

XỬ LÝ NƯỚC THẢI NUÔI TÔM CÔNG NGHIỆP CÓ BỔ SUNG NITƠ-AMONI TẢI TRỌNG CAO BẰNG HỆ THỐNG SINH HỌC HIẾU KHÍ CẢI TIẾN N-SAFB

Lê Văn Tuấn

Khoa Môi trường, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế

Email: levantuan@hueuni.edu.vn

Ngày nhận bài: 14/4/2025; ngày hoàn thành phản biện: 21/4/2025; ngày duyệt đăng: 24/4/2025

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá hiệu quả của hệ thống sinh học hiếu khí cải tiến có lớp đệm ngập nước (N-SAFB, *novel - submerged aerated fixed bed*) trong xử lý nước thải nuôi tôm công nghiệp giàu nitơ vô cơ. Mô hình được chế tạo ở quy mô phòng thí nghiệm, với cấu hình lớp đệm ngập nước và đầu phun oxy F.BT-50. Hệ thống được vận hành trong 19 ngày, gồm 10 ngày khởi động và 9 ngày vận hành ở ba mức tải $\text{NH}_4^+\text{-N}$: 5,5; 19,4; và 31,6 g-N/m³/ngày, với thời gian lưu thủy lực 6 giờ. Kết quả cho thấy hệ thống đạt hiệu suất loại bỏ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ổn định, từ $80 \pm 17\%$ đến $93 \pm 7\%$, với nồng độ đầu ra dao động từ 0,10 đến 1,58 mg/L. Các chỉ tiêu BOD₅, SS và PO₄³⁻-P cũng được xử lý hiệu quả, lần lượt đạt 61–73%, 74–91% và 58–62%. Hệ thống thể hiện khả năng vận hành ổn định, duy trì DO ≥ 6 mg/L và không phát sinh hiện tượng bùn nổi. So với các mô hình xử lý trước đó, N-SAFB cho thấy khả năng thích nghi nhanh, hiệu quả cao và phù hợp ứng dụng trong nuôi thâm canh.

Từ khóa: hệ sinh học hiếu khí, SAFB, nước thải nuôi tôm, xử lý nitơ, tải trọng cao.

1. MỞ ĐẦU

Nuôi tôm công nghiệp, đặc biệt là loài tôm thẻ chân trắng (*Litopenaeus vannamei*), đang phát triển mạnh tại nhiều quốc gia Đông Nam Á nhờ khả năng tăng trưởng nhanh và hiệu quả kinh tế cao. Tuy nhiên, hình thức nuôi thâm canh với mật độ cao dẫn đến việc phát sinh một lượng lớn nước thải chứa các chất hữu cơ, amoni và phosphate – là nguyên nhân chính gây phú dưỡng nguồn tiếp nhận nếu không được xử lý hiệu quả [1], [2]. Trong điều kiện nhiệt đới như Việt Nam, amoni ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) có thể tích tụ nhanh chóng trong ao nuôi do phân thải, thức ăn dư thừa và quá trình phân giải, vượt ngưỡng độc đối với tôm và các loài sinh vật đáy [3].

Trong các công nghệ xử lý nước thải hiện nay, xử lý sinh học hiếu khí được đánh giá là phương pháp thân thiện và kinh tế, nhờ khả năng loại bỏ hữu cơ và nito thông qua quá trình nitrat hóa – khử nitrat và hấp thụ sinh học [4], [5]. Một hướng đi đầy hứa hẹn là ứng dụng công nghệ MBBR (*moving bed biofilm reactor*), vốn đã được phát triển mạnh mẽ trong thập kỷ qua cho các hệ thống tuần hoàn nuôi thủy sản (RAS) và nước thải giàu amoni [6], [7]. Các vật liệu MBBR với khả năng tự làm sạch, diện tích bề mặt lớn và khả năng duy trì mật độ vi sinh cao đã được chứng minh mang lại hiệu quả xử lý ổn định ngay cả trong điều kiện tải trọng cao [8], [9].

Bên cạnh đó, các yếu tố như cấu trúc hệ thống, dạng phân phối oxy, thời gian lưu thủy lực (HRT) và sự tương tác vi sinh – vi tảo cũng đóng vai trò quan trọng trong tối ưu hóa hiệu suất hệ thống sinh học [10], [11]. Mặc dù công nghệ MBBR đã được nghiên cứu rộng rãi trên thế giới, chẳng hạn như tại Trung Quốc [12], nhưng việc ứng dụng công nghệ này trong xử lý nước thải nuôi tôm công nghiệp có bổ sung nito ở tải trọng cao tại Việt Nam vẫn còn khá hạn chế. Đặc biệt trong bối cảnh nhiều nguồn nước thải thực tế thường chứa hàm lượng cao nito vô cơ hòa tan (DIN – *dissolved inorganic nitrogen*).

Mục tiêu của nghiên cứu là đánh giá hiệu quả xử lý nước thải nuôi tôm công nghiệp có bổ sung nito tải trọng cao bằng hệ thống sinh học hiếu khí cải tiến sử dụng vật liệu MBBR. Mô hình được thiết lập ở quy mô phòng thí nghiệm, tích hợp lớp đệm ngập nước và đầu phun F.BT-50 giúp khuếch tán oxy hiệu quả. Hiệu suất xử lý được theo dõi thông qua các chỉ tiêu SS, BOD₅, NH₄⁺-N và PO₄³⁻-P trong ba pha vận hành khác nhau. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ tiềm năng ứng dụng thực tiễn của công nghệ sinh học cải tiến trong xử lý nước thải thủy sản giàu dinh dưỡng tại Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mẫu nước thải

Nước thải sử dụng trong nghiên cứu được lấy từ nước thải xi phông vào lúc sáng (7 – 8 giờ, trong tháng 4, tháng 5 năm 2023) ở ao nuôi tôm thẻ chân trắng (*Litopenaeus vannamei*) thuộc xã Điền Hương, huyện Phong Điền, tỉnh Thừa Thiên Huế. Mẫu nước được lấy và chứa trong can HDPE (25 L), tổng thể 250 L, vận chuyển về phòng thí nghiệm Môi trường (Trường ĐH Khoa học – Đại học Huế). Nước được bảo quản tránh ánh sáng, sục khí nhẹ nhằm hạn chế lắng và duy trì tảo tự nhiên. Các mẫu đầu vào cho các thực nghiệm được phân tích các đặc trưng chất lượng nước trong vòng 24 giờ và bổ sung cơ chất, dinh dưỡng phù hợp cho các khảo sát.

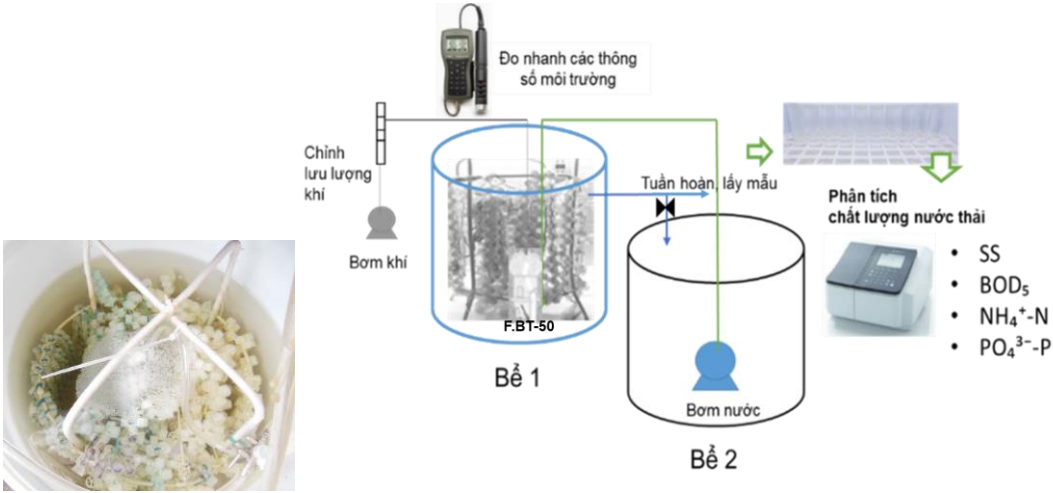
Để vận hành ở điều kiện tải trọng amoni cao, hàm lượng NH₄⁺-N trong nước thải được đo đạc kỹ và điều chỉnh bằng cách bổ sung amoni clorua (NH₄Cl, độ tinh khiết ≥ 99%, Sigma-Aldrich) nhằm đạt các mức tải trọng mong muốn từ 5,5 – 31,6g NH₄⁺-

N/m³/ngày. Đây là khoảng tải trọng tương ứng với mức cao trong hệ thống nuôi tuần hoàn và thâm canh theo các nghiên cứu trước [3], [6], [7].

2.2. Hệ thống N-SAFB

Mô hình hệ thống sinh học hiếu khí có lớp đệm ngập nước cải tiến (N-SAFB, *novel - submerged aerated fixed bed*) được bố trí quy mô phòng thí nghiệm, ngoài trời, với thể tích làm việc 15 L. Bể phản ứng bằng nhựa trụ đứng, chứa vật liệu MBBR dạng hạt (polyetylen, liên kết bằng sợi len), chiếm khoảng 25% thể tích bể. Không gian lọc được giữ ngập hoàn toàn.

Hệ thống được cấp khí liên tục bằng đầu phun khí F.BT-50, bố trí tại 1/3 đáy bể, lưu lượng khí ~0,6 L/phút, giúp phân tán oxy đồng đều và duy trì nồng độ DO ≥ 3 mg/L. Hệ thống vận hành tuần hoàn kín với thời gian lưu thủy lực (HRT) cố định 6 giờ [6]. Nhiệt độ môi trường dao động từ 27–30°C, pH ổn định 7,2 ± 0,2 và độ mặn 24–25‰.



Hình 1. Bố trí hệ thống sinh học hiếu khí cải tiến (N-SAFB)

Bảng 1. Thông số kỹ thuật hệ thống sinh học hiếu khí cải tiến (N-SAFB)

Hạng mục	Giá trị	Ghi chú	Đơn vị
Tên hệ thống	N-SAFB	Lọc sinh học hiếu khí có lớp đệm ngập	–
Cấu hình 2 bể	B1 (phản ứng), B2 (tuần hoàn)	Kết nối bằng bơm hồi lưu và ống xả tràn	–
Thể tích tổng mỗi bể	25	Kích thước vật lý giống nhau	L
Thể tích làm việc	15	Hiệu dụng cho cả B1 và B2	L
Kích thước bể	Ø30 × H100	Nhựa trụ đứng	cm
Vật liệu lọc (B1)	370 g (~25%)	Hạt kaldnes, diện tích ~500 m ² /m ³ , nối bằng sợi len	–
Sục khí (B1)	F.BT-50, 0,6	Đặt 1/3 đáy bể	L/phút
DO (B1)	≥ 3.0	Duy trì ổn định toàn bộ chu trình	mg/L
pH hệ thống	7,2 ± 0,2	Đo tại đầu vào và đầu ra	–
HRT – Q (B1)	6 – 0,25	Thời gian lưu – lưu lượng tuần hoàn	h – L/h

Hạng mục	Giá trị	Ghi chú	Đơn vị
Vận hành	10 + 3×3	Khởi động 10 ngày + 3 pha nâng tải trọng nito, mỗi pha 3 ngày	ngày

2.3. Bố trí thí nghiệm thay đổi tải trọng $\text{NH}_4^+\text{-N}$

Thí nghiệm được tiến hành sau giai đoạn khởi động 10 ngày (Pha 1), với mục tiêu tạo lớp biofilm bám trên vật liệu MBBR. Sau đó, hệ thống được vận hành liên tục qua 3 pha tải trọng khác nhau, mô phỏng điều kiện thực tế của nước thải nuôi tôm công nghiệp có bổ sung amoni. Trong giai đoạn khởi động và thí nghiệm, để hỗ trợ phát triển vi sinh vật, nước thải được bổ sung định kỳ chế phẩm vi sinh (3 mL/15L/ngày trong 10 ngày đầu, pha 1) và điều chỉnh tỷ lệ C:N = 4:1 bằng mật rỉ đường.

Nồng độ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ đầu vào được điều chỉnh bằng NH_4Cl tinh khiết. Thông tin chi tiết các pha thí nghiệm, nồng độ đầu vào và tải trọng amoni tương ứng được trình bày tại Bảng 2.

Bảng 2. Các pha vận hành và tải trọng amoni của hệ thống N-SAFB

Pha	Mô tả	Nồng độ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/L)	^(*) Tải trọng $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (g-N/m ³ /ngày)
Pha 1	Khởi động (thích nghi)	1,40	5,60
Pha 2.1	Tải thấp – ổn định	1,37 ± 0,03	5,48
Pha 2.2	Tải trung bình	4,86 ± 0,03	19,44
Pha 2.3	Tải cao	7,90 ± 0,10	31,60

(*)Tải trọng $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (g-N/m³/ngày) được xác định theo công thức (2)

2.4. Phân tích chất lượng nước và xử lý dữ liệu

Các thông số phân tích bao gồm: chất rắn lơ lửng (SS), nhu cầu oxy sinh hóa (BOD_5), amoni ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), phosphat ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$), pH, DO, nhiệt độ, độ mặn và mật độ tảo. Trong đó, các thông số pH, DO, nhiệt độ và độ mặn được đo nhanh tại hiện trường bằng thiết bị đa chỉ tiêu Horiba U-50 (Horiba Ltd., Nhật Bản), hiệu chuẩn trước mỗi lần đo.

Các mẫu nước được lấy tại đầu vào và đầu ra của hệ thống vào buổi sáng (7h30–8h), ngay sau khi bắt đầu một chu kỳ xử lý. Mẫu được bảo quản lạnh, tối ở 4°C và phân tích trong vòng 24 giờ.

Các thông số được phân tích theo APHA – 23rd Edition (2017) [13], cụ thể: $\text{NH}_4^+\text{-N}$: đo bằng phương pháp Nessler (4500-NH₃ F). Mẫu được kiềm hóa, thêm thuốc thử Nessler, đo quang ở bước sóng 425 nm bằng máy quang phổ UV-Vis. $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$: xác định bằng phương pháp ascorbic acid (4500-P E), đo tại bước sóng 880 nm. SS (chất rắn lơ lửng): theo phương pháp cân xác định khối lượng 2540 D. BOD_5 : Mẫu được ủ kín 5 ngày

ở 20°C trong chai thủy tinh có dung tích 300 mL, đo DO đầu và cuối bằng thiết bị đo DO. Mật độ tảo: đếm trực tiếp bằng buồng đếm Neubauer, không nhuộm màu. Mẫu được lấy trực tiếp từ bể phản ứng (B1), lắc đều và nhỏ vào buồng đếm. Đếm dưới kính hiển vi quang học với độ phóng đại 400×, tính số lượng tế bào/mL.

Hiệu suất (H, %) xử lý từng chỉ tiêu được tính theo công thức (1):

$$H = \left(\frac{C_0 - C}{C_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

Với C_0 là nồng độ đầu vào và C là nồng độ đầu ra (mg/L).

Tải trọng N-NH₄ (g-N/m³/ngày) được tính theo công thức (2):

$$L = \frac{Q \times C_0}{V} \times 10^{-3} \quad (2)$$

Với Q là lưu lượng đầu vào (m³/ngày), V là thể tích bể phản ứng (m³), C_0 là nồng độ đầu vào của N-NH₄ (mg/L hay g/m³).

Dữ liệu được xử lý bằng Microsoft Excel. Giá trị các chỉ tiêu được biểu diễn dưới dạng trung bình ± độ lệch chuẩn (SD).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Chất lượng nước thải đầu vào

Nguồn nước sử dụng trong nghiên cứu được lấy từ bể tuần hoàn của ao nuôi tôm thẻ chân trắng (*Litopenaeus vannamei*) 60 ngày tuổi tại xã Điền Hương, huyện Phong Điền, Thừa Thiên Huế (mật độ thả 200 con/m²). Kết quả phân tích các mẫu nước (Bảng 3) phản ánh điều kiện nuôi tôm thâm canh điển hình, có chế độ dinh dưỡng cao [14, 15].

Bảng 3. Một số thông số chất lượng nước thải nuôi tôm và khoảng thích nghi của tôm

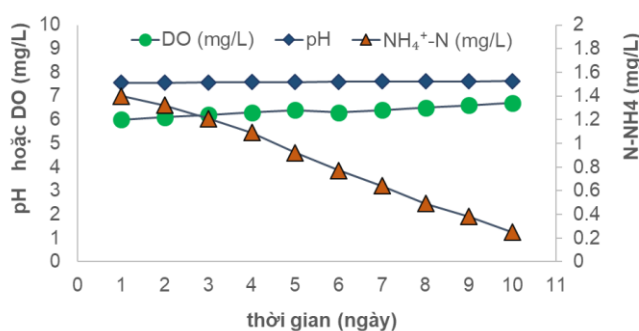
Thông số	Giá trị trung bình	Khoảng thích nghi	Nguồn	Đánh giá
pH	7,59	7,4 – 8,2	[14]	Phù hợp
Nhiệt độ (°C)	28	28 – 31	[14]	Tối ưu
Độ mặn (‰)	25	20 – 30 (isosmotic ~24,7)	[14]	Tốt
DO (mg/L)	6,6 ± 0,7	4 – 8 (85–105% saturation)	[15]	Tốt
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	1,40 ± 0,00	< 1, < 0,1 (tối ưu sinh lý)	[15]	Cao – độc NH ₃
PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)	0,61 ± 0,00	<0,4 (tránh phú dưỡng)	[14]	Cao – dễ kích thích tảo phát triển

Thông số	Giá trị trung bình	Khoảng thích nghi	Nguồn	Đánh giá
NO ₂ ⁻ -N (mg/L)	0,04 ± 0,04	<1 (lý tưởng), <10 (chịu đựng)	[14], [15]	An toàn
Tảo (tb/mL)	1,6 × 10 ⁶	<10 ⁵ tb/mL	[14]	Rất cao – mất cân bằng sinh học

Mặc dù các yếu tố vật lý như pH, nhiệt độ, độ mặn và DO đều nằm trong phạm vi thích hợp cho sinh trưởng và miễn dịch của *L. vannamei*, tải dinh dưỡng trong nước đầu vào rất cao – đặc biệt là NH₄⁺-N và PO₄³⁻-P. Với pH ~7,6 và nhiệt độ 28°C, khoảng 2,18% tổng TAN được chuyển hóa thành NH₃ không ion hóa – dạng độc sinh học chủ yếu với tôm. Điều này tương ứng với khoảng 0,03 mg/L NH₃, tiệm cận ngưỡng gây stress mạn tính (>0,05 mg/L) theo khuyến cáo của Samocha & Prangnell [15]. Cùng với đó, mật độ tảo cao phản ánh tình trạng phú dưỡng thứ cấp, dễ dẫn đến dao động pH và tiêu thụ oxy vào ban đêm – ảnh hưởng đến ổn định sinh thái ao nuôi. Đây là hậu quả điển hình của mô hình nuôi thâm canh sử dụng khẩu phần đậm đặc cao, nhưng thiếu kiểm soát DIN và photpho hòa tan. Nếu không được xử lý phù hợp, loại nước thải giàu dinh dưỡng này khi xả thải ra môi trường có thể gây ra hiện tượng phú dưỡng ven bờ, mất cân bằng hệ vi sinh vật nước mặn, và suy giảm chất lượng vùng nuôi kế cận lẫn nguồn nước biển ven bờ. Do đó, việc phát triển và đánh giá hiệu quả của một hệ thống xử lý sinh học cải tiến, có khả năng giảm nhanh NH₄⁺-N trong điều kiện tải cao, đồng thời duy trì tính tuần hoàn và tiết kiệm năng lượng, là cần thiết và có ý nghĩa thực tiễn lớn trong bối cảnh quản lý nước thải thủy sản hiện nay.

3.2. Kết quả vận hành pha 1 – Khởi động hệ thống

Giai đoạn khởi động (Pha 1) kéo dài 10 ngày, được thiết kế nhằm tạo điều kiện thuận lợi cho sự phát triển biofilm trên vật liệu MBBR, đồng thời kiểm tra tính ổn định ban đầu của hệ thống ở tải trọng thấp. Biến động các thông số chính gồm NH₄⁺-N, DO, và pH được trình bày trong Hình 2.



Hình 2. Biến động các thông số $\text{NH}_4^+\text{-N}$, DO, và pH ở pha khởi động (10 ngày)

Nồng độ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ giảm rõ rệt từ 1,40 xuống 0,25 mg/L, tương đương hiệu suất loại bỏ khoảng 82,1%. Diễn biến này phản ánh quá trình nitrat hóa bắt đầu được kích hoạt tốt, với tốc độ loại bỏ tăng dần từ ngày thứ 3 trở đi – phù hợp với thời gian đáp ứng sinh học điển hình khi sử dụng vật liệu lọc sinh học có bề mặt lớn ($> 500 \text{ m}^2/\text{m}^3$) [14]. Đồng thời, nồng độ oxy hòa tan (DO) duy trì trong khoảng 6,0–6,7 mg/L trong toàn bộ pha, vượt mức yêu cầu tối thiểu cho sinh vật hiếu khí ($\geq 4,0 \text{ mg/L}$) [15]. Điều này xác nhận hiệu quả của đầu phun F.BT-50 trong việc cung cấp oxy phân tán mịn. Giá trị pH ổn định trong khoảng 7,55–7,63, cho thấy khả năng đệm pH tốt của nguồn nước đầu vào. Ngoài ra, mật độ tảo giảm dần từ $1,6 \times 10^6$ xuống còn $7,5 \times 10^5$ tế bào/mL, tương đương giảm 50%. Sự suy giảm này có thể do cạnh tranh dinh dưỡng với vi sinh dị dưỡng, cũng như ảnh hưởng của DO. Theo [15], nồng độ DO cao và ổn định có thể hạn chế ưu thế sinh trưởng của nhóm tảo xanh lam hoặc tảo đơn bào nhạy sáng.

Pha khởi động cho thấy hệ thống có khả năng thích nghi nhanh, phát triển hệ vi sinh ổn định, duy trì DO tốt và kiểm soát tải $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ban đầu hiệu quả. Đây là cơ sở để tiếp tục đánh giá hệ thống ở các mức tải trọng nitơ cao hơn trong các pha kế tiếp.

3.3. Hiệu suất xử lý ở ba mức tải trọng $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (Pha 2.1 $\rightarrow$ 2.3)

Sau pha khởi động, hệ thống N-SAFB được vận hành qua ba pha tải trọng tăng dần, với nồng độ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ đầu vào lần lượt là 1,37; 4,86 và 7,90 mg/L, tương ứng với tải trọng 5,5; 19,4 và 31,6 g-N/m³/ngày (Bảng 2). Mỗi pha vận hành liên tục trong 3 ngày, không tuần hoàn nước đầu ra, và các chỉ tiêu được theo dõi hằng ngày tại đầu vào – đầu ra. Dữ liệu trình bày trong Bảng 4 là trung bình từ 3 mẫu phân tích/pha, thể hiện dưới dạng giá trị trung bình $\pm$ độ lệch chuẩn (SD).

Bảng 4. Hiệu quả xử lý nước thải tại ba mức tải trọng $\text{NH}_4^+\text{-N}$

Chỉ tiêu	Pha 2.1	Pha 2.2	Pha 2.3
	(5,5 g-N/m ³ /ngày)	(19,4 g-N/m ³ /ngày)	(31,6 g-N/m ³ /ngày)
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ ra (mg/L)	$0,10 \pm 0,07$	$0,58 \pm 0,13$	$1,58 \pm 0,37$
Hiệu suất $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (%)	93 ± 7	88 ± 10	80 ± 17
BOD ₅ ra (mg/L)	12,96	15,36	18,72
Hiệu suất BOD ₅ (%)	73 ± 7	68 ± 8	61 ± 10
SS ra (mg/L)	6,59	10,98	19,03
Hiệu suất SS (%)	91 ± 5	85 ± 6	74 ± 9
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ra (mg/L)	0,232	0,250	0,256
Hiệu suất $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (%)	62 ± 3	59 ± 4	58 ± 5

Kết quả cho thấy hệ thống duy trì hiệu suất xử lý $\text{NH}_4^+\text{-N}$ rất cao, với nồng độ đầu ra chỉ còn $\sim 0,1$ mg-N/L ở pha tải thấp và dưới 2 mg-N/L ngay cả khi tải đạt 31,6 g/m³/ngày. Điều này phản ánh hoạt tính sinh học ổn định và năng lực thích ứng tốt của hệ vi sinh vật trên vật liệu MBBR, được hỗ trợ bởi điều kiện hiếu khí tối ưu ($\text{DO} \geq 6$ mg/L) và cơ chế tiếp xúc nhờ dòng phân tán mịn từ đầu phun F.BT-50.

Hiệu suất xử lý BOD_5 và SS mặc dù có xu hướng giảm nhẹ khi tải tăng, nhưng vẫn ở mức khá cao ($>60\%$ và $>74\%$) ở pha tải nặng, cho thấy hệ thống vẫn duy trì năng lực phân hủy hữu cơ và giữ bùn tốt. Riêng $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ có hiệu suất xử lý khá ổn định (60%), phản ánh giới hạn của hệ hiếu khí đơn thuần trong việc hấp thụ P, vốn cần các vi sinh vật tích lũy polyphosphate (PAOs) hoạt động trong điều kiện thiếu khí [14]. So với nhiều hệ bùn hoạt tính truyền thống hoặc biofilter đơn lớp, mô hình N-SAFB cho thấy ưu thế vượt trội về hiệu suất loại $\text{NH}_4^+\text{-N}$, khả năng vận hành ở HRT ngắn (6 giờ), không tích tụ bùn nổi, và ổn định theo thời gian.

3.4. So sánh và thảo luận với một số nghiên cứu khác

Hiệu suất xử lý nito amoni ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) của hệ thống N-SAFB đạt từ $80 \pm 17\%$ đến $93 \pm 7\%$ tại ba mức tải trọng khác nhau (5,5–31,6 g-N/m³/ngày), với nồng độ đầu ra dao động 0,10–1,58 mg/L (Bảng 4). Các giá trị này cho thấy mức độ loại bỏ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ rất tốt, ngay cả khi hệ thống vận hành ở tải trọng cao gấp 5–6 lần so với đầu vào thực tế của nước thải tôm công nghiệp. Khi so sánh với các nghiên cứu khác, hiệu suất này là tương đương hoặc vượt trội.

Nghiên cứu của Poon et al. (2010) [6] ghi nhận hiệu suất loại $\text{NH}_4^+\text{-N}$ khoảng 85% tại tải trọng 15–20 g-N/m³/ngày trong hệ thống MBBR vận hành bán liên tục, với vật liệu K1 (AnoxKaldnes). Trong khi đó, Gupta & Bhargava (2017) [7] chỉ đạt hiệu suất 72–78% tại tải trọng 25 g-N/m³/ngày, khi dùng MBBR truyền thống trong xử lý nước thải công nghiệp giàu amoni. Như vậy, hệ thống N-SAFB trong nghiên cứu này vẫn duy trì hiệu suất ổn định ở tải trọng cao hơn, chứng minh được tính linh hoạt của cấu hình lớp đệm ngập + đầu phân tán khí mịn. So với hệ bùn hoạt tính truyền thống (ASP), mức hiệu suất từ 70–85% với $\text{HRT} \geq 8$ giờ thường được báo cáo tại tải trọng thấp hơn (<20 g-N/m³/ngày) [3], [9]. Bên cạnh đó, ASP còn gặp hạn chế trong kiểm soát bùn lơ lửng và dễ bị sốc tải, điều mà hệ thống biofilm như N-SAFB có thể khắc phục nhờ vi sinh vật bám dính và cấu trúc ổn định [11]. Ngoài hiệu suất $\text{NH}_4^+\text{-N}$, hệ thống trong nghiên cứu này còn duy trì hiệu suất xử lý $\text{BOD}_5 > 60\%$ và $\text{SS} > 70\%$ trong cả ba pha, phù hợp với khuyến nghị của FAO cho nước tái sử dụng trong nuôi thủy sản [15]. Hiệu suất $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ thấp hơn ($\sim 58\text{--}62\%$) là đặc điểm thường thấy trong hệ thống hiếu khí không có pha thiếu khí. Điều này cũng phù hợp với quan sát của Vinatea et al. (2022) [14], cho thấy xử lý photpho hiệu quả đòi hỏi cấu hình AO hoặc vi khuẩn PAO chuyên biệt.

Hệ N-SAFB thể hiện rõ ưu thế về hiệu suất, tính ổn định, khả năng chống sốc tải, và thời gian khởi động nhanh. Đây là mô hình phù hợp với các hệ thống tuần hoàn nuôi

thủy sản mật độ cao, đặc biệt trong điều kiện nước giàu DIN như nuôi tôm thẻ công nghiệp, góp phần giảm tải ra môi trường và nâng cao hiệu quả sử dụng nước.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã chứng minh hiệu quả của hệ thống N-SAFB sử dụng vật liệu MBBR trong xử lý nước thải nuôi tôm công nghiệp có bổ sung nitơ ở tải trọng cao. Với cấu hình lớp đệm ngập nước và đầu phun oxy F.BT-50, hệ thống đạt hiệu suất xử lý $\text{NH}_4^+\text{-N}$ vượt trội (80–93%) trong điều kiện tải trọng dao động từ 5,5 đến 31,6 g/m³/ngày, với nồng độ đầu ra dao động 0,10–1,58 mg/L. Đồng thời, các chỉ tiêu BOD₅, SS và $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ cũng được xử lý hiệu quả (trên 60%), khẳng định khả năng loại bỏ chất hữu cơ và chất rắn tốt của hệ thống. Hệ thống khởi động nhanh, vận hành ổn định, duy trì DO ≥ 6 mg/L và không phát sinh hiện tượng bùn nổi. Điều này cho thấy sự tương thích cao giữa vật liệu MBBR, cấu trúc vận hành và điều kiện hiếu khí, đặc biệt trong bối cảnh nuôi thâm canh với nguồn nước thải giàu DIN. So sánh với các nghiên cứu trước cho thấy hiệu suất xử lý của N-SAFB tương đương hoặc vượt nhiều mô hình MBBR hoặc ASP đã công bố. Kết quả nghiên cứu khẳng định tiềm năng ứng dụng thực tiễn của hệ thống N-SAFB trong xử lý nước thải nuôi tôm công nghiệp, hướng đến mục tiêu giảm ô nhiễm dinh dưỡng, tuần hoàn nước và phát triển nuôi trồng thủy sản bền vững tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Boopathy, R. (2009). Biological treatment of shrimp production wastewater. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 36(7), 989–995.
- [2] Milagres, T. G., Owatari, M. S., Dutra, S. A. P., & Silva, E. (2024). Sequencing batch biofilm reactor (SBBR) for the treatment of effluents from *Penaeus vannamei* cultivated under biofloc conditions. *Aquaculture and Environment Management*.
- [3] Hai, T. M., Tung, N. T., Duong, N. T., Tu, N. C., & Quan, N. T. (2023). The effects of ammonium loading rates and salinity on ammonium treatment of wastewater from super-intensive shrimp farming. *Vietnam Journal of Science and Technology*.
- [4] Fleckenstein, L. J., Tierney, T. W., Fisk, J. C., & Ray, A. J. (2020). The effects of different solids and biological filters in intensive Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production systems. *Aquacultural Engineering*, 88, 102052.
- [5] Patil, P. K., Antony, L., Avunje, S., Viswanathan, B., & Lalitha, N. (2021). Bioaugmentation with nitrifying and denitrifying microbial consortia for mitigation of nitrogenous metabolites in shrimp ponds. *Aquaculture*, 542, 736914.
- [6] Shitu, A., Liu, G., Muhammad, A. I., & Zhang, Y. (2022). Recent advances in application of moving bed bioreactors for wastewater treatment from recirculating aquaculture systems: A review. *Aquaculture and Fisheries*, 7(5), 227–238.

- [7] Zheng, H., Luo, G., Abakari, G., Lv, G., Tan, H., & Liu, W. (2023). Effect of seeding biofloc on the nitrification establishment in moving bed biofilm reactor (MBBR). *Aquaculture and Fisheries*, 8(3), 227–233.
- [8] Metcalf & Eddy, Inc. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education. ISBN: 9780073401188
- [9] Gao, Y., Wang, X., Li, J., Lee, C. T., Ong, P. Y., & Zhang, Z. (2020). Effect of aquaculture salinity on nitrification and microbial community in moving bed bioreactors with immobilized microbial granules. *Bioresource Technology*, 307, 123243.
- [10] Liu, D., Li, C., Guo, H., Kong, X., Lan, L., Xu, H., Zhu, S., & Ye, Z. (2019). Start-up evaluations and biocarriers transfer from a trickling filter to a moving bed bioreactor for synthetic mariculture wastewater treatment. *Chemosphere*, 222, 741–748.
- [11] Chen, M., Zhu, X., Yan, D., Teng, Y., Zhang, G., Li, Y., Chen, Q., Jiao, Y., Xie, X., & Li, S. (2025). Effects of C/N ratio on performance, enzyme activity and microbial community in a bacteria–algal symbiotic MBBR for mariculture wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(2), 115820.
- [12] Song, C., Zhao, C., Wang, Q., Lu, S., She, Z., & Zhao, Y. (2021). Impact of carbon/nitrogen ratio on the performance and microbial community of sequencing batch biofilm reactor treating synthetic mariculture wastewater. *Journal of Environmental Management*, 293, 112871.
- [13] American Public Health Association (APHA). (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). APHA, AWWA, WEF.
- [14] Vinatea, L. et al. (2022). *Water Quality for Shrimp Aquaculture*. In: *Sustainable Biofloc Systems for Marine Shrimp*. Academic Press.
- [15] Samocha, T.M., & Prangnell, D.I. (2020). Chapter 7 – Water Quality Management. In: *Sustainable Biofloc Systems for Marine Shrimp*. Academic Press.

TREATMENT OF HIGH- AMMONIUM NITROGEN LOAD SHRIMP AQUACULTURE WASTEWATER USING AN IMPROVED AEROBIC BIOLOGICAL SYSTEM N-SAFB

Le Van Tuan

Faculty of Environmental Science, University of Sciences, Hue University

Email: levantuan@hueuni.edu.vn

ABSTRACT

This study comprehensively evaluates the treatment efficiency of a novel submerged aerated fixed-bed (N-SAFB) aerobic biological system, specifically designed to remove high concentrations of inorganic nitrogen from industrial shrimp aquaculture wastewater. The laboratory-scale model was designed as a submerged biofilm configuration and equipped with a fine-bubble oxygen diffuser (F.BT-50). The system was operated for 19 days, including a 10-day startup phase and 9 days of operation at three ammonium ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) loading rates—5.5, 19.4, and 31.6 $\text{g/m}^3\text{/day}$ —with a fixed hydraulic retention time (HRT) of 6 hours. The results indicated that the system achieved stable $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal efficiencies ranging from $80 \pm 17\%$ to $93 \pm 7\%$, yielding effluent concentrations between 0.10 and 1.58 mg/L . In addition, removal efficiencies for BOD_5 , suspended solids (SS), and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ were satisfactory, ranging from 61% to 73%, 74% to 91%, and 58% to 62%, respectively. The system demonstrated robust operation by maintaining DO levels of $\geq 6 \text{ mg/L}$ throughout the testing period, with no sludge flotation observed. Compared to previous treatment models, the N-SAFB exhibited rapid acclimation, high removal efficiency, and strong applicability for intensive aquaculture operations.

Keywords: aerobic biological system, high nitrogen loading, SAFB, nitrogen removal, shrimp aquaculture wastewater.



Lê Văn Tuấn sinh năm 1981. Ông tốt nghiệp Cử nhân Hóa học (2003), Thạc sĩ Khoa học Môi trường (2008) và Tiến sĩ Khoa học và Kỹ thuật môi trường (2014). Hiện nay, ông công tác giảng dạy ở Khoa Môi trường, Trường ĐHKH, ĐH Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: Quan trắc Môi trường; Hóa học Môi trường; Vi sinh môi trường; Kỹ thuật môi trường.