



Politechnika Łódzka

Katedra Biotechnologii Środowiskowej

Prof. dr hab. Beata Gutarowska

Łódź, 16.12.2025

OCENA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Marcina Sojki

Opracowanie innowacyjnego inteligentnego wieloskładnikowego preparatu nawozowego na bazie surowców odpadowych i o spowolnionym uwalnianiu składników

wykonanej pod kierunkiem
dr hab. inż. Agnieszki Saeid, prof. uczelni

na Politechnice Wrocławskiej
w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria chemiczna

1. Celowość podjęcia problemu naukowego

Jednym z kluczowych wyzwań współczesnego rolnictwa jest konieczność zwiększania produkcji żywności przy jednoczesnym zachowaniu jej wysokiej jakości żywieniowej oraz dbałości o środowisko naturalne, zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym. Szczególnego znaczenia w tym kontekście nabiera rozwój strategii umożliwiających wykorzystanie substancji odpadowych pochodzących z przemysłu rolno-spożywczego, technologii odzysku cennych pierwiastków z tych odpadów na potrzeby nawożenia, a także wykorzystanie naturalnych procesów zachodzących w glebie, w tym aktywności mikroorganizmów środowiskowych.

Postępująca intensyfikacja produkcji rolniczej oraz degradacja gleb prowadzą do obniżenia zawartości niektórych mikro- i makroelementów w płodach rolnych, co skutkuje ich niedoborami w diecie ludzi i zwierząt. Konsekwencją tego zjawiska są m.in. zaburzenia metaboliczne, obniżenie odporności oraz zakłócenia homeostazy organizmów. Stosowane obecnie metody uzupełniania deficytów pierwiastków, takie jak suplementacja farmaceutyczna, zróżnicowana dieta czy wzbogacanie żywności na etapie produkcji, charakteryzują się istotnymi ograniczeniami, do których należą m.in. ryzyko przedawkowania, wysoki koszt, ograniczona trwałość efektu oraz umiarkowana skuteczność.

Na tym tle coraz większe zainteresowanie budzi biofortyfikacja agronomiczna wspomagana mikroorganizmami, polegająca na dogłębowej aplikacji mikro- i makroelementów w połączeniu z odpowiednio dobranymi konsorcjami mikrobiologicznymi w trakcie uprawy roślin. Szczególną rolę odgrywa w tym zakresie koncepcja tzw. inteligentnego nawożenia, umożliwiająca kontrolowane, długoterminowe uwalnianie składników pokarmowych, które wchodzi w korzystne interakcje z mikroorganizmami glebowymi, nie zaburzając naturalnej struktury mikrobiomu,

a jednocześnie zapewniając roślinom dostęp do mikroelementów w formach łatwo przyswajalnych.

Praca doktorska podejmuje powyższe wyzwania, koncentrując się na opracowaniu innowacyjnej formacji granulowanego preparatu nawozowego zawierającego bakterie solubilizujące składniki odżywcze, wytwarzanego na bazie surowców odpadowych z przemysłu rolno-spożywczego oraz popiołów z osadów ściekowych. Celem badań jest zwiększenie plonowania roślin uprawnych oraz podniesienie zawartości cynku, fosforu i selenu w biomase roślinnej. Tym samym **praca doktorska mgr. Inż. Marcina Sojki wpisuje się w aktualne i perspektywiczne kierunki badań nad systemowymi strategiami nawożenia, uwzględniającymi założenia gospodarki cyrkularnej i zrównoważonego rolnictwa.**

2. Formalna ocena pracy

Praca doktorska stanowi obszerne opracowanie obejmujące 214 stron maszynopisu i zawiera 85 tabel, 43 wykresy, 27 fotografii oraz 11 schematów, a także spis piśmiennictwa. Do rozprawy dołączono ulotkę informacyjną opracowanego granulowanego preparatu nawozowego o nazwie *NawLiof*, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz zestawienie dorobku naukowego autora. Struktura pracy odpowiada klasycznemu układowi rozprawy doktorskiej o charakterze eksperymentalnym. Część teoretyczna została przedstawiona na 29 stronach maszynopisu, natomiast opis metodyki badań zajmuje kolejne 30 stron. Omówienie i dyskusja uzyskanych wyników stanowią najbardziej rozbudowaną część rozprawy i obejmują 120 stron. Końcowe rozdziały zawierają podsumowanie, rekomendacje dotyczące dalszych badań, weryfikację postawionych hipotez badawczych oraz sformułowane wnioski końcowe. Bibliografia obejmuje 187 pozycji, z czego ponad 90% stanowią publikacje w języku angielskim, a przeszło 70% to prace opublikowane w ciągu ostatnich dziesięciu lat, **co świadczy o dobrym rozeznaniu autora w aktualnym stanie wiedzy.**

Część teoretyczna rozprawy stanowi **dobrze opracowany i aktualny przegląd literatury**, wprowadzający czytelnika w problematykę badawczą. Obejmuje ona zagadnienia związane z potrzebą zwiększania wartości odżywczej żywności, problemem globalnego głodu, rolą mikro- i makroelementów w żywieniu człowieka i roślin z szczególnym uwzględnieniem fosforu, cynku i selenu, a także omówienie sposobów uzupełniania ich niedoborów w diecie. Autor przedstawił również różne strategie nawożenia, w tym nawożenie naturalne, mineralne oraz tzw. nawożenie inteligentne, zaprezentował alternatywne źródła składników odżywczych, koncepcje podejścia zintegrowanego oraz znaczenie waloryzacji surowców odpadowych na cele nawozowe. **Z zaprezentowanych treści jasno wynika motywacja podjęcia badań oraz ich aktualność naukowa i aplikacyjna.**

Głównym celem naukowym pracy było opracowanie innowacyjnej formacji stałego, wieloelementowego preparatu nawozowego zawierającego bakterie solubilizujące składniki odżywcze, wykorzystującego odpadowe surowce rolno-spożywcze oraz popioły, którego zastosowanie miało prowadzić do zwiększenia plonu roślin oraz zawartości cynku, selenu i fosforu w biomase roślinnej. Należy zauważyć, że w sformułowaniu głównego celu na stronie 27 nie uwzględniono fosforu, jednak z treści rozprawy jednoznacznie wynika, iż suplementacja tym pierwiastkiem również stanowiła istotny element prowadzonych badań.

Ponadto doktorant sformułował cztery cele szczegółowe, obejmujące: uzyskanie efektywnych szczepów bakterii zwiększających dostępność omawianych mikro – i makroelementów dla roślin oraz promujących ich wzrost; dobór surowców odpadowych podatnych na solubilizację mikrobiologiczną, możliwych do zastosowania w docelowym preparacie nawozowym; opracowanie nawozu o wysokiej gęstości składników odżywczych; a także ocenę wpływu aplikacji preparatu na plonowanie roślin oraz zawartość Zn, Se, P w biomase roślinnej.

Postawiony, ambitny i wieloaspektowy cel pracy został w pełni zrealizowany, co należy przypisać dużej pracowitości doktoranta, konsekwentnej realizacji kolejnych etapów badań, prawidłowej interpretacji uzyskanych wyników, a także doświadczeniu promotora oraz zespołu badawczego, w którym praca była realizowana.

Doktorant przeprowadził szeroki zakres eksperymentów obejmujących zagadnienia z obszaru inżynierii chemicznej, chemii, biotechnologii przemysłowej, mikrobiologii środowiskowej, czego efektem było opracowanie nowatorskiego rozwiązania technologicznego, zweryfikowanego następnie na kilku modelach roślinnych. Na szczególne podkreślenie zasługuje wielowątkowość rozprawy, obok badań laboratoryjnych autor uwzględnił także badania na roślinach, elementy modelowania matematycznego oraz interesujące aspekty prawne związane z klasyfikacją opracowanego bionawozu.

Zgodnie z informacją podaną przez autora, część badań przedstawionych w rozprawie doktorskiej została zrealizowana w ramach projektu badawczego pt. „*Biofortyfikacja biomasy roślinnej w selen z wykorzystaniem bionawozów otrzymanych na drodze solubilizacji mikrobiologicznej*”, realizowanego w ramach II konkursu na polsko-południowoafrykańskie projekty badawcze (nr PL-RPA2/08/BioSeFert/2019), finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

Wyniki pracy zostały częściowo opublikowane w manuskrypcie w czasopiśmie *CHEMICAL AND BIOLOGICAL TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE* (IF₅ letni=6,1, MNiSW=70 pkt), doktorant jest także współautorem 2 innych publikacji na inne tematy badawcze spoza obszaru doktoratu (w czasopismach: *ADVANCES IN SAMPLE PREPARATION*, IF₅ letni=6,5, MNiSW- nie ma w wykazie; *OPEN CHEMISTRY* IF₅ letni=2,1, MNiSW=70 pkt).

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Praca eksperymentalna obejmowała 4 etapy: selekcję bakterii, surowców odpadowych, opracowanie stałej formułacji nawozowej i ocenę skuteczności bionawozu.

Badania przeprowadzono na ośmiu szczepach bakterii z rodzajów *Bacillus* i *Pseudomonas* pochodzących z Kolekcji Czystych Kultur oraz na ośmiu izolatach glebowych zidentyfikowanych metodami biologii molekularnej i zaklasyfikowanych do rodzajów *Priestia*, *Arthrobacter*, *Bacillus* i *Ensifer*. Oceniono wrażliwość bakterii na wysokie stężenia selenu (10–600 mM), zdolność solubilizacji fosforu i cynku oraz produkcję związków promujących wzrost roślin. Dodatkowo przeanalizowano wzajemne oddziaływania szczepów oraz ich wpływ na kiełkowanie rzodkiewki. Wykazano brak toksycznego oddziaływania selenu na badane bakterie oraz wysoką aktywność solubilizacji fosforu i cynku, szczególnie u szczepów *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas*

moraviensis i *Bacillus megaterium*, związaną z obniżeniem pH środowiska. Produkcję sideroforów stwierdzono wyłącznie u bakterii z rodzaju *Pseudomonas*, natomiast najwyższe ilości kwasu indolilo-3-octowego wytwarzały szczepy *Bacillus*. Wszystkie szczepy produkowały amoniak, choć z różną intensywnością, a oddziaływań antagonistycznych nie zaobserwowano. Na podstawie uzyskanych wyników wybrano szczepy *Pseudomonas putida* i *Bacillus megaterium* do utworzenia konsorcjum nawozowego; nie wykazywały one negatywnego wpływu na kiełkowanie rzodkiewki.

Ważnym etapem biotechnologicznym był dobór krioprotektantów chroniących bakterie w procesie liofilizacji i podczas przechowywania. Spośród badanych wariantów z sacharozą oraz odtłuszczonym mlekiem w proszku (10% i 20%) wybrano 20% roztwór sacharozy, który zapewniał wysoką przeżywalność bakterii po liofilizacji oraz w trakcie siedmiomiesięcznego przechowywania.

Za istotne osiągnięcie Autora należy uznać przeprowadzenie skryningu 11 surowców odpadowych przeznaczonych do doboru komponentów preparatu nawozowego. Surowce, wytypowane na podstawie danych literaturowych, poddano analizie składu pierwiastkowego metodą ICP-OES oraz ocenie ich podatności na mikrobiologiczną solubilizację. Dobór surowców do skryningu jest zasadny, **jednak istotne zastrzeżenia budzi wykorzystanie popiołu z osadu czynnego, który zgodnie z literaturą i wynikami analiz własnych zawiera podwyższone stężenia metali ciężkich** (m.in. Al - 27924 mg/kg, Cd 14mg/kg, Ni 63 mg/kg, Pb 80 mg/kg), potencjalnie niebezpiecznych ze względu na możliwość ich kumulacji w organizmach wyższych. **Zasadność zastosowania tego surowca w granulatach nawozowych wymaga jednoznacznego uzasadnienia i omówienia podczas obrony pracy.**

Analiza składu pierwiastkowego oraz podstawowych właściwości fizykochemicznych surowców (TC, TOC, TN, pH, gęstość nasypowa, wilgotność) stanowiła podstawę wyboru trzech komponentów: mączki rybnej, popiołu z osadu czynnego oraz hemoglobiny suszonej. Dla tych surowców i ich mieszanin przeprowadzono badania solubilizacji P, Zn i Se z udziałem dwóch wybranych szczepów bakterii oraz konsorcjum. **Etap ten należy ocenić wysoko – badania zostały poprawnie zaplanowane, dobrze odniesione do literatury i potwierdziły znane mechanizmy solubilizacji**, związane z intensywnym wzrostem bakterii, produkcją kwasów organicznych, obniżeniem pH, aktywnością kwaśnej fosfatazy oraz znaczeniem potencjału redoks, szczególnie dla bakterii tlenowych. Analizy FTIR sugerowały rozwój biomasy bakteryjnej w postaci biofilmu. Należy jednak zaznaczyć, że **interpretacja obecności biofilmów i zmian morfologicznych na podstawie samych obrazów SEM ma charakter przypuszczalny i wymagałaby potwierdzenia dodatkowymi analizami**. Całość etapu badań dobrze podsumowuje zestawienie kluczowych cech surowców przeznaczonych do otrzymania granulowanego bionawozu.

W trzecim etapie pracy opracowano formułację granulowanego nawozu, obejmującą optymalizację proporcji surowców oraz ocenę mikrobiologicznej solubilizacji P, Zn i Se w podłożu płynnym i w glebie. Charakterystyka otrzymanych granulatów opierała się głównie na ocenie ich odporności na ściskanie, która okazała się zadowalająca. **Z punktu widzenia aplikacyjnego zasadne byłoby jednak uzupełnienie tej charakterystyki o informacje dotyczące wilgotności granulatu, skłonności do zbrylania lub pylenia oraz podstawowych parametrów geometrycznych**. Część ta mogłaby w przyszłości zostać rozszerzona o dodatkowe cechy fizyczne granulatów

(np. o rozmiarach granul, im większe są granule tym gęstość nasypowa niższa, co utrudnia np. transport, łatwą analizą jest także kształt granul wg Zingga). Zoptymalizowany skład granulatu sprzyjał efektywnej solubilizacji pierwiastków, przy czym surowce organiczne stabilizowały proces kontrolowanego uwalniania składników. Biomasa bakterii umożliwiała przechodzenie pierwiastków do form rozpuszczalnych, jednocześnie ograniczając ich wymywanie z gleby (mogły pozostawać w formie nietrwalej w biomacie bakteryjnej zwykle pokrytej polisacharydowym biofilmem), co należy uznać za cechę korzystną z punktu widzenia ochrony środowiska (ogranicza to eutrofizację gleby i wypłukiwanie pierwiastków do wód gruntowych).

Na podkreślenie zasługuje zastosowanie w pracy, obok standardowych metod statystycznych, zaawansowanych modeli matematycznych do opisu kinetyki solubilizacji Zn i P, przeżywalności bakterii podczas przechowywania liofilizatów oraz zmian stężenia fosforu rozpuszczonego w trakcie solubilizacji surowców odpadowych. **Opracowanie matematyczne wyników zostało wykonane bardzo starannie i umożliwiło poprawną interpretację danych oraz sformułowanie uzasadnionych wniosków.** Szczególnie cenne okazały się **analizy optymalizacyjne składu granulatu**, które stanowiły podstawę doboru warunków przygotowania bionawozu oraz pozwoliły na rzetelne odniesienie uzyskanych wyników do danych literaturowych.

Zoptymalizowany granulatu NawLiof charakteryzował się wysoką odpornością na ściskanie ($R = 62 \text{ N}$), korzystnym składem chemicznym ($C_{\text{org}} 28\%$, $N 4,5\%$, $P_2O_5 10\%$, $K_2O 0,9\%$), spełniającym minimalne wymagania NPK, wysoką sumaryczną zawartością makroskładników ($15,5\%$), a także istotną zawartością Se i Zn oraz liczebnością bakterii na poziomie $1,6 \times 10^7$ jtk/g. Zaobserwowane niewielkie różnice pomiędzy składem teoretycznym a rzeczywistym dotyczące głównie liczebności *P.putida* wymagają krótkiej interpretacji.

Cennym elementem pracy jest rozdział poświęcony aspektom prawnym i regulacyjnym, zarówno w kontekście ustaw polskich, jak i rozporządzeń UE dotyczących nawozów. **Dyskusja w tym zakresie wskazuje na dojrzałe spojrzenie Autora na problem kategoryzacji granulatu NawLiof**, wynikający z luk prawnych, zbyt szerokiej definicji niektórych kategorii produktów nawozowych oraz braku dopuszczenia np. popiołu mineralnego z osadu czynnego jako składnika nawozu organiczno-mineralnego.

Ostatni etap pracy obejmował ocenę właściwości granulatu NawLiof w uprawach roślinnych (rzodkiewka, por, cebula, pomidor, papryka), w tym parametry kiełkowania, morfologię korzeni, plon oraz zawartość składników odżywczych w częściach jadalnych. Ustalono dawkowanie na poziomie $0,25\% \text{ m/m}$. Aplikacja granulatu poprawiła wzrost i kondycję roślin, zwiększyła plonowanie oraz zawartość P, Zn i Se, co jednoznacznie potwierdziło zasadność stosowania opracowanego bionawozu.

Na wyróżnienie zasługują logiczne **podsumowania wszystkich etapów badawczych**, zaprezentowane w pracy w postaci tabelarycznej, po każdym rozdziale oraz na końcu pracy, co umożliwiło syntetyczne sprawdzenie uzyskanych rezultatów i sformułowanie wniosków oraz weryfikację hipotez badawczych. **Uważam, że niektóre wnioski z pracy np. 10, 11 i 12 mogłyby zostać połączone w jeden.**

Autor pracy przedstawił również **perspektywy dalszych badań**, do których dodałabym również badania w 2-3 sezonach wegetacyjnych, sprawdzenie wpływu granulatu na różnych glebach w warunkach stresu środowiskowego, cenne będzie także

wskazanie interakcji z mikrobiomem glebowym. W załącznikach **istotnym elementem jest ulotka informacyjna granulatu preparatu nawozowego, opracowana z myślą o jego wdrożeniu.**

W pracy występują drobne błędy językowe, literowe i edytorskie, które jednak nie umniejszają wartości merytorycznej i nie wpływają na pozytywną ocenę pracy.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

W podsumowaniu pragnę stwierdzić, iż rozprawa doktorska Pana mgr inż. Marcina Sojki jest **oryginalnym i wartościowym pod względem naukowym opracowaniem o dużych walorach aplikacyjnych. Sekwencja planowanych eksperymentów z doбором odpowiednich metod badawczych, interdyscyplinarny zakres przeprowadzonych badań oraz dojrzała interpretacja uzyskanych wyników w tym modeli optymalizacyjnych w oparciu o dojrzałą dyskusję świadczą o umiejętności prowadzenia pracy naukowej i zasługują na wysoką ocenę.**

W pełnym przekonaniu stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt. *Opracowanie innowacyjnego inteligentnego wieloskładnikowego preparatu nawozowego na bazie surowców odpadowych i o spowolnionym uwalnianiu składników* spełnia wszystkie warunki stawiane rozprawom doktorskim określone w art.187 ustawy z dn.20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571 z późn.zm.).

Wnioskuje o przyjęcie rozprawy przez komisję ds. przewodu doktorskiego powołaną przez Radę Dyscypliny Inżynieria chemiczna Politechniki Wrocławskiej i dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów postępowania o ubieganie się o nadanie stopnia naukowego doktora.

Beata Gutamowska