

INGA MACH^{}, JULIA BARTCZAK^{}, TAKAO ISHIKAWA*^{}

* Autor korespondencyjny / corresponding author: e-mail: t.ishikawa@uw.edu.pl

Uniwersytet Warszawski, Wydział Biologii, Instytut Bioinżynierii, ul. I. Miecznikowa 1, 02-096 Warszawa

University of Warsaw, Faculty of Biology, Institute of Bioengineering, I. Miecznikowa 1 Street, 02-096 Warsaw, Poland

Bioprospekcja enzymów w rolnictwie regeneracyjnym

Enzyme bioprospecting in regenerative agriculture

DOI: <https://doi.org/10.12775/KOSMOS.2025.015>

Abstrakt

Rolnictwo mierzy się z ogromnym wyzwaniem wyżywienia stale rosnącej światowej ludzkiej populacji. Obecnie wykorzystywane praktyki rolnicze zwiększające wydajność w rolnictwie mają jednocześnie znaczny negatywny wpływ na środowisko naturalne. Rozwiązaniem tego problemu może okazać się rolnictwo regeneracyjne, które opiera się na bardziej zrównoważonych środowiskowo metodach. Jedną z praktyk alternatywnego podejścia jest wykorzystanie enzymów i produkujących je mikroorganizmów, które mają potencjał zastąpić lub zmniejszyć zużycie środków chemicznych nieprzyjaznych dla środowiska bądź usuwanie zanieczyszczeń wprowadzonych do ekosystemu w wyniku konwencjonalnych działań rolniczych. Procesem odkrywania nowych białek i organizmów mających zastosowanie w różnych sektorach działalności człowieka, w tym w rolnictwie, zajmuje się bioprospekcja, która jest istotnym narzędziem w rozwoju rolnictwa regeneracyjnego.

Słowa kluczowe: agrokultura regeneracyjna, bioprospekcja, enzymy, rolnictwo zrównoważone

Abstract

Agriculture faces the formidable challenge of feeding a continuously growing global human population. Current agricultural practices aimed at enhancing productivity often exert a considerable negative impact on the natural environment. A potential solution to this issue lies in regenerative agriculture, which utilizes more environmentally sustainable methods. One of the key practices within this alternative approach involves the use of enzymes and enzyme-producing microorganisms. It holds the potential to replace or reduce the reliance on environmentally harmful chemical compounds, as well as to remediate pollutants introduced into ecosystems due to conventional farming activities. The process of discovering novel proteins and organisms with applications across various sectors, including agriculture, is known as bioprospecting. This approach constitutes a crucial tool in the advancement of regenerative agriculture.

Key words: bioprospecting, enzymes, regenerative agriculture, sustainable agriculture

WYZWANIA ROLNICTWA KONWENCJONALNEGO

Na przestrzeni ostatnich 70 lat światowa populacja ludzi zwiększyła się trzykrotnie – z 2,5 mld w roku 1950 do niemal 7,9 mld w 2021 roku (United Nations 2021). Gwałtowny przyrost nadal się nie skończył. Obecnie na świecie żyje 8,2 mld ludzi, a według oszacowań Organizacji Narodów Zjednoczonych z 2024 roku w przeciągu najbliższych 50 lub 60 lat populacja ludzi zwiększy się o kolejne 2 mld (United Nations 2024). Wyżywienie tak wielu stanowi znaczące globalne wyzwanie. Przewidywania wskazują, że zapotrzebowanie na żywność od 2005 do 2050 roku może wzrosnąć między 70% a 110% (Godfray i in. 2010; Tilman i in. 2011). Próby nadążenia za światowym popytem na żywność wiąże się obecnie z wykorzystaniem praktyk, które mają znaczący negatywny wpływ na środowisko naturalne. Jedną z nich jest przeznaczanie większej powierzchni na uprawy, czyli tzw. ekstensyfikacja. W 2021 roku tereny na użytek rolniczy zajmowały łącznie 4,8 mld hektarów, czyli aż $\frac{1}{3}$ całkowitej powierzchni lądów na Ziemi, natomiast areal samych pól uprawnych wynosił 1,6 mld hektarów (FAO 2023). Takie przekształcanie terenów naturalnych na ogromną skalę znacząco obniża różnorodność biologiczną w wielu ekosystemach lądowych, gdyż poza zmniejszaniem powierzchni lasów, pociąga ze sobą zmniejszanie i fragmentowanie siedlisk różnych gatunków zwierząt (Dirzo i Raven 2003; Mullu 2016; Tilman i in. 2011).

Deforestacja, osuszanie terenów zalewowych, w tym degradacja torfowisk oraz spalanie biomasy w ramach stosowanych zabiegów rolniczych odpowiadają za emisję gazów cieplarnianych na poziomie 3,1 mld ton ekwiwalentu CO₂ w 2022 roku, co stanowi aż 19% całkowitej emisji pochodzącej z systemów rolno-spożywczych (ang. *agri-food systems*), czyli ok. 6,7% emisji światowej (FAO 2024). Odminną strategią zwiększenia produktywności rolnictwa jest wzmożone stosowanie rozmaitych środków chemicznych – nawozów i środków ochrony roślin, jednak i ona nie jest pozbawiona wad w aspekcie dobrego środowiska naturalnego. Według estymacji Organizacji Narodów Zjednoczonych ds. Wyżywienia i Rolnictwa (FAO) w 2022 roku wykorzystano 108 mln ton nieorganicznych nawozów azotowych i niemal 42 mln ton nieorganicznych nawozów fosforanowych. Jednocześnie zużycie nawozów nieorganicznych w przeliczeniu na obszar pól uprawnych rośnie – na przestrzeni ostatnich 20 lat wzrosło z 90 kg/ha w 2002 roku do 113 kg/ha (FAO 2024). Zdecydowana mniejszość dostarczanych w ten sposób pierwiastków biogennych jest pobierana przez uprawiane rośliny (w przypadku nieorganicznych nawozów fosforanowych od 9% do 16%), zaś większość pozostaje w glebie (Luo i in. 2024). Dostarczenie znacznej ilości nawozów może negatywnie wpłynąć na ich zasolenie i inne parametry fizyko-chemiczne gleb ornych, a tym samym może spowodować pogorszenie ich jakości (Gouda i in. 2018). Ponadto nadmiarowe biogeny zostają wypłukane z gleb ornych i mogą trafić do

zbiorników wodnych. Wówczas znaczne podniesienie się stężenia biogennych pierwiastków limitujących produktywność ekosystemów wodnych doprowadza do nagłego przyrostu biomasy w wodach powierzchniowych. Jest to tzw. przyspieszenie procesu eutrofizacji i może doprowadzić do zupełnej degradacji ekosystemu wodnego (Filippelli 2008; Luo i in. 2024). Z kolei wysokie zużycie różnych środków ochrony roślin, które w 2022 roku wyniosło 3,7 mln ton substancji aktywnych, może prowadzić do zanieczyszczania i akumulacji w okolicznych wodach i glebach. Szerokie spektrum działania tych preparatów może sprawiać, że wykazują one nie tylko toksyczne działanie w stosunku do szkodników rolniczych, takich jak drobnoustroje powodujące choroby roślin, niektórych insektów czy wybranych gatunków roślin. Takie związki mogą wykazywać szkodliwość dla innych mikroorganizmów, w tym mikoryzowych symbiontów roślinnych. Efekty toksyczne takie jak genotoksyczność, cytotoksyczność i zaburzenia gospodarki hormonalnej są również obserwowane u innych zwierząt, w tym u człowieka (Gill i in. 2018). Odmiernym wyzwaniem stojącym przed obecnym rolnictwem jest zanieczyszczenie nie tylko związkami organicznymi pochodzącymi z pestycydów, herbicydów czy fungicydów, ale również skażenia wynikające z rozwoju przemysłu – innymi związkami organicznymi bądź metalami ciężkimi (Hou i in. 2020; Singh i in. 2008). Ze względu na wysoką biodostępność jonów metali ciężkich dla roślin uprawnych, tego typu zanieczyszczenia nie tylko mają negatywny wpływ na jakość gleb ornych, ale także stwarzają ryzyko ich akumulacji w jadalnych częściach roślin uprawnych, co stwarza ryzyko dla konsumentów (Hou i in. 2020). Problemy powiązane z jakością gleb ornych będącymi poniekąd skutkami stosowanych praktyk rolniczych, tj. ich erozja, wzrost zasolenia, obecność zanieczyszczeń czy degradacja mikrobioty glebowej, mogą zostać spotęgowane przez postępujące zmiany klimatyczne (Díaz-Rodríguez i in. 2021; Godfray i in. 2010). Globalne ocieplenie i zmiany ilości opadów, które wpływają nie tylko bezpośrednio na wzrost roślin, ale również na wzorce występowania szkodników, mogą

mieć drastyczny wpływ na produktywność rolną (Aydinalp i Cresser 2008; Godfray i in. 2010). Niektóre oszacowania wskazują, że ze względu na powyższe czynniki, na przestrzeni tego stulecia światowa produkcja żywności może zmaleć nawet o 25% (Nellemann i in. 2009).

W przewyżczeniu powyższych złożonych problemów konwencjonalnego rolnictwa może pomóc implementacja bardziej zrównoważonych rozwiązań. Ich opracowywaniem zajmuje się rolnictwo regeneracyjne, którego celem jest wprowadzenie takich praktyk do rolnictwa, które zapewnią poprawę stanu środowiska naturalnego, w tym polepszenie jakości gleb i wód, zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych oraz zwiększenie różnorodności biologicznej (Díaz-Rodríguez i in. 2021). Metody rolnictwa regeneracyjnego skupiają się na zmianie sposobu uprawy roli, m.in. na redukcji częstości stosowania orki, która może doprowadzać do zmiany składu mikrobioty glebowej, na odejściu od upraw monokulturowych oraz na promowaniu płodozmianu i nasadzeń roślin okrywowych. Istotnymi założeniami tego alternatywnego podejścia rolniczego są również znaczące ograniczenie wykorzystania syntetycznych nawozów i pestycydów, a w zamian zastąpienie ich metodami biologicznymi, bardziej przyjaznymi dla środowiska naturalnego (Díaz-Rodríguez i in. 2021).

BIOPROSPEKCJA W ROLNICTWIE REGENERACYJNYM

Bioprospekcja to specyficzny rodzaj badań koncentrujących się na wyszukiwaniu, identyfikowaniu i opisywaniu organizmów zwracających uwagę swoimi właściwościami (Krajewski, 2023). W kontekście rolnictwa regeneracyjnego bioprospekcja może koncentrować się na odkrywaniu mikroorganizmów, enzymów i metabolitów, które przyczyniają się do odbudowy i wzrostu produktywności gleby w sposób naturalny i zrównoważony. Znaczenie i zastosowanie enzymów w rolnictwie, szczególnie tych występujących w glebie oraz stosowanych jako dodatki paszowe, jest powszechne i od wielu lat systematycznie rośnie. Regulacje polityki rolnej

coraz bardziej sprzyjają wdrażaniu osiągnięć biotechnologicznych i potwierdzają akceptację enzymów jako wartościowych biokatalizatorów w zielonej biotechnologii. Unia Europejska ustanowiła kompleksowe przepisy promujące zrównoważone praktyki rolnicze, w tym innowacje biotechnologiczne. Rozporządzenie (UE) 2018/848 kładzie nacisk na rolnictwo ekologiczne oraz zintegrowaną ochronę roślin, które mogą korzystać z zastosowania enzymów w celu ograniczenia użycia chemikaliów i poprawy zdrowotności gleby. Wspólna Polityka Rolna (WPR) UE obejmuje programy, które wspierają finansowo rolników stosujących praktyki przyjazne dla środowiska (Gałązka et al., 2025).

ENZYMY W ROLNICTWIE REGENERACYJNYM

Enzymy w glebie odgrywają istotną rolę zarówno w przekształcaniu materii organicznej i cyklu obiegu składników odżywczych (Piotrowska-Długosz, 2019), jak i w wiązaniu azotu, detoksykacji pestycydów czy ksenobiotyków (Gunjal et al., 2019). Zestawienie aktywności wybranych enzymów oraz ich znaczenie w kontekście rolnictwa przedstawiono w Tab. 1.

Fosfatazy

Fosfatazy stanowią grupę enzymów, które wykazują aktywność hydrolityczną, a niekiedy również transforsorylacyjną wobec różnych typów estrów fosforanowych (Millán 2006). Zdolność uwalniania reszt fosforanowych (P_i) z szerokiego spektrum substratów organicznych, w tym m.in. z estrów mono-, di- i trifosforanowych czy z fosfoamidów sprawia, że ta grupa białek enzymatycznych odgrywa istotną rolę w obiegu fosforu w ekosystemach lądowych (Campdelacreu Rocabrana i in. 2024; Millán 2006). Fosfor jest pierwiastkiem biogennym, który w wielu przypadkach jest czynnikiem limitującym przyrost biomasy. Jest to związane ze stosunkowo małym rezerwuarem tego pierwiastka w przyrodzie – minerały będące jego źródłem stanowią mniej niż 0,1% skorupy ziemskiej (Filippelli 2008). Na małą dostępność fosforu ma wpływ także brak sta-

bilnej formy w postaci gazu atmosferycznego i częsta resekwestracja tego biogenu do postaci nierozpuszczalnej i niedostępnej dla wielu organizmów (Filippelli 2008). W obliczu takiego niedostatku pierwiastka niezbędnego dla życia, aktywność enzymów uwalniających fosfor w postaci P_i , czyli bardzo dobrze przyswajalnej dla roślin, okazuje się kluczowa dla zwiększenia przyrostu biomasy uprawianych roślin (Campdelacreu Rocabrana i in. 2024; Filippelli 2008). Zaimplementowanie rozwiązań wspierających aktywność produkowanych już przez mikroorganizmy glebowe alkalicznych fosfataz (ALP, EC 3.1.3.1) w glebach o odczynie zasadowym bądź obojętnym oraz kwaśnych fosfataz (ACP, EC 3.1.3.2) w glebach kwaśnych, ma potencjał znacznie zmniejszyć zapotrzebowanie na nieorganiczne nawozy fosforanowe w rolnictwie (Campdelacreu Rocabrana i in. 2024; Sharma i in. 2013). Może się jednak okazać, że te działania są niewystarczające. W takich przypadkach można wprowadzić do gleby mikroorganizmy, wyselekcjonowane w procesie bioprospekcji pod kątem wykazywania aktywności fosfatolitycznej (Sharma i in. 2013). Istnieje również możliwość zastosowania mikroorganizmów transgenicznych, które produkują rekombinowaną fosfatazę, pochodzącą od innego gatunku (Saavedra i Baltar 2025; Sharma i in. 2013). To podejście pozwala na biosyntezę enzymu, którego aktywność jest lepiej dostosowana do warunków fizykochemicznych panujących w konkretnej glebie, w mikroorganizmach wykazujących wyższą przeżywalność w tymże środowisku. Poza możliwością zmniejszenia zużycia nieorganicznych nawozów fosforanowych, fosfatazy mogą również zostać wykorzystane w celach bioremediacyjnych do rozkładu niektórych pestycydów, np. parationu i paraoksonu do mniej toksycznych form (Saavedra i Baltar 2025; Singh i in. 2008).

Lakazy

Lakazy (EC 1.10.3.2) należą do szeroko rozpowszechnionych w świecie oksydoreduktaz występujących m.in. w roślinach wyższych, u większości grzybów oraz w niektórych bakte-

Tab. 1. Zestawienie enzymów wykazujących różne aktywności, które odgrywają istotną rolę w rolnictwie

Nazwa	Klasyfikacja	Aktywność	Znaczenie w agrokulturze
Fosfatazy	EC 3.1.3.1 EC 3.1.3.2	Hydroliza różnych typów estrów fosforanowych	Obieg fosforu w przyrodzie, poprawa żyzności gleby uprawnej, bioremediacja niektórych zanieczyszczeń organicznych
Lakazy (i peroksydazy)	EC 1.10.3.2	katalizują utlenianie szerokiego spektrum związków organicznych i nieorganicznych	Gospodarka odpadami, kompostowanie, poprawa żyzności gleby oraz bioremediacja
Celulazy (i hemicelulazy)	EC 3.2.1.4	Degradacja celulozy (i hemiceluloz)	Produkcja pasz, poprawa żyzności gleby
Pektynazy	EC 3.1.1.11 EC 3.2.1.15 EC 3.2.1.67 EC 4.2.2.2 EC 4.2.2.9	Rozkład substancji pektynowych	Produkcja pasz, kompostowanie, poprawa jakości gleby
Chitynazy	EC 3.2.1.14	Rozkład chityny	Działanie przeciwgrzybicze i przeciw owadom

riach. Enzymy te katalizują utlenianie szerokiego spektrum związków organicznych i nieorganicznych, któremu towarzyszy redukcja tlenu cząsteczkowego do wody (Polak i Jarosz-Wilkolazka 2007). W ostatnich latach wykazano istotną rolę enzymów ligninolitycznych (lakaz i peroksydaz) w biodegradacji ligniny – trudno rozkładalnego składnika biomasy roślinnej – oraz w usuwaniu niebezpiecznych zanieczyszczeń środowiskowych, które stanowią zagrożenie dla zdrowia człowieka. Enzymy te mogą być z powodzeniem wykorzystywane w gospodarce odpadami, kompostowaniu, poprawie żyzności gleby oraz bioremediacji (Gałązka i in. 2025). Lakazy skutecznie usuwają ze środowiska związki fenolowe, barwniki tekstylne, pestycydy oraz inne związki aromatyczne. Enzymy te mają duży potencjał zastosowania dzięki swojej aktywności w szerokim zakresie pH i temperatury (Janusz i in. 2020).

Celulazy

Celulazy są enzymami produkowanymi głównie przez mikroorganizmy, które wykorzystują celulozę jako źródło węgla i energii. Degradacja natywnej celulozy prowadzona jest

przez kompleks enzymów działających synergistycznie, w którym kluczową rolę odgrywają zarówno endo-, jak i egzo- β -1,4-glukanazy (Wesołowska-Trojanowska i Targoński 2014). Po raz pierwszy preparat celulazy zastosowano w przemysłowej produkcji pasz z jęczmienia i pszenicy do żywienia brojlerów i trzody chlewnej. Jęczmień i pszenica zawierają rozpuszczalne β -glukany, które zwiększają lepkość masy w przewodzie pokarmowym zwierząt. Skutkiem tego jest wchłanianie wody, co zmniejsza dostępność węglowodanów i witamin, które są zawarte w paszy. Oprócz tego wzrost lepkości przyczynia się do dolegliwości ze strony przewodu pokarmowego zwierząt. Po zastosowaniu dodatku enzymów celulolitycznych do pasz stwierdzono polepszenie wartości rzeźnej brojlerów nimi żywionych (Wesołowska-Trojanowska i Targoński 2014). Ponadto dodatek celulaz w celu przyspieszenia rozkładu resztek roślinnych w glebie prowadzi do poprawy żyzności gleby. Dotychczas stosowanie celulaz lub antagonistycznych grzybów celulolitycznych w uprawach wykazało, że sprzyja to wzrostowi roślin, w tym poprawie kiełkowania nasion oraz efektem ochronnym (Phitsuwan i in. 2013).

Pektynazy

Pektynazy to heterogenna grupa enzymów, wykazujących aktywność hydrolityczną wobec pektyn, czyli kwaśnych wielkocząsteczkowych polisacharydów występujących jako główny składnik blaszek środkowych pomiędzy komórkami roślinnymi (Jayani, Saxena, i Gupta 2005). Pektyny zbudowane są z różnie połączonych, a niekiedy również modyfikowanych podjednostek galakturonowych, ramnogalakturnowych, arabinowych i arabinogalakturnowych. Zarówno dokładny skład, dodatkowe modyfikacje, jak i masa cząsteczkowa (25–360 kDa) nie są stałe w obrębie tej grupy polimerów (Jayani, Saxena, i Gupta 2005). Ze względu na dużą różnorodność substratów, również i zróżnicowanie samych enzymów pektynolitycznych jest wysokie. Wśród nich wyróżnia się protopektynazy degradujące nierozpuszczalne pektyny, depolimerazy, w tym poligalakturnazy (EC 3.2.1.15, EC 3.2.1.67) czy liazy poligalakturnowe (EC 4.2.2.2, EC 4.2.2.9), katalizujące odpowiednio hydrolizę wiązań α -(1→4)-glikozydowych pomiędzy podjednostkami D-galakturnowymi lub odłączenia podjednostek na drodze trans-eliminacji, a także pektynoesterazy (EC 3.1.1.11) przeprowadzające usuwanie estrów metylowych występujących w strukturze pektyn (Jayani, Saxena, i Gupta 2005; Kashyap i in. 2001). Pektynazy w literaturze są najczęściej opisywane w kontekście przemysłu papierniczego i przetwórstwa żywności, jednakże znajdują one zastosowanie również w sektorze rolnictwa (Jayani, Saxena, i Gupta 2005; Kashyap i in. 2001). Podobnie jak celulazy, ta grupa enzymów jest wykorzystywana w procesie produkcji pasz dla zwierząt gospodarczych. Zmniejszenie lepkości paszy przy jednoczesnym rozkładzie polimerów, które naturalnie nie ulegają strawieniu przez zwierzęta powoduje zwiększenie dostępności i przyswajalności składników odżywczych. Skutkuje to zmniejszeniem zapotrzebowania na paszę oraz mniejszą ilością odchodów zwierzęcych stanowiących istotne źródło emisji gazów cieplarnianych w obszarze rolniczym (FAO 2024; Hoondal i in. 2002; Jayani, Saxena, i Gupta 2005). Zdolność do rozkła-

du resztek roślinnych przez pektynazy odgrywa również istotną rolę w przypadku kompostowania. Mikroorganizmy produkujące enzymy pektynolityczne wchodzi w skład konsorcjów rozkładających trudno degradowalne polimery pochodzących m.in. z odpadów rolniczych, w tym resztek roślinnych. W wyniku tego procesu powstaje kompost, który może zostać zastosowany jako nawóz rolniczy użyźniający glebę i może stanowić alternatywę dla sztucznych nawozów (Anastasi i in. 2004).

Chitynazy

Fungicydy i insektycydy oparte na związkach chemicznych wywołały poważniejsze skutki dla środowiska i zdrowia człowieka. Wiele patogennych gatunków grzybów i owadów uodporniło się na chemiczne środki ochrony roślin. Odporne grzyby stały się również odporne na wiele leków, a owady o obniżonej wrażliwości są trudne do skutecznego zwalczania (Sharma 2023). Chityna (a w niektórych grzybach chitozan) oraz mikrofibryle β -glukanu tworzą rusztowanie, które nadaje ścianie komórkowej grzybów kształt i wytrzymałość. Chitynazy to enzymy o działaniu przeciwgrzybiczym, które oddziałują z biopolimerem chityny, prowadząc do jej degradacji poprzez hydrolizę wiązań glikozydowych między dwoma lub większą liczbą reszt cukrowych (Stintzi i in. 1993). Bezpośrednie zastosowanie chitynazy w formie płynnej lub wykorzystanie całych komórek drobnoustrojów produkujących enzym działa antagonistycznie wobec szkodników.

PODSUMOWANIE

Zestawione w Tabeli 1 enzymy wskazują na szerokie spektrum funkcji biologicznych, które mogą zostać wykorzystane w rolnictwie regeneracyjnym. Wspólną cechą omawianych grup białek enzymatycznych jest ich zdolność do wspierania naturalnych procesów biogeochemicznych w glebie, co pozwala ograniczyć stosowanie nawozów mineralnych i chemicznych środków ochrony roślin. Poprzez poprawę dostępności składników odżywczych, zwiększanie żyzności gleby, a także degradację zanieczyszczeń, enzy-

my te odgrywają kluczową rolę w przywracaniu równowagi ekosystemów rolniczych.

Jednocześnie należy podkreślić ich zróżnicowaną funkcjonalność: fosfatazy odpowiadają przede wszystkim za obieg fosforu, lakazy i peroksydazy wspomagają procesy bioremediacyjne i recykling materii organicznej, celulazy i pektynazy usprawniają rozkład resztek roślinnych, a chitynazy pełnią funkcję ochronną wobec patogenów grzybowych i szkodników. Tak szerokie spektrum aktywności enzymatycznych pokazuje, że ich zastosowanie może mieć charakter komplementarny, obejmując zarówno aspekt żywieniowy i ochronny, jak i środowiskowy.

Perspektywy rozwoju badań nad enzymami w rolnictwie regeneracyjnym wiążą się z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi bioprospekcji, takich jak metagenomika, bioinformatyka czy inżynieria białek, które pozwalają na identyfikację nowych biokatalizatorów i dostosowanie ich aktywności do specyficznych warunków środowiskowych. Wdrożenie takich rozwiązań może przyczynić się do zmniejszenia presji rolnictwa na środowisko, zwiększenia bezpieczeństwa żywnościowego oraz poprawy jakości gleb i wód. Równocześnie istotne jest uwzględnianie barier technologicznych i regulacyjnych związanych z komercjalizacją enzymów, w tym kosztów ich produkcji czy ram prawnych dotyczących mikroorganizmów transgenicznych.

OŚWIADCZENIE AUTORÓW

Wszyscy autorzy deklarują wkład w powstanie artykułu, zaakceptowali kolejność autorów i ostateczną wersję artykułu. Autorzy deklarują brak konfliktu interesów.

PODZIĘKOWANIA

Badania prowadzone przez autorów niniejszej publikacji są finansowane przez Narodowe Centrum Nauki z projektu OPUS26 pt. Poszukiwanie i wykorzystanie bakterii psychrotolerancyjnych i nowych enzymów przystosowanych do niskich temperatur w rolnictwie regeneracyjnym (UMO-2023/51/B/NZ9/02910).

BIBLIOGRAFIA

- Anastasi, A., Varese, G.C., Voyron, S., Scannerini, S., Marchisio, V.F., 2004. Characterization of Fungal Biodiversity In Compost and Vermicompost. *Compost Science & Utilization* 12 (2), 185–191. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2004.10702179>.
- Aydinalp, C., Cresser, M.S., 2008. The effects of global climate change on agriculture. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences* 3 (5), 672–676.
- Campdelacreu Rocabruna, P., Domene, X., Preece C., Fernández-Martínez, M., Maspons J. i in. 2024. Effect of climate, crop, and management on soil phosphatase activity in croplands: A global investigation and relationships with crop yield. *European Journal of Agronomy* 161, 127358. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127358>.
- Díaz-Rodríguez, A.M., Salcedo Gastelum, L.A., Félix Pablos, C.M., Parra-Cota F.I., Santoyo, G. i in., 2021. The Current and Future Role of Microbial Culture Collections in Food Security Worldwide. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4 – 2020. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.614739>.
- Dirzo, R., Raven, P.H., 2003. Global State of Biodiversity and Loss. *Annual Review of Environment and Resources* 28 (1), 137–167. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105532>.
- FAO, 2023. Land use statistics and indicators 2000–2021. Global, regional and country trends. FAOSTAT Analytical Briefs Series No. 71. Rome. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc6907en>.
- FAO, 2024. Greenhouse gas emissions from agri-food systems – Global, regional and country trends, 2000–2022. FAOSTAT Analytical Brief Series, No. 94. Rome. FAO.
- FAO, 2024. Inorganic fertilizers – 2002–2022. FAOSTAT Analytical Briefs, No. 90. Rome. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd1485en>.
- Filippelli, G.M., 2008. The Global Phosphorus Cycle: Past, Present, and Future. *Elements* 4 (2), 89–95. <https://doi.org/10.2113/GSELEMENTS.4.2.89>.

- Galazka, A., Jankiewicz U., Orzechowski, S., 2025. The Role of Ligninolytic Enzymes in Sustainable Agriculture: Applications and Challenges. *Agronomy* 15 (2), 451. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020451>.
- Gill, J.P.K., Sethi, N., Mohan, A., Datta, S., Girdhar, M., 2018. Glyphosate Toxicity for Animals. *Environmental Chemistry Letters* 16 (2), 401–426. <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0689-0>.
- Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrance, D. i in., 2010. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science* 327 (5967), 812–818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>.
- Gouda, S., Kerry, R.G., Das, G., Paramithiotis, S., Shin, H-S. i in., 2018. Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. *Microbiological Research* 206, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.08.016>.
- Gunjal, A.B., Waghmode, M.S., Patil, N.N., Nawani, N.N., 2019. Significance of soil enzymes in agriculture, w: Annepu, S.K., Arya, P., Barh, A., Bhan, C., Bhatt P. (Red.) i in., *Smart Bioremediation Technologies*. Academic Press, s. 159–168. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818307-6.00009-3>.
- Hoondal, G.S., Tiwari, R.P., Tewari R., Dahiya N., Beg, Q., 2002. Microbial Alkaline Pectinases and Their Industrial Applications: a review. *Applied Microbiology and Biotechnology* 59 (4), 409–418. <https://doi.org/10.1007/s00253-002-1061-1>.
- Hou, D., O'Connor, D., Igalavithana, A.D., Alesci, D.S., Luo, J. i in., 2020. Metal Contamination and Bioremediation of Agricultural Soils for Food Safety and Sustainability. *Nature Reviews Earth & Environment* 1 (7), 366–381. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0061-y>.
- Janusz, G., Pawlik, A., Świdarska-Burek, U., Polak, J., Sulej, J. i in., 2020. Laccase Properties, Physiological Functions, and Evolution. *International Journal of Molecular Sciences* 21 (3), 966. <https://doi.org/10.3390/ijms21030966>.
- Jayani, R.S., Saxena, S., Gupta, R., 2005. Microbial Pectinolytic Enzymes: a review. *Process Biochemistry* 40 (9), 2931–2944. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.03.026>.
- Kashyap, D.R., Vohra, P.K., Chopra, S., Tewari, R., 2001. Applications of pectinases in the commercial sector: a review. *Biore-source Technology* 77 (3), 215–227. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00118-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00118-8).
- Krajewski, P., 2023. Land grabbing and bioprospecting in the perspective of the right to own environmental resources. *Studia Iuridica Toruniensia* 32 (1), 119–140. <https://doi.org/10.12775/SIT.2023.006>.
- Luo, X., Elrys, A.S., Zhang, L., Ibrahim, M.M., Liu, Y. i in., 2024. The global fate of inorganic phosphorus fertilizers added to terrestrial ecosystems. *One Earth* 7 (8), 1402–1413. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.07.002>.
- Millán, J.L., 2006. Alkaline Phosphatases: Structure, Substrate Specificity and Functional Relatedness to Other Members of a Large Superfamily of Enzymes. *Purinergic Signaling* 2 (2), 335–341. <https://doi.org/10.1007/s11302-005-5435-6>.
- Mullu, D., 2016. A Review on the Effect of Habitat Fragmentation on Ecosystem. *Journal of Natural Sciences Research* 6 (15).
- Nellemann, C., MacDevette, M., Manders, T., Eickhout, B., Svihus, B., Prins, A. i in., 2009. The environmental food crisis – The environment's role in averting future food crises. A UNEP rapid response assessment. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal.
- Phitsuwan, P., Laohakunjit, N., Kerdchoechuen, O., Kyu K.L., Ratanakhanokchai, K., 2013. Present and Potential Applications of Cellulases in Agriculture, Biotechnology, and Bioenergy. *Folia Microbiologica* 58 (2), 163–176. <https://doi.org/10.1007/s12223-012-0184-8>.
- Piotrowska-Długosz, A., 2019. Significance of Enzymes and Their Application in Agriculture, w: Husain, Q., Ullah, M.F. (Red), *Biocatalysis: Enzymatic Basics and Applications*. Springer Cham, s. 277–308. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25023-2_14.

- Polak, J., Jarosz-Wilkolazka, A., 2007. Laccase-mediated reactions – Mechanism and biotechnology applications. *Biotechnologia* 4, 82–94.
- Ruiz-Herrera, J., 1992. Fungal cell wall: structure, synthesis, and assembly. CRC Press.
- Saavedra, D.E.M., Baltar, F., 2025. Multifunctionality of alkaline phosphatase in ecology and biotechnology. *Current Opinion in Biotechnology* 91, 103229. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2024.103229>.
- Sharma, A., Arya, S.K., Singh, J., Kapoor, B., Bhatti, J.S. i in., 2023. Prospects of chitinase in sustainable farming and modern biotechnology: an update on recent progress and challenges. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews* 40 (1), 310–340. <https://doi.org/10.1080/02648725.2023.2183593>.
- Sharma, S.B., Sayyed, R.Z., Trivedi, M.H., Gobi, T.A., 2013. Phosphate Solubilizing Microbes: Sustainable Approach for Managing Phosphorus Deficiency in Agricultural Soils. *SpringerPlus* 2 (1), 587. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>.
- Singh, S., Kang, S.H., Mulchandani, A., Chen, W., 2008. Bioremediation: environmental clean-up through pathway engineering. *Current Opinion in Biotechnology*, 19 (5), 437–444. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.07.012>.
- Stintzi, A., Heitz, T., Prasad, V., Wiedemann-Merdinoglu, S., Kauffmann, S. i in., 1993. Plant ‘Pathogenesis-Related’ Proteins and Their Role in Defense against Pathogens. *Biochimie* 75 (8), 687–706. [https://doi.org/10.1016/0300-9084\(93\)90100-7](https://doi.org/10.1016/0300-9084(93)90100-7).
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Bafort, B.L., 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108 (50), 20260–20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>.
- United Nations (2024). World Population Prospects 2024: Summary of Results. UN DESA/POP/2024/TR/NO. 9. New York: United Nations.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2021). Global Population Growth and Sustainable Development. UN DESA/POP/2021/TR/NO. 2. United Nations Publication.
- Wesołowska-Trojanowska, M., Targoński, Z., 2014. Celulazy – właściwości, otrzymywanie i zastosowanie. *Engineering Sciences And Technologies* 2 (13), 104–121. <https://doi.org/10.15611/nit.2014.2.10>.

