

THE EFFECT OF ENVIRONMENT pH ON PHOSPHORUS REMOVAL FROM LIVESTOCK WASTEWATER USING BIOCHAR

Duong Thi Minh Hoa¹, Van Huu Tap^{2*}, Chu Van Ha¹, Bui Thi Thanh Lam¹,
Tran Do Hai Nam¹, Mone Oudomphone¹, Pham Hong Hanh¹, Soulivong Mitsaiya¹

¹TNU - University of Agriculture and Forestry, ²Thai Nguyen University

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	21/01/2025	This study aims to evaluate the phosphorus removal capacity of biogas sampling water from the pig landscape using the biochar made of acacia wood saws and to examine the impact of the pH value on adsorption. The biochar was produced through a slow pyrolysis process at 600°C for 2 hours and its characteristics were analyzed using SEM and FTIR. Experiments were conducted with pH values ranging from 6 to 9 to determine the optimal conditions for phosphorus adsorption efficiency. The results indicate that neutral pH (pH = 7) is the optimal condition, achieving a phosphorus removal efficiency of 32.33%, reducing the total phosphorus concentration from 79.34 ± 0.27 mg/L to 53.69 ± 0.06 mg/L. The porous structure of the biochar, along with functional groups such as hydroxyl (-OH), carbonyl (C=O), and carboxyl (COOH), plays a critical role in enhancing adsorption capacity. However, when the pH decreases to 6 or increases to 8 or 9, the adsorption efficiency decreases significantly due to changes in the chemical properties of phosphate and the biochar surface. Thus, biochar derived from acacia wood sawdust is a promising material for phosphorus removal in pig farming wastewater, especially under neutral pH conditions. Optimizing the structure and applying activation methods could further improve treatment efficiency, paving the way for sustainable applications in environmental protection and resource recovery.
Revised:	17/02/2025	
Published:	19/02/2025	
KEYWORDS		
Biochar		
Acacia wood sawdust		
Phosphorus adsorption		
Wastewater treatment		
Neutral pH		

ẢNH HƯỞNG CỦA pH ĐẾN KHẢ NĂNG XỬ LÝ PHOTPHO TRONG NƯỚC THẢI CHĂN NUÔI BẰNG THAN SINH HỌC

Dương Thị Minh Hoà¹, Văn Hữu Tập^{2*}, Chu Văn Hà¹, Bùi Thị Thanh Lam¹,
Trần Đỗ Hải Nam¹, Mone Oudomphone¹, Phạm Hồng Hạnh¹, Soulivong Mitsaiya¹

¹Trường Đại học Nông lâm - ĐHTN Thái Nguyên, ²Đại học Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 21/01/2025	Nghiên cứu này nhằm đánh giá khả năng xử lý photpho trong nước thải chăn nuôi sau biogas bằng than sinh học chế tạo từ mùn cưa gỗ keo, đồng thời nghiên cứu ảnh hưởng của pH đến hiệu suất hấp phụ. Than sinh học được chế tạo thông qua phương pháp nhiệt phân chậm ở 600°C trong 2 giờ và được phân tích đặc tính bằng SEM và FTIR. Thí nghiệm được thực hiện với pH thay đổi từ 6 đến 9 nhằm xác định điều kiện tối ưu cho hiệu suất hấp phụ photpho. Kết quả nghiên cứu cho thấy pH trung tính (pH = 7) là điều kiện tối ưu, với hiệu suất xử lý photpho đạt 32,33%, giảm hàm lượng tổng photpho từ 79,34 ± 0,27 mg/L xuống còn 53,69 ± 0,06 mg/L. Cấu trúc xốp của than sinh học, cùng các nhóm chức như hydroxyl (-OH), carbonyl (C=O), và carboxyl (COOH), đóng vai trò quan trọng trong việc tăng cường khả năng hấp phụ. Tuy nhiên, khi pH giảm xuống 6 hoặc tăng lên 8 hoặc 9, hiệu suất hấp phụ giảm đáng kể do sự thay đổi tính chất hóa học của photphat và bề mặt hấp phụ. Như vậy, than sinh học từ mùn cưa gỗ keo là vật liệu tiềm năng trong xử lý photpho trong nước thải chăn nuôi, đặc biệt ở điều kiện pH trung tính. Việc tối ưu hóa cấu trúc và áp dụng các phương pháp hoạt hóa có thể nâng cao hiệu suất xử lý, mở ra hướng ứng dụng bền vững cho bảo vệ môi trường và tái sử dụng tài nguyên.
Ngày hoàn thiện: 17/02/2025	
Ngày đăng: 19/02/2025	
TỪ KHÓA	
Than sinh học	
Mùn cưa gỗ keo	
Xử lý nước thải	
Hấp phụ photpho	
pH trung tính	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11932>

* Corresponding author. Email: tapvh@tnus.edu.vn

1. Giới thiệu

Nước thải từ hoạt động chăn nuôi lợn tại Việt Nam đang trở thành một trong những nguồn ô nhiễm môi trường nghiêm trọng. Theo ước tính của Cục Chăn nuôi, ngành chăn nuôi thải ra khoảng 73 triệu tấn chất thải rắn mỗi năm, trong đó chất thải từ chăn nuôi lợn chiếm khoảng 24,38 triệu tấn, tương đương 33,4% tổng lượng chất thải [1]. Đáng chú ý, khoảng 50% chất thải rắn và 80% chất thải lỏng từ chăn nuôi lợn được xả thẳng ra môi trường mà không qua xử lý, dẫn đến ô nhiễm nghiêm trọng [2]. Nước thải chăn nuôi lợn chứa hàm lượng cao các chất hữu cơ, chất dinh dưỡng như nitơ và photpho, cùng với vi sinh vật gây bệnh, gây ra mối đe dọa lớn đối với sức khỏe cộng đồng và môi trường [3].

Kết quả phân tích cho thấy, nhu cầu oxy hóa học (COD) trong nước thải chăn nuôi lợn tại các nông hộ đạt 39,33 mg/l, cao hơn 3,9 lần so với tiêu chuẩn cho phép; tại các gia trại đạt 120,08 mg/l, cao hơn 12 lần; và tại các trang trại đạt 11,9 mg/l, gấp 1,12 lần mức cho phép [2]. Hàm lượng vi khuẩn Coliform trong nước thải cũng vượt ngưỡng an toàn nhiều lần. Cụ thể, tại các nông hộ, hàm lượng Coliform đạt 571.200 MPN/ml, cao hơn 114,24 lần mức cho phép; tại các gia trại đạt 542.500 MPN/ml, cao hơn 108,5 lần; và tại các trang trại đạt 937.500 MPN/ml, cao hơn 187,5 lần [1], [2]. Sự hiện diện của các vi khuẩn này trong nước thải không qua xử lý là một vấn đề nghiêm trọng, không chỉ gây ô nhiễm môi trường mà còn ảnh hưởng đến sức khỏe cộng đồng.

Để giảm thiểu tác động tiêu cực của nước thải chăn nuôi lợn, cần áp dụng các biện pháp xử lý hiệu quả như xây dựng hệ thống biogas, sử dụng đệm lót sinh học và tuân thủ nghiêm ngặt các quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về nước thải chăn nuôi [4], [5]. Quy chuẩn QCVN 62-MT:2016/BTNMT [6] quy định các giá trị giới hạn của các thông số ô nhiễm trong nước thải chăn nuôi, nhằm bảo vệ môi trường và sức khỏe con người. Việc áp dụng các công nghệ xử lý nước thải như hệ thống xử lý sinh học và biogas không chỉ giúp giảm ô nhiễm mà còn có thể tạo ra nguồn năng lượng tái tạo từ chất thải [4] – [6].

Than sinh học (biochar) là sản phẩm thu được từ quá trình nhiệt phân yếm khí các vật liệu hữu cơ, như phế phẩm nông nghiệp, ở nhiệt độ cao. Với cấu trúc xốp và diện tích bề mặt lớn, than sinh học có khả năng hấp phụ hiệu quả các chất ô nhiễm trong nước thải, bao gồm cả nước thải chăn nuôi. Cụ thể, than sinh học được ứng dụng để loại bỏ các chất hữu cơ, kim loại nặng và chất dinh dưỡng dư thừa như amoni và photphat, góp phần giảm thiểu ô nhiễm môi trường nước [7] – [10].

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về khả năng hấp phụ photpho của than sinh học chế tạo từ các nguồn nguyên liệu khác nhau, việc chế tạo than sinh học từ mùn cưa gỗ keo để hấp phụ photpho trong nước thải chăn nuôi vẫn còn hạn chế. Để khắc phục khoảng trống này, bài báo này đặt mục tiêu đánh giá đặc tính của nước thải chăn nuôi và ảnh hưởng của pH đến hiệu suất hấp phụ photpho trong nước thải chăn nuôi bằng than sinh học chế tạo từ mùn cưa gỗ keo.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Phương pháp lấy mẫu và phân tích mẫu nước thải

- * Lấy mẫu nước thải chăn nuôi lợn sau biogas:
 - Số lượng mẫu: 01 mẫu.
 - Vị trí lấy mẫu: Nước thải chăn nuôi lợn sau khi được xử lý bằng bể biogas của hộ gia đình ông Cao Quang Hạ, tổ 14, phường Tích Lương, thành phố Thái Nguyên.
 - Phương pháp lấy mẫu: theo TCVN 5999:1995 - Chất lượng nước - Lấy mẫu - Hướng dẫn lấy mẫu nước thải [11].
- * Chỉ tiêu theo dõi:
 - Nước thải chăn nuôi lợn sau biogas được phân tích các chỉ tiêu: pH, TSS, BOD₅, COD, tổng N, tổng P, tổng K, Coliform.
 - Nước thải chăn nuôi lợn sau biogas sau thí nghiệm được phân tích: Tổng P.
- * Phương pháp phân tích:
 - pH: được đo bằng máy đo pH meter.

- TSS: được xác định bằng phương pháp khối lượng
- BOD₅: được xác định bằng phương pháp pha loãng
- COD: được xác định bằng phương pháp so màu
- Tổng N: được đo bằng máy đo tổng N
- Tổng P, Tổng K: được xác định bằng phương pháp so màu

2.2. Phương pháp chế tạo vật liệu hấp phụ và đánh giá đặc điểm của vật liệu hấp phụ

Than sinh học: được chế tạo theo phương pháp nhiệt phân chậm.

Nguyên liệu (mùn cưa gỗ keo) được sấy khô trong không khí, được bảo quản trong hộp kín để nhiệt phân. Quá trình nhiệt phân chậm nguyên liệu được thực hiện trong bếp than sinh học ở nhiệt độ khoảng 600 °C trong thời gian 2 giờ. Sau đó, than sinh học được để nguội và nghiền nhỏ, dán nhãn SP600.

Các phương pháp quét điện tử quang phổ (SEM) và phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FT-IR) được sử dụng để đánh giá đặc trưng của than sinh học từ mùn cưa gỗ keo và than sinh học biến tính.

2.3. Phương pháp bố trí thí nghiệm

Thí nghiệm đánh giá ảnh hưởng của pH nước thải đến khả năng xử lý photpho trong nước thải chăn nuôi của than sinh học được thực hiện theo các bước như sau:

Cho vào mỗi bình tam giác 250 ml 0,2 g vật liệu SP600 và 50 ml nước thải chăn nuôi, điều chỉnh pH của nước thải từ 6 đến 9, sau đó lắc 150 phút trên máy lắc. Mỗi công thức thí nghiệm được nhắc lại 3 lần. Mẫu sau lắc được lọc để phân tích tổng photpho, từ đó tính hiệu suất xử lý photpho của than sinh học.

2.4. Phương pháp xử lý số liệu

Số liệu được xử lý bằng phần mềm SAS và so sánh các công thức thí nghiệm với nhau và với các nghiên cứu khác.

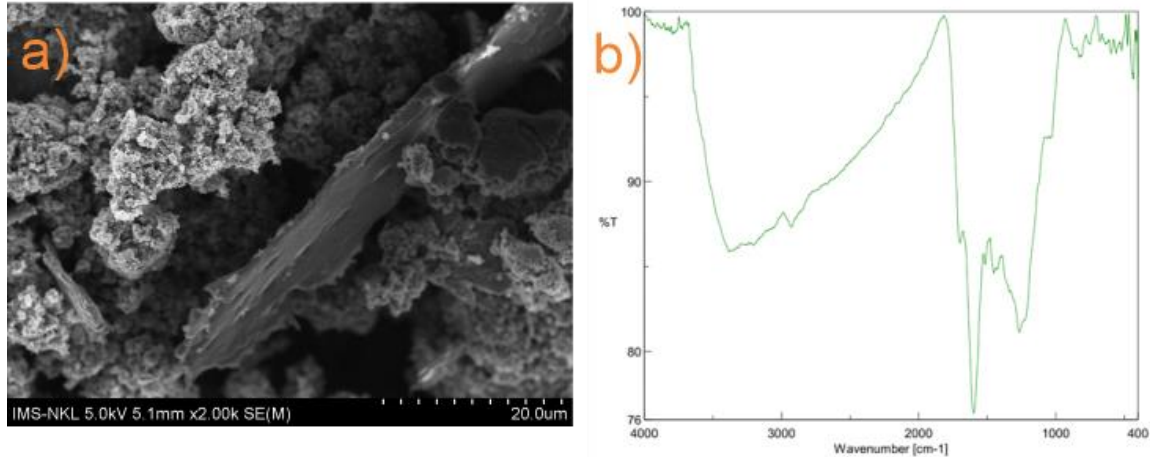
3. Kết quả và bàn luận

3.1. Đặc điểm của vật liệu than sinh học

Đặc điểm của than sinh học từ mùn cưa gỗ keo được đánh giá thông qua quan sát cấu trúc bề mặt thông qua ảnh hiển vi điện tử quét (SEM). Hình 1a cho thấy cấu trúc bề mặt của than sinh học thể hiện rõ các đặc điểm quan trọng. Cụ thể, sau quá trình nhiệt phân, bề mặt than sinh học xuất hiện nhiều lỗ rỗng với kích thước không đồng nhất, tạo nên cấu trúc xốp đặc trưng. Các lỗ rỗng này có thể do quá trình loại bỏ chất bay hơi và các hợp chất hữu cơ trong giai đoạn nhiệt phân. Bề mặt của than sinh học cũng cho thấy sự phát triển của mạng lưới mao quản, giúp tăng cường diện tích bề mặt hiệu dụng. Điều này rất quan trọng trong các ứng dụng hấp phụ, khi các chất ô nhiễm có thể dễ dàng tiếp cận và liên kết với bề mặt. Ngoài ra, sự hiện diện của các cạnh gồ ghề và cấu trúc không đều trên bề mặt than cho thấy tiềm năng cao trong việc hấp phụ các ion kim loại nặng hoặc các chất hữu cơ trong môi trường nước.

Phổ FT-IR của than sinh học chế tạo từ mùn cưa gỗ keo cho thấy sự hiện diện của nhiều nhóm chức quan trọng, góp phần quyết định đến khả năng hấp phụ của vật liệu (Hình 1b). Đỉnh hấp thụ rộng tại vùng 3400-3500 cm⁻¹ đặc trưng cho dao động của nhóm hydroxyl (-OH), cho thấy sự hiện diện của liên kết hydrogen mạnh, giúp tăng khả năng tương tác với các phân tử nước và chất ô nhiễm. Vùng 2900 cm⁻¹ biểu thị dao động kéo căng của liên kết C-H trong các nhóm alkyl (CH₂, CH₃), chỉ ra một lượng nhỏ hydrocarbon còn tồn tại. Đỉnh rõ nét trong khoảng từ 1700 cm⁻¹ đến 1750 cm⁻¹ liên quan đến dao động kéo căng của nhóm carbonyl (C=O), thường xuất phát từ các hợp chất carboxylic hoặc este. Đây là những vị trí hoạt động hóa học giúp tăng hiệu quả hấp phụ. Ngoài ra, vùng 1600 cm⁻¹ đại diện cho dao động của liên kết đôi C=C trong các vòng thơm (aromatic rings), đặc trưng của cấu trúc graphitic, giúp nâng cao tính ổn định và khả năng hấp phụ vật lý của vật liệu. Cuối cùng, vùng từ 1000 cm⁻¹ đến 1200 cm⁻¹ liên quan đến dao

động của liên kết C-O, chỉ ra sự hiện diện của các nhóm ether hoặc alcohol bậc một, đóng vai trò quan trọng trong sự tương tác hóa học với các chất ô nhiễm. Nhìn chung, các nhóm chức này góp phần làm tăng hiệu quả hấp phụ của than sinh học đối với các chất gây ô nhiễm trong môi trường.



Hình 1. Ảnh SEM (a) và phổ FTIR (b) của than sinh học từ mùn cưa gỗ keo

3.2. Thành phần, tính chất của nước thải chăn nuôi lợn sau bể biogas

Kết quả phân tích mẫu chăn nuôi lợn sau khi xử lý bằng bể biogas được thể hiện tại Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả phân tích một số chỉ tiêu trong nước thải chăn nuôi lợn sau bể biogas

STT	Chỉ tiêu thử nghiệm	Đơn vị	Kết quả thử nghiệm	QCVN 62-MT:2016/BTNMT (Cột B)
1	pH	-	7,56	5,5-9
2	TSS	mg/l	973,5	150
3	COD	mg/l	464,80	300
4	BOD ₅	mg/l	227,88	100
5	Tổng N	mg/l	279,21	150
6	Tổng P	mg/l	79,3	-
7	Tổng K	mg/l	376,6	-
8	Coliforms	MPN/100ml	11.000	5.000

**Chú thích:*

QCVN 62-MT:2016/BTNMT [6]: Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước thải chăn nuôi, Cột B - Giá trị C của các thông số ô nhiễm trong nước thải chăn nuôi khi xả ra nguồn nước không dùng cho mục đích cấp nước sinh hoạt.

Dựa trên kết quả phân tích chất lượng nước thải chăn nuôi lợn sau biogas (Bảng 1), có thể nhận thấy rằng nước thải chăn nuôi lợn sau khi qua bể biogas vẫn chứa hàm lượng ô nhiễm vượt mức cho phép theo QCVN 62-MT:2016/BTNMT [6, Cột B]. Cụ thể, các chỉ tiêu TSS (973,5 mg/L), COD (464,8 mg/L) và BOD₅ (227,88 mg/L) vượt lần lượt 6,5 lần, 1,5 lần và 2,3 lần so với giới hạn cho phép, cho thấy hàm lượng chất rắn lơ lửng và chất hữu cơ trong nước thải vẫn còn cao. Điều này phản ánh hiệu suất xử lý của hệ thống biogas chưa đạt tối ưu trong việc loại bỏ chất hữu cơ và cặn lơ lửng, làm tăng nguy cơ ô nhiễm nguồn nước tiếp nhận.

Đồng thời, hàm lượng tổng Nitơ (279,21 mg/L) cao gấp 1,86 lần ngưỡng cho phép, đây là một yếu tố nghiêm trọng do nitơ dư thừa có thể gây hiện tượng phú dưỡng hóa, ảnh hưởng tiêu cực đến hệ sinh thái thủy sinh. Mặc dù không có quy định cụ thể đối với tổng photpho (79,3 mg/L) trong quy chuẩn, giá trị này cho thấy nước thải chứa hàm lượng photpho cao, góp phần đáng kể vào nguy cơ phú dưỡng. Hơn nữa, Coliforms (11.000 MPN/100ml) vượt ngưỡng 2,2 lần, điều

này cho thấy nước thải có nguy cơ gây ô nhiễm vi sinh, ảnh hưởng đến sức khỏe cộng đồng nếu không được xử lý triệt để.

Chỉ tiêu pH (7,56) nằm trong ngưỡng cho phép (5,5-9), cho thấy nước thải sau biogas có tính trung tính, thuận lợi cho các bước xử lý tiếp theo. Các chỉ tiêu như tổng Kali (376,6 mg/L) tuy không được quy định trong quy chuẩn nhưng cho thấy sự hiện diện của các chất dinh dưỡng có thể được tận dụng trong nông nghiệp nếu nước thải được xử lý phù hợp.

So với kết quả nghiên cứu của Nguyễn Thị Hồng và cộng sự [12] tại Thừa Thiên Huế, các chỉ tiêu BOD₅, tổng P, tổng N thấp hơn, trong khi chỉ số TSS và COD cao hơn (Hàm lượng COD là 463 mg/L; BOD₅ là 307 mg/L; TSS là 373 mg/L; tổng N là 536 mg/L; tổng P là 318 mg/L). So với kết quả nghiên cứu của Lê Sỹ Chính và cộng sự [13] tại huyện Yên Định, tỉnh Thanh Hóa, các chỉ tiêu COD, TSS và tổng N đều thấp hơn (COD là 1.110 - 1.700 mg/L; TSS là 700 - 1.400 mg/L; tổng N là 300 - 410 mg/L).

3.3. Nghiên cứu ảnh hưởng của pH đến khả năng xử lý photpho trong nước thải chăn nuôi sau biogas của than sinh học

Thực hiện bố trí 04 công thức thí nghiệm, mỗi công thức lặp lại 03 lần với độ pH thay đổi từ 6 đến 9. Cho vào mỗi bình tam giác 250ml 0,2g vật liệu SP600 và 50ml nước thải chăn nuôi, lắc 150 phút. Sau đó, lọc mẫu để phân tích photpho. Hàm lượng tổng photpho trong nước thải đầu vào là $79,34 \pm 0,27$ (mg/L). Kết quả của thí nghiệm được thể hiện tại Hình 2.

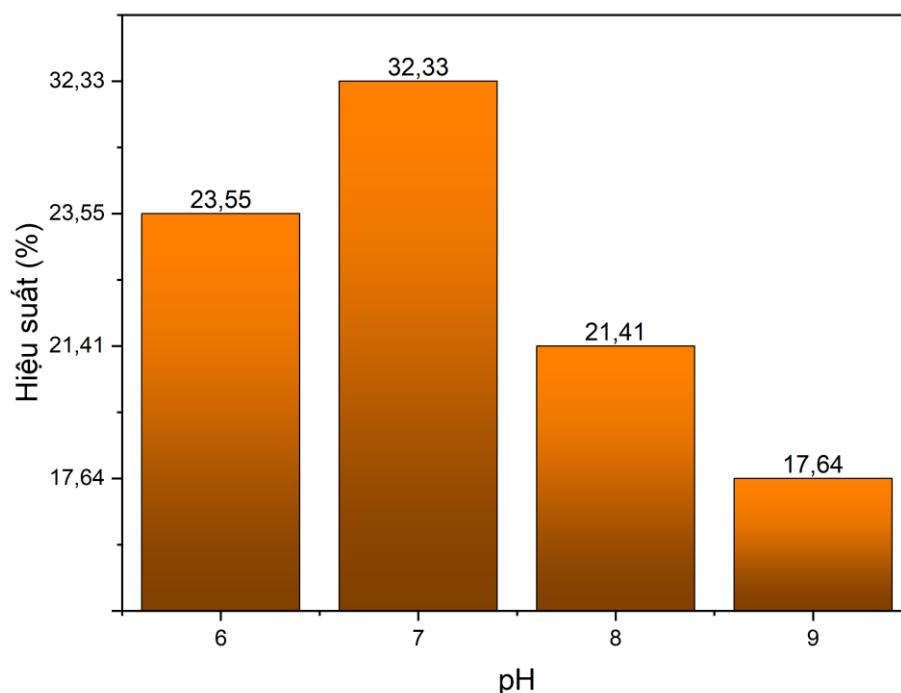
Dựa trên dữ liệu từ Hình 2, chúng ta có thể phân tích chi tiết ảnh hưởng của pH đến hiệu suất xử lý photpho trong nước thải chăn nuôi sau biogas của than sinh học. Kết quả cho thấy hiệu suất xử lý photpho thay đổi đáng kể theo giá trị pH, với pH = 7 là điều kiện tối ưu cho quá trình hấp phụ.

Cụ thể, tại pH = 7, hiệu suất xử lý đạt mức cao nhất, với 32,33%, giảm hàm lượng tổng photpho từ $79,34 \pm 0,27$ mg/L xuống còn $53,69 \pm 0,06$ mg/L. Điều này cho thấy rằng pH trung tính là điều kiện tối ưu để các nhóm chức trên bề mặt than sinh học tương tác mạnh mẽ với các ion photphat, cải thiện quá trình hấp phụ. Các nghiên cứu trước đây cũng đã chỉ ra rằng pH trung tính thường tạo điều kiện thuận lợi cho sự hấp phụ photpho, nhờ vào sự hiện diện của các nhóm chức oxy hóa như carboxyl và hydroxyl trên bề mặt than sinh học.

Ở các pH khác, hiệu suất xử lý photpho giảm rõ rệt. Tại pH = 6, hiệu suất là 23,55%, trong khi ở pH = 8 và pH = 9, hiệu suất lần lượt giảm xuống 21,41% và 17,64%. Sự giảm này có thể được giải thích bởi sự thay đổi tính chất hóa học của cả photphat và bề mặt hấp phụ của than sinh học khi pH thay đổi. Ở môi trường axit (pH = 6), các ion photphat có xu hướng tồn tại dưới dạng H_2PO_4^- , làm giảm khả năng tương tác với bề mặt than sinh học. Ngược lại, ở môi trường kiềm (pH = 8–9), các ion photphat chuyển sang dạng HPO_4^{2-} hoặc PO_4^{3-} , làm giảm ái lực hấp phụ trên bề mặt than sinh học, đồng thời ảnh hưởng đến điện tích của các nhóm chức [14].

Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây, trong đó cho thấy rằng pH trung tính là điều kiện tối ưu cho quá trình hấp phụ photpho bằng vật liệu hấp phụ chứa nhiều nhóm chức oxy hóa. Một nghiên cứu sử dụng biochar từ bùn thải cho thấy hiệu suất xử lý photpho cao nhất ở pH = 7, đạt hơn 35%, tương tự với hiệu suất của than sinh học từ mùn cưa gỗ keo trong nghiên cứu này [8], [14]. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc điều chỉnh pH trong các quy trình xử lý nước thải để tối ưu hóa hiệu suất hấp phụ.

Như vậy, có thể thấy rằng pH trung tính (pH = 7) có xu hướng mang lại hiệu quả xử lý photpho cao nhất, sau đó hiệu suất hấp phụ photpho của than sinh học sẽ giảm dần khi pH cao mang tính kiềm (pH = 8 và 9) hay pH thấp mang tính axit làm giảm hiệu suất do tác động đến hoạt động của các vi sinh vật và phản ứng hóa sinh trong hệ thống xử lý. Vậy có thể kết luận rằng pH = 7 là pH tối ưu để than sinh học đạt được hiệu suất hấp phụ tốt nhất.



Hình 2. Ảnh hưởng của pH đến hiệu suất xử lý photpho trong nước thải chăn nuôi sau biogas của than sinh học

3.4. Định hướng nghiên cứu xử lý photpho trong nước thải chăn nuôi bằng hấp phụ bởi than sinh học

Dựa trên các kết quả nghiên cứu, việc xử lý nước thải chăn nuôi bằng than sinh học từ mùn cưa gỗ keo cần tập trung vào một số khía cạnh quan trọng để tối ưu hóa hiệu quả xử lý. Đầu tiên, cần tối ưu hóa cấu trúc và đặc tính của than sinh học thông qua việc nghiên cứu các điều kiện nhiệt phân như nhiệt độ và thời gian. Việc này sẽ giúp tăng cường diện tích bề mặt, kích thước lỗ rỗng và số lượng các nhóm chức hoạt động như hydroxyl ($-OH$), carbonyl ($C=O$) và carboxyl ($COOH$) trên bề mặt than sinh học [15], [16]. Các nhóm chức này có vai trò quan trọng trong việc tương tác với các ion photphat trong nước thải, từ đó cải thiện khả năng hấp phụ.

Ngoài việc tối ưu hóa điều kiện nhiệt phân, việc áp dụng các phương pháp hóa học hoặc vật lý cũng rất cần thiết để cải thiện hiệu suất hấp phụ của than sinh học. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng hoạt hóa bằng các tác nhân hóa học như KOH hoặc NaOH có thể tạo ra cấu trúc xốp hơn và tăng cường khả năng hấp phụ của biochar [9], [16]. Việc này không chỉ giúp tăng diện tích bề mặt mà còn làm tăng tính khả dụng của các nhóm chức trên bề mặt than sinh học, từ đó nâng cao hiệu quả xử lý photpho trong nước thải chăn nuôi.

Kết quả thực nghiệm cho thấy pH trung tính ($pH = 7$) là điều kiện tối ưu để than sinh học đạt hiệu suất xử lý photpho cao nhất. Do đó, nghiên cứu và áp dụng các phương pháp điều chỉnh pH hiệu quả trong hệ thống xử lý là rất cần thiết. Việc duy trì pH ở mức tối ưu không chỉ giúp tăng cường khả năng hấp phụ mà còn giảm thiểu sự hình thành các ion photphat không có khả năng hấp phụ [10].

Cần nghiên cứu chi tiết cơ chế hấp phụ trên than sinh học, bao gồm tương tác hóa học và vật lý giữa các nhóm chức trên bề mặt than và các ion photphat ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}) trong nước thải. Hiểu rõ hơn về cơ chế này sẽ giúp tối ưu hóa quy trình xử lý và nâng cao hiệu quả xử lý [17]. Nước thải chăn nuôi sau biogas vẫn chứa hàm lượng chất rắn lơ lửng (TSS), chất hữu cơ (COD, BOD_5) và vi sinh vật vượt ngưỡng quy định. Do đó, cần tích hợp than sinh học với các

công nghệ khác như xử lý sinh học hoặc hệ thống biogas đa giai đoạn để tăng cường hiệu quả xử lý tổng thể [18].

Nước thải sau xử lý chứa các chất dinh dưỡng như Kali và Nitơ có thể được tái sử dụng trong nông nghiệp, góp phần xây dựng mô hình kinh tế tuần hoàn bền vững. Việc tái sử dụng này không chỉ giúp giảm thiểu ô nhiễm mà còn tạo ra giá trị kinh tế từ chất thải [19], [20].

Cuối cùng, cần xây dựng các mô hình xử lý nước thải chăn nuôi bằng than sinh học ở cả quy mô nhỏ (hộ gia đình) và quy mô lớn (trang trại). Việc này sẽ giúp đánh giá tính khả thi và hiệu quả kinh tế của các giải pháp xử lý này. Những định hướng này không chỉ giúp giảm thiểu ô nhiễm môi trường từ nước thải chăn nuôi mà còn mở ra triển vọng ứng dụng rộng rãi của than sinh học từ mùn cưa gỗ keo trong xử lý nước thải và bảo vệ môi trường [21], [22].

4. Kết luận

Nghiên cứu đã cho thấy nước thải chăn nuôi lợn sau khi qua bể biogas vẫn còn chứa hàm lượng các chất ô nhiễm vượt mức cho phép theo quy chuẩn kỹ thuật hiện hành: TSS vượt 5,49 lần; COD vượt 0,55 lần; BOD5 vượt 1,27 lần; Tổng N vượt 0,86 lần; Coliform vượt 1,2 lần. Đồng thời kết quả cũng khẳng định rằng than sinh học chế tạo từ mùn cưa gỗ keo là một vật liệu tiềm năng trong xử lý photpho trong nước thải chăn nuôi sau biogas, với hiệu suất xử lý cao nhất đạt 32,33% tại điều kiện pH trung tính ($\text{pH} = 7$). Các nhóm chức như hydroxyl ($-\text{OH}$), carbonyl ($\text{C}=\text{O}$), và carboxyl (COOH) cùng cấu trúc xốp của than sinh học đóng vai trò quan trọng trong việc tăng cường khả năng hấp phụ. Tuy nhiên, hiệu suất giảm đáng kể khi pH lệch khỏi giá trị tối ưu, do ảnh hưởng của sự thay đổi tính chất hóa học của photphat và bề mặt hấp phụ. Việc tối ưu hóa cấu trúc và áp dụng các phương pháp hoạt hóa là cần thiết để nâng cao hiệu quả xử lý, mở ra tiềm năng ứng dụng bền vững trong bảo vệ môi trường và tái sử dụng tài nguyên.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi Nhiệm vụ khoa học và công nghệ cấp Đại học Thái Nguyên thực hiện từ năm 2024 với mã số ĐH2024-NV-01.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. N. Waras, M.A. Zabidi, Z. Ismail, M. Sangaralingam, A. M. Gazzali, M. S. R. Harun, M. Y. Aziz, R. Mohamed, and M. N. M. Najib, "Comparative Analysis of Water Quality Index and River Classification in Kereh River, Penang, Malaysia: Impact of Untreated Swine Wastewater From Kampung Selamat Pig Farms," *Water Environment Research*, vol. 96, no. 8, 2024, Art. no. e11095.
- [2] D. P. Pham, V. H. Nguyen, Q. T. Luu, M. A. Cook, T. M. P. Trinh, D. B. Payne, T. T. Dao, D. Grace, and X. S. Dang, "Understanding Antibiotic Residues and Pathogens Flow in Wastewater From Smallholder Pig Farms to Agriculture Field in Ha Nam province, Vietnam," *Environmental Health Insights*, vol. 14, pp. 1-10, 2020.
- [3] F. Yang, B. Han, Y. Gu, and K. Zhang, "Swine Liquid Manure: A Hotspot of Mobile Genetic Elements and Antibiotic Resistance Genes," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, 2020, Art. no. e13503.
- [4] V. Souvannasouk, N. O. Singthong, N. P. Sayavongsa, N. S. Meas, N. T. Phaxaisithidet, and N. S. Fongsamouth, "Revolutionizing Biogas Generation: Polyethylene Tubular Digesters for Household Pig Farms," *Maejo International Journal of Energy and Environmental Communication*, vol. 5, no. 1, pp. 6-13, 2023.
- [5] W. Tsai, "Regulatory Promotion and Benefit Analysis of Biogas-Power and Biogas-Digestate From Anaerobic Digestion in Taiwan's Livestock Industry," *Fermentation*, vol. 4, no. 3, 2018, Art. no.e57.
- [6] Ministry of Natural Resources and Environment, *QCVN 62-MT:2016/BTNMT on National standards on livestock wastewater*, 2016.
- [7] C. de la M. Orozco, I. J. González-Acuña, R. A. Saucedo-Terán, H. E. Flores-López, H. O. Rubio-Arias, and J. M. Ochoa-Rivero, "Removing Organic Matter and Nutrients From Pig Farm Wastewater With a Constructed Wetland System," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, no. 5, 2018, Art. no. e1031.

- [8] C. Zhang, S. Sun, S. Xu, C. Johnston, and C. Wu, "Phosphorus Removal From Dirty Farmyard Water by Activated Anaerobic-Digestion-Derived Biochar," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 62, no. 45, pp. 19216-19224, 2023.
- [9] C. Zhang, Y. Ji, C. Li, Y. Zhang, S. Sun, Y. Xu, L. Jiang, and C. Wu, "The Application of Biochar for CO₂ Capture: Influence of Biochar Preparation and CO₂ Capture Reactors," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 62, no. 42, pp. 17168-17181, 2023.
- [10] Y. Shen, C. F. J. Loong, W. Chen, G. Liya, W. P. Chan, A. Veksha, and G. Lisak, "Closed-Loop K₂CO₃ Activation of Biochar for Coproduction of Microporous Carbon and Syngas," *Energy & Fuels*, vol. 38, no. 4, pp. 3186-3197, 2024.
- [11] Ministry of Natural Resources and Environment, *Vietnam Standard TCVN 5999:1995 (ISO 5667/10: 1992) on water quality - sampling - instructions for sampling wastewater*, 1995.
- [12] T. H. Nguyen and K. L. Pham, "Evaluation of the efficiency of pig farming wastewater treatment using household-scale biogas systems in Thua Thien Hue," *Hue University Journal of Science*, vol. 73, no. 4, pp. 67-78, 2012.
- [13] S. C. Le, A. H. Pham, and D. H. Phan, "Effect of recirculation ratio on the efficiency of pig farming wastewater treatment after biogas processing using a biofiltration method combined with alternating aeration," *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, vol. 34, no. 3, pp. 25-32, 2018.
- [14] Y. Wang, "Improvement of Acidic Soil Properties by Biochar From Fast Pyrolysis," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 37, no. 5, pp. 1743-1749, 2017.
- [15] M. Zhang, G. Song, D. L. Gelardi, L. Huang, E. Khan, G. Xu, S. J. Parikh, and K. H. Kim, "Evaluating Biochar and Its Modifications for the Removal of Ammonium, Nitrate, and Phosphate in Water," *Water Research*, vol. 186, 2020, Art. no. e116303.
- [16] M. Gale, T. T. P. Nguyen, M. Moreno, and K. L. Gilliard-AbdulAziz, "Physiochemical Properties of Biochar and Activated Carbon From Biomass Residue: Influence of Process Conditions to Adsorbent Properties," *Acs Omega*, vol. 6, no. 15, pp. 10224-10233, 2021.
- [17] T. Sizmur, T. Fresno, G. Akgül, H. Frost, and E. Moreno-Jiménez, "Biochar Modification to Enhance Sorption of Inorganics From Water," *Bioresource Technology*, vol. 246, pp. 34-47, 2017.
- [18] H. Deng, W. H. L. Chen, S. Li, H. Liu, and H. Lu, "Preparation, Properties, and Application of Biochar for Improving Sewage Sludge Dewatering Performance: A Review," *Water*, vol. 15, no. 9, 2023, Art. no. e1796.
- [19] D. Johnravindar, R. D. Patria, J. T. E. Lee, L. Zhang, Y. W. Tong, C. H. Wang, Y. S. Ok, and G. Kaur, "Syntrophic Interactions in Anaerobic Digestion: How Biochar Properties Affect Them?," *Sustainable Environment*, vol. 7, no. 1, 2021, Art. no. e1945282.
- [20] B. Chen, H. Zeng, F. Yang, Y. Yang, Z. Qiao, X. Zhao, L. Wang, and F. Wu, "Functional Biochar as Sustainable Precursors to Boost the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge From a Circular Economy Perspective: A Review," *Biochar*, vol. 6, no. 1, 2024, Art. no. e60.
- [21] I. Riera-Vila, N. O. Anderson, C. F. Hodge, and M. Rogers, "Anaerobically-Digested Brewery Wastewater as a Nutrient Solution for Substrate-Based Food Production," *Horticulturae*, vol. 5, no. 2, 2019, Art. no. e43.
- [22] W. Wang, J. Huang, T. Wu, X. Ren, and X. Zhao, "Research on the Preparation of Biochar From Waste and Its Application in Environmental Remediation," *Water*, vol. 15, no. 19, 2023, Art. no. e3387.