



POLITECHNIKA POZNAŃSKA
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych
Zakład Zaopatrzenia w Wodę i Biogospodarki

Autoreferat
rozprawy doktorskiej

**Analiza śladu środowiskowego miejskiej oczyszczalni ścieków w koncepcji
zrównoważonego rozwoju**

Analysis of the environmental footprint of an urban wastewater treatment plant in the context
of sustainable development

mgr inż. Paulina Szulc-Kłosińska

Dziedzina nauk inżynieryjno-technicznych

Dyscyplina naukowa: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka

Promotor: dr hab. inż. Zbysław Dymaczewski, profesor Uczelni

Poznań, 2025 r.

Spis treści

Streszczenie	3
Abstract.....	4
Wykaz skrótów	6
Definicje	7
1. Wprowadzenie	8
2. Tezy, cel i zakres pracy.....	13
Tezy	13
Cel główny (CG).....	13
Cele szczegółowe (CS)	13
Zakres prac.....	14
3. Omówienie cyklu publikacji.....	15
3.1. Analiza cyklu życia Centralnej Oczyszczalni Ścieków w Poznaniu	15
3.2. Opracowanie algorytmu kalkulacji śladu węglowego – Zakres 1.....	17
3.3. Rozszerzenie algorytmu kalkulacji śladu węglowego o Zakresy 2 i 3	18
3.4. Pozyskanie wskaźników empirycznych i wykorzystanie opracowanego algorytmu	19
3.5. Droga do neutralności klimatycznej.....	26
4. Podsumowanie i wnioski	27
Bibliografia.....	29

Streszczenie

W warunkach intensyfikacji działań na rzecz neutralności klimatycznej oraz wdrażania unijnych regulacji w zakresie zrównoważonego rozwoju, miejskie oczyszczalnie ścieków (OŚ) stają się istotnym przedmiotem badań w kontekście ich całkowitego oddziaływania środowiskowego. Obiekty te, będąc filarem systemów gospodarki wodno-ściekowej, generują istotne emisje gazów cieplarnianych (GHG), głównie podtlenku azotu (N_2O) oraz metanu (CH_4). Celem pracy było opracowanie spójnej metodologii oceny i kalkulacji śladu środowiskowego OŚ w warunkach polskich, ze szczególnym uwzględnieniem śladu węglowego jako głównej składowej śladu środowiskowego. Punktem wyjścia była szczegółowa analiza cyklu życia (LCA) przeprowadzona dla Centralnej Oczyszczalni Ścieków w aglomeracji poznańskiej. Analiza wykazała, że ślad węglowy, wynikający głównie z zapotrzebowania energetycznego obiektu oraz struktury miksu energetycznego, stanowi dominującą część całkowitego śladu środowiskowego. Obserwacje te potwierdziły zasadność koncentracji dalszych badań na komponentach emisji GHG i ich dokładnym odwzorowaniu w analizach środowiskowych.

Kolejnym etapem działań publikacyjnych było opracowanie autorskiego algorytmu kalkulacji śladu węglowego miejskiej oczyszczalni ścieków, zgodnego z wytycznymi GHG Protocol i unijnymi standardami raportowania (ESRS). Algorytm ten został opisany szczegółowo w cyklu dwóch publikacji. Uwzględniono w nim wszystkie zakresy emisji GHG Protocol: Zakres 1 (bezpośrednie, w tym emisje technologiczne i inne niezorganizowane emisje), Zakres 2 (emisje pośrednie związane z energią) oraz Zakres 3 (emisje pośrednie z łańcucha wartości). Zidentyfikowano również istotne luki informacyjne i zaproponowano strategię poprawy kompletności danych dla obiektów wodno-kanalizacyjnych, nadając charakter praktyczny opracowanemu algorytmowi. Jego celem było nie tylko umożliwienie spójnych obliczeń środowiskowych, ale również zapewnienie zgodności z nadchodzącymi obowiązkami raportowymi na poziomie krajowym i unijnym. Aby zweryfikować dokładność powszechnie stosowanych narzędzi kalkulacyjnych, przeprowadzono analizy porównawcze z wykorzystaniem trzech podejść: dwóch ogólnodostępnych narzędzi ECAM i CFCT (w wersjach 2014 i 2024) oraz opracowanego algorytmu. Najważniejszym elementem tego etapu była kampania pomiarowa emisji N_2O i CH_4 przeprowadzona w Centralnej Oczyszczalni Ścieków w Poznaniu w skali technicznej. Umożliwiła ona obliczenie rzeczywistych wskaźników emisji, które znacznie różniły się od wartości domyślnych używanych w narzędziach ECAM i CFCT o dwa rzędy wielkości. Narzędzia bazujące na wartościach literaturowych przeszacowywały emisje nawet o 100-200%, co potwierdza potrzebę lokalnej kalibracji i walidacji modeli emisyjnych. Opracowany algorytm, korzystający z danych rzeczywistych, oszacował emisje nawet o 80% niższe niż ECAM i znacznie dokładniejsze od CFCT.

Ostatnim komponentem rozprawy była analiza systemowa dotycząca warunków osiągnięcia stanu Zerowych emisji netto w sektorze oczyszczania ścieków, przedstawiona w artykule przeglądowym. Wskazano, że osiągnięcie neutralności węglowej wymaga synergii działań: modernizacji układów technologicznych (m.in. zastosowania technologii Anammox, nityfikacji częściowej), poprawy efektywności energetycznej, odzysku energii z biogazu, a także rozważenia offsetowania lub wychwytywania tzw. emisji rezydualnych. Wyniki pracy potwierdzają, że precyzyjna kalkulacja śladu węglowego oczyszczalni ścieków musi opierać się na danych empirycznych i lokalnie dopasowanych wskaźnikach, szczególnie dla emisji N_2O i CH_4 . Praca wnosi istotny wkład do wiedzy z zakresu inżynierii środowiska i gospodarki wodno-ściekowej, proponując spójne i operacyjne podejście do zarządzania śladem środowiskowym w sektorze infrastruktury miejskiej. Zaproponowane rozwiązania mogą stanowić fundament dla systemów decyzyjnych w zakresie dekarbonizacji obiektów komunalnych, przyczyniając się do realizacji celów Europejskiego Zielonego Ładu.

Słowa kluczowe: emisje gazów cieplarnianych, podtlenek azotu, metan, ślad węglowy, oczyszczanie ścieków

Abstract

In the context of accelerating climate neutrality commitments and the expanding scope of EU sustainability regulations, urban wastewater treatment plants (WWTPs) are becoming increasingly important objects of study due to their overall environmental footprint. These facilities, as fundamental components of urban water and sanitation systems, contribute substantially to greenhouse gas (GHG) emissions, particularly nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄). The aim of this study was to develop a consistent methodology for assessing and calculating the environmental footprint of WWTPs under Polish conditions, with a particular focus on the carbon footprint (CF) as the dominant contributor.

The starting point of the research was a detailed life cycle assessment (LCA) of the Central WWTP serving the Poznań metropolitan area. The analysis revealed that the CF - mainly driven by the plant's energy consumption and the composition of the local energy mix - accounted for the largest share of the total environmental impact. These observations justified a research focus on accurately quantifying GHG-related components in environmental performance analyses.

A subsequent research stage involved the development of a proprietary CF calculation algorithm tailored for urban WWTPs, fully aligned with the GHG Protocol and European Sustainability Reporting Standards (ESRS). This algorithm, described in a two-part publication series, incorporates all emission scopes: Scope 1 (direct emissions, including process and fugitive emissions), Scope 2 (indirect emissions from purchased energy), and Scope 3 (indirect emissions across the value chain). The study also identified key data gaps and proposed strategies for improving data completeness in the water and wastewater sector, rendering the algorithm not only accurate but also practically applicable. Its dual purpose was to support consistent footprint calculations and ensure compliance with upcoming national and EU-level reporting requirements. To assess the reliability of commonly used GHG calculators, a comparative analysis of three approaches was conducted: ECAM, CFCT (2014 and 2024 versions), and the proposed algorithm. A central element of this phase was a full-scale GHG monitoring campaign for N₂O and CH₄ emissions, carried out at the same WWTP. This enabled the derivation of site-specific empirical emission factors (EFs), which differed substantially from the default values embedded in ECAM and CFCT. Literature-based calculators were found to overestimate emissions by 100-200%, confirming the need for local calibration and validation. The algorithm developed in this study, informed by real operational data and updated global warming potentials (GWPs), yielded emission estimates up to 80% lower than ECAM and significantly more precise than CFCT.

The final component of the study involved a system-level analysis of pathways toward achieving net-zero emissions in the wastewater sector, as synthesized in a literature review. The findings emphasize that reaching carbon neutrality requires a synergistic strategy: upgrading biological treatment technologies (e.g., Anammox, partial nitrification), enhancing energy efficiency, recovering energy from biogas, and considering offsetting or capturing residual, unavoidable emissions.

The results of this study confirm that accurate CF accounting in WWTPs must be based on empirical data and locally calibrated emission factors, particularly for high-impact gases such as N₂O and CH₄. This work makes a significant contribution to the fields of environmental engineering and urban water management by offering a consistent, practical approach to managing the environmental footprint of municipal infrastructure. The proposed methodologies and findings may support decision-making processes in the decarbonization of public utilities and contribute meaningfully to the goals of the European Green Deal.

Keywords: GHG emissions, nitrous oxide, methane, carbon footprint, wastewater treatment

Wykaz publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej

Zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce [tekst jednolity Dz. U. 2021 poz. 478 Art. 187, ust. 3]: „Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia naukowa, **zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych**, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej.”

Lp.	Pozycja	Wkład własny	IF ^a	IF ^b	Cytowania ^c	Punktacja MNiSW ^e (MENiN)
A1	Szulc, P., Kasprzak, J., Dymaczewski, Z., Kurczewski, P. (2021). Life Cycle Assessment of Municipal Wastewater Treatment Processes Regarding Energy Production from the Sludge Line. Energies, 14(2), 356. https://doi.org/10.3390/en14020356	40%	3,252	3,100	15 (18)	140 (140)
A2	Szulc-Kłosińska, P., Dymaczewski Z. (2023). Algorithm of carbon footprint calculation for municipal wastewater treatment plant - part one. GAZ WODA I TECHNIKA SANITARNA, 1(10), 32-44. https://doi.org/10.15199/17.2023.10.4	75%	-	-	-	140 (20)
A3	Szulc-Kłosińska, P., Dymaczewski Z. (2023). Algorithm of carbon footprint calculation for municipal wastewater treatment plant - part two. GAZ WODA I TECHNIKA SANITARNA, 1(11), 32-40. https://doi.org/10.15199/17.2023.11.5	75%	-	-	-	140 (20)
A4	Comparative Analysis of Calculation Tools for Estimating Carbon Footprint of Wastewater Treatment Plants: Methodologies and Emission Factors* (2025). Archives of Environmental Protection – <i>przyjęte do druku</i>	60%	1,300	1,300	-	100 (100)
A5	Maktabifard, M., Al-Hazmi, H. E., Szulc, P., Mousavizadegan, M., Xu, X., Zaborowska, E., Li, X., Mąkinia, J. (2023). Net-zero carbon condition in wastewater treatment plants: A systematic review of mitigation strategies and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 185, 113638. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113638	15%	16,300	17,500	60 (67)	200 (200)
Indeks Hirscha					2,0 (2,0)	
PODSUMOWANIE		53% (średnia)	6,951	7,300	75 (89)	720 (480)

- a) sumaryczny Impact Factor (IF) wg bazy Web of Science (WoS) zgodny z rokiem ukazania się pracy
 b) sumaryczny Impact Factor (IF) wg bazy Web of Science (WoS) 5 - letni
 c) sumaryczna liczba cytowań - Web of Science (Scopus)
 e) Punktacja MNiSW w roku ukazania się pracy (punktacja MENiN w roku przygotowania zestawienia)

*autor korespondencyjny Szulc-Kłosińska P.

Wykaz skrótów

BZT₅	Biochemiczne Zapotrzebowanie Tlenu (5-dniowe)	Parametr ścieków - jednostkowe obciążenie
CF	Carbon Footprint (śląd węglowy)	Kluczowy wskaźnik środowiskowy
CH₄	Metan	Gaz cieplarniany
COŚ	Centralna Oczyszczalnia Ścieków	
CO₂	Dwutlenek węgla	Gaz cieplarniany
CO₂e	Ekwiwalent dwutlenku węgla	Jednostka w przeliczaniu GHG
ChZT	Chemiczne Zapotrzebowanie Tlenu	Parametr jakości ścieków
ESG	Environmental, Social, Governance	Raportowanie zrównoważonego rozwoju
ESRS	European Sustainability Reporting Standards	Standardy raportowania UE
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy	Metoda pomiarowa emisji gazów
GHG	Greenhouse Gases (gazy cieplarniane)	Kategorie emisji
GOZ	Gospodarka Obiegu Zamkniętego	Jedna z koncepcji zrównoważonego zarządzania odpadami
GWP100	Global Warming Potential (100 lat)	Potencjał cieplarniany gazów
IPCC AR6	Intergovernmental Panel on Climate Change, Sixth Assessment Report	Raport IPCC
LCA	Life Cycle Assessment (ocena cyklu życia)	Metodologia oceny środowiskowej
N-NH₄	Jon amonowy	Parametr ścieków
N-NO₂	Azotyny	Parametr ścieków
N-NO₃	Azotany	Parametr ścieków
N_{tot}	Azot ogólny	Parametr ścieków
N₂O	Podtlenek azotu	Gaz cieplarniany
OZE	Odnawialne źródła energii	Źródła energii
OŚ	Oczyszczalnia ścieków	Obiekt badawczy
OŚM	Oczyszczalnia ścieków miejskich	Obiekt badawczy
P-PO₄	Fosforany	Parametr ścieków
PIX	Siarczan żelaza(III) (koagulant)	Środek technologiczny w OŚ
PN/PN-EN/ISO	Polskie Normy / Normy Europejskie / International Organization for Standardization	Standardy normatywne
P_{tot}	Fosfor ogólny	Parametr ścieków
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition	System sterowania i monitoringu
SIREN	Integrated system for SIMultaneous Recovery of Energy, organics and Nutrients	Projekt badawczy
SNIT	Shortcut Nitrification in activated sludge process treating domestic wastewater	Projekt badawczy
TKN	Total Kjeldahl Nitrogen (azot Kjeldahla)	Parametr ścieków
UE	Unia Europejska	Organizacja międzynarodowa
WRI	World Resources Institute	Instytucja opracowująca metodologie GHG
WWTP	Wastewater Treatment Plant	Oczyszczalnia ścieków (ang.)

Definicje

Analiza cyklu życia (LCA)	Metoda oceny wpływu systemów technicznych na środowisko w całym cyklu życia, zgodna z normami ISO 14040-14044.	Metodologia badań środowiskowych.
Environmental Footprint	Ślad środowiskowy - zbiorcza miara całkowitego wpływu systemu lub procesu na środowisko w cyklu życia.	Ocena oddziaływania środowiskowego.
Europejski Zielony Ład (European Green Deal)	Strategia UE dotycząca zrównoważonego rozwoju, dekarbonizacji i neutralności klimatycznej.	Kontekst legislacyjny.
Gazy cieplarniane (GHG)	Grupa gazów zatrzymujących ciepło w atmosferze, m.in. CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O.	Podstawa kalkulacji śladu węglowego.
Odnawialne Źródła Energii (OZE)	Źródła energii niewyczerpywalne w skali ludzkiego życia, np. wiatr, słońce, biogaz.	Energetyka oczyszczalni.
One Health (Jedno Zdrowie)	Koncepcja analizująca powiązania zdrowia ludzi, zwierząt i środowiska jako jednego systemu.	Kontekst zrównoważonego rozwoju.
Zerowe emisje netto (Net Zero)	Stan równowagi, w którym emisje gazów cieplarnianych są zredukowane do określonych naukowo poziomów	Cel dekarbonizacji sektora wodno-ściekowego.
Ślad węglowy (CF)	Carbon Footprint - sumaryczna emisja gazów cieplarnianych w ekwiwalencie CO ₂ .	Kluczowy wskaźnik oceny środowiskowej oczyszczalni.

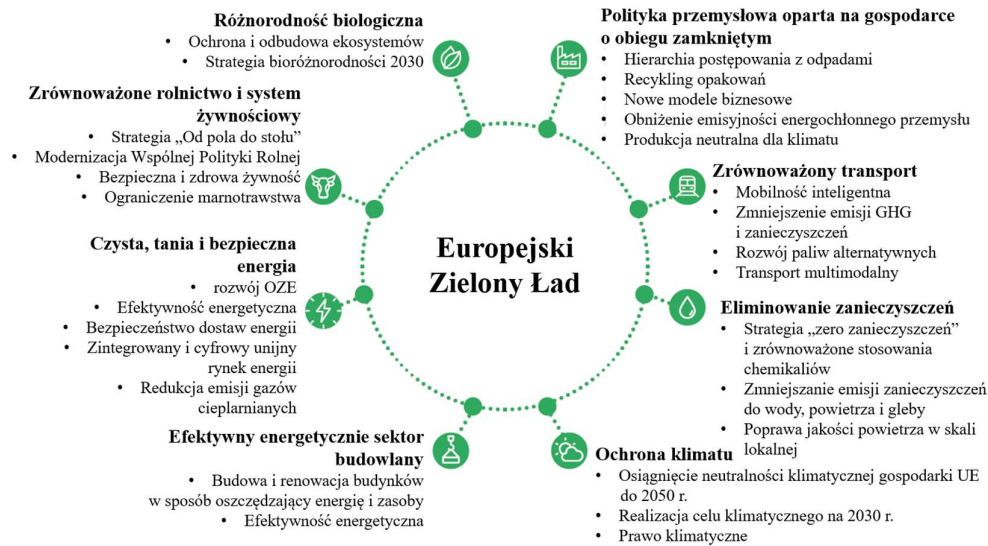
1. Wprowadzenie

Współczesne uwarunkowania środowiskowe, społeczne i legislacyjne wywierają silną presję na sektor gospodarki wodno-ściekowej, wymuszając nie tylko modernizację istniejących systemów technicznych, ale również redefinicję ich roli w zrównoważonym funkcjonowaniu struktur miejskich. Szczególnie istotnym ogniwem w tym kontekście są oczyszczalnie ścieków (OŚ). Mimo że przez dekady postrzegane były one niemal wyłącznie przez pryzmat ochrony zasobów wodnych oraz zdrowia publicznego - obecnie analizowane są coraz częściej jako złożone systemy oddziałujące aktywnie na środowisko w wielu wymiarach: konsumpcji energii i zasobów, minimalizacji zanieczyszczeń wodnych przy jednoczesnym generowaniu ich w innych obszarach. Zgodnie z koncepcją *Jedno Zdrowie* (ang. *One Health*), oczyszczalnie pełnią rolę nie tylko infrastruktury sanitarnej (Farkas et al., 2025), ale także środowiskowych punktów przejściowych dla patogenów, antybiotyków, mikroplastiku i innych mikrozanieczyszczeń (La Rosa et al., 2025).

W świetle aktualnych wyzwań klimatycznych i stale kurczących się źródeł zasobów, konieczna jest całościowa i ilościowa ocena funkcjonowania OŚ - nie tylko przez pryzmat ich pozytywnego wkładu w jakość środowiska wodnego, ale również z uwzględnieniem negatywnych skutków towarzyszących ich eksploatacji. Warto podkreślić, że oczyszczanie ścieków, jako proces technologicznie niezbędny, charakteryzuje się szczególnym statusem: nie może być całkowicie wyeliminowany. Dlatego też proces ten powinien być stale optymalizowany - tak, aby jego negatywny wpływ na środowisko był możliwie najmniejszy przy zachowaniu efektywności operacyjnej zgonie z postanowieniami Europejskiego Zielonego Ładu (ang. *European Green Deal*) - Rysunek 1.

W tym kontekście kluczowym sposobem oceny staje się ślad środowiskowy (ang. *environmental footprint*), rozumiany jako zbiorcza miara całkowitego wpływu danego systemu lub procesu na środowisko w całym jego cyklu życia. W przypadku OŚ obejmuje on m.in.: zużycie zasobów (woda, paliwa, materiały), emisję gazów cieplarnianych (ang. *greenhouse gases* - GHG) z procesów technologicznych, powstawanie odpadów, uwalnianie mikrozanieczyszczeń (w tym mikroplastiku i związków farmaceutycznych), jak również emisje hałasu i uciążliwości zapachowych (Cui et al., 2025). Narzędziem, które jest odpowiedzią na potrzebę opracowania spójnego, mierzalnego, a co za tym idzie porównywalnego sposobu oceny śladu środowiskowego miejskiej OŚ, który umożliwiałby identyfikację najbardziej obciążających etapów procesu oraz ocenę wpływu zastosowanych technologii i rozwiązań infrastrukturalnych, jest analiza cyklu życia (ang. *life cycle assessment* - LCA). Metoda ta uznawana jest na gruncie inżynierii środowiska za najbardziej kompleksowe narzędzie oceny wpływu systemów technicznych na środowisko. LCA, przeprowadzona zgodna z międzynarodowymi normami ISO 14040-14044¹, umożliwia nie tylko ilościowe określenie śladu węglowego czy wodnego, ale także analizę alternatywnych scenariuszy modernizacji, optymalizację efektywności energetycznej oraz weryfikację wpływu rozwiązań w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ).

¹ ISO 14040–14044 to normy, które dostarczają wytycznych do przeprowadzenia oceny cyklu życia (Life Cycle Assessment, LCA). Ocena cyklu życia to narzędzie analityczne, które pozwala organizacjom dokładnie ocenić wpływ ich produktów, procesów lub usług na środowisko na każdym etapie - od pozyskania surowców, przez produkcję i użytkowanie, aż po utylizację

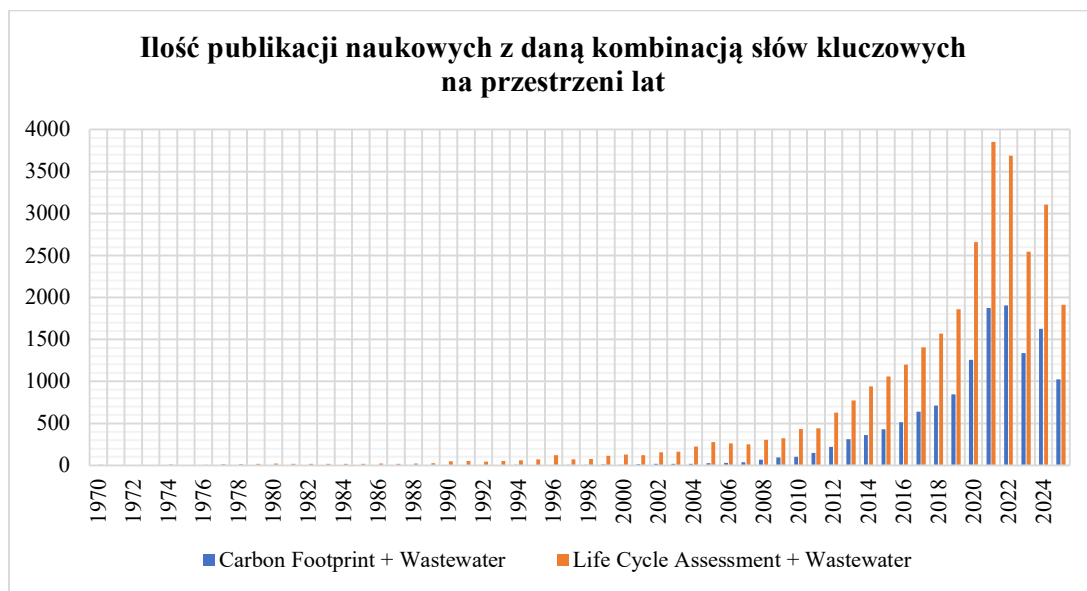


Rysunek 1. Główne obszary Zielonego Ładu UE [opracowanie własne].

Dzięki możliwościom integrowania danych materiałowych, energetycznych, emisyjnych i operacyjnych, LCA pozwala na rzetelną ocenę porównawczą różnych wariantów technologicznych - np. systemów opartych na osadzie czynnym, reaktorach MBR (ang. *Membrane Bioreactor*), hybrydach biologiczno-chemicznych czy układach z odzyskiem energii z osadów (Menon & Kalyanraman, 2025). Co więcej, metodologia ta umożliwia identyfikację tzw. „gorących punktów” (ang. *hot spots*) środowiskowych, których optymalizacja może znacząco obniżyć ślad środowiskowy bez konieczności kosztownej przebudowy całych układów technologicznych. W praktyce inżynierskiej oznacza to możliwość wsparcia procesów decyzyjnych w zakresie modernizacji obiektów, planowania inwestycji i przygotowania danych na cele ujawnień w ramach zrównoważonego raportowania ESG (ang. *Environmental, Social and Governance reporting*).

Na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci (Rysunek 2) znaczenie analizy cyklu życia w ocenie technologii wodno-ściekowych dynamicznie wzrosło. Od roku 2000. obserwuje się coraz większą liczbę publikacji, które wykorzystują metodę LCA do badania różnych wariantów technologicznych oczyszczalni ścieków. Jak wskazują Yang i Tu (2025), LCA stała się narzędziem referencyjnym w ocenie technologii wodno-ściekowych, pozwalając na porównywanie alternatyw technologicznych oraz wspieranie decyzji inwestycyjnych.

Badania Nurzhan i współautorów (2025) dowodzą, że w wymiarze globalnym LCA w sektorze wodno-kanalizacyjnym rozwija się równolegle z jego implementacją w gospodarce odpadami komunalnymi, tworząc podstawy do kompleksowych analiz systemowych dla całych aglomeracji.



Rysunek 2. Ilość publikacji ze słowami kluczowymi „Carbon Footprint” oraz „Wastewater”, „Life Cycle Assessment” oraz „Wastewater” [opracowanie własne na bazie Lens.org].

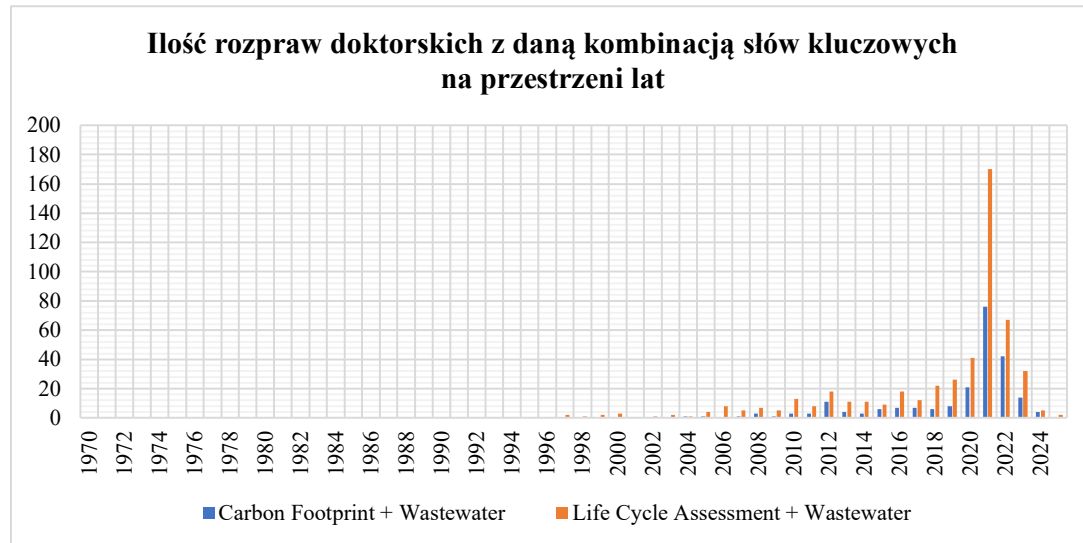
W Polsce badania LCA oczyszczalni ścieków pozostają wciąż ograniczone (Burchart-Korol & Zawartka, 2019), chociaż rośnie zainteresowanie ich implementacją w związku z rosnącymi wymaganiami regulacyjnymi Unii Europejskiej (UE). Dominującym problemem w badaniach krajowych jest korzystanie z międzynarodowych baz danych, takich jak Ecoinvent, które nie pozwalają na pełne odzwierciedlenie lokalnych uwarunkowań. Wśród nich należałoby wymienić: krajowy miks energetyczny, charakterystykę ścieków czy procesy gospodarki osadami. Wskazuje się zatem na potrzebę opracowania dedykowanych krajowych baz danych oraz rozwinięcia narzędzi obiektowych do kalkulacji śladu środowiskowego (Rebello et al., 2021).

W toku realizowania niniejszej rozprawy doktorskiej, na podstawie przeglądu najnowszych publikacji naukowych oraz przeprowadzonych własnych analiz LCA obiektów w Poznaniu (Szulc et al., 2021), jako kluczowy element śladu środowiskowego miejskich oczyszczalni ścieków zdiagnozowano ślad węglowy (ang. *carbon footprint* - CF), wskazywany w literaturze jako główny wskaźnik obciążenia środowiskowego tego sektora (Fang al., 2025). Zhang (2025) podkreśla, że kluczowym problemem środowiskowym pozostają emisje GHG z procesów biologicznych, które w znaczącym stopniu wpływają na ślad węglowy całego systemu, co potwierdzają także inne publikacje (Srivastava et al., 2025).

Zgodnie z definicją Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (ang. *Intergovernmental Panel of Climate Change* - IPCC), CF obejmuje sumaryczną emisję gazów cieplarnianych przeliczoną na jednostkę ekwiwalentu dwutlenku węgla (CO₂e), powstającą w wyniku bezpośredniego i pośredniego działania danego obiektu lub systemu.

Mimo, że do roku 2021. ilość publikacji o tematyce analizy cyklu życia i śladu węglowego stale rosła (Rysunek 2 i 3), to w literaturze podkreśla się, że to właśnie emisje gazów cieplarnianych (ang. *greenhouse gases*) - w tym metanu (CH₄) i podtlenku azotu (N₂O) oraz dwutlenku węgla (CO₂) pochodzenia biogenicznego - stanowią najbardziej znaczący czynnik wpływający na całkowity bilans środowiskowy oczyszczalni, zarówno w ujęciu lokalnym, jak i globalnym (Zhang, 2025). Wspominane wyżej emisje mają charakter zarówno bezpośredni, związany z procesami biologicznymi (nityfikacja, denityfikacja,

fermentacja osadów), jak i pośredni, na przykład wynikający z intensywnego zużycia energii elektrycznej w procesach napowietrzania, pompowania czy transportu osadów, a także zużycie chemii technologicznej wspierającej procesy (Li et al., 2025). Badania modelowe wskazują ponadto, że to właśnie CF najczęściej wyznacza ww. „gorące punkty” cyklu życia oczyszczalni, które w największym stopniu determinują końcowy wynik analizy LCA (Tang et al., 2025). Jak podkreślają Wang i in. (2025), tylko podejścia oparte na pełnym cyklu życia umożliwiają uchwycenie realnych emisji, w tym tych powiązanych z etapem eksploatacyjnym, który w infrastrukturze technicznej odpowiada za największy udział w całkowitym bilansie środowiskowym.



Rysunek 3. Ilość ze słowami kluczowymi „Carbon Footprint” oraz „Wastewater”, „Life Cycle Assessment” oraz „Wastewater” [opracowanie własne na bazie Lens.org].

Brakuje obecnie narzędzia, które umożliwiłoby kompletną kalkulację CF, uwzględniając specyficzne warunki eksploatacji oczyszczalni danej OŚ w Polsce. Istniejące rozwiązania - jak pokazują badania - koncentrują się głównie na biologicznych i sezonowych aspektach pracy instalacji, pomijając potrzebę integracji danych środowiskowych i regulacyjnych w jednolitym modelu (Cui et al., 2023). Podobne wnioski wynikają z pracy Lozada-Castro i in. (2025), gdzie oceniano innowacyjne systemy oczyszczania pod kątem parametrów środowiskowych, wskazując na potrzebę nowoczesnych narzędzi obliczeniowych dla poprawy jakości raportowania i zgodności z regulacjami.

W Polsce problematyka CF OŚ dopiero zaczyna być podejmowana w literaturze naukowej, równolegle zyskując w praktyce inżynierskiej coraz większe znaczenie ze względu na konieczność raportowania emisji zgodnie z regulacjami unijnymi (Rysunek 4) takimi, jak Nowa Dyrektywa Ściekowa 2024/3019, Dyrektywa o Zrównoważonym Rozwoju 2022/2464 (ang. Corporate Sustainability Reporting Directive - CSRD) oraz zestaw standardów dot. ujawnień nt. zrównoważonego rozwoju (ang. *European Sustainability Reporting Standards* - ESRS). Dotychczasowe badania wskazują, że brak krajowych baz wskaźników oraz ograniczona dostępność danych operacyjnych stanowią kluczową barierę w dokładnym określaniu śladu węglowego w warunkach lokalnych (Rebello et al., 2021).



Rysunek 4. Wybrane, kluczowe zmiany legislacyjne w kontekście branży wodno-kanalizacyjnej [opracowanie własne].

Analiza literatury pokazuje, że w badaniach dotyczących śladu węglowego oczyszczalni ścieków powtarzają się pewne problemy. Najczęściej wymienianą trudnością jest brak pełnej standaryzacji metod obliczania emisji GHG dla obiektów OŚ, co skutkuje stosowaniem różnych granic kalkulacyjnych. W wielu przypadkach ogranicza się zakres obliczeń wyłącznie do emisji bezpośrednich, pomijając emisje pośrednie związane z transportem osadów czy produkcją reagentów chemicznych. Kolejną istotną luką jest niewystarczająca dokładność danych dotyczących procesów biologicznych - emisje CH₄ i N₂O są często trudne do uchwycenia, co prowadzi do niedoszacowania lub przeszacowania całkowitego CF (Srivastava et al., 2025).

Ponadto badania wskazują, że niewiele prac uwzględnia zmienność sezonową oraz różnorodność warunków eksploatacyjnych, które mają istotne znaczenie w emisjach GHG z procesów biologicznych (Cui et al., 2025). Wreszcie, problemem pozostaje niedostateczna integracja analiz śladu węglowego z innymi wskaźnikami środowiskowymi, co ogranicza możliwość pełnej oceny zrównoważenia technologii.

Geneza niniejszej pracy związana jest z obserwowaną luką metodologiczną pomiędzy prostymi, szacunkowymi kalkulatorami emisji GHG a potrzebą prowadzenia dokładnych, obiektowych analiz środowiskowych, wymaganych przez wyżej wspomniane, nowe regulacje UE. Aktualnie brakuje narzędzia, które umożliwiłoby kompletną i jednocześnie precyzyjną kalkulację śladu węglowego na poziomie technologicznym, z uwzględnieniem lokalnych danych operacyjnych, rzeczywistego miksu energetycznego oraz specyficznych warunków eksploatacyjnych polskich oczyszczalni ścieków.

W odpowiedzi na wyżej wspomniane zdiagnozowane braki, w niniejszej rozprawie opracowano dedykowany oczyszczalniom ścieków autorski algorytm obliczania śladu węglowego, zgodny z wytycznymi i metodykami raportowania przyjętymi przez Unię Europejską. Algorytm ten został zaprojektowany tak, aby integrował szczegółowe dane technologiczne z zakresu zużycia energii, emisji procesowych i gospodarki osadami,

umożliwiając przeprowadzenie wiarygodnych analiz porównawczych oraz wskazanie „gorących punktów” środowiskowych w kontekście emisji GHG. Co istotne, rozwiązanie to nie tylko wypełnia lukę między prostymi narzędziami kalkulacyjnymi a wymaganiami legislacyjnymi, ale także może stanowić praktyczne wsparcie dla operatorów oczyszczalni w procesach decyzyjnych, planowaniu modernizacji oraz w przygotowywaniu raportów ESG i dokumentów zgodnych z CSRD/ESRS.

Wspomniany algorytm został zasilony danymi empirycznymi - w tym danymi z kampanii pomiarowej przeprowadzonej w ramach niniejszej rozprawy w skali technicznej na Centralnej Oczyszczalni Ścieków w Poznaniu. Wyniki kalkulacji przeprowadzonej zgodnie z proponowanym algorytmem porównano następnie z ogólnodostępnymi kalkulatorami CF.

2. Tezy, cel i zakres pracy

Tezy

Teza 1. Ślad węglowy stanowi kluczową i dominującą składową śladu środowiskowego miejskiej oczyszczalni ścieków, co uzasadnia koncentrację analiz środowiskowych na emisjach gazów cieplarnianych jako głównym czynnikiem oddziaływania.

Teza 2. Kalkulacja śladu węglowego miejskiej oczyszczalni ścieków wymaga wykorzystania danych empirycznych oraz lokalnie dopasowanych wskaźników emisyjnych, szczególnie dla emisji procesowych podtlenku azotu (N_2O) i metanu (CH_4), gdyż stosowanie wartości literaturowych prowadzi do istotnych przeszacowań całkowitych emisji.

Teza 3. Opracowanie algorytmu obliczania śladu węglowego miejskich oczyszczalni ścieków umożliwiającego kalkulację i raportowanie wyników emisji zgodnie z unijnymi wymogami legislacyjnymi pozwoli na skuteczniejszą identyfikację dźwigni redukcyjnych emisji GHG dla OŚ.

Cel główny (CG)

Celem rozprawy doktorskiej pt. „Analiza śladu środowiskowego miejskiej oczyszczalni ścieków w koncepcji zrównoważonego rozwoju” było opracowanie autorskiej metody wyznaczania najważniejszej składowej śladu środowiskowego miejskich oczyszczalni ścieków, wskazanej w toku rozprawy jako ślad węglowy, z dużym naciskiem na możliwość praktycznego wykorzystania wniosków z analizy w celu opracowania dźwigni redukcyjnych śladu środowiskowego oczyszczalni wraz z szacunkiem ich efektywności.

Cele szczegółowe (CS)

Cel szczegółowy 1. Przeprowadzenie obliczeń i analizy śladu środowiskowego w oparciu o LCA dla Centralnej Oczyszczalni Ścieków dla m. Poznania. – **CS1**

Cel szczegółowy 2. Wskazanie najważniejszej składowej śladu środowiskowego dla analizowanej oczyszczalni ścieków miejskich. – **CS2**

Cel szczegółowy 3. Stworzenie wykazu metodologii obliczania śladu węglowego oczyszczalni ze wskazaniem stosowanych metod obliczeniowych wraz z analizą luk

kalkulacyjnych. – CS3

Cel szczegółowy 4. Określenie rzeczywistych wskaźników bezpośredniej emisji gazów cieplarnianych z procesu osadu czynnego metodą empiryczną dla Centralnej Oczyszczalni Ścieków dla m. Poznania - przeprowadzenie kampanii pomiarowej w skali technicznej. – CS4

Cel szczegółowy 5. Stworzenie operacyjnego algorytmu wyznaczania śladu węglowego dla miejskich oczyszczalni ścieków zgodnego z wymogami legislacyjnymi UE. – CS5

Cel szczegółowy 6. Przeprowadzenie komparatywnych obliczeń śladu węglowego miejskiej oczyszczalni ścieków z użyciem empirycznych oraz literaturowych wskaźników emisji z procesu oczyszczania ścieków miejskich metodą osadu czynnego. – CS6

Zakres prac

Weryfikacja postawionych tez i osiągnięcie założonych celów zostały zrealizowane poprzez wnikliwe studia literaturowe oraz odpowiednio zaplanowane prace badawcze i analityczne. Całość prac podzielono na 13 etapów, które przedstawiono poniżej, z zaznaczeniem przyporządkowanych celów szczegółowych oraz publikacji cyklu, w których znajduje się opis wykonanych prac:

ETAP 1: Zapoznanie się z danymi literaturowymi z obszaru analiz śladu środowiskowego obiektów oczyszczania ścieków miejskich (OŚM): pozyskanie wiedzy z zakresu wykonywania analiz cyklu życia, przygotowanie wykazu danych niezbędnych do przeprowadzenia ww. analizy dla wybranej oczyszczalni ścieków – A1,

ETAP 2: Wybór oczyszczalni do analiz i dalszych badań,

ETAP 3: Pozyskanie zestawu szczegółowych danych rzeczywistych z Centralnej Oczyszczalni Ścieków dla miasta Poznania (COŚ), wstępna analiza danych – A1,

ETAP 4: Przeprowadzenie kompleksowej analizy cyklu życia dla COŚ, interpretacja wyników i składowych śladu środowiskowego obiektu –CS1, CS2, A1,

ETAP 5: Przegląd światowych metodologii, wytycznych i przewodników dotyczących kalkulacji emisji gazów cieplarnianych w procesach oczyszczania ścieków, analiza dostępnych baz wskaźników emisji: zdobycie wiedzy dotyczącej możliwości kalkulacji śladu węglowego OŚM, weryfikacja luk metodycznych oraz ew. braków pozyskanych dla COŚ danych, zebranie danych uzupełniających – CS3, A2, A3,

ETAP 6: Analiza trendów legislacyjnych Unii Europejskiej dotyczących wymagań prezentacji wpływu obiektów OŚM na środowisko – CS5, A2, A3,

ETAP 7: Opracowanie kompleksowego algorytmu kalkulacji śladu węglowego OŚM spełniającego wymagania UE z zakresu raportowania nt. zrównoważonego rozwoju wraz ze wskazaniem możliwości doskonalenia procesu kalkulacji – CS5, A2, A3,

ETAP 8: Studium przypadków – analiza technicznych aspektów wykonywania kampanii pomiarowych poziomów emisji gazów cieplarnianych celem pozyskania jednostkowych wskaźników emisji podtlenku azotu oraz metanu w literaturze światowej: pozyskanie informacji nt. przeprowadzenia badań w skali technicznej, przygotowanie wytycznych badawczych, projektu komory pomiarowej, wykonanie kosztorysu dla kampanii wraz z analizą możliwości finansowania za pomocą mechanizmów grantowych, przystąpienie do konkursów – CS4,

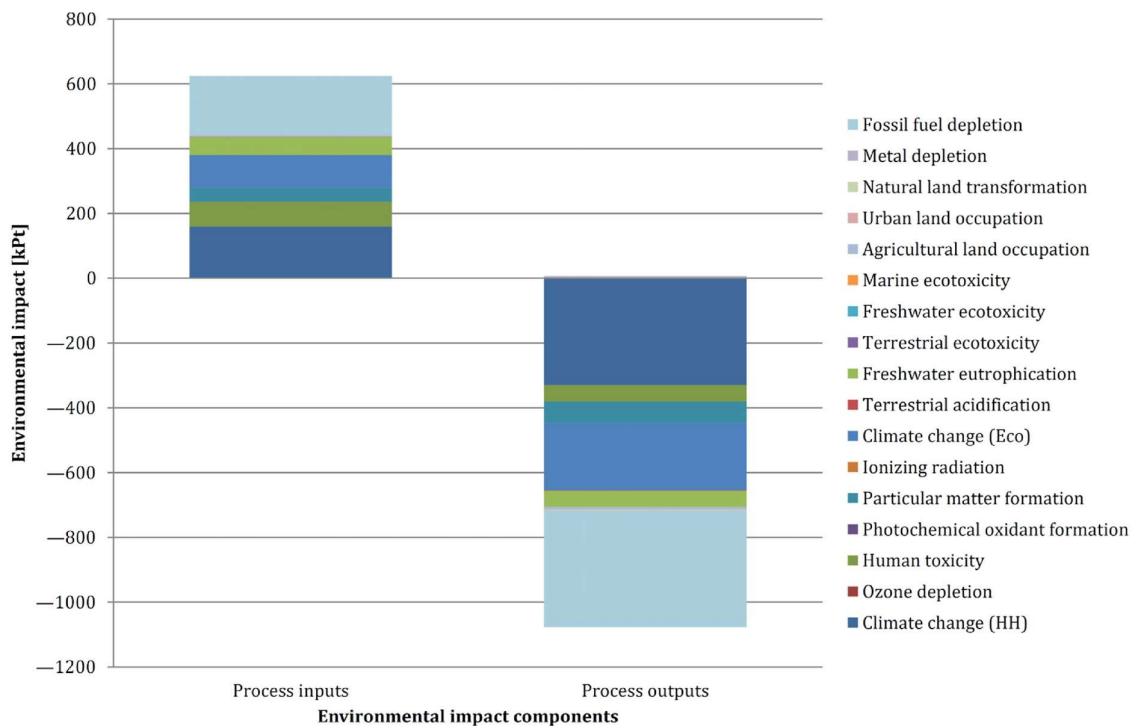
ETAP 9: Przeprowadzenie kampanii emisji gazów cieplarnianych na COŚ, kalkulacja oraz

- analiza otrzymanych wyników dot. wskaźników emisji – CS4, A4,
- ETAP 10:** Obliczenie śladu węglowego COŚ z użyciem opracowanego algorytmu (A2, A3) oraz pozyskanych wskaźników – CS5, A4,
- ETAP 11:** Ocena krytyczna – analiza porównawcza otrzymanych poziomów emisyjnych z wynikami uzyskanymi z ogólnodostępnych kalkulatorów śladu węglowego, wskazanie obszarów do doskonalenia – CS5, A4,
- ETAP 12:** Analiza możliwości zarządzania śladem węglowym OŚM celem osiągnięcia neutralności klimatycznej na podstawie przeglądu literaturowego – A5,
- ETAP 13:** Wyznaczenie dalszych kierunków badawczych z obszaru zarządzania emisjami gazów cieplarnianych z oczyszczalni ścieków.

3. Omówienie cyklu publikacji

3.1. Analiza cyklu życia Centralnej Oczyszczalni Ścieków w Poznaniu

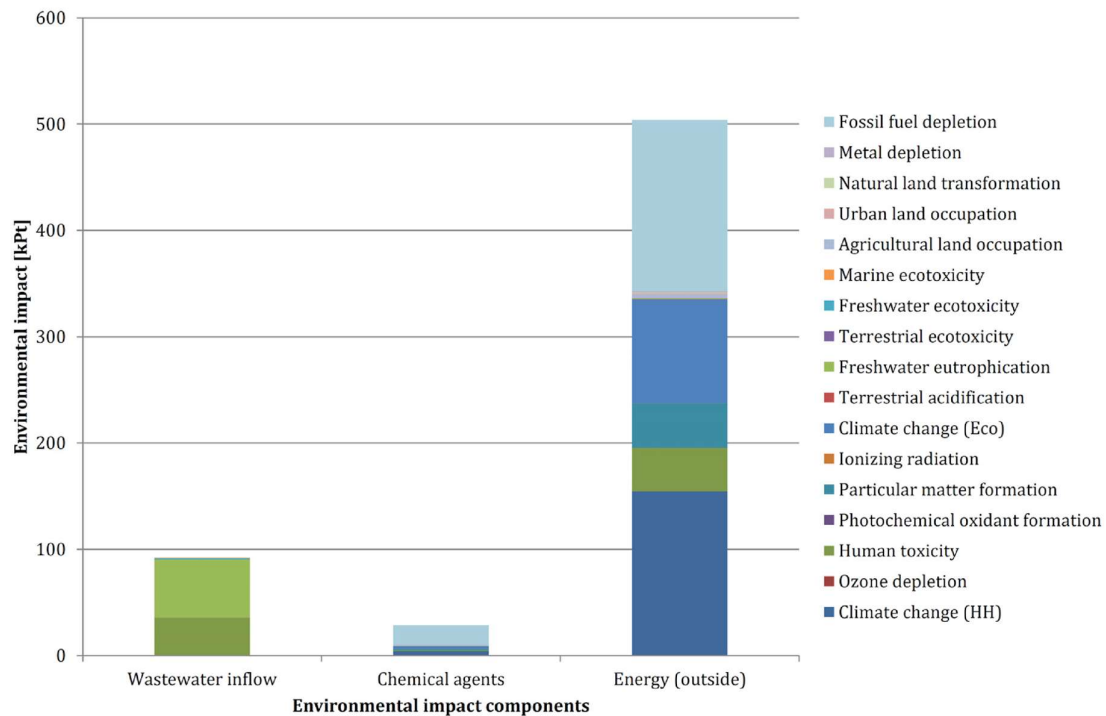
Analiza została przeprowadzona zgodnie z wytycznymi norm PN-EN ISO 14040:2009 oraz PN-EN ISO 14044:2009, a do oceny wpływu środowiskowego wykorzystano metodologię ReCiPe version 1.11, zarówno w wariantcie Midpoint - koncentrującym się na poszczególnych kategoriach oddziaływania, takich jak emisje GHG, eutrofizacja, zakwaszenie czy zużycie zasobów, jak i Endpoint - umożliwiającym określenie oddziaływania na poziomie trzech głównych obszarów: zdrowia ludzkiego, oddziaływania na ekosystem oraz zasobów naturalnych. W tym celu wykorzystano oprogramowanie SimaPro zasilone bazą EcoInvent. Analizowano Centralną Oczyszczalnię Ścieków dla miasta Poznania (COŚ) (A1). Wyniki wskazały, że dominującym komponentem śladu środowiskowego Centralnej Oczyszczalni Ścieków jest oddziaływanie na klimat (Rysunek 5).



Rysunek 5. Szczegółowe profile oddziaływania COŚ - podział na wejścia i wyjścia z procesu - z wyróżnieniem

kategorii oddziaływania [źródło: A1].

Odpowiadało ono za zdecydowaną większość całkowitego oddziaływania, a jego wielkość determinowana była głównie przez dwa czynniki: zapotrzebowanie energetyczne obiektu oraz charakterystykę krajowego miksu energetycznego (Rysunek 6).



Rysunek 6. Główne obciążenia środowiskowe COŚ - podział na kategorie wpływu [źródło: A1].

W analizowanym okresie (2019) struktura polskiego sektora energetycznego oparta była przede wszystkim na paliwach kopalnych, w szczególności na węglu kamiennym i brunatnym. Powodowało to, że każda jednostka energii elektrycznej zużytej w procesach technologicznych oczyszczalni przekładała się na znaczące emisje dwutlenku węgla i innych GHG.

Jednocześnie analiza LCA ujawniła istotne znaczenie emisji procesowych, związanych z przebiegiem procesów biologicznego oczyszczania ścieków i przeróbki osadów. Dotyczyło to zwłaszcza emisji N_2O oraz CH_4 . Choć ich ilościowy udział w całkowitych emisjach był mniejszy niż emisji powiązanych z zużyciem energii, to z uwagi na bardzo wysoki potencjał cieplarniany (ang. *Global Warming Potential* – GWP) tych gazów tych miały one istotny wpływ na wynik końcowy.

W strukturze CF oczyszczalni udział emisji procesowych nie był w pełni znany i precyzyjnie oszacowany, gdyż w obiekcie nie prowadzono rutynowych pomiarów tychże gazów. W konsekwencji analizy LCA musiały opierać się na wskaźnikach emisyjnych pochodzących z literatury międzynarodowej.

Analiza LCA (A1) wykazała również, że mimo stosowania technologii odzysku energii z biogazu, COŚ wciąż pozostawał odbiorcą energii elektrycznej z sieci. Produkcja energii z biogazu nie była w stanie zrekompensować całkowitego zapotrzebowania energetycznego obiektu. Wskazywało to na ograniczony potencjał samowystarczalności energetycznej obiektów tego typu w analizowanych warunkach technologicznych i strukturalnych.

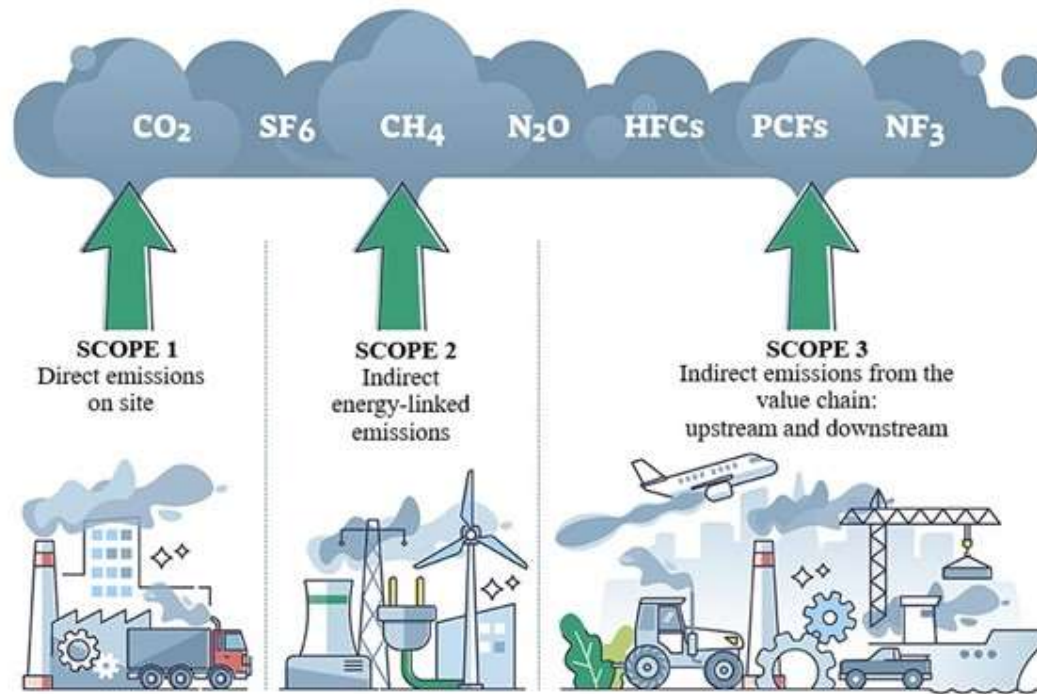
Dominującą składową śladu środowiskowego oczyszczalni stanowi CF, co uzasadniało koncentrację dalszych badań na tym aspekcie. Tradycyjne podejście do oceny funkcjonowania oczyszczalni, skupiające się na parametrach jakości ścieków oczyszczonych, okazało się nie być wystarczające do pełnej analizy oddziaływania na środowisko. Brak precyzyjnych danych dotyczących emisji procesowych N_2O i CH_4 ogranicza wiarygodność analiz i wskazuje na konieczność prowadzenia badań empirycznych oraz tworzenia własnych wskaźników emisyjnych dostosowanych do lokalnych warunków (Butterbah-Bahl et al., 2021).

3.2. Opracowanie algorytmu kalkulacji śladu węglowego – Zakres 1

Opracowanie uniwersalnego algorytmu kalkulacji śladu węglowego dowolnej wybranej miejskiej oczyszczalni ścieków zostało przedstawione w dwuczęściowym cyklu publikacji: część pierwsza dedykowana emisjom bezpośrednim (A2), część 2 – emisjom pośrednim (A3). Opracowany algorytm został zbudowany po szczegółowym przeglądzie dostępnych metodologii obliczeniowych z całego świata (krajów Europy, Stanów Zjednoczonych czy Australii). W oparciu o wytyczne IPCC 2019: *Guidelines for wastewater treatment and discharge* ujęte z wymaganiami metodologii GHG Protocol - najbardziej rozpowszechnionego na świecie standardu dotyczącego inwentaryzacji emisji gazów cieplarnianych - dostosowano go do wymogów Europejskich Standardów Raportowania nt. Zrównoważonego Rozwoju (ESRS), które w maju 2025 roku stały się obowiązkowe dla wybranych przedsiębiorstw sektora komunalnego w ramach implementacji dyrektywy CSRD i „stop the clock” (UE 2025/794).

Algorytm obejmował w pierwszej kolejności Zakres 1 (Z1). Dotyczy on emisji bezpośrednich, obejmujących przede wszystkim emisje procesowe N_2O i CH_4 , które powstają w trakcie oczyszczania ścieków, począwszy od oczyszczania mechanicznego, a także biologicznego – np. metodą osadu czynnego, zarządzania gospodarką osadową oraz podczas fermentacji i magazynowania osadów. Uwzględniono również emisje niezorganizowane, takie jak planowe uwalnianie się CH_4 w wyniku przeglądów technicznych, jak i niekontrolowane emisje GHG z układów transportu i magazynowania biogazu. Następnie przygotowano algorytm dla Zakresu 2 (Z2) oraz Zakresu 3 (Z3) (A3). Strukturę Zakresów zgodną z GHG Protocol przedstawiono na schemacie (Rysunek 7). Zastosowanie algorytmu pozwala na dokonanie pełnej inwentaryzacji emisji bezpośrednich oraz na ich agregację w postaci CF wyrażonego w ekwiwalencie dwutlenku węgla (CO_2e). Szczególną uwagę zwrócono na kwestię kompletności danych. W toku analiz zidentyfikowano bowiem, że w wielu przedsiębiorstwach zarządzających oczyszczalniami ścieków nie rejestruje się w sposób systematyczny części emisji niezorganizowanych ani danych, które mogłyby posłużyć do ich oszacowania – takich jak frakcje azotowe na etapie oczyszczania biologicznego. W konsekwencji wiele dostępnych dotychczas analiz środowiskowych opiera się na wskaźnikach literaturowych lub uproszczonych modelach, które nie odzwierciedlały specyfiki lokalnych obiektów. Algorytm pozwala również na wprowadzenie elastyczności w doborze współczynników emisyjnych, co umożliwiłoby zastosowanie danych empirycznych, jeśli takie byłyby dostępne. W przypadku ich braku istniała możliwość zastosowania wartości literaturowych, jednakże z wyraźnym wskazaniem na poziom niepewności takich oszacowań. Takie podejście czyni narzędzie przydatnym zarówno w warunkach akademickich, jak i praktycznych, gdyż umożliwia jego zastosowanie

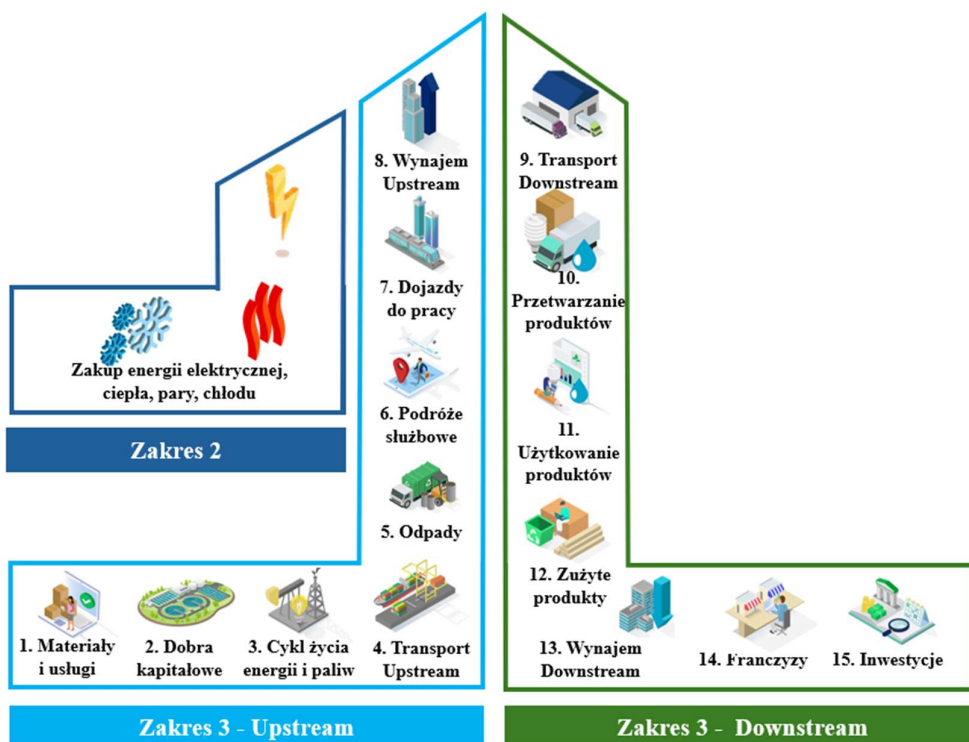
także w tych oczyszczalniach, które nie prowadzą zaawansowanych pomiarów emisji, pozostawiając przestrzeń do systematycznego polepszania jakości danych i przeprowadzenia coraz to rzetelniejszych obliczeń CF. Dodatkowo algorytm obejmuje także analizę niepewności dla zastosowanych w kalkulacjach wskaźników emisji.



Rysunek 7. Zakresy śladu węglowego organizacji według GHG Protocol [źródło: A4].

3.3. Rozszerzenie algorytmu kalkulacji śladu węglowego o Zakresy 2 i 3

Z2 obejmuje emisje pośrednie wynikające ze zużycia energii elektrycznej i ciepłej kupowanej z zewnętrznych źródeł, a Z3 podzielony jest zgodnie z GHG Protocol na określone Kategorie (Rysunek 8). Obejmują one pośrednie emisje GHG związane z działalnością oczyszczalni, ale powstające poza jej granicami. W ramach algorytmu (A3) przygotowano wytyczne do przeprowadzenia analizy istotności służącej do wskazania najbardziej istotnych kategorii Zakresu 3 dla danego przypadku. Do głównych kategorii zaliczono emisje wynikające z produkcji i transportu chemikaliów stosowanych w procesie oczyszczania ścieków (np. koagulantów, polielektrolitów, środków dezynfekcyjnych), emisje związane z gospodarką osadami (w tym transportem i procesami końcowego unieszkodliwiania), a także emisje generowane przez zużycie materiałów eksploatacyjnych i pomocniczych.



Rysunek 8. Poszczególne Kategorie Zakresu 3 według GHG Protocol [opracowanie własne].

Zidentyfikowano luki w raportowaniu, w tym brak ujednoliconych wskaźników emisyjnych dla produkcji chemikaliów czy transportu i zagospodarowania osadów. W związku z tym autorzy zaproponowali strategię poprawy kompletności danych. Obejmowała ona prowadzenie lokalnych inwentaryzacji w przedsiębiorstwach, ujednolicenie metod raportowania oraz wykorzystywanie międzynarodowych baz danych, takich jak EcoInvent czy DEFRA, jako źródła wartości zastępczych.

3.4. Pozyskanie wskaźników empirycznych i wykorzystanie opracowanego algorytmu

Aby pozyskać rzeczywiste wskaźniki emisji GHG, przeprowadzono kampanię pomiarową emisji podtlenku azotu (N_2O) i metanu (CH_4) w COŚ w Poznaniu (w skali technicznej) z zamiarem wykorzystania ich do kalkulacji śladu węglowego obiektu za pomocą opracowanego algorytmu (A2, A3, A4). Dotychczas stosowane metody kalkulacji CF OŚ opierały się na wartościach literaturowych i wskaźnikach uśrednionych.

Badana w niniejszej pracy Centralna Oczyszczalnia Ścieków zlokalizowana jest w Koziegłowach, na prawym brzegu rzeki Warty, w bezpośrednim sąsiedztwie Poznania - głównego ośrodka aglomeracji wielkopolskiej. Oczyszczalnia przetwarza średnio około 100 000 m³ ścieków na dobę, pochodzących z Poznania oraz okolicznych miejscowości, co odpowiada równoważnej liczbie 1 000 000 mieszkańców w przeliczeniu na jednostkowe obciążenie pięciodniowym biochemicznym zapotrzebowaniem na tlen (BZT₅). Technologia zastosowana w obiekcie umożliwia uzyskanie jakości ścieków oczyszczonych spełniających wymagania dla zrzutu do rzeki Warty i opiera się na procesach biologicznego usuwania

związków biogenych (ang. *Biological Nutrient Removal* - BNR) realizowanych metodą osadu czynnego w bioreaktorach skonstruowanych w systemie zmodyfikowanego Bardenpho. Przed etapem biologicznym ścieki poddawane są wstępnemu oczyszczaniu mechanicznemu, obejmującemu zatrzymywanie skrutek i separację piasku oraz osadu wstępnego. Zatrzymane frakcje stałe kierowane są najpierw do napowietrzanych zhermetyzowanych piaskowników poziomych, a następnie do osadników wstępnych, które także zostały zhermetyzowane.

Produktem ubocznym procesów oczyszczania są osady ściekowe: osad wstępny oraz osad nadmierny. Ze względu na wysoki potencjał energetyczny, oba rodzaje osadów są łączone i kierowane do sześciu komór fermentacyjnych beztlenowych. Uzyskany surowy biometan, poddawany jest wstępnej obróbce, a następnie wykorzystywany do produkcji energii elektrycznej i ciepłej w agregatach prądotwórczych.

Przefermentowany osad, kierowany jest do instalacji odgazowywania w zbiornikach, a następnie odwadniany w wirówkach. Ostateczna utylizacja odwodnionego osadu, wraz z innymi produktami ubocznymi oczyszczania (takimi jak piasek z piaskowników oraz skratki poddane kompresji), realizowana jest poza terenem oczyszczalni. Dodatkowo, aby zapewnić stabilność procesu usuwania fosforu w okresie zimowym, do ścieków wprowadza się okresowo roztwór siarczanu żelaza(III) (PIX113), w ilości gwarantującej utrzymanie wymaganego poziomu strącania fosforanów.

Należy wspomnieć, że prace związane z częścią badawczą niniejszej rozprawy, zostały sfinansowane w ramach projektu grantowego Integrated system for [Simultaneous Recovery of Energy, organics and Nutrients and generation of valuable products from municipal wastewater - SIREN](#), realizowanego z mechanizmu finansowego tzw. Grantów Norweskich.

Już na etapie przygotowywania wniosku projektowego opracowano szczegółowe wytyczne dotyczące pomiarów, obejmujące zarówno merytoryczne podstawy zastosowanej metody badawczej - spektroskopii FTIR - wraz z wymaganym zakresem pomiarowym, jak i kompletny plan badań, harmonogram poborów oraz rozwiązania techniczne umożliwiające przechwytywanie mieszaniny gazów z powierzchni bioreaktora COŚ. Na potrzeby kampanii zaprojektowano i skonstruowano specjalistyczną komorę pomiarową (Rysunek 9a i b). Została ona umieszczona na powierzchni mieszaniny osadu czynnego i ścieków oczyszczonych w komorze tlenowej wybranego reaktora biologicznego. Całość instalacji unieruchomiono za pomocą lin, a gazy wydzielające się z powierzchni bioreaktora kierowano węzłem wykonanym z materiału obojętnego chemicznie do analizatora FTIR. Pomiary prowadzono przy użyciu aparatu GASMET DX4000 z oprogramowaniem CALCMET (Rysunek 10). System umożliwiał rejestrację wyników w czasie rzeczywistym. Kampania została zorganizowana w trybie ciągłym (24 h/dobę) w wyznaczonych punktach pomiarowych na powierzchni bioreaktora COŚ (Rysunek 11), zgodnie z wcześniej opracowanym harmonogramem (Rysunek 12). Analizy rozpoczęto od montażu aparatury i etapu tzw. rozbiegu, trwającego około 17 godzin, w trakcie którego zespół badawczy zapoznawał się z obsługą i stabilizacją aparatury (Rysunek 13 - etap: rozbieg). Następnie zrealizowano pierwszą fazę badań trwającą nieco ponad 7 dob, której celem była ocena poziomów emisji CH₄ i N₂O w różnych strefach komory nityfikacji, a w konsekwencji identyfikacja punktu docelowego dla dalszych pomiarów (Rysunek 12 - dni 25.08÷01.09.2021) oraz okres walidacyjny w warunkach ustalonych (Rysunek 12 - 07.09.2021).



Rysunek 9a, 9b. Zdjęcie komory pomiarowej (ang. *flux chamber*). Komora o powierzchni roboczej 50 x 50 [cm] została przymocowana do dwóch pływaków. Cała konstrukcja została wykonana z poliwęglanu [zbiory własne].



Rysunek 10. Zdjęcie aparatury pomiarowej FTIR: GASMET z kondycjonerem i laptopem z oprogramowaniem CALCMET poliwęglanu [zbiory własne].

Właściwa kampania pomiarowa, trwająca cztery dni, została przeprowadzona w punkcie pomiarowym P3 (Rysunek 11), który wytypowano na podstawie wyników analiz wstępnych. Oprócz danych dotyczących emisji GHG, w trakcie kampanii gromadzono także dodatkowe informacje ilościowe i jakościowe obejmujące cały obiekt COŚ. Zawierały one m.in. parametry technologiczne pracy poszczególnych etapów oczyszczania ścieków takie, jak dane dotyczące ładunku dopływającego ścieku oraz wyniki równoległych analiz laboratoryjnych. Na Rysunkach 8 i 9 przedstawiono kolejne punkty pomiarowe oraz lokalizację tymczasowych laboratoriów polowych, zorganizowanych na potrzeby kampanii badawczej.

W ramach projektu SIREN przygotowywano także model COŚ za pomocą oprogramowania GPS-X. W celu odpowiedniej kalibracji ww. modelu kolekcjonowano także dane z gospodarki osadowej (Rysunek 13 - punkty 11÷15).



Rysunek 11. Umieszczenie punktów pomiarowych, w których montowano komorę - jeden z bioreaktorów (BR) (obiekt 10.5) COŚ [opracowanie własne].

POSZUKIWANIE PUNKTU POMIAROWEGO DLA	WTOREK 24.08.2021																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
KAMPANIA	MONTAŻ												ROZBIEG											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
WAR. UST.	CZWARTEK 26.08.2021												PIĄTEK 27.08.2021											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
PROFIL	SOBOTA 28.08.2021												NIEDZIELA 29.08.2021											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
KAMPANIA	PONIEDZIAŁEK 30.08.2021												WTOREK 31.08.2021											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
WAR. UST.	ŚRODA 01.09.2021												CZWARTEK 02.09.2021											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
PROFIL	PIĄTEK 03.09.2021												SOBOTA 04.09.2021											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
KAMPANIA	NIEDZIELA 05.09.2021												PONIEDZIAŁEK 06.09.2021											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
WAR. UST.	WTOREK 07.09.2021																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16								

Rysunek 12. Harmonogram badań - kolory tabeli odpowiadają oznaczeniem kolejnych punktów pomiarowych (Rys. 11). Zaznaczono kolejne godziny doby, w których komora znajdowała się w określonej punktem lokalizacji [opracowanie własne].

Informacje dotyczące reżimu poboru prób oraz wykonywanych analiz zestawiono w Tabeli 2. Zawarto w niej szczegółowe dane dotyczące harmonogramu i częstotliwości poborów, a także wykaz zastosowanych testów kuwetowych wykorzystujących metodę spektrofotometrii jonowej do oznaczeń jakościowych. Ponadto w tabeli przedstawiono zestawienie norm i procedur analitycznych stosowanych w laboratorium, które stanowiły podstawę walidacji uzyskanych wyników. Analizy walidacyjne wykonywano w akredytowanym laboratorium. Wyniki kampanii pomiarowej przeprowadzonej na COŚ w postaci zależności stężenia (mg gazu w przeliczeniu na Nm³) GHG od czasu przedstawiono na wykresie – Rysunek 14. Wyniki pomiarów wskazują na wyraźną przeciwną korelację między wartościami CH₄ i N₂O: w okresach, gdy emisje metanu osiągały maksimum, poziomy podtlenku azotu spadały do wartości minimalnych i odwrotnie. Zjawisko to odzwierciedla dominację odmiennych mechanizmów odpowiedzialnych za emisje obu gazów. Metan jest generowany głównie w procesach beztlenowych, podczas gdy N₂O powstaje w wyniku intensywnych przemian azotowych (nityfikacji i denityfikacji), które przebiegają w środowisku tlenowym lub przy zmiennych warunkach dostępności tlenu.



Rysunek 13. Umieszczenie poszczególnych punktów pomiarowych i poborowych próbek - z lotu ptaka [opracowanie – na cele projektu SIREN].

Tabela 2. Wykaz dodatkowych badań wykonywanych oraz danych agregowanych na cele opracowania wskaźników emisji GHG dla COŚ.

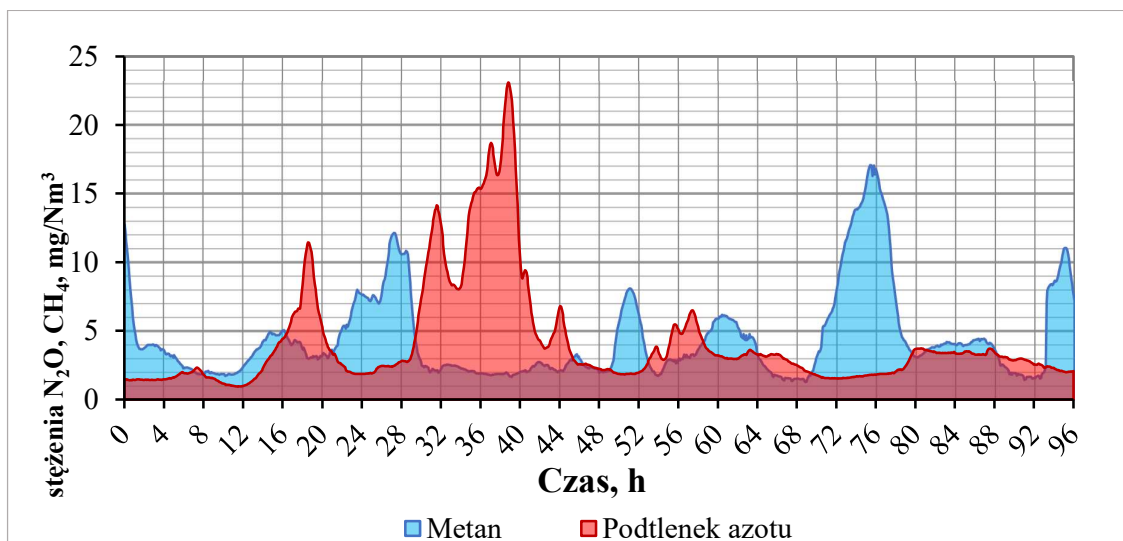
PARAMETR	JEDNOSTKA	METODA POMIAROWA	CZĘSTOTLIWOŚĆ POMIAROWA
DOPIŁYW DO BIOREAKTORA, DOPIŁYW DO COŚ, ODPIŁYW Z COŚ			
Frakcje azotowe (TKN - azot Kiejdahla, N-NH ₄ , N-NO ₂ , N-NO ₃)	mg/L	testy kuwetowe Hach (LCK304, 338, 340, 341), testy laboratoryjne (PN-C-04576-4:1994; PN-82/C-04576.08; PN-EN 26777:1999; PN-EN 25663:2001)	średnia dobową - 24 próbki uśrednione względem przepływu
ChZT całkowite i rozpuszczone rChZT	mg/L	testy kuwetowe Hach (LCK314, 514, 914), testy laboratoryjne ISO 15705	średnia dobową - 24 próbki uśrednione względem przepływu
Zawiesina ogólna, zawiesina organiczna	mg/L	testy laboratoryjne - metoda wagowa	średnia dobową - 24 próbki uśrednione względem przepływu
Fosfor ogólny i fosforany P _{tot} and P-PO ₄	mg/L	testy kuwetowe Hach (LCS349, LCK348, 350), testy laboratoryjne (PN-EN ISO 6878:2006 pkt 7 +Ap1:2010+ AP2:2010; PN-EN ISO 6878:2006 pkt 4 +Ap1:2010+ AP2:2010; PN-C-04537-7:1998)	średnia dobową - 24 próbki uśrednione względem przepływu
Przepływ	m ³ /h	SCADA	miar ciągły - zapis co 5 minut
CHARAKTERYSTYKA BIOREAKTORA			
Frakcje azotowe (TKN, N-NH ₄ , N-NO ₂ , N-NO ₃)	mg/L	SCADA oraz testy kuwetowe Hach (LCK238, 339, 340, 341,1054),	ciągły (SCADA) oraz analiza laboratoryjna co 2 godziny

PARAMETR	JEDNOSTKA	METODA POMIAROWA	CZĘSTOTLIWOŚĆ POMIAROWA
DOPIYW DO BIOREAKTORA, DOPIYW DO COŚ, ODPIYW Z COŚ			
		testy laboratoryjne (PN-C-04576-4:1994; PN-82/C-04576.08; PN-EN 26777:1999; PN-EN 25663:2001)	
ChZT całkowite i rozpuszczone rChZT	mg/L	testy kuwetowe Hach (LCK314, 914), testy laboratoryjne ISO 15705	analiza laboratoryjna co 2 godziny
Zawiesina ogólna, zawiesina organiczna	mg/L	testy laboratoryjne	analiza laboratoryjna raz na dobę
Fosforany P-PO ₄	mg/L	testy kuwetowe Hach (LCS349, LCK350), testy laboratoryjne (PN-EN ISO 6878:2006 pkt 4 +Ap1:2010+ AP2:2010)	analiza laboratoryjna co 2 godziny
Poziomy recyrkulacji wewnętrznej i zewnętrznej	% of Q, m ³ /h	SCADA	pomiar ciągły - zapis co 5 minut
Tlen rozpuszczony (osobno w każdym punkcie ustawienia komory)	mg/L	SCADA	pomiar ciągły - zapis co 5 minut
Temperatura	°C	SCADA	pomiar ciągły - zapis co 5 minut
Przepływ powietrza	m ³ /h	SCADA	pomiar ciągły - zapis co 5 minut

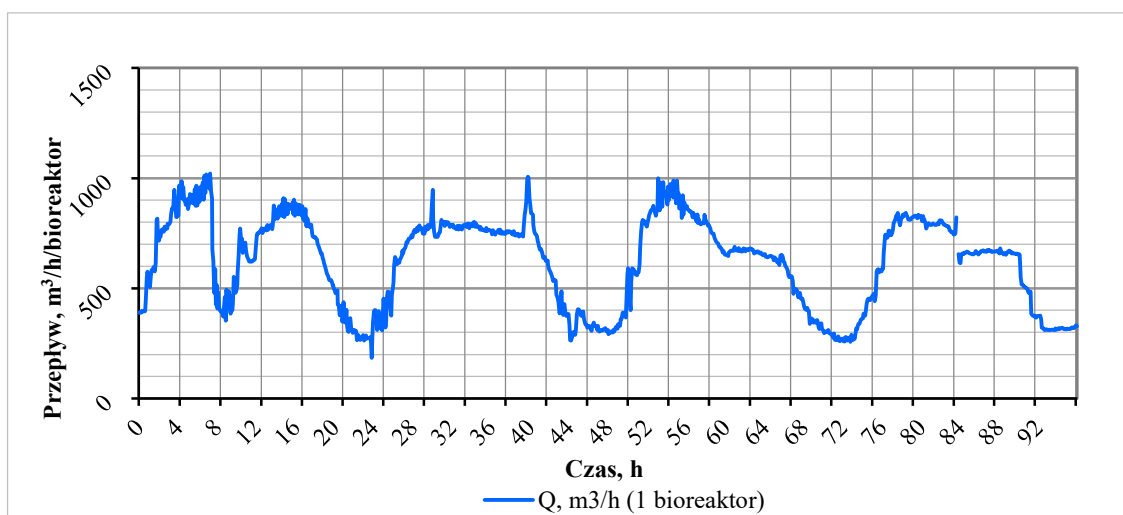
Zaobserwowano również okresy względnej stabilizacji stężeń obu gazów, trwające od 6. do 12. godziny kampanii, następnie pomiędzy 64. a 70. godziną oraz w końcowej fazie pomiarów - od 80. do 92. godziny. Stabilność ta może być interpretowana jako rezultat ustabilizowanych warunków technologicznych, w tym równomiernego dopływu ścieków i utrzymania odpowiednich parametrów tlenowych w reaktorach biologicznych.

Maksymalne stężenia CH₄ występowały cyklicznie, średnio co 24 ± 2 godziny, najczęściej około godziny 13:00. Zjawisko to wskazuje na powiązanie emisji metanu z dobowym rytmem pracy oczyszczalni oraz zmianami obciążenia hydraulicznego (wykres – Rysunek 15). Interesującym aspektem jest obserwacja, że szczytom emisji CH₄ towarzyszył wcześniejszy spadek przepływu, a następnie - ze średnim opóźnieniem od 1 do 3 godzin - gwałtowny wzrost emisji metanu. Może to sugerować, że niższy przepływ sprzyja krótkotrwałemu rozwojowi warunków beztlenowych, które intensyfikują procesy metanogenezy.

W przypadku N₂O zależność była odmienna: emisje tego gazu były ściśle skorelowane z przepływem ścieków, a co za tym idzie i ładunków azotowych, bez zauważalnych opóźnień czasowych. Wynik ten wskazuje, że procesy generujące N₂O (przede wszystkim nityfikacja i częściowa denityfikacja) reagują bezpośrednio na zmiany dopływu ładunku azotowego i warunki operacyjne, takie jak stężenie tlenu rozpuszczonego. Tym samym N₂O okazuje się gazem bardziej wrażliwym na krótkotrwałe wahania parametrów technologicznych niż CH₄, którego emisje charakteryzują się większą inercją i cyklicznością.



Rysunek 14. Wyniki stężeń gazów - CH₄ i N₂O [mg/Nm³] podczas 96-godzinnej kampanii pomiarowej COŚ.



Rysunek 15. Zmienność napływu ścieków [m³/h] na pojedynczy bioreaktor podczas 96-godzinnej kampanii pomiarowej COŚ (przerwa w 85. h kampanii spowodowana chwilową awarią przepływomierza).

Wyniki pomiarów FTIR oraz parametry analiz laboratoryjnych przeliczono następnie na wskaźniki emisji. W kalkulacjach uwzględniono także wyniki otrzymane podczas ostatniego etapu kampanii – pomiarów w warunkach ustalonych - przy stałym napływie ścieków oczyszczonych mechanicznie na bioreaktor, utrzymywanym na poziomie 600 m³/h oraz przy zadanych parametrach dotyczących stopnia recyrkulacji wewnętrznej i zewnętrznej oraz stałym stężeniu DO 1,0 mg/L. Ostatecznie, opracowania ostatecznych wartości wskaźników emisji dokonano z uwzględnieniem przepływu powietrza w komorze nityfikacji oraz powierzchni wszystkich bioreaktorów. Szczegółowe dane z okresu kampanii wykorzystano do budowy modelu GPSX COŚ - za pomocą którego, dokonano czynności kalibracyjnych, a następnie walidacyjnych, dla opracowanych wskaźników emisji. Wyniki porównano

z wartościami wytycznych IPCC (Tabela 7). Otrzymane wskaźniki empiryczne okazały się ok. 12x niższe (dla N_2O) oraz ok. 100x niższe (dla CH_4) niż dane literaturowe.

Tabela 7. Porównanie otrzymanych wskaźników emisji dla podtlenku azotu i metanu: kampania pomiarowa vs. wytyczne IPCC (wskaźniki literaturowe) – dokonano niezbędnych przeliczeń jednostek.

Opis wskaźnika	Wartość wskaźnika	Jednostka
IPCC	0,01600	$kg\ N_2O-N/kg\ N_{tot}$
	0,02514	$kg\ N_2O/kg\ N_{tot}$
Kampania	0,00212	$kg\ N_2O/kg\ N_{tot}$
IPCC	0,007500	$kg\ CH_4/kgBZT_5\ dopływ$
Kampania	0,000074	$kg\ CH_4/kg\ ChZT\ dopływ$

Tak uzyskanie wyniku zastosowano do kalkulacji CF w oparciu o wcześniej opracowany algorytm. Porównanie wyników wykazało bardzo duże różnice między narzędziami. Narzędzie CFCT w wersji z 2014 roku oszacowało całkowity ślad węglowy oczyszczalni na poziomie 29 310 tCO₂e rocznie, a wersja zaktualizowana z 2024 roku - na 28 730 tCO₂e rocznie. Narzędzie ECAM wskazało natomiast wartość aż 54 370 tCO₂e rocznie, czyli blisko dwukrotnie wyższą od wyniku CFCT. Z kolei opracowany algorytm, oparty na danych empirycznych z kampanii pomiarowej, oszacował emisje na poziomie około 10 000 tCO₂e rocznie. Oznacza to, że narzędzie ECAM przeszacowało emisje o około 65% w stosunku do wartości uzyskanych na podstawie danych rzeczywistych, a w odniesieniu do emisji procesowych różnice sięgały nawet 200%.

Wyniki tego etapu badań potwierdziły zasadność podejścia przyjętego w opracowanym algorytmie, zakładającego elastyczność w doborze wskaźników emisyjnych i preferencję dla danych empirycznych, jeśli są dostępne. Pokazały także, że w przypadku braku pomiarów konieczna jest lokalna kalibracja wartości literaturowych, aby uwzględniały specyfikę danego obiektu. Wskazano również, że rozwój metod monitoringu emisji gazów cieplarnianych w oczyszczalniach ścieków jest jednym z kluczowych wyzwań dla dalszego rozwoju sektora.

3.5. Droga do neutralności klimatycznej

Przegląd literatury potwierdził wcześniejsze obserwacje z badań empirycznych - emisje procesowe stanowią główne wyzwanie w bilansie klimatycznym OŚ w kontekście zarządczym, redukcyjnym – jako nieodzowny proces obiektu (A5). W wielu analizach wykazano, że mogą one odpowiadać za ponad 60% całkowitego śladu węglowego, podczas gdy emisje związane z energią elektryczną i ciepłą sięgają około 30%. Oznacza to, że działania dekarbonizacyjne muszą obejmować zarówno obszar procesów technologicznych, jak i gospodarkę energetyczną, optymalizację połączeń transportowych czy sposoby zagospodarowania osadów.

W literaturze podkreśla się rosnące znaczenie nowych technologii biologicznych, które pozwalają na ograniczenie emisji N_2O , takich jak proces Anammox czy nityfikacja częściowa (ang. *Partial Nitrification* - PN). Technologie te redukują ilość azotu przekształcanego w trakcie nityfikacji i denityfikacji, co przekłada się na niższą emisję

podtlenku azotu, a jednocześnie zmniejszają zapotrzebowanie na tlen, redukując zużycie energii elektrycznej. Z perspektywy systemowej mają one więc podwójną korzyść: ograniczają emisje procesowe i zmniejszają emisje pośrednie z energii. Dodatkową możliwością jest zastosowanie zaawansowanych, ale i kosztownych, metod usuwania azotu na cele produkcji nawozów – takich, jak techniki membranowe, albo bardziej klasycznych, opartych na procesach krystalizacji związków – produkcji struwitu.

Drugim istotnym obszarem możliwości redukcyjnych jest poprawa efektywności energetycznej. Oczyszczalnie ścieków należą do obiektów o wysokim zużyciu energii, dlatego każde działanie zmniejszające energochłonność procesów technologicznych – optymalizacja napowietrzania, zastosowanie zaawansowanych systemów sterowania, czy modernizacja urządzeń – przekłada się na realną redukcję śladu węglowego. Istotną rolę odgrywa także odzysk energii z biogazu powstającego w procesach fermentacji osadów. Choć w wielu przypadkach nie pozwala on na osiągnięcie pełnej samowystarczalności energetycznej, to znacząco obniża zapotrzebowanie na energię z sieci, a tym samym emisje w Z2. W przeglądzie wskazano również na znaczenie strategii gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). Separacja źródłowa ścieków i odzysk składników odżywczych, takich jak azot i fosfor, mogą przyczyniać się do zmniejszenia zapotrzebowania na energochłonną produkcję nawozów mineralnych, o czym wspomniano powyżej, co z kolei ogranicza emisje pośrednie w łańcuchu wartości. Takie podejście poszerza tradycyjne granice analizy i pozwala dostrzec powiązania między sektorem wodno-ściekowym a innymi gałęziami gospodarki, co ma duże znaczenie w perspektywie neutralności klimatycznej.

W literaturze pojawiają się także propozycje innowacyjnych technologii, które w przyszłości mogą zrewolucjonizować podejście do emisji gazów cieplarnianych w oczyszczalniach. Przykładem jest wychwytywanie i wykorzystanie N_2O jako źródła energii. Choć rozwiązanie to znajduje się na wczesnym etapie badań, pierwsze analizy wskazują, że mogłoby ono pozwolić na jednoczesną redukcję emisji i uzyskanie dodatkowych korzyści energetycznych. Podobne nadzieje wiąże się z rozwojem technologii wychwytu i sekwestracji dwutlenku węgla (CCS/CCU), które mogłyby znaleźć zastosowanie także w sektorze wodno-ściekowym. Przegląd literatury wskazał również na znaczenie synergii działań. Żadna z opisanych technologii ani strategii nie jest w stanie samodzielnie doprowadzić do neutralności klimatycznej obiektu OŚ czy, tym bardziej, sektora.

4. Podsumowanie i wnioski

Wykonanie przeglądu literaturowego i metodologicznego (A1, A5) wraz z przeprowadzoną kampanią pomiarową emisji gazów cieplarnianych w skali technicznej (A4) pozwoliły na wskazanie i opracowanie wytycznych do kalkulacji najważniejszego składnika śladu środowiskowego OŚM – algorytmu obliczeniowego CF zasilonego empirycznymi wskaźnikami emisji (A2, A3). Eliminuje on luki – zarówno w zakresie samej metodyki, jak i w obszarze zbierania danych. Algorytm spełnia wymagania legislacyjne UE w kontekście raportowania danych nt. zrównoważonego rozwoju dotyczących wpływu organizacji oraz procesów przez nią zarządzanych na klimat. Stanowi tym samym punkt wyjściowy do analizy struktury emisyjnej obiektów OŚM w celu opracowania ustrukturyzowanego, zaplanowanego w czasie podejścia do systematycznej redukcji emisji GHG – tzw. strategii dekarbonizacyjnej. Wnioski, będące wynikiem prac, można podzielić na dwa rodzaje –

wnioski naukowe (WN) oraz wnioski praktyczne (WP) realizujące poprzez publikacje (A1-5) wspólnie cel główny (CG) oraz cele szczegółowe (CS) rozprawy:

- WN1:** Na ślad środowiskowy obiektu OŚM największy wpływ ma miks energetyczny konsumowany przez obiekt oraz emisje gazów cieplarnianych (ślad węglowy) (A1) – CS1, CS2,
- WN2:** Poziomy emisyjności procesów oczyszczania ścieków mogą znacząco różnić się między obiektami OŚM, co wskazują na potrzebę rozwoju technik pomiarowych dot. produkcji i uwalniania się GHG (A4, A5),
- WN3:** Redukcja śladu węglowego procesów oczyszczania ścieków podkreśla potrzebę kontynuacji prac badawczych nad alternatywnymi do procesów osadu czynnego metodami oczyszczania z naciskiem na ponowne wykorzystanie zasobów oraz wykorzystanie potencjału energetycznego odpadów w zgodzie z koncepcją GOZ (A4, A5),
- WP1:** Mimo popularności tematyki śladu węglowego, analiza obecnie dostępnych metodologii kalkulacji poziomów emisji z OŚM wykazała, że brakuje ujednoliconego podejścia światowego, które pozwoliłoby porównywać wyniki między obiektami (A2, A3) – CS3,
- WP2:** Przeprowadzona kampania pomiarowa dla COŚ potwierdziła, że wskaźniki literaturowe emisji N₂O i CH₄ są wyższe odpowiednio ok. 12- i 100-krotnie niż literaturowe (A4) – CS4,
- WP3:** Wskaźniki emisji N₂O i CH₄ z procesów należy dobierać indywidualnie dla danego obiektu OŚM, uwzględniając zastosowaną technologię oczyszczania oraz parametry jakościowe charakterystyczne dla procesu celem minimalizacji ryzyka przeszacowania poziomów emisji GHG (A4) – CS4, CS6,
- WP4:** Kalkulacja CF we wszystkich trzech Zakresach GHG Protocol wymaga przygotowania szczegółowych danych – ilościowych i jakościowych – nie tylko dla procesów głównych, ale także dla procesów wspierających realizację głównego zadania OŚM – oczyszczania ścieków do wymaganych poziomów redukcji zanieczyszczeń kierowanych do odbiornika (A2, A3), co wskazuje na potrzebę budowania kompetencji i zasobów ludzkich dedykowanych regularnemu przeprowadzaniu obliczeń CF w przedsiębiorstwach wodno-kanalizacyjnych – CS5,
- WP5:** Korzystanie z ogólnodostępnych narzędzi do kalkulacji CF bez uprzedniego zapoznania się ze stosowanymi metodologią i zestawem wskaźników emisji może prowadzić do znaczących przeszacowań (A4) – CS6,
- WP6:** Analiza struktury śladu węglowego OŚM pozwala zdiagnozować głównego źródła emisji GHG - tak, aby następnie zaplanować praktyczną i wykonalną strategię działań nakierowanych na ich redukcję (A5) – CS5,
- WP7:** Przygotowanie strategii dekarbonizacji z pominięciem etapu pomiarów poziomów emisyjnych z dużym prawdopodobieństwem może przyczynić się do błędnych założeń redukcyjnych, a nawet niewywiązania się z zadeklarowanych celów (A4).

Bibliografia

1. Burchart-Korol, D., & Zawartka, P. (2023). Environmental Life Cycle Assessment of Septic Tanks in Urban Wastewater System – a Case Study for Poland. *Archives of Environmental Protection*. <https://doi.org/10.24425/aep.2019.130243>
2. Butterbach-Bahl, K., Kraus, D., Kiese, R., Mai, V. T., Nguyen, T., Sander, B. O., Werner, C. (2022). Activity Data on Crop Management Define Uncertainty of CH₄ and N₂O Emission Estimates From Rice: A Case Study of Vietnam. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(6), 793–806. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200382>
3. Cui, H., Cui, X., Cui, X., Zhang, X., & Tong, Y. (2025). Occurrence and Ecological Risks of Sterilizing Agents in a Municipal Wastewater Treatment Plant: Insights From the Ecologically Sensitive Area. *The Science of the Total Environment*, 998, 180281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180281>
4. Cui, Y., Zhang, J., Wen, L., Liu, J., Hao, Z., Wei, C., Shen, P. (2023). Seasonal Changes of Chemodiversity Along With Microbial Succession in a Municipal Wastewater Treatment Plant. *Journal of Environmental Sciences*, 150, 318–331. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.08.001>
5. Deska, M., Kruczek, M., Zawartka, P., & Burchart-Korol, D. (2018). ZASTOSOWANIE METODY LCA DO WSPOMAGANIA DECYZJI W ŚRODOWISKOWYCH W GOSPODARCE WODNO-ŚCIEKOWEJ. *Scientific Papers of Silesian University of Technology Organization and Management Series*, 2018, 91–107. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2018.117.6>
6. Fang, K., Tong, Y., Yao, G., Zhu, N., Jin, L., Zhou, Y., & Zhao, J. (2025). NaOH-Enhanced Wet Air Oxidation of Municipal Sludge for High-Quality Carbon Source Production. *Processes*, 13(2), 341. <https://doi.org/10.3390/pr13020341>
7. Farkas, K., Williams, R. C., Hillary, L. S., Garcia-Delgado, A., Jameson, E., Kevill, J. L., . . . Jones, D. L. (2024). Harnessing the Power of Next-Generation Sequencing in Wastewater-Based Epidemiology and Global Disease Surveillance. *Food and Environmental Virology*, 17(1). <https://doi.org/10.1007/s12560-024-09616-0>
8. La Rosa, M. C., Maugeri, A., Favara, G., La Mastra, C., Lio, R. M. S., Barchitta, M., & Agodi, A. (2025). The Impact of Wastewater on Antimicrobial Resistance: A Scoping Review of Transmission Pathways and Contributing Factors. *Antibiotics*, 14(2), 131. <https://doi.org/10.3390/antibiotics14020131>
9. Li, H., Liu, C., Guo, X., Sun, H., Li, X., Jiang, H., & Miao, S. (2025). Applying Machine Learning Approach to Design Operational Control Strategies for a Wastewater Treatment Plant in Typical Scenarios. *Water*, 17(3), 310. <https://doi.org/10.3390/w17030310>
10. Lozada-Castro, J. J., Bastidas-Obando, J. D., & Guerrero-Fajardo, C. A. (2025). Treatment of Domestic Wastewater Through a Pilot Treatment Plant That Applies Selective Ion Flow Cell Technology. *Chemistry and Materials Science*. In press. <https://doi.org/10.20944/preprints202501.2058.v1>
11. Menon, S. S., & Kalyanraman, V. (2025). A Comprehensive Review of Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) Technology: Advancements and Trends From 2010 to 2024. *Environmental Technology Reviews*, 14(1), 17–39. <https://doi.org/10.1080/21622515.2024.2447090>
12. Nurzhan, A., Ruan, X., & Chen, D. (2025). A Review of Life Cycle Assessment Application in Municipal Waste Management: Recent Advances, Limitations, and Solutions. *Sustainability*, 17(1), 302. <https://doi.org/10.3390/su17010302>
13. Ranganathan, J., World Resources Institute, World Business Council for Sustainable Development, Bhatia, P., World Business Council for Sustainable Development, Gage, P. World Resources Institute. (2014.). *A Corporate Accounting and Reporting Standard*. Retrieved from <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>
14. Rebello, T. A., Roque, R. P., Gonçalves, R. F., Calmon, J. L., & Queiroz, L. M. (2020a). Life Cycle Assessment of Urban Wastewater Treatment Plants: A Critical Analysis and Guideline Proposal. *Water Science & Technology*, 83(3), 501–514. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.608>
15. Srivastava, R. (2025). Bioinformatics in Monitoring and Enhancing Wastewater Treatment Processes. In *Advances in environmental engineering and green technologies book series* (pp. 457–484). <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-8487-9.ch015>

16. Szulc, P., Kasprzak, J., Dymaczewski, Z., & Kurczewski, P. (2021). Life Cycle Assessment of Municipal Wastewater Treatment Processes Regarding Energy Production from the Sludge Line. *Energies*, 14(2), 356. <https://doi.org/10.3390/en14020356>
17. Tang, L., Zhang, Y., Gao, M., & Wang, X. (2025). Simultaneous Nitrification–Endogenous Denitrification With Phosphorus Removal Sustained by Aeration-Free Filamentous Microalgal–Bacterial Granular Sludge for Low C/N Wastewater Treatment. *ACS ES&T Engineering*. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.4c00833>
18. Wang, Y., Zhang, H., Zhou, E., Xie, L., & Li, J. (2025). Carbon Footprint Analysis of Distribution Network Transformers Based on Life Cycle Assessment. *Energies*, 18(3), 600. <https://doi.org/10.3390/en18030600>
19. Yang, J., & Tu, X. (2025). Life Cycle Assessment and Its Application in Wastewater Treatment: A Brief Review. *Applied and Computational Engineering*, 124(1), 212–218. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.20076>
20. Zhang, T. (2025). Sustainable Wastewater Treatment and the Circular Economy. *Water*, 17(3), 335. <https://doi.org/10.3390/w17030335>
21. Zhang, X., Fan, Y., Zhu, H., Wei, Z., Zhang, Y., Yang, A., He, Y. (2025). [Carbon Emission Analysis and Carbon Reduction Strategy of Small and Medium-scale Municipal Wastewater Treatment Plants in Cities and Towns]. *PubMed*, 46(1), 107–117. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202401090>