

prof. dr hab. inż. Monika Żubrowska-Sudoł

Warszawa, 16 stycznia 2026

Politechnika Warszawska

Wydział Inżynierii Środowiska

Zakład Systemów Wodociągowych i Kanalizacyjnych

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pauliny Szulc-Kłosińskiej
pt. „**Analiza śladu środowiskowego miejskiej oczyszczalni ścieków w koncepcji
zrównoważonego rozwoju**”

Promotor: dr hab. inż. Zbysław Dymaczewski, prof. uczelni

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Szulc-Kłosińskiej wykonana została pod promotorską opieką dr hab. inż. Zbysława Dymaczewskiego, prof. uczelni w Zakładzie Zaopatrzenia w Wodę i Biogospodarki na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej.

Głównym celem pracy było opracowanie metody wyznaczania śladu węglowego (CF) miejskich oczyszczalni ścieków (OŚ) – wskaźnika wytypowanego przez Doktorantkę jako najważniejszej składowej śladu środowiskowego przedmiotowych obiektów. Dysertacja wnosi istotne elementy poznawcze w obszarze analizy śladu środowiskowego komunalnych oczyszczalni ścieków, charakteryzując się równocześnie istotnymi walorami praktycznymi. Do najważniejszych osiągnięć dysertacji zaliczam opracowanie algorytmu kalkulacji śladu węglowego miejskich oczyszczalni ścieków z uwzględnieniem całego łańcucha wartości. Równie cennymi pod kątem naukowym i praktycznym są przeprowadzenie badań ukierunkowanych na określenie rzeczywistych emisji N_2O i CH_4 w obiekcie technicznym i skonfrontowanie ich wykorzystania do określenia CF ze wskaźnikami emisyjności pozyskanymi z literatury. Wspomniane już przeze mnie praktyczne znaczenie rezultatów niniejszej dysertacji odnosi się także do możliwości ich wykorzystania w procesie decyzyjnym związanym z wyborem rozwiązań technologicznych, czy materiałów eksploatacyjnych przyczyniających się do zmniejszenia śladu węglowego oczyszczalni ścieków w szerokich

granicach przyjętego systemu. Tego typu działania są kluczowe dla osiągnięcia neutralności klimatycznej, jednego na najważniejszych wyzwań globalnych.

W tym kontekście wybór tematyki pracy należy uznać za zasadny i wychodzący naprzeciw zarówno środowisku naukowemu jak i praktycznemu.

Dysertacja mgr inż. Pauliny Szulc-Kłosińskiej została przygotowana w formie spójnego tematycznie cyklu 5. oryginalnych prac opublikowanych w latach 2021 – 2025 w następujących periodykach wymienionych w wykazie czasopism naukowych MNiSW: *Energies* (P1; IF=3,252, 140 pkt. MNiSW), *Gaz Woda i Technika Sanitarna* (P2 i P3; 140 pkt. MNiSW), *Archives of Environmental Protection* (P4, praca przyjęta do druku; IF=1,300, 100 pkt. MNiSW) oraz *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (P5; IF=16,300, 200 pkt. MNiSW). W czterech z nich Doktorantka jest pierwszym autorem, a jej wkład własny w ich powstanie jest kluczowy i wynosi: 40 % dla P1 przy czterech autorach, 75 % dla prac P2 i P3 przy dwóch autorach i 60 % dla P4 przy czterech autorach. Zgodnie załączonymi przez Autorkę oświadczeniami każdorazowo polegał on na przygotowaniu koncepcji i pierwszej wersji artykułu. W przypadku P1 obejmował również opracowanie metodyki oraz walidację i analizę wyników, dla P2 i P3 opracowanie pierwszej wersji algorytmu oraz jego walidację i korektę, a dla P4 opracowanie metodyki badawczej, przygotowanie i koordynowanie kampanii pomiarowej, pobór próbek, prowadzenie analiz FTIR oraz wykonanie obliczeń. W artykule P5, stanowiącym pracę przeglądową, Doktorantka występuje jako 3 autor z 15 % udziałem w jego powstaniu wśród ośmioosobowego zespołu. Tylko udział pierwszego autora jest wyższy od udziału Pani mgr inż. Pauliny Szulc-Kłosińskiej. W tym przypadku Doktorantka odpowiedzialna była za przygotowanie jednego z rozdziałów tegoż artykułu. Dwóch współautorów nie potwierdziło pisemnie zadeklarowanych udziałów, co w odniesieniu do podpisów złożonych przez pozostałych czterech (w tym pierwszego i drugiego autora), uznaję za dopuszczalne i nie budzące moich wątpliwości, co do roli Kandydatki w powstaniu przedmiotowej pracy.

Sumaryczny IF oraz liczba punktów zgodna z listą czasopism punktowanych MNiSW przedmiotowego cyklu wynoszą odpowiednio 20,852 i 720.

Przedstawiony do oceny cykl opublikowanych artykułów naukowych stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, dokumentując tym samym umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktorantkę.

Analizując strukturę ocenianej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane tego typu pracom. Oprócz kopii wymienionych powyżej artykułów zawiera merytoryczny komentarz do przeprowadzonych prac oraz oświadczenia autorów

publikacji dotyczące ich udziału w powstaniu poszczególnych artykułów. Dysertacja rozpoczyna się streszczeniem w języku polskim oraz angielskim, wykazem publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej oraz wykazem pozostałego dorobku Doktorantki. Jej kolejna część to siedmiostronicowe wprowadzenie (rozdział 1), w którym Pani mgr inż. Paulina Szulc-Kłosińska definiuje luki naukowe w obszarze, którym się zajęła, podkreśla utylitarny charakter przeprowadzonych prac oraz wskazuje bariery i wyzwania dla rzetelnie przeprowadzonej środowiskowej oceny cyklu życia miejskich oczyszczalni ścieków. Tekst uzupełniają cztery rysunki, z których chciałabym wyróżnić dwa, a mianowicie: rysunek 1 ilustrujący obszary Zielonego Ładu UE oraz rysunek 4, który przedstawia wybrane kluczowe zmiany legislacyjne w kontekście branży wodno-kanalizacyjnej. Stanowią one graficzne udokumentowanie wysokiej istotności tematyki rozprawy doktorskiej dla wdrażania zrównoważonych rozwiązań w oczyszczalniach ścieków. Logicznym następstwem zagadnień omówionych we wprowadzeniu jest sprecyzowanie tez, celu i zakresu pracy (Rozdział 2). Cytując Autorkę jako tezy pracy wskazano:

- 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 i metanu, gdyż stosowanie wartości literaturowych prowadzi do istotnych przeszacowań całkowitych emisji.
- Teza 3. Opracowanie algorytmu obliczania śladu węglowego miejskiej oczyszczalni ścieków umożliwiającego kalkulację i raportowanie wyników emisji zgodnie z unijnymi wymogami legislacyjnymi pozwoli na skuteczniejszą identyfikację dźwigni redukcyjnych emisji GHG dla OŚ.

Doktorantka sprecyzowała 6 celów szczegółowych, które miały ją doprowadzić do osiągnięcia głównego celu rozprawy. Ponadto wyszczególniła kolejne etapy realizacji pracy, odnosząc je do postawionych celów oraz do publikacji, w których zaprezentowano ich rezultaty.

Kolejny rozdział poświęcony jest omówieniu cyklu publikacji stanowiącego podstawę rozprawy doktorskiej. Wyodrębniono w nim pięć podrozdziałów, w których zaprezentowano główne wątki i najważniejsze spostrzeżenia ujęte w publikacjach. Doktorantka rozpoczęła tę część pracy od omówienia analizy cyklu życia przeprowadzonej dla Centralnej Oczyszczalni

ścieków w Poznaniu (P1). Następnie przedstawiła zagadnienia związane z opracowaniem autorskiego algorytmu kalkulacji śladu węglowego OŚ, z uwzględnieniem emisji bezpośrednich (P2) i pośrednich (P3), przechodząc płynnie do omówienia tematyki pozyskania wskaźników empirycznych i wykorzystania opracowanego algorytmu (P4). Tę część pracy kończy wskazanie działań, które przyczyniają się do osiągnięcia neutralności klimatycznej oczyszczalni ścieków. Doktorantka podkreśliła, że w tym aspekcie istotne znaczenie ma synergia podejmowanych działań, gdyż żadna z opisanych w pracy technologii/strategii nie jest w stanie samodzielnej doprowadzić do osiągnięcia neutralności klimatycznej OŚ.

Przewodnik do artykułów zamykają wnioski, prezentujące zasadnicze osiągnięcia rozprawy i dokumentujące słuszność sformułowanych tez, oraz omówienie dalszych kierunków działań i planów badawczych.

W tej części dysertacji znajduje się również spis literatury wykorzystanej przy jej pisaniu, obejmujący 21 pozycji.

Szczegółowy zakres prac zaprezentowanych w publikacjach przedstawia się następująco:

1. „Life Cycle Assessment of Municipal Wastewater Treatment Processes Regarding Energy Production from the Sludge Line”, *Energies*, 2021, 14 (2), 356.

Przedmiotem publikacji nr 1 było przeprowadzenie kompleksowej analizy cyklu życia dla Centralnej Oczyszczalni Ścieków (COŚ) w Poznaniu. Podkreślenia wymaga fakt, że analiza została wykonana na rzeczywistych danych pochodzących z obiektu i obejmujących roczny okres eksploatacji. Dane te dotyczyły: zużycia energii, wartości stężeń poszczególnych zanieczyszczeń w ściekach dopływających i odpływających z oczyszczalni, zużycia środków chemicznych w procesach oczyszczania, ilości produkowanych osadów ściekowych oraz ilości odzyskanych produktów. Bazą do przeprowadzania analizy LCA była również charakterystyka krajowego miksu energetycznego dla analizowanego okresu. Oparto ją na normach PN-EN ISO 14040:2009 i PN-EN ISO 14044:2009 oraz metodologii ReCiPe version 1.11. Jako jednostkę funkcjonalną przyjęto ilość oczyszczanych ścieków odniesioną do poszczególnych miesięcy. Jasno zdefiniowano granice systemu, wskazując ich ograniczenia. Na podstawie uzyskanych wyników wykazano, że dominującym komponentem śladu środowiskowego COŚ było oddziaływanie na klimat. Na jego wartość miały wpływ przede wszystkim: zapotrzebowanie energetyczne oczyszczalni oraz charakterystyka krajowego miksu energetycznego.

2. „Algorithm of carbon footprint calculation for municipal wastewater treatment plant – part one, *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 2023, 1(10), 32-44.
3. „Algorithm of carbon footprint calculation for municipal wastewater treatment plant – part two”, *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 2023, 1(11), 32-40.

Kolejne dwie prace to dwuczęściowy cykl publikacji poświęcony opracowaniu uniwersalnego algorytmu kalkulacji śladu węglowego miejskich oczyszczalni ścieków. Punktem wyjścia dla Doktorantki był przegląd dostępnych metodyk obliczeniowych. Został on w klarowny sposób omówiony w artykule nr 2. W dalszej części tegoż artykułu skoncentrowano się na emisjach bezpośrednich, które obejmują przede wszystkim emisje N_2O i CH_4 powstające w procesach oczyszczania ścieków oraz przeróbki osadów ściekowych. Uwzględniono również tzw. emisje niezorganizowane. Praca dokumentuje, iż opracowany przez Doktorantkę algorytm daje możliwość pełnej inwentaryzacji emisji bezpośrednich i ich agregacje w postaci śladu węglowego (wyrażonego w ekwiwalencie dwutlenku węgla). Cechą, która go wyróżnia jest elastyczność w doborze współczynników emisyjnych. Mogą one pochodzić z pomiarów empirycznych realizowanych na danym obiekcie lub z dostępnych danych literaturowych. Oprócz wyznaczenia CF, algorytm pozwala również na analizę niepewności dla zastosowanych w kalkulacjach wskaźników emisji.

Kontynuacją rozważań przedstawionych w artykule nr 2 jest kolejna praca, w której rozszerzono algorytm kalkulacji śladu węglowego o emisje pośrednie wynikające ze zużycia energii elektrycznej i ciepłej kupowanej ze źródeł zewnętrznych (Zakres 2) oraz o pośrednie emisje GHG związane z działalnością oczyszczalni ścieków, ale powstające poza jej granicami (Zakres 3). Dodatkowo algorytm umożliwia przeprowadzanie analizy istotności mającej na celu wskazanie najbardziej istotnych kategorii Zakresu 3. Doktorantka zaliczyła do tej grupy emisje wynikające z produkcji i transportu chemikaliów stosowanych w procesach oczyszczania ścieków, emisje związane z gospodarką osadami oraz emisje generowane przez zużycie materiałów eksploatacyjnych i pomocniczych.

Istotnym osiągnięciem przytoczonych prac jest opracowanie algorytmu kalkulacji śladu węglowego miejskich oczyszczalni ścieków z uwzględnieniem całego łańcucha organizacji. Na podkreślenie zasługuje również identyfikacja obszarów, w których działania redukcyjne mogą przynieść największe korzyści. Doktorantka wykazała, że oprócz modernizacji procesów technologicznych, istotne znaczenie ma również optymalizacja logistyki związanej z zagospodarowaniem osadów ściekowych oraz dobór mniej emisyjnych środków chemicznych pozwalających na uzyskanie pożądanego celu technologicznego.

W artykułach nr 2 i 3 pierwiastek naukowy polegający na wykorzystaniu wszystkich trzech Zakresów emisji łączy się znakomicie z praktycznym znaczeniem przeprowadzonych przez Doktorantkę prac. Przedsiębiorstwa zarządzające oczyszczalniami ścieków zyskały bowiem narzędzie do bardziej rzetelnej oceny całkowitego oddziaływania tych obiektów na środowisko oraz do identyfikacji obszarów, w których zmiany mogą przynieść znaczące ograniczenie śladu węglowego.

W mojej opinii na wyróżnienie zasługuje również graficzna strona niniejszych artykułów. Tabelaryczne podsumowania oraz drzewa decyzyjne stanowią klarowną syntezę prac przeprowadzonych przez Doktorantkę.

4. „Treatment Plants: Methodologies and Emission Factors”, Archives of Environmental Protection, 2025.

Problem badawczy, któremu poświęcono publikację nr 4 stanowiło opracowanie empirycznych wskaźników emisji N_2O i CH_4 oraz porównanie dwóch narzędzi powszechnie wykorzystywanych do wyznaczania CF, a mianowicie CFCT i ECAM. Niniejsza publikacja stanowi logiczną kontynuację wcześniejszych prac, w których udokumentowano istotny wpływ emisji procesowych (N_2O i CH_4), związanych z przebiegiem procesów biologicznego oczyszczania ścieków i przeróbki osadów, na CF miejskiej oczyszczalni ścieków i zarazem zauważono, że wykorzystanie do ich wyznaczenia wartości literaturowych nie uwzględnia lokalnych uwarunkowań technologicznych ani warunków pracy poszczególnych obiektów. Pomiary emisji N_2O i CH_4 przeprowadzono w Centralnej Oczyszczalni Ścieków w Koziegłowach. Do tego celu wykorzystano aparat GASMET DX4000 z oprogramowaniem CALCMET.

W mojej opinii wartym podkreślenia jest wykazanie istotnych różnic w wartościach CF wyznaczonych przy wykorzystaniu zastosowanych narzędzi. Doktorantka zauważyła, że „narzędzie ECAM przeszacowało emisje o około 65 % w stosunku do wartości uzyskanych na podstawie danych rzeczywistych, a w odniesieniu do emisji procesowych różnice sięgnęły nawet 200 %.” Na tej podstawie wskazuje, że stosowanie wskaźników pozyskanych z literatury w analizach środowiskowych może prowadzić do przeszacowania lub niedoszacowania emisji, co obniża wiarygodność całych analiz. Spostrzeżenie to dokumentuje słuszność przyjętego przez Doktorantkę podejścia do określania CF, zakładającego elastyczność w doborze wskaźników emisyjnych i preferencję dla danych empirycznych.

5. „Net-zero carbon condition in wastewater treatment plant: A systematic review of mitigation strategies and challenges”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023.

Publikacja nr 5 ma charakter przeglądowy. Wkład Doktorantki w jej powstanie, zgodnie z przedłożonym oświadczeniem, polegał na opracowaniu rozdziału 4. Ta część artykułu poświęcona jest omówieniu metod szacowania emisji GHG. Stanowi ona tło dla badań własnych, ale również uwzględnia wnioski sformułowane na ich podstawie. Należy podkreślić wysoką rangę naukową czasopisma, w którym opublikowano niniejszy artykuł.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi materiał o wysokiej wartości merytorycznej. Cechuje się również bardzo starannym przygotowaniem pod względem edycyjnym. Jej lektura dała podstawę do sformułowania kilku pytań o charakterze polemicznym. Nie mają one jednak wpływu na moją końcową ocenę wartości merytorycznej rozprawy:

1. W wykazie publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej brakuje autorów publikacji A4.
2. Na stronach 43/44 występuje pomyłka w numeracji tabel.
3. W rozprawie zdarzają się sformułowania, które w mojej opinii należałoby poprawić:
 - ✓ „ładunek dopływającego ścieku” (np. str. 38.); sugerowałabym zmianę na „ładunek zanieczyszczeń w ściekach dopływających ...”,
 - ✓ „stężenie ChZT” (np. str. 43.); moja sugestia to „zawartość związków organicznych wyrażonych ChZT”,
 - ✓ „stężenia ścieków oczyszczonych” (sformułowanie używane w tytułach tabel); moja sugestia to „stężenia zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych”,
 - ✓ „opartych na procesach krystalizacji rozwiązań – produkcji struwitu” (str. 48); wydaje się, że w tym przypadku nie krystalizujemy rozwiązań.
4. Praca przygotowana jest bardzo starannie pod względem edycyjnym. Znajdują się w niej sporadyczne błędy z tego obszaru, np. str. 29. „które w mają stać się” , str. 43. „w okresie kampanii dopływie”, str. 52. „związanych emisjami”.
5. Podczas obrony rozprawy doktorskiej proszę o odpowiedź na następujące pytania:
 - ✓ Jakie zmiany w prowadzeniu procesów biologicznego oczyszczania ścieków (jakie warunki prowadzenia procesów, parametry technologiczne, czy też ukierunkowanie przemian na dedykowane szlaki metaboliczne, itd.) pozwoliłyby Pani zdaniem na istotną redukcję emisji podtlenku azotu?

- ✓ Jakiego typu urządzenia rekomendowałaby Pani do monitorowania emisji GHP w oczyszczalniach ścieków. Proszę o sprecyzowanie najważniejszych wyzwań w tym obszarze.
- 6. Proszę o zaproponowanie strategii wdrażania działań (organizacyjnych, pomiarowych itd.) pozwalających na rzetelną ocenę śladu środowiskowego w całym łańcuchu wartości miejskich oczyszczalni ścieków oraz na wykorzystanie jej wyników w celu dekarbonizacji danego podmiotu.

Podsumowując, stwierdzam, że oceniana rozprawa doktorska posiada wysoki poziom merytoryczny oraz wnosi nowe elementy poznawcze w obszarze oczyszczania ścieków i przeróbki osadów ściekowych, rozszerzając wiedzę z zakresu analizy śladu środowiskowego oczyszczalni. Dysertację cechuje czytelny sposób prezentowania wyników i wyciąganych na ich podstawie wniosków. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, dokumentuje znaczną, ogólną wiedzę Doktorantki, a także umiejętność planowania i prowadzenia przez Nią prac naukowych, opracowania i krytycznej dyskusji wyników oraz wyciągania wniosków. Dysertacja potwierdza również znajomość ogólnej wiedzy teoretycznej Autorki w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Tym samym oceniana rozprawa doktorska spełnia wymagania formalne dla tego typu prac zawarte w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023r., poz. 742 z późn. zm.). Dlatego wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie Pani mgr inż. Pauliny Szulc-Kłosińskiej do dalszego etapu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

Jednocześnie doceniając bardzo wysoki poziom merytoryczny, zawarte w rozprawie nowe elementy poznawcze oraz użyteczność przeprowadzonych prac stwierdzam, że w mojej ocenie praca zasługuje na wyróżnienie.

M. Sudół