

ẢNH HƯỞNG NỒNG ĐỘ ĐẠM VÀ LÂN ĐẾN HIỆU SUẤT XỬ LÝ NƯỚC THẢI SAU BIOGAS CỦA BÈO TAI CHUỘT (*Salvinia molesta*)

Tôn Thiên Giáp¹, Võ Thị Phương Thảo¹, Nguyễn Ngọc Hân¹,
Phạm Ngọc Hân¹, Lê Minh Duy¹, Trần Khánh Vi¹, Ngô Thụy Diễm Trang^{1,*}

¹ Khoa Môi trường và Tài nguyên thiên nhiên, Đại học Cần Thơ

*Email: ntdtrang@ctu.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu được thực hiện nhằm xác định tiềm năng xử lý nước thải sau biogas của bèo tai chuột (*Salvinia molesta*). Thí nghiệm được bố trí trong điều kiện nhà lưới với 6 nghiệm thức là tỷ lệ pha loãng nước thải sau biogas (NT) từ hộ chăn nuôi heo với nước sông (NS) bao gồm: 5% NT + 95% NS (NT1), 10% NT + 90% NS (NT2), 20% NT + 80% NS (NT3), 30% NT + 70% NS (NT4), 40% NT + 60% NS (NT5) và 50% NT + 50% NS (NT6). Các nghiệm thức được bố trí hoàn toàn ngẫu nhiên với 3 lần lặp lại. Mật độ bèo 158 g/thùng (tương đương với 158 g cho 0,15 m² diện tích xử lý) được áp dụng để xử lý nước thải với thể tích mỗi thùng là 35 L (25 cm). Thời gian lưu nước trong hệ thống được thiết lập 15 ngày và mẫu nước được thu định kỳ 5 ngày/lần. Sau 15 ngày vận hành, các chỉ tiêu chất lượng nước đầu ra gồm: pH, COD, TP đều đạt trong giới hạn cho phép theo QCVN 62:2025/BTNMT (cột B). Hiệu suất xử lý COD của các nghiệm thức NT1, NT2, NT3, NT4, NT5, NT6 lần lượt đạt 77,2; 72,1; 79,4; 75,6; 82,8; 72,5%. Tương tự, hiệu suất loại bỏ tổng đạm vô cơ (TIN) đạt 98,1; 98,4; 98,8; 99,0; 99,1; 98,6% và TP được loại bỏ với hiệu suất tương ứng là 96,5; 86,6; 98,3; 96,3; 98,1; 90,3%. Trong đó, NT3, NT4, NT5 cho hiệu quả xử lý đồng thời COD, TIN và TP tốt nhất. Điều này cho thấy, nồng độ đầu vào khoảng 216,0 - 248,0 mg COD/L, 13,9 - 29,7 mg TIN/L và 5,2 - 8,3 mg TP/L của NT3, NT4, NT5 là tối ưu cho hoạt động hấp thu của bèo tai chuột cũng như các quá trình vi sinh vật cộng sinh, giúp hệ thống vận hành ổn định và đạt hiệu quả xử lý vượt trội. Khối lượng tươi bèo tăng gấp 2,08 - 2,18 lần sau 15 ngày và các tỷ lệ pha loãng không ảnh hưởng đến sinh trưởng của cây. Xử lý bằng bèo tai chuột là giải pháp sinh học hiệu quả, chi phí thấp, dễ áp dụng cho hộ gia đình đồng bằng sông Cửu Long trong mô hình VACB.

Từ khóa: Bèo tai chuột, đạm, hiệu suất xử lý, nước thải biogas, lân.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mô hình vườn - ao - chuồng - biogas (VACB) được khuyến khích tại Việt Nam để thúc đẩy nông nghiệp tuần hoàn bền vững, tận dụng chất thải chăn nuôi sản xuất khí sinh học (biogas) và giảm ô nhiễm môi trường. Theo Nguyễn Trọng Tuyển (2024) [1], có khoảng 35% hộ chăn nuôi xử lý chất thải bằng biogas, tuy nhiên, nước thải sau biogas vẫn chứa nhiều chất ô nhiễm hữu cơ và dinh dưỡng. Nghiên cứu của Nguyễn Trí Thức và cs (2020) [2] ghi nhận, hàm lượng TKN và TP trong nước sau túi biogas lần lượt là 213,97 và 135,41

mg/L, cao hơn so với QCVN 62:2016/BTNMT [3], là nguyên nhân làm suy giảm chất lượng nguồn nước tiếp nhận nếu không xử lý triệt để [4].

Giải pháp dùng thực vật thủy sinh nổi như: Lục bình, bèo tai tượng, bèo tấm được ưa chuộng do chi phí thấp, dễ áp dụng và thân thiện môi trường, với hiệu quả hấp thu chất ô nhiễm cao [2]. Bèo tai chuột (*Salvinia molesta*) là một loài dương xỉ nước nổi có nguồn gốc Nam Mỹ, được xem là thực vật thủy sinh tiềm năng trong xử lý nước thải nhờ tốc độ sinh trưởng nhanh, khả năng tái sinh mạnh và hệ rễ chùm phát triển, có khả năng hấp

thu hiệu quả các chất ô nhiễm mà vẫn đảm bảo ánh sáng xuyên qua cột nước, hạn chế nguy cơ che phủ bề mặt [5]. Kết quả nghiên cứu của Ahmad và cs (2017) [6] ghi nhận, bèo tai chuột đạt mức giảm 49,7% độ màu và 100% COD trong nước thải nhà máy giấy, khẳng định hiệu suất phân giải chất hữu cơ rất cao. Kết quả nghiên cứu của Mishra và cs (2018) [7] ghi nhận, loài này loại bỏ 78% COD, 67% TDS và 68% SS trong nước thải dệt nhuộm, cho thấy khả năng xử lý đồng thời chất hữu cơ (COD), chất rắn hòa tan (TDS) và lơ lửng (SS). Nghiên cứu của Kumar và Deswal (2020) [8] tiếp tục chứng minh tiềm năng của loài này khi ghi nhận mức giảm 75% COD và 80% phospho (PO_4^{3-}) trong nước thải nhà máy xay xát gạo sau 15 ngày xử lý. Bổ sung thêm bằng chứng, kết quả nghiên cứu của Hauwa và Gasim (2020) [9] cho thấy, độ đục, $\text{PO}_4\text{-P}$ và $\text{NH}_4\text{-N}$ giảm lần lượt 94%, 90,47% và 92,1% chỉ trong 24 giờ trong hệ thống thủy canh sử dụng bèo tai chuột. Tổng hợp các kết quả cho thấy, bèo tai chuột có khả năng loại bỏ hiệu quả nhiều chỉ tiêu ô nhiễm hữu cơ và dinh dưỡng, với hiệu suất phụ thuộc đáng kể vào điều kiện môi trường như nồng độ đầu vào và mức độ pha loãng của nước thải.

Tại Việt Nam, các nghiên cứu đánh giá hiệu quả xử lý nước thải sau biogas bằng bèo tai chuột còn rất hạn chế, chủ yếu tập trung vào những loài thủy sinh phổ biến như lục bình và bèo tai tượng, trong khi bèo tai chuột được ghi nhận có nhiều đặc điểm sinh thái và khả năng hấp thu dinh dưỡng vượt trội vẫn chưa được quan tâm trong bối cảnh ứng dụng cho xử lý nước thải. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm bổ sung dữ liệu khoa học và đề xuất giải pháp xử lý nước thải hiệu quả, phù hợp cho nông hộ. Việc ứng dụng bèo tai chuột không chỉ giúp giảm chi phí xử lý mà còn tạo sinh khối có thể ủ compost và tận dụng nước đã xử lý cho tưới tiêu, qua đó đóng góp vào mô hình nông nghiệp tuần hoàn và bền vững ở đồng bằng sông Cửu Long.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Chuẩn bị thí nghiệm

Chuẩn bị mẫu nước thải biogas: Nước thải sau túi biogas được thu thập tại hộ chăn nuôi xã Nhơn

Ái, thành phố Cần Thơ (9°58'38.6"N 105°40'51.5"E). Hộ gia đình nuôi 7 con heo và sử dụng hệ thống hầm biogas để xử lý chất thải chăn nuôi, lượng nước thải sau túi ủ mỗi ngày khoảng 200 - 250 lít. Chất lượng nước thải sau biogas được tham khảo từ các nghiên cứu trước đây, cho thấy nồng độ các chất ô nhiễm thường cao [2] và vượt giới hạn cho phép của QCVN 62:2016/BTNMT [3], khẳng định sự cần thiết phải xử lý thêm. Dựa trên đặc điểm nước thải sau biogas trong thực tế và nhằm xây dựng dải nồng độ phù hợp để đánh giá hiệu quả xử lý của bèo tai chuột. Nước thải sau khi thu về pha loãng với nước sông để đạt các tỷ lệ là 5, 10, 20, 30, 40, 50%; nước thải được đánh giá chất lượng nước thông qua các thông số: Nhiệt độ, pH, DO, TDS, EC, COD, N-NO_2^- , N-NO_3^- , N-NH_4^+ , TIN, P-PO_4^{3-} và TP (Bảng 1).

Chuẩn bị mẫu cây: Bèo tai chuột được thu thập ở xã Vĩnh Viễn, thành phố Cần Thơ (9°41'28.28"N 105°25'52.73"E). Chọn những cây bèo khỏe, không úa vàng và rửa sạch bằng nước máy để loại bỏ tạp chất bám trên rễ và lá. Trước khi bố trí thí nghiệm, xác định khối lượng tươi, chiều dài rễ, đếm số lá và chụp ảnh đặc tính ban đầu.

2.2. Bố trí thí nghiệm

Thí nghiệm gồm 6 nghiệm thức tỷ lệ pha loãng nước thải sau biogas và nước sông (Bảng 1): 5% NT + 95% NS (NT1); 10% NT + 90% NS (NT2); 20% NT + 80% NS (NT3); 30% NT + 70% NS (NT4); 40% NT + 60% NS (NT5); 50% NT + 50% NS (NT6). Thí nghiệm được bố trí theo kiểu hoàn toàn ngẫu nhiên với 3 lần lặp lại trong điều kiện nhà lưới của Khoa Môi trường và Tài nguyên thiên nhiên, Đại học Cần Thơ. Theo kết quả nghiên cứu của Nguyễn Trí Thức và cs (2020) [2], khi sử dụng bèo tai tượng trong xử lý nước thải biogas, bèo biểu hiện rõ hiện tượng suy giảm sinh trưởng, thậm chí chết ở các tỷ lệ 50, 75, 100% nước thải, trong khi các mức pha loãng thấp hơn (5, 10, 20% nước thải) duy trì được khả năng sinh trưởng và xử lý tương đối tốt. Việc tăng nồng độ lên tới 50% cũng nhằm đánh giá giới hạn chịu đựng sinh lý của bèo tai chuột trong điều kiện thực tế, đồng thời xác định ngưỡng pha loãng phù hợp nhất để cân bằng giữa hiệu suất xử lý và sinh trưởng thực vật trong các hệ thống xử lý sinh học ở quy mô nông hộ.

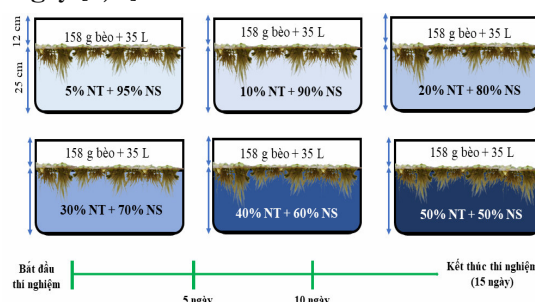
Bảng 1. Chất lượng nước thải đầu vào của các nghiệm thức

Chỉ tiêu	Đơn vị	NT1	NT2	NT3	NT4	NT5	NT6	Nước sông	QCVN 62:2025/BTNMT [10]
Nhiệt độ	°C	27,9	28,3	28,3	28,4	28,4	28,3	28,4 ± 0,01	-
pH	-	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,2	7,0 ± 0,01	6 - 9
EC	µS/cm	850	870	830	830	1480	1620	890 ± 0,02	-
DO	mg/L	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	2,9 ± 0,01	-
TDS	mg/L	420	430	460	450	680	790	440 ± 0,02	-
COD	mg/L	176,0	206,4	216,0	228,8	248,0	268,0	50,40 ± 5,47	≤ 150
N- NO ₂ ⁻	mg/L	0,005	0,048	0,069	0,111	0,160	0,229	0,015 ± 0,00	-
N- NO ₃ ⁻	mg/L	0,038	0,043	0,049	0,073	0,140	0,198	0,032 ± 0,00	-
N-NH ₄ ⁺	mg/L	6,641	8,282	13,767	20,186	29,448	44,679	0,217 ± 0,03	-
TIN	mg/L	6,685	8,372	13,886	20,370	29,748	45,106	0,104 ± 0,03	-
P- PO ₄ ³⁻	mg/L	1,053	1,446	2,077	3,565	4,056	6,613	0,057 ± 0,00	-
TP	mg/L	2,406	3,210	5,277	5,904	8,267	11,486	0,370 ± 0,04	≤ 14

Nước thải sau pha loãng của 6 nghiệm thức vẫn còn ô nhiễm đáng kể (Bảng 1), cụ thể: Hàm lượng COD (176,0 - 268,0 mg/L) vượt QCVN 62:2025/BTNMT [10]; hàm lượng N-NH₄⁺ và TP vẫn ở mức rất cao so với nghiên cứu về nước thải sau biogas [2]. Điều này phản ánh tải lượng ô nhiễm đầu vào lớn dù nước thải đã được pha loãng ở tỷ lệ 5 - 50%. Ngoài các chỉ tiêu quy định trong QCVN 62:2025/BTNMT [10], nghiên cứu bổ sung các dạng đạm vô cơ như: PO₄³⁻, TIN, EC và TDS để đánh giá toàn diện đặc tính nước thải và khả năng hấp thu dinh dưỡng của bèo tai chuột theo hướng tiếp cận và kế thừa các nghiên cứu trước đó. Tóm lại, chất lượng nước ở tất cả 6 nghiệm thức chưa đạt yêu cầu để thải ra môi trường hoặc tái sử dụng cho tưới tiêu, đặc biệt trong bối cảnh nguồn nước sau biogas hiện đang được xả trực tiếp vào kênh tưới của nông hộ. Vì vậy, việc tiếp tục xử lý nước sau biogas sau khi pha loãng là cần thiết.

Tiến hành đóng 35 L nước theo từng tỷ lệ tương ứng với từng nghiệm thức cho vào mỗi thùng nhựa kích thước 50 x 30 x 37 cm (diện tích bề mặt là 0,15 m²). Bèo tai chuột được trồng với mật độ 158 g/thùng (bèo chiếm khoảng 25% diện tích bề mặt thùng), giá trị này được lựa chọn dựa trên kết quả nghiên cứu của Munfarida và cs (2020) [5], Ahmad và cs (2017) [6]. Thí nghiệm được thực hiện trong 15 ngày ở điều kiện nhà lưới đảm bảo ánh sáng cho cây sinh trưởng và phát triển (Hình 1). Khoảng thời gian này được lựa

chọn dựa trên đặc điểm sinh trưởng của bèo tai chuột, khi loài này thường đạt tốc độ hấp thu dinh dưỡng cao nhất trong 10 - 15 ngày đầu trước khi khối lượng cây bắt đầu bão hòa. Mốc thời gian này cũng phù hợp với các nghiên cứu trước, bèo tai chuột cho hiệu suất xử lý tối ưu trong khoảng 12 - 15 ngày [7, 8].



Hình 1. Mô phỏng thí nghiệm

2.3. Phương pháp thu và phân tích mẫu nước và mẫu cây

Mẫu nước được thu với tần suất 5 ngày/lần, tần suất này phản ánh đầy đủ các giai đoạn sinh trưởng chính của bèo tai chuột bao gồm: Giai đoạn thích nghi, tăng trưởng mạnh và ổn định, đồng thời đảm bảo tính kế thừa phương pháp theo kết quả nghiên cứu của Nguyễn Thị Hồng Nho và cs (2021) [11], giúp đánh giá chính xác hiệu suất xử lý qua thời gian. Việc thu mẫu được thực hiện vào buổi sáng trong khoảng thời gian từ 7 - 8 giờ. Lượng nước được theo dõi và bổ sung bằng nước sông để bù cho lượng nước đã bay hơi, ghi nhận

thể thích nước được bổ sung. Nước sông sử dụng để bổ sung được phân tích đầy đủ các chỉ tiêu và trình bày trong bảng 1, cho thấy biên độ dao động của các thông số hẹp và ổn định giữa các lần bổ sung; đồng thời lượng nước bổ sung nhỏ so với tổng thể tích thí nghiệm. Vì vậy, chất lượng nước sông không ảnh hưởng đáng kể đến kết quả thí nghiệm và không làm sai lệch đánh giá hiệu suất xử lý của bèo tai chuột [2, 9]. Các chỉ tiêu trong

nước gồm: Nhiệt độ, pH, DO, TDS, EC được đo trực tiếp tại hiện trường bằng máy chuyên dụng (Bảng 2). Các chỉ tiêu hóa tính nước còn lại được phân tích tại các phòng thí nghiệm tại tòa nhà RLC thuộc Bộ môn Khoa học Môi trường, Khoa Môi trường và Tài nguyên thiên nhiên, Đại học Cần Thơ theo quy trình tiêu chuẩn đánh giá nước và nước thải [12].

Bảng 2. Phương pháp phân tích mẫu nước theo chuẩn

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Phương pháp phân tích
1	Nhiệt độ	°C	Đo trực tiếp bằng máy DO (Hanna 9146)
2	pH	-	Đo trực tiếp tại hiện trường bằng máy pH (Hanna 8424)
3	EC	mS/cm	Đo trực tiếp bằng máy EC cầm tay (Hanna 99300)
4	DO	mg/L	Đo trực tiếp bằng máy đo DO cầm tay (Hanna 9146)
5	TDS	mg/L	Đo trực tiếp bằng máy đo EC cầm tay (Hanna 99300)
6	COD	mg/L	Phương pháp chuẩn độ bằng FAS
7	N- NO ₂ ⁻	mg/L	Phương pháp colorimetric [12]
8	N- NO ₃ ⁻	mg/L	Phương pháp Salicylate, 4500-B [12]
9	N-NH ₄ ⁺	mg/L	Phương pháp indophenol blue [12]
10	P- PO ₄ ³⁻	mg/L	Phương pháp axit ascorbic [12]
11	TP	mg/L	Phương pháp axit ascorbic [12]

Khối lượng bèo tai chuột được xác định tại 5, 10, 15 ngày bằng cách cân toàn bộ sinh khối bèo trong mỗi bể để ghi nhận khối lượng tươi tổng. Việc theo dõi khối lượng tươi giúp đánh giá trực tiếp sự biến động sinh trưởng của bèo tai chuột qua các giai đoạn sinh trưởng và xử lý nước thải.

2.4. Phương pháp xử lý số liệu

Số liệu được tổng hợp, tính toán bằng phần mềm Microsoft Excel 2013. Sử dụng phần mềm thống kê Statgraphic Centurion XV (StatPoint, Inc., Hoa Kỳ) để phân tích phương sai một nhân tố (One-way ANOVA). So sánh trung bình các nghiệm thức dựa vào kiểm định Tukey ở mức ý nghĩa 5% để so sánh sự khác biệt giữa các nghiệm thức và thời gian xử lý. Sử dụng phần mềm Sigmaplot 14.0 (San Jose, California, Hoa Kỳ) để vẽ biểu đồ.

Chất lượng nước sau xử lý được so sánh với QCVN 62:2025/BTNMT [10], cột B, tương đương mức B ở bảng 2 và 3 của QCVN 08:2023/BTNMT [13]. Đây là các ngưỡng giới hạn áp dụng cho trường hợp nước thải được xả ra nguồn nước tiếp nhận là kênh, sông không dùng cho mục đích cấp

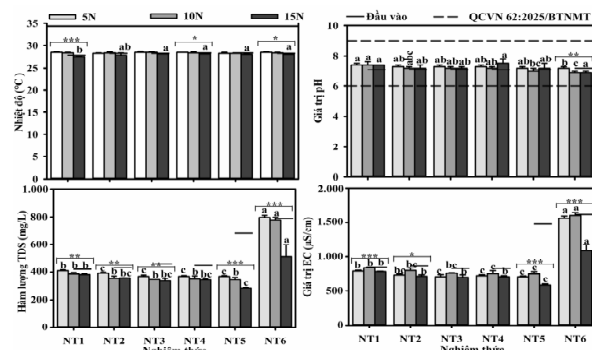
nước sinh hoạt. Điều này phù hợp với thực tế tại nông hộ, nơi nước thải sau biogas thường được xả trực tiếp ra kênh/rạch nội đồng, các thủy vực có chức năng tưới tiêu, tiêu thoát nước và không yêu cầu chất lượng cao như mục đích cấp nước sạch.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Diễn biến giá trị nhiệt độ, pH, EC và hàm lượng TDS

Kết quả cho thấy, tỷ lệ pha loãng nước thải không ảnh hưởng đến nhiệt độ nước trong suốt quá trình xử lý ($p > 0,05$; hình 2A), ngoại trừ thời điểm 15 ngày ($p < 0,05$) và không có sự khác biệt giữa các đợt thu mẫu ($p > 0,05$), ngoại trừ NT1, NT4, NT6 ($p < 0,05$) ở đợt thu mẫu 15 ngày thấp hơn đợt 5 và 10 ngày. Nhìn chung, nhiệt độ dao động trong khoảng 27,5 - 28,5°C, thể hiện xu hướng ổn định tương đối và giảm nhẹ ở đợt 3 so với giá trị đầu vào. Sự giảm này có thể được lý giải bởi mật độ bèo tăng cao theo thời gian, che phủ phần lớn bề mặt nước, làm hạn chế lượng bức xạ mặt trời hấp thụ vào bể và làm giảm nhiệt độ nước so với giai đoạn đầu. Mặc dù vậy, giá trị nhiệt độ đo được vẫn nằm trong khoảng thích

hợp cho sự sinh trưởng của bèo tai chuột (22 - 30°C) và thuận lợi cho hoạt động của hệ thực vật và vi sinh vật [14].



Hình 2. Diễn biến giá trị nhiệt độ (A), pH (B), TDS (C), EC (D) của các nghiệm thức theo thời gian

*Ghi chú: *, **, ***: Sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các thời điểm thu mẫu ở mức ý nghĩa lần lượt 5%, 1%, 0,1% dựa vào kiểm định Tukey HSD (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$). Trong cùng một thời điểm thu mẫu, các chữ cái a, b, c khác nhau chỉ sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các nghiệm thức theo kiểm định Tukey HSD ở mức 5%.*

Giá trị pH trong nước dao động 6,9 - 7,4 và nằm trong giới hạn cho phép của QCVN 62:2025/BTNMT [10] cột B (6 - 9), thích hợp cho hoạt động của vi sinh vật và sinh vật thủy sinh và có sự khác biệt giữa các nghiệm thức trong cùng đợt thu mẫu ($p < 0,05$; hình 2B), ngoại trừ thời điểm 5 ngày ($p > 0,05$). Tuy nhiên, trong cùng một nghiệm thức không có sự khác biệt rõ rệt giữa các thời điểm thu mẫu ($p > 0,05$), ngoại trừ NT6 ($p < 0,05$). Nhìn chung, giá trị pH trong nước ở các nghiệm thức có xu hướng cao hơn hoặc xấp xỉ so với giá trị đầu vào, cho thấy quá trình xử lý bằng bèo tai chuột góp phần ổn định và tăng nhẹ độ kiềm của môi trường nước. Riêng ở NT6, ở thời điểm 10 và 15 ngày, giá trị pH thấp hơn so với đầu vào và giảm thấp hơn thời điểm 5 ngày, có thể do diện tích che phủ mặt nước của bèo tăng cao trong môi trường nước có hàm lượng N, P cao nhất, làm giảm cường độ chiếu sáng vào bể, hạn chế quá trình quang hợp làm pH trong nước giảm. Kết quả này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Nguyễn Văn Công và cs (2021) [15], sự che phủ của bèo làm giảm lượng ánh sáng xuyên

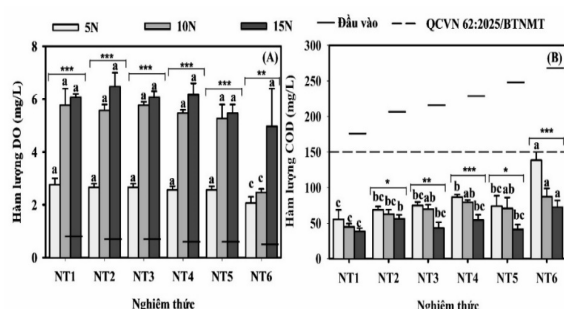
vào bể, khiến quá trình hô hấp chiếm ưu thế hơn so với quang hợp, dẫn đến gia tăng CO_2 và làm giảm pH so với đối chứng.

Có sự khác biệt đáng kể giữa các nghiệm thức về hàm lượng TDS và giá trị EC trong cùng thời điểm thu mẫu ($p < 0,05$; hình 2C) và giữa các đợt thu mẫu trong cùng một nghiệm thức ($p < 0,05$), ngoại trừ NT4 đối với TDS và NT3, NT4 đối với EC ($p > 0,05$). Nhìn chung, hàm lượng TDS và giá trị EC trong nước đều có xu hướng giảm dần theo thời gian và thấp nhất ở thời điểm 15 ngày xử lý, giảm đáng kể so với đầu vào. Cụ thể, hàm lượng TDS sau 15 ngày xử lý theo thứ tự NT1 < NT2 < NT3 < NT4 < NT5 < NT6 lần lượt là 283,3 < 340,0 < 346,7 < 360,3 < 383,3 < 510,0 mg/L và với EC là 590,0 < 706,7 < 713,3 < 720,0 < 786,7 < 1.093,3 ($\mu\text{S/cm}$), giảm 1,55 - 2,40 và 1,08 - 1,48 lần so với giá trị đầu vào (680,0 - 790,0 mg/L và 850,0 - 1.620,0 $\mu\text{S/cm}$). Sự giảm đồng thời của TDS và EC phản ánh sự giảm hàm lượng các chất rắn và ion hòa tan trong nước thải. Nguyên nhân chủ yếu do quá trình phân ly của các muối tan trong nước thành anion và cation, sau đó được cây hấp thu để thúc đẩy sự tăng sinh khối [16]. Ngoài ra, hoạt động của vi sinh vật cộng sinh cùng quá trình kết tủa muối vô cơ góp phần làm giảm hàm lượng ion hòa tan, từ đó dẫn đến hàm lượng TDS và giá trị EC giảm đáng kể so với ban đầu.

3.2. Diễn biến hàm lượng oxy hòa tan (DO) và nhu cầu oxy hóa học (COD)

Hàm lượng DO giữa các nghiệm thức có sự khác biệt đáng kể ở các đợt thu mẫu ($p < 0,05$; hình 3A), ngoại trừ thời điểm 15 ngày ($p > 0,05$) và DO có xu hướng tăng dần theo thời gian ($p < 0,05$). Nhìn chung, hàm lượng DO trong nước sau xử lý cải thiện đáng kể so với ban đầu, đặc biệt là sau 10 - 15 ngày xử lý. Cụ thể, hàm lượng DO sau 10 - 15 ngày xử lý ở các nghiệm thức dao động từ 5,8 - 6,5 mg/L, tăng gấp 3,22 - 3,82 lần so với đầu vào (1,8 - 1,7 mg/L). Theo QCVN 62:2025/BTNMT [10], DO không được quy định; tuy nhiên, đối chiếu với QCVN 08:2023/BTNMT [13], giá trị DO tối thiểu quy định trong cột B là $\geq 5,0$ mg/L, do đó hàm lượng DO sau xử lý ở các nghiệm thức đều đạt cột B của QCVN 08:2023/BTNMT [13]. Bên cạnh đó, xu hướng tăng của DO qua các đợt thu mẫu tương

tự như biến động nhiệt độ, cho thấy điều kiện trong bể ngày càng thuận lợi cho quá trình oxy hóa sinh học. Ngoài ra, theo Brix (1997) [17], hệ rễ của thực vật thủy sinh còn đóng vai trò bổ sung oxy cho môi trường nước. Các loài này có cấu trúc rỗng bên trong thân và rễ, cho phép vận chuyển oxy từ không khí qua lá, thân xuống rễ rồi khuếch tán ra vùng nước xung quanh. Nhờ cơ chế này, hàm lượng DO trong nước có xu hướng tăng dần theo thời gian, góp phần cải thiện chất lượng môi trường trong bể xử lý.



Hình 3. Diễn biến hàm lượng DO (A) và COD (B) của các thí nghiệm theo thời gian

*Ghi chú: *, **, ***: Sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các thời điểm thu mẫu ở mức ý nghĩa lần lượt 5%, 1%, 0,1% dựa vào kiểm định Tukey HSD (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$). Trong cùng một thời điểm thu mẫu, các chữ cái a, b, c khác nhau chỉ sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các thí nghiệm theo kiểm định Tukey HSD ở mức 5%.*

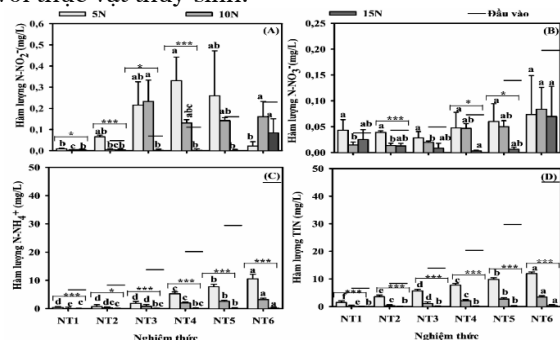
Hàm lượng DO trong nước sau xử lý được cải thiện là yếu tố quan trọng giúp gia tăng nồng độ oxy trong nước thúc đẩy quá trình phân hủy chất hữu cơ, thể hiện qua kết quả hàm lượng COD giảm đáng kể so với đầu vào và giảm nhiều nhất ở thời điểm 15 ngày xử lý (Hình 3B). Tại thời điểm 15 ngày xử lý, hàm lượng COD trong nước đầu ra của NT1, NT2, NT3, NT4, NT5, NT6 có sự khác biệt đạt tương ứng 40,0; 57,4; 44,4; 55,7; 42,6; 73,6 mg/L ($p < 0,05$; hình 2B). Hiệu suất xử lý COD có xu hướng tăng dần theo thời gian xử lý ($p < 0,05$). Cụ thể, hiệu suất xử lý thời điểm 5 ngày của NT1, NT2, NT3, NT4, NT5, NT6 đạt lần lượt là 67,8; 66,0; 64,8; 61,6; 69,6; 47,8% và sau 15 ngày xử lý tăng lên 77,2; 72,1; 79,4; 75,6; 82,8; 72,5% tương ứng (Bảng 3). Kết quả cho thấy, NT5 đạt hiệu suất

cao nhất, trong khi NT6 mặc dù ban đầu có hiệu suất thấp nhất nhưng cải thiện đáng kể theo thời gian ($p < 0,05$). Theo Mustafa và Hayder (2021) [18], vùng rễ của thực vật thủy sinh tạo điều kiện thuận lợi cho sự phát triển của hệ vi sinh vật hiếu khí, giúp phân hủy các hợp chất hữu cơ phức tạp thành dạng đơn giản hơn, đồng thời cung cấp nguồn dinh dưỡng cho cây. Kết quả nghiên cứu của Nguyễn Thị Hồng Nho và cs (2021) [11] cho rằng, mức độ giảm COD phụ thuộc vào tốc độ sinh trưởng của thực vật và quá trình lắng tụ chất hữu cơ trong hệ thống, do đó việc tối ưu hóa thời gian lưu nước và mật độ trồng là yếu tố quan trọng để nâng cao hiệu quả xử lý. Kết quả nghiên cứu ghi nhận rằng, nồng độ COD sau xử lý ở tất cả các thí nghiệm đều thấp hơn giới hạn cho phép theo QCVN 62:2025/BTNMT [10] cột B (≤ 150 mg/L), qua đó cho thấy nước thải sau biogas xử lý bằng bèo tai chuột đạt tiêu chuẩn xả thải, tuy cao hơn QCVN 08:2023/BTNMT [13] (≤ 15 mg/L), nhưng do mẫu là nước thải sau biogas nên việc so sánh với QCVN 62:2025/BTNMT [10] là phù hợp, do đó nước sau xử lý trong nghiên cứu này đáp ứng cho phép xả thải theo quy định.

3.3. Diễn biến hàm lượng đạm hòa tan

Có sự khác biệt đáng kể giữa các thí nghiệm ở tất cả các đợt thu mẫu về hàm lượng N-NO_2^- ($p < 0,05$; hình 4A), ngoại trừ NT5 và NT6 ($p > 0,05$). Nhìn chung, hàm lượng N-NO_2^- dao động trong khoảng 0,030 - 0,261 mg/L, với xu hướng tăng so với đầu vào ở đợt thu mẫu ngày thứ 5 và 10 so với giá trị đầu vào (0,005 - 0,229 mg/L) và có xu hướng tăng cao ở NT3, NT4, NT5, NT6, cho thấy quá trình nitrate hóa chưa diễn ra hoàn toàn và điều này phản ánh quá trình oxy hóa NH_4^+ sang NO_2^- diễn ra mạnh hơn khi nồng độ đầu vào cao. Sau thời điểm này, hàm lượng N-NO_2^- ở tất cả các thí nghiệm tiếp tục giảm, và đến ngày thứ 15, hàm lượng N-NO_2^- dao động từ 0,003 - 0,086 mg/L và đạt cao nhất ở NT6 (0,086 mg/L; $p < 0,05$). Hàm lượng N-NO_2^- ở tất cả các thí nghiệm đều duy trì ở mức thấp và có xu hướng tăng vào giai đoạn đầu sau đó giảm dần. Xu hướng này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Võ Thị Phương Thảo và Ngô Thụy Diễm Trang (2025) [19], Nguyễn Tiến Đạt và cs (2025) [20]. Ngoài ra, bèo tai chuột được ghi

nhận có khả năng hấp thu trực tiếp nitrite và tạo điều kiện thuận lợi cho vi sinh vật bám rễ thực hiện quá trình nitrate hóa và khử nitrate [17, 18]. Việc NO_2^- không tích tụ và duy trì ở mức thấp là chỉ dấu quan trọng cho thấy hệ thống hoạt động ổn định, không phát sinh nguy cơ độc tính nitrite đối với thực vật thủy sinh.



Hình 4. Diễn biến hàm lượng N-NO_2^- (A), N-NO_3^- (B), N-NH_4^+ (C) và TIN (D) của các nghiệm thức theo thời gian

Ghi chú: *, **, ***: Sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các thời điểm thu mẫu ở mức ý nghĩa lần lượt 5%, 1%, 0,1% dựa vào kiểm định Tukey HSD (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$). Trong cùng một thời điểm thu mẫu, các chữ cái a, b, c, d, e khác nhau chỉ sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các nghiệm thức theo kiểm định Tukey HSD ở mức 5%.

Hàm lượng N-NO_3^- trong nước sau xử lý có xu hướng thấp hơn so với đầu vào và có sự biến động qua các mốc thời gian thu mẫu ($p < 0,05$; hình 4B), ngoại trừ NT1, NT2, NT6. Cụ thể, ngày thứ 5, hàm lượng N-NO_3^- dao động 0,010 - 0,062 mg/L và không có sự khác biệt giữa các nghiệm thức ($p > 0,05$). Đến ngày thứ 10, hàm lượng N-NO_3^- dao động 0,010 - 0,062 mg/L và có sự khác biệt giữa các nghiệm thức, đạt giá trị cao nhất ở NT6. Đến ngày thứ 15, N-NO_3^- giảm mạnh ở hầu hết nghiệm thức ngoại trừ NT6. Nhìn chung, hàm lượng N-NO_3^- trong nước sau xử lý ở tất cả thời điểm đều thấp hơn đầu vào, cho thấy hệ thống không tích tụ nitrate. Mặc dù hàm lượng N-NO_3^- không được quy định trong QCVN 62:2025/BTNMT [10] và QCVN 08:2023/BTNMT [13], việc theo dõi thông số này vẫn quan trọng để đánh giá rủi ro ô nhiễm nitrate đối với nguồn nước và hiệu quả xử lý nitơ. Hàm lượng N-NO_3^- duy trì ở mức thấp phản ánh đồng

thời nhiều cơ chế loại bỏ, bao gồm: Khử nitrate trong các vi vùng kỵ khí bởi các vi khuẩn như *Pseudomonas*, *Alcaligenes* và *Bacillus*; hấp thu nitrate bởi bèo tai chuột thông qua vùng rễ và quá trình đồng hóa tại lá; cũng như nitrate hóa một phần từ N-NH_4^+ nhờ hoạt động của vi khuẩn *Nitrosomonas* và *Nitrobacter*, đặc biệt rõ ở NT6. Kết quả này phù hợp với kết quả nghiên cứu về vai trò của thực vật thủy sinh trong việc tăng cường quá trình nitrate hóa-khử nitrate và giảm tích lũy N-NO_3^- trong nước [18, 21].

Kết quả phân tích thống kê cho thấy, hàm lượng N-NH_4^+ có sự khác biệt đáng kể giữa các nghiệm thức trong cùng đợt thu mẫu ($p < 0,05$; hình 4C). Hàm lượng N-NH_4^+ sau 5, 10, 15 ngày xử lý giảm đáng kể so với đầu vào (6,641 - 44,679 mg/L) và giảm nhiều nhất sau 15 ngày xử lý ($p < 0,05$). Cụ thể, hàm lượng N-NH_4^+ trong nước sau xử lý 15 ngày ở các nghiệm thức NT1, NT2, NT3, NT4, NT5, NT6 lần lượt là 0,096; 0,108; 0,151; 0,192; 0,236; 0,442 mg/L. Theo Lê Diễm Kiều và cs (2015) [22], ion amoni (NH_4^+) được chuyển hóa thành nitrite (NO_2^-) thông qua quá trình nitrate hóa dưới tác động của vi khuẩn hiếu khí, đồng thời một phần NH_4^+ cũng được tảo hấp thu trực tiếp, cung cấp nguồn dinh dưỡng cho sự sinh trưởng của sinh vật thủy sinh. Ngoài ra, hàm lượng N-NH_4^+ giảm nhờ vào cơ chế khử N-NH_4^+ chủ yếu là quá trình nitrate hóa được thực hiện trong môi trường hiếu khí bởi vi khuẩn *Nitrosomonas* và *Nitrobacter* [21].

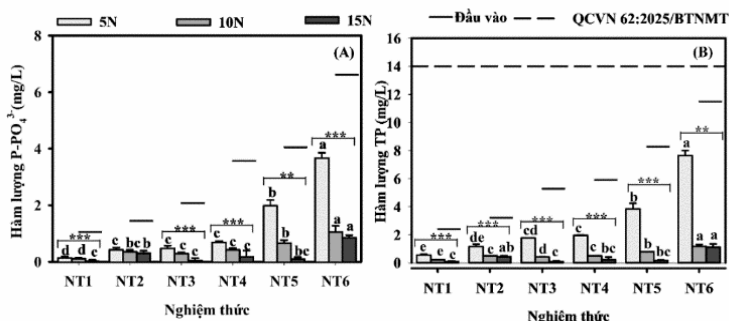
Tương tự, hàm lượng N-NH_4^+ , tổng đạm hòa tan (TIN) ở các nghiệm thức có sự khác biệt đáng kể trong cùng đợt thu mẫu ($p > 0,05$; hình 4D) và có xu hướng giảm dần theo thời gian xử lý và đạt thấp nhất sau 15 ngày xử lý ($p < 0,05$). Cụ thể, hàm lượng TIN sau 5, 10, 15 ngày xử lý ở các nghiệm thức dao động tương ứng là 1,740 - 12,179; 0,328 - 3,716; 0,126 - 0,599 mg/L và đạt giá trị cao nhất ở NT6 > NT5 > NT4 > NT3 > NT2 > NT1. Trong giai đoạn 10 - 15 ngày, khi sinh khối bèo tai chuột bắt đầu tăng và cây bước vào giai đoạn sinh trưởng ổn định, hệ rễ phát triển đã tạo điều kiện thuận lợi cho các quá trình hấp thu dinh dưỡng, nitrate hóa và khử nitrate, đồng thời hỗ trợ hoạt động của vi sinh vật tại vùng rễ. Do đó, hàm lượng TIN sau 15

ngày xử lý hiệu quả hơn so với 5 và 10 ngày. Cụ thể, hiệu suất xử lý TIN tăng mạnh theo thời gian và đạt cao nhất ở NT3, NT4, NT5 với các giá trị lần lượt là 98,8; 99,0; 99,1% sau 15 ngày xử lý (Bảng 3). Bên cạnh các cơ chế sinh học, sự giảm TIN còn có thể được giải thích bởi các quá trình vật lý và hóa học tự nhiên trong hệ thống, bao gồm quá trình lắng cơ học của các hợp chất nitơ dạng hạt và bay hơi amoniac (NH_3) khi điều kiện pH và nhiệt độ thích hợp [23]. Như vậy, sự kết hợp giữa các cơ chế sinh học, hóa học và vật lý đã đóng vai trò quan trọng trong việc làm giảm đáng kể hàm lượng TIN trong nước thải sau thời gian xử lý.

3.4. Diễn biến hàm lượng lân

Hàm lượng P-PO_4^{3-} là dạng lân (P) vô cơ hoạt động mạnh và là dạng duy nhất có thể được vi sinh vật, tảo và thực vật hấp thu, nên phản ánh trực tiếp nguy cơ phú dưỡng cũng như hiệu quả xử lý lân trong hệ thống nước [24]. Hàm lượng P-PO_4^{3-} và TP có sự khác biệt đáng kể giữa các nghiệm thức trong cùng đợt thu mẫu ($p < 0,05$; hình 5) và có xu hướng giảm dần theo thời gian xử lý ($p < 0,05$). Hàm lượng P-PO_4^{3-} và TP sau 15 ngày xử lý lần lượt là 0,045;

0,332; 0,073; 0,205; 0,130; 0,886 mg/L (P-PO_4^{3-}) và 0,084; 0,429; 0,085; 0,220; 0,160; 112 mg/L (TP), tương ứng NT1, NT2, NT3, NT4, NT5, NT6. Hiệu suất xử lý TP cũng đạt cao nhất ở NT1, NT3, NT4, NT5. với các giá trị tương ứng là 96,5; 98,3; 96,3; 98,1% sau 15 ngày (Bảng 3). Bèo tai chuột không chỉ hấp thu dạng phốt phát hòa tan mà còn góp phần loại bỏ các dạng P khác thông qua quá trình hấp thu dinh dưỡng vào mô thực vật, lắng đọng cơ học và chuyển hóa sinh học tại vùng rễ [18], từ đó cải thiện chất lượng nước đầu ra và ổn định hơn so với thời điểm ban đầu. Kết quả nghiên cứu cho thấy, hàm lượng TP sau 15 ngày xử lý bằng bèo tai chuột giảm đáng kể so với đầu vào và đạt giá trị nằm trong khoảng giới hạn cho phép của QCVN 62:2025/BTNMT [10] cột B ($\text{TP} \leq 14$ mg/L), mặc dù vẫn cao hơn so với QCVN 08:2023/BTNMT [13] ($\text{TP} \leq 0,3$ mg/L); tuy nhiên vì đây là nước thải sau biogas nên việc so sánh với QCVN 62:2025/BTNMT [10] là phù hợp và cho thấy nước sau xử lý đã đạt tiêu chuẩn xả thải. Điều này chứng tỏ hệ thống xử lý sử dụng bèo tai chuột có hiệu quả cao trong việc loại bỏ lân khỏi nước thải, góp phần cải thiện chất lượng nước thải đầu ra.



Hình 5. Diễn biến hàm lượng P-PO_4^{3-} (A), TP (B) của các nghiệm thức theo thời gian

Ghi chú: *, **, ***: Sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các thời điểm thu mẫu ở mức ý nghĩa lần lượt 5%, 1%, 0,1% dựa vào kiểm định Tukey HSD (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$). Trong cùng một thời điểm thu mẫu, các chữ cái a, b, c, d, e khác nhau chỉ sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các nghiệm thức theo kiểm định Tukey HSD ở mức 5%.

Bảng 3. Hiệu suất xử lý COD, TIN, TP của các nghiệm thức

Nghiệm thức	Thời điểm thu mẫu		
	5 ngày	10 ngày	15 ngày
Hiệu suất xử lý COD (%)			
5% NT + 95% NS (NT1)	67,8 ^{Aa} ± 6,88	73,9 ^{Aa} ± 1,89	77,2 ^{Aabc} ± 1,64

10% NT + 90% NS (NT2)	66,0 ^{Ca} ± 1,57	68,9 ^{ABab} ± 2,33	72,1 ^{Ac} ± 2,02
20% NT + 80% NS (NT3)	64,8 ^{Ba} ± 1,70	67,1 ^{Bab} ± 2,26	79,4 ^{Aab} ± 3,07
30% NT + 70% NS (NT4)	61,6 ^{Ba} ± 1,07	64,8 ^{Bb} ± 0,81	75,6 ^{Abc} ± 2,65
40% NT + 60% NS (NT5)	69,6 ^{Ba} ± 5,31	70,9 ^{Bab} ± 5,59	82,8 ^{Aa} ± 2,15
50% NT + 50% NS (NT6)	47,8 ^{Bb} ± 3,88	66,9 ^{Aab} ± 3,84	72,5 ^{Ac} ± 3,03
Hiệu suất xử lý TIN (%)			
5% NT + 95% NS (NT1)	73,9 ^{Ba} ± 5,21	95,1 ^{Aa} ± 2,60	98,1 ^{Ab} ± 0,32
10% NT + 90% NS (NT2)	54,2 ^{Bc} ± 4,16	93,3 ^{Aab} ± 0,98	98,4 ^{Aab} ± 0,37
20% NT + 80% NS (NT3)	57,4 ^{Cc} ± 2,51	90,3 ^{Bbc} ± 2,36	98,8 ^{Aa} ± 0,15
30% NT + 70% NS (NT4)	60,7 ^{Cbc} ± 1,71	88,1 ^{Bc} ± 0,60	99,0 ^{Aa} ± 0,14
40% NT + 60% NS (NT5)	66,0 ^{Cab} ± 1,17	89,8 ^{Bbc} ± 0,71	99,1 ^{Aa} ± 0,27
50% NT + 50% NS (NT6)	73,0 ^{Ca} ± 0,77	91,7 ^{Babc} ± 0,50	98,6 ^{Aab} ± 0,17
Hiệu suất xử lý TP (%)			
5% NT + 95% NS (NT1)	77,2 ^{Ca} ± 2,99	91,2 ^{Bb} ± 0,55	96,5 ^{Aa} ± 1,72
10% NT + 90% NS (NT2)	63,9 ^{Bb} ± 5,31	84,1 ^{Aa} ± 0,03	86,6 ^{Ab} ± 2,65
20% NT + 80% NS (NT3)	66,4 ^{Cb} ± 0,18	92,2 ^{Bc} ± 0,20	98,3 ^{Aa} ± 1,02
30% NT + 70% NS (NT4)	66,9 ^{Cb} ± 0,61	91,4 ^{Bbc} ± 0,17	96,3 ^{Aa} ± 3,16
40% NT + 60% NS (NT5)	53,5 ^{Cc} ± 4,81	90,3 ^{Ba} ± 0,08	98,1 ^{Aa} ± 0,61
50% NT + 50% NS (NT6)	33,5 ^{Bd} ± 3,22	89,8 ^{Aa} ± 1,15	90,3 ^{Ab} ± 2,04

Trong cùng một thời điểm thu mẫu, các chữ cái a, b, c, d khác nhau chỉ sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các nghiệm thức theo kiểm định Tukey HSD ở mức 5%. Trong cùng một nghiệm thức, các chữ cái A, B, C khác nhau chỉ sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa 3 thời điểm thu mẫu theo kiểm định Tukey HSD ở mức 5%.

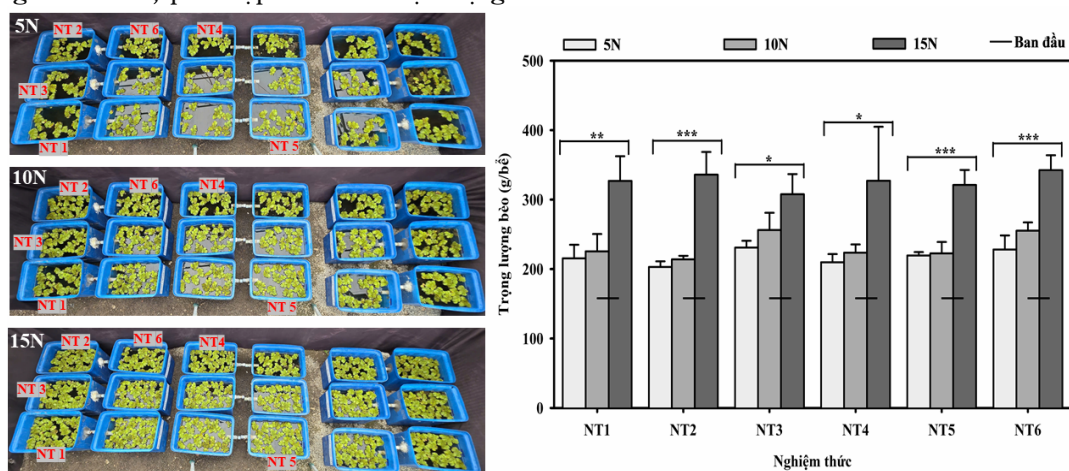
Tóm lại, những kết quả trên phản ánh quá trình hấp thu và chuyển hóa chất hữu cơ, N và P diễn ra liên tục theo thời gian trong hệ thống xử lý. Sự khác biệt giữa các nghiệm thức chủ yếu phản ánh vai trò nồng độ chất ô nhiễm trong nước thải. Nghiệm thức có nồng độ chất ô nhiễm thấp có tỷ lệ NT thấp (NT1, NT2), ban đầu có hiệu suất xử lý COD và TIN cao hơn một số nghiệm thức có tỷ lệ NT cao, có thể do môi trường nước duy trì DO tốt hơn, thuận lợi cho hoạt động của vi sinh vật và hấp thu chất dinh dưỡng bởi cây thủy sinh. Ngược lại, nghiệm thức có tỷ lệ NT cao (NT6) ban đầu có hiệu suất thấp, có thể do hàm lượng chất hữu cơ cao gây thiếu oxy cục bộ, hạn chế hoạt động vi sinh vật phân hủy COD. Tuy nhiên, sau 15 ngày, hệ thống thích nghi, hiệu suất tăng đáng kể, chứng tỏ cây và vi sinh vật dần ổn định. Các nghiệm thức trung gian, đặc biệt NT5 đạt hiệu

suất xử lý COD, TIN, TP cao nhất, cho thấy tỷ lệ pha loãng tối ưu cân bằng giữa nguồn chất hữu cơ và dinh dưỡng dồi dào và môi trường nước ổn định, tạo điều kiện thuận lợi cho cả vi sinh vật phân hủy và cây thủy sinh hấp thu dinh dưỡng. Xu hướng này phù hợp với cơ chế xử lý trong hệ thống thực vật thủy sinh, trong đó cây hấp thu chất dinh dưỡng, vi sinh vật phân hủy COD và P, đồng thời quá trình thích nghi theo thời gian giúp nâng cao hiệu suất xử lý [25, 26]. Nhìn chung, kết quả cho thấy, cả thời gian xử lý và nồng độ chất ô nhiễm đầu vào đều ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất xử lý COD, TIN, TP, với nồng độ chất ô nhiễm đầu vào trung bình (NT3, NT4, NT5 có giá trị COD, TIN, TP khoảng 216,0 - 248,0; 13,9 - 29,7; 5,2 - 8,3 mg/L) là tối ưu, phù hợp cho các hệ thống kết hợp xử lý đồng thời COD, TIN, TP trong nước thải bằng thực vật thủy sinh.

Dựa trên lưu lượng nước thải sau biogas của hộ nuôi 7 con heo (250 L/ngày) và thời gian lưu 15 ngày, thể tích xử lý cần thiết là 3,75 m³. Khi áp dụng theo các tỷ lệ pha loãng hiệu quả nhất (NT3 - NT5, tương ứng 20 - 40% NT với hiệu suất xử lý sau 15 ngày đạt 75,6 - 82,8% COD; 99,0 - 99,1% TIN và TP 96,3 - 98,3% TP), thể tích hệ thống thực tế cần đạt 9,4 - 18,8 m³, tùy tỷ lệ pha loãng. Với mực nước vận hành 0,8 - 1,0 m, diện tích ao cần bố trí chỉ khoảng 9 - 23 m², phù hợp với điều kiện hộ gia

đình. Mật độ bèo từ thí nghiệm ($\approx 1,13 \text{ kg/m}^2$) được quy đổi cho quy mô hộ gia đình, cần khoảng 10 - 26 kg bèo cho mỗi hệ thống. Các nghiệm thức NT3 - NT5 cũng cho thấy mô hình hoàn toàn phù hợp để áp dụng thực tế cho hộ chăn nuôi nhỏ lẻ sau biogas, với diện tích nhỏ và hiệu quả xử lý ổn định.

3.5. Sinh trưởng của bèo tai chuột ở các nghiệm thức



Hình 6. Sinh trưởng của bèo tai chuột ở các nghiệm thức tỷ lệ pha loãng theo thời gian

Ghi chú: 5% NT + 95% NS (NT1); 10% NT + 90% NS (NT2); 20% NT + 80% NS (NT3); 30% NT + 70% NS (NT4); 40% NT + 60% NS (NT5); 50% NT + 50% NS (NT6).

Khối lượng tươi bèo tai chuột tăng dần theo thời gian và đạt giá trị cao nhất sau 15 ngày ($p < 0,05$; hình 6), phản ánh rõ quá trình sinh trưởng phát triển của cây qua thời gian. Sau 5 ngày xử lý, khối lượng tươi của bèo trung bình là 204,7 - 232,3 g/bể, tăng 1,3 - 1,5 lần so với khối lượng cây ban đầu (158 g/bể), cho thấy bèo nhanh chóng thích nghi với môi trường nước thải và bước vào pha sinh trưởng tích cực. Đến thời điểm 10 ngày, khối lượng tươi bèo tiếp tục gia tăng, đạt 215,7 - 256,7 g/bể (tăng 1,4 - 1,6 lần so với cây ban đầu); tuy nhiên sự khác biệt về khối lượng tươi giữa thời điểm 5 và 10 ngày chưa thật sự rõ rệt, vì đây là giai đoạn ổn định sinh lý khi bèo tập trung hoàn thiện hệ rễ và mô sinh dưỡng để thích nghi với điều kiện môi trường, trong giai đoạn này, bèo ưu tiên phát triển cấu trúc sinh học hơn là gia tăng nhanh sinh khối. Đến giai đoạn 10 - 15 ngày, bèo đã thích nghi hoàn toàn và bước vào giai đoạn sinh trưởng mạnh, đạt 309,0 - 343,8 g/bể, tương ứng tốc độ tăng sinh

khối 10,0 - 12,3 g/ngày, tăng gấp 2,08 - 2,18 lần so với cây ban đầu. Giai đoạn này trùng hợp với sự suy giảm rõ rệt nồng độ các chất ô nhiễm hữu cơ và dinh dưỡng trong nước thải được ghi nhận ở trên, cho thấy khi bèo bước vào pha sinh trưởng mạnh, khả năng hấp thu và tích lũy các hợp chất chứa nitơ và phospho cũng được tăng cường. Kết quả nghiên cứu của Nguyễn Trí Thức và cs (2020) [2] cho thấy, tốc độ tăng sinh khối của bèo tai tượng chỉ tăng 4,83 - 7,07 mg/ngày và không có sự khác biệt giữa các nồng độ pha loãng, cho thấy tốc độ sinh trưởng và tích lũy sinh khối của bèo tai tượng tương đối chậm. Ngược lại, bèo tai chuột thể hiện tốc độ tăng sinh khối vượt trội và khả năng bao phủ bề mặt nước nhanh, qua đó gia tăng diện tích tiếp xúc giữa hệ rễ và nước thải, góp phần nâng cao hiệu quả loại bỏ các chất ô nhiễm và khẳng định tiềm năng ứng dụng của bèo tai chuột trong các hệ thống xử lý nước thải sinh học quy mô hộ gia đình. Việc sử dụng loài này không

những giúp cải thiện chất lượng nước thải nhờ hấp thu các chất ô nhiễm mà còn góp phần tạo nguồn sinh khối sinh học có thể tái sử dụng làm phân bón hữu cơ hoặc nguyên liệu cho sản xuất năng lượng sinh học, mở ra hướng đi bền vững trong quản lý và tái chế chất thải nông nghiệp.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Hệ thống xử lý nước thải sau biogas bằng bèo tai chuột cho thấy sau 15 ngày vận hành, các chỉ tiêu chất lượng nước đầu ra gồm pH, COD, TP đều đạt trong giới hạn cho phép theo QCVN 62:2025/BTNMT cột B. Hiệu suất xử lý COD, TIN, TP của các nghiệm thức cho thấy, hệ thống bèo tai chuột hoạt động hiệu quả, trong đó các nghiệm thức có tỷ lệ pha loãng trung bình NT3, NT4, NT5 đạt hiệu suất xử lý cao nhất khi xử lý đồng thời cả ba thông số. Nước thải có nồng độ chất ô nhiễm ở mức vừa phải với COD, TIN, TP, tương ứng khoảng 216,0 - 248,0; 13,9 - 29,7; 5,2 - 8,3 mg/L tại NT3, NT4, NT5 là tối ưu cho quá trình hấp thu chất dinh dưỡng của bèo tai chuột, cũng như các hoạt động vi sinh vật cộng sinh, giúp hệ thống vận hành ổn định và đạt hiệu quả xử lý cao. Khối lượng tươi của bèo tai chuột tăng gấp 2,08 - 2,18 lần sau 15 ngày và các tỷ lệ pha loãng không ảnh hưởng đến sinh trưởng của bèo.

Kết quả nghiên cứu gợi ý rằng, việc ứng dụng bèo tai chuột trong hệ thống VACB tự nhiên tại nông hộ là khả thi; tuy nhiên cần tiếp tục đánh giá trong điều kiện thực tế có biến động về thời tiết, ánh sáng và tải lượng nước thải nhằm xác định khả năng duy trì hiệu suất xử lý lâu dài và tính bền vững của mô hình.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi kinh phí đề tài nghiên cứu khoa học công nghệ cấp cơ sở TSV2025-74, được cấp bởi Đại học Cần Thơ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nguyễn Trọng Tuyển (2024). Tình hình chăn nuôi lợn của Việt Nam năm 2023. <https://nhachannuoi.vn/tinh-hinh-chan-nuoi-lon-cua-viet-nam-nam-2023/>. Ngày truy cập 01/10/2025.
2. Nguyễn Trí Thức, Võ Hoàng Việt, Nguyễn

Thị Thiên Nhi, Nguyễn Thị Cẩm Nhiên, Võ Thị Diễm Xuân & Ngô Thụy Diễm Trang (2020). Khả năng xử lý nước sau túi ủ biogas của bèo tai tượng (*Pistia stratiotes*) kết hợp nuôi cá sặc rằn (*Trichogaster pectoralis*). *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn*, 16, 27 - 36.

3. Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia QCVN 62:2016/BTNMT về Nước thải chăn nuôi.

4. Vũ Thị Nguyệt, Trần Văn Tựa, Nguyễn Trung Kiên & Đặng Đình Kim (2015). Nghiên cứu sử dụng bèo tây *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms để xử lý nitơ và photpho trong nước thải chăn nuôi lợn sau công nghệ biogas. *Tạp chí Sinh học*, 37(1), 53 - 59.

5. Munfarida I., Auvaria S. W., Suprayogi D. & Munir M. (2020). *Application of Salvinia molesta for water pollution treatment using phytoremediation batch system. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 493(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/493/1/012002>

6. Ahmad M. I., Abdullah S., Hassan H., Abdul, R. R. (2017). Screening of tropical native aquatic plants for polishing pulp and paper mill final effluent. *Malaysian. J. Anal. Sci.*, 21, 105 - 112.

7. Mishra, S., Tripathi, B. D. & Srivastava, S. (2018). Potential of aquatic macrophytes (*Salvinia molesta*) for phytoremediation of textile wastewater. *Journal of Environmental Management*, 210, 82 - 90. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.016>

8. Kumar, S. & Deswal, S. (2020). Phytoremediation capabilities of *Salvinia molesta*, water hyacinth, water lettuce and duckweed to reduce phosphorus in rice mill wastewater. *Int. J. Phytoremediation.*, 1 - 13. DOI: 10.1080/15226514.2020.1731729.

9. Hauwa, M. M. & Gasim, H. (2020). Performance of *Pistia stratiotes*, *Salvinia molesta* and *Eichhornia crassipes* aquatic plants in the tertiary treatment of domestic wastewater with varying retention times. *Appl. Sci.*, 10, 9105. DOI:10.3390/app10249105.

10. Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia QCVN

62:2025/BTNMT về Nước thải chăn nuôi.

11. Nguyễn Thị Hồng Nho, Trương Quốc Phú & Phạm Thanh Liêm (2021). Hiệu quả xử lý nước thải nuôi cá tra vàng (*Clarias macrocephalus*) thâm canh bằng hệ thống thực vật thủy sinh. *Tạp chí Khoa học, Trường Đại học Cần Thơ*, 57, 1 - 9.

12. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Control Federation (WCF) (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 20th ed. Washington D.C., USA.

13. Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia QCVN 08:2023/BTNMT về Chất lượng nước mặt.

14. Sajna. N., Urek. T., Kušar. P. & Šipek. M. (2023). The importance of thermally abnormal water for bioinvasions - A case study of *Pistia stratiotes*. *Diversity*, 15(3), 2 - 22. <https://doi.org/10.3390/d15030421>.

15. Nguyễn Văn Công, Trần Thị Ngọc Chiêm, Nguyễn Hữu Chiêm, Nguyễn Xuân Hoàng & Seishu Tojo (2021). Loại bỏ nitrat trong nước bằng bèo tai tượng. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam*, 11(132), 122 - 127.

16. Nguyễn Bá (1977). *Hình thái học thực vật* (Tập 1). Nxb Đại học và Trung học Chuyên nghiệp, Hà Nội. 258 trang.

17. Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*, 35, 11 - 17. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00047-4).

18. Mustafa. H. M. & Hayder. G. (2021). Performance of *Salvinia molesta* plants in tertiary treatment of domestic. *Heliyon*, 7(1), e06040. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06040>.

19. Võ Thị Phương Thảo & Ngô Thụy Diễm Trang (2025). Tiềm năng giảm ô nhiễm trong nước thải đô thị của năm loài hoa kiểng trong điều kiện thí nghiệm. *Tạp chí Khoa học, Đại học Cần Thơ*, 61, 120 - 132. <https://doi.org/10.22144/ctujos.2025.063>.

20. Nguyễn Tiến Đạt, Võ Thị Phương Thảo,

Quách Ngọc Ngân Khánh, Phan Văn Nhiệm, Trần Lê Minh Luân, Trần Hải Anh & Ngô Thụy Diễm Trang (2025). Ảnh hưởng của mật độ cây bách thủy tiên (*Echinodorus cordifolius*) đến khả năng sinh trưởng và hiệu suất xử lý nước thải đô thị. *Tạp chí Khoa học Nông nghiệp Việt Nam*, 23(4), 420 - 429. <https://doi.org/10.31817/tckhnnvn>.

21. Thái Văn Anh & Lê Thị Cẩm Chi (2016). Nghiên cứu khả năng xử lý nước thải sinh hoạt bằng mô hình đất ngập nước nhân tạo dùng Sậy, Nén, Vetiver. *Tạp chí Khoa học Công nghệ và Thực phẩm - Chuyên san Công nghệ Sinh học và Kỹ thuật Môi trường*, 53 - 60.

22. Lê Diễm Kiều, Phạm Quốc Nguyên, Trần Thị Huỳnh Như & Ngô Thụy Diễm Trang (2015). Diễn biến thành phần đạm của nước thải ao nuôi thâm canh cá tra (*Pangasianodon hypophthalmus*) trong điều kiện thủy canh cỏ mồm mỡ (*Hymenachne acutigluma*). *Tạp chí Khoa học, Trường Đại học Cần Thơ*, 80 - 87.

23. Panrare A., Tondee T. & Sohsalam P. (2016). Effect of plant density in constructed wetland on domestic wastewater treating efficiency. *International Journal of Applied and Physical Sciences*, 2(1), 7 - 12.

24. Correll, D. L. (1998). *The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. Journal of Environmental Quality*, 27(2), 261 - 266.

25. Shah, M., Hashmi, H. N., Ali, A. & Ghumman, A. R. (2014). Performance assessment of aquatic macrophytes for treatment of municipal wastewater. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 106 - 117. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-106>.

26. Sudiarto, S. I. A., Renggaman, A. & Choi, H. L. (2019). Floating aquatic plants for total nitrogen and phosphorus removal from treated swine wastewater and their biomass characteristics. *Journal of Environmental Management*, 231, 763 - 769. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.070>.

EFFECT OF NITROGEN AND PHOSPHORUS CONCENTRATIONS ON THE TREATMENT EFFICIENCY OF BIOGAS EFFLUENT OF GIANT SALVINIA (*Salvinia molesta*)

Ton Thien Giap¹, Vo Thi Phuong Thao¹, Nguyen Ngoc Han¹, Pham Thi Han¹,
Le Minh Duy¹, Tran Khanh Vi¹, Ngo Thuy Diem Trang¹

¹*College of Environment and Natural Resources, Can Tho University*

Abstract

The study was conducted to determine the potential of giant salvinia (*Salvinia molesta*) for treating biogas effluent. The experiment was conducted in a nethouse with 6 treatments, which were the dilution ratio of biogas effluent (NT) from pig farms with river water (NS), including of 5% NT + 95% NS (NT1), 10% NT + 90% NS (NT2), 20% NT + 80% NS (NT3), 30% NT + 70% NS (NT4), 40% NT + 60% NS (NT5) and 50% NT + 50% NS (NT6). The treatments were arranged in a completely randomized design with 3 replications. A plant weight of 158 g/tank (equivalent to 158 g for 0.15 m² of treatment area) was applied to treat wastewater with each tank volume of 35 L (25 cm). The hydraulic retention time in the system was set for 15 days and water samples were collected at each every 5 days. After 15 days of operation, the treated water quality parameters including pH, COD and TP were all within the allowable limits according to QCVN 62:2025/BTNMT (column B). The COD removal efficiency of the treatments NT1, NT2, NT3, NT4, NT5, NT6 were 77.2; 72.1; 79.4; 75.6; 82.8; 72.5%, respectively. Similarly, the total inorganic nitrogen (TIN) removal efficiency were 98.1; 98.4; 98.8; 99.0; 99.1; 98.6% and TP was removed with the respective efficiencies of 96.5; 86.6; 98.3; 96.3; 98.1; 90.3%. In which, the NT3, NT4, NT5 treatments simultaneously provided the highest COD, TIN, TP removal efficiency. This shows that the inlet concentrations of about 216.0 - 248.0 mg COD/L, 13.9 - 29.7 mg TIN/L, 5.2 - 8.3 mg TP/L of NT3, NT4, NT5 treatments are optimal for the absorption activity of giant salvinia as well as symbiotic microbial processes, helping the system operate stably and achieve outstanding treatment efficiency. Giant Salvinia fresh weight was increased 2.08 - 2.18 times after 15 days and the dilution ratios did not affect the plant growth. Using giant salvinia for wastewater treatment is an effective, low-cost biological solution, easy to apply for households in the Mekong delta in the VACB model.

Keywords: *Salvinia molesta*, nitrogen, removal efficiency, biogas effluent, phosphorus.

Ngày nhận bài: 6/10/2025

Ngày chuyển phản biện: 10/10/2025

Ngày thông qua phản biện: 5/11/2025

Ngày duyệt đăng: 20/11/2025