

Phân tích phát thải khí nhà kính và hiệu quả năng lượng trong xử lý nước thải: tổng hợp nghiên cứu và đề xuất giải pháp bền vững

Huỳnh Anh Tuấn^{1*}, Giang Văn Tuyền¹

¹ Công ty TNHH đầu tư xây dựng và công nghệ môi trường Huỳnh Gia

¹ Trường Đại Học Xây Dựng Miền Tây

TỪ KHOÁ

Xử lý nước thải
Khí nhà kính
Đánh giá vòng đời
Phát triển bền vững
Phát thải

TÓM TẮT

Xử lý nước thải đóng vai trò quan trọng trong bảo vệ môi trường và phát triển bền vững, nhưng cũng là nguồn phát thải đáng kể khí nhà kính (GHG) như CO₂, CH₄ và N₂O, góp phần vào biến đổi khí hậu. Ngoài ra, vận hành các nhà máy xử lý nước thải đòi hỏi lượng năng lượng lớn, đặc biệt từ các quy trình sinh học như sục khí, gây áp lực lên tài nguyên năng lượng. Nghiên cứu này tổng hợp các phát hiện chính từ những nghiên cứu hiện có, tập trung vào phát thải GHG và hiệu quả năng lượng trong hệ thống xử lý nước thải.

Methane (CH₄) và Nitrous Oxide (N₂O) được xác định là các khí có tiềm năng gây hiệu ứng nhà kính cao, phát sinh từ các quy trình kỵ khí, nitrát hóa và khử nitrat. Các công nghệ tiên tiến như xử lý kỵ khí cải tiến, tái sử dụng khí sinh học, và sử dụng năng lượng tái tạo đã chứng minh hiệu quả trong việc giảm phát thải và tối ưu hóa năng lượng. Phương pháp đánh giá vòng đời (LCA) và mô hình hóa được áp dụng rộng rãi để cung cấp cái nhìn toàn diện về tác động môi trường.

Bài viết nhấn mạnh tầm quan trọng của việc chuẩn hóa phương pháp đánh giá, mở rộng nghiên cứu tại các nước đang phát triển và tích hợp công nghệ carbon-neutral vào thiết kế hệ thống nhằm hướng tới mục tiêu phát triển bền vững.

KEYWORDS

Wastewater treatment
Greenhouse gas
Life cycle assessment
Sustainable development
Emissions

ABSTRACT

Wastewater treatment plays a crucial role in environmental protection and sustainable development but is also a significant source of greenhouse gas (GHG) emissions, such as CO₂, CH₄, and N₂O, contributing to climate change. Additionally, operating wastewater treatment plants requires substantial energy, especially for biological processes like aeration, putting pressure on energy resources. This study synthesizes key findings from existing research, focusing on GHG emissions and energy efficiency in wastewater treatment systems.

Methane (CH₄) and Nitrous Oxide (N₂O) are identified as high-impact greenhouse gases, generated from anaerobic processes, nitrification, and denitrification. Advanced technologies, such as improved anaerobic treatment, biogas reuse, and the use of renewable energy, have demonstrated effectiveness in reducing emissions and optimizing energy use. Life Cycle Assessment (LCA) and modeling approaches are widely applied to provide a comprehensive view of environmental impacts.

The article emphasizes the importance of standardizing evaluation methods, expanding research in developing countries, and integrating carbon-neutral technologies into system design to achieve sustainable development goals.

1. Giới thiệu

Xử lý nước thải là một trong những lĩnh vực quan trọng nhất trong quản lý môi trường và phát triển bền vững. Khi quá trình đô thị hóa, công nghiệp hóa và tăng trưởng dân số gia tăng, lượng nước thải từ các khu vực dân cư, công nghiệp và nông nghiệp cũng tăng theo, gây áp lực lớn lên môi trường. Nếu không được xử lý hiệu quả, nước thải không chỉ gây ô nhiễm nguồn nước mà còn ảnh hưởng nghiêm

trọng đến sức khỏe con người, hệ sinh thái và chất lượng cuộc sống. Trong bối cảnh này, hệ thống xử lý nước thải đóng vai trò quan trọng nhằm bảo vệ môi trường và giảm thiểu các tác động tiêu cực.

Tuy nhiên, mặc dù xử lý nước thải mang lại nhiều lợi ích về môi trường, các nghiên cứu đã chỉ ra rằng các hệ thống này cũng có thể là nguồn phát thải đáng kể khí nhà kính (GHG - Greenhouse Gases), bao gồm CO₂, CH₄ (methane) và N₂O (nitrous oxide). Đây là những khí có tiềm năng cao gây hiệu ứng nhà kính và góp phần vào

*Liên hệ tác giả: anhtuan.18smt21@gmail.com

Nhận ngày 11/02/2025, sửa xong ngày 28/02/2025, chấp nhận đăng ngày 03/03/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2025.857>

biến đổi khí hậu toàn cầu. Ngoài ra, vận hành các nhà máy xử lý nước thải cũng đòi hỏi lượng lớn năng lượng, khiến ngành này trở thành một lĩnh vực tiêu thụ tài nguyên không nhỏ. Do đó, nhận thức rõ hơn về phát thải GHG và hiệu quả năng lượng trong xử lý nước thải không chỉ cần thiết để giảm thiểu tác động môi trường mà còn đóng góp vào các mục tiêu phát triển bền vững toàn cầu.

Phát thải khí nhà kính từ xử lý nước thải là một vấn đề phức tạp, chịu sự ảnh hưởng của nhiều yếu tố, bao gồm thiết kế hệ thống, điều kiện vận hành và các loại công nghệ được sử dụng. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng:

- Methane (CH_4): Phát sinh từ các quá trình kỵ khí (anaerobic digestion) hoặc từ nước thải lưu trữ lâu ngày trong điều kiện thiếu oxy. Đây là một loại khí nhà kính có tiềm năng gây hiệu ứng cao gấp 25 lần so với CO_2 trong vòng 100 năm.

- Nitrous Oxide (N_2O): Được hình thành trong quá trình nitrát hóa (nitrification) và khử nitrát (denitrification), N_2O có tiềm năng gây hiệu ứng nhà kính cao hơn đến 298 lần so với CO_2 . Các nghiên cứu gần đây đã nhấn mạnh rằng việc kiểm soát nồng độ oxy hòa tan (DO - Dissolved Oxygen) trong hệ thống xử lý sinh học có thể giảm phát thải N_2O đáng kể.

- Carbon Dioxide (CO_2): Phát thải từ tiêu thụ năng lượng liên quan đến vận hành các thiết bị như hệ thống sục khí, bơm và máy ép bùn. Mặc dù CO_2 từ nguồn sinh học (biogenic CO_2) không được coi là phát thải ròng, nhưng lượng CO_2 phát thải từ tiêu thụ năng lượng hóa thạch cần được giảm thiểu.

Các nhà máy xử lý nước thải hiện nay đóng góp đáng kể vào tiêu thụ năng lượng toàn cầu. Theo nghiên cứu của He (2019), hơn 80 % năng lượng tiêu thụ tại các nhà máy xử lý nước thải đến từ các quy trình xử lý sinh học, đặc biệt là các hệ thống sục khí. Các nhà máy tại các quốc gia đang phát triển thường gặp khó khăn trong việc cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng do hạn chế về công nghệ và nguồn lực tài chính. Tuy nhiên, các hệ thống tiên tiến như xử lý kỵ khí và tái sử dụng khí sinh học đã mở ra cơ hội để giảm thiểu chi phí năng lượng và thậm chí đạt được trạng thái tự cung cấp năng lượng.

Những thách thức kể trên cũng đồng thời tạo ra cơ hội để cải thiện hiệu quả môi trường và kinh tế của hệ thống xử lý nước thải. Các công nghệ tiên tiến như hệ thống xử lý kỵ khí cải tiến, tái sử dụng năng lượng tái tạo, và áp dụng mô hình hóa dự báo phát thải đã được chứng minh có tiềm năng lớn trong việc giảm thiểu phát thải khí nhà kính và nâng cao hiệu quả năng lượng. Ngoài ra, các phương pháp tiếp cận toàn diện như đánh giá vòng đời (LCA - Life Cycle Assessment) và mô hình hóa dấu chân carbon (carbon footprint modeling) đang ngày càng được sử dụng rộng rãi để cung cấp cái nhìn tổng thể về tác động môi trường của hệ thống xử lý nước thải.

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nhu cầu phát triển bền vững, việc nghiên cứu và giảm thiểu phát thải khí nhà kính từ hệ thống xử lý nước thải đã trở thành một lĩnh vực được quan tâm toàn cầu. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện nay vẫn tồn tại những hạn chế nhất định:

- Các nghiên cứu được thực hiện trên nhiều hệ thống, công nghệ và vùng địa lý khác nhau, dẫn đến sự không đồng nhất trong dữ liệu và phương pháp luận. Điều này gây khó khăn trong việc so sánh và tổng hợp kết quả.

- Thiếu dữ liệu từ các khu vực đang phát triển: Mặc dù các nước đang phát triển như Việt Nam, Ấn Độ và các quốc gia châu Phi thường có hệ thống xử lý không đạt chuẩn, nhưng số lượng nghiên cứu tại các khu vực này còn hạn chế. Điều này tạo ra khoảng trống lớn trong việc đánh giá phát thải GHG ở quy mô toàn cầu.

- Mặc dù các công cụ mô hình hóa như LCA và dự báo phát thải đã được áp dụng rộng rãi, nhưng việc chuẩn hóa và cải thiện độ chính xác của các mô hình này vẫn cần được tập trung.

Từ những hạn chế trên, việc tổng hợp các nghiên cứu hiện có là cần thiết để cung cấp một bức tranh toàn diện và có hệ thống về phát thải khí nhà kính và tiêu thụ năng lượng trong hệ thống xử lý nước thải. Điều này không chỉ giúp nâng cao nhận thức về các vấn đề môi trường mà còn hỗ trợ các nhà hoạch định chính sách và kỹ sư đưa ra các giải pháp hiệu quả.

Bài viết này nhằm mục đích tổng hợp và phân tích các nghiên cứu về phát thải khí nhà kính và hiệu quả năng lượng trong hệ thống xử lý nước thải, dựa trên danh mục tài liệu đã được thu thập. Bằng cách kết hợp phân tích định tính và định lượng, bài viết sẽ: Tổng hợp các phát hiện chính từ các nghiên cứu hiện có, bao gồm các yếu tố ảnh hưởng đến phát thải GHG và tiêu thụ năng lượng; Đánh giá các phương pháp luận và công cụ được sử dụng trong nghiên cứu, như LCA, mô hình hóa và phân tích vòng đời; Thảo luận sâu về tầm quan trọng của các phát hiện, đặc biệt là trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nhu cầu phát triển bền vững; Chỉ ra các điểm mạnh và hạn chế từ hệ thống nghiên cứu hiện tại, từ đó đề xuất các hướng nghiên cứu và ứng dụng trong tương lai.

Việc nghiên cứu và tổng hợp các phát hiện về phát thải khí nhà kính và hiệu quả năng lượng là cần thiết để đưa ra các giải pháp bền vững và hiệu quả. Bài viết này, bằng cách phân tích các nghiên cứu hiện tại, hy vọng sẽ đóng góp vào việc nâng cao nhận thức và hỗ trợ xây dựng các chính sách, chiến lược phù hợp nhằm giảm thiểu phát thải và hướng tới sự phát triển bền vững.

2. Tổng quan

2.1. Luận điểm chính từ các nghiên cứu được chọn lọc

2.1.1. Đánh giá phát thải khí nhà kính từ hệ thống xử lý nước thải

Phát thải khí nhà kính từ các quy trình xử lý: Bao và cộng sự [5, 11] so sánh các hệ thống xử lý như A/O (anoxic/oxic) và SBR (Sequencing Batch Reactor) ở Trung Quốc, nhận thấy rằng sự khác biệt trong thiết kế và vận hành có thể ảnh hưởng đáng kể đến phát thải CO_2 và N_2O ; Cheng [3] chỉ ra rằng các hệ thống xử lý không nối mạng (non-sewered sanitation systems) cũng có đóng góp không nhỏ vào phát thải GHG, thường bị xem nhẹ trong các nghiên cứu lớn; Koutsou và cộng sự [13] đánh giá phát thải khí nhà kính từ quản lý nước thải sinh hoạt tại Hy Lạp ở quy mô quốc gia, cho thấy sự quan

trọng của việc thiết lập các phương pháp kế toán cụ thể hơn cho từng quốc gia.

Nguồn phát thải chính: Methane (CH_4) và Nitrous Oxide (N_2O) là hai khí có tiềm năng gây hiệu ứng nhà kính cao so với CO_2 . Nghiên cứu của Oshita [24] và Daelman [25] tập trung vào các phát thải này từ quá trình xử lý kỵ khí và các quy trình sinh học khác; Bani Shahabadi [16, 30] phát triển mô hình dự đoán phát thải GHG dựa trên thiết kế hệ thống, cho thấy sự khác biệt về phát thải giữa các quy trình xử lý kỵ khí, hiếu khí và kết hợp.

2.1.2. Tối ưu hóa năng lượng và giảm phát thải

Hiệu quả năng lượng: Gu [6] và Panepinto [17] đã thảo luận về khả năng tự cung cấp năng lượng của các nhà máy xử lý nước thải, đặc biệt thông qua việc tái sử dụng khí sinh học từ bể kỵ khí; He [10] đánh giá tiêu thụ năng lượng tại các nhà máy xử lý nước thải ở Trung Quốc, trong khi Hao [18] đề xuất khả năng vận hành carbon-neutral bằng cách kết hợp công nghệ năng lượng tái tạo và tối ưu hóa quy trình.

Giảm thiểu phát thải khí nhà kính: Aghabalaee [7] và Mannina [29] tập trung vào các chiến lược thiết kế hợp lý để giảm cả phát thải GHG và tiêu thụ năng lượng, nhấn mạnh vai trò của công nghệ và mô hình hóa; Nghiên cứu của Zawartka [28] giới thiệu mô hình tính toán dấu chân carbon trong toàn bộ vòng đời hệ thống xử lý, từ thu gom, vận chuyển đến xử lý và thải bỏ.

2.1.3. Phương pháp luận và công cụ đánh giá

Phương pháp đánh giá vòng đời (LCA): Các nghiên cứu của Bui [1], Gallego-Schmid [22], và Venkatesh [12] áp dụng phương pháp LCA để đánh giá toàn diện tác động môi trường và phát thải GHG từ hệ thống xử lý nước thải; Singh [14] và Huang [19] tập trung vào việc chuẩn hóa các phương pháp kế toán năng lượng và khí nhà kính, cho thấy sự cần thiết của các công cụ đánh giá đồng nhất.

Mô hình hóa và dự báo: Các nghiên cứu sử dụng mô hình hóa như của Massara [9], Sun [27], và Asadi [20] cho thấy tiềm năng lớn trong việc dự đoán và giảm phát thải GHG thông qua tối ưu hóa vận hành và kiểm soát nồng độ DO (dissolved oxygen).

2.2. Phân tích và thảo luận

2.2.1. Tầm quan trọng của các phát hiện

Các nghiên cứu đã làm rõ mối liên hệ giữa thiết kế, vận hành hệ thống xử lý nước thải và lượng phát thải khí nhà kính. Điều này nhấn mạnh vai trò của việc tích hợp công nghệ và mô hình hóa trong việc giảm thiểu tác động môi trường.

Việc áp dụng phương pháp LCA không chỉ cung cấp bức tranh toàn diện về vòng đời hệ thống mà còn giúp xác định các điểm nóng về phát thải, từ đó đưa ra các giải pháp cải thiện.

Nghiên cứu về khả năng tự cung cấp năng lượng (Gu [6], Hao [18]) và vận hành carbon-neutral cho thấy tiềm năng lớn trong việc kết hợp tái sử dụng năng lượng với giảm phát thải.

2.2.2. Điểm mạnh của các tài liệu

Tính đa dạng: Các nghiên cứu bao quát nhiều khía cạnh, từ đánh giá phát thải, hiệu quả năng lượng đến các giải pháp công nghệ và mô hình hóa.

Tính thực tiễn: Một số nghiên cứu như của Bao [5, 11] và Aghabalaee [7] đi sâu vào các trường hợp cụ thể, cung cấp dữ liệu thực tế có giá trị cho các nhà hoạch định chính sách và kỹ sư.

2.2.3. Hạn chế và thiếu sót

Thiếu sự đồng nhất về phương pháp: Một số nghiên cứu sử dụng các phương pháp kế toán và mô hình khác nhau, dẫn đến khó khăn trong việc so sánh và tổng hợp kết quả.

Thiếu dữ liệu tại các nước đang phát triển: Nhiều nghiên cứu tập trung vào các khu vực phát triển (Châu Âu, Trung Quốc), trong khi các nước đang phát triển như Việt Nam (Bui [1]) còn thiếu dữ liệu đầy đủ và phương pháp đánh giá chuẩn hóa.

Chưa giải quyết triệt để vấn đề phát thải từ hệ thống không nối mạng: Như Cheng [3] đã chỉ ra, các hệ thống không nối mạng là nguồn phát thải đáng kể nhưng ít được chú ý.

3. Kết luận và hướng nghiên cứu tương lai

Các nghiên cứu đã chứng minh rằng xử lý nước thải không chỉ là một vấn đề môi trường mà còn gắn liền với mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính và tối ưu hóa năng lượng. Trong tương lai, cần tập trung vào:

- Chuẩn hóa các phương pháp đánh giá và mô hình hóa để tăng tính so sánh giữa các nghiên cứu.
- Mở rộng nghiên cứu tại các nước đang phát triển để đánh giá thực trạng phát thải và xây dựng chiến lược giảm thiểu phù hợp.
- Tích hợp công nghệ năng lượng tái tạo và các giải pháp carbon-neutral vào thiết kế và vận hành hệ thống xử lý nước thải.

4. Tài liệu tham khảo

- [1]. Hiep Nghia Bui và cộng sự (2022), *Life cycle assessment of paper mill wastewater: a case study in Viet Nam*.
- [2]. Vũ Thế Hưng và cộng sự (2024), *Nghiên cứu thiết lập mô hình số tính toán phát thải khí nhà kính từ hệ thống xử lý nước thải sinh hoạt*.
- [3]. Shikun Cheng và cộng sự (2022), *Nonnegligible greenhouse gas emissions from non-sewered sanitation systems: A meta-analysis*.
- [4]. Vanessa Parravicini và cộng sự (2022), *Evaluation of greenhouse gas emissions from the European urban wastewater sector, and options for their reduction*.

- [5]. Zhiyuan Bao, Shichang Sun, Dezhi Sun (2014), *Characteristics of direct CO₂ emissions in four full-scale wastewater treatment plants*.
- [6]. Yifan Gu và cộng sự (2017), *Energy self-sufficient wastewater treatment plants: feasibilities and challenges*.
- [7]. Vahid Aghabalaie và cộng sự (2023), *Minimizing greenhouse gases emissions and energy consumption from wastewater treatment plants via rational design and engineering strategies: A case study in Mashhad, Iran*.
- [8]. *The 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2006)*.
- [9]. Theoni Maria Massara và cộng sự (2017), *A review on nitrous oxide (N₂O) emissions during biological nutrient removal from municipal wastewater and sludge reject water*.
- [10]. Yan He và cộng sự (2019), *Assessment of energy consumption of municipal wastewater treatment plants in China*.
- [11]. Zhiyuan Bao, Shichang Sun, Dezhi Sun (2016), *Assessment of greenhouse gas emission from A/O and SBR wastewater treatment plants in Beijing, China*.
- [12]. G. Venkatesh, Johanne Hammervold, and Helge Brattebø (2009), *Combined MFA-LCA for Analysis of Wastewater Pipeline Networks: Case Study of Oslo, Norway*.
- [13]. Olga P. Koutsou, Georgia Gatidou, Athanasios S. Stasinakis (2018), *Domestic wastewater management in Greece: Greenhouse gas emissions estimation at country scale*.
- [14]. Pratima Singh và cộng sự (2018), *Energy and GHG accounting for wastewater infrastructure*.
- [15]. Hossein Nayeib và cộng sự (2019), *Estimating greenhouse gas emissions from Iran's domestic wastewater sector and modeling the emission scenarios by 2030*.
- [16]. M. Bani Shahabadi và cộng sự (2010), *Estimation of greenhouse gas generation in wastewater treatment plants – Model development and application*.
- [17]. Deborah Panepinto và cộng sự (2016), *Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy*.
- [18]. Xiaodi Hao và cộng sự (2015), *Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China*.
- [19]. Lailai Huang và cộng sự (2024), *Greenhouse gas accounting methodologies for wastewater treatment plants: A review*.
- [20]. Mohsen Asadi, Kerry Neil McPhedran (2021), *Greenhouse gas emission estimation from municipal wastewater using a hybrid approach of generative adversarial network and data-driven modelling*.
- [21]. Xavier Flores-Alsina, Lluís Corominas, Laura Snip, Peter A. Vanrolleghem (2011), *Including greenhouse gas emissions during benchmarking of wastewater treatment plant control strategies*.
- [22]. Alejandro Gallego-Schmid và cộng sự (2019), *Life cycle assessment of wastewater treatment in developing countries: A review*.
- [23]. D. Mamais và cộng sự (2015), *Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions*.
<https://doi.org/10.2166/wst.2014.521>.
- [24]. Kazuyuki Oshita và cộng sự (2014), *Methane and nitrous oxide emissions following anaerobic digestion of sludge in Japanese sewage treatment facilities*.
- [25]. Matthijs R.J. Daelman và cộng sự (2012), *Methane emission during municipal wastewater treatment*.
- [26]. Jinhe Wang và cộng sự (2011), *Methane emissions from a full-scale A/A/O wastewater treatment plant*.
- [27]. Shichang Sun và cộng sự (2017), *Reduction and prediction of N₂O emission from an Anoxic/Oxic wastewater treatment plant upon DO control and model simulation*.
- [28]. Paweł Zawartka và cộng sự (2020), *Model of Carbon Footprint Assessment for the Life Cycle of the System of Wastewater Collection, Transport and Treatment*.
- [29]. Giorgio Mannina và cộng sự (2016), *Greenhouse gases from wastewater treatment - A review of modelling tools*.
- [30]. M. Bani Shahabadi và cộng sự (2009), *Impact of process design on greenhouse gas (GHG) generation by wastewater treatment plants*.