

Rozprawa doktorska
Streszczenie

**Efektywność technik modyfikujących procesy
biodegradacji zanieczyszczeń ropopochodnych w
gruncie z terenu dołu urobkowego**

Autor:
mgr Katarzyna Wojtowicz

Promotor:
dr hab. inż. Teresa Steliga,
prof. INiG-PIB



**Politechnika
Śląska**

Dyscyplina naukowa: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka
Gliwice, 2026

Gospodarka odpadami wiertniczymi od kilku lat stanowi jeden z kluczowych problemów środowiskowych, z jakimi mierzy się obecnie branża górnictwa nafty i gazu. Odpady te przez wiele lat były sukcesywnie deponowane w tzw. dołach urobkowych, co doprowadziło do trwałego skażenia gruntów na tych terenach oraz konieczność przeprowadzenia działań rekultywacyjnych. Bioremediacja jest obecnie jedną z najczęściej wykorzystywanych metod oczyszczania terenów historycznie zanieczyszczonych węglowodorami ropopochodnymi, co wynika z jej wysokiej skuteczności, relatywnie niskiego oddziaływania środowiskowego oraz stosunkowo niskich kosztów prowadzenia procesu. Jednocześnie obserwuje się, że w przypadku gruntów silnie zdegradowanych, klasyczne techniki bioremediacyjne mogą wykazywać ograniczoną efektywność procesu, dlatego w niniejszej pracy doktorskiej podjęto próbę modyfikacji i opracowania zintegrowanych strategii bioremediacyjnych umożliwiających głębsze doczyszczenie gleb z terenów dołów urobkowych.

Niniejsza rozprawa doktorska została opracowana na podstawie siedmiu spójnych tematycznie publikacji naukowych, w których zaproponowano różne możliwości modyfikacji istniejących technik bioremediacyjnych obejmujących zarówno modyfikację techniki inokulacji gleby biopreparatem opracowanym na bazie bakterii autochtonicznych, jak i zastosowanie tzw. strategii zintegrowanych.

W części literaturowej omówiono zagadnienia związane z problemem skażenia środowiska substancjami ropopochodnymi, charakterystykę węglowodorów ropopochodnych oraz metodami oczyszczania gleb zanieczyszczonych tego typu substancjami, ze szczególnym uwzględnieniem biodegradacji oraz metodami wspomagającymi biodegradację zanieczyszczeń ropopochodnych. Ważnym aspektem poruszonym w tej części pracy było zwrócenie uwagi na szczególnie charakter gleb pochodzących z terenów dołów urobkowych, które stanowiły materiał badawczy w artykułach omówionych w niniejszej rozprawie doktorskiej.

W części doświadczalnej omówiono materiał badawczy oraz metodyki badawcze wykorzystywane do oceny efektywności proponowanych modyfikacji procesu bioremediacji gleb z terenów dołów urobkowych, a także szczegółowo omówiono wyniki badań zaprezentowanych w artykułach I-VII, stanowiących podstawę niniejszej rozprawy doktorskiej. Ważnym aspektem niniejszej pracy była kompleksowość badań zaprezentowanych w załączonych publikacjach naukowych, obejmujących wykorzystanie analiz respirometrycznych, chromatograficznych, mikrobiologicznych oraz toksykologicznych, co umożliwiło pełną ocenę efektywności proponowanych modyfikacji procesów bioremediacyjnych, a także możliwość wykorzystania uzyskanych wyników w przyszłości, w warunkach przemysłowych.

W poszczególnych artykułach omówionych w pracy zaprezentowano nowe podejścia prowadzenia procesu bioremediacji wspomaganej bioaugmentacją ukierunkowane na poprawę efektywności biodegradacji zanieczyszczeń ropopochodnych w glebach z dołów urobkowych. W artykule I zaproponowano możliwość modyfikacji techniki inokulacji biopreparatem opracowanym na bazie bakterii autochtonicznych poprzez zastosowanie γ -PGA, a efekty tych badań zostały opublikowane w czasopiśmie *Materials* (Wojtowicz et al., 2022). Wyniki uzyskane w I artykule stanowiły podstawę do rozwijania koncepcji modyfikacji techniki inokulacji biopreparatem poprzez wzbogacenie jej w inne substancje wpływające na poprawę biodostępności zanieczyszczeń takie jak biosurfaktanty. Kompleksowe laboratoryjne badania biodegradacji z wykorzystaniem zmodyfikowanej techniki inokulacji biopreparatem poprzez

wprowadzenie do układu reakcyjnego biosurfaktantów umożliwiły ocenę ich wpływu na biodegradację węglowodorów alifatycznych oraz WWA w glebie z dołu urobkowego i zostały opublikowane w czasopiśmie *Sustainability* (Wojtowicz et al., 2025).

Kolejnym etapem badań była modyfikacja biopreparatu opracowanego na bazie bakterii autochtonicznych w wybrane szczepy grzybów autochtonicznych oraz wprowadzenie fitoremediacji z wykorzystaniem roślin uprawnych *Zea mays* i ozdobnych *Echinacea purpurea*, w celu głębszego doczyszczania gleb z terenów dołów urobkowych. Bazując na wynikach uzyskanych w artykułach I i II, zbadano również możliwość połączenia bioaugmentacji, fitoremediacji i γ -PGA, wykazując przewagę tzw. metod zintegrowanych nad metodami klasycznymi w poprawie efektywności oczyszczania gleb historycznie zanieczyszczonych węglowodorami ropopochodnymi. Wyniki tych badań zostały opublikowane w czasopiśmie *Molecules* (Wojtowicz et al., 2023b) i *Applied Science* (Wojtowicz et al., 2023a).

W artykule V rozwijano możliwość wykorzystania techniki fitoremediacji wspomaganej bioaugmentacją, jednakże w badaniach postanowiono wykorzystać dziką roślinność z gatunków *Scirpus sylvaticus* oraz *Cirsium oleraceum*, pobraną z terenów skażonych ropą naftową zlokalizowanych w sąsiedztwie dołu urobkowego, z którego pobrano glebę do badań. Wykorzystanie dzikiej roślinności wykazującej wysoką tolerancję na wysokie stężenie zanieczyszczeń ropopochodnych w glebie skutkowało istotną poprawą efektywności oczyszczania gleby z dołu urobkowego. Ponadto w artykule przeprowadzono charakterystykę społeczności bakteryjnej oraz orzęskowej w glebie po zakończeniu eksperymentu, co stanowiło rozszerzenie zakresu badań omawianych w pozostałych artykułach. Wyniki tych prac zostały opublikowane w czasopiśmie *International Biodeterioration & Biodegradation* (Wojtowicz et al., 2026a).

W artykule VI zaproponowano nowe podejście do poprawy efektywności biodegradacji zanieczyszczeń ropopochodnych, polegające na połączeniu bioaugmentacji z wzbogaceniem gleby w wybrane nanomateriały. Badania biodegradacji prowadzone w skali laboratoryjnej wykazały wysoką skuteczność zaproponowanej modyfikacji procesu bioremediacji gleby z dołu urobkowego, w związku z czym rozwijano ten koncept poprzez wprowadzenie fitoremediacji z wykorzystaniem trawy *Lolium perenne*, a wyniki tych badań zostały zaprezentowane w czasopiśmie *Molecules* (Wojtowicz et al., 2026b).

W ostatnim z omówionych w pracy doktorskiej artykułach, zbadano wpływ zanieczyszczeń współwystępujących takich jak PCB na efektywność biodegradacji zanieczyszczeń ropopochodnych w glebie z dołu urobkowego. Wykazano skuteczność biopreparatów opracowanych na bazie kilku szczepów bakteryjnych o różnym spektrum działania, w poprawie efektywności oczyszczania gleb skażonych różnymi rodzajami zanieczyszczeń. Wyniki tych badań zostały opublikowane w czasopiśmie *Molecules* (Steliga et al., 2020).

Kompleksowe badania prowadzone w skali laboratoryjnej i póltechniczne zaproponowanych technik modyfikacji procesów bioremediacyjnych omówionych w artykułach I-VII pozwoliły na zrealizowanie wszystkich założonych celów niniejszej pracy doktorskiej oraz sformułowanie najważniejszych wniosków. Wykazano, że zaproponowane modyfikacje istniejących technik bioremediacyjnych oraz zastosowanie technik zintegrowanych istotnie przyczyniło się do poprawy efektywności bioremediacji gleb z terenów dołów urobkowych i wykazują potencjał do wykorzystania ich w przyszłości w warunkach terenowych.

Bibliografia

1. Steliga T.; Wojtowicz K.; Kapusta P.; Brzeszcz J. Assessment of Biodegradation Efficiency of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) and Petroleum Hydrocarbons (TPH) in Soil Using Three Individual Bacterial Strains and Their Mixed Culture. *Molecules* **2020**, *25*, 709, doi:10.3390/molecules25030709.
2. Wojtowicz K.; Steliga T.; Brzeszcz J.; Fyda J.; Skalski T.; Kapusta P. Phytoremediation of Soil Contaminated with Petroleum Hydrocarbons Using the Wild Plants *Scirpus Sylvaticus* and *Cirsium Oleraceum*, Supported by Bioaugmentation. *International Biodeterioration & Biodegradation* **2026a**, *206*, 106217, doi:10.1016/j.ibiod.2025.106217.
3. Wojtowicz K., Steliga T., Kapusta P. Evaluation of the Effectiveness of Bioaugmentation-Assisted Phytoremediation of Soils Contaminated with Petroleum Hydrocarbons Using *Echinacea purpurea*. *Applied Sciences* **2023a**, *13*, 13077. <https://doi.org/10.3390/app132413077>
4. Wojtowicz K., Steliga T., Kapusta P., Brzeszcz J. The Role of Graphene Oxide and Zinc Oxide Nanoparticles in Enhancing the Effectiveness of Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soils Using *Lolium perenne*. *Molecules* **2026b**, *31*, 890. <https://doi.org/10.3390/molecules31050890>
5. Wojtowicz K., Steliga T., Kapusta P., Brzeszcz J.. Oil-Contaminated Soil Remediation with Biodegradation by Autochthonous Microorganisms and Phytoremediation by Maize (*Zea mays*). *Molecules* **2023b**, *28*, 6104. <https://doi.org/10.3390/molecules28166104>
6. Wojtowicz K.; Steliga T.; Kapusta P.; Brzeszcz J.; Skalski T. Evaluation of the Effectiveness of the Biopreparation in Combination with the Polymer γ -PGA for the Biodegradation of Petroleum Contaminants in Soil. *Materials* **2022**, *15*, 400, doi:10.3390/ma15020400
7. Wojtowicz K.; Steliga T.; Skalski T.; Kapusta P. Influence of Biosurfactants on the Efficiency of Petroleum Hydrocarbons Biodegradation in Soil. *Sustainability* **2025**, *17*, 6520, doi:10.3390/su17146520.