



Ministerstwo Rolnictwa
i Rozwoju Wsi



Zakład Mikrobiologii i Ryzosfery

Bionawozy dla rozwoju agroekologicznych metod nawożenia roślin

Autorzy:

Prof. dr hab. Lidia Sas-Paszt, Dr inż. Krzysztof Górnik, Dr Michał Oskiera, Dr Sławomir Głuszek,
Mgr Michał Przybył, Dr Edyta Derkowska, Dr Anna Lisek, Dr Paweł Trzciniński, Dr Beata Sumorok,
Mgr Mateusz Frąc, Mgr Krzysztof Weszczak

Wykonano w ramach dotacji celowej MRiRW, **zadanie nr 10.2** „Wsparcie działań w obszarze badań i innowacji w rolnictwie na forum międzynarodowym”.

Skierniewice 2025

Raport: Bionawozy dla rozwoju agroekologicznych metod nawożenia roślin

W Polsce i w innych krajach dynamicznie wzrasta produkcja i stosowanie bionawozów. Intensywny rozwój rolnictwa wiąże się ze znacznym zużyciem chemicznych środków produkcji, przyczyniających się do zachwiania równowagi w środowisku naturalnym. Obserwowane w ostatnich latach w Polsce zubożenie gleb uprawnych w substancję organiczną stanowi poważny problem w produkcji roślin ogrodnich. Spadek żyzności gleb i gorsze zaopatrzenie roślin w składniki mineralne, ich erozja i degradacja ograniczają produktywność roślin. Nie zmienia to jednak faktu, że konsumenci oczekują zdrowej i bezpiecznej żywności, wolnej od pozostałości chemicznych środków produkcji. Z tego powodu konieczne jest poszukiwanie bionawozów i stymulatorów wzrostu, zawierających pożyteczne mikroorganizmy, mikroelementy i organiczne nośniki, które zmniejszą zużycie syntetycznych agrochemikaliów w produkcji roślinnej i ograniczą ich emisję do środowiska naturalnego. Zwiększenie zawartości materii organicznej w glebie oraz przywrócenie dominacji pożytecznych mikroorganizmów w glebie powoduje zwiększenie stabilności mechanicznej gleby i poprawia jej zdolności sorpcyjne oraz pobieranie składników odżywczych przez rośliny, a także łagodzi skutki anomalii pogodowych, tj. niskich lub wysokich temperatur czy wymywania składników pokarmowych na skutek ulewnych deszczy. Aktywność pożytecznych mikroorganizmów w ryzosferze jest nie tylko jednym z czynników warunkujących prawidłowy wzrost roślin, ale także ważnym potencjalnym źródłem ich odporności na choroby infekcyjne. Zubożenie gleb rolniczych i ogrodnich oraz choroby replantacji stwarzają potrzebę wykorzystania bioproduktów wzbogaconych mikrobiologicznie w celu zwiększenia bioróżnorodności i antagonistycznego oddziaływania na mikroorganizmy szkodliwe. W celu ograniczenia zużycia nawozów chemicznych poszukuje się rozwiązań mających na celu poprawę aktywności mikrobiologicznej gleby i wzrost efektywności wykorzystania składników pokarmowych z zasobów glebowych oraz z zastosowanych bionawozów. Istotnym elementem takich rozwiązań jest inokulacja nasion pożytecznymi mikroorganizmami, która pozwala kształtować mikrobiom rośliny już od fazy kiełkowania. Nasiona stanowią naturalny wektor wprowadzania konsorcjów mikroorganizmów do ryzosfery, co przekłada się na lepsze ukorzenienie, bardziej efektywne wykorzystanie składników pokarmowych oraz zwiększoną odporność siewek na stresy abiotyczne i biotyczne. Włączenie technologii inokulacji nasion do programów nawożenia bionawozami wzmacnia ich efekt biostymulujący i stabilizuje funkcjonowanie agroekosystemu.

Bionawozy to preparaty na bazie surowców pochodzenia organicznego, zawierające: aminokwasy, cukry, witaminy, fitohormony, enzymy oraz makro- i mikro-elementy, a często także mikroorganizmy i/lub ich metabolity korzystnie wpływające na wzrost i plonowanie roślin. W Polsce i w innych krajach dynamicznie wzrasta zainteresowanie nawozami wzbogaconymi pożytecznymi mikroorganizmami. W Instytucie Ogrodnictwa – PIB powstał pierwszy w Polsce SYMBIO BANK - bank symbiotycznych mikroorganizmów: grzybów mykoryzowych i strzępkowych, drożdży oraz pożytecznych bakterii glebowych, wyizolowanych z ryzosfery roślin, rosnących w różnych warunkach glebowo-klimatycznych naszego kraju. SYMBIO-BANK to także źródło, z którego zakłady produkujące bionawozy pozyskują pożyteczne mikroorganizmy, rozmnażają je i inkorporują do biostymulatorów, polepszaczy glebowych i podłoży organicznych. Skuteczność innowacyjnych bionawozów od

wielu lat sprawdzana jest w IO-PIB w Skierniewicach na roślinach ogrodniczych. Uzyskane wyniki zachęcają do stosowania bionawozów w praktyce ponieważ pod ich wpływem wzrasta zawartość dostępnych form składników mineralnych w glebie o ok. 30%. Dzięki temu w uprawach roślin można stosować mniejsze dawki nawozów mineralnych i środków ochrony roślin, a uzyskiwane plony są większe i jakościowo lepsze. Odpowiedni skład bionawozów wzbogaconych o pożyteczne mikroorganizmy sprawia, że ich stosowanie wpływa na zwiększenie pH gleby, dostępności w ryzosferze i przyswajania przez rośliny jonów składników mineralnych. Pod wpływem aplikacji bionawozów następuje poprawa bio-fizyko-chemicznych właściwości gleby, m.in. zwiększenie populacji pożytecznych grup mikroorganizmów oraz poprawa stosunków powietrzno-wodnych. Stosowanie bionawozów w uprawie roślin ogrodniczych przyczynia się do ochrony bioróżnorodności środowiska glebowego. Bionawozy i biopreparaty zawierające pożyteczne mikroorganizmy glebowe mogą być stosowane do ograniczenia występowania patogenów glebowych. Mikroorganizmy mogą także wytwarzać biologicznie aktywne związki (witaminy, regulatory wzrostu, antybiotyki, siderofory, substancje odżywcze dla roślin), poprawiające jakość gleb uprawnych oraz wzrost i plonowanie roślin. Innowacyjność bionawozów opiera się w dużym stopniu na pozyskaniu ze środowiska glebowego pożytecznych mikroorganizmów, wchodzących w skład inokulów mikrobiologicznych. Zaletą bionawozów jest brak fitotoksyczności dla roślin, bezpieczeństwo dla środowiska, poprawa jakości plonów i ich walorów prozdrowotnych oraz odporności roślin na stresy biotyczne i abiotyczne. Zastosowanie w praktyce symbiotycznych mikroorganizmów mających największy wpływ na dostępność i pobieranie składników odżywczych oraz na wzrost odporności roślin na stresy biotyczne i abiotyczne przyczyni się do rozwoju ekologicznych i zrównoważonych metod uprawy roślin ogrodniczych i rolniczych. Stosowanie bionawozów korzystnie wpływa na poprawę jakości gleb uprawnych i zdegradowanych, zwiększenie materii organicznej w glebie oraz wielkości populacji, bioróżnorodności i przeżywalności bakterii ryzosferowych i grzybów mykoryzowych oraz wielkości i jakości plonowania roślin uprawnych. Bionawozy działają najskuteczniej, jeśli są aplikowane podczas sadzenia roślin i na początku uprawy. Stymulują one wzrost i rozwój systemu korzeniowego, który jest zdrowy, silny, o kilkakrotnie większej objętości niż w uprawach konwencjonalnych. Udowodniono, że rośliny ogrodnicze (m.in. jabłoń, truskawka, pomidor, ogórek, pelargonja, tuja) traktowane bionawozami w większym stopniu przyswajają składniki mineralne i wodę oraz lepiej rosną i plonują. W badaniach prowadzonych w Zakładzie Mikrobiologii i Ryzosfery szczególną uwagę zwraca się na łączenie bionawozów z inokulacją nasion oraz na ocenę reakcji roślin m.in. poprzez pomiar fluorescencji chlorofilu. Analiza wydajności fotosyntetycznej pozwala wcześniej wykrywać stres oraz obiektywnie oceniać skuteczność zastosowanych biopreparatów w warunkach polowych i szklarniowych, zanim różnice w kondycji roślin staną się widoczne gołym okiem. Konsorcja pożytecznych mikroorganizmów są jednym z najnowszych rozwiązań mających na celu zwiększenie jakości, bezpieczeństwa i efektywności produkcji roślinnej, zarówno ogrodniczej jak i rolniczej. Wysoką efektywność działania uzyskuje się po ich połączeniu z innymi synergistycznymi mikroorganizmami, a także z materią organiczną, kwasami humusowymi, biowęglem, biostymulatorami i nawozami naturalnymi. Z powodu korzystnych oddziaływań pożytecznych mikroorganizmów na wzrost i plonowanie roślin są one komponentami preparatów biologicznych, w tym biostymulatorów, bionawozów i środków ochrony roślin. Zwiększenie efektywności pobierania i przyswajania składników

odżywczych z biopreparatów przyczynia się do ograniczenia stosowania nawozów mineralnych i innych chemicznych środków produkcji roślin. W uprawach ogrodniczych zaleca się stosowanie stałych bionawozów w dawkach 400-700 kg/ha, a płynnych w dawkach 10-20 l/ha. W zależności od rodzaju zastosowanego bionawozu, aplikacja i dawka w warunkach polowych powinna być dostosowana do rośliny uprawnej. Pożyteczne mikroorganizmy to sprzymierzeńcy rolnika, których rola jest coraz bardziej doceniana. Mikroorganizmy glebowe (bakterie, grzyby i drożdże) stymulują wzrost i plonowanie roślin uprawnych, poprawiają jakość produkowanych plonów o walory prozdrowotne, chronią rośliny przed patogenami i wspierają bioróżnorodność systemów uprawy roślin. Pomagają w rozkładzie materii organicznej, zwiększają pobieranie składników pokarmowych i chronią rośliny przed chorobami. Mikroorganizmy występujące w glebie można podzielić na dwie grupy: **mikroorganizmy autochtoniczne**, tzn. naturalnie występujące i typowe dla gleb uprawnych i nie użytkowanych rolniczo oraz **mikroorganizmy allochtoniczne** rozwijające się po wprowadzeniu do gleby materii organicznej: obornik, komposty roślinne, ściółki organiczne, odchody zwierząt, ścieki bytowo-gospodarcze i inne. Bogata różnorodność mikrobiologiczna gleb, a szczególnie obecność pożytecznych mikroorganizmów odgrywa także kluczową rolę w łagodzeniu zmian klimatu, magazynowaniu i oczyszczaniu wody, ograniczaniu erozji gleb, dostarczaniu substancji biologicznie czynnych, np. o działaniu stymulującym wzrost i plonowanie roślin oraz biobójczym dla mikroorganizmów szkodliwych, w tym patogenów roślin.

Arbuskularne grzyby mykoryzowe (AGM) są ważnymi symbiontami korzeni roślin i biologicznymi komponentami ryzosfery roślin. Grzybnia mikoryzowa zwiększa efektywną powierzchnię chłonną korzeni i poprawia dostępność składników mineralnych dla roślin. Arbuskularne grzyby mikoryzowe występują powszechnie w korzeniach większości gatunków roślin na ziemi. Grzyby mikoryzowe mają korzystny wpływ na właściwości adaptacyjne oraz na wzrost i plonowanie roślin uprawnych. Grzyby te zwiększają efektywność pobierania z gleby składników mineralnych (głównie P, N, K, Zn, Mn, Cu, Mn), a także chronią korzenie roślin uprawnych przed patogenami i szkodnikami, dzięki czemu mają również korzystny wpływ na wzrost i plonowanie roślin oraz kiełkowanie nasion, zwłaszcza w warunkach stresu suszy. Ponadto, wydzielana przez grzyby AGM substancja białkowa – glomalina, ma zdolność długotrwałego stabilizowania aglomeratów glebowych, co znacząco poprawia strukturę gruzełkową gleby. **Bakterie ryzosferowe PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria)** wspomagają wzrost i rozwój roślin, poprawiają ich stan zdrowotny oraz indukują odporność roślin na choroby i szkodniki. Pożyteczne mikroorganizmy zasiedlające korzenie utrudniają kolonizację korzeni przez organizmy patogeniczne, inne zaś stanowią konkurencję pokarmową lub wydzielają do gleby antybiotyki i inne substancje hamujące rozwój patogenów glebowych. Grzyby mikroskopowe zasiedlające ryzosferę, aktywnie ograniczają liczebność niektórych patogenów w glebie (zjawisko nadpasożytnictwa), gdyż poprzez konkurencję o zasoby pokarmowe utrudniają rozwój patogenicznych gatunków grzybów. Bardzo korzystny wpływ na wzrost i plonowanie roślin mają grzyby z rodzaju *Trichoderma*. Stanowią one konkurencję dla patogenów glebowych o składniki pokarmowe dostępne w glebie, niektóre z nich wydzielają do gleby substancje o działaniu grzybobójczym lub wykazują mikopasożytnictwo. Wykazano, że inokulacja korzeni truskawki grzybami *Trichoderma* ogranicza infekcję przez grzyby patogeniczne i wpływa na zwiększenie plonowania roślin. W 15-centymetrowej

warstwie gleby, na powierzchni jednego hektara, znajduje się 1,5-7 t biomasy mikroorganizmów – bakterii, grzybów, glonów, sinic, pierwotniaków, które odpowiadają w 90% za przebieg bio-fizyko-chemicznych procesów zachodzących w glebie. Najwięcej mikroorganizmów znajduje się w profilu 10 cm od powierzchni oraz w ryzosferze (wokół korzeni roślin). Najczęściej występującymi grzybami są gatunki z rodzajów: *Aspergillus*, *Mucor*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Acremonium*, *Candida*, *Rhizopus*, *Chrysosporium*. Spośród bakterii powszechnie występują *Azotobacter*, *Xanthomonas*, *Agrobacterium*, *Sarcina*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Arthrobacter*, *Corynebacterium*, *Brevibacterium*, *Serratia*, promieniowce z rodzajów *Actinomyces*, *Nocardia*, *Streptomyces*. Udział mikroorganizmów w kształtowaniu i poprawie struktury gleby polega głównie na wytwarzaniu metabolitów i śluzów. Metabolity bakteryjne o charakterze śluzu, strzępki grzybów mikoryzowych i związki humusowe spajają niewielkie gruzełki gleby w większe agregaty, które stwarzają lepsze warunki fizyczne do rozwoju bakterii tlenowych i korzeni roślin, stabilizują glebę, przeciwdziałają erozji, zwiększają przewietrzenie gleby i jej drenaż, zatrzymują wodę i zabezpieczają glebę przed wysychaniem, zwiększają zawartość związków organicznych i mineralnych, polepszają żyzność gleby. Mikroorganizmy wydzielają do gleby bardzo dużo różnych enzymów, które są coraz częściej określane jako biologiczne wskaźniki żyzności i urodzajności gleb.

Pożyteczne mikroorganizmy poprawiają żyzność gleby

Dzięki mikroorganizmom i mezofaunie glebowej gleba „żyje” i utrzymuje lepszą strukturę, co korzystnie wpływa na plony. Do najważniejszych funkcji pożytecznych mikroorganizmów kolonizujących glebę należą: rozkład i mineralizacja substancji organicznej, uwalnianie składników mineralnych z trudno dostępnych form, udział w obiegu pierwiastków w przyrodzie, formowanie próchnicy w glebie, stymulacja wzrostu i ochrona roślin przed agrofagami oraz detoksykacja i bioremediacja gleb skażonych metalami ciężkimi, związkami ropopochodnymi i innymi zanieczyszczeniami. W przypadku trwałych toksycznych zanieczyszczeń dużą aktywność wykazują grzyby mykoryzowe, które neutralizują zanieczyszczenia pochodzące głównie z środków ochrony roślin i nawozów mineralnych. Podobną do nich rolę spełniają niektóre pożyteczne bakterie z rodzaju *Pseudomonas*, które rozkładają w glebie toksyczne związki ropopochodne. Stosowanie obornika i bionawozów wzbogacanych mikrobiologicznie zwiększa zawartość próchnicy w glebie i bioróżnorodność mikrobiologiczną gleb uprawnych. Próchnica zwiększa także magazynowanie składników pokarmowych dla roślin o 4 do 12 razy, w porównaniu do gleby, gdy jej brak lub występuje w niewielkiej ilości.

Pożyteczne mikroorganizmy wpływają na ochronę roślin przed chorobami

Niektóre mikroorganizmy konkurują z patogenami o przestrzeń i składniki, inne wydzielają substancje antybakteryjne lub stymulują naturalną odporność roślin. To naturalny sposób na ograniczenie chemicznych pestycydów. Coraz większe zainteresowanie wzbudzają produkty, których czynnikiem aktywnym są mikroorganizmy. Są to głównie bakterie z rodzaju *Bacillus*, *Lactobacillus*, *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Streptomyces*, *Cellulomonas* oraz grzyby z rodzaju *Trichoderma*. Preparaty zawierające mikroorganizmy wchodziły w skład produktów dostępnych

na rynku pod nazwą: nawozowe produkty mikrobiologiczne, bionawozy, biostymulatory lub biologiczne środki ochrony roślin. Biologiczne środki ochrony roślin zawierają w swoim składzie mikroorganizmy antagonistyczne lub pasożytnicze w stosunku do patogenów i szkodników roślin. Mikroorganizmy te dysponują pewnymi mechanizmami, które umożliwiają bezpośrednie i/lub pośrednie zwalczanie patogenów, a także stymulowanie wzrostu roślin. Mają one zdolność oddziaływania antagonistycznego na inne mikroorganizmy oraz indukowania systemicznej odporności roślin na choroby. Antagonizm obejmuje trzy rodzaje interakcji między organizmami: antybiozę, współzawodnictwo o pokarm i miejsce oraz pasożytnictwo. **Antybioza** polega na hamowaniu wzrostu jednych drobnoustrojów przez inne, występujące w tym samym środowisku, na skutek wydzielania przez nie szkodliwych substancji chemicznych (antybiotyków i innych metabolitów). Na przykład, antagonistyczne grzyby *Trichoderma* syntetyzują antybiotyki peptydowe, które charakteryzują się silną aktywnością w stosunku do wielu bakterii. Bakterie *Pseudomonas* spp. syntetyzują antybiotyki takie jak: pyroluterina, pyrrolitryna, jak również cykliczne lipopeptydy. Promieniowce natomiast produkują np. erytromycynę, neomycynę, tetracyklinę, streptomycynę. Antybiotyki te zakłócają formowanie ściany komórkowej. Wiele mikroorganizmów wykazuje aktywność zwaną pasożytnictwem, wyrażającą się wydzielaniem enzymów hydrolitycznych rozkładających ścianę komórkową patogenów, która np. u patogenicznych grzybów zbudowana jest z chityny. Indukowana systemiczna odporność jest współdziałaniem między rośliną, a mikroorganizmem, które prowadzi do stymulacji reakcji obronnych rośliny, skutkujących ograniczeniem wzrostu i rozwoju patogena, a nawet jego eliminacją. Po zadziałaniu induktora następuje seria reakcji biochemicznych wywołujących różnorodne mechanizmy ochronne w roślinie. Induktorami odporności systemicznej mogą być białka o cechach enzymów, oligosacharydy lub inne niskocząsteczkowe związki. W odpowiedzi w roślinie następują zmiany, w wyniku których dalsze rozprzestrzenianie się patogena jest niemożliwe lub znacznie utrudnione.

Rola mikroorganizmów w obiegu pierwiastków

Bakterie wiążące azot atmosferyczny

Jest to jeden z najskuteczniejszych sposobów zaopatrywania roślin w ten pierwiastek; szacunkowo, w ciągu roku rośliny przyswajają około $2,5 \times 10^{11}$ kg NH_3 . Biologicznie związany azot jest mniej podatny na wymywanie, sublimację i denitryfikację. Dlatego wiązanie azotu jest uważane za bardzo ważny proces biologiczny stanowiący element zrównoważonego rolnictwa. Najbardziej znanym przykładem bionawozów na bazie mikroorganizmów wiążących azot są modyfikatory roślin bobowatych zawierające w swoim składzie bakterie z rodzaju *Rhizobium* wiążące azot atmosferyczny w brodawkach wytwarzanych na korzeniach roślin bobowatych. Pomimo swojej różnorodności taksonomicznej, wszystkie bakterie z rodzaju *Rhizobium* nawiązują symbiotyczne interakcje z roślinami żywicielskimi poprzez wysoce wyspecjalizowane mechanizmy, które są dość dobrze zbadane. Obecnie rośliny bobowate uprawiane są na całym świecie na powierzchni ponad 250 milionów hektarów i wiążą one około 90 milionów ton azotu atmosferycznego rocznie. W latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych ub. wieku wiele preparatów z opartych na bakteriach *Rhizobium* było nieskutecznych, ale standardy jakościowe i skuteczność tego typu produktów, w ciągu ostatniej dekady, znacznie się poprawiła. Dzięki udoskonaleniu metod formułowania, zwiększyła się

stabilność biologiczna tego typu preparatów. Na przykład w Brazylii dzięki biologicznemu wiązaniu azotu tylko na roślinach bobowatych, oszczędza się około 7 miliardów dolarów rocznie. Oprócz bakterii z rodzaju *Rhizobium* istnieje wiele gatunków asocjacyjnych i wolno żyjących również wiążących azot, które są skuteczne dla innych ważnych upraw roślin. Inokulanty zawierające bakterie z rodzaju *Azospirillum* zostały przetestowane na polach w Argentynie i wykazały pozytywne wyniki w zwiększaniu produktywności różnych gatunków roślin. W Brazylii preparaty oparte na *Azospirillum brasilense* wykazały wysoką skuteczność w uprawach kukurydzy i pszenicy. Ukraina może również pochwalić się dobrymi wynikami w stosowaniu swoich modyfikatorów do zbóż i upraw przemysłowych. Poza dostarczaniem azotu, bakterie wiążące azot wykazują również inne korzystne dla roślin właściwości, takie jak stymulowanie wzrostu roślin, zwiększanie tolerancji na stresy abiotyczne oraz rekultywację gleb skażonych metalami ciężkimi. Poza glebowymi bakteriami wiążącymi azot w ostatnich latach wdrożono do praktyki rolniczej preparaty zawierające bakterie endofityczne wiążące azot. Przykładem jest produkt Blue-N w skład którego wchodzi bakterie *Methylobacterium symbioticum*, które w odróżnieniu od innych bakterii wiążących azot, zasiedlają część nadziemną roślin. Dzięki temu asymilacja azotu odbywa się poprzez liście. Pozwala to na stosowanie produktu w szerokiej gamie upraw, ponieważ bakterie dostarczają azot z powietrza, niezależnie od ilości azotu dostępnego w glebie przez cały cykl wegetacji. Ponadto trwają prace nad wdrożeniem produktów zawierających inne endosymbionty, takie jak *Herbaspirillum* czy *Gluconacetobacter*.

Mikroorganizmy mobilizujące fosfor

Po azocie fosfor jest drugim najważniejszym składnikiem pokarmowym dla roślin. Jednak zwykle jest najmniej mobilny i nawet w nawozach występuje w formie stosunkowo niedostępnej do pobrania przez rośliny. Dlatego rośliny zużywają tylko niewielką ilość fosforu z dostarczanych im nawozów. Ponadto, aż 70 – 90% wprowadzonego do gleby fosforu wiąże się z kationami metali i przechodzi w formy niedostępne dla roślin. Szacuje się, że globalna dostępność fosforytów w ciągu najbliższych kilkudziesięciu lat znacznie się zmniejszy. Warto podkreślić, że całkowita ilość fosforu w glebie jest dość wysoka (400-1200 mg/kg), ale z reguły występuje on w formie niedostępnej dla roślin, w postaci nierozpuszczalnych, nieorganicznych minerałów lub w postaci związków organicznych takich jak: fosforany inozytolu (fityniany glebowe), fosforano-monoetery i fosforano-trietery. W wymienionych związkach może być zawarte od 20 do 80 % tego pierwiastka. Mikroorganizmy glebowe, które uwalniają fosforany ze źródeł organicznych i nieorganicznych, mogą znacznie ograniczyć potrzebę stosowania nawozów fosforowych. Zwiększone plony dzięki zastosowaniu organizmów mobilizujących fosforany zaobserwowano w przypadku zastosowania bakterii z rodzaju *Bacillus* i grzybów z rodzaju *Penicillium*. W Kanadzie średni wzrost plonu pszenicy po zastosowaniu mobilizatorów fosforanów wyniósł ~ 6 %, a w niektórych regionach odnotowano wzrost plonów nawet o 66%, chociaż wielu rolników wskazywało na znacznie mniejszy przyrost plonów, bo wynoszący około 2 – 3 %. Niemniej wyniki te przekonująco wskazują na istotny pozytywny wpływ na wysokość plonów mikroorganizmów mobilizujących fosfor. Inną grupą mikroorganizmów mobilizujących fosforany są grzyby endomikoryzowe, zdolne do tworzenia sieci strzępek, które w interakcji z korzeniami roślin poprawiają transport składników odżywczych i chronią rośliny przed patogenami oraz niektórymi stresami abiotycznymi. Spośród grzybów

endomikoryzowych najszerszej stosowane w rolnictwie są grzyby kłębiakowe, ponieważ najskuteczniej mobilizują fosforany. Preparaty oparte na mikroorganizmach mobilizujących fosfor są coraz częściej dostępne na światowych rynkach, a tempo wzrostu ich produkcji w ciągu najbliższych lat będzie najprawdopodobniej nadal się zwiększać.

Mikroorganizmy mobilizujące potas

Po azocie i fosforze potas jest trzecim najważniejszym składnikiem pokarmowym roślin. Forma potasu występująca w roślinach jest jednak znacznie bardziej specyficzna. Zarówno azot, jak i fosfor są składnikami związków organicznych często nierozpuszczalnych i wytracających się w wodzie, natomiast potas ma postać jonową i nie wchodzi w skład związków organicznych budujących komórki. Potas jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych składników skorupy ziemskiej. Zawartość potasu (K_2O) w glebach jest stosunkowo wysoka i sięga 2,5% (wagowo), czyli 10 – 15 razy więcej niż azotu i fosforu. Jednak pomimo stosunkowo wysokiej zawartości potasu w glebie, jego większa część jest nierozpuszczalna, a więc niedostępna dla roślin. Istnieje pewna równowaga między wymiennymi i niewymiennymi formami potasu znajdującymi się w glebie. Podczas zużywania potasu wymiennego, jego rezerwy są uzupełniane przez potas niewymienny. W glebach następuje ciągłe przejście od jednej formy chemicznej potasu do drugiej, poprzez nieustannie zachodzące procesy mobilizacji, jak i immobilizacji tego pierwiastka. Taka systemowa organizacja puli potasu glebowego reguluje jego dostępność dla roślin, ponieważ wprost zależy ona od szybkości przejścia z form niedostępnych w przyswajalne. Jeżeli równowaga w układzie potasowym jest zaburzona z powodu jego intensywnego biologicznego wykorzystania, lub dostarczenia do gleby w postaci nawozów mineralnych, w celu przywrócenia pierwotnej równowagi dynamicznej, następuje naturalna redystrybucja jonów potasu w środowisku naturalnym. Najszybciej przywrócona zostaje równowaga pomiędzy formami rozpuszczalnymi i wymiennymi, natomiast pomiędzy formami niewymiennymi, a rozpuszczalnymi w wodzie może to trwać tygodnie, a nawet miesiące. Niedobory potasu w glebie rekompensuje się zazwyczaj mineralnymi nawozami potasowymi. Na dostępność potasu w układzie gleba – rośliny istotny wpływ mają procesy jego biologicznego rozpuszczania. Mikroorganizmy mobilizujące potas, w odpowiednich warunkach mogą przekształcać formy nierozpuszczalne w rozpuszczalne, dostępne dla roślin. Do takich mikroorganizmów należy znaczna liczba bakterii saprotroficznych należących do rodzajów: *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Acidithiobacillus*, *Pseudomonas*, *Burkholderia* oraz grzybów z rodzajów *Aspergillus* i *Penicillium*. Ponadto stwierdzono, że wymienione bakterie mogą uwalniać z nierozpuszczalnych minerałów również krzem i glin. Stwierdzono także, że bakterie mobilizujące potas promują wzrost roślin, poprzez tłumienie fitopatogenów i poprawę dostępności dla roślin innych składników pokarmowych. Na przykład niektóre bakterie mogą nie tylko utleniać minerały krzemianowe, aby uwolnić potas, krzem i glin, ale są również zdolne do wytwarzania: hormonów wzrostu roślin, amoniaku, sideroforów, a także rozpuszczania i przekształcania fosforu i innych trudno dostępnych pierwiastków w formy przyswajalne dla roślin. Dlatego takie bakterie są szeroko stosowane w bionawozach. Zaprawianie nasion i traktowanie sadzonek biologicznymi preparatami zawierającymi mobilizatory potasu, doprowadziło do znacznego wzrostu plonów wielu roślin uprawnych, w tym: pszenicy, kukurydzy, trawy sudańskiej, sorgo, chili, bawełny, pomidorów, soi, orzeszków ziemnych, ryżu, pomarańczy, czarnej papryki, ziemniaków, tymianku i bakłażana. Badania wykazały

również, że stosowanie mikroorganizmów mobilizujących potas pomaga znacznie ograniczyć stosowanie nawozów chemicznych oraz organicznych.

Mikrobiom gleby jako wskaźnik stanu zdrowotnego gleby

Mikrobiom gleby i ryzosfery to cała społeczność mikroorganizmów (bakterii, archeonów, grzybów, protistów, wirusów) wraz z ich genomami, funkcjami i interakcjami z roślinami i środowiskiem glebowym. Wyniki licznych badań wskazują, że zdrowie gleby i długoterminowa wydajność upraw są ściśle związane z bogactwem gatunkowym, równomiernością i potencjałem funkcjonalnym mikrobiomu gleby, zwłaszcza w ryzosferze. Coraz więcej badań podkreśla, że bioindykatory mikrobiologiczne, takie jak biomasa mikrobiologiczna, aktywność enzymatyczna, profile genów funkcjonalnych i struktura społeczności określona metodami sekwencjonowania o wysokiej przepustowości, mogą być wykorzystywane do oceny wpływu praktyk rolniczych i stosowania nawozów biologicznych na funkcje gleby (obieg pierwiastków, mineralizacja materii organicznej, stabilność agregatów). Włączenie analizy mikrobiomu jako standardowego elementu oceny skuteczności biopreparatów umożliwia monitorowanie zmiany liczebności wybranych grup pożytecznych mikroorganizmów, jak również śledzenie ogólnych zmiany w strukturze i funkcjonowaniu społeczności mikroorganizmów glebowych, w tym udział kluczowych taksonów (tzw. "keystone taxa") dla stabilności agroekosystemu. Uzupełnieniem tych analiz jest równoległa ocena kondycji roślin, m.in. na podstawie parametrów fluorescencji chlorofilu, tempa wzrostu i rozwoju systemu korzeniowego. Połączenie danych mikrobiologicznych z fizjologiczną odpowiedzią roślin pozwala lepiej zrozumieć mechanizmy działania bionawozów oraz precyzyjniej dobierać konsorcja mikroorganizmów do konkretnych gatunków i warunków glebowo-klimatycznych.

Metody aplikacji biopreparatów w uprawach polowych

Właściwe sposoby aplikacji środków ochrony roślin i bionawozów w produkcji roślin jest jednym z kluczowych elementów skuteczności ich działania. Wymogi ochrony środowiska naturalnego i zdrowia człowieka sprawiają, iż wielu producentów rolnych przekształca swoje gospodarstwa w kierunku produkcji ekologicznej. Prowadzi to do coraz szerszego stosowania biostymulatorów, bionawozów, naturalnych środków ochrony roślin i ulepszczy glebowych. Nowe rodzaje preparatów wymagają opracowania nowych technik ich aplikacji w warunkach produkcji towarowej. Stąd tak ważnym jest rozwój nowych metod aplikacji biopreparatów, m.in. zapewnienie odpowiednich parametrów ich stosowania, tak by nie zmniejszyć przeżywalności i wielkości populacji oraz efektywności działania pożytecznych mikroorganizmów obecnych w biopreparatach (bakterie, grzyby mykoryzowe). Preparaty pochodzenia organicznego stosowane w rolnictwie ekologicznym w znacznym stopniu różnią się właściwościami fizycznymi od syntetycznych środków produkcji, używanych w rolnictwie konwencjonalnym. Nowoczesne opryskiwacze i rozsiewacze nawozów z automatyką regulacji parametrów roboczych (komputery pokładowe) umożliwiają odpowiednią aplikację preparatów w produkcji ekologicznej. W celu ulepszenia rozwiązań technicznych dostosowywane są parametry pracy rozrzutników obornika oraz aplikatorów preparatów doglebowych. Równolegle coraz większe znaczenie zyskują metody aplikacji ukierunkowane na materiał siewny, w tym zaprawianie i powlekanie nasion biopreparatami. Takie podejście

pozwała na precyzyjne dostarczenie pożytecznych mikroorganizmów w bezpośrednie sąsiedztwo kiełkujących nasion, przy mniejszym zużyciu preparatu i ograniczeniu strat biologicznej aktywności. Integracja technologii inokulacji nasion z doglebową i nalistną aplikacją bionawozów tworzy spójny system biologicznego wsparcia roślin w całym cyklu wegetacji.

Nowoczesne metody analizy mikrobiomu w ocenie nawozów biologicznych

Rozwój metod biologii molekularnej i bioinformatyki umożliwił ilościową i jakościową analizę mikrobiomów gleby i ryzosfery przy użyciu sekwencjonowania markerów filogenetycznych (np. 16S rRNA, ITS), metagenomiki, metatranskryptomiki oraz profilowania genów funkcjonalnych związanych z obiegami azotu, fosforu i węgla. W kontekście biopreparatów podejście to pozwala nam:

- śledzić przeżywalność i kolonizację szczepów zawartych w preparatach mikrobiologicznych w ryzosferze i wewnątrz tkanek roślinnych (endofity),
- ocenić, czy stosowanie biopreparatów prowadzi do wzrostu bioróżnorodności i funkcjonalnej redundancji mikroorganizmów, co ma kluczowe znaczenie dla odporności gleby na stres spowodowany suszą, zasoleniem i degradacją chemiczną,
- zidentyfikować potencjalne gatunki wskaźnikowe i bioindykatory skuteczności biopreparatu, odzwierciedlające poprawę zdrowia gleby i zwiększoną efektywność wykorzystania składników odżywczych.

Integracja wyników analizy mikrobiomu z danymi dotyczącymi plonu, składem chemicznym roślin i parametrami fizykochemicznymi gleby stanowi podstawę do optymalizacji składu konsorcjów mikroorganizmów w biopreparatach i dostosowania ich stosowania do lokalnych warunków glebowych i klimatycznych.

Perspektywy upowszechnienia i wdrożenia bionawozów w krajowym rolnictwie i ogrodnictwie

W Zakładzie Mikrobiologii i Ryzosfery Instytutu Ogrodnictwa – Państwowym Instytucie Badawczym w Skierniewicach opracowano i wdrożono do praktyki ogrodniczej i rolniczej mikrobiologiczne technologie uprawy roślin ogrodniczych i rolniczych oraz poprawy jakości gleb. Zaproponowane innowacyjne technologie są przełomowe w kraju i w skali międzynarodowej. Nowe technologie obejmują opracowanie naturalnych bioproduktów wzbogaconych mikrobiologicznie, takich jak bionawozy i ulepszacze glebowe, komposty oraz opracowanie metod ich stosowania w zróżnicowanych warunkach uprawy polowej lub szklarniowej różnych gatunków roślin ogrodniczych i rolniczych. Opracowane technologie znajdują zastosowanie przede wszystkim na glebach zakwaszonych, o dużej intensywności upraw roślin ogrodniczych, gdzie brak jest możliwości przeprowadzenia powszechnie zalecanego zmianowania, w sytuacji wystąpienia choroby replantacyjnej, a także na glebach przygotowywanych pod nowe uprawy. W perspektywie rozwoju krajowych technologii nawożenia coraz większą rolę będzie odgrywać kompleksowe podejście obejmujące zarówno jakość gleby, jak i jakość biologiczną materiału siewnego. Inokulacja nasion konsorcjami pożytecznych mikroorganizmów wyselekcjonowanych na podstawie badań mikrobiomu oraz monitorowanie kondycji roślin z użyciem metod takich jak fluorescencja chlorofilu powinny stać się stałym elementem strategii wdrażania bionawozów w rolnictwie i ogrodnictwie. Dotychczasowa współpraca Zakładu Mikrobiologii i Ryzosfery Instytut Ogrodnictwa - PIB z

producentami nawozów zaowocowała rejestracją i wprowadzeniem do produkcji ogrodniczej następujących bionawozów:

- Florovit AGRO wapno nawozowe granulowane PMG z kwasami humusowymi i pożytecznymi mikroorganizmami;
- Bioaktywne podłoża do uprawy warzyw Profi 3 i Profi 4 z mikroorganizmami z rodzaju *Trichoderma*;
- Nawóz BioPlus Forte i Harvest na bazie drożdży i mikroorganizmów;
- BACTERBASE biopreparat zawierający szczepy bakterii *Bacillus velezensis* i *B. amyloliquefaciens* do stosowania w warzywnictwie i sadownictwie;
- Nawóz organiczno-mineralny SLAFER firmy TAYLOR, który jest źródłem składników pokarmowych (makro i mikroelementów) oraz substancji organicznej wpływającej pozytywnie na rozwój roślin i przyczyniającej się do poprawy właściwości fizycznych gleby;

Projektowanie konsorcjów mikroorganizmów w oparciu o dane dotyczące mikrobiomu

Jednym z etapów rozwoju nawozowych produktów mikrobiologicznych jest ich projektowanie w oparciu o dane dotyczące mikrobiomu. Analizy struktury i funkcji mikrobiomu glebowego w różnych systemach upraw (konwencjonalnych, zintegrowanych, ekologicznych) oraz w warunkach stresu suszy, nadmiaru wody lub niedoborów składników odżywczych pozwalają na identyfikację konsorcjów mikroorganizmów naturalnie związanych z wysoką wydajnością i odpornością roślin.

Praktyczne zastosowanie takich danych pozwala nam:

- wybierać autochtoniczne szczepy o kluczowych cechach funkcjonalnych,
- budować konsorcja o synergicznych interakcjach, minimalizując ryzyko antagonizmów i niestabilności po zastosowaniu w różnych glebach,
- oceniać długoterminową stabilność mikrobiologiczną gleb traktowanych biopreparatami poprzez monitorowanie zmian w społeczności mikroorganizmów i identyfikację taksonów, które odgrywają rolę „gatunków kluczowych” dla stabilności systemu.

Włączenie badań nad mikrobiomem do opracowywania i walidacji biopłodników jest zgodne z europejskimi i globalnymi inicjatywami podkreślającymi znaczenie mikrobiomu gleby jako czynnika zmieniającego zasady gry w zakresie bezpieczeństwa żywnościowego i zdrowia gleby.

Zalety bioproduktów

Nawozy, stymulatory i komposty wzbogacone mikrobiologicznie są bezpieczną, skuteczną i ekonomicznie opłacalną metodą nawożenia roślin. Komponentami bionawozów i biostymulatorów są unikalne szczepy i gatunki mikroorganizmów, zawierające minimum 10^8 jtk/g, umożliwiające ich aplikację do substratów organicznych. Wysoka skuteczność biopreparatów wynika z ich stabilnego składu organicznego i mikrobiologicznego, dostosowanego do specyfiki warunków glebowo-klimatycznych Polski. Produkty te są sukcesywnie wdrażane na polskim rynku dla uprawy roślin ogrodniczych i rolniczych.

Opracowane bionawozy wyróżniają się:

- unikalną recepturą składu ponieważ zawierają węgiel brunatny, osady z przetwórstwa owoców i warzyw, torf i pożyteczne mikroorganizmy, co sprawia, że są wysoce skuteczne w stymulacji wzrostu i plonowania roślin;
- obecnością autochtonicznych szczepów pożytecznych mikroorganizmów, wyizolowanych z ryzosfery roślin, rosnących w warunkach glebowo-klimatycznych Polski;
- zwiększoną aktywnością biologiczną, ze względu na obecność konsorcjów pożytecznych mikroorganizmów;
- korzystnym oddziaływaniem na wzrost i plonowanie roślin, przez wzmacnianie ich odporności na biotyczne i abiotyczne stresy środowiskowe, poprawę stanu odżywienia roślin w składniki mineralne.

Podsumowanie

W praktyce ogrodniczej i rolniczej można zauważyć tendencję zwiększonego zainteresowania naturalnymi metodami produkcji, w tym mikrobiologicznymi technologiami nawożenia i ochrony roślin uprawnych. Istnieje ku temu wiele powodów, wśród których wymienić można: obawy konsumentów o pozostałości szkodliwych substancji w owocach i innych płodach rolnych, obecne trendy w ustawodawstwie i zmniejszanie ilości dopuszczonych do użytku pestycydów, pojawianie się nowych odpornych ras szkodników oraz niszczenie pożytecznej fauny, w tym owadów zapylających oraz wzrost świadomości o wpływie konsumpcji owoców na zdrowie. W ramach popularyzacji bionawozów zachęca się rolników do ich stosowania. Jednocześnie wskazuje się na celowość optymalizacji wykorzystania nawozów chemicznych lub ich całkowite lub częściowe zastąpienie bionawozami. Zwiększenie efektywności pobierania i przyswajania składników odżywczych z bionawozów przez zastosowanie pożytecznych mikroorganizmów przyczyni się do poprawy wielkości i jakości plonów oraz ograniczenia stosowania nawozów mineralnych i innych chemicznych środków produkcji roślin. W związku z tym na większą skalę, niż dotychczas, warto stosować nawozy mineralno-organiczne wzbogacone mikrobiologicznie stymulujące wzrost i plonowanie roślin ogrodniczych. Innowacyjne bionawozy wzbogacone mikrobiologicznie są wdrażane do praktyki ogrodniczej i rolniczej w celu poprawy wzrostu i plonowania roślin uprawnych oraz żyzności gleby.