

PRZEGLĄD WYBRANYCH METOD FITOREMEDIACYJNYCH - ZIELONE TECHNOLOGIE W OCZYSZCZANIU ŚRODOWISKA

REVIEW OF SELECTED PHYTOREMEDIATION METHODS – GREEN TECHNOLOGIES IN ENVIRONMENTAL CLEANUP

Wiktorja Szmelić, Zbigniew Lazar- Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Biotechnologii i Mikrobiologii Żywności

DOI:10.5604/01.3001.0055.2367

Streszczenie

Fitoremediacja to ekologiczna metoda oczyszczania środowiska z wykorzystaniem roślin, które usuwają lub neutralizują zanieczyszczenia z gleby, wody i powietrza, takie jak metale ciężkie, pestycydy czy substancje ropopochodne. Główne mechanizmy tego procesu to fitoekstrakcja (akumulacja zanieczyszczeń), fitostabilizacja (ograniczenie ich mobilności), fitodegradacja (enzymatyczny rozkład) oraz rizofiltracja (oczyszczanie wody przez korzenie). Metoda ta jest przyjazna dla środowiska i tania, choć jej skuteczność zależy od rodzaju zanieczyszczeń i warunków lokalnych. Obecne badania koncentrują się na doborze roślin, ich modyfikacjach genetycznych oraz wykorzystaniu mikroorganizmów wspomagających proces.

Słowa kluczowe: fitoremediacja, zanieczyszczenia, metale ciężkie, fitoekstrakcja, fitostabilizacja, rekultywacja

Abstract

Phytoremediation is an environmentally friendly method of cleaning up the environment using plants that remove or neutralize pollutants from soil, water, and air, such as heavy metals, pesticides, or petroleum-derived substances. The main mechanisms of this process include phytoextraction (accumulation of contaminants), phytostabilization (limiting their mobility), phytodegradation (enzymatic breakdown), and rhizofiltration (water purification through roots). This method is eco-friendly and cost-effective, although its efficiency depends on the type of contaminants and local environmental conditions. Current research focuses on plant selection, genetic modifications, and the use of microorganisms that support the remediation process.

Keywords: phytoremediation, contamination, heavy metals, phytoextraction, phytostabilization, reclamation

Wstęp

W obliczu rosnącej świadomości ekologicznej coraz większą rolę odgrywają technologie, łączące wysoką efektywność z troską o środowisko naturalne. Jedną z takich metod jest fitoremediacja – proces wykorzystujący rośliny do oczyszczania skażonych gleb, wód i powietrza [1]. To rozwiązanie, choć znane od kilku dekad, w ostatnich latach zyskuje na popularności dzięki swojej niskiej inwazyjności oraz przyjaznemu wpływowi dla środowiska [2].

Zanieczyszczenie gleb metalami ciężkimi, pestycydami czy produktami ropopochodnymi stanowi wyzwanie dla prawidłowego działania ekosystemów. Tradycyjne metody remediacyjne – takie jak wykopywanie gleby czy jej chemiczna neutralizacja – są kosztowne, energochłonne

i często niosą za sobą inne szkody ekologiczne. Fitoremediacja stanowi alternatywę, która nie tylko pozwala na oczyszczenie środowiska, ale również umożliwia jego biologiczną rekultywację i przywrócenie równowagi środowiskowej [2,3].

Szczególnie dużym problemem w Polsce i na świecie są zanieczyszczenia występujące na terenach pokopalnianych – obszarach, które przez dziesięciolecia były eksploatowane przez przemysł wydobywczy. Grunty te często zawierają wysokie stężenia metali ciężkich, siarczanów, związków ropopochodnych oraz innych substancji toksycznych, które nie tylko hamują rozwój roślinności, ale także mogą przenikać do wód gruntowych i łańcuchów pokarmowych [4,5]. Konwencjonalne metody rekultywacji są kosztowne i trudne do wdrożenia na dużą

skalę, dlatego właśnie na takich obszarach fitoremediacja staje się wyjątkowo wartościową alternatywą – umożliwia stopniowe oczyszczanie terenu i jednocześnie przywracanie jego biologicznej aktywności.

W niniejszej pracy przedstawione zostaną podstawowe mechanizmy procesu fitoremediacji i jej głównych metod, a także zaprezentowane przykłady zastosowania tej technologii w praktyce.

Natura w służbie środowiska

Fitoremediacja (z jęz. greckiego: *phyton* – roślina oraz łac. *remedium* – środek zaradczy) to biologiczna metoda oczyszczania środowiska, która polega na wykorzystaniu roślin wyższych do usuwania, neutralizacji lub stabilizacji zanieczyszczeń obecnych w glebie, wodzie i powietrzu. Proces ten opiera się na naturalnych zdolnościach niektórych gatunków roślin do pobierania i metabolizowania szkodliwych substancji lub ograniczania ich migracji w środowisku [6,7]. W zależności od rodzaju zanieczyszczeń i zastosowanej strategii, rośliny mogą:

- absorbować zanieczyszczenia do swoich tkanek,
- przekształcać związki chemiczne w mniej szkodliwe formy,
- stabilizować toksyny w glebie, ograniczając tym samym ich mobilność,
- przekształcać je w formy lotne, które ulegają dalszym przemianom w atmosferze.

Fitoremediacja może być stosowana wobec szerokiego wachlarza różnych zanieczyszczeń – zarówno organicznych, takich jak węglowodory ropopochodne, pestycydy czy rozpuszczalniki, jak i nieorganicznych, w tym metali ciężkich (np. ołów, kadm, rtęć, arsen), metaloidów, a nawet materiałów wybuchowych [8]. Ze względu na szerokie spektrum zastosowań oraz niską ingerencję w środowisko naturalne, metoda ta jest szczególnie atrakcyjna w kontekście rekultywacji terenów zdegradowanych, np. dawnych składowisk odpadów, obszarów poprzemysłowych czy pokopalnianych.

Główne metody fitoremediacji

Fitoremediacja obejmuje różnorodne techniki, jednak ich wspólnym mianownikiem jest wykorzystanie zdolności roślin do przekształcania, wychwytywania lub stabilizowania zanieczyszczeń. Metody te różnią się mechanizmem i potencjalnym zastosowaniem, co pozwala na ich dostosowanie do konkretnych warunków środowiskowych oraz rodzaju skażenia [9].

a. Fitoekstrakcja (phytoextraction)

Fitoekstrakcja polega na aktywnym pobieraniu zanieczyszczeń, głównie metali ciężkich, z gleby przez system korzeniowy roślin, a następnie ich transporcie i akumulacji w tkankach nadziemnych. W procesie tym użyteczne są szczególnie rośliny hiperakumulujące, zdolne do gromadzenia znacznych ilości metali takich jak kadm, ołów, cynk czy nikiel, jednocześnie bez zaburzenia własnych procesów fizjologicznych [2,10].



Rys. 1. Przedstawienie procesu fitoekstrakcji. Rysunek wygenerowano za pomocą AI (ChatGPT OpenAI)

Fig. 1. Representation of the phytoextraction process. Figure generated using AI (ChatGPT OpenAI)

Badania prowadzone przez Adiloglu Sevinç (2021) [11] wykazały, że brokuł (*Brassica oleracea*) może efektywnie akumulować metale ciężkie, takie jak ołów (Pb), kadm (Cd) i chrom (Cr). Najwyższe stężenia Pb, Cd i Cr w częściach nadziemnych brokułu osiągnęły odpowiednio 14,0 mg/kg, 6,67 mg/kg i 5,17 mg/kg. Obecność metali ciężkich, choć nieznacznie, to jednak miała wpływ na biomasę rośliny. Największe ilości suchej masy korzeni i pędów odnotowano w próbach z dodatkiem Pb i Cr, co sugeruje, że brokuł wykazuje zdolność do tolerowania i akumulacji tych metali bez istotnego wpływu na tempo wzrostu oraz ogólną kondycję rośliny [11].

Ciekawym rozwinięciem tej metody jest fitogórnictwo (ang. phytomining) – proces odzysku cennych metali z biomasy roślinnej. Znajduje ono zastosowanie m.in. na hałdach poprzemysłowych, gdzie metale te występują w rozproszonych, nieopłacalnych do tradycyjnego wydobycia formach. Fitogórnictwo umożliwia nie tylko dekontaminację środowiska, ale również odzysk wartościowych surowców, co czyni je jeszcze bardziej atrakcyjnym [12,13].

b. Fitostabilizacja (phytostabilization)

Fitostabilizacja to proces, w którym rośliny wraz z ich systemami korzeniowymi unieruchamiają zanieczyszczenia w glebie, ograniczając ich mobilność, biodostępność oraz możliwość migracji do wód gruntowych i powierzchniowych. Mechanizmy stabilizacji obejmują m.in. sorpcję jonów metali na powierzchni korzeni i ich wydzielenia w formie trudno rozpuszczalnych soli przy jednoczesnym wroście pH [14,15].

Technika ta ma szczególne znaczenie w przypadku hałd i zwałowisk pogórnicych, gdzie fizyczne usunięcie skażonej gleby jest technicznie i ekonomicznie nieopłacalne. Poprzez odpowiedni dobór roślin – najczęściej gatunków trawiastych (np. kostrzewa, wiechlina) lub roślin z rodziny bobowatych – możliwe jest szybkie ograniczenie dalszego rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń [6,16].



Rys. 2. Przedstawienie procesu fitostabilizacji. Rysunek wygenerowano za pomocą AI (ChatGPT OpenAI)

Fig. 2. Representation of the phytostabilization process. Figure generated using AI (ChatGPT OpenAI)

Badania przeprowadzone przez Meeinkuirt i in. (2012) [17] analizowały zdolność sześciu gatunków drzew do fitostabilizacji odpadów pokopalnianych zanieczyszczonych ołowiem (Pb) w Tajlandii. Wyniki potwierdziły, że rośliny takie jak akacja (*Acacia mangium*) i eukaliptus (*Eucalyptus camaldulensis*) poza zdolnościami do gromadzenia ołowiu w ilości 600-800 $\mu\text{g}/\text{roślina}$, to wykazały również bardzo wysoki przyrost biomasy. Oba gatunki skutecznie ograniczały mobilność Pb w glebie, co świadczy o ich wysokich zdolnościach fitostabilizacyjnych jak i o tym, że mogą być dobrymi gatunkami do wzrostu na terenach skażonych tym metalem [17].

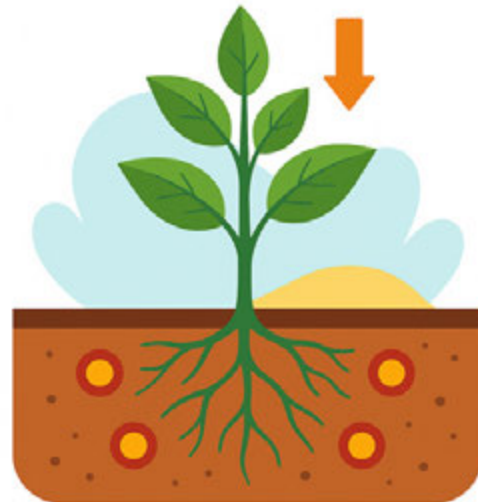
Niewątpliwą zaletą fitostabilizacji jest jej stosunkowo szybkie działanie oraz możliwość zastosowania na dużych, silnie zdegradowanych terenach [15]. Ograniczeniem pozostaje jednak fakt, że zanieczyszczenia nie są usuwane ze środowiska, a jedynie izolowane, co wymaga stałego monitoringu i utrzymania roślinności pokrywającej teren.

c. Fitodegradacja (phytodegradation)

Fitodegradacja polega na rozkładzie przez rośliny zanieczyszczeń organicznych z wykorzystaniem ich enzymów lub zamieszkujących strefę korzeniową mikroorganizmów. W wyniku działania takich enzymów jak peroksydazy, dehalogenazy czy oksydazy, na związki toksyczne – np. pestycydy, rozpuszczalniki chlorowane czy fenole, ulegają one transformacjom chemicznym, prowadzącym do ich unieczynnienia lub przekształcenia do produktów mniej szkodliwych [2,18].

W kwestii terenów pokopalnianych fitodegradacja znajduje potencjalne zastosowanie przy rekultywacji obszarów skażonych takimi substancjami jak oleje napędowe, smary czy emulgatory, które są wykorzystywane w procesie wydobywczym [3]. Wiechlina roczna (*Poa annua*), Jęczmień grzywiasty (*Hordeum jubatum*), Kostrzewy (*Festuca sp.*) to rośliny wykazujące wysoki potencjał fitodegradacyjny [19].

Ochekwu i in. (2020) [20] badali potencjał fitodegradacyjny trzech gatunków roślin: maneczki indyjskiej (*Eleusine indica*), prosa olbrzymiego (*Panicum maximum*) i fasolnika egipskiego (*Lablab purpureus*) na glebie zanieczyszczonej ropą naftową. Wyniki wykazały, że *P. maximum* osiągnęło najwyższą redukcję całkowitych węglowodorów ropopochodnych (TPH) o 94,1% przy stężeniu 4% v/w ropy naftowej. *L. purpureus* również wykazał wysoką efektywność, redukując TPH o 93,7% przy stężeniu 6% v/w. Badania te podkreślają jak istotne jest znaczenie doboru odpowiednich gatunków roślin w procesach fitodegradacji zanieczyszczeń organicznych [20].



Rys. 3. Przedstawienie procesu fitodegradacji. Rysunek wygenerowano za pomocą AI (ChatGPT OpenAI)

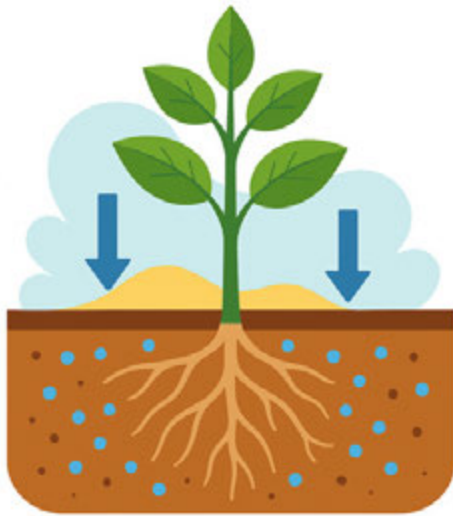
Fig. 3. Representation of the phytodegradation process. Figure generated using AI (ChatGPT OpenAI)

d. Rhizofiltracja (rhizofiltration)

Rhizofiltracja, to metoda polegająca na oczyszczaniu wód za pomocą systemu korzeniowego roślin hydroponicznych. Mechanizm procesu opiera się na sorpcji/absorpcji zanieczyszczeń przez korzenie rosnące w wodzie lub w środowisku o wysokiej wilgotności. Metoda ta znajduje zastosowanie w remediacji wód powierzchniowych, drenaży kopalnianych oraz odcieków przepływających przez tereny pogórnice [21].

W badaniu przeprowadzonym przez Veselý i in. (2011) oceniono skuteczność czterech makrofitów wodnych—Pistii rozetkowej, Salwinii uszkowatej, Azolli karłowatej — w procesie usuwania metali ciężkich z zanieczyszczonego roztworu. Analizowano wpływ kadmu (3,5 mg/L i 10,5 mg/L) oraz ołowiu (25 mg/L i 125 mg/L) na reakcje stresowe roślin poprzez pomiar zawartości chlorofilu oraz tempa transpiracji w ciągu 14-dniowego eksperymentu. Największą redukcję stężenia Cd i Pb w roztworze odnotowano w pierwszych czterech dniach, przy czym ołów akumulował się głównie w korzeniach (42 862 mg/kg), ponad dziesięciokrotnie bardziej niż w liściach (3 867 mg/kg). W przypadku kadmu jego stężenie stopniowo wzrastało, osiągając maksimum pod koniec eksperymentu, gdzie w korzeniach wynosiło 3 923 mg/kg, czyli około sześć razy więcej niż w liściach (624 mg/kg) [22].

Zaletą procesu jest wysoka skuteczność przy niskim koszcie i możliwość zastosowania w trudno dostępnych miejscach, jednak wadą są koszty i konieczność utylizacji zużytej biomasy.



Rys. 4. Przedstawienie procesu rhizofiltracji. Rysunek wygenerowano za pomocą AI (ChatGPT OpenAI)

Fig. 4. Representation of the rhizofiltration process. Figure generated using AI (ChatGPT OpenAI)

Podsumowanie

Analiza wybranych strategii fitoremediacyjnych wskazuje na znaczący potencjał w rekultywacji terenów zdegradowanych oraz zwiększającą się świadomość społeczeństwa. Zastosowanie odpowiednio dobranych roślin umożliwia ograniczenie mobilności metali ciężkich, ich akumulację lub degradację szkodliwych substancji bez konieczności kosztownych działań inżynierskich. Warto jednak podkreślić, że skuteczność fitoremediacji zależy od wielu czynników, takich jak specyfika zanieczyszczeń, warunki glebowe, dostępność składników odżywczych czy zastosowanie środków wspomagających (np. chelatorów, mikroorganizmów). Choć metoda ta jest zrównoważona środowiskowo, jej ograniczeniem może być długi czas trwania procesu oraz potrzeba precyzyjnego doboru gatunków roślin [1,3,23]. Pomimo tych przeszkód, fitoremediacja pozostaje perspektywnym rozwiązaniem dla przyszłych technologii zielonej inżynierii i rekultywacji terenów przemysłowych.



Literatura

- [1] CC, Lee & Yeh, T. Y. (2014). The Improvement of Phytomediation on the Treatment Effectiveness of Heavy Metals with Energy Sunflower Plants with Calcium Peroxide and Phytohormones. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 04. 10.4172/2165-784X.1000148.
- [2] Salt, D. E., Smith, R. D., & Raskin, I. (1998). PHYTOREMEDIATION. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49(1), 643–668.
- [3] Shimp, J. F., Tracy, J. C., Davis, L. C., Lee, E., Huang, W., Erickson, L. E., & Schnoor, J. L. (1993). Beneficial effects of plants in the remediation of soil and groundwater contaminated with organic materials. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 23(1), 41–77.
- [4] Glasby, G., Szefer, P., Geldon, J., & Warzocha, J. (2004). Heavy-metal pollution of sediments from Szczecin Lagoon and the Gdansk Basin, Poland. *Science of The Total Environment*, 330(1-3), 249–269.
- [5] Pocięcha, A., Wojtał, A. Z., Szarek-Gwiazda, E., Ciepłok, A., Ciszewski, D., & Kownacki, A. (2019). Response of Cladocera Fauna to Heavy Metal Pollution, Based on Sediments from Subsidence Ponds Downstream of a Mine Discharge (S. Poland). *Water*, 11(4), 810.
- [6] Grobelak, A., Kacprzak, M., & Fijałkowski, K. (2010). Fitoremediacja: niedoceniony potencjał roślin w oczyszczeniu środowiska. *Journal of Ecology and Health*, 14(6), 276-280.
- [7] Siwek M. 2008. Phytoremediation as a biological method of cleaning up the environment. *Wiadomości Botaniczne* 52(1/2): 23-28.
- [8] Asante-Badu, B., Kgorutla, L. E., Li, S. S., Danso, P. O., Xue, Z., & Qiang, G. (2020). Phytoremediation of organic and inorganic compounds in a natural and an agricultural environment: a review. *Applied Ecology & Environmental Research*, 18(5).
- [9] Posmyk, K., & Urbaniak, M. (2014). Fitoremediacja jako biologiczna metoda oczyszczania środowiska. *Aura* (07).
- [10] Żurek, G., & Majtkowski, W. (2009). Rośliny alternatywne w fitoekstrakcji metali ciężkich z obszarów skażonych. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 17, 83-89.
- [11] Adiloglu, Sevinç. (2021). Nutritional Relationships and Accumulation Capacity of Broccoli (*Brassica Oleracea*) Grown Under the Stress Caused by Some Heavy Metals Seen in Agricultural Areas.
- [12] Krzciuk, K. (2019). Fitogórnictwo Pierwiastków Ziem Rzadkich Jako Metoda Zrównoważonego Gospodarowania Nieodnawialnymi Zasobami Ziemi. *Kosmos*, 68(3), 443-449.
- [13] Cabała, J. (2011). Metalofity—nowe możliwości górnictwa XXI wieku. *W: Przyroda terenów pogórnich. Wyd. CK Bolesław*, 55-72
- [14] Krzyżak, J. (2013). Wspomagana fitostabilizacja metali ciężkich w glebach.
- [15] Bolan, N. S., Park, J. H., Robinson, B., Naidu, R., & Huh, K. Y. (2011). Phytostabilization: a green approach to contaminant containment. *Advances in agronomy*, 112, 145-204.
- [16] Oleńska, E. 19 Bobowate różnowiekowych hałd cynkowo-olowiowych w Polsce.
- [17] Meeinkuirt, W., Pokethitiyook, P., Kruatrachue, M., Tanhan, P., & Chaiyarat, R. (2012). Phytostabilization Of A Pb-Contaminated Mine Tailing By Various Tree Species In Pot And Field Trial Experiments. *International Journal of Phytoremediation*, 14(9), 925–938.
- [18] Kumar, N., Jeena, N., Gangola, S., & Singh, H. (2019). Phytoremediation facilitating enzymes: an enzymatic approach for enhancing remediation process. In *Smart bioremediation technologies* (pp. 289-306). Academic Press.
- [19] Schwitzguébel, J. P., Meyer, J., & Kidd, P. (2006). Pesticides removal using plants: phytodegradation versus phytostimulation. In *Phytoremediation rhizoremediation* (pp. 179-198). Dordrecht: Springer Netherlands.
- [20] Ochekwu, Edache & Akpheokhai, Leonard & Efebor, Abiya. (2020). Phytoremediation Potential Of Eleusine indica (L.) Gaertn, Panicum maximum Jacquin AND Lablab purpureus L. In A Crude Oil Polluted Soil. *Scientific Research Journal*. 08. 56-62.
- [21] Lee, M., & Yang, M. (2010). Rhizofiltration using sunflower (*Helianthus annuus L.*) and bean (*Phaseolus vulgaris L. var. vulgaris*) to remediate uranium contaminated groundwater. *Journal of Hazardous Materials*, 173(1-3), 589–596.
- [22] Veselý, T., Tlustoš, P., & Száková, J. (2011). The Use of Water Lettuce (*Pistia Stratiotes L.*) for Rhizofiltration of a Highly Polluted Solution by Cadmium and Lead. *International Journal of Phytoremediation*, 13(9), 859–872.
- [23] Arthur, Ellen & Rice, Pamela & Rice, Patricia & Anderson, Todd & Baladi, Sadika & Henderson, Keri & Coats, Joel. (2005). Phytoremediation—An Overview. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 24.