

## Wynik ekspozycji nasion pieprzycy siewnej (*Lepidium sativum* L.) na promieniowanie neutronowe

**Streszczenie.** Promieniowanie jonizujące powoduje jonizację i/lub wzbudzenie atomów ośrodka materialnego, z którym oddziałuje. W zależności od mechanizmu oddziaływania mówimy o bezpośrednim i pośrednim promieniowaniu jonizującym. Pierwsza grupa obejmuje cząstki naładowane elektrycznie (alfa, beta, protony), które jonizują głównie na drodze oddziaływań kulombowskich. Z drugiej strony, cząstki obojętne (np. neutrony) i wysokoenergetyczne promieniowanie elektromagnetyczne (promienie X i  $\gamma$ ) oddziałują z materią pośrednio poprzez efekt fotoelektryczny, rozpraszanie Comptona i tworzenie par elektron-pozyton, a także poprzez reakcje jądrowe. W pracy przedstawiono wynik eksperymentu, w którym nasiona Pieprzycy siewnej (*Lepidium sativum* L.) poddano działaniu promieniowania neutronowego. W eksperymencie wykorzystano komercyjne źródło Cf-252 (aktywność źródła w dniu eksperymentu A 11 MBq, wydatek neutronów  $W = 1,34E + 6$  n/s.) [5-7]. Czas ekspozycji wahał się od 5 sekund do 11 godzin.

**Abstract.** Ionizing radiation causes ionization and / or excitation of atoms of the material medium with which it interacts. Depending on the mechanism of interaction, we speak of direct and indirect ionizing radiation. The first group includes electrically charged particles (alpha, beta, protons), which ionize mainly by Coulomb interactions. On the other hand, neutral particles (e.g. neutrons) and high-energy electromagnetic radiation (X and  $\gamma$  rays) interact with matter indirectly through the photoelectric effect, Compton scattering, electron-positron pair production, and also by nuclear reactions. The paper presents the result of an experiment in which seeds *Lepidium sativum* L. were exposed to neutron radiation. A commercial Cf-252 neutron source was used in the experiment (source activity on the day of the experiment A = 11 MBq, yield of neutron source  $W = 1.34E + 6$  n/s.) [5-7]. The exposure time ranged from 5 seconds to 11 hours. (Result of seeds *Lepidium sativum* L. exposure to ionizing radiation).

**Słowa kluczowe:** neutrony, ekspozycja, nasiona, kiełkowanie.

**Keywords:** neutrons, exposure, seeds, germination.

### Wstęp

Metody fizyczne w agrotechnice stanowią uzupełnienie zabiegów chemicznych i biologicznych stosowanych w odniesieniu do materiału siewnego czy plonu przeznaczanego do przechowywania. Pozytywny wpływ promieniowania elektromagnetycznego został wykazany w przypadku stosowania, w odniesieniu do materiału roślinnego, pola magnetycznego, ultrafioletu, mikrofal, lasera czy promieniowania jonizującego (stosowanego w odniesieniu do roślin papyrki; promieniowanie gamma z udziałem etyloiminy – wykazano wzrost zawartości kapsaicyny) [1-8].

Pieprzycy siewna (*Lepidium sativum* L.) to gatunek uprawnej rośliny jednorocznej z rodziny kapustowatych (*Brassicaceae*) cechującej się szybkim wzrostem, szczególnie w początkowych okresach rozwojowych; od fazy heterotroficznej do fazy autotroficznej (kiedy kiełek uzyskuje całkowitą zdolność do autotroficznego życia i staje się samodzielną siewką). Powyższe sprawia, że roślina ta często jest wykorzystywana, jako obiekt badań, w ścisłych doświadczeniach uprawowych. Przykładem mogą być doświadczenia Kusior i in. [9] gdzie badano wpływ światła o długości fal  $\lambda=650$  nm,  $\lambda=570$  nm,  $\lambda=550$  nm, i  $\lambda=490$  nm) na rozwój tych roślin. Wykazano, w zależności od barwy światła, różnice w zawartości chlorofilu A i B, polifenoli oraz FRAP. Podobnie Liptai i in. [10], stosując długotrwałe napromienianie mikrofalami o częstotliwości 2.412 - 2.472 GHz stwierdzili zahamowanie wzrostu Pieprzycy siewnej. Badanie wpływu światła na rośliny prowadzone były także przez [11]. Badanie wpływu innych czynników prowadzone jest przez inne ośrodki naukowe i tak np. autorzy pracy [12] analizują wpływ podłoża pokrytego warstwą cienką srebra na wzrost nasion z rodziny *Fabaceae*.

Promieniowanie jonizujące ma zdolność do jonizacji ośrodka, z którym oddziałuje. W odniesieniu do układów biologicznych oddziaływanie promieniowania jonizującego

odbywa się na skutek wzbudzenia i jonizacji atomów żywych komórek a także przez procesy radiolizy wody i oddziaływanie powstających w nich wolnych rodników z molekułami budującymi różne struktury biologiczne [13,14].

Promieniowanie neutronowe jest formą promieniowania jonizującego pośrednio. Do podstawowych procesów zachodzących przy przechodzeniu neutronów przez materię (w szczególności organiczną) należą:

- reakcje jądrowe – gdy na skutek wchłonięcia neutronu atom ulega wzbudzeniu emitując przy tym energię w postaci kwantu gamma,
- reakcje jądrowe – w których neutron zderza się z lekkimi jądrami ośrodka co może doprowadzić do emisji protonów, cząstek alfa lub cięższych jonów które mają zdolność bezpośredniej jonizacji ośrodka,
- reakcje rozproszenia na protonach ośrodka w wyniku których proton uzyskuje energię wystarczającą do jonizacji ośrodka.

Promieniowanie jonizujące w większym lub mniejszym stopniu oddziałuje na organizmy żywe. Skutek uzależniony jest jednakże od zaabsorbowanej dawki. Podnieść należy, że chemiczne i biologiczne efekty promieniowania jonizującego wynikają z dwóch typów oddziaływania: bezpośredniego (depozycja energii promieniowania bezpośrednio w makrocząsteczce biologicznej) i pośredniego (absorpcja energii promieniowania przez ośrodek otaczający makrocząsteczkę biologiczną, co prowadzi do powstania produktów pośrednich). Depozycja energii może generować tworzenie produktów pośrednich (tworzone są one niejednorodnie a ich zasięg ograniczony jest przez szybkość dyfuzji). Nie każdy zatem kontakt z promieniowaniem jonizującym musi ograniczać wzrost i rozwój rośliny czy przyrost jej biomasy (np. aby rodnik OH, o wysokiej reaktywności, mógł uszkodzić DNA musiałby powstać nie dalej niż 3 nm od niego). Mogą zatem istnieć pewne dawki (zakresy dawek) promieniowania

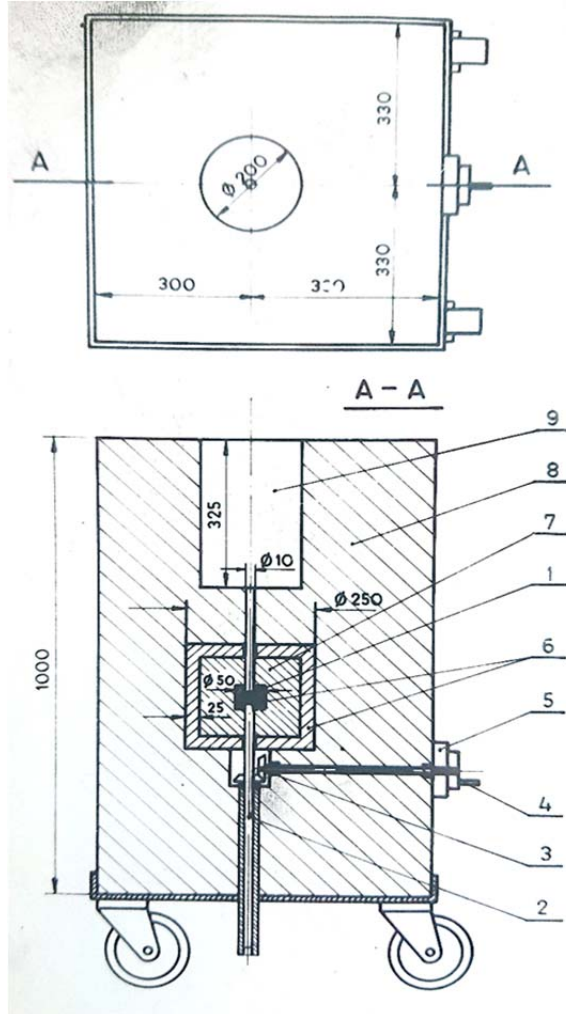
jonizującego, których działanie będzie miało stymulujący wpływ na rośliny [15,16].

Celem pracy było zbadanie wpływu promieniowania neutronowego na wybrane parametry procesu kiełkowania Pieprzycy siewnej (*Lepidium sativum* L.).

### Obiekt badań i metody

Badania realizowano w roku 2022 w warunkach laboratoryjnych. Obiektem badań były nasiona pieprzycy siewnej (*Lepidium sativum* L.) pozyskane bezpośrednio od certyfikowanego producenta (masa 1000 nasion rzeżuchy wynosi około 2,5 g - w 1 g materiału siewnego znajduje się około 400 nasion). W doświadczeniu badano zdolność kiełkowania nasion oraz przyrost biomasy roślin.

### Stanowisko do ekspozycji nasion na promieniowanie neutronowe



Rys.1. Urządzenie do napromieniowania materiału biologicznego neutronami (1 – źródło Cf-252, 2 – pręt teflonowy na którym umieszczone jest źródło, 3 – przekładnia zębata, 4 – korba przekładni krokowej; mechanizm podnoszenia źródła, 5 – przekładnia krokowa, 6 – osłona ołowiana (przed promieniowaniem ze źródła umieszczonego w pozycji spoczynkowej), 7 – mieszanka parafiny i kwasu borowego, 8 – polietylen, 9 – kanał aktywacyjny umożliwiający umieszczenie wkładki aktywacyjnej)

W celu napromienienia nasion strumieniem neutronów zastosowano komercyjne źródło Cf-252 (aktywność źródła w dniu wykonywania eksperymentu  $A = 11 \text{ MBq}$ , wydatek neutronów  $W = 1,34E+6 \text{ n/s}$ ) zamknięte w stalowej kapsule. Schemat obudowy urządzenia, wewnątrz którego umieszczone jest źródło, przedstawiono na rysunku 1.

Szczegółowy opis stanowiska znajduje się w pracy Cichanowskiego i in. [17].

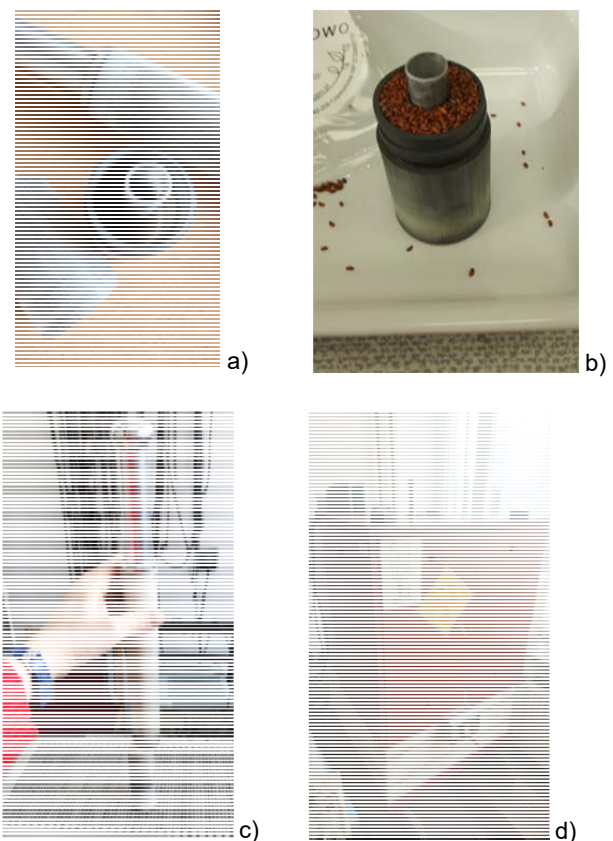
Napromieniane próbki ziaren umieszczano w pojemniku polietylenowym w kształcie dwuściennego cylindra (rys. 2ab) i umieszczano w kanale aktywacyjnym urządzenia. W trakcie ekspozycji próbek źródło umieszczone było w pozycji roboczej, gwarantującej ułożenie źródła w geometrycznym środku pojemnika na próbki.

### Ekspozycja nasion na promieniowanie neutronowe

Nasiona umieszczano we wnętrzu polietylenowego, dwuściennego cylindra w taki sposób, aby wypełniły całą jego objętość (rys. 2b). Cylinder zakręcano, nakręcano trzpień z rączką i wraz z nasionami umieszczano we wnętrzu kanału aktywacyjnego (rys.1 – pkt 9, rys. 2cd) urządzenia do napromieniania neutronami. Czas napromieniania liczono od momentu dotknięcia podstawy kanału aktywacyjnego przez dolną część cylindra do chwili całkowitego jego wyciągnięcia z kanału.

Nasiona eksponowano na promieniowanie neutronowe przez czas: 11 i 6 [godz], 45, 15, 5, 3 i 1 [min] oraz 30, 15 i 5 [s] – co stanowiło kombinacje doświadczenia; każda kombinacja obejmowała 3 replikacje. Wprowadzono próbę kontrolną (nie poddaną działaniu promieniowania jonizującego).

Ze względu na złożone widmo energetyczne neutronów penetrujących objętość próbki oraz reakcje jądrowe zachodzące w materiale samej próbki a także w materiale otaczającym próbkę [18,19] w przedstawionym opisie ograniczono się jedynie do podania całkowitego strumienia neutronów przechodzących przez objętość napromienianej próbki. Oszacowana wartość strumienia wynosi  $1,05 \cdot 10^6$  [neutronów/s].



Rys.2. Proces ekspozycji nasion na promieniowanie neutronowe (a) – polietylenowy cylinder dwuścienny na próbki, b) – widok cylindra wypełnionego nasionami, c) widok cylindra z nakręcaną rączką, d) urządzenie, w którym zamontowane jest źródło Cf-252

### Przygotowanie nasion do kiełkowania

Spośród napromieniowanych nasion, dla każdej replikacji eksperymentu, losowo wyłoniono 100 ziaren (1 kombinacja = 300 ziaren), które umieszczano na materiale zwilżonym wodą, w szalkach Petriego, pełniących rolę kiełkownika. Zastosowany materiał na podłoże (rodzaj i masa) był taki sam w każdym kiełkowniku, w trakcie doświadczenia roślinom zapewniono identyczne dawki nawadniające. Określono masę początkową kompletnych kiełkowników (szalka + materiał + woda + nasiona). Kiełkowniki wraz z nasionami pozostawiono bez dostępu światła na okres 24 godzin w temperaturze 22°C. Nasiona podkiełkowywano przy udziale światła dziennego, w temperaturze 20-22°C i wilgotności względnej powietrza 55-60%, w pomieszczeniu laboratorium [3,20].

### Badanie procesu kiełkowania nasion

Ziarna podkiełkowywano przez 6 dób, badanie przeprowadzono przy kroku pomiarowym 24 h wyznaczając kolejne parametry procesu kiełkowania nasion rzeżuchy [3,21]:

- liczbę nasion aktywnie kiełkujących (zgodnie z PN-R-65950: 1994 oraz standardami ISTA),
- wskaźnik kiełkowania ( $W_k$ ) w oparciu o wzór (1)

$$(1) \quad W_k = \frac{N_t}{N_0}$$

gdzie:  $N_t$  – liczba wykiełkowanych nasion w czasie  $t$ ,  $N_0$  – liczba wykiełkowanych nasion w próbie kontrolnej w czasie  $t$ .

W oparciu o powyższe parametry oraz formułę (2) zobrazowano przebieg procesu kiełkowania w postaci krzywej logistycznej.

$$(2) \quad N_t = \frac{N_k}{1 + (N_k - 1) \exp(-\alpha N_k (t - t_0))}$$

gdzie:  $N_k$  – końcowa liczba wykiełkowanych nasion (%),  $N_t$  – liczba wykiełkowanych nasion po danym czasie  $t$  (%),  $\alpha$  – współczynnik szybkości kiełkowania,  $t_0$  – czas pierwszego wykiełkowanego nasiona (h).

W ostatniej dobie eksperymentu określono masę końcową kiełkowników z wyrosłymi roślinami (laboratoryjna waga precyzyjna o dokładności pomiaru 0.01 g). Różnica między masami, końcową i początkową kiełkowników, pozwoliła na uzyskanie wartości biomasy roślin wyrosłych w trakcie doświadczenia. Zależność między przyrostami biomasy zobrazowano graficznie i opisano matematycznie funkcją liniową.

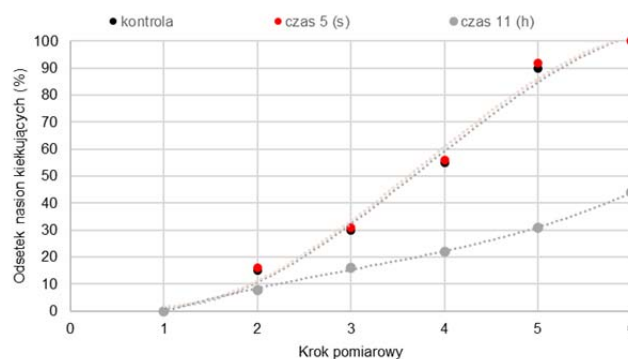
### Analiza wyników

Wyniki badań opracowano w programie STATISTICA 13.3 na założonym poziomie istotności  $\alpha=0,05$ . Krzywe logistyczne oraz zależności liniowe analizowano metodą najmniejszych kwadratów błędów. Przyrost biomasy roślin badano poprzez wskaźnik korelacji liniowej Pearsona. Dopasowanie krzywych regresji do danych pomiarowych określano wartością współczynnika determinacji. Wyniki z poszczególnych replikacji, w obrębie tej samej kombinacji, uśredniano wg średniej arytmetycznej. Błąd pomiaru wyrażono poprzez rozrzut estymatorów z próby wokół parametru badanej populacji, wyrażono poprzez błąd standardowy (odchylenie standardowe dla rozkładu średniej z próby) i zwizualizowano jak słupki błędów. Charakter i liczebność populacji danych doświadczalnych uzyskanych z eksperymentu, w zakresie zdolności kiełkowania nasion, wymusiła zastosowanie testu nieparametrycznego do badania istotności różnic między kombinacjami

eksperymentu. Zastosowano test U Manna-Whitneya dla grup niezależnych (procedura ta testuje równość dwóch rozkładów; założono zatem, że badane rozkłady mają ten sam kształt) z poprawką na ciągłość; przyjęto  $\alpha = 0,05$ .

### Wyniki i dyskusja

Ze względu na obszerność materiału doświadczalnego i wyników badań oraz przyjęty sposób ich analizy prezentację rezultatów, dotyczących wpływu promieniowania neutronowego na zdolność kiełkowania nasion, ograniczono do kombinacji skrajnych (czas napromieniania 5 s i 11 godzin) i próby kontrolnej.

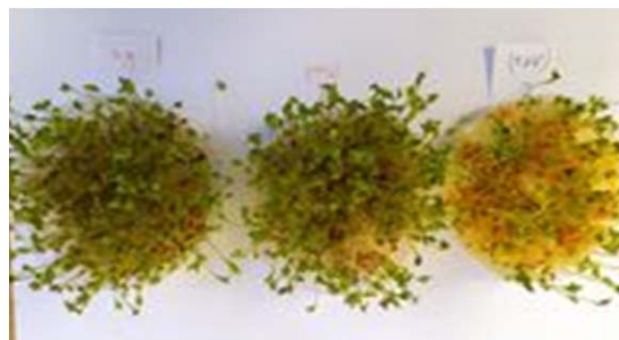


Rys. 3. Krzywe logistyczne - zdolności kiełkowania nasion w wybranych kombinacjach eksperymentu

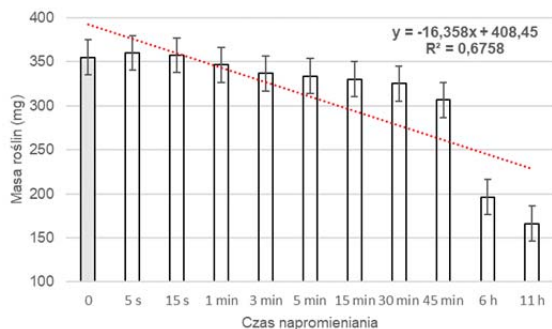
Tabela 1. Równania regresji dla uzyskanych krzywych logistycznych (zależność logarytmiczna)

Kombinacja	Równanie	Współczynnik determinacji ( $R^2$ )
5 s	$y = 57,638 \ln(x) - 14,036$	0,8774
Kontrola	$y = 57,222 \ln(x) - 14,413$	0,8731
11 h	$y = 22,624 \ln(x) - 4,6411$	0,8912

Jak wynika z informacji zawartych na rys. 3 dla czasu napromieniania 11 h wykazano negatywny wpływ promieniowania neutronowego na rośliny Pieprzycy siewnej (efekt spodziewany). Podobny rezultat uzyskano w przypadku kombinacji doświadczenia, gdzie czas napromieniania zawierał się w przedziale 6 h – 1 min. W przypadku kombinacji napromienianej przez 5 s stwierdzono, że jej linia trendu (krzywa logistyczna) znajduje się częściowo ponad linią trendu próby kontrolnej. Powyższe ma swoje odzwierciedlenie w parametrach równań krzywych logarytmicznych oraz wartościach współczynników determinacji (tabela 1). Procedura Manna-Whitneya wykazała jednak nieistotną wartość testu U porównującą kombinację nasion kiełkujących z ziarniaków napromieniowanych przez czas 5 s i kombinację kontrolną.



Rys. 4. Proces kiełkowania nasion w wybranych kombinacjach eksperymentu (od lewej: kontrola, 5 s, 11 h)



Rys. 5. Biomasa roślin w poszczególnych kombinacjach doświadczenia (pionowe słupki – błąd standardowy)

Na rys. 4 i 5 przedstawiono masę roślin uzyskaną w końcowej fazie eksperymentu (szósta, ostatnia doba doświadczenia) w poszczególnych kombinacjach doświadczenia. Wyniki wskazują, że kombinacje doświadczenia poddane działaniu promieniowania neutronowego przez czas 5 i 15 [s] odznaczają się wyższą biomasa w odniesieniu do masy roślin uzyskanej z próby kontrolnej (odpowiednio 1,41 i 0,56% w stosunku do próby kontrolnej). Mimo uzyskania takich rezultatów doświadczenia, wartości wyższych w odniesieniu do próby kontrolnej, uwzględnić należy uzyskaną wielkość błędu standardowego w aspekcie statystycznej istotności wyników. Dla zależności między czasem napromieniania neutronami a przyrostem biomasy roślin uzyskano współczynnik korelacji liniowej Pearsona  $R = -0,8221$ .

Jak wspomniano we wstępie, kontakt - obiektu biologicznego z promieniowaniem prowadzi często do zdeponowania w nim energii, a w dalszej kolejności generowane mogą być produkty pośrednie. Kontakt z promieniowaniem jonizującym może wyzwać mutacje, czyli zmianę informacji genetycznej zawartej w DNA.

Występujące naturalnie tautomery (forma izomeru) zasad azotowych lub pochodne zasad powstające w wyniku działania czynników zewnętrznych, np. promieniowania neutronowego, są niekiedy błędnie rozpoznawane w czasie syntezy DNA i wstawiane zamiast właściwych zasad. Istnieje zatem prawdopodobieństwo, że tak wywołana mutacja, może wpływać na wzrost i rozwój roślin jak aktywator.

Podobnego zdania jest Krajewski [14], który stwierdza, że nie wszystkie mutacje muszą być szkodliwe dla organizmu. Większość mutacji nie wpływa na funkcjonowanie organizmu lub komórki, ponieważ nie zmieniają znaczenia kodowanej informacji genetycznej lub zachodzą w komórkach zróżnicowanych, które się nie dzielą. Najniebezpieczniejsze są mutacje w komórkach macierzystych i takie, które prowadzą do zapoczątkowania podziałów (np. mutacje proto-onkogenów).

Uzasadnienia dla uzyskanego wyniku eksperymentu poszukiwać można również na poziomie przemian metabolicznych rośliny, a szczególnie wpływu promieniowania neutronowego na reaktywne formy tlenu (*reactive oxygen species*; zwane dalej ROS) [22]. Czynniki stymulującymi wzrost wytwarzania ROS w nasionach na różnych etapach ich rozwoju są m.in.: promieniowanie nadfioletowe, nadmierna energia świetlna, ozon, utlenianie zredukowanych form niskocząsteczkowych składników komórek, reakcje enzymatyczne oraz metale ciężkie [23], atak patogenów oraz działanie ekstremalnych temperatur [24,25].

Zaobserwowano m.in., że wzrost stężenia ROS w osiach zarodkowych roślin łubinu, tuż po przebiegu okrywy nasiennej [26] oraz utlenianie specyficznych polisacharydów ściany komórkowej nasion pieprzycy

siewnej przez OH stymulowało ich kiełkowanie [27] - podobnie jak wzrost elongacyjny koleoptyli siewek kukurydzy. Ponadto stwierdzono, że działanie ROS na rozluźnianie struktury ścian komórkowych podlegało hormonalnej regulacji przez gibereliny (GA) i ABA [27-30].

W niektórych doświadczeniach wykazano również, w efekcie ekspozycji roślin na promieniowanie jonizujące, pobudzenie podziałów komórkowych; wskazując na działanie wg hipotetycznego modelu hormezy radiacyjnej [31].

Istnieje możliwość, że podobne mechanizmy zadziałały w przypadku napromieniania nasion pieprzycy siewnej neutronami przez czas 5 i 15 s i uwidoczniły się w procesie kiełkowania i przyrostu biomasy.

## Podsumowanie

Uzyskane wyniki badań wskazują, że niewielkie dawki (krótki czas napromieniania neutronami) promieniowania jonizującego mogą aktywować mechanizmy odpowiedzialne za proces kiełkowania i późniejszy przyrost biomasy rośliny.

W przedmiotowym doświadczeniu wykazano zróżnicowanie, w odniesieniu do próby kontrolnej, w przebiegu i układzie krzywej kiełkowania dla kombinacji eksperymentu, w których nasiona napromieniano przez czas 5 s – co wskazuje na stymulujące działanie promieniowania neutronowego na początkową fazę rozwoju ziarniaka. W odniesieniu do próby kontrolnej, stwierdzono również wyższe wartości średnie uzyskanej biomasy dla kombinacji eksperymentu, w których nasiona napromieniano przez czas 5 i 15 s.

W opinii autorów badania dotyczące wpływu promieniowania jonizującego na rośliny powinny być kontynuowane, jednakże z uwzględnieniem krótszych niż zastosowane w przedmiotowym doświadczeniu czasów ekspozycji.

*Sfinansowano z subwencji Ministerstwa Edukacji i Nauki dla Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie na rok 2022.*

**Autorzy:** Dr inż. Marek Ciechanowski, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, E-mail: Marek.Ciechanowski@fis.agh.edu.pl; Dr inż. Andrzej Bolewski, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, E-mail: Andrzej.Bolewski@fis.agh.edu.pl; Dr inż. Joanna Dudala, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, E-mail: Joanna.Dudala@fis.agh.edu.pl; dr hab. inż. Tomasz Jakubowski, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, E-mail: tomasz.jakubowski@urk.edu.pl; PhD Serhiy Syrotyuk, Lviv National Agrarian University, Department of Energy, V. Velykogo str., Dubliany-Lviv, 80381, E-mail: ssyr@ukr.net.; Prof. Vasył Lopushniak, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Henerala Rodimtseva str.19, Kyiv, Ukraine 03041, E-mail: lopushniak@i.ua, Prof. dr Atilgan Atilgan, Alanya Alaaddin Keykubat University, E-mail: atilganatilgan01@gmail.com.

## LITERATURA

- [1] Zderkiewicz T. Wpływ etyloiminy i naświetlania promieniami gamma na wzrost i rozwój orz na zawartość kapsaicyny papryki (*Capsicum annuum* L.), *Acta Agrobotanica*, XXIV/2 (1971), 343-356
- [2] Sobol Z., Jakubowski T., Surma M. Effect of potato tuber exposure to UV-C radiation and semi-product soaking in water on acrylamide content in french fries dry matter, *Sustainability*, 12/8 (2020), 3426, DOI: 10.3390/su12083426
- [3] Jakubowski T., Syrotyuk S., Lopushniak V., Atilgan A. Wpływ stymulacji zmiennym polem magnetycznym nasion pszenicy o różnym przeznaczeniu technologicznym. *Przegląd Elektrotechniczny*, 98/5 (2022), 38-42
- [4] Lemessa A., Popardowski E., Hebda, T. Jakubowski T. The effect of UV-C irradiation on the mechanical and physiological properties of potato tuber and different products. *Applied Sciences-Basel* 12/12 (2022), 1-19 doi.org/10.3390/app12125907

- [5] Jakubowski T. Wpływ stymulacji sadzeniaków (*Solanum tuberosum* L.) w polu magnetycznym na wybrane parametry wegetacji roślin ziemniaka. *Przegląd Elektrotechniczny*, 96/1 2020, 166-169, doi:10.15199/48.2020.01.36
- [6] Radhakrishnan R., Kumari B., Pulsed magnetic field: a contemporary approach offers to enhance plant growth and yield of soybean, *Plant Physiology and Biochemistry*, 51, (2012), 139-144
- [7] Faten D., Al-Khayri J., Essam H., Static magnetic field influence on elements composition in date palm (*Phoenix dactylifera* L.), *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 5, (2009), nr 2, 161-166
- [8] Kielbasa P., Drózd T., Popardowski E. Influence of coniferous wood conditioning by pulsed electric field on its combustion heat characteristics. *Applied Science*, 11/3, (2021), 983
- [9] Kusior M., Krośniak M., Chłopicka J., Zagrodzki P. Wpływ światła o różnej długości fal na rozwój roślin i wybrane parametry biochemiczne na przykładzie rzeżuchy (*Lepidium sativum*) i gorczycy (*Sinapis alba*). *Bromatologia i Chemia Toksykologiczna XLV/3* (2012), 717–721
- [10] Liptai P., Dolník B., Gumanová V. Effect of wi-fi radiation on seed germination and plant growth. *International Journal of Engineering*, XV/1 (2017), 109-112
- [11] Gałązka-Czarnecka, I.; Korzeniewska, E.; Czarnecki, A.; Kielbasa, P.; Drózd, T. Modelling of Carotenoids Content in Red Clover Sprouts Using Light of Different Wavelength and Pulsed Electric Field. *Appl. Sci.* 2020, 10, 4143. <https://doi.org/10.3390/app10124143>
- [12] Korzeniewska, E.; Gałązka-Czarnecka, I.; Czarnecki, A.; Wpływ cienkich warstw srebrnych naniesionych metodą fizycznego osadzania próżniowego na energię i zdolność kiełkowania nasion roślin z rodziny Fabaceae, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2020, 1 (96), 250-253
- [13] Dobrzyński L. Biologiczne skutki promieniowania jonizującego [http://ncbj.edu.pl/zasoby/rozne/biol\\_skutki\\_prom\\_joniz\\_raport1\\_3ptj.pdf](http://ncbj.edu.pl/zasoby/rozne/biol_skutki_prom_joniz_raport1_3ptj.pdf).
- [14] Krajewski P. Biologiczne skutki promieniowania jonizującego, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Warszawa 2009, 29.
- [15] Hanafy, M.S., Ramadan L.S., Hanan A., Mona H.: Irradiation with fast neutrons induced qualitative and quantitative changes in the yield in irradiated rice. *Egypt. J. Biophys.* 9(3) (2011), 327-345
- [16] Selem E., Hashem S. Irradiation with fast neutrons induced qualitative and quantitative changes in the growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivar, DOI: 10.13140/RG.2.2.21198.77128
- [17] Cichanowski M., Bolewski A., Kreft A.: Absolute determination of neutron source yield using melamine as neutron detector. *IOPscience*. 10 (2015), no P01001, 1-12
- [18] Knoll G. F. Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons, Inc. (2010)
- [19] Muchin K.N. Doświadczalna fizyka jądrowa. NWT (2001)
- [20] Lopushnyak V., Hrytsuliak H., Kozova I., Jakubowski T., Kotsyubynska Y., Polutrenko M., Kozan N. Biological Absorption of Chemical Elements in Topinambur Plants by Separation of Wastewater in Podzol Soil. *Journal of Ecological Engineering*, 23/9 (2022), 18–24 [doi.org/10.12911/22998993/150648](https://doi.org/10.12911/22998993/150648)
- [21] Biczak R., Pawłowska B., Feder-Kubis J., Growth inhibition and oxidative stress in plants under the influence of chiral imidazolium ionic liquid with tetrafluoroborate anion, *Chem. Environ. Biotechnol.*, 19, (2016), 35-45
- [22] Krasuska U., Gniazdowska A., Bogatek R. Rola ROS w fizjologii nasion. *Problemy Nauk Biologicznych*, 60/1–2 (2011), 113–128
- [23] Bailly C., El-Maarouf-Bouteau H., Corbineau F. From intracellular signaling networks to cell death: the dual role of reactive oxygen species in seed physiology. *C. R. Biol.* 331, (2008), 806–814.
- [24] Blokhina O., Virolainen E., Fagerstedt K. V. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review. *Ann. Bot.* 91, (2003), 179-194.
- [25] Bartosz G. Druga twarz tlenu. Wolne rodniki w przyrodzie. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2004, Warszawa.
- [26] Garnczarska M., Bednarski W., Jancelewicz M. Ability of lupine seeds to germinate and to tolerate desiccation as related to changes in free radical level and antioxidants in freshly harvested seeds. *Plant Physiol. Biochem.* 47, (2009), 56– 62.
- [27] Mueller M. J., Berger S. Reactive electrophilic oxylipins: Pattern recognition and signalling. *Phytochemistry* 70, (2009), 1511–1521.
- [28] Trzyniec, K., Juliszewski, T., Nawara, P., Popardowski, E., & Oziembłowski, M. (2019). Wykorzystanie emisji fotonów do oceny jakości owoców egzotycznych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 95(1), 117–120. <http://doi.org/10.15199/48.2019.01.30>
- [29] Bałabusta M., Szafrąńska K., Posmyk M., Exogenous melatonin improves antioxidant defense in cucumber seeds (*Cucumis sativus* L.) germinated under chilling stress, *Front Plant Sci.*, 7 (2016), 575, 1-12
- [30] Hasanuzzaman M., Nahar K., Hossain M., Al Mahmud J., Rahman A., Inafuku M., Oku H., Fujita M., Coordinated actions of glyoxalase and antioxidant defense systems in conferring abiotic stress tolerance in plants. *Int. J. Mol. Sci.*, 18, (2017), nr 1, 200-228
- [31] Volkova P., Bondarenko E., Kazakova E. Radiation hormesis in plants, *Current Opinion in Toxicology*, 30, (2022), ISSN 2468-2020, <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2022.02.007>.