

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Bednik

pt.: *Czynniki decydujące o degradacji biowęgla w glebie w kontekście możliwości wykorzystania węgla pirogenicznego jako narzędzia sekwestracji CO₂*

Promotor pracy: dr hab. inż. Agnieszka Medyńska-Juraszek, prof. Uczelni
Promotor pomocniczy: dr Irmina Ćwieliąg-Piasecka

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą wykonania recenzji była uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo nr 99.RO.2023 z dnia 17.10.2023 r. przekazana pismem Przewodniczącego Rady Dyscypliny prof. dr hab. Cezarego Kabały z dnia 8.11.2023 r., powołująca mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Magdaleny Bednik (PD000000.4100.14.2023).

2. Ocena formalna rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Magdaleny Bednik pt. *Czynniki decydujące o degradacji biowęgla w glebie w kontekście możliwości wykorzystania węgla pirogenicznego jako narzędzia sekwestracji CO₂* składa się z autoreferatu w języku polskim oraz załącznika zawierającego streszczenie rozprawy w języku polskim i angielskim, a także kopie publikacji wraz z oświadczeniami współautorów. W autoreferacie Doktorantka w sposób syntetyczny przedstawiła aktualny stan wiedzy na temat wykorzystania biowęgla w sekwestracji węgla i jego trwałości w środowisku, główne cele i hipotezy badawcze, opis etapów badań oraz omówienie wyników badań przedstawionych w poszczególnych publikacjach. Całość zamyka podsumowanie wraz z wykazem piśmiennictwa cytowanym w autoreferacie.

Wyniki badań będące przedmiotem rozprawy są rezultatem zrealizowanego projektu naukowego „Innowacyjny Doktorat”, którego Doktorantka była kierownikiem. Osiągnięcie naukowe Doktorantki stanowi zbiór 3 publikacji spójnych tematycznie, opublikowanych w czasopismach posiadających współczynnik wpływu *Impact Factor* (IF) oraz znajdujących się w wykazie czasopism naukowych zamieszczonym w komunikacie Ministra Edukacji i Nauki z dnia 6 listopada 2023 r.:

1. **Bednik M.**, Medyńska-Juraszek A., Ćwieląg-Piasecka I., 2022. Effect of Six Different Feedstocks on Biochar's Properties and Expected Stability. *Agronomy*, 12(7), 1525. doi:10.3390/agronomy12071525.
2. **Bednik, M.**, Medyńska-Juraszek, A., Ćwieląg-Piasecka, I. 2023. Biochar and Organic Fertilizer Co-Application Enhances Soil Carbon Priming, Increasing CO₂ Fluxes in Two Contrasting Arable Soils. *Materials*, 16(21), 6950. doi.org/10.3390/ma16216950.
3. **Bednik, M.**, Medyńska-Juraszek, A., Ćwieląg-Piasecka, I., Dudek, M. 2023. Enzyme Activity and Dissolved Organic Carbon Content in Soils Amended with Different Types of Biochar and Exogenous Organic Matter. *Sustainability*, 15(21), 15396. doi.org/10.3390/su152115396.

Wartość punktowa zbioru publikacji wynosi 340, zaś sumaryczny IF – 11,0.

Doktorantka we wszystkich pracach jest pierwszym autorem, a Jej wkład w powstanie publikacji, zgodnie z oświadczeniami współautorów, jest znaczący (udział 50-65%). Doktorantka brała udział w typowych dla prac badawczych etapach, tj. opracowanie koncepcji i metodyki badań, przeprowadzenie badań eksperymentalnych, udział w opracowaniu wyników i ich interpretacji, przygotowaniu manuskryptów i ich korekcie wydawniczej.

Doktorantka jest aktywna naukowo i organizacyjnie. Poza publikacjami zawartymi w osiągnięciu naukowym, jest współautorką 7 prac opublikowanych w czasopiśmie o IF w zakresie 3,4–4,4 oraz rozdziału monograficznego. Ponadto, jest autorką oraz współautorką dwóch prezentacji i dwóch posterów na konferencjach zagranicznych. Doktorantka uczestniczyła w dwóch projektach badawczych jako kierownik i wykonawca. Zrealizowała krótkoterminowy zagraniczny staż naukowy oraz brała udział w organizacji dwóch konferencji naukowych o zasięgu krajowym i międzynarodowym. Na podstawie danych w bazie Web of Science Core Collection, prace mgr inż. Magdaleny Bednik, których jest współautorką, były cytowane 99 razy, a indeks Hirscha dorobku publikacyjnego wynosi 6. Swoim dorobkiem Pani mgr inż. Magdalena Bednik potwierdza, że posiada zdolność pracy w zespole badawczym i jest dobrze rokującym młodym naukowcem.

3. Znaczenie podjętej tematyki badawczej

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Magdaleny Bednik prezentuje wyniki badań, których głównym celem była ocena przydatności biowęgla pozyskanych z różnych substratów w procesie sekwestracji węgla w glebie z uwzględnieniem czynników istotnych dla trwałości tego materiału.

W obliczu zachodzących zmian klimatycznych oraz ciągłej emisji gazów cieplarnianych do atmosfery, istnieje coraz większa potrzeba tworzenia zrównoważonych rozwiązań w zakresie usuwania i recyklingu dwutlenku węgla. Dużą uwagę zwraca się na rozwijaną w skali globalnej strategię transferu dwutlenku węgla z atmosfery do gleby poprzez jego sekwestrację. Tradycyjne metody sprzyjające sekwestracji węgla w glebie takie jak stosowanie płodozmianu, utrzymanie całorocznego pokrycia gleby czy dywersyfikacja upraw odgrywają istotną rolę, jednakże wprowadzenie biowęglu jako niekonwencjonalnego rozwiązania może stanowić kluczową innowację umożliwiającą długotrwałe magazynowanie węgla w glebie.

Biowęgiel produkowany z różnych rodzajów biomasy i odpadów posiada duży potencjał magazynowania węgla w glebie. Sekwestracja węgla w glebie jest szczególnie istotna na gruntach rolniczych, gdzie bezpośrednio przyczynia się do poprawy struktury i jakości gleby, ale również wspomaga rolnictwo w dostosowywaniu się do zmian klimatu.

Stabilność biowęglu rozumiana jako jego oporność na rozkład pełni kluczową rolę w skuteczności sekwestracji dwutlenku węgla. Decyduje ona o czasie, przez jaki węgiel zostaje zatrzymany w glebie, co łagodzi wpływ emisji gazów cieplarnianych na zmianę klimatu. Najnowsze doniesienia literaturowe wskazują, że stabilność nie jest stałą właściwością biowęglu i może zmieniać się w czasie pod wpływem szeregu czynników takich jak warunki pirolizy, właściwości biowęglu, właściwości gleby, czy sposób gospodarowania danym gruntem, a sam proces rozkładu ma charakter złożony. Poznanie czynników wpływających na stabilność biowęglu jest nie tylko istotne z punktu widzenia sekwestracji węgla, ale także kompleksowej oceny przydatności biowęglu jako dodatku glebowego.

Reasumując, **tematyka i zakres badawczy rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Magdaleny Bednik bardzo dobrze wpisują się w nurt badawczy związany z wykorzystaniem biomasy przetworzonej w procesie pirolizy do poprawy jakości i stanu środowiska oraz jako sposób ograniczania emisji gazów cieplarnianych.** Aspekt dotyczący analizy trwałości biowęglu w środowisku glebowym w kontekście sekwestracji węgla zdecydowanie poszerza wiedzę na temat zachowania biowęglu i jego funkcjonalności. Ponadto, tematyka rozprawy podnosi świadomość przyrodniczej i środowiskowej roli biowęglu, co docelowo może korzystnie wpłynąć na upowszechnienie jego stosowania.

3. Analiza rozprawy i ocena merytoryczna

Celem rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Magdaleny Bednik było określenie trwałości biowęglu w środowisku glebowym w zależności od rodzaju biomasy poddawanej

pirolizie, rodzaju gleby oraz obecności egzogennej materii organicznej, a także ocena przydatności testowanych biowęgla dla sekwestracji węgla.

Dla realizacji ww. celu Doktorantka sformułowała cztery główne cele badawcze, które umożliwiły weryfikację trzech **hipotez badawczych**, zgodnie z którymi:

1. Podatność biowęgla na procesy degradacji jest uzależniona od rodzaju biomasy wykorzystanej do procesu pirolizy.
2. Obecność glebowej materii organicznej, jak również egzogennych form materii wprowadzanych w procesie nawożenia gleb może mieć wpływ na efektywność biowęgla w sekwestracji węgla w glebie.
3. Biowęgiel w określonych warunkach będzie stanowił efektywne narzędzie sekwestracji węgla w glebie, a jego podatność na rozkład można oszacować na podstawie charakterystyki biowęgla oraz zmian najbardziej mobilnej puli węgla po wprowadzeniu biowęgla do gleby (rozpuszczony węgiel organiczny, dwutlenek węgla, aktywność mikroorganizmów).

Schemat badań załączony w autoreferacie porządkuje organizację pracy. Doktorantka przeprowadziła badania w trzech etapach opartych na doświadczeniach inkubacyjnych poprzedzonych przygotowaniem i charakterystyką biowęgla. Warto zaznaczyć, że doświadczenia inkubacyjne prowadzono w przedziale czasowym od 3 do 12 miesięcy, co pozwala ocenić istotne zmiany w stabilności biowęgla. Wyniki badań zawarto w trzech publikacjach.

W **publikacji (1)** Doktorantka oceniła wpływ rodzaju substratów na właściwości i stabilność biowęgla produkowanych w tych samych warunkach pirolizy (temp. 550°C, czas pirolizy 1 godz.). Testowano sześć rodzajów biomasy w postaci odpadów kuchennych, trawy ogrodowej, fusów z kawy, słomy pszenicznej, łupin słonecznika oraz zrębków drewna bukowego.

Biowęgla charakteryzowano z wykorzystaniem standardowych metod analitycznych w celu określenia odczynu (pH), pojemności wymiany kationów oraz zawartości popiołu. Stabilność biowęgla analizowano w szerszym ujęciu uwzględniając (i) skład elementarny materiałów, a na jego podstawie molowe stosunki H:C oraz O:C, (ii) strukturę biowęgla w oparciu o widma MIR, (iii) udział lotnych związków organicznych uwalnianych z biowęgla w warunkach kontrolowanych oraz (iv) stężenie labilnych form węgla w postaci rozpuszczonego węgla organicznego oraz rozpuszczalnych węglowodanów. Biorąc pod uwagę złożoność matrycy biowęgla, **próba podjęcia oceny stabilności biowęgla na podstawie analizy emisji lotnych związków organicznych, w mojej ocenie, stanowi wartościową część rozprawy.**

Przeprowadzone analizy wykazały istotną zależność pomiędzy rodzajem substratu

wykorzystywanym do produkcji biowęgla a jego stabilnością. Biowęgłe z substratów o wyższej zawartości lignocelulozy charakteryzowały się wyższą zawartością węgla, bardziej aromatyczną strukturą oraz niższą zawartością labilnych frakcji węgla. Doktorantka poza prezentacją i interpretacją uzyskanych wyników, w sposób krytyczny odniosła się do oceny poszczególnych wskaźników charakteryzujących stabilność biowęgla, wskazując te najbardziej przydatne.

W publikacji (2) Doktorantka skoncentrowała się na ocenie stabilności biowęgla w glebie z dodatkiem samego biowęgla oraz mieszaniny biowęgla z egzogenną materią organiczną, powszechnie wykorzystywaną w rolnictwie (kompost, obornik bydlęcy, świeża biomasa roślinna). Stabilność materiału węglowego oceniano na podstawie badań respirometrycznych opartych na analizie labilnej frakcji węgla w postaci CO₂, podczas kilkumiesięcznej inkubacji, w warunkach kontrolowanych. Badania prowadzono dla dwóch gleb użytkowanych rolniczo, powszechnie występujących na terenie Europy Środkowej. Gleby charakteryzowały się odmiennymi właściwościami dotyczącymi tekstury, odczynu, pojemności wymiany kationów, zawartości węgla organicznego, azotu oraz węglanów, co stanowiło dodatkowy czynnik wpływający na stabilność biowęgla. Uwzględniając rodzaj biowęgla oraz egzogennej materii organicznej, dla każdej gleby badania przeprowadzono w 25 wariantach, co umożliwiło weryfikację postawionej hipotezy badawczej. Wyniki emisji dwutlenku węgla z próbek glebowych w czasie umożliwiły analizę przemian materii organicznej oraz określenie bilansu węgla, a tym samym wnioskowanie o zmianach w stabilności biowęgla.

Doktorantka jednoznacznie wykazała wyższą emisję CO₂ w glebie z dodatkiem biowęgla niż w glebie bez dodatku biowęgla, a obecność egzogennej materii organicznej, zwłaszcza nieustabilizowanej dodatkowo potęgowała ten proces. Najwyższą emisję CO₂ obserwowano jedynie na początku inkubacji, ale jej poziom silnie zależał od rodzaju biowęgla i właściwości gleby. Na podstawie emisji CO₂, Doktorantka oceniła, że większe straty węgla, następują w glebie piaszczystej z dodatkiem biowęgla z odpadów spożywczych, w których udział labilnych form węgla był wysoki.

W publikacji (3) Doktorantka analizowała zmiany aktywności enzymatycznej oraz zawartości rozpuszczonego węgla organicznego w glebach z dodatkiem biowęgla oraz biowęgla i egzogennej materii organicznej. Podczas 12-miesięcznej inkubacji, pobierano próby glebowe do badań w określonych odstępach czasu. W pracy, Doktorantka analizowała podstawowe enzymy glebowe w postaci dehydrogenazy, β-glukozydazy oraz celulazy. Oceniając aktywność enzymatyczną gleb, Doktorantka zwróciła uwagę, że istotne znaczenie dla tej oceny ma rodzaj enzymu. Wykazano, że aktywność enzymatyczna zależała zarówno od właściwości gleby jak i rodzaju wprowadzonej materii organicznej. Wyższą aktywność enzymatyczną Doktorantka

uzyskała dla gleby o teksturze pyłu gliniastego niż dla gleby o teksturze piasku gliniastego, co dobrze korelowało z właściwościami obu gleb. Zarówno w przypadku biowęgla jak i egzogennej materii organicznej, wyższe przyrosty aktywności enzymatycznej uzyskano dla biowęgla zawierających wyższą pulę labilnej frakcji węgla. Uzyskane wyniki znalazły odzwierciedlenie w analizie stężenia rozpuszczonego węgla organicznego oraz dynamice zmian tego wskaźnika.

Wszystkie publikacje wchodzące w skład rozprawy są napisane na bardzo dobrym poziomie naukowym, co jednoznacznie wskazuje na bardzo dobrą opiekę Promotorów pracy. Z analizy cyklu prac wynika, że Doktorantka wykazała się dużą skrupulatnością i rzetelnością na etapie planowania badań, doboru substratów do pirolizy oraz egzogennej materii organicznej, a także gleb do testów inkubacyjnych. Długoterminowe testy inkubacyjne wymagały szczególnej kontroli, począwszy od utrzymania odpowiedniej wilgotności, poprzez pomiary respirometryczne oraz pobór próbek gleby do oznaczeń wybranych wskaźników biologiczno-chemicznych.

Część metodyczna prac została opracowana poprawnie. Szczegółowo opisano metody analityczne oraz sposób wyliczenia strat węgla. We wszystkich pracach Doktorantka konsekwentnie posługuje się odpowiednią nomenklaturą i skrótami odnośnie nazw biowęgla, egzogennej materii organicznej, próbek gleb, a także analizowanych wskaźników, co ułatwia lekturę całego cyklu publikacji. Wyniki badań przedstawiono czytelnie, a ich jakość opatrzona analizą statystyczną nie budzi zastrzeżeń. Doktorantka rzetelnie interpretuje uzyskane wyniki i dyskutuje na tle dostępnej literatury.

Oceniając rozprawę doktorską w zakresie kryteriów merytorycznych i metodycznych stwierdzam, że recenzowana praca dotyczy ważnego przyrodniczo i środowiskowo zagadnienia jakim jest wykorzystanie biowęgla w sekwestracji węgla w glebie. Przeprowadzone badania z udziałem biowęgla wytworzonych z różnych rodzajów biomasy oraz dodatkiem egzogennej materii organicznej dla gleb o odmiennych właściwościach pozwoliły Doktorantce zrealizować szczegółowe cele pracy i udowodnić stawiane hipotezy. Przy użyciu wybranych metod, Doktorantka oceniła podatność badanych biowęgla na degradację i ich potencjał w sekwestracji węgla w glebach. Tak zaprojektowane i przeprowadzone badania pozwoliły ostatecznie na sformułowanie podstawowych wytycznych w zakresie doboru substratów do produkcji biowęgla czy źródeł egzogennej materii organicznej dla uzyskania skutecznej sekwestracji węgla w glebach o różnych właściwościach. Uzyskane wyniki stanowią również przesłankę do weryfikacji wyników badań nad degradacją biowęgla w glebie z uwzględnieniem wpływu czynników biotycznych i abiotycznych w warunkach polowych.

Stwierdzam, że **praca doktorska Pani mgr inż. Magdaleny Bednik jest cenna z poznawczego punktu widzenia i wnosi istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej Rolnictwo i Ogrodnictwo.**

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy zaliczam wykazanie, że:

- labilna frakcja węgla (rozpuszczony węgiel organiczny oraz rozpuszczone węglowodany) w połączeniu ze spektroskopową analizą struktury biowęgla mogą być użytecznym wskaźnikiem do oceny stabilności biowęgla,
- biowęgiel o wyższym stopniu karbonizacji może zapewnić bardziej długotrwałą sekwestrację węgla niż biowęgiel o niższym stopniu karbonizacji,
- trwałość biowęgla w glebie zależy nie tylko od rodzaju substratu wykorzystanego do produkcji biowęgla, ale również od uziarnienia i właściwości chemicznych gleby,
- rodzaj egzogennej materii organicznej wprowadzanej jednocześnie z biowęglem ma wpływ na jego stabilność w glebie, a aplikacja niestabilizowanej biomasy może przyspieszać procesy rozkładu biowęgla na skutek tzw. pozytywnego primingu.

Pomimo, że publikacje były już poddane krytycznej ocenie recenzentów przed ich opublikowaniem, chciałbym przedstawić kilka uwag, które mogą stanowić przyczynek do dyskusji podczas publicznej obrony rozprawy doktorskiej. Poniższe uwagi mają jedynie charakter ogólny i nie umniejszają wartości poznawczej rozprawy:

1. Jednym z testowanych substratów do produkcji biowęgla były odpady kuchenne. Na potrzeby badań odpady te zostały starannie wyselekcjonowane i ograniczone do resztek wybranych warzyw i owoców. W pracy nie podano jaki był udział poszczególnych resztek w ogólnej mieszaninie. Warto zaznaczyć, że skład odpadów kuchennych w rzeczywistości jest bardziej złożony i zmienny w czasie. W związku z tym, istotne jest zastanowienie się nad wpływem zmienności składu odpadów kuchennych na właściwości biowęgla, zwłaszcza jego stabilność.
2. W części metodycznej podano, że pirolizę wszystkich substratów prowadzono w temperaturze 550°C. Wiadomo, że wzrost temperatury pirolizy koreluje ze wzrostem stabilności biowęgla. W pracy zabrakło wyjaśnienia na jakiej podstawie wybrano taką temperaturę pirolizy. Należałoby się zastanowić czy piroliza substratów w postaci odpadów kuchennych oraz fusów z kawy w wyższej temperaturze nie przyczyniłaby się do zwiększenia stopnia stabilności biowęgla i sekwestracji węgla.
3. Na jakiej podstawie przyjęto w badaniach nad sekwestracją węgla dawkę biowęgla równą 2%. Czy wcześniej przeprowadzono badania optymalizacyjne w tym zakresie? Czy i w jaki sposób wielkość dawki biowęgla może wpływać na jego stabilność w glebie?

4. Zakres prac badawczych w publikacji (3) skupiał się analizie aktywności enzymatycznej oraz rozpuszczonego węgla organicznego. Szkoda, że Doktorantka nie przedstawiła wyników zmian podstawowych właściwości gleb (odczyn, zasolenie, stężenie węgla organicznego) podczas 12-miesięcznej inkubacji. Zmiany we właściwościach samej gleby pod wpływem biowęgla mogły również mieć wpływ na analizowane wskaźniki.
5. Pomimo szczegółowego opisu części metodycznej, w publikacji (3) nie podano całkowitej wielkości pobieranych próbek gleby w różnych odstępach czasu do analiz. W eksperymencie całkowita masa gleby w poszczególnych wariantach wynosiła 100 g. Analizując zużycie gleby na analizy poszczególnych wskaźników można oszacować, że w połowie inkubacji ubytek gleby z naczyń reakcyjnych mógł wynieść ok. 40%. W związku z tym czy ubytek gleby w czasie mógł wpływać na wyniki aktywności enzymatycznej oraz stężenie rozpuszczonego węgla organicznego?
6. Podsumowanie autoreferatu przypomina raczej dyskusję wyników. Sformułowanie wniosków jednoznacznie uwidoczniłoby osiągnięcia rozprawy.

4. Wniosek końcowy

Podsumowując moją opinię, stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Magdaleny Bednik pt. *Czynniki decydujące o degradacji biowęgla w glebie w kontekście możliwości wykorzystania węgla pirogenicznego jako narzędzia sekwestracji CO₂* stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, posiada odpowiedni poziom merytoryczny oraz wnosi nowe elementy poznawcze w zakresie wykorzystania biowęgla w procesie sekwestracji węgla w glebie. Rozprawa dokumentuje wiedzę Doktorantki w zakresie pirolizy, charakterystyki biowęgla oraz przemian materii organicznej różnego pochodzenia w glebie, a także umiejętność planowania i prowadzenia przez Nią badań naukowych, opracowania i krytycznej dyskusji wyników oraz wyciągnięcia wniosków.

Opiniowana praca spełnia wymagania formalne stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z obowiązującą podstawą prawną (*Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, art. 187*). Wobec tego przedkładam Wysokiej Radzie Naukowej Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu wniosek o przyjęcie opiniowanej rozprawy i dopuszczenie Pani mgr inż. Magdaleny Bednik do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.



Dr hab. inż. Mariusz Gusiatin, prof. UWM