

Received: 20.10.2022 / Accepted: 25.11.2022

ARTYKUŁ ORYGINALNY

Możliwości wykorzystania nanotechnologii dla poprawy jakości kiełków z nasion rzepaku jarego w kontekście wymogów integrowanej produkcji

Possibilities of using nanotechnology to improve spring rapeseed germ quality in the context of integrated production requirements

Magdalena Kachel^{1,A}, Anna Tratwa^{2,B*}

Streszczenie

Zrównoważona polityka rolnictwa skłania się do zastosowania nanokolloidów srebra i miedzi (AgNK, CuNK), które są najczęściej stosowanymi związkami spośród nanomateriałów w różnych dziedzinach, zwłaszcza w sektorze rolniczym. Rośliny są podstawowym składnikiem ekosystemu i najważniejszym źródłem pożywienia dla ludzkości, dlatego ważne jest zrozumienie wpływu nanokolloidów srebra i miedzi na wzrost i rozwój roślin. Niniejszy artykuł przedstawia wpływ powyższych nanokolloidów na rośliny, pod kątem zawartości pierwiastków zawartych w produkcie spożywczym w postaci suszonych kiełków nasion rzepaku pozyskanych z uprawy polowej z zastosowaniem opryskiwania dolistnego zawierającego nanokolloidy metali srebra i miedzi.

Słowa kluczowe: nasiona rzepaku, nawożenie, nanokolloid srebra, nanokolloid miedzi, makro- i mikroelementy

Abstract

Sustainable agricultural policies are leaning towards the use of silver and copper nanocolloids (AgNK, CuNK), which are the most widely used compounds among nanomaterials in various fields, especially in the agricultural sector. Plants are an essential component of the ecosystem and the most important source of food for humanity, therefore, it is important to understand the effects of nanocolloids silver and copper on plant growth and development. This article presents the effects of the above nanocolloids on plants, in terms of the elemental content of a food product in the form of dried rapeseed sprouts obtained from a field crop with a foliar spray containing silver and copper metal nanocolloids.

Key words: rapeseeds, fertilisation, silver nanocolloid, copper nanocolloid, macro- and micronutrients

¹Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
Katedra Eksploatacji Maszyn i Zarządzania Procesami Produkcyjnymi
ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin

²Instytut Ochrony Roślin – Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Monitorowania i Sygnalizacji Agrofagów
ul. Władysława Węgorka 20, 60-318 Poznań

*corresponding author: a.tratwa@iorpib.poznan.pl

ORCID: ^A0000-0002-0595-9718, ^B0000-0001-9611-8799

Wstęp / Introduction

Wszelkie czynności prowadzone na rzecz rolnictwa zrównoważonego dążą do działań zapewniających bardziej efektywne i przyjazne posunięcia zarówno dla ludzi, jak i środowiska, z jednej strony podnoszące jakość produktów, a z drugiej strony nieszkodzące środowisku naturalnemu. Wykorzystanie zasobów w postaci gleby, wody, nawozów czy środków ochrony roślin powinno odbywać się przy zachowaniu opłacalności produkcji rolniczej oraz akceptacji społecznej. Trwają prace nad koncepcją zapewniającą długofalowy rozwój gospodarstw rolnych poprzez zapewnienie zaufania klienta, zdrowia ludzi i zwierząt oraz z ciągłym poszanowaniem otaczającego środowiska.

Według The Royal Society i The Royal Academy of Engineering (2004) „Nanotechnologia to nauka zajmująca się charakterystyką, projektowaniem, produkcją i zastosowaniem struktur, urządzeń i systemów poprzez kontrolę kształtu i wielkości w skali nanometrycznej”. Nanomateriał to naturalny, powstały przypadkowo lub wytworzony przez człowieka materiał zawierający cząstki w stanie swobodnym lub w formie agregatu bądź aglomeratu, w którym co najmniej 50% lub więcej cząstek w liczbowym rozkładzie wielkości cząstek ma jeden lub więcej wymiarów w zakresie 1–100 nm (GUS 2013). Powstający nanomateriał jest substancją polikrystaliczną, złożoną z ziaren o wielkości nieprzekraczającej 100 nm. Wielkością tą może być średnica ziarna lub grubość warstw wytworzonych albo naniesionych na podłożu (Kachel 2018). Perspektywa zastosowania nanomateriałów w inżynierii oraz rolnictwie dotyczy wykorzystania ewentualnych nanoproduktów do kontrolowanego uwalniania środków ochronnych w zwalczaniu szkodników, jak również dostarczania składników odżywczych roślinom (Bhardwaj i Tomar 2011; Ghormade i wsp. 2011).

Dział nanotechnologii zapewnia nowe środki agrochemiczne, sprawniejsze mechanizmy ich dostarczania w celu poprawy wydajności upraw, a także może przyczynić się do ograniczenia stosowania środków ochrony roślin. Według Ghidan i Al Antary (2019) wykorzystanie nanotechnologii może zwiększyć produkcję rolną, jak i środków ochrony roślin w następujących obszarach: (1) nanoformulacji agrochemikaliów do stosowania środków ochrony roślin i nawozów; (2) zastosowania nanoczuJNIKÓW w ochronie upraw w celu identyfikacji chorób i pozostałości agrochemikaliów; (3) nanourządzeń do inżynierii genetycznej roślin; (4) diagnostyki chorób roślin; (5) poprawy zdrowia zwierząt w chowie; (6) zarządzania płodem rolnym po zbiorach. Należy jednak pamiętać o tym, że zastosowanie nanotechnologii obejmuje transfer genów lub DNA za pośrednictwem nanocząstek w roślinach. Dzięki temu można uzyskać odmiany odporne na wszelkiego rodzaju owady, przetwarzanie i przechowywanie żywności oraz wydłużanie okresu jej trwałości.

Większość obecnych prac nad zastosowaniem nanotechnologii w rolnictwie pod kątem ochrony roślin sugeruje, że

są to badania laboratoryjne i są w początkowym etapie lub jeszcze nie zostały skomercjalizowane (Zheng i wsp. 2005; Hasan 2015). Środki nanotechnologiczne, takie jak nanokapsułki i nanocząsteczki, to przykłady zastosowań do wykrywania i leczenia chorób. W najbliższym czasie przypuszczalnie nanotechnologia zrewolucjonizuje rolnictwo, medycynę i przemysł spożywczy. Zastosowanie w rolnictwie nanocząstek prawdopodobnie ułatwi kolejny etap rozwoju upraw genetycznie zmodyfikowanych, produkcji zwierzęcej, biocydów i systemu hodowli precyzyjnej (Musee i wsp. 2011; Lombi i wsp. 2012). Umożliwi kontrolowanie uwalniania produktów odżywczych lub agrochemicznych przez aplikację nawozów, pestycydów w konkretne miejsce docelowe, przyczyniając się do poprawy efektów środków ochrony roślin, wzrostu i plonowania roślin, a także wydajności konwencjonalnych nawozów (Chhipa 2017).

Zastosowanie nanokoloidu srebra zostało opracowane pod kątem stymulatorów wzrostu roślin (Steinitz i Bilavendran 2011), fungicydów zapobiegających chorobom powodowanym przez grzyby (Alavi i Dehpour 2010) lub środków wspomagających dojrzewanie owoców (Seif Sahandi i wsp. 2011; Vinković i wsp. 2017).

Miedź (Cu) jest niezbędnym mikroelementem dla roślin i odgrywa ważną rolę w wielu procesach metabolicznych obejmujących poza fotosyntezą, oddychanie oraz wzrost i rozwój roślin (Fernandes i Henriques 1991), chociaż w wyższym stężeniu może działać jak „trucizna pokarmowa” (Maksymiec 1997). Nadmiar miedzi hamuje działanie dużej liczby enzymów i zakłóca wiele procesów biochemicznych roślin.

Nanocząstkom (NC) srebra (Ag) oraz miedzi (Cu) poświęcono dużo uwagi ze względu na doskonałe i szerokie spektrum aktywności przeciwdrobnoustrojowej, antybakteryjnej oraz antywirusowej. Przeprowadzone badania przez Phu i wsp. (2010), Carroll i wsp. (2011), Chatterjee i wsp. (2014), potwierdzają fakt, że nanocząstki metali Ag oraz Cu posiadają wysoką aktywność antybakteryjną przeciw niektórym bakteriom oraz patogenom roślinnym, jak np.: *Phytophthora*, *Corticium salmonicolor* i *Escherichia coli*.

Dostępne publikacje wskazują, że odpowiednie stężenie nanokoloidu srebra odgrywa ważną rolę w polepszeniu kiełkowania nasion (Shelar i Chavan 2015) oraz wroście roślin (Kaveh i wsp. 2013; Vannini i wsp. 2013), poprawie wydajności fotosyntezy kwantowej i zawartości chlorofilu (Hatami i Ghorbanpour 2013), czy też zwiększeniu efektywności wykorzystania wody i nawozów. Przeprowadzono również badania dotyczące toksyczności nanokoloidów dla roślin uprawnych, między innymi takich jak: rzepak (*Brassica napus*), rzodkiewka (*Raphanus sativus*), kukurydza (*Zea mays*) i ogórek (*Cucumis sativus*) (Lin i Xing 2007; Barrera i wsp. 2009). Najnowsze publikacje dotyczą przede wszystkim fitotoksyczności, absorpcji, translokacji, akumulacji i biotransformacji nanokoloidów w roślinach spożywczych (Klaine i wsp. 2008; Barrera i wsp. 2009; Musante i White 2010). Otrzymywane wyniki nie zawsze są jedno-

znaczne, a w niektórych przypadkach nie stwierdzono pozytywnego lub negatywnego wpływu użycia nanosrebra lub nanomiedzi na rośliny (Monica i Cremonini 2009; Musante i White 2010). Niektóre wyniki badań wykazały, że toksyczność nanocząstek srebra jest niewielka przy ekspozycji na niskie stężenie wynoszące 5 mg/dm³, jednocześnie przy większym ich stężeniu obserwowano hamowanie wzrostu roślin (Wood i wsp. 1996; McGeer i wsp. 2000). Oddziaływanie nanocząstek na różne gatunki roślin mogą znacznie różnić się w zależności od fazy rozwojowej, sposobu i czasu trwania ekspozycji oraz od kształtu, wielkości, składu chemicznego, stężenia, struktury powierzchniowej, agregacji i rozpuszczalności nanokolloidów (Khiew i wsp. 2011).

Stosunkowo krótka trwałość surowców roślinnych wymaga konieczności ich przetwarzania. Jedną z głównych metod konserwowania żywności jest jej suszenie, które pozwala na długotrwałe przechowywanie produktu poprzez zmniejszenie aktywności wody i wiążące się z tym ograniczenie rozwoju drobnoustrojów. Ponadto, suszenie może wpływać na wydłużenie dostępności produktu, nie tylko w okresie jego sezonowości. Proces ten może jednak wpływać niekorzystnie na szereg zmian zachodzących podczas suszenia. Powodem tej sytuacji jest podwyższona temperatura wymagana do osiągnięcia optymalnego czasu trwania procesu i związanych z nim względnie niskich nakładów energetycznych (Oliveira i wsp. 2016). Kielki z nasion rzepaku mogą stanowić źródło cennych składników odżywczych, wśród których możemy wyróżnić między innymi: witaminy, przeciwutleniacze w postaci związków fenolowych i związki barwne. Poddanie ich wstępnej obróbce suszenia powinno zapewnić w maksymalnym stopniu ich wartość odżywczą poprzez ograniczanie degradacji enzymatycznej i rozwój mikroorganizmów (Lewicki 2010).

Sposób działania nanocząstek na wzrost i rozwój roślin jest wciąż mało poznany, zatem celem niniejszego artykułu była analiza zawartości pierwiastków Ag, Cu, Ca, K, Mg, Na, P i S w kielkach z nasion rzepaku jarego, w których zastosowano opryskiwanie dolistne nanokolloidami srebra i miedzi.

Materiały i metody / Materials and methods

Kielkowanie nasion rzepaku

Doświadczenie polowe założono w cyklu dwuletnim, w sezonach wegetacyjnych 2019 i 2020 na glebie średniej o uziarnieniu pyłu piaszczystego. W doświadczeniach użyto nieotoczowane nasiona rzepaku jarego (*Brassica napus* L. var. *arvensis* f. *annua*) odmiany Markus pochodzące z Hodowli Roślin Strzelce Sp. z o.o. Grupa IHAR. Doświadczenie polowe przeprowadzono w gospodarstwie rolnym w Czesławicach, województwo lubelskie, 51°18'23"N 22°16'02"E.

W eksperymencie polowym przyjęto najniższe stężenie nanokolloidów (50 ml/l). Wyboru takiego stężenia nanokolloidów

dokonano w celu minimalizacji ewentualnych niekorzystnych efektów środowiskowych. Przygotowane nieotoczowane nasiona wysiano na poletkach o powierzchni 30 m² w trzech powtórzeniach. Wysiew nasion na polu przeprowadzono wykorzystując siewnik rzędowy firmy KUHN KN253APL E, w rozstawie wąskiej wynoszącej 12 cm. Doświadczenie podzielono na 2 warianty. W pierwszym wariantcie uprawy nasion przeprowadzono tylko jeden zabieg w postaci opryskiwania na rośliny przygotowanymi roztworami nanokolloidów (srebra i miedzi) w terminie BBCH 12–16. W wariantcie drugim rośliny opryskiwano dwukrotnie w terminie BBCH 12–16 oraz w okresie kwitnienia (BBCH 61–66). Obiekt kontrolny stanowiły rośliny niepoddane opryskiwaniu rozpatrywanymi substancjami.

Po wschodach roślin przeprowadzono regulację obsady roślin do ilości 60 szt. na m² dla każdego wariantu doświadczenia. Wszystkie zabiegi agrotechniczne przeprowadzono zgodnie z zaleceniami dla rzepaku jarego. Do nawożenia mineralnego zastosowano przedsięwzięcie nawóz wieloskładnikowy NPK, dawka nawozu wynosiła 60 kg/ha P₂O₅, 90 kg/ha K₂O oraz nawożenie azotem (N) w dawce 92 kg/ha. Ochrona herbicydowa była wykonana z użyciem substancji czynnej chlomezon w dawce 96 g/ha. W trakcie wegetacji w fazie BBCH 31 zastosowano płynny nawóz dolistny zawierający 150 g boru (B) w 1 litrze w formie boroetanoloamin w dawce 1 l/ha.

W ostatniej dekadzie lipca rzepak zebrano metodą jednoetapową przy wykorzystaniu kombajnu poletkowego Wintersteiger typu KM-ELITE. Zebrane nasiona oczyszczono wykorzystując wialnię laboratoryjną modelu SLN. Po oczyszczeniu nasiona przechowywano w workach jutowych przez dwa tygodnie w warunkach laboratoryjnych w temperaturze 20°C, mieszając każdego dnia w celu wyrównania poziomu wilgotności w całej masie surowca, a następnie poddano analizom. W dwóch latach zbioru średni plon dla obiektu kontrolnego wyniósł 1,5 t/ha.

Przygotowanie preparatów nanokolloidów

Nanopreparat (nanokolloid srebra i nanokolloid miedzi) do opryskiwania przygotowano w stężeniu 50 ml/l (0,005%), rozcieńczając odpowiednie ilości preparatu do przeprowadzenia opryskiwania do objętości 1 l wodą destylowaną.

Przygotowanie nasion i warunki ich kielkowania

Kielkowanie nasion przeprowadzono w dwóch niezależnych wariantach. Doświadczenie mające na celu analizę energii oraz zdolności kielkowania wykonano następująco: nasiona rzepaku umieszczono w 70% roztworze etanolu na 15 s w celu sterylizacji powierzchniowej, następnie przeniesiono je do 1,5% roztworu chloranu (I) sodu (NaClO₃) na czas 15 minut, a po upływie tego czasu nasiona wypłukano pięciokrotnie w wodzie destylowanej. Kielkowanie prowadzono na szalkach Petriego wyłożonych trzema warstwami sterylnej bibuły filtracyjnej, nawilżonej wodą destylowaną po 1,5 cm³ na każdą szalkę.

Suszenie materiału

Próbki surowca zamrożono w temperaturze -30°C przez 48 godzin i liofilizowano przy użyciu laboratoryjnego liofilizatora ALPHA 1-4 firmy Martin Christ o kontaktowym sposobie dostarczania ciepła oraz zintegrowanym systemie wagowym do pomiaru zmian masy próbek podczas suszenia. System grzewczy składa się z pięciu płyt grzewczych umieszczonych na stojaku podporowym. Ciepło potrzebne do przejścia fazowego jest dostarczane do materiału przez bezpośredni kontakt. Zarówno pomiar, jak i regulacja temperatury płyty grzejnej odbywa się za pomocą czujnika temperatury umieszczonego wewnątrz jednej z płyt liofilizatora. Masę materiału rejestrowano w sposób ciągły podczas suszenia z dokładnością $\pm 0,1$ g (Rudy 2009). Proces suszenia kontynuowano w temperaturze 20, 40 i 60°C oraz przy stałym ciśnieniu w komorze suszącej wynoszącym 52 Pa, aż masa próbki osiągnęła wilgotność około 5% (wag.).

Zawartość pierwiastków w kielkach

Do mineralizacji użyto 0,2 g próbek kielków. Próbki kielków poddano mineralizacji w mineralizatorze Berghoff Speedwave Four w naczyniach teflonowych DAP 100% przy użyciu 65% kwasu HNO_3 . Po mineralizacji uzyskane roztwory wykorzystano do oznaczenia zawartości srebra (Ag), wapnia (Ca), miedzi (Cu), potasu (K), magnezu (Mg), sodu (Na), fosforu (P) i siarki (S). Analizy przeprowadzono techniką atomowej spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem w plazmie indukowanej (ICP-OES; Thermo Scientific Icap Series 6500). Krzywa wzorcowa została przygotowana z wzorców dedykowanych do ICP-OES zakupionych w Inorganic Ventures (USA, Virginia). Mineralizację i pomiary ICP-OES przeprowadzono według standardowej metodyki dostarczonej przez producentów urządzeń.

Analiza statystyczna

Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej. Dla wszystkich zmiennych wyznaczono wartości średnie, odchylenia standardowe oraz zastosowano test post hoc Tukeya (HSD) i macierze korelacji. Analizę przeprowadzono na poziomie istotności $p < 0,05$.

Wyniki i dyskusja / Results and discussion

Wymogi i zapisy integrowanej ochrony wyraźnie wskazują na potrzebę wykorzystania wszelkich dostępnych metod zapewniających wytworzenie bezpiecznej i odpowiedniej jakości żywności. Pierwszeństwo mają tu metody niechemiczne oraz wszelkie procesy i metody wspomagające naturalną odporność roślin uprawnych. Ponadto przemiany w rolnictwie, które odbywają się za sprawą wprowadzanego przez Komisję Europejską planu działania „Europejskiego Zielonego Ładu”, strategii „Od pola do stołu” oraz strategii „Na rzecz bioróżnorodności”, zakładają także ograniczenie

wykorzystania chemicznej ochrony roślin na rzecz tej naturalnie występującej w świecie roślin.

Spśród nielicznych publikacji można odnaleźć badania dotyczące wpływu nanocząstek na właściwości jakościowe roślin. Przeprowadzone badanie przez Dimkpa i wsp. (2015) na przykładzie aplikacji CuNC o stężeniu 100–500 mg/kg przez 7 dni na fasoli spowodowało zmniejszenie zawartości Fe, Ca i Mg w jej liściach. Podobnie aplikacja CuNC w ilości 20 mg/l przez 15 dni na sałacie obniżyła stężenie P, Ca i Mg (Trujillo-Reyes i wsp. 2014), a w lucernie aplikacja CuNC zmniejszała zawartość P i Fe w jej pędach i korzeniach (Hong i wsp. 2015). Według Adrees i wsp. (2015) wpływ miedzi na pobieranie składników mineralnych przez rośliny i ich kumulacja zależy od gatunku rośliny, stężenia Cu w strefie korzeniowej, czasu trwania ekspozycji, dawki i warunków wzrostu roślin.

W przypadku przeprowadzonych badań szczególną uwagę skupiono na zawartości metali srebra oraz miedzi, a następnie na zawartości pozostałych ważnych dla roślin pierwiastków o największej zawartości w nasionach, a potem w kielkach rzepaku. Do pierwiastków o znacznej zawartości w kielkach rzepaku, należały między innymi: Ca, K, Mg, Na, P i S. W tabeli 1. i 2. przedstawiono wyniki analiz pierwiastków zawartych w kielkach rzepaku wyhodowanych z nasion zebranych w roku 2019 i 2020.

Analizowane kielki z nasion rzepaku charakteryzowały się następującą zawartością pierwiastków: ilość srebra po aplikacji na rośliny nanokolloidem srebra w czasie wzrostu w kielkach rzepaku w próbie kontrolnej wahała się w przedziale od 22,71 do 25,81 mg/kg. Aplikacja zarówno pojedyncza (x1), jak i podwójna (x2) nanokolloidu srebra przyczyniła się do podwyższenia zawartości tego pierwiastka w analizowanych kielkach. Po pojedynczej aplikacji (x1) rozpatrywanego nanokolloidu wzrost ten w analizowanych próbach był wyższy od tego w próbie kontrolnej w zakresie od 3,4% dla temperatury suszenia kielków 20°C do 18,49% dla temperatury suszenia roślin w 60°C . W przypadku podwójnej aplikacji (x2) preparatu zaobserwowano również podwyższenie jego ilości. Zawartość metalu była wyższa i wahała się w zakresie od 13,63% dla suszenia w 20°C do 31,74% dla temperatury 60°C . Aplikacja nanokolloidu miedzi na rośliny w obu wariantach doświadczenia również spowodowała podwyższenie zawartości srebra w kielkach rzepaku. Odpowiednio po pojedynczej aplikacji wzrost ten mieścił się w granicach od 1,43% dla kielków suszonych w temperaturze 20°C do 15,94% dla suszenia w temperaturze 60°C . Podwójna aplikacja nanokolloidu miedzi zwiększyła zawartość srebra w kielkach w porównaniu do próby kontrolnej. Otrzymane wartości były wyższe odpowiednio o 7,43% dla temperatury 20°C do 23,07% w temperaturze suszenia 60°C (tab. 1).

W kielkach rzepaku w próbie kontrolnej zawartość Cu wahała się w przedziale od 3,65 do 3,78 mg/kg. Aplikacja nanokolloidów w wariantach podwójnego opryskiwania

Tabela 1. Zawartość mikro- i makroelementów w suszonych kiełkach nasion rzepaku ze zbioru w 2019 roku
Table 1. Micronutrient and macronutrient content of dried rapeseed sprouts from the 2019 harvest

Rok Year	Pierwiastki Elements [mg/kg]	Temperatura Temperature [°C]	Kontrola Control	Nanokoloid srebra Nanocolloid silver AgNK		Nanokoloid miedzi Nanocolloid copper CuNK	
				x1	x2	x1	x2
2019	Ag	20	25,81 ± 3,16 aa	26,69 ± 2,10 ba	29,33 ± 3,20 ca	26,18 ± 2,90 ba	27,73 ± 3,16 da
		40	24,49 ± 4,01 aa	26,86 ± 2,02 ba	29,33 ± 3,15 ca	26,30 ± 3,15 ba	27,91 ± 3,33 da
		60	22,71 ± 3,20 ab	26,91 ± 3,00 ba	29,92 ± 3,16 ca	26,33 ± 2,95 ba	27,95 ± 3,21 ba
	Cu	20	3,78 ± 0,02 aa	2,98 ± 0,02 aa	4,08 ± 0,02 bb	4,12 ± 0,01 bb	4,61 ± 0,02 bb
		40	3,67 ± 0,02 aa	2,88 ± 0,03 aa	4,12 ± 0,04 bb	4,15 ± 0,03 bb	4,62 ± 0,03 bb
		60	3,65 ± 0,01 aa	3,11 ± 0,01 aa	4,17 ± 0,02 bb	4,18 ± 0,01 bb	4,84 ± 0,03 bb
	Ca	20	18 520 ± 5,01 aa	14 400 ± 4,07 bb	15 170 ± 4,12 cc	15 180 ± 5,20 cc	15 210 ± 6,12 cc
		40	18 550 ± 5,03 aa	14 120 ± 5,02 bb	15 270 ± 4,90 cc	15 190 ± 5,60 cc	15 220 ± 5,98 cc
		60	18 080 ± 5,06 aa	14 130 ± 5,17 bb	15 560 ± 5,39 cc	16 050 ± 5,49 dd	15 360 ± 6,15 cc
	K	20	96 120 ± 6,22 a	75 500 ± 6,36 bb	65 040 ± 5,04 cc	80 850 ± 6,21 ee	91 050 ± 6,44 ff
		40	94 520 ± 6,10 ab	75 300 ± 6,14 bb	65 640 ± 6,78 cc	80 790 ± 5,94 ee	91 055 ± 6,45 ff
		60	94 800 ± 6,80 ab	75 320 ± 6,23 bb	67 150 ± 6,87 cd	80 791 ± 5,98 ee	91 650 ± 5,98 ff
	Mg	20	3132 ± 1,34 aa	2570 ± 2,32 bb	2667 ± 1,98 bb	2659 ± 2,66 bb	2750 ± 2,56 cc
		40	3074 ± 1,43 aa	2587 ± 1,97 bb	2717 ± 1,68 bc	2672 ± 1,98 bb	2700 ± 2,79 cc
		60	3099 ± 1,26 aa	2639 ± 1,99 bb	2759 ± 2,01 cc	2834 ± 2,04 dd	2717 ± 1,97 cc
	Na	20	316,5 ± 4,16 aa	311,6 ± 4,01 aa	319 ± 3,98 aa	439 ± 4,77 dd	490 ± 3,08 fe
		40	327,5 ± 4,27 aa	313,8 ± 3,99 aa	317 ± 3,99 ba	425 ± 4,06 dd	491 ± 3,02 fe
		60	329,8 ± 4,12 aa	314,5 ± 4,05 ba	337 ± 4,03 bc	498 ± 4,04 ee	482 ± 4,02 fe
	P	20	8952 ± 3,41 aa	7124 ± 3,12 bb	7222 ± 3,66 cc	7222 ± 3,95 cc	7803 ± 4,02 ff
		40	8651 ± 3,12 ab	7128 ± 3,99 bb	7246 ± 3,15 cc	7217 ± 3,75 cc	7890 ± 4,36 ff
		60	8661 ± 3,04 ab	7435 ± 3,87 bc	7450 ± 3,18 bd	7580 ± 3,69 de	7894 ± 3,99 ff
	S	20	11 660 ± 3,44 aa	8542 ± 3,78 bb	9297 ± 3,78 cc	9395 ± 3,56 cc	10 360 ± 3,54 dd
		40	11 340 ± 3,79 aa	8371 ± 3,59 bc	9368 ± 3,09 cc	9385 ± 3,97 cc	10 260 ± 3,88 dd
		60	11 360 ± 3,79 aa	8385 ± 3,87 bc	9538 ± 3,88 cd	9420 ± 3,88 cc	10 261 ± 3,69 dd

Wartości średnie ± SD; a – statystycznie istotna różnica w stosunku do obiektu kontrolnego; b, c, d, e, f – średnie oznaczone tymi samymi literami w wierszach, kolumnach nie różnią się istotnie w stosunku do obiektu kontrolnego przy $p < 0,05$

Mean values ± SD; a – statistically significant difference from control; b, c, d, e, f – means marked by same letters in rows, columns not significantly different from control at $p < 0.05$

nanokoloidem srebra (x2 AgNK) oraz pojedynczego, jak i podwójnego nanokoloidem miedzi przyczyniła się do podwyższenia zawartości miedzi w suszonym produkcie. Aplikacja pojedyncza nanokoloidu srebra spowodowała obniżenie zawartości Cu w kiełkach rzepaku. Różnice te stanowiły wartość niższą od tej, którą uzyskano w próbie kontrolnej o wartości odpowiednio 21,16; 21,52 oraz 14,79% (tab. 1).

Zawartość wapnia w kiełkach dla prób kontrolnych stanowiła wartość mieszczącą się w przedziale od 18 080 do 18 550 mg/kg. Po aplikacji obu nanokoloidów we wszystkich wariantach doświadczenia zaobserwowano obniżenie zawartości tego pierwiastka. Wartości te były niższe odpowiednio od 21,84 do 23,88% dla pojedynczej oraz od 13,93 do 18,08% dla podwójnej aplikacji nanokoloidu srebra oraz od 11,22 do 18,11% dla pojedynczej, jak i od 15,04 do 17,95% dla podwójnej aplikacji nanokoloidu miedzi.

Zawartość potasu w suszonych kiełkach rzepaku w próbie kontrolnej mieściła się w przedziale od 94 520 do 96 120 mg/kg. Aplikacja wybranych dwóch preparatów na rośliny w czasie ich wzrostu przyczyniła się do obniżenia jego zawartości w suszonych roślinach. Znaczące obniżenie dla tego składnika w analizowanym materiale zaobserwowano po aplikacji podwójnej dawki nanokoloidu miedzi. Otrzymane wartości są niższe od tych otrzymanych w próbie kontrolnej odpowiednio o 3,32%, 3,66% oraz 5,27%.

Zawartość magnezu w wysuszonych kiełkach rzepaku w próbach kontrolnych stanowiła wartość mieszczącą się w przedziale od 3074 dla suszenia w temperaturze 40°C do 3132 mg/kg dla temperatury suszenia 20°C. Zastosowanie nanokoloidów na roślinach wpłynęło na zróżnicowanie zawartości magnezu w kiełkach z nasion rzepaku. We wszystkich wariantach zaobserwowano obniżenie jego zawartości.

Tabela 2. Zawartość mikro- i makroelementów w suszonych kiełkach nasion rzepaku ze zbioru w 2020 roku
Table 2. Micronutrient and macronutrient content of dried rapeseed sprouts from the 2020 harvest

Rok Year	Pierwiastki Elements [mg/kg]	Temperatura Temperature [°C]	Kontrola Control	Nanokoloid srebra Nanocolloid silver AgNK		Nanokoloid miedzi Nanocolloid copper CuNK	
				x1	x2	x1	x2
2020	Ag	20	23,60 ± 2,98 aa	26,16 ± 2,87 bb	29,33 ± 2,77 bb	23,18 ± 2,88 aa	23,73 ± 3,01 aa
		40	23,16 ± 2,87 aa	26,2 ± 2,69 bb	29,33 ± 2,79 cb	23,3 ± 2,92 aa	23,91 ± 3,05 aa
		60	25,31 ± 2,66 bb	26,34 ± 2,88 cb	29,92 ± 2,81 db	25,33 ± 2,78 cb	24,95 ± 2,78 cb
	Cu	20	3,06 ± 0,01 aa	3,05 ± 0,03 aa	4,08 ± 0,02 bb	4,12 ± 0,03 bb	4,61 ± 0,02 bb
		40	3,44 ± 0,02 aa	2,99 ± 0,02 aa	4,12 ± 0,02 bb	4,15 ± 0,02 bb	4,62 ± 0,01 bb
		60	3,64 ± 0,01 aa	2,31 ± 0,01 ba	4,18 ± 0,03 cb	4,18 ± 0,03 cb	4,84 ± 0,01 cb
	Ca	20	18 510 ± 4,05 aa	14 870 ± 5,08 bb	15 181 ± 4,07 bb	15 180 ± 4,68 bb	15 220 ± 4,87 bb
		40	18 522 ± 4,08 aa	15 050 ± 4,08 bb	15 272 ± 5,01 bb	15 190 ± 4,88 bb	15 225 ± 4,96 bb
		60	18 520 ± 4,05 aa	15 120 ± 4,09 bb	15 570 ± 4,99 bb	16 050 ± 4,79 bb	15 361 ± 4,91 bc
	K	20	96 360 ± 5,99 aa	75 360 ± 5,88 bb	65 040 ± 6,98 cc	80 859 ± 5,06 dd	91 061 ± 6,02 aa
		40	96 470 ± 5,98 aa	75 358 ± 5,84 bb	65 640 ± 5,99 cc	80 792 ± 5,99 dd	91 065 ± 6,01 aa
		60	96 486 ± 5,81 aa	75 650 ± 5,90 bb	67 150 ± 6,03 cc	80 793 ± 5,05 dd	91 655 ± 6,01 aa
	Mg	20	3123 ± 1,55 aa	2519 ± 1,76 bb	2667 ± 1,86 cb	2659 ± 1,48 cc	2750 ± 1,77 cb
		40	3155 ± 1,65 aa	2519 ± 1,23 bb	2717 ± 1,54 cb	2672 ± 1,49 cc	2700 ± 2,03 cb
		60	3153 ± 1,75 aa	2510 ± 1,45 bb	2759 ± 1,68 cb	2834 ± 1,89 dd	2717 ± 2,83 cb
	Na	20	314 ± 3,99 aa	312,6 ± 4,78 aa	321,5 ± 4,67 aa	429 ± 4,06 bc	495 ± 4,06 bd
		40	316 ± 4,03 aa	314,8 ± 4,05 aa	327 ± 4,55 bb	425 ± 4,88 cc	498 ± 4,03 dd
		60	316 ± 4,07 aa	314,5 ± 4,08 aa	337 ± 4,57 bb	438 ± 4,09 cd	490 ± 3,99 dd
	P	20	8952 ± 3,76 aa	7130 ± 4,05 bb	7225 ± 3,08 bb	7221 ± 4,93 bb	7805 ± 3,87 cc
		40	8651 ± 3,98 ab	7138 ± 3,99 bb	7236 ± 3,06 bb	7225 ± 4,36 bb	7878 ± 3,98 cc
		60	8661 ± 3,54 ab	7239 ± 4,07 bb	7350 ± 3,55 cc	7380 ± 3,99 bb	7884 ± 4,07 cc
	S	20	11 360 ± 3,46 aa	8550 ± 3,89 bb	9297 ± 3,37 cc	9395 ± 3,55 cc	10 360 ± 3,47 dd
		40	11 349 ± 3,84 aa	8361 ± 3,68 bc	9368 ± 3,35 cc	9385 ± 4,01 cc	10 260 ± 3,48 dd
		60	11 580 ± 3,09 aa	8371 ± 3,94 bc	9538 ± 3,66 cd	9420 ± 3,69 cd	10 261 ± 3,99 dd

Wartości średnie ± SD; a – statystycznie istotna różnica w stosunku do obiektu kontrolnego; b, c, d, e, f – średnie oznaczone tymi samymi literami w wierszach, kolumnach nie różnią się istotnie w stosunku do obiektu kontrolnego przy $p < 0,05$
 Mean values ± SD; a – statistically significant difference from control; b, c, d, e, f – means marked by same letters in rows, columns not significantly different from control at $p < 0,05$

Zawartość sodu w kiełkach rzepaku w próbach kontrolnych mieściła się w przedziale od 317 dla temperatury suszenia 20°C do 330 mg/kg dla temperatury 60°C. Po zastosowaniu pojedynczej dawki nanokoloidu srebra na rośliny w czasie ich wzrostu, a następnie wyhodowanych kiełków poddanych suszeniu z tych nasion zaobserwowano obniżenie zawartości omawianego pierwiastka w porównaniu do prób kontrolnych. Otrzymane wartości były niższe odpowiednio o 1,54%; 4,18% oraz 4,63%. Po podwójnej aplikacji nanokoloidu srebra i suszeniu kiełków w temperaturze 40°C również zaobserwowano obniżenie zawartości sodu w kiełkach o 3,2%. W pozostałych wariantach doświadczenia obserwowano podwyższenie zawartości badanego pierwiastka.

Zawartość fosforu w kiełkach rzepaku w próbie kontrolnej w zależności od przyjętego wariantu doświadczenia mieściła się w przedziale od 8651 do 8952 mg/kg.

W każdym założonym doświadczeniu obserwowano obniżenie zawartości fosforu o co najmniej 8,79% w odniesieniu do prób kontrolnych.

Obecność siarki w kiełkach nasion rzepaku w próbach kontrolnych mieściła się w przedziale od 11 340 dla temperatury 40°C do 11 660 mg/kg w temperaturze suszenia 20°C. We wszystkich wariantach przyjętego doświadczenia aplikacja nanokoloidów oraz suszenie próbek przyczyniły się do obniżenia zawartości siarki w odniesieniu do kontroli. Największe różnice odnotowano w przypadku pojedynczej aplikacji nanokoloidu srebra. Różnice te stanowiły odpowiednio niższe wartości w porównaniu do prób kontrolnych o 26,74; 26,18 oraz 26,18% (tab. 1).

W tabeli 2. przedstawiono wyniki zawartości analizowanych pierwiastków w kiełkach z nasion rzepaku z uprawy w 2020 roku. Ilość srebra po aplikacji na rośliny nanokoloidu

idu srebra w czasie wegetacji w kielkach rzepaku w próbie kontrolnej wahała się w przedziale od 23,16 do 25,31 mg/kg. Aplikacja nanokolloidów na rośliny w czasie ich wzrostu niezależnie od wariantu doświadczenia przyczyniła się do zwiększenia ilości srebra w suszonych kielkach rzepaku. Wyjątek stanowi przypadek aplikacji pojedynczej oraz podwójnej nanokolloidu miedzi przy suszeniu materiału w temperaturze 20 oraz 60°C. Tu zaobserwowano obniżenie zawartości tego pierwiastka o wartości odpowiednio równej 1,77 oraz 1,42%.

Zawartość miedzi w suszonych kielkach rzepaku w próbach kontrolnych mieściła się w przedziale od 3,06 przy temperaturze 20°C do 3,64 mg/kg dla temperatury suszenia 60°C. Pojedyncza aplikacja nanokolloidu srebra we wszystkich przyjętych wariantach doświadczenia przyczyniła się do obniżenia zawartości tego pierwiastka w analizowanym materiale. Otrzymane wartości były niższe od tych w próbach kontrolnych odpowiednio o 0,32; 13,08 oraz 36,53%. W pozostałych przypadkach aplikacji nanokolloidu obserwowano zwiększenie zawartości miedzi w kielkach rzepaku.

Zawartość wapnia w analizowanych próbach kontrolnych kielków rzepaku wahała się w granicach od 18 510 (20°C) do 18 522 mg/kg (60°C). Aplikacja nanokolloidu na rośliny w czasie ich wzrostu przyczyniła się we wszystkich przypadkach do obniżenia zawartości rozpatrywanego pierwiastka niezależnie od zastosowanej temperatury suszenia kielków. Najwyższe różnice odnotowano po pojedynczej aplikacji nanokolloidu srebra. Były one niższe od wartości otrzymanych w próbach kontrolnych odpowiednio o 19,66; 18,74 oraz 18,35%.

Zawartość potasu w suszonych kielkach rzepaku w próbie kontrolnej mieściła się w przedziale od 96 360 (20°C) do 96 486 mg/kg (60°C). Aplikacja nanokolloidów w czasie wzrostu roślin rzepaku przyczyniła się niezależnie od temperatury suszenia kielków do obniżenia zawartości rozpatrywanego pierwiastka w każdym wariantcie doświadczenia. Najniższe różnice w porównaniu do prób kontrolnych odnotowano w przypadku podwójnej aplikacji nanokolloidu miedzi. Różnice między otrzymanymi wartościami były niższe odpowiednio o 5,49% (20°C); 5,60% (40°C) i 5,0% (60°C).

Zawartość magnezu w wysuszonych kielkach rzepaku w próbach kontrolnych stanowiła wartość mieszczącą się w przedziale od 3123 dla suszenia w temperaturze 20°C do 3155 mg/kg dla temperatury suszenia 40°C. Aplikacja nanokolloidów na rośliny przyczyniła się do obniżenia za-

wartości niniejszego pierwiastka we wszystkich wariantach doświadczenia. Największą różnicę między kielkami rzepaku w próbach kontrolnych, a przyjętymi wariantami badań obserwowano dla pojedynczej aplikacji nanokolloidu srebra. Wartości te były niższe kolejno o 19,34; 20,16 oraz 20,39%.

Zawartość sodu w kielkach rzepaku w próbach kontrolnych mieściła się w przedziale od 314 dla temperatury suszenia 20°C do 316 mg/kg dla temperatury 60°C. Zastosowanie nanopreparatu z zawartością srebra w pojedynczej dawce na rośliny w czasie ich wzrostu przyczyniło się do obniżenia ilości sodu w kielkach rzepaku. Obniżenie jego zawartości w odniesieniu do próby kontrolnej było niższe odpowiednio o następujące wartości: 0,44; 0,37 oraz 0,47%. W pozostałych wariantach doświadczenia ilość analizowanego pierwiastka wzrosła.

Zawartość fosforu w kielkach rzepaku w próbie kontrolnej w zależności od przyjętego wariantu doświadczenia mieściła się w przedziale od 8952 do 8661 mg/kg. Aplikacja wszystkich wariantów nanokolloidów na rośliny oraz ich suszenie przyczyniły się do obniżenia jego zawartości w kielkach rzepaku.

Obecność siarki w kielkach nasion rzepaku w próbach kontrolnych mieściła się w przedziale od 11 349 dla temperatury 40°C do 11 580 mg/kg w temperaturze suszenia 60°C. We wszystkich wariantach przyjętego doświadczenia aplikacja nanokolloidów oraz suszenie próbek przyczyniło się do obniżenia jej zawartości w odniesieniu do kontroli.

Wnioski / Conclusions

1. W wyniku przeprowadzonych badań, tj. po zastosowaniu opryskiwania nanokolloidami (srebra i miedzi) na rośliny rzepaku w czasie ich wzrostu, pozyskaniu z nich nasion, wyhodowaniu kielków i wysuszeniu na cele spożywcze wykazano, że w większości przypadków nastąpiło obniżenie zawartości analizowanych pierwiastków w badanych próbach.
2. Uzyskane wyniki nie są jednoznaczne, a zdobyta wiedza nie wyjaśnia wszystkich problemów dotyczących uprawy niniejszej rośliny, dlatego proces zastosowania nanocząstek/nanokolloidów wymaga dalszych badań w celu otrzymania stabilnych danych i uzyskania pełnowartościowej żywności.

Literatura / References

- Adrees M., Ali S., Rizwan M., Ibrahim M., Abbas F., Farid M., Zia-Ur-Rehman M., Irshad M.K., Bharwana S.A. 2015. The effect of excess copper on growth and physiology of important food crops: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 22 (11): 8148–8162. DOI: 10.1007/s11356-015-4496-5
- Alavi S., Dehpour A. 2010. Evaluation of the nanosilver colloidal solution in comparison with the registered fungicide to control greenhouse cucumber downy mildew disease in the north of Iran. *Proceedings of the VI International Postharvest Symposium, Antalya, Turkey, 11 November 2010: 1643–1646.*

- Barrena R., Casals E., Colon J., Font X., Sanchez A., Puentes V. 2009. Evaluation of the ecotoxicity of model nanoparticles. *Chemosphere* 75 (7): 850–857. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2009.01.078
- Bhardwaj D., Tomar R.J. 2011. Use of surface modified inorganic nano materials as slow release nitrogen fertilizer. s. 171–184. W: *Sustainable Agricultural Development* (M. Behnassi, S.A. Shahid, J. D'Silva, red.). Springer + Science Business Media, London, UK, 315 ss. ISBN 978-9400705180.
- Carroll K.J., Reveles J.U., Shultz M.D., Khanna S.N., Carpenter E.E. 2011. Preparation of elemental Cu and Ni nanoparticles by the polyol method: an experimental and theoretical approach. *The Journal of Physical Chemistry C* 115 (6): 2656–2664. DOI: 10.1021/jp1104196
- Chatterjee A.K., Chakraborty R., Basu T. 2014. Mechanism of antibacterial activity of copper nanoparticles. *Nanotechnology* 25 (13): 135101. DOI: 10.1088/0957-4484/25/13/135101
- Chhipa H. 2017. Nanofertilizers and nanopesticides for agriculture. *Environmental Chemistry Letters* 15 (1): 15–22. DOI: 10.1007/s10311-016-0600-4
- Dimkpa C.O., McLean J.E., Britt D.W., Anderson A.J. 2015. Nano-CuO and interaction with nano-ZnO or soil bacterium provide evidence for the interference of nanoparticles in metal nutrition of plants. *Ecotoxicology* 24 (1): 119–129. DOI: 10.1007/s10646-014-1364-x
- Fernandes J.C., Henriques F.S. 1991. Biochemical, physiological, and structural effects of excess copper in plants. *The Botanical Review* 57: 246–273. DOI: 10.1007/BF02858564
- Ghidan A.Y., Al Antary T.M. 2019. Applications of Nanotechnology in Agriculture. ISBN 978-1-78985-978-2. DOI: 10.5772/intechopen.88390
- Ghormade V., Deshpande M.V., Paknikar K.M. 2011. Perspectives for nano-biotechnology enabled protection and nutrition of plants. *Biotechnology Advances* 29 (6): 792–803. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2011.06.007
- GUS 2013. *Nanotechnologia w Polsce w 2012 r.* Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 8 ss.
- Hasan S. 2015. A review on nanoparticles: their synthesis and types. *Research Journal of Recent Sciences* 4: 9–11.
- Hatami M., Ghorbanpour M. 2013. Effect of nanosilver on physiological performance of *Pelargonium* plants exposed to dark storage. *Journal of Horticultural Research* 21 (1): 15–20. DOI: 10.2478/johr-2013-0003
- Hong J., Rico C.M., Zhao L., Adeleye A.S., Keller A.A., Peralta-Videa J.R., Gardea-Torresdey J.L. 2015. Toxic effects of copper-based nanoparticles or compounds to lettuce (*Lactuca sativa*) and alfalfa (*Medicago sativa*). *Environmental Science Process Impacts* 17 (1): 177–185. DOI: 10.1039/c4em00551a
- Kachel M. 2018. Wpływ nanokolloidów metali na wybrane parametry jakości nasion, roślin i oleju z rzepaku jarego. Rozprawa habilitacyjna. Komitet Inżynierii Rolniczej, Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków, 145 ss. ISBN 978-83-64377-22-8.
- Kaveh R., Li Y.S., Ranjbar S., Tehrani R., Brueck C.L., Van Aken B. 2013. Changes in *Arabidopsis thaliana* gene expression in response to silver nanoparticles and silver ions. *Environmental Science & Technology* 47 (18): 10637–10644. DOI: 10.1021/es402209w
- Khiew P., Chiu W., Tan T., Radiman S., Abd-Shukur R., Chia C.H. 2011. Capping effect of palm-oil based organometallic ligand towards the production of highly monodispersed nanostructured material. s. 189–219. W: *Palm Oil: Nutrition, Uses and Impacts* (M.L. Palmetti, red.). Nova Science Publishers Inc, 321 ss. ISBN 978-1612099217.
- Klaine S.J., Alvarez P.J.J., Batley G.E., Fernandes T.F., Handy R.D., Lyon D.Y., Mahendra S., McLaughlin M.J., Lead J.R. 2008. Nanomaterials in the environment: behavior, fate, bioavailability, and effects. *Environmental Toxicology and Chemistry* 27 (9): 1825–1851. DOI: 10.1897/08-090.1
- Lewicki P.P. 2010. Kiełki nasion jako źródło cennych składników odżywczych. [Sprouts as source of valuable nutrients]. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość* 6 (73): 18–33.
- Lin D., Xing B. 2007. Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environmental Pollution* 150 (2): 243–250. DOI: 10.1016/j.envpol.2007.01.016
- Lombi E., Nowack B., Baun A., McGrath S.P. 2012. Evidence for effects of manufactured nanomaterials on crops is inconclusive. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109 (49): E3336. DOI: 10.1073/pnas.1214934109
- Maksymiec W. 1997. Effect of copper on cellular processes in higher plants. *Photosynthetica* 33 (13): 321–342. DOI: 10.1023/A:1006818815528
- McGeer J.C., Playle R.C., Wood C.M., Galvez F. 2000. A physiologically based biotic ligand model for predicting the acute toxicity of waterborne silver to rainbow trout in freshwaters. *Environmental Science and Technology* 34 (19): 4199–4207. DOI: 10.1021/es9912168
- Monica R.C., Cremonini R. 2009. Nanoparticles and higher plants. *Caryologia* 62 (2): 161–165. DOI: 10.1080/00087114.2004.10589681
- Musante C., White J.C. 2010. Toxicity of silver and copper to *Cucurbita pepo*, differential effects of nano and bulk-size particles. *Environmental Toxicology* 27 (9): 510–517. DOI: 10.1002/tox.20667
- Musee N., Thwala M., Nota N. 2011. The antibacterial effects of engineered nanomaterials: implications for wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Monitoring* 13 (5): 1164–1183. DOI: 10.1039/C1EM10023H
- Oliveira S.M., Brandão T.R.S., Silva C.L.M. 2016. Influence of drying processes and pretreatments on nutritional and bioactive characteristics of dried vegetables: a review. *Food Engineering Reviews* 8 (2): 134–163. DOI: 10.1007/s12393-015-9124-0
- Phu D.V., Lang V.T.K., Lan N.T.K., Duy N.N., Chau N.D., Du B.D., Cam B.D., Hien N.Q. 2010. Synthesis and antimicrobial effects of colloidal silver nanoparticles in chitosan by γ -irradiation. *Journal of Experimental Nanoscience* 5 (2): 169–179. DOI: 10.1080/17458080903383324
- Rudy S. 2009. Energy consumption in the freeze - and convection-drying of garlic. [Energochłonność sublimacyjnego i konwekcyjnego suszenia czosnku]. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa/Teka Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture* 9: 259–266.
- Seif Sahandi M., Sorooshzadeh A., Rezazadeh H.S., Naghdibadi H.A. 2011. Effect of nano silver and silver nitrate on seed yield of borage. *Journal of Medicinal Plants Research* 5 (5): 706–710.

- Shelar G.B., Chavan A.M. 2015. Myco-synthesis of silver nanoparticles from *Trichoderma harzianum* and its impact on germination status of oil seed. *Biolife* 3 (1): 109–113. DOI: 10.17812/blj314
- Steinitz B., Bilavendran A.D. 2011. Thiosulfate stimulates growth and alleviates silver and copper toxicity in tomato root cultures. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 107 (2): 355–363. DOI: 10.1007/s11240-011-9987-6
- The Royal Society and The Royal Academy of Engineering 2004. *Nanoscience and nanotechnologie: opportunities and uncertainties*. London, UK, 116 ss. ISBN 0-85403-604-0.
- Trujillo-Reyes J., Majumdar S., Botez C.E., Peralta-Videa J.R., Gardea-Torresdey J.L. 2014. Exposure studies of core-shell Fe/Fe₃O₄ and Cu/CuO NPs to lettuce (*Lactuca sativa*) plants: Are they a potential physiological and nutritional hazard? *Journal Hazard Materials* 267: 255–263. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.11.067
- Vannini C., Domingo G., Onelli E., Prinsi B., Marsoni M., Espen L., Bracale M. 2013. Morphological and proteomic responses of *Eruca sativa* exposed to silver nanoparticles or silver nitrate. *PLoS One* 8 (7): e68752. DOI: 10.1371/journal.pone.0068752
- Vinković T., Novák O., Strnad M., Goessler W., Jurašin D.D., Parađiković N., Vrček I.V. 2017. Cytokinin response in pepper plants (*Capsicum annuum* L.) exposed to silver nanoparticles. *Environmental Research* 156: 10–18. DOI: 10.1016/j.envres.2017.03.015
- Wood C.M., Hogstrand C., Galvez F., Munger R.S. 1996. The physiology of waterborne silver toxicity in freshwater rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) 1. The effects of ionic Ag⁺. *Aquatic Toxicology* 35 (2): 93–109. DOI: 10.1016/0166-445-X(96)00003-3
- Zheng L., Hong F., Lu S., Liu C. 2005. Effect of nano-TiO₂ on strength of naturally aged seeds and growth of spinach. *Biological Trace Element Research* 104 (1): 83–92. DOI: 10.1385/BTER:104:1:083