



TĂNG CƯỜNG HIỆU QUẢ PHÂN HỦY KỶ KHÍ CỦA Bùn THẢI TỪ TRẠM XỬ LÝ NƯỚC THẢI SINH HOẠT ĐÔ THỊ BẰNG TIỀN XỬ LÝ VỚI KALI HYDROXYDE

LÊ NGỌC THUẤN^{1,*}, NGUYỄN THỊ THU HÀ², VŨ THỊ MAI¹, NGUYỄN XUÂN LAN¹

¹Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội

²Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

Tóm tắt

Trong bối cảnh công nghiệp hóa và đô thị hóa ngày càng gia tăng, việc quản lý và xử lý bùn thải, đặc biệt là bùn hoạt tính thải (Waste Activated Sludge - WAS), đã trở thành một trong những thách thức môi trường lớn nhất. WAS là sản phẩm phụ không thể tránh khỏi của quá trình xử lý nước thải sinh học tại các nhà máy xử lý nước thải đô thị (Wastewater Treatment Plant - WWTP). Việc thải bỏ WAS không đúng cách có thể gây ra tác hại nghiêm trọng cho môi trường do hàm lượng mầm bệnh và chất hữu cơ cao trong bùn. Nghiên cứu này nhằm phát triển một quy trình tiền xử lý bằng KOH hiệu quả, tích hợp phân tích cơ chế, hiệu suất và tiềm năng ứng dụng thực tế, từ đó cung cấp giải pháp tối ưu cho việc xử lý WAS và thu hồi năng lượng. Nghiên cứu chỉ ra, tiền xử lý kiềm bằng KOH trong 3 giờ là phương pháp tiền xử lý hiệu quả để tăng cường quá trình phân hủy kỵ khí của bùn hoạt tính thải, kết quả là tăng đáng kể tiềm năng sinh khí biogas. Liều lượng KOH tối ưu (0,15 gKOH/gVS) đã giúp tăng sản lượng biogas tích lũy lên 34% so với mẫu đối chứng. Sự tăng cường này đạt được nhờ khả năng phá vỡ mạnh mẽ cấu trúc sinh khối, làm tăng nồng độ sCOD lên gần 5 lần. Với hiệu quả tăng cường khí biogas rõ rệt và thời gian xử lý ngắn (3 giờ), phương pháp này có tiềm năng triển khai thực tế để cải thiện tính kinh tế và môi trường của các trạm xử lý nước thải.

Từ khóa: Tiền xử lý kiềm, bùn hoạt tính thải, phân hủy kỵ khí.

Ngày nhận bài: 30/11/2025; Ngày sửa chữa: 11/12/2025; Ngày duyệt đăng: 15/12/2025

Enhancement of anaerobic digestion efficiency of sludge from urban domestic wastewater treatment plants by pretreatment with Kali hydroxide

Abstract

With the increasing industrialization and urbanization, the management and disposal of wastewater sludge, especially Waste Activated Sludge (WAS), has become one of the biggest environmental challenges. WAS is an inevitable by-product of biological wastewater treatment in municipal wastewater treatment plants (WWTP). Improper disposal of WAS can cause serious environmental damage due to the high pathogen and organic content in the sludge. This study aimed to develop an efficient KOH pretreatment process, integrating the analysis of mechanism, performance and practical application potential, thereby providing an optimal solution for WAS treatment and energy recovery. The study confirmed that 3-hour alkaline pretreatment with KOH is an effective pretreatment method to enhance the anaerobic digestion of waste activated sludge, resulting in a significant increase in biogas potential. The optimal KOH dosage (0.15 gKOH/gVS) increased the cumulative biogas yield by 34% compared to the control sample. This enhancement was achieved due to the strong disruption of the biomass structure, which increased the sCOD concentration by nearly 5 times. With the obvious biogas enhancement effect and short treatment time (3 hours), this method has the potential for practical implementation to improve the economic and environmental performance of wastewater treatment plants.

Key words: Alkaline Pretreatment, Waste Activated Sludge, Anaerobic Digestion.

JEL Classifications: Q51, Q52, Q55.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việc xử lý bùn hoạt tính thải WAS từ quá trình xử lý sinh học hiếu khí của nước thải đúng cách rất tốn kém, chiếm khoảng 60% tổng chi phí vận hành của các nhà máy xử lý nước thải. Các phương pháp xử lý

truyền thống như chôn lấp, ủ compost có chi phí vận hành cao và hiệu quả không ổn định.

Bùn thải WAS chứa sinh khối vi sinh vật và các hợp chất hữu cơ phức tạp, với thành phần chủ yếu là protein (khoảng 30%), carbohydrate (khoảng 40%), và

lipid (khoảng 30%). Bùn thải cũng có hàm lượng COD cao, dao động từ 45-63 g/L [1]. Phương pháp phân hủy kỵ khí (Anaerobic Digestion - AD) được áp dụng rộng rãi trên toàn thế giới để giảm thể tích, ổn định bùn và là một phương pháp thu hồi năng lượng dưới dạng khí sinh học (biogas). Biogas thường chứa 60-70% methane, được sử dụng để sản xuất điện năng, giúp giảm chi phí vận hành cho các nhà máy xử lý nước thải và giảm phát thải CO₂ bằng cách thay thế nhiên liệu hóa thạch [2,3].

Mặc dù AD mang lại lợi ích rõ rệt, yêu cầu năng lượng thấp và sản phẩm phân hủy ổn định, nhưng thách thức lớn nhất là tốc độ thủy phân các chất hữu cơ dạng hạt của WAS thấp do các sinh khối vi sinh vật WAS được bao bọc bởi mạng lưới polymer ngoại bào (Extracellular Polymeric Substances - EPS) phức tạp và bền vững ngăn cản các enzyme tiếp cận và phân giải các chất hữu cơ nội bào. Do rào cản này, bùn thứ cấp (WAS) không có tiền xử lý chỉ đạt hiệu suất phân hủy chất rắn bay hơi (VS) khoảng 30-45%, trong khi bùn sơ cấp có thể đạt tới 60-65%. Hiệu suất thủy phân thấp dẫn đến thời gian lưu bùn kéo dài (thường 20-30 ngày), hiệu suất phân hủy tổng thể thấp, và sản lượng biogas thu được không đạt kỳ vọng [2,3,4]. Để khắc phục, các phương pháp tiền xử lý (như hóa học, nhiệt, hoặc kết hợp) là cần thiết để phá vỡ cấu trúc này và cải thiện hiệu suất tiêu hóa kỵ khí.

Tiền xử lý kiềm đã trở thành một phương pháp được ưu tiên để tiền xử lý bùn do quy trình đơn giản, dễ vận hành và hiệu quả cao, cụ thể là:

- Tăng khả năng hòa tan của chất hữu cơ (tCOD → sCOD) [3,4].
- Phá vỡ EPS → tăng khả năng tiếp cận cơ chất: ALK phá vỡ mạng lưới EPS và các tế bào vi sinh vật, giải phóng vật chất hữu cơ nội bào ra dạng hòa tan [3,5].
- Sử dụng KOH hiệu quả cao hơn NaOH: Trong các nghiên cứu so sánh, tiền xử lý bằng NaOH và KOH cho thấy hiệu quả tương đương nhau trong việc tăng cường sCOD (tăng gần 8 lần) và tăng sản lượng methane (50%) đối với phân gia súc [5,6]. Tuy nhiên, KOH mang lại lợi thế về giá trị dinh dưỡng và môi trường sau xử lý. Ngoài ra, chất thải lỏng từ tiền xử lý KOH có thể gây ra ít vấn đề môi trường hơn (như nhiễm mặn đất) so với NaOH [5,6,7].

Mặc dù hiệu quả của tiền xử lý kiềm đã được chứng minh rộng rãi, nhưng các nghiên cứu về tiền xử lý kiềm thường sử dụng thời gian xử lý dài (ví dụ: 24 giờ), hoặc áp dụng nhiệt độ cao hơn (thermo-alkaline) kết hợp thời gian giữ nhiệt 3-5 giờ ở 80°C để đạt hiệu suất mong muốn [4,6,8,9] mà ít nghiên cứu đánh giá KOH

với thời gian xử lý ngắn 3 giờ đối với bùn hoạt tính dư (WAS). Mục tiêu nghiên cứu này tập trung vào việc tối ưu hóa và đánh giá KOH như một tác nhân tiền xử lý hiệu quả và bền vững cho WAS:

- Đánh giá thay đổi tính chất bùn hoạt tính sau tiền xử lý KOH.
- Xác định ảnh hưởng của liều lượng KOH đến quá trình phân hủy kỵ khí.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Thu gom và đặc điểm mẫu bùn hoạt tính ban đầu

Bùn hoạt tính thải (WAS) được sử dụng trong thí nghiệm này là bùn thứ cấp, được thu gom từ bể lắng thứ cấp của công trình xử lý sinh học tại Trạm xử lý nước thải Vĩnh Yên có công suất thiết kế 5000 m³/ngày, đêm. Bùn được lấy về và phân tích các đặc điểm hóa lý ban đầu trước khi tiến hành tiền xử lý kiềm bằng hóa chất Kali Hydroxide (KOH).

2.2. Quy trình tiền xử lý bằng KOH

Quy trình tiền xử lý kiềm được thực hiện trên bùn hoạt tính thải (WAS) thu thập từ nhà máy xử lý nước thải Vĩnh Yên. Bùn được xử lý trong thời gian ngắn là 3 giờ ở nhiệt độ phòng. Các thí nghiệm tiền xử lý được thiết lập với bốn trường hợp chính: một mẫu đối chứng không qua xử lý và ba mẫu được xử lý với các liều lượng Kali Hydroxide (KOH) khác nhau.

Các liều lượng KOH thí nghiệm được lựa chọn dựa trên khối lượng chất rắn bay hơi (VS) của bùn ban đầu, cụ thể là: 0,03 g KOH/g VS, 0,09 g KOH/g VS và 0,15 g KOH/g VS. Mục tiêu là đạt được mức pH kiềm cao để đảm bảo sự phá vỡ cấu trúc bùn và hòa tan chất hữu cơ.

Sau 3 giờ tiền xử lý kiềm, các mẫu bùn được trung hòa ngay lập tức. Việc này được thực hiện bằng cách thêm dung dịch HCl cho đến khi đạt pH = 7 ± 0,2. Mục đích của bước trung hòa là tránh sốc pH cho quần xã vi sinh vật trong hệ thống phân hủy kỵ khí tiếp theo.

Các thông số được theo dõi sau tiền xử lý bao gồm sự thay đổi của TS (Tổng chất rắn), VS (Chất rắn bay hơi) và sCOD (COD hòa tan). Ngoài ra, TN (Tổng Nitơ) và TP (Tổng Phốt pho) trong pha lỏng cũng được theo dõi và ghi nhận sự thay đổi.

2.3. Thí nghiệm sinh khí Biogas kỵ khí (Batch anaerobic digestion tests)

Thí nghiệm phân hủy kỵ khí được thực hiện theo mẻ nhằm đánh giá hiệu suất sản xuất biogas của bùn hoạt tính thải (WAS) sau khi được tiền xử lý bằng KOH. Các mẫu thử nghiệm bao gồm một mẫu đối chứng không xử lý và ba mẫu đã qua tiền xử lý KOH ở các liều lượng 0,03 g KOH/g VS, 0,09 g KOH/g VS và 0,15 g KOH/g VS. Trước khi đưa vào hệ thống kỵ khí,



bùn đã được điều chỉnh về pH trung tính ($pH = 7.02$) bằng dung dịch HCl loãng để tránh hiện tượng sốc pH, bảo vệ quần xã vi sinh vật kỵ khí.

Thí nghiệm được tiến hành trong điều kiện nhiệt độ trung bình (mesophilic), duy trì ổn định ở $35,1^{\circ}C$. Toàn bộ quá trình theo dõi thể tích khí biogas tích lũy được thực hiện bằng cách thu khí sinh ra vào túi chứa khí. Thời gian thí nghiệm được kéo dài cho đến khi sản lượng khí ổn định, với các dữ liệu được ghi nhận trong 21 ngày.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Đặc điểm bùn hoạt tính ban đầu tại nhà máy

Bùn hoạt tính thải (WAS) được thu thập từ bể lắng thứ cấp của công trình xử lý sinh học tại Trạm xử lý nước thải Vĩnh Yên (công suất $5000\text{ m}^3/\text{ngày}$, đêm). Các chỉ tiêu hóa lý của bùn hoạt tính ban đầu (mẫu đối chứng) được xác định như sau:

Bùn có tính chất gần trung tính với pH đạt 7,1. Tổng chất rắn (TS) đạt $23,1 \pm 2,5\text{ g/l}$, trong đó chất rắn bay hơi (VS), thể hiện phần hữu cơ, là $17,2 \pm 1,9\text{ g/l}$

Về hàm lượng chất hữu cơ, COD tổng (tCOD) ban đầu của bùn là 9500 mg/l . Nồng độ COD hòa tan

(sCOD) – phần hữu cơ đã được hòa tan sẵn và dễ dàng được vi sinh vật kỵ khí tiếp cận – là $825,3 \pm 56\text{ mg/l}$. Tỷ lệ sCOD so với tCOD tương đối thấp cho thấy phần lớn chất hữu cơ trong bùn ở dạng hạt hoặc bị bao bọc trong cấu trúc sinh khối ban đầu. Đặc điểm này phản ánh khả năng phân hủy kỵ khí ban đầu bị giới hạn ở bước thủy phân, hay còn gọi là bùn "già", làm giảm tiềm năng tạo khí sinh học...

Hàm lượng dinh dưỡng trong bùn ban đầu cũng được xác định (tính theo %TS): Tổng Nitơ (TN) chiếm $1,8 \pm 0,5\%$ %TS và Tổng Phốt pho (TP) chiếm $2,1 \pm 0,3\%$ %TS. Do đó, việc tiền xử lý kiềm là cần thiết để phá vỡ cấu trúc bùn, giải phóng chất hữu cơ hòa tan và nâng cao hiệu suất sinh khí.

3.2. Ảnh hưởng của tiền xử lý KOH đến tính chất bùn

Kết quả đo được cho thấy, chỉ với liều lượng $0,09\text{ g KOH/g VS}$ và $0,15\text{ g KOH/g VS}$, pH sau xử lý đã đạt mức kiềm mạnh, lần lượt là 12,3 và 12,5. Liều lượng thấp hơn ($0,03\text{ g KOH/g VS}$) chỉ đạt pH 11,5.

Tăng cường hòa tan chất hữu cơ (sCOD)

Dữ liệu cho thấy, nồng độ sCOD thay đổi trong 4 mẫu thí nghiệm: từ $823,5\text{ mg/l}$ ở mẫu bùn thải ban đầu có tăng nhẹ ở mẫu đối chứng lên 1.021 mg/l , tăng mạnh



Lấy mẫu tại Trạm xử lý nước thải Vĩnh Yên

Bảng 1. Đặc điểm bùn hoạt tính

Chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị
pH	-	7,1
TS	g/l	23.1 ± 2.5
VS	g/l	17.2 ± 1.9
tCOD	mg/l	9.500 ± 68
sCOD	mg/l	825.3 ± 56
TN	%TS	1.8 ± 0.5
TP	%TS	2.1 ± 0.3

ở các mẫu được tiền xử lý bằng KOH, tới 2.978 mg/l ở liều lượng 0,035 g KOH/g VS, 3.165 mg/l ở liều lượng 0,09 g KOH/g VS và đạt cao nhất là 3.956 mg/l ở liều lượng 0,15 g KOH/g VS, tương đương với mức tăng sCOD lên khoảng 4,8 lần so với mẫu bùn thải ban đầu. Sự gia tăng sCOD này là bằng chứng trực tiếp cho thấy, quá trình tiền xử lý kiềm đã thành công trong việc thủy phân sinh khối vi sinh vật, giải phóng các hợp chất hữu cơ nội bào và ngoại bào (EPS) vào dung dịch, tạo ra nguồn cơ chất hòa tan dồi dào cho quá trình phân hủy kỵ khí tiếp theo.

Nhận xét:

Kết quả cho thấy, liều lượng KOH càng cao càng thúc đẩy quá trình phá vỡ sinh khối mạnh mẽ, dẫn đến tăng cơ chất hòa tan (sCOD) theo cấp số nhân. Việc tăng sCOD lên gần 5 lần ở liều lượng tối ưu đã cung cấp nguồn dinh dưỡng dễ tiếp cận cho vi khuẩn kỵ khí, làm giảm bước giới hạn tốc độ (thủy phân) và có thể làm gia tăng hiệu suất sinh khí biogas của giai đoạn xử lý kỵ khí sau đó.

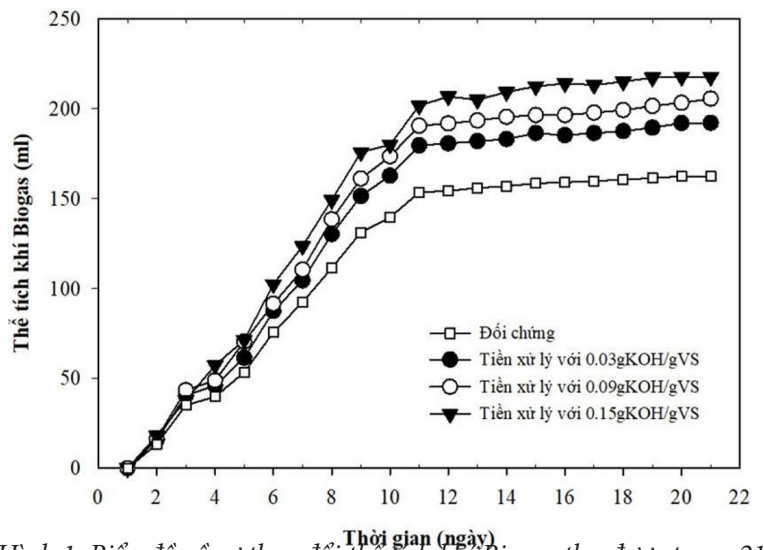
Bảng 2. Tính chất của bùn thải sau khi tiền xử lý 3h với KOH sử dụng phân hủy kỵ khí

Nồng độ gKOH/gVS	Đối chứng	KOH 0,03	KOH 0,09	KOH 0,15
pH	7,10	11,50	12,3	12,5
TS (g/l)	20,60	19,10	18,51	18,42
VS (g/l)	12,15	12,31	11,97	11,65
tCOD (mg/l)	9256	8617	8155	9167
sCOD (mg/l)	1021	2978	3165	3956
TN (mg/l)	225	270	331,5	312,6
TP (mg/l)	7,6	5,6	6,7	4,7

3.3. So sánh lượng biogas tích lũy giữa các liều lượng KOH

Thí nghiệm phân hủy kỵ khí cho thấy, tiền xử lý kiềm bằng KOH đã tác động tích cực và rõ rệt đến tổng lượng khí sinh học tích lũy so với mẫu đối chứng không xử lý. Theo dõi trong 21 ngày, thể tích khí sinh ra tăng nhanh chóng trong khoảng 2 đến 5 ngày đầu tiên và dần ổn định sau ngày thứ 15, chứng tỏ quá trình thủy phân/axit hóa được tăng tốc nhờ cơ chất hòa tan được giải phóng.

Lượng khí sinh ra được ghi nhận cho thấy, có sự gia tăng nhanh chóng trong khoảng 2-5 ngày đầu tiên và dần dần ổn định sau ngày thứ 15. Biogas tích lũy sinh ra từ tất cả các mẫu bùn đã tiền xử lý đều cao hơn đáng kể so với mẫu đối chứng. Cụ thể, sau 21 ngày, liều lượng KOH 0,15 g KOH/g VS mang lại hiệu suất sinh khí tăng cao nhất, đạt mức tăng 34% so với mẫu đối chứng. Các liều lượng 0,09 g KOH/g VS và 0,03 g KOH/g VS cũng cho mức tăng đáng kể, lần lượt là 27% và 18%.



Hình 1. Biểu đồ về sự thay đổi thể tích khí Biogas thu được trong 21 ngày của 4 mẫu thí nghiệm

Bàn luận: Sự gia tăng sCOD (từ 1021 mg/l của mẫu đối chứng lên tới 3956 mg/l ở liều 0,15 gKOH/gVS) đã cung cấp đủ lượng cơ chất hòa tan để thúc đẩy quá trình sản xuất khí, khiến liều cao nhất trong phạm vi thử nghiệm trở thành liều tối ưu. Tuy nhiên,

tiền xử lý kiềm mạnh tạo ra mức hòa tan cực cao của chất hữu cơ. Nếu nồng độ chất hòa tan (như sCOD, hoặc các hợp chất polymer ngoại bào bị phá vỡ) được giải phóng quá nhanh, chúng có thể vượt quá khả năng chuyển hóa của vi khuẩn sinh methane. Điều này dẫn đến sự tích tụ VFA, làm giảm pH đột ngột trong hệ kỵ khí và gây ức chế quá trình sinh methane, dù bùn đã được trung hòa về pH trước khi đưa vào hệ. Trong trường hợp này, việc trung hòa và duy trì điều kiện nhiệt độ trung bình (mesophilic) có thể đã giúp hệ thống vi sinh vật ổn định và xử lý hiệu



Bảng 3. So sánh Lượng Biogas tích lũy (sau 21 ngày)

Nghiệm thức	Liều lượng (gKOH/gVS)	Thể tích khí tích lũy (ml)	Tỉ lệ tăng của mẫu so với Đối chứng
Đối chứng	0	162,5	—
T1	0,03	192,2	18%
T2	0,09	205,7	27%
T3	0,15	217,2	34%

quả lượng cơ chất tăng cao mà không bị ức chế. Cần có nghiên cứu sâu hơn về ngưỡng hàm lượng kiềm để tránh nguy cơ quá tải (quá liều) khi sử dụng quá nhiều KOH.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu khẳng định rằng, tiền xử lý kiềm bằng KOH trong 3 giờ là một phương pháp tiền xử lý hiệu quả để tăng cường quá trình phân hủy kỵ khí của bùn hoạt tính thải, kết quả là tăng đáng kể của tiềm năng sinh khí biogas. Liều lượng KOH tối ưu (0,15 gKOH/gVS) đã giúp tăng sản lượng biogas tích lũy lên 34% so với mẫu đối chứng. Sự tăng cường này đạt được nhờ khả năng phá vỡ mạnh mẽ cấu trúc sinh khối, làm tăng nồng độ sCOD lên gần 5 lần.

Với hiệu quả tăng cường khí biogas rõ rệt và thời gian xử lý ngắn (3 giờ), phương pháp này có tiềm năng triển khai thực tế để cải thiện tính kinh tế và môi trường của các trạm xử lý nước thải như nhà máy xử lý nước thải sinh hoạt đô thị Vinh Yên.

Để tối ưu hóa hơn nữa quy trình này, hướng nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào việc áp dụng các mô hình động học (như Modified Gompertz) để định lượng chính xác tốc độ và tiềm năng sinh methane, đồng thời nghiên cứu tiền xử lý kết hợp nhiệt – kiềm để đánh giá khả năng giảm liều lượng hóa chất trong khi vẫn duy trì hoặc nâng cao hiệu suất phá vỡ sinh khối. Bên cạnh đó, cần có nghiên cứu sâu hơn về ngưỡng hàm lượng kiềm để tránh nguy cơ quá tải (quá liều) khi sử dụng quá nhiều KOH.

Lời cảm ơn: Tập thể tác giả chân thành cảm ơn trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội tạo điều kiện nghiên cứu, Bộ Nông nghiệp và Môi trường đã cấp kinh phí thông qua đề tài mã số TNMT.DL.2023.01 ■

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Shao, L., Wang, X., Xu, H., & He, P. (2012). Enhanced anaerobic digestion and sludge dewaterability by alkaline pretreatment and its mechanism. *Journal of Environmental Sciences*, 24(10), 1731–1738.
 2. Zhang, C., Li, J., Liu, C., Liu, X., Wang, J., Li, S., Fan, G., & Zhang, L. (2013). Alkaline pretreatment for

enhancement of biogas production from banana stem and swine manure by anaerobic codigestion. *Bioresource Technology*, 149, 353–358.

3. Jaffar, M., Pang, Y., Yuan, H., Zou, D., Liu, Y., Zhu, B., Korai, R. M., & Li, X. (2016). Wheat straw pretreatment with KOH for enhancing biomethane production and fertilizer value in anaerobic digestion. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24(3), 404–409.

4. Xu, X.-J., Wang, W.-Q., Chen, C., Xie, P., Liu, W.-Z., Zhou, X., Wang, X.-T., Yuan, Y., Wang, A.-J., Lee, D.-J., Yuan, Y.-X., & Ren, N.-Q. (2020). Bioelectrochemical system for the enhancement of methane production by anaerobic digestion of alkaline pretreated sludge. *Bioresource Technology*, 304, 123000.

5. Hodaei, M., Ghasemi, S., Khosravi, A., & Vossoughi, M. (2021). Effect of the ozonation pretreatment on biogas production from waste activated sludge of tehran wastewater treatment plant. *Biomass and Bioenergy*, 152, 106198.

6. García-Depraect, O., Lebrero, R., Martínez-Mendoza, L. J., Rodríguez-Vega, S., Aragão Börner, R., Börner, T., & Muñoz, R. (2023). Enhancement of biogas production rate from bioplastics by alkaline pretreatment. *Waste Management*, 164, 154–161.

7. Ren, W., Zhang, Y., Liu, X., Li, S., Li, H., & Zhai, Y. (2024). Peracetic acid pretreatment improves biogas production from anaerobic digestion of sewage sludge by promoting organic matter release, conversion and affecting microbial community. *Journal of Environmental Management*, 349, 119427.

8. Lê Ngọc Thuần. (2024). Báo cáo công việc 3.3: thiết kế và lắp đặt hệ hóa nhiệt quy mô phòng thí nghiệm. (Báo cáo thuộc đề tài TNMT.ĐL.2023.01). Bộ Tài nguyên và Môi trường.

9. Yan, W., Yin, Z., Kong, L., Zhang, Q., & Liu, C. (2026). Alkali pretreatment as a game-changer in enhancing methane production from cattle manure and reshaping microbial landscape: A comparative analysis of NaOH, KOH, and Ca(OH)₂. *Biochemical Engineering Journal*, 225, 109931.