

Lublin, 6.11.2023 r.

dr hab. Katarzyna Szewczuk-Karpisz, prof. IA PAN
Zakład Fizykochemii Materiałów Porowatych
Tel. 81 744 50 61 w. 129
E-mail: k.szewczuk-karpisz@ipan.lublin.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr Magdaleny Kusiak

pt. „Analiza biochemicznej i molekularnej odpowiedzi jęczmienia jarego (*Hordeum vulgare* L.) na dolistną aplikację nanocząstek i jonów miedzi”

opracowana na zlecenie Pani prof. dr hab. Barbary Kołodziej,

Przewodniczącej Rady Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

(pismo RDRiO/5100/os/2023 z dnia 29 września 2023 r.)

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska została wykonana w Instytucie Genetyki, Hodowli i Biotechnologii Roślin na Wydziale Agrobiotechnologii Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie pod kierunkiem naukowym Pani dr hab. Izabeli Joško, prof. uczelni. Doktorat został zrealizowany w ramach projektu pt. „Molekularne i biochemiczne mechanizmy regulujące transport nanocząstek miedzi oraz ich wpływ na wzrost, rozwój i plonowanie roślin jęczmienia jarego”, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w ramach konkursu SONATA (2017/26/D/NZ9/00067). Kierownikiem projektu była Pani promotor dr hab. Izabela Joško, prof. uczelni.

Stały wzrost populacji światowej jest równoznaczny z coraz większym zapotrzebowaniem na pełnowartościową żywność. Szacuje się, że do 2050 roku liczba ludzi na Ziemi może osiągnąć nawet 10 miliardów, a to z kolei przełoży się na konieczność co najmniej dwukrotnego zwiększenia światowych plonów. Rozwiązaniem tego problemu może być przeznaczenie większej powierzchni gruntów na uprawę lub opracowanie nowych, wysoce wydajnych i skutecznych metod rolniczych. Pierwszy sposób jest niezwykle trudny do realizacji ze względu na powszechną degradację gleb. Szacuje się, że w Unii Europejskiej

50% gleb może być użytkowanych rolniczo, ale zapewnienie im dobrego stanu jest dość kłopotliwe. Gleby UE są nieustannie narażone na erozję, pustynnienie, zanieczyszczenie, spadek zawartości materii organicznej czy też utratę różnorodności biologicznej. Intensywne praktyki rolnicze powodują kompaktację gruntu lub przyczyniają się do jego przenawożenia, co znacznie obniża jakość i pogarsza zdolności produkcyjne gleb uprawnych. Przywrócenie glebom zdegradowanym wartości użytkowych jest czasochłonne i dlatego w pełni uzasadnione jest nieustanne poszukiwanie nowych metod nawożenia oraz wysoce produktywnych technik rolniczych.

W ramach swojej pracy doktorskiej Pani mgr Magdalena Kusiak podjęła próbę opracowania nowej techniki nawożenia opartej na zastosowaniu nanocząstek. W ten sposób idealnie wkomponowała się w wyżej opisany trend. Nanomateriały są znane od lat 90. ubiegłego wieku i charakteryzują się rozmiarem ziaren mieszczącym się w przedziale od 1 do 100 nm. Ze względu na przeważającą liczbę atomów na ich powierzchni w stosunku do liczby atomów znajdujących się w głębi materiału, mają one zupełnie inne właściwości niż materiały „mikro”. Posiadają m.in. dużą powierzchnię właściwą, wysoką reaktywność chemiczną i biologiczną, wysoką wytrzymałość na rozciąganie, a także skłonność do aglomeracji. Nanomateriały mogą być bardzo zróżnicowane pod kątem składu chemicznego, a biorąc pod uwagę ich pochodzenie można je podzielić na naturalne, antropogeniczne i zaprojektowane. Pierwsze z nich pochodzą z procesów termicznych (np. pożarów lasów) lub z procesów utleniania minerałów, erozji skał czy parowania. Nanocząstki antropogeniczne są produktem ubocznym działalności człowieka, np. spalania węgla kamiennego. Z kolei nanomateriały projektowane są wytwarzane w sposób celowy przy wykorzystaniu odpowiedniej techniki. Nanocząstki można otrzymać poprzez rozdrobnienie litych materiałów do cząstek wielkości nano (ang. *top-down*) lub prowadząc przyrost nanokryształów przez ściśle określony czas (ang. *bottom-up*). W literaturze można znaleźć również doniesienia o możliwości syntezy nanocząstek przez mikroorganizmy.

Zastosowanie nanomateriałów w rolnictwie może przynieść wiele korzyści. Dzięki małym rozmiarom nanocząstki mogą z łatwością przenikać nie tylko do tkanek, ale również komórek roślinnych i tam pozytywnie wpływać na procesy fizjologiczne, co przekłada się na lepszą kondycję rośliny i lepszą jakość owoców. Podane dolistnie nanocząstki srebra mogą zwiększać odporność organizmów roślinnych na zakażenia grzybicze, bakteryjne i wirusowe. W postaci nanocząstek mogą być aplikowane mikroelementy niezbędne do prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin, np. miedź (Cu). Warto jednak zaznaczyć, że wiele aspektów związanych z zastosowaniem nano-nawozów nie zostało do tej pory wyjaśnionych.

W większości przeprowadzonych dotychczas badań skupiono się na dogłębowym podaniu nanocząstek, przez co nieznanne pozostają mechanizmy ich oddziaływania z liśćmi roślin po dolistnej aplikacji. Badania ekotoksykologiczne wykonywano krótkoterminowo z zastosowaniem wysokich stężeń nanocząstek, co nie pozwoliło na precyzyjną ocenę wpływu nano-nawozu na roślinę. W pracach doświadczalnych nie brano pod uwagę poszczególnych etapów cyklu rozwojowego organizmów roślinnych. Badacze dokonywali pomiarów właściwości morfologicznych, fizjologicznych lub biochemicznych roślin po zastosowaniu nanocząstek, ale bez analizy plonów (np. ich wartości odżywczej). Nie przeprowadzono również analiz ekspresji genów związanych z homeostazą, które pozwoliłyby na dokładne zbadanie mechanizmów działania nanocząstek we wnętrzu rośliny. Pani mgr Magdalena Kusiak realizując swoją pracę doktorską podjęła próbę uzupełnienia wszystkich tych luk literaturowych.

Doktorantka wykonała wielopoziomową ocenę nanocząstek miedzi jako innowacyjnego nawozu, zestawiając je z tradycyjnymi nawozami zawierającymi Cu w formie jonowej. Zbadła rzeczywistą absorpcję i translokację miedzi w roślinach po ich ekspozycji na nano-miedź i jony miedzi. Przeprowadziła analizę biochemiczną odpowiedzi roślin na dolistną aplikację nano-miedzi i jej rozpuszczalnych odpowiedników, a także analizę ekspresji genów regulujących transport i detoksykację miedzi w roślinach poddanych działaniu nanocząstek i rozpuszczalnych soli. Ostatnim celem Doktorantki była ocena potencjału nano-miedzi do biofortyfikacji oraz poprawy cech jakościowych plonu w porównaniu do mikrocząstek i konwencjonalnych nawozów. Pani mgr Magdalena Kusiak postawiła hipotezę, że dzięki nanocząstkowej formie miedź jest stopniowo i długotrwale dostarczana roślinie, co znacznie poprawia jakość plonów. Mechanizmy pobierania i dystrybucji nanocząstek w roślinie są ściśle uzależnione od formy miedzi, jej stężenia oraz czasu ekspozycji. Co więcej, reakcja roślin na nanocząstki, od poziomu molekularnego do odpowiedzi całego organizmu, jest zupełnie inna niż w przypadku jonów miedzi.

W pracach doświadczalnych Doktorantka wykorzystała cząstkowe formy miedzi oraz rozpuszczalne związki miedzi będące źródłem jonów Cu^{2+} . W doświadczeniu wazonowym zaaplikowała roślinom nanocząstki miedzi (nano-Cu), nanocząstki tlenku miedzi (nano-CuO), mikrocząstki miedzi (mikro-Cu), siarczan miedzi (CuSO_4) oraz sól disodową kwasu etylenodiaminotetraoctowego (Cu-EDTA), z kolei w doświadczeniu hydroponicznym – nano-Cu oraz CuSO_4 . Jako roślinę testową Pani mgr zastosowała jęczmień jary (*Hordeum vulgare* L.) odmiany Ella, który jest wrażliwy na niedobory miedzi. Doświadczenie hydroponiczne było krótkoterminowe, prowadzone w warunkach deficytu Cu. Pozwoliło ono na ocenę

interakcji nano-Cu z kutykulą liści, ocenę zdolności roślin do pobierania nanocząstek, określenie zmian fizjologicznych i biochemicznych roślin po dolistnym podaniu nanocząstek, ocenę wpływu nano-Cu na redukcję stresu wywołanego niedoborem miedzi, a także ocenę zmian w profilach ekspresji genów związanych z transportem, homeostazą i reakcją na stres roślin. Doświadczenie wazonowe prowadzono przez cały cykl życiowy jęczmienia, co umożliwiło określenie rzeczywistego wpływu nanocząstek, mikrocząstek i jonowej formy miedzi na plonowanie, a także skład chemiczny, wartość odżywczą i bioaktywność ziarniaków.

Powierzchnia właściwa cząstek miedzi została oznaczona metodą adsorpcji/desorpcji azotu, ich skład fazowy określono techniką dyfrakcji rentgenowskiej (XRD), natomiast rozmiary cząstek zmierzono z wykorzystaniem techniki dynamicznego rozpraszania światła. Roztwory przeznaczone do aplikacji dolistnej poddano analizom potencjału dzeta i rozkładu wielkości cząstek/agregatów przy użyciu zetasizera. Sprawdzone również stabilność cząstek miedzi obecnych w roztworze przeprowadzając separację i oznaczenie ilościowe form jonowych przy użyciu spektrometrii emisyjnej z plazmą wzbudzaną indukcyjnie (ICP-OES). Analizy spektroskopowe liści *in situ* obejmowały oznaczenie grup funkcyjnych w naskórku liścia przed i po podaniu nawozów z wykorzystaniem spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR), a także obrazowanie powierzchni liści poddanych ekspozycji na związki miedzi przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) z systemem EDS. Całkowitą zawartość Cu w tkankach roślinnych mierzono po uprzedniej mineralizacji próbek z wykorzystaniem ICP-OES. Przeprowadzone analizy biochemiczne obejmowały: (1) analizę zawartości barwników (chlorofilu (a i b) i karotenoidów), (2) analizę peroksydacji lipidów (zawartości aldehydu malonowego), (3) analizę zdolności do usuwania wolnych rodników, (4) analizę aktywności enzymów antyoksydacyjnych (dysmutazy ponadtlenkowej, katalazy, peroksydazy, reduktazy glutationowej), (5) analizę aktywności enzymów związanych z antyoksydantami nieenzymatycznymi (amoniakolizazy fenyloalaniny, oksydazy polifenolowej), (6) analizę zawartości drobnocząsteczkowych antyoksydantów (glutationu, polifenoli). Analiza ekspresji genów obejmowała wybrane geny transporterów miedzi (RAN1, COPT, PAA1, PAA2), akwaporyn (NIP 2;2, PIP 1;1, TIP 1;1, TIP 1;2) oraz enzymów oksydacyjnych (SOD Cu/Zn, SOD Fe, SOD Mn, CAT). Z kolei analizy ziarniaków polegały na określeniu (1) zawartości mikro- i makroelementów (Cu, cynku, manganu, żelaza, wapnia, magnezu i potasu), (2) wartości odżywczej (oznaczenie zawartości białka, strawności białka oraz całkowitej zawartości błonnika pokarmowego), wykonaniu (3) oznaczeń całkowitej zawartości polifenoli, antocyjanów, flawonoidów, tanin i flawanoli oraz zbadaniu

(4) zdolności do usuwania wolnych rodników. Doktorantka wykonała również analizy statystyczne wyników z wykorzystaniem m.in. oprogramowania Statistica 13.1., jedno- i dwukierunkowej analizy wariancji (ANOVA) oraz analizy głównych składowych (PCA). Zakres badań przeprowadzonych przez Panią mgr Magdalenę Kusiak był zatem ogromny, wymagał jej poświęcenia i dużego zaangażowania. Jestem pod wrażeniem ilości i złożoności wykonanych prac eksperymentalnych.

Wyniki uzyskane przez Doktorantkę zostały opisane w 3 publikacjach naukowych (PII-PIV). Są to obszernie artykuły, w którym dokonano fachowej interpretacji wyników. Do każdego z nich przygotowano materiały dodatkowe. Co więcej, otrzymane wyniki porównano z danymi opublikowanymi przez innych badaczy. Na podstawie przeprowadzonych prac eksperymentalnych stwierdzono, że nanocząstki wykazują tendencję do agregacji i tworzenia skupisk nawet 10-krotnie większych od średniej wielkości nanocząstek, a także silnej adhezji do powierzchni liści, co znacznie utrudniało pobieranie Cu przez roślinę. Z drugiej zaś strony, zastosowany surfaktant Tween20 przyczynił się do znacznej redukcji warstwy kutikuli, co mogło ułatwiać dyfuzję nanocząstek do wnętrza liści. Niezależnie od formy Cu nie stwierdzono translokacji mikroelementu do części podziemnych. Było to prawdopodobnie podyktowane krótkim czasem ekspozycji (7 dni) oraz silnym wiązaniem Cu przez bioligandy. Długotrwały wzrost jęczmienia w warunkach deficytu miedzi skutkowało wystąpieniem chlorozy, a także deformacji i usychania końcówek młodych liści. Po 1-dniowej ekspozycji na nano-cząstki lub siarczan miedzi nie zaobserwowano zmian w fenotypie roślin, natomiast po 7 dniach widoczna była chloroza i zmiany nekrotyczne roślin poddanych działaniu miedzi w formie jonowej. Efekt ten nie wystąpił po podaniu nano-nawozu. Analiza przyrostu biomasy wykazała, że większy wzrost wykazały rośliny poddane działaniu siarczanu miedzi, co było związane z szybkim podaniem Cu roślinom cierpiącym na jej niedobór. Zmiany aktywności antyoksydantów zaobserwowano głównie po 1 dniu od podania związków Cu. Dla wyższej dawki nano-Cu (1000 mg/L) oraz obu stężeń CuSO_4 zaobserwowano negatywną odpowiedź roślin, m.in. zwiększoną peroksydację lipidów, obniżenie aktywności enzymu SOD odpowiedzialnego za obronę przed stresem oksydacyjnym. Podanie obu form Cu przyczyniło się do wzrostu aktywności enzymu odpowiedzialnego za redukcję GSSG do GSH (GR), co sugerowało aktywację mechanizmów obronnych związanych z glutationem. Wyższa dawka nanocząstek i obie dawki soli miedzi zwiększyły zawartość GSSG, co wskazało na nadprodukcję reaktywnych form tlenu (ROS) pod wpływem tych aplikacji. Badania nad aktywnością kluczowych enzymów szlaku fenylopropanoidowego oraz zawartością jednego z jego produktów – polifenoli, wykazały pozytywny wpływ na rośliny jedynie po podaniu

niskiego stężenia nanocząstek. Zaobserwowano wówczas zwiększoną akumulację polifenoli, co mogło świadczyć o prawidłowym funkcjonowaniu mechanizmu obronnego rośliny i działaniu nano-nawozu jako elicytatora. Warto jednak podkreślić, że po dłuższej ekspozycji nie zaobserwowano znaczącego wpływu związków Cu na badane parametry, co wskazywało na krótkotrwały efekt stymulujący dla niższej dawki nano-Cu lub ich udziale w neutralizacji ROS. Zmiany w odpowiedzi molekularnej roślin po aplikacji związków miedzi były uzależnione od zastosowanego stężenia, analizowanego genu i czasu ekspozycji. Krótco po aplikacji niższej dawki związków miedzi zaobserwowano największe zmiany w ekspresji genów związanych z transportem miedzi między formą nanocząstkową a jonami Cu. W miarę upływu czasu „efekt nano” ulegał zatarciu, co mogło oznaczać, że obie formy nawozów dostarczyły roślinom Cu wymagających uruchomienia mechanizmów jej relokacji w celu ochrony kluczowych organelli. Na podstawie poziomu ekspresji genów antyoksydantów stwierdzono, że reakcja na jony miedzi była szybsza i silniejsza. Nano-Cu miały łagodniejszy wpływ na rośliny. Analiza ziarniaków wykazała zwiększoną zawartość miedzi zarówno po aplikacji nanocząstek, jak i łatwo rozpuszczalnych związków miedzi. Potwierdziło to stopniową absorpcję i translokację miedzi po aplikacji nanocząstek. Aplikacja nano-nawozu nie przyczyniła się do wzrostu plonowania jęczmienia, ale poprawiła niektóre cechy jakościowe ziarniaków, np. zawartość błonnika i flawonoli. Obawę może jednak budzić fakt, że ziarniaki pochodzące z roślin traktowanych nanocząstkami wykazywały wyraźny spadek zdolności do neutralizacji wolnych rodników, co świadczy o obniżeniu ich wartości prozdrowotnych.

Publikacja PI to wnikliwy przegląd literatury na temat zastosowania nanotechnologii w uprawie roślin. Opisano w niej potencjalne korzyści i zagrożenia związane ze stosowaniem nanocząstek, nanopestycydów i nanonawozów. Omówiono pozytywny i negatywny wpływ nanocząstek na organizmy roślinne, uwzględniając przy tym reakcje roślin na poziomie molekularnym. Artykuł stanowi doskonały wstęp dla prac eksperymentalnych przeprowadzonych przez Doktorantkę i jest wysoce wartościowym przeglądem aktualnej wiedzy rolniczej.

Artykuły zaliczone do rozprawy doktorskiej Pani mgr Magdaleny Kusiak ukazały się w czasopiśmie z listy JCR o wysokich współczynnikach oddziaływania IF, zaliczonych do Q1, tj. *Journal of Hazardous Materials* (Elsevier, 200 pkt. MEiN, IF₂₀₂₂ 13,6), *Environmental Pollution* (Elsevier, 100 pkt. MEiN, IF₂₀₂₃ 8,9), *NanoImpact* (Elsevier, 100 pkt. MEiN, IF₂₀₂₃ 4,9) oraz *Food Research International* (Elsevier, 140 pkt. MEiN, IF₂₀₂₃ 8,1). Sumaryczna liczba punktów ministerialnych prac wynosi 540, natomiast ich sumaryczny IF – 35,5.

Według bazy *Scopus* (dn. 4.11.2023) prace te zostały zacytowane 13 razy. W trzech publikacjach (PI-PIII) pierwszym autorem jest Pani mgr Magdalena Kusiak, natomiast w czwartej pracy (PIV) – Pani promotor dr hab. Izabela Joško, prof. uczelni. Artykuł P1 ma 3 autorów, PII – 6 autorów, PIII – 7 autorów, z kolei PIV – 8 autorów. We wszystkich publikacjach autorem korespondencyjnym jest Pani promotor. Warto w tym miejscu podkreślić, że współautorami 3 prac zaliczonych do opiniowanej rozprawy doktorskiej są naukowcy pracujący w zagranicznych ośrodkach naukowych, tj. Uniwersytecie Mansoura (Egipt), Uniwersytecie w Tuluzie (Francja) oraz Uniwersytecie w Sao Paulo (Brazylia). Budzi to mój podziw, ponieważ współpraca międzynarodowa jest obecnie jednym z najważniejszych elementów pracy naukowej. Na podstawie załączonych oświadczeń współautorów stwierdzam, że udział Doktorantki w powstawaniu prac był znaczny. Dla artykułów PI-PIII Doktorantka oszacowała go na 51-70%. Jedynie w publikacji PIV zaangażowanie Pani promotor i Pani mgr Magdaleny Kusiak było zbliżone i wynosiło odpowiednio 35 i 30%.

Oprócz kopii publikacji naukowych oraz oświadczeń współautorów recenzowana rozprawa doktorska zawiera 56-stronicowy opis składający się z następujących części: „Wprowadzenie”, „Hipotezy i cele badawcze”, „Materiały i metody”, „Omówienie wyników i dyskusja”, „Wnioski” i „Literatura”. Na początku rozprawy znajduje się też streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści oraz spis publikacji będących przedmiotem rozprawy. We „wprowadzeniu” Pani mgr Magdalena Kusiak wskazała luki literaturowe, które chciała uzupełnić przeprowadzając swoje prace eksperymentalne. Podkreśliła również, jak ważne w dzisiejszych czasach jest opracowywanie nowych nanotechnologii pozwalających na zwiększenie ilości i jakości pozyskiwanych plonów. W kolejnym rozdziale Doktorantka prawidłowo sformułowała 4 cele szczegółowe dla swoich badań oraz 3 hipotezy badawcze. Natomiast w części „Omówienie wyników i dyskusja” w sposób syntetyczny i zrozumiały zinterpretowała uzyskane rezultaty. Bardziej wnikliwa dyskusja wyników znajduje się w poszczególnych publikacjach naukowych Doktorantki. Podsumowaniem opisu jest 9 prawidłowo sformułowanych wniosków. Rozdział „Literatura” zawiera aż 108 odpowiednio dobranych pozycji literaturowych pochodzących z ostatnich lat. To dodatkowo potwierdza, że Doktorantka jest dobrze zaznajomiona z bieżącą literaturą przedmiotu. Cała rozprawa doktorska jest starannie przygotowana. Jej struktura jest przejrzysta, a rysunki i tabele czytelne. W tekście znalazłam zaledwie kilka błędów edytorskich, tzw. literówek. Jedynym elementem, który zdecydowanie ułatwiłby mi lekturę rozprawy doktorskiej byłby spis używanych symboli.

Sylwetka Pani mgr Magdaleny Kusiak nie została opisana w postaci osobnego rozdziału. Mogłam jedynie ocenić osiągnięcia Doktorantki na podstawie jej profili w bazie *Scopus* i platformie *Researchgate*. W dniu 4.11.2023 dorobek Pani mgr składał się z 10 oryginalnych publikacji naukowych, które zostały zacytowane 84 razy (wg *Scopus*). Pierwsza publikacja Doktorantki ukazała się w 2020 r., co oznacza, że swój dorobek zbudowała w stosunkowo krótkim czasie. Indeks Hirscha Pani mgr Magdaleny Kusiak wynosi 5. Można zatem stwierdzić, że jest ona aktywnym i ambitnym młodym naukowcem.

Jak już wcześniej wspomniałam, tematykę opiniowanej rozprawy doktorskiej uważam za aktualną. Wyniki uzyskane przez Doktorantkę będą z pewnością pomocne podczas opracowywania nowych nawozów. Każda publikacja Pani mgr Magdaleny Kusiak ma wysoką wartość merytoryczną. Ze względu na to, że zostały one poddane niebudzącej zastrzeżeń procedurze recenzji w czasopiśmie, mam jedynie kilka sugestii/pytań, które nasunęły mi się w trakcie czytania rozprawy. Pragnę przy tym podkreślić, że moje uwagi nie mają wpływu na ogólną, pozytywną ocenę pracy.

1. Doktorantka użyła stwierdzenia „rozpuszczanie nanocząstek”. Z chemicznego punktu widzenia dochodzi do ich „utleniania” i według mnie takie nazewnictwo jest bardziej odpowiednie.
2. Utlenianie nanocząstek miedzi badano w roztworze. Czy na powierzchni liści zjawisko to nie zachodzi?
3. Pani mgr stwierdziła, że nanocząstki miedzi agregują, co utrudnia ich aplikację oraz pobieranie przez roślinę. Myślę, że można by było temu zapobiec stosując substancję podnoszącą stabilność suspensji nanocząstek. Jak jest opinia Doktorantki na ten temat?
4. W doświadczeniu wazonowym wykorzystano glebę piaszczysto-gliniastą, którą scharakteryzowano pod kątem pH oraz ilości dostępnych mikro- i makroelementów. Dlaczego wybrano akurat taką glebę? Czy zastosowanie innego typu gleby mogłoby wpłynąć na końcowy wynik doświadczenia?
5. Nanocząstki są często rozpatrywane jako toksyczne dla organizmów. Czy istnieje prawdopodobieństwo, że nanocząstki zakumulowane na powierzchni liści zostaną wymyte wraz z wodą opadową i wywołają negatywny wpływ na pozostałe organizmy glebowe?

Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pani mgr Magdaleny Kusiak jest wartościowym opracowaniem, które stanowi znaczne rozszerzenie wiedzy na temat interakcji roślin z nanocząstkami miedzi. Spełnia ona warunki określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. Poz. 1668, z późn. zm.) i stanowi podstawę do nadania stopnia doktora w dyscyplinie rolnictwo i ogrodnictwo. Wnioskuje o dopuszczenie Pani mgr Magdaleny Kusiak do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Dodatkowo biorąc pod uwagę zakres przeprowadzonych prac oraz wysoką jakość uzyskanych wyników wnoszę o wyróżnienie jej pracy doktorskiej.

Ketaminus
Srewnski-Kapiton