Tạp chí Khoa học Nông nghiệp Việt Nam 2026, 24(9): 1184-1193 https://doi.org/10.31817/tckhnnvn.2026.24.9.02
vie.vjas.vn

TIỀM NĂNG KHAI THÁC KHÍ METAN TỪ MỘT SỐ NGUỒN RÁC HỮU CƠ Ở VIỆT NAM

Bùi Ngọc Tấn[1], Đinh Mai Thùy Linh[2], Kazuya Matsunaga[3], Phạm Văn Cường[1,2*]

[1]Khoa Nông học, Học viện Nông nghiệp Việt Nam
[2]Phòng Thí nghiệm Khoa học cây trồng, Học viện Nông nghiệp Việt Nam
[3]Công ty TNHH Toyo Energy Solution, Nhật Bản

[*]Tác giả liên hệ: pvcuong@vnua.edu.vn

Ngày nhận bài: 18.04.2026 Ngày chấp nhận đăng: 05.09.2026

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá đặc tính hóa lý và tiềm năng sinh metan (BMP) từ bốn nguồn phụ phẩm hữu cơ: thức ăn thừa, phân lợn, phân gà và rác thực vật thông qua lên men yếm khí mẻ trong 42 ngày. Thí nghiệm được tiến hành bằng hệ thống BMP trong phòng. Các chỉ số hiệu suất được tính toán dựa trên nhu cầu oxy hóa học (COD) và hiệu quả sản xuất điện - nhiệt. Kết quả cho thấy thức ăn thừa là nguyên liệu tối ưu nhất với sản lượng CH_4 tích lũy (21.482NmL) và BMP cao nhất (638,5NmL CH_4/g VS). Rác thực vật có chỉ số BMP đạt 513,5NmL CH_4/g VS, nhưng có tỷ lệ chuyển hóa COD thấp (6,98%) bằng 1/2 thức ăn thừa do lượng carbon cao hơn. Phân gà có hàm lượng chất rắn cao nhất nhưng chỉ số BMP chỉ đạt 346NmL CH_4/g VS. Phân lợn có chỉ số BMP thấp nhất, nhưng chất lượng khí metan (CH_4) vượt trội đạt tới 72,16% nhờ lượng lipid cao. Hiệu quả sản xuất điện và nhiệt của các nguyên liệu giảm dần từ thức ăn thừa > phân gà > rác thực vật > phân lợn. Nghiên cứu khẳng định tiềm năng và chất lượng khí metan phụ thuộc chặt chẽ vào nguyên liệu đầu vào, là cơ sở sử dụng nguyên liệu cho sản xuất khí sinh học và khai thác điện ở Việt Nam.

Từ khóa: Lên men kị khí, khí sinh học, rác hữu cơ, phân lợn, phân gà, thức ăn thừa.

Potential of Metan (CH_4) Digested from Organic Waste Sources in Vietnam

ABSTRACT

This study evaluated the physicochemical properties and methane production potential (BMP) of four organic by-products: feed waste, pig manure, chicken manure, and plant waste, through batch anaerobic fermentation over 42 days. The experiment was conducted using a laboratory BMP system. Performance indicators were calculated based on chemical oxygen demand (COD) and electrothermal production efficiency. The results showed that feed waste was the optimal feedstock with the highest accumulated CH_4 yield (21,482NmL) and BMP (638,5ml CH_4/g VS). Plant waste had a BMP of 513,5NmL CH_4/g VS but a low COD conversion rate (7.01%) (half that of feed waste) due to its higher carbon content. Chicken manure had the highest solids content, while BMP was achieved at 346NmL CH_4/g VS. Pig manure had the lowest BMP index, but its CH_4 gas quality was superior, reaching 72.16% due to its high lipid content. The efficiency of electricity and heat production of the materials decreases gradually from food waste > chicken manure > plant waste > pig manure. The study confirms that the potential and quality of methane gas depend closely on the input materials, which form the basis for using these materials for biogas production and electricity generation in Vietnam.

Keywords: Methane fermentation, biogas, organic waste, pig manure, chiken manure, foodwaste.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh an ninh năng lượng và biến đổi khí hậu đang trở thành thách thức toàn cầu, việc chuyển dịch sang nền kinh tế tuần hoàn thông qua khai thác năng lượng tái tạo từ chất thải hữu cơ là một lộ trình tất yếu. Công nghệ lên men yếm khí (Anaerobic Digestion - AD) đóng vai trò là giải pháp xử lý chất thải hiệu quả, là công cụ then chốt trong việc giảm phát thải khí nhà kính, đặc biệt là metan (CH_4) và carbon dioxide (CO_2) từ rác thải (Jameel & cs., 2015). Theo ước tính của Cơ quan Năng lượng Quốc tế (IEA), tiềm năng khí sinh học

toàn cầu có thể đáp ứng tới 20% nhu cầu khí đốt hiện nay, nếu các nguồn phụ phẩm nông nghiệp và rác thải thực phẩm được tận dụng tối ưu (IEA, 2020).

Tại Việt Nam, khối lượng phụ phẩm từ trồng trọt và chăn nuôi ước tính lên đến hàng trăm triệu tấn mỗi năm. Tuy nhiên, hiệu quả khai thác khí sinh học tại Việt Nam vẫn còn đối mặt với nhiều rào cản kỹ thuật. Nghiên cứu của Roubík & cs. (2025) chỉ ra rằng đa số các hầm biogas quy mô hộ gia đình và trang trại tại Việt Nam đang vận hành ở trạng thái lên men đơn nguồn (mono - digestion) với nguyên liệu chủ yếu là phân lợn. Điều này dẫn đến hiệu suất sinh khí thấp, chất lượng metan không ổn định và dễ xảy ra hiện tượng ức chế do tích lũy amoniac tự do khi nồng độ nitơ hữu cơ quá cao trong phân động vật (Kalamaras & cs., 2021).

Một trong những công nghệ lên men kị khí được cho là hiệu quả khi đồng phân với nhiều nguồn nguyên liệu khác nhau như phân động vật kết hợp rác hữu cơ (Co-digestion) (Wang & cs., 2012; Zhang & cs., 2021). Các công nghệ này nhằm tối ưu hóa khai thác khí metan làm chất đốt, sản xuất điện và làm phân bón đã được áp dụng ở các nước tiên tiến. Các loại nguyên liệu sở hữu hàm lượng chất rắn dễ bay hơi (VS) cao và giàu carbohydrate, đóng vai trò là nguồn cơ chất mồi giúp cân bằng tỷ lệ C/N cho các nguồn thải động vật (Xue & cs., 2020). Một số nghiên cứu tại Việt Nam đã bước đầu đánh giá tiềm năng sinh khí từ bùn thải bể tự hoại (Nguyễn Phương Thảo & Nguyễn Việt Anh, 2014), thức ăn thừa (Nguyen & cs., 2014) hay rác hữu cơ kết hợp phân lợn (Đỗ Quang Trung & cs., 2019). Mặc dù vậy, những khoảng trống về đánh giá các đặc tính khác nhau của các nguồn nguyên liệu tác động đến năng suất, chất lượng khí trong cùng điều kiện phân hủy của các nguyên liệu này vẫn chưa được làm rõ.

Vì vậy, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá đặc tính hóa lý và động học sinh khí dựa trên hệ thống BMP tự động của các nhóm rác thải hữu cơ phổ biến, gồm thức ăn thừa, phân lợn, phân gà và rác thực vật trong cùng điều kiện thí nghiệm và cơ chất nền. Thông qua việc phân tích chỉ số BMP, tỷ lệ chuyển hóa COD và hiệu quả phát điện để đánh giá sự ảnh hưởng của các nguyên liệu rác thải phổ biến đến sản lượng khí và chất lượng metan đầu ra. Kết quả nghiên cứu không chỉ góp phần nâng cao tiềm năng năng lượng sinh khối tại Việt Nam mà còn cung cấp cơ sở khoa học để tối ưu hóa tái sử dụng chất thải sơ cấp, hướng tới một nền nông nghiệp không chất thải.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Thí nghiệm được tiến hành tại Phòng Nghiên cứu cây trồng Việt Nam - Nhật Bản, Khoa Nông học, Học viện Nông nghiệp Việt Nam từ tháng 4 đến tháng 9 năm 2025. Vật liệu nghiên cứu gồm 4 loại rác thải hữu cơ thu thập được từ các nguồn thức ăn thừa, phân lợn, phân gà và rác thực vật là các loại thân lá rau, củ, quả thải loại trong khu vực xã Gia Lâm và lân cận. Các nguồn vật liệu thu thập, làm sạch tạp chất, nghiền nhỏ tới cấp hạt < 0,5mm và được bảo quản trong điều kiện nhiệt độ thấp (4°C) để phân tích hoặc sử dụng trong các thí nghiệm. Chất nền được sử dụng là dung dịch chất lỏng lấy từ hầm khí sinh học (pH 7,0; tổng lượng chất khô (TS) 2,55%; lượng chất rắn dễ bay hơi (VS) 39,4% TS; khối lượng riêng 1,0036 g/ml) thuộc Phòng Thí nghiệm chăn nuôi, Khoa Chăn nuôi, Học viện Nông nghiệp Việt Nam.

Các nguyên liệu được phân tích tại phòng thí nghiệm Bộ môn Khoa học Đất và Viện Tăng trưởng xanh, Học viện Nông nghiệp Việt Nam theo các tiêu chuẩn tương ứng được liệt kê trong bảng 1.

2.2. Bố trí thí nghiệm

Thí nghiệm sử dụng phương pháp lên men yếm khí bằng hệ thống buồng BMP (TOYO, Nhật Bản) (Hình 1). Hệ thống bao gồm bộ điều khiển trung tâm, bình lên men 3,5l, hệ thống ổn nhiệt, máy khuấy và máy đo lưu lượng khí (Bảng 2).

Bảng 1. Chỉ tiêu phân tích và phương pháp thực hiện

Chỉ tiêu	Đơn vị	Phương pháp phân tích
pH	-	AGG/L-SOP-PB.03 (US EPA method 9040C + US EPA method 9045D)
Tổng lượng chất khô (TS)	%	TCVN 138-387 -VN 1-2023
Chất rắn dễ bay hơi (VS)	%-TS	SMEWW 2540 E
Nhu cầu oxy hóa học (COD)	g/kg*	AGG/L-SOP-MT.10/ SOP-PB.06
Carbon tổng số (TC)	%-TS	AGG/L-SOP-MT.09/ SOP-PB.05
Nito tổng số (TN)	%-TS	AGG/L-SOP-MT.08/ SOP-PB.04
Lưu huỳnh tổng số (TSf)	%-TS	AGG/L-SOP-MT.11/ SOP-PB.07
Lân tổng số (TP)	mg/kg	AGG/L-SOP-MT.12/ SOP-PB.08
Kali tổng số (TK)	mg/kg	AGG/L-SOP-MT.13/ SOP-PB.09
Carbohydrates	%	AGG/L-SOP-MT.14/ SOP-PB.10
Lipid	%	AGG/L-SOP-MT.15/ SOP-PB.11
Protein	%	AGG/L-SOP-MT.16/ SOP-PB.12

*Ghi chú: * Đơn vị quy đổi từ g/l.*



Hình 1. Hệ thống BMP lắp ráp hoàn chỉnh

Bảng 2. Thông số kỹ thuật của hệ thống BMP trong thí nghiệm

Mục	Thông số kỹ thuật
Bình lên men	Thể tích thực: 3,5l
Nhiệt độ và tốc độ khuấy	Nhiệt độ: 0-100°C; Tốc độ quay: 18-280 vòng/phút
Lưu lượng kế	Phạm vi: 1-6.000 ml/h
Bộ ghi dữ liệu và máy tính	Bộ ghi dữ liệu lưu lượng kế
Bể điều nhiệt	Phạm vi: 5-95°C
Túi khí	10l

Nguyên liệu trước khi đưa vào thử nghiệm được loại bỏ tạp chất và nghiền nhỏ. Lượng nguyên liệu được xác định dựa trên tỷ lệ chất rắn dễ bay hơi giữa nguyên liệu và chất nền đầu vào (F/I) đồng nhất ở mức 0,7 (Bảng 3), trung bình của khoảng 0,5-1 (Yoon & cs., 2014). Quá trình lên men được thực hiện trong điều kiện kiểm soát hoàn toàn các yếu tố phi thí nghiệm. Đầu tiên, chất nền được đưa vào bình lên men. Sau đó, không khí bên trong buồng làm sạch bằng khí N_2. Hệ thống máy khuấy, máy ổn định nhiệt được duy trì liên tục ở 38°C. Mẫu đối chứng được thực hiện và thu thập khí ban đầu ở điều kiện chưa có nguyên liệu đầu vào. Sau đó, tiếp tục đưa nguyên liệu thí nghiệm vào bình lên men đã có chất nền như mô tả (Bảng 3). Tất cả quá trình đều được thực hiện trong điều kiện yếm khí hoàn toàn. Thời gian theo dõi thí nghiệm là 42 ngày. Toàn bộ quá trình được lặp lại ba lần.

- Đo lưu lượng khí sinh ra

Lượng khí sinh ra được đo bằng máy đo lưu lượng khí BPC-GO (Nhật Bản). Kết quả được tính toán dựa trên nồng độ CH_4 trung bình được tạo ra khi chỉ có nguyên liệu đầu vào theo công thức sau:

Lượng khí sinh ra từ nguyên liệu = Lượng khí sinh ra (chất nền + nguyên liệu đầu vào) – Lượng khí sinh ra ở Mẫu đối chứng (chỉ có chất nền)

Khí phát sinh hàng ngày được lưu trữ vào túi chuyên dụng để phân tích. Cuối mỗi chu kỳ thử nghiệm, một mẫu khí được chiết ra từ túi khí và được phân tích về hàm lượng CH_4, CO_2, H_2S, CO và NH_3 bằng máy phân tích cầm tay Biogas 5000 (QED/GEOTECH-Mỹ).

- Tiềm năng khí metan (BMP) dựa trên tổng lượng chất rắn dễ bay hơi (VS)

$$BMP = \frac{\text{Tổng lượng khí sinh ra [l]} \times CH_4c[\%]}{VS[\%] \times Wnguyên liệu[g]}$$

$W_{nguyên\ liệu}$: Khối lượng nguyên liệu đầu vào

- Hiệu quả chuyển hoa chất hữu cơ - Hiệu chỉnh từ COD

Lượng CH_4 sinh ra sau mỗi kỳ chuyển hóa COD là 0,35 [l/g COD] (Tauber & cs., 2019).

$$\text{Tỷ lệ chuyển hóa COD} = \frac{\text{Tổng lượng khí sinh ra [l]} \times CH_4c[\%] \div 0{,}35\ [\text{l/g COD}]}{COD[\%] \times W_{nguyên\ liệu}[g]}$$

- Ước tính hiệu quả sản xuất điện và nhiệt thu hồi

Để đánh giá hiệu quả từ quá trình sinh khí của các nguồn nguyên liệu khác nhau, với giả định hiệu quả thu hồi là 35% lượng điện và 50% lượng nhiệt (Havukainen & cs., 2012) và nhiệt trị thấp của metan là 9,97 kWh/m^3 (IEA), công thức tính hiệu quả sử dụng điện và thu hồi nhiệt được tính theo các công thức:

Lượng điện sinh ra (kWh/ngày) = Tổng VS [kg/ngày] × BMP [m^3/kg VS] × 9,97 kWh/Nm^3 × 35%

Sản lượng điện (KW) = Lượng điện sinh ra (kWh)/24h

Lượng nhiệt thu hồi (kWh/ngày) = Tổng VS [kg/ngày] × BMP [m^3/kg VS] × 9,97 kWh/Nm^3 × 50%

2.3. Xử lý số liệu

Số liệu thu thập được xử lý bằng phần mềm MS Excel 365. Số liệu được xử lý thống kê bằng phần mềm SPSS (IBM, 22). Sai khác giữa các công thức thí nghiệm được so sánh bằng phương pháp phân tích ANOVA ở mức tin cậy 95% và xếp hạng bằng kiểm định $LSD_{0,05}$.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc tính và thành phần cơ bản của một số nguyên liệu trong nghiên cứu

Các nguyên liệu khảo sát được phân tích đều có pH dao động từ 5,4 đến 6,4 (Bảng 4). Kết quả này tương đồng với nghiên cứu của Zhang & cs. (2014) khẳng định nguyên liệu hữu cơ tươi có xu hướng axit hóa do các axit béo bay hơi (VFAs) hình thành trong giai đoạn đầu của quá trình phân hủy. Hàm lượng vật chất khô (TS) của phân gà (28,19%) và phân lợn (26,26%) cao gấp đôi so với thức ăn thừa (15,73%) và rác thực vật (13,09%). Tuy nhiên, thức ăn thừa và rác

thực vật có tỷ lệ chất rắn dễ bay hơi (VS) cao lần lượt đạt 91,28% và 90,16%. Trong khi, phân lợn và phân gà có tỷ lệ VS chỉ đạt 72,76% và 80,96%. Theo quan điểm của Xue & cs. (2020), các loại phụ phẩm thực vật chứa chất rắn dễ bay hơi cao dễ dàng bị phân hủy hoàn toàn trong điều kiện yếm khí, do đó, các loại nguyên liệu này có thể ảnh hưởng rõ rệt đến năng suất khí sinh ra.

Hàm lượng C và N tổng số trong các loại nguyên liệu khác nhau có sự khác nhau không rõ rệt. Hàm lượng C của bốn loại nguyên liệu dao động từ 38,7% (phân gà) đến 47,8% (rác thực vật), hàm lượng N dao động từ 4,64% (thức ăn thừa) đến 5,15% (phân gà). Đáng chú ý, tỷ lệ C/N của tất cả các mẫu đều nằm trong khoảng 7,51-10,60. Rác hữu cơ thực vật có tỷ lệ C/N cao nhất (10,60), sở hữu hàm lượng kali tổng số (TK) (6.300 mg/kg) và lân tổng số (TP) (1.200 mg/kg) vượt trội so với các loại nguyên liệu còn lại. Sự khác biệt này được giải thích bởi đặc tính tích lũy khoáng đa lượng trong mô thực vật cao hơn so với quá trình bài tiết của động vật (Ayele & cs., 2025). Bên cạnh các thành phần đa lượng, chỉ số lưu huỳnh tổng số (TSf) trong rác thực vật (0,84% TS) và thức ăn thừa (0,59%) cao gấp hai lần so với phân gà và phân lợn (mg/kg). Hàm lượng lưu huỳnh cao là tiền chất tạo ra khí H_2S, một tác nhân gây ăn mòn thiết bị, ức chế vi sinh vật và có thể làm giảm tới 30% tiềm năng sinh khí metan (Abera & cs., 2025).

Hàm lượng carbohydrate cao nhất ở phân động vật (44,86-45,9%) cao gấp hai lần so với thức ăn thừa và rác thực vật (21,7-23,8%). Tương tự, hàm lượng protein ở phân động vật (8,43-9,05%) cũng cao hơn so với thức ăn thừa và rác hữu cơ (3,67-4,58%). Phân lợn chứa hàm lượng lipid rất cao (6,57%), trong phân gà thấp nhất chỉ đạt 1,08%. Các kết quả phân tích cho thấy thành phần, chất lượng nguyên liệu đầu vào sẽ có ảnh hưởng đến tiềm năng khai thác khí metan.

Bảng 3. Lượng nguyên liệu đầu vào thí nghiệm dựa trên tổng chất rắn

Tỷ lệ chất rắn dễ bay hơi F/I (%)	Thức ăn thừa (g)	Phân lợn (g)	Phân gà (g)	Rác thực vật (g)	Chất nền (ml)
0,7	122,89	92,35	77,32	149,51	2.500

Bảng 4. Chỉ số phân tích một số đặc điểm và thành phần cơ bản của nguyên liệu

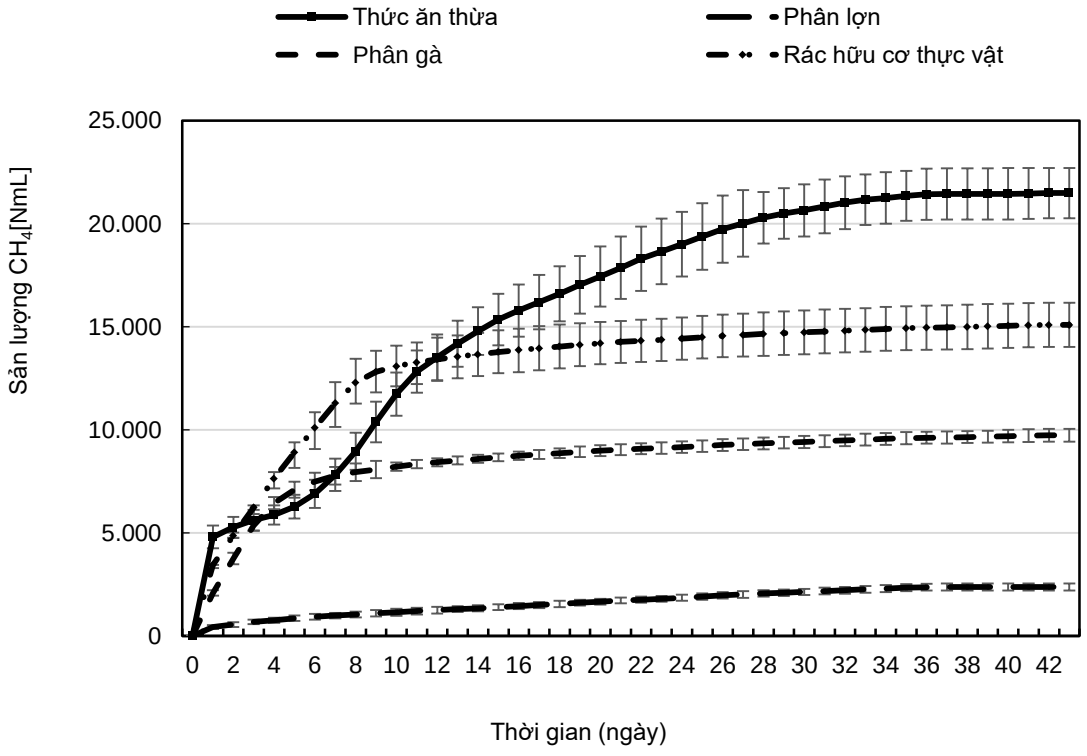
Chỉ tiêu	Đơn vị	Thức ăn thừa	Phân lợn	Phân gà	Rác thực vật
pH	-	5,7	5,8	6,4	5,4
Tổng lượng chất khô (TS)	%	15,73	26,26	28,19	13,09
Chất rắn dễ bay hơi (VS)	%-TS	91,28	72,76	80,96	90,16
COD	g/kg	1,653	1,322	2,975	2,479
Carbon tổng số (TC)	%-TS	40,04	42,9	38,7	47,8
Nito tổng số (TN)	%-TS	4,64	5,14	5,15	4,51
Tỷ lệ C/N	-	8,63	8,35	7,51	10,60
Đạm Amoni (NH_4^+-N)	mg/kg	381,97	248,69	364,8	515,61
Lưu huỳnh tổng số (TSf)	%-TS	0,57	0,19	0,28	0,84
Lân tổng số (TP)	mg/kg	400	500	500	1200
Kali tổng số (TK)	mg/kg	2,200	2,300	4,800	6,300
Carbohydrates	%	21,7	45,9	44,86	23,78
Protein	%	4,58	8,43	9,06	3,67
Lipid	%	2,76	6,57	1,08	4,55

3.2. Tích lũy metan theo thời gian ủ từ các nguồn nguyên liệu khác nhau

Sản lượng khí sinh học tích lũy cho thấy sự khác biệt rõ rệt về khả năng sinh khí và tốc độ phân hủy giữa các nhóm nguyên liệu, thể hiện trong hình 2. Thức ăn thừa thể hiện ưu thế vượt trội với sản lượng khí tích lũy (xấp xỉ 21.500NmL). Đáng chú ý, đồ thị sinh khí của thức ăn thừa có độ dốc tăng liên tục đến ngày thứ 30, cho thấy quá trình thủy phân và metan hóa diễn ra mạnh mẽ. Kết quả này tương đồng với các nghiên cứu trước đây (Browne & cs. 2013; Yasim & Buyong, 2023). Đáng chú ý, trong thí nghiệm này với cùng lượng chất rắn dễ bay hơi (VS) nạp vào nhưng thức ăn thừa vẫn cho thấy sự vượt trội, có thể do thành phần của thức ăn thừa có sự cân bằng hơn so với các nguyên liệu khác (Chuenchart & cs., 2020)

Rác hữu cơ thực vật đạt sản lượng khí tích lũy đạt 15.000NmL. Đặc điểm sinh khí của rác thực vật diễn ra rất nhanh, đạt đỉnh tốc độ sớm nhất chỉ sau 10 ngày (Hình 2). Theo Yasim & Buyong (2023), tốc độ phân hủy nhanh của rác thực vật phản ánh sự phân hủy nhanh chóng của các hợp chất carbohydrate đơn giản như đường, tinh bột. Tuy nhiên, đường cong này có xu hướng bão hòa sớm từ ngày thứ 14, có thể do sự cạn kiệt nguồn cơ chất dễ phân hủy hay sự tồn dư của các thành phần chậm phân hủy như lignocellulose làm giảm quá trình sinh khí (Kaur & Phutela, 2016).

Ngược lại, nhóm phân động vật cho thấy hiệu suất sinh khí thấp hơn đáng kể trong cùng điều kiện thí nghiệm. Phân gà đạt sản lượng trung bình khoảng 10.000NmL, duy trì tốc độ sinh khí ổn định nhưng thấp. Phân lợn cho thấy mức sinh khí thấp nhất (2.300NmL) và đường cong gần như đi ngang trong suốt chu kỳ. Sự hạn chế sinh khí của phân lợn trong trường hợp này có thể do lượng lipid cao (6,57%) đã tạo ra các axit béo chuỗi dài gây cản trở quá trình chuyển hóa của vi khuẩn methanogen (Alhraishawi & Aslan, 2022). Trong khi đó, ở phân gà, nguyên nhân chính có thể do hàm lượng N cao hơn (5,15), tỷ lệ C/N thấp (7,51) dẫn đến hiện tượng ức chế hoạt động của vi khuẩn methanogen (Kalamaras & cs., 2021).



Hình 2. Sản lượng tích lũy khí metan trung bình của các loại nguyên liệu

Bảng 5. Tổng lượng tích lũy và tỷ lệ khi thu được từ các nguồn nguyên liệu

Chỉ tiêu	Thức ăn thừa	Phân lợn	Phân gà	Rác thực vật
Tổng tích lũy khí sinh học (NmL)	$21.482^{a} \pm 705$	$2.373^{d} \pm 98$	$9.729^{c} \pm 180$	$15.084^{b} \pm 619$
Tỷ lệ CH_4 (%)	$52,39^{c} \pm 0,99$	$71,16^{a} \pm 1,05$	$62,79 \pm 0,92^{b}$	$60,06^{b} \pm 1,30$
Tỷ lệ CO_2 (%)	$47,60^{a} \pm 1,00$	$28,83^{c} \pm 1,08$	$37,20^{b} \pm 0,96$	$39,93^{b} \pm 1,25$
Tỷ lệ loại khác (%)	$0,0022^{a}$	$0,001^{b}$	$0,00049^{c}$	$0,00052^{c}$

Ghi chú: NmL: milli-lít tiêu chuẩn; ký tự chữ cái trong bảng thể hiện sự khác biệt giữa các công thức với mức độ tin cậy 95%.

3.3. Tỷ lệ và tổng khối lượng tích lũy metan từ các nguồn nguyên liệu khác nhau

Kết quả thực nghiệm cho thấy đa dạng về tỷ lệ và thành phần khí của các nguyên liệu đầu vào (Bảng 5). Tỷ lệ metan trong thức ăn thừa thấp rõ rệt (52,39%) so với các nhóm còn lại. Ngược lại, phân lợn cho thấy chất lượng khí vượt trội với tỷ lệ metan đạt tới 71,16%, tiếp đến là phân gà (62,79%) và rác thực vật đạt 60,06%. Theo nghiên cứu của Xue & cs. (2020), hàm lượng protein và lipid cao trong phân động vật thường tạo ra dòng khí có giá trị nhiệt lượng cao hơn, tuy nhiên, quá trình phân hủy các hợp chất này cũng giải phóng nhiều amoniac (NH_3), dẫn đến sự chênh lệch về tổng thể tích khí so với các nguồn giàu carbohydrate dễ phân hủy. Tỷ lệ CO_2 trong phân động vật thấp hơn nhiều so với thức ăn thừa (47,61%) và rác thực vật (39,94%), cho thấy quá trình metan hóa trong các mẫu phân động vật có thể diễn ra triệt để hơn, ít bị ảnh hưởng bởi các phản ứng phụ tạo ra khí CO_2 (Wang & cs., 2012).

Về các thành phần khí khác, tất cả các mẫu đều duy trì ở mức cực thấp (< 0,0022%). Các thành phần này chủ yếu bao gồm H_2S, NH_3 và hơi nước. Nồng độ ở rác thực vật, phân gà cao hơn so với thức ăn thừa và phân lợn là do sự khác nhau ở hàm lượng N tổng số và S tổng số (Bảng 4).

3.4. Đánh giá tiềm năng khai thác metan (BMP) từ các nguồn nguyên liệu khác nhau

Chỉ số BMP phản ánh khả năng chuyển hóa lý thuyết của các hợp chất hữu cơ có trong nguyên liệu thành khí metan. Kết quả cho thấy thức ăn thừa có chỉ số BMP cao nhất đạt 638,5NmL CH_4/g VS, tiếp đến là rác hữu cơ thực vật có chỉ số BMP đạt 513,5NmL CH_4/g VS (Hình 3). Theo nghiên cứu của Jiang & cs. (2022), các loại thực phẩm và thực vật chứa tỷ lệ carbohydrate và protein dễ phân hủy bởi vi sinh vật, trong khi chất thải động vật thường chứa các thành phần đã qua quá trình tiêu hóa sinh học, khiến các liên kết hữu cơ còn lại khó bị bẻ gãy hơn. Do đó, tiềm năng khai thác metan của thức ăn thừa và rác thực vật vượt trội so với các nhóm phân động vật.

Giá trị BMP của phân gà chỉ đạt khoảng 346NmL CH_4/g VS, bằng 1/2 so với thức ăn thừa. Phân lợn có giá trị BMP thấp nhất (95,6NmL CH_4/g VS), cho thấy hiệu suất chuyển hóa của nguyên liệu này trong điều kiện thí nghiệm mẻ là không cao, có thể do sự tích lũy các chất ức chế sinh học trong quá trình chăn nuôi công nghiệp (Kalamaras & cs., 2021).

Kết quả cho thấy các thành phần khác nhau của nguồn nguyên liệu có ảnh hưởng khác nhau đến tiềm năng sinh khí và chất lượng khí thu được. Kulichkova & cs. (2020) chứng minh tỷ lệ C/N cao có liên quan chặt chẽ với sản lượng khí tích lũy từ đó làm tăng chỉ số BMP. Thức ăn thừa và rác hữu cơ thực vật có C/N cao hơn (Bảng 3), sản lượng khí tích lũy lần lượt đứng đầu và thứ hai. Đặc biệt, đường tích lũy động học của rác thực vật cho thấy tốc độ sinh khí vượt trội trong 10 ngày đầu; đường tích lũy của thức ăn thừa tăng đều đến 30 ngày (Hình 2). Tương đương với đó là tiềm năng sinh khí BMP của hai loại này cũng cao nhất (Hình 3).Trong khi đó, nhóm phân động vật (lợn và gà) dù có hàm lượng vật chất khô (TS) và lượng carbohydrate cao, nhưng lượng khí sinh ra thấp hơn đáng kể so với thức ăn thừa hay rác thực

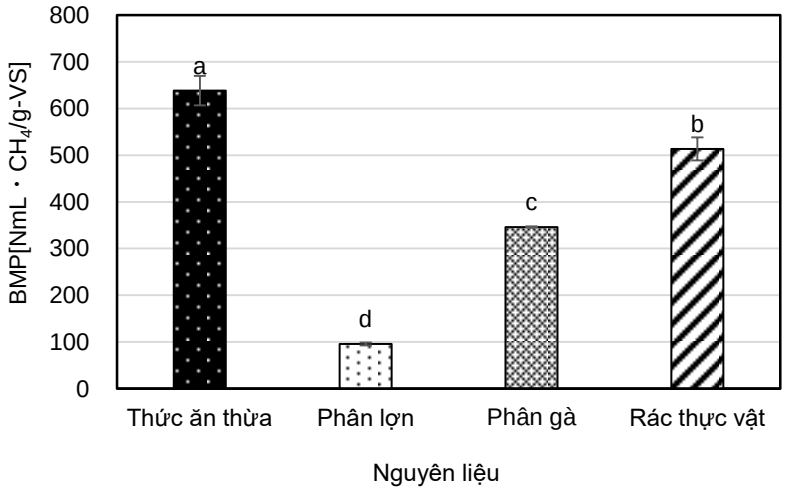
vật (Bảng 5, Hình 2), do các hợp chất hữu cơ phức tạp đã qua hệ tiêu hóa của vật nuôi, khó phân hủy hơn (Xue & cs., 2020). Phân gà với C/N thấp, chỉ đạt 7,51, làm giảm đáng kể lượng khí meatan và mức BMP thấp hơn đáng kể so với nguồn rác hữu cơ và thứ ăn thừa (Hình 3) tương tự kết quả các nghiên cứu trước đây (Kulichkova & cs., 2020; Jameel & cs. 2024). Ngược lại, nhóm phân động vật, đặc biệt là phân lợn, có ưu thế về chất lượng khí với tỷ lệ metan cao (Bảng 5). Theo Zhang & cs. (2014), hàm lượng lipid cao là nhân tố chính thúc đẩy nồng độ metan cao ở phân lợn (Bảng 4), nhưng đồng thời cũng tiềm ẩn nguy cơ ức chế hệ thống do tích lũy axit béo chuỗi dài làm giảm rõ rệt chỉ số BMP.

3.5. Hiệu quả phân hủy chất hữu cơ và sản xuất điện - nhiệt của các nguồn nguyên liệu

Hiệu quả chuyển hóa COD của các nguyên liệu trong thí nghiệm được thể hiện ở hình 4. Tỷ lệ chuyển hóa COD đạt cao nhất ở thức ăn thừa (15,85%). Phân gà và rác thực vật có tỷ lệ chuyển hóa COD khá tương đương so với thức ăn thừa, lần lượt đạt 7,58% và 6,98%. Phân lợn có tỷ lệ chuyển hóa COD thấp nhất, chỉ đạt mức 3,95% so với lượng COD nạp vào. Tỷ lệ chuyển hóa COD của các nguyên liệu đều ở mức thấp so với một số nghiên cứu (Li & cs., 2026). Điều này có thể do hàm lượng COD trong các nguyên liệu rất cao trong khi tỷ lệ N, P thấp, nên dẫn đến hoạt động của vi sinh vật bị hạn chế do thiếu cân bằng về dinh dưỡng trong nguyên liệu, đặc biệt tỷ lệ COD/N/P ở các nguyên liệu đầu vào đầu sai khác lớn so với tỷ lệ chuẩn (250/5/1) (Hamza & cs., 2019).

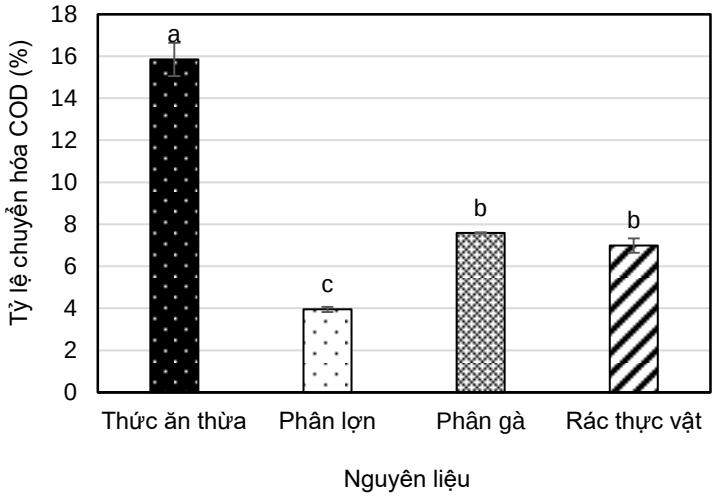
Hiệu quả sản xuất điện và thu hồi nhiệt ở thức ăn thừa đạt cao nhất tương ứng 312,1 và 458,7 kWh/ngày nhờ chỉ số BMP cao vượt trội. Phân gà mặc dù có chỉ số BMP thấp nhưng nhờ tỷ lệ chất rắn cao trong nguyên liệu (Bảng 3) nên lượng điện và lượng nhiệt thu hồi cũng ở mức cao (276,5 và 395 kWh/ ngày). Rác thực vật có các chỉ số tương đương với phân gà, trong khi phân lợn có hiệu suất thấp nhất chỉ đạt 64 kWh/ngày và 91,4 kWh/ngày. Tương ứng với đó, sản lượng điện từ các nguồn nguyên liệu có giá trị từ 2,7kW với phân lợn và cao nhất là 13,4kW với thức ăn thừa.

Kết quả nghiên cứu cho thấy tiềm năng khai thác khí phụ thuộc rõ rệt vào nguyên liệu đầu vào (Kulichkova & cs., 2020). Theo Zhang & cs. (2021), nghiên cứu phối hợp đa nguyên liệu để cân bằng sản lượng và chất lượng khí metan, giúp khắc phục hạn chế của nguyên liệu đơn trong sản xuất khí sinh học. Điều này cho thấy cần có những nghiên cứu tiếp theo phối hợp giữa nhóm cho năng suất metan cao như thức ăn thừa với nhóm cho chất lượng metan cao như phân lợn là cần thiết để tối ưu việc tái sử dụng rác hữu cơ cho sản xuất khí metan.



Ghi chú: BMP: Tiềm năng khí metan; ký tự chữ cái trong bảng thể hiện sự khác biệt giữa các công thức với mức độ tin cậy 95%.

Hình 3. Tiềm năng khai thác khí từ các nguồn nguyên liệu đầu vào



Ghi chú: Ký tự chữ cái trong bảng thể hiện sự khác biệt giữa các công thức ở mức độ tin cậy 95%.

Hình 4. Tỷ lệ chuyển hóa COD của các nguồn nguyên liệu trong thí nghiệm

Bảng 6. Hiệu quả sản xuất điện và thu hồi nhiệt từ các nguồn nguyên liệu khác nhau
(quy đổi 1 tấn nguyên liệu/ngày)

Chỉ tiêu	Đơn vị	Thức ăn thừa	Phân lợn	Phân gà	Rác thực vật
Hiệu suất phát điện	kWh/ngày	321,1	64,0	276,5	212,2
Sản lượng điện	kW	13,4	2,7	11,5	8,8
Lượng nhiệt thu hồi	kWh/ngày	458,7	91,4	395,0	303,2

Ghi chú: kW: công suất điện năng; kWh: Điện năng tiêu thụ trong thời gian 1 giờ.

4. KẾT LUẬN

Các nguồn rác thải hữu cơ có thành phần khác nhau như tổng lượng chất rắn, tỷ lệ chất rắn dễ bay hơi, tỷ lệ C/N và lượng lipid có ảnh hưởng rõ rệt đến sản lượng và tiềm năng phát sinh khí metan. Thức ăn thừa là nguyên liệu cho sản lượng metan tích lũy, chỉ số BMP, chuyển hóa COD cao nhất dẫn tới hiệu quả khai thác điện - nhiệt tốt nhất. Rác hữu cơ thực vật có tỷ lệ C/N cao nhất cho tiềm năng BMP cao nhưng hiệu quả chuyển hóa COD và sản xuất điện - nhiệt thấp hơn phân gà do tỷ lệ chất rắn thấp hơn. Nhóm phân động vật có sản lượng sinh khí và chỉ số BMP thấp, nhưng cho chất lượng metan cao hơn các nguyên liệu thực vật. Mặc dù vậy, hiệu quả chuyển hóa COD của các nguyên liệu đều ở mức trung bình thấp (dưới 20%). Do đó, cần có các nghiên cứu tiếp theo về phối trộn các nguồn nguyên liệu rác thải để tối ưu tiềm năng khai thác năng lượng tái tạo và xử lý môi trường bền vững tại Việt Nam.

LỜI CẢM ƠN

Kết quả nghiên cứu được tài trợ kinh phí từ dự án JICA-VNUA-TOYO Nhật Bản giai đoạn 2020-2026.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Abera G.B., Andersen T.O., Solli L., Horn S.J. & Feng L. (2025). Impact of hydrogen sulphide on biomethanation and the potential mechanisms of mitigation. Biomass and Bioenergy. 201: 108051. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108051

Alhraishawi A. & Aslan Ş. (2022). Effect of Lipid Content on Anaerobic Digestion Process and Microbial Community: Review Study. European Scientific Journal Esj. 8. https://doi.org/10.19044/esipreprint.8.2022.p197

Ayele D.T., Kassa Y., Biru B., Aregahagne S., Jember K., Fentie T. & Ayele H.S. (2025). Evaluating the nutrient content and heavy metal safety of water hyacinth-based compost: A sustainable solution for chemical fertilizer reduction and nutrient recycling in agriculture. Scientific African. 30: e02985. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02985.

Browne J.D., Allen E. & Murphy J.D. (2013). Assessing the variability of biometan production from food waste in batch and continuous operation. Applied Energy. 102: 307-314. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.097

Chuenchart W., Logan M., Leelayouthayotin C. & Visvanathan C. (2020). Enhancement of food waste thermophilic anaerobic digestion through synergistic effect with chicken manure. Biomass and Bioenergy. 136: 105541. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105541.

Hamza R.A., Zaghloul M.S., Iorhemen O.T., Sheng Z. & Tay J.H. (2019). Optimization of organics to nutrients (COD:N:P) ratio for aerobic granular sludge treating high-strength organic wastewater. Science of The Total Environment. 650: 3168-3179. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.026.

Havukainen J., Zavarauskas K., Denafas G., Luoranen M., Kahiluoto H., Kuisma M. & Horttanainen M. (2012). Potential of energy and nutrient recovery from biodegradable waste by co-treatment in Lithuania. Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA. 30(2): 181-189. https://doi.org/10.1177/0734242X11427945.

IEA. (2020). Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth. IEA. Retrieved from https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth on Mar 20, 2026.

Jameel M.K., Mustafa M.A., Ahmed H., Mohammed A.R.M.I., Ghazy H., Shakir M. & Kianfar E. (2024). Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. Results in Chemistry. 7: 101549. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101549.

Jiang H., Wang S., Li B., Feng L., Zhai L., Zhou H. & Pan J. (2022). Anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste using a novel two-stage solid-liquid system. Journal of Cleaner Production. 370: 133521. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133521.

Kalamaras S.D., Vitoulis G., Christou M.L., Sfetsas T., Tziakas S., Fragos V., Samaras P., & Kotsopoulos T.A. (2021). The Effect of Ammonia Toxicity on Methane Production of a Full-Scale Biogas Plant-An Estimation Method. Energies. 14(16): 5031. https://doi.org/10.3390/en14165031

Kaur K. & Phutela K. (2016). Enhancement of paddy straw biogas production through chemical pretreatment. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 92: 178-184. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.083

Kulichkova G.I., Ivanova T.S., Köttner M., Volodko O.I., Spivak S.I., Tsygankov S.P. & Blume Y.B. (2020). Plant Feedstocks and their Biogas Production Potentials. The Open Agriculture Journal. 14(1): 219-234. https://doi.org/10.2174/1874331502014010219.

Li S., Wang S., Wang X., Wang Z., Li S., Yang S. & Ying H. (2026). Carbon-based Materials in Anaerobic Digestion for Metan Production: Unraveling the Multi-faceted Mechanisms and Shaping Future Perspectives. Sustainable Energy & Fuels. https://doi.org/10.1039/d5se01690h

Nguyen H.H., Heaven S. & Banks C. (2014). Energy potential from the anaerobic digestion of food waste in municipal solid waste stream of urban areas in Vietnam. International Journal of Energy and Environmental Engineering. 5(4): 365-374. https://doi.org/10.1007/s40095-014-0133-1.

Nguyễn Phương Thảo & Nguyễn Việt Anh (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, Đại học Xây dựng Hà Nội. 8(3): 34-39.

Quang Trung Đỗ, Văn Hưởng Đoàn, Duy Cam Bùi, Thị Nhâm Nguyễn, Quang Minh Nguyễn & Xuân Quang Chu (2019). Nghiên cứu quá trình phân hủy kỵ khí chất thải chăn nuôi lợn và rác hữu cơ trong sinh hoạt nông thôn để sinh khí metan và phân hữu cơ. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam. 61(1): 16-19.

Roubík H., Chubur V., Chernysh Y., Jelínek M., Phung L.D., Dung D.V., Duong N.V. & Banout J. (2025). Digestate from small-scale biogas plants in central Vietnam produced under mesophilic conditions: friend or foe for local farmers?. Biofuels Bioproducts and Biorefining. 19(3): 864-881. https://doi.org/10.1002/bbb.2745.

Tauber J., Parravicini V., Svardal K. & Krampe J. (2019). Quantifying methane emissions from anaerobic digesters. Water Science and Technology. 80(9): 1654-1661. https://doi.org/10.2166/wst.2019.415.

Wang X., Yang G., Feng Y., Ren G. & Han X. (2012). Optimizing feeding composition and carbon-nitrogen ratios for improve metan yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. Bioresource Technology, 120, 78-83. doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.058.

Xue S., Wang Y., Lyu X., Zhao N., Song J., Wang X. & Yang G. (2020). Interactive effects of carbohydrate, lipid, protein composition and carbon/nitrogen ratio on biogas production of different food wastes. Bioresource Technology. 312: 123566. doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123566.

Yasim N.S. & Buyong F. (2023). Comparative of experimental and theoretical biochemical methane potential generated by municipal solid waste. Environmental Advances. 11: 100345. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100345

Yoon Y.-M., Kim S.-H., Shin K.-S. & Kim C.-H. (2014). Effects of Substrate to Inoculum Ratio on the Biochemical Methane Potential of Piggery Slaughterhouse Wastes. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences. 27(4): 600-607. https://doi.org/10.5713/ajas.2013.13537