

ĐÁNH GIÁ TIỀM NĂNG ỨNG DỤNG HẠT CHÙM NGÂY TRONG QUÁ TRÌNH XỬ LÝ NƯỚC

Nguyễn Thúy Liên^a, Dương Thu Hằng^{a,*}, Vũ Đức Cảnh^b, Trần Thị Việt Nga^a

^aKhoa Kỹ thuật Môi trường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam

^bTrung tâm Nghiên cứu Công nghệ Môi trường Nước, Đại học Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Nhật Bản

Nhận ngày 22/4/2025, Sửa xong 18/7/2025, Chấp nhận đăng 14/8/2025

Tóm tắt

Bài báo này đánh giá tổng quan các nghiên cứu về hoạt tính, cơ chế quá trình keo tụ – tạo bông loại bỏ cặn bẩn và vi khuẩn, vi rút trong nước, phân tích tiềm năng phát triển công nghệ ứng dụng hạt chùm ngây trong xử lý nước. Các nghiên cứu đã cho thấy, hạt chùm ngây có khả năng tạo keo, loại bỏ độ đục và chất rắn lơ lửng đạt đến 90% và có khả năng ức chế, loại bỏ vi khuẩn, vi rút đạt hiệu quả đến $7 \log_{10}$ trong nước. Cơ chế chính bao gồm trung hòa điện tích các hạt keo và tạo bông, khả năng hấp phụ và kháng khuẩn từ protein có trong hạt. Các yếu tố ảnh hưởng bao gồm dạng chế phẩm, liều lượng, pH, và đặc tính nguồn nước được đánh giá toàn diện. Tiềm năng kết hợp giữa keo tụ bằng chùm ngây với các vật liệu hấp phụ khác cũng được đánh giá nhằm nâng cao hiệu quả xử lý tổng thể. Bài báo luận bàn tính khả thi của việc ứng dụng thực tiễn hạt chùm ngây, các thách thức và đề xuất các định hướng nghiên cứu tiếp theo nhằm phát triển công nghệ xử lý nước quy mô nhỏ, phù hợp cho các khu vực thiếu hạ tầng, hướng đến giải pháp bền vững và dễ tiếp cận.

Từ khóa: hạt chùm ngây; chiết xuất; xử lý nước cấp; keo tụ; khử trùng.

EVALUATION OF POTENTIAL APPLICATION OF MORINGA SEEDS IN WATER TREATMENT

Abstract

This study critically reviewed effectiveness, process mechanisms and potential application of *Moringa oleifera* for water treatment, focusing on coagulation–flocculation and microbial removal. Results showed that moringa seeds could achieve up to 90% removal of turbidity and suspended solids and reduced bacterial and viral loads by up to $7 \log_{10}$. The primary treatment mechanisms include charge neutralization, floc formation, adsorption, and the antimicrobial properties of seed-derived proteins. Key factors influencing performance such as formulation type, dosage, pH, and source water characteristics, are thoroughly evaluated. The potential for synergistic use of moringa coagulants with other adsorptive materials is explored to enhance overall treatment efficiency. The paper discussed practical feasibility, current limitations, and future research directions for deploying small-scale, sustainable water treatment solutions using moringa seeds, particularly in areas with limited infrastructure.

Keywords: *Moringa oleifera* seed; extraction; water supply treatment; coagulation-flocculation; disinfection.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(3V\)-07](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(3V)-07) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Hạt cây chùm ngây đã được nghiên cứu và ứng dụng để xử lý nước ở các vùng nông thôn tại các nước Châu Á và Nam Phi trong một vài thế kỷ gần đây và được biết đến như một loại thảo mộc tốt cho sức khỏe do có chứa nhiều vitamin, khoáng chất, ... Hạt cây chùm ngây có chứa các protein mang điện tích dương (*Moringa oleifera*, MO) với tính chất, đặc điểm tương tự như chất keo tụ tự nhiên trong xử lý nước. Các thành phần có trong hạt chùm ngây được đánh giá là chất keo tụ tự nhiên có

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hangdt@huce.edu.vn (Hằng, D. T.)

hiệu quả tốt trong xử lý nước cung cấp cho mục đích sinh hoạt khi so sánh với các chiết xuất từ các loại thực vật khác. Một số nghiên cứu trên thế giới và trong nước đã đánh giá hiệu quả loại độ đục của chùm ngây từ 27% đến 90% [1–4]. Ngoài ra, đã có những nghiên cứu đánh giá hiệu quả loại bỏ vi sinh vật gây bệnh trong quá trình keo tụ sử dụng MO, đồng thời bước đầu đưa ra giải pháp bao phủ MO lên bề mặt vật liệu cát silica, than hoạt tính hoặc một số vật liệu khác và sử dụng vật liệu này để xử lý nước như một vật liệu lọc ... Thành phần hóa học chính của hạt cây chùm ngây gồm protein, lipid và carbohydrate đã được tổng hợp ở Bảng 1, trong đó protein là một trong những thành phần chính, chiếm khoảng 26% đến 36%. Chất béo có trong hạt chùm ngây được tìm thấy khoảng 40%. Trong khi đó tinh bột chỉ chiếm khoảng 9% đến 14% với các nghiên cứu khác nhau. Ngoài các thành phần hóa học chính, hàm lượng khoáng chất trong hạt cây chùm ngây đã được nghiên cứu, và kết quả thu được cho thấy rằng cây chùm ngây rất giàu nhiều khoáng chất quan trọng, đặc biệt là canxi (Ca), kali (K), magie (Mg), photpho (P), đồng (Cu), sắt (Fe) và kẽm (Zn). Sự khác nhau về tính chất có trong 100 gam hạt chùm ngây khô được giải thích do nguồn gốc hạt được nghiên cứu từ các vùng khác nhau trên thế giới.

Tính chất của các dung dịch chiết từ hạt chùm ngây với nước cũng được nghiên cứu. Một số nghiên cứu trước đây đã chứng minh dung dịch chiết hạt chùm ngây khô với nước có pH 10 – 11 [5]. Trong hạt MO có chứa các protein mang điện tích dương với khối lượng phân tử được xác định trong khoảng 3,7 – 30 kDa [1, 5, 6]. Nordmark và cs. [7] đã phân lập các loại protein mang điện tích dương khác nhau được chiết xuất từ hạt MO, mỗi loại có khối lượng phân tử riêng biệt và chỉ ra globulin và albumin là hai thành phần protein chiếm tỷ lệ cao nhất trong hạt MO, lần lượt chiếm 53% và 44% tổng lượng protein. Protein trong hạt chùm ngây cũng là thành phần được nghiên cứu nhiều nhất với khả năng loại bỏ độ đục, COD, một số vi khuẩn, vi rút có trong các nguồn nước khác nhau [1, 7, 8].

Bảng 1. Thành phần hóa học và dinh dưỡng có trong 100 g hạt cây chùm ngây

STT	Thành phần	Compaoré và cs., 2011 [9]	EL-Massry và cs., 2013 [10]
1	Độ ẩm (%)	2,14	4,67
2	Độ tro (%)	4,98	5,22
3	Chất xơ (%)	4,7	4,87
4	Chất béo (%)	43,56	–
5	Protein (%)	35,37	25,97
6	Tinh bột (%)	9,17	14,41
7	Calcium (Ca) (mg)	78	76,85
8	Phosphorus (P) (mg)	525	524,3
9	Magnesium (M) (mg)	261	259,78
10	Potassium (K) (mg)	48,2	64,24
11	Sodium (Na) (mg)	25,01	24,92
12	Zinc (Zn) (mg)	300,47	27,47
13	Copper (Cu) (mg)	54,2	48,13
14	Manganese (Mn) (mg)	95,4	87,75
15	Iron (Fe) (mg)	12,77	13,67

Việc phát triển các sản phẩm mới sử dụng chiết xuất hạt MO chỉ ra là một xu hướng nghiên cứu mới, tận dụng các đặc tính kháng khuẩn, keo tụ và hấp phụ để sản xuất nước sạch. Mặc dù vẫn còn các hạn chế liên quan đến việc áp dụng hạt chùm ngây trên quy mô lớn, nhưng lợi ích mang lại là rất

đáng kể cũng như các vấn đề về an toàn và bản chất sinh thái của MO. Vì vậy, trong tương lai các nhà máy sản xuất nước sạch sử dụng các quy trình lọc và xử lý nước bằng công nghệ keo tụ - lắng có thể áp dụng công nghệ mới này bằng các hình thức ứng dụng khác nhau. Bài báo nhằm phân tích, đánh giá hoạt tính, cơ chế quá trình keo tụ – tạo bông loại bỏ tạp chất và vi khuẩn, vi rút trong nước từ các nghiên cứu trong nước và quốc tế, từ đó phân tích cơ hội và tiềm năng phát triển công nghệ ứng dụng hạt chùm ngây trong xử lý nước.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là hạt chùm ngây (*Moringa oleifera*, MO), thành phần, hoạt tính của nó và các nghiên cứu khoa học sử dụng MO trong quá trình xử lý nước bằng phương pháp keo tụ - tạo bông và khả năng loại bỏ vi khuẩn, vi rút đối với các nguồn nước khác nhau.

Phương pháp nghiên cứu bao gồm phương pháp tổng hợp, phân tích các quá trình lý hóa sinh trong kỹ thuật nước, cơ chế và hiệu quả xử lý các chất ô nhiễm, kế thừa các kết quả nghiên cứu trong nước và thế giới, nhận định tiềm năng, cơ hội và thách thức của việc ứng dụng hạt chùm ngây trong xử lý nước an toàn.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đánh giá khả năng keo tụ cặn bẩn trong nước ứng dụng chiết xuất hạt cây chùm ngây

Hiện nay, trong các nhà máy xử lý nước cấp, quá trình đầu tiên và cơ bản nhất là loại bỏ cặn bẩn có kích thước khác nhau bằng các phương pháp vật lý hoặc hóa học như lắng, keo tụ và tạo bông. Quá trình này loại bỏ hầu hết các chất rắn lơ lửng, các tạp chất khác nhau và làm giảm hầu hết độ đục của nước. Các hóa chất thông thường được sử dụng hiện nay và phổ biến là các chất keo tụ hóa học vô cơ như phèn nhôm, phèn sắt và các polyme hữu cơ có điện tích dương hoặc âm khác nhau. Mặc dù các chất keo tụ này đã chứng minh rất hiệu quả trong việc loại bỏ các cặn bẩn và chất hữu cơ, nhưng nếu chúng còn tồn dư sau quá trình xử lý cũng có thể dẫn đến các vấn đề thứ cấp như sự tồn tại của ion sắt và nhôm sau quá trình xử lý, cũng như các polyme tổng hợp độc hại có trong nước đã qua xử lý [11]. Chính vì vậy, tìm ra một chất keo tụ có nguồn gốc tự nhiên bắt đầu được các nhà nghiên cứu quan tâm và phát triển trong những năm qua. Một trong các loại chất keo tụ tự nhiên được quan tâm và đánh giá hiệu quả của quá trình keo tụ để loại bỏ độ đục trong xử lý nước là hạt chùm ngây. Với ưu điểm là nguồn gốc chất hữu cơ tự nhiên, hạt chùm ngây là nguyên liệu phổ biến và có sẵn ở khu vực nông thôn khiến việc sử dụng nó để cung cấp sản xuất nước sạch hiệu quả cho các cộng đồng nhỏ, đặc biệt là ở các nước đang phát triển [6]. Các nghiên cứu đầu tiên được tiến hành khá đơn giản, hạt được bóc vỏ và nghiền thành bột, cho bột vào thùng chứa nước, khuấy hoặc lắng để chiết xuất thành phần protein mang điện tích dương. Sau đó, chất rắn hay thành phần có khả năng tạo keo tụ được chiết ra có tác dụng như chất keo tụ được thêm vào nước để xử lý các nguồn nước có chất lượng khác nhau [5]. Nhiều nghiên cứu đã chứng minh rằng khả năng keo tụ được thực hiện bởi nhiều loại protein có trong hạt chùm ngây [1, 5].

Các nghiên cứu gần đây chỉ ra rằng bản chất và đặc điểm của chúng bị ảnh hưởng bởi kỹ thuật chiết xuất và tinh chế protein từ hạt chùm ngây. Cụ thể, Bảng 2 sau đây cho thấy hiệu quả loại bỏ độ đục khác nhau với phương pháp chiết tách MO bằng nước tinh khiết, bằng dung dịch muối hoặc kết hợp với quá trình khử chất béo, tinh chế thành phần protein tinh khiết.

Các nghiên cứu tập trung vào hai loại nước chủ yếu là nước mặt tự nhiên hoặc nước tổng hợp có độ đục thấp, dưới 200 NTU. Với các phương pháp chiết protein của hạt chùm ngây như nghiền đơn giản sau đó chiết với nước cất, hay nghiền hạt sau đó chiết với dung dịch muối với nồng độ khác nhau, hoặc nghiền chiết với dung môi hữu cơ, tách các thành phần chất béo đưa ra các kết quả khác nhau. Điều thú vị là với các phương pháp càng đơn giản như chiết bằng nước tinh khiết hoặc bằng các dung

dịch muối (NaCl , KCl , KNO_3 , ...) ở các nồng độ khác nhau thì hiệu quả loại bỏ độ đục đều từ 89 đến 99% [12–14]. Mặt khác, càng tinh chế phức tạp khi loại bỏ chất béo bằng các dung môi hữu cơ hoặc tinh chế phức tạp để thu được protein tinh khiết thì hiệu quả loại bỏ độ đục lại thấp hơn [2–4]. Như vậy, các nghiên cứu trước đây đều kết luận rằng phương pháp chiết xuất protein bằng dung dịch nước muối là tốt nhất để loại bỏ độ đục và an toàn với sức khỏe của người sử dụng. Bảng 2 cũng chỉ ra độ đục càng thấp xu hướng cho thấy hiệu quả loại bỏ độ đục càng giảm chỉ đạt khoảng 60 – 70% đối với nguồn nước có độ đục dưới 60 NTU, trong khi với độ đục càng lớn từ 180 đến 200 NTU hiệu quả loại bỏ độ đục có thể lên đến trên 95% [15]. Ngoài ra, thời gian và liều lượng của dung dịch chiết từ chùm ngây ở tốc độ khuấy trộn thấp đều có ý nghĩa quan trọng. Các nghiên cứu cũng chỉ ra thời gian lắng sau quá trình keo tụ bằng MO được thực hiện từ 10 phút đến 60 phút và tốc độ khuấy trộn nhanh từ 2 đến 5 phút ở tốc độ từ 120 – 150 vòng/phút và khuấy chậm ở tốc độ 20 – 50 vòng/phút trong khoảng 15 đến 40 vòng/phút sẽ cho hiệu quả loại bỏ chất bẩn tốt. Một trong những yếu tố ảnh hưởng đến kết quả của quá trình keo tụ - lắng khi sử dụng MO là nguồn gốc, xuất xứ của hạt chùm ngây. Tuy nhiên, để xác định và chứng minh đầy đủ các protein ở trong hạt chùm ngây có hoạt động keo tụ vẫn chưa được hoàn thành, cho thấy đây là một lĩnh vực vẫn cần nghiên cứu sâu rộng.

Bảng 2. Hiệu quả sử dụng hạt chùm ngây cho quá trình keo tụ - kết bông để xử lý nước với phương pháp chiết tách khác nhau

Phương pháp chiết xuất thành phần chất keo tụ từ hạt chùm ngây	Độ đục ban đầu (NTU)	Khối lượng MO (mg/L)	Hiệu quả loại bỏ độ đục (%)	Tài liệu tham khảo
Chiết xuất bằng nước	75	13	89	[12]
Tinh chế protein tinh khiết	180	100	100	[13]
Tinh chế protein tinh khiết (globulin)	50	13	90	[14]
Chiết xuất bằng nước nước và khử chất béo	100	75	75	[16]
Chiết xuất MO bằng dung dịch muối	200	70	91	[15]
Chiết xuất MO bằng muối, khử chất béo bằng dung môi hexane	44	40	99	[2]
Dịch chiết dung dịch muối đã khử chất béo bằng dung môi hexane	49	30	77	[4]
Dịch chiết dung dịch muối đã khử chất béo bằng dung môi ethanol	49	50	74	[4]
Chiết xuất dung dịch muối	79	400	90	[4]
Chiết xuất dung dịch muối đã khử chất béo	80	400	94	[3]
Chiết xuất dung dịch muối	143	200	97	[17]

Các nghiên cứu tập trung vào hai loại nước chủ yếu là nước mặt tự nhiên hoặc nước tổng hợp có độ đục thấp, dưới 200 NTU. Với các phương pháp chiết protein của hạt chùm ngây như nghiền đơn giản sau đó chiết với nước cất, hay nghiền hạt sau đó chiết với dung dịch muối với nồng độ khác nhau, hoặc nghiền chiết với dung môi hữu cơ, tách các thành phần chất béo đưa ra các kết quả khác nhau. Điều thú vị là với các phương pháp càng đơn giản như chiết bằng nước tinh khiết hoặc bằng các dung

dịch muối (NaCl , KCl , KNO_3 ...) ở các nồng độ khác nhau thì hiệu quả loại bỏ độ đục đều từ 89 đến 99% [12–14]. Mặt khác, càng tinh chế phức tạp khi loại bỏ chất béo bằng các dung môi hữu cơ hoặc tinh chế phức tạp để thu được protein tinh khiết thì hiệu quả loại bỏ độ đục lại thấp hơn [2–4]. Như vậy, các nghiên cứu trước đây đều kết luận rằng phương pháp chiết xuất protein bằng dung dịch nước muối là tốt nhất để loại bỏ độ đục và an toàn với sức khỏe của người sử dụng. Bảng 2 cũng chỉ ra độ đục càng thấp xu hướng cho thấy hiệu quả loại bỏ độ đục càng giảm chỉ đạt khoảng 60 – 70% đối với nguồn nước có độ đục dưới 60 NTU, trong khi với độ đục càng lớn từ 180 đến 200 NTU hiệu quả loại bỏ độ đục có thể lên đến trên 95% [15]. Ngoài ra, thời gian và liều lượng của dung dịch chiết từ chùm ngây ở tốc độ khuấy trộn thấp đều có ý nghĩa quan trọng. Các nghiên cứu cũng chỉ ra thời gian lắng sau quá trình keo tụ bằng MO được thực hiện từ 10 phút đến 60 phút và tốc độ khuấy trộn nhanh từ 2 đến 5 phút ở tốc độ từ 120 – 150 vòng/phút và khuấy chậm ở tốc độ 20 – 50 vòng/phút trong khoảng 15 đến 40 vòng/phút sẽ cho hiệu quả loại bỏ chất bẩn tốt. Một trong những yếu tố ảnh hưởng đến kết quả của quá trình keo tụ - lắng khi sử dụng MO là nguồn gốc, xuất xứ của hạt chùm ngây. Tuy nhiên, để xác định và chứng minh đầy đủ các protein ở trong hạt chùm ngây có hoạt động keo tụ vẫn chưa được hoàn thành, cho thấy đây là một lĩnh vực vẫn cần nghiên cứu sâu rộng.

3.2. Đánh giá khả năng keo tụ kết hợp ứng dụng chiết xuất từ hạt chùm ngây với hóa chất keo tụ hóa học

Ngoài kỹ thuật chiết tách hạt chùm ngây, các điều kiện khuấy, trộn, chất lượng nước đầu vào đều ảnh hưởng đến kết quả loại bỏ chất bẩn của quá trình keo tụ thì việc nghiên cứu kết hợp sử dụng hạt chùm ngây với các chất keo tụ truyền thống để tăng hiệu suất của quá trình loại bỏ cặn bẩn, cũng như giảm liều lượng hóa chất keo tụ hóa học, đồng thời bùn cặn loại bỏ sau quá trình lắng được sử dụng an toàn cho nông nghiệp đã được nghiên cứu những năm gần đây. Các nghiên cứu sử dụng hạt chùm ngây làm chất trợ keo tụ kết hợp với phèn nhôm, phèn sắt, phèn nhôm khá phổ biến, vì đây là chất keo tụ hóa học được sử dụng rộng rãi nhất trong các nhà máy xử lý nước và nước thải.

Nghiên cứu của Ghebremichael và cs. (2009) [18] cho thấy hạt chùm ngây có hiệu quả như một chất hỗ trợ keo tụ tương tự phèn sắt hoặc phèn nhôm, cải thiện khả năng loại bỏ độ đục trên 20%, do đó sử dụng nó có thể làm giảm lượng hóa chất keo tụ phèn nhôm khoảng 60%. Họ thử nghiệm và đánh giá thử tự sử dụng hạt chùm ngây cùng với phèn trong quá trình xử lý loại bỏ cặn bẩn, quan sát thấy độ đục còn lại các hạt cặn và hàm lượng COD cao hơn đáng kể so với khi sử dụng hạt chùm ngây. Điều này là do khi hạt chùm ngây được thêm vào sau phèn, chúng tiếp xúc với nước có độ đục thấp, làm giảm hiệu quả và tồn tại một phần ở trong nước đã qua xử lý. Phát hiện mới của Freitas và cs. [19] lactin có ở trong hạt chùm ngây được tinh chế, sau đó hòa tan trong nước, sử dụng để đánh giá tiềm năng của nó trong việc giảm độ đục và độ tinh với nước mặt. Nước được xử lý bằng phèn chua và lactin từ hạt chùm ngây hòa tan cho thấy khả năng loại bỏ độ đục tăng lên và nồng độ nhôm dư giảm khoảng 100 lần.

Nghiên cứu của Valverde và cs. [21] nhằm xác định điều kiện vận hành tốt nhất trong xử lý nước sử dụng phèn chua và hạt chùm ngây với điều kiện thí nghiệm khác nhau. Họ chỉ ra điều kiện tốt nhất như tốc độ trộn nhanh 105 vòng/phút trong thời gian 1 phút, sau đó tốc độ trộn chậm 30 vòng/phút trong 15 phút, thời gian lắng 15 phút, độ pH trong khoảng 7 – 9, liều lượng hạt MO và phèn trong khoảng 300 – 400 mg/L và 15 – 25 mg/L tương ứng cho hiệu quả tốt. Ngoài ra, các nghiên cứu khác trong Bảng 3 cũng chỉ ra rằng hoạt tính keo tụ của sự kết hợp AlCl_3 (PAC, polyaluminum clorua) và hạt chùm ngây kém hiệu quả hơn so với phèn trong việc giảm độ đục ban đầu của nước thô. Mặt khác, cần nồng độ chất keo tụ PAC cao hơn để tạo ra kết quả tương đương về hoạt tính keo tụ. Tuy nhiên, liên quan đến chất lượng hóa lý của nước đã xử lý, PAC–MO đã giảm 50% tỷ lệ tiềm năng hình thành trihalomethanes, khuyến khích sử dụng nó trong xử lý nước.

Bảng 3. Hiệu quả loại bỏ cặn bẩn trong nước của các loại hóa chất keo tụ truyền thống

Hóa chất keo tụ	Liều lượng keo tụ (mg/L)	Liều lượng hạt MO (mg/L)	Lượng giảm của chất keo tụ hóa học (%)	Độ đục loại bỏ (%)	Tài liệu tham khảo
$Al_2(SO_4)_3$	0,4	2,8	60	92	[5]
$Al_2(SO_4)_3$	5 – 30	250 – 500	–	80 – 88	[8]
$Al_2(SO_4)_3$	20	200	–	97	[19]
$AlCl_3$	15 – 20	0 – 100	–	97	[20]
Anionic polymer	0 – 0,4	30 – 60	–	85	[4]

3.3. Đánh giá khả năng loại bỏ vi khuẩn, vi rút của hạt chùm ngây

Gần đây, một phương pháp tiềm năng đã được nghiên cứu nhằm ứng dụng hạt chùm ngây trong quy trình lọc để loại bỏ vi sinh vật gây bệnh, bao gồm cả vi khuẩn và vi rút, trong nước. Các cột lọc chức năng hóa với protein từ hạt MO đã được phát triển thông qua việc phủ protein MO lên các vật liệu lọc như cát và các loại vải sợi (như bông, lụa và lanh). Các protein mang điện tích dương từ MO có khả năng hấp phụ mạnh lên bề mặt các vật liệu này thông qua tương tác điện tích, do các vật liệu thường mang điện tích âm trong môi trường pH trung tính (5–8).

Cột lọc MO cho thấy hiệu quả vượt trội trong việc loại vi khuẩn. Cụ thể, cột lọc phủ protein MO trên bề mặt cát có thể loại bỏ hoàn toàn vi khuẩn *E. coli* khi thử nghiệm với nước đầu vào có nồng độ 10^8 CFU/mL, tương đương đạt hiệu quả giảm trên 8 log₁₀ [22]. Thêm vào đó, các nghiên cứu nhuộm huỳnh quang BacLight cũng cho thấy phần lớn vi khuẩn bị giữ lại trên cột lọc MO đều ở trạng thái bất hoạt, nhiều khả năng do cơ chế phá vỡ màng tế bào thông qua hiện tượng hợp nhất màng gây ra bởi protein MO.

Đối với vi rút, cột lọc MO cũng đạt hiệu quả cao, với mức loại bỏ lên đến $7,1 \pm 0,4$ log₁₀ đối với vật liệu lọc bằng cát và $7,65 \pm 0,23$ log₁₀ đối với các vật liệu sợi. Hiệu suất này cao hơn hiệu quả loại bỏ 4 log₁₀ được khuyến cáo bởi Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ (US EPA) và Tổ chức Y tế Thế giới (WHO) đối với hệ thống cấp nước uống an toàn. Khi so sánh với các công nghệ xử lý nước hiện nay, bộ lọc MO cho thấy ưu thế vượt trội so với các phương pháp truyền thống như keo tụ-lắng (0,4 – 2,63 log₁₀), lọc cát nhanh (0,26 – 0,49 log₁₀) [23], và lọc cát chậm (1,26 – 2,8 log₁₀) [24]. Ngoài ra, hiệu quả loại bỏ vi rút của cột lọc MO cũng cao hơn so với các công nghệ tiên tiến như vi lọc (microfiltration, 0,5 – 0,9 log₁₀) [24], siêu lọc (ultrafiltration, 2,5 – 4,8 log₁₀) [25], màng lọc nano (nanofiltration) [26], và thẩm thấu ngược (reverse osmosis – RO, 3,7 – 4 log₁₀) [27].

Một ưu điểm nổi bật của cột lọc MO là khả năng hoàn nguyên dễ dàng mà không làm giảm hiệu quả xử lý. Cụ thể, protein có thể được tách khỏi vật liệu lọc bằng cách rửa với dung dịch muối NaCl 600 mM, sau đó tái chức năng hóa bằng dung dịch chiết từ hạt MO [28, 29]. Ngoài ra, các cột lọc này có thể được làm khô và bảo quản ở nhiệt độ phòng trong thời gian lên đến 3 tháng mà vẫn duy trì khả năng loại bỏ vi rút. Các nghiên cứu trước đây cũng đã khảo sát cơ chế tương tác giữa protein trong cột lọc MO và vi rút, với đối tượng nghiên cứu là thực khuẩn thể MS2 [28, 29]. Kết quả chỉ ra rằng hai protein từ MO, gồm MO2.1 (6,5 kDa) và MoCBP (14 kDa), có mặt trên bề mặt các vật liệu lọc sau khi chức năng hóa. Tuy nhiên, chỉ có MoCBP được xác định là có khả năng liên kết hiệu quả với vi rút. Cơ chế liên kết này bao gồm các tương tác điện tích, liên kết hydro và tương tác kỵ nước, trong đó tương tác điện tích giữ vai trò chủ đạo.

Mặc dù cho thấy tiềm năng cao trong việc loại bỏ vi rút, các nghiên cứu hiện tại mới chỉ được thực hiện trong điều kiện phòng thí nghiệm, sử dụng dung dịch đệm PBS làm mẫu nước thử. Trong thực tế, hiệu quả xử lý có thể bị ảnh hưởng bởi các thành phần phức tạp trong nguồn nước tự nhiên,

chẳng hạn như các hợp chất hữu cơ. Bên cạnh đó, hầu hết các nghiên cứu hiện nay đều tập trung vào vi rút thực khuẩn thể MS2, vốn khác biệt đáng kể về kích thước, hình dạng và điện tích so với các vi rút gây bệnh thường gặp trong môi trường nước, chẳng hạn như norovirus, enterovirus và rotavirus. Những yếu tố này có thể làm thay đổi hiệu quả thực tế của cột lọc MO.

Bảng 4 phân tích kết quả nghiên cứu ứng dụng hạt chùm ngây trong xử lý nước, ưu nhược điểm của các phương pháp tiếp cận, những động lực và thách thức để phát triển công nghệ xử lý nước ứng dụng vật liệu tự nhiên là hạt chùm ngây.

Bảng 4. Các ứng dụng điển hình của hạt chùm ngây trong quá trình xử lý nước

Phương pháp tiếp cận	Kết quả	Ưu điểm	Nhược điểm	Tài liệu tham khảo
Tinh chế thành phần keo tụ hoạt tính được chiết xuất từ hạt <i>Moringa oleifera</i> bằng dung dịch muối, thẩm tách, và trao đổi ion (MOC-SC-pc).	Hoạt tính đông tụ của thành phần hoạt tính sau khi qua trao đổi ion tăng lên gấp 34 lần so với chiết xuất thô ban đầu (MOC-SC)	Có hiệu quả cao trong việc loại bỏ độ đục của nước ở nhiều mức độ đục khác nhau, bao gồm cả nước có độ đục thấp.	Quy trình phức tạp, tốn kém hơn so với việc sử dụng các chất đông tụ thông thường.	[1]
Phân tích ảnh hưởng của các dạng chiết xuất từ hạt <i>Moringa oleifera</i> (MO) làm chất keo tụ và đặc trưng hóa bột chiết xuất MO theo các thành phần hóa học.	MO có hiệu quả cao hơn PAC trong việc xử lý nước có độ đục cao (10 – 1000 NTU), trong khi PAC hiệu quả hơn với nước có độ đục thấp.	Thân thiện với môi trường. MO là chất keo tụ tự nhiên, không gây độc hại, có khả năng phân hủy sinh học cao. Giảm thiểu lượng bùn thải.	Hiệu quả không cao với nước có độ đục thấp. Quy trình chiết xuất phức tạp.	[2]
Tinh chế hoạt tính của protein chiết xuất từ hạt <i>Moringa oleifera</i> , nhằm cải thiện quá trình xử lý nước.	Protein hạt <i>Moringa oleifera</i> (MOCP) có thể được tinh chế bằng cách sử dụng nhựa trao đổi cation, với giá trị pI cao của MOCP giúp cho quá trình này diễn ra thuận lợi.	Phương pháp tinh chế đơn giản và hiệu quả; kỹ thuật trao đổi cation có thể dễ dàng mở rộng quy mô để đáp ứng nhu cầu ứng dụng trên diện rộng.	Phương pháp chỉ đánh giá hoạt tính keo tụ trong điều kiện phòng thí nghiệm, cần thử nghiệm thêm trong các điều kiện thực tế khác nhau.	[5]
Đánh giá toàn diện về xu hướng sử dụng hạt <i>Moringa oleifera</i> (MO) trong xử lý nước, với tập trung vào các ứng dụng	Sử dụng MO như chất hỗ trợ đông tụ giúp cải thiện hiệu quả xử lý nước lên 20% và giảm lượng chất đông tụ hóa	Hạt MO là chất keo tụ tự nhiên, không gây bùn độc hại và dễ phân hủy sinh học.	Việc áp dụng MO trong các nhà máy xử lý nước uống còn gặp nhiều thách thức, đòi hỏi các	[26]

Phương pháp tiếp cận	Kết quả	Ưu điểm	Nhược điểm	Tài liệu tham khảo
khác nhau và kết quả tương ứng.	học cần sử dụng xuống 60%.		phương pháp chiết xuất, tinh chế và lưu trữ chất đông tụ trên quy mô lớn phải khả thi.	
Xác định các điều kiện tối ưu cho sự keo tụ bằng cách sử dụng quang phổ huỳnh quang để phân tích sự thay đổi cấu trúc của protein khi tiếp xúc với các yếu tố khác nhau như độ mạnh ion, pH và các chất dập tắt huỳnh quang.	Sự tăng cường của NaCl trong mẫu đã làm giảm độ huỳnh quang của protein, cho thấy sự thay đổi cấu trúc do ảnh hưởng của ion.	Phương pháp quang phổ huỳnh quang nhạy cảm và đáng tin cậy để phân tích sự thay đổi cấu trúc của protein, cung cấp thông tin chi tiết về ảnh hưởng của các yếu tố môi trường đến tính năng keo tụ của protein chiết xuất từ hạt <i>Moringa oleifera</i> .	Nghiên cứu yêu cầu quá trình tinh chế protein phức tạp và sự chuẩn bị mẫu kỹ lưỡng, có thể hạn chế khả năng áp dụng rộng rãi trong các điều kiện thực tế mà việc xử lý nước cần phải đơn giản và hiệu quả nhanh chóng.	[30]
Cải thiện phương pháp chiết xuất thành phần hoạt tính kết tủa từ hạt <i>Moringa oleifera</i> bằng cách sử dụng dung dịch muối.	Chiết xuất với dung dịch NaCl (1,0 mol/l) cải thiện đáng kể hiệu quả kết tủa, giảm liều lượng cần thiết và tăng khả năng loại bỏ độ đục.	Tiết kiệm chi phí, An toàn và tự nhiên.	Sử dụng NaCl hoặc các muối khác có thể làm tăng hàm lượng muối trong nước xử lý, có thể không phù hợp với một số ứng dụng.	[31]

3.4. Đánh giá tiềm năng sử dụng hạt chùm ngây Việt Nam và thách thức trong phát triển công nghệ xử lý nước ở Việt Nam

Cây chùm ngây (*Moringa oleifera*) có nguồn gốc từ châu Á và là một khu vực chính trong việc trồng, sản xuất các sản phẩm từ hạt chùm ngây. Tại Việt Nam, chùm ngây được mọc tự nhiên ở các tỉnh Ninh Thuận, Bình Thuận, Đồng Nai, Kiên Giang. Trên thế giới, hạt và lá chùm ngây được đánh giá là cây có giá trị kinh tế cao vì chúng có những thành phần dinh dưỡng lớn. Đặc biệt, khi nhu cầu về các loại thực phẩm bổ sung, trà và thực phẩm chức năng tăng lên, hạt chùm ngây đã được chế biến thành nhiều sản phẩm khác nhau. Dự đoán tăng trưởng thị trường hạt chùm ngây trong giai đoạn từ 2024 đến 2032 trên toàn thế giới là 9,68%, đạt mức xấp xỉ 20 tỷ USD [32].

Nhu cầu ngày càng tăng các sản phẩm của hạt chùm ngây dẫn đến việc phát triển các vùng canh tác cây chùm ngây phát triển mạnh tại các tỉnh, trong đó chủ yếu được trồng ở tỉnh Ninh Thuận, Tây Nguyên, Phan Thiết, Long An, ... Mặt khác, tại các vùng nông thôn ở Tây Nguyên và Nam Trung bộ tỷ lệ gia đình sử dụng nước sạch đạt quy chuẩn chỉ đạt 39,5% [33]. Theo quyết định số 1978/QĐ-TTg

ngày 24/11/2021 của Thủ tướng Chính phủ về việc phê duyệt chiến lược quốc gia cấp nước sạch và vệ sinh nông thôn đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045 đề ra mục tiêu tối thiểu 65% dân số nông thôn được tiếp cận bền vững với nước sạch đạt quy chuẩn với số lượng tối thiểu 60 lít/người/ngày, đảm bảo cấp nước sạch sinh hoạt quy mô hộ gia đình cho các hộ dân tại những khu vực chưa có khả năng tiếp cận với nước cấp tập trung, vùng khan hiếm, khó khăn về nguồn nước, vùng thường xuyên bị ảnh hưởng thiên tai, hạn hán, xâm nhập mặn. Để đạt được mục tiêu này, việc triển khai áp dụng các hệ thống xử lý nước phân tán, các hệ thống cấp nước quy mô hộ gia đình đóng một vai trò quan trọng. Vì vậy, sử dụng hạt chùm ngây trong quá trình xử lý nước để loại bỏ chất bẩn hay vi khuẩn, vi rút được đánh giá là có tiềm năng lớn, với nguyên vật liệu được trồng phổ biến tại địa phương.

Hoa và cs. [2] đã sử dụng hạt chùm ngây Việt Nam và chứng minh khả năng loại bỏ trên 90% hàm lượng cặn bẩn và độ đục khi được chiết với dung dịch muối [2] và không gây độc hại, có khả năng phân hủy sinh học cao, hiệu quả trong xử lý nước với độ đục cao. Cột lọc được cát hoặc vải bông đã bọc dung dịch chiết từ hạt chùm ngây được chứng minh với khả năng loại bỏ vi khuẩn, vi rút với hiệu suất đạt $\pm 0,4 \log_{10}$ [29], khả năng hoàn nguyên một cách đơn giản như rửa lọc bằng dung dịch muối mà không ảnh hưởng tiêu cực đến môi trường.

Việc sử dụng hạt chùm ngây để xử lý nước có thể triển khai ở cấp hộ gia đình thông qua việc tách vỏ hạt MO, sau đó dễ dàng chiết xuất thành phần chất keo tụ bằng muối ăn. Cát hoặc than hoạt tính có thể mua được với chi phí rẻ tại địa phương, kết hợp với dung dịch chiết MO để tạo ra một thiết bị lọc nước đơn giản ở quy mô hộ gia đình là khả thi vì hạt chùm ngây được chứng minh là loại bỏ được các chất độc hại xuống dưới mức quy định của WHO [28]. Do đó, quy trình này có thể được áp dụng ở Việt Nam để có được nước uống sạch, đặc biệt là ở những vùng nông thôn kém phát triển, khó tiếp cận với nguồn nước đảm bảo vệ sinh hoặc đang chịu ảnh hưởng của thiên tai. Để mở rộng khả năng phát triển ứng dụng hạt chùm ngây trong xử lý nước và đảm bảo chất lượng nước an toàn sức khỏe người sử dụng, các nghiên cứu trong tương lai cần đánh giá hiệu suất chiết tách thành phần hoạt tính của hạt chùm ngây bằng phương pháp đơn giản và khả năng xử lý các chất ô nhiễm tổng hợp trong nước, bao gồm cặn bẩn, các thành phần hữu cơ và các vi khuẩn, vi rút gây bệnh trong các điều kiện chất lượng nước nguồn khác nhau.

4. Kết luận

Đánh giá và phân tích hiệu quả của hạt chùm ngây (*Moringa oleifera*) trong xử lý nước là cơ sở khoa học toàn diện, xác định tính khả thi và tiềm năng ứng dụng của một vật liệu tự nhiên, bền vững trong các quy trình xử lý nước tại Việt Nam. Hạt chùm ngây có khả năng loại bỏ độ đục và chất rắn lơ lửng lên đến 90%, đồng thời ức chế vi khuẩn và vi rút với hiệu quả giảm lên đến $7 \log_{10}$, chứng tỏ tiềm năng vượt trội trong việc xử lý nước. Kết hợp hạt chùm ngây với các chất keo tụ hóa học như phèn nhôm hoặc phèn sắt giúp cải thiện hiệu quả loại bỏ cặn bẩn trong nước tăng 20%, đồng thời giảm liều lượng hóa chất keo tụ hóa học và giảm độc tính nước đã xử lý. Tuy nhiên, cơ chế khử vi khuẩn và vi rút cần được nghiên cứu thêm để xác minh hiệu quả thực tế, đặc biệt ở quy mô lớn hơn. Việc phân tích và đánh giá hiệu quả của nghiên cứu này không chỉ giúp hiểu rõ hơn về cơ chế hoạt động của hạt chùm ngây mà còn mở ra cơ hội ứng dụng thực tiễn trong các hệ thống xử lý nước quy mô nhỏ, hộ gia đình hoặc ở những khu vực thiếu cơ sở hạ tầng cấp nước. Các nghiên cứu tiếp theo sẽ là cơ sở để hoàn thiện công nghệ xử lý nước sinh hoạt và nước uống với chi phí tiết kiệm và thân thiện với môi trường. Việc ứng dụng hạt chùm ngây trong xử lý nước tại Việt Nam có tiềm năng phát triển mạnh mẽ, đặc biệt là ở các khu vực nông thôn, nơi cây chùm ngây đã được trồng phổ biến.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Quỹ phát triển khoa học và công nghệ quốc gia (NAFOSTED) cho đề tài “Phát triển công nghệ lọc nước sử dụng keo chiết xuất từ hạt cây

chùm ngây xử lý vi rút gây bệnh trong nước ăn, uống”, mã số: 10/2022/TN.

Tài liệu tham khảo

- [1] Okuda, T., Baes, A. U., Nishijima, W., Okada, M. (2001). [Isolation and characterization of coagulant extracted from moringa oleifera seed by salt solution](#). *Water Research*, 35(2):405–410.
- [2] Hoa, N. T., Hue, C. T. (2018). [Enhanced water treatment by Moringa oleifera seeds extract as the bio-coagulant: role of the extraction method](#). *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 67 (7):634–647.
- [3] dos Santos, T. R. T., Silva, M. F., de Andrade, M. B., Vieira, M. F., Bergamasco, R. (2018). [Magnetic coagulant based on Moringa oleifera seeds extract and super paramagnetic nanoparticles: optimization of operational conditions and reuse evaluation](#). *Desalination and Water Treatment*, 106:226–237.
- [4] dos Santos, T. R. T., Bongiovani, M. C., Silva, M. F., Nishi, L., Coldebella, P. F., Vieira, M. F., Bergamasco, R. (2016). [Trihalomethanes minimization in drinking water by coagulation/flocculation/sedimentation with natural coagulant Moringa oleifera Lam and activated carbon filtration](#). *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 94(7):1277–1284.
- [5] Ghebremichael, K. A., Gunaratna, K., Henriksson, H., Brumer, H., Dalhammar, G. (2005). [A simple purification and activity assay of the coagulant protein from Moringa oleifera seed](#). *Water Research*, 39 (11):2338–2344.
- [6] Moulin, M., Mossou, E., Signor, L., Kieffer-Jaquinod, S., Kwaambwa, H., Nermark, F., Gutfreund, P., Mitchell, E., Haertlein, M., Forsyth, V., Rennie, A. (2019). [Towards a molecular understanding of the water purification properties of Moringa seed proteins](#). *Journal of Colloid and Interface Science*, 554: 296–304.
- [7] Nordmark, B. A., Przybycien, T. M., Tilton, R. D. (2016). [Comparative coagulation performance study of Moringa oleifera cationic protein fractions with varying water hardness](#). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(4):4690–4698.
- [8] Cardoso Valverde, K., Ferri Coldebella, P., Fernandes Silva, M., Nishi, L., Carvalho Bongiovani, M., Bergamasco, R. (2018). [Moringa oleifera Lam. and Its Potential Association with Aluminium Sulphate in the Process of Coagulation/Flocculation and Sedimentation of Surface Water](#). *International Journal of Chemical Engineering*, 2018(1):4342938.
- [9] Compaoré, W. R., Nikiéma, P. A., Bassolé, H. I. N., Savadogo, A., Mouecoucou, J. (2011). Chemical composition and antioxidative properties of seeds of Moringa oleifera and pulps of Parkia biglobosa and Adansonia digitata commonly used in food fortification in Burkina Faso. *Current Research Journal of Biological Sciences*, 3(1):64–72.
- [10] El-Massry, F. H. M., Mossa, M. E., Youssef, S. M. (2013). [Moringa oleifera plant "value and utilization in food processing"](#). *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 91(4):1597–1909.
- [11] Krupińska, I. (2020). [Aluminium Drinking Water Treatment Residuals and Their Toxic Impact on Human Health](#). *Molecules*, 25(3):641.
- [12] Baptista, A. T. A., Coldebella, P. F., Cardines, P. H. F., Gomes, R. G., Vieira, M. F., Bergamasco, R., Vieira, A. M. S. (2015). [Coagulation–flocculation process with ultrafiltered saline extract of Moringa oleifera for the treatment of surface water](#). *Chemical Engineering Journal*, 276:166–173.
- [13] Choudhary, M., Neogi, S. (2017). [A natural coagulant protein from Moringa oleifera: isolation, characterization, and potential use for water treatment](#). *Materials Research Express*, 4(10):105502.
- [14] Baptista, A. T. A., Silva, M. O., Gomes, R. G., Bergamasco, R., Vieira, M. F., Vieira, A. M. S. (2017). [Protein fractionation of seeds of Moringa oleifera lam and its application in superficial water treatment](#). *Separation and Purification Technology*, 180:114–124.
- [15] Mohamed, E. H., Mohammad, T. A., Noor, M. J. M. M., Ghazali, A. H. (2015). [Influence of extraction and freeze-drying durations on the effectiveness of Moringa oleifera seeds powder as a natural coagulant](#). *Desalination and Water Treatment*, 55(13):3628–3634.
- [16] Garcia-Fayos, B., Arnal, J., Sancho, M., Ruiz, V. (2016). [Use of Moringa oleifera in drinking water treatment: study of storage conditions and performance of the coagulant extract](#). *Desalination and Water Treatment*, 57(48–49):23365–23371.

- [17] Mateus, G. A. P., Paludo, M. P., dos Santos, T. R. T., Silva, M. F., Nishi, L., Fagundes-Klen, M. R., Gomes, R. G., Bergamasco, R. (2018). [Obtaining drinking water using a magnetic coagulant composed of magnetite nanoparticles functionalized with Moringa oleifera seed extract](#). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4):4084–4092.
- [18] Ghebremichael, K., Abaliwano, J., Amy, G. (2009). [Combined natural organic and synthetic inorganic coagulants for surface water treatment](#). *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 58(4): 267–276.
- [19] Freitas, J. H. E. S., de Santana, K. V., do Nascimento, A. C. C., de Paiva, S. C., de Moura, M. C., Coelho, L. C. B. B., de Oliveira, M. B. M., Paiva, P. M. G., do Nascimento, A. E., Napoleão, T. H. (2016). [Evaluation of using aluminum sulfate and water-soluble Moringa oleifera seed lectin to reduce turbidity and toxicity of polluted stream water](#). *Chemosphere*, 163:133–141.
- [20] García-Fayos, B., Arnal, J., Monforte-Monleon, L., Sancho, M. (2015). [Alternatives to the use of synthetic organic coagulant aids in drinking water treatment: improvements in the application of the crude extract of Moringa oleifera seed](#). *Desalination and Water Treatment*, 55(13):3635–3645.
- [21] Valverde, K. C., Paccola, E. A. d. S., Pomini, A. M., Yamaguchi, N. U., Bergamasco, R. (2018). [Combined water treatment with extract of natural Moringa oleifera Lam and synthetic coagulant](#). *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 13(3):1.
- [22] Xiong, B., Piechowicz, B., Wang, Z., Marinaro, R., Clement, E., Carlin, T., Uliana, A., Kumar, M., Velegol, S. B. (2018). [Moringa oleifera f-sand Filters for Sustainable Water Purification](#). *Environmental Science & Technology Letters*, 5(1):38–42.
- [23] Kato, R., Asami, T., Utagawa, E., Furumai, H., Katayama, H. (2018). [Pepper mild mottle virus as a process indicator at drinking water treatment plants employing coagulation-sedimentation, rapid sand filtration, ozonation, and biological activated carbon treatments in Japan](#). *Water Research*, 132:61–70.
- [24] Canh, V. D., Furumai, H., Katayama, H. (2019). [Removal of pepper mild mottle virus by full-scale microfiltration and slow sand filtration plants](#). *NPJ Clean Water*, 2(1):18.
- [25] ElHadidy, A. M., Peldszus, S., Van Dyke, M. I. (2013). [An evaluation of virus removal mechanisms by ultrafiltration membranes using MS2 and \$\phi\$ X174 bacteriophage](#). *Separation and Purification Technology*, 120:215–223.
- [26] Ueda Yamaguchi, N., Cusioli, L. F., Quesada, H. B., Camargo Ferreira, M. E., Fagundes-Klen, M. R., Salcedo Vieira, A. M., Gomes, R. G., Vieira, M. F., Bergamasco, R. (2021). [A review of Moringa oleifera seeds in water treatment: Trends and future challenges](#). *Process Safety and Environmental Protection*, 147:405–420.
- [27] Torii, S., Hashimoto, T., Do, A. T., Furumai, H., Katayama, H. (2019). [Impact of repeated pressurization on virus removal by reverse osmosis membranes for household water treatment](#). *Environmental Science: Water Research & Technology*, 5(5):910–919.
- [28] Samineni, L., De Respino, S., Tu, Y.-M., Chowdhury, R., Mohanty, R. P., Oh, H., Geitner, M., Alberg, C. H., Roman-White, A., McKinzie, S., Lemus, C., Massey, J., Ghosh, D., Truskett, T. M., Velegol, S., Kumar, M. (2022). [Effective pathogen removal in sustainable natural fiber Moringa filters](#). *npj Clean Water*, 5(1):27.
- [29] Samineni, L., Xiong, B., Chowdhury, R., Pei, A., Kuehster, L., Wang, H., Dickey, R., Soto, P. E., Massenburg, L., Nguyen, T. H., Maranas, C., Velegol, D., Kumar, M., Velegol, S. (2019). [7 Log Virus Removal in a Simple Functionalized Sand Filter](#). *Environmental Science & Technology*, 53(21):12706–12714.
- [30] Kwaambwa, H., Maikokera, R. (2007). [A fluorescence spectroscopic study of a coagulating protein extracted from Moringa oleifera seeds](#). *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 60(2):213–220.
- [31] Okuda, T., Baes, A. U., Nishijima, W., Okada, M. (1999). [Improvement of extraction method of coagulation active components from Moringa oleifera seed](#). *Water Research*, 33(15):3373–3378.
- [32] Stellar Market Research (2025). [Moringa Seeds Market - Global Industry Analysis and Forecast \(2025-2032\)](#). Access on 10/5/2025.
- [33] Cổng thông tin điện tử, Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2025). [Hội nghị Toàn quốc Công tác Nước sạch nông thôn](#). Truy cập ngày 10/3/2025.