Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ
Số chuyên đề: Công nghệ chiến lược - Động lực phát triển Đồng bằng sông Cửu Long (SDMD)
ISSN 1859-2333 | e-ISSN 2815-5599

DOI:10.22144/ctujos.2026.266

TÁI SỬ DỤNG DINH DƯỠNG TỪ NƯỚC THẢI BIOGAS TRONG NÔNG NGHIỆP THEO HƯỚNG KINH TẾ TUẦN HOÀN: TỔNG QUAN VÀ BẰNG CHỨNG THỰC NGHIỆM TẠI ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG

Huỳnh Công Khánh, Huỳnh Văn Thảo, Nguyễn Công Thuận, Dương Trí Dũng, Nguyễn Văn Công và Trần Sỹ Nam*

Khoa Môi trường và Tài nguyên Thiên nhiên, Đại học Cần Thơ, Việt Nam
**Tác giả liên hệ (Corresponding author): tsnam@ctu.edu.vn*

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 18/08/2026
Sửa bài (Revised): 26/10/2026
Duyệt đăng (Accepted): 12/11/2026

Title: *Nutrient reuse from biogas effluent in agriculture toward a circular economy: A review and experimental evidence from the Vietnamese Mekong Delta*

Author(s): *Huynh Cong Khanh, Huynh Van Thao, Nguyen Cong Thuan, Duong Tri Dung, Nguyen Van Cong and Tran Sy Nam**

Affiliation(s): *College of Environment and Natural Resources, Can Tho University, Viet Nam*

TÓM TẮT

Ngành chăn nuôi ở Đồng bằng sông Cửu Long phát sinh nhiều chất thải giàu nitơ (N) và phốt pho (P) nhưng phần lớn chưa được tái sử dụng phù hợp. Báo cáo tổng quan này được thực hiện nhằm tổng hợp các nghiên cứu về việc tái sử dụng dinh dưỡng từ nước thải biogas theo hướng kinh tế tuần hoàn, thu hồi và tái sử dụng dinh dưỡng, và đánh giá theo quy mô. Các nghiên cứu thực nghiệm ở quy mô chậu cho thấy đạm dạng amôn (NH_4^+-N) trong nước thải biogas có thể thay thế một phần phân đạm hóa học cho lúa và cây trồng cạn với năng suất tương đương trong điều kiện thí nghiệm; quản lý nước hợp lý còn làm giảm phát thải khí nhà kính. Các nghiên cứu ở quy mô đồng ruộng còn hạn chế; yêu cầu thể tích nước tưới lớn, rủi ro mầm bệnh, kim loại nặng và thiếu khung pháp lý là các rào cản chính cho việc nhân rộng ứng dụng trong thực tế. Báo cáo đề xuất sơ đồ dòng N kèm các điểm thất thoát, điểm kiểm soát và chỉ số sơ bộ về mức độ tuần hoàn dinh dưỡng trong tái sử dụng nước thải biogas.

Từ khóa: *Kinh tế tuần hoàn, nước thải biogas, phân bón hữu cơ, tái sử dụng dinh dưỡng, thu hồi dinh dưỡng*

ABSTRACT

Livestock production in the Vietnamese Mekong Delta generates large quantities of nitrogen (N)- and phosphorus (P)-rich waste, most of which is not yet appropriately reused. This review synthesizes studies on nutrient reuse from biogas effluent from three perspectives: the circular economy, nutrient recovery and reuse, and evaluation across experimental scales. Pot experiments show that ammonium nitrogen (NH_4^+-N) in biogas effluent can partially replace synthetic N fertilizer for rice and upland crops while achieving comparable yields under experimental conditions. Appropriate water management can also reduce greenhouse gas emissions. Field-scale studies, however, remain limited. Large irrigation volumes, risks from pathogens and heavy metals, and the lack of a regulatory framework are the main barriers to scaling up practical application. The review proposes an N flow diagram that marks loss points and control points, together with preliminary indicators of nutrient circularity in biogas effluent reuse.

Keywords: *Biogas effluent, circular economy, nutrient recovery, nutrient reuse, organic fertilizer*

1. GIỚI THIỆU

Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) là vùng sản xuất nông nghiệp trọng điểm của Việt Nam, đồng thời có ngành chăn nuôi phát triển. Đi kèm với tăng trưởng là sự gia tăng nhanh chóng của chất thải chăn nuôi – dòng chất thải giàu dinh dưỡng, đặc biệt là nitơ (N) và phốt pho (P), nhưng phần lớn vẫn chưa được quản lý và tái sử dụng hiệu quả. Ở quy mô toàn cầu, chuỗi cung ứng chăn nuôi thải ra khoảng 65 Tg N mỗi năm, tương đương khoảng một phần ba tổng lượng phát thải nitơ do con người tạo ra, với hiệu suất sử dụng đạm rất thấp và biến động lớn giữa các hệ thống sản xuất (Uwizeye et al., 2020). Riêng tại Việt Nam, ngành chăn nuôi phát sinh hơn 80 triệu tấn chất thải rắn mỗi năm, cùng khối lượng lớn nước thải giàu dinh dưỡng, song tỷ lệ tái sử dụng cho trồng trọt còn thấp và chênh lệch lớn giữa các vùng, phản ánh nhiều rào cản về kỹ thuật và chính sách (Giang và ctv., 2024).

Sự thất thoát dinh dưỡng này gây ra 2 vấn đề song hành. Thứ nhất, dinh dưỡng dư thừa đi vào môi trường nước gây phú dưỡng, suy giảm chất lượng nước mặt và phát thải khí nhà kính như mêtan (CH_4) và oxit nitơ (N_2O). Thứ hai, đây là sự lãng phí một nguồn tài nguyên có giá trị, trong khi ngành nông nghiệp vẫn phụ thuộc lớn vào phân bón hóa học. Trong bối cảnh đó, kinh tế tuần hoàn (circular economy) – với nguyên lý biến chất thải của một quá trình sản xuất trở thành đầu vào của quá trình khác – đã trở thành khung tiếp cận trọng tâm để giải quyết đồng thời cả bài toán ô nhiễm và bài toán tài nguyên (Dadrasnia et al., 2021).

Về bản chất, kinh tế tuần hoàn hướng đến việc giữ cho vật chất và năng lượng luân chuyển trong hệ thống càng lâu càng tốt, thông qua các nguyên tắc giảm thiểu, tái sử dụng và tái chế. Việc khép kín dòng N và P không chỉ giảm nhu cầu phân bón hóa học mà còn giảm lượng ô nhiễm và phát thải ra môi trường. Việc tái sử dụng dinh dưỡng (nutrient reuse), giúp đưa dinh dưỡng từ chất thải chăn nuôi trở lại sản xuất cây trồng, là mắt xích then chốt trong việc khép kín dòng vật chất giữa chăn nuôi và trồng trọt. Bên cạnh đó, nhiều công nghệ đã được phát triển và thương mại hóa, từ phân hủy yếm khí thu khí sinh học kèm sản phẩm phụ giàu dinh dưỡng, tách khí amoniac, đến các giải pháp sinh học dựa trên thực vật thủy sinh (Dadrasnia et al., 2021; Sajjad et al., 2024). Song song, khái niệm phân bón thu hồi từ chất thải chăn nuôi (RENURE – REcovered Nitrogen from manURE) đang được thể chế hóa nhằm cho phép các sản phẩm này thay thế phân đạm khoáng trong khuôn khổ pháp lý (Saju et al., 2023; Vingerhoets et al., 2025).

Tại ĐBSCL, một hướng nghiên cứu nổi bật trong những năm qua là tái sử dụng nước thải hầm ủ biogas (biogas effluent) làm phân bón cho lúa và cây trồng cạn. Tuy vậy, các kết quả này vẫn còn rải rác trong nhiều công bố riêng lẻ và chưa được hệ thống hóa trong một khung phân tích chung về kinh tế tuần hoàn. Mặt khác, các tổng quan quốc tế trước đây chủ yếu tập trung vào công nghệ thu hồi N – P từ phân chuồng (Dadrasnia et al., 2021; Sajjad et al., 2024), giá trị nông học và rủi ro của digestate trong điều kiện ôn đới (Möller & Müller, 2012; Nkoa, 2014; Smit et al., 2026) hoặc khung pháp lý RENURE ở châu Âu (Saju et al., 2023; Vingerhoets et al., 2025); chưa có nghiên cứu tổng quan nào được thực hiện nhằm đánh giá bằng chứng thực nghiệm từ hệ thống canh tác lúa nhiệt đới, quy mô nông hộ như ĐBSCL trong một khung kinh tế tuần hoàn. Vì vậy, trong bài báo tổng quan này, hai đóng góp cốt lõi đã được tập trung làm rõ: (i) tổng hợp và đánh giá phê bình bằng chứng thực nghiệm về việc tái sử dụng dinh dưỡng từ nước thải biogas tại ĐBSCL theo quy mô nghiên cứu (chậu, đồng ruộng, nông hộ) và đối chiếu với bằng chứng quốc tế; (ii) trên cơ sở đó, các khoảng trống nghiên cứu đã được chỉ ra và sơ đồ dòng vật chất N cùng một chỉ số đánh giá sơ bộ mức độ tuần hoàn dinh dưỡng cho vùng đã được đề xuất.

2. PHƯƠNG PHÁP TỔNG QUAN

2.1. Cách tiếp cận, tìm kiếm và lựa chọn tài liệu

Báo cáo tổng quan được thực hiện theo cách tiếp cận tổng quan phê bình (critical review) kết hợp tổng hợp bằng chứng thực nghiệm (Grant & Booth, 2009); đây không phải là tổng quan hệ thống hay phân tích tổng hợp (meta-analysis). Tài liệu được tìm kiếm trên các cơ sở dữ liệu Scopus, Web of Science và Google Scholar, cùng các tạp chí khoa học trong nước (Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ và hệ thống Tạp chí khoa học Việt Nam trực tuyến). Tổ hợp từ khóa tiếng Anh gồm (“biogas effluent” OR “biogas slurry” OR “digestate”) AND (“rice” OR “fertilizer” OR “nutrient recovery” OR “circular economy”), có hoặc không kèm (“Mekong Delta” OR “Vietnam”); từ khóa tiếng Việt tương ứng gồm “nước thải biogas”, “nước thải hầm ủ”, “khí sinh học”, “thu hồi dinh dưỡng” và “kinh tế tuần hoàn”. Khoảng thời gian tìm kiếm là 2010–2026; danh mục tài liệu tham khảo của các công trình chính cũng được rà soát để bổ sung các tài liệu liên quan.

Tài liệu được lựa chọn khi: (i) đã công bố trên tạp chí có phản biện, kỷ yếu hội thảo khoa học hoặc là văn bản chính thức; (ii) có số liệu định lượng về thành phần dinh dưỡng, hiệu quả thu hồi/xử lý, hiệu quả nông học, phát thải hoặc rủi ro khi sử dụng nước thải biogas và (iii) đối với nhóm bằng chứng tại ĐBSCL, thí nghiệm được thực hiện trong vùng. Tài liệu bị loại khi không có số liệu gốc, không nêu rõ điều kiện thí nghiệm, trùng lặp dữ liệu hoặc chỉ có bản tóm tắt. Dựa trên các tiêu chí này, 40 tài liệu đã được sử dụng; trong đó, có 08 nghiên cứu thực nghiệm sử dụng nước thải biogas cho cây trồng tại ĐBSCL (Bảng 3). Trong 08 nghiên cứu này, 06 nghiên cứu có sự tham gia của nhóm tác giả (đánh dấu * trong Bảng 3); vì vậy, các phân tích tổng hợp và thí nghiệm đồng ruộng quốc tế được sử dụng làm cơ sở đối chiếu độc lập (mục 5.1 và 5.2).

Dữ liệu của mỗi nghiên cứu được trích xuất theo các trường: nguồn nguyên liệu nạp, quy mô thí nghiệm, cách định liều và liều lượng, năng suất so với đối chứng phân hóa học, phát thải khí nhà kính và các chỉ tiêu rủi ro. Do khác biệt lớn về quy mô, thiết kế và chỉ tiêu theo dõi nên kết quả được tổng hợp định tính và biểu diễn dưới dạng giá trị tương đối thay vì phân tích tổng hợp thống kê. Bằng chứng được phân tích theo chuỗi: nguồn nguyên liệu → thành phần dinh dưỡng → công nghệ thu hồi → khả năng tái sử dụng → hiệu quả nông học → rủi ro môi trường → tính khả thi về kinh tế → mức độ tuần hoàn.

2.2. Các khái niệm sử dụng trong báo cáo tổng quan

Trong bài báo này, việc phân biệt ba khái niệm có liên quan nhưng không đồng nhất đã được thực hiện. Xử lý chất thải (waste treatment) là việc giảm nồng độ và tải lượng chất ô nhiễm để đạt quy chuẩn xả thải; trong quá trình này, N có thể bị loại khỏi chu trình (ví dụ qua khử nitrat thành N_2), nên hiệu quả loại bỏ N hoặc P cao không đồng nghĩa với việc dinh dưỡng đã được thu hồi. Thu hồi dinh dưỡng (nutrient recovery) là việc tách và giữ lại dinh dưỡng (trong bài này chủ yếu là N) dưới dạng sản phẩm có thể sử dụng như dung dịch amôn sunfat hoặc sinh khối thực vật. Tái sử dụng dinh dưỡng (nutrient reuse) là việc đưa dinh dưỡng – trực tiếp từ nước thải biogas hoặc từ sản phẩm thu hồi – trở lại sản xuất cây trồng; phần dinh dưỡng thực sự được cây hấp thụ là một chỉ tiêu nông học riêng. Bên cạnh đó, bằng chứng được phân cấp theo quy mô: thí nghiệm chậu (microcosm), mesocosm, đồng ruộng và quy mô nông hộ/sản xuất; kết quả ở quy mô chậu không thể diễn giải trực tiếp thành khả năng áp dụng ở quy mô sản xuất đại trà.

3. NƯỚC THẢI BIOGAS VÀ DÒNG DINH DƯỠNG

3.1. Nguồn và thành phần dinh dưỡng của nước thải biogas

Chất thải chăn nuôi bao gồm phân, nước tiểu, nước rửa chuồng và nước thải sau xử lý yếm khí. Đặc trưng quan trọng nhất về mặt dinh dưỡng là hàm lượng đạm cao, chủ yếu tồn tại ở dạng amôn (NH_4^+-N), dễ tiêu cho cây trồng. Tuy nhiên, tỷ lệ NH_4^+-N/tổng N thay đổi đáng kể theo nguyên liệu nạp và điều kiện vận hành hầm ủ: tỷ lệ 86 – 96% được ghi nhận cho nước thải biogas phân bò trong một nghiên cứu cụ thể (Minamikawa et al., 2020), trong khi các số liệu khác của nước thải biogas phân bò chỉ khoảng 30 – 87% (Bảng 1); nước thải biogas từ phân heo có hàm lượng dinh dưỡng cao hơn nhiều, với NH_4^+-N dao động khoảng 318 – 338 mg N/L và tổng đạm 330 – 419 mg N/L (Huynh et al., 2026). Thành phần này khiến nước thải biogas trở thành một nguồn dinh dưỡng hữu cơ tiềm năng, nhưng cũng đặt ra thách thức là nồng độ dinh dưỡng loãng nên cần bón với khối lượng lớn cho cây trồng.

Việc quản lý chất thải chăn nuôi ở Việt Nam vẫn còn nhiều hạn chế. Kết quả nghiên cứu trên các trang trại chăn nuôi heo cho thấy quy mô đất đai và kiến thức về ủ phân là những yếu tố quyết định mức độ tách và xử lý chất thải, trong khi tỷ lệ tách phân vẫn còn thấp ngay cả ở các trang trại có hợp đồng liên kết (Le et al., 2020). Điều này cho thấy dư địa lớn để cải thiện việc quản lý và thu hồi dinh dưỡng từ nguồn thải này.

Bảng 1. Thành phần dinh dưỡng của nước thải biogas theo loại nguyên liệu nạp

Nguyên liệu nạp	pH	NH_4^+-N (mg N/L)	Tổng N (mg N/L)	Tổng P (mg P/L)	Nguồn
Phân bò	6,8–6,9	35–75	149–215	34–48	Khánh và ctv. (2019)
Phân bò	7,6–7,7	90–99	99–118	49,8	Huynh et al. (2022)
Phân bò	7,3–7,5	148–195	210–234	68–163	Minamikawa et al. (2021)
Phân heo	6,9–7,1	318–338	330–419	138–161	Huynh et al. (2026)

Ghi chú: Giá trị là khoảng dao động đo được của nước thải biogas dùng trong các thí nghiệm bón cho lúa tương ứng, bao gồm: quy mô chậu/mesocosm (Khánh và ctv., 2019; Huynh et al., 2022; Huynh et al., 2026) và quy mô đồng ruộng (Minamikawa et al., 2020, 2021). Tỷ lệ NH_4^+-N/tổng N tính theo trung điểm khoảng giá trị lần lượt là 30%, 87%, 77% và 88%.

Thành phần dinh dưỡng của nước thải biogas thay đổi theo loại nguyên liệu nạp và thời điểm thu mẫu (Bảng 1). Nước thải từ phân heo có nồng độ đạm và lân cao hơn rõ rệt so với phân bò, trong khi tỷ lệ NH_4^+-N/tổng N biến động lớn, từ khoảng 30% đến gần 90% (tính theo trung điểm khoảng giá trị). Đặc điểm này chi phối cách tính liều lượng khi sử dụng nước thải biogas làm phân bón, sẽ được phân tích ở mục 5.1.

3.2. Thất thoát dinh dưỡng và rủi ro môi trường

Dinh dưỡng thất thoát từ chăn nuôi gây ra chuỗi tác động đến môi trường. Ngoài việc phú dưỡng nguồn nước, quá trình lưu trữ và xử lý chất thải còn phát thải khí nhà kính. Việc phân tích tổng hợp toàn cầu về ủ chất thải chăn nuôi cho thấy N_2O chiếm tới 74,2% hiệu ứng nhà kính của quá trình ủ và các biện pháp như bổ sung than sinh học hoặc điều chỉnh tần suất đảo trộn có thể giảm đáng kể phát thải (Liu et al., 2023). Những bằng chứng này củng cố lập luận rằng việc thu hồi và tái sử dụng dinh dưỡng từ nước thải biogas không chỉ mang lại lợi ích về tài nguyên mà còn là giải pháp giảm thiểu ô nhiễm và phát thải, đồng thời tránh lãng phí nguồn dinh dưỡng vốn có thể thay thế phân bón hóa học.

4. CÔNG NGHỆ THU HỒI VÀ CHUYỂN HÓA DINH DƯỠNG

4.1. Phân hủy yếm khí và khí sinh học

Phân hủy yếm khí (anaerobic digestion) là công nghệ nền tảng trong kinh tế tuần hoàn nông nghiệp: vừa thu hồi năng lượng dưới dạng khí sinh học (biogas), vừa tạo ra sản phẩm phụ giàu dinh dưỡng (nước thải biogas) để làm phân bón. Tại ĐBSCL, các nghiên cứu đã tối ưu hóa quá trình sinh khí từ nhiều nguồn nguyên liệu. Đối với lục bình (*Eichhornia crassipes*) – một loài thực vật thủy sinh phát triển mạnh trên kênh rạch – tổng lượng khí sinh học tăng theo tải lượng chất rắn bay hơi (VS), đạt cao nhất 147,1 L ở mức 3,0% VS trong hệ thống bán liên tục (Nguyen & Huynh, 2023); trong hệ thống mẻ, năng suất khí riêng cao nhất đạt 154,5 L/kg VS ở mức 2,0% VS (Huynh & Nguyen, 2024).

Ở quy mô ứng dụng, chương trình khí sinh học của vùng đã lắp đặt và chuyển giao hơn 515 túi ủ polyethylene; mô hình chia sẻ khí sinh học cộng đồng giúp giảm 12,9 tấn CO_2tđ/năm, tương đương khoảng 69,2% lượng phát thải dư (Nam và ctv., 2022). Như vậy, phân hủy yếm khí đóng vai trò như một "trạm trung chuyển", biến chất thải chăn nuôi thành năng lượng tái tạo và nguồn dinh dưỡng hữu cơ tiềm năng cho cây trồng. Cần lưu ý rằng phân hủy yếm khí hầu như không loại bỏ N và P mà chủ yếu bảo toàn và chuyển hóa N hữu cơ thành NH_4^+-N, làm tăng tỷ lệ NH_4^+-N/tổng N và pH của chất thải (Möller & Müller, 2012); vì vậy, đây là khâu chuyển hóa dinh dưỡng, chưa phải thu hồi hay tái sử dụng dinh dưỡng.

4.2. Thu hồi N bằng tách khí amoniac

Đối với các dòng thải có nồng độ dinh dưỡng cao, các công nghệ hóa – lý cho phép thu hồi N dưới dạng sản phẩm cô đặc, dễ vận chuyển. Khí amoniac được tách để thu hồi N dưới dạng dung dịch amôn sunfat: một hệ thống tách đơn giản tại trang trại loại bỏ khoảng 45% đạm amôn trong 2 tuần ở 40°C (tới 64% trong 1 tuần khi bổ sung NaOH), tạo ra dung dịch amôn sunfat với chi phí khoảng 0,86 EUR/kg N thu hồi (Finzi et al., 2024). Cần lưu ý, hiệu quả loại bỏ NH_4^+-N khỏi nước thải không hoàn toàn trùng với hiệu suất thu hồi, vì chỉ phần N được giữ lại trong dung dịch hấp thụ mới là N thu hồi. Ở quy mô thí điểm, tổ hợp vi lọc – tách amoniac qua màng – thẩm thấu ngược thu hồi tới 56% N dưới dạng amôn sunfat tinh khiết và tái sử dụng tới 42% nước (Rodriguez-Alegre et al., 2024).

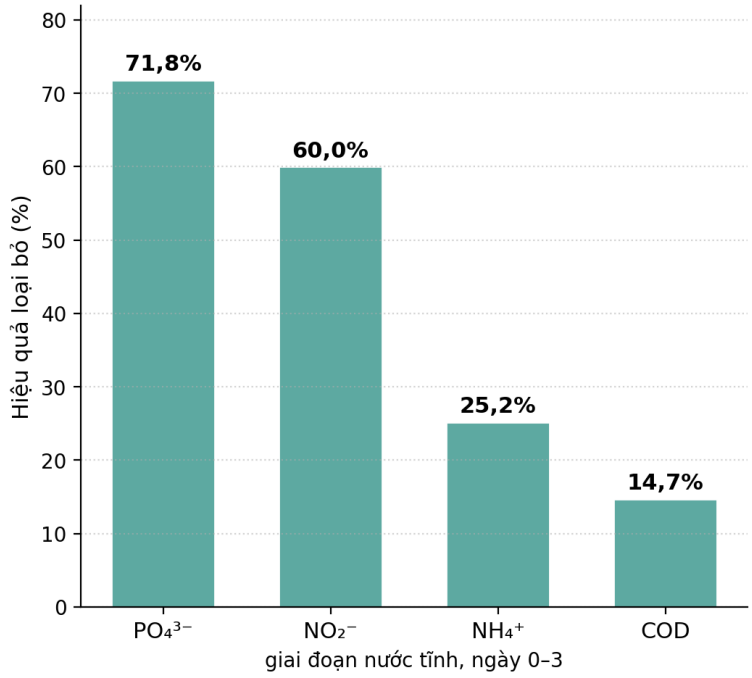
Các đánh giá tổng quan gần đây nhấn mạnh rằng không có công nghệ đơn lẻ nào tối ưu cho mọi dòng thải; các tổ hợp đa công đoạn thường vượt trội trong thu hồi dinh dưỡng (Sajjad et al., 2024) và các phương pháp như cô đặc bằng đông lạnh vẫn còn ít được khai thác (Dadrasnia et al., 2021). Trong bối cảnh ĐBSCL, các công nghệ này còn ít được áp dụng do chi phí và quy mô, nhưng có tiềm năng cho các trang trại chăn nuôi tập trung có dòng thải đậm đặc.

4.3. Xử lý bằng thực vật thủy sinh

Các giải pháp sinh học chi phí thấp phù hợp với điều kiện nhiệt đới và quy mô nông hộ. Thực vật thủy sinh như bèo cái (*Pistia stratiotes*) hấp thu dinh dưỡng từ nước thải hầm ủ biogas, đồng thời tạo sinh khối có thể quay lại làm nguyên liệu sản xuất khí sinh học. Kết quả nghiên cứu của Nguyen et al. (2024) trong việc sử dụng bèo cái để xử lý nước thải biogas cho thấy hiệu quả loại bỏ phốt phát cao nhất (61,6 – 71,8%), tiếp đến là nitrit và đạm vô cơ tổng số, trong khi hiệu quả loại bỏ tăng lên ở giai đoạn nước chảy. Ở quy mô phòng thí nghiệm, bèo còn hấp thu đồng thời cả amôn và nitrat (ưu tiên amôn), loại bỏ khoảng 0,26 g N với 112 g sinh khối tươi sau 28 ngày mà không cần sục khí (Nguyen & Nguyen, 2022). Đây là hướng xử lý – tận dụng phù hợp để vừa giảm tải lượng dinh dưỡng dư thừa trong nước thải biogas, vừa tạo sinh khối cho chuỗi tuần hoàn. Tuy nhiên, hiệu quả loại bỏ nêu trên phản ánh khả

năng xử lý; chỉ phần dinh dưỡng nằm trong sinh khối bèo được thu hoạch và tái sử dụng (làm nguyên liệu nạp hầm ủ, phân xanh hoặc thức ăn) mới được xem là dinh dưỡng thu hồi.

Bảng 2 tổng hợp một số công nghệ thu hồi và tái sử dụng dinh dưỡng từ chất thải chăn nuôi cùng hiệu quả điển hình. Có thể thấy mỗi công nghệ phù hợp với một mục tiêu khác nhau, và trong thực tế thường cần kết hợp nhiều công đoạn để đạt hiệu quả tổng thể.



Hình 1. Hiệu quả loại bỏ chất ô nhiễm trong nước thải hầm ủ biogas bằng bèo cái (*Pistia stratiotes*) ở giai đoạn nước tĩnh (Nguồn: số liệu vẽ lại từ Nguyen et al., 2024)

Bảng 2. Tổng hợp một số công nghệ thu hồi, tái sử dụng dinh dưỡng và hiệu quả điển hình

Công nghệ	Chất thải áp dụng	Hiệu quả điển hình	Nguồn
Phân hủy yếm khí (biogas)	Phân chăn nuôi, lục bình, nước thải nuôi tôm	Lục bình: đạt hiệu suất sinh khí tốt nhất với 3,0% VS, đồng phân hủy nước thải tôm tăng năng suất khí 26 – 53%	Nguyen and Huynh (2023), Nam và ctv. (2022)
Tách khí amoniac	Nước thải chăn nuôi thâm canh	Loại bỏ 45 – 64% NH_4^+-N; thu hồi tới 56% N dưới dạng amôn sunfat	Finzi et al. (2024), Rodriguez-Alegre et al. (2024)
Thực vật thủy sinh (bèo cái)	Nước thải hầm ủ	Loại bỏ (xử lý) phosphate 62 – 72%; N, P chỉ được thu hồi khi sinh khối được thu hoạch, tái sử dụng	Nguyen et al. (2024)
Bón nước thải biogas cho lúa	Nước thải biogas	Năng suất tương đương hoặc cao hơn phân hóa học (chủ yếu quy mô chậu); giảm >80% chất ô nhiễm trong nước	Khánh và ctv. (2019), Huynh et al. (2026), Minamikawa et al. (2021)

5. TÁI SỬ DỤNG DINH DƯỠNG TRONG SẢN XUẤT NÔNG NGHIỆP

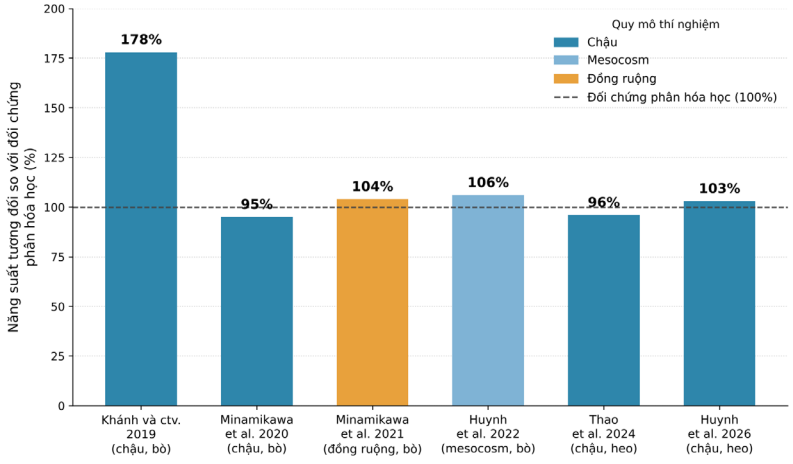
5.1. Nước thải biogas làm phân bón cho lúa

Việc tái sử dụng nước thải biogas làm phân bón cho lúa là minh chứng rõ nét nhất cho dòng dinh dưỡng tuần hoàn giữa chăn nuôi và trồng trọt ở ĐBSCL. Kết quả thí nghiệm chậu trên đất phù sa cho thấy trong điều kiện thí nghiệm, nước thải biogas từ phân bò có thể thay thế phân đạm hóa học: nghiệm thức bón theo NH_4^+-N đạt năng suất lúa cao nhất 1.740 g/m² (quy đổi theo diện tích chậu), gần gấp đôi so với nghiệm thức phân hóa học (980 g/m²), đồng thời giảm hơn 80% nồng độ các chất ô nhiễm (NH_4^+,

TKN, TP) trong nước sau canh tác (Khánh và ctv., 2019). Kết quả này đặt nền tảng cho một nguyên tắc quan trọng: do NH_4^+-N chiếm phần lớn tổng đạm, liều lượng nước thải biogas nên được tính theo đạm amôn thay vì tổng đạm.

Nguyên tắc trên tiếp tục được kiểm chứng và mở rộng qua các nghiên cứu tiếp theo, chủ yếu ở quy mô chậu. Trong thí nghiệm chậu quy mô nhỏ, việc bón nước thải biogas theo thời điểm linh hoạt, dựa trên bảng so màu lá, là khả thi, trong đó bón khi chỉ số bảng so màu lá (LCC) giảm xuống 3,75 – giá trị trên thang so màu dùng để quyết định thời điểm bón, không phải ngưỡng năng suất – cho năng suất hạt cao nhất; nước thải biogas phân bò trong nghiên cứu này có NH_4^+-N chiếm 86 – 96% tổng đạm nên các tác giả khuyến nghị định liều theo NH_4^+-N (Minamikawa et al., 2020). Trong thí nghiệm mesocosm, tưới ngập – khô xen kẽ (AWD) kết hợp bón nước thải biogas làm tăng năng suất lúa 12% so với tưới ngập liên tục và tăng khả năng hấp thu đạm của cây, cho thấy có thể đồng thời tiết kiệm nước và duy trì năng suất (Huynh et al., 2022). Kết quả nghiên cứu quy mô chậu gần đây trên nước thải biogas từ phân heo (nồng độ dinh dưỡng cao hơn) cho thấy bón theo NH_4^+-N ở mức tương đương 100 – 200 kg N/ha đều đạt năng suất tương đương phân hóa học (826 – 898 so với 871 g/m²); mức 100 kg N/ha cho hiệu quả cân bằng nhất vì đạt năng suất tương đương nhưng cần khối lượng nước thải nhỏ hơn nhiều so với mức 200 kg N/ha (Huynh et al., 2026). Điểm mới có ý nghĩa thực tiễn là nông dân có thể ước tính liều bón bằng bộ dụng cụ thử nhanh NH_4^+, theo công thức thể tích nước thải cần bón bằng lượng đạm mục tiêu chia cho nồng độ NH_4^+-N. Ở quy mô đồng ruộng, bón nước thải biogas phân bò (150 kg N/ha) kết hợp rút nước nhiều lần cho năng suất tương đương với phân tổng hợp (658 so với 632 g/m²), đồng thời giảm phát thải CH_4 27 – 30% và N_2O khoảng 52% (Minamikawa et al., 2021). Như vậy, ngoại trừ nghiên cứu đồng ruộng này, bằng chứng về khả năng thay thế phân đạm hóa học tại ĐBSCL chủ yếu đến từ thí nghiệm chậu và mesocosm (Bảng 3 và Hình 2); kết quả cần được kiểm chứng qua nhiều vụ ở quy mô đồng ruộng và nông hộ trước khi khuyến cáo áp dụng rộng rãi.

Các kết quả tại ĐBSCL phù hợp với bằng chứng quốc tế về giá trị thay thế phân đạm từ nước thải biogas. Phân tích tổng hợp cho thấy giá trị thay thế đạm khoáng của nước thải biogas trung bình khoảng 0,78 (tức tương đương khoảng 78% đạm khoáng dễ tiêu), nhưng biến động lớn tùy theo tỷ lệ C/N, pH đất và hàm lượng chất hữu cơ đất (Smit et al., 2026). Kết quả nhiều nghiên cứu đồng ruộng khẳng định rằng phần lỏng của nước thải biogas và các sản phẩm RENURE có thể thay thế một phần đáng kể phân đạm tổng hợp mà vẫn duy trì năng suất cây trồng (Saju et al., 2023; Šatvar Vrbančić et al., 2024; Sigurnjak et al., 2017). Theo tiêu chí RENURE của Liên minh châu Âu, sản phẩm có tỷ lệ N khoáng/tổng N từ 90% trở lên (hoặc tỷ lệ TOC/TN không quá 3) có thể được sử dụng như phân đạm khoáng (Reuland et al., 2021; Saju et al., 2023); việc đối chiếu với Bảng 1 cho thấy chỉ một phần nước thải biogas ở ĐBSCL đạt gần ngưỡng này, nên cần kiểm soát chất lượng nước thải trước khi xem đây là nguồn thay thế phân đạm khoáng. Như vậy, nước thải biogas không chỉ là chất thải cần xử lý mà còn là một nguồn dinh dưỡng hữu cơ tiềm năng có giá trị nông học, với điều kiện quản lý liều lượng và thời điểm bón hợp lý.



Hình 2. Năng suất lúa tương đối (%) ở nghiệm thức bón nước thải biogas so với đối chứng phân hóa học (đối chứng = 100%) theo quy mô thí nghiệm

5.2. Nước thải biogas cho cây trồng cạn

Ngoài cây lúa, nước thải biogas còn được nghiên cứu sử dụng cho nhiều loại cây trồng cạn, phản ánh một hướng nghiên cứu đã hình thành từ khá sớm ở ĐBSCL. Nước thải túi ủ biogas phân heo bón cho bắp (*Zea mays* L.) ở mức 75% nhu cầu đạm cho năng suất tương đương phân hóa học (1.390 so với 1.400 g/m²), đồng thời tái sử dụng 18,7 g N, 4,47 g P và 6,42 g K trên mỗi mét vuông và mang lại lợi nhuận cao hơn đối chứng (Thảo và ctv., 2017b). Tương tự, nước thải biogas phân heo pha loãng 75% với nước ao bón cho ớt (*Capsicum frutescens* L.) cho số trái tương đương và khối lượng trái cao hơn đối chứng, trong khi nước thải từ nguyên liệu nạp bèo tai tượng quá nghèo dinh dưỡng nên không thể thay thế phân hóa học (Nữ và ctv., 2015). Cơ chế nền tảng của các hiệu quả này là khả năng khoáng hóa cung cấp đạm dễ tiêu: thí nghiệm ủ đất cho thấy đất nhận 100% nước thải biogas đạt N-NH_4^+ tới 171 mg/kg và N-NO_3^- 78,9 mg/kg, cao hơn hẳn so với đối chứng (Thảo và ctv., 2017a). Bảng 3 tổng hợp 08 nghiên cứu thực nghiệm sử dụng nước thải biogas cho lúa và cây trồng cạn ở ĐBSCL, trong đó 06 nghiên cứu có sự tham gia của nhóm tác giả (đánh dấu *) và 02 nghiên cứu của các nhóm khác, 05 trong 08 nghiên cứu chỉ được thực hiện ở quy mô chậu.

Bảng 3. Tổng hợp các nghiên cứu sử dụng nước thải biogas cho cây trồng ở Đồng bằng sông Cửu Long

Nghiên cứu	Nước thải (nguyên liệu nạp)	Cây trồng (quy mô)	Liều lượng	Kết quả chính
Khánh và ctv. (2019)*	Biogas phân bò	Lúa (chậu)	140 kg N/ha, theo NH_4^+-N/TKN	NS theo NH_4^+-N 1.740 g/m² (ĐC 980) Cây hấp thu >80% chất ô nhiễm
Minamikawa et al. (2020)*	Biogas phân bò	Lúa (chậu, microcosm)	Định liều lượng đạm theo bảng so màu lá	Ngưỡng LCC 3,75 để quyết định thời điểm bón Nên bón theo NH_4^+-N (86 – 96% tổng N)
Minamikawa et al. (2021)*	Biogas phân bò	Lúa (đồng ruộng)	150 kg N/ha; rút nước nhiều lần	NS BE tương đương SF (658 vs 632 g/m²) Giảm CH_4 27 – 30%, N_2O − 52%
Huynh et al. (2022)*	Biogas phân bò	Lúa (mesocosm)	150 kg N/ha; tưới ngập–khô xen kẽ	BE-AWD 863 g/m² (SF-CF 815) AWD tăng NS 12%
Huynh et al. (2024)*	Biogas phân heo	Lúa (chậu)	150 kg N/ha; cấy vi khuẩn methanotroph	NS BE tương đương SF (713 vs 740 g/m²) Giảm CH_4 17 – 44% so với BE không cấy
Huynh et al. (2026)*	Biogas phân heo	Lúa (chậu)	100–200 kg N/ha, theo NH_4^+-N	NS 826 – 898 g/m² tương đương SF-150 (871) Mức 100 kg N/ha cân bằng thể tích
Thảo và ctv. (2017b)	Biogas phân heo	Bắp (chậu + đồng)	75% nhu cầu N	NS 1.390 g/m² tương đương ĐC 1.400 Lợi nhuận cao hơn
Nữ và ctv. (2015)	Biogas phân heo/bèo tai tượng	Ớt (chậu)	Pha loãng 75% với nước ao	Số trái tương đương ĐC, khối lượng trái cao hơn

*Ghi chú: NS: năng suất, ĐC: đối chứng phân hóa học, SF: phân bón tổng hợp, BE: nước thải biogas, AWD: tưới ngập – khô xen kẽ, LCC: bảng so màu lá, *: nghiên cứu có sự tham gia của nhóm tác giả. Năng suất ở thí nghiệm chậu được quy đổi theo diện tích bề mặt chậu, không so sánh trực tiếp với năng suất đồng ruộng.*

Bên cạnh các công trình nghiên cứu trong nước, kết quả của các nghiên cứu quốc tế cũng đã chứng minh và làm sáng tỏ thêm các xu hướng này. Phân hủy yếm khí làm tăng tỷ lệ NH_4^+-N trên tổng đạm và

pH của chất thải, qua đó tăng khả năng cung cấp đạm ngắn hạn cho cây trồng (Möller & Müller, 2012). Theo Lu et al. (2024), nước thải biogas giúp cải thiện độ phì đất, tăng cường trao đổi đạm và duy trì hoặc tăng năng suất lúa; trong khi đó, việc thay thế khoảng 30% phân đạm hóa học bằng nước thải biogas cho năng suất lúa và hiệu quả sử dụng phân cao nhất. Tổng quan về ứng dụng nước thải biogas trên đồng ruộng ở Trung Quốc cũng ghi nhận lợi ích cải thiện quần thể vi sinh vật đất và giảm chua hóa, nhưng cảnh báo rủi ro tích lũy kim loại nặng và kháng sinh khi bón quá mức (Wang et al., 2023). Tại Việt Nam, việc quản lý phân, nước thải biogas và phụ phẩm cây trồng cũng được chứng minh làm thay đổi phát thải CH_4 từ ruộng lúa quy mô nông hộ (Vu et al., 2015).

6. KHUNG KINH TẾ TUẦN HOÀN DINH DƯỠNG TỪ CHẤT THẢI CHĂN NUÔI

Các bằng chứng tổng hợp cho thấy ĐBSCL hội tụ nhiều điều kiện thuận lợi để phát triển nông nghiệp tuần hoàn dựa trên thu hồi dinh dưỡng từ chất thải chăn nuôi: nguồn chất thải dồi dào, nhu cầu phân bón cho canh tác lúa và cây trồng cạn lớn, khí hậu nhiệt đới thuận lợi cho các giải pháp sinh học, và nền tảng nghiên cứu – ứng dụng khí sinh học đã được xây dựng trong hơn một thập niên. Việc thể chế hóa phân bón thu hồi từ chất thải chăn nuôi (RENURE) trên thế giới cung cấp thêm định hướng chiến lược cho vùng (Saju et al., 2023; Vingerhoets et al., 2025).

Tuy nhiên, vẫn còn một số thách thức cần được giải quyết. Thứ nhất là khối lượng và nồng độ: nước thải biogas có nồng độ dinh dưỡng loãng nên cần thể tích lớn khi bón, ví dụ đạt mức 150 – 200 kg N/ha có thể cần khoảng 45 – 61 m^3 nước thải cho mỗi 1.000 m^2 (Huynh et al., 2026), tương đương 450 – 610 m^3/ha. Thể tích này được quy đổi theo NH_4^+-N: V (m^3/1.000 m^2) = lượng N mục tiêu (kg NH_4^+-N/1.000 m^2) / nồng độ NH_4^+-N (kg/m^3); ví dụ 15 – 20 kg N/1.000 m^2 chia cho khoảng 0,33 kg NH_4^+-N/m^3 (≈ 330 mg/L) cho 45 – 61 m^3. Nếu định liều theo tổng N (330 – 419 mg N/L) thì thể tích thấp hơn khoảng 5 – 20% nhưng lượng đạm dễ tiêu cung cấp cho cây giảm tương ứng, do một phần N ở dạng hữu cơ chậm khoáng hóa. Khối lượng lớn này gây khó khăn cho việc vận chuyển và công lao động. Thứ hai là an toàn sinh học: nước thải chăn nuôi có thể chứa mầm bệnh, cần có biện pháp xử lý để giảm thiểu mầm bệnh bằng các phương pháp đã được kiểm chứng trước khi sử dụng ở quy mô đồng ruộng (Huynh et al., 2026). Thứ ba là chất lượng và tiêu chuẩn sản phẩm: các sản phẩm phân bón thu hồi cần có khung tiêu chuẩn và quy định pháp lý rõ ràng, như mô hình RENURE (Saju et al., 2023; Vingerhoets et al., 2025). Thứ tư là các rào cản kinh tế – xã hội: khả năng tài chính hạn chế và tổ chức sản xuất còn yếu cản trở việc mở rộng ứng dụng ở quy mô hộ nông dân.

Trong các thách thức trên, nồng độ dinh dưỡng thấp của nước thải biogas không chỉ là vấn đề kỹ thuật mà còn là một nút thắt kinh tế trong tuần hoàn dinh dưỡng ở ĐBSCL: nồng độ thấp kéo theo thể tích bón lớn, chi phí vận chuyển và công lao động tăng, làm giảm tính khả thi trên thực tế. Ngược lại, các công nghệ thu hồi – cô đặc (tách khí amoniac) giúp giảm thể tích và chi phí vận chuyển, qua đó nâng cao tính khả thi về mặt kinh tế. Do đó, việc cô đặc và tinh chế sản phẩm thu hồi nên được xem là một trong những chìa khóa để biến tiềm năng dinh dưỡng thành sản phẩm phân bón thương mại hóa, chứ không chỉ là một khâu xử lý chất thải. Trên thực tế, nước thải biogas đã được thử nghiệm chế biến thành phân hữu cơ dạng lỏng (phối với dịch cá) và dạng rắn (hấp phụ trên xỉ than và bã bùn mía), cho thấy hướng tạo ra sản phẩm phân bón có giá trị và dễ vận chuyển hơn (Châu và ctv., 2022).

Để đánh giá sơ bộ tính khả thi về mặt kinh tế, có thể so sánh khối lượng cần vận chuyển với giá trị phân bón được thay thế. Với nồng độ khoảng 0,33 kg NH_4^+-N/m^3, mỗi m^3 nước thải biogas chỉ tương đương khoảng 0,7 kg urê (46% N); để cung cấp 150 kg N/ha cần bón khoảng 450 m^3 (≈ 450 tấn) nước thải nhằm thay thế khoảng 326 kg urê. Do đó, chi phí vận chuyển và lao động trên mỗi m^3 quyết định trực tiếp tính khả thi: khi ruộng canh tác nằm liền kề hầm ủ và nước thải được dẫn bằng ống, kênh hoặc bơm, chi phí chủ yếu là chi phí bơm tưới; ngược lại, khi phải vận chuyển bằng xe bồn, chi phí vận chuyển có thể vượt giá trị phân bón được thay thế. Các công nghệ cô đặc cũng có chi phí đầu tư và vận hành riêng, ví dụ tách khí amoniac đơn giản tại trang trại khoảng 0,86 EUR/kg N thu hồi (Finzi et al., 2024) và tiềm năng kinh tế của thu hồi dinh dưỡng từ phân chuồng khác nhau đáng kể giữa các vùng và công nghệ (Vingerhoets et al., 2025). Vì vậy, việc sử dụng trực tiếp nước thải biogas phù hợp hơn với nông hộ có diện tích canh tác gần hầm ủ, trong khi các trang trại chăn nuôi tập trung có dòng thải lớn mới đủ quy mô để đầu tư cô đặc – thu hồi. Việc phân tích chi phí – lợi ích đầy đủ cho điều kiện ĐBSCL, bao gồm chi phí vận chuyển, xử lý/cô đặc, lao động, giá trị phân bón thay thế và lợi ích môi trường (giảm xả thải, giảm phát thải), hiện vẫn là khoảng trống nghiên cứu.

An toàn sinh học và chất lượng sản phẩm là điều kiện tiên quyết để tái sử dụng dinh dưỡng ở quy mô lớn. Nước thải biogas từ phân heo có thể chứa mầm bệnh, đòi hỏi xử lý bảo đảm an toàn vi sinh theo quy trình được kiểm chứng trước khi bón để bảo đảm an toàn thực phẩm; phân bón có nguồn gốc từ chất thải chăn nuôi còn tiềm ẩn nguy cơ kháng kháng sinh (AMR) đối với sức khỏe cộng đồng, cần được giám sát và đánh giá rủi ro. Riêng nước thải biogas cần được giám sát dài hạn về kim loại nặng tích lũy trong đất và tồn dư kháng sinh trong môi trường (Wang et al., 2023).

Cần phân biệt rủi ro tiềm tàng với bằng chứng thực nghiệm về mức độ rủi ro. Về mầm bệnh, phân hủy yếm khí ở nhiệt độ trung bình như các hầm ủ hộ gia đình chỉ làm giảm một phần chứ không loại bỏ hoàn toàn vi sinh vật gây bệnh; mức giảm phụ thuộc vào nhiệt độ, thời gian lưu và loại vi sinh vật (Nkoa, 2014); do đó, thời gian lưu trữ và các bước xử lý sau hầm (hồ ổn định, lọc sinh học, xử lý nhiệt) cần được kiểm chứng bằng chỉ tiêu vi sinh như *E. coli* hoặc coliform. Về kim loại nặng, Cu và Zn thường được bổ sung vào thức ăn chăn nuôi heo, không bị phân hủy trong hầm ủ và có thể tích lũy trong đất khi bón lặp lại nhiều vụ; dư lượng kháng sinh và gen kháng kháng sinh cũng có thể phát tán ra đất – nước – cây trồng (Nkoa, 2014; Wang et al., 2023). Tuy nhiên, tại ĐBSCL, các nghiên cứu được trình bày trong Bảng 3 chủ yếu đánh giá hiệu quả nông học và phát thải; dữ liệu định lượng về vi sinh vật chỉ thị, kim loại nặng và tồn dư kháng sinh trong nước thải biogas, đất và nông sản còn rất hạn chế, nên mức độ rủi ro thực tế chưa thể kết luận. Trước khi khuyến nghị ứng dụng rộng, chất lượng nước thải cần được đối chiếu với QCVN 01-195:2022/BNNPTNT về nước thải chăn nuôi sử dụng cho cây trồng (Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn, 2022) và được giám sát dài hạn trong đất và nông sản. Về mặt pháp lý, phân bón phải được công nhận lưu hành theo Luật Trồng trọt (Quốc hội, 2018) và Nghị định 84/2019/NĐ-CP (Chính phủ, 2019); vì vậy, trong bài bào này, nước thải biogas sử dụng trực tiếp được xem là nguồn dinh dưỡng/phân bón hữu cơ tiềm năng, không phải phân bón theo nghĩa pháp lý, còn các sản phẩm chế biến từ nước thải biogas như phân hữu cơ dạng lỏng hoặc rắn (Châu và ctv., 2022) mới có thể hướng tới đăng ký công nhận.

Từ đó, một số định hướng nghiên cứu và ứng dụng được đề xuất. Về công nghệ, cần nghiên cứu việc cô đặc và tinh chế nước thải biogas (tách khí amoniac) để tạo sản phẩm phân bón đậm đặc, dễ vận chuyển, phù hợp với điều kiện ĐBSCL; đồng thời; quá trình phân hủy chất thải chăn nuôi và sinh khối thực vật cần được tối ưu hóa nhằm tối đa hóa việc thu hồi năng lượng và dinh dưỡng. Về nông học, cần kiểm chứng qua nhiều vụ ở quy mô đồng ruộng và nông hộ, xây dựng quy trình bón dựa trên NH_4^+-N với công cụ thử nhanh cho nông dân, kết hợp quản lý nước để giảm phát thải. Về hệ thống, vòng đời (life-cycle assessment) và cân bằng dinh dưỡng ở cấp độ hệ thống chăn nuôi – trồng trọt cần được đánh giá để lượng hóa lợi ích tuần hoàn (Minamikawa et al., 2021). Về chính sách, cần có khung tiêu chuẩn cho phân bón thu hồi, cơ chế khuyến khích tài chính và cơ chế tổ chức liên kết giữa các hộ nông dân để nhân rộng mô hình. Việc kết nối các mảnh ghép này sẽ giúp chuyển từ các kết quả nghiên cứu riêng lẻ sang một hệ sinh thái nông nghiệp tuần hoàn hoàn chỉnh cho vùng.

Để lượng hóa mức độ khép kín thay vì chỉ mô tả định tính, bài viết đề xuất một chỉ số đánh giá sơ bộ mức độ tuần hoàn dinh dưỡng (nutrient circularity, C), áp dụng cho N (có thể mở rộng tương tự cho P). Ranh giới hệ thống là một trang trại hoặc một cụm chăn nuôi – trồng trọt; dòng đầu vào là lượng N trong chất thải chăn nuôi phát sinh trong một năm (hoặc một vụ) và dòng đầu ra là lượng dinh dưỡng được bón lại cho cây trồng trong cùng ranh giới (Hình 3):

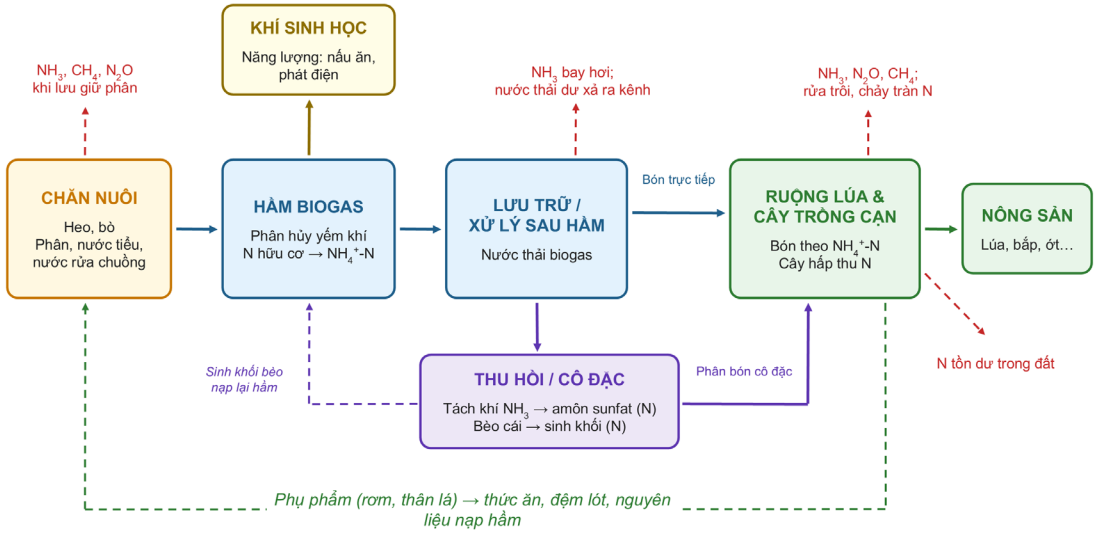
$$C\ (\%) = (M_{TSD} / M_{ĐV}) \times 100 = \eta_{TH} \times \eta_{TSD} \times 100$$

Trong đó: $M_{ĐV}$ là tổng lượng N trong chất thải chăn nuôi đi vào hệ thống (kg/năm), M_{TSD} là lượng dinh dưỡng thực sự được bón trở lại cho cây trồng (kg/năm). Khi đó, $\eta_{TH} = M_{TH}/M_{ĐV}$ là hiệu suất thu hồi (phản ánh công nghệ) và $\eta_{TSD} = M_{TSD}/M_{TH}$ là tỷ lệ tái sử dụng (phản ánh mức độ sử dụng sản phẩm thu hồi), trong đó M_{TH} là lượng dinh dưỡng được thu hồi dưới dạng có thể sử dụng (nước thải biogas sau lưu trữ, dung dịch amôn sunfat, sinh khối bèo; kg/năm). Do hai hệ số đều là tỷ số không thứ nguyên giữa các đại lượng cùng đơn vị (kg N) nên tích của chúng có ý nghĩa định lượng, nằm trong khoảng 0–1 và mỗi đơn vị dinh dưỡng chỉ được tính một lần. Hiệu suất cây hấp thu (η_{HT}, tỷ lệ giữa lượng dinh dưỡng cây hấp thu từ nguồn tái sử dụng và M_{TSD}) là chỉ tiêu nông học thứ ba, cần được báo cáo song song nhưng không gộp vào C để tránh nhầm lẫn giữa tái sử dụng và hấp thu. Ví dụ minh họa với số liệu giả định: một trang trại có dòng thải chứa 100 kg N/năm, hiệu suất thu hồi bằng tách khí amoniac $\eta_{TH} = 0,45$ (gần với mức loại bỏ NH_4^+-N của hệ thống tách khí đơn giản; Finzi et al., 2024) và 80% lượng amôn sunfat thu được, được bón lại cho lúa ($\eta_{TSD} = 0,80$), khi đó C = 0,45 × 0,80 × 100 = 36%; nếu cây hấp thu 50% lượng N bón ($\eta_{HT} = 0,50$) thì chỉ khoảng 18 kg N thực sự quay lại sinh khối cây trồng. C là chỉ số

khái niệm ở mức đề xuất; tính hợp lệ cần được kiểm chứng bằng dữ liệu cân bằng dinh dưỡng thực tế ở cấp trang trại.

Nhìn tổng thể, một mô hình kinh tế tuần hoàn khả thi cho chất thải chăn nuôi được trình bày dưới dạng sơ đồ dòng vật chất N (Hình 3): chất thải chăn nuôi được đưa vào phân hủy yếm khí để thu khí sinh học làm năng lượng; nước thải biogas sau đó được sử dụng làm phân bón cho lúa và cây trồng cạn theo liều lượng tính trên đạm amôn, kết hợp quản lý nước để hạn chế phát thải; phần dinh dưỡng dư được thu hồi thêm qua tách khí amoniac hoặc thực vật thủy sinh, tạo ra sản phẩm phân bón cô đặc quay lại đồng ruộng. Điểm mấu chốt để mô hình vận hành bền vững là sự đồng bộ giữa công nghệ phù hợp với quy mô nông hộ, quy trình kỹ thuật đơn giản dễ áp dụng, khung tiêu chuẩn – chính sách cho sản phẩm thu hồi, và liên kết tổ chức giữa các tác nhân trong chuỗi. Trên thực tế, một số mô hình đã được đề xuất và thử nghiệm ở quy mô nông hộ, ví dụ mô hình canh tác tích hợp hướng tới không phát thải cho hộ chăn nuôi bò ở vùng Bảy Núi (An Giang), trong đó nước thải chăn nuôi và sinh hoạt được xử lý bằng biogas rồi tái sử dụng cho trồng trọt, vừa giảm phát thải vừa tăng thu nhập hộ (Nhân và ctv., 2019).

Sơ đồ ở Hình 3 cũng chỉ ra các dòng thất thoát N chính (mũi tên nét đứt màu đỏ): bay hơi NH_3 và phát thải CH_4, N_2O khi lưu giữ phân (Liu et al., 2023); bay hơi NH_3 trong quá trình lưu trữ nước thải sau hầm và nước thải dư xả ra kênh rạch khi lượng phát sinh vượt nhu cầu bón; bay hơi NH_3, phát thải N_2O, CH_4, rửa trôi và chảy tràn N khi bón trên ruộng (Minamikawa et al., 2021) và phần N không được cây hấp thu tồn dư trong đất hoặc đi theo nước tháo. Để hạn chế các dòng thất thoát này, bốn điểm kiểm soát môi trường được đề xuất tại các khâu tương ứng của sơ đồ: (i) thời gian lưu và xử lý giảm mầm bệnh ở khâu lưu trữ/xử lý sau hầm; (ii) giám sát kim loại nặng, tồn dư kháng sinh và vi sinh vật chỉ thị trước khi bón; (iii) định liều theo NH_4^+-N bằng bộ thử nhanh khi bón cho ruộng và (iv) quản lý nước (AWD, rút nước nhiều lần) để hạn chế phát thải và thất thoát. Trong phương trình, η_{TH} phản ánh phần N được giữ lại ở dạng sử dụng được sau các khâu hầm ủ, lưu trữ và thu hồi/cô đặc (sau khi trừ các dòng thất thoát ở những khâu này), η_{TSD} tương ứng với dòng bón lại cho ruộng (bón trực tiếp hoặc phân bón cô đặc), còn η_{HT} là phần N được cây hấp thu tại ruộng.



Hình 3. Sơ đồ dòng vật chất N trong khung kinh tế tuần hoàn tái sử dụng dinh dưỡng từ nước thải biogas

Ghi chú: Mũi tên liền: dòng chính, mũi tên nét đứt màu xanh lá và tím: dòng tuần hoàn, mũi tên nét đứt màu đỏ: dòng thất thoát.

7. KẾT LUẬN

Bằng chứng hiện có tại ĐBSCL, chủ yếu từ thí nghiệm chậu/mesocosm và một số ít thử nghiệm đồng ruộng, cho thấy nước thải biogas là nguồn dinh dưỡng hữu cơ tiềm năng: khi định liều theo NH_4^+-N, nước thải biogas có thể thay thế một phần hoặc toàn bộ phân đạm hóa học cho lúa và cây trồng cạn trong điều kiện thí nghiệm mà vẫn đạt năng suất tương đương, đồng thời kết hợp quản lý nước giúp giảm

phát thải CH_4 và N_2O. Tuy nhiên, kết quả này chưa thể suy rộng thành khả năng thay thế hoàn toàn phân đạm ở quy mô sản xuất, do bằng chứng đồng ruộng, nhiều vụ và quy mô nông hộ còn hạn chế; thể tích bón lớn làm tăng chi phí vận chuyển và lao động; dữ liệu định lượng về mầm bệnh, kim loại nặng và tồn dư kháng sinh còn thiếu và khung pháp lý cho sản phẩm dinh dưỡng thu hồi chưa hoàn thiện. Các ưu tiên nghiên cứu – ứng dụng gồm: (i) thử nghiệm đồng ruộng nhiều vụ tại nông hộ với quy trình định liều theo NH_4^+-N; (ii) đánh giá rủi ro an toàn sinh học và xây dựng quy trình xử lý sau hầm; (iii) cô đặc – thu hồi N (tách khí amoniac) cho trang trại tập trung kèm phân tích chi phí – lợi ích và (iv) kiểm chứng chỉ số tuần hoàn dinh dưỡng đề xuất bằng cân bằng dinh dưỡng cấp trang trại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn. (2022). *Thông tư số 28/2022/TT-BNNPTNT ban hành Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về nước thải chăn nuôi sử dụng cho cây trồng (QCVN 01-195:2022/BNNPTNT)*. https://luatvietnam.vn/nong-nghiep/quy-chuan-viet-nam-qcvn-01-195-2022-bnnptnt-240165-d3.html.

Chính phủ. (2019). *Nghị định số 84/2019/NĐ-CP quy định về quản lý phân bón*. https://vanban.chinhphu.vn/?pageid=27160&docid=198327.

Dadrasnia, A., de Bona Muñoz, I., Hernández Yáñez, E., Uald Lamkaddam, I., Mora, M., Ponsá, S., Ahmed, M., Llenas Argelaguet, L., Williams, P. M., & Oatley-Radcliffe, D. L. (2021). Sustainable nutrient recovery from animal manure: A review of current best practice technology and the potential for freeze concentration. *Journal of Cleaner Production*, *315*, 128106. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128106

Finzi, A., Ferrari, O., Riva, E., & Provolo, G. (2024). Nitrogen recovery from intensive livestock farms using a simplified ammonia stripping process. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *8*, 1406962. https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1406962

Giang, N. T. H., Chính, T. C., Anh, L. Đ., & Ân, N. T. (2024). Thách thức trong tái sử dụng nước thải chăn nuôi cho trồng trọt tại Việt Nam nhằm tiếp cận kinh tế tuần hoàn. Trong Kỷ yếu Hội thảo khoa học quốc gia *Môi trường nông nghiệp, nông thôn và Phát triển bền vững.* Nhà xuất bản Học viện Nông nghiệp Việt Nam, Hà Nội.

Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, *26*(2), 91–108. https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x

Huynh, C. K., Minamikawa, K., Nguyen, N. V. C., Nguyen, C. H., & Nguyen, C. V. (2022). Effects of cattle biogas effluent application and irrigation regimes on rice growth and yield: A mesocosm experiment. *Japan Agricultural Research Quarterly*, *56*(4), 341–348. https://doi.org/10.6090/jarq.56.341

Huynh, C. K., Le, T. N. N., Tran, S. N., Nguyen, Q. K., & Huynh, V. T. (2026). Use of ammonium-N-based biogas effluent application for sustainable rice production and improved nutrient recycling. *Journal of Ecological Engineering*, *27*(9), 344–352. https://doi.org/10.12911/22998993/222240

Huynh, C. K., & Nguyen, C. T. (2024). Optimizing biogas production from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) through varied volatile solids loading rates in batch anaerobic digestion. *International Journal of Renewable Energy Research*, *14*(2), 216–223. https://doi.org/10.20508/ijrer.v14i2.14045.g8883

Khánh, H. C., Hosen, Y., Lộc, N. X., Nam, T. S., & Chiếm, N. H. (2019). Sử dụng nước thải biogas với nguyên liệu nạp phân bò tưới lúa trồng trên đất phù sa. *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, *55*(CĐ: Môi trường), 142–148. https://doi.org/10.22144/ctu.jsi.2019.122

Le, T. T. H., Takahashi, Y., Nomura, H., Son, C. T., Kusudo, T., & Yabe, M. (2020). Manure management and pollution levels of contract and non-contract livestock farming in Vietnam. *Science of the Total Environment*, *710*, 136200. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136200

Liu, W., Yao, B., Xu, Y., Dai, S., Wang, M., Ma, J., Ye, Z., & Liu, D. (2024). Biogas digestate as a potential nitrogen source enhances soil fertility, rice nitrogen metabolism and yield. *Field Crops Research*, *318*, 109568. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109568

Liu, Y., Tang, R., Li, L., Zheng, G., Wang, J., Wang, G., Bao, Z., Yin, Z., Li, G., & Yuan, J. (2023). A global meta-analysis of greenhouse gas emissions and carbon and nitrogen losses during livestock manure composting: Influencing factors and mitigation strategies. *Science of the Total Environment*, *885*, 163900. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163900

Lu, Y., Xiao, Q., Wu, S., Yuan, H., Gao, T., Cai, T., Wu, X., Ma, Y., & Liao, X. (2024). Partial substitution of nitrogen fertilizer with biogas slurry increases rice yield and fertilizer utilization

efficiency, enhancing soil fertility in the Chaohu Lake Basin. *Plants*, *13*(15), 2024. https://doi.org/10.3390/plants13152024

Minamikawa, K., Huynh, C. K., Hosen, Y., Tran, S. N., & Nguyen, C. H. (2020). Variable-timing, fixed-rate application of cattle biogas effluent to rice using a leaf color chart: Microcosm experiments in Vietnam. *Soil Science and Plant Nutrition*, *66*(1), 225–234. https://doi.org/10.1080/00380768.2019.1665970

Minamikawa, K., Huynh, C. K., Uno, K., Tran, S. N., & Nguyen, C. H. (2021). Cattle biogas effluent application with multiple drainage mitigates methane and nitrous oxide emissions from a lowland rice paddy in the Mekong Delta, Vietnam. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *319*, 107568. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107568

Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*, *12*(3), 242–257. https://doi.org/10.1002/elsc.201100085

Nam, T. S., Chiếm, N. H., Thảo, H. V., Khánh, H. C., Thuận, N. C., Danh, Đ. T., Dũng, D. T., Izumi, T., Maeda, K., & Công, N. V. (2022). Sản xuất khí sinh học từ các nguồn chất thải khác nhau ở Đồng bằng sông Cửu Long. *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, *58*(Số chuyên đề SDMD), 239–251. https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2022.210

Nguyen, C. T., & Huynh, C. K. (2023). Semi-continuous anaerobic digestion of water hyacinth with different volatile solid levels for biogas production – A mesocosm experiment. *Journal of Ecological Engineering*, *24*(2), 230–237. https://doi.org/10.12911/22998993/156622

Nguyen, C. T., Huynh, C. K., & Nguyen, V. C. (2024). Pollutant removal in wastewater from anaerobic digesters by water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) at both still-water and running-water stages. *Journal of Ecological Engineering*, *25*(6), 80–89. https://doi.org/10.12911/22998993/186943

Nguyen, C. T., & Nguyen, V. C. (2022). Removal of ammonium and nitrate in water by an aquatic plant: Water lettuce (*Pistia stratiotes* L.). *Applied Ecology and Environmental Research*, *20*(6), 5095–5102. https://doi.org/10.15666/aeer/2006_50955102

Nhân, L. T., Huyền, Đ. T. T., Hải, L. T., Vĩ, L. Q., Hiệu, T. T., Thảo, N. T. P., Tín, P. Đ., & Thảo, V. T. L. T. (2019). Đề xuất mô hình sản xuất canh tác tích hợp hướng tới không phát thải cho hộ chăn nuôi: áp dụng điển hình cho hộ chăn nuôi bò ở khu vực Bảy Núi. *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ – Khoa học Trái đất và Môi trường*, *3*(2), 75–84. https://doi.org/10.32508/stdjsee.v3i2.481

Nkoa, R. (2014). Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *34*(2), 473–492. https://doi.org/10.1007/s13593-013-0196-z

Nữ, P. V., Izumi, T., & Nga, B. T. (2015). Sử dụng nước thải túi ủ biogas có vật liệu nạp là phân heo và bèo tai tượng (*Pistia stratiotes*) canh tác cây ớt (*Capsicum frutescens* L.). *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ,* (CĐ Môi trường), 35-40. https://ctujsvn.ctu.edu.vn/index.php/ctujsvn/article/view/2359

Quốc hội. (2018). *Luật số 31/2018/QH14 của Quốc hội: Luật trồng trọt*. https://vanban.chinhphu.vn/?pageid=27160&docid=206097&classid=1&typegroupid=3

Reuland, G., Sigurnjak, I., Dekker, H., Michels, E., & Meers, E. (2021). The potential of digestate and the liquid fraction of digestate as chemical fertiliser substitutes under the RENURE criteria. *Agronomy*, *11*(7), 1374. https://doi.org/10.3390/agronomy11071374

Rodriguez-Alegre, R., Zapata-Jiménez, J., Pérez Megías, L., Andecochea Saiz, C., Sanchis, S., Pérez-Moya, M., García-Montaño, J., & You, X. (2024). Pilot scale on-site demonstration and seasonality assessment of nitrogen recovery and water reclamation from pig's slurry liquid fraction. *Journal of Environmental Management*, *370*, 122597. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122597

Sajjad, M., Huang, Q., Khan, S., Nawab, J., Khan, M. A., Ali, A., Ullah, R., Kubar, A. A., Guo, G., & Yaseen, M. (2024). Methods for the removal and recovery of nitrogen and phosphorus nutrients from animal waste: A critical review. *Ecological Frontiers*, *44*(1), 2–14.

Saju, A., Van De Sande, T., Ryan, D., Karpinska, A., Sigurnjak, I., Dowling, D. N., Germaine, K., Kakouli-Duarte, T., & Meers, E. (2023). Exploring the short-term in-field performance of Recovered Nitrogen from Manure (RENURE) materials to substitute synthetic nitrogen fertilisers. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, *5*, 100043. https://doi.org/10.1016/j.clcb.2023.100043

Šatvar Vrbančić, M., Petek, M., Lazarević, B., Jukić, Ž., Meers, E., & Čoga, L. (2024). Solid and liquid fraction of digestate as an alternative mineral nitrogen source: Two-year field research in Croatia. *Agriculture*, *14*(8), 1243. https://doi.org/10.3390/agriculture14081243

Sigurnjak, I., Vaneeckhaute, C., Michels, E., Ryckaert, B., Ghekiere, G., Tack, F. M. G., & Meers, E. (2017). Fertilizer performance of liquid

fraction of digestate as synthetic nitrogen substitute in silage maize cultivation for three consecutive years. *Science of the Total Environment*, *599–600*, 1885–1894. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.120

Smit, M. F., Vonk, W. J., & Hijbeek, R. (2026). A variable residue: Meta-analysis on the nitrogen fertilizer replacement value of anaerobic digestate. *European Journal of Agronomy*, *172*, 127845. https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127845

Thao, H. V., Tarao, M., Takada, H., Nishizawa, T., Nam, T. S., Cong, N. V., & Xuan, D. T. (2024). Methanotrophic inoculation reduces methane emissions from rice cultivation supplied with pig-livestock biogas digestive effluent. *Agronomy*, *14*(6), 1140. https://doi.org/10.3390/agronomy14061140

Thảo, N. P., Thạnh, T. Đ., Nga, B. T., & Khôi, C. M. (2017a). Nghiên cứu khả năng cung cấp đạm của nước thải biogas cho đất. *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ, (CĐ Môi trường*), 36–44. https://doi.org/10.22144/ctu.jsi.2017.051

Thảo, N. P., Anh, N. T. L., Vân, T. T. T., & Nga, B. T. (2017b). Nghiên cứu sử dụng nước thải biogas trồng bắp (*Zea mays* L.). *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ, (53)*, 53–64. https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2017.141

Châu, T. A. T., Luân, Đ. T., Xã, L. T., Thảo, N. P., & Nghĩa, N. K. (2022). Đánh giá chất lượng của hai dạng phân bón hữu cơ lỏng và rắn được tạo ra từ nước thải hầm ủ biogas. *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ, 58*(6B), 106–116. https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2022.249

Uwizeye, A., de Boer, I. J. M., Opio, C. I., Schulte, R. P. O., Falcucci, A., Tempio, G., Teillard, F., Casu, F., Rulli, M., Galloway, J. N., Leip, A., Erisman, J. W., Robinson, T. P., Steinfeld, H., & Gerber, P. J. (2020). Nitrogen emissions along global livestock supply chains. *Nature Food*, *1*(7), 437–446. https://doi.org/10.1038/s43016-020-0113-y

Vingerhoets, R., Spiller, M., Schoumans, O., Vlaeminck, S. E., Buysse, J., & Meers, E. (2025). Economic potential for nutrient recovery from manure in the European Union. *Resources, Conservation and Recycling*, *215*, 108079. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108079

Vu, Q. D., de Neergaard, A., Tran, T. D., Hoang, Q. Q., Ly, P., Tran, T. M., & Jensen, L. S. (2015). Manure, biogas digestate and crop residue management affects methane gas emissions from rice paddy fields on Vietnamese smallholder livestock farms. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *103*(3), 329–346. https://doi.org/10.1007/s10705-015-9746-x

Wang, Z., Sanusi, I. A., Wang, J., Ye, X., Kana, E. B. G., Olaniran, A. O., & Shao, H. (2023). Developments and prospects of farmland application of biogas slurry in China—A review. *Microorganisms*, *11*(11), 2675. https://doi.org/10.3390/microorganisms11112675