

Kiểm toán khí nhà kính trong hệ thống thoát nước đô thị: Nghiên cứu điển hình lưu vực Lê Chân và Nhà máy xử lý nước thải Vĩnh Niệm, Hải Phòng

Greenhouse gas audit for urban drainage systems: A case study of Le Chan catchment and Vinh Niem wastewater treatment plant, Hai Phong

> **THS LÊ THU THỦY^{1,*}, GS.TS NGUYỄN VIỆT ANH², NGUYỄN VĂN QUỐC³**

¹Cục Kết cấu hạ tầng xây dựng, Bộ Xây dựng/NCS Trường Đại học Xây dựng Hà Nội; *Email: thuylethu.bxd@gmail.com

²Viện trưởng Viện Khoa học và Kỹ thuật Môi trường (IESE), Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

³HVCH, Viện Khoa học và Kỹ thuật Môi trường (IESE), Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

TÓM TẮT

Trong bối cảnh Việt Nam cam kết đạt phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050, việc kiểm kê và giảm phát thải khí nhà kính (KNK) trong các lĩnh vực kết cấu hạ tầng ngày càng được quan tâm trong đó có lĩnh vực thoát nước và xử lý nước thải (XLNT). Hệ thống thoát nước và xử lý nước thải đô thị không những tiêu thụ năng lượng lớn mà còn phát sinh khí methane (CH₄), khí nitrous oxide (N₂O) và khí carbon dioxide (CO₂) trong quá trình vận hành, do vậy là nguồn phát thải KNK rất đáng kể. Các nghiên cứu trên thế giới đã tính toán phát thải KNK ngành nước và vệ sinh chiếm khoảng từ 3 - 7% phát thải KNK trong đô thị [7].

Tuy nhiên, các nghiên cứu về kiểm toán KNK trong hệ thống thoát nước tại Việt Nam hiện còn hạn chế và chủ yếu tập trung vào nhà máy XLNT, chưa xem xét đầy đủ toàn bộ hệ thống thoát nước từ bể tự hoại, mạng lưới thu gom, hồ điều hòa, trạm bơm đến xử lý bùn.

Bài báo tổng hợp các quá trình phát thải KNK trong hệ thống thoát nước đô thị, phân tích cơ sở phương pháp tính toán theo IPCC, ECAM và cách tiếp cận theo từng công trình đơn vị (unit process), đồng thời tính toán thử nghiệm cho lưu vực Lê Chân và Nhà máy XLNT Vĩnh Niệm, Hải Phòng. Kết quả cho thấy công đoạn xử lý sinh học bùn hoạt tính và hệ thống thổi khí là khu vực tiêu thụ điện năng lớn nhất, chiếm khoảng 50 - 70% tổng điện năng nhà máy. Methane (CH₄) phát sinh từ bể tự hoại, mạng lưới thu gom nước thải và xử lý bùn là nguồn phát thải đáng kể trong toàn hệ thống. Chỉ số tiêu thụ năng lượng riêng (SEC) của nhà máy đạt khoảng 0,182 - 0,200 kWh/m³ (chưa bao gồm xử lý bùn như các nước), tương đối phù hợp với các giá trị tham chiếu (benchmark) quốc tế theo ENERWATER và ECAM. Nghiên cứu đề xuất hướng tiếp cận kiểm toán tích hợp năng lượng - khí nhà kính, kết hợp dữ liệu SCADA và tính toán chi tiết theo từng công trình nhằm nhận diện các điểm nóng phát thải và phục vụ mục tiêu Net Zero cho hệ thống thoát nước đô thị Việt Nam.

Từ khóa: Khí nhà kính; kiểm toán khí nhà kính; hệ thống thoát nước đô thị; methane (CH₄); IPCC; ECAM; nhà máy xử lý nước thải; CI = Cường độ phát thải khí nhà kính; tiêu thụ năng lượng riêng (SEC).

ABSTRACT

As Vietnam pursues its commitment to achieving net-zero greenhouse gas (GHG) emissions by 2050, the quantification and mitigation of GHG emissions from the water sector have become increasingly important. Urban drainage and wastewater treatment systems are not only significant energy consumers but also sources of methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O), and carbon dioxide (CO₂) emissions. Studies worldwide have estimated that GHG emissions from the water and sanitation sector account for 3-7% of GHG emissions in urban areas [7]. However, studies on GHG auditing in Vietnam have primarily focused on wastewater treatment plants (WWTPs), with limited consideration of the entire urban drainage system,

including septic tanks, sewer networks, retention ponds, pumping stations, and sludge management facilities. This study reviews GHG emission pathways within urban drainage systems and summarizes assessment methodologies based on the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring (ECAM) tool, and unit-process-based approaches. A case study was conducted for the Le Chan drainage basin and the Vinh Niem Wastewater Treatment Plant in Hai Phong City. The results indicate that activated sludge treatment and aeration systems are the largest electricity consumers, accounting for approximately 50 - 70% of total plant energy use. Methane emissions originating from septic tanks, sewer networks, and sludge treatment processes represent significant emission sources across the drainage system. The specific energy consumption (SEC) of the WWTP was estimated at 0.182 - 0.200 kWh/m³, which is comparable to international benchmark values reported by ENERWATER and ECAM. The study proposes an integrated energy-GHG auditing framework that combines SCADA-based operational data with detailed unit-process analysis to identify emission hotspots and prioritize mitigation measures. The proposed approach provides a practical basis for improving energy efficiency, reducing GHG emissions, and supporting the transition toward net-zero urban wastewater management systems in Vietnam. **Keywords:** greenhouse gas emissions; greenhouse gas audit; urban drainage system; wastewater treatment plant; methane (CH₄); IPCC; ECAM; greenhouse gas emission intensity (GI)

Keywords: Greenhouse gas emissions; greenhouse gas audit; urban drainage system; wastewater treatment plant; methane (CH₄); IPCC; ECAM; greenhouse gas emission intensity (GI); Specific Energy Consumption (SEC).

Danh mục chữ viết tắt

Ký hiệu	Thuật ngữ tiếng Anh	Diễn giải tiếng Việt
GHG	Greenhouse Gas	Khí nhà kính (KNK)
KTKNK	Greenhouse Gas Audit	Kiểm toán khí nhà kính
KTNL	Energy Audit	Kiểm toán năng lượng
WWTP	Wastewater Treatment Plant	Nhà máy xử lý nước thải (XLNT)
GTTC	benchmark	Giá trị tham chiếu
SEC	Specific Energy Consumption	Chỉ số tiêu thụ năng lượng riêng
CI	Carbon Intensity	Cường độ phát thải carbon
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	Ủy ban Liên Chính phủ về Biến đổi khí hậu
IWA	International Water Association	Hiệp hội Nước Quốc tế
ECAM	Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring Tool	Công cụ đánh giá và giám sát hiệu quả năng lượng và phát thải carbon
ENERWATER	Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Benchmarking of Wastewater Treatment Plants	Hệ thống đánh giá và so sánh chuẩn hiệu quả năng lượng và phát thải carbon của nhà máy xử lý nước thải
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	Hệ thống giám sát, điều khiển và thu thập dữ liệu
CAS	Conventional Activated Sludge	Công nghệ bùn hoạt tính truyền thống
BTH	Septic Tank	Bể tự hoại
BOD ₅	Biochemical Oxygen Demand	(Nhu cầu oxy sinh hóa 5 ngày)
COD	Chemical Oxygen Demand	(Nhu cầu oxy hóa học)
TN	Total Nitrogen	(Tổng nitơ)

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Biến đổi khí hậu và mục tiêu phát thải ròng bằng "0" đang trở thành định hướng quan trọng trong phát triển hạ tầng kỹ thuật đô thị bền vững. Tại Việt Nam, Luật Bảo vệ môi trường năm 2020, Nghị định số 06/2022/NĐ-CP về giảm nhẹ phát thải khí nhà kính và bảo vệ tầng ô-dôn, cùng Nghị định số 119/2025/NĐ-CP sửa đổi, bổ sung Nghị định số 06/2022/NĐ-CP đã tạo cơ sở pháp lý cho việc kiểm kê, quản lý và giảm phát thải KNK trong các lĩnh vực phát thải chính [3-5].

Trong lĩnh vực thoát nước và XLNT, các công trình từ bể tự hoại, tuyến cống thoát nước, trạm bơm, hồ điều hòa đến nhà máy XLNT và xử lý bùn vừa tiêu thụ nhiều năng lượng, vừa phát sinh KNK thông qua quá trình phân hủy chất hữu cơ, chuyển hóa nitơ và sử dụng điện năng. Theo IPCC, nước thải là một nguồn phát thải CH₄ và N₂O quan trọng trong lĩnh vực chất thải [1], [2]. Đối với hệ thống thoát

nước hỗn hợp trong điều kiện khí hậu nhiệt đới như Việt Nam, phát thải methane từ cống thoát nước, bể tự hoại và hồ điều hòa có thể có ý nghĩa lớn hơn so với các khu vực ôn đới.

Hiện nay, nhiều nghiên cứu trong nước mới tập trung riêng cho nhà máy xử lý nước thải mà chưa đánh giá toàn bộ hệ thống thoát nước đô thị bao gồm bể tự hoại, mạng lưới cống, hồ điều hòa, kênh mương, trạm bơm, xử lý bùn và các công trình phụ trợ. Trong khi đó, các công cụ và phương pháp quốc tế như IPCC, ECAM và ENERWATER đã được sử dụng để đánh giá phát thải, hiệu quả năng lượng và benchmark vận hành của hệ thống nước đô thị [1], [2], [6].

Lưu vực Lê Chân - Hải Phòng được lựa chọn làm nghiên cứu điển hình do có đầy đủ đặc trưng của hệ thống thoát nước hỗn hợp tại đô thị lớn của Việt Nam, bao gồm bể tự hoại phân tán, mạng lưới thu gom nước thải, mạng lưới thoát nước mưa, hồ điều hòa, trạm

bơm nước mưa, trạm bơm nước thải, Nhà máy XLNT Vĩnh Niệm và hệ thống xử lý bùn. Khu vực này có tốc độ đô thị hóa cao, chịu ảnh hưởng của ngập úng và triều cường, đồng thời có dữ liệu vận hành và SCADA tương đối đầy đủ, phù hợp cho nghiên cứu kiểm toán KNK toàn hệ thống.

2. CÁC QUÁ TRÌNH PHÁT THẢI KNK TRONG HỆ THỐNG THOÁT NƯỚC

Trong hệ thống thoát nước đô thị, các nguồn phát thải KNK chủ yếu bao gồm bể tự hoại, mạng lưới thu gom nước thải, hồ điều hòa, trạm bơm, nhà máy XLNT, hệ thống xử lý bùn và các công trình phụ trợ. Các nguồn này tạo ra CH₄, N₂O và CO₂ thông qua các quá trình sinh hóa và tiêu thụ năng lượng trong vận hành.

Bảng 1. Nguồn phát thải KNK chủ yếu trong hệ thống thoát nước đô thị

Công trình/quá trình	Khí phát thải chính	Cơ chế phát thải	Phản ứng/quan hệ đặc trưng	Ghi chú áp dụng
Bể tự hoại	CH ₄ , CO ₂	Phân hủy kỵ khí chất hữu cơ; lên men axit; tạo methane	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2$	Cần tính riêng do tỷ lệ sử dụng bể tự hoại cao tại đô thị Việt Nam
Mạng lưới cống thu gom	CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S	Lắng cặn hữu cơ, điều kiện yếm khí trong cống; giải phóng khí hòa tan	$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$	Phụ thuộc thời gian lưu, nhiệt độ, độ dốc và điều kiện vận hành
Hồ điều hòa, kênh mương	CH ₄ , CO ₂ , N ₂ O	Lắng bùn, phân hủy hữu cơ, chuyển hóa nitơ trong lớp trầm tích	$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$	Có ý nghĩa trong hệ thống thoát nước chung và hồ điều hòa đô thị
Trạm bơm	CO ₂ gián tiếp, CH ₄	Tiêu thụ điện năng; khuấy trộn và giải phóng khí từ nước thải	Điện năng \times hệ số phát thải lưới điện	Thuộc Scope 2 và một phần Scope 1 nếu có phát thải trực tiếp
Nhà máy xử lý nước thải	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Xử lý sinh học, nitrat hóa, khử nitrat, lắng bùn và tiêu thụ điện	$NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$; $NO_3^- \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$	Aeroten và máy thổi khí là điểm nóng tiêu thụ năng lượng
Xử lý và lưu chứa bùn	CH ₄ , N ₂ O, CO ₂	Phân hủy bùn hữu cơ; ép bùn, vận chuyển và chôn lấp	$VS \rightarrow CH_4 + CO_2$	Cần đưa vào Scope 1 và Scope 3 tùy ranh giới kiểm kê

3. PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN PHÁT THẢI KNK

Nghiên cứu sử dụng kết hợp ba nhóm phương pháp: (i) phương pháp IPCC để kiểm kê phát thải CH₄ và N₂O từ nước thải; (ii) công cụ ECAM để đánh giá đồng thời hiệu quả năng lượng và phát thải carbon; và (iii) phương pháp cân bằng vật chất dựa trên hiệu suất tính theo từng công trình đơn vị, có xét đến mô hình động học xử lý sinh học để nhận diện các điểm nóng phát thải để so sánh đánh giá đặc biệt đối với bể tự hoại là nguồn phát thải lớn.

Bảng 2. Mô hình động học và tham số đặc trưng tính toán kiểm toán KNK

Quá trình	Mô hình	Tham số chính	Công thức đặc trưng	Ý nghĩa ứng dụng
Sinh trưởng vi sinh vật dị dưỡng	Monod	μ_m, K_s, S	$\mu = \mu_m \times S / (K_s + S)$	Mô tả tăng trưởng vi sinh theo cơ chất
Phân hủy cơ chất hữu cơ	Substrate utilization	k, K_s, S	$rs = -k \times S / (K_s + S)$	Tính tốc độ tiêu thụ COD/BOD
Sinh khối tạo thành	Biomass growth	Y, rs	$rx = Y \times rs$	Ước tính lượng bùn sinh ra
Phân hủy nội bào	Endogenous decay	kd, X	$rd = -kd \times X$	Mô tả suy giảm sinh khối
Nitrat hóa	Nitrification kinetics	NH_4^+, DO	$r_{nit} = \mu_A \times NH_4 / (K_{NH_4} + NH_4) \times DO / (K_O + DO)$	Oxy hóa amoni và nguy cơ phát sinh N ₂ O
Khử nitrat	Denitrification kinetics	NO_3^-, COD	$r_{den} = \mu_H \times NO_3 / (K_{NO_3} + NO_3) \times COD / (K_S + COD)$	Đánh giá quá trình sinh N ₂ /N ₂ O

Bảng 3. Tham số và công thức tính toán phát thải KNK theo IPCC và hiệu suất công trình đơn vị

STT	Tham số/Mô hình	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị tham khảo	Công thức/Ứng dụng	Nguồn
1	Khả năng sinh methane tối đa	B ₀	kg CH ₄ /kg COD	0,25	$ECH_4 = COD \times B_0 \times MCF$	IPCC 2006/2019
2	Hệ số hiệu chỉnh methane	MCF	-	0,5-0,8	Điều chỉnh theo điều kiện yếm khí	IPCC 2006/2019
3	Phát thải CH ₄ từ cống	ECH _{4-sw}	kg CO ₂ eq/năm	Theo COD	$ECH_{4-sw} = COD \times B_0 \times MCF_{sw} \times GWP_{CH_4}$	IPCC, unit process
4	Thời gian lưu nước	HRT	giờ hoặc ngày	4-24	$HRT = V/Q$	Dữ liệu vận hành
5	Hiệu suất xử lý của các quá trình xử lý sinh học	H	%	5-90%	$= COD_{load} - COD_{removed_primary}$ $= COD_{removed_bio} \times EF_{CH_4_CAS}$ $= TN_{removed} \times EF_{N_2O_N_TN}$	IWA, thiết kế vận hành
6	Tuổi bùn	SRT	ngày	5-30	$SRT = VX / (QrXr + QwXw)$	ASM/thiết kế vận hành
7	Phát thải N ₂ O	EN ₂ O	kg CO ₂ eq/ngày	Theo EF	$EN_{2O} = Neffluent \times EF_{N_2O} \times GWP_{N_2O}$	IPCC 2019
8	Phát thải CO ₂ gián tiếp từ điện	ECO _{2-e}	kg CO ₂ eq/ngày	EFgrid theo điện năng năm công bố	$ECO_{2-e} = \text{Điện năng} \times EF_{grid}$	Scope 2
9	Tổng phát thải KNK	GHGtotal	kg CO ₂ eq/ngày	Tổng hợp	$GHG = CO_2 + GWP_{CH_4} \times CH_4 + GWP_{N_2O} \times N_2O$	IPCC AR6/GHG Protocol

Theo cách tiếp cận kiểm kê KNK, phạm vi phát thải có thể được phân thành ba nhóm: Phạm vi (Scope) 1 là phát thải trực tiếp từ quá trình thu gom và xử lý nước thải; Scope 2 là phát thải gián tiếp từ điện năng, nhiệt hoặc hơi nước mua ngoài; Scope 3 là phát thải gián tiếp từ hóa chất, vật tư, vận chuyển, xây dựng, xử lý chất thải và các hoạt động phụ trợ khác [7], [8].

CH₄ chủ yếu phát sinh từ quá trình phân hủy yếm khí các chất hữu cơ trong bể tự hoại, mạng lưới cống và bùn thải. Nitrous oxide phát sinh trong quá trình nitrat hóa và khử nitrat tại các công trình xử lý sinh học. CO₂ gián tiếp phát sinh từ điện năng tiêu thụ cho bơm, thổi khí, xử lý bùn và các công trình phụ trợ. Đối với Nhà máy XLNT Vĩnh Niệm sử dụng công nghệ bùn hoạt tính truyền thống (CAS), hệ thống xử lý hiếu khí (Aeroten) và máy thổi khí là khu vực tiêu thụ điện năng lớn nhất, chiếm khoảng 60 - 70% tổng điện năng vận hành.

Phương pháp IPCC phù hợp cho kiểm kê cấp hệ thống và có khả năng áp dụng khi dữ liệu chi tiết còn hạn chế. Tuy nhiên, để dễ xuất giải pháp giảm phát thải cho từng công trình cụ thể, cần kết hợp dữ liệu vận hành, SCADA, điện năng tiêu thụ, công suất hoạt động của các thiết bị và các tham số công nghệ như COD, BOD₅, TN, lưu lượng, nhiệt độ, thời gian lưu nước và tuổi bùn.

4. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN THỬ NGHIỆM CHO LƯU VỰC LÊ CHÂN VÀ NHÀ MÁY XLNT VĨNH NIỆM

Lưu vực Lê Chân được lựa chọn là nghiên cứu điển hình do có đầy đủ đặc trưng của hệ thống thoát nước chung và dữ liệu vận hành thực tế tương đối ổn định (đã đi vào vận hành từ 2020). Quy mô dân số hiện tại khoảng 230.000 người và định hướng đến năm 2030 khoảng trên 280.000 người. Để tính toán phát thải KNK với độ tin cậy cao, cần thu thập đồng bộ các thông số đầu vào tại bể tự hoại, mạng lưới cống, hồ điều hòa, trạm bơm trong lưu vực, nhà máy xử lý nước thải và hệ thống xử lý bùn.

Đối với nhà máy XLNT Vĩnh Niệm, công suất thiết kế là 36.000 m³/ngày, lưu lượng vận hành bình quân khoảng 32.000 m³/ngày. Nhà máy sử dụng công nghệ bùn hoạt tính truyền thống (CAS) - Aeroten.



Hình 1. Phạm vi nghiên cứu kiểm toán KNK hệ thống thoát nước lưu vực Lê Chân

Bảng 4. Tham số đầu vào chính phục vụ tính toán KNK cho Nhà máy XLNT Vĩnh Niệm

Nhóm đối tượng	Quy mô/Thông số chính	Giá trị
Dân số phục vụ	Dân số tương đương	~230.000 - 280.000 người (dự kiến quy hoạch đến 2030)
Hệ thống thoát nước	Chiều dài mạng lưới cống	>730 km
Hệ thống thoát nước	Giếng thu, giếng thăm	>25.000 công trình
Hệ thống thoát nước	Hồ điều hòa	70,3 ha
Hệ thống thoát nước	Kênh, mương thoát nước	>70 km
Hệ thống thoát nước	Cống ngăn triều, cửa phai	~170 cửa
Trạm bơm	Trạm bơm nước mưa	Máy Đèn, Vĩnh Niệm, Nam Cầu Bình
Trạm bơm	Trạm bơm nước thải	Đông Quốc Bình, Hồ Sen
Nhà máy XLNT Vĩnh Niệm	Công suất thiết kế	36.000 m ³ /ngày
Nhà máy XLNT Vĩnh Niệm	Lưu lượng vận hành trung bình	~32.000 m ³ /ngày
Nhà máy XLNT Vĩnh Niệm	Công nghệ xử lý	CAS - Aeroten
Nhà máy XLNT Vĩnh Niệm	Điện năng tiêu thụ trung bình năm	
Chất lượng nước thải đầu vào	BOD ₅	98 - 150 mg/L
Chất lượng nước thải đầu vào	COD	150 - 200 mg/l
Chất lượng nước thải đầu vào	Tổng Nitơ (TN)	~40 mg/L
Điều kiện vận hành	Nhiệt độ nước thải	24 - 30°C

Thiết lập công thức tính toán theo từng quá trình (unit process) kết hợp các tham số tham chiếu theo IPCC đã công bố tính lượng phát thải để xây dựng công thức, hàm tính toán như Hình 3.

Mã CT	Nhóm phát thải	Công thức sử dụng trong file	Đơn vị kết quả
1	Nhiệm vụ hóa thạch trực tiếp	$CO_2_{fuel} = FC \times EF_{fuel}$	kgCO ₂ /năm
2	Nhiệm vụ thu gom rác	$CH_4_{landfill} = BOD_{landfill} \times EF_{CH_4_{landfill}}$	kgCO ₂ /năm
3	Tải lượng ô nhiễm nước	$Load = C \times V \times 10^3$	kg
4	Vật thải chôn	$CH_4_{landfill} = BOD_{landfill} \times EF_{CH_4_{landfill}}$	kgCO ₂ /năm
5	CH ₄ sơ cấp	$CH_4 = CO_2_{removed} \times EF_{CH_4_{primary}}$	kgCO ₂ /năm
6	CH ₄ sơ cấp sinh học CAS	$CH_4 = CO_2_{removed} \times EF_{CH_4_{CAS}}$	kgCO ₂ /năm
7	BOD loại bỏ	$BOD_{removed} = Q \times BOD_{in} \times (1 - \eta_{BOD})$	kgCO ₂ /năm
8	NH ₃ -N chuyển hóa nitơ	$NH_3 = TN_{removed} \times EF_{NH_3-N}$	kgCO ₂ /năm
9	CH ₄ từ bùn phơi khô	$CH_4_{sludge} = DS \times 1000 \times EF_{CH_4_{sludge}}$	kgCO ₂ /năm
10	Vận chuyển bùn/ vật tư	$CO_2_{transport} = Mass \times Distance \times EF_{CO_2_{transport}}$	kgCO ₂ /năm
11	Quyển sách CO ₂ e	$CO_2_{book} = CO_2_{book} \times Mass \times EF_{CO_2_{book}}$	kgCO ₂ /năm

Mã CT	Unit process GAS	CO ₂ removed (kg/năm)	TH removed (kg/năm)	MCF	CH ₄ kg/năm	N ₂ O kg/năm	CO ₂ eq kg/năm
21-08	Sông chôn rác thải cũ	0	0	0	0	0	18044,8832
21-09	Bể điều hòa	50000	0	0,1	3000	0	191376
21-11	Bể lắng sơ cấp	80000	0	0,2	9000	0	270936,8064
21-12	Aerotank CAS / máy thổi khí	800000	120000	0	0	842,8571429	1527910,24
21-13	Bể tiêu, khử clo nitơ	0	60000	0	0	380,8571429	146210
21-14	Sông thu cấp bơm bùn tuần hoàn	0	0	0	0	0	99990
21-15	Khu vực	0	0	0	0	0	13184
TOTAL	1 Công nghệ CAS	800000	170000		12000	1208,714286	2171741,93

Hình 3. Kết quả mô phỏng thiết lập hàm công thức tính phát thải KNK nhà máy XLNT Vĩnh Niệm theo từng quá trình (unit process)

(*) Đây là các kết quả tính chi tiết bước đầu, sẽ tiếp tục được cập nhật trong quá trình khảo sát chi tiết, các kết quả sẽ có sự dao động theo điều kiện đầu vào nước thải giữa các mùa, sẽ kiểm chứng đối chứng kết quả và phân tích so sánh với các mô hình tính của EPA, ECAM

Khi mở rộng ranh giới tính toán cho toàn hệ thống gồm bể tự hoại, mạng lưới thoát nước, hồ điều hòa, trạm bơm, nhà máy XLNT và xử lý bùn, tổng phát thải KNK tăng đáng kể so với chỉ tính riêng nhà máy.



Hình 2. Vị trí khảo sát, thu thập tính toán phát thải KNK tại lưu vực Lê Chân - Tây Nam Hải Phòng

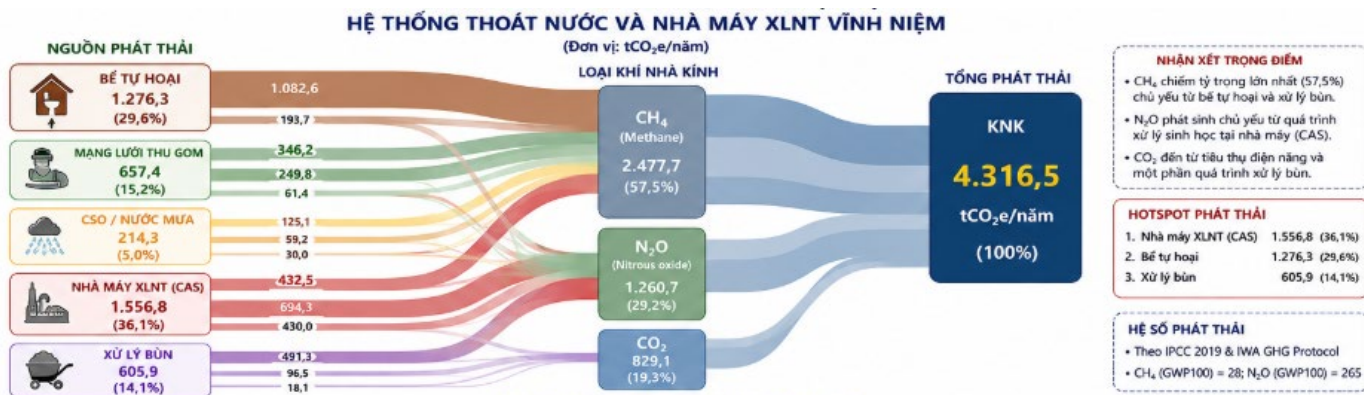
Kết quả thu thập xác định phạm vi tính toán của hệ thống thoát nước lưu vực Lê Chân

Kết quả tính toán phát thải gián tiếp từ điện năng của nhà máy xử lý ước tính khoảng 5,97 tCO₂/ngày, tương ứng khoảng 0,166 kgCO₂/m³ nước thải xử lý. Trong đó, Aeroten và máy thổi khí là khu vực tiêu thụ năng lượng lớn nhất.

Tổng hợp kết quả tính khí nhà kính của từng quá trình và so sánh từng đối tượng phát thải thể hiện tại Bảng 5:

Bảng 5. Tổng hợp kết quả phát thải và tiềm năng giảm phát thải

Nội dung	Giá trị tổng hợp	Nhận xét
Tổng phát thải KNK toàn hệ thống	≈ 4.316,5 tCO ₂ eq/năm	Bao gồm Scope 1, Scope 2 và Scope 3
Tổng phát thải sau tối ưu	≈ 3.020 - 3.450 tCO ₂ eq/năm	Sau áp dụng các giải pháp tối ưu vận hành và thu hồi năng lượng
Tiềm năng giảm phát thải KNK	≈ 860 - 1.300 tCO ₂ eq/năm	Tương đương giảm khoảng 20 - 30%
Nguồn phát thải lớn nhất	Bể tự hoại và nhà máy XLNT	Hotspot CH ₄ (BTH) và tiêu thụ điện của hệ thống
Nguồn tiêu thụ điện lớn nhất	Sục khí Aerotank	Phụ tải điện chính của WWTP
Tổng tiêu thụ năng lượng toàn hệ thống	≈ 7.542 MWh/năm	Bao gồm WWTP, trạm bơm, bùn, CSO
Tổng tiềm năng thu hồi/tiết kiệm năng lượng	≈ 3.100 - 4.410 MWh/năm	Tương đương khoảng 28–33% nhu cầu năng lượng
Điện mặt trời mái nhà (PV)	≈ 1.000 - 1.350 MWh/năm	Nguồn thu hồi lớn
Thu hồi biogas từ bể tự hoại và bùn	≈ 1965 MWh/năm	Giảm phát thải CH ₄
Tiết kiệm từ tối ưu DO và biển tần	≈ 600 - 800 MWh/năm	Hiệu quả đầu tư cao
SEC hiện trạng toàn hệ thống	≈ 0,55 kWh/m ³	Nằm trong khoảng benchmark của một số nước đang phát triển, đã bao gồm các trạm bơm, bổ sung xử lý bùn
CI hiện trạng	≈ 0,42 kg CO ₂ eq/m ³	Còn cao so với benchmark EU/Nhật Bản
Tiềm năng giảm SEC sau tối ưu	≈ 0,38 - 0,45 kWh/m ³	Giảm khoảng 15 - 25%
Tiềm năng giảm CI sau tối ưu	≈ 0,28 - 0,35 kg CO ₂ eq/m ³	Tiếp cận benchmark quốc tế



Hình 4. Mô phỏng kết quả tính phát thải KNK theo từng quá trình (unit process) cho hệ thống thoát nước Lê Chân

Kết quả phân tích bước đầu cho thấy tổng phát thải KNK của hệ thống đạt khoảng **4.316,5 tCO₂eq/năm**.

So sánh với các nghiên cứu quốc tế cho thấy tỷ lệ phát thải CH₄ tại lưu vực nghiên cứu có thể cao hơn các hệ thống tại châu Âu do điều kiện nhiệt đới, thời gian lưu nước lớn trong tuyến ống thu gom và tỷ lệ bể tự hoại cao là nguồn phát thải đáng kể. Phát thải N₂O tại công trình sinh học công nghệ bùn hoạt tính truyền thống (CAS) tương đối tương đồng với các nghiên cứu đối với công nghệ CAS của các nước, trong khi chỉ số phát thải carbon còn phụ thuộc mạnh vào cường độ phát thải của lưới điện và khả năng thu hồi năng lượng.

5. SO SÁNH VÀ THẢO LUẬN

Kết quả phân tích cân bằng năng lượng cho thấy tổng nhu cầu năng lượng của toàn hệ thống thoát nước và XLNT Vĩnh Niệm ước tính khoảng 7.542 MWh/năm. Trong đó, khu vực tiêu thụ năng lượng lớn nhất là nhà máy XLNT (46,6%), tiếp theo là xử lý bùn (18,2%), cụm trạm bơm (15,5%) và các phụ tải phụ trợ (12,8%). Điều này phù hợp với các nghiên cứu quốc tế cho thấy hệ thống sục khí và xử lý bùn là hai nhóm phụ tải tiêu thụ năng lượng chính trong các nhà máy XLNT công nghệ bùn hoạt tính truyền thống. Nguồn phát thải lớn nhất là nhà máy XLNT công nghệ CAS gồm cả trạm bơm nước thải (bao gồm phát thải gián tiếp từ điện năng) chiếm khoảng 36%, tiếp theo là bể tự hoại (29,6%) và xử lý bùn, trong đó CH₄ từ bể tự hoại là nguồn phát thải lớn nhất trong các quá trình.

Kết quả này cho thấy phát thải KNK trong điều kiện Việt Nam không chỉ tập trung tại nhà máy mà còn phân bố đáng kể trong hệ thống thu gom nước thải đặc biệt bể tự hoại.



(* Các giá trị thể hiện kết quả năng lượng tiêu thụ và tiềm năng kỹ thuật tính toán theo mô hình KTNL - KNK, không phải sản lượng năng lượng thu hồi thực tế tại thời điểm khảo sát, kết quả tính để xuất này sẽ tiếp tục nghiên cứu phân tích tính toán chi tiết.

Hình 5. Sơ đồ nhu cầu tiêu thụ năng lượng và tiềm năng thu hồi năng lượng của hệ thống thoát nước Vĩnh Niệm

Đề xuất một số giải pháp

Từ các kết quả kiểm toán KNK để xuất các giải pháp giảm thiểu tiêu thụ năng lượng và phát thải KNK tại các “điểm nóng” phát thải. Kết quả tính toán sơ bộ như Bảng 6:

Bảng 6. Tiềm năng giảm phát thải KNK và tiết kiệm năng lượng

Giải pháp	Tiết kiệm năng lượng (%)	Giảm phát thải KNK (%)
Điều khiển DO trực tuyến	5 - 10	5 - 8
Tối ưu máy thổi khí	10 - 15	10 - 12
SCADA và điều khiển thông minh	3 - 5	3 - 5
Thu hồi biogas	-	10 - 15
Điện mặt trời mái nhà	-	5 - 10
Tổng tiềm năng	15 - 25	20 - 30

6. KẾT LUẬN

Hệ thống thoát nước đô thị là một trong những nguồn phát thải KNK đáng kể trong lĩnh vực hạ tầng kỹ thuật đô thị. Các nguồn phát thải chính bao gồm CH₄ từ bể tự hoại, mạng lưới thu gom nước thải và xử lý bùn; N₂O từ các quá trình xử lý sinh học; và CO₂ gián tiếp từ tiêu thụ điện năng, hóa chất và vận chuyển từ nhà máy chiếm tỷ trọng lớn trong quá trình vận hành.

Kết quả nghiên cứu đối với lưu vực thoát nước Lê Chân và Nhà máy XLNT Vĩnh Niệm cho thấy công đoạn xử lý sinh học bằng bùn hoạt tính và hệ thống thổi khí là khu vực tiêu thụ năng lượng lớn nhất, chiếm khoảng trên 70% tổng điện năng vận hành. Chỉ số SEC vận hành nhà máy đạt khoảng 0,200 kWh/m³, (chưa gồm xử lý bùn) tương đối phù hợp với các giá trị benchmark quốc tế theo ENERWATER và ECAM.

Kết quả phân tích phát thải cho thấy CH₄ là thành phần đóng góp lớn trong tổng phát thải của hệ thống. Các giải pháp tối ưu hóa vận hành, điều khiển DO trực tuyến, ứng dụng SCADA, thu hồi năng lượng từ bùn và sử dụng năng lượng tái tạo có thể giúp giảm khoảng 20 - 30% lượng phát thải KNK và tiết kiệm khoảng 15 - 25% điện năng tiêu thụ.

Nghiên cứu là cơ sở khoa học cho việc xây dựng quy trình kiểm toán KNK trong lĩnh vực thoát nước đô thị, góp phần thực hiện Luật Bảo vệ môi trường năm 2020, Nghị định số 06/2022/NĐ-CP, Nghị định số 119/2025/NĐ-CP và lộ trình thực hiện cam kết phát thải ròng bằng "0" của Việt Nam đến năm 2050.

Kiến nghị

Kết quả nghiên cứu cho thấy cần chuyển từ cách tiếp cận đánh giá riêng lẻ nhà máy XLNT sang kiểm toán tích hợp toàn hệ thống thoát nước đô thị, bao gồm bể tự hoại, mạng lưới thu gom, hồ điều hòa, trạm bơm, nhà máy xử lý nước thải, xử lý bùn và các công trình phụ trợ.

Đối với điều kiện Việt Nam, phương pháp IPCC phù hợp để kiểm kê phát thải KNK ở cấp hệ thống; phương pháp kiểm toán theo từng công trình đơn vị phù hợp để xác định các điểm nóng phát thải và đề xuất giải pháp giảm phát thải; trong khi công cụ ECAM có thể sử dụng để đánh giá hiệu quả năng lượng và benchmark vận hành. Việc bổ sung mô hình động học cho bể tự hoại và quá trình xử lý sinh học giúp lựa chọn tham số phù hợp hơn với điều kiện khí hậu nhiệt đới của Việt Nam.

Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy cần xây dựng bộ chỉ số tham chiếu chuẩn (benchmark) quốc gia về tiêu thụ năng lượng và phát thải KNK cho các hệ thống thoát nước và xử lý nước thải đô thị nhằm phục vụ công tác kiểm toán, kiểm kê và giảm phát thải khí nhà kính trong tương lai.

Trong giai đoạn tới, cần xây dựng cơ sở dữ liệu KNK cho lĩnh vực thoát nước, tăng cường quan trắc online, chuẩn hóa dữ liệu SCADA, đo đạc điện năng theo thiết bị chính, xây dựng benchmark quốc gia và các giải pháp giúp giảm phát thải KNK, nâng cao hiệu quả quản lý, vận hành hạ tầng thoát nước đô thị là cơ sở đóng góp mục tiêu Net Zero.

Lời cảm ơn: Nhóm Nghiên cứu trân trọng cảm ơn đơn vị quản lý vận hành hệ thống thoát nước và nhà máy xử lý nước thải đã hỗ trợ cung cấp số liệu, khảo sát hiện trường và trao đổi chuyên môn phục vụ nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, vol. 5: Waste. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan, 2006.
- [2] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 2019.
- [3] Quốc hội Việt Nam. Luật Bảo vệ môi trường số 72/2020/QH14, Hà Nội, 2020.
- [4] Chính phủ Việt Nam. Nghị định số 06/2022/NĐ-CP ngày 07/01/2022 quy định giảm nhẹ phát thải khí nhà kính và bảo vệ tầng ô-dôn, Hà Nội, 2022.
- [5] Chính phủ Việt Nam. Nghị định số 119/2025/NĐ-CP ngày 09/06/2025 sửa đổi, bổ sung một số điều của Nghị định số 06/2022/NĐ-CP, Hà Nội, 2025.
- [6] World Bank and IWA. ECAM Tool: Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring Tool, User Guide. World Bank and International Water Association, Washington, DC and London, 2021.
- [7] IWA. Reducing the Greenhouse Gas Emissions of Water and Sanitation Services: Overview of Emissions and their Potential Reduction. International Water Association, London, 2022.
- [8] Liu Y., Porro J., Nopens I. Quantification and Modelling of Fugitive Greenhouse Gas Emissions from Urban Water Systems. IWA Publishing, London, 2022.
- [9] Wakeel M., Chen B., Hayat T., Alsaedi A., Ahmad B. Energy consumption for water use cycles in different countries: A review. Applied Energy, vol. 178, pp. 868-885, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.114.
- [10] Wang H., Yang Y., Keller A.A., Li X., Feng S., Dong Y., Li F. Comparative analysis of energy intensity and carbon emissions in wastewater treatment in USA, Germany, China and South Africa. Applied Energy, vol. 184, pp. 873-881, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.061.
- [11] GIZ and SALGA. A Practical Guideline for Energy Efficiency Audits at Wastewater Treatment Works. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) and South African Local Government Association (SALGA), Pretoria, 2020.
- [12] US EPA. Energy Assessment Report: Kailua Wastewater Treatment Plant. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2010.
- [13] Liu Y., Gu J., Zhang M. A-B Processes: Towards Energy Self-sufficient Municipal Wastewater Treatment. IWA Publishing, London, 2019.
- [14] Nguyễn Việt Anh. Bể tự hoại. NXB Xây dựng, Hà Nội, 2017.
- [15] Nguyễn Việt Anh, Bùi Thị Thủy, Vũ Thị Minh Thanh. Xử lý bùn của trạm xử lý nước thải. NXB Xây dựng, Hà Nội, 2017.
- [16] Công ty TNHH MTV Thoát nước Hải Phòng. Báo cáo môi trường và số liệu vận hành Nhà máy xử lý nước thải Vĩnh Niệm giai đoạn 2022 - 2025, Hải Phòng, 2025.
- [17] Bộ Tài nguyên và Môi trường. Báo cáo hiện trạng môi trường quốc gia giai đoạn 2023 - 2025, Hà Nội, 2025.
- [18] ENERWATER Consortium. Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Benchmarking of Wastewater Treatment Plants. European Commission, Brussels, 2018.