Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (4V): 217–230

ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG TĂNG SINH METHANE VÀ ĐỘNG HỌC PHÂN HỦY KỴ KHÍ CHẤT THẢI HỮU CƠ

Nguyễn Việt Phong[a,*], Vũ Đức Toàn[b], Tạ Minh Phương[c], Nguyễn Ngọc Ánh[d]

[a]*Viện Công nghệ Sức khỏe và Môi trường, LK24 Athena Xuân Phương, phường Xuân Phương, Hà Nội, Việt Nam*
[b]*Khoa Hóa và Môi trường, Trường Đại học Thủy Lợi, số 175 Tây Sơn, phường Kim Liên, Hà Nội, Việt Nam*
[c]*Trung tâm Đào tạo Quốc tế, Trường Đại học Thủy Lợi, số 175 Tây Sơn, phường Kim Liên, Hà Nội, Việt Nam*
[d]*Công ty TNHH Công nghệ Kỹ thuật Môi trường Xanh, số 6/38 ngõ 156 phố Hồng Mai, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 09/10/2026, Sửa xong 24/10/2026, Chấp nhận đăng 26/10/2026

Tóm tắt

Đồng phân hủy kỵ khí là giải pháp xử lý chất thải chăn nuôi và chất thải hữu cơ, đồng thời thu hồi methane (CH_4) làm năng lượng. Nghiên cứu đánh giá hiệu quả sinh methane của mô hình bổ sung chế phẩm sinh học so với mô hình đối chứng, với quy mô 500 kg/mẻ trong 45 ngày. Phân gia súc có pH 8,0, TS 307 ± 5,5 g/kg và VS 241 ± 5,8 g/kg; chất thải hữu cơ có pH 5,5, TS 115 ± 3,8 g/kg và VS 108 ± 2,9 g/kg. Sau 45 ngày, mô hình bổ sung chế phẩm thu được 25,974 m^3 CH_4 (297,70 L CH_4/kg VS), cao hơn đối chứng đạt 11,690 m^3 (133,98 L CH_4/kg VS). Methane sinh mạnh trong ngày 10–24, đạt cực đại khoảng ngày 20–22. Mô hình Gompertz cải tiến mô tả dữ liệu tốt hơn mô hình bậc nhất (R^2 = 0,9984 so với 0,9895), với tiềm năng sinh methane cực đại lần lượt là 315,51 và 142,01 mL CH_4/g VS; thời gian trễ đều là 8,77 ngày. Kết quả cho thấy bổ sung chế phẩm làm tăng hiệu quả thu hồi methane, tuy nhiên chưa đủ cơ sở xác nhận ý nghĩa thống kê.

Từ khoá: Đồng phân hủy kỵ khí; chất thải chăn nuôi; chất thải hữu cơ; chế phẩm sinh học; thu hồi methane; Gompertz cải tiến; mô hình động học.

ASSESSMENT OF METHANE PRODUCTION ENHANCEMENT AND ANAEROBIC DIGESTION KINETICS OF ORGANIC WASTE

Abstract

Anaerobic co-digestion treats livestock manure and organic waste while recovering methane (CH_4) for energy. This study compared methane production between a system supplemented with a biological additive and an unsupplemented control, in a batch experiment loaded with 500 kg of a mixed substrate over a 45-day anaerobic digestion period. Livestock manure had a pH of 8.0, total solids (TS) of 307 ± 5.5 g/kg, and volatile solids (VS) of 241 ± 5.8 g/kg; those of organic waste were 5.5, 115 ± 3.8 g/kg, and 108 ± 2.9 g/kg. After 45 days, the supplemented system produced 25.974 m^3 CH_4 (297.70 L CH_4/kg VS), compared with 11.690 m^3 (133.98 L CH_4/kg VS) in the control. Methane production was most active during days 10–24, peaking around days 20–22. The modified Gompertz model fitted the data better than the first-order model (R^2 = 0.9984 versus 0.9895), with maximum methane production potentials of 315.51 and 142.01 mL CH_4/g VS for the supplemented and control systems, respectively. Both systems had a lag phase of 8.77 days. These findings suggest improved methane recovery with supplementation; however, the available evidence is insufficient to establish statistical significance.

Keywords: Anaerobic co-digestion; livestock manure; organic waste; microbial preparation; methane recovery; modified Gompertz model; kinetic modeling.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(4V)-17 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Phân hủy kỵ khí (AD) giúp xử lý chất thải hữu cơ và thu hồi methane (CH_4), phù hợp với kinh tế tuần hoàn. Đồng phân hủy các cơ chất bổ trợ nhau có thể cải thiện hiệu suất sinh khí. Zhang và cs. [1] ghi nhận đồng phân hủy chất thải thực phẩm với phân bò làm tăng tổng lượng methane 41,1% ở điều kiện tỷ lệ phối trộn tối ưu trong thí nghiệm mẻ. Các nghiên cứu gần đây tiếp tục khẳng định tỷ

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* nvphong1415@gmail.com (Phong, N. V.)

lệ phối trộn giữa chất thải thực phẩm và phân chăn nuôi là một biến số quan trọng chi phối hiệu suất methane [2].

Tổng quan về nguồn vi sinh cấy trong AD cho thấy nguồn, trạng thái bảo quản và mức độ hoạt hóa của inoculum có thể ảnh hưởng đến hiệu suất và độ ổn định của quá trình [3]. Các nghiên cứu thực nghiệm cũng ghi nhận tiềm năng của việc bổ sung vi sinh trong việc tăng sản lượng methane, mặc dù mức độ đáp ứng phụ thuộc đáng kể vào cơ chất, cấu trúc hệ vi sinh và điều kiện vận hành [4, 5].

Mô hình Gompertz cải tiến và mô hình bậc nhất giúp phân tích động học sinh methane. Việc so sánh các mô hình theo R^2, RMSE và ý nghĩa sinh học của tham số là cần thiết vì mức độ phù hợp phụ thuộc vào loại cơ chất và dạng đường cong thực nghiệm [6, 7].

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về phân hủy kỵ khí chất thải hữu cơ đã tập trung vào những vấn đề như tiền xử lý cơ chất, ảnh hưởng của pH và tải lượng hữu cơ đến hiệu quả phân hủy và thu hồi năng lượng [8–11]. Hoàng Minh Giang, Nguyễn Văn Hoan [12] nghiên cứu và đề xuất các giải pháp thu hồi khí methane từ bãi rác. Hoàng Ngọc Hà, Nguyễn Thị Kim Thái [13] khẳng định ủ sinh học là phương pháp áp dụng có hiệu quả đối với các loại chất thải rắn sinh hoạt ở Việt Nam. Nguyễn Phương Thảo và Nguyễn Việt Anh [14] đã đánh giá khả năng phối trộn phân bùn bể tự hoại với chất thải thực phẩm thông qua thí nghiệm phân hủy kỵ khí theo mẻ, cho thấy tiềm năng cải thiện khả năng thu hồi methane. Bên cạnh đó, nghiên cứu của Lều Thọ Bách và cs. [15] đề cập giải pháp cố định vi khuẩn kỵ khí nhằm tăng hiệu quả xử lý chất hữu cơ.

Tuy nhiên, đánh giá đồng thời hiệu quả chế phẩm sinh học và động học sinh methane ở quy mô hàng trăm kilôgam còn hạn chế. Nghiên cứu này đánh giá quá trình đồng phân hủy chất thải chăn nuôi và chất thải hữu cơ, có và không bổ sung chế phẩm sinh học, ở quy mô 500 kg nguyên liệu/mẻ trong 45 ngày. Các mục tiêu gồm đặc trưng hóa lý nguyên liệu, định lượng mức tăng thu hồi methane, xác định tác động của chế phẩm đến tiềm năng sinh methane cực đại (P), tốc độ sinh methane cực đại (R_m), thời gian trễ (λ) và so sánh khả năng mô tả dữ liệu của hai mô hình động học.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguyên liệu và đặc tính ban đầu

Mô hình xử lý chất thải hữu cơ quy mô 500 kg/mẻ áp dụng ủ kỵ khí trong bể kín để thu hồi methane. Nguyên liệu chi tiết ở Bảng 1 gồm chất thải chăn nuôi, rác hữu cơ, phụ phẩm giàu carbon, nước hoặc dịch tuần hoàn và chế phẩm sinh học. Sau phân loại, băm nhỏ, phối trộn và điều chỉnh pH, độ ẩm, tỷ lệ C/N, hỗn hợp được đưa vào bể ủ dung tích khoảng 1,8–2,5 m^3. Trong khoảng 30 - 45 ngày ủ, vi sinh vật phân hủy chất hữu cơ, tạo khí sinh học chứa khoảng 50 - 65% CH_4. Khí được thu gom, tách hơi nước, khử H_2S để đun nấu, sấy nông sản hoặc phát điện quy mô nhỏ. Bã được ủ ổn định hiếu khí thêm 10–20 ngày, sau đó sàng lọc làm phân bón hữu cơ.

Bảng 1. Công thức phối trộn cho 1 mẻ 500kg

Thành phần	Khối lượng	Tỷ lệ
Phân chăn nuôi: phân lợn, bò, gà	300–350 kg	60–70%
Rác hữu cơ: rau, củ, quả, thức ăn thừa	100–150 kg	20–30%
Phụ phẩm giàu carbon: lá mía, bã mía, rơm băm, trấu	25–50 kg	5–10%
Phụ phẩm cây có múi: vỏ cam, bưởi, quả loại	Không quá 30–50 kg	≤ 10%
Chế phẩm sinh học	1–2,5 kg	0,2–0,5%

Nguyên liệu sử dụng trong thí nghiệm gồm phân gia súc và chất thải hữu cơ. Chất thải hữu cơ sau khi thu gom, được trộn đều, lấy mẫu đại diện và bảo quản theo điều kiện phù hợp trước khi phân tích. Các chỉ tiêu phân tích đối với nguyên liệu này gồm pH, tổng chất rắn (TS), chất rắn bay hơi (VS), tổng

chất rắn lơ lửng (TSS), chất rắn lơ lửng bay hơi (VSS), COD tổng số và COD hòa tan. Đối với phân gia súc, các chỉ tiêu vi sinh gồm tổng số vi sinh vật hiếu khí, *E.coli* và *Salmonella*. Kết quả phân tích đặc tính nguyên liệu được sử dụng để đánh giá thành phần đầu vào, khả năng phân hủy sinh học và quy đổi lượng methane sinh ra theo lượng VS đưa vào hệ thống.

Bảng 2. Đặc tính của nguyên liệu sử dụng trong thí nghiệm

Chỉ tiêu	Đơn vị	Phân gia súc	Chất thải hữu cơ
pH đầu vào	-	8,0	5,5
Tổng chất rắn (TS)	g/kg	307 ± 5,5	115 ± 3,8
Chất rắn bay hơi (VS)	g/kg	241 ± 5,8	108 ± 2,9
Tổng chất rắn lơ lửng (TSS)	g/kg	278 ± 11,5	71,3 ± 2,1
Chất rắn lơ lửng dễ bay hơi (VSS)	g/kg	215 ± 13,2	65,7 ± 3,5
COD tổng	g/kg	281 ± 9,8	143,1 ± 11,3
COD hòa tan	g/kg	22,5 ± 3,3	51,3 ± 2,1
Tổng số vi sinh vật hiếu khí	CFU/g	$2{,}3 \times 10^6$	-
E. coli	MPN/25 g	$2{,}6 \times 10^8$	-
Salmonella	VK/25 g	$1{,}8 \times 10^8$	-

2.2. *Bố trí thí nghiệm*

Thí nghiệm được thực hiện trên hai mô hình: đối chứng và bổ sung chế phẩm sinh học. Theo Bảng 3, hai mô hình sử dụng cùng loại và tỷ lệ nguyên liệu, gồm hỗn hợp chất thải gia súc và chất thải hữu cơ. Mô hình đối chứng không bổ sung chế phẩm, còn mô hình thí nghiệm bổ sung chế phẩm sinh học với tỷ lệ 0,2% khối lượng nguyên liệu. Mỗi mô hình sử dụng 500 kg nguyên liệu/mẻ và được theo dõi trong 45 ngày. Lượng methane sinh ra và diễn biến phân hủy được ghi nhận để so sánh giữa hai mô hình.

Bảng 3. Bố trí các thí nghiệm

Thí nghiệm	Thành phần	Bổ sung chế phẩm sinh học
Đối chứng	Chất thải gia súc + chất thải hữu cơ	Không
Thí nghiệm	Chất thải gia súc + chất thải hữu cơ	0,2% khối lượng nguyên liệu

2.3. *Mô hình phân hủy kỵ khí và theo dõi quá trình*

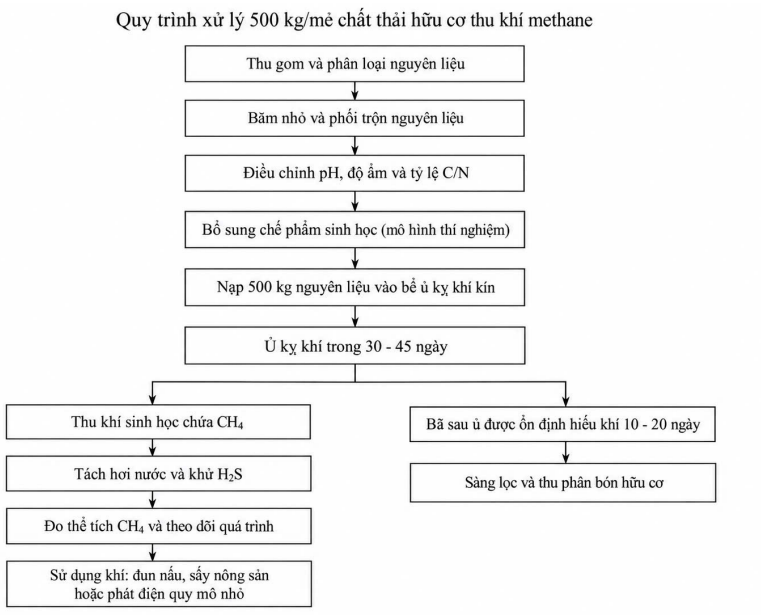
Mô hình xử lý 500 kg/mẻ chất thải hữu cơ được xây dựng theo nguyên lý ủ kỵ khí trong bể kín được thể hiện ở Hình 1. Nguyên liệu sau phân loại và chuẩn bị được nạp vào bể, đóng kín và thu khí sinh ra trong quá trình ủ.

2.4. *Xác định và chuẩn hóa lượng methane*

Lượng khí CH_4 được xác định bằng đồng hồ đo lưu lượng khí hoặc thiết bị đo thể tích khí phù hợp. Lượng khí CH_4 tích lũy và tốc độ sản sinh CH_4 được tính theo phương pháp tính toán.

$$R(t) = \frac{V_t - V_{CK,t}}{VS} \tag{1}$$

trong đó: $R(t)$ là đại lượng methane riêng tại kỳ đo t; V_t là thể tích CH_4 đo được của mô hình thí nghiệm tại kỳ t (mL); $V_{CK,t}$ là thể tích CH_4 đo được của mô hình đối chứng tại cùng kỳ (mL); VS là



Hình 1. Sơ đồ mô hình xử lý 500 kg/mẻ chất thải hữu cơ thu khí methane trong nghiên cứu

lượng chất rắn bay hơi dùng làm cơ sở chuẩn hóa (g).

$$M(t) = \sum_{\tau=1}^{t} \frac{V_\tau - V_{CK,\tau}}{VS} \tag{2}$$

trong đó: $M(t)$ là lượng CH_4 tích lũy đến thời điểm t (mL CH_4/g VS); V_τ là thể tích CH_4 của mô hình thí nghiệm tại kỳ đo τ (mL); $V_{CK,\tau}$ là thể tích CH_4 của mô hình đối chứng tại cùng kỳ (mL); VS là lượng chất rắn bay hơi dùng để chuẩn hóa (g).

Thể tích CH_4 sinh ra được ghi nhận theo từng thời điểm đo đối với mỗi mô hình và tổng hợp để xác định lượng CH_4 tích lũy trong 45 ngày. Lượng CH_4 được chuẩn hóa theo hàm lượng chất rắn bay hơi (VS) của nguyên liệu và biểu diễn dưới dạng mL CH_4/g VS, tương đương L CH_4/kg VS. Theo kết quả ghi nhận, lượng CH_4 tích lũy đạt 25,974 m^3 đối với mô hình bổ sung chế phẩm sinh học và 11,690 m^3 đối với mô hình đối chứng.

2.5. Mô hình Gompertz cải tiến

Mô hình Gompertz cải tiến được sử dụng để mô tả đường cong methane tích lũy và xác định ba tham số động học có ý nghĩa đối với hệ ủ kỵ khí: tiềm năng sinh methane cực đại P (mL CH_4/g VS), tốc độ sinh methane cực đại R_m (mL CH_4/g VS/ngày) và thời gian trễ λ (ngày). Dạng phương trình sử dụng trong báo cáo là:

$$M(t) = P\ \exp\left\{-\exp\left[\frac{R_m e}{P}(\lambda - t) + 1\right]\right\} \tag{3}$$

trong đó: $M(t)$ là lượng CH_4 tích lũy tại thời điểm t; P là tiềm năng sinh CH_4 cực đại; R_m là tốc độ sinh CH_4 cực đại; λ là thời gian trễ; t là thời gian ủ; e là hằng số Euler ($e \approx 2{,}718$).

Mức độ phù hợp của mô hình với dữ liệu thực nghiệm được đánh giá thông qua hệ số xác định R^2 và sai số căn trung bình bình phương (RMSE). M_{45} là lượng CH_4 tích lũy thực nghiệm tại ngày 45, tỷ lệ M_{45}/P được sử dụng để phản ánh mức độ tiến gần đến tiềm năng methane cực đại dự đoán.

2.6. Mô hình động học bậc nhất

$$M(t) = P\left[1 - e^{-k(t-\lambda)}\right] \tag{4}$$

trong đó: $M(t)$ là lượng CH_4 tích lũy tại thời điểm t; P là tiềm năng sinh CH_4 cực đại; k là hằng số tốc độ động học bậc nhất; t là thời gian phân hủy kỵ khí; λ là thời gian trễ trước khi bắt đầu sinh methane theo mô hình; e là hằng số Euler ($e \approx 2{,}718$).

Mô hình bậc nhất được sử dụng như một mô hình đối sánh để mô tả sự gia tăng methane tích lũy theo thời gian dựa trên giả thiết tốc độ chuyển hóa tỷ lệ với lượng cơ chất còn khả năng phân hủy. Các tham số chính gồm tiềm năng methane cực đại P, hằng số tốc độ phân hủy k (ngày^{-1}) và thời gian trễ λ.

2.7. Xử lý và phân tích số liệu

Hệ số xác định

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(M_{i,obs} - M_{i,pred})^2}{\sum_{i=1}^{n}(M_{i,obs} - \overline{M_{obs}})^2} \tag{5}$$

trong đó: R^2 là hệ số xác định; $M_{i,obs}$ là lượng CH_4 tích lũy đo được tại thời điểm i; $M_{i,pred}$ là lượng CH_4 tích lũy dự đoán từ mô hình tại thời điểm i; $\overline{M_{obs}}$ là giá trị trung bình của lượng CH_4 tích lũy thực nghiệm.

Căn bậc hai của sai số bình phương trung bình

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(M_{i,obs} - M_{i,pred})^2} \tag{6}$$

trong đó: $RMSE$ độ sai lệch giữa giá trị dự đoán từ mô hình và giá trị thực nghiệm; $M_{i,obs}$ là lượng CH_4 tích lũy đo được tại thời điểm i; $M_{i,pred}$ là lượng CH_4 tích lũy dự đoán từ mô hình tại thời điểm i; n là số điểm dữ liệu quan sát.

Số liệu được tổng hợp để mô tả lượng methane theo thời gian đo, methane tích lũy và hiệu suất methane theo VS. Hai mô hình động học được khớp với dữ liệu methane tích lũy và so sánh dựa trên R^2, RMSE và tính hợp lý của các tham số động học. R^2 là hệ số xác định, phản ánh mức độ phù hợp của mô hình với dữ liệu thực nghiệm. Giá trị R^2 càng gần 1 cho thấy mô hình giải thích được càng nhiều biến thiên của dữ liệu thực nghiệm. RMSE là căn bậc hai của sai số bình phương trung bình, phản ánh mức độ sai lệch giữa giá trị dự đoán từ mô hình và giá trị thực nghiệm. RMSE càng nhỏ cho thấy mô hình dự đoán càng chính xác.

$$\frac{M_{45}}{P} \times 100\% \tag{7}$$

trong đó: M_{45} là lượng methane tích lũy thực nghiệm tại ngày 45; P là tiềm năng methane cực đại do mô hình dự đoán. Bài đang dùng tỷ lệ này để báo cáo mức 94,36% và 94,35% đối với mô hình Gompertz.

$$\frac{R_m}{P} \tag{8}$$

trong đó: R_m là tốc độ sinh methane cực đại; P là tiềm năng methane cực đại. Bản thảo đang tính giá trị xấp xỉ 0,0430 ngày^{-1}.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{M_{45}} \times 100\% \tag{9}$$

trong đó: $NRMSE$ là sai số RMSE chuẩn hóa (%); $RMSE$ là sai số căn trung bình bình phương; M_{45} là lượng methane thực nghiệm tại ngày 45. Bản thảo dùng biểu thức này để so sánh sai số tương đối giữa hai nghiệm thức.

$$t^* = \lambda + \frac{P}{eR_m} \tag{10}$$

trong đó: t^* là thời điểm điểm uốn/thời điểm tốc độ sinh methane đạt cực đại theo mô hình; λ là thời gian trễ; P là tiềm năng methane cực đại; R_m là tốc độ sinh methane cực đại; e là hằng số Euler.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đặc tính nguyên liệu và ý nghĩa đối với quá trình phân hủy kỵ khí

Kết quả tại Bảng 2 cho thấy hai nhóm nguyên liệu khác nhau cả về pH, hàm lượng chất rắn và sự phân bố chất hữu cơ giữa các dạng hòa tan và không hòa tan. Phân gia súc có pH 8,0, trong khi chất thải hữu cơ có pH 5,5. Sự khác biệt này có tính bổ trợ khi phối trộn: phân gia súc có thể hỗ trợ khả năng đệm của hỗn hợp, còn chất thải hữu cơ cung cấp thêm nguồn cơ chất cho quá trình chuyển hóa. Zhang và cs. [1] đã ghi nhận vai trò tăng khả năng đệm của phân gia súc trong hệ phân hủy chất thải thực phẩm.

Hàm lượng TS và VS của phân gia súc lần lượt đạt 307 ± 5,5 và 241 ± 5,8 g/kg, tương ứng tỷ lệ VS/TS khoảng 78,5%. Đối với chất thải hữu cơ, các giá trị tương ứng là 115 ± 3,8 và 108 ± 2,9 g/kg, cho tỷ lệ VS/TS khoảng 93,9%. Như vậy, chất thải hữu cơ có tỷ trọng chất rắn bay hơi trong tổng chất rắn cao hơn, nhưng lượng VS trên một kilôgam nguyên liệu lại thấp hơn phân gia súc. Hai cách biểu thị này cần được phân biệt: VS/TS phản ánh thành phần của phần chất rắn, còn VS tính theo g/kg phản ánh lượng chất rắn bay hơi được đưa vào hệ trên một đơn vị khối lượng nguyên liệu. Vì vậy, so sánh hiệu quả thu hồi methane theo lượng VS nạp vào có ý nghĩa hơn việc chỉ so sánh theo khối lượng nguyên liệu ban đầu.

Phân bố COD cho thấy sự khác biệt rõ hơn về trạng thái của chất hữu cơ. COD tổng của phân gia súc đạt 281 ± 9,8 g/kg, cao hơn chất thải hữu cơ với 143,1 ± 11,3 g/kg. Ngược lại, COD hòa tan của chất thải hữu cơ đạt 51,3 ± 2,1 g/kg, cao hơn giá trị 22,5 ± 3,3 g/kg của phân gia súc. Tính từ các giá trị trung bình ở Bảng 2, tỷ lệ COD hòa tan/COD tổng lần lượt khoảng 35,8% và 8,0%, tức tỷ lệ COD hòa tan trong chất thải hữu cơ cao khoảng 4,48 lần. Kết quả cho thấy chất thải hữu cơ đóng góp tỷ lệ cơ chất hòa tan lớn hơn, trong khi phần lớn COD của phân gia súc nằm ngoài phần hòa tan.

Các chỉ tiêu chất rắn lơ lửng cũng thể hiện xu hướng tương tự. Tỷ lệ VSS/TSS tính từ giá trị trung bình đạt khoảng 77,3% ở phân gia súc và 92,1% ở chất thải hữu cơ. Tuy nhiên, VS/TS hoặc VSS/TSS cao không đồng nghĩa toàn bộ phần hữu cơ đều dễ phân hủy hay được chuyển hóa hết thành methane. Tương tự, COD hòa tan chỉ phản ánh trạng thái phân bố của cơ chất, không trực tiếp xác định tốc độ sử dụng sinh học.

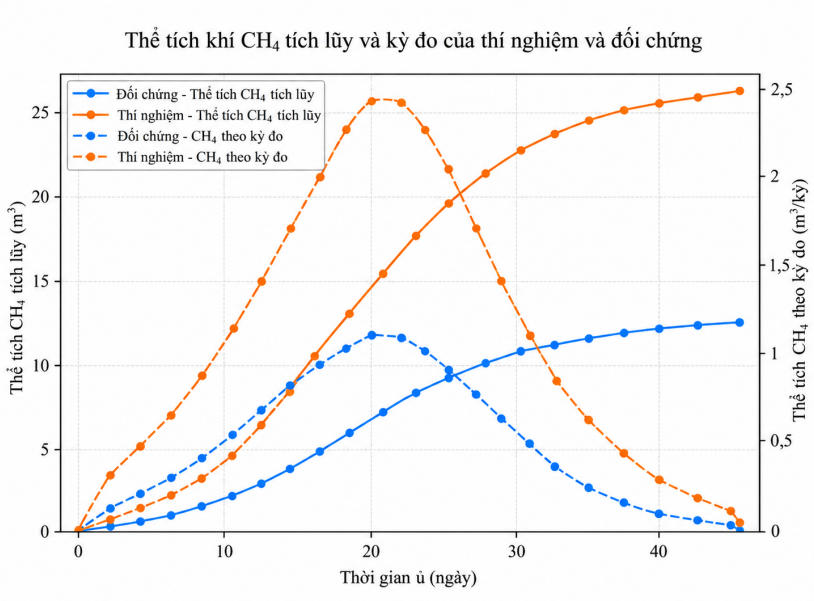
Dựa vào số liệu thu được, hỗn hợp phân gia súc và chất thải hữu cơ có thể cung cấp đồng thời các phần cơ chất với mức độ tiếp cận khác nhau đối với hệ vi sinh. Đây là cơ sở hợp lý để khảo sát đồng phân hủy, phù hợp với hướng tiếp cận của El-Mashad và Zhang [16].

3.2. Diễn biến sinh methane và hiệu quả thu hồi CH_4

Diễn biến tại Hình 2 cho thấy quá trình sinh methane có ba giai đoạn: sinh khí chậm ban đầu, tăng mạnh ở giai đoạn giữa và giảm dần về cuối chu kỳ. Lượng CH_4 theo kỳ đo tăng rõ trong khoảng ngày 10 - 24 và đạt cực đại khoảng ngày 20 - 22 ở cả hai thí nghiệm. Sau thời điểm này, lượng CH_4 phát sinh trong từng kỳ giảm, nhưng lượng tích lũy vẫn tăng do khí tiếp tục được tạo thành. Do đó, sự giảm của đường biểu diễn CH_4 theo kỳ không biểu thị methane tích lũy bị mất đi, mà phản ánh mức đóng góp ngày càng nhỏ của các kỳ đo tiếp theo vào tổng lượng thu hồi.

Giá trị cực đại theo kỳ đo đạt 2,403 m^3 ở thí nghiệm bổ sung chế phẩm và 1,081 m^3 ở đối chứng. Việc đỉnh sinh khí xuất hiện trong khoảng thời gian tương đồng, trong khi biên độ khác nhau khoảng 2,22 lần, gợi ý sự khác biệt nổi bật nằm ở lượng methane được tạo thành hơn là sự dịch chuyển rõ của giai đoạn sinh khí mạnh.

Kết quả tổng hợp trong Bảng 4 cho thấy sau 45 ngày, thí nghiệm bổ sung chế phẩm thu được 25,974 m^3 CH_4, tương ứng 297,70 L CH_4/kg VS, trong khi đối chứng đạt 11,690 m^3 và 133,98 L CH_4/kg VS. Chênh lệch tuyệt đối tính từ các giá trị báo cáo là 14,284 m^3 CH_4/mẻ, tương ứng 163,72 L CH_4/kg VS. Chênh lệch tương đối khoảng 122,2%, tức mức thu hồi cao khoảng 2,22 lần. Các chỉ tiêu tuyệt đối và tương đối bổ sung cho nhau: tỷ lệ tăng thể hiện mức khác biệt giữa hai thí nghiệm, còn thể tích tăng thêm cho biết quy mô thu hồi bổ sung trong một mẻ 500 kg.



Hình 2. Diễn biến CH_4 theo kỳ đo và CH_4 tích lũy của mô hình bổ sung chế phẩm sinh học và mô hình đối chứng trong 45 ngày

Bảng 4. Các chỉ tiêu chính về hiệu quả sinh methane sau 45 ngày

Chỉ tiêu	Bổ sung chế phẩm	Đối chứng
CH_4 tích lũy sau 45 ngày (m^3)	25,974	11,690
Hiệu suất methane (L CH_4/kg VS)	297,70	133,98
CH_4 cực đại theo kỳ đo (m^3/kỳ)	2,403	1,081
Thời điểm đạt cực đại	Khoảng ngày 20 - 22	Khoảng ngày 20 - 22

Thí nghiệm bổ sung chế phẩm đạt khoảng 86,4% lượng CH_4 cuối chu kỳ vào ngày 30 và 98,4% vào ngày 40. Như vậy, khoảng ngày 30 - 40 đóng góp thêm 12,0% tổng lượng methane, còn 5 ngày cuối chỉ đóng góp khoảng 1,6%. Lượng CH_4 tăng thêm tương ứng khoảng 3,117 m^3 và 0,416 m^3, với mức sinh khí trung bình khoảng 0,312 và 0,083 m^3/ngày.

Sự giảm sinh khí cuối chu kỳ phù hợp với khả năng phần cơ chất dễ tiếp cận đã được sử dụng nhiều hơn, trong khi các phần còn lại được chuyển hóa chậm hoặc hoạt tính của hệ bị giới hạn. Đến ngày thứ 40, lượng methane tích lũy đạt 98,4% tổng lượng methane thu được trong toàn bộ chu kỳ thí nghiệm 45 ngày.

Đối chiếu với tài liệu, hiệu suất 297,70 L CH_4/kg VS nằm trong khoảng 282 - 311 L CH_4/kg VS mà El-Mashad và Zhang [16] ghi nhận khi đồng phân hủy phân bò sữa và chất thải thực phẩm sau 30 ngày. Trong một hệ khác, Zhang và cs. [1] ghi nhận 388 mL CH_4/g VS ở tỷ lệ phối trộn tối ưu của thí nghiệm mẻ.

3.3. Động học sinh methane theo mô hình Gompertz cải tiến

Mô hình Gompertz cải tiến mô tả tốt đường cong methane tích lũy của cả hai thí nghiệm, với R^2 = 0,9984 và RMSE lần lượt 4,51 và 2,03 mL CH_4/g VS. Tiềm năng sinh methane cực đại dự đoán P của thí nghiệm bổ sung chế phẩm đạt 315,51 mL CH_4/g VS, cao khoảng 2,22 lần giá trị 142,01 mL CH_4/g VS của đối chứng. Tốc độ sinh methane cực đại R_m tương ứng đạt 13,58 và 6,11 mL CH_4/g VS/ngày. Sự tăng đồng thời của P và R_m cho thấy đường cong của thí nghiệm bổ sung chế phẩm có cả mức tiệm cận và độ dốc cực đại cao hơn trên cùng cơ sở VS nạp vào.

Bảng 5. Thông số động học theo mô hình Gompertz cải tiến

Thí nghiệm	P (mL/g VS)	R_m (mL/g VS/ngày)	λ (ngày)	R^2	RMSE (mL/g VS)	M_{45} (mL/g VS)	M_{45}/P (%)
Bổ sung chế phẩm	315,51	13,58	8,77	0,9984	4,51	297,70	94,36
Đối chứng	142,01	6,11	8,77	0,9984	2,03	133,98	94,35

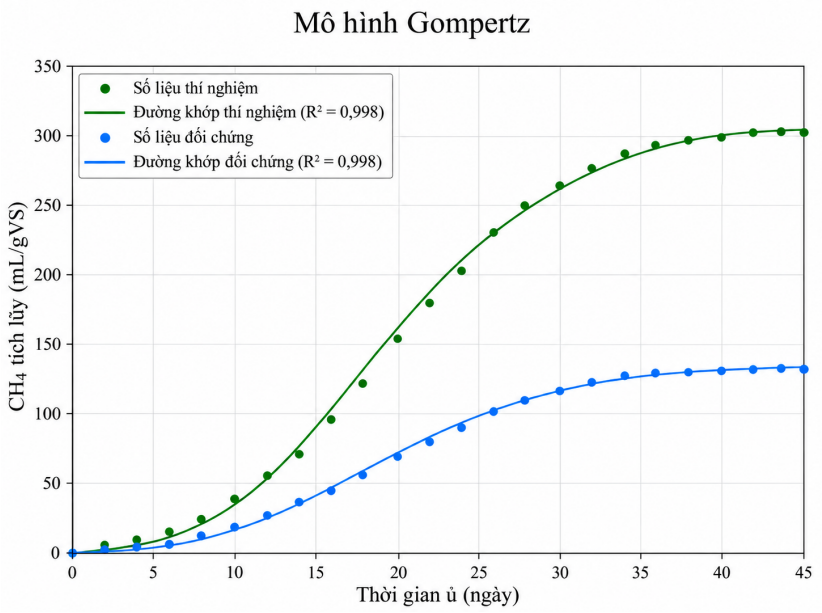
Trong khi P và R_m khác nhau về độ lớn, thời gian trễ λ của hai thí nghiệm đều bằng 8,77 ngày ở độ chính xác báo cáo. Kết quả này không hỗ trợ nhận định chế phẩm đã rút ngắn pha thích nghi. Cần lưu ý λ là tham số được suy ra từ hình dạng đường cong Gompertz, không đồng nhất với ngày đầu tiên thiết bị phát hiện methane. Vì vậy, việc hệ có sinh một lượng khí nhỏ trước thời điểm λ không nhất thiết mâu thuẫn với kết quả khớp mô hình. Sự tương đồng của λ nên được hiểu trong giới hạn của mô hình và độ làm tròn tham số, thay vì khẳng định toàn bộ quá trình thích nghi sinh học của hai hệ hoàn toàn giống nhau.

Phân tích bổ sung tỷ số R_m/P cho thấy giá trị này xấp xỉ 0,0430 ngày^{-1} ở cả hai thí nghiệm. Trong phương trình Gompertz đang sử dụng, khi chia methane tích lũy $M(t)$ cho P, hình dạng đường cong chuẩn hóa phụ thuộc vào R_m/P và λ. Do hai đại lượng này gần tương đương, các tham số báo cáo mô tả hai đường cong chuẩn hóa gần trùng nhau, khác biệt chủ yếu ở hệ số quy mô P. Như vậy, R_m tăng khoảng 2,22 lần phản ánh tốc độ sinh khí cực đại trên một đơn vị VS cao hơn, nhưng chưa chứng minh tốc độ chuyển hóa tương đối hoặc hoạt tính riêng trên một đơn vị sinh khối vi sinh tăng tương ứng. Đây là điểm cần phân biệt giữa tăng cường độ sinh khí và rút ngắn đặc trưng thời gian của quá trình.

Tại ngày 45, tỷ lệ M_{45}/P đạt 94,36% ở thí nghiệm bổ sung chế phẩm và 94,35% ở đối chứng. Phần chênh giữa tiềm năng dự đoán và lượng thực nghiệm tương ứng là 17,81 và 8,03 mL CH_4/g VS. Các khoảng chênh này là phần chưa đạt tới so với tiệm cận của mô hình, không phải lượng khí bổ sung đã được đo sau ngày 45. Do P được ước lượng bằng ngoại suy đường cong, cần thí nghiệm kéo dài hoặc kiểm định độc lập để xác nhận mức thu hồi cuối cùng. Mức tiệm cận tương đồng giữa hai thí nghiệm tiếp tục cho thấy sự khác biệt chủ yếu ở lượng methane, hơn là tỷ phần tiềm năng dự đoán đã đạt được tại cùng thời điểm.

Hai tỷ lệ 98,4% tại ngày 40 và 94,36% tại ngày 45 của thí nghiệm bổ sung chế phẩm sử dụng các mẫu số khác nhau. Tỷ lệ thứ nhất so sánh lượng khí ngày 40 với lượng thực nghiệm ngày 45, còn tỷ lệ thứ hai so sánh lượng thực nghiệm ngày 45 với tiềm năng P dự đoán. Vì vậy, chúng không mâu thuẫn và cũng không thể thay thế cho nhau khi đánh giá mức độ hoàn tất của quá trình. Sự phân biệt này cho

phép đồng thời nhận định rằng lượng khí tăng thêm cuối cửa sổ thí nghiệm đã nhỏ, nhưng vẫn tồn tại phần tiềm năng ngoại suy chưa được kiểm chứng bằng thực nghiệm.



Hình 3. Đường cong khớp mô hình Gompertz cải tiến đối với methane tích lũy của thí nghiệm bổ sung chế phẩm và đối chứng

Từ góc độ diễn giải và dựa vào Hình 3, Gompertz giúp tách mức thu hồi cực đại, cường độ sinh khí và đặc trưng thời gian, thay vì chỉ so sánh một giá trị methane cuối mẻ. Việc sử dụng mô hình này cũng phù hợp với cách tiếp cận của Omondi và cs. [6] trong nghiên cứu đồng phân hủy bèo tây và chất thải dạ cỏ. Tuy nhiên, sự phù hợp về dạng hàm không đồng nghĩa với việc mô hình nhận diện được bước phản ứng chi phối. Đối với bộ số liệu hiện tại, kết luận có cơ sở là thí nghiệm bổ sung chế phẩm có P và R_m cao hơn theo kết quả khớp, còn việc quy sự thay đổi đó cho thủy phân, acetat hóa hoặc methane hóa vẫn cần bằng chứng riêng.

3.4. Động học theo mô hình bậc nhất

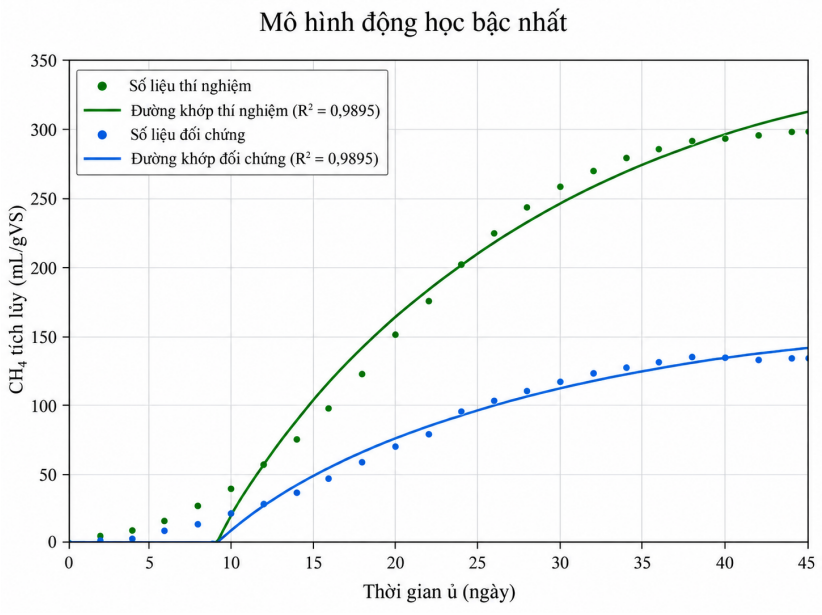
Kết quả tổng hợp trong Bảng 6 cho thấy mô hình bậc nhất cũng mô tả được xu hướng tăng methane tích lũy, với $R^2 = 0{,}9895$ ở cả hai thí nghiệm. P dự đoán đạt 367,77 mL CH_4/g VS ở thí nghiệm bổ sung chế phẩm và 165,53 mL CH_4/g VS ở đối chứng, tiếp tục cho tỷ lệ khoảng 2,22 lần. Tuy nhiên, hằng số tốc độ k đều bằng 0,0524 ngày^{-1} và thời gian trễ λ đều bằng 9,26 ngày. Như vậy, trong cấu trúc mô hình bậc nhất được báo cáo, sự khác biệt vẫn chủ yếu nằm ở tiềm năng methane, trong khi các tham số phản ánh diễn biến tương đối theo thời gian không thay đổi ở độ chính xác trình bày.

Bảng 6. Thông số động học theo mô hình bậc nhất

Thí nghiệm	P (mL/g VS)	k (ngày^{-1})	λ (ngày)	R^2	RMSE (mL/g VS)	M_{45} (mL/g VS)
Bổ sung chế phẩm	367,77	0,0524	9,26	0,9895	11,62	297,70
Đối chứng	165,53	0,0524	9,26	0,9895	5,23	133,98

P của mô hình bậc nhất cao hơn P của Gompertz khoảng 16,6% ở cả hai thí nghiệm. So với methane thực nghiệm ngày 45, P của mô hình bậc nhất cao hơn khoảng 23,5%; tỷ lệ M_{45}/P vì vậy chỉ

đạt khoảng 80,9%, thấp hơn mức 94,4% của Gompertz. Chênh lệch này cho thấy lựa chọn dạng mô hình có ảnh hưởng đáng kể đến ước lượng tiềm năng cuối cùng, dù cả hai mô hình đều cho R^2 cao. Đặc biệt, khi dùng P để đánh giá lợi ích của việc kéo dài mẻ ủ, ngoại suy từ mô hình bậc nhất sẽ gợi ý phần methane chưa thu hồi lớn hơn so với Gompertz.



Hình 4. Đường cong khớp mô hình động học bậc nhất đối với methane tích lũy của thí nghiệm bổ sung chế phẩm và đối chứng

Hình 4 thể hiện được sự khác biệt về P. Điều này có thể được hiểu từ việc hai dạng hàm phân bổ khác nhau phần tăng trưởng giữa giai đoạn đầu, giai đoạn giữa và đuôi đường cong. Với bộ dữ liệu có pha sinh khí chậm rồi tăng mạnh, một tham số tốc độ biểu kiến duy nhất không nhất thiết mô tả đồng thời tốt toàn bộ diễn biến. Tuy nhiên, chưa có bảng phần dư theo thời gian để xác định chính xác mô hình bậc nhất sai lệch nhiều nhất ở giai đoạn nào. Vì vậy, P cao hơn chỉ cho thấy xu hướng ngoại suy tiệm cận xa hơn, không chứng minh hệ thực nghiệm thực sự còn lượng cơ chất có thể sinh methane tương ứng.

Mặt khác, k là hằng số tốc độ biểu kiến của mô hình đang khớp, không phải phép đo trực tiếp hoạt tính thủy phân hoặc tốc độ của một phản ứng sinh hóa riêng lẻ. Việc k bằng nhau không phủ nhận sự khác nhau về lượng methane thu được, cũng không đủ để khẳng định chế phẩm không ảnh hưởng đến chuyển hóa cơ chất. Giá trị của mô hình bậc nhất trong nghiên cứu này nằm ở vai trò đối sánh: nó tái hiện xu hướng chênh lệch về P, đồng thời chỉ ra rằng ước lượng tiềm năng cuối cùng phụ thuộc vào cấu trúc toán học. Do đó, mô hình này nên được sử dụng cùng kết quả thực nghiệm và sai số khớp, thay vì làm căn cứ duy nhất để dự báo thời gian kết thúc mẻ.

3.5. So sánh khả năng mô tả của hai mô hình động học

So sánh tại Bảng 7 cho thấy Gompertz cải tiến có R^2 cao hơn và RMSE thấp hơn mô hình bậc nhất ở cả hai thí nghiệm. Đối với thí nghiệm bổ sung chế phẩm, RMSE giảm từ 11,62 xuống 4,51 mL CH_4/g VS; ở đối chứng, chỉ tiêu này giảm từ 5,23 xuống 2,03 mL CH_4/g VS. Tính theo $(\mathrm{RMSE}_{\text{bậc nhất}} - \mathrm{RMSE}_{\text{Gompertz}})/\mathrm{RMSE}_{\text{bậc nhất}}$, mức giảm sai số đạt khoảng 61,2% trong cả hai trường hợp. Vì vậy, ưu thế của Gompertz không chỉ thể hiện ở chênh lệch R^2 từ 0,9895 lên 0,9984, mà còn ở mức giảm sai số tuyệt đối nhất quán đối với bộ dữ liệu đang khớp.

Bảng 7. So sánh mức độ phù hợp của hai mô hình

Thí nghiệm	Mô hình	R^2	RMSE (mL/g VS)	Nhận xét
Bổ sung chế phẩm	Gompertz cải tiến	0,9984	4,51	Phù hợp tốt hơn
Bổ sung chế phẩm	Bậc nhất	0,9895	11,62	Sai số cao hơn
Đối chứng	Gompertz cải tiến	0,9984	2,03	Phù hợp tốt hơn
Đối chứng	Bậc nhất	0,9895	5,23	Sai số cao hơn

Để so sánh giữa hai thí nghiệm có độ lớn methane khác nhau, có thể chuẩn hóa RMSE bằng lượng methane thực nghiệm ngày 45. Theo cách tính $RMSE/M_{45} \times 100\%$, sai số chuẩn hóa của Gompertz đều khoảng 1,51%, còn mô hình bậc nhất đều khoảng 3,90%. Như vậy, RMSE tuyệt đối của thí nghiệm bổ sung chế phẩm cao hơn đối chứng không đồng nghĩa với chất lượng khớp tương đối kém hơn; sự khác biệt này phần lớn đi cùng quy mô của đường cong. Cách chuẩn hóa nêu trên là chỉ tiêu tính bổ sung từ các giá trị trong Bảng 5–7, dùng để đặt sai số trên cùng một thang so sánh, không phải sai số của phép đo khí.

Ưu thế của Gompertz phù hợp với việc mô hình biểu diễn trực tiếp đường cong tích lũy dạng sigmoid thông qua P, R_m và λ. Omondi và cs. [6] cũng lựa chọn Gompertz sau khi đối chiếu các mô hình động học trong hệ đồng phân hủy của họ. Tuy nhiên, kết quả phù hợp hơn trong nghiên cứu hiện tại không có nghĩa Gompertz luôn là lựa chọn tối ưu cho mọi cơ chất hoặc mọi chế độ vận hành. Việc lựa chọn mô hình cần gắn với dạng đường cong, mục tiêu sử dụng và phạm vi thời gian đã có số liệu; mô hình mô tả tốt tích lũy chưa chắc dự đoán chính xác từng kỳ sinh khí.

Một điểm cần đối chiếu thêm là thời điểm đạt tốc độ cực đại. Từ dạng phương trình Gompertz ở mục 2.5, thời điểm uốn được tính theo $t^* = \lambda + P/(e \times R_m)$; thay các tham số tại Bảng 5 cho kết quả khoảng 17,3 ngày ở cả hai thí nghiệm. Đây là giá trị suy ra từ mô hình, sớm hơn khoảng cực đại theo kỳ đo ngày 20 - 22 được mô tả tại Hình 2. Cực đại tức thời và cực đại theo khoảng đo không hoàn toàn đồng nhất, nhưng khác biệt này vẫn cần được kiểm tra bằng chuỗi số liệu gốc, quy ước thời điểm ghi nhận khí và phần dư của phép khớp. Do đó, R^2 tích lũy cao không đủ để khẳng định mô hình đã tái hiện chính xác thời điểm sinh khí mạnh nhất.

Ngoài ra, cùng một quan trắc khí góp vào nhiều giá trị tích lũy kế tiếp, nên mức phù hợp của đường cong tích lũy không thay thế cho kiểm định dự báo trên dữ liệu độc lập. Việc P, R_m và RMSE cùng biến đổi gần theo hệ số 2,22, trong khi λ và sai số chuẩn hóa gần giống nhau, phù hợp với khả năng hai đường cong chủ yếu khác nhau về biên độ. Tuy nhiên, các đặc điểm này không phải những bằng chứng độc lập về cơ chế sinh học. Khi có dữ liệu gốc, phân tích phần dư, khoảng tin cậy tham số và kiểm định trên các mẻ lặp sẽ giúp xác định mức độ chắc chắn của ưu thế mô hình. Trong phạm vi số liệu hiện có, Gompertz là mô hình mô tả phù hợp hơn, còn độ tin cậy ngoại suy ngoài 45 ngày chưa được xác nhận.

3.6. Ý nghĩa công nghệ, điểm mới và giới hạn của nghiên cứu

Ở quy mô 500 kg nguyên liệu/mẻ, chênh lệch 14,284 m^3 CH_4 sau 45 ngày cho thấy bổ sung chế phẩm là một hướng có tiềm năng tăng lượng khí thu hồi cần được kiểm chứng tiếp. Quy đổi theo khối lượng nguyên liệu nạp, hai thí nghiệm tương ứng khoảng 51,948 và 23,380 m^3 CH_4/tấn nguyên liệu, chênh lệch 28,568 m^3/tấn. Đây chỉ là phép quy đổi từ mẻ thí nghiệm, không phải năng suất đã xác nhận ở quy mô một tấn hoặc công suất của một hệ vận hành liên tục. Với tỷ lệ chế phẩm 0,2%, lượng bổ sung danh định tương ứng 1,0 kg cho mẻ 500 kg. Các đại lượng này có thể làm đầu vào sơ bộ cho đánh giá kỹ thuật - kinh tế sau khi hiệu quả được xác nhận bằng mẻ lặp và điều kiện chuẩn hóa khí được làm rõ.

Diễn biến tích lũy cung cấp cơ sở để khảo sát thời điểm kết thúc mẻ, bởi 5 ngày cuối chỉ đóng góp khoảng 1,6% lượng methane trong 45 ngày. Tuy nhiên, lựa chọn rút ngắn thời gian ủ phải cân nhắc lượng khí thu thêm, chi phí duy trì vận hành, thời gian tháo nạp và mức ổn định của bã sau xử lý. Do chưa có cân bằng năng lượng, chi phí chế phẩm hoặc chất lượng bã, chưa thể xác định thời gian tối ưu về kinh tế hay chất lượng xử lý. Mốc khoảng 40 ngày chỉ nên được xem là thời điểm đáng quan tâm để thiết kế thí nghiệm xác nhận cho hệ mẻ tương tự, không được chuyển trực tiếp thành thời gian lưu thủy lực tối ưu của hệ liên tục.

Đóng góp của nghiên cứu nằm ở việc kết hợp lượng methane thu hồi ở quy mô hàng trăm kilôgam với phân tích động học để phân biệt biên độ sinh khí và đặc trưng thời gian. Cả hai mô hình đều cho P cao hơn ở thí nghiệm bổ sung chế phẩm; riêng Gompertz cho thấy R_m tăng tương ứng, trong khi R_m/P và λ gần như không thay đổi. Cách phân tích này làm rõ rằng kết quả hiện tại chủ yếu phản ánh tăng lượng methane và cường độ sinh khí trên cùng lượng VS, chưa cho thấy pha thích nghi được rút ngắn. Đồng thời, việc hai mô hình cho P khác nhau khoảng 16,6% cho thấy cần thận trọng khi sử dụng tiềm năng ngoại suy để thay thế sản lượng thực nghiệm.

Giới hạn quan trọng về thiết kế là bản thảo chưa trình bày số mẻ lặp độc lập, độ biến động giữa các bể và khoảng tin cậy của tham số. Nhiều thời điểm đo trong cùng một mẻ không thay thế cho các mẻ lặp sinh học, nên chênh lệch 2,22 lần hiện được diễn giải ở mức mô tả, chưa phải bằng chứng về khác biệt có ý nghĩa thống kê. Về cơ chế, thiếu chuỗi pH, độ kiềm, VFA, COD hòa tan và VS còn lại khiến chưa thể phân biệt tác động lên từng giai đoạn chuyển hóa hoặc loại trừ các nguyên nhân khác của biến động sinh khí. Đặc tính vi sinh, hoạt tính và thành phần chất mang của chế phẩm cũng cần được xác định trước khi quy lượng methane tăng thêm cho một cơ chế cụ thể.

Một giới hạn khác liên quan đến cơ sở xác định methane. Mục 2.4 đã lưu ý cần đối chiếu công thức có trừ giá trị đối chứng với số liệu gốc. Vì đối chứng trong thiết kế này vẫn chứa đầy đủ hỗn hợp cơ chất, chênh lệch giữa hai thí nghiệm biểu thị lượng methane tăng thêm, không thay thế tổng methane của thí nghiệm bổ sung chế phẩm. Cần phân biệt phép so sánh này với hiệu chỉnh khí nền từ nguồn giống hoặc chế phẩm, nếu có. Trước khi so sánh trực tiếp với phép thử tiềm năng methane sinh hóa (BMP), cần làm rõ phương pháp xác định tỷ phần CH_4, nhiệt độ và áp suất quy đổi, xử lý hơi nước, khối lượng VS thực nạp và phần đóng góp của chế phẩm. Các phép tính bổ sung trong phần thảo luận sử dụng nguyên các giá trị báo cáo, nên cũng chịu những giới hạn chuẩn hóa đó.

Lượng methane cao hơn chưa đủ để khẳng định mức giảm ô nhiễm, chất lượng phân bón của bã hoặc lợi ích môi trường ròng. Bản thảo chưa có kết quả sau xử lý để định lượng hiệu suất loại bỏ COD, VS hoặc mức giảm *E.coli* và *Salmonella*; các chỉ tiêu vi sinh đầu vào không thể thay thế đánh giá an toàn của bã. Để tiến tới ứng dụng, hướng kiểm chứng phù hợp là lặp lại các mẻ có cùng cơ sở nạp VS, theo dõi đồng thời chỉ tiêu ổn định quá trình, xác nhận lượng khí cuối chu kỳ và khảo sát thêm liều chế phẩm. Trên nền tảng đó mới có thể đánh giá độ lặp lại của mức tăng methane, lựa chọn điều kiện vận hành và lượng hóa lợi ích kỹ thuật - kinh tế của giải pháp.

Các nghiên cứu trước đây cho thấy khả năng ứng dụng phân hủy kỵ khí trong xử lý chất thải hữu cơ và thu hồi năng lượng tại Việt Nam, đồng thời nhấn mạnh ảnh hưởng của pH, tải lượng hữu cơ và đặc tính hệ vi sinh đến hiệu quả vận hành [8, 9, 11, 17]. Ngoài hiệu quả xử lý, cân bằng vật chất và năng lượng cần được xem xét để đánh giá khả năng ứng dụng thực tế của công nghệ [18]. Vì vậy, mức tăng methane quan sát được trong nghiên cứu này cần tiếp tục được xác nhận bằng các mẻ độc lập, cùng với dữ liệu về độ ổn định quá trình, năng lượng thực thu và chi phí chế phẩm trước khi đề xuất mở rộng quy mô.

4. Kết luận

Mô hình đồng phân hủy kỵ khí chất thải chăn nuôi và chất thải hữu cơ quy mô 500 kg/mẻ, nghiệm thức bổ sung chế phẩm sinh học ghi nhận tổng lượng methane thu hồi sau 45 ngày đạt 25,974 m^3 CH_4, cao hơn khoảng 2,22 lần so với nghiệm thức đối chứng (11,690 m^3 CH_4). Quá trình sinh methane diễn ra mạnh trong khoảng từ ngày 10 đến ngày 24. Tại thời điểm ngày thứ 40, lượng methane tích lũy của nghiệm thức bổ sung chế phẩm đã đạt khoảng 98,4% tổng lượng methane thu hồi trong toàn bộ chu kỳ.

Kết quả phân tích động học cho thấy mô hình Gompertz cải tiến mô tả dữ liệu thực nghiệm phù hợp hơn mô hình động học bậc nhất, thể hiện qua hệ số xác định R^2 cao hơn (0,9984 so với 0,9895) và sai số RMSE thấp hơn. Theo mô hình Gompertz cải tiến, tiềm năng sinh methane cực đại (P) và tốc độ sinh methane cực đại (R_m) của nghiệm thức bổ sung chế phẩm lần lượt đạt 315,51 mL CH_4/g VS và 13,58 mL CH_4/g VS/ngày, cao hơn so với nghiệm thức đối chứng (142,01 mL CH_4/g VS và 6,11 mL CH_4/g VS/ngày). Trong khi đó, thời gian pha thích nghi (λ) của hai nghiệm thức đều đạt 8,77 ngày. Kết quả này cho thấy sự khác biệt giữa hai nghiệm thức chủ yếu ở lượng thu hồi, trong khi thời gian pha thích nghi theo mô hình không có sự khác biệt.

Nhìn chung, việc bổ sung chế phẩm sinh học ảnh hưởng đến sự gia tăng lượng thu hồi methane và cải thiện các thông số động học trong điều kiện thực nghiệm. Tuy nhiên, do nghiên cứu chưa theo dõi diễn biến axit béo bay hơi (VFA), độ kiềm, COD, VS và hoạt tính của quần thể vi sinh vật trong quá trình ủ, kết quả hiện tại chưa đủ cơ sở để xác định cơ chế tác động cụ thể của chế phẩm đến các giai đoạn sinh hóa của quá trình phân hủy kỵ khí. Các nghiên cứu tiếp theo cần bổ sung những chỉ tiêu này, đồng thời thực hiện các thí nghiệm lặp độc lập để đánh giá ý nghĩa thống kê và khả năng ứng dụng của chế phẩm ở quy mô lớn hơn.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Trường Đại học Thủy lợi đã hỗ trợ về cơ sở vật chất, trang thiết bị và tạo điều kiện thuận lợi trong quá trình xây dựng mô hình, theo dõi thí nghiệm, phân tích nguyên liệu và xử lý số liệu phục vụ nghiên cứu thu hồi methane từ chất thải hữu cơ.

Tuyên bố về việc sử dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh và các công nghệ hỗ trợ bởi AI

Các tác giả xác nhận không sử dụng bất kỳ công cụ trí tuệ nhân tạo tạo sinh hoặc công nghệ hỗ trợ bởi AI nào trong quá trình chuẩn bị và hoàn thiện bản thảo.

Tài liệu tham khảo

[1] Zhang, C., Xiao, G., Peng, L., Su, H., Tan, T. (2013). The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. *Bioresource Technology*, 129:170–176.

[2] Lee, W., Kim, S., Park, J., Cho, S. (2024). Comparison of anaerobic co-digestion of food waste and livestock manure at different mixing ratios. *Sustainability*, 16(17):7653.

[3] Meng, X., Wang, Q., Zhao, X., Cai, Y., Ma, X., Fu, J., Wang, P., Wang, Y., Liu, W., Ren, L. (2023). A review of the technologies used for preserving anaerobic digestion inoculum. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188:113804.

[4] Obi, L. U., Roopnarain, A., Tekere, M., Adeleke, R. A. (2023). Bioaugmentation potential of inoculum derived from anaerobic digestion feedstock for enhanced methane production using water hyacinth. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(6):153.

[5] Alipoursarbani, M., Tideman, J., López, M., Abendroth, C. (2026). Bioaugmentation in anaerobic digesters: A systematic review. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 19(1):25.

[6] Omondi, E. A., Ndiba, P. K., Chepkoech, G. K., Kegode, A. A. (2023). Modeling anaerobic co-digestion of water hyacinth with ruminal slaughterhouse waste for first-order, modified Gompertz and logistic kinetic models. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(3):627–634.

[7] Kusi, J. Y., Müller, R., Empl, F., Pelz, S. K., Liebetrau, J. (2025). Kinetic modelling and simulation of anaerobic digestion of fibrous waste materials and slaughterhouse waste. *Array*, 28:100521.

[8] Định, P. V., Lê, T. H. (2023). Ảnh hưởng của điều kiện pH đến quá trình phân hủy kỵ khí hai pha chất thải rắn hữu cơ có khả năng phân hủy sinh học. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 17(3V):166–173.

[9] Định, P. V., Cường, Đ. V., Anh, N. V., Tới, P. V. (2024). Khảo sát ảnh hưởng của tải lượng hữu cơ đến quá trình phân hủy kỵ khí hai pha chất thải rắn sinh hoạt hữu cơ. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 18(1V):174–182.

[10] Tới, P. V., Trung, N. T., Mạnh, Đ. V., Yu, C.-P., Guan, C.-Y. (2021). Tổng quan các công nghệ tiền xử lý để cải thiện quá trình phân hủy kỵ khí của chất thải rắn hữu cơ. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 15(4V):71–86.

[11] Định, P. V., Cường, Đ. V., Tới, P. V. (2025). Đánh giá hiện trạng và giải pháp ứng dụng công nghệ phân hủy kỵ khí trong xử lý chất thải rắn phân hủy sinh học ở Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 19(1V):34–45.

[12] Giang, H. M., Hoan, N. V. (2014). Các giải pháp kỹ thuật thu gom khí bãi rác nhằm thu hồi năng lượng và bảo vệ môi trường. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (STCE)*, 8(3):51–59.

[13] Hà, H. N., Thái, N. T. K. (2014). Nghiên cứu sự thay đổi về thành phần và tính chất của nước rỉ rác từ quá trình ủ rác thải hữu cơ. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (STCE)*, 8(3):47–50.

[14] Thảo, N. P., Anh, N. V. (2014). Xử lý phân bùn bể tự hoại bằng phương pháp phân hủy kỵ khí, thu hồi biogas. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (STCE)*, 8(3):34–39.

[15] Bách, L. T., Định, P. V., Điệp, N. H. (2014). Cố định vi khuẩn kỵ khí thành dạng hạt bằng polyvinil alcohol ứng dụng trong xử lý nước thải. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (STCE)*, 8(3):25–33.

[16] El-Mashad, H. M., Zhang, R. (2010). Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresource Technology*, 101(11):4021–4028.

[17] Anh, N. V., Ân, V. T. H. (2014). Xử lý, ổn định bùn cặn từ các trạm xử lý nước thải theo hướng tái tạo năng lượng, thu hồi tài nguyên. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (STCE)*, 8(3):5–12.

[18] Nguyen, V. A., Vu, T. M. T., Bui, T. T., Nguyen, T. H., Tran, H. N. (2016). Mass balance and energy analysis of a wastewater sludge anaerobic digestion system for energy recovery. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)*, 10(5):122–126.