

Preparaty mikrobiologiczne – składniki i bioformulacja

1. Wprowadzenie

Według Organizacji Narodów Zjednoczonych ds. Wyżywienia i Rolnictwa (FAO, ang. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*) liczba ludności na świecie ma wzrosnąć do ponad 9 mld do 2050 r. Ten bezprecedensowy wzrost populacji będzie wymagał znacznego zwiększenia produkcji rolnej (co najmniej o 70%), co w warunkach zaostrejających się zmian klimatycznych jest jednym z największych wyzwań stojących przed sektorem rolnictwa. Obecnie rolnictwo odgrywa kluczową rolę w gospodarce światowej. System produkcji rolnej jest wynikiem złożonej interakcji między roślinami, glebą, wodą, różnorodnością biologiczną oraz agrochemikaliami. Dla prawidłowego funkcjonowania tej złożonej sieci bardzo ważne jest odpowiednie zarządzanie wszystkimi tymi komponentami [1, 2].

Obecnie praktyka rolnicza w dużym stopniu uzależniła się od stosowania agrochemikaliów, bez których światowa produkcja żywności prawdopodobnie zmniejszyłaby się o połowę. Nawozy mineralne służą do zaspokojenia zapotrzebowania roślin na składniki pokarmowe. Trzy główne rodzaje nawozów handlowych – azot (N), fosfor (P) i potas (K) – są stosowane w celu osiągnięcia maksymalnych plonów w produkcji roślinnej. Pestycydy natomiast służą do ograniczenia strat plonów powodowanych przez szkodniki, w tym patogeny, chwasty, bezkręgowce i owady [3, 4]. Stosowanie pestycydów i nawozów mineralnych odgrywa kluczową rolę w zwiększeniu plonów i poprawie bezpieczeństwa żywnościowego. Agrochemikalia przynoszą wymierne korzyści dla rolników, jednak ich nadmierne stosowanie może przyczynić się pogorszenia stanu środowiska naturalnego [5]. Negatywne implikacje intensywnego stosowania agrochemikaliów to m.in.:

- zanieczyszczenie środowiska (gleby, wody, powietrza);
- zwiększenie częstotliwości i intensywności występowania patogenów i chwastów;
- degradacja jakości gleby;
- niedobór mikroelementów w glebie;
- destabilizacja cyklu składników odżywczych;
- zwiększona emisja tlenu azotu;
- zanieczyszczenie metalami ciężkimi;
- zasolenie i zakwaszenie środowiska glebowego;
- ryzyko przedostania się szkodliwych substancji do łańcucha pokarmowego, co stwarza zagrożenie dla zdrowia ludzi;
- utrata bioróżnorodności [6, 7].

Rocznie około 7% stosowanych pestycydów wypłukuje się do wód gruntowych, a ponad 10% pozostaje w glebie, co prowadzi do powstania zanieczyszczeń stanowiących zagrożenie dla środowiska, różnorodności biologicznej i zdrowia ludzi [7, 8].

¹ m.wozniak@iung.pulawy.pl, Zakład Mikrobiologii, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy.

Biorąc pod uwagę te obawy dotyczące środowiska i zdrowia ludzi, ale i wpływu na przyszłe pokolenia, Organizacja Narodów Zjednoczonych (ONZ) wezwała państwa członkowskie do podjęcia globalnych działań w celu zmniejszenia uzależnienia od syntetycznych nawozów i pestycydów w ramach Celów Zrównoważonego Rozwoju [9]. W tym zakresie wdrożono liczne praktyki. W ciągu ostatniej dekady europejska polityka rolna nawołuje do wdrażania na szczeblu krajowym i regionalnym licznych praktyk mających na celu ograniczenie stosowania chemikaliów i zwiększenie powierzchni upraw ekologicznych. Coraz większa liczba rolników przyjęła przyjazne dla środowiska technologie, które wykorzystują biopreparaty, tj. bioprodukty, przeznaczone do hamowania wzrostu patogenów grzybów lub bakterii, stymulowania wzrostu roślin, poprawy pobierania składników odżywczych przez rośliny oraz przywracania właściwości i żyzności gleby. Konsumenci zaczęli coraz bardziej cenić produkty rolne o wysokiej wartości odżywczej i funkcjonalnej oraz takie pochodzące z produkcji przyjaznej dla środowiska naturalnego [10]. Obecnie powszechnie uznaje się, że musimy podjąć działania w celu ochrony środowiska poprzez stosowanie przyjaznych dla środowiska i zrównoważonych metod gospodarowania. Dlatego też celem niniejszego opracowania jest przegląd literatury dotyczącej mikrobiologicznych składników biopreparatów oraz sposobów ich formulacji, podkreślając fakt, że wykorzystanie produktów bazujących na potencjale biotechnologicznym mikroorganizmów zyskuje powszechną akceptację jako uzupełnienie środków agrochemicznych. Aby utrzymać produkcję rolną i zdrowe środowisko, inokulanty mikrobiologiczne są kluczowymi składnikami zintegrowanych systemów zarządzania składnikami odżywczymi. [11-13].

2. Preparaty mikrobiologiczne

Początkowo termin „mikrobiologiczny bionawóz” (ang. *microbial biofertilizer*) odnosił się wyłącznie do mikroorganizmów ryzosferowych zdolnych do poprawy wykorzystania składników odżywczych z gleby [14]. Najnowsze koncepcje wskazują, że mikrobiologiczne bionawozy, znane również jako: preparaty mikrobiologiczne inokulanty, bioinokulanty lub bioprodukty to produkty złożone z pożytecznych mikroorganizmów w formie aktywnej lub nieaktywnej, sformułowane z pojedynczego szczepu lub w formie mieszanej (konsorcjum szczepów), zdolne do kolonizacji ryzosfery lub wewnętrznych tkanek roślin. Są to mikroorganizmy określane mianem PGPM (ang. *plant growth-promoting microorganisms*), składające się zarówno z bakterii PGPB (ang. *plant growth-promoting bacteria*), jak i grzybów PGPF (ang. *plant growth-promoting fungi*) [15].

Ze względu na potencjał i popyt rynkowy na stosowanie mikrobiologicznych inokulantów w rolnictwie, rynek biofertylizatorów rośnie, osiągając imponujące kwoty. Wartość rynku biofertylizatorów w 2024 r., biorąc pod uwagę biofertylizatory wiążące azot, solubilizujące fosforany i inne, szacuje się na około 1,41 mld USD i przewiduje się, że wzrośnie do 4,71 mld USD do 2034 r., co oznacza wysoką wartość rynkową i wzrost o 12,83% [16].

2.1. Podział preparatów mikrobiologicznych

Mikroorganizmy tworzące preparaty mikrobiologiczne mogą mieć różne pochodzenie i funkcje. Są one klasyfikowane według następujących kryteriów: grupy mikroorganizmów, środowiska kolonizacji i funkcji mikrobiologicznej dla wzrostu roślin. Najprostsza klasyfikacja opiera się na rodzaju zastosowanych mikroorganizmów, głównie bakterii

i grzybów, chociaż w ostatnich czasach wzrasta też wykorzystanie mikroalg [15]. Głównymi grupami mikroorganizmów używanych do biofertilizatorów są bakterie i grzyby. Na przykład gatunki z rodzaju *Rhizobium*, *Bacillus*, *Pseudomonas* i *Azotobacter* są głównymi bakteriami, które tworzą biofertilizatory w wielu krajach, działając głównie w oparciu o zdolność biologicznego wiązania azotu, rozpuszczania fosforanów i wspomagania wzrostu roślin [17, 18]. Wśród grzybów wymienia się najczęściej rodzaje *Aspergillus*, *Penicillium* i *Trichoderma*, natomiast wśród alg – *Chlorella* i *Anabaena* [3, 15]. Druga klasyfikacja oparta jest na funkcjach mikroorganizmów, takich jak: biologiczne wiązanie N (bakterie z rodzaju *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum*), rozpuszczanie i zwiększanie mobilizacji P (bakterie z rodzaju *Bacillus*, *Pseudomonas*), produkcja fitohormonów (bakterie z rodzaju *Bacillus*, *Burkholderia*, *Delftia*, *Stenotrophomonas*) i produkcja sideroforów (bakterie z rodzaju *Bacillus*, *Pseudomonas*), synteza demianazy ACC (ang. *1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid*) (bakterie z rodzaju *Rhizobium*, *Stenotrophomonas*, *Collimonas*) oraz produkcja zewnątrzkomórkowych enzymów hydrolitycznych (bakterie z rodzaju *Delftia*, *Stenotrophomonas*) [12, 15, 19]. Taki podział pomaga zidentyfikować określone grupy wedle potrzeb, upraszczając ich stosowanie. Jednak wiele mikroorganizmów jest wielofunkcyjnych, tj. mogą one prezentować różne mechanizmy korzystne dla roślin, co może stanowić wartość dodaną biofertilizatorów, które prezentują dodatkowe mechanizmy [3, 12, 15, 19]. Przykładem wielofunkcyjności są grzyby mikoryzy arbuskularnej (AMF, ang. *arbuscular mycorrhizal fungi*) zaangażowane w mobilizację fosforanów i ochronę roślin [18]. Istnieją również asocjacyjne bakterie ryzosferowe wspomagające wzrost roślin (PGPR), takie jak *Azospirillum brasilensis*, które mogą być skuteczne w wiązaniu N i w produkcji fitohormonów. Trzecie kryterium klasyfikacji dotyczy środowiska interakcji z rośliną biofertilizatory formułowane z:

- mikroorganizmów ryzosferowych, np. z rodzaju *Azospirillum*, *Bacillus*, *Pseudomonas* (interakcja z strefą wokół korzenia roślin) [15, 19];
- mikroorganizmów endofitycznych, np. z rodzaju *Burkholderia*, *Delftia*, *Brevundimonas* (interakcja wewnątrz tkanek rośliny) [20];
- mikroorganizmów fytosferowych, np. z rodzaju *Bacillus*, *Erwinia*, *Pantoea* (interakcja z częścią nadziemną roślin) [15];
- mikroorganizmów wolno żyjących, np. z rodzaju *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Xanthomonas* (regiony gleby niezwiązanej z ryzosferą) [15].

Klasyfikacja biofertilizatorów w oparciu o ich funkcje i o mechanizm ich działania wydaje się być najbardziej praktyczna z punktu widzenia zastosowania przez rolnika. Mikroorganizmy, które promują wzrost roślin, biorą udział w różnych działaniach biotycznych w ekosystemie gleba-roślina, wspierając dynamiczny i zrównoważony rozwój produkcji roślinnej. Kolonizują korzenie i wnętrza tkanek roślin w sposób konkurencyjny i poprawiają wzrost roślin poprzez różne mechanizmy, w tym: rozpuszczanie fosforanów, wiązanie azotu, produkcję kwasu indolo-3-octowego (IAA, ang. *indole-3-acetic-acid*) i innych fitohormonów, syntezę sideroforów, deaminazy kwasu 1-aminocyklopropano-1-karboksylowego (ACCD, ang. *1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase*) i cyjanianu wodoru, degradację zanieczyszczeń środowiska, a także produkcję antybiotyków i enzymów litycznych. Ponadto niektóre mikroorganizmy wspomagające wzrost roślin mogą stymulować dodatkowe szczególne właściwości wspomagające wzrost roślin, takie jak detoksykacja metali ciężkich, zwiększenie tolerancji na zasolenie i suszę oraz

biologiczna kontrola fitopatogenów i owadów [12, 19]. W tabeli 1 podano przykłady mikrobiologicznych inokulantów zaliczanych zarówno do bakterii, jak i grzybów, których mechanizm działania wskazuje na korzystny wpływ na rośliny będące ich gospodarzami. W tabeli uwzględniono mikroorganizmy wykazujące szerokie spektrum działania – od zwiększania dostępności składników pokarmowych, syntezy fitohormonów, sideroforów i lotnych związków organicznych, po ochronę roślin przed patogenami i zwiększanie aktywności antyoksydacyjnej oraz zawartości chlorofilu.

Tabela 1. Gatunki mikrobiologicznych inokulantów i mechanizmy ich działania

Mikrobiologiczny inokulant	Mechanizm działania	Roślina-gospodarz	Referencje
<i>Bacillus anyloliquefaciens</i>	ochrona roślin przed patogenami, promowanie wzrostu roślin	<i>Solanum lycopersicum</i> , <i>Arabidopsis thaliana</i>	[21, 22]
<i>Bacillus cereus</i>	wspomaganie wzrostu roślin, produkcja kwasów organicznych, zwiększanie dostępności fosforu, produkcja fitohormonów	<i>Hordeum vulgare</i> , <i>Solanum tuberosum</i>	[15, 23]
<i>Burkholderia contaminans</i>	ochrona roślin przed patogenami	<i>Zea mays</i>	[24]
<i>Streptomyces</i> spp.	wspomaganie wzrostu roślin, poprawa tolerancji na infekcje produkcja sideroforów i lotnych związków organicznych, zwiększanie dostępności fosforu, wiązanie azotu, produkcja fitohormonów	<i>Solanum lycopersicum</i> , uprawy zbóż	[18, 25]
<i>Pseudomonas koreensis</i>	wspomaganie wzrostu roślin, produkcja kwasów organicznych, rozpuszczanie P, Zn i K, działanie przeciwwgrzybicze	<i>Hordeum vulgare</i> , <i>Arabidopsis thaliana</i>	[15, 26]
<i>Aspergillus flavus</i>	zwiększenie aktywności enzymów antyoksydacyjnych i zawartości chlorofilu	<i>Glycine max</i>	[27]
<i>Trichoderma harzianum</i>	aktywność przeciwdrobnoustrojowa	<i>Zea mays</i> , <i>Bupleurum chinense</i> , <i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Brassica napus</i>	[28, 29]

Źródło: opracowanie własne.

2.2. Etapy przygotowania preparatów mikrobiologicznych

Produkcja mikrobiologicznych biopreparatów jest wieloaspektową procedurą, która obejmuje kilka etapów. Jednym z głównych wyzwań jest przeżywalność mikroorganizmów, a tym samym zapewnienie ich wysokiej efektywności w środowisku naturalnym. Formuła biofertylizatorów musi umożliwiać mikroorganizmom adaptację, przetrwanie i konkutowanie z autochtonicznymi mikroorganizmami, aby zwiększały żyzność gleby nawet po upływie długiego czasu od momentu aplikacji [30].

2.2.1. Wybór potencjalnego mikrobiologicznego komponentu biopreparatu

Proces selekcji odpowiednich mikroorganizmów jest niezbędnym krokiem w procesie produkcji biopreparatów. Wybór efektywnych szczepów odbywa się na podstawie ich właściwości promujących wzrost roślin (PGP, ang. *plant growth promoting*), właściwości antagonistycznych, potencjału degradacji substancji toksycznych, zwiększaniu odporności na niekorzystne czynniki stresogenne, zarówno biotyczne, jak i abiotyczne, oraz wszelkich innych przydatnych właściwości [31, 32]. Aby wybrać potencjalnych kandydatów, przeprowadza się proces izolacji, wykorzystując różne mikrobiologiczne

podłoża, m.in. selektywne i wybiórczo-różnicujące. Źródłem aktywnych mikroorganizmów może być: gleba, rośliny, woda i wszelkie inne specyficzne substancje. Następnym etapem jest testowanie wyselekcjonowanych mikroorganizmów pod kątem różnych korzystnych właściwości, takich jak zwiększanie mobilizacji składników odżywczych, pośredniczenie w fitostymulacji oraz zwiększanie odporności roślin, co ogranicza tym samym zużycie agrochemikaliów. Wytypowane szczepy są następnie identyfikowane i zostaje określona ich przynależność taksonomiczna. Ponadto najbardziej efektywne szczepy są testowane *in vitro* i *in vivo* w fitotronach, szklarniach i w czasie eksperymentów polowych w naturalnych warunkach glebowych i klimatycznych. Warto podkreślić, że potencjalni kandydaci na mikrobiologiczne biopreparaty muszą posiadać pewne pożądane cechy: stabilność genetyczną i fizjologiczną, łatwość adaptacji do środowiska gospodarza, wysoką przeżywalność, zdolność przetrwania w trudnych warunkach, skuteczną kolonizację rośliny gospodarza, niepatogeniczność itp. [20, 33, 34].

2.2.2. Wybór nośnika

Drugim najważniejszym składnikiem wykorzystywanym w przygotowaniu biopreparatów jest nośnik. Jest to materiał przeznaczony do transportu szczepów drobnoustrojów podczas przetwarzania z laboratorium na pole. Materiał nośnikowy zapewnia środowisko ochronne i źródło energii do wzrostu i rozwoju mikroorganizmów. Gwarantuje też pomyślne uwolnienie komórek bakteryjnych po zastosowaniu. Nośniki stosowane do przygotowania mikrobiologicznych preparatów mogą znacząco wpływać na okres przydatności, biodostępność, szybkość uwalniania i ogólną wydajność bioformulacji na bazie mikrobiologicznych inokulantów. Dlatego też kompatybilność z mikroorganizmami i potencjalna toksyczność nośnika powinny być priorytetem podczas wyboru materiału nośnikowego. Kluczowe cechy nośnika to: opłacalność, łatwość przetwarzania, stabilność chemiczna, dobra absorpcja wilgoci i zdolność buforowania, nie toksyczność zarówno dla roślin, jak i mikroorganizmów oraz zapewnienie żywotności komórek bakteryjnych po określonym okresie przechowywania (minimum 2-3 miesiące). Ponadto nośnik powinien umożliwiać kontrolowane uwalnianie substancji bioaktywnych w zależności od zamierzonego zastosowania celem zwiększenia ich biodostępności. Na uwagę zasługuje również wielkość cząstek materiału nośnikowego, ponieważ mniejsze cząstki zazwyczaj zapewniają szybszą dyspersyjność i szybkość rozpuszczania. Warto podkreślić, że należy ocenić, czy wybrany nośnik można skutecznie przetwarzać i skalować, pozostając jednocześnie przyjaznym dla środowiska w kontekście produkcji komercyjnej [17, 32, 35]. Nośniki stałe mogą być pozyskiwane z materiałów glebowych, takich jak torf, węgiel czy glina. Niektóre pochodzą z materiałów organicznych, np. trociny, kompost, węgiel drzewny, otręby pszenne, łuski ryżowe, a niektóre są materiałami nieorganicznymi – np. talk, wermikulit, bentonit i kaolin. Bioformulacja płynna może być wytwarzana w podłożu bulionowym, węglowodanach, oleju mineralnym lub organicznym, emulsjach i zawiesinach mikrobiologicznych [35, 36]. Podczas przygotowywania biopreparatu konieczna jest sterylizacja nośników. W tym celu wykorzystywane są przede wszystkim promieniowanie gamma o mocy 4,0 kGy przez 1 godzinę lub autoklawowanie w temperaturze 121°C przez 20-30 minut [37].

2.2.3. Bioformulacja

Bioformulacja to biologicznie aktywne połączenie biomasy mikrobiologicznej i metabolitów z substancją nośnikową. Wysterylizowany nośnik jest mieszany ze szczepami drobnoustrojów. Ponadto mieszanina jest pakowana i zamykana we wstępnie sterylizo-

wanych opakowaniach [36]. Prawidłowa i efektywna bioformulacja powinna zawierać co najmniej $\sim 10^7$ jednostek tworzących kolonie na gram lub mililitr biopreparatu [38]. Bioformulacje mogą być klasyfikowane jako:

- stałe bioformulacje, tj. proszek suszony, granule, proszek zwilżany, granulowana formulacja zwilżalna/dyspergowalna w wodzie;
- płynne bioformulacje. Bioformuły płynne można podzielić na: koncentraty zawiesinowe, koncentraty mieszalne z olejem, zawiesiny o bardzo małej objętości i dyspersje olejowe;
- bioformuły zamknięte w kapsułkach. Istnieją dwa rodzaje metod kapsułkowania – mikrokapsułkowanie i makrokapsułkowanie. Makrokapsułkowanie wykorzystuje kulki o wielkości sięgającej milimetrów lub centymetrów, podczas gdy mikrokapsułkowanie wykorzystuje kulki o wielkości od 1 do 1000 μm ;
- bioformulacja metabolitów;
- bioformulacja CFCS (ang. *cell-free culture supernatant*). Bioformulacja CFCS jest przygotowywana przez oddzielenie supernatantu od osadu komórek przez wirowanie i przepuszczenie przez filtr 0,22 μm oraz zmieszanie z odpowiednim nośnikiem [33, 35, 36, 39].

Opracowano wiele strategii stosowania preparatów mikrobiologicznych, biorąc pod uwagę warunki uprawy i części, które można nawozić (korzeń, nasiona i pęd). Wśród metod aplikacji bionawozów należy wymienić: zastosowanie dolistnic, zaprawianie nasion oraz zastosowanie na glebę [33].

3. Podsumowanie i konkluzje

Głównym celem zwiększania produktywności rolnictwa jest zaspokojenie potrzeb rosnącej populacji globalnej. Jedną z dróg mającej pomóc zrealizować ten cel jest inwestowanie w rozwój preparatów bazujących na mikrobiologicznych komponentach. Podejście to wspiera wzrost roślin i zrównoważony rozwój środowiska. Aby zapewnić sukces bioformulacji, proces rozpoczyna się od starannego wyboru szczepów mikrobiologicznych. Wybrane szczepy powinny posiadać przewagę konkurencyjną nad rodzimą mikroflorą, jednocześnie wykazując korzystne funkcje nawet w warunkach stresowych i zachowując swoją efektywność po uwolnieniu. Ponadto wybór idealnego nośnika jest kluczowy dla wydłużenia okresu przydatności bioformulacji i zachowania jej skuteczności. Wykorzystania bioproduktów w rolnictwie odniosło znaczące sukcesy, ale nie jest pozbawione szeregu ograniczeń. Jednym z podstawowych problemów jest ograniczona możliwość ekstrapolacji ich pozytywnych wyników potwierdzonych w skali laboratoryjnej na ciągle zmieniające się warunki środowiskowe na polu. Ponadto istnieje potrzeba podniesienia świadomości społeczności rolników w kwestii i metod stosowania bioformulacji mikrobiologicznych w terenie i ich znaczenia praktycznego. Podsumowując, konieczne są badania i wprowadzanie innowacji związanych ze skuteczną formulacją, która wydłuży żywotność inokulantów mikrobiologicznych, ich stabilność i aktywność. Wówczas możliwe będzie pomyślne i szersze uznanie preparatów mikrobiologicznych. Biofertylizatory mają znaczący potencjał poprawy globalnej produkcji żywności i zrównoważonego rozwoju środowiska.

Uwagi ogólne

Opracowanie wykonano w ramach realizacji zadania 1.7 dotacji celowej MRiRW w 2025 r. pt. „Preparaty mikrobiologiczne”.

Literatura

1. www.fao.org [data dostępu: 05.03.2025].
2. Daniel A. I., Fadaka A. O., Gokul A., Bakare O. O., Aina O., Fisher S., Klein A., *Biofertilizer: the future of food security and food safety*, Microorganisms, 10(6), 2022.
3. Chaudhary R., Nawaz A., Khattak Z., Butt M. A., Fouillaud M., Dufossé L., Mukhtar H., *Microbial bio-control agents: A comprehensive analysis on sustainable pest management in agriculture*, Journal of Agriculture and Food Research, 2024.
4. Kumar L., Chhogyel N., Gopalakrishnan T., Hasan M. K., Jayasinghe S. L., Kariyawasam C. S., ... & Ratnayake S., *Climate change and future of agri-food production*, [w:] Bhat R. (red.), *Future foods*, Academic Press, 2022, s. 49-79.
5. Brunelle T., Chakir R., Carpentier A., Dorin B., Goll D., Guilpart N., Tang F.H., *Reducing chemical inputs in agriculture requires a system change*, Communications Earth & Environment, 5(1), 2024, 369.
6. Cui X., Zhou F., Ciaisi P., Davidson E. A., Tubiello F. N., Niu X., Zhu D., *Global mapping of crop-specific emission factors highlights hotspots of nitrous oxide mitigation*, Nature Food, 2(11), 2021, s. 886-893.
7. Jote C.A., *The impacts of using inorganic chemical fertilizers on the environment and human health*, Organic and Medicinal Chemistry International Journal, 13, 2023.
8. Maggi F., Tang F.H.M., Tubiello F.N., *Agricultural pesticide land budget and river discharge to oceans*, Nature, 620, 2023, s. 10137-1017.
9. Sustainable development knowledge platform.
<https://sustainabledevelopment.un.org/about> [data dostępu: 05.03.2025].
10. Buragienė S., Šarausis E., Adamavičienė A., Romaneckas K., Lekavičienė K., Rimkuvienė D., Naujokienė V., *The effect of different biopreparations on soil physical properties and CO₂ emissions when growing winter wheat and oilseed rape*, Soil, 9(2), 2023, s. 593-608.
11. Darnhofer I., Lindenthal T., Bartel-Kratochvil R., Zollitsch W., *Conventionalization of organic farming practices: From structural criteria towards an assessment based on organic principles. A Review*, Agronomy for Sustainable Development, 30, 2010, s. 67-81.
12. Woźniak M., Tyśkiewicz R., Siebielec S., Gałązka A., Jaroszuk-Ścisiel J., *Metabolic profiling of endophytic bacteria in relation to their potential application as components of multi-task biopreparations*, Microbial Ecology, 86(4), 2023, s. 2527-2540.
13. Rachappanavar V., Kumar M., Negi N., Chowdhury S., Kapoor M., Singh S., *Silicon derived benefits to combat biotic and abiotic stresses in fruit crops: Current research and future challenges*, Plant Physiology and Biochemistry, 211, 2024, 108680.
14. Malusá E., Vassilev N., *A contribution to set a legal framework for biofertilisers – mini-review*, Applied Microbiology and Biotechnology, 98, 2014, s. 6599-6607.
15. Ibáñez A., Garrido-Chamorro S., Vasco-Cárdenas M.F., Barreiro C., *From lab to field: biofertilizers in the 21st century*, Horticulturae, 9, 2023, 1306.
16. <https://www.precedenceresearch.com/biofertilizers-market> [data dostępu: 05.03.2025].
17. Aloo B.N., Mbega E.R., Makumba B.A., Tumuhairwe J.B., *Effects of carrier materials and storage temperatures on the viability and stability of three biofertilizer inoculants obtained from potato (Solanum tuberosum L.) rhizosphere*, Agriculture, 12, 2022.
18. Patel J.K., Madaan S., Archana G., *Antibiotic producing endophytic Streptomyces spp. colonize above-ground plant parts and promote shoot growth in multiple healthy and pathogen-challenged cereal crops*, Microbiological Research, 215, 2018, s. 36-45.
19. Woźniak M., Gałązka A., *The rhizosphere microbiome and its beneficial effects on plants – current knowledge and perspectives*, Postępy Mikrobiologii, 58(1), 2019, s. 59-69.
20. Woźniak M., Gałązka A., Tyśkiewicz R., Jaroszuk-Ścisiel J., *Endophytic bacteria potentially promote plant growth by synthesizing different metabolites and their*

- phenotypic/physiological profiles in the Biolog GEN III MicroPlate™ Test, International Journal of Molecular Sciences, 20(21), 2019, 5283.
21. Beris D., Theologidis I., Skandalis N., Vassilakos N., *Bacillus amyloliquefaciens* strain MBI600 induces salicylic acid dependent resistance in tomato plants against tomato spotted wilt virus and potato virus Y, Scientific Reports, 8, 2018, 10320.
22. Liu S., Tian Y., Jia M., Lu X., Yue L., Zhao X., Jin W., Wang Y., Zhang, Y., Xie Z., *Induction of salt tolerance in Arabidopsis thaliana by volatiles from Bacillus amyloliquefaciens FZB42 via the jasmonic acid signaling pathway*, Frontiers in Microbiology, 11, 2020, 562934.
23. Ali A.M., Awad M.Y.M., Hegab S.A., El Gawad A.M.A., Eissa M.A., *Effect of potassium solubilizing bacteria (Bacillus cereus) on growth and yield of potato*, Journal of Plant Nutrition, 44, 2021, s. 411-420.
24. Bazie Tagele S., Woo Kim S., Gu Lee H., Seung Kim H., Lee Y., *Effectiveness of multi-trait Burkholderia contaminans KNU17B11 in growth promotion and management of banded leaf and sheath blight in maize seedling*, Microbiological Research, 214, 2018, s. 8-18.
25. Dias M.P., Bastos M.S., Xavier V.B., Cassel E., Astarita L.V., Santarém E.R., *Plant growth and resistance promoted by Streptomyces spp. in tomato*, Plant Physiology and Biochemistry, 118, 2017, s. 479-493.
26. Gu Y., Ma Y., Wang J., Xia Z., Wei H., *Genomic insights into a plant growth-promoting Pseudomonas koreensis strain with cyclic lipopeptide-mediated antifungal activity*, MicrobiologyOpen, 9, 2020, e1092.
27. Lubna Asaf S., Hamayun M., Khan A.L., Waqas M., Khan M.A., Jan R., Lee I.-J., Hussain A., *Salt tolerance of Glycine max L. induced by endophytic fungus Aspergillus flavus CSH1, via regulating its endogenous hormones and antioxidative system*, Plant Physiology and Biochemistry, 128, 2018, s. 13-23.
28. Yu C., Fan L., Gao J., Wang M., Wu Q., Tang J., Li Y., Chen J., *The platelet-activating factor acetylhydrolase gene derived from Trichoderma harzianum induces maize resistance to Curvularia lunata through the jasmonic acid signaling pathway*, The Journal of Environmental Science and Health. Part B, 50, 2015, s. 708-717.
29. Liu L., Xu Y., Cao H., Fan Y., Du K., Bu X., Gao D., *Effects of Trichoderma harzianum Biofertilizer on Growth, Yield, and Quality of Bupleurum chinense*, Plant Direct, 6, 2022, e461.
30. Herrmann L., Lesueur D., *Challenges of formulation and quality of biofertilizers for successful inoculation*, Applied Microbiology and Biotechnology, 97, 2013, s. 8859-8873.
31. Wong C.K.F., Saidi N.B., Vadmalai G., The C.Y., Zulperi D., *Effect of bioformulations on the biocontrol efficacy, microbial viability and storage stability of a consortium of biocontrol agents against Fusarium wilt of Banana*, Journal of Applied Microbiology, 127(2), 2019, s. 544-555.
32. Singh J., Singh A.V., Upadhyay V.K., Khan A., *Comparative evaluation of developed carrier based bioformulations bearing multifarious PGP properties and their effect on shelf life under different storage conditions*, Environment and Ecology, 38(1), 2020, s. 96-103.
33. Negi R., Yadav N., Yadav A.N., *Microbial biofertilizers: A paradigm shift towards agricultural sustainability*, Biologia, 2025, s. 1-26.
34. Chakraborty A.P., *Carrier based bioformulations of PGPR-characteristics, shelf life and application in improving health status of crop plants—A mini review*, International Journal of Research and Review, 7, 2020, s. 88-98.
35. Fadji A.E., Xiong C., Egidi E., Singh B.K., *Formulation challenges associated with microbial biofertilizers in sustainable agriculture and paths forward*, Journal of Sustainable Agriculture and Environment, 3(3), 2024, e70006.
36. Khan A., Singh A.V., Gautam S.S., Agarwal A., Punetha A., Upadhyay V.K., Goel R., *Microbial bioformulation: a microbial assisted biostimulating fertilization technique for sustainable agriculture*, Frontiers in Plant Science, 14, 2023, 1270039.