

ĐÁNH GIÁ HIỆN TRẠNG VÀ GIẢI PHÁP ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ PHÂN HỦY Kừ KHÍ TRONG XỬ LÝ CHẤT THẢI RẮN PHÂN HỦY SINH HỌC Ở VIỆT NAM

Phạm Văn Định^{a,*}, Đinh Viết Cường^a, Phạm Văn Tới^a

^aKhoa Kỹ thuật Môi trường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 28/10/2024, Sửa xong 05/01/2025, Chấp nhận đăng 20/01/2025

Tóm tắt

Ứng dụng công nghệ phân hủy kỵ khí (PHKK) trong xử lý thành phần phân hủy sinh học trong chất thải rắn sinh hoạt (CTRSHHC) đã được chứng minh thực tiễn là mang lại lợi ích kép về năng lượng và môi trường. Trong những năm gần đây chủ đề này cũng đã thu hút được nhiều các nghiên cứu trong nước, nhưng chưa có một đánh giá cụ thể nào thể hiện được những thành tựu chung đạt được trong lĩnh vực nghiên cứu này ở Việt Nam. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá hiện trạng nghiên cứu ứng dụng trong nước. Nhìn chung nghiên cứu trong nước mặc dù bước đầu đã tiến hành chuyển hóa được CTRSHHC thành khí biogas, tuy nhiên, những nghiên cứu mang tính chất đổi mới còn hạn chế mà chủ yếu sử dụng công nghệ được phát triển cách đây nhiều năm. Về mặt ứng dụng tuy đã có một số dự án triển khai theo công nghệ PHKK thu hồi năng lượng, nhưng vẫn đang trong quá trình hoàn tất chưa có nhà máy nào ghi nhận đã đi vào hoạt động. Hơn nữa việc nghiên cứu trong nước chưa làm chủ được công nghệ sẽ khiến quá trình vận hành các nhà máy sẽ gặp nhiều khó khăn. Về đặc trưng phát thải và đặc tính lý hóa của thành phần CTRSHHC ở Việt Nam không có quá nhiều sự khác biệt so với thế giới. Do đó, từ những bài học Quốc tế, nghiên cứu cũng đưa ra một số giải pháp phù hợp với việc áp dụng công nghệ này ở Việt Nam.

Từ khóa: phân hủy kỵ khí; chất thải rắn sinh hoạt; xử lý rác thải; biogas; quản lý chất thải.

ASSESSMENT OF CURRENT STATUS AND SOLUTIONS FOR APPLYING ANAEROBIC DIGESTION OF BIODEGRADABLE SOLID WASTE IN VIETNAM

Abstract

The application of anaerobic digestion (AD) technology in the treatment of biodegradable municipal solid waste (BMSW) has been proven to bring dual benefits in terms of energy and environment. In recent years, this topic has also attracted many domestic studies, but there has not been a specific assessment showing the general achievements in this research field in Vietnam. Therefore, this study was conducted to assess the current status of domestic application research. In general, although domestic research has initially converted BMSW into biogas, innovative research is still limited and mainly uses technology developed many years ago. In terms of application, although there have been a number of projects implemented using AD technology to recover energy, they are still in the process of completion and no factory has been recorded as being put into operation. Furthermore, domestic research has not mastered the technology, which will make the operation of factories face many difficulties. Regarding the emission characteristics and physical and chemical properties of BMSW components in Vietnam, there are few differences compared to the world. Therefore, from international lessons, the study also offers some solutions to suit the application of this technology in Vietnam.

Keywords: anaerobic digestion; municipal solid waste; solid waste treatment; biogas; solid waste management.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(1V\)-04](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(1V)-04) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: dinghpv@huce.edu.vn (Định, P. V.)

1. Giới thiệu

Phân hủy kỵ khí (PHKK) là một chuỗi các quá trình mà vi sinh vật phân hủy cơ chất hữu cơ trong điều kiện không có oxy, bao gồm tuần tự các bước thủy phân, lên men axit, lên men acetate và chuyển hóa metan. Thông qua quá trình PHKK, thành phần hữu cơ có khả năng phân hủy sinh học trong chất thải rắn sinh hoạt (CTRSHHC) có thể chuyển hóa chủ yếu thành khí CH_4 và CO_2 [1]. Như vậy, CTRSHHC trước đây được coi là nguồn gây ô nhiễm phức tạp bởi đặc tính dễ phân hủy trong điều kiện môi trường thông thường, thì nay lại được coi là một nguồn tài nguyên năng lượng dồi dào [1, 2]. Do đó, ứng dụng PHKK trong xử lý CTRSHHC ngày càng trở thành mắt xích quan trọng trong một hệ thống quản lý chất thải bền vững, không những giúp con người đối mặt với những gánh nặng về ô nhiễm môi trường mà còn mang lại nguồn năng lượng đáng kể.

Với sự hỗ trợ của Khoa học kỹ thuật, các nước châu Âu đã đi đầu trong việc ứng dụng PHKK chuyển hóa chất thải rắn có khả năng phân hủy sinh học thành năng lượng, họ tạo ra nguồn năng lượng đáng kể từ loại rác thải này. Báo cáo gần đây của Hiệp hội Khí sinh học Châu Âu (EBA) nêu rõ số lượng nhà máy PHKK mới đã tăng đáng kể từ 6227 vào năm 2009 đến 17439 vào năm 2016 [3]. Trong đó, Đức là nước đi đầu trong lĩnh vực sản xuất điện từ biogas chất thải với công suất 12.500 Gwh năm. Bên cạnh các nước châu Âu thì Mỹ cũng đóng góp một tỷ trọng đáng kể trong việc sử dụng năng lượng biogas với 181 nhà máy phân hủy kỵ khí thành phần hữu cơ chất thải rắn sinh hoạt (tổng công suất 780.000 tấn/năm, 2015) [1]. Ngược lại, mặc dù Nhật Bản cũng là một quốc gia phát triển có tiềm năng công nghệ cao, nhưng do tập trung vào việc xử lý rác thải bằng phương pháp đốt nên việc ứng dụng công nghệ biogas vẫn còn chậm: từ một nhà máy biogas cỡ lớn vào năm 2004 (150 Nm^3 -khí/giờ) lên đến sáu nhà máy vào năm 2009 (tổng công suất 2.400 Nm^3 -khí/giờ) [1]. Trong số các nước đang phát triển, Trung Quốc được coi là quốc gia có nhiều hệ thống Biogas nhất thế giới, tuy nhiên, các hệ thống này chủ yếu có quy mô nhỏ áp dụng cho chất thải chăn nuôi. Cũng tương tự như Trung Quốc, Việt Nam mặc dù được hỗ trợ bởi các tổ chức phi chính phủ trong phát triển các hệ thống Biogas, nhưng mới chỉ phổ biến các hệ thống biogas quy mô nhỏ với nguồn chất thải chăn nuôi [4].

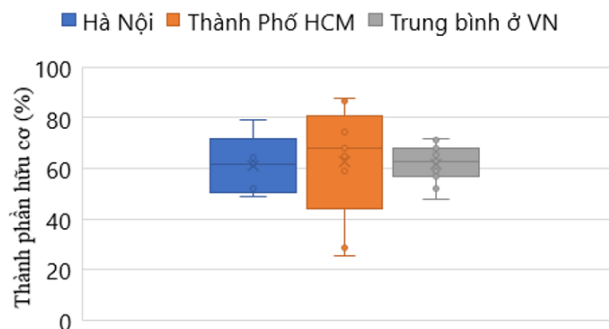
Theo thống kê, tổng khối lượng CTRSH phát sinh ở Việt Nam là khoảng 44.400 tấn/ngđ vào năm 2011, lượng chất thải này đã nhanh chóng tăng lên 64.658 tấn/ngđ năm 2019, trong đó thành phần phân hủy sinh học (CTRSHHC) chiếm 50-70% [5]. Với tốc độ gia tăng như hiện tại (4,8%/năm), lượng rác này có thể lên tới hơn 100 nghìn tấn/ngđ vào năm 2030. Như vậy tiềm năng tận dụng nguồn rác thải này là rất lớn. Nguyen và cs. [6] ước tính tiềm năng thu hồi năng lượng có thể đạt 45 Gwh/ngày vào năm 2025, có thể thay thế 2.4-4.1% nhu cầu dùng điện của Việt Nam. Thực tế, thông qua sự hỗ trợ của nhiều tổ chức khác nhau, việc ứng dụng PHKK thu hồi năng lượng từ chất thải chăn nuôi ở Việt Nam đã sớm bắt đầu từ những năm 80s với nguồn chất thải nông nghiệp [4, 7]. So với chất thải chăn nuôi thì CTRSHHC có hàm lượng chất rắn và khối lượng cao hơn rất nhiều [4, 8]. Do đó, tiềm năng thu hồi năng lượng là rất lớn. Cũng vì vậy, vấn đề ứng dụng PHKK xử lý CTRSHHC cũng dần thu hút được cộng đồng nghiên cứu trong nước. Các nghiên cứu gần đây có thể kể đến như: khảo sát ảnh hưởng của tải lượng hữu cơ đến quá trình phân hủy kỵ khí hai pha CTRSHHC [9]; Nghiên cứu đồng phân hủy chất thải rắn hữu cơ và nước thải sinh hoạt bằng công nghệ màng sinh học kỵ khí kết hợp thu hồi năng lượng [10]; Đánh giá ảnh hưởng của điều kiện pH đến quá trình phân hủy kỵ khí hai pha CTRSHHC [11]; Nghiên cứu xử lý chất thải rắn hữu cơ bằng phương pháp sinh học kỵ khí trong điều kiện Việt Nam [12]; 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 [13]. Tuy nhiên, chưa có một đánh giá nào khái quát được tình hình nghiên cứu trong nước cũng như những định hướng tiềm năng có thể mở ra trong lĩnh vực này nhằm đáp ứng được nhu cầu thực tiễn về năng lượng và môi trường.

Nghiên cứu này nhằm đánh giá hoạt động nghiên cứu và triển khai ứng dụng thực tế trong việc ứng

dụng công nghệ PHKK để xử lý CTRSH hữu cơ đồng thời thu hồi năng lượng ở Việt Nam. Nghiên cứu được chia làm các nội dung mang tính nối tiếp gồm: xem xét đặc trưng thành phần CTRSHHC ở Việt Nam; đánh giá hiện trạng nghiên cứu; đánh giá hiện trạng ứng dụng trong nước; các giải pháp tích hợp công nghệ PHKK có tiềm năng áp dụng thực tế ở Việt Nam và cuối cùng là kết luận.

2. Đặc điểm thành phần phân hủy sinh học trong CTRSH ở Việt Nam

Thành phần hữu cơ có khả năng phân hủy sinh học trong CTRSH ở Việt Nam luôn chiếm tỉ trọng rất cao so với các thành phần rác thải khác như rác tái chế, rác có khả năng cháy và rác không thể tái chế/không thể đốt. Theo thống kê từ 2017 trở lại đây, thành phần này chiếm 47,9-71,8% (trung bình 61,8%) khối lượng rác phát sinh [5]. Một số các thành phố lớn như Hà Nội hay Thành phố Hồ Chí Minh cũng có tỉ lệ thành phần rác hữu cơ tương tự so với mặt bằng chung cả nước, xem Hình 1. Tỉ lệ thành phần hữu cơ trong rác thải sinh hoạt ở Việt Nam lớn hơn so với mặt bằng chung các nước có thu nhập thấp đến trung bình trên thế giới (50%) và cũng lớn hơn đáng kể so với mặt bằng chung của các nước phát triển có thu nhập cao (32%) [2]. Điều này phần nào phản ánh thói quen tiêu dùng thực phẩm của người Việt Nam lớn hơn so với mặt bằng chung của thế giới [14]. Tỉ lệ phát sinh rác thải theo đầu người của Việt Nam là 0,68 kg/người/ngđ năm 2019 (tương đương 0,59 kg/người/ngđ năm 2016) có thể so sánh với giá trị ở các nước có thu nhập trung bình thấp (0,61 kg/người/ngđ, 2016). Giá trị này thấp hơn so với giá trị bình quân các nước trên thế giới (0,74 kg/người/ngđ, 2016) và thấp hơn nhiều so với các nước có thu nhập cao (1,57 kg/người/ngđ, 2016) [2, 5]. Điều này phản ánh nhóm các nước thu nhập cao có nhiều nhu cầu sử dụng vật chất hơn và do đó thải ra nhiều chất thải hơn. Thực tế, khối lượng rác phát sinh theo đầu người ở các nước trên thế giới được chứng minh là có mối tương quan thuận với thu nhập bình quân đầu người, thấp ở các nước chậm phát triển và cao ở các nước phát triển [2]. Từ thành phần và khối lượng rác thải, khối lượng rác CTRSHHC phát sinh theo đầu người ở Việt Nam cao hơn so với nhóm các nước đang phát triển và có thể so sánh với mặt bằng chung thế giới.



Hình 1. Thành phần hữu cơ trong rác thải sinh hoạt, thông tin tổng hợp từ [5, 15]

Thành phần CTRSH có khả năng phân hủy sinh học mới được quan tâm nghiên cứu ở Việt Nam trong những năm gần đây. Đặc tính lý hóa của thành phần này đóng vai trò quan trọng quyết định đến công nghệ và các thông số vận hành hệ thống xử lý [4, 8]. Tuy nhiên, các nghiên cứu ở Việt Nam hầu hết mới chỉ đề cập đến tỉ lệ thành phần hữu cơ trong CTRSH, còn thông tin về đặc tính lý hóa của thành phần này còn rất hạn chế. Một số nghiên cứu mới đây tiết lộ đặc tính hóa lý CTRSHHC ở một số địa phương được thể hiện trong Bảng 1. Thông tin về đặc tính thành phần chất thải này ở các quốc gia khác trên thế giới được thể hiện trong Nghiên cứu của Campuzano và González-Martínez [8] (giá trị trung bình được thể hiện trong Bảng 1). Thành phần CTRSHHC ở Việt Nam có độ ẩm cao hơn so với giá trị trung bình các nước trên thế giới có thể được giải thích bởi thói quen sinh hoạt của người Việt Nam thường xuyên sử dụng thực phẩm có nhiều nước như Bún, Phở, hoa quả, ... [14].

Hàm lượng chất dễ bay hơi (VS/TS) trong CTRSHHC ở Việt Nam lại có xu hướng thấp hơn. Kết quả này có thể được giải thích bởi rác thải hữu cơ ở Việt Nam đang được thải bỏ chung cùng các loại rác thải khác nên khi phân loại không thể tách hoàn toàn các thành phần tro như đất, cát, ... Chỉ số quan trọng liên quan đến cân bằng dinh dưỡng như C/N, Nito thì tương đối tương đồng và nằm trong phạm vi cho quá trình xử lý sinh học CTRSHHC.

Bảng 1. Đặc tính hóa lý của CTRSHHC ở Việt Nam và trên Thế giới

STT	Đặc tính	Thế Giới [8]	Việt Nam				
			Long An [16]	Hà Nội [9]	Hà Nội [17]	TP. HCM [18]	Trung bình
1	Độ ẩm	72,8±7,6	76,8	72,6	87,7	79,9	79,3
2	Tổng chất rắn TS (%)	27,2±7,6	23,2	27,4	12,3	20,1	20,8
3	VS/TS (%)	84,6±9,9	68,3	66,8	95,9	82,0	78,3
4	TN (%TS)	2,9±0,6	2,1	2,8	6,2	1,2	3,1
5	TP (%TS)	1,7±2,5	ND	ND	ND	2,4	ND
6	C/N	16,1	17,0	16,3	ND	ND	16,7

Ghi chú: ND – Không có sẵn dữ liệu.

Cũng chính vì có đặc tính độ ẩm rất cao, vượt ra ngoài điều kiện tối ưu của quá trình composting (50%), nên việc trực tiếp sử dụng CTRSHHC cho quá trình làm phân compost hầu như thất bại. Một số nghiên cứu phối trộn CTRSHHC với các vật liệu có độ ẩm thấp như chấu, rơm, mùn cưa, ... [16, 19]. Rõ ràng rằng những nghiên cứu này khó có thể triển khai với quy mô lớn trên thực tế do hạn chế nguồn cung chất trộn so với lượng lớn CTRSHHC được tạo ra. Đây cũng có thể là nguyên nhân mà Việt Nam sau nhiều năm áp dụng vẫn không thể đưa các nhà máy composting vào hoạt động. Trong khi đó công nghệ PHKK không bị giới hạn về độ ẩm của cơ chất, phù hợp hơn so với làm phân compost [1].

3. Hiện trạng nghiên cứu và ứng dụng ở Việt Nam

3.1. Hiện trạng nghiên cứu

Trong những năm gần đây, việc nghiên cứu về công nghệ phân hủy kỵ khí để xử lý chất thải có khả năng phân hủy sinh học ở Việt Nam đã bắt đầu nhận được sự quan tâm của các nhà nghiên cứu. Nguyen [6] tính toán năng lượng thu hồi biogas thông qua mô hình Buswell dựa trên thành phần vật lý và khối lượng rác thải phát sinh ở Việt Nam. Kết quả cho thấy, tiềm năng thu hồi năng lượng có thể đạt 45 Gwh/ngày vào năm 2025. Nhóm tác giả cũng cho thấy nguồn năng lượng này có thể thay thế 2.4-4.1% nhu cầu dùng điện của Việt Nam. Theo đó, PHKK rõ ràng là một công nghệ đầy hứa hẹn với nhu cầu xử lý môi trường đồng thời thu hồi năng lượng. Tuy nhiên, một yếu tố đầu vào quan trọng của mô hình là thành phần hóa học của chất thải hữu cơ được nhóm tác giả tham khảo không phải là giá trị đặc trưng của Việt Nam. Hơn nữa các vấn đề về tiêu tốn năng lượng trong hệ thống như bơm vận chuyển, máy khuấy, tỏa nhiệt bề phản ứng, ... đã không được đề cập cụ thể.

Về mặt nghiên cứu thực nghiệm, công nghệ PHKK cũng đã bắt đầu thu hút được cộng đồng nghiên cứu trong nước. Đinh Quang Hưng và cs. [20] nghiên cứu tiềm năng thu khí sinh học từ quá trình phân hủy yếm khí rác thải thực phẩm trên địa bàn thành phố Hà Nội. Nghiên cứu sử dụng quy trình phản ứng dạng mẻ để tập trung đánh giá khả năng thu hồi năng lượng từ rau muống và rau cải trong điều kiện khác nhau về nhiệt độ. Sản lượng khí ở điều kiện ấm (37 °C) cao hơn nhiều (1,6-2,0 lần) so với điều kiện nhiệt độ phòng. Sản lượng khí tốt nhất đạt 224 ml-biogas/g-VS. Trung và Hường [13] sử dụng nguồn cơ chất là chất thải chăn nuôi lợn và rác hữu cơ trong sinh hoạt nông thôn để thu hồi khí

mêtan và phân hữu cơ. Nghiên cứu này sử dụng bể phản ứng khối tích 1 m^3 và áp dụng quy trình vận hành theo mẻ. Thí nghiệm thực hiện với các tỉ lệ khối lượng chất thải chăn nuôi / rác thải hữu cơ lần lượt là 100:0, 90:10 và 85:15. Sản lượng khí sinh học thu được nằm trong khoảng 107,31-108,40 ml/g-CODt với hàm lượng CH_4 trong khoảng 64-65%. Nghiên cứu cũng cho thấy sản phẩm sau quá trình PHKK có thành phần tương đương phân hữu cơ vi sinh được quy định trong TCVN 7185:2002. Gần đây cũng đã có một số Luận án Tiến sĩ về công nghệ PHKK sử dụng cơ chất nền là CTRSHHC. Ví dụ, Thảo [17] nghiên cứu quá trình xử lý kết hợp bùn bể tự hoại và rác hữu cơ bằng phương pháp sinh học kỵ khí. Nghiên cứu ban đầu được tiến hành ở quy mô phòng thí nghiệm với bể khuấy trộn liên tục để lựa chọn tỉ lệ phối trộn cơ chất tối ưu, đồng thời so sánh điều kiện lên men nóng và lên men ấm. Kết quả cho thấy điều kiện lên men nóng cho hiệu suất cao hơn 0,56-11% về sản lượng khí so với điều kiện lên men ấm và tỉ lệ phối trộn bùn/chất thải thực phẩm theo khối lượng ướt tối ưu là 9:1 (tương ứng tỉ lệ phối trộn theo COD 1:1), khi đó hiệu suất xử lý theo COD đạt 58-75% với sản lượng khí đạt 264-278 Nml/g-COD. Tỉ lệ này được áp dụng cho thí nghiệm mô hình hiện trường dung tích 1 m^3 với tải lượng hữu cơ thay đổi trong khoảng 0,5-2 kg-COD/ m^3 /ngđ. Kết quả trong nghiên cứu này cho thấy tải lượng hữu cơ tối ưu đạt 1,5 kg-COD/ m^3 /ngđ. Một nghiên cứu gần tương tự, Hoàng [21] khảo sát xử lý phân bùn bể tự hoại và chất thải hữu cơ bằng phương pháp sinh học trong điều kiện Việt Nam. Nghiên cứu sử dụng bể phản ứng dạng mẻ. Trong nghiên cứu này, tác giả đã chỉ ra tỉ lệ phối trộn giữa phân bùn bể tự hoại với rác thải hữu cơ từ chợ là 3:1 về khối lượng. Tải lượng hữu cơ phù hợp 1,5 kg-VS/ m^3 .ngđ. Cả hai nghiên cứu này đều chỉ đạt được giá trị tải lượng hữu cơ còn khá khiêm tốn (tải lượng hữu cơ thấp). Ở một nghiên cứu khác của tác giả Hà [12] có tiêu đề “xử lý chất thải rắn hữu cơ bằng phương pháp sinh học kỵ khí trong điều kiện Việt Nam”. Mục đích chính của tác giả là thu hồi phân mùn hữu cơ. CTRSHHC được phân hủy trong bể phản ứng với các loại chế phẩm vi sinh khác nhau trong điều kiện nhiệt độ môi trường, sau khoảng 40 ngày, phần mùn thu được đem thử nghiệm trồng rau. Kết quả cho thấy, phân mùn sau quá trình PHKK hoàn toàn phù hợp cho mục đích sử dụng trong nông nghiệp nhằm cung cấp dinh dưỡng và cải tạo đất. Về mặt nghiên cứu bài bản và tiến bộ, gần đây nhất có thể kể đến Luận án “Nghiên cứu đồng phân hủy chất thải rắn hữu cơ và nước thải sinh hoạt bằng công nghệ màng sinh học kỵ khí (AnMBR) kết hợp thu hồi năng lượng” của tác giả Hà [10]. Trong nghiên cứu này, tác giả đã pha loãng cơ chất là CTRSHHC với nước thải sinh hoạt với nồng độ 5 g/L sau đó bơm vào bể phản ứng AnMBR trong điều kiện nhiệt ấm. Nghiên cứu cũng chỉ đạt được hiệu suất tốt ở tải lượng 2 g-COD/L/ngđ (OLR thấp). Nhìn chung các nghiên cứu này sử dụng các mô phản ứng còn đơn giản và các khảo nghiệm với số lượng nhỏ trong thời gian ngắn. Tiến bộ hơn, Ha và cs. [22] sử dụng bể phản ứng kỵ khí dòng chảy ngược với quy trình vận hành liên tục để khảo sát khả năng chuyển hóa sinh học kỵ khí của hỗn hợp chất thải nhà bếp và bùn thải đô thị trong điều kiện nhiệt ấm. Nước thải sau quá trình phân hủy kỵ khí được lọc qua màng siêu vi (UF). Kết quả cho thấy 80% chất hữu cơ (theo COD) có thể được loại bỏ với tải lượng hữu cơ trong khoảng 3-5 kg-COD/ m^3 .ngđ. Tuy nhiên, cũng giống như các nghiên cứu trước đây, nghiên cứu này mới dừng lại ở công nghệ PHKK một giai đoạn (các phản ứng xảy ra trong cùng một bể phản ứng) vốn đã được nghiên cứu nhiều trên thế giới trong nhiều năm trở về trước.

Gần đây nhóm nghiên cứu ở Trường Đại học Xây dựng Hà Nội do TS. Phạm Văn Định làm trưởng nhóm đã có hướng tiếp cận mới hơn khi sử dụng mô hình công nghệ PHKK phân pha để xử lý CTRSHHC [9, 11, 23]. Ban đầu cơ chất được nghiền và lên men trong bể phản ứng khuấy trộn liên tục, sau đó phần không thủy phân được tách ra, dung dịch axit thu được tiếp tục bơm vào bể mêtan (bể phản ứng dòng chảy ngược). Toàn bộ hệ thống được duy trì trong điều kiện nhiệt ấm (35-37 °C). Hệ thống đạt điều kiện vận hành tối ưu khi cơ chất được lên men ở pH 6.5. Với tải lượng 1,6 kg-COD/ m^3 /ngđ sản lượng khí đạt 485 l/g-VS với hàm lượng 71,6% CH_4 [11]. Khi tăng tải lượng lên

thì sản lượng khí có xu hướng giảm và hệ thống có thể đạt tải lượng 9,5 kg-COD/m³/ngđ. Tải lượng 6,45 kg-COD/m³/ngđ được coi là điểm tới hạn về tải lượng với sản lượng khí 358,6 ml/g-COD (70% CH₄) [9]. Nhóm nghiên cứu còn có một bước tiến xa hơn khi sử dụng bùn dạng hạt kết hợp với bùn lơ lửng trong bể phản ứng metan, đây chính là cơ sở để hệ thống có thể hoạt động đạt được hiệu suất tốt ở điều kiện tải lượng cao [23].

Ngoài trừ nhóm nghiên cứu ở Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, hầu hết các nghiên cứu trong nước khác vẫn đang sử dụng công nghệ phân hủy kỵ khí không phân pha (các bước PHKK cùng diễn ra trong một bể phản ứng). Đây cũng chính là nguyên nhân mà các nghiên cứu chỉ dừng lại ở mức độ tải lượng hữu cơ thấp (1,5 kg-TS/m³/ngđ) [23]. Mặc dù đã thu hút được nhiều đề tài, dự án hay luận án nghiên cứu về ứng dụng PHKK xử lý CTRSHHC, song những tiến bộ trong công nghệ đạt được còn rất hạn chế so với những hiện trạng công nghệ đang được nghiên cứu trên thế giới được giới thiệu trong nghiên cứu của Dinh [1].

3.2. Hiện trạng ứng dụng ở Việt Nam

Công nghệ phân hủy kỵ khí ở Việt Nam thực tế đã được ứng dụng từ lâu trong việc thu hồi biogas từ chất thải chăn nuôi. Học tập sự thành công trong mô hình phát triển năng lượng của Trung Quốc (1960s), Việt Nam đã xây dựng và vận hành thành công công trình Biogas đầu tiên vào cuối 1979. Với sự hỗ trợ của chính phủ và các tổ chức như SNV (tổ chức phát triển Hà Lan), Ngân hàng phát triển Châu Á (ADB) và Ngân hàng Thế giới (WB), tới 2015 Việt Nam đã lắp đặt được 450,000 công trình Biogas [24]. Các bể phân hủy này chính là dạng công nghệ phân hủy kỵ khí ướt một pha với tải lượng thấp (OLR = 0,5-1,6 kg-VS/m³/ngđ), có đặc điểm là cấu tạo đơn giản, nhưng thời gian lưu nước lớn (40 ngày), sản lượng khí gas thấp, chỉ thích hợp với chất thải chăn nuôi và quy mô nhỏ [4]. Hiện nay các công trình Biogas này được tích hợp xử lý thêm chất thải rắn hữu cơ phát sinh tại nguồn (hộ gia đình và cơ sở chăn nuôi) [7].

Về thực tế triển khai ứng dụng PHKK xử lý CTRSHHC trong nước hiện nay rất ít thông tin, một số Dự án được thông tin truyền thông được liệt kê trong Bảng 2. Điển hình có thể kể đến như nhà máy phân loại, xử lý rác thải, sản xuất điện và phân bón khoáng hữu cơ do Công ty TNHH phát triển dự án Việt Nam là chủ đầu tư, với tổng mức đầu tư hơn 53.835.000 Euro (1.380 tỷ đồng), với công suất thiết kế 245 tấn CTRSH và 60 tấn phế phẩm nông nghiệp mỗi ngày. Được khởi công từ tháng 8/2016, hệ thống phân loại hoàn thành và đi vào hoạt động từ tháng 3/2018. Tổng công suất phát điện thiết kế từ chất thải hữu cơ là 3MW (trong tổng 10MW phát điện), lượng phân bón khoáng hữu cơ ước tính có thể đạt 10.000 tấn/năm. Đây là công nghệ chưa từng có tại Việt Nam nói riêng, cũng như Châu Á nói chung. Tuy nhiên thực tế thì vì nhiều lý do, cho đến nay hợp phần biogas của nhà máy vẫn chưa thực sự hoạt động. Một ví dụ khác là ứng dụng công nghệ PHKK xử lý rác công suất 200-300 tấn/ngày tại An Giang để thu hồi biogas phát điện và sản xuất phân bón từ xử lý rác. Khí biogas thu hồi để phát điện dự tính 1.551 MWh/năm và sử dụng mùn hữu cơ từ việc xử lý rác có thể sản xuất phân bón 3.860 tấn/năm; thu hồi khí biogas cung cấp chất đốt và phát điện cho trại chăn nuôi heo Vĩnh Khánh quy mô 2.000 con heo, cung cấp 100% nhu cầu năng lượng điện cho trại chăn nuôi hàng năm với lượng điện 151.200 kwh/năm [17]. Toàn bộ các Dự án này chưa được ghi nhận trong trạng thái hoạt động tốt. Như vậy, công nghệ máy móc có thể nhập khẩu, nhưng mấu chốt vẫn ở nguồn lực về con người chưa nắm bắt và hiểu biết về công nghệ để có thể vận hành.

4. Giải pháp ứng dụng

Hiện nay các vấn đề Môi trường do rác thải sinh hoạt chủ yếu diễn ra ở khu vực có các Bãi chôn lấp (BCL) mà nguyên nhân chủ yếu đến từ nước rỉ rác [5]. Nước rỉ rác không chỉ phát sinh trong quá trình vận hành mà còn kéo dài nhiều năm sau khi đóng bãi. Dựa vào thời gian đã chôn lấp có thể chia

Bảng 2. Thống kê các trạm xử lý CTRSHHC sử dụng công nghệ PHKK

STT	Nhà máy/loại hình công nghệ	Công suất thiết kế	Hiện trạng	TLTK
1	Nhà máy xử lý CTRSH theo phương pháp ủ khô kỵ khí. Địa điểm: huyện Kim Sơn, tỉnh Ninh Bình	4 tấn/ngày	Đang bỏ hoang	[12]
2	Nhà máy phân loại xử lý rác thải, sản xuất Biogas và phân bón khoảng hữu cơ của công ty TNHH phát triển dự án Việt Nam. Địa điểm: Bồ Trạch, Quảng Bình Công nghệ của Đức. Diện tích 9 ha.	245 tấn CTRSH/ngày + 60 tấn phế phẩm nông nghiệp/ngày	- Đã vận hành thử nghiệm dây chuyền phân loại rác công suất 190 tấn/ngày. - Đang hoàn thiện 3 mô-đun: lên men CTRSHHC để phát điện.	(*)
3	Nhà máy xử lý rác thải tinh hoạt của công ty TNHH Môi trường xanh miền Trung. Địa điểm: Quảng Trạch, Quảng Bình	200 tấn/ngày	Chưa triển khai	[12]
4	Nhà máy xử lý CTRSH tại Xã Cẩm Hà, Quảng Nam	100-120 tấn/ngày	Đang triển khai xây dựng	
5	Nhà máy xử lý rác An Giang	200-300 tấn/ngđ	Không rõ tình trạng hoạt động	[17]

Ghi chú (*): Tác giả trực tiếp tham quan.

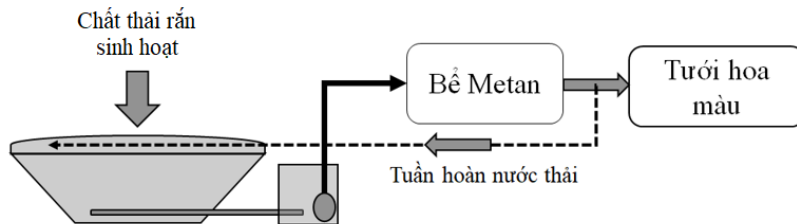
làm ba nhóm gồm nhóm I là BCL mới (thời gian chôn lấp < 5 năm, COD > 10 g/L, pH < 6,5), nhóm II là BCL đang phân hủy (thời gian chôn lấp trong khoảng 5 đến 10 năm, COD ~ 4÷10 g/L, pH 6,5-7,5) và nhóm III là BCL cũ với thời gian chôn lấp trên 10 năm (COD < 4 g/L; pH > 7,5) [25]. Khối lượng phát sinh lớn và khó xử lý luôn là rào cản lớn đối với việc hạn chế ô nhiễm Môi trường từ nước rỉ rác. Nhiều quá trình lý hóa được áp dụng, tuy nhiên với chi phí xử lý cao nên không phù hợp với điều kiện kinh tế của các nước đang phát triển như Việt Nam. Nhiều nghiên cứu đã thành công trong việc chứng minh sử dụng bể phản ứng kỵ khí để xử lý chất hữu cơ trong nước rỉ rác, đồng thời thu hồi năng lượng [26–28]. Trong trường hợp này các bể phản ứng kỵ khí cao tải dạng ướt được sử dụng như UASB (Bể phản ứng kỵ khí dòng chảy ngược), EGSB (Bể phản ứng với lớp bùn hạt giãn nở), ..., với hiệu suất loại bỏ chất hữu cơ tính theo COD dao động trong khoảng 71-99%. Nhìn chung hiệu quả xử lý phụ thuộc nhiều vào các điều kiện vận hành (xem Bảng 3). Để tăng cường hiệu suất xử lý (giảm thời gian hoạt động của BCL và tăng lượng khí sinh học), dòng nước thải có thể được tuần hoàn trở lại BCL [29]. Khi đó, mô hình kết hợp BCL với bể PHKK được thể hiện ở Hình 2. Lúc này BCL trở thành bãi chôn lấp sinh học, khí biogas cũng sẽ phát sinh trong BCL. Do đó, BCL cần bố trí giếng thu khí kết nối vào phần thu khí của bể metan.

Sau quá trình PHKK, dòng cơ chất cạn kiệt các-bon hữu cơ đồng thời giàu amoni nên có thể được dùng làm sản phẩm phân tươi. Hiện chưa có quy định cụ thể về chất lượng phân tươi dạng này. Tuy nhiên, có thể lấy căn cứ vào quy định sản phẩm phân bón của EU và UK để giới hạn lượng dùng: quy định liều lượng sử dụng nitơ của EU là không quá 170 kg-N/ha/năm còn UK là không quá 250 kg-N/ha/năm [30]. Gần đây, Gregory Reuland 2021 Reuland [30] có đề xuất tiêu chuẩn RENURE cho phân tươi từ quá trình phân hủy kỵ khí gồm ba tiêu chuẩn : (i) tỷ lệ nitơ khoáng trên tổng nitơ là 90%,

tỷ lệ tổng cacbon hữu cơ trên tổng nitơ < 3 (TOC:TN < 3); (ii) giới hạn là 300 mg đồng (Cu)/kg và 800 mg Zn/kg.

Bảng 3. Ứng dụng bể Metan xử lý nước rỉ rác, [25]

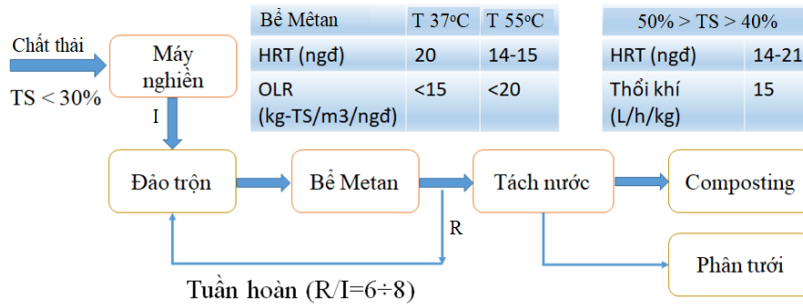
STT	Hàm lượng COD nước rỉ rác (g/L)	Loại bể phản ứng	Điều kiện vận hành	Hiệu suất loại bỏ COD (%)	Ref.
1	40 g/L	UASB	OLR 18,2 kg-COD/m ³ /ngđ HRT 2.4 ngđ; Nhiệt độ 37 °C	89,0	[26]
2	6,6-8,6 g/L	UASB	OLR 15.8 kg-COD/m ³ /ngđ HRT 0,44 ngđ; Nhiệt độ 37 °C	96,0	[27]
3	92.3 g/L	Bể lọc kỵ khí	OLR 7,1 kg-COD/m ³ /ngđ HRT 13 ngđ; Nhiệt độ 21-22 °C	86,0	[31]
4	23 g/L	Bể khuấy trộn liên tục	OLR 1,3 kg-COD/m ³ /ngđ HRT 15 ngđ; Nhiệt độ 35 °C	91,3	[28]
5	2 g/L	EGSB	OLR 23,6 kg-COD/m ³ /ngđ HRT 1,9 ngđ; Nhiệt độ 35 °C	80,0	[32]
6	2 g/L	UASB	OLR 2,0 kg-COD/m ³ /ngđ HRT 1 ngđ; Nhiệt độ 37 °C	93,0	[33]



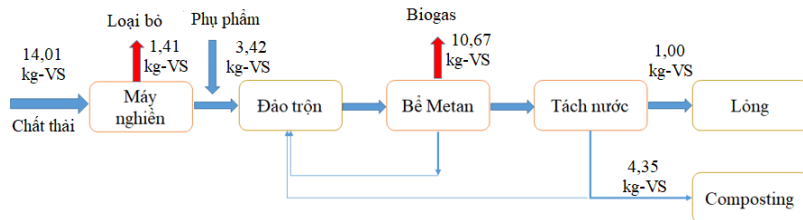
Hình 2. Sơ đồ kết hợp bể Metan và công trình BCL sẵn có để xử lý thành phần hữu cơ

Hiện nay Việt Nam đang bắt đầu triển khai thực hiện luật Môi trường 2020. Theo đó rác thải hữu cơ phải được phân loại tại nguồn và đem đi xử lý riêng. Thành phần hữu cơ của chất thải rắn sinh hoạt có độ ẩm cao (> 65%) nên không phù hợp với quá trình đốt cháy. Ngược lại, thành phần rác này có hàm lượng VS cao, phù hợp với các quá trình xử lý sinh học như composting hay PHKK. Nếu sử dụng trực tiếp quá trình composting, chi phí điện năng là rất lớn cùng với thời gian lưu chứa kéo dài (6÷8 tuần) [34]. Thay vào đó, giải pháp xử lý hiện đang được áp dụng tại một số nước phát triển như Đức được thể hiện trong Hình 3. Phần CTRHC (TS < 30%) trước tiên được đưa vào máy nghiền làm giảm kích thước cơ chất (< 4 cm). Sau đó, nó được trộn với nguồn vi sinh trước khi đưa vào bể Mêtan. Bể Mêtan có thể được duy trì ở điều kiện nhiệt ẩm (37 °C, HRT 20 ngđ) hoặc nhiệt nóng (55 °C, HRT 14÷15 ngđ). Tải lượng hữu cơ có thể đạt 10-15 kg-TS/m³/ngđ ở điều kiện nhiệt ẩm và 15-20 kg-TS/m³/ngđ với điều kiện nhiệt nóng. Sản phẩm dư thừa sau PHKK với đặc điểm có mật độ vi sinh cao, đang trong trạng thái tăng trưởng tốt. Do đó, nó được tuần hoàn trở lại trộn với cơ chất đầu vào với tỉ lệ 6÷8 lần [1, 3]. CTRSHHC có chứa lượng lớn các chất có cấu trúc lignocellulose/hemicellulose khó phân hủy sinh học, thành phần này vẫn còn tồn tại sau PHKK [35]. Thực tế chỉ có khoảng 36% khối lượng chất rắn chuyển hóa thành biogas, phần lớn cơ chất vẫn còn lại sau quá trình PHKK [1, 4].

Lượng cơ chất dư thừa này được chia làm hai phần có đặc tính khác nhau là rắn và lỏng. Phần lỏng thì giàu amoni còn phần rắn thì có cấu trúc xơ nên ổn định. Do đó, mỗi tấn chất thải không chỉ mang lại 200 kWh điện năng, mà còn tạo ra 0,3-0,5 tấn phân compost và 300-500 L phân tươi [1].

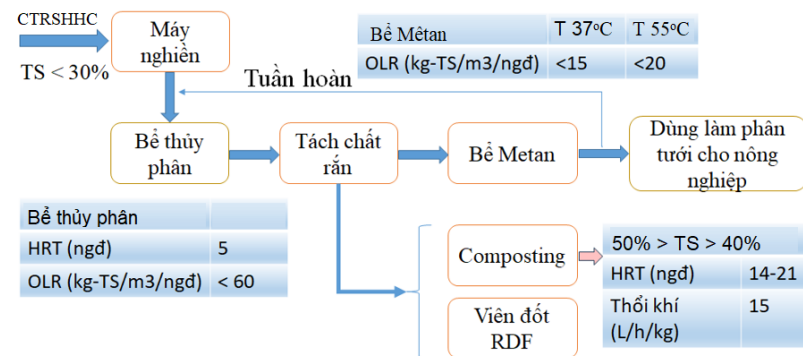


Hình 3. Mô hình kết hợp PHKK không phân pha với quá trình ủ compost [1, 34, 36]



Hình 4. Dòng vật chất trong hệ thống PHKK ở Dongdaemun (Seul – Hàn Quốc) [37]

Với sơ đồ trên có thể thấy việc đưa vào bể Metan cả các chất khó PHKK khiến bể phản ứng có kích thước lớn hơn so với yêu cầu. Do đó, Dinh và Fujiwara [23] đã sử dụng hệ thống phân pha và tách các thành phần không thủy phân trước khi dòng cơ chất được đẩy vào bể metan (xem Hình 5). Thành phần không thủy phân này có cấu trúc xơ có thể được đem tách nước ép thành viên đốt hoặc cũng có thể trải qua quá trình ủ hiếu khí để làm phân compost. Các mô hình tích hợp này vẫn đang trong quá trình nghiên cứu hoàn thiện nên thông tin còn hạn chế. Đây cũng là mô hình tiềm năng với CTRSHHC ở Việt Nam khi có tỉ lệ VS/TS thấp (nhiều thành phần tro).



Hình 5. Mô hình ứng dụng công nghệ PHKK phân pha [1, 23, 34, 36]

5. Kết luận

Về đặc trưng phát thải và đặc tính lý hóa của thành phần CTRSHHC ở Việt Nam không có quá nhiều sự khác biệt so với thế giới. Do đó, Việt Nam hoàn toàn có thể học tập áp dụng các mô hình

công nghệ đã được chứng minh là thành công trên thế giới, nhằm giúp đẩy nhanh quá trình áp dụng thực tiễn khi nghiên cứu trong nước còn hạn chế;

Ứng dụng công nghệ PHKK xử lý CTRSHHC ở Việt Nam mới bắt đầu được quan tâm nghiên cứu nên còn tồn tại những hạn chế như thiếu tính cập nhật công nghệ, các khảo nghiệm vẫn ở dạng đơn giản. Về mặt ứng dụng công nghệ này trong nước trên thực tế lại có thể đi trước các nghiên cứu do quá trình nhập khẩu công nghệ từ nước ngoài. Song nguồn lực nội sinh vẫn là nền tảng thiết yếu. Do đó cần có những định hướng để thúc đẩy hướng nghiên cứu này trong nước;

Một mình công nghệ PHKK không thể giải quyết hết các vấn đề liên quan đến CTRSHHC, do đó sử dụng các giải pháp tích hợp với quá trình composting hay đốt cháy được cho là có tính triệt để hơn. Chúng ta cũng có thể học hỏi các mô hình xử lý tích hợp này để áp dụng phù hợp với điều kiện của mình.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Xây dựng Hà Nội thông qua đề tài mã số 12-2024/KHXD.

Tài liệu tham khảo

- [1] Dinh, P. V., Fujiwara, T., Leu Tho, B., Toan, P. P. S., Hoang Minh, G. (2020). [A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends.](#) *Environmental Engineering Research*, 25(1):1–17.
- [2] Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F. (2018). [What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050.](#)
- [3] Zamri, M., Hasmady, S., Akhiar, A., Ideris, F., Shamsuddin, A., Mofijur, M., Fattah, I. R., Mahlia, T. (2021). [A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste.](#) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137:110637.
- [4] Abbasi, T., Tauseef, S., Abbasi, S. A. (2011). *Biogas energy*. Springer Science & Business Media, New York.
- [5] MONRE (2020). *Báo cáo hiện trạng môi trường quốc gia 2019, Chuyên đề Chất thải rắn sinh hoạt.*
- [6] 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.
- [7] Surendra, K., Takara, D., Hashimoto, A. G., Khanal, S. K. (2014). [Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges.](#) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31: 846–859.
- [8] Campuzano, R., González-Martínez, S. (2016). [Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review.](#) *Waste Management*, 54:3–12.
- [9] Định, P. V., Khánh, T. C., Bách, L. T., Liêm, T. T., Gia, N. P. (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 (TCKHCN XD)-ĐHXDHN*, 18(1V):174–182.
- [10] Hà, B. H. (2023). *Nghiên cứu đồng phân hủy chất thải rắn hữu cơ và nước thải sinh hoạt bằng công nghệ màng sinh học kỵ khí (AnMBR) kết hợp thu hồi năng lượng.* Luận án Tiến sĩ, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự.
- [11] 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 (TCKHCN XD)-ĐHXDHN*, 17(3V):166–173.
- [12] Hà, N. T. T. (2021). *Nghiên cứu xử lý chất thải rắn hữu cơ bằng phương pháp sinh học kỵ khí trong điều kiện Việt Nam.* Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.
- [13] Trung, Q., Hường, Đ. V. (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*, (1B):16.

- [14] Thomas, M. (2004). [Transitions in Taste in Vietnam and the Diaspora](#). *The Australian Journal of Anthropology*, 15(1):54–67.
- [15] Phuong, N. T. L., Yabar, H., Mizunoya, T. (2021). [Characterization and analysis of household solid waste composition to identify the optimal waste management method: A case study in Hanoi city, Vietnam](#). *Earth*, 2(04).
- [16] Huynh, T. L., Le, T. K. O., Wong, Y. J., Phan, C. T., Trinh, T. L. (2023). [Towards sustainable composting of source-separated biodegradable municipal solid waste-Insights from Long An Province, Vietnam](#). *Sustainability*, 15(17):13243.
- [17] Thảo, N. P. (2016). *Nghiên cứu quá trình xử lý kết hợp bùn bể tự hoại và rác hữu cơ bằng phương pháp sinh học kỵ khí ở chế độ lên men nóng*. Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Xây dựng.
- [18] Nguyen, P.-D., Tran, N.-S. T., Nguyen, T.-T., Dang, B.-T., Le, M.-T. T., Bui, X.-T., Mukai, F., Kobayashi, H., Ngo, H. H. (2021). [Long-term operation of the pilot scale two-stage anaerobic digestion of municipal biowaste in Ho Chi Minh City](#). *Science of the Total Environment*, 766:142562.
- [19] Duyên, Đ. H., Hưng, P. Q., Điệp, N. T., Thủy, Đ. T. (2023). [Hiện trạng quản lý và thử nghiệm xây dựng mô hình xử lý phân gà tạo nguyên liệu cho sản xuất phân bón hữu cơ tại tỉnh Phú Thọ](#). *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Lâm nghiệp*, 12(5):029–038.
- [20] Đình Quang Hưng, Mùi, Đ. T., Yến, N. V. H., Cúc, H. T., Chinh, B. V. (2018). Nghiên cứu tiềm năng thu khí sinh học (biogas) từ quá trình phân hủy yếm khí rác thải thực phẩm trên địa bàn thành phố Hà Nội. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ (Đại học Bách Khoa Hà Nội)*, 45.
- [21] Hoàng, L. P. (2018). *Nghiên cứu xử lý phân bùn bể tự hoại bằng phương pháp sinh học trong điều kiện Việt Nam*. Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Xây dựng.
- [22] Ha, B. H., Lam, H. T. U., Hung, N. X., Phuoc, D. N., Loc, N. Q., Thanh, B. X. (2021). [Application of the single-stage anaerobic membrane bioreactor \(1S-AnMBR\) for the co-digestion of organic kitchen waste and sewage](#). *VNUHCM Journal of Engineering and Technology*, 4(SI1):SI108–SI118.
- [23] Dinh, P. V., Fujiwara, T. (2023). [Application of an Integrated Granular and Suspended Sludge Methane Reactor for a Two-Stage Anaerobic Digestion System to Deal with Biodegradable Municipal Solid Waste](#). *Fermentation*, 9(8):720.
- [24] Nga, D. T., Duc, N. H., Truong, D. D., Khanitchaidecha, W., Thoa, L. T. (2021). Enhancing Capacity for Public Communities to use Renewable Energy (biogas) from Livestock Wastes. Technical report, Asia-Pacific Network for Global Change Research.
- [25] Anjum, M., Anees, M., Qadeer, S., Khalid, A., Kumar, R., Barakat, M. A. (2023). [A recent progress in the leachate pretreatment methods coupled with anaerobic digestion for enhanced biogas production: feasibility, trends, and techno-economic evaluation](#). *International Journal of Molecular Sciences*, 24(1): 763.
- [26] Lei, Y., Wei, L., Liu, T., Xiao, Y., Dang, Y., Sun, D., Holmes, D. E. (2018). [Magnetite enhances anaerobic digestion and methanogenesis of fresh leachate from a municipal solid waste incineration plant](#). *Chemical Engineering Journal*, 348:992–999.
- [27] Shin, H.-S., Han, S., Song, Y., Lee, C. (2001). [Performance of UASB reactor treating leachate from acidogenic fermenter in the two-phase anaerobic digestion of food waste](#). *Water Research*, 35(14): 3441–3447.
- [28] Gao, M., Yang, J., Liu, Y., Zhang, J., Li, J., Liu, Y., Wu, B., Gu, L. (2022). [Deep insights into the anaerobic co-digestion of waste activated sludge with concentrated leachate under different salinity stresses](#). *Science of the Total Environment*, 838:155922.
- [29] Wang, Q., Matsufuji, Y., Dong, L., Huang, Q., Hirano, F., Tanaka, A. (2006). [Research on leachate recirculation from different types of landfills](#). *Waste Management*, 26(8):815–824.
- [30] 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.
- [31] Saha, S., Hussain, A., Lee, J., Lee, E., Lee, H.-S. (2023). [An integrated leachate bed reactor-anaerobic membrane bioreactor system \(LBR-AnMBR\) for food waste stabilization and biogas recovery](#). *Chemosphere*, 311:137054.

- [32] Liu, Y., Lv, Y., Cheng, H., Zou, L., Li, Y.-Y., Liu, J. (2022). [High-efficiency anaerobic co-digestion of food waste and mature leachate using expanded granular sludge blanket reactor](#). *Bioresource Technology*, 362:127847.
- [33] Kawai, M., Kishi, M., Hamersley, M., Nagao, N., Hermana, J., Toda, T. (2012). [Biodegradability and methane productivity during anaerobic co-digestion of refractory leachate](#). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 72:46–51.
- [34] Li, M., Jia, X., Xi, B., Hou, J., Liu, D., Hao, Y. (2020). [Differentiated resourceful utilization of rural organic wastes](#). Springer.
- [35] Dinh, P., Fujiwara, T., Giang, H., Phu, S. P. (2019). [The fate of carbon in two-stage anaerobic digestion of vegetable waste](#). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 307(1):012019.
- [36] Peng, W., Pivato, A. (2019). [Sustainable Management of Digestate from the Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Food Waste Under the Concepts of Back to Earth Alternatives and Circular Economy](#). *Waste and Biomass Valorization*, 10(2):465–481.
- [37] Choi, C., Lee, C., Song, Y., Yoon, Y. (2016). [Plant \(Dongdaemun Environment and Resources Center\) Operation Case Study: Anaerobic digestion of food waste](#). *Journal of Korea Society of Waste Management*, 33(8):819–832.