

Katowice, 20.10.2025 r

Prof. dr hab. Zofia Piotrowska-Seget  
Instytut Biologii, Biotechnologii i Ochrony Środowiska  
40-032 Katowice  
ul. Jagiellońska 28

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr Dominiki Gmur

pt: Ocena występowania pierwiastków ziem rzadkich w glebach i odpadach oraz możliwości  
ich odzysku w procesie fitoekstrakcji

wykonanej w Instytucie Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa - Państwowym Instytucie  
Badawczym w Puławach

pod kierunkiem dr hab. Grzegorza Siebielca prof. IUNG-PIB

### Tematyka badawcza rozprawy

Pierwiastki ziem rzadkich (REE – *rare earth elements*) to grupa metali, które dzięki unikalnym właściwościom magnetycznym, optycznym i katalitycznym stanowią podstawę wielu zaawansowanych technologii. Są powszechnie wykorzystywane w tzw. zielonych technologiach, m.in. do produkcji turbin wiatrowych, akumulatorów i pojazdów elektrycznych. W związku z dynamicznym rozwojem tych gałęzi gospodarki zapotrzebowanie na REE gwałtownie wzrasta, co wymusza poszukiwanie nowych źródeł oraz metod pozyskiwania tych pierwiastków. Ich eksploatacja wiąże się jednak z wysokimi kosztami środowiskowymi, obejmującymi degradację gleb, zanieczyszczenie wód oraz powstawanie toksycznych odpadów.

Alternatywą dla konwencjonalnych metod wydobycia staje się fitoekstrakcja, jedna z technik fitoremediacji, wykorzystująca zdolność wybranych roślin do pobierania i akumulacji metali w ich tkankach. Fitoekstrakcja REE pozwala połączyć proces usuwania szkodliwych metali ze środowiska z odzyskiem cennych surowców, wpisując się tym samym w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym, umożliwiającej bardziej zrównoważone wykorzystanie zasobów naturalnych.

Zaprezentowana rozprawa doktorska wpisuje się w nurt takich właśnie badań i dotyczy oceny występowania pierwiastków ziem rzadkich w glebach i odpadach przemysłowych oraz efektywności ich odzysku w procesie fitoekstrakcji. Bardzo wysoko oceniam zaprezentowaną tematykę, to ważny i aktualny kierunek badań, wpisujący się w problematykę nauk o środowisku, gleboznawstwa i biogeochemii. Należy podkreślić, że temat pracy ma znaczenie zarówno poznawcze, jak i praktyczne. Wyniki badań poszerzają naszą wiedzę teoretyczną o fitoremediacji i metalach ziem rzadkich, a jednocześnie mogą stanowić podstawę do opracowania przyjaznej dla środowiska technologii odzysku REE w skali przemysłowej,

### ***Ocena formalna pracy***

Przedłożona do oceny rozprawa stanowi zbiór z trzech powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w recenzowanych czasopismach:

1. Gmur D., Siebielec G. 2022. Phytoextraction of Rare Earth Elements. Polish Journal of Agronomy, 50, 3–11.
2. Gmur D., Siebielec G., Pecio M. 2025. Differences in Accumulation of Rare Earth Elements by Plants Cultivated in Soil and Substrates from Industrial Waste Materials. Plants, 14(4), 589.
3. Gmur D., Siebelec G., Pecio M. Chelate-induced accumulation of rare earth elements in plants grown on soil and ash-based growing media. Current Agronomy, 2025, 2, 1 – 17.

Pierwsza w wymienionych publikacji jest pracą przeglądową, dwie pozostałe mają charakter prac eksperymentalnych i prezentują wyniki przeprowadzonych przez mgr Dominikę Gmur doświadczeń. Wszystkie prace są współautorskie, jedna ma dwóch, a dwie trzech współautorów. We wszystkich publikacjach Doktorantka jest pierwszym i korespondującym autorem. W dołączonych oświadczeniach wszyscy autorzy określili swój udział i zakres pracy. Wynika z nich, że mgr Dominika Gmur miała kluczowy, wiodący udział w prowadzeniu badań i przygotowaniu publikacji. Jej udział polegał na opracowaniu koncepcji badań, zebraniu materiału badawczego, prowadzeniu doświadczeń szklarniowych, wykonaniu części analiz laboratoryjnych, interpretacji otrzymanych wyników oraz przygotowaniu manuskryptów i udzieleniu odpowiedzi na uwagi recenzentów.

W rozprawie, obok wymienionych wyżej publikacji, znajduje się również polskojęzyczna część, która uzupełnia i podsumowuje wyniki zaprezentowane w opublikowanych pracach. Przedłożona rozprawa doktorska liczy 146 stron i składa się z następujących części: Wstęp i Przegląd

literatury, Hipoteza i cel badań, Materiał i metody badawcze, Wyniki, Dyskusja, Wnioski. Spis literatury, Streszczenie w języku polskim i angielskim oraz kopie publikacji wchodzących w skład rozprawy.

Reasumując ocenę formalną stwierdzam, że cykl publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe oraz ich opis spełniają wymagania stawiane przez prawo osobom ubiegającym się o stopień doktora.

### ***Ocena merytoryczna***

W pierwszej części pracy „Wstępie i Przeglądzie literatury” mgr Dominika Gmur wprowadza czytelnika w tematykę przedstawionych badań. W tym rozdziale, a szczególnie we wspomnianej wyżej publikacji przeglądowej (Phytoextraction of Rare Earth Elements, 2022) mgr Dominika Gmur w uporządkowany sposób porusza wiele aspektów związanych z występowaniem i źródłami REE w środowisku oraz wykorzystaniem potencjału roślin do pobierania i akumulacji tych metali. Doktorantka dokumentuje swoją wiedzę również w zakresie oddziaływania REE na organizmy żywe, omawia zasady fitoekstrakcji oraz czynniki determinujące jej efektywność. W mojej ocenie zaprezentowany przegląd literatury stanowi logiczną i spójną całość oraz zawiera informacje niezbędne do interpretacji uzyskanych wyników.

Przedstawione podstawy teoretyczne są bardzo dobrym wprowadzeniem do celu pracy, którym było określenie efektywności fitoekstrakcji pierwiastków ziem rzadkich (REE) z gleby oraz odpadów przemysłowych przez wybrane gatunki roślin. Doktorantka postawiła hipotezę badawczą, która zakłada, że źródłem pierwiastków ziem rzadkich, pozyskiwanych w procesie fitoodzysku, mogą być składowiska różnych typów odpadów przemysłowych. W prezentowanych badaniach odpady obejmowały popiół pochodzący z przemysłu papierniczego i elektrowni oraz odpad poflotacyjny z huty cynku.

W celu sprawdzenia hipotezy oraz osiągnięcia głównego celu pracy, Autorka sformułowała kilka zadań szczegółowych obejmujących ocenę: (1) zawartości lantanu (La), ceru (Ce), europu (Eu) i gadolinu (Gd) w odpadach przemysłowych oraz wybranych glebach; (2) poziomu akumulacji La, Ce, Eu i Gd przez wybrane gatunki roślin uprawianych na glebie i podłożach, których głównym komponentem były odpady przemysłowe oraz (3) poziomu akumulacji La, Ce, Eu i Gd przez wybrane gatunki roślin hodowane na dwóch podłożach z dodatkiem wybranych chelatów.

Hipoteza badawcza została zweryfikowana w logicznie zaplanowanych, konsekwentnie i poprawnie realizowanych zadaniach badawczych. Przedstawiony projekt doktorski realizowany był w dwóch doświadczeniach przeprowadzonych w hali wegetacyjnej IUNG-PIB w Puławach. W pierwszym mgr Dominika Gmur oceniała przydatność 8 gatunków roślin - krwawnika pospolitego (*Achillea millefolium* L.), maruny bezwonnej (*Tripleurospermum maritimum* (L.) W.D.J. Koch), kostrzewy trzcinowej (*Festuca arundinacea* Schreb.), nagieteka (*Tagetes* sp.), kukurydzy (*Zea mays*), gorczyca biała (*Sinapsis alba*), koniczyny łąkowej (*Trifolium pratense* L.) oraz narecznicy czerwonożawijkowej (*Dryopteris erythrosora* (D.C.Eaton) Kuntze) - hodowanych w czterech różnych podłożach, do fitoekstrakcji La, Ce, Eu i Gd. W drugim, biorąc pod uwagę wyniki 1 eksperymentu, badała wpływ chelatów kwasu cytrynowego (CA), kwasu etylenobis[oksyetylenotrynitrilo]tetraoctowego (EGTA) i kwasu etylenodiaminotetraoctowego (EDTA) na zawartość REE u krwawnika pospolitego, koniczyny łąkowej i narecznicy czerwonożawijkowej. Do realizacji zaplanowanych zadań Doktorantka wykorzystwała metody powszechnie stosowane do oceny fizycznych i chemicznych właściwości podłoży, zawartości REE i pierwiastków śladowych, oznaczenia poziomu zakumulowanych w korzeniach i pędach REE. Ponadto, w celu oceny przydatności testowanych roślin do procesu fitoekstrakcji obliczała wartość współczynnika translokacji (TF) i współczynnika biokoncentracji (BCF). W opublikowanych artykułach Doktorantka szczegółowo opisała zastosowane metody i procedury, w sposób umożliwiający ich powtórzenie. Wszystkie badane warianty wykonano w odpowiedniej liczbie powtórzeń. Biorąc pod uwagę szeroki zakres badań wysoko oceniam wysiłek Doktorantki włożony w realizację wszystkich zaplanowanych doświadczeń.

Koncepcja badań i testowanie kilku wariantów eksperymentów zaowocowała dużą ilością wyników, które przedstawione są w poprawnie skonstruowanych tabelach i rysunkach. Wyniki zostały poddane analizie statystycznej co sprawia, że przedstawione wnioski są uzasadnione i wiarygodne. Do najważniejszych rezultatów rozprawy zaliczam:

1. Wykazanie, że testowane rośliny posiadają zdolność do pobierania i akumulacji REE, a zawartość poszczególnych pierwiastków w korzeniach i pędach istotnie się różni w zależności od rośliny i podłoża;

2. Wskazanie *Dryopteris erythrosora* jako rośliny o największym potencjale do fitoodzysku REE.
3. Wskazanie *Trifolium pratense*, hodowanej na glebie bez dodatku chelatu, jako jedynej rośliny, u której stężenie wszystkich REE w pędach było wyższe niż w korzeniach.
4. Wykazanie, że chelaty w zróżnicowany sposób oddziaływały na wzrost roślin i stężenie REE w ich korzeniach i pędach, ale nie przyczyniły się do istotnego zwiększenia efektywności fitoekstrakcji

W rozdziale Dyskusja mgr Dominika Gmur, umiejętnie skonfrontowała uzyskane wyniki z wynikami zaprezentowanymi w światowej literaturze. Pracę kończą wnioski, które znajdują odzwierciedlenie w uzyskanych rezultatach i są ich syntetycznym ujęciem.

Przedstawiona rozprawa napisana jest poprawnym językiem, w przejrzysty i zrozumiały sposób. Doktorantka nie uniknęła jednak literówek i pewnych nieścisłości. Nie do końca zgadzam z poniższym zdaniem „Jeśli stosunek zawartości metali w korzeniu do innych organów rośliny oraz stosunek zawartości metali w tkankach roślinnych do podłoża są większe od 1, roślinę można sklasyfikować jako szczególnie przydatną do fitoekstrakcji, ze względu na wysoką efektywność procesu” (str 55). Zdanie to wymaga korekty, bowiem u roślin szczególnie przydatnych do fitoekstrakcji (i fitoodzysku) zawartość metali w częściach nadziemnych powinna być większa niż w korzeniach roślin (wartość TF powinna być  $> 1$ ).

W trakcie czytania rozprawy nasunęły mi się pewne pytania, które chciałabym zadać Doktorantce w czasie obrony:

1. W pracy mgr Dominika Gmur podkreśla, że REE mogą oddziaływać na organizmy żywe. Chciałabym poprosić o krótką informację na temat interakcji tych metali z mikroorganizmami, odgrywającymi tak ważną rolę w cyklu biogeochemicznym metali.
2. Czym kierowała się Doktorantka wybierając rośliny do badań, a także stężenia REE dodawane do gleby w doświadczeniu 2?
3. Jako sposób zwiększenia pobierania REE przez rośliny Doktorantka proponuje odpowiednie przygotowanie gleby/podłoża. Co, oprócz wspomnianej już w pracy, modyfikacji pH mogłoby mieć istotny wpływ na poprawę efektywności fitoekstrakcji.

4. W pracy wykazano, że dodanie chelatów nie zwiększyło istotnie efektywności fitoekstrakcji. Czy są jakieś inne, ekonomicznie opłacalne sposoby zwiększenia pobierania REE przez rośliny?

### **Wniosek końcowy**

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska mgr Dominiki Gmur pt.: „Ocena występowania pierwiastków ziem rzadkich w glebach i odpadach oraz możliwości ich odzysku w procesie fitoekstrakcji” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim wymienione w art. 187 ustawy Prawo o Szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2028 roku (Dz. U. 2018 poz. 1668 – tekst ujednolicony). Doktorantka pokazała, że opanowała odpowiednie techniki badawcze, że potrafi stawiać i weryfikować hipotezy badawcze oraz posiada teoretyczną wiedzę w dziedzinie nauk, dyscyplinie rolnictwo i ogrodnictwo. Ma również umiejętność prezentowania, interpretacji i dyskusji wyników. W związku z tym wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowego Instytutu Badawczego o dopuszczenie mgr Dominiki Gmur do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

*2 p/eq et*