

TỐI ƯU HÓA QUÁ TRÌNH XỬ LÝ N, P TRONG NƯỚC THẢI SINH HOẠT TẠI CẢNG BẢNG VI TẢO CHLORELLA VULGARIS: NGHIÊN CỨU ĐIỂN HÌNH TẠI CẢNG CHÙA VỄ, HẢI PHÒNG

OPTIMIZATION OF N, P TREATMENT IN PORT DOMESTIC WASTEWATER USING CHLORELLA VULGARIS MICROALGAE: A CASE STUDY AT CHUA VE PORT, HAI PHONG

NGUYỄN THỊ THÚY NHUNG*, NGUYỄN THỊ THU

Viện Môi trường, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: nhungntt.vmt@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1105>**Tóm tắt**

Nước thải sinh hoạt tại khu vực cảng Chùa Vẽ (Hải Phòng) mang tải lượng dinh dưỡng Nitơ (N) và Phospho (P) cao, tiềm ẩn rủi ro gây phú dưỡng hóa nguồn nước sông Cẩm. Nghiên cứu này ứng dụng vi tảo *Chlorella vulgaris* kết hợp mô hình bề mặt đáp ứng (RSM-BBD) nhằm tối ưu hóa quá trình xử lý dòng thải và thu hồi sinh khối. Phân tích ANOVA chứng minh mô hình hồi quy đa thức bậc hai đạt độ tin cậy xuất sắc ($R^2 > 0,99$, Lack of Fit $p > 0,05$). Thông số vận hành tối ưu được xác lập tại: Thời gian lưu nước 4,3 ngày, cường độ sáng $127\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ và mức độ tải lượng nước thải đầu vào tương đương 67,6% so với nước thải ban đầu. Tại điều kiện này, thực nghiệm kiểm chứng ghi nhận hiệu suất loại bỏ đạt 87,13% đối với Tổng Nitơ và 92,39% Tổng Phospho (sai số thực nghiệm 1,24% và 1,59%), kèm theo năng suất sinh khối 1,15g/L. Kết quả cung cấp chuỗi thông số nền tảng để định cỡ thiết bị quang phản ứng, định hướng sản xuất phân bón hữu cơ sinh học, thúc đẩy trực tiếp chiến lược Cảng xanh và kinh tế tuần hoàn.

Từ khóa: *Chlorella vulgaris*, nước thải sinh hoạt, cảng Chùa Vẽ, bề mặt đáp ứng (RSM), kinh tế tuần hoàn.

Abstract

Domestic wastewater at Chua Ve port (Hai Phong) contains high loads of Nitrogen (N) and Phosphorus (P), posing a risk of eutrophication in the Cam River. This study applied *Chlorella vulgaris* microalgae coupled with Response Surface Methodology (RSM-BBD) to optimize the wastewater treatment process and biomass recovery. ANOVA demonstrated that the quadratic polynomial regression models achieved excellent

reliability $R^2 > 0.99$, Lack of Fit $p > 0.05$). The optimal operational conditions were established at a hydraulic retention time of 4.3 days, a light intensity of $127\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, and a wastewater dilution ratio of 67.6%. Under these conditions, validation experiments recorded removal efficiencies of 87.13% for Total Nitrogen and 92.39% for Total Phosphorus (1.24% and 1.59% experimental error), along with a biomass productivity of 1.15g/L. The findings provide foundational parameters for scaling up photobioreactor systems and guide the production of organic bio-fertilizers, directly advancing the Green Port strategy and the circular economy.

Keywords: *Chlorella vulgaris*, domestic wastewater, Chua Ve port, Response Surface Methodology (RSM), circular economy.

1. Mở đầu

Cảng Chùa Vẽ là một trong những đầu mối container quan trọng và lâu đời nhất trong hệ thống cảng Hải Phòng. Nằm bên bờ sông Cẩm, giáp ranh với các khu vực dân cư nội đô đông đúc, cảng Chùa Vẽ hiện đang đối mặt với áp lực kép về hiệu quả khai thác và bảo vệ môi trường thủy vực. Nước thải sinh hoạt phát sinh từ các tòa nhà điều hành, nhà ăn và khu hậu cần logistics tại đây mang đặc thù tải lượng dinh dưỡng Nitơ (N) và Phospho (P) cao. Việc kiểm soát xả thải không chỉ là yêu cầu pháp lý mà còn là trách nhiệm đối với hệ sinh thái hạ lưu sông Cẩm. Việc áp dụng các công nghệ xử lý sinh học bền hoạt tính truyền thống (như Aerotank, SBR) bộc lộ nhược điểm tiêu tốn năng lượng điện cho sục khí (chiếm 50-60% tổng chi phí vận hành), phát sinh lượng bùn thải thứ cấp lớn [1] và đi ngược lại với lộ trình trung hòa carbon (Net Zero) của ngành hàng hải.

Nhằm giải quyết bài toán này, công nghệ quang phản ứng vi tảo (microalgal photobioreactor) nổi lên

như một giải pháp công nghệ sinh thái mũi nhọn. Chúng vi tảo lục *Chlorella vulgaris* sở hữu bộ máy enzyme ưu việt, cho phép chúng đồng hóa trực tiếp amoni, nitrat và orthophosphate trong nước thải để tổng hợp protein, lipid cấu trúc tế bào [2]. Cơ chế này diễn ra đồng thời với quá trình quang hợp, trong đó vi tảo hấp thụ CO_2 và giải phóng O_2 , tạo ra một vòng lặp hoàn hảo: Chuyển hóa chất ô nhiễm thành sinh khối có giá trị gia tăng cao.

Mặc dù nền tảng lý thuyết sinh học đã rõ ràng, việc áp dụng công nghệ vi tảo vào ma trận nước thải thực tế luôn đối mặt với rào cản tối ưu hóa kỹ thuật. Hiệu suất hệ thống bị chi phối bởi các yếu tố phi tuyến tính: nếu thời gian lưu nước (HRT) quá ngắn sẽ gây rửa trôi tế bào; nếu cường độ sáng không phù hợp sẽ dẫn đến hiện tượng ức chế quang hợp hoặc tự che khuất; và nồng độ chất ô nhiễm quá cao có thể tạo ra ứng suất thẩm thấu [3]. Phương pháp thiết kế khảo sát đơn biến truyền thống không thể nắm bắt được các tương tác chéo giữa những yếu tố này [4].

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm mục đích: (1) Ứng dụng mô hình thống kê Bề mặt đáp ứng (RSM) theo cấu trúc Box-Behnken để số hóa và thiết lập phương trình động lực học dự báo hiệu suất xử lý TN, TP từ nước thải cảng sinh hoạt tại cảng Chùa Vẽ; (2) Phân tích chuyên sâu cơ chế tương tác giữa động lực học thủy lực (HRT), quang học (cường độ sáng) và sinh học (nồng độ cơ chất); (3) Xác lập bộ thông số vận hành cực đại hóa hiệu suất xử lý và thu hồi tài nguyên, cung cấp luận cứ khoa học vững chắc để thiết kế các trạm xử lý nước thải chuẩn Cảng xanh.

Nghiên cứu không chỉ tối ưu hóa các thông số vận hành mà còn thiết lập chuỗi dữ liệu nền tảng để định cỡ các module quang phản ứng sinh học, phục vụ trực tiếp cho tiêu chí môi trường trong lộ trình chuyển đổi Cảng xanh. Việc chuyển hóa chất ô nhiễm thành phân bón sinh học tạo vành đai xanh cách ly khu vực bốc xếp container là một đóng góp mang tính thực tiễn cao cho cảng Chùa Vẽ.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Mẫu nước thải sinh hoạt được thu thập liên tục trong 3 ngày tại hồ gom khu vực hành chính cảng Chùa Vẽ. Nhằm mô phỏng sát nhất điều kiện vận hành của trạm xử lý sơ bộ, nước thải được để lắng cơ học 2 giờ để loại trừ rác thô và cặn lơ lửng vô cơ. Đặc tính hóa lý đầu vào ghi nhận nồng độ ô nhiễm cao và biến động nhẹ: Nhu cầu oxy hóa học (COD) đạt $385 \pm 20 \text{ mg/L}$, Tổng Nitơ (TN) $52,4 \pm 4,5 \text{ mg/L}$, và Tổng Phospho (TP) $10,8 \pm 1,2 \text{ mg/L}$, pH $7,2 \pm 0,3$.

Chủng *Chlorella vulgaris* thuần khiết được tăng sinh trong môi trường BG-11 tại bình tam giác 1000mL (lắc 150 vòng/phút, chiếu sáng liên tục $120 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$, nhiệt độ $25 \pm 2^\circ\text{C}$). Sinh khối ở pha logarit (mật độ quang $\text{OD}_{680} \sim 1,0$) được thu hoạch bằng phương pháp ly tâm 4000 vòng/phút, rửa qua nước cất hai lần để loại bỏ sinh dưỡng dư thừa, đảm bảo vi tảo ở trạng thái đói dinh dưỡng trước khi cấy vào lò phản ứng, kích thích hiệu ứng hấp thụ vượt mức.

2.2. Bố trí mô hình quang phản ứng sinh học (Photobioreactor)

Hệ thống thí nghiệm theo mẻ được thiết lập với các bình quang phản ứng dung tích làm việc 2L. Mật độ vi tảo cấy khởi điểm được chuẩn hóa ở mức $0,15 \text{ g/L}$ (trọng lượng khô). Hệ thống được vận hành với chu kỳ chiếu sáng quang chu kỳ 12/12 (sáng/tối) nhằm mô phỏng điều kiện ánh sáng tự nhiên và ngăn ngừa ứng suất quang hóa lên hệ vi tảo. Giá trị pH đầu vào của nước thải nội cảng ghi nhận ở mức $7,2 \pm 0,3$, phù hợp với khoảng sinh trưởng tối ưu của *Chlorella vulgaris*. Hệ thống không dùng hóa chất đệm pH để giảm chi phí. Nguồn carbon vô cơ (CO_2) được cung cấp liên tục, thông qua hệ thống cấp khí sục bọt mịn ($1,5 \text{ L/phút}$) bằng không khí tự nhiên, đáp ứng đủ nhu cầu quang hợp. Ngoài ra việc sục khí liên tục này còn có tác dụng tản bộ O_2 sinh ra tránh ức chế quang hợp cục bộ; và (3) tạo dòng rối liên tục, ngăn ngừa sự lắng đọng và đảm bảo mọi tế bào đều luân phiên tiếp xúc với vùng chiếu sáng hiệu dụng [4].

2.3. Thiết kế thí nghiệm

Thuật toán Box-Behnken (BBD) thuộc nhóm thiết kế Bề mặt đáp ứng (RSM) được lựa chọn do ưu điểm giảm thiểu số lượng thí nghiệm (tránh các điểm cực trị không thực tế ở góc của không gian thiết kế) so với thiết kế Cấu trúc tam [5]. Ba biến số độc lập đầu vào được mã hóa ở 3 mức (-1, 0, +1) [6]:

X_1 : Thời gian lưu nước - HRT (2, 4, 6 ngày);

X_2 : Cường độ chiếu sáng (80, 120, 160 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$);

X_3 : Mức độ tải lượng nước thải đầu vào (mô phỏng sức chịu tải) (tương đương 50%, 75%, 100% nước thải ban đầu).

Mối tương quan phi tuyến tính giữa hàm mục tiêu (Y_{TN} : Hiệu suất loại bỏ TN, Y_{TP} : Hiệu suất loại bỏ TP) và các biến số được mô hình hóa theo phương trình đa thức hồi quy bậc hai tổng quát:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

Trong đó: Y là giá trị đáp ứng dự đoán; β_0 là hằng

số chặn; β_i là hệ số hồi quy tuyến tính (linear); β_{ii} là hệ số hồi quy bậc hai (quadratic); và β_{ij} là hệ số hồi quy tương tác chéo (interaction). Dữ liệu được xử lý thống kê bằng phần mềm Design-Expert. Độ tin cậy của mô hình được đánh giá thông qua phân tích phương sai (ANOVA) với mức ý nghĩa $\alpha=0,05$.

2.4. Phương pháp phân tích và tính toán

Nồng độ TN và TP được xác định theo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA) [4, 7]. Cụ thể, Tổng Phospho được phân tích theo phương pháp SMEWW 4500-P.B&D:2023 và Tổng Nitơ theo phương pháp SMEWW 4500-N. Sinh khối khô được lọc qua giấy lọc sợi thủy tinh GF/C (0,45 μ m) và sấy ở 105°C đến khối lượng không đổi. Hiệu suất xử lý (%) được tính bằng tỷ lệ phần trăm chênh lệch giữa nồng độ đầu vào và đầu ra sau mỗi chu kỳ HRT tương ứng.

3. Kết quả và thảo luận

Ma trận thiết kế Box-Behnken được thực hiện trong 17 mẻ thí nghiệm ngẫu nhiên [8], trong đó 12 mẻ là các điểm trên các cạnh của không gian thí nghiệm và 5 mẻ lặp lại tại điểm trung tâm (nhằm đánh giá sai số thuần của hệ thống).

3.1. Thiết lập mô hình toán học dự báo hiệu suất xử lý N và P

Dựa trên bộ dữ liệu thực nghiệm thu thập từ 17 mẻ chạy của lò quang phản ứng theo ma trận Box-Behnken, mối tương quan phi tuyến tính giữa các thông số vận hành và khả năng đồng hóa dinh dưỡng của vi tảo *C. vulgaris* đã được số hóa. Trong mô hình này, vi tảo *C. vulgaris* với đặc tính dinh dưỡng hỗn hợp cũng thực hiện quá trình oxy hóa các hợp chất hữu cơ, góp phần làm giảm đồng thời nồng độ COD, Tổng Nitơ và Tổng Phospho trong cùng một module quang phản ứng. Nồng độ COD sẽ sụt giảm song hành cùng N, P, do đó không gây ra hiện tượng thiếu hụt dinh dưỡng cho các công đoạn sau. Tuy nhiên bài báo tập trung thiết lập phương trình dự báo cho N, P do đây là hai tác nhân chính yếu gây rủi ro phú dưỡng hóa cho hạ lưu sông Cấm.

Quá trình phân tích hồi quy đa biến đã thiết lập thành công hai mô hình toán học dự báo hiệu suất xử lý Tổng Nitơ (Y_{TN}) và Tổng Phospho (Y_{TP}). Sau khi loại bỏ các thành phần nhiễu không có ý nghĩa thống kê, các phương trình thực nghiệm (được biểu diễn dưới dạng các biến mã hóa) có dạng đa thức bậc hai như sau:

$$Y_{TN} = 85,222 + 5,18X_1 + 4,26X_2 - 3,26X_3 +$$

$$3,67X_1X_2 - 7,77X_1^2 - 4,551X_2^2 - 5,171X_3^2 \quad (2)$$

$$Y_{TP} = 90,48 + 5,54X_1 + 4,26X_2 - 3,64X_3 + 3,48X_1X_2 + 2,34X_2X_3 - 7,82X_1^2 - 4,93X_2^2 - 5,5X_3^2 \quad (3)$$

Trong đó: X_1 : Thời gian lưu nước - HRT (2, 4, 6 ngày);

X_2 : Cường độ chiếu sáng (80, 120, 160 μ mol/m²/s).

X_3 : Mức độ tải lượng nước thải đầu vào (mô phỏng sức chịu tải) (tương đương 50%, 75%, 100% nước thải ban đầu);

Y_{TN} : Hiệu suất loại bỏ TN;

Y_{TP} : Hiệu suất loại bỏ TP.

Trong các mô hình trên, dấu và độ lớn của các hệ số hồi quy phản ánh trực tiếp chiều hướng và mức độ tác động của từng yếu tố đến hệ thống. Cụ thể, các hệ số tuyến tính dương của Thời gian lưu nước (X_1) và Cường độ sáng (X_2) cho thấy việc tăng thông số trong giới hạn nhất định sẽ thúc đẩy hiệu suất xử lý. Ngược lại, hệ số âm mang giá trị tuyệt đối lớn ở các bậc hai (như $-7,77X_1^2$ và $-7,82X_1^2$) dự báo sự tồn tại của một điểm cực đại (đỉnh vòm) trên không gian bề mặt, báo hiệu giới hạn chịu đựng sinh lý của hệ vi tảo khi vượt quá ngưỡng cân bằng.

Để đánh giá năng lực dự báo và độ tin cậy của hai phương trình toán học vừa thiết lập, công cụ Phân tích phương sai (ANOVA) đã được áp dụng (Bảng 1).

Bảng 1. Kết quả kiểm định các mô hình dự báo hiệu suất xử lý N và P

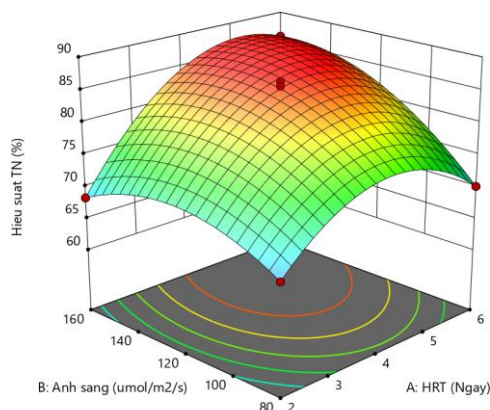
Tham số	TN: p-value	TN: p-value	Ý nghĩa
Mô hình	<0,0001	<0,0001	Rất có ý nghĩa
Sai số (Residual)	0,36	0,54	
Lack of Fit	1,000	0,7082	Không ý nghĩa
R^2	0,9975	0,9966	Mô hình xuất sắc
Adequate Precision	48,36	40,96	

Kết quả kiểm định từ Bảng 1 cung cấp bằng chứng vững chắc về chất lượng của các mô hình. Cả hai phương trình đều đạt mức ý nghĩa thống kê xuất sắc với $p\text{-value} < 0,0001$. Chỉ số “Thiếu phù hợp” (Lack of Fit) - thước đo độ chênh lệch giữa đường cong dự báo và số liệu thực tiễn [9]- ghi nhận p-value lần lượt là 1,000 và 0,7082 (đều $> 0,05$). Sự không có ý nghĩa

thống kê của chỉ số này là tín hiệu tích cực, khẳng định những sai lệch nhỏ giọt hoàn toàn là do ngẫu nhiên tự nhiên của quá trình sinh học, mô hình không hề bị lỗi thiếu phù hợp. Đặc biệt, sức mạnh dự báo của hai mô hình được bảo chứng tuyệt đối qua hệ số xác định (R^2), đạt mức 0,9975 cho Y_{TN} và 0,9966 cho Y_{TP} . Điều này chứng minh rằng hơn 99% sự biến thiên về hiệu suất đồng hóa dinh dưỡng trong nước thải cảng Chùa Vẽ được giải thích và dự báo chính xác bởi phương trình toán học đa biến. Chỉ số tín hiệu trên nhiều (Adequate Precision) vượt mức 48,35 và 40,9 (lớn hơn rất nhiều so với ngưỡng tiêu chuẩn là 4), đảm bảo hệ phương trình hoàn toàn đủ độ nhạy để điều hướng, tìm kiếm và xác lập tọa độ thiết kế tối ưu trên biểu đồ không gian.

3.2. Cơ sở sinh - hóa học của các tương tác đa biến

Giá trị khoa học cốt lõi của phương pháp RSM không chỉ nằm ở việc xác định các hệ số thống kê đơn thuần, mà còn ở khả năng phác họa các giới hạn sinh lý của vi tảo thông qua các bề mặt tương tác 3 chiều (Hình 1 và 2). Sự phức tạp trong động lực học của hệ vi tảo *Chlorella vulgaris* khi xử lý ma trận nước thải thực tế tại cảng Chùa Vẽ được giải mã thông qua các cơ chế sau:



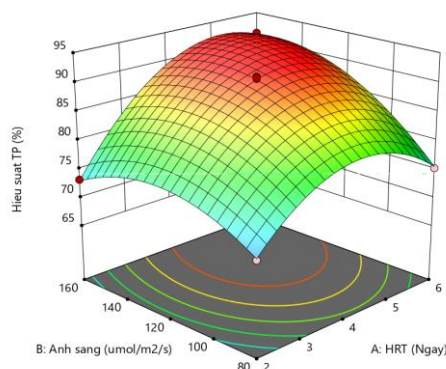
Hình 1. Biểu đồ bề mặt đáp ứng 3D mô phỏng ảnh hưởng của các thông số vận hành đến hiệu suất xử lý Tổng Nitơ của hệ vi tảo *Chlorella vulgaris*

- Tương tác cộng hưởng giữa thời gian lưu nước (HRT) và cường độ sáng

Tương tác giữa hai thông số HRT và cường độ chiếu sáng là tương tác chi phối mạnh mẽ đến hiệu suất xử lý tổng N và P của hệ thống vi tảo. Phương trình hồi quy ghi nhận hệ số tương tác chéo dương (X_1X_2 đạt +3.67 cho TN và +3.48 cho TP), nhưng lại bị kẹp giữa hai hệ số bậc hai âm rất lớn $-7,77X_1^2$ và $-$

$4,551X_2^2$). Sự kết hợp toán học này tạo ra một bề mặt mái vòm bất đối xứng, hơi lệch về phía góc phần tư có HRT và cường độ sáng cao, biểu thị 3 pha sinh lý rõ rệt:

Pha giới hạn thủy lực (HRT 2 ngày): Tại các mẻ



Hình 2. Biểu đồ bề mặt đáp ứng 3D mô phỏng ảnh hưởng của các thông số vận hành đến hiệu suất xử lý Tổng Phospho của hệ vi tảo *Chlorella vulgaris*

chạy có HRT cực ngắn (như Run 1, 3, 5, 7), hiệu suất xử lý bị kìm hãm ở mức thấp, dao động từ 63% đến 70% đối với TN và 68% đến 75% đối với TP, bất chấp việc thay đổi cường độ sáng hay mức độ tải lượng của nước thải đầu vào. Về mặt động học vi sinh, thời gian 2 ngày chưa đủ để tế bào hoàn tất chu kỳ nhân lên. Tốc độ pha loãng của lò phản ứng lớn hơn tốc độ sinh trưởng đặc trưng (μ) gây ra hiện tượng rửa trôi sinh khối. Các hệ enzyme chủ chốt như Nitrate Reductase (khử Nitrat) không có đủ thời gian tiếp xúc với cơ chất để phát huy tác dụng [8].

Pha bút tốc và đồng bộ năng lượng (HRT 4 - 6 ngày, ánh sáng 120 - 160 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$): Khi tăng HRT lên 4 đến 6 ngày kết hợp ánh sáng mạnh, bề mặt đáp ứng dựng đứng và bút tốc. Tại các điểm trung tâm (Run 13-17), hiệu suất đạt mức trung bình 85,12% (TN) và 90,82% (TP). Đặc biệt, sự cộng hưởng dương của tương tác X_1X_2 được thể hiện rõ nhất tại Run 4 (HRT 6 ngày, cường độ ánh sáng 160 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, Mức độ tải lượng nước thải đầu vào tương đương 75%), đây hiệu suất TN lên mức cực đại 86,01% và TP lên 91,26%. Tại đây, các photon ánh sáng kích hoạt tối đa chu trình dòng chuyển điện tử, sản sinh lượng lớn ATP để bơm chủ động các ion orthophosphate qua màng tế bào, từ đó giảm rõ rệt hàm lượng phospho trong nước [4].

Giới hạn bão hòa tự che khuất (Đỉnh vòm): Dù có sự cộng hưởng, các hệ số bậc hai âm xác nhận quy luật hiệu suất giảm dần. Nếu tiếp tục neo HRT quá lâu ở cường độ sáng cực đại, sinh khối bùng nổ quá mức làm độ đục sinh học tăng vọt. Ánh sáng bị suy giảm

theo hàm mũ khi đâm xuyên vào tâm lò, gây ra hiện tượng tự che khuất. Vùng tối xuất hiện khiến tế bào tảo giả hóa, hô hấp nội sinh lấn át quang hợp, dẫn đến giải phóng ngược N, P nội bào ra môi trường [10].

- *Tương tác ứng suất giữa Mức độ tải lượng nước thải đầu vào (mô phỏng sức chịu tải) và hiệu suất xử lý*

Việc khảo sát biến Mức độ tải lượng nước thải đầu vào (mô phỏng sức chịu tải) (X_3) đã bộc lộ một cơ chế ứng suất môi trường rất đặc trưng của nước thải cảng biển. Hệ số tuyến tính của X_3 mang dấu âm trong cả hai phương trình (-3.26 cho TN và -3.39 cho TP).

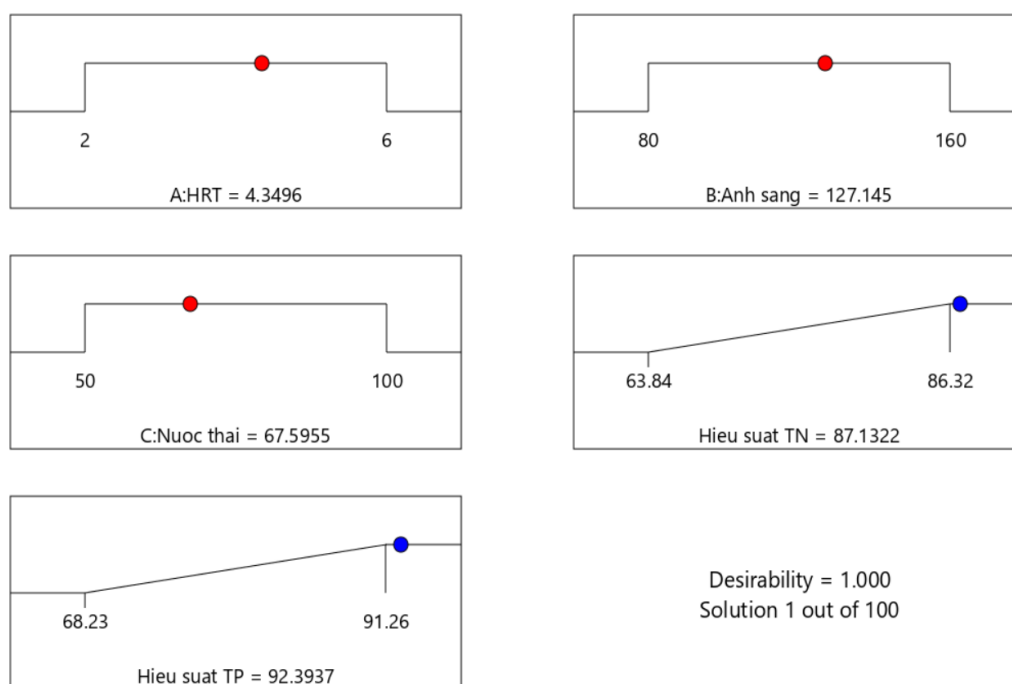
Khi sử dụng nước thải sinh hoạt tại cảng Chùa Vẽ ở mức 100% (như Run 7 và Run 11), hiệu suất tụt giảm rõ rệt, chỉ còn 63,84% và 67,98% đối với TN. Nước thải nguyên chất tại hồ thu gom nội cảng thường chứa nhiều cặn lơ lửng, váng dầu mỡ từ nhà ăn và nồng độ amoniac tự do cao. Ma trận này vừa tạo ra độc tính xuyên màng, vừa làm tăng độ tán xạ quang học, trực tiếp cắt giảm lượng photon tiếp cận tế bào tảo. Ngược lại, với mức độ tải lượng nước thải đầu vào (mô phỏng sức chịu tải) tương đương với mức 50% (Run 5, Run 9) hoặc 75% (các điểm trung tâm) giúp tạo ra một vùng đệm sinh thái, giảm thiểu sốc tải và tối ưu hóa môi trường truyền sáng.

Điểm sáng giá nhất của mô hình RSM nằm ở việc phát hiện ra hệ số tương tác dương (+2,84) giữa cường

(mô phỏng sức chịu tải) (X_3) đối với chỉ tiêu TP. Điều này có nghĩa là ánh sáng mạnh có khả năng bù trừ cho sự cản quang của nước thải đục. Bằng chứng thực nghiệm thể hiện sắc nét qua đối chiếu: Ở cùng nồng độ nước thải 100% và HRT 4 ngày, nếu ánh sáng chỉ ở mức $80 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (Run 11), hiệu suất TP giảm mạnh xuống mức 69,81%. Nhưng khi tăng cường độ sáng lên $160 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (Run 12), hiệu suất TP phục hồi mạnh mẽ lên 84,51%. Năng lượng photon bức xạ cao đã thành công xuyên thấu qua lớp nước thải đục, duy trì động lực quang hợp để vi tảo tiếp tục bắt giữ Phospho.

3.3. Tối ưu hóa điều kiện vận hành và kiểm định thực nghiệm

Mục tiêu cốt lõi của việc thiết lập các phương trình Bề mặt đáp ứng (RSM) là dò tìm tọa độ vàng trên không gian thiết kế nhiều chiều, nơi hệ thống đạt hiệu năng xử lý cực đại đồng thời tránh được các vùng rủi ro như sốc tải hay tự che khuất. Quá trình này được thực hiện thông qua thuật toán tối ưu hóa số học tích hợp hàm số mong muốn [4, 6]. Trên phần mềm Design-Expert, các tiêu chí ràng buộc được thiết lập khắt khe: Giữ cả 3 biến vận hành (HRT, cường độ sáng, mức độ tải lượng nước thải đầu vào (mô phỏng sức chịu tải)) nằm trong vùng không gian ma trận khảo sát, đồng thời cực đại hóa trọng số của cả hai hàm mục



Hình 3. Điều kiện vận hành tối ưu của hệ vi tảo *Chlorella vulgaris*

độ sáng (X_2) và mức độ tải lượng nước thải đầu vào

tiêu là hiệu suất loại bỏ Tổng Nitơ (Y_{TN}) và Tổng

Phospho (Y_{TP}). Mức độ ưu tiên của cả hai chỉ tiêu môi trường này được đánh giá ngang bằng nhau. Thông qua việc giải hệ phương trình đạo hàm riêng phần để tìm cực trị toàn cục từ hai mô hình hồi quy bậc hai, thuật toán đã hội tụ và định vị được tọa độ vận hành lý tưởng với chỉ số độ mong muốn đạt mức xuất sắc 1,000. Bộ thông số vận hành tối ưu tuyệt đối được thể hiện tại Hình 3.

Thời gian lưu nước (HRT): 4,3 ngày;

Cường độ chiếu sáng: $127 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$;

Mức độ tải lượng nước thải đầu vào (mô phỏng sức chịu tải): Tương đương mức 67,6% so với nước thải đầu vào.

Tại hệ quy chiếu này, các phương trình toán học dự báo hệ thống quang phản ứng sẽ đạt hiệu suất xử lý đột phá: 87,13% đối với TN và 92,39% đối với TP. Để hệ thống vận hành đạt hiệu suất tối đa, nước thải cần trải qua công đoạn tiền xử lý (như lắng cơ học hoặc lọc thô) để tách bớt cặn lơ lửng, làm giảm độ đục và tải lượng ô nhiễm thô tương đương mức 67,6% so với ban đầu, giúp tối ưu hóa khả năng truyền sáng cho vi tảo.

So với các nghiên cứu ứng dụng vi tảo xử lý nước thải sinh hoạt truyền thống (thường yêu cầu HRT từ 7 - 10 ngày để đạt hiệu suất loại bỏ P trên 80%) [11], điều kiện vận hành tối ưu do mô hình RSM thiết lập trong nghiên cứu này cho phép rút ngắn đáng kể thời gian lưu thủy lực xuống chỉ còn 4,3 ngày, trong khi vẫn duy trì hiệu suất xử lý xuất sắc (>92% đối với TP).

Để kiểm nghiệm độ chính xác của mô hình toán học (đặc biệt sau khi phân tích ANOVA đã khẳng định chỉ số Lack of Fit không có ý nghĩa thống kê), nghiên cứu đã tiến hành kiểm chứng thực nghiệm độc lập. Ba mẻ lò quang phản ứng ($n=3$) được thiết lập và vận hành song song tại phòng thí nghiệm với chính xác các điều kiện vận hành tối ưu vừa được đề xuất.

Kết quả phân tích hóa lý thực tế thu được hiệu suất loại bỏ trung bình đạt $86,05 \pm 0,8\%$ đối với TN và $90,92 \pm 0,7\%$ đối với TP. Khi đối chiếu, sai số tương

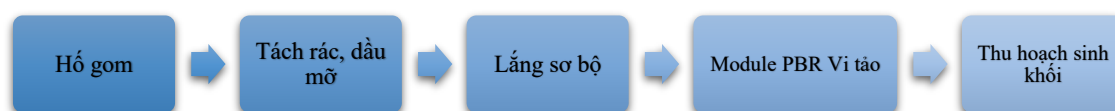
thuyết chỉ dao động ở mức 1,24% (đối với TN) và 1,59% (đối với TP). Biên độ sai lệch cực kỳ hẹp này (dưới ngưỡng tiêu chuẩn 5%) là minh chứng đánh thép khẳng định sự thành công của ma trận Box-Behnken trong việc mô phỏng trọn vẹn quy luật sinh - hóa của hệ vi tảo *Chlorella vulgaris*.

Sự hội tụ giữa lý thuyết và thực tiễn này đảm bảo rằng, bộ thông số vận hành được xác lập không phải là những con số ảo trên phần mềm, mà là dữ liệu nền tảng hoàn toàn đáng tin cậy. Vì vậy bộ thông số tối ưu này có thể sử dụng để tiến hành định cỡ và thiết kế chi tiết các module quang sinh học công nghiệp, tích hợp trực tiếp vào hệ thống hạ tầng xử lý nước thải tại các bãi container thuộc cảng Chùa Vẽ.

4. Định hướng công nghệ và phát triển kinh tế tuần hoàn tại cảng Chùa Vẽ

Sự chuyển dịch mô thức từ “xử lý cuối đường ống” sang “thu hồi tài nguyên” là hạt nhân của kỹ thuật môi trường hiện đại [12]. Đối với hệ thống quang sinh học tại cảng Chùa Vẽ, hệ thống không chỉ hướng tới việc đáp ứng tiêu chuẩn xả thải QCVN 14:2025/BTNMT, mà trọng tâm là tận thu triệt để nguồn dinh dưỡng dư thừa (ngay cả ở nồng độ thấp) để sản xuất sinh khối, hiện thực hóa mục tiêu không phát thải (zero-waste) của mô hình Cảng Xanh.

Kết quả tối ưu hóa RSM cung cấp dữ liệu nền tảng động học sinh học cho hệ vi tảo *Chlorella vulgaris* xử lý nước thải tại cảng Chùa Vẽ. Để hướng tới mục tiêu kinh tế tuần hoàn, với quy mô thực tế ưu tiên các hệ thống diện tích chiếu sáng lớn, tận dụng ánh sáng tự nhiên như bể mương oxy hóa hồ. So với công nghệ bùn hoạt tính truyền thống (50-60% chi phí năng lượng cho sục khí hiếu khí) [11], hệ vi tảo có ưu thế cắt giảm năng lượng vận hành đáng kể do khả năng tự cung cấp oxy qua quang hợp, chỉ yêu cầu sục khí CO_2 lưu lượng thấp. Sinh khối vi tảo thu hồi ($1,15\text{g/L}$) là nguyên liệu sản xuất phân bón sinh học và năng lượng, tạo giá trị kinh tế trực tiếp. Tính ổn định dài hạn được đảm bảo thông qua việc tích hợp các bước tiền xử lý cơ học (lắng sơ bộ, lọc thô) để duy trì độ trong quang



Hình 4. Sơ đồ khối quy trình xử lý nước thải sử dụng vi tảo *C. vulgaris* tại cảng Chùa Vẽ

đối giữa kết quả thực nghiệm và giá trị dự báo lý

học ổn định, giảm thiểu ứng suất quang học trước các

biến động tải lượng ngẫu nhiên. Nhóm tác giả đề xuất sơ đồ khối tích hợp quy trình (Hình 4).

Nước sau xử lý có thể tái sử dụng cho các mục đích tưới cây, vệ sinh bến bãi trong cảng, giảm đáng kể lượng nước sạch tiêu thụ. Sinh khối tảo thu hoạch được chuyển sang công đoạn chế biến sâu.

Dưới góc độ quản lý môi trường và tài nguyên ven bờ, cảng Chùa Vẽ mang tính đặc thù cao: là cảng sông đan xen với các khu đô thị sầm uất dọc tuyến sông Cấm. Do đó, việc thiết lập các dải cây xanh cách ly để cản bụi phế liệu và suy giảm tiếng ồn từ hoạt động bốc xếp container là yêu cầu bắt buộc. Lượng sinh khối vi tảo dồi dào thu hồi từ module xử lý nước thải chính là giải pháp vật liệu sinh học lý tưởng. Khác với phân bón vô cơ dễ bị rửa trôi gây phú dưỡng ngược dòng sông Cấm, sinh khối vi tảo khi được ép ẩm sẽ đóng vai trò như một hệ phân bón nhà chậm. Màng tế bào vi tảo phân hủy từ từ dưới tác động của hệ vi sinh vật đất, giải phóng từ từ N, P, đồng thời cung cấp các phytohormone sinh trưởng tự nhiên, giúp tái thiết lập cấu trúc mùn và tăng cường sức chống chịu cho hệ thực vật cách ly nội cảng. Hơn thế nữa, dựa trên phương trình cân bằng tỷ lệ quang hợp, sự sinh trưởng của hệ vi tảo song hành với cơ chế cô lập carbon. Việc chuyển đổi ma trận nước thải thành sinh khối trực tiếp hấp thụ một lượng lớn khí CO₂, tạo ra các bể tín chỉ carbon cục bộ ngay tại trạm điều hành. Luận điểm này cung cấp cơ sở khoa học vững chắc cho việc thiết kế các hệ thống quang phản ứng đa mục tiêu, vừa giải quyết triệt để rủi ro ô nhiễm tài nguyên nước mặt, vừa đóng góp trực tiếp vào lộ trình giảm phát khí nhà kính, hiện thực hóa tầm nhìn chiến lược về một mô hình Cảng xanh (Green Port) phát triển hài hòa với hệ sinh thái đô thị.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã ứng dụng thành công phương pháp Bề mặt đáp ứng (RSM) dựa trên ma trận thiết kế Box-Behnken (BBD) để số hóa, mô phỏng và tối ưu hóa hệ thống quang phản ứng sử dụng vi tảo *Chlorella vulgaris* trong xử lý nước thải sinh hoạt tại cảng Chùa Vẽ. Công cụ phân tích phương sai (ANOVA) khẳng định mô hình toán học đa thức bậc hai phản ánh xuất sắc động lực học của hệ thống với hệ số xác định (R²) đạt trên 0,99, đồng thời chỉ số thiếu phù hợp (Lack of Fit) hoàn toàn không có ý nghĩa thống kê ($p > 0,05$), bảo chứng tuyệt đối cho năng lực dự báo của thuật toán. Sự cân bằng tinh tế giữa quang học và động lực học thủy lực đã được khóa chặt tại hệ quy chiếu vận hành tối ưu: thời gian lưu nước 4,3 ngày, cường độ chiếu sáng 127 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ và nước thải cần trải qua

công đoạn tiền xử lý (như lắng cơ học hoặc lọc thô) để tách bớt cặn lơ lửng, làm giảm độ đục và tải lượng ô nhiễm thô tương đương mức 67,6% so với ban đầu. Tại vùng không gian này, các mẻ thực nghiệm kiểm chứng độc lập xác nhận hệ thống đạt năng lực khoáng hóa ấn tượng với hiệu suất loại bỏ 87,13% đối với Tổng Nitơ và 92,39% Tổng Phospho, sai số chênh lệch so với mô hình lý thuyết chỉ ở mức 1,24% (đối với TN) và 1,59% (đối với TP). Kết quả của nghiên cứu không chỉ đưa ra giải pháp kỹ thuật sinh thái ưu việt giúp thay thế các trạm xử lý bùn hoạt tính tốn kém điện năng, mà còn mở ra tiềm năng thu hồi 1,15 g/L sinh khối làm phân bón sinh học.

Những số liệu định lượng này vượt qua giới hạn của quy mô phòng thí nghiệm, cung cấp chuỗi tham số kỹ thuật cốt lõi để thiết lập các thông số cho các thiết bị quang phản ứng sinh học trong thực tiễn. Nghiên cứu khẳng định tiềm năng to lớn của công nghệ vi tảo trong việc khép kín vòng lặp tài nguyên (nước thải - sinh khối - phân bón sinh học), mở ra hướng đi tiên phong cho chuyên ngành quản lý môi trường tại cảng Chùa Vẽ nói riêng và chiến lược phát triển chuỗi cung ứng logistics hàng hải xanh bền vững nói chung.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.174**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] WS Chai, JY Cheun, PS Kumar, M. Mubashir, Z. Majeed, F. Banat, S.-H. Ho, PL Show (2021), *A review on conventional and novel materials towards heavy metal adsorption in wastewater treatment application*, Journal of Cleaner Production, Vol. 296.
Doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126589.
- [2] Abdallah Abdelfattah et al. (2023), *Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects*, Environmental Science and Ecotechnology, Vol. 13.
Doi: 10.1016/j.ese.2022.100205.
- [3] D.T. Tran, T.C. Van Do, Q.T. Nguyen, T.G. Le (2021). *Simultaneous removal of pollutants and high value biomaterials production by Chlorella variabilis TH03 from domestic wastewater*. Clean Technol. Environ. Policy, Vol. 23, pp.3-17.
- [4] Yazan Abubhasheesh, Aya Ghazal, Doris Ying Ying Tang, Fawzi Banat, Shadi W. Hasan, Pau Loke Show (2025). *Advances in Chlorella microalgae*

- for sustainable wastewater treatment and bioproduction. Chemical Engineering Journal Advances, Vol. 22.
Doi: 10.1016/j.cej.2025.100715.
- [5] Meega Reji, Rupak Kumar (2022), *Response surface methodology (RSM): An overview to analyze multivariate data*, Indian Journal of Microbiology Research. Vol. 9(4), p.241-248.
Doi: 10.18231/j.ijmr.2022.042.
- [6] Angela Paul Peter et. al. (2023), *Artificial intelligence model for monitoring biomass growth in semi-batch Chlorella vulgaris cultivation*, Fuel, Vol. 333, Part 2.
Doi: 10.1016/j.fuel.2022.126438.
- [7] APHA (American Public Health Association) (2022) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 24th Edition, American Public Health Association.
- [8] Bạch Long Giang, Trần Văn Thuận (2017), *Ứng dụng phương pháp đáp ứng bề mặt (RSM) để tối ưu hóa khả năng loại bỏ thuốc nhuộm Congo Red sử dụng vật liệu nano từ tính Graphene oxide - MnFe₂O₄*. Tạp chí Công thương, Số 9.
- [9] Benjamas Cheirsilp, Wageeporn Maneechote, Sirasit Srinuanpan, Irini Angelidaki (2023), *Microalgae as tools for bio-circular-green economy: Zero-waste approaches for sustainable production and biorefineries of microalgal biomass*. Bioresource Technology. Vol. 387.
Doi: 10.1016/j.biortech.2023.129620.
- [10] Fahed Javed, Sulaiman Al-Zuhair (2025), *Role of microalgae and activated sludge in the removal of fats, oils, and grease (FOG) in municipal wastewater*. Chemical Engineering Journal Advances, Vol. 22.
Doi: 10.1016/j.cej.2025.100737.
- [11] Lý Thị Ái Duyên và cộng sự (2022), *Nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ lệ vi tảo Chlorella sp. và bùn hoạt tính loại bỏ chất dinh dưỡng và chất hữu cơ cho nước thải có nồng độ C/N thấp*, Tạp chí Khoa học Kỹ thuật và Công nghệ, Số 64(8), tr.58-64.
- [12] Gul Muhammad et al. (2022), *Enhanced biodiesel production from wet microalgae biomass optimized via response surface methodology and artificial neural network*. Renewable Energy, Vol. 184.
Doi: 10.1016/j.renene.2021.11.091.

Ngày nhận bài:	06/04/2026
Ngày nhận bản sửa:	19/04/2026
Ngày duyệt đăng:	23/04/2026