

ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG Bùn BỂ BIOGAS SAU TIỀN XỬ LÝ BẰNG PHƯƠNG PHÁP OXY HÓA FENTON VÀ TÁCH NƯỚC LÀM NGUYÊN LIỆU PHỐI TRỘN PHÂN BÓN HỮU CƠ

VÕ NGUYỄN XUÂN QUẾ^{1,2*}, TRẦN THỊ PHI OANH^{1,2}

¹ Khoa Môi trường và Tài nguyên, Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh

² Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

Tóm tắt:

Bùn biogas giàu dinh dưỡng, có thể sử dụng làm phân bón nếu giải quyết được các hạn chế như pH cao, lượng nước lớn, chứa N dễ bay hơi, dễ thất thoát ra môi trường và chứa vi sinh gây bệnh. Nghiên cứu khảo sát hiệu quả xử lý bùn bằng phương pháp Fenton để tăng khả năng phân hủy sinh học và hiệu quả tách nước, cô đặc bùn làm nguyên liệu phối trộn phân bón. Kết quả cho thấy, oxy hóa Fenton giúp điều chỉnh pH và giảm vi sinh gây bệnh trong bùn. Quá trình làm ẩm - tách ẩm cho hiệu quả loại nước đáng kể ở 70°C (36,6%) và giúp làm giàu thành phần dinh dưỡng trong bùn. Bùn cô đặc chứa hàm lượng TKN (3089,2 mg/L), P₂O₅ (37,3 mg/L) và K₂O (21,8 mg/L). Nước ngưng sau cô đặc chứa nitơ (651,2 mg/L) có thể tận thu ủ phân compost.

Từ khóa: Tái sử dụng chất thải, bùn biogas, phân bón nhà chặm, màng bọc sinh học.

Ngày nhận bài: 4/3/2024 ; Ngày sửa chữa: 25/3/2024;
Ngày duyệt đăng: 12/4/2024.

1. Đặt vấn đề

Việc sản xuất khí sinh học bằng các hệ thống bể biogas từ quá trình phân hủy kỵ khí chất thải hữu cơ mang lại lợi ích đáng kể về kinh tế và BVMT. Các phản ứng phân hủy kỵ khí trong bể biogas làm giảm hàm lượng hữu cơ của chất thải đến 60%, đồng thời để lại bùn thải có thể sử dụng làm phân bón hoặc chất ổn định đất [1,2]. Tùy điều kiện vận hành và thiết kế của bể biogas, bùn sau phân hủy được rút khỏi bể gián đoạn hay liên tục nhằm đảm bảo hoạt động ổn định của hệ thống.

Phế phẩm bùn bể biogas giàu dinh dưỡng và thích hợp sử dụng làm phân bón, tuy nhiên còn nhiều hạn chế khi sử dụng như một dạng phân bón lỏng. Trong

Evaluating the quality of biogas sludge after pretreatment by Fenton process and dewatering for organic fertilizer formulation

Abstract:

Biogas sludge is rich in nutrients and can be used as fertilizers after resolving the limits such as high pH, large amount of water, containing volatile N that is easily lost into the environment, and pathogens. This study investigates the effectiveness of iron-rich biogas sludge pretreatment using Fenton method to increase biodegradability and dewatering efficiency to recover condensed sludge as a raw material for fertilizer production. The results showed that Fenton oxidation process improved the quality of sludge by adjusting pH and reducing pathogenic microorganisms in sludge. The humidification - dehumidification process effectively removed water at 70°C (36.6%) and helped to enrich nutrients in the biogas sludge. The condensed sludge remained significant amounts of nutrients (3089.2 mg/L of TKN, 37.3 mg/L of P₂O₅ and 21.8 mg/L of K₂O). The water recovered from the humidification - dehumidification process contained significant amount of TKN (651.2 mg/L), which can be reused for composting process.

Keywords: Waste reuse, biogas sludge, slow-release fertilizer, bio-based coating.

JEL Classifications: Q51, Q53, O44.

đó, hạn chế đáng lưu ý bao gồm pH cao, hàm lượng nước rất cao (hơn 60%), dinh dưỡng đậm trong bùn biogas chủ yếu ở dạng NH₃ và NH₄⁺ dễ thất thoát ra môi trường theo nước tưới và qua quá trình bay hơi [2]. Hàm lượng nước cao gây khó khăn cho việc vận chuyển và tái sử dụng bùn [3]. Sự thất thoát nitơ khi được sử dụng làm phân bón phụ thuộc vào các yếu tố môi trường (nhiệt độ, độ ẩm, và tốc độ gió) và tính chất vật lý của bùn (pH, độ nhớt, hàm lượng và kích thước hạt rắn) [4]. Việc sử dụng trực tiếp bùn lỏng bể biogas tăng nguy cơ nhiễm độc, gây ảnh hưởng đến sự phát triển của cây trồng do nồng độ NH₄⁺ và PO₄³⁻ cao, vì vậy nên bùn lỏng biogas thường được pha loãng trước khi sử dụng [5]. Bùn bể biogas làm tăng pH đất. Sau khi bón phân, vi sinh chuyển hóa NH₄⁺ thành NO₃⁻, đất

bị axit hóa làm giảm khả năng hấp thu dinh dưỡng cần thiết của cây trồng [6].

Hạn chế đối với việc sử dụng bùn bể biogas chưa xử lý làm phân bón còn đến từ nguy cơ tiềm ẩn khi đưa các chất gây ô nhiễm tồn dư trong bùn biogas vào đất nông nghiệp. Tùy vào nguồn nguyên liệu đầu vào và điều kiện xử lý trong bể biogas, bùn sau phân hủy còn có thể chứa chất hữu cơ khó phân hủy như các hợp chất giống dioxin, hợp chất biphenyl chứa clo (PCB), thuốc trừ sâu, các hydrocarbon thơm đa vòng (PAH), paraffin chứa clo, hợp chất phenolic và phthalate [7]. Sự hiện diện của vi sinh gây bệnh trong bùn biogas quyết định chất lượng sinh học của bùn, có thể tạo điều kiện cho các đường lây truyền mầm bệnh mới giữa người, động vật và môi trường [8]. Trong quá trình phân hủy kỵ khí, không có oxy, trong một thời gian dài (15-50 ngày), ở nhiệt độ khoảng 35°C, một số vi khuẩn gây bệnh, vi rút, động vật nguyên sinh và trứng giun sán bị vô hiệu hóa. Tuy nhiên, khả năng ổn định chất thải và bất hoạt mầm bệnh trong bể biogas không hoàn chỉnh, so với công nghệ ủ phân compost. Do đó, để có thể sử dụng bùn thải biogas làm phân thì bùn thải cần phải được tiền xử lý để đạt chất lượng như một nguồn dinh dưỡng cho thực vật và giúp điều hòa chất lượng môi trường đất.

Để tăng cường tái sử dụng bùn bể biogas đáp ứng yêu cầu xử lý chất thải ô nhiễm theo xu hướng phát triển nông nghiệp sinh thái, bùn bể biogas cần được tách nước để thu hồi bùn đặc làm nguyên liệu phối trộn phân bón. Bùn biogas đặc có thể được sử dụng làm nguyên liệu phối trộn viên phân bón hữu cơ lai hóa có bổ sung dinh dưỡng vô cơ ở tỷ lệ đáp ứng nhu cầu dinh dưỡng của các loại cây trồng khác nhau. Bùn biogas đặc cũng có thể được sử dụng làm chất mang hữu cơ trong quá trình nhân sinh khối các chủng vi sinh ổn định dinh dưỡng, sau đó có thể đưa vào quá trình ủ phân compost với vai trò kép vừa là chất kích hoạt vừa bổ sung môi trường vi sinh có lợi [9].

Phương pháp tiền xử lý Fenton, một trong nhiều phương pháp oxy hóa bậc cao, được biết đến như một phương pháp phổ biến nhằm tăng cường khả năng phân hủy sinh học bùn thải. Quá trình oxy hóa Fenton có thể phân hủy các hợp chất cao phân tử ngoại bào do vi sinh tiết ra, chiếm tới 80% khối lượng bùn hoạt tính [10]. Một phần khối lượng bùn hoạt tính bị hòa tan, chuyển hóa thành các chất hữu cơ có khả năng phân hủy sinh học, và khoáng hóa giải phóng sản phẩm là CO₂ và H₂O. Tùy điều kiện thực hiện quá trình oxy hóa Fenton, tính chất bùn có thể thay đổi bao gồm khả năng tách nước tăng, độ nhớt giảm và kích thước hạt rắn tăng [11]. Vì vậy, phương pháp tiền xử lý Fenton đối với bùn biogas có chứa hàm lượng lớn ion sắt hòa tan (Fe²⁺ và Fe³⁺) được dự đoán là thích hợp để hỗ trợ cho quá trình cô đặc, tách nước và cải thiện chất lượng

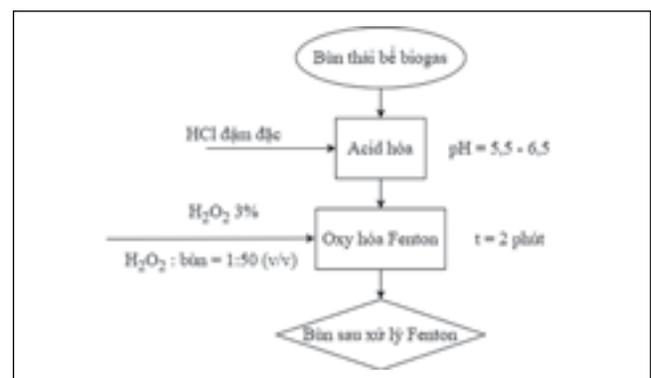
bùn làm nguyên liệu phối trộn phân bón. Điều kiện pH tối ưu để thực hiện phản ứng oxy hóa Fenton trong khoảng pH 3 - 6 [11], cũng đồng thời giúp điều chỉnh pH của bùn biogas về ngưỡng phù hợp cho việc phối trộn phân bón.

Nghiên cứu này tiến hành đánh giá chất lượng bùn biogas thu hồi sau tiền xử lý bằng phương pháp Fenton và cô đặc, tách nước. Thành phần dinh dưỡng và vi sinh gây bệnh (E.Coli và Coliform) trong bùn sau xử lý Fenton và hiệu suất tách nước bằng quá trình tạo ẩm-tách ẩm (HDH) ở các điều kiện gia nhiệt khác nhau được đánh giá để đảm bảo bùn thu hồi phù hợp làm nguyên liệu phối trộn phân bón hữu cơ.

2. Phương pháp nghiên cứu

Quá trình tiền xử lý bùn thải từ bể ủ biogas bằng phản ứng Fenton hóa sử dụng H₂O₂ làm tác nhân oxy hóa các hợp chất hữu cơ có cấu trúc phức tạp trong bùn. Phản ứng oxy hóa chất hữu cơ RH bằng gốc tự do OH• và các gốc chứa oxy hoạt hóa khác phát sinh từ quá trình phân hủy H₂O₂ khi có mặt chất xúc tác là muối sắt tan hoặc phức chứa sắt trong điều kiện acid nhẹ.

Bùn lỏng được thu từ hệ thống biogas của Nhà máy xử lý bùn thải thuộc Công ty TNHH Công nghệ Sinh học Sài Gòn Xanh, Đa Phước, Bình Chánh, Thành phố Hồ Chí Minh. Bình thủy tinh chứa bùn bể biogas có tổng hàm lượng Fe 12,8% và pH 8,3 được bổ sung dung dịch HCl đậm đặc từ từ để điều chỉnh pH đến khoảng 5,5 - 6,5. Sau đó, dung dịch H₂O₂ 3% được tiếp tục bổ sung vào bùn biogas đã acid hóa với tỷ lệ thể tích H₂O₂:bùn thay đổi (1:10, 1:20, 1:50) và khuấy liên tục ở điều kiện nhiệt độ phòng trong thời gian 2 phút. Mẫu bùn đã qua xử lý bằng H₂O₂ 3% được chia thành hai phần. Một phần bùn sau xử lý Fenton được dùng để phân tích tổng Fe, hàm lượng chất rắn bay hơi (TVS), NH₄⁺-N và vi sinh gây bệnh (E.Coli và Coliform). Phần còn lại được cho vào hệ thống cô quay để tiến hành tách nước và cô đặc bùn (Hình 1). Tỷ lệ H₂O₂:bùn tối ưu được lựa chọn dựa vào hàm lượng Fe và hàm lượng TVS còn lại trong bùn sau xử lý.



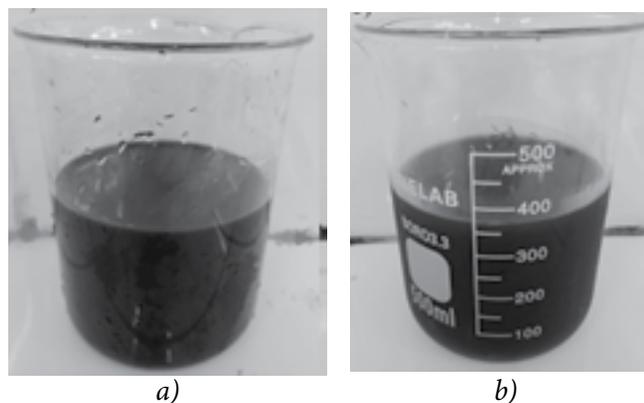
▲ Hình 1. Quy trình tiền xử lý bùn biogas bằng phương pháp oxy hóa Fenton

Hệ thống cô quay (Rotavapor R210, Buchi, Germany) được sử dụng để mô phỏng quá trình tạo ẩm-tách ẩm (HDH) để cô đặc bùn bể biogas [12]. Bơm chân không được sử dụng làm bơm hút không khí vào hệ thống tách ẩm. Bùn lỏng biogas (200 mL) sau tiền xử lý được bổ sung vào bình cô quay thể tích 1 lít và được gia nhiệt trong bể cách thủy. Nước trong bùn bay hơi và lôi cuốn qua bộ ngưng tụ nhờ động lực dòng không khí tạo ra bởi bơm hút. Dòng không khí bên ngoài đi vào hệ thống cô quay thông qua lỗ nạp và được làm ẩm bằng hơi nước. Không khí nóng ẩm với một lượng lớn hơi nước được ngưng tụ trong ống ngưng và thu hồi ở bình cầu nối với ống ngưng. Bùn đặc thu hồi được phân tích hàm lượng ẩm, TSS, TVS và thành phần dinh dưỡng cần thiết để phối trộn phân bón (TKN, P₂O₅, K₂O). Ảnh hưởng của nhiệt độ nước gia nhiệt (tối đa 70°C) đến hiệu quả cô đặc bùn biogas được khảo sát. Thời gian gia nhiệt mỗi mẻ là 4 giờ với lưu lượng không khí cố định ở mức 4 L/phút. Mỗi thử nghiệm được lặp lại 3 lần để đảm bảo độ tin cậy của số liệu. Hiệu quả tách nước và hàm lượng chất dinh dưỡng còn lại trong bùn sau quá trình tách ẩm được phân tích để xác định điều kiện vận hành tối ưu, làm cơ sở thiết kế hệ thống tách ẩm trong định hướng nghiên cứu tiếp theo. Các thử nghiệm được thực hiện ở điều kiện độ ẩm không khí 70%.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Hiệu quả tiền xử lý bùn lỏng biogas bằng phương pháp Fenton

Đặc điểm và chất lượng sinh học bùn lỏng biogas trước và sau xử lý bằng phương pháp oxy hóa Fenton được trình bày trong Hình 2 và Bảng 1. Bùn được xử lý trong điều kiện axit (pH 5,5 – 6,5) kết hợp tác nhân oxy hóa H₂O₂ làm giảm hàm lượng Fe tổng, chất rắn bay hơi (TVS), NH₄⁺-N và tổng số vi sinh gây bệnh (E.Coli và Coliform). Kết quả phân tích tổng hàm lượng Fe trong bùn sau xử lý còn lại thấp nhất khi sử dụng tỷ lệ bùn:H₂O₂ là 1:50, giảm từ 12,8 còn 0,7%.



▲ Hình 2. Mẫu bùn lỏng biogas (a) trước tiền xử lý và (b) sau tiền xử lý bằng phương pháp Fenton

Hàm lượng TVS giảm khoảng 20% (từ 24 mg/L còn 19 mg/L), trong đó khoảng 15% thành phần rắn bay hơi thất thoát ở dạng NH₄⁺-N (từ 2222 mg/L còn 1857 mg/L). Đặc biệt, hàm lượng vi sinh gây bệnh (E. Coli) trong bùn đã giảm đạt quy định về quản lý chất lượng phân bón (Nghị định số 108/2017/NĐ-CP về Quản lý phân bón, Phụ lục 5 - Chỉ tiêu chất lượng và phương pháp thử phân bón). Do xử lý bằng H₂O₂ nồng độ thấp, hàm lượng dinh dưỡng nitơ trong bùn có giảm nhưng không nhiều, phù hợp làm nguyên liệu trong sản xuất phân bón.

Bảng 1. Chất lượng bùn biogas sau tiền xử lý bằng oxy hóa Fenton

Chỉ tiêu	Đơn vị	Bùn lỏng (trước xử lý)	Bùn lỏng (sau xử lý)	Nghị định số 108/2017/NĐ-CP
Fe	%	12,8	0,7	-
TVS	mg/L	23,74 ± 3,57	18,05 ± 4,28	-
NH ₄ ⁺ -N	mg/L	2222,24 ± 11,23	1857,65 ± 31,11	-
E. Coli	MPN/100 mL	2,37 x 10 ⁴	9,47 x 10 ¹	1,1 x 10 ³
Coliform	MPN/100 mL	4,74 x 10 ⁵	4,28 x 10 ³	-

3.2. Hiệu quả tách nước, cô đặc bùn lỏng biogas sau tiền xử lý bằng oxy hóa Fenton

Sau xử lý Fenton, bùn lỏng được gia nhiệt và tách ẩm trong hệ thống cô quay ở 50°C và 70°C). Bảng 2 trình bày kết quả xác định hàm lượng ẩm, tổng rắn lơ lửng (TSS) và tổng rắn bay hơi (TVS) trong mẫu bùn lỏng trước và sau khi tách ẩm. Kết quả cho thấy hiệu quả tách nước tăng đáng kể khi tăng nhiệt độ gia nhiệt từ 50°C lên 70°C, từ 16,2% ở 50°C lên 36,6% ở nhiệt độ 70°C. Sau khi được tách nước ở 70°C, bùn cô đặc chứa tổng lượng chất rắn lơ lửng xấp xỉ 65,4 g/L, trong đó tổng hàm lượng rắn bay hơi đạt 23,7 g/L do một số thành phần dễ bay hơi bị thất thoát khi gia nhiệt đến 70°C.

Bảng 2. Hiệu suất tách nước bùn lỏng trong điều kiện nhiệt độ thay đổi

Nhiệt độ (°C)	Hàm lượng nước (%)	TSS (g/L)	TVS (g/L)	Hiệu suất tách nước (%)
32	96,15 ± 0,02	42,38 ± 4,19	18,05 ± 4,28	-
50	80,25 ± 0,01	50,06 ± 3,12	19,77 ± 3,27	16,24 ± 1,26
70	60,70 ± 0,02	65,45 ± 5,02	23,74 ± 3,57	36,66 ± 0,89



Bảng 3. Thành phần dinh dưỡng trong bùn biogas sau tách nước

Mẫu	TKN (mg/L)	P ₂ O ₅ (mg/L)	K ₂ O (mg/L)
Bùn lỏng trước tách ẩm	2426,67±10,78	26,24±6,13	15,84±8,27
Bùn lỏng sau tách ẩm	3089,24±13,54	37,31±5,41	21,87±4,95
Nước thu hồi sau tách ẩm	651,18±11,31	0	0

3.3. Thành phần dinh dưỡng bùn bể biogas sau khi cô đặc

Thành phần dinh dưỡng (TKN, P₂O₅ và K₂O) trong bùn biogas sau khi tách nước được trình bày trong Bảng 3. Kết quả cho thấy quá trình tạo ẩm-tách ẩm (HDH) có hiệu quả tách nước đáng kể, giúp cô đặc bùn và làm giàu hàm lượng dinh dưỡng trong bùn. Nước thu hồi từ quá trình cô đặc bùn biogas có chứa hàm lượng TKN cân bằng với mức giảm hàm lượng TKN trong bùn sau cô đặc, chứng tỏ quá trình tạo ẩm-tách ẩm (HDH) còn làm thất thoát các thành phần hợp chất chứa N dễ bay hơi. Vì vậy, để tăng hiệu quả tái sử dụng thành phần dinh dưỡng trong bùn biogas, cần có giải pháp thu hồi và tận dụng nước ngưng tụ từ quá trình cô đặc bùn cho quá trình ủ phân compost. Phần lớn hàm lượng N trong bùn ở dạng vô cơ hòa tan NH₄⁺, vốn là dạng N dễ hấp thu bởi cây trồng nhưng cũng dễ rửa trôi, thất thoát trong môi trường đất. Sau khi cô đặc, bùn biogas chứa hàm lượng TKN trung bình xấp xỉ 3089,2 mg/L, hàm lượng P₂O₅ trung bình xấp xỉ 37,3 mg/L và trung bình xấp xỉ K₂O

trung bình xấp xỉ 21,8 mg/L. Nước thu hồi từ quá trình cô đặc bùn ở điều kiện nhiệt độ 70°C có chứa hàm lượng TKN trung bình xấp xỉ 651,2 mg/L.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã tiến hành khảo sát hiệu quả tiền xử lý và tách nước bùn lỏng biogas làm nguyên liệu phối trộn phân bón. Phương pháp oxy hóa Fenton giúp điều chỉnh pH phù hợp (5,5 - 6,5) và làm giảm thành phần vi sinh gây bệnh. Hiệu quả loại nước bằng quá trình làm ẩm - tách ẩm ghi nhận đáng kể trong điều kiện nhiệt độ 70°C, giúp làm giàu thành phần dinh dưỡng NPK trong bùn sau thu hồi, thuận lợi dùng làm nguyên liệu cho quá trình phối trộn sản xuất phân bón. Thất thoát nitơ trong nước ngưng từ quá trình tách nước bùn biogas có thể được bổ sung vào quy trình ủ phân compost. Kết quả cho thấy, tính khả thi tận dụng bùn thải biogas sau xử lý oxy hóa Fenton và tách nước làm nguyên liệu phối trộn phân bón. Tuy nhiên, do hạn chế về thời gian, nghiên cứu chưa tính toán hiệu quả kinh tế của giải pháp tái sử dụng bùn bể biogas, bao gồm chi phí hóa chất cho quá trình tiền xử lý Fenton và chi phí năng lượng để vận hành hệ thống tách nước. Việc đánh giá hiệu quả kinh tế của giải pháp là cơ sở cho định hướng nghiên cứu tiếp theo trong thiết kế hệ thống tách nước bùn sử dụng năng lượng mặt trời.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia - TP. Hồ Chí Minh trong khuôn khổ đề tài mã số C2022-20-26. Nhóm tác giả xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia - TP. Hồ Chí Minh đã hỗ trợ cho nghiên cứu này■

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Al Juhaimi, F., Hamad, S., Al-Ahaideb, I., Al-Otaibi, M., Ghafoor, K., Abbasi, T., Abbasi, S.A., 2014. Biogas Production through the Anaerobic Digestion of Date Palm Tree Wastes - Process Optimization. *Bioresources* 9, 3323-3333.
- Yadav, R., Sudhishri, S., Khanna, M., Lal, K., Dass, A., Kushwaha, H.L., Bandyopadhyay, K., Dey, A., Kushwah, A., Nag, R.H., 2023. Temporal characterization of biogas slurry: a pre-requisite for sustainable nutrivation in crop production. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 7.
- Kumar, A., Verma, L.M., Sharma, S., Singh, N., 2023. Overview on agricultural potentials of biogas slurry (BGS): applications, challenges, and solutions. *Biomass Conversion and Biorefinery* 13, 13729-13769.
- Bonten, L.T.C., Zwart, K., Rietra, R., Postma, R., de, H., Nysingh, S.L., 2014. Bio-slurry as fertilizer : is bio-slurry from household digesters a better fertilizer than manure?: a literature review.
- Caspersen, S., Oskarsson, C., Asp, H., 2023. Nutrient challenges with solid-phase anaerobic digestate as a peat substitute - Storage decreased ammonium toxicity but increased phosphorus availability. *Waste Management* 165, 128-139.
- Malav, L., Khan, S., Gupta, N., 2015. Impacts of Biogas Slurry Application on Soil Environment, Yield and Nutritional Quality of Baby Corn. *Vegetos- An International Journal of Plant Research* 28, 194.
- Wang, Y., Feng, L., Zhao, X., Ma, X., Yang, J., Liu, H., Dou, S., Zhou, M., Xie, Z., 2013. Characteristics of volatile compounds removal in biogas slurry of pig manure by ozone oxidation and organic solvents extraction. *Journal of Environmental Sciences* 25, 1800-1807.
- Islam, M.A., Biswas, P., Sabuj, A.A.M., Haque, Z.F., Saha, C.K., Alam, M.M., Rahman, M.T., Saha, S., 2019. Microbial load in bio-slurry from different biogas plants in Bangladesh. *Journal of advanced veterinary and animal research* 6, 376-383.
- Chojnacka, K., Moustakas, K., 2024. Anaerobic digestate management for carbon neutrality and fertilizer use: A review of current practices and future opportunities. *Biomass and Bioenergy* 180, 106991.
- Liang, Y., Wang, R., Sun, W., Sun, Y., 2023. Advances in Chemical Conditioning of Residual Activated Sludge in China. *Water* 15, 345.
- Pilli, S., Yan, S., Tyagi, R.D., Surampalli, R.Y., 2015. Overview of Fenton pre-treatment of sludge aiming to enhance anaerobic digestion. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 14, 453-472.
- Wang, P., Zhang, X., Gouda, S.G., Yuan, Q., 2020. Humidification-dehumidification process used for the concentration and nutrient recovery of biogas slurry. *Journal of Cleaner Production* 247, 119142.