

INNOWACJE

W ROLNICTWIE, ENERGETYCE
I ZARZĄDZANIU ODPADAMI

perspektywy i wyzwania

Tom 2



Redakcja: Kinga Kalbarczyk, Alicja Danielewska

Lublin 2025

**Innowacje w rolnictwie, energetyce
i zarządzaniu odpadami –
perspektywy i wyzwania. Tom 2**



Innowacje w rolnictwie, energetyce i zarządzaniu odpadami – perspektywy i wyzwania. Tom 2

Redakcja:
Kinga Kalbarczyk
Alicja Danielewska

Lublin 2025

**Wydawnictwo Naukowe TYGIEL składa serdeczne podziękowania
zespołowi Recenzentów za zaangażowanie w dokonane recenzje
oraz merytoryczne wskazówki dla Autorów.**

Recenzentami niniejszej monografii byli:

- prof. dr hab. inż. Wojciech Dobicki
- prof. dr hab. inż. Marian Kuczaj
- prof. dr hab. inż. Paweł Parzuchowski
- prof. dr hab. inż. Grzegorz Wielgosiński
- dr hab. inż. Lidia Felska-Błaszczak, prof. ZUT
- dr hab. Beata Krawczyk
- dr hab. Barbara Łata
- dr hab. Agnieszka Kuźniar
- dr hab. Agnieszka Richert, prof. UMK
- dr inż. Bernadetta Bienia
- dr n. o zdr. Mariola Janiszewska
- dr inż. Katarzyna Łuczak
- dr inż. Katarzyna Midor

Wszystkie opublikowane rozdziały otrzymały pozytywne recenzje.

Skład i łamanie:
Monika Maciąg

Projekt okładki:
Marcin Szklarczyk

Korekta:
Wiktoria Paul

© Copyright by Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o.

ISBN 978-83-67881-93-7

Wydawca:
Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o.
ul. Głowackiego 35/341, 20-060 Lublin
www.wydawnictwo-tygiel.pl

Spis treści

Ilona Kulus, Aneta Adamczuk, Iwona Ciereszko Przeciwdziałanie negatywnym skutkom deficytu fosforu we współczesnym rolnictwie	7
Karolina Gromek, Anna Szafranek-Nakoneczna Biotyczne możliwości degradacji tworzyw sztucznych – aktualny stan wiedzy.....	19
Bożena Karbowska, Jarosław Bartoszewicz, Edyta Janeba-Bartoszewicz, Patryk Heleniak Właściwości paliwowe odpadu ziemniaczanego pod kątem przydatności do termicznego unieszkodliwienia na drodze spalania, zgazowania lub pirolizy	38
Edyta Janeba-Bartoszewicz, Bożena Karbowska Metodyka optymalnego zarządzania odpadami zakaźnymi	52
Monika Koziół Taksonomia, charakterystyka i wpływ preparatów mikrobiologicznych na bazie bakterii symbiotycznych roślin bobowatych na wzrost i rozwój roślin.....	61
Ryszard Gąsiorowski, Danuta Matykiewicz, Dominika Janiszewska-Latterini Zastosowanie biomasy z sorgo jako surowca do wywarzania materiałów ze źródeł zrównoważonych.....	72
Joanna Wojtas, Joanna Kisała, Natalia Matłok Wykorzystanie nanocząstek w nowoczesnym rolnictwie	82
Sylwia Andrzejczak-Grządko, Michalina Gniewosz, Leszek Jerzak Szop pracz – zagrożenie dla bioróżnorodności oraz zdrowia ludzi i zwierząt	91
Magdalena Mysiek-Bęben, Joanna Guziałowska-Tic Analiza strumienia odpadów poprodukcyjnych a realizacja celów zrównoważonego rozwoju w przemyśle kosmetycznym	98
Grzegorz Strozik Problemy rewitalizacji terenów pogórnich, ochrony środowiska i transformacji gmin pogórnich na przykładzie miasta Piekary Śląskie	107
Katarzyna Targońska Potencjał akwakultury w świetle współczesnych wyzwań ekologicznych	133

Taksonomia, charakterystyka i wpływ preparatów mikrobiologicznych na bazie bakterii symbiotycznych roślin bobowatych na wzrost i rozwój roślin

1. Wstęp

Strategia „Od pola do stołu” jest częścią Europejskiego Zielonego Ładu, którego celem jest promowanie zrównoważonej produkcji rolnej w celu zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego i osiągnięcia neutralności klimatycznej [1, 2]. Wiąże się to z radykalnym ograniczeniem stosowania pestycydów i promowaniem praktyk rolnictwa ekologicznego i zrównoważonego. W rezultacie zarówno naukowcy, jak i rolnicy poszukują skutecznych naturalnych metod, które zwiększą wydajność produkcji rolnej [3]. Obecnie dzięki pogłębianiu świadomości i rozwojowi metod biologicznych dąży się do ograniczenia stosowania środków chemicznych na rzecz biopreparatów [4].

Biopreparaty są jedną z alternatyw dla chemicznych środków ochrony roślin, których celem jest ochrona roślin przed patogenami oraz pozytywny wpływ na ich wzrost i rozwój [5, 6]. Preparaty mikrobiologiczne zawierają w swoim składzie m.in. starannie wyselekcjonowane żywe organizmy lub odpowiednio przygotowane produkty ich metabolizmu, a także formy przetrwalnikowe bakterii chorobotwórczych atakujących niektóre gatunki patogenów. Biopreparaty mogą być stosowane jako bionawozy, biopestycydy, biostymulatory i preparaty mikrobiologiczne [6-9]. Na podstawie składu biopreparaty stosowane w rolnictwie można sklasyfikować jako: grzybowe, bakteryjne, bakteryjno/grzybowo-enzymatyczne, bakteryjno-grzybowe i enzymatyczne [3].

Bionawozy są jednym z najlepszych sposobów na zwiększenie lub utrzymanie obecnego tempa produkcji żywności przy jednoczesnym zapewnieniu stabilności i bezpieczeństwa środowiska. Stosowanie biopreparatów może przyczyniać się do poprawy właściwości próchnicotwórczych gleby, co skutkuje zwiększeniem plonowania roślin, jednocześnie nie zaburzając równowagi biologicznej w glebie. Preparaty mikrobiologiczne wywierają również korzystny wpływ na rośliny poprzez zwiększanie wchłaniania trudno-dostępnych pierwiastków, takich jak azot, fosfor, cynk i potas, eliminację patogenów oraz indukcję odporności w warunkach stresowych [10, 11]. Do biopreparatów zaliczamy produkty zawierające bakterie wiążące azot atmosferyczny. Zasiedlające strefę ryzosferową bakterie przyczyniają się do poprawy wzrostu i rozwoju roślin jako PGPR (ang. *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*), dlatego też znajdują zastosowanie w rolnictwie, leśnictwie, ogrodnictwie, a także w remediacji środowiska [12-13]. Obecnie znanych jest kilkadziesiąt rodzajów PGPR, tj. *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Agrobacterium*, *Allorhizobium*, *Arthrobacter*, *Azoarcus*, *Azorhizobium*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Bradyrhizobium*, *Burkholderia*, *Caulobacter*, *Chromobacterium*, *Delftia*, *Enterobacter*, *Flavobacterium*, *Frankia*, *Gluconacetobacter*, *Klebsiella*, *Mesorhizobium*, *Micro-*

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

coccus, *Paenibacillus*, *Pantoea*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Serratia*, *Streptomyces* i *Thiobacillus*, będących obiektem licznych badań laboratoryjnych i polowych [14].

Najpopularniejszymi produktami mikrobiologicznymi wykorzystywanymi w promowaniu wzrostu roślin są biopreparaty, w skład których wchodzi bakterie z rodzaju *Rhizobium*. Symbiotyczne bakterie wiążące azot atmosferyczny dostarczają roślinom składników mineralnych, tj. azotu, fosforu, potasu, cynku, żelaza, i syntetyzują fitohormony (auksyny, cytokiny, gibereliny). Poprzez modulację poziomów fitohormonów bakterie te wpływają na różne aspekty wzrostu roślin, takie jak rozwój korzeni i pędów, kwitnienie czy tolerancja na warunki stresowe. Ponadto bakterie z rodzaju *Rhizobium* obniżają poziom etylenu niekorzystnie wpływającego na ukorzenienie roślin oraz chronią rośliny przed działaniem fitopatogenów [15]. Mają one ogromny potencjał w zrównoważonej produkcji rolnej, szczególnie w obliczu dynamicznych zmian klimatu, częściowo powodowanych przez nadmierne stosowanie nawozów mineralnych. Ze względu na pozytywny wpływ biopreparatów na bazie bakterii symbiotycznych na wzrost i plonowanie wielu roślin uprawnych opracowywanie nowych produktów wydaje się być ważnym elementem pracy naukowców w wielu ośrodkach naukowych [16].

Głównym celem artykułu jest podkreślenie znaczenia symbiotycznych bakterii z rodziny *Rhizobiaceae* w rolnictwie ekologicznym i zrównoważonym jako potencjalnego składnika biopreparatów poprawiających wzrost, rozwój i jakość plonu roślin uprawnych. Ponadto dokonano przeglądu aktualnych informacji na temat taksonomii i najważniejszych cech charakteryzujących symbionty roślin bobowatych. Zwrócono uwagę na praktyczne zastosowanie omawianych bakterii jako czynnika biologicznego w produkcji biopreparatów coraz częściej wykorzystywanych w optymalizacji produkcji rolniczej.

2. Taksonomia symbiotycznych bakterii wiążących azot atmosferyczny

Bakterie brodawkowe, zwane ryzobiami, zaliczane są do grupy bakterii glebowych, które – wchodząc w symbiozę z roślinami bobowatymi – powodują powstawanie na korzeniach brodawek. W brodawkach zachodzi proces wiązania azotu atmosferycznego, czyli jego redukcja do formy amonowej, przyswajalnej dla roślin [17, 18]. Spośród symbiotycznych bakterii wiążących azot najczęściej opisywaną grupą są bakterie z rodzaju *Rhizobium* spp. będące Gram-ujemnymi, tlenowymi, urzęsionymi pałeczkami, które nie tworzą form przetrwanych [19]. Popularna nazwa „rizobia” wywodzi się od nazwy rodzajowej *Rhizobium* i po łacinie oznacza „żyjący w korzeniach” [18].

Przez wiele lat taksonomia bakterii brodawkowych oparta była na stopniu specyficzności układów symbiotycznych tworzonych przez bakterie i rośliny. Jednak wiele ryzobiów jest w stanie nawiązać interakcje symbiotyczne między taksonomicznie odrębnymi gatunkami roślin strączkowych, a ta sama roślina strączkowa może wejść w symbiozę z odrębnymi gatunkami bakterii z rodzaju *Rhizobium*. Kiedy okazało się, że spektrum żywicieli nie jest jedynym kryterium, które należy wziąć pod uwagę przy klasyfikacji *Rhizobium* spp., zaproponowano podział bakterii na dwie grupy: wolno-rosnące (*Bradyrhizobium*) i szybko-rosnące (*Rhizobium*, *Allorhizobium*, *Sinorhizobium* i *Mesorhizobium*), w oparciu o ich czas generacji [19]. Współczesna taksonomia ryzobiów jest taksonomią wielokierunkową, opierającą się na analizie zarówno cech fenotypowych, genomowych, jak i danych pochodzących z badań filogenetycznych. W oparciu o analizę porównawczą sekwencji genu *16S* rybosomalnego RNA znane symbionty

roślin bobowatych przypisano do trzech głównych klas filogenetycznych: α , β i γ -*Proteobacteria*. Większość znanych bakterii symbiotycznych sklasyfikowanych jest do rodzajów należących do klasy α -*Proteobakterii* z rodzin *Rhizobiaceae* (*Rhizobium*, *Ensifer* (syn. *Sinorhizobium*), *Allorhizobium*, *Pararhizobium*, *Neorhizobium*, *Shinella*), *Phyllobacteriaceae* (*Mesorhizobium*, *Aminobacter*, *Phyllobacterium*), *Brucellaceae* (*Ochrobactrum*), *Methylobacteriaceae* (*Methylobacterium*, *Microvirga*), *Bradyrhizobiaceae* (*Bradyrhizobium*), *Xanthobacteraceae* (*Azorhizobium*) i *Hyphomicrobiaceae* (*Devosia*), niektóre sklasyfikowane są do rodzajów z klasy β -*Proteobakterii* z rodziny *Burkholderiaceae* (*Paraburkholderia*, *Cupriavidus*, *Trinickia*) i jeden rodzaj należący do rzędu *Pseudomonales* w klasie γ -*Proteobacteria* [20-22]. Przez wiele lat uważano, że *Rhizobium* spp. to jedyne wiążące N_2 bakterie występujące w brodawkach korzeniowych roślin strączkowych. Badania dowodzą, że w strukturach tych występują również inne rodzaje α - β - i γ -*Proteobacteria*, tj. *Pantoea*, *Burkholderia*, *Serratia*, *Pseudomonas*, *Bacillus* i *Enterobacter* [23-25]. Większość tych diazotrofów, poza zdolnością do wiązania azotu atmosferycznego, wykazuje właściwości promujące wzrost roślin [26].

3. Charakterystyka bakterii z rodziny *Rhizobiaceae*

Bakterie brodawkowe charakteryzuje zdolność do tworzenia na korzeniach roślin bobowatych specyficznych struktur zwanych brodawkami korzeniowymi, w których zachodzi proces wiązania azotu atmosferycznego. W aktywnych brodawkach następuje redukcja azotu do formy amonowej, przyswajalnej dla roślin [27, 28]. Proces biologicznego wiązania azotu atmosferycznego dostarcza corocznie do gleb uprawnych około 139-170 mln ton azotu [29, 30]. Ilość azotu związanego przez mikroorganizmy symbiotyczne stanowi od około 70% do 80%, natomiast pozostałe 20-30% azotu wiązane jest przez mikroorganizmy niesymbiotyczne [31]. Wydajność wiązania azotu przez wolno żyjące mikroorganizmy jest mała i wynosi od około 1 kg do 50 kg $N_2 \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$. W układach symbiotycznych wydajność procesu wiązania N_2 jest znacznie wyższa i osiąga wartość od 200 kg do nawet 500 kg $N_2 \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ [32, 33].

Efektywność procesu wiązania azotu jest zależna od współdziałania rośliny-gospodarza z odpowiednim gatunkiem *Rhizobium* spp. Rośliny muszą zagwarantować źródła energii niezbędne bakteriom do przeprowadzania procesu redukcji azotu atmosferycznego, natomiast bakterie muszą wykazywać zdolność do wiązania tego pierwiastka na odpowiednim poziomie, wykraczającym poza ich zapotrzebowanie [32]. W tabeli 1 zamieszczono najważniejsze rodzaje i gatunki bakterii symbiotycznych oraz nazwy roślin bobowatych, z którymi bakterie te tworzą układy symbiotyczne. Symbioza zachodząca pomiędzy roślinami bobowatymi a bakteriami symbiotycznymi charakteryzuje się dość dużą specyficznością, czyli powinowactwem poszczególnych gatunków bakterii tylko do określonego rodzaju rośliny-gospodarza. Na przykład bakterie symbiotyczne fasoli (*R. leguminosarum* bv. *phaseoli*) nie tworzą symbiozy z koniczyną, wyką czy bobikiem ani odwrotnie. Wśród gatunków ryzobiów są również takie, które mogą indukować tworzenie brodawek korzeniowych u jednego lub kilku gatunków roślin bobowatych. Na przykład *Rhizobium leguminosarum* biovar *viciae* jest symbiontem bobiku, grochu i soczewicy, a *Mezorhizobium loti* tworzy symbiozę z korzeniami łubinu i komonicy [30, 32, 34]. Pomimo licznych badań, nie wyizolowano dotychczas uniwersalnego gatunku bakterii symbiotycznych, który tworzyłby symbiozę ze wszystkimi gatunkami roślin bobowatych.

Tabela 1. Wybrane gatunki bakterii brodawkowych i ich symbiotyczni gospodarze roślinni

Rodzaj	Gatunek	Gospodarz roślinny
<i>Rhizobium</i>	<i>R. leguminosarum</i> bv. <i>viciae</i>	groch, bobik, wyka, soczewica
	<i>R. leguminosarum</i> bv. <i>trifolii</i>	koniczyna
	<i>R. leguminosarum</i> bv. <i>phaseoli</i>	fasola
	<i>R. leguminosarum</i> bv. <i>etli</i>	fasola, wspanięga
<i>Bradyrhizobium</i>	<i>Bradyrhizobium</i> sp.	hubin
	<i>B. japonicum</i>	soja
	<i>B. elkanii</i>	<i>Glycine max</i>
<i>Sinorhizobium</i>	<i>S. meliloti</i>	lucerna, nostryk, kozieradka
	<i>S. sahelenense</i>	akacja, jadaloszyn, neptunia
<i>Mesorhizobium</i>	<i>M. loti</i>	komonica
	<i>M. huakuii</i>	<i>Astragalus sinicus</i>
<i>Azorhizobium</i>	<i>A. caulinodans</i>	<i>Sesbania rostrata</i>
	<i>A. dobereineriae</i>	<i>Sesbania virgata</i>

Źródło: opracowanie własne na podstawie [22, 34].

W okresie, kiedy bakterie brodawkowe nie tworzą symbiozy z roślinami występują w glebie jako saprofity. Ich występowanie i liczebność zależy od właściwości fizyczno-chemicznych i biologicznych gleb, czynników klimatycznych oraz zabiegów agrotechnicznych. Spośród czynników agrotechnicznych, które w istotny sposób wpływają na występowanie i liczebność glebowych bakterii brodawkowych możemy wymienić: nawożenie NPK, wapnowanie, częstotliwość uprawy roślin motylkowatych na danym polu oraz system gospodarowania (uprawy roślin). Należy pamiętać, iż stężenie jonów wodorowych oraz skład granulometryczny, głównie zawartość części spławialnych, mogą przyczyniać się do zmiany liczebności tych bakterii w środowisku glebowym. Większości bakterii symbiotycznych służy odczyn zbliżony do obojętnego, większa zawartość części spławialnych i wapnowanie gleby [34-36].

4. Wykorzystanie biopreparatów na bazie bakterii symbiotycznych w uprawie roślin

W dużej mierze ze względu na negatywne skutki stosowania nawozów mineralnych wykorzystywanie preparatów mikrobiologicznych w rolnictwie stało się powszechną praktyką przyjazną dla środowiska. Biopreparaty są uznawane za produkty, które tworzone są poprzez zastosowanie wyselekcjonowanych i scharakteryzowanych fizjologicznie, biochemicznie i genetycznie żywych mikroorganizmów poprawiających dostępność składników odżywczych w glebie. Na światowym rynku dostępne są zarówno biopreparaty, które zawierają tylko szczepy bakterii reprezentujące określony gatunek bakterii, jak i innowacyjne i równie efektywnie działające preparaty mikrobiologiczne zawierające konsorcja bakteryjne [37, 38].

Od kilkadziesiąt lat intensywnie stosowane są szczepionki rizobiowe dedykowane w szczególności roślinom bobowatym. Preparat na bazie bakterii symbiotycznych jest obecny na rynku od 1896 roku, kiedy to Nobbe i Hiltner uzyskali patent na wykorzystanie czystych kultur *Rhizobium* spp. i wprowadzili na rynek produkt pod nazwą Nitragin [30]. Szczepy należące do rodzajów *Allorhizobium*, *Azorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Rhizobium* i *Sinorhizobium* są wykorzystywane jako biokomponenty preparatów mikrobiologicznych ze względu na silne właściwości promujące wzrost roślin [40]. Plony roślin bobowatych można zwiększyć, stosując biopreparaty zawierające

w swoim składzie *Rhizobium* spp. i *Bradyrhizobium* spp. [41] Wykazano, że szczepienie nasion soi przyczynia się do wzrostu plonów, zwiększenia zawartości materii organicznej w glebie, a także zaspokojenia około 80% zapotrzebowania tej rośliny na azot [42]. Patten i Glick [43] dowiedli, że zainokulowanie nasion fasoli *Bradyrhizobium* spp. wpływa korzystnie na wydłużenie międzywęźli i wzrost poziomu giberelin. Dowiedli także, że poza giberelinami *Rhizobium leguminosarum* var. *trifolii* wytwarza kwas indoliloctowy (IAA) należący do auksyn. Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń i uzyskanych wyników stwierdzili, że IAA pełni kluczową rolę w rozwoju systemu korzeniowego roślin. Badania o podobnym charakterze prowadzili Li i wsp. [44], którzy stwierdzili, iż kwas indoliloctowy stymuluje podział i wydłużenie komórek roślinnych. Okazuje się, że niski poziom bakteryjnego IAA wpływa na wydłużenie korzeni, natomiast za pobudzenie tworzenia korzeni przybyszowych i bocznych odpowiada wysoki poziom kwasu indoliloctowego [45]. Zastosowanie biopreparatów na bazie *Bradyrhizobium diazoefficiens* spowodowało wzrost plonowania soi, niezależnie od zastosowanego materiału nośnikowego. Zarówno bioinokulanty w formie płynnej, jak i stałej zwiększyły liczbę brodawek korzeniowych [46]. Ismail i wsp. [47] zaobserwowali wzrost plonu fasoli szparagowej, fasoli czarnej, grochu gołębiego, ciecierzycy, soi i orzeszków ziemnych o 10% do 28% po inokulacji płynnym bionawozem zawierającym bakterie z rodzaju *Rhizobium*. Badania naukowe potwierdzają także pozytywny wpływ inokulacji roślin bobowatych szczepami *Rhizobium* spp. w warunkach stresu suszy. Zauważono wzrost suchej masy korzeni, całkowitej zawartości N i względnej zawartości wody w roślinach bobu po inokulacji *R. leguminosarum* bv. *viciae* (F46) [48]. Gan i wsp. [49] odnotowali zwiększenie wykorzystania wody przez ciecierzycę w warunkach niedoboru wody po wcześniejszym zaszczepieniu bakteriami z rodzaju *Rhizobium*. Poza pozytywnym wpływem *Rhizobium* spp. na wzrost i plonowanie roślin bobowatych liczne badania potwierdzają istotne znaczenie tych bakterii w uprawie innych roślin. Potwierdzono, że inokulacja szczepami *Rhizobium etli* bv. *phaseoli*, *R. leguminosarum* bv. *trifolii* i *Sinorhizobium* sp. poprawiła wzrost i zwiększyła wysokość plonu ziarna kukurydzy [50]. Badania przeprowadzone przez Chaintreuil i wsp. [51] potwierdziły, że zaszczepienie ryżu *Bradyrhizobium* spowodowało 20% wzrost całkowitej biomasy roślin. Ponadto Hussain i wsp. [52] zaobserwowali znaczną poprawę plonu (43%), biomasy (18%) i wielkości ziarna (25%) w uprawie ryżu po zastosowaniu biopreparatu na bazie *Rhizobium leguminosarum*. Na światowym rynku dostępne są bionawozy, w których skład wchodzi nie tylko wyselekcjonowane doświadczalnie szczepy bakterii z rodzaju *Rhizobium*, ale również innowacyjne i efektywnie działające preparaty mikrobiologiczne zawierające konsorcja bakteryjne. Jak donoszą dane z literatury, stosowanie *Rhizobium* spp. wraz z innymi drobnoustrojami jest wysoce skuteczne i preferowane zarówno wśród naukowców, jak i rolników. Figueiredo i wsp. [53] podali, że zastosowanie konsorcjum zawierającego szczepy *Rhizobium* spp. i inne bakterie PGPR w uprawie fasoli zwykłej zwiększyło liczbę brodawek korzeniowych oraz zawartość azotu w roślinach w warunkach niedoboru wody. Koinokulacja szczepami bakterii z rodzaju *Bacillus* i *Rhizobium* przyczynia się do poprawy struktury korzeni i rozwoju brodawek korzeniowych w uprawie fasoli, grochu i soi [54].

Bionawozy oparte na bakteriach symbiotycznych roślin bobowatych są stale opracowywane, testowane, zalecane i dopuszczane do obrotu w wielu krajach na świecie (tab. 2). Pomimo rosnącego zainteresowania tego rodzaju produktami, ich potencjał nie

został jeszcze w pełni wykorzystany, a stosowanie ich w praktyce rolniczej jest ciągle rzadkie, chociaż wykazuje tendencję wzrostową. Istnieje zatem potrzeba prowadzenie dalszych badań nad skutecznością biopreparatów rizobiowych, aby zwiększyć zainteresowanie ich potencjałem i praktycznym wykorzystaniem, a także przyczynić się do wprowadzania na rynek nowych produktów bezpiecznych dla człowieka i środowiska.

Tabela 2. Przykłady bionawozów rizobiowych dostępnych na światowym rynku

Kraj	Nazwa produktu	Mikroorganizmy	Roślina	Źródło
Argentyna	Rhizo Liq	<i>Bradyrhizobium</i> sp. <i>Mesorhizobium ciceri</i> <i>Rhizobium</i> spp.	ciecierzyca, soja, fasola zwyczajna, orzeszki ziemne	[55]
Kanada	Rhizocell GC Nodulator	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> , <i>Bradyrhizobium japonicum</i>	fasola, kukurydza, marchewka, ryż, bawełna	[56]
Afryka	Histick N-Soy MasterFix	<i>Bradyrhizobium japonicum</i> <i>Bradyrhizobium elkanii</i> , <i>Bradyrhizobium japonicum</i>	soja soja	[46, 57]
Stany Zjednoczone	Ammnite A 100 Legume Fix Chickpea Nodulator Cowpea Inoculant	<i>Azotobacter</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Rhizobium</i> , <i>Pseudomonas</i> <i>Rhizobium</i> sp., <i>Bradyrhizobium japonicum</i> <i>Mesorhizobium ciceri</i> <i>Rhizobium</i> spp.	ogórek, pomidor, pieprz fasola zwyczajna, soja ciecierzyca wspiega węzowata	[55, 56]
Polska	Rhizobium groch Novobakt Rhizo Bobik Atuva Groch&Łubin Turbosoy Verruca Pro Łubin	<i>Rhizobium</i> spp. <i>Rhizobium</i> spp. <i>Rhizobium</i> spp. <i>Bradyrhizobium japonicum</i> <i>Bradyrhizobium</i> spp.	groch, bobik, wyka groch, bobik, wyka groch, bobik, wyka, łubin soja łubin	[58]

5. Podsumowanie

Chemizacja rolnictwa, a także niewłaściwe metody uprawy gleby doprowadziły do degradacji środowiska glebowego, co przyczyniło się do ograniczenia wzrostu i rozwoju roślin. Priorytetem staje się poszukiwanie nowych rozwiązań mających na celu podniesienie wydajności upraw przy jednoczesnym zapewnieniu stabilności środowiska. Stosowanie biopreparatów mikrobiologicznych jest obecnie istotnym elementem zrównoważonej praktyki rolniczej, która minimalizuje negatywny wpływ na środowisko naturalne. Preparaty zawierające różnego rodzaju mikroorganizmy wykorzystują naturalne procesy biologiczne, aby wspierać zdrowie gleby i roślin, co przyczynia się do długotrwałego utrzymania płodności gleby i ekosystemów rolniczych. Wśród wielu dostępnych na rynku biopreparatów dużą grupę stanowią produkty zawierające w swoim składzie symbiotyczne bakterie brodawkowe posiadające zdolność do asymilacji azotu atmosferycznego. Dzięki temu przekształcają azot z powietrza w formy, które mogą być wykorzystane przez rośliny. Ponadto preparaty mikrobiologiczne na bazie bakterii rizobiowych zapewniają szeroki zakres korzyści – od stymulacji wzrostu roślin, po ich ochronę przed czynnikami stresowymi. Stosowanie tego typu biopreparatów nie niesie za sobą ryzyka przenawożenia i zaburzenia bioróżnorodności środowiska glebowego, a jednocześnie pozwala zmniejszyć zużycie nawozów mineralnych. Stosowanie biopreparatów zawie-

rających symbiotyczne bakterie brodawkowe przynosi w rolnictwie wiele korzyści zarówno środowiskowych, zdrowotnych, jak i ekonomicznych. Do ich niewątpliwych zalet należy zaliczyć fakt, że zawierają właściwe szczepy bakterii z rodzaju *Rhizobium* o wysokiej wydajności, które wykazują specyficzność gospodarza i tworzą związki symbiotyczne z odpowiednimi rodzajami bobowatych. Ze względu na wciąż rosnącą liczbę odkrywanych nowych gatunków mikroorganizmów o cechach promujących wzrost, rozwój roślin i możliwość współdziałania z różnymi gatunków *Rhizobium* spp. konieczne są dalsze badania w celu tworzenia możliwie optymalnych i wysoce skutecznych biopreparatów, które zostaną rzetelnie przebadane przez jednostki naukowe, a następnie wprowadzone na rynek.

Uwagi ogólne

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

Literatura

1. Havryliuk L., Kichihina O., Turovnik Y., *Biopreparations as an agro-ecological factor enhancement of biosafety in agro-cenoses*, *Balanced Nature Using*, 4, 2022, s. 105-111.
2. Nazranov K.M., Didanova E.N., Khalishkhova L.Z., *Formation and development of the biopreparations market*, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 699(1), 2021, s. 1-8.
3. Rowińska P., Gutarowska B., Janas R., Szulc J., *Biopreparations for the decomposition of crop residues*, *Microbial Biotechnology*, 17, 2024, s. 1-18.
4. Grzyb A., Wolna- Maruwka A., Niewiadomska A., *Environmental factors affecting the mineralization of crop residues*, *Agronomy*, 10(12), 2020, s. 1-18.
5. Fenibo E.O., Ijoma G.N., Nurmahomed W., Matambo, T., *The potential and green chemistry attributes of biopesticides for sustainable agriculture*, *Sustainability*, 14(21), 2022, s. 1-24.
6. Narwade J.D., Odaneth A.A., Lele S.S., *Solid-state fermentation in an earthen vessel: Trichoderma viride sporebased biopesticide production using corn cobs*, *Fungal Biology*, 127(7-8), 2023, s. 1146-1156.
7. Marwal A., Srivastava A.K., Gaur, R.K., Plant viruses as biopesticides, [w:] Singh H.B., Vaishnav A. (red.), *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering*, Elsevier, Amsterdam 2022, s. 181-194.
8. Parajuli S., Shrestha J., Subedi S., Pandey, M., *Biopesticides: a sustainable approach for pest management*, *SAARC Journal of Agriculture*, 20(1), 2022, s. 1-13.
9. Pylak M., Oszust K., Frąc, M., *Searching for new beneficial bacterial isolates of wild raspberries for biocontrol of phytopathogens-antagonistic properties and functional characterization*, *International Journal of Molecular Sciences*, 21(24), 2020, s. 1-32.
10. Kumar S., Diksha M., Sindhu S.S., Kumar, R., *Biofertilizers: an ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability*, *Current Research in Microbial Sciences*, 3, 2022, s. 1-26.
11. Singh S.P., Sharma B., *Role of crop residues in improving soil fertility and succeeding crops*, *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(3), 2020, s. 258-264.
12. Kosicka D., Wolna-Maruwka A., Trzeciak M., *Wpływ preparatów mikrobiologicznych na glebę oraz wzrost i rozwój roślin*, *Kosmos*, 64(2), 2015, s. 327-335.
13. Ladan W.H., Lawan S.A., Hayatu M., Babura S.R., *Role of plant growth promoting rhizobia strains in agriculture for sustainable crop yield (A Review)*, *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, 13(1), 2022, s. 326-335.

14. Basu A., Prasad P., Das S.N., Kalam S., Sayyed R.Z., Reddy M.S., El Enshasy H., *Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: Recent developments, constraints, and prospects*, Sustainability, 13, 2021, s. 1-20.
15. Ikiz B., Dasgan H.Y., Gruda N.S., *Utilizing the power of plant growth promoting rhizobacteria on reducing mineral fertilizer, improved yield, and nutritional quality of Batavia lettuce in a floating culture*, Scientific Reports, 14, 2024, s. 1-12.
16. Iqbal S., Passricha N., Saifi S.K., Sikka V.K., Tuteja N., *Multilegume biofertilizer: A dream*, [w:] Sharma V., Salwan R., Khalil I., Tawfeeq Al-Ani (red.), *Molecular Aspects of Plant Beneficial Microbes in Agriculture*, Chapter 3, Academic Press, London, UK, 2020, s. 35-45.
17. Koziel M., *Charakterystyka i znaczenie mikroorganizmów stosowanych w produktach mikrobiologicznych – bakterie z rodzaju Rhizobium*, [w:] Gałazka A., Podleśny J. (red.), *Preparaty mikrobiologiczne w rolnictwie i ochronie środowiska*, Monografie i rozprawy naukowe 66, Wydawnictwo IUNG-PIB, Puławy 2024, s. 62-73.
18. De Lajudie P.M., Andrews M., Ardley J., Eardly B., Jumas-Bilak E., Kuzmanović N., Lassalle F., Lindström K., Mhamdi R., Martínez-Romero E., Moulin L., Mousavi S.A., Nesme X., Peix A., Puławska J., Steenkamp E., Stępkowski T., Tian Ch-F., Vinuesa P., Wei G., Willems A., Zilli J., Young P., *Minimal standards for the description of new genera and species of rhizobia and agrobacteria*, International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 69, 2019, s. 1852-1863.
19. Zakhia F., de Lajudie P., *Taxonomy of rhizobia*, Agronomie, 21, 2001, s. 569-576.
20. Estrada-de Los Santos P., Palmer M., Chavez-Ramírez B., Beukes C., Steenkamp E.T., Briscoe L., Khan N., Maluk M., Lafos M., Humm E., Arrabit M., Crook M., Gross E., Simon M.F., Dos Reis Junior F.B., Whitman W.B., Shapiro N., Poole P.S., Hirsch A.M., Venter S.N., Ames E.K., *Whole genome analyses suggests that Burkholderia sensu lato contains two additional novel genera (Mycetohabitans gen. nov., and Trinickia gen. nov.): implications for the evolution of diazotrophy and nodulation in the Burkholderiaceae*, Genes, 9, 2018, s. 389-412.
21. Andrews M., Andrews M.E., *Specificity in legume-rhizobia symbioses*, International Journal of Molecular Sciences, 18, 2017, s. 705-744.
22. Berrada H., Fikri-Benbrahim K., *Taxonomy of the Rhizobia: Current Perspectives*, British Microbiology Research Journal, 4(6), 2014, s. 616-639.
23. Saidi S., Chebil S., Gtari M., Mhamdi R., *Characterization of root-nodule bacteria isolated from Vicia faba and selection of plant growth-promoting traits*, World Journal of Microbiology and Biotechnology, 29, 2013, s. 1099-1106.
24. Martinez-Hidalgo P., Hirsch A.M., *The nodule microbiome: N₂-fixing rhizobia do not live alone*, Phytobiomes Journal, 1, 2017, s. 70-82.
25. Gopalakrishnan S., Srinivas V., Vemula A., Samineni S., Rathore A., *Influence of diazotrophic bacteria on nodulation, nitrogen fixation, growth promotion and yield traits in five cultivars of chickpea*, Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 15, 2018, s. 35-42.
26. Gopalakrishnan S., Srinivas V., Prakash B., Sathya A., Vijayabharathi R., *Plantgrowth-promoting traits of Pseudomonas geniculata isolated from chickpea nodules*, 3 Biotech, 5, 2015, s. 653-661.
27. Coba de la Pena T., Fedorova E., Pueyo J.J., Lucas M.M., *The symbiosome: Legume and rhizobia co-evolution toward a nitrogen-fixing organelle?*, Frontiers in Plant Science, 8, 2018, s. 1-26.
28. Schwember A.R., Schulze J., del Pozo A., Cabeza R.A., *Regulation of Symbiotic Nitrogen Fixation in Legume Root Nodules*, Plants, 8, 2019, s. 1-18.
29. Martyniuk S., *Znaczenie procesu biologicznego wiązania azotu w rolnictwie ekologicznym*, Journal of Research and Application in Agricultural Engineering, 53(4), 2008, s. 9-14.

30. Martyniuk S., *Naukowe i praktyczne aspekty symbiozy roślin strączkowych z bakteriami brodawkowymi*, Polish Journal of Agronomy, 9, 2012, s. 17-22.
31. Beovides-García Y., Pérez-Peñaranda M.C., González-Marrero I., Rayas-Cabrera A., Basail-Pérez M., Santos-Pino A., Medero-Vega V.R., Alarcón Mok M.J., *Effects of a New Rhizobium-Based Biofertilizer (Fertiriz) on Growth and the Yield of Cowpea (Vigna unguiculata (L.) Walp)*, Environmental Analysis and Ecology Studies, 12(1), 2024, s. 1376-1385.
32. Paśmionka I., *Mikrobiologiczne przemiany azotu glebowego*, Kosmos, 66(2), 2018, s. 185-192.
33. Podleśna A., *Proces wiązania N₂ przez rośliny bobowate jako źródło azotu dla roślin uprawnych*, Studia i Raporty IUNG-PIB, 56(10), 2018, s. 71-85.
34. Martyniuk S., *Biologiczne wiązanie N₂, bakterie symbiotyczne roślin bobowatych w glebach Polski i oszacowywanie ich liczebności*, Polish Journal of Agronomy, 38, 2019, s. 52-65.
35. Martyniuk S., Oroń J., *Bioróżnorodność mikrobiologiczna gleb na przykładzie bakterii wiążących azot atmosferyczny – oddziaływanie wybranych zabiegów agrotechnicznych*, Fragmenta Agronomica, 4(96), 2007, s. 18-23.
36. Fahde S., Boughribil S., Sijilmassi B., Armi A., *Rhizobia: A promising source of plant growth-promoting molecules and their non-legume interactions: examining applications and mechanisms*, Agriculture, 13, 2023, s. 1-21.
37. Vejan P., Abdullah R., Khadiran T., Ismail S., Nasrullah Boyce A., *Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Agricultural Sustainability-A Review*, Molecules, 21(5), 2016, s. 1-17.
38. Jan B., Sajad S., Reshi Z.A., Mohiddin F.A., *Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): Eco-Friendly Approach for Sustainable Agriculture*, [w:] Pirzadah T.B., Malik B., Hakeem K.R. (red.), *Plant-Microbe Dynamics: Recent Advances for Sustainable Agriculture*, 1st ed, CRC Press: Boca Raton, FL, USA 2021, s. 185-200.
39. Mitter E.K., Tosi M., Obregón D., Dunfield K.E., Germida J.J., *Rethinking Crop Nutrition in Times of Modern Microbiology: Innovative Biofertilizer Technologies*, Frontiers in Sustainable Food Systems, 5, 2021, s. 1-23.
40. Riaz U., Murtaza G., Anum W., Samreen T., Sarfraz M., Nazir M.Z., *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Biofertilizers and Biopesticides*, [w:] Hakeem K.R., Dar G.H., Mehmood M.A., Bhat R.A. (red.), *Microbiota and Biofertilizers*, Springer International Publishing, Cham, Germany, 2021, s. 181-196.
41. Hassen A. I., Bopape F. L., Sanger, L. K., *Microbial inoculants as agents of growth promotion and abiotic stress tolerance in plants*, Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity, 3, 2016, s. 23-36.
42. Chianu J. N., Nkonya E. M., Mairura F., Chianu J. N., Akinnifesi F., *Biological nitrogen fixation and socioeconomic factors for legume production in sub-Saharan Africa: A review*, Agronomy for Sustainable Development, 31(1), 2010, s. 139-154.
43. Patten C. L., Glick B. R., *Role of Pseudomonas putida Indoleacetic Acid in Development of the Host Plant Root System*, Applied and Environmental Microbiology, 68, 2002, s. 3795-3801.
44. Li J., Ovakim D. H., Charles T. C., Glick B. R., *An ACC deaminase minus mutant of Enterobacter cloacae UW4 no longer promotes root elongation*, Current Microbiology, 41, 2000, s. 101-105.
45. Kalitkiewicz A., Kępińska E., *Wykorzystanie ryzobakterii do stymulacji wzrostu roślin*, Biotechnologia, 2, 2008, s. 102-114.
46. Savala C.E.N., Wiredu A.N., Chikoye D., Kyei-Boahen S., *Prospects and Potential of Bradyrhizobium diazoefficiens Based Bio-Inoculants on Soybean Production in Different Agro-Ecologies of Mozambique*, Frontiers in Sustainable Food Systems, 2022, 6, s. 1-16.

47. Ismail S., Dhamak A.L., Mohanty S.R., *Technical Bulletin – Rhizobium Biofertilizer Technology for Legumes of Maharashtra*, AINP SBB Technical Bulletin VNMKV: Parbhani, India, 2021.
48. Dashadi M., Khosravi H., Moezzi A., Nadian H., Heidari M., Radjabi R., *Co-Inoculation of Rhizobium and Azotobacter on Growth of Faba bean*, American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental, 11(3), 2011, s. 314-319.
49. Gan Y., Warkentin T., Bing D., Stevenson F., McDonald C., *Chickpea water use efficiency in relation to cropping system, cultivar, soil nitrogen and Rhizobial inoculation in semiarid environments*, Agricultural Water Management, 97, 2010, s. 1375-1381.
50. Hayat R., Ahmed I., Sheirdil R.A., *An Overview of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) for Sustainable Agriculture*, [w:] Ashraf M., Öztürk M., Ahmad M.S.A., Aksoy A. (red.), *In Crop Production for Agricultural Improvement*, Springer, Dordrecht, The Netherlands 2012, s. 557-579.
51. Chaintreuil C., Giraud E., Prin Y., Lorquin J., Bâ A., Gillis M., de Lajudie P., Dreyfus B., *Photosynthetic Bradyrhizobia Are Natural Endophytes of the African Wild Rice Oryza breviligulata*, Applied and Environmental Microbiology, 66, 2000, s. 5437-5447.
52. Hussain M.B., Mehboob I., Zahir Z.A., Naveed M., Asghar H.N., *Potential of Rhizobium spp. for improving growth and yield of rice (Oryza sativa L.)*, Soil and Environment, 15, 2009, s. 49-55.
53. Figueiredo M.V.B., Martinez C.R., Burity H.A., Chanway C.P., *Plant growth-promoting rhizobacteria for improving nodulation and nitrogen fixation in the common bean (Phaseolus vulgaris L.)*, World Journal of Microbiology and Biotechnology, 24, 2008, s. 1187-1193.
54. Bellabarba A., Fagorzi C., Diczenco G.C., Pini F., Viti C., Checcucci A., *Deciphering the Symbiotic Plant Microbiome: Translating the Most Recent Discoveries on Rhizobia for the Improvement of Agricultural Practices in Metal-Contaminated and High Saline Lands*, Agronomy, 9, 2019, s. 1-21.
55. Adeleke R.A., Raimi A.R., Roopnarain A., Mokubedi S.M., *Status and prospects of bacterial inoculants for sustainable Management of Agroecosystems*, [w:] Giri B., Prasad R., Wu Q. S., Varma A. (red.), *Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment*, Springer International Publishing, Cham 2019, s. 137-172.
56. Odoh C.K., Eze C.N., Akpi U.K., Unah V.U., *Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): a novel agent for sustainable food production*, American Journal of Agricultural and Biological Science, 14, 2019, s. 35-54.
57. Tairo E.V., Ndakidemi P.A., *Macronutrients uptake in soybean as affected by Bradyrhizobium japonicum inoculation and phosphorus (P) supplements*, American Journal of Plant Sciences, 5, 2014, s. 488-496.
58. Kobus A., Sach M., *Asortyment produktów mikrobiologicznych roślin jak grzyby po deszczu*. Farmer, 5, 2023, s. 95-97.

Taksonomia, charakterystyka i wpływ preparatów mikrobiologicznych na bazie bakterii symbiotycznych roślin bobowatych na wzrost i rozwój roślin

Streszczenie

W ostatnich dekadach obserwuje się wzrost produkcji rolnej napędzany globalnym przyrostem populacji, a co za tym idzie – rosnącym zapotrzebowaniem na żywność. Zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego jest bez wątpienia jednym z najważniejszych wyzwań współczesnego świata. Dostosowanie się do oczekiwań konsumentów poszukujących zdrowej i bezpiecznej żywności, rosnące koszty nawozów mineralnych oraz rozwój rolnictwa ekologicznego i zrównoważonego powodują, że na popularności zyskują biopreparaty. Są one skuteczną i ekonomicznie opłacalną alternatywą dla nawozów mineralnych, ponieważ nie zawierają szkodliwych związków chemicznych i nie powodują negatywnych skutków dla środowiska. Celem używania preparatów mikrobiologicznych jest ochrona roślin przed patogenami oraz korzystne wpłynięcie na ich wzrost i rozwój. Na rynku dostępnych jest wiele biopreparatów, które mogą być aplikowane zarówno doglebowo,