm bảo đủ diện tích thoát nước, vừa giảm thiểu tổn thất năng lượng và giúp kiểm soát tốt tốc độ dòng chảy.

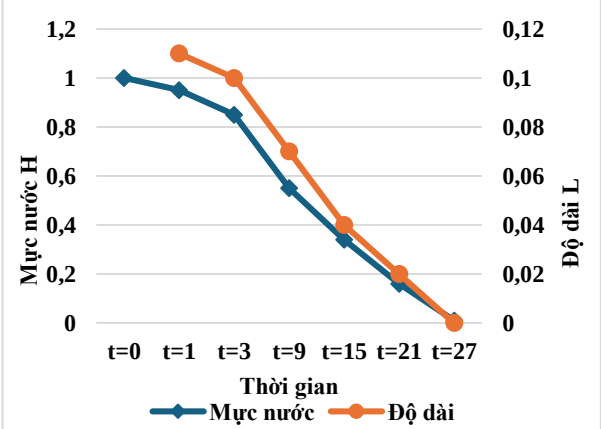


Hình 3. Đường ra của nước ở thành ống đặt sát đáy

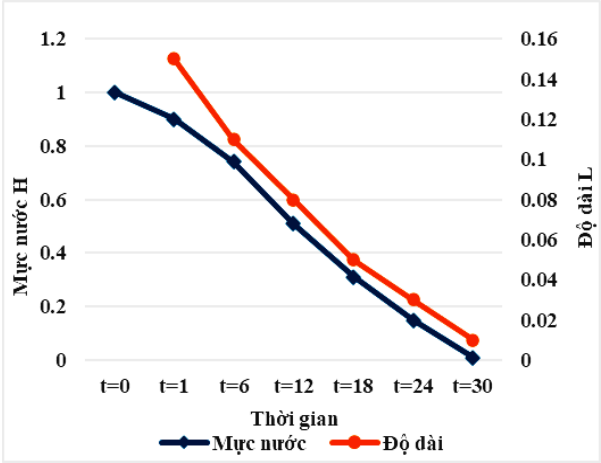
Qua quan sát thực nghiệm, cho thấy hiệu quả thoát nước ổn định và phù hợp với các ứng dụng xử lý nước bằng công nghệ màng lọc tự chảy, tiết kiệm năng lượng. Điều này hoàn toàn phù hợp với nội dung trong tài liệu [2] và [4], trong đó đều nhấn mạnh vai trò của dòng chảy thẳng đứng từ đáy ống trong việc tận dụng tối ưu áp suất thủy tĩnh và giảm tổn thất năng lượng.

3.2. Hệ thống khi không có thiết bị tăng áp và khi có thiết bị tăng áp

Từ các kết quả thu được trong quá trình thực nghiệm, mối quan hệ giữa thời gian, mức nước và độ dài dòng nước thoát ra khỏi hệ thống đã được ghi nhận và thể hiện thông qua các biểu đồ trong hình 4 và hình 5. Các biểu đồ này giúp minh họa rõ ràng ảnh hưởng của thiết bị tăng áp đến quá trình thoát nước trong hệ thống.



Hình 4. Sự thay đổi của chiều cao cột nước và độ dài thoát nước (không có bộ phận tăng áp)



Hình 5. Sự thay đổi của chiều cao cột nước và độ dài thoát nước (có bộ phận tăng áp)

Ở cả hai hệ thống mực nước giảm dần theo

thời gian. Tuy nhiên, hệ thống có thiết bị tăng áp có tốc độ rút nước nhanh hơn trong thời điểm đầu. Điều này chứng minh thiết bị tăng áp giúp tăng vận tốc dòng chảy ban đầu nhờ nén không khí, tạo thêm áp lực hỗ trợ.

Ngay từ thời điểm đầu (t =1), hệ thống có tăng áp là 0,15 m so với chỉ 0,11 m ở hệ thống thường. Trong suốt quá trình, giá trị L ở hệ thống có tăng áp luôn cao hơn, chứng tỏ lưu lượng cao hơn và khả năng duy trì dòng tốt hơn.

Hệ thống có thiết bị tăng áp kéo dài thời gian thoát nước vì không khí bị nén trong thiết bị làm chậm tốc độ giảm mực nước, đồng thời duy trì dòng chảy ổn định hơn, dẫn đến quá trình thoát nước kéo dài nhưng hiệu quả hơn.

Thiết bị tăng áp giúp nâng cao lưu lượng dòng chảy ban đầu, nhờ khả năng nén không khí và tạo áp lực phụ thêm. Ở cùng chiều cao cột nước ban đầu, hệ thống có thiết bị tăng áp có khả năng thoát nước nhanh hơn, xa hơn và ổn định hơn. Đặc biệt hữu ích khi áp dụng trong hệ thống màng lọc tự chảy, nơi cần duy trì áp suất cao hơn ở đầu vào mà không dùng điện hoặc bơm.

Kết quả này phù hợp với các nội dung có trong tài liệu [3], [5] và tài liệu [8] khi nói đến hiệu quả rõ rệt của việc bổ sung áp lực trong màng MF để cải thiện tốc độ lọc giúp nâng cao hiệu suất.

3.3 Hệ thống với các chế độ van khác nhau

Để đánh giá ảnh hưởng của các chế độ mở van khác nhau thực nghiệm đã được tiến hành với các % cho độ dài thoát L lớn nhất (170 mm), chứng tỏ dòng nước tuy có lưu lượng nhỏ nhưng có áp lực đầu ra cao, lực phun tập trung, làm tăng động năng dòng chảy. Khi mở rộng van hơn (từ 50% đến 100%), độ dài thoát nước L giảm dần (160 mm và 150 mm), do lưu lượng tăng nhưng dòng trở nên phân tán hơn, không còn tập trung như ở tiết diện nhỏ. Lựa chọn chế độ van mở 25% được xem là tối ưu nhất vì giúp tăng áp lực đầu vào cho màng lọc sẽ tạo áp lực tốt hơn lên bề mặt màng, kéo dài thời gian lọc nhưng đạt hiệu quả cao nhờ dòng nước có động năng lớn. Tuy thời gian chảy hết nước lâu hơn, nhưng đổi lại hiệu quả đẩy nước qua màng cao hơn, đặc biệt phù hợp cho hệ thống lọc MF tự chảy có hỗ trợ thiết bị tăng áp khí kín. Điều này phù hợp với các phân tích thủy lực cơ bản trong tài liệu [1] và [6] nhấn mạnh rằng tiết diện dòng chảy tối ưu không phải lúc nào cũng là tiết diện lớn nhất, mà phụ thuộc vào mục tiêu vận hành (duy trì áp lực, hạn chế nhiễu dòng…).

Bảng 2. Sự thay đổi dòng chảy theo các góc mở van

Thông số	25%	50%	75%	100%
Tiết diện F (mm^2)	82,4	173,1	263,9	346,4
Thời gian chảy t (s)	131	103	75	30
Độ dài thoát L (mm)	170±5	160±8	150 ± 4	150 ± 6
Lưu lượng Q (m^3/s)	4,5±0,1	5,8±0,5	8,0±0,6	20,0±0,8
Vận tốc w (m/s)	0,54	0,33	0,30	0,57

3.4. Đánh giá hệ thống khi cột nước thay đổi

Để đánh giá ảnh hưởng của chiều cao cột nước đến đặc tính dòng chảy, các thông số kỹ thuật tương ứng với cột nước 1 m và 2 m được tổng hợp trong bảng 3.

Bảng 3. So sánh hệ thống hệ thống khi cột nước thay đổi

Tiêu chí	Cột nước 1m	Cột nước 2m
Thời gian chảy hết nước t (s)	131	258

Tiêu chí	Cột nước 1m	Cột nước 2m
Độ dài thoát nước L (mm)	170 ± 5	340 ± 12
Lưu lượng nước Q (m^3/s)	$4,5 \times 10^{-5}$	$4,6 \times 10^{-5}$
Vận tốc thoát nước w (m/s)	0,54 ± 0,4	0,55 ± 0,6

Nếu mục tiêu chính là đạt được dòng chảy xa hơn cột áp 2 m rõ ràng là lựa chọn tốt hơn với độ dài thoát nước gấp đôi. Cột áp 2 m cũng mang lại thời gian chảy lâu hơn, có thể hữu ích trong các ứng dụng cần duy trì dòng chảy trong một khoảng thời gian dài mà không cần can thiệp.

Hệ thống cột áp 1 m là lựa chọn tối ưu nếu muốn tiết kiệm chi phí, không yêu cầu áp lực nước cao và cần một hệ thống đơn giản, bền bỉ. Hệ thống cột áp 2 m là lựa chọn tối ưu nếu cần hiệu suất cao, dòng chảy ổn định, độ dài thoát nước xa hơn và có thể đầu tư vào thiết bị tăng áp.

Kết quả cho thấy hoàn toàn phù hợp với các nội dung trong tài liệu [2] và [4], nơi áp suất thủy tĩnh được xác định tỉ lệ thuận với chiều cao cột chất lỏng và được ứng dụng trực tiếp trong các hệ thống lọc trọng lực.

3.5. Hệ thống với lõi lọc MF

Bảng 4 so sánh hoạt động của hệ thống lọc MF trong hai trường hợp: có sử dụng thiết bị tăng áp và không sử dụng thiết bị tăng áp [5]. Nghiên cứu sử dụng loại màng Màng Puri-Fine (Model: PRS, Đài Loan), Vật liệu: PP (polipropylen), kích thước lỗ mao quản: 0,5-1 µm. Kích thước của màng (dài: 255 mm × đường kính ngoài: 62 mm; đường kính trong: 28 mm; độ dày: 18 mm). Màng có khả năng làm việc trong 2 năm. Khi có hiện tượng giảm năng suất lọc có thể tháo ra để rửa. Việc sử dụng hệ thống tự chảy giúp tiết kiệm năng lượng so với hệ thống lọc màng truyền thống (do phải dùng bơm). Đối với hệ tự chảy mà không có tăng áp, lúc đó hệ thống vận hành hoàn toàn nhờ áp suất thủy tĩnh, nên có ưu điểm là không tốn điện, đơn giản. Tuy nhiên, áp lực lọc rất thấp, dẫn đến vận tốc lọc và năng suất thấp. Khi màng bắt đầu bị bám cặn, tốc độ giảm mạnh. Sẽ ảnh hưởng tới hiệu suất, chất lượng nước và tuổi thọ màng [7, 8]. Khi có thiết bị tăng áp sẽ giúp nâng áp lực lọc mà vẫn giữ tiêu chí tiết kiệm năng lượng. Với mức tăng này, năng suất tăng gần 1.5 lần, vận hành ổn định hơn, ít bị giảm lưu lượng do bám cặn.

Các số liệu này phù hợp với vùng làm việc tối ưu của màng MF được mô tả trong tài liệu [5], [9] nơi vận tốc lọc an toàn được khuyến cáo dưới 10 mm/s để tránh gây tổn thương cho màng và kéo dài tuổi thọ thiết bị.

Kết quả phân tích mẫu trước và sau lọc (bảng 5) cho thấy rõ hiệu quả của hệ thống đối với việc đảm bảo chất lượng nước, có khả năng sử dụng trong sinh hoạt.

Bảng 4. So sánh hệ thống với lõi lọc MF khi có thiết bị tăng áp và khi không có

Thông số	Không tăng áp	Có tăng áp
Áp suất (Pa)	9810 ± 64	16705 ± 120
Áp suất tương đương (atm)	0,097	0,165
Thể tích lọc (L)	2,90 ± 0,4	6,25 ± 0,8
Năng suất lọc Q (L/h)	34,8 ± 2	75 ± 5
Vận tốc nước tại đầu ra (m/s)	0,32 ± 0,1	0,57 ± 0,1
Vận tốc lọc v (mm/s)	3,21 ± 0,6	6,67 ± 0,9
Cơ hội bám cặn, giảm lưu lượng	Cao hơn	Thấp hơn
Độ ổn định vận hành	Thấp, dễ giảm theo thời gian	Cao, ổn định hơn

Thông số	Không tăng áp	Có tăng áp
Khả năng ứng dụng lâu dài	Hạn chế	Khả thi hơn cho quy mô thực tế

Bảng 5. Kết quả phân tích chất lượng nước

Thông số	Đơn vị	Trước lọc	Sau lọc	QCVN 01-1:2018 /BYT
Độ đục	NTU	9	1	2
Chỉ số pecmanganat	mg/L	1,41	0,52	2
Tổng chất rắn hòa tan (TDS)	mg/L	185	122	1000
Coliform	CFU/100 mL	5	0	<3

4. KẾT LUẬN

Qua quá trình nghiên cứu và thực hiện thực nghiệm, đề tài đã đạt được mục tiêu đề ra là thiết kế và đánh giá một hệ thống màng lọc vi lọc (MF) hoạt động dựa trên nguyên lý tự chảy có tích hợp thiết bị tăng áp đơn giản, không sử dụng bơm. Hệ thống sử dụng áp suất thủy tĩnh và nguyên lý hai bình thông nhau, trong đó một bình kín đóng vai trò như thiết bị tăng áp cho thấy hiệu quả rõ rệt trong việc duy trì áp lực ổn định. Kết quả thực nghiệm khẳng định rằng thiết bị tăng áp giúp ổn định dòng chảy và tạo điều kiện thuận lợi để dòng nước đi qua màng lọc với áp suất phù hợp. Những kết quả này mang lại giá trị thực tiễn, đặc biệt trong bối cảnh nhu cầu xử lý nước tiết kiệm năng lượng ngày càng được quan tâm. Mô hình thử nghiệm đơn giản, dễ chế tạo và chi phí thấp, cho thấy tính khả thi để ứng dụng vào các hệ thống lọc nước nhỏ lẻ. Trong tương lai, hệ thống tăng áp không dùng bơm có thể được tích hợp vào các mô hình lọc nước bằng màng MF hoặc UF, đồng thời mở rộng thử nghiệm với nhiều điều kiện và quy mô khác nhau. Việc ứng dụng thực tế tại vùng nông thôn hứa hẹn tạo ra các giải pháp lọc nước thông minh, hiệu quả và bền vững.

5. 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] Nguyễn Bin, “Các quá trình, thiết bị trong công nghệ hóa chất và thực phẩm”, NXB Khoa học và Kỹ thuật (2004).

[2] Nguyễn Văn Tài, Trần Ngọc Cầu, “Thủy lực đại cương”, NXB Xây dựng (2011).

[3] Nguyễn Thị Hạnh, Lê Văn Đức, “Công nghệ màng trong xử lý nước và nước thải”, NXB Khoa học và Kỹ thuật (2019).

[4] Nguyễn Thành Vinh, “Kỹ thuật xử lý nước cấp”, NXB Xây dựng (2018).

[5] Nguyễn Thị Thu Hằng, “Ứng dụng công nghệ màng trong xử lý nước thải sinh hoạt”, NXB Đại học Quốc gia Hà Nội (2015).

[6] Tran Thu Lan, Do Tien Anh, Pham Tuan Hung, Nguyen Kim Thanh, Duong Cong Hung, “Decentralised, small-scale coagulation-membrane treatment of wastewater from metal recycling villages – a case study from Vietnam”, Water Science and Technology, 82(4), 789–798 (2020).

[7] Wouter Pronk, An Ding, Eberhard Morgenroth, Nicolas Derlon, Peter Desmond, Michael Burkhard, Bing Wu, Anthony G. Fane, “Gravity-driven membrane filtration for water and wastewater treatment: A review“, Water Research, 149(1), 553-565 (2019).

[8] Duong Cong Hung, Nguyen Cong Nguyen, Do Khac Uan, Le Thanh Son, “Membrane processes and their potential applications for fresh water provision in Vietnam”, Vietnam Journal of Chemistry, 55(5), 533–544 (2017).

[9] Rayess Y. P., “Microfiltration: Principles, Process and Applications”, Nova Science Publishers (2019).

Thông tin liên hệ: **Đỗ Khắc Uẩn**

Điện thoại: 0975867976 - Email: uan.dokhac@hust.edu.vn

Khoa Khoa học và Công nghệ môi trường, Trường Hóa và Khoa học sự sống, Đại học Bách khoa Hà Nội.