



Original Article

Study Filter Materials for Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland to Treat Wastewater from the Da Mai Noodle Handicraft Village in Bac Giang Province

Nguyen Van Thanh^{1,*}, Bui Thi Kim Anh¹, Nguyen Thi Thu Thuy²,
Nguyen Hong Yen¹, Nguyen Hong Chuyen¹, Dang Dinh Kim¹

¹*Institute of Science and Technology for Energy and Environment,*

Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet, Cau Giay, Hanoi, Vietnam

²*Vietnam-Russia Tropical Center, 63 Nguyen Van Huyen, Cau Giay, Hanoi, Vietnam*

Received 19 March 2024

Revised 18 May 2024; Accepted 05 June 2024

Abstract: Vertical subsurface flow-constructed wetlands (VSF CW) are evaluated in this research as a potentially effective and cost-efficient solution for treating wastewater from Da Mai noodle handicraft village in Bac Giang province. Due to the high pollution load in this type of wastewater, there are concerns about clogging and the stability of the technology. In this study, we explored different sizes of limestone and gravel for the five medium composition formulas in the VSF CW system. The experiments were conducted over a period of three months. We used ANOVA, one-sample T-test, and Pearson correlation analysis methods to evaluate the experimental results, with statistical significance set at 0.05. The results showed a linear correlation between medium size, hydraulic conductivity, and treatment efficiency ($p < 0.05$). Smaller medium sizes had higher pollutant removal efficiency but lower porosity and hydraulic conductivity. For the same sizes, limestone demonstrated higher treatment efficiency compared to gravel ($p < 0.05$). The Cp5 formula (comprising sand, 1×2 cm limestone, and 3×5 cm gravel) was selected as the best filter medium for VSF CW, achieving COD, TSS, TN, and TP removal efficiencies of $86.02 \pm 1.71\%$, $81.15 \pm 2.24\%$, $64.46 \pm 2.23\%$, and $69.76 \pm 2.68\%$, respectively. After three months of operation, the treated wastewater consistently met QCVN 40:2011/BTNMT Column B standards, and there were no significant differences in hydraulic conductivity ($p > 0.05$), indicating stable operation of the VSF CW.

Keywords: Vertical subsurface flow constructed wetland; noodle handicraft village wastewater; size filter; media filter.

* Corresponding author.

E-mail address: Knthanh@gmail.com

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5078>

Nghiên cứu lựa chọn kích thước và cấp phối vật liệu phù hợp cho hệ bãi lọc ngầm trồng cây dòng chảy đứng để xử lý nước thải của làng nghề sản xuất bún bánh Đa Mai, Bắc Giang

Nguyễn Văn Thành^{1,*}, Bùi Thị Kim Anh¹, Nguyễn Thị Thu Thủy²,
Nguyễn Hồng Yên¹, Nguyễn Hồng Chuyên¹, Đặng Đình Kim¹

¹*Viện Khoa học Công nghệ Năng lượng và Môi trường, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,
18 Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam*

²*Trung tâm Nhiệt đới Việt Nga, 63 Nguyễn Văn Huyền, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 19 tháng 3 năm 2024

Chỉnh sửa ngày 18 tháng 5 năm 2024; Chấp nhận đăng ngày 05 tháng 6 năm 2024

Tóm tắt: Bãi lọc ngầm trồng cây dòng chảy đứng (VSF CW) được đánh giá sẽ trở thành giải pháp hiệu quả và tiết kiệm để xử lý nước thải làng nghề sản xuất bún bánh. Tuy nhiên, tải trọng ô nhiễm cao trong nước thải làng nghề gây ra mối lo ngại về tắc nghẽn và tính ổn định của công nghệ. Trong nghiên cứu này, thiết kế vật liệu lọc của VSF CW được tối ưu dựa trên kết quả đánh giá của các kích thước vật liệu đá vôi, sỏi khác nhau từ năm công thức cấp phối vật liệu của hệ VSF CW, các thí nghiệm được vận hành trong vòng 3 tháng. Phương pháp phân tích ANOVA, phân tích One-Sample T-test và tương quan Pearson được sử dụng các để đánh giá các kết quả thí nghiệm, với $p < 0,05$ có ý nghĩa thống kê. Kết quả cho thấy, có sự tương quan tuyến tính giữa kích thước vật liệu, độ dẫn thủy lực và hiệu suất xử lý ($p < 0,05$). Vật liệu có kích thước nhỏ hơn có hiệu quả xử lý ô nhiễm cao hơn nhưng độ rỗng và độ dẫn thủy lực thấp hơn. Cùng kích thước, hiệu suất xử lý của đá vôi cao hơn so với sỏi ($p < 0,05$). Công thức Cp5 (gồm cát, đá vôi 1×2 cm và sỏi 3×5 cm) được lựa chọn làm cấp phối vật liệu cho VSF CW, hiệu suất xử lý COD, TSS, TN, TP lần lượt là $86,02 \pm 1,71$; $81,15 \pm 2,24$; $64,46 \pm 2,23$ và $69,76 \pm 2,68\%$. Sau ba tháng vận hành, chất lượng nước thải sau xử lý luôn đạt QCVN 40:2011/ BTNMT cột B và độ dẫn thủy lực không có sự khác biệt đáng kể ($p > 0,05$) cho thấy VSF CW vận hành ổn định.

Từ khóa: Bãi lọc ngầm trồng cây dòng chảy thẳng đứng; nước thải làng nghề sản xuất bún; kích thước vật liệu; cấp phối vật liệu.

1. Mở đầu

Tại làng nghề sản xuất bún bánh Đa Mai, thành phố Bắc Giang, nước thải được xử lý qua bể biogas trước khi thải ra môi trường. Tuy nhiên, kết quả khảo sát thực tế cho thấy chất lượng nước thải sau xử lý vẫn chưa đạt quy chuẩn cho phép, tiềm ẩn nguy cơ gây ô nhiễm

cao. Thách thức lớn nhất đối với nước thải làng nghề không chỉ là giải pháp công nghệ mà còn là chi phí xử lý. Dù cho những phương pháp tiên tiến trong công nghệ xử lý nước thải ngày càng phát triển thì các phương pháp xử lý nước thải tự nhiên với chi phí thấp vẫn được ưu tiên do phù hợp với điều kiện Việt Nam.

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: Knthanh172@gmail.com

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5078>

Bãi lọc ngầm trồng cây dòng chảy đứng (VSF CW) là một giải pháp hiệu quả về chi phí và thân thiện với môi trường để xử lý nước thải. Công nghệ có hiệu suất xử lý tốt các chất hữu cơ và chất dinh dưỡng có tải lượng ô nhiễm cao trong nước thải [1, 2]. Tuy nhiên, hạn chế của công nghệ là quá trình lọc theo chiều thẳng đứng dễ bị tắc nghẽn. Việc lựa chọn kích thước và các cấp phối vật liệu cần đáp ứng tiêu chí phù hợp với sự phát triển của cây; đảm bảo hiệu quả xử lý đạt quy chuẩn dựa trên đặc điểm nước thải đầu vào và đảm bảo khả năng lưu thông trong hệ. Một loạt các vật liệu lọc đã được sử dụng trong bãi lọc trồng cây (CW) như sỏi, đá vôi, đất, cát, sét và các phụ phẩm từ các ngành công nghiệp (ví dụ: xỉ thép, bùn phèn) [3, 4]. Nhìn chung, sỏi và đá vôi thường được sử dụng trong các CW khác nhau [5, 6]. Trong nghiên cứu của Ma và cộng sự (2019), sỏi (cỡ hạt 10×20 mm) đã được sử dụng cho CW để xử lý nước thải sinh hoạt [7]. Đá vôi thường được sử dụng làm vật liệu để loại bỏ photpho [8]. Ngoài ra, cát là vật liệu kích thước hạt mịn vẫn được sử dụng rộng rãi trong CW do khả năng loại bỏ TSS, kim loại nặng và các chất hữu cơ [9-11]. Tuy nhiên, lựa chọn vật liệu nào hay cách sắp xếp các lớp vật liệu ra sao còn phụ thuộc vào đặc điểm nước thải để đảm bảo độ dẫn thủy lực cần thiết, tránh tắc nghẽn. Đã có nghiên cứu đánh giá hiệu quả xử lý nước thải sản xuất bún tại hộ gia đình bằng VSF CW nhưng tải lượng ô nhiễm thấp (TSS: 87,27 mg/l; COD: 338,61 mg/l) [12]. Đối với nước thải làng nghề Đa Mai, giá trị TSS, COD cao hơn 2-3 lần nghiên cứu trước đây và chưa có nghiên cứu nào xử lý bằng công nghệ VSF CW. Đá vôi và sỏi có thể là vật liệu phổ biến nhất trong thiết kế CW nhưng các đánh giá về ảnh hưởng kích thước vật liệu đến độ rỗng, độ dẫn thủy lực và hiệu suất xử lý còn hạn chế. Đối với nguồn nước thải của làng nghề bún bánh Đa Mai có giá trị TSS, COD cao, cần có những đánh giá cụ thể về hiệu quả xử lý và khả năng lưu thông dòng chảy thông qua các đánh giá về độ rỗng, độ dẫn thủy lực của vật liệu lọc.

Trong nghiên cứu này, các thí nghiệm đã được triển khai với kích thước vật liệu đá, sỏi khác nhau và thử nghiệm các công thức sắp xếp

cấp phối vật liệu để làm rõ tính phù hợp của từng loại vật liệu, đưa ra thiết kế vật liệu tối ưu nhất cho bãi lọc ngầm trồng cây dòng chảy thẳng đứng (VSF CW) để ứng dụng trong xử lý nước thải của làng nghề sản xuất bún bánh Đa Mai, Bắc Giang.

2. Đối tượng, phương pháp nghiên cứu

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Nước thải được lấy tại đầu ra của bể biogas của làng nghề sản xuất bún bánh Đa Mai, Bắc Giang có hàm lượng chất hữu cơ, dinh dưỡng cao vượt QCVN 40:2011/ BTNMT cột B (Bảng 1).

Vật liệu: sỏi (0,5×1 cm); sỏi (1×2 cm); sỏi (3×5 cm); đá vôi (0,5×1 cm); đá vôi (1×2 cm); đá vôi (3×5 cm) và cát được rửa sạch để ráo nước trước khi cho vào thí nghiệm.

Cây sậy (*Phragmites australis* Cav.) được sử dụng trong nghiên cứu là cây trưởng thành, khỏe mạnh, không bị sâu bệnh. Cây có chiều dài ban đầu 15 cm, chiều dài rễ 5 cm được trồng trên hệ thí nghiệm trong 60 ngày để cây phát triển ổn định, sau đó tiến hành các thí nghiệm.

Bảng 1. Đặc điểm nước thải biogas của làng nghề sản xuất bún bánh Đa Mai, Bắc Giang

Chỉ số	Đơn vị	Giá trị	QCVN 40:2011/ BTNMT cột B
pH	-	6,2 - 6,4	5,5 - 9
TSS	mg/l	215,6 - 271,6	100
COD	mg/l	725,8 - 882,4	150
TN	mg/l	44,6 - 57,6	40
TP	mg/l	9,4 - 14,3	6

Ghi chú: QCVN 40:2011/BTNMT, cột B: quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về nước thải công nghiệp áp dụng cho nước thải công nghiệp thải vào nguồn tiếp nhận không dùng cho mục đích cấp nước sinh hoạt.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phương pháp bố trí thí nghiệm

i) Bố trí thí nghiệm lựa chọn kích thước vật liệu
 Các vật liệu được hộp nhựa kích thước 50×30×50 cm. Các thí nghiệm với các vật liệu

sỏi, đá vôi kích thước khác nhau: TN11: sỏi kích thước 0,5×1 cm; TN21: sỏi kích thước 1×2 cm; TN31: sỏi kích thước 3×5 cm; TN12: Đá vôi kích thước 0,5×1 cm; TN22: đá vôi kích thước 1×2 cm; TN32: đá vôi kích thước 3×5 cm. Thí nghiệm được tiến hành theo mẻ, chiều cao lớp vật liệu là 0,4 m. Nước thải được đưa vào hệ qua ống phân phối nước (ống nhựa PVC có đục lỗ), sao cho nước thải ngập hết các lớp vật liệu (ghi lại thể tích nước thải sử dụng). Lấy mẫu ở các mốc thời gian khác nhau: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ngày, mỗi lần lấy 100 ml mẫu nước thải phân tích sự thay đổi hàm lượng của các chỉ tiêu pH, TSS, COD, nitơ tổng số, photpho tổng số. Bổ sung lượng nước hao hụt bằng nước cất. Mỗi thí nghiệm được lặp lại 3 lần;

ii) Bố trí thí nghiệm lựa chọn cấp phối vật liệu

Bố trí hệ thống lọc với các cấp phối vật liệu khác nhau trong hộp nhựa kích thước 50×30×50 cm. Sử dụng các vật liệu chính là đá, sỏi kích cỡ như sau: 0,5×1 cm; 1×2 cm; 3×5 cm và cát được chia làm 5 công thức thí nghiệm khác nhau:

Cấp phối 1 (cp1): Đá vôi (3×5 cm) dày 40 cm;

Cấp phối 2 (cp2): Lớp đáy dày 30 cm: đá (1×2 cm); Lớp trên cùng dày 10 cm: cát;

Cấp phối 3 (cp3): Lớp đáy dày 20 cm: sỏi (3×5 cm); Lớp trên cùng dày 20 cm: đá (1×2 cm);

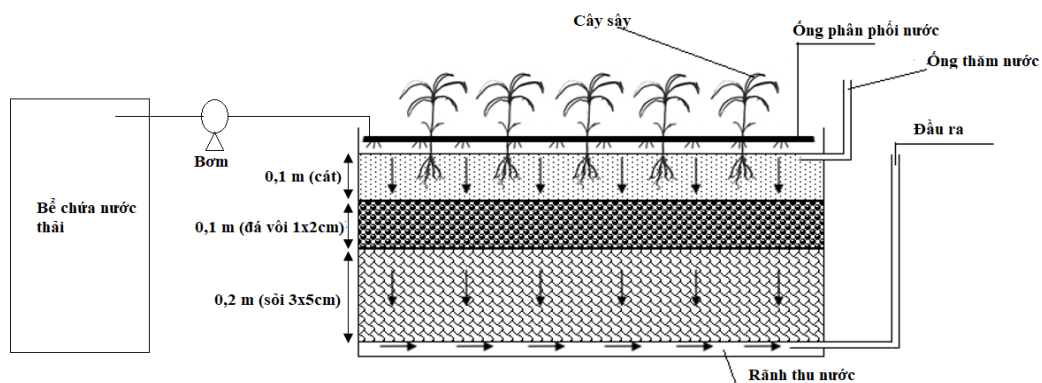
Cấp phối 4 (cp4): Lớp đáy dày 20 cm: sỏi (3×5 cm); Lớp giữa dày 10 cm: đá vôi (1×2 cm); Lớp trên cùng dày 10 cm: đá dăm (0,5×1 cm);

Cấp phối 5 (cp5): Lớp đáy dày 20 cm: sỏi (3×5 cm); Lớp giữa dày 10 cm: đá (1×2 cm); Lớp trên cùng dày 10 cm: cát;

Thí nghiệm được tiến hành theo mẻ, chiều cao lớp vật liệu là 0,4 m, cây sậy được trồng trên lớp vật liệu gồm 4 khóm, mỗi khóm 3 cây. Nước thải được đưa vào hệ qua ống phân phối nước (ống nhựa PVC có đục lỗ), sao cho nước thải ngập hết các lớp vật liệu (ghi lại thể tích nước thải sử dụng). Lấy mẫu ở các mốc thời gian khác nhau: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ngày, mỗi lần lấy 100 ml mẫu nước thải phân tích các thông số pH, TSS, COD, hàm lượng nitơ tổng số và photpho tổng số. Bổ sung lượng nước hao hụt bằng nước cất. Theo dõi sự phát triển của thực vật sau khi kết thúc thí nghiệm. Mỗi thí nghiệm được lặp lại 3 lần;

iii) Bố trí thí nghiệm đánh giá hiệu quả xử lý của VSF CW

Dựa trên kết quả lựa chọn cấp phối vật liệu, thiết kế hệ VFS CWs để xử lý nước thải làng nghề sản xuất bún như sau: lớp đáy dày 0,2 m là sỏi 3×5 cm, lớp giữa dày 10 cm là đá vôi 1×2 cm, lớp trên cùng là cát dày 10 cm (Hình 1). Bố trí ống thấm nước ở đầu và cuối lớp lọc. Trồng sậy lên các lớp vật liệu gồm 10 khóm, mỗi khóm 3 cây, chia thành 2 hàng. Nước thải được đưa vào liên tục bằng bơm định lượng với công suất 20 l/ngày và được phân phối đều qua các lớp vật liệu theo chiều thẳng đứng (Hình 1), tải trọng thủy lực (HLR) là 0,04 m/ngày, thời gian lưu nước (HRT) là 6 ngày. Thí nghiệm được tiến hành liên tục trong 3 tháng, 6 ngày lấy mẫu 1 lần (16 lần lấy mẫu) để xác định các chỉ tiêu thông số pH, TSS, COD, Nitơ tổng số, Photpho tổng số. Đồng thời, đánh giá sự khác biệt của độ dẫn thủy lực, hiệu suất xử lý và chất lượng nước thải đầu ra được so sánh với QCVN 40:2011/BTNMT, cột B.



Hình 1. Bố trí hệ VSF CW xử lý nước thải làng nghề sản xuất bún bánh.

2.2.2. Phương pháp phân tích số liệu

Xác định độ rỗng: Các vật liệu được chứa trong hộp nhựa kích thước dài × rộng × cao: 50×30×50 cm, chiều cao lớp vật liệu là 0,4 m, thể tích vật liệu $V_T = 0,06 \text{ m}^3$. Đổ vật liệu vào đầy hộp, sau đó cho nước vào, sao cho nước ngập hết phần vật liệu. Ghi lại thể tích nước đổ vào (V_v) cho đến khi ngập lớp vật liệu.

Độ rỗng được tính bằng công thức:

$$\Phi = V_v/V_T \times 100\% \quad (1)$$

Trong đó Φ là độ rỗng (%), V_v là thể tích phần lỗ rỗng (m^3), V_T là tổng thể tích của khối vật liệu (m^3).

Xác định độ dẫn thủy lực: Công thức xác định độ dẫn thủy lực được khai triển từ công thức Darcy theo đó, độ dẫn thủy lực k được xác định như sau:

$$k = Q \times L / (A \times h) \quad (2)$$

Trong đó: k là độ dẫn thủy lực (m/ngày); A là diện tích mặt cắt (m^2); h là độ chênh áp giữa hai đầu lớp lọc (m); Q là lưu lượng dòng chảy qua lớp lọc ($\text{m}^3/\text{ngày}$); L là chiều cao của lớp lọc (m).

Xác định hiệu suất xử lý: Hiệu suất xử lý được xác định theo công thức:

$$H = (C_{in} - C_{out}) / C_{in} \times 100\% \quad (3)$$

Trong đó: H là hiệu suất (%); C_{in} là nồng độ ô nhiễm đầu vào; C_{out} là nồng độ ô nhiễm đầu ra.

Các phân tích thống kê về dữ liệu thử nghiệm được thực hiện bằng Excel 365 và SPSS 20.0 dành cho Windows. Tất cả dữ liệu đã được kiểm tra về mức độ phù hợp với phân phối chuẩn, sử dụng thử nghiệm một mẫu Kolmogorov-Smirnov. Phân tích phương sai một chiều tham số (ANOVA), sau đó là bài kiểm tra Tukey HSD hậu kiểm đã được sử dụng để xác định sự khác biệt về các giá trị thí nghiệm tại thời điểm phân tích khác nhau. Sử dụng kiểm định One-Sample T-test nhằm mục đích so sánh trung bình nồng độ đầu ra của nước thải với quy chuẩn cho phép với $p < 0,05$ cho thấy có sự khác biệt.

Phân tích tương quan Pearson nhằm kiểm tra mối tương quan tuyến tính giữa kích thước vật liệu, độ dẫn thủy lực và hiệu suất xử lý. Với $p < 0,05$ có thể kết luận được là hai biến có tương quan với nhau. Hệ số tương quan r nằm trong khoảng từ -1 đến 1 thể hiện mức độ tương quan. Trong đó r bằng 0 (hay gần 0) có nghĩa là hai

biến số không có liên hệ gì với nhau; bằng -1 hay 1 có một mối liên hệ tuyệt đối; r là âm ($r < 0$) tương quan nghịch và r là dương ($r > 0$) tương quan thuận.

2.2.3. Phương pháp phân tích

Xác định chất lượng nước, các thông số trong nước thải được phân tích bằng các phương pháp tiêu chuẩn APHA, AWWA và WEF 2012. pH được đo theo phương pháp 9040C, COD được đo bằng phương pháp so màu kali dicromat (phương pháp 410.1), và TSS được đo theo phương pháp 160.2. Tổng N (TN) được đo bằng phép so màu bán tự động (phương pháp 351.2 và 350). Tổng P (TP) được đo bằng phương pháp 4500-P.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đánh giá kích thước vật liệu

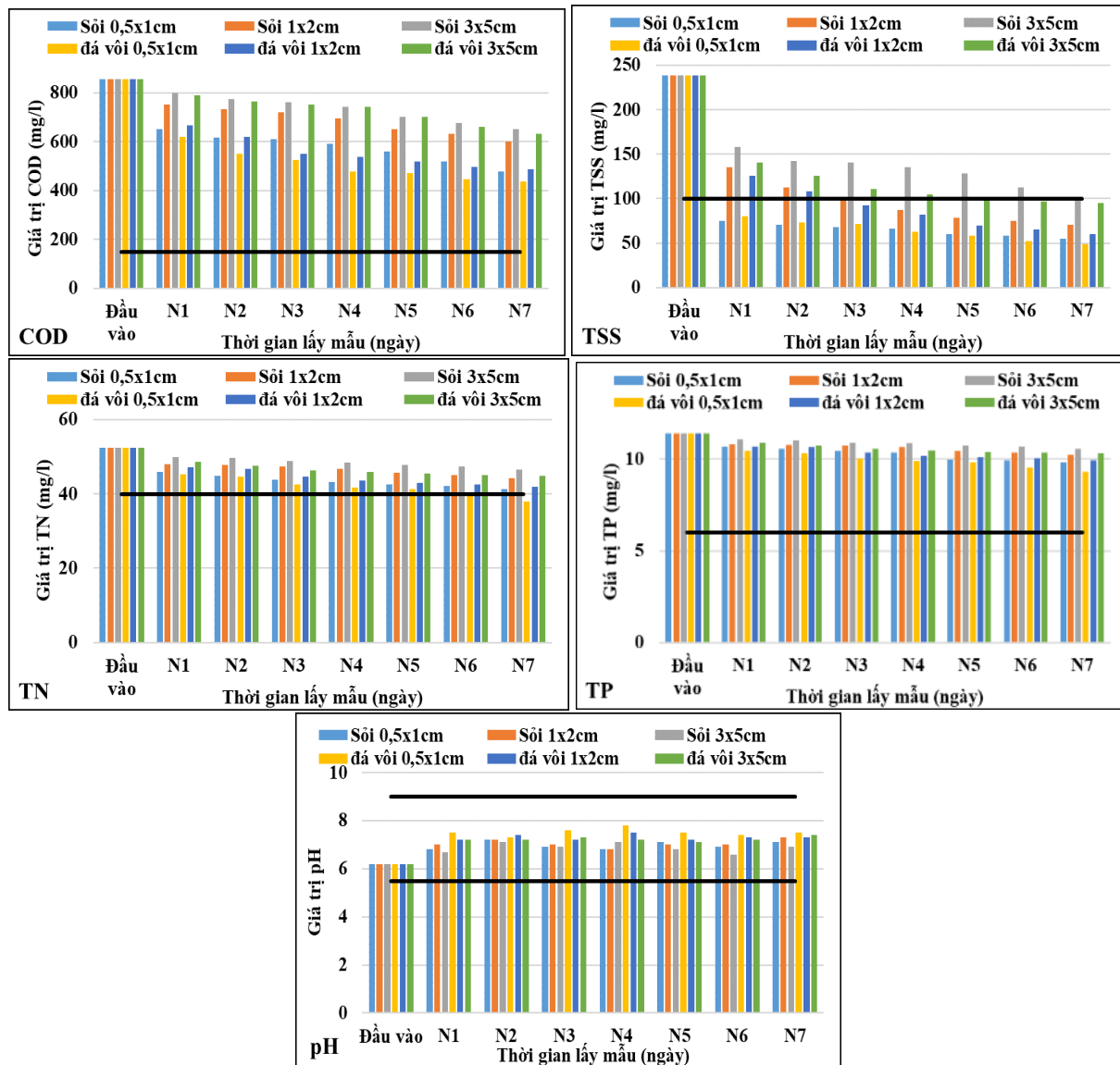
Bảng 2. Độ rỗng của các lớp vật liệu sỏi với kích thước khác nhau

Thí nghiệm	Độ rỗng (%)	Độ dẫn thủy lực (m/ngày)
TN11 (sỏi 0,5×1 cm)	33,2 ± 2,4	254,83 ± 11,2
TN21 (sỏi 1×2 cm)	40,8 ± 4,9	375,23 ± 15,4
TN31 (sỏi 3×5 cm)	55,9 ± 7,3	553,94 ± 22,6
TN12 (đá vôi 0,5×1 cm)	30,5 ± 5,8	158,84 ± 12,3
TN22 (đá vôi 1×2 cm)	37,1 ± 4,6	293,13 ± 14,8
TN32 (đá vôi 3×5 cm)	50,3 ± 8,8	472,34 ± 31,5

Các kích thước sỏi được lựa chọn là 0,5×1 cm; 1×2 cm và 3×5 cm có độ rỗng khác nhau (Bảng 2). Tại TN11 vật liệu sử dụng là sỏi kích thước 0,5×1 cm có kích thước nhỏ nhất, độ rỗng là 33,2%. Trong khi đó kích thước vật liệu ở TN31 lớn nhất có độ rỗng lớn nhất là 55,9%. TN11 độ dẫn thủy lực xấp xỉ bằng 254,83 m/ngày, ở TN21 và TN31 lần lượt là 375,23 m/ngày và 553,94 m/ngày. So sánh với kết quả tại Bảng 2, ở cùng kích thước vật liệu, độ rỗng và độ dẫn thủy lực của đá vôi thấp hơn so với sỏi. Với kích thước 0,5×1 cm, độ rỗng tương ứng là

30,5% và độ dẫn thủy lực 158,84 m/ngày. Ở kích thước lớn hơn là 1×2 cm, độ rỗng là 37,1% và độ dẫn thủy lực ghi nhận 293,13 m/ngày. Tại kích thước lớn nhất là 3×5 cm, độ rỗng và độ dẫn thủy lực lớn nhất là 50,3% và 472,34 m/ngày. Vật liệu có kích thước nhỏ có độ rỗng và độ dẫn thủy lực thấp, điều này có thể gây tắc nghẽn sau một thời gian vận hành. Ngược lại, nếu kích thước hạt quá

lớn, độ rỗng cao, nước sẽ thoát nhanh hơn. Hơn nữa, hạt kích thước lớn, lớp vật liệu sẽ có diện tích bề mặt riêng thấp, không thuận lợi cho sự phát triển của vi khuẩn và sự phát triển, lan rộng của rễ cây. Điều này ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả xử lý của từng loại vật liệu. Kết quả thí nghiệm cho thấy, giá trị pH dao động từ 6,6-7,2 đạt quy chuẩn cho phép.



Hình 2. Hiệu quả xử lý nước thải của các vật liệu sỏi, đá có kích thước khác nhau.

Hiệu suất xử lý các chỉ tiêu ô nhiễm khác, có sự chênh lệch rõ ràng giữa các kích thước vật liệu khác nhau. Giá trị quan trắc tại TN11 luôn thấp hơn TN21 và TN31; TN21 thấp hơn TN31 (Hình 2). Cũng giống như sỏi, hiệu quả xử lý của đá vôi phụ thuộc vào kích thước vật liệu. Kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng hiệu suất xử lý TSS, COD, TN và TP của được sắp xếp theo xu hướng giảm dần như sau: TN12 > TN22 > TN32. Ngoài ra, vật liệu đá vôi cao hơn một chút so với sỏi. Thành phần của đá vôi là các muối cacbonat giúp tăng pH dựa trên phản ứng trung hòa [13]. Giá trị pH đầu ra của các thí nghiệm đá vôi dao động từ 7,1-7,8, cao hơn so với thí nghiệm với sỏi (Hình 2).

Các thí nghiệm với đá vôi có độ rỗng nhỏ, tỉ lệ đá/nước cao thuận lợi cho vi sinh vật bám dính và phát triển trên bề mặt vật liệu. Quá trình chuyển hóa chất dinh dưỡng bởi vi sinh vật diễn ra thuận lợi hơn. Theo cơ chế lọc, các vật liệu có kích thước nhỏ giữ được các chất lơ lửng tốt hơn. Rõ ràng kích thước vật liệu nhỏ hơn có khả năng lọc cao hơn và hiệu quả xử lý sẽ cao hơn. Tuy nhiên, về lâu dài, các chất lơ lửng sẽ lấp đầy các khoảng trống và xảy ra hiện tượng tắc nghẽn nếu khả năng lưu thông nước không đảm bảo. Thông thường, thiết kế VSF CW sẽ phân các lớp vật liệu theo chiều thẳng đứng và sắp xếp các lớp phù hợp với kích thước vật liệu để đảm bảo thời gian lưu thủy lực phù hợp. Sỏi được sử dụng làm chất nền vì cung cấp diện tích bề mặt lớn cho các quá

trình sinh hóa và độ dẫn điện cao cần thiết để ổn định thời gian lưu thủy lực của vùng đất ngập nước [13]. Trong nghiên cứu của Perdana và cộng sự (2018) đã sử dụng sỏi có đường kính 1 cm, 4 cm và 8 cm được xếp lần lượt từ trên xuống dưới [14]. Một số nghiên cứu cũng cho rằng vật liệu kích thước 10×20 mm phù hợp làm lớp giữa của bãi lọc, trong khi đó ở vật liệu có kích thước 30 – 50 mm được lựa chọn làm lớp đáy [12], ở cùng kích thước này sỏi có ưu điểm là khả năng lưu thông dòng chảy tốt hơn.

Từ kết quả nghiên cứu cho thấy các vật liệu đá vôi, sỏi có khả năng loại bỏ chất ô nhiễm trong nước thải làng nghề sản xuất bún bánh. Có sự tương quan tuyến tính giữa kích thước vật liệu, độ dẫn thủy lực với hiệu suất xử lý ($p < 0,05$, Bảng 3). Hệ số tương quan $r < 0$ chứng tỏ tương quan nghịch, nghĩa là kích thước vật liệu và độ dẫn thủy lực càng nhỏ hiệu suất xử lý càng cao và ngược lại. Đối với các loại sỏi, đá có kích thước khác nhau sẽ phù hợp để bố trí vào các lớp vật liệu trong bãi lọc trồng cây. Với thiết kế theo chiều thẳng đứng, vật liệu có kích thước lớn (3×5 cm) phù hợp làm lớp vật liệu đáy, trong khi các kích thước nhỏ hơn được bố trí làm lớp giữa hoặc lớp bề mặt. Không nhiều nghiên cứu sử dụng hoàn toàn vật liệu có kích thước lớn hơn 1×2 cm làm lớp bề mặt do lo ngại về khả năng sinh trưởng của thực vật. Điều này được kiểm chứng tại các thí nghiệm cấp phối ở mục sau.

Bảng 3. Kết quả phân tích tương quan Pearson

Biến độc lập	Giá trị	Biến phụ thuộc			
		Hiệu suất COD	Hiệu suất TSS	Hiệu suất TN	Hiệu suất TP
Kích thước	Hệ số tương quan (r)	-0,905*	-0,891*	-0,896*	-0,953**
	p	0,013	0,017	0,016	0,003
Độ dẫn thủy lực	Hệ số tương quan (r)	-0,967**	-0,975**	-0,971**	-0,979**
	p	0,002	0,001	0,001	0,001

Ghi chú: * Độ tin cậy 95%; ** Độ tin cậy 99%.

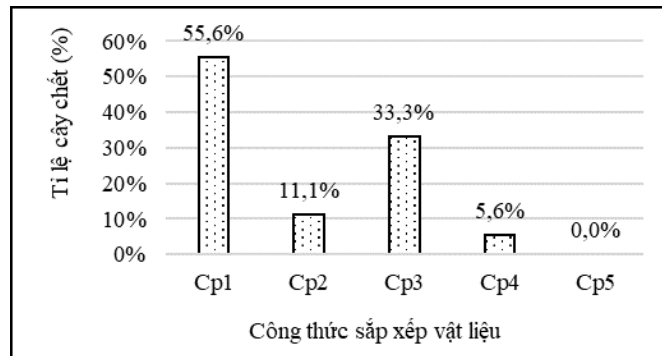
3.2. Lựa chọn cấp phối vật liệu

Lựa chọn các lớp cấp phối phù hợp cho bãi lọc trồng cây dựa trên hai yếu tố cụ thể là sự phát triển của thực vật và khả năng xử lý ô nhiễm

trong nước thải. Kết quả khảo sát khả năng sinh trưởng của cây sậy trồng trên các cấp phối vật liệu cho thấy có sự khác biệt rõ ràng. Tỉ lệ cây chết ở cp1 cao nhất với 55,6%. Trong khi tỉ lệ này ở cp2, cp4 và cp5 chỉ 5,6 - 33,3% (Hình 3).

Thí nghiệm cp1 chỉ toàn đá vôi (3×5 cm) có thể không thuận lợi cho hệ rễ. Chất nền trong bãi lọc cần có độ chặt, xốp nhất định để rễ thực vật bám

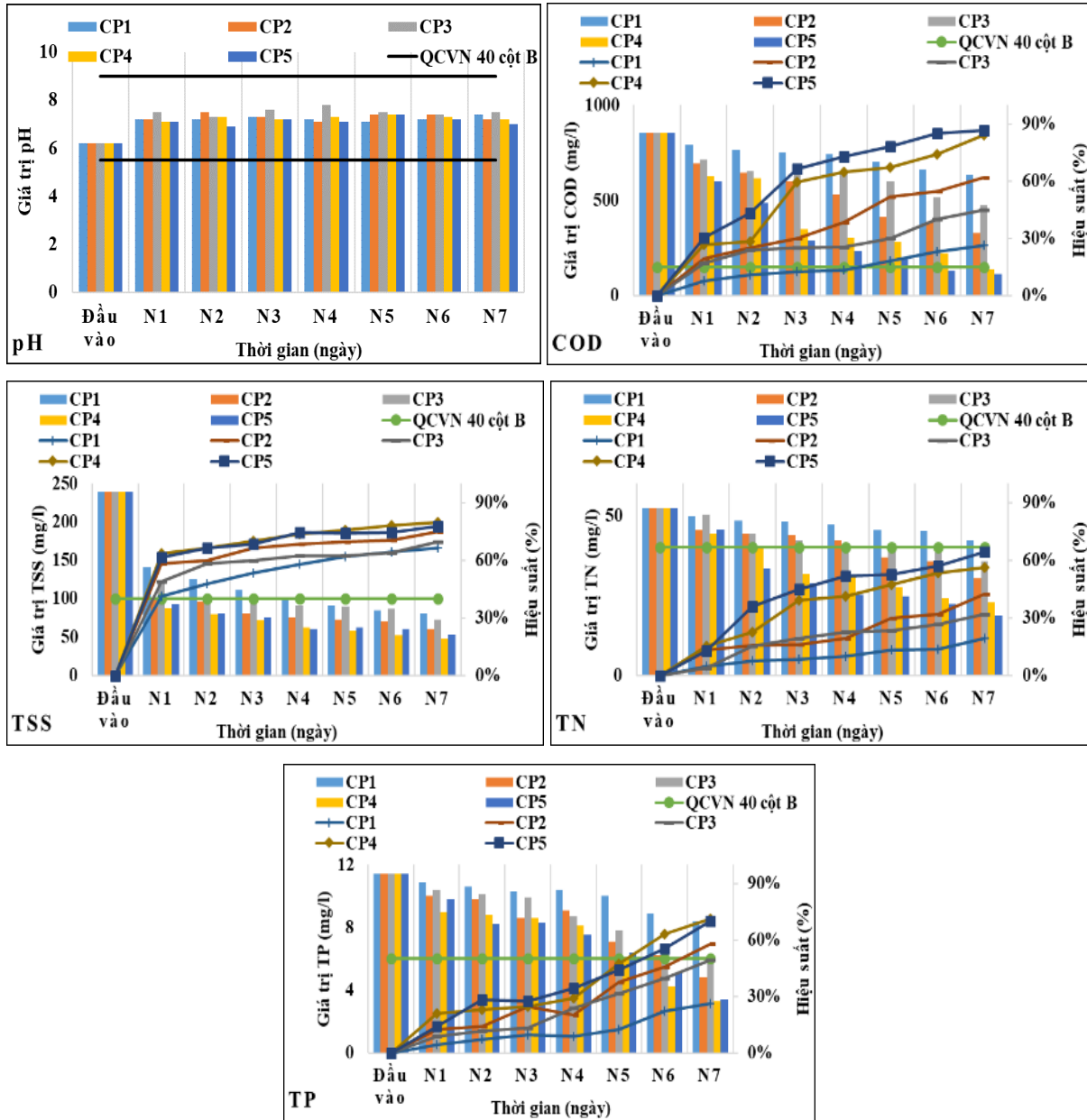
đính. Sự khác biệt về khả năng sinh trưởng của cây ảnh hưởng trực tiếp đến các quá trình xử lý của bãi lọc.



Hình 3. Ti lệ cây chết sau thời gian thí nghiệm.

Kết quả thí nghiệm cho thấy giá trị pH ở tất cả các thí nghiệm luôn nằm trong giới hạn cho phép trong QCVN 40:2011/BTNMT cột B. Tuy nhiên, đối với các chỉ tiêu COD, TSS, TN, TP có sự chênh lệch đáng kể giữa với các thí nghiệm. Hiệu suất xử lý COD, TN, TP của cp4 và cp5 cao hơn các thí nghiệm khác và hiệu suất xử lý tại cp1 là thấp nhất ($p < 0,05$). Chất lượng nước thải đầu ra đạt QCVN 40:2011/BTNMT cột B sau 6 ngày tại cp5; sau 7 ngày tại cp4; tại các thí nghiệm còn lại chưa đạt quy chuẩn sau 7 ngày thí nghiệm. Cơ chế loại bỏ các chất ô nhiễm trong hệ bãi lọc trồng cây phụ thuộc vào đặc điểm vật liệu và sự phát triển của thực vật. Chất rắn lơ lửng thông qua quá trình lắng, lọc. Các hợp chất hữu cơ bị phân hủy trong điều kiện hiếu khí cũng như kỵ khí bởi vi khuẩn tại vùng rễ của thực vật và bề mặt vật liệu [1, 2]. Sự phát triển của thực vật đóng vai trò quan trọng trong loại bỏ chất dinh dưỡng. Chúng có thể hấp thu nitơ, photpho trong nước thải, đồng thời sự phát triển mạnh mẽ của rễ thực vật tạo môi trường lý tưởng cho các vi sinh vật trong quá trình chuyển hóa nitơ và photpho [3, 5]. Do vậy, hiệu suất loại bỏ cao hơn đối với các cấp phối có cây phát triển tốt hơn. Hiệu suất xử lý COD, TSS, TN, TP của cp5 lần lượt là 86,8%; 77,8%; 64,4% và 70,2%, cao hơn hiệu suất xử lý TSS, COD, TN, TP của cp1, cp2, cp3 (hình 4). Giữa cp5 và cp4 có sự chênh lệch không đáng kể về hiệu suất xử lý, tuy nhiên về lâu dài, chất nền thuận lợi cho sự phát triển

của thực vật được ưu tiên. Cát thay cho các vật liệu đá, sỏi kích thước 0,5 – 1 cm do cát có độ xốp và mềm thuận tiện cho việc trồng cây, phát triển của rễ cây và hệ vi sinh vật trong bãi lọc [2]. Nghiên cứu trước đây với nguồn nước thải có tính chất tương tự cũng đã kết hợp các vật liệu với tỷ lệ và cách sắp xếp khác nhau từ vật liệu đá, sỏi và cát [14, 15]. Một nghiên cứu khác đã sử dụng cấp phối vật liệu lớp đáy 10 cm đá to (3 - 5 cm), lớp giữa 12 cm đá (1 - 2 cm) và lớp trên cùng 20 cm cát để xử lý nước thải có nồng độ thấp hơn 2 - 3 lần so với nghiên cứu này [12]. Việc sắp xếp các lớp vật liệu phụ thuộc vào đặc điểm nước thải, đặc biệt là giá trị TSS để đảm bảo độ dẫn thủy lực cần thiết để tránh tắc nghẽn. Tỷ lệ sắp xếp độ dày các lớp vật liệu tại cp5 khác biệt so với nghiên cứu trước đây, lớp trên cùng là cát mỏng hơn, chỉ dày 10 cm do có độ dẫn thủy lực thấp. Bổ sung đá vôi (1×2 cm) có tác dụng trung hòa axit và tăng hiệu quả xử lý của hệ. Vật liệu sỏi kích thước 3×5 cm ở lớp cuối cùng đảm bảo khả năng lưu thông nước, tránh tắc nghẽn cho hệ và đã có kết quả thực nghiệm độ dẫn thủy lực cao hơn so với đá ở cùng kích thước. Như vậy lựa chọn cp5 bao gồm cát, đá vôi 1×2 cm và sỏi 3×5 cm làm cấp phối vật liệu cho hệ bãi lọc trồng cây để đảm bảo thuận lợi cho sự phát triển của thực vật, hiệu quả xử lý và phù hợp với đặc điểm nước thải làng nghề sản xuất bún Đa Mai, Bắc Giang.



Hình 4. Hiệu quả xử lý nước thải của các cấp phối vật liệu khác nhau (biểu đồ cột thể hiện giá trị tại thời điểm quan trắc (mg/l); biểu đồ đường thể hiện hiệu suất xử lý tương ứng (%)).

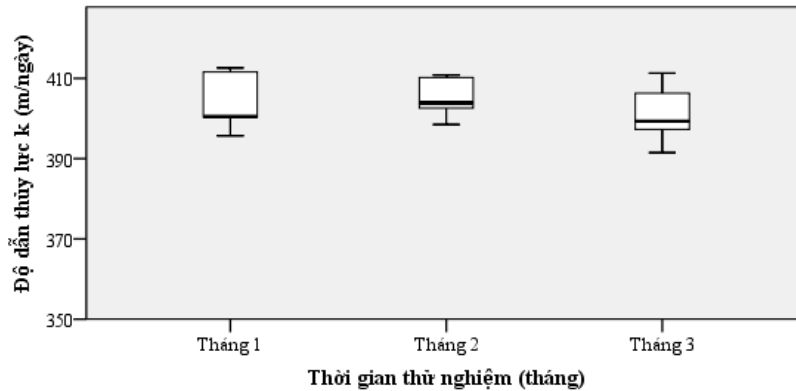
3.3. Hiệu suất xử lý nước thải bằng VSF CW

Trong quá trình thực nghiệm, giá trị COD, TSS, TN, TP trong nước thải đầu vào cao hơn QCVN 40:2011/BTNMT cột B từ 1,3 - 5,4 lần. Sự thay đổi nồng độ các chất ô nhiễm sau khi xử

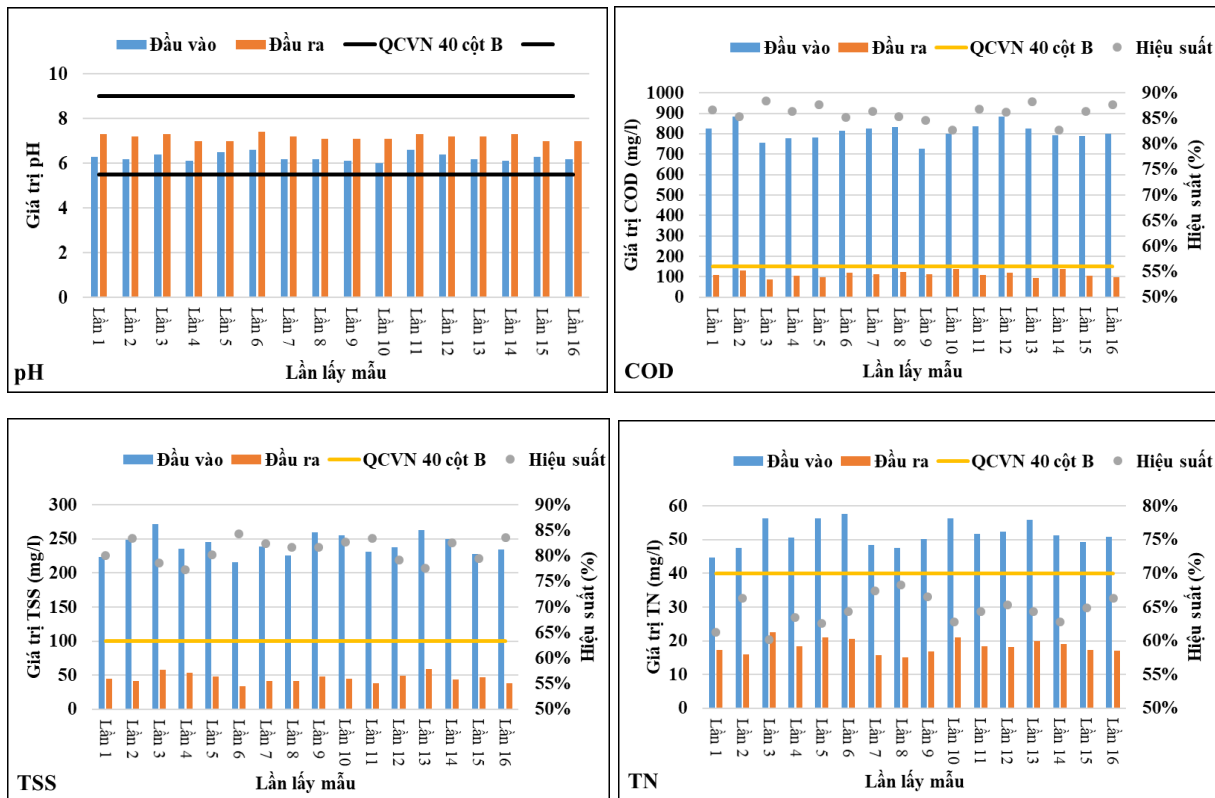
lý bằng VSF CW là rõ rệt. Hiệu suất xử lý COD, TSS, TN, TP lần lượt là $86,02 \pm 1,71$; $81,15 \pm 2,24$; $64,46 \pm 2,23$ và $69,76 \pm 2,68\%$ tương đồng với các báo cáo trước đây [12, 15]. Vấn đề nổi bật báo cáo đề cập là kết quả của cả quá trình vận hành trong 3 tháng thử nghiệm. Theo đó, vận

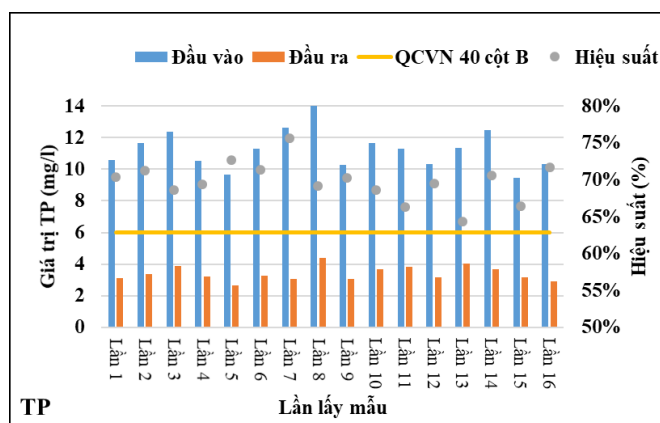
hành của hệ bãi lọc ngầm trồng cây có thể đạt ổn định bằng cách chọn môi trường phát triển phù hợp. Kích thước hạt, tính chất bề mặt, độ xốp lớn và không gian lỗ rỗng của vật liệu lọc là những yếu tố quan trọng trong khía cạnh này [16]. Với việc tăng thời gian hoạt động của CW, các lỗ rỗng sẽ bị lấp đầy bởi chất lơ lửng, điều này cũng

giải thích tại sao tắc nghẽn xảy ra trong CW sau một khoảng thời gian [17]. Hệ VSF CW được thiết kế phân lớp như trong nghiên cứu này, giá trị độ thấm có sự thay đổi không đáng kể ($p > 0,05$) chứng tỏ nước lưu thông tốt, tránh tắc nghẽn (Hình 5).



Hình 5. Độ dẫn thủy lực của VSF CW sau 3 tháng vận hành.





Hình 6. Hiệu quả xử lý nước thải làng nghề sản xuất bún bánh Đa Mai, Bắc Giang bằng VSF CW trong 3 tháng thử nghiệm.

Ngoài ra, thực vật thủy sinh cũng đóng vai trò quan trọng trong sự duy trì sự ổn định của hệ thống. Sự hấp thụ của thực vật là một trong những cơ chế loại bỏ chất dinh dưỡng [18]. Vùng hoạt động của rễ thực vật là tầng vật liệu có độ rỗng thấp, tác dụng vật lý của rễ bao gồm lọc, giảm tốc độ dòng chảy, cải thiện quá trình lắng đọng, giảm huyền phù và thậm chí phân phối nước và ngăn ngừa tắc nghẽn [18, 19]. Sau 3 tháng vận hành, quan sát thấy cây sậy phát triển tốt, không có hiện tượng cây chết và không bỏ sung phân bón cho cây trong suốt quá trình. Hệ VSF CW được thiết kế trong nghiên cứu này phù hợp để xử lý nước thải sau biogas của làng nghề sản xuất bún bánh Đa Mai, chất lượng nước thải đầu ra luôn ổn định và đạt QCVN 40:2011/BTNMT cột B (Hình 6).

4. Kết luận

Đá vôi và sỏi phù hợp để làm vật liệu lọc trong hệ đất ngập nước nhân tạo dòng chảy ngầm đứng để xử lý nước thải làng nghề sản xuất bún bánh Đa Mai, Bắc Giang. Kết quả nghiên cứu cho thấy, có sự tương quan tuyến tính nghịch giữa kích thước vật liệu, độ dẫn thủy lực với hiệu suất xử lý ($p < 0,05$; $r < 0$). Ở cùng kích thước, vật liệu sỏi có độ rỗng và độ dẫn thủy lực cao hơn; hiệu suất xử lý thấp hơn so với đá vôi. Phụ thuộc vào đặc điểm của vật liệu, có thể sắp xếp

cấp phối vật liệu phù hợp cho bãi lọc trồng cây. Đối với thiết kế bãi lọc trồng cây để xử lý nước thải của làng nghề sản xuất bún bánh Đa Mai, Bắc Giang, lớp cấp phối vật liệu phù hợp là lớp đáy: sỏi (3×5 cm); lớp giữa: đá vôi (1×2 cm); lớp trên cùng: cát. Chất lượng nước thải sau xử lý bằng hệ đất ngập nước nhân tạo dòng chảy ngầm đứng luôn đạt QCVN 40:2011/BTNMT cột B, hệ thống vận hành ổn định với độ dẫn thủy lực và hiệu suất xử lý không thay đổi đáng kể.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam trong khuôn khổ đề tài mã số NVCC 31.04/24-25.

Tài liệu tham khảo

- [1] D. S. Taha, A. A. A. H. Faisal, Using of Constructed Wetlands in the Treatment of Wastewater: A Review for Operation and Performance, *Journal of Engineering*, Vol. 29, No. 7, 2023, pp. 169-188, <https://doi.org/10.31026/j.eng.2023.07.11>.
- [2] A. Gorgoglione, V. Torretta, Sustainable Management and Successful Application of Constructed Wetlands: A Critical Review, *Sustainability*, Vol. 10, No. 11, 2018, pp. 3910, <https://doi.org/10.3390/su10113910>.

- [3] M. Li, Y. J. Wu, Z. L. Yu, G. P. Sheng, H. Q. Yu, Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal from Eutrophic Lake Water by *Ipomoea Aquatica* with Low-Energy Ion Implantation, *Water Research*, Vol. 43, No. 5, 2009, pp. 1247-1256, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.013>.
- [4] S. A. Ong, K. Uchiyama, D. Inadama, Y. Ishida, K. Yamagiwa, Performance Evaluation of Laboratory Scale Up-Flow Constructed Wetlands with Different Designs and Emergent Plants, *Bioresource Technology*, Vol. 101, No. 19, 2010, pp. 7239-7244, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.032>.
- [5] W. M. Mayes, L. C. Batty, P. L. Younge, M. U. Mander, Wetland Treatment at Extremes of Ph: A Review, *Science of the Total Environment*, Vol. 407, No. 13, 2008, pp. 3944-3957.
- [6] J. H. Peverl, J. M. Surface, T. Wang, Growth and Trace Metal Absorption by *Phragmites Australis* in Wetlands Constructed for Landfill Leachate Treatment, *Ecological Engineering*, Vol. 5, 1995, pp. 21-35, [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(95\)00018-E](https://doi.org/10.1016/0925-8574(95)00018-E).
- [7] Y. Ma, Y. Zhai, X. Zheng, S. He, M. Zhao, Rural Domestic Wastewater Treatment in Constructed Ditch Wetlands: Effects of Influent Flow Ratio Distribution, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 225, 2019, pp. 350-358, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.235>.
- [8] N. R. Rane, S. M. Patil, V. V. Chandanshive, S. K. Kadam, R. V. Khandare, J. P. Jadhav, S. P. Govindwar, *Ipomoea Hederifolia* Rooted Soil Bed and *Ipomoea Aquatica* Rhizofiltration Coupled Phytoreactors for Efficient Treatment of Textile Wastewater, *Water Research*, Vol. 96, 2016, pp. 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.029>.
- [9] S. Pongthornpruek, Treatment of Piggery Wastewater by Three Grass Species Growing in a Constructed Wetland, *App. Envi. Res.*, Vol. 39, No. 1, 2017, pp. 75-83.
- [10] S. K. M. Saat, N. Q. Zaman, Suitability of *Ipomoea Aquatica* for the Treatment of Effluent from Palm Oil Mill, *Journal of Built Environment Technology and Engineering*, Vol. 2, 2017, pp. 39-44.
- [11] P. H. Sezerino, V. Reginatto, M. A. Santos, K. Kayser, S. Kunst, L. S. Philippi, H. M. Soares, Nutrient Removal from Piggery Effluent Using Vertical Flow Constructed Wetlands in Southern Brazil, *Water Science & Technology*, Vol. 48, No. 2, 2003, pp. 129-35.
- [12] X. C. Nguyen, S. W. Chang, T. C. P. Tran, T. T. N. Nguyen, T. Q. Hoang, J. R. Banu, D. D. Nguyen, Comparative Study about the Performance of Three Types of Modified Natural Treatment Systems for Rice Noodle Wastewater, *Bioresource Technology*, Vol. 282, 2019, pp. 163-170, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.117>.
- [13] A. Paul, G. George, I. Joshy, C. Sreelekha, T. S. Sojan, Study on the Filter Media for Constructed Wetlands, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 7, No. 3, 2018, pp. 2060-2065.
- [14] M. C. Perdana, H. B. Sutanto, G. Prihatmo, Vertical Subsurface Flow (VSSF) Constructed Wetland for Domestic Wastewater Treatment, in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 148, 2018, pp. 012-025.
- [15] B. T. K. Anh, N. V. Thanh, N. M. Phuong, N. T. H. Ha, N. H. Yen, B. Q. Lap, D. D. Kim, Selection of Suitable Filter Materials for Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland Treating Swine Wastewater, *Water, Air & Soil Pollution*, Vol. 231, 2020, pp. 1-10, <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4449-6>.
- [16] P. W. Amos, P. L. Younger, Substrate Characterisation for A Subsurface Reactive Barrier to Treat Colliery Spoil Leachate, *Water Research*, Vol. 37, No. 1, 2003, pp. 108-120, [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00159-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00159-8).
- [17] L. Cui, H. Xie, S. Zhang, Z. Hu, S. Liang, J. Zhang, Microscale Constructed Wetlands with Different Particulate Matters in their Substrates Exhibit Opposite Nitrogen Removal Performances, *Water*, Vol. 15, No. 3, 2023, pp. 434, <https://doi.org/10.3390/w15030434>.
- [18] J. Vymazal, Plants Used in Constructed Wetlands with Horizontal Subsurface Flow: A Review, *Hydrobiologia*, Vol. 674, 2011, pp. 133-156, <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>.
- [19] U. Stottmeister, A. Wießner, P. Kusch, U. Kappelmeyer, M. Kästner, O. Bederski, R. A. Müller, H. Moormann, Effects of Plants and Microorganisms in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, *Biotechnology Advances* Vol. 22, No. 1-2, 2003, pp. 93-11, <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2003.08.010>.