VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology

Journal homepage: https://js.vnu.edu.vn/NST

Original Article

Fabrication of Porous Biochip Carrier Based on HDPE with Microbial Compatibility for Domestic Wastewater Treatment Using MBBR Technology

Mai Duc Huynh[1,2], Nguyen Quang Minh[1], Tran Huu Trung[1], Do Van Cong[1,2], Nguyen Thi Thai[1], Nguyen Tien Minh[1], Dang Thanh Huyen[3], Nguyen Minh Viet[4], Ngo Hong Anh Thu[4], Do Van Son[5], Nguyen Vu Giang[1,2,*]

[1]*Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet, Nghia Do, Hanoi, Vietnam*
[2]*Graduate University of Science and Technology, Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet, Nghia Do, Ha Noi, Viet Nam*
[3]*Hanoi University of Natural Resources and Environment, 41A Phu Dien, Phu Dien, Hanoi, Vietnam*
[4]*VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam*
[5]*Thinh Truong Phat Environment Joint Stock Company, Adjacent House No. 423, Yen Lo Service Area, Yen Nghia, Hanoi, Vietnam*

Received 23rd September 2025
Revised 12th January 2026; Accepted 23rd January 2026

Abstract: This study presents the development of a porous HDPE/PEO-based biochip carrier enhanced with maleic anhydride-grafted polyethylene (PEgMA) for domestic wastewater treatment using Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) technology. The incorporation of hydrophilic PEO and PEgMA improved microbial compatibility by enhancing hydrophilicity and surface interaction. The optimized carrier achieved a density of 0.61 g/cm³, 40.48% porosity, and pore sizes ranging from 50–500 µm. After 8 weeks of operation at Hung Yen Eye Hospital, the system achieved 99.8% ammonium removal and met national discharge standards (QCVN 14:2008/BTNMT). The study confirms the potential of HDPE/PEgMA/PEO carriers as high-efficiency, scalable solutions for sustainable domestic wastewater treatment using MBBR systems.

Keywords: Biochip, wastewater treatment materials, HDPE/PEO media, MBBR.

* Corresponding author.
E-mail address: nvgiang@itt.vast.vn

https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5849

Chế tạo giá thể biochip xốp trên nền nhựa HDPE có tính tương thích vi sinh định hướng xử lý nước thải sinh hoạt bằng công nghệ MBBR

Mai Đức Huynh[1,2], Nguyễn Quang Minh[1], Trần Hữu Trung[1], Đỗ Văn Công[1,2], Nguyễn Thi Thái[1], Nguyễn Tiến Minh[1], Đặng Thanh Huyền[3], Nguyễn Minh Việt[4], Ngô Hồng Ánh Thu[4], Đỗ Văn Sơn[5], Nguyễn Vũ Giang[1,2,*]

[1]*Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô, Hà Nội, Việt Nam*

[2]*Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô, Hà Nội, Việt Nam*

[3]*Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội, 41A Phú Diễn, Phú Diễn, Hà Nội, Việt Nam*

[4]*Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, 334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam*

[5]*Công ty Cổ phần Môi trường Trường Thịnh Phát, Liền kề 423, Khu dịch vụ Yên Lộ, Phường Yên Nghĩa, Thành phố Hà Nội*

Nhận ngày 09 tháng 4 năm 2025
Chỉnh sửa ngày 12 tháng 01 năm 2026; Chấp nhận đăng ngày 23 tháng 01 năm 2026

Tóm tắt: Trong nghiên cứu này, giá thể xốp trên nền polyetylen tỉ trọng cao/polyetylen oxit (HDPE/PEO) được chế tạo và ứng dụng trong xử lý nước thải sinh hoạt theo công nghệ MBBR tại Bệnh viện Mắt Hưng Yên. PEgMA được sử dụng làm chất tương hợp nhằm cải thiện khả năng phân tán của PEO trong nền HDPE, từ đó tăng cường tính ưa nước và khả năng bám dính, phát triển vi sinh vật trên giá thể. Giá thể thu được có khối lượng riêng là 0,61 g/cm³, độ xốp đạt 40,48% với kích thước lỗ 50–500 µm. Sau 8 tuần xử lý, hiệu suất loại bỏ NH_4^+ đạt 99,8%, các chỉ tiêu pH, BOD, TSS, NH_4^+ và NO_3^- đều đáp ứng tiêu chuẩn QCVN 14:2008/BTNMT. Kết quả cho thấy giá thể HDPE/PegMA/PEO có tiềm năng ứng dụng cao trong công nghệ MBBR, góp phần nâng cao hiệu quả và bền vững trong xử lý nước thải sinh hoạt.

Từ khóa: Biochip, vật liệu xử lý nước thải, giá thể HDPE/PEO, MBBR.

1. Mở đầu

Nước thải sinh hoạt nói chung có chứa các thành phần và đặc tính rất phức tạp, bao gồm hàm lượng hữu cơ dễ phân hủy, chất rắn lơ lửng, dầu mỡ, xà phòng, ngoài ra còn có thể chứa vi khuẩn, mầm bệnh, hóa chất, dung môi,… do đó nước thải sinh hoạt cần phải được xử lý nhanh chóng và triệt để. Các kỹ thuật xử lý nước thải khác nhau đã được thực hiện như: vật lý, hóa học, sinh học,… Sự ra đời của công nghệ bể phản ứng màng vi sinh chuyển động (MBBR) đã cải thiện khả năng xử lý nước thải sinh hoạt với ưu điểm: loại bỏ hiệu quả các chất hữu cơ và chất dinh dưỡng nhưng giảm thiểu được năng lượng và tối ưu không gian xử lý,… [1]. Do vậy, công nghệ này có thể lắp đặt để xử lý nước thải sinh hoạt có độ ô nhiễm cao trong không gian chật hẹp như: nhà hàng, bệnh viện, trường học,…

Quy trình MBBR đã tận dụng được ưu điểm của quy trình bùn hoạt tính (ASP), trong đó cung cấp môi trường hỗ trợ để tăng cường sự

* Tác giả liên hệ.
Địa chỉ email: nvgiang@itt.vast.vn

https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5849

phát triển của vi khuẩn [2, 3]. Trong ASP, các hoạt động sinh học diễn ra ở dạng lơ lửng thông qua quá trình sục khí. Ngược lại, MBBR sử dụng các chất mang chuyển động để hỗ trợ màng sinh học, phân phối chúng khắp bể phản ứng và tăng thời gian lưu trú của vi sinh vật so với ASP. Điều này dẫn đến việc loại bỏ chất gây ô nhiễm được cải thiện đáng kể [2, 4]. Ngoài ra, quy trình MBBR không tuần hoàn bùn nhờ khả năng giữ lại sinh khối hiệu quả hơn [5]. Các hệ thống MBBR được thiết kế tương tự như các hệ thống bùn hoạt tính có sục khí giúp các giá thể nhựa nuôi giữ các vi sinh vật và thu giữ bùn. Những giá thể này cung cấp diện tích bề mặt bên trong lớn, giúp tăng cường hiệu quả tiếp xúc giữa nước thải, không khí và vi sinh vật, từ đó nâng cao hiệu suất xử lý.

Trong số các loại giá thể được sử dụng phổ biến hiện nay trong công nghệ MBBR, các giá thể dạng xốp đang được các nhà khoa học quan tâm nhờ các đặc điểm nổi bật như: giảm được thể tích bể phản ứng; hệ vi sinh phát triển ổn định, tải trọng xử lý hữu cơ cao; thuận tiện trong vận hành, giá thể ít bị tắc nghẽn, có thể mở rộng công suất xử lý một cách dễ dàng [6-9]. Hiệu suất của công nghệ MBBR phụ thuộc vào cấu trúc, độ xốp của giá thể để làm sao mang được một lượng vi sinh lớn nhất trên cùng một thể tích.

Hiện nay, trên thế giới, nghiên cứu sử dụng công nghệ MBBR với lựa chọn các giá thể khác nhau cho xử lý nước thải sinh hoạt đã được tiến hành nghiên cứu [10-12]. Tác giả M. Levstek và các cộng sự [13] đã chế tạo sinh khối cầu PVA ở dạng gel cho xử lý nước thải, nhóm nghiên cứu đã tiến hành so sánh khả năng xử lý của giá thể gel PVA (2500 m^2/m^3) và giá thể Kaldnes K1 hình trụ (diện tích bề mặt riêng 550 m^2/m^3) để làm rõ diện tích bề mặt hiệu quả cho sự phát triển của màng sinh học trên giá thể. Kết quả thu được cho thấy thể tích sử dụng khối cầu gel PVA đưa vào thấp hơn (9,7%) so với thể tích giá thể Kaldnes K1 (37%) đã được sử dụng, nhưng cho tốc độ xử lý tốt hơn giá thể Kaldnes K1 hình trụ. Để làm rõ hơn sự ảnh hưởng của diện tích bề mặt trên giá thể đến sự phát triển màng sinh học, nhóm nghiên cứu Meta Levstek [13] đã ước tính diện tích bề mặt hiệu quả của giá thể gel PVA hình cầu (Kuraray) trong việc duy trì sinh khối tự dưỡng và dị dưỡng. Nhóm tác giả đã sử dụng phần mềm mô phỏng GPS-X (Hydromantis) để phân tích, so sánh khả năng xử lý của các giá thể gel PVA với diện tích bề mặt khác nhau trên cùng với dữ liệu thực nghiệm thu được. Các nghiên cứu đã công bố cho thấy việc sử dụng giá thể khác nhau bánh xe, gel, dạng cầu có khả năng xử lý nước thải [13]. Tuy nhiên, các loại này còn có hạn chế là diện tích bề mặt thấp (< 2500 m^2/m^3), dẫn tới tải lượng xử lý các chất ô nhiễm còn thấp.

Giá thể dạng xốp đĩa dẹt trên nền nhựa polyetylen tỉ trọng cao (HDPE) đang được phát triển thể hiện nhiều ưu điểm vượt trội như diện tích bề mặt lên tới 5000 m^2/m^3 giúp nâng cao hiệu suất làm việc của hệ MBBR [14]. Tuy nhiên, hiện nay chưa có nhiều nghiên cứu đề cập đến chế tạo và đánh giá khả năng làm việc của giá thể đĩa dẹt trên nền nhựa HDPE cho vấn đề xử lý nước thải sinh hoạt. Trong nghiên cứu của Qing Xi và các cộng sự [15], quá trình tạo xốp cho nền nhựa HDPE bằng phụ gia tạo xốp hóa học (CFA) đã được tiến hành. Nghiên cứu này tập trung vào việc khảo sát hình thái cấu trúc của PE xốp khi sử dụng các loại CFA như BIH40, natri bicacbonat, FP và Celogen-OT. Tác giả đã sử dụng thiết bị đùn một trục Brabender để chế tạo các mẫu xốp với khoang nhiệt được thiết lập lần lượt là 170 °C, 180 °C và 190 °C. Trong số các chất tạo xốp được thử nghiệm, Celogen-OT ở hàm lượng 1,5% khối lượng cho thấy hiệu quả tạo xốp cao nhất trên nền nhựa polyetylen nguyên sinh. Các phụ gia khác như FP, Celogen-AZNP và EX210 cũng thể hiện tiềm năng trong việc phát triển cấu trúc xốp.

Hiện nay phần lớn các giá thể sinh học đã nghiên cứu và thương mại được làm bằng nhựa như polyetylen và polypropylen do yêu cầu tỉ trọng trong nước từ 0,6 - 0,8. Vật liệu này có một số hạn chế như: tính kị nước cao và ái lực sinh học kém, do vậy làm các màng sinh học phát triển chậm và dễ dàng tách ra. Để khắc phục nhược điểm đó, việc biến tính bề mặt là cần thiết để tăng độ nhám và khả năng tương thích sinh học của vật liệu. Tuy nhiên, chưa có

nghiên cứu nào đề cập tới việc sử dụng các phụ gia có khả năng ưa nước trong việc phối trộn với nhựa nền HDPE. Việc giảm tính kị nước giúp giá thể trên nền HDPE có khả năng di chuyển trong môi trường nước tốt hơn, giúp tăng hiệu quả xử lý nước thải.

Trong khi đó, polyetylen oxit (PEO) được biết đến có độ phân cực cao, nhờ cấu trúc có chứa nhiều nhóm OH có thể giảm khả năng kị nước của giá thể HDPE. Bên cạnh đó, sự khả năng tan tốt của PEO trong nước có thể cung cấp nguồn cacbon giúp vi sinh vật phát triển. Huang và các cộng sự [16] đã đánh giá quá trình phân hủy sinh học hiếu khí và kỵ khí của PEO trong một mô hình xử lý nước thải sử dụng vi khuẩn bùn từ nhà máy dệt Xiamen Terylene. Trong điều kiện hiếu khí, cả ba loại PEO (PEO 600, 6000 và 20000) đều bị phân hủy khoảng 80% trong 5 ngày, bất kể sự đa dạng về MW. Trong điều kiện kỵ khí, PEO 600 bị phân hủy khoảng 50% trong 9 ngày, PEO 6000 khoảng 40% trong 10 ngày và PEO 20000 khoảng 80% trong 6 ngày. Nghiên cứu này chứng minh rõ ràng khả năng của vi sinh vật trong bùn hoạt tính sử dụng PEO làm nguồn carbon. Trong nghiên cứu khác của Guntenberger [17] cũng cho thấy PEO được biến tính trên bề mặt than hoạt tính tạo điều kiện thuận lợi cho sự hình thành màng sinh học hoặc trở thành nguồn carbon cục bộ khi các vi sinh vật có khả năng phân hủy PEO bám vào bề mặt. Từ các nghiên cứu trên cho thấy, PEO có thể giúp nền HDPE cải thiện khả năng tương hợp, nâng cao khả năng sinh trưởng, phát triển và bám dính của vi sinh vật. Tuy nhiên do độ phân cực giữa HDPE và PEO khác nhau có thể gây ra phân tách pha trong quá trình chế tạo. Chất tương hợp polyetylen ghép maleic anhydrit (PegMA) được sử dụng để cải thiện khả năng phân tán của PEO và cải thiện sự kết dính giữa các thành phần của vật liệu. Vật liệu sau khi chế tạo được đánh giá hiệu quả qua việc xử lý nước thải sinh hoạt của Bệnh viện Mắt Hưng Yên nhằm mục đích định hướng xử lý amoni trước khi đến nguồn tiếp nhận.

2. Thực nghiệm

2.1. Hóa chất

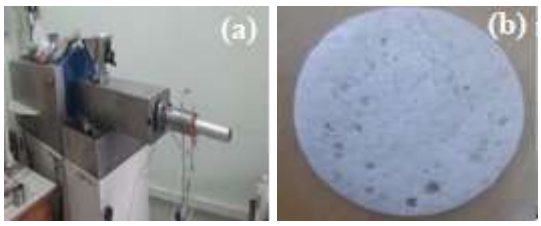
Nhựa polyetylen tỉ trọng cao (HDPE), LG Chemical, Hàn Quốc có khối lượng riêng là 0,945 g/cm^3; chất tạo nở azodicacbonat (AC 3000F) cung cấp bởi hãng Kum Yang, Trung Quốc; chất chống xẹp Hari 95, Rikevita (M) SDN BDH, Malaysia; Polyetylen oxit (PEO), Sigma-Aldrich, Mỹ; Polyetylen ghép maleic anhydrit (PEgMA), Sigma-Aldrich, Mỹ.

Chủng vi sinh Microbe-Lift N1 có mật độ vi sinh: 1-10^{10} vi sinh/ml được sản xuất bởi hãng Ecological Laboratories Inc., USA. Microbe-Lift N1 bao gồm hỗn hợp 2 chủng vi sinh vật là *Nitrosomonas sp* (cho chuyển hóa ammonia thành nitrit) và *Nitrobacter sp* (cho chuyển hóa nitrit thành nitrat).

2.2. Thực nghiệm

2.2.1. Chế tạo giá thể HDPE dạng xốp với tỉ lệ PEgMA/PEO khác nhau

Hỗn hợp gồm nhựa nền HDPE, chất tạo nở AC 3000F, Hari 95, PEgMA, PEO được trộn đều với nhau. Trong đó, hỗn hợp PEgMA: PEO theo tỉ lệ 1:1, hàm lượng PEO trong khoảng 1; 3 và 5 %kl so với nhựa nền HDPE. Hỗn hợp được cấp vào thiết bị trộn nóng chảy một trục vít Poly Haake (Đức) với điều kiện gia công như sau: tốc độ trục quay là 50 vòng/phút, nhiệt độ tại các khoang trộn là 140 ºC, 150 ºC và 160 ºC. Hỗn hợp nóng chảy đi qua khuôn tạo xốp có đường kính 30 mm với nhiệt độ khuôn là 170 ºC. Sau khi được đùn ra, mẫu được làm nguội và ổn định tại nhiệt độ phòng trong 24 giờ trước khi cắt thành đĩa xốp dẹt với độ dày 1 ± 0,01 mm (như trình bày trên Hình 1).



Hình 1. (a) Thiết bị đùn chế tạo xốp HDPE/PEO; (b) sản phẩm giá thể xốp tạo thành.

2.2.2. Nuôi cấy vi sinh trên giá thể HDPE

Vi sinh được nuôi cấy lên trên các mẫu giá thể trong bể kính có sục khí, sử dụng nước thải nhân tạo được pha từ nguồn nước cất 1 lần để tạo môi trường ô nhiễm tương tự như nước thải sinh hoạt (với nồng độ NH_4^+ ~ 50 mgN/l, BOD_5 ~ 200 mg/l) có thành phần như sau: thể tích cần pha 200 lít; Nồng độ amoni C_o = 50 mg/l (NH_4^+ tính theo N); Hàm lượng BOD_5 = 200 mg/l.

Bảng 1. Thành phần vật liệu chế tạo giá thể xốp HDPE/PegMA/PEO

Tên mẫu	Phần trăm khối lượng (%kl)				
	HDPE	AC3000F	Hari 95	PEgMA	PEO
PEG0	97	2	1	-	-
PEG1	95	2	1	1	1
PEG3	91	2	1	3	3
PEG5	87	2	1	5	5

Các mẫu giá thể sau khi được nuôi cấy trong thời gian 30 ngày sẽ được đánh giá khả năng bám dính của vi sinh lên trên bề mặt giá thể.

Hình **Error! No text of specified style in document.**. Quá trình nuôi cấy vi sinh lên trên giá thể.

2.2.3. Mô hình xử lý nước thải sinh hoạt theo công nghệ MBBR quy mô phòng thí nghiệm sử dụng giá thể xốp PE với công suất xử lý 2 -10 lít/giờ

Mô hình xử lý nước thải sinh hoạt có công suất từ 2 - 10 lít/giờ được trình bày như Hình 3. Thiết kế hệ thống với thông số ô nhiễm đầu vào trên nền nước thải bệnh viện mắt Hưng Yên: NH_4^+ = 41,5 mgN/l; BOD = 830 mgO_2/l.

Ban đầu, 200 lít nước thải sinh hoạt lấy từ Bệnh viện mắt Hưng Yên được cấp vào bể điều hòa. Tiếp theo, bổ sung 6 lít giá thể vào mỗi bể thiếu khí và hiếu khí. Sau đó cấp hàm lượng vi sinh vào bể xử lý vi sinh hiếu khí theo thời gian: Ngày 1 và 2 sử dụng từ 40 – 80 ml/m^3 (chọn: 60 ml/m^3); Ngày 3 đến 7 sử dụng từ 10 - 20 ml/m^3 (chọn: 15 ml/m^3); Ngày 8 đến 30 sử dụng từ 2 – 5 ml/m^3 (chọn: 4 ml/m^3).

Lượng vi sinh nuôi cấy cho mô hình thí nghiệm. Thể tích của các bể vi sinh của mô hình: thể tích bể thiếu khí: 45 lít (chiều cao hiệu dụng 40 cm/chiều cao tổng là 50 cm) → thể tích hiệu dụng = 36 ít; Thể tích bể hiếu khí: 90 lít chiều cao hiệu dụng 40 cm/chiều cao tổng là 50 cm) → thể tích hiệu dụng = 72 lít.

Hình 3. Mô hình xử lý nước thải sinh hoạt công suất 2-10 lít/giờ.

Vận hành mô hình theo chế độ tự động: bơm định lượng và máy thổi khí được vận hành luân phiên 15 phút mỗi máy để đảm bảo cấp nước thải và khí cho vi sinh phát triển, đồng thời đảm bảo tuổi thọ hoạt động của bơm.

Bảng 2. Thành phần nước thải sinh hoạt lấy từ Bệnh viện Mắt Hưng Yên

STT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả phân tích	QCVN (cột A) 14/2008/BTNMT

1	pH	-	6,95	5-9
2	BOD	mgO_2/g	830	30
3	TSS	mg/l	4	50
4	TDS	mg/l	620	500
5	Sunfua	mg/l	0,03	1
6	Amoni ($NH_4^{+)}$	mg/l	41,5	5
7	Nitrat (NO_3^-)	mg/l	66,1	30
8	Dầu mỡ động thực vật	mg/l	0,48	10
9	Tổng các chất HĐBM	mg/l	1,17	5
10	Photphat (PO_4^{3-})	mgP/l	5,0	6
11	Coliform tổng	VK/100 ml	15,1	3000

2.3. Các phương pháp nghiên cứu

2.3.1. Xác định tính chất lưu biến nóng chảy của vật liệu

Đánh giá tính chất lưu biến nóng chảy được thực hiện trên thiết bị Rheomix 610 của hãng Haake (CHLB Đức) với buồng trộn có thể tích là 69 cm^3 sử dụng 2 trục loại Roller. Giản đồ lưu biến nóng chảy được ghi lại trên phần mềm Polylab.

2.3.2. Xác định khối lượng riêng và độ xốp

Khối lượng riêng của mẫu HDPE/phụ gia tạo xốp được theo tiêu chuẩn ASTM D792 và tính theo công thức:

$D = \frac{m}{v}$ (g/cm^3) [1]

Trong đó:

m: khối lượng mẫu (g)

V: thể tích hình trụ ($V= \pi r^2. h$, trong đó: h là độ cao hình trụ).

Độ xốp là giá trị được sử dụng để mô tả khoảng trống hoặc lượng không gian trống có trong một mẫu nhất định, được thực hiện theo tiêu chuẩn ASTM C830.

Độ xốp (%)= $\frac{V_{kk}}{V_t}$ x 100 [2]

Trong đó: V_{kk} là thể tích khoảng trống trong mẫu vật liệu ($V_{kk} = V_t - V_{vật\ liệu}$, trong đó phần $V_{vật\ liệu}$ được xác định bằng phần thể tích vật liệu chiếm chỗ trong nước).

V_t là thể tích khối mẫu vật liệu.

2.3.3. Phương pháp phân tích phổ hồng ngoại biến đổi chuỗi Fourier (FT-IR)

Ghi phổ FT-IR được tiến hành trên NEXUS 670 (Mỹ) để xác định các nhóm chức đặc trưng có trong vật liệu, tại Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam (IMS – VAST) với các điều kiện đo như sau: độ phân giải 4 cm^{-1}, số lần quét 32 lần, giải sóng từ 4000 cm^{-1} – 400 cm^{-1}.

2.3.4. Góc tiếp xúc nước

Góc tiếp xúc với nước được đo bằng thiết bị đo góc tiếp xúc OCA 50 Hãng Dataphysics - Đức sử dụng kích thước giọt thử nghiệm là 5 µL. Thí nghiệm được tiến hành tại IMS – VAST.

2.3.5. Ảnh hiển vi điện tử quét (SEM)

Kính hiển vi điện tử quét (SEM) được sử dụng để phân tích hình thái cấu trúc của các mẫu giá thể xốp HDPE/PEgMA/PEO. Các mẫu được phân tích trên thiết bị JMS-6510LV, Jeol (Nhật Bản) tại IMS - VAST.

2.3.6. Xác định khả năng bám dính vi sinh trên giá thể

Hàm lượng vi sinh được xác định theo phương pháp khối lượng, bằng xác định %kl của giá thể trước và sau khi nuôi cấy vi sinh.

% vi sinh = $\frac{ms-mo}{mo}$ x 100 (g/cm^3) [3]

Trong đó:

m_o: Khối lượng giá thể ban đầu

m_s: Khối lượng giá thể sau khi có vi sinh bám dính

2.3.7. Phân tích chất lượng nước thải sau xử lý

Nước thải sinh hoạt được phân tích theo các tiêu chuẩn TCVN 6492:1999 (xác định pH), TCVN 6001:1995 (phân tích nhu cầu sinh hóa oxy BOD), TCVN 6625-2000 (tổng chất rắn lơ lửng TSS), TCVN 5988:1995 (hàm lượng amoni), TCVN 6180-1996 (Hàm lượng nitrat (NO_3^-). Nước thải sau xử lý phải đáp ứng QC ĐP 01:2019/HY.

Hiệu quả xử lý của giá thể vi sinh được đánh giá thông qua hàm lượng amoni như sau:

TLd= [(C_o – C_t)/T] x Q lưu lượng (lít/ngày)

TLv = TLd/V

Theo đó,

TLd: tải lượng xử lý trên 1 ngày

C_o: nồng độ amoni thời điểm ban đầu (41,5 mg/lít).

C_t: Nồng độ amoni sau 1 ngày xử lý (2,4 mg/lít).

T: thời gian xử lý trong 1 ngày

Q: lưu lượng đối với mô hình thử nghiệm (10 lít/giờ = 240 lít/ngày)

TLv: tải lượng xử lý trên 1 đơn vị thể tích

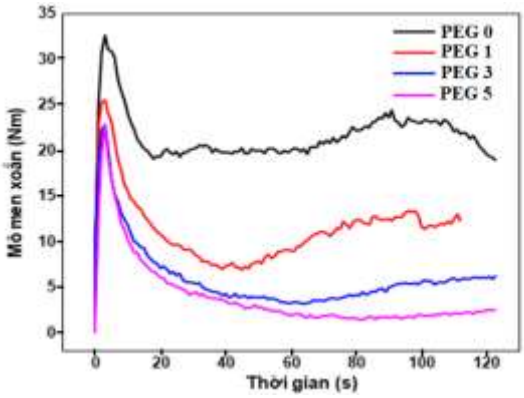
V thể tích giá thể (lít) (6 lít)

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ lệ PEgMA/PEO đến tính chất và cấu trúc của xốp PE thu được

3.1.1. Ảnh hưởng của hàm lượng PEO đến mô men xoắn chế tạo giá thể dạng xốp

Ảnh hưởng của hàm lượng poly(ethylene oxide) (PEO) tại các tỷ lệ 1, 3 và 5%kl đến đặc trưng lưu biến nóng chảy của vật liệu polyethylene (PE) được trình bày trên Hình 4.



Hình 4. Giản đồ mô-men xoắn của các mẫu xốp giá thể xốp PEG 0, PEG 1, PEG 3 và PEG 5.

Hình 4 thể hiện đường cong lưu biến mô-men xoắn của các mẫu vật liệu PE chứa hàm lượng PEO khác nhau. Ngay sau khi đưa hỗn hợp vào buồng trộn, mô-men xoắn tăng nhanh và đạt trạng thái ổn định trong khoảng thời gian từ 40 đến 100 giây, phản ánh quá trình phân tán và gia tăng thể tích do sự hình thành bọt khí trong vật liệu. Sự gia tăng thể tích này làm tăng mô-men xoắn ban đầu do cản trở cơ học trong hệ thống kín. Tuy nhiên, khi hàm lượng PEO tăng, giá trị mô-men xoắn có xu hướng giảm. Điều này cho thấy PEO đóng vai trò như một chất bôi trơn nội tại, làm giảm độ nhớt của hệ và hỗ trợ quá trình phân tán chất tạo xốp trong nền HDPE, từ đó giảm tiêu hao năng lượng trong quá trình trộn cũng như hạn chế mài mòn trên trục vít. Sự hiện diện của PEO vì vậy không chỉ điều chỉnh đặc tính lưu biến mà còn cải thiện khả năng gia công của hệ polymer xốp.

Bảng 1. Đặc trưng nóng chảy của các mẫu giá thể xốp PE/PEgMA/PEO tại các hàm lượng PEO khác nhau

Mẫu	Thời gian tạo xốp (giây)	Mô-men xoắn (N.m)	Năng lượng (kJ)
PEG 0	83	22,7	12,94
PEG 1	107	13,4	7,99
PEG 3	120	6,1	5,36

PEG 5	120	2,3	3,54

Dữ liệu từ Bảng 1 cho thấy khi hàm lượng PEO tăng, thời gian phản ứng tạo bọt kéo dài, trong khi mô-men xoắn và năng lượng trộn giảm. Điều này cho thấy PEO ảnh hưởng đến động học tạo bọt và cải thiện khả năng gia công. Cụ thể, PEO có thể làm chậm quá trình giải phóng khí do ảnh hưởng đến phân tán và tương tác giữa các pha, đồng thời làm giảm độ nhớt nóng chảy, từ đó giảm mô-men xoắn và năng lượng cần thiết cho quá trình trộn nóng chảy.

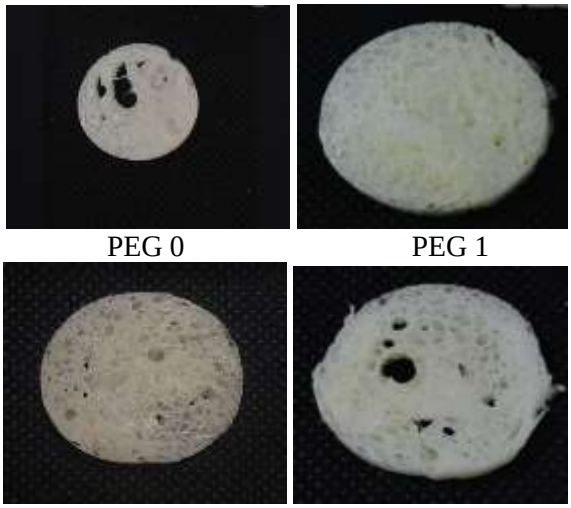
3.1.2. Ảnh hưởng của hàm lượng PEO đến mật độ và độ xốp của vật liệu PE/PEgMA/PEO

Khối lượng riêng và độ xốp của các mẫu giá thể PE/PEgMA/PEO có chứa PEO tại các hàm lượng khác nhau được tóm tắt trong Bảng 2. Việc bổ sung PEO dẫn đến khối lượng riêng giảm từ 0,65 g/cm³ xuống 0,43 g/cm³ khi thêm 7 %kl PEO. Ngược lại, độ xốp tăng từ 30,21% lên 64,11% khi hàm lượng PEO tăng.

Bảng 2. Mật độ và độ xốp của các mẫu giá thể xốp PE/PEgMA/PEO tại các hàm lượng PEO khác nhau

Mẫu	Khối lượng riêng (g/)	Độ xốp (%)
PEG 0	0,65	30,21
PEG 1	0,63	35,12
PEG 3	0,61	40,48
PEG 5	0,55	45,52

Sự hiện diện của PEO có thể ảnh hưởng đến quá trình tạo bọt trong nền HDPE do làm giảm độ nhớt nóng chảy, dẫn đến giảm khả năng ổn định cấu trúc bọt trong giai đoạn giãn nở. Khi độ nhớt giảm, lực cản dòng chảy yếu đi, khiến các bong bóng khí dễ hợp nhất thành lỗ rỗng lớn hơn hoặc vỡ ra trước khi cấu trúc được ổn định, điều này được minh họa rõ trong Hình 5. Cơ chế này cũng đã được ghi nhận trong các nghiên cứu trước. Chẳng hạn, theo Yuhui Qiao và cộng sự [18], việc bổ sung PEO vào nền poly(lactic acid)/polyamide 6 làm tăng cao mật độ tạo bọt xốp và tỉ lệ giãn nở so với mẫu không sử dụng PEO.

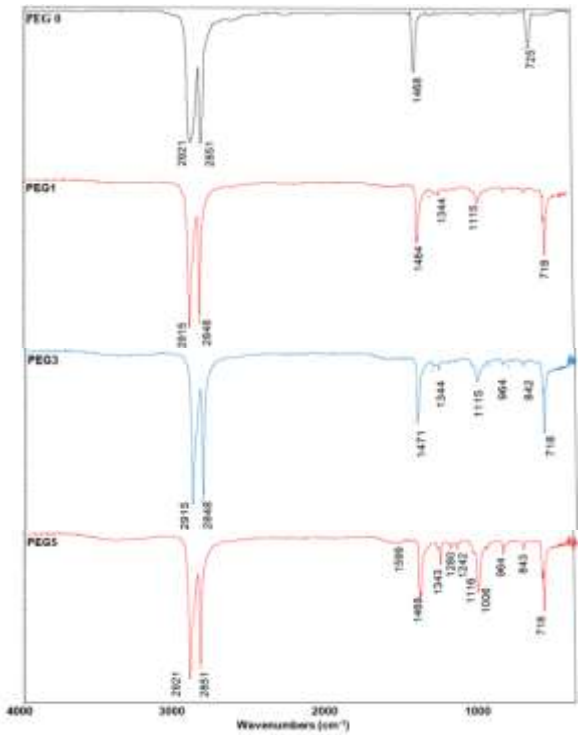


Hình 5. Mặt cắt ngang của giá thể xốp PE/PEgMA/PEO với hàm lượng PEO khác nhau.

Khi hàm lượng PEO nằm trong khoảng 1–3%, cấu trúc bọt duy trì ổn định với mạng lỗ xốp đồng đều. Vượt quá 3%, xảy ra hiện tượng hợp nhất lỗ xốp, làm xuất hiện các lỗ lớn không đồng nhất. Sự bất đồng đều này gây suy giảm độ bền cơ học và ảnh hưởng tiêu cực đến tính ổn định hình thái của vật liệu.

3.1.3. Phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FT-IR)

Phổ FT-IR của giá thể xốp PE/PEgMA/PEO có thành phần khác nhau được trình bày trong Hình 6. Sự dịch chuyển của các nhóm chức trong các mẫu được tóm tắt trong Bảng 3. Bên cạnh các số sóng đặc trưng cho liên kết -CH_2-CH_2- trong HDPE được quan sát tại 2921 cm^{-1}, 2851 cm^{-1}, 1468 cm^{-1} và 725 cm^{-1} [19]. phổ IR của các mẫu PEG1, PEG3 và PEG5 còn xuất hiện một số píc mới khi so sánh với PEG0. Cụ thể, trên phổ IR của mẫu PEG1 và PEG3 xuất hiện dao động mới tại số sóng 1115 cm^{-1} được cho là của dao động hóa trị của nhóm chức C-O trong PEgMA và PEO [20].



Hình 6. Phổ FT-IR của các mẫu giá thể PEG0, PEG1, PEG3 và PEG5.

Phổ FT-IR của mẫu PEG5 có mặt các số sóng mới là dao động hóa trị của liên kết C=O và C-O. Khi tăng hàm lượng PEO trong mẫu, cường độ các pic là dao động của nhóm chức C-O gây ra tăng. Hơn nữa, ở các hàm lượng 5% PEO, có thể quan sát rõ dao động tại 1242 cm^{-1} và 1006 cm^{-1} tương ứng dao động hóa trị của nhóm C-O.

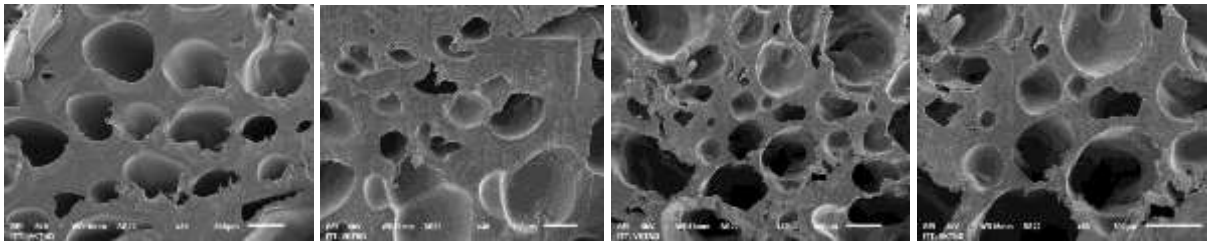
Từ phổ FT-IR của các mẫu xốp PE/PEO được tóm tắt trong Bảng 3, cũng thấy các dao động biến dạng và dao động ngoài mặt phẳng của liên kết $-CH_2-CH_2-$ có sự dịch chuyển nhẹ so tương ứng trên phổ FT-IR của mẫu HDPE. Điều này có thể giải thích bởi PEgMA đã thúc đẩy sự phân tán của PEO vào trong nền HDPE, các chất này đã tương hợp với nền PE, làm cho vị trí các pic dao động dịch chuyển. Rõ ràng, PEgMA cải thiện sự tương tác giữa các thành phần trong mẫu xốp PE/PEgMA/PEO.

Bảng 3. Đặc trưng dao động của các nhóm chức trong giá thể xốp PE/PEgMA/PEO

Dao động	PEG0	PEG1	PEG3	PEG5
$\nu_{CH\ no}$	2921 2851	2915 2948	2915 2848	2921 2851
$\delta_{CH\ no}$	1468	1464	1471	1468
$\gamma_{CH\ no}$	725	718	718	718
ν_{C-O}	-	1115	1115	1242 1006
$\nu_{C=O}$	-	-	-	1599

3.1.4. Ảnh hiển vi điện tử quét (SEM)

Hình 7 cho thấy ảnh SEM mặt cắt ngang của các mẫu HDPE/PEgMA/PEO ở độ phóng đại 30 lần. Mẫu không chứa PEO (PEG0) có kích thước lỗ xốp tương đối đồng nhất (200–600 nm), trong khi các mẫu có PEO thể hiện phân bố kích thước lỗ rộng hơn (50–500 nm), do ảnh hưởng của độ nhớt thấp từ PEgMA và PEO. Khi tăng hàm lượng pha trộn (PEG3, PEG5), xuất hiện hiện tượng hình thành các lỗ lớn liên kết nhau, làm tăng độ xốp tổng thể. Tuy nhiên, độ xốp cao kéo theo khối lượng riêng giảm, ảnh hưởng tiêu cực đến khả năng phân tán trong môi trường nước - một yếu tố then chốt trong ứng dụng xử lý nước thải. Để duy trì khả năng di chuyển trong điều kiện sục khí, khung vật liệu cần có mật độ nằm trong khoảng 0,6–0,8 g/cm³. Dựa trên hình thái cấu trúc, độ xốp và khối lượng riêng, mẫu PEG3 được lựa chọn cho nghiên cứu tiếp theo.



PEG0 PEG1 PEG3 PEG5

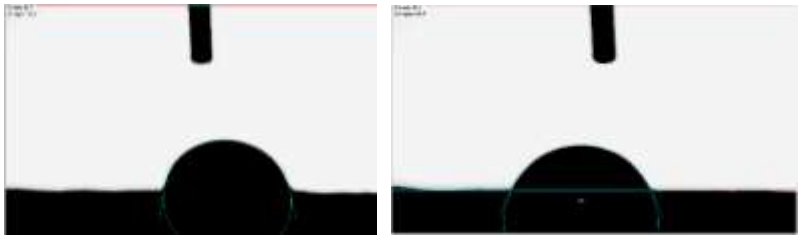
Hình 7. Hình ảnh SEM của bề mặt mẫu PE/PegMA/PEO ở độ phóng đại 30 lần.

3.2. Đánh giá khả năng xử lý nước thải sinh hoạt của vật liệu xốp HDPE/PEgMA/PEO

3.2.1. Ảnh hưởng của thành phần vật liệu đến góc tiếp xúc nước của các giá thể HDPE/PegMA/PEO

Do đặc tính kỵ nước của polyetylen, khả năng bám dính sinh học của vi sinh vật lên bề mặt giá thể bị hạn chế trong môi trường nước thải. Việc bổ sung polyethylene oxide (PEO) cải thiện tính ưa nước và khả năng phân tán của giá thể trong pha lỏng, từ đó tăng diện tích tiếp xúc và tạo điều kiện thuận lợi cho vi sinh vật hấp phụ, tiếp cận cơ chất và phát triển sinh khối. Điều này góp phần nâng cao hiệu suất xử lý sinh học của hệ thống.

Dữ liệu từ Hình 8 cho thấy mẫu PEG0 có góc tiếp xúc ban đầu cao (≈84°), phản ánh bản chất kỵ nước của nền HDPE. Việc phối trộn PEgMA làm giảm đáng kể góc tiếp xúc do sự hiện diện của nhóm maleic anhydride có độ phân cực cao. Khi bổ sung 3% PEO, góc tiếp xúc giảm sâu xuống ~68°, cho thấy sự gia tăng đáng kể tính ưa nước của bề mặt. Sự cải thiện này góp phần tăng cường khả năng phân tán của vật liệu trong môi trường nước và thúc đẩy quá trình bám dính của vi sinh vật, từ đó nâng cao hiệu quả ứng dụng trong xử lý sinh học.



PEG0 PEG3

Hình 8. Góc tiếp xúc của các mẫu PEG0 và PEG3.

3.2.2. Đánh giá độ bám dính của vi khuẩn vào vật liệu xốp PE

Hình 9 cho thấy sự thay đổi màu sắc rõ rệt của nền giá thể HDPE trong quá trình nuôi cấy vi sinh vật, từ trắng sang vàng và sau cùng là nâu sẫm - dấu hiệu cho thấy sự gia tăng mật độ sinh khối vi khuẩn theo thời gian. Trạng thái màu nâu đậm được xem là đặc trưng cho giai đoạn phát triển bão hòa, do đó thời gian nuôi cấy 30 ngày được chọn cho các thử nghiệm xử lý nước thải. Để đánh giá ảnh hưởng của thành phần nền đến khả năng sinh trưởng vi sinh, các mẫu PEG0 và PEG3 được khảo sát. Hình 10 cho thấy mẫu PEG3 có sắc độ nâu cao hơn, phản ánh sự phát triển vi sinh vật vượt trội. Kết quả này được quy cho khả năng tương thích sinh học được cải thiện nhờ sự hiện diện của PEgMA và PEO, giúp tối ưu hóa môi trường bề mặt cho sự bám dính và xâm nhập của vi khuẩn.

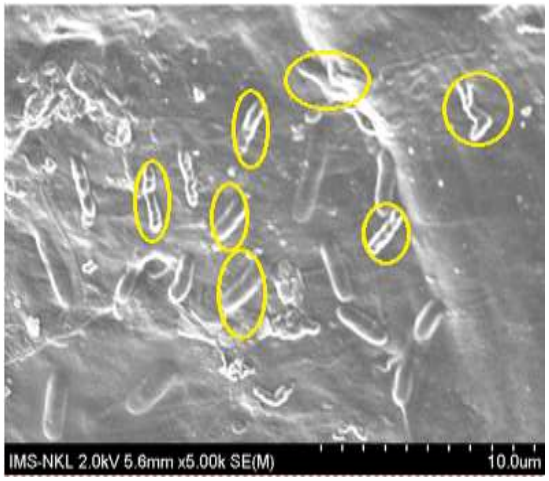
Chất nền ban đầu (trắng) Sau 7 ngày (vàng) Sau 15 ngày (nâu) Sau 30 ngày (nâu sẫm)

Hình 9. Sự thay đổi màu sắc của mẫu PEG0 theo thời gian nuôi cấy vi sinh vật.

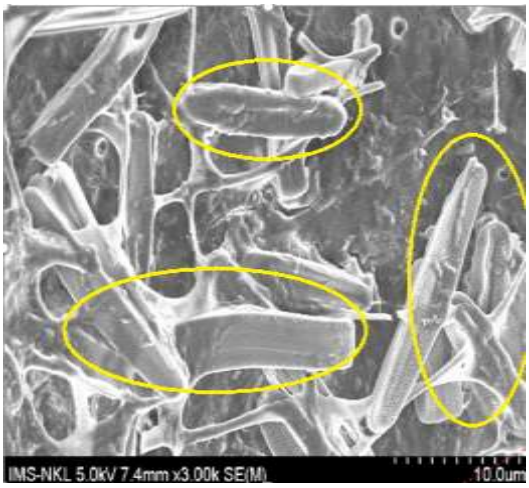
PEG0 PEG3

Hình 10. Các mẫu PEG0 và PEG3 sau 30 ngày hình thành màng sinh học vi khuẩn.

Để đánh giá sự phát triển sinh học trên bề mặt chất nền, ảnh SEM ở độ phóng đại 5000× (Hình 11) được sử dụng cho các mẫu PEG0 và PEG3. Kết quả cho thấy sự khác biệt rõ rệt về mật độ và mức độ bám dính của vi sinh vật. Mẫu PEG0 thể hiện sự bám dính hạn chế, trong khi PEG3 cho thấy mật độ vi khuẩn cao (ảnh vi khuẩn được khoanh tròn). Điều này được cho là sự cải thiện tính tương thích sinh học và độ ưa nước của bề mặt nhờ vào sự hiện diện đồng thời của PEgMA và PEO, từ đó thúc đẩy quá trình hấp phụ và phát triển sinh khối vi khuẩn.



PEG0



PEG3

Hình 11. Ảnh SEM bề mặt của các mẫu giá thể PEG0 và PEG3 sau 30 ngày thử nghiệm nuôi cấy vi sinh.

Bảng 5 cho thấy mức thay đổi khối lượng sau nuôi cấy sinh học phản ánh mức độ phát triển của vi sinh vật trên các nền vật liệu. Mẫu PEG0 có sự thay đổi khối lượng là 2,19%, trong khi PEG3 đạt mức cao nhất là 3,83%, cho thấy sự phát triển sinh khối vượt trội trên nền chứa PEgMA và PEO. Kết quả này phù hợp với ảnh SEM và phân tích sinh khối, xác nhận rằng việc sự có mặt của HDPE, PEgMA và PEO cải thiện đáng kể tính tương thích sinh học và độ ưa nước bề mặt – các yếu tố then chốt thúc đẩy sự bám dính và phát triển của vi khuẩn. Do đó, PEG3 được xác định là công thức tối ưu cho chế tạo nền giá thể sinh học.

Bảng 5. Sự bám dính của vi khuẩn sau 30 ngày trên các mẫu PEG0 và PEG3

Mẫu	Tỷ lệ phần trăm thay đổi trọng lượng (%kl)
PEG0	2,19
PEG3	3,83

3.2.3. Đánh giá tải lượng xử lý của giá thể xốp HDPE

Bảng 6 trình bày nồng độ các chất ô nhiễm trong nước thải sinh hoạt sau một ngày xử lý. Kết quả cho thấy, pH của nước sau xử lý tương đối cao ở mức 9,05 vượt ngưỡng chuẩn từ 5-9.

Bảng 6. Chất lượng nước thải xử lý sau 24 giờ

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	Cột A (QCVN 14:2008/BTNMT)
1	pH	-	9,05	5-9
2	BOD	mgO_2/l	77	30
3	TSS	mg/l	3	50
4	Amoni NH_4^+	mg/l	2,4	5
5	Nitrat (NO_3^-)	mg/l	36,7	30

Nồng độ BOD_5 là 77 mg O_2/L, cao hơn giới hạn quy định tại cột A của QCVN 14/2008/BTNMT là 47 mg O_2/L. Nồng độ tổng chất rắn lơ lửng (TSS) tương đối thấp, nằm trong giới hạn của QCVN 14/2008/BTNMT (30 mg/L), vì nước thải sinh hoạt thô từ bệnh viện có nồng độ TSS chỉ là 4 mg/L. Sau một ngày xử lý, nồng độ amoni giảm xuống còn 2,4 mg/L, chứng tỏ quá trình oxy hóa amoni của vi sinh vật tốt. Tuy nhiên, quá trình loại bỏ nitrat chậm hơn, dẫn đến nồng độ nitrat là 36,7 mg/L, cao hơn tiêu chuẩn quy định tại cột A của QCVN 14/2008/BTNMT.

Tải trọng hữu cơ (OLR) được tính toán là (41,5-2,4) x 240/1 ngày = 9384 mg/ngày.

• TLv = 9384/6 = 1564 mg/L.

Do đó, có thể tính toán rằng giá thể xốp PEG3 có thể hấp phụ 1564 mg chất ô nhiễm trên một lít nước thải mỗi ngày.

3.2.4. Đánh giá chất lượng nước thải sinh hoạt sau xử lý ở tuần thứ 2, 4, 6 và 8.

Bảng 7 trình bày kết quả phân tích nồng độ các chất ô nhiễm trong nước thải sinh hoạt sau khi xử lý bằng công nghệ MBBR kết hợp giá thể dạng xốp và vi sinh vật ở các thời điểm lần lượt là 2, 4, 6 và 8 tuần. Nồng độ các chất ô nhiễm được xác định theo Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia QCVN 01:2019/HY của tỉnh Hưng Yên áp dụng tại Bệnh viện Mắt Hưng Yên, theo công thức sau:

$C_{max} = C \times K \times K_{hy}$

Trong đó:

C_{max}: nồng độ tối đa cho phép đối với các chất ô nhiễm tại Bệnh viện Mắt Hưng Yên theo quy định tại QCVN 01:2019/HY.

C: Nồng độ cho phép của các chất ô nhiễm làm cơ sở tính toán Cmax theo QCVN 14:2008/BTNMT.

K: hệ số 1, áp dụng đối với Bệnh viện Mắt Hưng Yên - Thành phố Hưng Yên (tương ứng với các cơ quan, trường học, viện nghiên cứu có diện tích từ 10.000 m^2 trở lên).

K_{hy}: hệ số 0,95, áp dụng cho thành phố Hưng Yên.

Bảng 7. Chất lượng nước thải sinh hoạt theo thời gian xử lý

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Tuần 2	Tuần 4	Tuần 6	Tuần 8	QCĐP Hưng Yên (C_{max}=C x K x K_{hy})
1	pH	-	8,08	7,31	7,57	7,67	5-9
2	BOD	mgO_2/l	15	27	13	15	28,5
3	TSS	mg/l	3	3	2	3	47,5
4	Amoni NH_4^+	mg/l	2,10	1,75	0,68	0,08	4,75
5	Nitrat (NO_3^-)	mg/l	4,58	16,6	12,9	5,6	28,5

Sau 2 tuần xử lý, tất cả các thông số bao gồm pH, BOD, TSS, amoni và nitrat đều nằm trong giới hạn cho phép của QCVN 01:2019/HY. Nước thải sau xử lý có tính kiềm nhẹ (pH > 7) và tương đối ổn định trong suốt quá trình xử lý. Tổng chất rắn lơ lửng (TSS) cũng tương đối ổn định. Nồng độ amoni và nitrat giảm dần theo thời gian. Sau 8 tuần, nồng độ amoni còn lại là 0,08 mg/L và nồng độ nitrat còn lại là 5,6 mg/L. Hiệu suất loại bỏ amoni theo thời gian được tính theo công thức sau:

%H = 100% x (Co-Ct)/Co

Trong đó: H: hiệu suất loại bỏ (%)

Co: nồng độ amoni ban đầu (mg/L)

Ct: nồng độ amoni tại thời điểm t

Kết quả đánh giá hiệu suất loại bỏ amoni tại các thời điểm khác nhau cho thấy hiệu suất loại bỏ được cải thiện theo thời gian, từ 94,93% lên 99,80% tại mốc 8 tuần. Tốc độ tải BOD/NH_4^+ tăng nhanh và sau đó ổn định, đạt nồng độ vi khuẩn tương ứng với mức bão hòa. Với công suất loại bỏ cao này, có thể mở rộng công suất xử lý nước thải mà vẫn đáp ứng được yêu cầu nước thải đầu ra của QCĐP 01:2019/HY.

Vận hành mô hình ở lưu lượng 10 lít/giờ và đánh giá chất lượng nước thải tại các thời điểm khác nhau (2, 4, 6 và 8 tuần) cho thấy hiệu suất loại bỏ amoni cao, đạt 95% sau 2 tuần và gần 100% sau 8 tuần. Tất cả các thông số phân tích (pH, BOD, TSS, NH_4^+, nitrat) đều đáp ứng được yêu cầu của QCĐP 01:2019/HY.

4. Kết luận

Giá thể vi sinh trên nền HDPE đã được biến tính thành công bằng PEgMA và PEO nhằm cải thiện đặc tính ưa nước và khả năng tương thích sinh học. Vật liệu thu được có khối lượng riêng 0,61 g/cm³, độ xốp 40,48% và kích thước lỗ xốp phân bố trong khoảng 50–500 µm. Hệ thống MBBR sử dụng giá thể này cho thấy hiệu quả loại bỏ amoni đạt 99,8% sau 8 tuần xử lý nước thải tại Bệnh viện Mắt Hưng Yên, với các thông số pH, BOD, TSS, NH_4^+và NO_3^- đều đáp ứng tiêu chuẩn QCĐP 01:2019/HY. Kết quả khẳng định tiềm năng ứng dụng thực tiễn của hệ vật liệu giá thể xốp PE/PegMA/PEO trong xử lý nước thải sinh hoạt.

Lời cảm ơn

Công trình này được hỗ trợ kinh phí bởi Viện Kỹ thuật nhiệt đới (nay là Viện Khoa học vật liệu), Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Tài liệu tham khảo

[1] Almomani, R. R. Bohsale, Optimizing Nutrient Removal of Moving Bed Biofilm Reactor Process using Response Surface Methodology, Bioresource Technology, Vol. 305, 2020, pp. 123059.

[2] B. Rusten, L. J. Hem, H. Ødegaard, Nitrification of Municipal Wastewater in Moving-Bed Biofilm Reactors, Water Environ. Res., Vol. 67, 1995, pp. 75-86.

[3] V. Saravanan, T. R. Sreekrishnan, Modelling Anaerobic Biofilm Reactors - A Review, J. Environ, Manag., Vol. 81, 2006, pp. 1-18.

[4] B. Rusten, B. Eikebrokk, Y. Ulgenes, E. Lygren, Design and Operations of the Kaldnes Moving Bed Biofilm Reactors, Aquac. Eng., Vol. 34, 2006, pp. 322-331.

[5] J. P. Bassin, M. Dezotti, Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR), in: Advances in Biological Processes for Wastewater Treatment: Emerging and Consolidated Technologies, Springer International Publishing, 2017, pp. 37-74.

[6] I. D. Manariotis, S. G. Grigoropoulos, Anaerobic Filter Treatment of Municipal Wastewater: Biosolids Behavior, J. Environ. Eng.-ASCE, Vol. 132, 2006, pp. 23-31.

[7] L. S. Zhang, W. Z. Wu, J. L. Wang, Immobilization of Activated Sludge Using Improved Polyvinyl Alcohol (PVA) Gel, J. Environ. Sci., Vol. 19, 2007, pp. 1293-1297.

[8] M. X. Loukidou, A. I. Zouboulis, Comparison of Two Biological Treatment Processes Using Attached-Growth Biomass for Sanitary Landfill Leachate Treatment, Environ, Pollut., Vol. 111, 2001, pp. 273-281.

[9] S. Sfaelou, C. A. Papadimitriou, I. D. Manariotis, J. D. Rouse, J. Vakros, K. K. Karapanagioti, Treatment of Low-Strength Municipal Wastewater Containing Phenanthrene Using Activated Sludge and Biofilm Process, Desalination and Water Treatment, 2015, pp. 1-11.

[10] A. Aygun, B. Nas, A. Berktay, Influence of High Organic Loading Rates on COD Removal and Sludge Production in Moving Bed Biofilm Reactor, Environ. Eng. Sci., Vol. 25, 2008, pp. 1311-1316.

[11] J. L. Shore, W. S. M'Coy, C. K. Gunsch, M. A. Deshusses, Application of a Moving Bed Biofilm Reactor for Tertiary Ammonia Treatment in High Temperature Industrial Wastewater, Bioresour. Technol., Vol. 112, 2012, pp. 51-60.

[12] J. L. Shore, W. S. M'Coy, C. K. Gunsch, M. A. Deshusses, Application of a Moving Bed Biofilm Reactor for Tertiary Ammonia Treatment in High Temperature Industrial Wastewater, Bioresour. Technol., Vol. 112, 2012, pp. 51-60.

[13] M. Levstek, I. Plazl, J. D. Rouse, Estimation of the Specific Surface Area for a Porous Carrier, Acta Chim. Slov., Vol. 57, 2010, pp. 45-51.

[14] A. Mašić, J. Bengtsson, M. Christensson, Measuring and Modeling the Oxygen Profile in a Nitrifying Moving Bed Biofilm Reactor, Mathematical Biosciences, Vol. 227, 2010, pp. 1-11.

[15] D. Klempner, K. C. Frisch, Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology, Hanser, New York, 1991.

[16] Y. L. Huang, Q. B. Li, X. Deng, Y. H. Lu, X. K. Liao, M. Y. Hong, Y. Wang, Aerobic and Anaerobic Biodegradation of Polyethylene Glycols Using Sludge Microbes, Process Biochem., Vol. 40, No. 1, 2005, pp. 207-211, https://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.12.004.

[17] G. M. Gutenberger, O. M. Holgate, W. A. Arnold, J. S. Guest, P. J. Novak, Polyethylene Glycol as a Robust, Biocompatible Encapsulant for Two-Stage Treatment of Food and Beverage Wastewater, Environ. Sci.: Water Res. Technol., Vol. 2, No. 2, 2024, https://doi.org/10.1039/D3EW00633F.

[18] G. M. Gutenberger, O. M. Holgate, W. A. Arnold, J. S. Guest, P. J. Novak, Polyethylene Glycol as a Robust, Biocompatible Encapsulant for Two-Stage Treatment of Food and Beverage Wastewater, Environ. Sci.: Water Res. Technol., Vol. 2, No. 2, 2024, https://doi.org/10.1039/D3EW00633.

[19] S. G. Prasad, C. Lal, K. R. Sahu, A. Saha, U. De, Spectroscopic Investigation of Degradation Reaction Mechanism in γ-Rays Irradiation of HDPE, Biointerface Res. Appl. Chem., Vol. 11, No. 2, 2021, pp. 9405-9419, https://doi.org/10.33263/BRIAC112.94059419.

[20] X. He, L. Wang, K. Lv, W. Li, S. Qin, Z. Tang, Polyethylene Oxide Assisted Fish Collagen-Poly ε-Caprolactone Nanofiber Membranes by Electrospinning, Nanomaterials, Vol. 12, No. 6, 2022, pp. 900, https://doi.org/10.3390/nano12060900.