

Ảnh hưởng của mật độ nuôi đến chất lượng và hệ số phát thải carbon, nitơ, photpho trong trầm tích đáy ao nuôi tôm thẻ chân trắng tại Ninh Bình**Nguyễn Đức Bình^{1*}, Phan Trọng Bình¹, Nguyễn Thị Minh Nguyệt¹,
Mai Đăng Nhân², Vũ Văn Duy²**¹*Viện Khoa học Thủy sản Việt Nam, phường Từ Sơn, tỉnh Bắc Ninh, Việt Nam*²*Chi cục Thủy sản - Kiểm Ngư Ninh Bình, phường Hoa Lư, tỉnh Ninh Bình, Việt Nam*

Ngày nhận bài 1/4/2026; ngày chuyển phản biện 3/4/2026;

ngày nhận phản biện 21/4/2026; ngày chấp nhận đăng 18/5/2026

Tóm tắt:

Nghiên cứu này nhằm đánh giá nồng độ và hệ số phát thải carbon hữu cơ (OC), tổng nitơ (TN) và tổng photpho (TP) trong trầm tích đáy của ba mô hình nuôi tôm thẻ chân trắng với mật độ khác nhau tại Ninh Bình, gồm: siêu thâm canh (A, 219 con/m²), siêu thâm canh (B, 167 con/m²) và thâm canh (C, 92 con/m²). Mẫu trầm tích được thu bằng bẫy chuyên dụng qua bốn giai đoạn nuôi (TN1-TN4). Kết quả cho thấy, nồng độ OC, TN và TP tăng dần theo thời gian nuôi và tỷ lệ thuận với mật độ nuôi. Ở cuối vụ, mô hình A ghi nhận giá trị lớn nhất (OC: 4,00±0,32%; TN: 5.811±380 mg/kg; TP: 2.856±210 mg/kg), tiếp đến là mô hình B (3,65±0,28%; 4.791±320 mg/kg; 2.026±150 mg/kg) và thấp nhất là mô hình C (2,24±0,19%; 3.260±240 mg/kg; 1.530±110 mg/kg). Hệ số phát thải ($F_{i-bùn}$) cao nhất ở mô hình A (OC: 6.468 kg/ha/vụ; TN: 932 kg/ha/vụ; TP: 439 kg/ha/vụ). Mật độ nuôi cao làm gia tăng tích tụ và phát thải chất hữu cơ cùng dinh dưỡng trong trầm tích, từ đó làm tăng áp lực lên môi trường.

Từ khóa: carbon hữu cơ, hệ số phát thải, mật độ nuôi, tôm thẻ chân trắng, tổng nitơ, tổng photpho.

Chỉ số phân loại: 4.5, 4.7**Effects of stocking density on sediment quality and carbon, nitrogen, and
phosphorus emission factors in bottom sediments of whiteleg shrimp ponds
in Ninh Binh province****Duc Binh Nguyen^{1*}, Trong Binh Phan¹, Thi Minh Nguyet Nguyen¹,
Dang Nhan Mai², Van Duy Vu²**¹*Vietnam Academy of Fishery Sciences, Tu Son Ward, Bac Ninh Province, Vietnam*²*Ninh Binh Sub-Department of Fisheries and Surveillance,
Hoa Lu Ward, Ninh Binh Province, Vietnam*

Received 1 April 2026; revised 21 April 2026; accepted 18 May 2026

*Tác giả liên hệ: Email: ndbinh@vafis.vn

Abstract:

This study aimed to assess the concentrations and emission factors of organic carbon (OC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) in bottom sediments of three whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) farming models with different densities in Ninh Binh Province, including: super-intensive (A, 219 ind./m²), super-intensive (B, 167 ind./m²), and intensive (C, 92 ind./m²). Sediment samples were collected using a specialised trap over four rearing periods (TN1-TN4). The results showed that OC, TN, and TP concentrations increased gradually with rearing time and were directly proportional to stocking density. At the end of the crop, model A recorded the highest values (OC: 4.00±0.32%; TN: 5,811±380 mg/kg; TP: 2,856±210 mg/kg), followed by model B (3.65±0.28%; 4,791±320 mg/kg; 2,026±150 mg/kg), and the lowest was model C (2.24±0.19%; 3,260±240 mg/kg; 1,530±110 mg/kg). The emission factor (F_{i-bun}) was highest in model A (OC: 6,468 kg/ha/crop; TN: 932 kg/ha/crop; TP: 439 kg/ha/crop). High stocking density increased the accumulation and emission of organic matter and nutrients in the sediment, thereby increasing environmental pressure.

Keywords: emission factor, organic carbon, stocking density, total nitrogen, total phosphorus, whiteleg shrimp.

Classification numbers: 4.5, 4.7

1. Đặt vấn đề

Nuôi tôm nước lợ là ngành kinh tế mũi nhọn của Việt Nam, với tôm thẻ chân trắng (*Litopenaeus vannamei*) là đối tượng chủ lực trong các mô hình thâm canh (TC) và siêu thâm canh (STC). Theo số liệu của Hải quan Việt Nam, tổng kim ngạch xuất khẩu tôm của Việt Nam năm 2025 đạt 4,6 tỷ USD, tăng 19% so với năm 2024, mức cao nhất từ trước đến nay [1]. Nghề nuôi tôm đã từng bước chuyển mình thành ngành hàng xuất khẩu chiến lược, đóng góp lớn vào kim ngạch xuất khẩu nông nghiệp và tạo sinh kế cho hàng triệu lao động [2]. Bên cạnh những giá trị kinh tế, quá trình thâm canh hóa đã dẫn đến sự tích tụ đáng kể chất hữu cơ và dinh dưỡng trong ao nuôi. Trong đó, trầm tích đáy ao đóng vai trò là bể chứa chính cho phần lớn vật chất đầu vào không được tôm sử dụng, chủ yếu là các hợp chất hữu cơ và dinh dưỡng dư thừa từ hoạt động nuôi [3, 4].

Hiệu suất sử dụng dinh dưỡng trong nuôi tôm thâm canh còn thấp. Nghiên cứu của T.T. Cao và cs (2025) [5] ghi nhận khoảng 13,8% N và 11,4% P từ thức ăn được tôm giữ lại; trong khi đó, A. Sahrijanna và cs (2024) [6] báo cáo tỷ lệ tương ứng là 22,27% N và

9,79% P. Phần lớn dinh dưỡng còn lại tích tụ trong bùn đáy, nước thải hoặc thất thoát ra môi trường. Sự tích tụ này là nguồn gây ô nhiễm thứ cấp, thúc đẩy phân hủy yếm khí, phát sinh khí độc (H_2S , NH_3) và khí nhà kính (CH_4 , N_2O), ảnh hưởng xấu đến sức khỏe tôm nuôi và hệ sinh thái xung quanh [7-9].

Nghiên cứu trước đây của N.D. Binh và cs (2025) [10] đã xác định được ảnh hưởng của mật độ nuôi đến khối lượng trầm tích tích lũy (F^*) tại Ninh Bình. Kết quả cho thấy mô hình STC mật độ 219 con/m² (mô hình A) có tổng lượng trầm tích cao nhất (175 tấn/ha/vụ), tiếp đến là mô hình STC 167 con/m² (mô hình B) với 161 tấn/ha/vụ và thấp nhất ở mô hình TC 92 con/m² (mô hình C) với 131 tấn/ha/vụ. Tuy nhiên, để đánh giá đầy đủ tác động môi trường của các mô hình nuôi, cần thiết phải xác định không chỉ khối lượng mà còn cả chất lượng của trầm tích, đặc biệt là hàm lượng các chất ô nhiễm như carbon hữu cơ (OC), tổng nitơ (TN) và tổng photpho (TP).

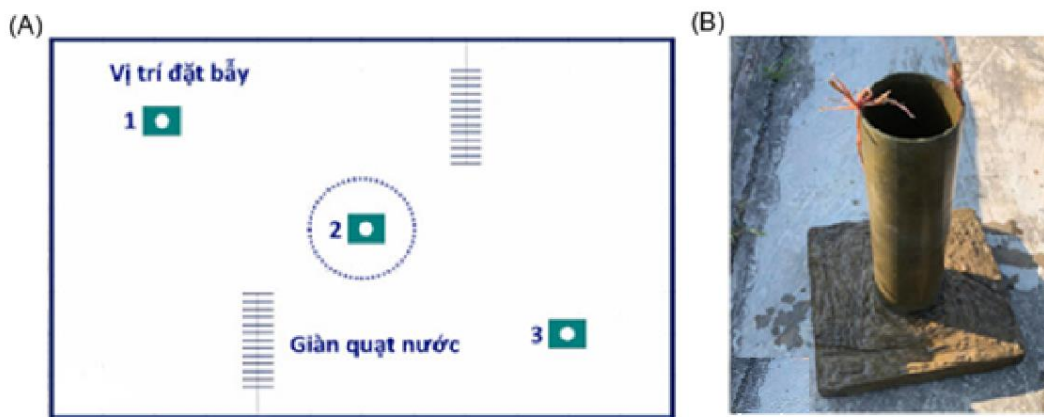
Nghiên cứu này được thực hiện nhằm bổ sung khoảng trống đó, với mục tiêu: (i) Xác định nồng độ OC, TN, TP trong trầm tích đáy theo thời gian ở các mô hình nuôi có mật độ khác nhau; (ii) Tính toán hệ số phát thải các chất ô nhiễm ($F_{i-bùn}$) cho từng mô hình dựa trên khối lượng trầm tích đã công bố [10]; (iii) Đánh giá mối tương quan giữa mật độ nuôi và mức độ ô nhiễm trầm tích, làm cơ sở khoa học cho các giải pháp quản lý chất thải rắn hiệu quả.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Đối tượng và địa điểm nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện tại xã Hải Tiến và Hải Xuân, tỉnh Ninh Bình, từ tháng 9 đến tháng 12 năm 2024. Đây là khu vực nuôi tôm trọng điểm của tỉnh, đại diện cho vùng nuôi tôm nước lợ phía Bắc. Thí nghiệm kế thừa hệ thống 9 ao nuôi đã được mô tả chi tiết trong nghiên cứu [10], các ao được bố trí và vận hành từ năm 2024. Diện tích ao trung bình 1.200 m², được lót bạt và có hệ thống quạt nước, sục khí đáy. Tôm thẻ chân trắng (PL12-15) được nuôi với ba mật độ khác nhau, mỗi mật độ lặp lại ba lần: Mô hình A (siêu thâm canh mật độ cao): 219±5 con/m²; mô hình B (siêu thâm canh mật độ trung bình): 167±4 con/m²; mô hình C (thâm canh): 92±3 con/m².

Quy trình chăm sóc, quản lý thức ăn (thức ăn viên công nghiệp, FCR 1,2-1,5), xử lý môi trường và xi phông đáy được thực hiện đồng nhất theo quy trình kỹ thuật của vùng. Hệ thống ao nuôi được bố trí tương tự nhau, bao gồm: hệ thống cấp oxy trong các ao có sục khí đáy (1 máy 3,5 kW/ao, 150-200 cục sủi) và hai giàn quạt nước (3,5 kW/giàn, 12-14 cánh/giàn) [10]. Các giàn nước được bố trí so le nhằm tập trung chất thải (hình 1A).



Hình 1. Dụng cụ lấy mẫu và sơ đồ lấy mẫu trầm tích.

2.2. Thu mẫu trầm tích

Bẫy trầm tích được sử dụng là loại chuyên dụng theo mô tả của H.S. Suwoyo và cs (2015) [11]. Bẫy được làm từ ống nhựa PVC (đường kính 12 cm, diện tích mặt cắt ngang 95 cm², cao 40 cm) gắn trên đế bê tông (25×25 cm) (hình 1B). Mỗi ao đặt 3 bẫy cố định tại các vị trí khác nhau (giữa ao và 2 góc đại diện) ngay từ đầu vụ nuôi.

Mẫu trầm tích được thu qua 5 đợt trong vụ nuôi 4 tháng: đợt 1 (ngày 30, TN1), đợt 2 (ngày 60, TN2), đợt 3 (ngày 75) và đợt 4 (ngày 90) được lấy để tính giá trị trung bình cho tháng nuôi thứ 3 (TN3), đợt 5 (ngày 103, TN4 - cuối vụ). Giá trị TN3 là trung bình của đợt 3 và đợt 4. Mẫu từ 3 bẫy trong cùng một ao được trộn thành một mẫu hỗn hợp đại diện cho ao. Mẫu bùn sau khi thu được để ráo nước, phơi khô tự nhiên, sau đó sấy ở 105°C đến khối lượng không đổi và nghiền mịn để phân tích.

2.3. Phân tích chất lượng trầm tích

Các chỉ tiêu phân tích bao gồm: Hàm lượng OC được xác định bằng phương pháp Walkley-Black (TCVN 8941:2011); TN được xác định bằng phương pháp Kjeldahl (TCVN 6498:1999); TP được xác định bằng phương pháp so màu (TCVN 8942:2011).

2.4. Phương pháp xác định hệ số phát thải chất ô nhiễm từ bùn đáy ($F_{i-bùn}$)

Hệ số phát thải chất ô nhiễm từ bùn đáy ($F_{i-bùn}$) cho cả vụ nuôi được xác định dựa trên hai nguồn số liệu chính:

(i) Khối lượng trầm tích tích lũy (F^*): Giá trị F^* (tấn khô/ha) cho từng đợt thu mẫu được kế thừa từ kết quả nghiên cứu đã công bố của N.D. Binh và cs (2025) [10] trên cùng hệ thống thí nghiệm (bảng 1).

(ii) Nồng độ chất ô nhiễm trong trầm tích ($C_{i-bùn}$) được xác định thông qua hàm lượng OC, TN và TP tại từng đợt thu mẫu (TN1, TN2, TN3, TN4) (bảng 1). Cách tiếp cận này đã được áp dụng trong các nghiên cứu của K. Sabilu và cs (2021) [12] cho thấy, hàm lượng TOC, TN và TP trong trầm tích có xu hướng gia tăng theo thời gian nuôi và đạt giá trị cao vào cuối vụ, phản ánh sự tích tụ tải lượng chất thải trong hệ thống nuôi tôm thâm canh.

Hệ số phát thải chất ô nhiễm từ bùn đáy cho cả vụ nuôi được tính theo công thức:

$$F_{i-bùn} (\text{cả vụ}) = \sum (C_{i-bùn-n} \times F_n^* \times 0,001) \quad (1)$$

trong đó: $F_{i-bùn}$ (cả vụ) là hệ số phát thải của chất ô nhiễm i (OC, TN hoặc TP) từ bùn đáy cho cả vụ nuôi, đơn vị kg/ha/vụ; $C_{i-bùn-n}$ là nồng độ chất ô nhiễm i tại đợt thu mẫu thứ n ($n=TN1, TN2, TN3, TN4$), đơn vị mg/kg; F_n^* là khối lượng trầm tích khô tại đợt thu mẫu thứ n, đơn vị tấn khô/ha; 0,001 là hệ số chuyển đổi đơn vị từ mg/kg sang kg/tấn; $F_{i-bùn}$ (cả vụ) là tổng hệ số phát thải của 4 đợt thu mẫu (TN1, TN2, TN3, TN4).

2.5. Xử lý số liệu thống kê

Số liệu được xử lý bằng phần mềm Microsoft Excel, Real Statistics Using Excel. Sử dụng thống kê mô tả (giá trị trung bình, độ lệch chuẩn). Kiểm định Shapiro-Wilk được dùng để kiểm tra phân phối chuẩn. Kiểm định Levene được sử dụng để kiểm tra sự đồng nhất của phương sai. Để so sánh nồng độ các chất ô nhiễm giữa các mô hình và giữa các thời điểm, sử dụng phân tích phương sai hai yếu tố (Two-way ANOVA). Khi có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê, kiểm định hậu kiểm Tukey HSD được sử dụng để so sánh cụ thể giữa các cặp. Hệ số tương quan Pearson (r) được dùng để đánh giá mối liên hệ giữa mật độ nuôi và nồng độ các chất ô nhiễm. Mức ý nghĩa thống kê được xác định ở $\alpha=0,05$.

3. Kết quả

3.1. Nồng độ các chất ô nhiễm trong trầm tích theo thời gian nuôi

Kết quả phân tích nồng độ OC, TN và TP trong trầm tích qua các đợt thu mẫu được trình bày trong bảng 1. Để phù hợp với cách tính trong nghiên cứu của N.D. Bình và cs (2025) [10], giá trị cho tháng TN3 được tính là trung bình của hai đợt lấy mẫu trong tháng (đợt 3 + 4).

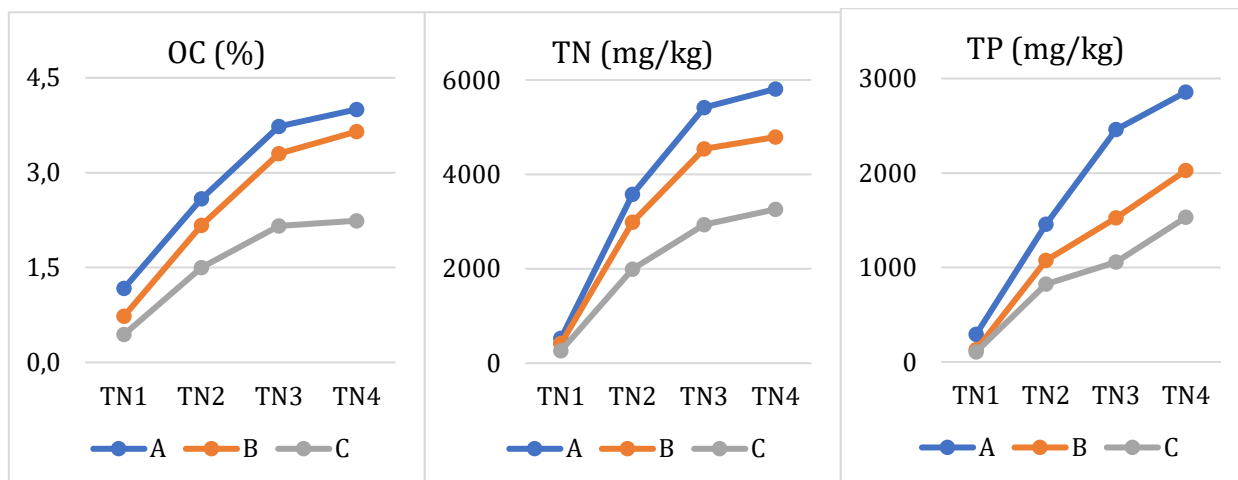
Biến động theo thời gian nuôi: Bảng 1 và hình 2 cho thấy, nồng độ OC, TN, TP tăng dần theo thời gian ở cả ba mô hình, từ mức thấp ở TN1, tăng rõ rệt ở TN2 và tiếp tục tăng đến TN3. Ở mô hình A, nồng độ OC tăng từ 1,17% (TN1) lên 3,73% (TN3); TN từ 527 mg/kg lên 5.419 mg/kg; TP từ 293 mg/kg lên 2.460 mg/kg. Ở cuối vụ (TN4), nồng độ các chất ô nhiễm tiếp tục duy trì ở mức cao, thậm chí có xu hướng tăng nhẹ so với TN3 (ví dụ:

mô hình A tăng từ 3,73 lên 4,00% đối với OC; TN từ 5.419 mg/kg lên 5.811 mg/kg; TP từ 2.460 mg/kg lên 2.856 mg/kg). Điều này cho thấy, dù ở giai đoạn cuối vụ, có thực hiện xi phông và diễn ra quá trình phân hủy tự nhiên, nhưng lượng chất thải tích lũy từ suốt vụ nuôi vẫn vượt quá khả năng loại bỏ, dẫn đến sự gia tăng hoặc duy trì nồng độ chất hữu cơ và dinh dưỡng trong trầm tích [4].

Bảng 1. Nồng độ OC, TN, TP trong trầm tích qua các giai đoạn nuôi.

Mô hình	Thông số	TN1	TN2	TN3	TN4
A (219 con/m ²)	OC (%)	1,17±0,15	2,59±0,21	3,73±0,28	4,00±0,32
	TN (mg/kg)	527±45	3.580±210	5.419±350	5.811±380
	TP (mg/kg)	293±28	1.458±95	2.460±180	2.856±210
	Lượng trầm tích (tấn/ha/vụ) [10]	4,96	11,95	78,48	79,34
B (167 con/m ²)	OC (%)	0,73±0,08	2,17±0,18	3,30±0,25	3,65±0,28
	TN (mg/kg)	417±35	2.992±180	4.542±300	4.791±320
	TP (mg/kg)	129±12	1.075±70	1.523±110	2.026±150
	Lượng trầm tích (tấn/ha/vụ) [10]	4,09	10,82	73,88	71,79
C (92 con/m ²)	OC (%)	0,44±0,05	1,50±0,12	2,16±0,18	2,24±0,19
	TN (mg/kg)	266±22	1.995±130	2.934±210	3.260±240
	TP (mg/kg)	107±10	824±55	1.058±80	1.530±110
	Lượng trầm tích (tấn/ha/vụ) [10]	2,67	7,78	60,39	60,17

Giá trị TN3 là trung bình cộng của đợt 3 và đợt 4; (n=3 ao x 3 lần lặp lại/mô hình).



Hình 2. Nồng độ OC, TN, TP trong trầm tích qua các giai đoạn nuôi. Ký hiệu A, B và C là các mô hình nuôi.

Biến động theo mô hình nuôi: Nồng độ OC, TN và TP trong trầm tích có mối tương quan chặt chẽ với mật độ thả nuôi. Cụ thể, các giá trị cao nhất được ghi nhận ở mô hình A (219 con/m²), tiếp đến là mô hình B (167 con/m²) và thấp nhất ở mô hình C (92 con/m²). Vào cuối vụ nuôi (TN4), nồng độ OC ở mô hình A cao gấp 1,1 lần so với mô hình B và 1,8 lần so với mô hình C; tương tự, nồng độ TN cao gấp 1,2 lần so với mô hình B và 1,8 lần so với mô hình C; trong khi nồng độ TP cao gấp 1,4 lần so với mô hình B và 1,9 lần so với mô hình C.

Xu hướng này được giải thích bởi lượng thức ăn đầu vào tăng tỷ lệ thuận với mật độ thả nuôi, dẫn đến gia tăng thức ăn dư thừa và chất thải từ tôm. Các chất này tích tụ dần trong trầm tích, làm gia tăng hàm lượng chất hữu cơ và dinh dưỡng theo mức độ thâm canh của từng mô hình.

Nhận xét: TN1 đến TN2 (30-60 ngày): Nồng độ TN, TP tăng rất mạnh (397,6-733,3%) do tôm sinh trưởng nhanh, thức ăn và chất thải tăng đột biến. TN2 đến TN3 (60-90 ngày): Tốc độ tăng chậm lại (OC 44,0-52,1%, TN 47,1-51,8%, TP 28,4-68,7%). Mô hình A có TP tăng cao nhất (68,7%), thể hiện áp lực phát pho lớn ở siêu thâm canh. TN3 đến TN4 (cuối vụ, 90-103 ngày): OC và TN chỉ tăng 3,7-11,1% nhờ xi phông và phân hủy; TP vẫn tăng 16,1-44,6% (cao nhất ở mô hình C: 44,6%), do phát pho khó phân hủy, dễ tích tụ (bảng 2).

Bảng 2. Tỷ lệ tăng (%) nồng độ OC, TN, TP giữa các tháng nuôi.

Thông số	Mô hình (con/m ²)	TN2 so với TN1 (%)	TN3 so với TN2 (%)	TN4 so với TN3 (%)
OC	A (219)	+121,4	+44,0	+7,2
	B (167)	+197,3	+52,1	+10,6
	C (92)	+240,9	+44,0	+3,7
TN	A (219)	+579,3	+51,4	+7,2
	B (167)	+617,5	+51,8	+5,5
	C (92)	+650,0	+47,1	+11,1
TP	A (219)	+397,6	+68,7	+16,1
	B (167)	+733,3	+41,7	+33,0
	C (92)	+670,1	+28,4	+44,6

Công thức tính = [(giá trị sau - giá trị trước)/giá trị trước] × 100. Số liệu được làm tròn đến một chữ số thập phân.

So sánh mô hình: Mật độ càng cao, tích lũy tuyệt đối càng lớn, nhưng nhờ quản lý tốt, mô hình A vẫn giữ mức tăng OC, TN cuối vụ thấp (~7%), khẳng định vai trò của quản lý kỹ thuật.

3.2. Ảnh hưởng của mô hình và thời gian nuôi đến tích lũy chất ô nhiễm trong trầm tích

Kiểm định Shapiro-Wilk và Levene cho thấy, dữ liệu OC, TN và TP đáp ứng các giả định về phân phối chuẩn và đồng nhất phương sai ($p > 0,05$). Kết quả Two-way ANOVA cho thấy, cả yếu tố mô hình (mật độ nuôi) và thời gian nuôi đều ảnh hưởng rất có ý nghĩa thống kê đến nồng độ cả ba chất ô nhiễm ($p < 0,001$). Tương tác giữa mô hình và thời gian cũng có ý nghĩa ($p < 0,01$ đối với OC; $p < 0,001$ đối với TN và TP), cho thấy sự khác biệt giữa các mô hình thay đổi theo từng giai đoạn nuôi.

Để làm rõ ảnh hưởng của mật độ nuôi, nghiên cứu tiến hành so sánh nồng độ các chất ô nhiễm giữa ba mô hình A (219 con/m²), B (167 con/m²) và C (92 con/m²) tại thời điểm cuối vụ (TN4) - thời điểm tích lũy cao nhất, làm cơ sở tính hệ số phát thải. Để đánh giá xu hướng tích lũy theo thời gian, so sánh được thực hiện trên mô hình A (mật độ cao nhất) vì mô hình này có biến động rõ rệt nhất và đại diện cho xu hướng chung.

3.3. So sánh giữa các mô hình tại thời điểm cuối vụ (TN4)

Kiểm định hậu kiểm Tukey HSD tại thời điểm cuối vụ (TN4) cho thấy, nồng độ OC, TN và TP đều khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa ba mô hình ($p < 0,05$). Cụ thể, mô hình A

(mật độ cao nhất) có nồng độ các chất ô nhiễm cao nhất, tiếp đến là mô hình B và thấp nhất là ở mô hình C. Sự chênh lệch giữa A và C là rất có ý nghĩa đối với cả ba chỉ tiêu ($p < 0,001$). Giữa A và B, sự khác biệt có ý nghĩa đối với OC ($p < 0,05$), TN ($p < 0,05$) và TP ($p < 0,01$). Giữa B và C, sự khác biệt cũng rất có ý nghĩa đối với OC và TN ($p < 0,001$), trong khi TP khác biệt ở mức $p < 0,05$.

3.4. So sánh theo thời gian trong cùng mô hình A

Kiểm định hậu kiểm Tukey HSD đối với các thông số OC, TN và TP trong mô hình A cho thấy các thông số này đều tăng rõ rệt theo thời gian nuôi. Sự khác biệt giữa TN1 với TN2, TN3 và TN4 đều có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$ đến $p < 0,001$), phản ánh quá trình tích tụ mạnh chất hữu cơ và dinh dưỡng trong trầm tích đáy ao. Giai đoạn TN2-TN3 tiếp tục ghi nhận sự gia tăng có ý nghĩa thống kê, trong khi giữa TN3 và TN4 không có sự khác biệt có ý nghĩa ($p > 0,05$), cho thấy các chất ô nhiễm đạt mức tích tụ cao từ giữa vụ và duy trì ổn định đến cuối vụ nuôi.

3.5. Hệ số phát thải chất ô nhiễm từ bùn đáy ($F_{i-bùn}$)

Dựa trên nồng độ OC, TN, TP (bảng 1) và khối lượng trầm tích tích lũy của từng đợt thu mẫu [10], hệ số phát thải $F_{i-bùn}$ cho cả vụ được tính theo công thức (1) và tổng hợp kết quả trong bảng 3.

Áp dụng công thức (1) cho từng đợt thu mẫu (TN1 đến TN4) và tổng hợp kết quả, hệ số phát thải $F_{i-bùn}$ cho cả vụ nuôi được trình bày trong bảng 3. Trong đó, cột F^* (175; 161; 131) là tổng khối lượng trầm tích tích lũy của cả 4 đợt (ví dụ, mô hình A: $4,96 + 11,95 + 78,48 + 79,34 = 174,73 \approx 175$ tấn/ha/vụ).

Kết quả cho thấy sự khác biệt rất lớn về tải lượng ô nhiễm giữa các mô hình: Mô hình A có hệ số phát thải cao nhất: F_{OC} là 6.468 kg/ha/vụ, F_{TN} là 932 kg/ha/vụ, F_{TP} là 439 kg/ha/vụ; mô hình B cho giá trị trung gian: F_{OC} là 5.323 kg/ha/vụ, F_{TN} là 714 kg/ha/vụ, F_{TP} là 270 kg/ha/vụ; mô hình C có tải lượng thấp nhất: F_{OC} là 2.781 kg/ha/vụ, F_{TN} là 390 kg/ha/vụ, F_{TP} là 163 kg/ha/vụ.

Bảng 3. Hệ số phát thải chất ô nhiễm từ bùn đáy cho cả vụ nuôi.

Mô hình	F^* (tấn/ha/vụ)	F_{OC} (kg/ha/vụ)	F_{TN} (kg/ha/vụ)	F_{TP} (kg/ha/vụ)
A (219 con/m ²)	175	6.468	932	439
B (167 con/m ²)	161	5.323	714	270
C (92 con/m ²)	131	2.781	390	163

3.6. Môi trường quan giữa mật độ nuôi và chất lượng trầm tích

Để đánh giá mức độ liên hệ giữa mật độ thả nuôi và chất lượng trầm tích, phân tích tương quan được thực hiện giữa mật độ nuôi, nồng độ các chất ô nhiễm (OC, TN, TP) và hệ số phát thải $F_{i-bùn}$. Kết quả phản ánh mức độ chặt chẽ của các mối quan hệ này thông qua hệ số tương quan Pearson (bảng 4).

Bảng 4. Tương quan giữa mật độ, nồng độ chất ô nhiễm và hệ số phát thải $F_{i-bùn}$

Thông số	Mật độ (con/m ²)	OC (%)	TN (mg/kg)	TP (mg/kg)	F_{OC} (kg/ha/vụ)	F_{TN} (kg/ha/vụ)	F_{TP} (kg/ha/vụ)
Mật độ	1						
OC	0,96*	1					
TN	0,95*	0,99*	1				
TP	0,94*	0,99*	0,98*	1			
F_{OC}	0,97*	0,99*	0,99*	0,98*	1		
F_{TN}	0,96*	0,98*	0,99*	0,98*	0,99*	1	
F_{TP}	0,95*	0,99*	0,98*	0,99*	0,99*	0,99*	1

* $p < 0,001$; $n = 9$ (giá trị trung bình của 3 ao/mô hình).

Kết quả tương quan Pearson cho thấy: mật độ nuôi tương quan rất chặt với nồng độ OC ($r = 0,96$), TN ($r = 0,95$), TP ($r = 0,94$) và với hệ số phát thải F_{OC} ($r = 0,97$), F_{TN} ($r = 0,96$), F_{TP} ($r = 0,95$) ($p < 0,001$). OC, TN và TP có tương quan gần như hoàn hảo với nhau ($r \geq 0,98$). Điều này phản ánh nguồn gốc chung của chúng từ thức ăn dư thừa và phân tôm.

4. Bàn luận

Kết quả nghiên cứu phản ánh rõ nét nguồn gốc các chất ô nhiễm trong trầm tích. Ở các mô hình mật độ cao, lượng thức ăn công nghiệp sử dụng lớn hơn. Mặc dù FCR được kiểm soát ở mức 1,2-1,5, một phần đáng kể thức ăn không được tôm tiêu hóa (thức ăn dư thừa) và sản phẩm bài tiết (phân tôm) đã lắng đọng xuống đáy ao, làm gia tăng hàm lượng OC, TN và TP. Điều này phù hợp với nhận định của S. Ma và cs (2023) [3] về vai trò của trầm tích như một bể chứa dinh dưỡng.

Nồng độ các chất ô nhiễm trong trầm tích tăng dần theo thời gian nuôi ở cả ba mô hình (bảng 1). Ở giai đoạn đầu (TN1), các giá trị còn ở mức thấp (OC 1,17%; TN 527 mg/kg; TP 293 mg/kg ở mô hình A). Đến giai đoạn TN2 và TN3, nồng độ tăng mạnh, phản ánh sự tích lũy liên tục chất thải trong quá trình tôm phát triển. Ở cuối vụ (TN4), nồng độ các chất vẫn tiếp tục ở mức cao, thậm chí tăng nhẹ so với TN3 (ví dụ mô hình A: OC từ

3,73% lên 4,00%; TN từ 5419 mg/kg lên 5811 mg/kg; TP từ 2460 mg/kg lên 2856 mg/kg). Điều này cho thấy dù ở giai đoạn cuối có thể có các biện pháp xi phông và phân hủy tự nhiên, nhưng lượng chất thải tích lũy từ suốt vụ nuôi vẫn vượt quá khả năng loại bỏ, dẫn đến nồng độ ô nhiễm trong trầm tích không giảm mà còn có xu hướng gia tăng [4].

Kết quả ở mô hình A (OC đạt 4,00%; TN đạt 5811 mg/kg và TP đạt 2856 mg/kg trong trầm tích khô vào cuối vụ) cho thấy sự tích tụ đáng kể chất hữu cơ và dinh dưỡng trong ao nuôi siêu thâm canh. Tương tự, S. Kunlapapuk và cs (2021) [13] ghi nhận hàm lượng OC, TN và TP trong trầm tích ao nuôi *Litopenaeus vannamei* tăng liên tục theo thời gian và đạt cao nhất vào cuối vụ, lần lượt đạt 4,87% OC, 4.300 mg/kg TN và 800 mg/kg TP. Ngoài ra, H. Wu và cs (2014) [14] ghi nhận tải lượng phát thải từ ao nuôi tôm đạt 712,84 kg TN/ha/năm và 353,86 kg TP/ha/năm ở mật độ nuôi khoảng 19,7 con/m², trong khi nghiên cứu hiện tại ở mô hình C (92 con/m²) đạt tải lượng khoảng 854 kg TN/ha/năm và 400 kg TP/ha/năm. Kết quả này cho thấy tải lượng dinh dưỡng có xu hướng gia tăng theo mật độ nuôi và mức độ tích tụ chất thải trong ao.

Ở mật độ tương đương mô hình B (167 con/m²), K. Sabilu và cs (2021) [12] báo cáo tải lượng cao hơn (OC 10,03-12,05; TN 2,38-2,85; TP 0,6-0,81 tấn/ha/vụ) so với mô hình B (OC 5,88; TN 0,77; TP 0,33 tấn/ha/vụ). Ở mật độ rất cao (750-1.250 con/m²), H.S. Suwoyo và cs (2019) [15] ghi nhận tải lượng cao hơn nhiều (OC 20,8-23,3; TN 3,0-3,6; TP 2,5-3,0 tấn/ha/vụ) so với mô hình A (OC 6,47; TN 0,93; TP 0,44 tấn/ha/vụ). Sự khác biệt này cho thấy, ngoài mật độ nuôi, kỹ thuật quản lý (FCR, tần suất xi phông, chế độ thay nước) đóng vai trò quan trọng trong kiểm soát tích lũy chất ô nhiễm đáy ao.

Như vậy, kết quả của nghiên cứu này nằm trong xu hướng chung: mật độ nuôi càng cao, tải lượng ô nhiễm càng lớn. Đồng thời, sự khác biệt giữa các nghiên cứu có cùng mật độ mô hình B so với K. Sabilu và cs (2021) [12] cho thấy, ngoài mật độ nuôi, các yếu tố kỹ thuật quản lý như FCR, tần suất xi phông, chế độ thay nước và hiệu quả xử lý cũng đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát tích lũy chất ô nhiễm tại đáy ao.

Sự khác biệt này phản ánh ảnh hưởng tổng hợp của mật độ nuôi và kỹ thuật quản lý. Ở các nghiên cứu có mật độ nuôi rất cao, tải lượng ô nhiễm cao hơn đáng kể; ở mật độ thấp, tải lượng thấp hơn. Bên cạnh đó, các yếu tố như FCR, tần suất xi phông và chế độ thay nước cũng đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát sự tích lũy chất ô nhiễm tại đáy ao.

Kết quả phân tích thống kê đã định lượng khẳng định mật độ nuôi là yếu tố then chốt quyết định mức độ ô nhiễm hữu cơ và dinh dưỡng của trầm tích đáy. Mối tương quan chặt chẽ này có ý nghĩa quan trọng trong công tác quản lý: khi quy hoạch vùng nuôi hoặc cấp

phép cho các cơ sở nuôi với mật độ cao, cần tính đến sức tải môi trường và yêu cầu bắt buộc về hệ thống xử lý chất thải rắn.

5. Kết luận

Kết quả cho thấy, nồng độ OC, TN và TP trong trầm tích có xu hướng gia tăng theo thời gian nuôi và tỷ lệ thuận với mật độ thả. Giá trị cao nhất ghi nhận ở mô hình A (219 con/m²) và thấp nhất ở mô hình C (92 con/m²); trong đó, nồng độ TN và TP vào cuối vụ tại mô hình A cao gấp khoảng 1,8-1,9 lần so với mô hình C.

Hệ số phát thải từ bùn thải ở mô hình A: OC là 6.468 kg/ha/vụ, TN là 932 kg/ha/vụ, TP là 439 kg/ha/vụ, cao hơn đáng kể so với các mô hình còn lại. Điều này cho thấy mật độ nuôi càng cao thì khối lượng, nồng độ và tải lượng các chất trong trầm tích càng tăng, qua đó làm gia tăng áp lực môi trường trong hệ thống nuôi.

Từ các kết quả trên, nghiên cứu đề xuất một số giải pháp quản lý nhằm giảm thiểu ô nhiễm và nâng cao tính bền vững của hoạt động nuôi tôm. Cụ thể, các cơ sở nuôi cần kiểm soát lượng thức ăn thông qua sàng ăn, kết hợp xi phông đáy định kỳ từ tháng nuôi thứ hai, đồng thời xử lý bùn thải bằng phương pháp ủ compost.

Bên cạnh đó, cơ quan quản lý cần xây dựng quy chuẩn đối với bùn thải trong nuôi trồng thủy sản, quy hoạch vùng nuôi theo hướng bố trí 20-30% diện tích ao cho xử lý chất thải tại các khu vực nuôi mật độ cao, và triển khai giám sát môi trường định kỳ thông qua các công cụ như bẫy trầm tích.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Trung tâm Nghiên cứu môi trường và bệnh thủy sản miền Bắc (Viện Khoa học Thủy sản Việt Nam). Bài báo có sử dụng số liệu nghiên cứu bởi nhiệm vụ: “Đánh giá nguồn ô nhiễm, lượng chất thải từ hoạt động nuôi tôm nước lợ khu vực phía Bắc và đề xuất giải pháp quản lý” và nhiệm vụ: “Quan trắc, cảnh báo và giám sát môi trường vùng nuôi trồng thủy sản tại một số tỉnh trọng điểm khu vực phía Bắc”.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Vietnam Fisheries Magazine (2025), “Vietnam’s shrimp exports are expected to peak at \$4.6 billion in 2025”, <https://vasep.com.vn/san-pham-xuat-khau/tom/xuat-nhap-khau/xuat-khau-tom-viet-nam-dat-dinh-4-6-ty-usd-nam-2025-35852.html>, accessed 26 March 2026 (in Vietnamese).

[2] Ministry of Agriculture and Rural Development (2024), “Turning point in the shrimp industry: Three transformations for Vietnam’s shrimp industry”,

<https://mae.gov.vn/buoc-ngoa-t-nganh-tom-ba-buoc-chuyen-minh-cua-nganh-tom-viet-nam-21385.htm>, accessed 26 March 2026 (in Vietnamese).

[3] S. Ma, X. Dong, C. Luo, et al. (2023), “Enrichment of organic carbon increases the flux of phosphorus from sediment in mariculture ponds”, *Aquaculture*, **565**, DOI: 10.1016/j.aquaculture.2022.739148.

[4] J.L. Rocha, A.C. da Silveira Pereira, A.M. Correia, et al. (2022), “A new strategy to study pond soil chemistry in intensive and extensive cultures of *Litopenaeus vannamei*: A case study in Brazil”, *Aquaculture*, **549**, DOI: 10.1016/j.aquaculture.2021.737785.

[5] T.T. Cao, A. Le Hung, J.L. Vassel, et al. (2025), “Nutrient dynamics, environmental impacts, and feed efficiency in intensive whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) farming on sandy soils in Ninh Thuan, Vietnam”, *Aquaculture Reports*, **44**, DOI: 10.1016/j.aqrep.2025.103050.

[6] A. Sahrijanna, H.S. Suwoyo, Makmur, et al. (2024), “Application of organic fertilizer made from solid waste from shrimp ponds for tilapia nursery (*Oreochromis niloticus*)”, *BIO Web of Conferences*, DOI: 10.1051/bioconf/202413604001.

[7] B.T. Iber, N.A. Kasan (2021), “Recent advances in shrimp aquaculture wastewater management”, *Heliyon*, **7(11)**, DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e08283.

[8] H. Ariadi, M. Musa, M. Mahmudi, et al. (2025), “Organic material solubility and dynamic modelling analysis of intensive shrimp farming activities in the coastal area of Pekalongan, Indonesia”, *Croatian Journal of Fisheries*, **83**, pp.71-85, DOI: 10.2478/cjf-2025-0008.

[9] Q.F. Cheng, B.K. Liao, H.C. Tseng, et al. (2025), “Shrimp mariculture may increase aquatic CO₂, CH₄, and N₂O emissions in semi-indoor and indoor ponds”, *Marine Pollution Bulletin*, **210**, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.117298.

[10] N.D. Binh, P.T. Binh, N.T.M. Nguyet, et al. (2025), “Effect of stocking density on sediment accumulation in whiteleg shrimp ponds”, *Journal of Agriculture and Environment*, **10**, DOI: 10.71254/3vdxym66.

[11] H.S. Suwoyo, S. Tahe, M. Fahrur (2015), “Characterization of sediment waste of vaname shrimp pond super intensive with different stocking density”, *Prosiding Forum Inovasi Teknologi Akuakultur*, pp.1015-1026.

[12] K. Sabilu, E. Supriyono, K. Nirmala, et al. (2021), “Sedimentary waste nutrients, water quality and production profiles of intensive *Penaeus vannamei* culture

reared in low salinities”, *AACL Bioflux*, **14(2)**, pp.683-694, <http://www.bioflux.com.ro/docs/2021.683-694.pdf>.

[13] S. Kunlapapuk, P. Saipattana, K. Limhang, et al. (2021), “Sediment accumulation rate and carbon burial rate in the Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) ponds, Phetchaburi Province, upper Gulf of Thailand”, *International Journal of Agricultural Technology*, **17(3)**, pp.929-940, ISSN 2630-0192.

[14] H. Wu, R. Peng, Y. Yang, et al. (2014), “Mariculture pond influence on mangrove areas in south China: Significantly larger nitrogen and phosphorus loadings from sediment wash-out than from tidal water exchange”, *Aquaculture*, **426-427**, pp.204-212, DOI: 10.1016/j.aquaculture.2014.02.009.

[15] H.S. Suwoyo, S. Tahe, M. Fahrur (2019), “Potential, characteristics and utilization of shrimp pond solid waste as organic fertilizer”, *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, **4(2)**, pp.411-421, DOI: 10.22161/ijeab/4.2.24.