

# ROZPRAWY NAUKOWE

## UNIwersytetu Przyrodniczego w Lublinie

ISSN 1899-2374

**Marek Kopacki**

**Wpływ ozonu i plazmy niskotemperaturowej  
na cechy biometryczne i zdrowotność  
wybranych gatunków roślin  
rozmnażanych wegetatywnie**

zeszyt

400



# ROZPRAWY NAUKOWE

UNIwersytetu Przyrodniczego  
w Lublinie

ISSN 1899-2374

---

---

zeszyt 400

Marek Kopacki

Wpływ ozonu i plazmy niskotemperaturowej  
na cechy biometryczne i zdrowotność  
wybranych gatunków roślin  
rozmnażanych wegetatywnie

WUP

Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie

Rada Programowa

Przewodniczący – prof. dr hab. Krzysztof Tomczuk

Członkowie: dr hab. Elżbieta Harasim, prof. uczelni; dr hab. Anna Krzepiło, prof. uczelni;  
dr hab. Elżbieta Mielniczuk, prof. uczelni; dr hab. Siemowit Muszyński, prof. uczelni;  
dr hab. Leszek Rydzak, prof. uczelni; dr hab. Piotr Skąlecki, prof. uczelni

Recenzenci

dr hab. inż. Wojciech Pusz, prof. uczelni

dr hab. inż. Grzegorz Lemańczyk, prof. uczelni

Opracowanie redakcyjne

Renata Zelik

Skład i łamanie

Jacek Pałyszka



Ten utwór jest dostępny na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa –  
Użycie niekomercyjne – Bez utworów zależnych 4.0 Międzynarodowe.

ISBN 978-83-7259-375-7

ISBN 978-83-7259-376-4 on-line

<https://doi.org/10.24326/rn.2022.400>

WYDAWNICTWO UNIWERSYTETU PRZYRODNICZEGO W LUBLINIE

ul. Akademicka 15, 20-950 Lublin

<https://up.lublin.pl/nauka/wydawnictwo>

Ark wyd. 8,2.



# Spis treści

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Wstęp.....                                                                                                                      | 7  |
| 2. Cel pracy.....                                                                                                                  | 10 |
| 3. Przegląd piśmiennictwa.....                                                                                                     | 11 |
| 3.1. Zastosowanie ozonu i plazmy niskotemperaturowej w produkcji roślinnej.....                                                    | 11 |
| 3.2. Najważniejsze problemy fitosanitarne wybranych roślin ozdobnych<br>rozmnażanych wegetatywnie.....                             | 22 |
| 4. Materiał i metody.....                                                                                                          | 25 |
| 4.1. Doświadczenie fitotronowe z zastosowaniem ozonu.....                                                                          | 25 |
| 4.1.1. Ocena wpływu ozonu na rozwój <i>Botrytis cinerea</i> na chryzantemach.....                                                  | 25 |
| 4.1.2. Ocena wpływu ozonu na populację <i>Myzus persicae</i> na chryzantemach.....                                                 | 28 |
| 4.2. Ocena wpływu plazmy niskotemperaturowej na ukorzenianie sadzonek<br>zdrewniałych, półzdrewniałych i zielnych .....            | 30 |
| 4.2.1. Określenie parametrów morfologicznych sadzonek zdrewniałych<br>traktowanych plazmą.....                                     | 32 |
| 4.2.2. Ocena parametrów morfologicznych sadzonek półzdrewniałych<br>traktowanych plazmą.....                                       | 33 |
| 4.2.3. Ocena parametrów morfologicznych sadzonek zielnych<br>traktowanych plazmą.....                                              | 33 |
| 4.2.4. Doświadczenie fitotronowe oceniające wpływ wody plazmowanej<br>(PAW) na sadzonki zdrewniałe.....                            | 34 |
| 4.3. Analiza zmian fizjologicznych i biochemicznych w sadzonkach zielnych<br>pod wpływem działania plazmy niskotemperaturowej..... | 35 |
| 4.4. Analiza mykologiczna sadzonek zdrewniałych wierzby poddanych<br>działaniu plazmy.....                                         | 36 |
| 4.5. Laboratoryjna ocena wpływu plazmy niskotemperaturowej<br>na wybrane gatunki grzybów.....                                      | 37 |
| 4.6. Analiza fitotoksycznego wpływu ozonu i plazmy na badane rośliny.....                                                          | 38 |
| 4.7. Analiza statystyczna.....                                                                                                     | 38 |
| 5. Wyniki.....                                                                                                                     | 40 |
| 5.1. Wpływ ozonu na patogeny i szkodniki chryzantem .....                                                                          | 40 |
| 5.1.1. Ocena indeksu chorobowego chryzantem porażonych przez<br><i>Botrytis cinerea</i> .....                                      | 40 |
| 5.1.2. Wpływ ozonu na populację <i>Myzus persicae</i> i zasiedlone chryzantemy.....                                                | 42 |

|                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2. Ocena świeżej masy sadzonek oraz długości powstałych korzeni i pędów traktowanych plazmą niskotemperaturową ..... | 45  |
| 5.2.1. Ocena sadzonek zdrewniałych wierzby.....                                                                        | 45  |
| 5.2.2. Ocena sadzonek półzdrewniałych.....                                                                             | 49  |
| 5.2.3. Ocena sadzonek zielnych.....                                                                                    | 54  |
| 5.2.4. Ocena zmian morfologicznych sadzonek zdrewniałych w wyniku traktowania wodą plazmowaną (PAW).....               | 60  |
| 5.3. Wpływ plazmy na poziom IAA w sadzonkach zielnych.....                                                             | 66  |
| 5.4. Ocena wpływu plazmy niskotemperaturowej na bioróżnorodność grzybów na sadzonkach zdrewniałych wierzby.....        | 70  |
| 5.5. Ocena wpływu plazmy niskotemperaturowej na wybrane gatunki grzybów <i>in vitro</i> .....                          | 73  |
| 5.6. Ocena fitotoksycznego działania ozonu i plazmy.....                                                               | 81  |
| 6. Dyskusja.....                                                                                                       | 85  |
| 6.1. Ocena wpływu ozonu na agrofagi.....                                                                               | 85  |
| 6.2. Wpływ plazmy niskotemperaturowej na rośliny i procesy fizjologiczne.....                                          | 87  |
| 6.3. Wpływ plazmy na grzyby.....                                                                                       | 92  |
| 6.4. Fitotoksyczne oddziaływanie ozonu i plazmy na badane rośliny.....                                                 | 96  |
| 7. Podsumowanie i wnioski.....                                                                                         | 98  |
| 8. Streszczenie.....                                                                                                   | 100 |
| 9. Summary.....                                                                                                        | 102 |
| 10. Piśmiennictwo.....                                                                                                 | 104 |

# 1. WSTĘP

Ochrona roślin od początku była nieodłącznym elementem produkcji roślinnej. W czasach nowożytnych notowano wystąpienie groźnych patogenów, które miały znaczący wpływ na historię. Szczególnie znane są wydarzenia z 1845 r., kiedy patogen *Phytophthora infestans* spowodował spustoszenie na plantacjach ziemniaka w Irlandii czy *Plasmopara viticola* na plantacjach winogron we Francji [Arya 2010]. Współczesna ochrona roślin poszukuje alternatywnych rozwiązań problemu patogenów, stawiając sobie za cel redukcję ilości toksycznych związków wprowadzanych do środowiska [Popp i in. 2013]. Jest to związane z koncepcją rozwoju rolnictwa zw. rolnictwem zrównoważonym, która zakłada użytkowanie zasobów naturalnych w sposób racjonalny, poprzez ograniczenie stosowania chemicznych środków ochrony roślin [Gamliel 2010, Valiūškaite i in. 2017, Carlisle i in. 2019]. Według prognoz Organizacji Narodów Zjednoczonych ds. Wyżywienia i Rolnictwa (FAO) światowy popyt na żywność wzrośnie trzykrotnie ze względu na niedostępność niezbędnych zasobów w przyszłości [Sivachandiran i Khacef 2017]. Pomimo powszechnego stosowania pestycydów, ich aplikacja spotyka się z coraz większymi ograniczeniami. Niedawno wprowadzony zakaz zaprawiania nasion roślin kapustowatych czy bobowatych przeciwko patogenom glebowym przy użyciu tiuramu (TMTD) spowodował, że rolnicy przyzwyczajeni od lat do jego stosowania są zmuszeni poszukiwać innych rozwiązań [European Commission 2018]. Zaleganie szkodliwych substancji w środowisku czy w plonach, ograniczenia prawne, toksyczny wpływ na organizmy niebędące celem zabiegu, wpływ na powstawanie nowotworów u ludzi, poronienia, problemy z układem nerwowym czy zmiany w ekosystemach to tylko część problemów związanych z aplikacją pestycydów [Arcury i Quandt 2003, Miszczak 2016, Grotowska i in. 2018]. Coraz częściej, zwłaszcza w przypadku roślin ozdobnych, na pierwszy plan wysuwa się problem fitotoksyczności środków ochrony roślin [Asogwa i Dongo 2009].



Zastosowanie pestycydów wymaga nie tylko wiedzy na temat ich bezpośredniego działania na organizmy szkodliwe, ale także poznania wzajemnych relacji między rośliną a patogenem, wiedzy o mechanizmach infekcji oraz na temat ewentualnego negatywnego wpływu na roślinę chronioną [Przybysz i in. 2014, Donatelli i in. 2017]. Chemiczne środki ochrony roślin mogą skutecznie ograniczać występujące na roślinach organizmy szkodliwe, jednak, przy zbyt częstym stosowaniu, mogą powodować występowanie ras odpornych agrofagów, co zmusza producentów do zaprzestania stosowania niektórych preparatów [Mavroedi i Shaw 2005, Deising i in. 2008]. Także problemy z pozostałościami pestycydów w roślinach czy w środowisku sprawiają, że szuka się sposobów ograniczania ich negatywnego wpływu [Skoczko i Ignatowicz 2002, Skoczko 2013, Podbielska i in. 2014, Walorczyk i in. 2016, Trajdos i in. 2017]. Literatura dostarcza wielu informacji na temat pestycydów skutecznie ograniczających występowanie agrofagów na liściach czy pędach roślin ozdobnych [Lakshman i in. 2019]. Coraz częściej można też usłyszeć o zagrożeniach zanieczyszczenia plonu przez mykotoksyny [Kiecana i in. 2005, Stanciu i in. 2017]. Nie można również zapominać o ekonomicznym aspekcie ochrony roślin i oczywistej potrzebie uzyskania plonu wysokiej jakości i w dobrej cenie [Golinowska 2009, Gamliel 2010, Jamiołkowska i Kopacki 2016]. Powoduje to poszukiwanie nowych preparatów oraz nowych metod. Stosowane pestycydy, zwłaszcza pod osłonami, mogą być aplikowane przy pomocy różnych urządzeń, np. wytwornic mgły. Metodę tę cechuje prostota wykonania zabiegu, mniejsza fitotoksyczność oraz wysoka skuteczność. Pomimo że najczęściej zamgławianie wykonuje się z użyciem insektycydów, także fungicydy można stosować przy pomocy tej metody ze względu na jej skuteczność i znacznie większą wydajność pracy w porównaniu z opryskiem, co jest bardzo ważne w praktyce ogrodniczej [Stachowiak 2006]. Poszukuje się też alternatywnych metod ochrony roślin, które mogłyby zastąpić użycie chemicznego środka ochrony roślin.

Metody mechaniczna, biologiczna czy fizyczna stają się coraz ważniejszymi możliwościami w kontekście wymogu stosowania przez profesjonalnych użytkowników od 2014 r. pestycydów zgodnie z zasadami Integrowanej Ochrony Roślin [Lipa i Pruszyński 2010, Wagner i in. 2013, Włodarek i Robak 2013, Jamiołkowska i in. 2017]. Wykorzystywanie biopreparatów czy wyciągów roślinnych pozwala ograniczać występowanie szkodników czy patogenów [Sellami i in. 2013, Sharma i in. 2014, Gleń-Karolczyk i Boligłowa 2015, Danelski i in. 2016, Jamiołkowska i Hetman 2016, Dad i in. 2018, Zimowska i Król 2018, Kareem i in. 2019]. Wiele gatunków owadów, nicieni, wirusów, grzybów i bakterii produkuje około 23 000 substancji biologicznie aktywnych (MBC) ograniczających agrofagi w rolnictwie oraz mikroorganizmy w medycynie [Mülner i in. 2019, Navarro i in. 2019]. Tak liczna grupa organizmów, które mogą być potencjalnie wykorzystane

w biologicznej ochronie roślin, jest w dużym stopniu ograniczana przez warunki środowiskowe wpływające na różnorodne interakcje w ekosystemach [Fedele i in. 2020]. Coraz częściej i powszechniej stosuje się grzyby mykoryzowe w celu ograniczania patogenów glebowych [Jamiołkowska i in. 2018, Bodenhausen i in. 2019, Jamiołkowska i Michałek 2019], a także zjawisko allelopatii w ograniczaniu chwastów [Turk i Tawaha 2003]. Wykorzystuje się też coraz częściej zjawisko indukcji odporności roślin na agrofagi poprzez aplikację elicytorów [Monci i in. 2019, Woźniak i Gałązka 2019]. Metoda fizyczna, poprzez wykorzystanie wysokiej lub niskiej temperatury, czy też różnego rodzaju promieniowanie od lat wspierają metodę chemiczną. W ostatnich latach coraz częściej docenia się ozon w zwalczaniu organizmów szkodliwych. Stosowane już 100 lat temu w Amsterdamie ozonowanie wody wodociągowej czy ostatnio klimatyzacji w samochodach nie jest jedyną możliwością wykorzystania trójatomowego tlenu. W przechowalniach zboża i innych materiałów, w uprawach polowych i pod osłonami ozon jest coraz częściej stosowany. Zaletą tej metody jest brak toksycznych pozostałości. Jednak istnieje ryzyko utraty zdrowia dla osób aplikujących, a także wysokie ryzyko fitotoksyczności dla roślin, zwłaszcza zielnych. W ramach fizycznej metody ochrony roślin coraz częściej też stosuje się plazmę, zwłaszcza plazmę niskotemperaturową, która, ograniczając występowanie patogenów, ma również pozytywny wpływ na chronione rośliny [Mitra i in. 2014]. Dzięki temu można oczekiwać poprawienia parametrów biometrycznych traktowanych plazmą roślin, np. zwiększenie masy sadzonek, długości tworzonych korzeni czy pędów. Liczne doniesienia potwierdzają ten pozytywny wpływ nie tylko na tkanki roślinne, ale też zwierzęce czy ludzkie [Tsukamoto i in. 2003, Ohta 2016].

## 2. CEL PRACY

Celem pracy jest określenie wpływu fizycznych metod wykorzystujących ozon i plazmę niskotemperaturową na ograniczanie występowania wybranych agrofagów roślin ozdobnych oraz ich oddziaływania na chronione rośliny. Ponadto w pracy oceniano wpływ plazmy niskotemperaturowej, wytwarzanej w specjalnie skonstruowanym reaktorze typu gliding arc discharge (GAD) przy podaniu azotu lub powietrza i skierowaniu strumienia gazu opuszczającego reaktor na powierzchnię boczną pędów (zdrewniałych, półzdrewniałych i zielnych), na ukorzenianie się wybranych gatunków roślin ozdobnych oraz cechy biometryczne sadzonek. W badaniu uwzględniono wpływ plazmy na fitotoksyczność sadzonek i bioróżnorodność grzybów zasiedlających ukorzeniane pędy.

### 3. PRZEGLĄD PIŚMIENICTWA

#### 3.1. Zastosowanie ozonu i plazmy niskotemperaturowej w produkcji roślinnej

W związku z coraz większym ograniczaniem stosowania chemicznej metody ochrony roślin coraz bardziej rozpowszechnia się metoda fizyczna. Metoda ta polega na działaniu na organizm szkodliwy takimi fizycznymi czynnikami jak temperatura, promieniowanie czy ciśnienie [Panneton i in. 2001, Nawrot i Olejarski 2007]. Wysoka lub niska temperatura wykorzystywana jest od dawna do odkażania podłoża, do zaprawiania nasion, a także dezynfekcji czy dezynsekcji oraz do ograniczania patogenów podczas przechowywania owoców [Sauer i Shelton 2002, Zhou i in. 2014]. Gorącą wodę czy gorącą parę wodną wykorzystuje się do zwalczania wirusów, np. PPV [Jakab-Ilyefalvi i in. 2012], zaprawiania nasion [Mancini i Romanazzi 2014], a także do dezynfekcji przechowywanych sadzonek truskawek [Turechek i in. 2020]. Temperaturę wykorzystuje się także do niszczenia nicieni w materiale szkółkarskim, szczególnie w zakresie od 43 do 44°C [Gacek i in. 2016]. Obróbkę cieplną można zastosować przez zanurzenie w gorącej wodzie lub wystawienie na działanie gorącej pary. Gorąca woda jest przydatna w zwalczaniu infekcji pochodzenia grzybowego, a także szkodliwych owadów. Gorąca woda była wykorzystywana do skutecznego ograniczania grzybów takich jak *Botrytis cinerea* czy *Rhizopus stolonifer* występujących na powierzchni owoców [Fallik i in. 1996]. Stosując wysoką temperaturę, można wpływać na strukturę popularnych insektycydów, jak deltametryna, i kilkukrotnie zwiększać ich skuteczność [Yang i in. 2020]. Znane od lat jest stosowanie promieniowania jako metody ograniczania występowania organizmów szkodliwych, zwłaszcza kwarantannowych. Promieniowanie ma za zadanie doprowadzić do zahamowania rozrodu organizmu szkodliwego oraz ograniczyć możliwości jego rozprzestrzeniania się bez

uszkodzania rośliny. Próby takie wykonywano w celu ograniczenia porażenia chryzantem przez *B. cinerea* [Chu i in. 2015]. Napromieniowanie można wykonywać podczas pakowania produktów do przewozu, przechowywania nasion niezapakowanych w przyzmacz oraz podczas gromadzenia nasion w portach przeładunkowych. W niektórych przypadkach promieniowanie może być też używane na granicy państwa, w odpowiednio przygotowanej strefie na terenie państwa tranzytowego oraz w miejscu docelowym u odbiorcy produktu [Ignatowicz 1992]. Udowodniono również skuteczność metody radiacyjnej w zwalczaniu groźnego dla chryzantem grzyba *Sclerotinia sclerotiorum* w podłożach uprawnych [Ptaszek i in. 2010]. Stosowano też z dobrym skutkiem wodę poddaną elektrolizie do zwalczania mączniaka prawdziwego na chryzantemie [Mueller i in. 2003].

Stosowanie różnej długości fali promieniowania UV ogranicza występowanie licznych gatunków szkodników w uprawach pod osłonami [Costa i in. 2002]. Niskie dawki światła UV-C (o długości fali 190–280 nm) mogą indukować w owocach i warzywach odporność na patogeny [Barkai-Golan 2001]. Pulsacyjne stosowanie białego światła i UV-C na przechowywane owoce powoduje ograniczenie występowania *B. cinerea* i *Monilinia fructigena* [Marquenie i in. 2003]. Może też ograniczać występowanie pożytecznych grzybów owadobójczych [Yao i in. 2010]. Coraz częściej wykorzystuje się też kontrolowaną atmosferę do ograniczania organizmów szkodliwych w przechowalniach. W pomieszczeniu chłodniczym, w którym przechowywane są owoce i warzywa, celowo obniża się znacznie poziom tlenu, zwłaszcza w celu ograniczenia owadów [Liu 2008]. Podobnie bardzo wysoką śmiertelność wśród mszyc na sałacie uzyskał Liu [2005], stosując do przechowywania bardzo niskie stężenia tlenu (ultra low oxygen – ULO) oraz Navarro i in. [2007] w zwalczaniu szkodników w przechowywanym ziarnie kakao. Nadzorowana jest też zawartość dwutlenku węgla w powietrzu, aby był na niezmiennym poziomie. Podobnie podwyższony poziom dwutlenku węgla obniżał parametry życiowe mszyc [Dáder i in. 2016]. Warunki, które są niekorzystne dla organizmów szkodliwych, powodują zmniejszenie ich liczebności, a przez to zachowanie plonu [Hammer i in. 1990, Piwoni 2007, Nawalany i in. 2014]. Stosuje się też obniżone ciśnienie do eliminacji szkodników. Stosowane jest to w specjalnie przystosowanych do tego pomieszczeniach, z których wysysane jest powietrze i przechowywane są produkty roślinne. Umożliwia to długotrwałe przechowywanie owoców i warzyw, a brak powietrza eliminuje agrofagi. Poszukiwanie alternatywnych metod ochrony roślin jest szczególnie ważne w związku z zakazem używania bromku metylu do dezynfekcji i dezynsekcji gleby i pomieszczeń zamkniętych [Nawrot i Olejarski 2007].

W fizycznej metodzie ochrony roślin od lat ważne miejsce zajmuje wykorzystanie ozonu [Keivanloo i in. 2014]. Ozon składa się z trzech molekuł tlenu i w środowisku jest spotykany w stanie gazowym. Ozon jest gazem, który gotuje

się w temperaturze  $-160^{\circ}\text{C}$ , a przechodzi w stan ciekły w przedziale temperatur od  $-193$  do  $-111^{\circ}\text{C}$ . W naturze ozon powstaje w górnej części atmosfery na skutek działania promieniowania UV, następuje rozpad cząsteczki  $\text{O}_3$  i przyłączanie się następnych cząsteczek. Gaz ten cechuje się łatwą rozpuszczalnością w wodzie i jest niepalny [Bakuła 2013]. Tworzący się w atmosferze, związany z ocieplaniem klimatu, ozon troposferyczny wykazuje działanie fitotoksyczne i jest wtórnym zanieczyszczeniem powietrza. Powstaje w wyniku reakcji fotochemicznych przy udziale substancji inicjujących, którymi są tlenki azotu oraz lotne związki organiczne (VOC) w warunkach wysokiej temperatury i nasłonecznienia [Fiscus i in. 2005, Cape 2008, Ramirez 2019]. Ozon staje się też najważniejszym, obok dwutlenku siarki, zanieczyszczeniem powietrza i posiada istotny wpływ na niszczenie ekosystemów leśnych, powodując przyspieszone starzenie się liści, spadek zawartości chlorofilu i wpływa na interakcje pomiędzy roślinami a owadami [Holopainen i in. 1997, Jackson i in. 1999, Fuhrer 2009, Baciak i in. 2015, Agathokleous i in. 2020]. Ten negatywny wpływ ozonu wynika z zakłócenia równowagi między produkcją a usuwaniem reaktywnych form tlenu (reactive oxygen species – ROS) w tkankach roślinnych [Faoro i Iriti 2007]. Rośliny mogą aktywować mechanizmy obronne przeciwko szkodnikom, patogenom lub chemicznym elicytorom, takim jak ozon, w którym pośredniczą ROS, zwłaszcza  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Ta niekorzystna równowaga między produkcją ROS a zdolnością przeciwutleniającą roślin odpowiada za wynikającą z tego podatność rośliny na atak owadów [Menéndez i in. 2013]. Podwyższony poziom ozonu moduluje też powstawanie fitohormonów, co z kolei wpływa na interakcje między roślinami a owadami roślinożernymi takimi jak *Bemisia tabaci*. Zaobserwowano, że podwyższony poziom ozonu aktywuje szlak sygnałowy roślinnego kwasu abscysynowego (abscisic acid – ABA) [Guo i in. 2020]. Zwiększa też odporność transgenicznego rzepaku na tantnisia krzyżowiaczka [Himanen i in. 2009].

Ozon może też, w pewnych warunkach, powodować zjawisko fitotoksyczności widoczne zwłaszcza na liściach czy igłach. Reakcja ozonu ze strukturami komórkowymi generuje reaktywne formy tlenu, które powodują denaturację lipidów membranowych i ich peroksydację, w wyniku czego powstaje tzw. stres oksydacyjny [Hunowa i in. 2010]. Zaburzona jest fotosynteza, oddychanie, wymiana azotu i lipidów. Później pojawiają się nekrotyczne plamy i brązowe zabarwienie liści [Emberson i in. 2018]. Ozon odpowiedzialny jest też za upośledzenie funkcji zamykania aparatów szparkowych, co prowadzi do nadmiernych strat wody poprzez transpirację [Paoletti i in. 2009, Wagg i in. 2012]. Zaobserwowano też, że ocieplenie klimatu i podwyższony poziom ozonu wpływały na procesy fizjologiczne soi, nie powodując jednak istotnych zmian w plonowaniu [Burkey i in. 2020]. Zaobserwowano też, że ozon troposferyczny osłabia nadawaną przez endofity odporność potomstwa roślin zasiedlonych na mszyce [Bustos i in. 2020].

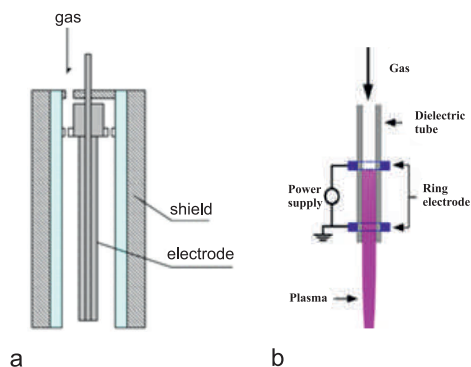


Ozon jest wytwarzany w ozonatorach. Ozonator jest reaktorem plazmowym z wyładowaniami barierowymi. Wskutek wyładowań w powietrzu lub w tlenie tworzy się ozon, który może też być wytwarzany przy udziale promieniowania ultrafioletowego [Lunin i in. 1998]. Od początku XX w. jest używany do obróbki wody pitnej, wypierając szkodliwy dla środowiska chlor. Jest szeroko stosowany w uzdatnianiu i dezynfekcji wody, ponieważ eliminuje nieprzyjemne zapachy, smaki i kolory [Biń 1995, Bakula 2013]. Obecnie na świecie pracuje ponad 3000 instalacji ozonowania wody pitnej. W połowie XX w. zaczęto powszechnie stosować ozonowanie wody basenowej [Schalekamp 1989]. Podczas rozkładu ozon uwalnia cząsteczkę i atom tlenu, który reaguje szybko z różnymi związkami chemicznymi prowadzącymi do ich neutralizacji. Ta reakcja nazywa się ozonowaniem i jest wykorzystywana do oczyszczania powietrza w pomieszczeniach zamkniętych. Ozon charakteryzuje się szerokim zakresem stosowania i bezpieczeństwem dla środowiska i ludzi. Dzięki temu procesowi powietrze staje się świeże, wolne od mikroorganizmów i innych substancji zagrażających zdrowiu ludzkiemu [Wan-Norafikach i in. 2016]. Dalego też ozon używany jest w miejscach publicznych takich jak hotele, domy pogrzebowe, przedszkola oraz sklepy. Gaz ten działa odstraszająco na gryzonie. Ponadto jest również używany do neutralizacji żelaza, manganu, amoniaku, siarkowodoru i innych związków chemicznych w wodzie [Beltran 1996, Białoszewski i in. 2012]. Ozon jest gazem powszechnie stosowanym w lecznictwie jako element terapii. Często spotkać go można w laryngologii, okulistyce czy też w chirurgii. Działa on bakteriobójczo, grzybobójczo i wirusobójczo. Ozon utlenia biologicznie tkanki agrofagów w wyniku procesu wolnorodnikowego [Levy i in. 1974]. Ozon powoduje u bakterii najpierw rozerwanie ściany komórkowej, z czasem – peroksydację kwasów tłuszczowych fosfolipidów. Wskutek tego zjawiska zachodzą zmiany w błonie komórkowej. Dlatego może być stosowany jako środek do dezynfekcji narzędzi medycznych [Białoszewski i in. 2012, Ebihara i in. 2012, Takigawa i in. 2012]. Wirusy bardziej od bakterii reagują na działanie ozonu. Spowodowane jest to tym, że posiadają one otoczkę zbudowaną z dużej ilości lipidów. Gaz ten powoduje zatrzymanie namnażania wirusów, niszcząc też struktury białkowe, i uniemożliwia im wnikanie do komórek [Hudson i in. 2009]. Gaz ten powoduje utlenianie się związków organicznych lub ozonolizę niektórych reszt aminokwasowych takich jak tryptofan, tyrozyna i cysteina. W wyniku tego ataku cząsteczki białka ulegają zmianom w ich zwykłej zdolności fałdowania i wiązania, a następnie są denaturowane [Cataldo 2006]. Badania ostatnich lat potwierdzają też niszczący wpływ ozonu na wirusy groźne dla ludzi [Tseng i Li 2008], w tym SARS CoV-2 [Ignatowicz 2020]. Ozon skutecznie eliminuje takie bakterie jak *Listeria monocytogenes* i *Yersinia enterocolitica*. Ozon może być szkodliwy dla organizmu ludzkiego. Jego duży poziom może prowadzić

do bólu głowy i bólu w klatce piersiowej. Ozon jest stosowany do dezynfekcji owoców, warzyw i ryb. Często wykorzystywany jest do dezynsekcji ziarna i pomieszczeń magazynowych [Woloshuk i in. 2003]. Wykorzystywany jest też do przechowywania mięsa [Gantner i in. 2016]. Zanotowano też jego pozytywny wpływ na kiełkowanie i wzrost siewek kukurydzy [Kurzin i in. 2014]. Ozon stosowany jest często przeciwko licznym patogenom, ponieważ nie zostawia żadnych śladów i nie przyczynia się do uodparniania organizmów szkodliwych. Liczne są doniesienia o częstym wykorzystywaniu ozonu w przechowalniach oraz do wydłużania żywotności przechowywanych surowych owoców i warzyw [Abdel-Wahhab i in. 2011]. Wykorzystywany jest też do sanityzacji, czyli eliminacji mikroorganizmów na różnych przedmiotach. Wprowadzanie ozonu przez 20 min do przechowywanych winogron zmniejszyło gnicie spowodowane przez *R. stolonifer* i wydłużyło okres przydatności do spożycia w podobnym stopniu jak dwutlenek siarki [Sarig i in. 1996, Mari i in. 2003]. Zanotowano też, że przechowywana cebula poddana działaniu ozonu była znacznie mniej porażona przez grzyby i bakterie [Song i in. 2000]. Pozytywnie wpływał też na procesy biochemiczne w przechowywanych melonach [Zhang i in. 2020], a także na składniki antyoksydacyjne papryki [Sachadyn-Król i in. 2016] oraz powodował redukcję pozostałości pestycydów w owocach [Balawejder i in. 2013, Sadło i in. 2017]. Ozon używany jest też do ograniczania liczebności patogenów podczas wegetacji. Zaobserwowano, że indukował powstawanie biochemicznych mechanizmów obronnych pszenicy przeciw mączniakowi prawdziwemu zbóż i traw [Pazarlar i in. 2017]. Ozon ograniczał też rozwój *Alternaria alternata* i *Colletotrichum coccodes* przy stężeniu od 0,005 do 5,0  $\mu\text{mol/mol}$  [Tzortzakis i in. 2008]. Dlatego też jest często wykorzystywany do dezynfekcji podłogi [Ebihara i in. 2012, Abiru i in. 2015]. Czynnikiem ten stosowany jest również w uprawach pod osłonami i magazynach do zwalczania szkodników roślin ozdobnych, zwłaszcza kwarantannowych [Hollingsworth i Armstrong 2005]. Skutecznie ograniczał w formie wody ozonowanej szkodliwość omacnicy spichrzanki w przechowywanym materiale [Keivanloo i in. 2013]. Wodę ozonowaną stosowano też do eliminowania pozostałości pestycydów w owocach [Łozowicka i Jankowska 2016]. Biorąc pod uwagę bezpieczeństwo ludzi i szybkość rozkładu, uznano, że ozon jest bezpieczniejszym środkiem niż chlor i inne środki dezynfekujące [EPA 1999] i w 2001 r. Amerykańska Agencja ds. Żywności i Leków (United States Food and Drug Administration – FDA) zatwierdziła stosowanie ozonu do bezpośredniego kontaktu z żywnością, uzyskując status GRAS (generally recognized as safe – ogólnie uznawany za bezpieczny) bez określenia jego dopuszczalnej dawki [EPA 1999, Abdel-Wahhab i in. 2011]. Ochrona roślin z wykorzystaniem ozonu, w związku z dużym ryzykiem fitotoksyczności, nie może być w nieograniczony sposób stosowana, zwłaszcza w wyższych stężeniach, na wszystkich gatunkach roślin podczas wegetacji.

Plazma (cold atmospheric plasma – CAP), zawierająca m.in. ozon, nazywana jest czwartym stanem skupienia ze względu na swój wysoki potencjał energetyczny i ze względu na odmienne od fazy stałej, ciekłej i gazowej właściwości. Generowana jest poprzez ślizgające się wyładowanie łukowe [Stryczewska 2011]. Powstaje w temperaturach, w których średnie energie kinetyczne cząstek przekraczają wartość potencjału jonizacyjnego. Jako zjonizowany gaz wykazuje unikatowe właściwości głównie ze względu na fakt bycia źródłem reaktywnych form tlenu i azotu. Pojawia się wtedy, gdy dochodzi do zmiany cech fizycznych gazów. Za moment przejścia materii ze stanu gazowego w plazmę uznaje się nabycie przez gaz cech przewodzenia ładunków oraz utratę właściwości izolacyjnych. Jest to stan skupienia o najszerszym paśmie energii cząstek oraz największym zróżnicowaniu stopnia jonizacji i składu chemicznego. Plazmę najczęściej wytwarza się za pomocą wyładowań elektrycznych w gazach. W zależności od zastosowania możliwe jest modelowanie takich parametrów plazmy jak skład chemiczny gazu, ciśnienie, struktura pola magnetycznego oraz innych elementów wpływających na jej strukturę. W strumieniu plazmy znajdują się bardzo reaktywne cząstki, które przechodząc ze stanu wzbudzonego do stanu podstawowego, emitują energię poprzez emisję fotonu światła, np. nadfioletowego lub poprzez przekazanie energii napotkanej komórce [Stryczewska 2011, Pawłat i in. 2018]. Powstają reaktywne formy tlenu i azotu (reactive oxygen and nitrogen species – RONS), tj. nadtlenek wodoru, rodniki OH, OH<sub>2</sub>, NO oraz ozon O<sub>3</sub>, a także wolne elektrony, zjonizowane cząsteczki i cząsteczki obojętne, tworząc w sumie nawet 500 składników [Gordillo-Vázquez 2008, Jablonowski i in. 2018]. Ze względu na parametry takie jak ciśnienie i temperatura plazmę można podzielić na wysoko- i niskotemperaturową. Plazmę uznaje się za wysokotemperaturową w temperaturze 30 000°K.

Plazma niskotemperaturowa, tzw. zimna, używana w ochronie roślin, klasyfikowana jest pod względem energetycznym w przedziale od 0,2 eV do 3 eV. Temperatura przy takim udziale energii wynosi 2000–30 000°K. Aby osiągnąć niskie temperatury na wylocie z dyszy gazów szlachetnych, takich jak hel lub argon, stosuje się dodatki innych gazów reaktywnych, takich jak O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> [Pawłat 2013, Raniszewski i in. 2017]. Ten rodzaj plazmy cechuje się słabą jonizacją i zawiera dużo cząstek obojętnych [Stryczewska 2011]. W laboratorium plazmę niskotemperaturową wytwarza się w urządzeniu zwanym reaktorem plazmowym (plazmotronem) poprzez doprowadzenie odpowiedniej ilości energii do strumienia gazu, np. azotu czy argonu [Skryplonek 2016]. W ostatnich latach powstaje wiele rodzajów reaktorów takich jak: typu RF, typu DBD czy typu Gliding Arc Discharge (GAD), różniących się od siebie parametrami powstającej plazmy. Przykłady przenośnych reaktorów wytwarzających strumień plazmy przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat budowy reaktora plazmowego typu RF (a) i DBD (b) [Pawłat 2013]  
 Fig. 1. Scheme of construction of a plasma reactor type RF (a) and DBD (b) [Pawłat 2013]

Wyemitowana energia jest na tyle wysoka, że może uczestniczyć w reakcjach chemicznych, przez co działa destruktywnie na komórki drobnoustrojów, dlatego może być wykorzystywana w leczeniu i dekontaminacji różnych powierzchni żywych tkanek [Janda i in. 2012, Stryczewska 2020]. Reaktory plazmy niskotemperaturowej często wykorzystywane są w procesach związanych z ochroną środowiska i ekotoksykologią. Można ją też stosować do higienizacji odpadów komunalnych służących do produkcji paliwa [Pankaj i Keener 2017, Wolny-Koładka i in. 2017]. Możliwości plazmotronów potwierdzono niejednokrotnie przy usuwaniu tlenków azotu, dwutlenku siarki z gazów spalinowych, metali ciężkich i lotnych substancji organicznych powstających w procesach malowania, lakierowania i w procesach chemicznych [Kołaciński 2004]. Silna reaktywność plazmy umożliwia też obróbkę różnych powierzchni bez potrzeby stosowania inwazyjnych środków chemicznych [Belkind i Gershan 2008, Brelles 2012, Baier i in. 2014]. Urządzenia plazmowe powstawały na początku po to, by w procesach wstępnego czyszczenia materiałów nie było potrzebne nic poza skompresowanym powietrzem i prądem elektrycznym. Umożliwiało to bardzo szybkie, dokładne i eliminujące wyładowania elektrostatyczne czyszczenie powierzchni materiałów, które później można było trwale łączyć z innymi materiałami. Podczas procesu czyszczenia wysoki poziom energii plazmy rozbijał strukturę substancji organicznych zanieczyszczających materiał i usuwał zanieczyszczenia z powierzchni [Melamies 2016]. Plazma wykorzystywana też jest do przemysłowej produkcji nanomateriałów [Raniszewski i in. 2017] i oczyszczania powierzchni teflonowych z zanieczyszczeń [Krupski i in. 2016]. Plazma zimna wykorzystywana jest też do sterylizacji narzędzi oraz dezynfekcji pomieszczeń w szpitalach, zakładach produkujących żywność.

Efektywność stosowania zimnej plazmy zależy od rodzaju maszyny wytwarzającej ją, częstotliwości energii elektrycznej, czasu trwania jednokrotnego impulsu

wzbudającego, długości ekspozycji komórek rośliny na plazmę oraz stosowanego gazu roboczego [Laskowska i in. 2016]. Zastosowania plazmy niskotemperaturowej wykorzystują bakteriobójcze właściwości wyładowań elektrycznych, a zwłaszcza wytwarzanych podczas tych wyładowań takich związków jak ozon, tlenek azotu i nadtlenek wodoru. Pożądaną cechą plazmy w tych zastosowaniach jest brak równowagi termodynamicznej – niska temperatura gazu i wysokie energie elektronów inicjują reakcje chemiczne wpływające na struktury biologiczne oraz DNA i RNA bakterii, wirusów i grzybów, ale nie niszczą innych składników czy komórek środowiska biologicznego poddanego obróbce plazmowej [Pawłati in. 2011]. Mechanizm działania plazmy na drobnoustroje jest kilkietapowy i polega głównie na trwałym uszkodzeniu ściany komórkowej, błony cytoplazmatycznej, a następnie struktur wewnątrzkomórkowych, materiału genetycznego oraz aparatu enzymatycznego [Moisan i in. 2002, Kyzek i in. 2017]. Oddziaływanie na błonę komórkową skutkuje jednoczesnym wytwarzaniem dużej liczby perforacji, co przekracza możliwości naprawcze komórki. Inni badacze wskazują na nagromadzenie się ładunków elektrycznych na powierzchni błony czy też oddziaływania pulsacyjnego pola elektrycznego na destrukcję plazmalemy [Wiktor i in. 2013]. Reaktywne postaci tlenu i azotu oraz rodnik hydroksylowy unieszkodliwiają patogeny oraz ich formy przetrwalnikowe. Działanie sterylizujące ma też promieniowanie UV, które występuje podczas procesu tworzenia się plazmy [Dziemitrowicz i in. 2014]. Biologiczne i medyczne zastosowania plazmy niskotemperaturowej wykorzystują określone właściwości wyładowań elektrycznych. Główną rolę odgrywają wytwarzane podczas tych wyładowań związki chemiczne, takie jak ozon, tlenki azotu, nadtlenek wodoru i ich wysokoreaktywne pochodne. Istotne są również: promieniowanie elektromagnetyczne (ciepło, światło i pole elektryczne mają wpływ na przepuszczalność błon komórkowych) oraz naprężenia ścinające i osuszanie wywołane ewentualnym przepływem strumienia gazu. Głębokość penetracji czynników aktywnych nie jest duża i oddziaływanie plazmy można uznać za powierzchniowe. Na skuteczność zabiegu oczyszczania z zanieczyszczeń biologicznych wpływ ma moc zasilająca reaktor, skład i prędkość przepływu gazów roboczych oraz temperatura plazmy na traktowanej powierzchni [Samoń i in. 2014]. Prowadzone są badania nad zastosowaniem reaktorów plazmowych w temperaturach bliskich temperaturze ciała ludzkiego, a więc nieprzewodzących do degeneracji białek w żywych komórkach, m.in. do dekontaminacji i koagulacji ran powierzchniowych, wspomagania leczenia stopy cukrzycowej, nowotworów skóry i błon śluzowych. Ponadto plazma może znaleźć zastosowanie w inżynierii tkankowej oraz w modyfikacji własności powierzchniowych materiałów w celu poprawy biokompatybilności implantów, stentów, soczewek i protez. Pomocna też jest w zwalczaniu chorób skóry człowieka [Dobrynin i in. 2009, Daeschlein

i in. 2011]. Metody plazmowe wykazują wysoką skuteczność, eliminują większość bakterii, wirusów i grzybów, aktywizują działanie enzymów antyutleniających, pobudzają wytwarzanie białych krwinek. W oddziaływaniu z żywymi organizmami i tkankami, w bezpiecznych dawkach nie dają skutków ubocznych, są bezbolesne, nie wywołują reakcji alergicznych, a często eliminują konieczność kuracji farmakologicznej [Stryczewska 2011]. W medycynie używana jest też tzw. żyłетка plazmowa i służy do dezynfekcji i zwalczania groźnych dla człowieka grzybów takich jak *Candida albicans* czy *Prototheca zopfii* [Tyczkowska-Sieroń i in. 2018], a także ograniczania wirusa SARS CoV-2 [Mina i in. 2021].

Liczni autorzy potwierdzają możliwość zastosowania plazmy w rolnictwie i przechowalnictwie [Mitra i in. 2014, Kramer i in. 2015, Ohta 2016, Sarinont i in. 2016]. Aplikację plazmy można przeprowadzić na trzy sposoby. Pierwszy sposób to bezpośrednia aplikacja plazmy, która zapewnia najwyższą produkcję reaktywnych form tlenu i azotu, jonów, elektronów i fotonów. Drugi sposób opiera się na odległej aplikacji plazmy, która również zapewnia wysoką produkcję RONS, jonów i fotonów, ale przy mniejszym uszkodzeniu roślin. Trzecią możliwością jest zastosowanie wody aktywowanej plazmą (plasma activated water – PAW). Zapewnia to stosunkowo niskie stężenie RONS przy krótkich okresach życia, ale wytwarza większą ilość form azotu i tlenu o dłuższym okresie życia, których stosowaniu towarzyszy niskie ryzyko uszkodzenia rośliny [Sarinont i in. 2017]. Należy dodać, że plazma aplikowana do wody może być bogatym źródłem form aktywnych: nadtlenu wodoru  $H_2O_2$ , azotynów  $NO_2^-$ , azotanów  $NO_3^-$  i ozonu rozpuszczonego w wodzie, co może silnie oddziaływać na komórki mikroorganizmów i roślin [Pawłat i in. 2019].

Plazma CAP używana jest w praktyce do aplikacji w przechowywaniu licznych gatunków owoców i warzyw, zbóż, orzechów, ryb, mięsa, jajek i soków [Niemira i Sites 2008, Schlüter i in. 2013, Butscher i in. 2016, Chen i in. 2020]. Pozytywnie wpływa na przechowywanie białek i skrobi, gorzej zaś tłuszczów [Muhammad i in. 2018]. Dowiedziono, że plazma może znacznie redukować liczebność bakterii z rodzaju *Bacillus* – groźnych patogenów wielu gatunków roślin [Jiang i in. 2018]. Jest też skuteczna w ograniczaniu bakterii szkodliwych dla człowieka, nawet szczepów odpornych na antybiotyki, powodując ich całkowitą inaktywację w temperaturze otoczenia [Baier i in. 2014, Vaze i in. 2017]. Wpływać też może na ograniczanie bakterii *Escherichia coli* i być używana do sterylizacji materiałów i żywności [Kirkpatrick i in. 2007, Samoń i in. 2014, Dasan i Boyaci 2017]. Według literatury działanie plazmy niskotemperaturowej na patogeny jest potwierdzone dla wielu gatunków bakterii i grzybów, takich jak *Pseudomonas aeruginosa*, *C. albicans*, *Microsporium canis*, *Staphylococcus aureus*, *E. coli* oraz *Bacillus* sp. [Niemira i Sites 2008, Laskowska i in. 2016]. Stosuje się też plazmę niskotemperaturową



do przedłużania trwałości soku pomidorowego bez utraty jego wartości [Starek i in. 2020], a także przechowywania i zapobiegania brązowieniu świeżo pociętych jabłek [Tappi i in. 2014]. W licznych badaniach potwierdzono pozytywny wpływ traktowania plazmą orzechów laskowych i kukurydzy na ograniczenie groźnych dla ludzi aflatoksyn, które produkowane przez *Aspergillus flavus* i *A. parasiticus* stanowią od lat jedno z najgroźniejszych zanieczyszczeń produktów spożywczych [Siciliano i in. 2016, Yeung i in. 2020, Hojnik i in. 2021]. Potwierdzono też wpływ plazmy na redukcję groźnego deoksyniwalenolu (DON) w ziarnie jęczmienia [Feizollahi i in. 2020]. Pomocna też jest plazma w zwalczaniu szkodliwych owadów, np. *Drosophila sp.* [Lee i in. 2016]. Użycie plazmy niskotemperaturowej do polepszania zdrowotności materiału rozmnożeniowego jest znaną, ale wciąż rozwijaną metodą w ochronie roślin [Mitra i in. 2014, Pawłat i in. 2017]. Zimna plazma, odpowiednio zastosowana, niszczy głównie komórki patogenów, nie uszkadzając przy tym samej rośliny [Samoń i in. 2014, Wannicke i in. 2021]. Najczęściej używana jest do traktowania materiału nasiennego i sadzonek [Šera i in. 2010, Mitra i in. 2014, Kordas i in. 2015, Matra 2017, Šera i Šery 2018, Baldanov i in. 2020]. Oddziałując na strukturę okrywy nasiennej, przerywając spoczynek nasion, wpływa na siłę i energię kiełkowania oraz dalszy rozwój wysianych nasion, co jest szczególnie istotne w przypadku gatunków trudno kiełkujących [Pawłat i in. 2018, Rifna i in. 2019, Velichko i in. 2019, Hui i in. 2020]. Wpływa też na szybkość wchłaniania wody przez nasiona [Volin i in. 2000]. Poziom pobierania wody odgrywa bardzo istotną rolę i wpływa na procesy fizjologiczne w tkankach roślin [Turk i Tawaha 2003]. Plazma zawiera reaktywne formy tlenu i azotu, które modyfikują zewnętrzną powierzchnię nasion oraz procesy wewnątrz. Zmienia też właściwości osłony nasiennej, powodując, że jest bardziej hydrofilna, przepuszczalna dla wody i nasiąkliwa, oraz zwiększa się absorpcja wody, a stymulując aktywność enzymów hydrolitycznych, przyspiesza kiełkowanie i wzrost roślin. Zwiększa się aktywność  $\alpha$ -amylazy, proteazy i dehydrogenazy, co pozwala dostarczyć zarodkowi energii i inicjować kiełkowanie. Osłona nasiennej staje się miękka i perforowana [De Groot i in. 2018, Dawood 2020]. Należy podkreślić, że jedną z konsekwencji działania plazmy jest stymulacja syntezy wtórnych metabolitów. Rośliny w swoim środowisku podlegają stresom związanym z czynnikami abiotycznymi i biotycznymi. W odpowiedzi na nie opracowały adaptacyjny system obronny. Znanych jest ok. 100 000 wtórnych metabolitów, których rola jest niezastąpiona w przystosowaniu roślin do niekorzystnych warunków [Jamwal i in. 2018]. Plazma wpływa na działanie m.in. enzymów antyoksydacyjnych. Zmiany w aktywności tych enzymów odnotowano w wielu roślinach. W badaniach dotyczących świerka, niskotemperaturowa plazma zmniejszała aktywność peroksydazy [Pauzaite i in. 2018]. W badaniach na nasionach udowodniono, że wystąpiła większa aktywność me-



taboliczna kiełkujących nasion zaprawionych plazmą niskotemperaturową związana z tworzącymi się reaktywnymi formami tlenu i wolnymi rodnikami [Jiayun i in. 2014]. Zwiększająca się ilość RONS wywołuje stres oksydacyjny i zwiększa się aktywność enzymów przeciwutleniających [Sharma i in. 2012]. RONS są również silnie powiązane z innymi metabolitami, w tym fitohormonami, takimi jak kwas salicylowy (SA), kwas jasmonowy (JA), etylen (ET), kwas abscysynowy (ABA) i kwas giberelinowy (GA) [Noctor i in. 2016]. Stwierdzono też, że plazma niskotemperaturowa redukuje działanie katalazy [Mildažienė i in. 2019].

Połączenie plazmy z wodą pozwala uzyskać wodę plazmowaną (PAW), która również posiada liczne zastosowania w zwalczaniu bakterii i grzybów. Jest to jednak najczęściej działanie krótkotrwałe i powierzchniowe [Royintarat i in. 2019]. Woda z kranu lub woda dejonizowana poddana działaniu niskotemperaturowej plazmy zmienia istotnie swoje właściwości, takie jak pH, przewodność elektrolityczna i napięcie powierzchniowe w porównaniu do ich odpowiedników niepoddanych plazmowaniu, zawiera znaczne ilości chemicznie aktywnych form szczególnie na granicy faz plazma–ciecz, zwłaszcza reaktywny tlen i reaktywny azot, w tym przede wszystkim ozon i nadtlenek wodoru.  $\text{NO}_2^-$  oraz  $\text{NO}_3^-$  odpowiedzialne są za transport protein, są źródłem azotu oraz wpływają na oddychanie roślin. Nadtlenek wodoru wpływa natomiast na namnażanie i różnicowanie komórek, przenoszenie informacji o czynnikach stresowych oraz wzmacnianie odporności na stres [Mystkowska i in. 2013, Lukes i in. 2014, Machala i in. 2019]. PAW jest stosowana jako czynnik umożliwiający dezynfekcję owoców i warzyw, niezmniejszający istotnie zawartości witaminy C [Bozkurt i in. 2017, Jablonowski i in. 2018]. PAW ma również pozytywny wpływ na czystość mikrobiologiczną i kiełkowanie nasion [Darmanin i in. 2020]. Zaobserwowano też wpływ wody plazmowanej na dostępność selenu w roślinach oraz parametry fotosyntezy [Hawrylak-Nowak i in. 2018, Saberi i in. 2018].

Czynniki fizyczne mogą oddziaływać pozytywnie na procesy fizjologiczne zachodzące w roślinach, a także w sadzonkach roślin. Stosuje się pole elektryczne do poprawiania kiełkowania nasion [Pietruszewki i Kornarzyński 2002]. Znany jest też pozytywny wpływ plazmy na procesy zachodzące w nasionach [Filatova i in. 2012, Mitra i in. 2014, Randeniya i De Groot 2015, Ling i in. 2016, Da Silva i in. 2018, Pawłat i in. 2018], a także w cebulach [De Souza i in. 2014]. Wciąż poszukuje się sposobów przyspieszania procesu tworzenia się nowych korzeni. Od lat znane są preparaty chemiczne przyspieszające ukorzenianie, jednak w ostatnich latach, w związku z ograniczaniem chemicznych środków ochrony roślin, wzrasta zainteresowanie wykorzystaniem metod alternatywnych takich jak temperatura, pole elektryczne, promienie laserowe, ozon czy plazma [Gładyszewska 2004, Makarska i in. 2004, Śliwka 2005, Osman i in. 2009, Ćwintal i in. 2010,

Kowalyszyn i Konyk 2015]. Znany jest wpływ plazmy niskotemperaturowej na kiełkowanie nasion, wzrost sadzonek, morfologię korzeni i pobór składników odżywczych pomidora [Jiang i in. 2018], a także soi [Ling i in. 2014]. Wielu badaczy potwierdza pozytywny wpływ plazmy na proces ukorzenia się roślin, zwłaszcza na zwiększenie długości i ilości tworzonych korzeni [Bormashenko i in. 2015, Li i in. 2019a]. Najważniejszymi substancjami chemicznymi w procesie rizogenezy są hormony roślinne – auksyny [Tivendale i Cohen 2015]. Związki te odpowiedzialne są m.in. za stymulowanie wytwarzania korzeni. Wydzielane są w wierzchołkach wzrostu sadzonki, skąd transportowane są w dolne jej partie. Naturalne auksyny to np. kwas indoliloctowy (IAA) czy kwas indolilomasłowy (IBA). Dzięki ich wspomagananiu proces ukorzenia zazwyczaj przebiega szybciej, korzenie są dłuższe, a cała bryła korzeniowa jest większa [Jerzy i Krzywińska 2005, Rout 2006, Jaroszuk-Ścisł i in. 2014, Rameau i in. 2015]. IAA jest induktorem ukorzenia, który stymuluje podziały komórkowe w kambium i aktywuje metabolizm składników odżywczych w celu uwolnienia energii i zapewnienia substancji strukturalnych do ukorzenia [Gutierrez i in. 2012, Druge i in. 2016]. Pomimo tego, że auksyny odpowiedzialne za rozwój i różnicowanie komórek tworzą się wewnątrz korzeni oraz mogą być wytwarzane przez mikroorganizmy glebowe lub syntetycznie, poszukuje się możliwości stymulowania ich wytwarzania przez biostymulatory i nawozy dolistne [Szabó i in. 2016, Liu i in. 2018, Ozimek i in. 2018], a także zewnętrzne czynniki fizyczne [Woźniak i Gałązka 2019].

### **3.2. Najważniejsze problemy fitosanitarne wybranych roślin ozdobnych rozmnażanych wegetatywnie**

Rośliny ozdobne są rozmnażane m.in. z wykorzystaniem metody wegetatywnej. Wykorzystuje się sadzonki zdrewniałe, półzdrewniałe i zielne. Jedną z ważniejszych gospodarczo roślin jest chryzantema wielkokwiatowa (*Chrysanthemum grandiflorum* Ramat./Kitam.) uprawiana w Polsce i na świecie. Produkowana jest w cyklu całorocznym, najczęściej pod osłonami, jako kwiat cięty i doniczkowy, a także z przeznaczeniem do wystroju grobów [Farias i Saad 2005]. Uwarunkowania klimatyczne powodują, że chryzantema uprawiana jest w naszym kraju przede wszystkim w tunelach foliowych i szklarniach. Wielkość i jakość uzyskiwanego plonu zależy od warunków klimatycznych, nawożenia i zdrowotności roślin w okresie wegetacji [Jerzy i Breś 2011]. Chryzantema porażana jest przez patogeny typowe dla roślin astrowatych, jak również organizmy charakterystyczne dla innych upraw [Rataj-Guranowska i Pukacka 2012, Lin i in. 2017, Trolinger i in. 2017]. Do takich należą m.in. gatunki *Fusarium oxysporum*, *Fusarium ave-*

*naceum*, *Fusarium culmorum* oraz *Rhizoctonia solani*. Związane są one ze środowiskiem glebowym i odpowiadają za choroby korzeni oraz podstawy pędu [Wojdyła i in. 1988, Kopacki i Wagner 2006, Song i in. 2013, Zhao i in. 2016, Yesuraja i Ebenezar 2021]. Za zgnilizny korzeni i podstawy pędu odpowiedzialny jest przede wszystkim *S. sclerotiorum*, a za zgnilizny pędów, liści i kwiatostanów polifagiczny *B. cinerea* [DuToit i in. 2004, Williamson i in. 2007, Chu i in. 2015]. *B. cinerea* atakuje ponad 260 gatunków roślin [Michailides i Elmer 2000] i od lat wykazuje dużą odporność na chemiczne fungicydy [Ma i Michailides 2005, Esterio i in. 2007, Li i in. 2013, Oliveira i in. 2017]. Z łodygą i aparatem asymilacyjnym chryzantem związany jest grzyb *A. alternata* powodujący nekrotyczne plamy na pędach i liściach [Xu i Chen 2009, Nagrale i in. 2013, Dominguez-Serrano i in. 2016, Kopacki i in. 2018]. Ważnymi patogenami, chociaż rzadziej występującymi na części nadziemnej, są *Septoria chrysanthemella* i *Bipolaris setariae*, powodujące plamistości liści chryzantem [Verkley i in. 2013, Kopacki i in. 2016]. Za najgroźniejszy patogen chryzantem należy uznać *Puccinia horiana* powodujący białą rdzę chryzantem [Pedley 2009, Bonde i in. 2015]. Najgroźniejszymi szkodnikami ograniczającymi zdrowotność chryzantem są wciornastki i mszyce, zwłaszcza *Aphis fabae* [Ali 2017], *Macrosiphoniella sanbourni* [Reddy i Lahta 2012, Xia i in. 2014] i *Myzus persicae* [Riddick 2017].

Ważną i popularną rośliną ozdobną jest też wierzba (*Salix sp.*). Jest to roślina o pędach zdrewniałych, która należy do drzew szybko rosnących w zanieczyszczonych warunkach miejskich, a także w środowisku naturalnym [Capuana 2020] oraz jako roślina przeznaczona na cele energetyczne [Bieniek i Żołnierz-Rusinek 2008]. Posiada duże zdolności regeneracyjne [Suchocka 2008]. Rozmnażana jest najczęściej przez sadzonki zdrewniałe ukorzeniane w wodzie, specjalnym podłożu lub *in vitro* w zależności od gatunku [Liesebach i Naujoks 2004, Zhang i in. 2017]. Wierzba porażana jest przez liczne patogeny związane z korą i drewnem, osłabiające materiał szkółkarski. Groźną chorobą jest antraknoza powodowana przez *Colletotrichum gleosporioides*, powodujące rozległe nekrozy liści i pędów [Dłużniewska 2012]. Rdza wierzby stanowi jedną z najbardziej niebezpiecznych chorób wierzby. Chorobę może powodować 6 gatunków grzybów, z których najczęściej pojawiają się *Melampsora epitea*, *M. caprearum*, *M. ribesi* i *M. viminalis*. Objawy chorobowe dostrzegalne są na dolnej stronie liści, rzadziej na pędach, w formie początkowo niewielkich, wzniesionych, pomarańczowych skupień łączących się ze sobą. Na wierzbach powstaje jedno stadium rdzy – urenidia z uredosporami [Liesebach i in. 2001, Głowacka i in. 2017]. Zarówno w warunkach naturalnych, jak i w terenie zurbanizowanym pojawiają się wciąż nowe agrofagi. W ostatnich latach coraz groźniejszy dla wierzby jest polifagiczny gatunek *Trichothecium roseum* [Tang i Fang 2015, Gong i in. 2019]. Często porażana też jest

przez polifagicznego grzyba *Chondrostereum purpureum* [Hamberg i in. 2017]. Liczne są gatunki uszkadzające osłabione rośliny i prowadzące do rozkładu drewna. Zrakowacenie kory uwidaczniające się w miejscu uszkodzenia może być wywołane na skutek *Phomopsis salicina*. Grzyb ten atakuje pień oraz młode odrosty w koronie. Pokrewne symptomy może powodować *Valsa sordidata*. W okresie początkowym są to drobne, okrągłe lub nieregularne nekrozy, szybko się rozwijające i formujące na pędach w kolorze od jasnobrązowego poprzez czerwonawe do brunatnego. W punkcie porażenia tkanki zwężają się i kora zasycha, rozrastają się wolniej lub zamierają [Dłużniewska 2012, Hiscox i in. 2018]. Zagrożeniem dla nadziemnej części wierzby mogą być też grzyby takie jak *A. alternata*, *B. cinerea* czy grzyby rodzaju *Pestalotia* [Adamska 2005, Oliveira Longa i in. 2005, Maharachchikumbura i in. 2011, Pusz i Urbaniak 2017, Jacewski i in. 2019].

## 4. MATERIAŁ I METODY

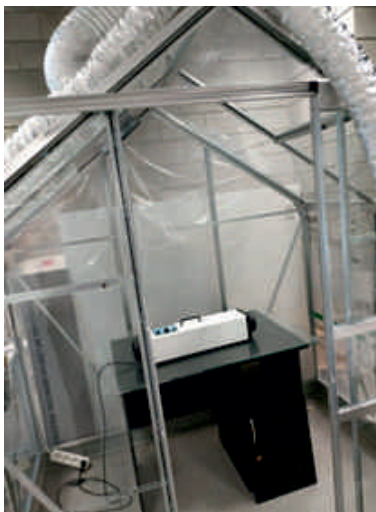
### 4.1. Doświadczenie fitotronowe z zastosowaniem ozonu

Badania zostały przeprowadzone w fitotronie Katedry Ochrony Roślin Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie w dniach 20 maja – 20 lipca 2016 r. Badaniami objęto chryzantemy *C. grandiflorum* (Ramat./Kitam.) odmiany Anastasia (odmiana wielkokwiatowa, uprawiana na kwiat cięty) dostarczone z firmy Pychyński Praszka. Doświadczenie przeprowadzono w układzie bloków losowych. W skrzynce plastikowej wypełnionej podłożem torfowym z firmy HOLLAS Pasłek z 30-procentowym dodatkiem piasku posadzono po 8 roślin chryzantem w skrzynce w 4 powtórzeniach, traktując skrzynkę jako powtórzenie. Umieszczono je na 14 dni w fitotronie nr 1 przy sztucznym oświetleniu przy fotoperiodzie 12/12 h z wykorzystaniem lamp LED. W doświadczeniu do doświetlania wykorzystano oprawę Xenargo Greenhouse LED Module 120W 3-Row Medium 1200 mm, emitującą światło o następującym składzie: 55,43% (660–670 nm), 11,60% (450–460 nm), 24,74% (380–800 nm), 7,79% (600–610 nm) i 0,43% (700–740 nm). Natężenie napromieniowania mierzone w trakcie doświetlania sadzonek wyniosło 80  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ . Lampy LED były włączane codziennie [Woźny i Rymarz 2017].

#### 4.1.1. Ocena wpływu ozonu na rozwój *Botrytis cinerea* na chryzantemach

Gdy rośliny osiągnęły wysokość ok. 10 cm – BBCH 35 [Meier 2001] przeniesiono je do fitotyonu nr 2, w którym panowały identyczne warunki jak w fitotronie nr 1 i wykonano natychmiast sztuczną inokulację, wykorzystując zarodniki konidialne *B. cinerea* szczep R28 o sprawdzonej wcześniej patogeniczności dla chryzantem [Kopacki, dane niepublikowane]. Szczep użyty do infekcji

wyselekcjonowano z chryzantem uprawianych pod osłonami w okolicach Sandomierza w latach 2014–2016 i był hodowany na pożywce dekstrozowo-ziemniaczanej PDA (Difco). Konidia z 10–14-dniowych kultur zebrano w sterylizowanej wodzie destylowanej i oczyszczono z resztek grzybni przez filtrację przez gazę. Stężenie zostało określone za pomocą hemocytometru. Zawiesina została przeniesiona do sterylizowanej wody destylowanej. Liście chryzantem przy pomocy ręcznego rozpylacza równomiernie spryskano 2 ml/roślinę zawiesiną zawierającą 106 zarodników konidialnych z dodatkiem glukozy w ilości 0,5 mg/ml zawiesiny, zgodnie z metodyką opisaną przez De Meyera i in. 1998 na zranione skalpelem rośliny. Doświadczenie przeprowadzono w układzie bloków kompletnie zrandomizowanych w 4 powtórzeniach, traktując skrzynkę z 8 roślinami jako powtórzenie. Rośliny umieszczono w fitotronie nr 2 w temperaturze 22–24°C w warunkach wilgotności powyżej 90%. Po 5 dniach, gdy na roślinach występowały objawy i oznaki etiologiczne, przeniesiono je do szczelnej szklarni i zastosowano ozon (w różnych stężeniach i czasie działania, tj. 2,24 mg/m<sup>3</sup> z przetrzymaniem 10-minutowym, 7,20 mg/m<sup>3</sup> bez przetrzymania w szczelnym pomieszczeniu oraz 7,20 mg/m<sup>3</sup> z przetrzymaniem 10-minutowym zgodnie z tabelą 1), wykorzystując generator ozonu BW-STL20 20000 mg/h (fot. 1). Po aplikacji ozonem rośliny z kombinacji nr 2 i 4 były pozostawione w szczelnej szklarni przez 10 min celem obserwacji działania ozonu, natomiast część roślin bezpośrednio po aplikacji została usunięta ze szklarni i przeniesiona do fitotronu celem dalszej obserwacji zgodnie z metodyką zalecaną zgodnie ze standardami EPPO [EPPO 1989, 2002, 2019].



Fot. 1. Przygotowanie aplikacji ozonu w szklarni  
Phot. 1. Preparation of ozone application in a greenhouse



Tabela 1. Stężenia ozonu i czas jego aplikacji na chryzantemy

Table 1. Ozone concentration and time of its application to chrysanthemums

| Kombinacja<br>Combination                                                        | Traktowanie ozonem<br>Ozone treatment       |                                                  | Przechowywanie po ozonowaniu<br>Storage after ozonation |                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                                                                                  | czas aplikacji<br>application time<br>(min) | stężenie<br>cocentration<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | czas<br>time<br>(min)                                   | stężenie<br>cocentration<br>(mg/m <sup>3</sup> ) |
| 1 – Kontrola bezwzględna/<br>Absolute control                                    | –                                           | –                                                | –                                                       | –                                                |
| 2 – Ozon2 (aplikacja<br>i przechowywanie)/ Ozone2<br>(aplication and storage)    | 2                                           | 2,24                                             | 10                                                      | 1,42                                             |
| 3 – Ozon10 (aplikacja)/ Ozone10<br>(application)                                 | 10                                          | 7,20                                             | 0                                                       | 0                                                |
| 4 – Ozon10 (aplikacja<br>i przechowywanie)/ Ozone10<br>(application and storage) | 10                                          | 7,20                                             | 10                                                      | 1,98                                             |
| 5 – Kontrola względna/ Relative<br>control                                       | –                                           | –                                                | –                                                       | –                                                |

Parametry doświadczenia wybrane zostały w celu wstępnej oceny skuteczności ozonu i sprawdzenia możliwości fitotoksycznego oddziaływania na chronione rośliny i podjęcie decyzji o kontynuacji badań w tym kierunku. Ocena stężenia ozonu w pomieszczeniu zamkniętym umożliwiła sprawdzenie zarówno skuteczności oddziaływania na agrofagi, jak i fitotoksyczności i porównanie z kombinacją, w której natychmiast wystawiono rośliny z pomieszczenia.

W trakcie doświadczenia oceniano wysokość roślin, indeks chorobowy roślin zainfekowanych czynnikiem chorobotwórczym (*B. cinerea*). Wysokość roślin mierzono od podstawy do szczytu i wyrażono w centymetrach. W celu oceny indeksu chorobowego zastosowano własną, 5-stopniową skalę (0–4°):

- 0 – brak objawów chorobowych,
- 1 – drobne, nieliczne plamy na liściach, pokrywające do 25% powierzchni liści,
- 2 – żółknące liście i drobne nekrotyczne plamy na liściach, pokrywające do 50% powierzchni liści,
- 3 – nekrotyczne plamy na liściach, pokrywające od 50% do 75% powierzchni liści,
- 4 – rozległe nekrotyczne plamy na liściach, pokrywające powyżej 75% powierzchni, więdnące, zamierające rośliny.

Uzyskane w stopniach wartości przeliczono na indeks chorobowy (DI) wyrażony w procentach wg wzoru Townsenda i Heubergera:

$$DI = \frac{\sum_0^i (n \times v)}{i \times N} \times 100$$

$n$  – liczba roślin w danym stopniu porażenia,

$v$  – stopień porażenia,

$i$  – największy stopień skali porażenia,

$N$  – całkowita liczba badanych roślin [Wenzel 1948].

Oceniając fitotoksyczne działanie ozonu, obserwowano rośliny w fitotronie po 2, 7 i 14 dniach od zastosowania ozonu w poszczególnych kombinacjach doświadczenia. Ocena przeprowadzona została wg metody przedstawionej w wytycznych Międzynarodowej Organizacji Ochrony Roślin [EPPO 2014]. Określono liczbę roślin martwych w każdej kombinacji oraz występowanie innych objawów, takich jak chloroza, bielenie, brązowienie, nekroza lub deformacja roślin. Do oceny nasilenia objawów zaburzeń rozwoju roślin zastosowano zmodyfikowaną 6-stopniową skalę (0–5°): 0 – brak objawów fitotoksyczności, 1 – lekka chloroza, 2 – umiarkowana chloroza, 3 – ciemnienie liści, nekrozy, 4 – deformacja roślin, 5 – rośliny zamierające [Stasiulewicz-Paluch i Wachowska 2015].

#### 4.1.2. Ocena wpływu ozonu na populację *Myzus persicae* na chryzantemach

Gdy rośliny osiągnęły wysokość ok. 10 cm, umieszczono je w fitotronie 2 i skolonizowano mszycą burakową (*M. persicae*) uzyskaną z roślin chryzantem uprawianych pod osłonami. Pojedyncze liście zasiedlone przez mszyce rozkładano równomiernie na roślinach w ilości 5 liści na metr kwadratowy powierzchni fitotronu. Po uzyskaniu odpowiedniego zasiedlenia mszyce na średnim poziomie ok. 5 owadów na roślinę, chryzantemy w skrzynkach w kombinacji 2, 3 i 4 poddano działaniu ozonu. Ozon aplikowano, stosując ozonator BW-STL20 20000 mg/h umieszczony w szczelnej szklarni, do której przeniesiono rośliny z kombinacji 2, 3 oraz 4 zgodnie z tabelą 2. Kontrolę bezwzględną stanowiły rośliny nieozonowane, a kontrolę względną rośliny opryskane insektycydem Karate Zeon 050 CS (substancja czynna: lambdacyhalotryna) w stężeniu 0,05% [Zalecenia Ochrony Roślin na lata 2016–2017].

Ocenę liczebności mszyce burakowej na roślinach przeprowadzono przed aplikacją ozonem, a następnie 2, 7, 14 i 30 dni po zabiegu ozonowania. Częstotliwość liczenia mszyce burakowej zgodna była z metodyką zalecaną przez EPPO

Tabela 2. Zabiegi ochronne wykonane na chryzantemach zasiedlonych przez mszyce  
 Table 2. Protective treatments performed on chrysanthemums inhabited by aphids

| Kombinacja<br>Combination                                                        | Traktowanie ozonem<br>Ozone treatment       |                                                  | Przechowywanie po ozonowaniu<br>Storage after ozonation |                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                                                                                  | czas aplikacji<br>application time<br>(min) | stężenie<br>cocentration<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | czas<br>time<br>(min)                                   | stężenie<br>cocentration<br>(mg/m <sup>3</sup> ) |
| 1 – Kontrola bezwzględna/<br>Absolute control                                    | –                                           | –                                                | –                                                       | –                                                |
| 2 – Ozon2 (aplikacja<br>i przechowywanie)/ Ozone2<br>(application and storage)   | 2                                           | 2,34                                             | 10                                                      | 1,39                                             |
| 3 – Ozon10 (aplikacja)/<br>Ozone10 (application)                                 | 10                                          | 7,30                                             | 0                                                       | 0                                                |
| 4 – Ozon10 (aplikacja<br>i przechowywanie)/ Ozone10<br>(application and storage) | 10                                          | 7,30                                             | 10                                                      | 1,85                                             |
| 5 – Kontrola względna/<br>Relative control                                       | –                                           | –                                                | –                                                       | –                                                |

[EPPO 1997]. Ponadto oceniano wysokość sadzonek. Śmiertelność mszyc wyliczono ze wzoru Abbotta:

$$Sk = \frac{Ca-Ta}{Ca} * 100\%$$

Sk – skuteczność zabiegu,

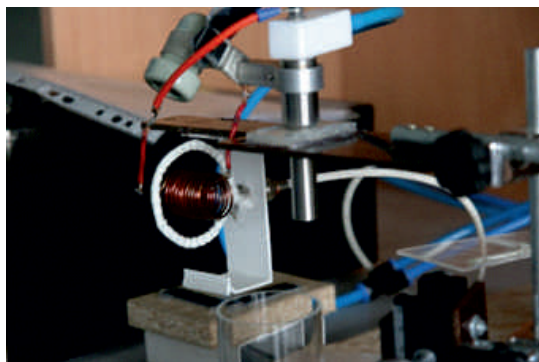
Ca – liczba mszyc w kontroli,

Ta – liczba mszyc w kombinacji ze stosowaniem zabiegu ochrony [Abbott 1925].

Podobnie jak w przypadku chryzanem inokulowanych przez *B. cinerea* oceniano uszkodzenia liści wywołane toksycznym działaniem ozonu.

## 4.2. Ocena wpływu plazmy niskotemperaturowej na ukorzenianie sadzonek zdrewniałych, półzdrewniałych i zielnych

W przeprowadzonych doświadczeniach wykorzystywano plazmę niskotemperaturową wytwarzaną w specjalnie skonstruowanym na Politechnice Lubelskiej reaktorze Glide Arc Discharges (GAD) powstałą po podaniu powietrza lub azotu o przepływie od 1 do 30 l/min, opisanym i zgłoszonym do Urzędu Patentowego [Mazurek i in. 2015]. W reaktorze tym powstaje quasi-łukowe wyładowanie, które jest źródłem tworzącej się plazmy nietermicznej. Sposobem dostarczania energii jest wymuszony przepływ prądu elektrycznego w gazie w formie łuku elektrycznego. Tworzy się plazma, czyli zjonizowany gaz, który przewodzi prąd elektryczny i wpływa w sposób fizyczny i chemiczny na podany do przestrzeni działania materiał. Pod wpływem wdmuchiwanej w komorę wyładowczą mieszaniny gazów wyładowanie unosi się wzdłuż elektrod aż do momentu zgaszenia wyładowania kiedy energia dostarczana ze źródła nie jest już w stanie zrównoważyć strat energetycznych. Po zgaszeniu wyładowania w strefie gaśnięcia łuk odbudowuje się natychmiast w strefie zapłonu i rozpoczyna się kolejny cykl pracy [Mazurek i Pawłat 2016]. Podstawowymi składnikami reaktora były: kompresor lub butla z gazem, generator oraz komora wyładowcza. Reaktor plazmowy składał się z dwóch wymiennych elektrod miedzianych o profilowanym kształcie i o grubości 1,5 mm i długości 10,4 cm ustawionych pod kątem  $12^\circ$  (fot. 2). Odległość między elektrodami w dolnej części tworząca początkową szczelinę wyładowczą wynosiła 3 mm. Cechą charakterystyczną reaktora jest możliwość regulacji odstępów między elektrodami w strefie zapłonu. Takie rozwiązanie pozwala dostosowywać reaktor do rodzaju stosowanego gazu procesowego, jego wilgotności, prędkości przepływu oraz składu chemicznego [Mazurek i Pawłat 2016]. Ten rodzaj reaktora umożliwia uzyskanie nadtlenu wodoru, ozonu, stężenie powyżej 800 ppm NO oraz 200 ppm NO<sub>2</sub> [Pawłat i in. 2019]. Funkcję zapłonu wyładowania i stabilną pracę reaktora plazmowego zapewniał odpowiednio zaprojektowany układ zasilnia typu flyback. Parametry elektryczne wyjścia układu zapłonu (sygnału podawanego przez elektrody) wynosiły 15 kV, 40 mA, 16 kHz. Warunki środowiskowe w pomieszczeniu z reaktorem były następujące: temperatura 23°C, wilgotność 20%, ciśnienie 1000 hPa. Procesy zachodzące w generatorze plazmy niskotemperaturowej to: jonizacja, rekombinacja, wymiana ładunku, wzbudzenie. Ten rodzaj plazmy jest przeważnie gazem zjonizowanym w dość małym stopniu, o bardzo dużej lub dużej zawartości cząstek neutralnych [Kwiatkowski i in. 2014, Mazurek 2019, Mazurek 2020]. Do wykonania pomiarów przebiegów napięcia i prądu wykorzystano sondę napięciową Tektronix P6015A, sondę prądową Tektronix P6022 i Tektro-nix Oscyloskop TDS 2024B. Temperaturę przetworzonego gazu zmierzono za



Fot. 2. Reaktor plazmowy typu GAD

Phot. 2. GAD-type plasma reactor

pomocą nieizolowanej termopary typu K z elektronicznym multimetrem kompensacji temperatury przy odległości 3 cm od końca elektrod [Pawłat i in. 2019].

Bardzo istotna dla sprawnej pracy jest sprawna współpraca z siecią zasilającą, wysoka sprawność, prostota i bezpieczeństwo użytkowania oraz niskie koszty inwestycyjne i operacyjne. Oprócz systemu zasilania elektrycznego reaktory zawierają układy zasilania gazem, sterowania prędkością gazu oraz systemy regulacji i ochrony [Mazurek i Pawłat 2016].

W przeprowadzonym doświadczeniu oceniano wpływ plazmy niskotemperaturowej wytwarzanej przez opisany generator na ukorzenianie pędów i zdrowotność oraz fitotoksyczność względem sadzonek wybranych roślin ozdobnych.

Materiałem doświadczalnym były:

- sadzonki zdrewniałe *Salix gracilistyla* i *Salix hookeriana*,
- sadzonki półzdrewniałe *Eonymus fortunei* i *Hedera helix*,
- sadzonki zielne *Chrysanthemum grandiflorum* 'Anastasia White' i *Pleioblastus variegatus*.

Gatunki te zostały wybrane w celu oceny wpływu plazmy na ukorzenianie się sadzonek gatunków roślin zdrewniałych, półzdrewniałych i zielnych różniących się od siebie łatwością wytwarzania kallusa i korzeni przybyszowych. W praktyce szkółkarskiej często wykorzystuje się ukorzeniace oparte o związki chemiczne przyspieszające proces wytwarzania nowych korzeni, które jednak, w związku z ograniczeniami prawnymi, są wycofywane.

Plazma została wytworzona przez reaktor RF typu GAD skonstruowany na Politechnice Lubelskiej w Lublinie. Bezpośrednio po zbiorze pędy zostały poddane działaniu plazmy niskotemperaturowej z wykorzystaniem 2 rodzajów gazu roboczego – powietrza i azotu. Aplikację przeprowadzono w następujący sposób: do reaktora typu GAD zasilanego prądem o zadanej częstotliwości i zadany

napięciu podano powietrze lub azot o przepływie od 1 do 30 l/min i skierowano strumień gazu opuszczającego reaktor na powierzchnię boczną pędów przez zadany czas, który wynosił 60 s, 120 s i 300 s. Odległość od głowicy wynosiła 4 cm. Kombinację kontrolną stanowiły sadzonki bez obróbki plazmowej.

#### **4.2.1. Określenie parametrów morfologicznych sadzonek zdrewniałych traktowanych plazmą**

Do badań wybrano 2 gatunki wierzby – *S. gracilistyla* oraz *S. hookeriana* charakteryzujących się różnymi zdolnościami do tworzenia korzeni. Sztobry uzyskano z roślin pochodzących z Gospodarstwa Szkółkarskiego „Zielone Wzgórze” w Nałęczowie (woj. lubelskie). Następnie zostały one pocięte na ok. 10-centymetrowe części zgodnie z praktyką szkółkarską i przygotowane do potraktowania plazmą niskotemperaturową. Zarówno pędy plazmowane, jak i pędy w kombinacji kontrolnej zostały poddane ukorzenianiu w szklanych naczyniach o pojemności 0,5 l ze sterylną wodą zdemineralizowaną. Doświadczenie przeprowadzono w 4 powtórzeniach, w każdym znajdowały się po 4 pędy. Pędy traktowane plazmą niskotemperaturową zostały posegregowane w zależności od czasu ekspozycji na jej działanie. Plazma została wytworzona przez reaktor RF typu GAD wyprodukowany na Politechnice Lubelskiej. Przed zabiegiem wszystkie pędy zostały zważone. Następnie po 3 pędy z kombinacji wykorzystano do określenia zdrowotności, a pozostałe poddano procesowi ukorzeniania przez umieszczenie w wodzie i przetrzymywano w warunkach fitotronowych w temperaturze ok. 23–25°C, wilgotności 70% i 12-godzinny oświetleniu, stosując oprawę Xenergo Greenhouse LED Module 120 W 3-Row Medium 1200 mm, emitującą światło o następującym składzie: 55,43% (660–670 nm), 11,60% (450–460 nm), 24,74% (380–800 nm), 7,79% (600–610 nm) i 0,43% (700–740 nm). Natężenie napromieniowania mierzone w trakcie doświetlania sadzonek wyniosło 80  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ . Po upływie 4 tygodni od zastosowania plazmy powstające korzenie zostały zmierzone, a także zważono pędy. Eksperyment został zaplanowany jako całkowicie losowy projekt z 4 powtórzeniami. Obserwowano sposób stymulacji rozwoju roślin zwiększający przyrost korzeni i tworzenie kallusa. Stymulację sadzonek pędów zdrewniałych przy pomocy plazmy przeprowadzono w sposób analogiczny do licznych doświadczeń wykorzystujących światło lasera do stymulacji wytwarzania korzeni przez sadzonki wierzby produkowane na cele energetyczne [Jakubiak 2012, Klima i in. 2014]. Uzyskane wyniki zostały poddane analizie statystycznej z zastosowaniem analizy wariancji (ANOVA).

#### **4.2.2. Ocena parametrów morfologicznych sadzonek półzdrewniałych traktowanych plazmą**

Materiał do badań stanowiły dwa gatunki ozdobne o pędach półzdrewniałych: *E. fortunei* i *H. helix*. Młode pędy pochodziły z Gospodarstwa Szkółkarskiego „Zielone Wzgórze” w Nałęczowie. Pędy przygotowano do badania poprzez pocięcie na mniejsze części obejmujące 2 pączki zgodnie z praktyką szkółkarską. Poddano je działaniu plazmy niskotemperaturowej z wykorzystaniem 2 rodzajów gazu roboczego – powietrza i azotu w 3 czasach ekspozycji (60 s, 120 s i 300 s) i odległości od głowicy 4 cm. Pędy zostały poddane ukorzenianiu w multiplatach w mieszance torfu z piaskiem i perlitem (w stosunku objętościowym 1 : 1 : 1) w 4 powtórzeniach i w każdym powtórzeniu znajdowały się 4 pędy umieszczone po zabiegu w multiplacie. Pędy traktowane plazmą niskotemperaturową zostały posegregowane w zależności od czasu ekspozycji na jej działanie. Kombinację kontrolną stanowiły pędy nietraktowane plazmą. Przed zabiegiem pędy zostały ważone. Po aplikacji plazmy pędy umieszczono w multiplatach i przetrzymywano w warunkach fitotronowych w temperaturze ok. 23–25°C i 12-godzinnym oświetleniu, z zastosowaniem oprawy Xenergo Greenhouse LED Module 120W 3-Row Medium 1200 mm, emitującej światło o następującym składzie: 55,43% (660–670 nm), 11,60% (450–460 nm), 24,74% (380–800 nm), 7,79% (600–610 nm) i 0,43% (700–740 nm). Po upływie 4 tygodni od zastosowania plazmy obserwowano tworzące się korzenie, które zmierzono, a następnie zmierzono i ważono pędy. Uzyskane wyniki zostały poddane analizie statystycznej z wykorzystaniem analizy wariancji (ANOVA).

#### **4.2.3. Ocena parametrów morfologicznych sadzonek zielnych traktowanych plazmą**

Materiał do badań został pobrany z dwóch popularnych gatunków roślin ozdobnych: *C. grandiflorum* i *P. variegatus* jesienią 2018 r. Wykorzystano młode pędy, o średnicy 3–4 mm posiadające 2 węzły z roślin pochodzących z Gospodarstwa Ogrodniczego „K. Pychyński” w Praszce. Następnie zostały one pocięte na ok. 5 cm fragmenty i przygotowane do potraktowania plazmą niskotemperaturową za pomocą generatora plazmy niskotemperaturowej (fot. 3). Po usunięciu dolnych liści pędy zostały poddane działaniu plazmy niskotemperaturowej z wykorzystaniem powietrza i azotu jako gazu roboczego w 3 czasach ekspozycji (60 s, 120 s i 300 s) i odległości od głowicy 4 cm analogicznie jak w przypadku pędów zdrewniałych. Eksperyment został zaplanowany jako całkowicie losowy projekt z 4 powtórzeniami po 4 pędy w każdym.



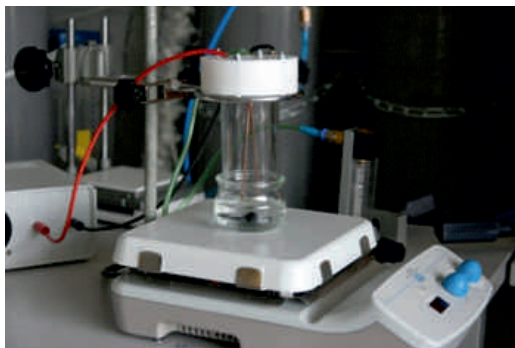


Fot. 3. Aplikacja plazmy niskotemperaturowej na sadzonki zielne chryzantemy  
 Phot. 3. Application of low-temperature plasma to chrysanthemum cuttings

Następnie pędy zostały poddane ukorzenianiu w wielodoniczkach – multiplatach w mieszance torfu z piaskiem i perlitem (w stosunku objętościowym 1 : 1 : 1). Nietraktowane pędy (kombinacja kontrolna) również umieszczono w multiplatach w celu ukorzenienia. Pędy plazmowane i te z kombinacji kontrolnej przed zabiegiem zostały zważone. Następnie umieszczono je w multiplatach i przetrzymywano w warunkach fitotronowych w temperaturze ok. 23–25°C, wilgotności 80% i 12-godzinnym oświetleniu, stosując oprawę Xenergo Greenhouse LED Module 120 W 3-Row Medium 1200 mm, emitującą światło (lampy sodowe o mocy 400 W) o następującym składzie: 55,43% (660–670 nm), 11,60% (450–460 nm), 24,74% (380–800 nm), 7,79% (600–610 nm) i 0,43% (700–740 nm). Po upływie 4 tygodni od zastosowania plazmy określano długość korzeni (cm) oraz świeżą masę pędów (g). Uzyskane dane zostały poddane analizie statystycznej z zastosowaniem analizy wariancji (ANOVA).

#### **4.2.4. Doświadczenie fitotronowe oceniające wpływ wody plazmowanej (PAW) na sadzonki zdrewniałe**

W doświadczeniu wykorzystano wodę poddaną aplikacji przez plazmę niskotemperaturową wytwarzaną w specjalnie skonstruowanym na Politechnice Lubelskiej reaktorze typu GAD po podaniu powietrza lub azotu. Skierowano strumień gazu opuszczającego reaktor do naczynia z wodą destylowaną, umieszczając naczynie na płycie mieszadła magnetycznego (fot. 4). Podczas eksperymentów przepływ gazu był kierowany prostopadłe do powierzchni wody, która była ustawiona



Fot. 4. Wytwarzanie wody plazmowanej przez generator plazmy

Phot. 4. Production of plasma activated water (PAW) by the plasma generator

w odległości 4 cm od końca elektrod. Próbkę wody były traktowane plazmą przez 60 s, 120 s oraz 300 s [Brisset i Pawłat 2016, Pawłat i in. 2019].

Materiał do badań (pędy) został pobrany z dwóch gatunków wierzby: *S. gracilistyla* i *S. hookeriana* w Gospodarstwie Szkółkarskim „Zielone Wzgórze” w Nałęczowie. Wybrano do badań z wodą plazmowaną (PAW) tylko pędy wierzby w związku z praktyką ukorzenia tego gatunku w wodzie. Stosując PAW do ukorzenia sadzonek w multiplatach, należałoby opracować urządzenie do aplikacji wody plazmowanej bezpośrednio po wytworzeniu do podłoża, co w obecnych warunkach było technicznie niewykonalne. Bezpośrednio po zbiorze pędy wierzby zostały pocięte na ok. 10-centymetrowe odcinki, zważone i umieszczone w szklanych naczyniach z wodą plazmowaną. Po 30 dniach oceniano świeżą masę sadzonek (g), liczbę (szt.) i długość korzeni (cm) i pędów nadziemnych [Jakubiak 2012, Monder 2016].

#### 4.3. Analiza zmian fizjologicznych i biochemicznych w sadzonkach zielnych pod wpływem działania plazmy niskotemperaturowej

Badanie przeprowadzono na ukorzenionych sadzonkach zielnych *C. grandiflorum* ‘Anastasia White’, oceniono zawartość kwasu indoliloctowego (IAA) w korzeniach, łodygach i liściach. Wybrano chryzantemy, ponieważ zakładano, że jako rośliny niezdrewniałe, z małą zawartością tkanki wzmacniającej, która mogłaby mieć wpływ na odczyty wyników, po poddaniu laboratoryjnej obróbce pozwolą uzyskać wiarygodne dane na temat wpływu plazmy na IAA. Wybrane sadzonki, w ilości 3 sadzonek z powtórzenia, przemyto wodą destylowaną. Świeża masa chryzantem (liście, łodygi i korzenie) w ilości 1 g, została zamrożona w ciekłym azocie w temperaturze  $-80^{\circ}\text{C}$ , a następnie poddana procesowi ekstrakcji

fitohormonów (IAA) z wykorzystaniem mieszaniny ekstrakcyjnej metanol/woda/kwas mrówkowy (w stosunku objętościowym 15 : 4 : 1, v/v/v) poprzez ucieranie w moździerz. Tak przygotowane próbki zostały pozostawione w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$ . Uzyskane ekstrakty przepuszczono przez kolumnę C18 (Sep-Pack) w celu usunięcia substancji wielkocząsteczkowych. Tak uzyskane roztwory suszono na wyparce próżniowej, następnie rozpuszczano ponownie w metanolu (do objętości wyjściowego ekstraktu). W tak uzyskanych próbach oznaczano ogólną zawartość IAA metodą spektrofotometryczną – Salkowsky'ego w 3 niezależnych powtórzeniach. Uzyskane wyniki przedstawiono w przeliczeniu na 1 g świeżej masy roślin [Agulló-Antón i in. 2014, Jaroszuk-Ścisel i in. 2019].

#### **4.4. Analiza mykologiczna sadzonek zdrewniałych wierzby poddanych działaniu plazmy**

Do analizy mykologicznej wybrano pędy *S. gracilistyla* i *S. hookeriana*, ponieważ tylko na nich występowały objawy chorobowe w trakcie ukorzeniania, a na niektórych z nich obserwowano szybki rozwój tych objawów i zamieranie sadzonek. Zastosowano własną 5-stopniową skalę porażenia ( $0-4^{\circ}$ ):

- 0 – brak objawów chorobowych,
- 1 – drobne, nieliczne plamy do 25% powierzchni pędów,
- 2 – drobne nekrotyczne plamy na sadzonce do 50% powierzchni pędów,
- 3 – nekrotyczne plamy na sadzonkach od 50% do 75% powierzchni pędów,
- 4 – gnijące sadzonki powyżej 75% powierzchni, zamieranie sadzonek.

Część sztabrów wierzby została pobrana z każdej kombinacji, po aplikacji plazmy, celem sprawdzenia wpływu plazmy na skład gatunkowy izolatów grzybów zasiedlających sztabry. W celu porównania do badań wykorzystano też sztabry odkażone w podchlorynie sodu ( $\text{NaClO}$ ) oraz nieodkażone. Odkażanie odbywało się przez trzymanie materiału przez 1 min w 10-procentowej  $\text{NaClO}$  oraz 3-krotne płukanie w sterylnej wodzie destylowanej przez 3 min. Następnie sztabry z każdej kombinacji zostały pocięte na 3-milimetrowe odcinki i wyłożone na szalki Petriego wypełnione pożywką mineralną [Kopacki i Wagner 2006]. Po 7 dniach hodowli w termostacie, w temperaturze  $20-22^{\circ}\text{C}$  kolonie grzybów zostały policzone i przeniesione z szalek Petriego na skosy z pożywką ziemniaczano-dekstrozową (PDA) firmy Difco [Kopacki i in. 2018]. Po upływie 14 dni grzyby, które wyrosły na skosach, zostały poddane identyfikacji pod mikroskopem i oznaczone przy wykorzystaniu monografii i kluczy [Raper i in. 1949, Gilman 1957, Booth 1971, Barnett i Hunter 1972, Sałata i Rudnicka-Jeziarska 1979, Skirgiełło i in. 1979, Domsch i Gams 1980, Marcinkowska 2012].

#### 4.5. Laboratoryjna ocena wpływu plazmy niskotemperaturowej na wybrane gatunki grzybów

W doświadczeniu oceniano wpływ plazmy na tempo wzrostu liniowego grzybni wybranych gatunków grzybów chorobotwórczych zasiedlających badane sadzonki. Do badania wybrano 3 szczepy grzybów wyisobnionych ze sztabów wierzby: *Alternaria alternata* (szczep nr A 21), *Botrytis cinerea* (szczep nr R 28) oraz *Trichothecium roseum* (szczep nr T 19). Wymienione gatunki występowały najliczniej w populacji grzybów zasiedlających sadzonki. Uzyskane z jednokulturowych kultur kolonie mateczne były przeszczepiane na pożywkę PDA (Difco) i przetrzymywane w termostacie przez 48 h zgodnie z metodyką opisaną przez Karem i współautorów [2019]. Po tym czasie kultury grzybów poddawano działaniu plazmy niskotemperaturowej przy pomocy plazmotronu z wykorzystaniem powietrza i azotu jako gazu roboczego w 3 czasach ekspozycji (60 s, 120 s i 300 s) i odległości od głowicy 4 cm. Kombinację kontrolną stanowiły kolonie badanych grzybów nietraktowane plazmą. Dla każdej kombinacji doświadczalnej przygotowano po 3 szalki, traktując je jako powtórzenia. Szalki były umieszczone w termostacie w temperaturze 25°C. Po 7, 14 i 21 dniach mierzono średnice testowanych grzybów, wykonując po 2 pomiary średnicy kolonii na krzyż. Hamowanie wzrostu grzybni względem kombinacji kontrolnej umożliwiło ocenę aktywności grzybobójczej plazmy. Efektywność grzybobójcza była obliczana wg wzoru Abbota:

$$I = [C - T/C \times 100\%]$$

*I* – indeks hamowania liniowego wzrostu grzybni (%),

*C* – średnica kolonii w kombinacji kontrolnej,

*T* – średnica kolonii w kombinacji traktowanej plazmą [Jamiołkowska i Kowalski 2012].

Otrzymane dane były następnie poddane analizie statystycznej.

Oceniano też wpływ plazmy na żywotność zarodników tych samych 3 szczepów grzybów. Zarodniki grzybów testowych uzyskano z grzybni hodowanej na podłożu agarowym z ekstraktem słodowym MEA (Merck) w 30°C przez 7 dni i zebrano poprzez zalanie powierzchni płytek ~5 ml sterylnego roztworu soli fizjologicznej (8,5 g NaCl w 1 litrze wody) zawierającej Tween 80 (0,1%). Żywotność zarodników wszystkich szczepów sprawdzono i określono, używając metody kolejnych rozcieńczeń na poziomie 105 jtk (jednostek tworzących kolonie, ang. CFU) w 1 ml. Każdorazowo 0,1 ml zawiesiny zarodników grzybów rozprowadzono na powierzchni agaru z ekstraktem słodowym MEA (Merck), wykonując okrężne ruchy szalką. Zaszczepione płytki pozostawiono w temperaturze

pokojujowej na ok. 30 min, aby umożliwić pełne wchłonięcie inokulum przez agar. Następnie pokrywy płytek Petriego usunięto i przeprowadzono eksperyment, gdy zaszczipiona powierzchnia agaru była wystawiona na działanie 2 rodzajów gazu plazmowego (powietrza i azotu) przez 0 s (kontrola), 60 s, 120 s oraz 300 s. Płytki następnie inkubowano przez 72 h w temperaturze 25°C, po czym zliczono wyrosłe kolonie. Procent kolonii (w porównaniu z próbą kontrolną) dla każdej szalki obliczono z wzoru  $(A/B) \times 100$ , gdzie A oznacza całkowitą liczbę kolonii grzyba przy obróbce plazmą, a B jest całkowitą liczbą kolonii grzybów w kombinacji kontrolnej [Suhem i in. 2013].

#### **4.6. Analiza fitotoksycznego wpływu ozonu i plazmy na badane rośliny**

Oceniano wpływ badanych czynników fizycznych na kondycję roślin. Zarówno w doświadczeniu z wykorzystaniem ozonu, jak i plazmy niskotemperaturowej oceniano negatywny wpływ tych czynników na rośliny. Określano także objawy fitotoksyczności dla ozonu wg skali EPPO PP 1/135(4) [EPPO 2014], od 0 do 5, gdzie 0 oznacza brak objawów uszkodzeń, a 5 rośliny całkowicie zniszczone [Włodarek i in. 2016]. Oceniano też przekroje traktowanych plazmą sadzonek, wykorzystując mikroskopię optyczną 3D.

#### **4.7. Analiza statystyczna**

Analizy statystyczne oparte zostały na modelach dwuczynnikowej analizy wariancji (ANOVA) oraz wielokrotnych testach T-Tukeya, przy przyjętym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Dla danych uzyskanych z pomiarów w kolejnych terminach (z tych samych obiektów) stosowano ANOVA z powtarzanymi pomiarami (repeated measures analysis of variance) – dane są skorelowane. Zastosowano modele analizy wariancji z efektami głównymi badanych czynników i ich interakcjami. Tabele ANOVA zawierają najważniejsze elementy analiz wariancji z finałowym podaniem obliczonych prawdopodobieństw (tzw. p-value) związanych z zastosowanymi funkcjami testowymi F (F- Snedecora lub Fishera-Snedecora). Obliczone wartości p określają istotność i wielkość wpływu badanych czynników na różnicowanie wyników analizowanych zmiennych poprzez porównywanie ich z najczęściej przyjmowanymi poziomami istotności alfa (0,05; 0,01; ...).

Testy porównań wielokrotnych T-Tukeya umożliwiły szczegółowe analizy porównawcze średnich poprzez wyodrębnianie jednorodnych statystycznie grup średnich (grupy homogeniczne). Wskaźniki literowe przy średnich wyznaczają tzw. grupy homogeniczne (jednorodne statystycznie). Wystąpienie tego samego

wskaźnika literowego przy średnich (przynajmniej jednego) oznacza niewykazanie (brak) istotnej statystycznie różnicy pomiędzy nimi. Kolejne wskaźniki literowe a, b, ... określają grupy średnich w porządku rosnącym. Wielkości NIR pełnią rolę pomocniczą, pozwalając w sposób ilościowy szacować różnice pomiędzy średnimi. Współzależności pomiędzy analizowanymi zmiennymi (cechami) badano przy pomocy współczynników korelacji Pearsona (obliczano współczynniki korelacji oraz wartości prawdopodobieństw związanych z funkcjami testowymi t-Studenta, służącymi do oceny istotności poprzez porównanie z przyjętym poziomem istotności) [Łomnicki 2014, Raudonius 2017].

Dla danych uzyskanych z pomiarów w kolejnych terminach (z tych samych obiektów) stosowano ANOVA z powtarzanymi pomiarami (dane są skorelowane). Analizy statystyczne oparte zostały na modelach analizy wariancji (ANOVA) oraz wielokrotnych testach bazujących na testach T-Tukeya, przy przyjętym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Odpowiednikiem testu T-Tukeya jest test Newmana-Keulsa (test Studenta-Newmana-Keulsa, ang. Newman-Keuls test – wykorzystywany w statystyce test post hoc. Służy on porównywaniu wszystkich możliwych par średnich. Test ten jest uważany za mniej konserwatywny od testu HSD Tukeya, ale oparty jest na jego technologii [Bordens i Abbott 2008].

## 5. WYNIKI

### 5.1. Wpływ ozonu na patogeny i szkodniki chryzantem

#### 5.1.1. Ocena indeksu chorobowego chryzantem porażonych przez *Botrytis cinerea*

Przeprowadzone badania wykazały, że najwyższy indeks chorobowy zaobserwowano na chryzantemach w kombinacji kontroli bezwzględnej. Najniższe wartości indeksu chorobowego osiągnięto w kontroli względnej, czyli po użyciu preparatu Rovral Flo 255 SC. Na roślinach w kombinacji kontrolnej porażenie wzrastało w bardzo szybkim tempie (fot. 5).



Fot. 5. Chryzantemy inokulowane *B. cinerea* w kombinacji ozonowanej (a) i w kontroli bezwzględnej (b)

Phot. 5. Chrysanthemums inoculated with *B. cinerea* in ozone combination (a) and absolute control (b)

W okresie 7 dni po ozonowaniu wybranych roślin, a także roślin objętych ochroną preparatem Rovral Flo 255 SC nastąpiło prawie całkowite wyeliminowanie *B. cinerea*. Po 14 dniach po ozonowaniu średni indeks chorobowy był niższy. Analiza wariancji pokazała, że badane czynniki są różnicowane przez wielkości badanych zmiennych. Okazało się, że w zależności od zastosowanej kombina-



cji ochrony roślin ozonem uzyskano zróżnicowane wartości zmiennych i jego wpływ na zróżnicowanie badanej zmiennej jaką jest indeks chorobowy. Średnie indeksy chorobowe po 7 i 14 dniach różniły się istotnie od kontroli bezwzględnej. Szczególnie niskie były w kombinacji z opryskiem fungicydowym oraz w kombinacji z najdłuższym czasem aplikacji ozonu i po 30 min przetrzymywania w zamkniętej szklarni z ozonem (tab. 3).

Największy przyrost wysokości wykazywały rośliny traktowane preparatem Rovral Flo 255 SC, podczas gdy najmniejszy przyrost wysokości roślin był w kontroli bezwzględnej. Średni przyrost wysokości roślin we wszystkich kombinacjach różnił się istotnie od kombinacji kontrolnej (tab. 4).

Tabela 3. Indeks chorobowy chryzantem traktowanych ozonem (%)

Table 3. Disease index of ozone-treated chrysanthemums (%)

| Kombinacja doświadczalna<br>Experimental combination                        | Indeks chorobowy po 7 dniach<br>Disease index after 7 days | Indeks chorobowy po 14 dniach<br>Disease index after 14 days |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Kontrola bezwzględna/<br>Absolute control                                   | 87,5000e*                                                  | 50,0000bc                                                    |
| 2 min/10 min                                                                | 53,1250c                                                   | 26,5625abd                                                   |
| 10 min/0 min                                                                | 42,1875abc                                                 | 25,0000abcd                                                  |
| 10 min/30 min                                                               | 29,6875abcd                                                | 14,0625ad                                                    |
| Kontrola względna Rovral Flo<br>255SC/ Relative control Rovral<br>Flo 255SC | 32,8125abc                                                 | 7,8125d                                                      |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).

Tabela 4. Średnia wysokość sadzonek chryzantem traktowanych ozonem (CM)

Table 4. Average height of ozone-treated chrysanthemum seedlings (CM)

| Kombinacja doświadczalna<br>Experimental combination                        | Przed aplikacją ozonu<br>Before the application of<br>ozone | Po 30 dniach<br>od aplikacji<br>After 30 days<br>from application | Różnica wysokości<br>Height difference |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Kontrola bezwzględna/<br>Absolute control                                   | 9,125                                                       | 9,250                                                             | 0,125a*                                |
| 2 min/10 min                                                                | 10,250                                                      | 11,125                                                            | 0,875b                                 |
| 10 min/0 min                                                                | 9,000                                                       | 9,875                                                             | 0,875b                                 |
| 10 min/30 min                                                               | 8,625                                                       | 9,625                                                             | 1,000b                                 |
| Kontrola względna Rovral<br>Flo 255SC/ Relative<br>control Rovral Flo 255SC | 8,375                                                       | 13,250                                                            | 4,875c                                 |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).

### 5.1.2. Wpływ ozonu na populację *Myzus persicae* i zasiedlone chryzantemy

Przeprowadzone badania wykazały, że największe zasiedlenie przez mszycę *M. persicae* i wyraźne osłabienie roślin zaobserwowano na chryzantemach w kombinacji kontroli bezwzględnej (fot. 6). Dwa dni po ozonowaniu zasiedlenie wyraźnie się zmniejszyło. Podobne wyniki osiągnięto po użyciu preparatu Karate Zeon 050 CS. Na roślinach nieobjętych ochroną średnia liczba mszyc wzrastała w szybkim tempie. Tydzień po ozonowaniu wybranych kombinacji roślin i roślin objętych ochroną preparatem Karate Zeon 050 CS nastąpiło prawie całkowite wyeliminowanie mszyc na roślinie. Dwa tygodnie po ozonowaniu średnia liczba mszyc nieznacznie wzrosła. Miesiąc po ozonowaniu nastąpił znaczny wzrost liczby *M. persicae* na chryzantemach. Analiza wariancji pokazała, że badane czynniki są różnicowane przez wielkości badanych zmiennych. Określono, że zastosowana kombinacja ochrony roślin ozonem wpływa na zróżnicowanie badanej zmiennej, jaką jest ilość mszyc. Najszybszy wzrost roślin nastąpił w kombinacji z 30-minutowym czasem przechowywania roślin w ozonie. Rośliny uzyskały średnią wysokość 24,625 cm, ale ich wysokość nie różniła się statystycznie od innych kombinacji. Różnice statystyczne zaobserwowano po 7 dniach od ozonowania. Jedynie kombinacja z aplikacją insektycydem różniła się istotnie statystycznie wysokością względem pozostałych kombinacji. Chryzantemy najdłużej traktowane ozonem uzyskały najwyższą średnią wysokość 24,7 cm. Najniższy wzrost zaobserwowano u roślin w kombinacji nr 2 i 3, ale nie różniły się istotnie od kontroli (tab. 5).



Fot. 6. Zasiedlenie chryzantem przez mszycę w kombinacji kontrolnej  
Phot. 6. Infestation of chrysanthemums by aphids in the control combination

Tabela 5. Średnia wysokość pędów chryzantem zasiedlonych przez mszyce po potraktowaniu ozonem (cm)

Table 5. Average height of chrysanthemum shoots infested by aphids after ozone treatment (cm)

| Kombinacja doświadczalna<br>Experimental combination                            | Przed aplikacją ozonu<br>Before ozone application | Po 2 dniach od aplikacji<br>After 2 days from application | Po 7 dniach od aplikacji<br>After 7 days from application |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Kontrola bezwzględna/<br>Absolute control                                       | 22,550                                            | 22,700                                                    | 22,925ab*                                                 |
| 2 min/10 min                                                                    | 21,300                                            | 21,500                                                    | 21,650ab                                                  |
| 10 min/0 min                                                                    | 21,150                                            | 21,500                                                    | 21,500ab                                                  |
| 10 min/30 min                                                                   | 24,325                                            | 24,625                                                    | 24,700ab                                                  |
| Kontrola względna<br>Karate Zeon 050 CS/<br>Relative control Karate Zeon 050 CS | 23,525                                            | 23,725                                                    | 24,100b                                                   |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).



Fot. 7. Chryzantemy zasiedlone przez mszyce po 30 dniach od aplikacji ozonu

Phot. 7. Chrysanthemums colonized by aphids 30 days after ozone application

Analizowano również liczebność *M. persicae* na chryzantemach. Dwa dni po zabiegu najwięcej mszyc notowano w kombinacji kontrolnej, a najmniej w kombinacjach traktowanych ozonem przez 10 min. Podobna sytuacja miała miejsce po 7 dniach i wszystkie kombinacje różniły się istotnie od kombinacji kontrolnej. Na roślinach opryskanych preparatem Karate Zeon 050 CS wzrosła jednak

liczba mszyc po 14 oraz po 30 dniach. Po 14 dniach średnie liczebności mszyc we wszystkich kombinacjach różniły się istotnie od kontroli. Po 30 dniach doświadczenia we wszystkich kombinacjach znacząco wzrosła liczba mszyc (fot. 7). Liczba ich różniła się istotnie od liczby mszyc w kontroli, jednak nadal najmniej osobników notowano na roślinach traktowanych ozonem przez 10 min i 30 min przetrzymywanych w szczelnej szklarni (tab. 6).

Tabela 6. Średnia liczba mszyc na roślinie (szt.)

Table 6. Average the number of aphids per plant (pcs.)

| Kombinacja doświadczalna<br>Experimental combination                               | Przed zabiegiem<br>Before application | Po 2 dniach<br>After 2 days | Po 7 dniach<br>After 7 days | Po 14 dniach<br>After 14 days | Po 30 dniach<br>After 30 days |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Kontrola bezwzględna/<br>Absolute control                                          | 4,5950a*                              | 8,0650abc                   | 20,4400de                   | 25,8750e                      | 100,5950f                     |
| 2 min/10 min                                                                       | 20,5025de                             | 5,0825a                     | 2,7525a                     | 2,2900a                       | 19,1275de                     |
| 10 min/0 min                                                                       | 17,2150d                              | 1,4100a                     | 1,0325a                     | 1,9575a                       | 16,2200cd                     |
| 10 min/30 min                                                                      | 6,9425ab                              | 0,4100a                     | 0,5650a                     | 1,5750a                       | 14,2200bcd                    |
| Kontrola względna<br>Karate Zeon 050 CS/<br>Relative control<br>Karate Zeon 050 CS | 5,2000a                               | 0,7200a                     | 0,7200a                     | 4,5025a                       | 17,5325de                     |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).

Tabela 7. Wartość współczynnika Abbotta na roślinach traktowanych ozonem

Table 7. The value of the Abbott's coefficient on plants treated with ozone

| Kombinacja doświadczalna<br>Experimental combination                         | Współczynnik Abbotta (%)<br>Abbott's coefficient (%) |                             |                               |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
|                                                                              | po 2 dniach<br>after 2 days                          | po 7 dniach<br>after 7 days | po 14 dniach<br>after 14 days |
| Kontrola bezwzględna/ Absolute control                                       | 0,0000a*                                             | 0,0000a                     | 0,0000a                       |
| 2 min/10 min                                                                 | 32,0050b                                             | 86,3675c                    | 90,9525c                      |
| 10 min/0 min                                                                 | 82,1850c                                             | 95,1275c                    | 92,1450c                      |
| 10 min/30 min                                                                | 95,3650c                                             | 97,3600c                    | 93,7850c                      |
| Kontrola względna Karate Zeon 050 CS/<br>Relative control Karate Zeon 050 CS | 91,0950c                                             | 96,3250c                    | 82,9600c                      |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).

Opierając się na ocenie liczebności mszyc, obliczono współczynniki Abbota, z których wynikało, że największa skuteczność zabiegu związana ze śmiertelnością mszyc, zarówno po 7, jak i po 14 dniach od aplikacji ozonu, dotyczyła kombinacji nr 4 z aplikacją 10-minutową i 30-minutowym przechowywaniem roślin w szczelnym pomieszczeniu. Najniższa skuteczność była przy aplikacji ozonu w czasie 120 s, różniła się istotnie od pozostałych kombinacji, zwłaszcza po 2 dniach od aplikacji ozonu (tab. 7).

## 5.2. Ocena świeżej masy sadzonek oraz długości powstałych korzeni i pędów traktowanych plazmą niskotemperaturową

### 5.2.1. Ocena sadzonek zdrewniałych wierzby

Analiza masy sztabrów wierzby przed plazmowaniem oraz po nim wykazała jej wzrost po 4 tygodniach od zastosowania plazmy. Wzrost masy był zróżnicowany w zależności od czasu ekspozycji. Największy przyrost masy zanotowano w kombinacji przy 30-minutowym przetrzymywaniu roślin w ozonie w przypadku *S. caprea* (0,5375 g) i w kombinacji bez przetrzymywania roślin w ozonie dla *S. gracilistyla* (1,85 g), natomiast w przypadku *S. hookeriana* – w kombinacji bez przetrzymywania roślin w ozonie (1,625 g). Dość duży wzrost masy zauważono też w kombinacji z 2-minutowym czasem aplikacji i 10-minutowym przetrzymywaniem w ozonie, w których gazem roboczym było powietrze. Mniejsze przyrosty masy zauważono przy zastosowaniu plazmy, gdy

Tabela 8. Średnia świeża masa sadzonek *S. gracilistyla* (g)

Table 8. Average fresh weight of *S. gracilistyla* seedlings (g)

| Kombinacja doświadczalna<br>Experimental combination | Przed aplikacją plazmy<br>Before the application<br>of plasma | Po 30 dniach<br>od aplikacji plazmy<br>30 days after plasma<br>application | Różnica świeżej<br>masy<br>Fresh weight<br>difference |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Kontrola/ Control                                    | 2,975                                                         | 3,800                                                                      | 0,825a*                                               |
| Powietrze 1 min/ Air 1 min                           | 4,050                                                         | 5,300                                                                      | 1,250a                                                |
| Powietrze 2 min/ Air 2 min                           | 6,275                                                         | 8,125                                                                      | 1,850a                                                |
| Powietrze 5 min/ Air 5 min                           | 5,775                                                         | 7,100                                                                      | 1,325a                                                |
| Azot 1 min/ Nitrogen 1 min                           | 3,925                                                         | 5,050                                                                      | 1,125a                                                |
| Azot 2 min/ Nitrogen 2 min                           | 5,300                                                         | 6,675                                                                      | 1,375a                                                |
| Azot 5 min/ Nitrogen 5 min                           | 3,650                                                         | 4,675                                                                      | 1,025a                                                |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).

Tabela 9. Średnia świeża masa sadzonek *S. hookeriana* (g)Table 9. Average fresh weight of *S. hookeriana* seedlings (g)

| Kombinacja<br>Combination     | Masa sadzonek przed<br>aplikacją<br>Seedlings weight before<br>application | Masa sadzonek<br>po 30 dniach od aplikacji<br>Seedlings weight 30 days<br>after application | Różnica masy<br>Weight difference |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Kontrola/Control              | 3,750                                                                      | 4,400                                                                                       | 0,650a*                           |
| Powietrze 1 min/<br>Air 1 min | 4,800                                                                      | 5,500                                                                                       | 0,700a                            |
| Powietrze 2 min/<br>Air 2 min | 5,150                                                                      | 6,775                                                                                       | 1,625a                            |
| Powietrze 5 min/<br>Air 5 min | 5,275                                                                      | 6,325                                                                                       | 1,050a                            |
| Azot 1 min/<br>Nitrogen 1 min | 4,325                                                                      | 5,700                                                                                       | 1,375a                            |
| Azot 2 min/<br>Nitrogen 2 min | 4,950                                                                      | 6,250                                                                                       | 1,300a                            |
| Azot 5 min/<br>Nitrogen 5 min | 5,025                                                                      | 5,725                                                                                       | 0,700a                            |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).

gazem roboczym był azot. Nie zanotowano jednak różnic istotnych statystycznie względem kombinacji kontrolnej (tab. 8 i 9). Obliczony współczynnik korelacji pomiędzy różnicą masy sadzonek *S. gracilistyla* a stopniem porażenia był dodatni i wyniósł  $r = 0,0797$  (przy  $p = 0,687$ ). Obliczony współczynnik korelacji pomiędzy różnicą masy sadzonek *S. hookeriana* a stopniem porażenia wyniósł  $r = -0,7489$  (przy  $p = 0,000$ ).

Pomiary po 4 tygodniach od zastosowania plazmy na sztołach *S. gracilistyla* zaobserwowano różnice w długości powstałych korzonków (fot. 8). Największa sumaryczna długość powstałych korzeni zaobserwowana była w kombinacji z azotem jako gazem roboczym stosowanym przez 60 s oraz 120 s. Nieco mniejsze przyrosty korzeni zaobserwowano w kombinacjach z powietrzem 120 s i 300 s. Najmniejsze przyrosty zauważono w kombinacji kontrolnej, chociaż wyniki te nie różniły się istotnie statystycznie pomiędzy sobą. Liczba tworzących się korzeni na sadzonce w tym przypadku była największa w kombinacji plazmy z azotem aplikowanym przez 120 s. Biorąc pod uwagę sumę długości powstałych pędów na sadzonce, największa średnia długość dotyczyła kombinacji plazmy z powietrzem aplikowanej przez 300 s. W kombinacji tej najwięcej powstało pędów, jednak te wyniki też nie różniły się istotnie od kombinacji kontrolnej (tab. 10). Obliczony współczynnik korelacji pomiędzy sumą długości korzeni a różnicą masy był dodatni i wyniósł  $r = 0,5470$  ( $p = 0,003$ ).



Fot. 8. Tworzące się korzenie na pędach *S. gracilistyla*

Phot. 8. Forming roots on *S. gracilistyla* shoots

Tabela 10. Średnia liczba korzeni i średnia suma długości pędów na *S. gracilistyla*

Table 10. Average number of roots and mean sum of shoot lengths on *S. gracilistyla*

| Kombinacja doświadczalna<br>Experimental combination | Liczba korzeni na sadzonce (szt.)<br>The number of roots on the seedling (pcs.) | Suma długości korzeni na sadzonce<br>Length sum of the roots on the seedling (cm) | Liczba pędów na sadzonce (szt.)<br>The number of the shoots on the seedling (pcs.) | Suma długości pędów na sadzonce<br>Length sum of the shoots on the seedling (cm) |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Kontrola/Control                                     | 15,00a*                                                                         | 57,400a                                                                           | 5,25a                                                                              | 10,100a                                                                          |
| Powietrze 1 min/<br>Air 1 min                        | 14,25a                                                                          | 67,525a                                                                           | 3,50a                                                                              | 8,350a                                                                           |
| Powietrze 2 min/<br>Air 2 min                        | 14,00a                                                                          | 73,775a                                                                           | 4,50a                                                                              | 12,325a                                                                          |
| Powietrze 5 min/<br>Air 5 min                        | 15,00a                                                                          | 72,900a                                                                           | 6,75a                                                                              | 14,800a                                                                          |
| Azot 1 min/<br>Nitrogen 1 min                        | 15,25a                                                                          | 74,425a                                                                           | 4,75a                                                                              | 9,550a                                                                           |
| Azot 2 min/<br>Nitrogen 2 min                        | 19,75a                                                                          | 83,175a                                                                           | 6,25a                                                                              | 13,750a                                                                          |
| Azot 5 min/<br>Nitrogen 5 min                        | 16,00a                                                                          | 66,650a                                                                           | 5,75a                                                                              | 11,675a                                                                          |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).

Oceniając sztabry *S. hookeriana*, zaobserwowano również różnice w długości powstałych korzonków (fot. 9). Największa sumaryczna długość powstałych korzeni oraz ich liczba na sadzonce zaobserwowana była w kombinacji z powietrzem jako gazem roboczym stosowanym przez 120 s. Nieco mniejsze przyrosty korzeni zaobserwowano w kombinacji z powietrzem aplikowanym przez 60 s.





Fot. 9. Korzenie i pędy wytworzone na sztozach *S. hookeriana*

Phot. 9. Roots and shoots developed on *S. hookeriana* cuttings

Tabela 11. Średnia liczba korzeni i średnia suma długości pędów na *S. hookeriana*

Table 11. Average number of roots and mean sum of shoot lengths per *S. hookeriana*

| Kombinacja<br>Combination     | Liczba korzeni<br>na sadzonce (szt.)<br>The number of<br>roots on the<br>seedling (pcs.) | Suma długości<br>korzeni na<br>sadzonce (cm)<br>Lengths sum of<br>the roots on the<br>seedling (cm) | Liczba pędów<br>na sadzonce (szt.)<br>The number of<br>shoots on the<br>seedling (pcs.) | Suma długości<br>pędów na<br>sadzonce (cm)<br>Lengths sum of<br>the shoots on the<br>seedling (cm) |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kontrola/Control              | 10,25ab*                                                                                 | 34,475ab                                                                                            | 4,00a                                                                                   | 9,425a                                                                                             |
| Powietrze 1 min/<br>Air 1 min | 12,00abc                                                                                 | 41,550a                                                                                             | 5,25a                                                                                   | 14,700a                                                                                            |
| Powietrze 2 min/<br>Air 2 min | 16,00c                                                                                   | 44,925a                                                                                             | 5,00a                                                                                   | 13,225a                                                                                            |
| Powietrze 5 min/<br>Air 5 min | 10,00ab                                                                                  | 37,275ab                                                                                            | 5,25a                                                                                   | 13,475a                                                                                            |
| Azot 1 min/<br>Nitrogen 1 min | 9,00a                                                                                    | 39,150ab                                                                                            | 3,25a                                                                                   | 9,675a                                                                                             |
| Azot 2 min/<br>Nitrogen 2 min | 9,50a                                                                                    | 20,400b                                                                                             | 4,75a                                                                                   | 10,725a                                                                                            |
| Azot 5 min/<br>Nitrogen 5 min | 14,50bc                                                                                  | 37,275ab                                                                                            | 6,25a                                                                                   | 14,575a                                                                                            |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).

Średnie długości korzeni w pozostałych kombinacjach doświadczenia były dużo niższe i różniły się statystycznie pomiędzy sobą. Biorąc pod uwagę sumę długości powstałych pędów na sadzonce, największa średnia długość dotyczyła kombinacji plazmy z powietrzem aplikowanej przez 60 s i w kombinacji z azotem 300 s. W kombinacji z azotem liczba powstałych pędów była najwyższa, jednak wyniki dotyczące powstałych na sztobrach pędów nie różniły się istotnie od kombinacji kontrolnej (tab. 11). Obliczony współczynnik korelacji pomiędzy sumą długości korzeni, a różnicą masy był dodatni i wynosił  $r = 0,1160$  ( $p = 0,557$ ).

### 5.2.2. Ocena sadzonek półzdrewniałych

Analiza sadzonek półzdrewniałych *Eonymus fortunei* przed zastosowaniem oraz po zastosowaniu plazmy wykazała wzrost ich masy po 4 tygodniach. Wzrost ten był zróżnicowany w zależności od czasu ekspozycji (fot. 10). Największy średni przyrost masy zanotowano dla *E. fortunei*, gdy gazem roboczym było powietrze (0,5325 g), natomiast najmniejszy (0,13 g) w przypadku, gdy gazem roboczym był azot aplikowany przez 2 min. Dość duży wzrost masy (0,3675 g) zauważono też w kombinacji, w której gazem roboczym było powietrze (tab. 12, rys. 2). Mniejsze przyrosty masy zauważono w przypadku doświadczenia z *Hedera helix* (fot. 11). Największy średni przyrost masy (0,1975 g) zanotowano w kombinacji, w której gazem roboczym było powietrze. Najmniejszy średni przyrost masy sadzonek (0,0275 g) dotyczył kombinacji, w której gazem roboczym był azot aplikowany przez 5 min (tab. 13, rys. 3).



Fot. 10. Ukorzenione sadzonki *E. fortunei*

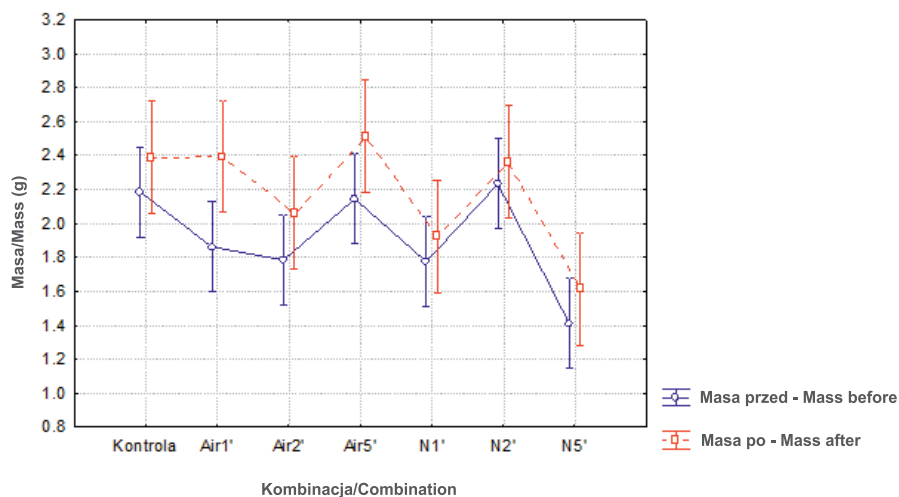
Phot. 10. Rooted cuttings of *E. fortunei*

Tabela 12. Świeża masa sadzonek *E. fortunei* (g)Table 12. Fresh weight of *E. fortunei* seedlings (g)

| Kombinacja<br>Combination     | Masa sadzonek<br>przed aplikacją<br>The weight of the<br>seedlings before<br>application | Masa sadzonek<br>po 30 dniach od aplikacji<br>The weight of the seedlings<br>after 30 days from<br>application | Różnica masy<br>Weight difference |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Kontrola/Control              | 2,1850                                                                                   | 2,3875                                                                                                         | 0,1925ab*                         |
| Powietrze 1 min/<br>Air 1 min | 1,8625                                                                                   | 2,3950                                                                                                         | 0,0400a                           |
| Powietrze 2 min/<br>Air 2 min | 1,7850                                                                                   | 2,0625                                                                                                         | 0,0350a                           |
| Powietrze 5 min/<br>Air 5 min | 2,1450                                                                                   | 2,5125                                                                                                         | 0,0900a                           |
| Azot 1 min/<br>Nitrogen 1 min | 1,7750                                                                                   | 1,9250                                                                                                         | 0,1825ab                          |
| Azot 2 min/<br>Nitrogen 2 min | 2,2325                                                                                   | 2,3625                                                                                                         | 0,4150b                           |
| Azot 5 min/<br>Nitrogen 5 min | 1,4125                                                                                   | 1,6150                                                                                                         | 0,1700ab                          |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).

Rys. 2. Różnica masy (g) sadzonek *E. fortunei* traktowanych plazmąFig. 2. Weight difference (g) of *E. fortunei* seedlings treated with plasma



Fot. 11. Sadzonki *H. helix*

Phot. 11. *H. helix* seedlings

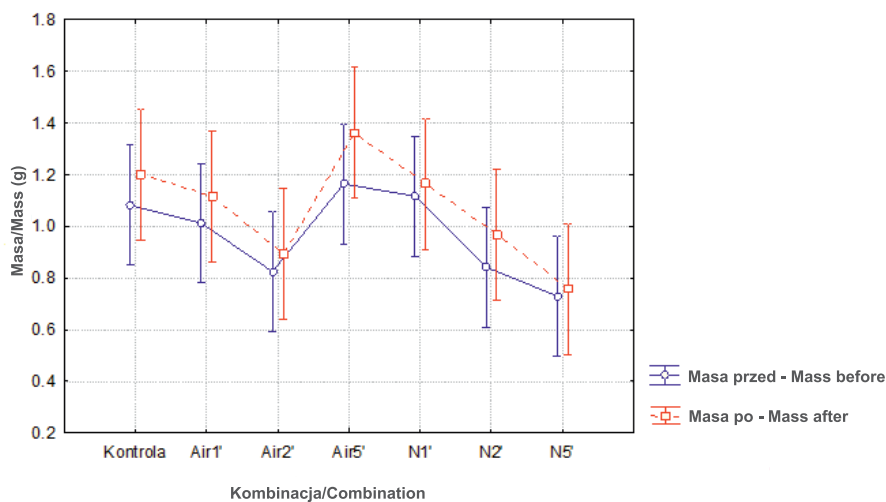
Tabela 13. Średnia świeża masa sadzonek *H. helix* przed plazmowaniem i po plazmowaniu (g)

Table 13. Average fresh weight of *H. helix* seedlings before and after plasma application (g)

| Kombinacja doświadczalna<br>Combination experimental | Masa sadzonek przed aplikacją<br>The weight of the seedlings before application | Masa sadzonek po 30 dniach od aplikacji<br>The weight of the seedlings after 30 days from application | Różnica masy<br>Weight difference |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Kontrola/Control                                     | 1,0825                                                                          | 1,2000                                                                                                | 0,1175a*                          |
| Powietrze 1 min/<br>Air 1 min                        | 1,0125                                                                          | 1,1150                                                                                                | 0,1025a                           |
| Powietrze 2 min/<br>Air 2 min                        | 0,8250                                                                          | 0,8950                                                                                                | 0,0700a                           |
| Powietrze 5 min/<br>Air 5 min                        | 1,1650                                                                          | 1,3625                                                                                                | 0,1975a                           |
| Azot 1 min/<br>Nitrogen 1 min                        | 1,1175                                                                          | 1,1650                                                                                                | 0,2950a                           |
| Azot 2 min/<br>Nitrogen 2 min                        | 0,8425                                                                          | 0,9700                                                                                                | 0,1275a                           |
| Azot 5 min/<br>Nitrogen 5 min                        | 0,7300                                                                          | 0,7575                                                                                                | 0,0275a                           |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).



Rys. 3. Średni przyrost masy (g) sadzonek *H. helix* traktowanych plazmą

Fig. 3. Average weight gain (g) of *H. helix* seedlings treated with plasma

Tabela 14. Średnia liczba korzeni i średnia suma długości pędów na *E. fortunei*

Table 14. Average number of roots and mean sum of shoot lengths on *E. fortunei*

| Kombinacja<br>Combination     | Liczba korzeni<br>na sadzonce (szt.)<br>The number of<br>roots on the<br>seedling (pcs.) | Suma długości<br>korzeni na sadzonce<br>Lengths sum of the<br>roots on the seedling<br>(cm) | Liczba pędów<br>na sadzonce (szt.)<br>Shoots number<br>on the seedling<br>(pcs.) | Suma długości<br>pędów na sadzonce<br>Lengths sum of the<br>shoots on the<br>seedling (cm) |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kontrola/Control              | 3,250ab*                                                                                 | 5,8875a                                                                                     | 2,0a                                                                             | 0,525a                                                                                     |
| Powietrze 1 min/<br>Air 1 min | 3,750ab                                                                                  | 7,6750a                                                                                     | 2,0a                                                                             | 0,550a                                                                                     |
| Powietrze 2 min/<br>Air 2 min | 2,250a                                                                                   | 2,6000a                                                                                     | 2,0a                                                                             | 0,500a                                                                                     |
| Powietrze 5 min/<br>Air 1 min | 4,250b                                                                                   | 9,1500a                                                                                     | 2,0a                                                                             | 0,650a                                                                                     |
| Azot 1 min/<br>Nitrogen 1 min | 2,750ab                                                                                  | 4,1500a                                                                                     | 2,0a                                                                             | 1,450b                                                                                     |
| Azot 2 min/<br>Nitrogen 2 min | 4,000ab                                                                                  | 6,1250a                                                                                     | 2,0a                                                                             | 0,925ab                                                                                    |
| Azot 5 min/<br>Nitrogen 5 min | 3,000ab                                                                                  | 2,7500a                                                                                     | 2,0a                                                                             | 0,375a                                                                                     |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).

Pomiary po 30 dniach od zabiegu traktowania plazmą wykazały różnice w długości wytworzonych korzonków. Podczas analizy liczby oraz długości korzeni okazało się, że najwięcej korzeni i największa ich sumaryczna długość była notowana na *E. fortunei* w kombinacji z powietrzem jako gazem roboczym przez 300 s. Wyniki te, dotyczące liczby korzeni, różniły się istotnie od kombinacji kontrolnej. Najmniejsze wyniki uzyskano w kombinacji z powietrzem w czasie aplikacji 120 s.

Największa sumaryczna długość wytworzonych pędów była w kombinacji, w której gazem roboczym był azot aplikowany przez 60 s. Różnił się ten wynik istotnie od kombinacji kontrolnej (tab. 14, rys. 4). W przypadku sadzonek *H. helix* największą sumaryczną długość powstałych korzeni zanotowano w kombinacji z plazmą z powietrzem aplikowaną przez 5 min. Jednak nie zanotowano istotnych różnic względem kombinacji kontrolnej. Podobnie było w przypadku sumarycznej długości pędów. Analizując te dane zaobserwowano istotne statystycznie różnice pomiędzy kombinacjami (tab. 15, rys. 5). Obliczony współczynnik korelacji dla *E. fortunei* pomiędzy sumą długości korzeni a różnicą masy sadzonek był dodatni, chociaż niewysoki, ponieważ wyniósł  $r = 0,0680$  ( $p = 0,731$ ). Ten sam parametr dla *H. helix* był też dodatni i wyniósł  $r = 0,2162$  ( $p = 0,269$ ).

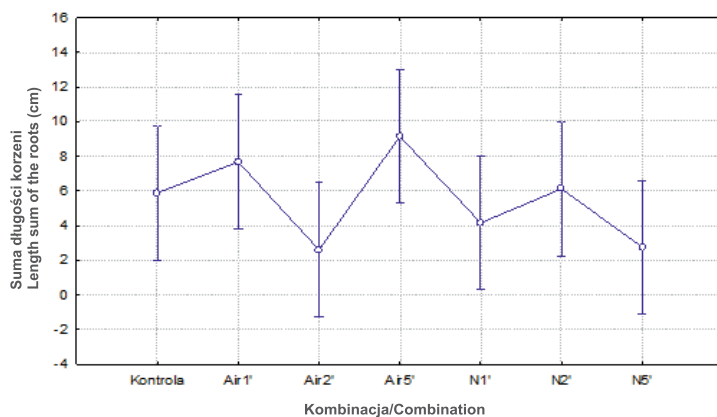
Tabela 15. Średnia liczba korzeni i średnia suma długości pędów na *H. helix*

Table 15. Average number of roots and average sum of shoot lengths per *H. helix*

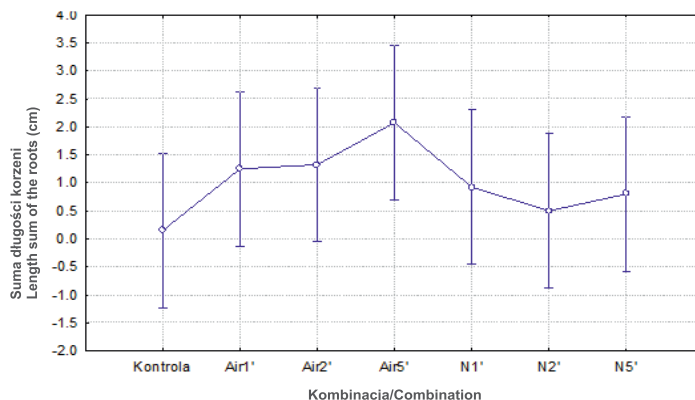
| Kombinacja<br>Combination     | Liczba korzeni<br>na sadzonce (szt.)<br>Roots number on<br>the seedling<br>(pcs.) | Suma długości<br>korzeni na sadzonce<br>Length sum of the<br>roots on the seedling<br>(cm) | Liczba pędów<br>na sadzonce (szt.)<br>Shoots number on<br>the seedling (pcs.) | Suma długości<br>pędów na<br>sadzonce<br>Length sum of the<br>shoots on the<br>seedling (cm) |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kontrola/Control              | 0,750a*                                                                           | 0,150a                                                                                     | 0,500a                                                                        | 0,750ab                                                                                      |
| Powietrze 1 min/<br>Air 1 min | 1,500a                                                                            | 1,250a                                                                                     | 1,250a                                                                        | 2,175b                                                                                       |
| Powietrze 2 min/<br>Air 2 min | 2,000a                                                                            | 1,325a                                                                                     | 0,750a                                                                        | 0,375a                                                                                       |
| Powietrze 5 min/<br>Air 5 min | 3,250a                                                                            | 2,075a                                                                                     | 1,000a                                                                        | 1,250ab                                                                                      |
| Azot 1 min/<br>Nitrogen 1 min | 1,750a                                                                            | 0,925a                                                                                     | 1,250a                                                                        | 0,925ab                                                                                      |
| Azot 2 min/<br>Nitrogen 1 min | 1,000a                                                                            | 0,500a                                                                                     | 0,750a                                                                        | 0,425ab                                                                                      |
| Azot 5 min/<br>Nitrogen 1 min | 1,500a                                                                            | 0,800a                                                                                     | 1,500a                                                                        | 0,875ab                                                                                      |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).



Rys. 4. Suma długości (cm) korzeni sadzonek *E. fortunei* traktowanych plazmą  
 Fig. 4. Length sum (cm) of the roots of *E. fortunei* cuttings treated with plasma



Rys. 5. Suma długości (cm) korzeni sadzonek *H. helix* traktowanych plazmą  
 Fig. 5. Length sum (cm) of the roots of *H. helix* cuttings treated with plasma

### 5.2.3. Ocena sadzonek zielnych

Ocena sadzonek zielnych *Chrysanthemum grandiflorum* przed zastosowaniem oraz po zastosowaniu plazmy wykazała wzrost masy po 4 tygodniach. Wzrost ten był zróżnicowany w zależności od czasu ekspozycji (fot. 12). Oceniając średni przyrost masy sadzonek *C. grandiflorum*, zaobserwowano, że najwyższe wyniki były w kombinacji, gdy gazem roboczym było powietrze (0,255 g), przy czasie aplikacji 300 s, natomiast najmniejszy, gdy gazem roboczym był azot przy 5 min aplikacji (0,1075 g) – tab. 16, rys. 6. Większe przyrosty masy zauważono





Fot. 12. Ukorzenione sadzonki *C. grandiflorum*

Phot. 12. Rooted cuttings of *C. grandiflorum*

Tabela 16. Średnia różnica masy sadzonek *C. grandiflorum* przed plazmowaniem i po nim (g)

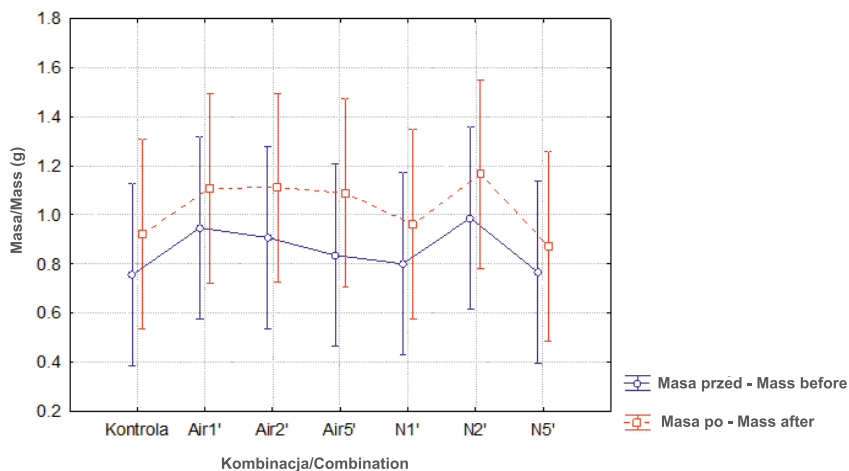
Table 16. Average difference in weight of *C. grandiflorum* seedlings before and after plasma (g)

| Kombinacja<br>Combination     | Masa sadzonek<br>przed aplikacją<br>The weight of the seedlings<br>before application | Masa sadzonek<br>po 30 dniach od aplikacji<br>The weight of the seedlings<br>30 days after application | Różnica masy<br>Weight difference |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Kontrola/Control              | 0,7550                                                                                | 0,9225                                                                                                 | 0,1675ab*                         |
| Powietrze 1 min/<br>Air 1 min | 0,9475                                                                                | 1,1075                                                                                                 | 0,1600ab                          |
| Powietrze 2 min/<br>Air 1 min | 0,9075                                                                                | 1,1100                                                                                                 | 0,2025ab                          |
| Powietrze 5 min/<br>Air 1 min | 0,8350                                                                                | 1,0900                                                                                                 | 0,2550b                           |
| Azot 1 min/<br>Nitrogen 1 min | 0,8000                                                                                | 0,9625                                                                                                 | 0,1625ab                          |
| Azot 2 min/<br>Nitrogen 1 min | 0,9875                                                                                | 1,1650                                                                                                 | 0,1775ab                          |
| Azot 5 min/<br>Nitrogen 1 min | 0,7650                                                                                | 0,8725                                                                                                 | 0,1075a                           |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).

w przypadku doświadczenia z sadzonkami *Pleiblastus variegatus* (fot. 13). Największy średni przyrost masy zanotowano w kombinacji, gdy gazem roboczym było powietrze aplikowane przez 5 min (0,465 g). Najmniejszy średni przyrost masy sadzonek dotyczył kombinacji, gdy gazem roboczym był azot aplikowany przez 5 min (0,2025 g) – tab. 17, rys. 7.



Rys. 6. Średni przyrost masy (g) sadzonek *C. grandiflorum* traktowanych plazmą

Fig. 6. Average weight gain (g) of *C. grandiflorum* seedlings treated with plasma



Fot. 13. Ukorzenione *P. variegatus*

Phot. 13. Rooted *P. variegatus*

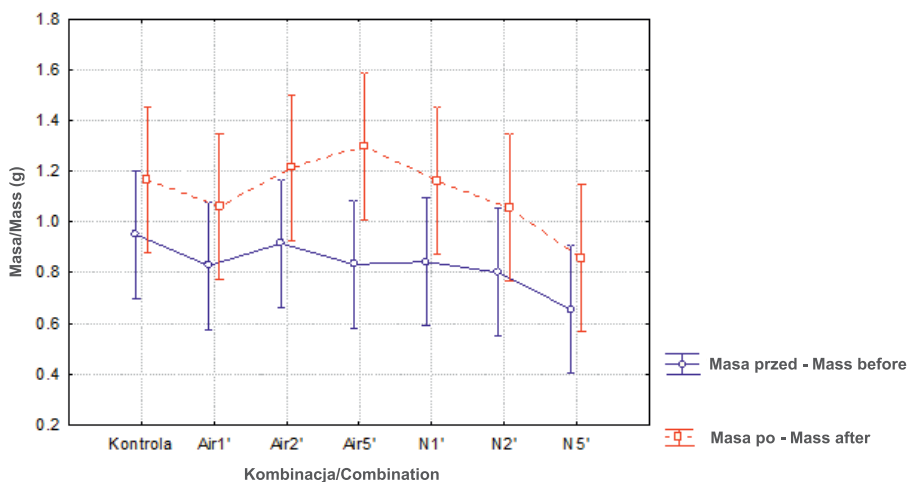
Po 30 dniach od traktowania plazmą wykazano różnice w długości wytworzonych korzonków. Najwięcej i najdłuższe korzenie występowały w kombinacji przy czasie ekspozycji plazmą 300 s, gdy gazem roboczym było powietrze i różniły się te wyniki istotnie od kombinacji kontrolnej. Najmniejsza sumaryczna długość korzonków pojawiła się w kombinacji przy czasie ekspozycji 60 s, gdy gazem roboczym był azot i było to nawet mniej od kombinacji kontrolnej. Część nadziemna wytworzona z sadzonek traktowanych plazmą była nieznaczna, ale w przypadku *C. grandiflorum* najdłuższa sumaryczna długość pędów wystąpiła

Tabela 17. Średnia różnica masy sadzonek *P. variegatus* przed plazmowaniem i po nim (g)  
 Table 17. Average difference in weight of *P. variegatus* seedlings before and after plasma (g)

| Kombinacja<br>Combination     | Masa sadzonek<br>przed aplikacją<br>The weight of the seedlings<br>before application | Masa sadzonek<br>po 30 dniach od aplikacji<br>The weight of the seedlings<br>after 30 days from application | Różnica masy<br>Weight difference |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Kontrola/Control              | 0,9500                                                                                | 1,1650                                                                                                      | 0,2150a*                          |
| Powietrze 1 min/<br>Air 1 min | 0,8275                                                                                | 1,0600                                                                                                      | 0,2325a                           |
| Powietrze 2 min/<br>Air 2 min | 0,9150                                                                                | 1,2125                                                                                                      | 0,2975a                           |
| Powietrze 5 min/<br>Air 5 min | 0,8325                                                                                | 1,2975                                                                                                      | 0,4650a                           |
| Azot 1 min/<br>Nitrogen 1 min | 0,8425                                                                                | 1,1625                                                                                                      | 0,3200a                           |
| Azot 2 min/<br>Nitrogen 2 min | 0,8000                                                                                | 1,0575                                                                                                      | 0,2575a                           |
| Azot 5 min/<br>Nitrogen 5 min | 0,6550                                                                                | 0,8575                                                                                                      | 0,2025a                           |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).



Rys. 7. Średni przyrost masy (g) sadzonek *P. variegatus* traktowanych plazmą

Fig. 7. Average weight gain (g) of *P. variegatus* seedlings treated with plasma

w kombinacji z powietrzem przy 300 s aplikacji plazmy, a najkrótsza w kombinacji kontrolnej (tab. 18, rys. 8). Należy dodatkowo zwrócić uwagę, że w przypadku *C. grandiflorum* po 4 tygodniach od stosowania plazmy nie zauważono objawów chorobowych i osłabienia zdrowotności roślin związanego z działalnością patogenów. Obliczony współczynnik korelacji dla *C. grandiflorum* pomiędzy sumą długości korzeni a różnicą masy sadzonek był wprawdzie dodatni, ale niewielki i wyniósł  $r = 0,02752$  ( $p = 0,156$ ). Pomiary sadzonek *P. variegatus* po 4 tygodniach od traktowania plazmą wykazały również różnice w długości wytworzonych korzonków. Najdłuższe korzenie występowały w kombinacji przy czasie ekspozycji plazmą 120 s, gdy gazem roboczym był azot. Podobnie wysoki poziom występował, gdy gazem roboczym było powietrze i czas aplikacji wyniósł 300 s. Najmniejsza suma długości korzonków pojawiła się w kombinacji z azotem przy czasie ekspozycji 300 s i było to znacznie mniej od kombinacji kontrolnej. Biorąc pod uwagę część nadziemną wytworzoną z sadzonek traktowanych plazmą, w przypadku *P. variegatus*, kombinacja kontrolna charakteryzowała się najwyższą sumaryczną długością. Najniższa sumaryczna długość pędów dotyczyła kombinacji, w której

Tabela 18. Średnia liczba korzeni i suma długości pędów na *C. grandiflorum*

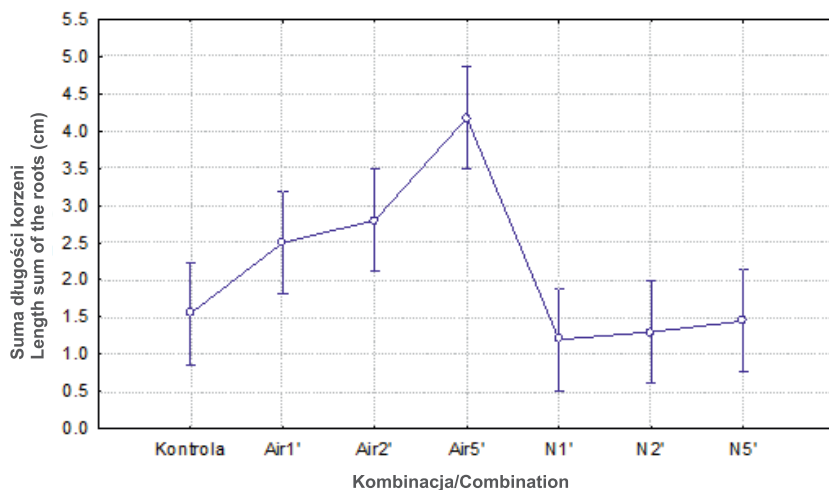
Table 18. Average number of roots and sum of shoot lengths on *C. grandiflorum*

| Kombinacja<br>Combination     | Liczba korzeni na<br>sadzonce (szt.)<br>The number of<br>roots on the<br>seedling (pcs.) | Suma długości korzeni<br>na sadzonce (cm)<br>Length sum of the roots<br>on the seedling (cm) | Liczba pędów<br>na sadzonce (szt.)<br>Shoots number on<br>the seedling (pcs.) | Suma długości<br>pędów na<br>sadzonce (cm)<br>Length sum of<br>the shoots per<br>seedling (cm) |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kontrola/Control              | 2,00a*                                                                                   | 1,550ab                                                                                      | 0,50a                                                                         | 0,250a                                                                                         |
| Powietrze 1 min/<br>Air 1 min | 2,50ab                                                                                   | 2,500ab                                                                                      | 1,25a                                                                         | 2,175b                                                                                         |
| Powietrze 2 min/<br>Air 2 min | 3,75ab                                                                                   | 2,800bc                                                                                      | 0,75a                                                                         | 0,375a                                                                                         |
| Powietrze 5 min/<br>Air 5 min | 4,75b                                                                                    | 4,175c                                                                                       | 1,00a                                                                         | 1,250ab                                                                                        |
| Azot 1 min/<br>Nitrogen 1 min | 2,75ab                                                                                   | 1,200a                                                                                       | 1,25a                                                                         | 0,925ab                                                                                        |
| Azot 2 min/<br>Nitrogen 2 min | 2,00a                                                                                    | 1,300ab                                                                                      | 0,75a                                                                         | 0,425a                                                                                         |
| Azot 5 min/<br>Nitrogen 5 min | 2,50ab                                                                                   | 1,450ab                                                                                      | 1,50a                                                                         | 0,875ab                                                                                        |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

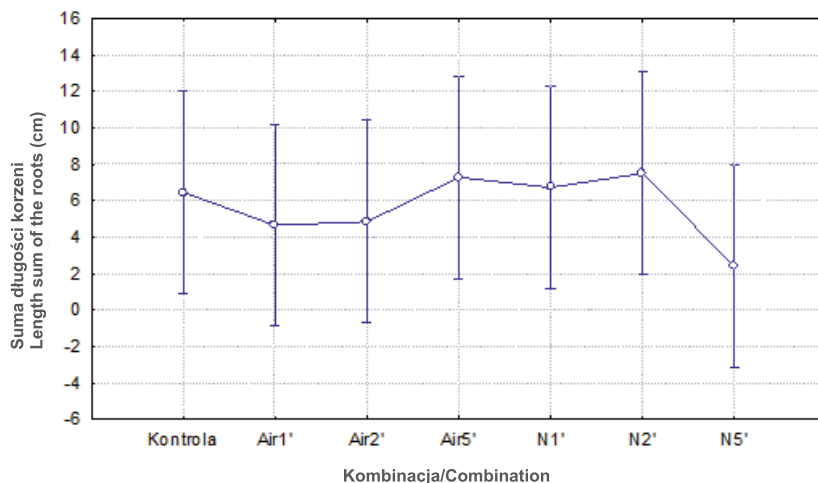
\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).

gazem roboczym był azot i czas aplikacji wyniósł 300 s (tab. 19, rys. 9). Obliczony współczynnik korelacji dla *P. variegatus* pomiędzy sumą długości korzeni a różnicą masy sadzonek był ujemny i wyniósł  $r = -0,1252$  ( $p = 0,875$ ).



Rys. 8. Średnia suma długości (cm) korzeni sadzonek *C. grandiflorum* traktowanych plazmą

Fig. 8. Average sum of the root length (cm) of plasma treated *C. grandiflorum* seedlings



Rys. 9. Suma długości (cm) korzeni sadzonek *P. variegatus* traktowanych plazmą

Fig. 9. Length sum (cm) of the roots of *P. variegatus* cuttings treated with plasma

Tabela 19. Średnia liczba korzeni i pędów powstałych na *P. variegatus* po aplikacji plazmy  
 Table 19. Average number of the roots and shoots formed on *P. variegatus* after plasma application

| Kombinacja<br>Combination     | Liczba korzeni<br>na sadzonce (szt.)<br>The number of<br>roots on the<br>seedling (pcs.) | Suma długości<br>korzeni na sadzonce<br>Length sum of the<br>roots on the seedling<br>(cm) | Liczba pędów<br>na sadzonce (szt.)<br>Shoots number on<br>the seedling (pcs.) | Suma długości<br>pędów na sadzonce<br>Length sum of the<br>shoots per seedling<br>(cm) |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Kontrola/Control              | 2,25a*                                                                                   | 6,450a                                                                                     | 2,25a                                                                         | 8,975a                                                                                 |
| Powietrze 1 min/<br>Air 1 min | 2,50a                                                                                    | 4,650a                                                                                     | 2,50a                                                                         | 8,550a                                                                                 |
| Powietrze 2 min/<br>Air 2 min | 3,00a                                                                                    | 4,850a                                                                                     | 2,75a                                                                         | 7,675a                                                                                 |
| Powietrze 5 min/<br>Air 5 min | 2,75a                                                                                    | 7,275a                                                                                     | 2,25a                                                                         | 5,525a                                                                                 |
| Azot 1 min/<br>Nitrogen 1 min | 2,50a                                                                                    | 6,725a                                                                                     | 2,25a                                                                         | 6,675a                                                                                 |
| Azot 2 min/<br>Nitrogen 2 min | 2,00a                                                                                    | 7,500a                                                                                     | 2,75a                                                                         | 7,700a                                                                                 |
| Azot 5 min/<br>Nitrogen 5 min | 2,00a                                                                                    | 2,400a                                                                                     | 2,25a                                                                         | 5,000a                                                                                 |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).

#### 5.2.4. Ocena zmian morfologicznych sadzonek zdrewniałych w wyniku traktowania wodą plazmowaną (PAW)

Analiza masy sadzonek *S. gracilistyla* przed traktowaniem plazmą i 4 tygodnie po nim wykazała wzrost masy. Wzrost ten, pomimo że był niezbyt wysoki, był zróżnicowany w zależności od czasu ekspozycji i użytego gazu roboczego. Kombinacja z wodą traktowaną plazmą z powietrzem przez 120 s i 300 s różniły się istotnie od kontroli. Znaczny wzrost masy został odnotowany w czasie ekspozycji wody powietrzem przez 120 s. Wzrost masy zanotowano też dla czasu ekspozycji wody azotem w czasie 120 s. Nieco mniejszy wzrost masy sadzonek zanotowano dla czasu ekspozycji 60 s. Najmniejszy przyrost masy zanotowano w przypadku pędów w kombinacji kontrolnej (tab. 20, rys. 10). W przypadku sadzonek *S. hookeriana* ukorzenianych w wodzie plazmowanej sytuacja też była zróżnicowana. Najwyższy przyrost masy zanotowano w przypadku sadzonek w wodzie plazmowanej traktowanej powietrzem przez 300 s, a także w pozostałych kombinacjach z wodą plazmowaną traktowaną azotem, zwłaszcza przez 300 s (tab. 21, rys. 11).

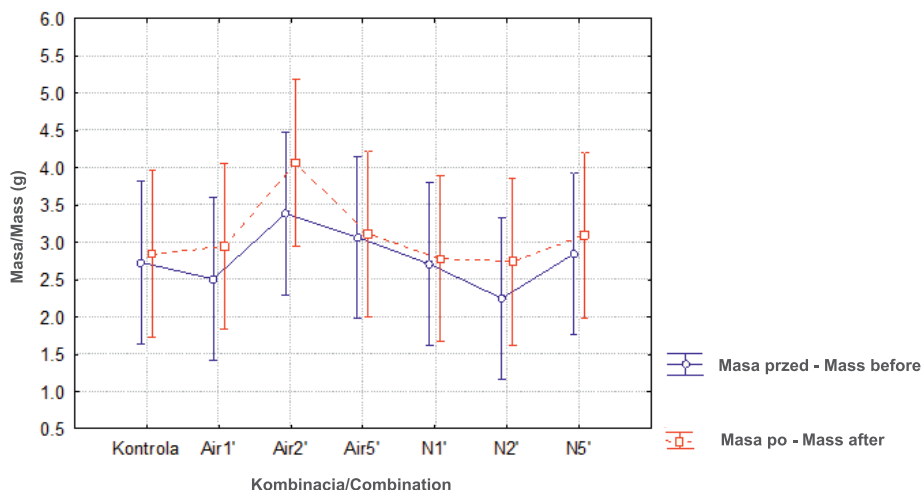
Tabela 20. Średnia różnica masy sadzonek *S. gracilistyla* przed umieszczeniem i po umieszczeniu w wodzie plazmowanej (g)

Table 20. Average difference in weight of *S. gracilistyla* seedlings before and after placing in plasma water (g)

| Kombinacja<br>Combination     | Masa sadzonek<br>przed aplikacją<br>The weight of the seedlings<br>before application | Masa sadzonek<br>po 30 dniach od aplikacji<br>The weight of the seedlings<br>30 days after application | Różnica masy<br>Weight difference |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Kontrola/Control              | 2,7300                                                                                | 2,8450                                                                                                 | 0,1150a*                          |
| Powietrze 1 min/<br>Air 1 min | 2,5075                                                                                | 2,9500                                                                                                 | 0,4425a                           |
| Powietrze 2 min/<br>Air 2 min | 3,3850                                                                                | 4,0675                                                                                                 | 0,6825a                           |
| Powietrze 5 min/<br>Air 5 min | 3,0700                                                                                | 3,1075                                                                                                 | 0,0375a                           |
| Azot 1 min/<br>Nitrogen 1 min | 2,7075                                                                                | 2,7825                                                                                                 | 0,0750a                           |
| Azot 2 min/<br>Nitrogen 2 min | 2,2500                                                                                | 2,7350                                                                                                 | 0,4850a                           |
| Azot 5 min/<br>Nitrogen 5 min | 2,8450                                                                                | 3,0900                                                                                                 | 0,2450a                           |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).



Rys. 10. Przyrost masy (g) sadzonek *S. gracilistyla* zanurzonych w wodzie plazmowanej

Fig. 10. Weight gain (g) of *S. gracilistyla* seedlings immersed in plasma water



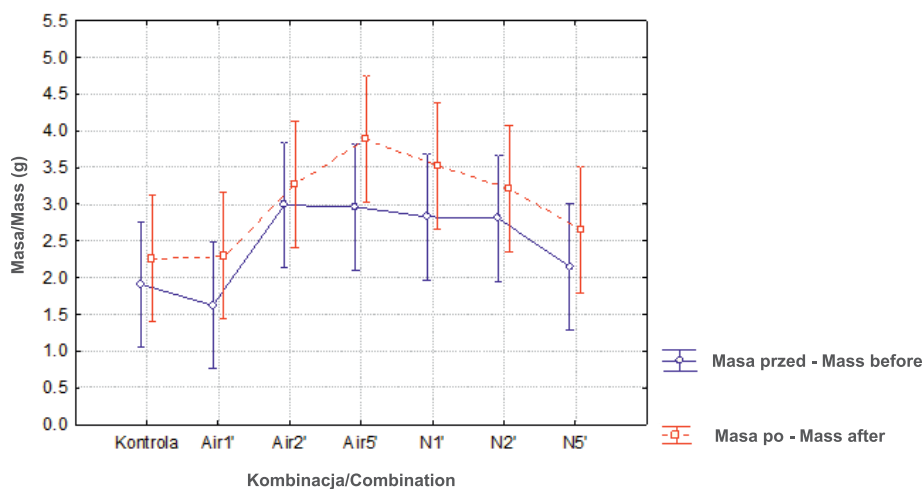
Tabela 21. Średnia różnica masy sadzonek *S. hookeriana* przed umieszczeniem i po umieszczeniu w wodzie plazmowanej (g)

Table 21. Average difference in weight of *S. hookeriana* seedlings before and after placing in plasma activated water (g)

| Kombinacja<br>Combination     | Masa sadzonek<br>przed aplikacją<br>The weight of the seedlings<br>before application | Masa sadzonek po 30<br>dniach od aplikacji<br>Weight of seedlings 30<br>days after application | Różnica masy<br>Weight difference |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Kontrola/Control              | 1,9075                                                                                | 2,2575                                                                                         | 0,3500a*                          |
| Powietrze 1 min/<br>Air 1 min | 1,6225                                                                                | 2,2950                                                                                         | 0,6725a                           |
| Powietrze 2 min/<br>Air 2 min | 2,9875                                                                                | 3,2725                                                                                         | 0,2850a                           |
| Powietrze 5 min/<br>Air 5 min | 2,9650                                                                                | 3,8950                                                                                         | 0,9300a                           |
| Azot 1 min/<br>Nitrogen 1 min | 2,8275                                                                                | 3,5150                                                                                         | 0,6875a                           |
| Azot 2 min/<br>Nitrogen 2 min | 2,8075                                                                                | 3,2150                                                                                         | 0,4075a                           |
| Azot 5 min/<br>Nitrogen 5 min | 2,1500                                                                                | 2,6525                                                                                         | 0,5025a                           |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).



Rys. 11. Przyrost masy (g) sadzonek *S. hookeriana* zanurzonych w wodzie plazmowanej

Fig. 11. Weight gain (g) of *S. hookeriana* seedlings immersed in plasma activated water

Pomiary po 4 tygodniach od traktowania wody plazmą niskotemperaturową sadzonki *S. gracilistyla* wykazały różnice w długości wytworzonych korzeni (fot. 14). Nie były to jednak różnice istotne statystycznie. Najwięcej i najdłuższe korzenie występowały w kombinacji przy czasie ekspozycji wody plazmą powietrzem jako gazem roboczym 300 s oraz azotem przez 120 s. Najmniej korzonków pojawiło się w kombinacji z wodą traktowaną plazmą z powietrzem jako gazem roboczym przy czasie ekspozycji 120 s (tab. 22, rys. 12). W przypadku części nadziemnej wyrosłej z sadzonek traktowanych wodą plazmowaną, na *S. hookeriana* najdłuższa sumaryczna długość pędów powstała w kombinacji z wodą traktowaną azotem przez 60 s i 300 s (fot. 15). Najmniejsza długość pędów wystąpiła w kombinacji z wodą traktowaną plazmą z powietrzem przez 300 s. Mimo to różnice nie były istotne statystycznie (tab. 23, rys. 13). Obliczony współczynnik korelacji pomiędzy sumą długości korzeni a różnicą masy był ujemny i wyniósł  $r = -0,1242$  ( $p = 0,529$ ).



Fot. 14. Ukorzenione w wodzie plazmowanej sadzonki *S. gracilistyla*

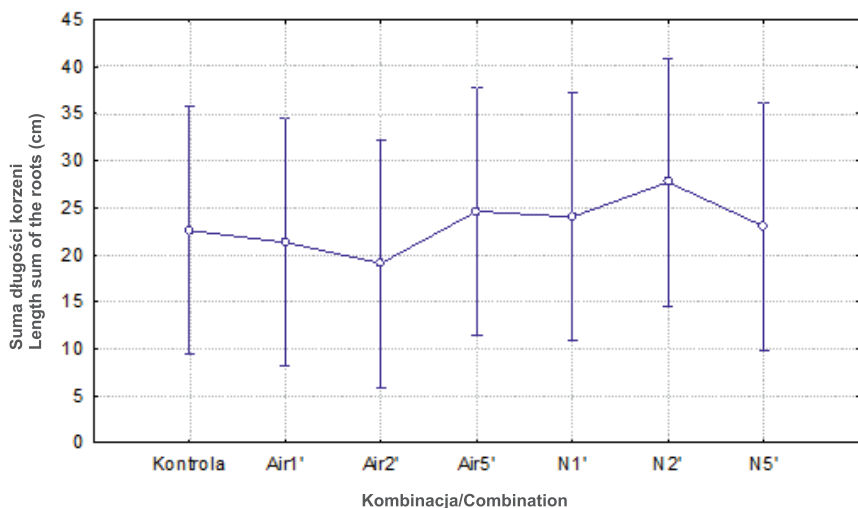
Phot. 14. *S. gracilistyla* cuttings rooted in plasma activated water

Tabela 22. Średnia liczba korzeni i średnia suma długości pędów na *S. gracilistyla*  
 Table 22. Average number of roots and mean sum of shoot lengths per *S. gracilistyla*

| Kombinacja<br>Combination     | Liczba korzeni<br>na sadzonce (szt.)<br>The number of roots<br>on the seedling (pcs.) | Suma długości<br>korzeni na sadzonce<br>Length sum of the<br>roots on the seedling<br>(cm) | Liczba pędów na<br>sadzonce (szt.)<br>Shoots number<br>on the seedling<br>(pcs.) | Suma długości<br>pędów na sadzonce<br>Length sum of the<br>shoots on the<br>seedling (cm) |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kontrola/ Control             | 8,25a*                                                                                | 22,575a                                                                                    | 3,75a                                                                            | 6,525a                                                                                    |
| Powietrze 1 min/<br>Air 1 min | 8,00a                                                                                 | 21,325a                                                                                    | 3,50a                                                                            | 6,000a                                                                                    |
| Powietrze 2 min/<br>Air 2 min | 9,75a                                                                                 | 19,100a                                                                                    | 3,25a                                                                            | 6,775a                                                                                    |
| Powietrze 5 min/<br>Air 5 min | 10,00a                                                                                | 24,625a                                                                                    | 2,00a                                                                            | 3,725a                                                                                    |
| Azot 1 min/<br>Nitrogen 1 min | 9,75a                                                                                 | 24,025a                                                                                    | 3,00a                                                                            | 7,750a                                                                                    |
| Azot 2 min/<br>Nitrogen 2 min | 10,00a                                                                                | 27,725a                                                                                    | 3,00a                                                                            | 5,850a                                                                                    |
| Azot 5 min/<br>Nitrogen 5 min | 9,50a                                                                                 | 23,025a                                                                                    | 4,25a                                                                            | 6,800a                                                                                    |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).



Rys. 12. Suma długości (cm) korzeni *S. gracilistyla* traktowanych wodą plazmowaną

Fig. 12. Lengths sum (cm) of *S. gracilistyla* roots treated with plasma activated water



Fot. 15. Ukorzenione w wodzie plazmowanej sadzonki *S. hookeriana*

Phot. 15. *S. hookeriana* cuttings rooted in plasma activated water

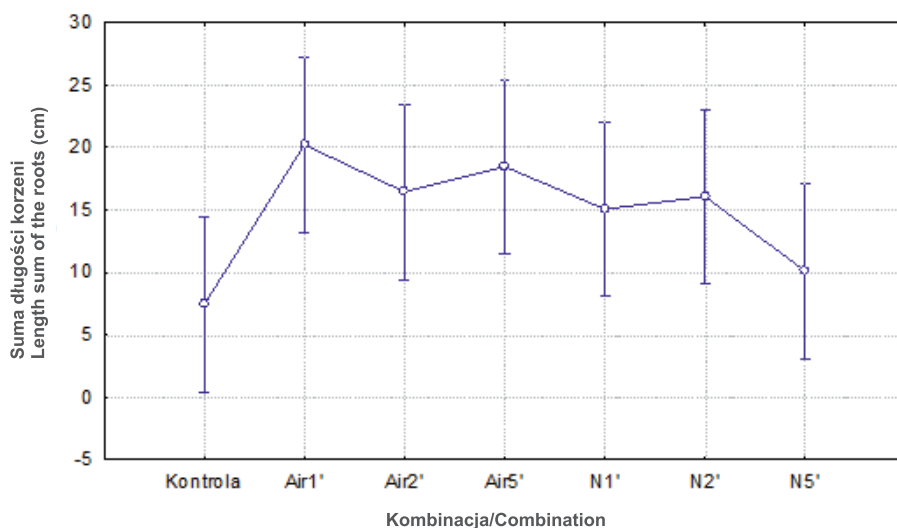
Tabela 23. Średnia liczba korzeni i średnia suma długości pędów *S. hookeriana*

Table 23. Average number of roots and mean sum of *S. hookeriana* shoot lengths

| Kombinacja<br>Combination     | Liczba korzeni<br>na sadzonce (szt.)<br>The number of<br>roots on the<br>seedling (pcs.) | Suma długości<br>korzeni na sadzonce<br>Length sum of the<br>roots on the seedling<br>(cm) | Liczba pędów<br>na sadzonce (szt.)<br>Shoots number<br>on the seedling<br>(pcs.) | Suma długości<br>pędów na<br>sadzonce<br>Length sum of<br>the shoots on the<br>seedling (cm) |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kontrola/Control              | 5,25a*                                                                                   | 7,400a                                                                                     | 4,75a                                                                            | 7,925a                                                                                       |
| Powietrze 1 min/<br>Air 1 min | 9,00a                                                                                    | 20,200a                                                                                    | 2,50a                                                                            | 6,700a                                                                                       |
| Powietrze 2 min/<br>Air 2 min | 7,25a                                                                                    | 16,425a                                                                                    | 5,75a                                                                            | 7,575a                                                                                       |
| Powietrze 5 min/<br>Air 5 min | 8,50a                                                                                    | 18,450a                                                                                    | 4,00a                                                                            | 7,475a                                                                                       |
| Azot 1 min/<br>Nitrogen 1 min | 8,00a                                                                                    | 15,050a                                                                                    | 4,75a                                                                            | 9,125a                                                                                       |
| Azot 2 min/<br>Nitrogen 2 min | 8,50a                                                                                    | 16,050a                                                                                    | 5,00a                                                                            | 8,075a                                                                                       |
| Azot 5 min/<br>Nitrogen 5 min | 5,25a                                                                                    | 10,100a                                                                                    | 3,75a                                                                            | 5,625a                                                                                       |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).

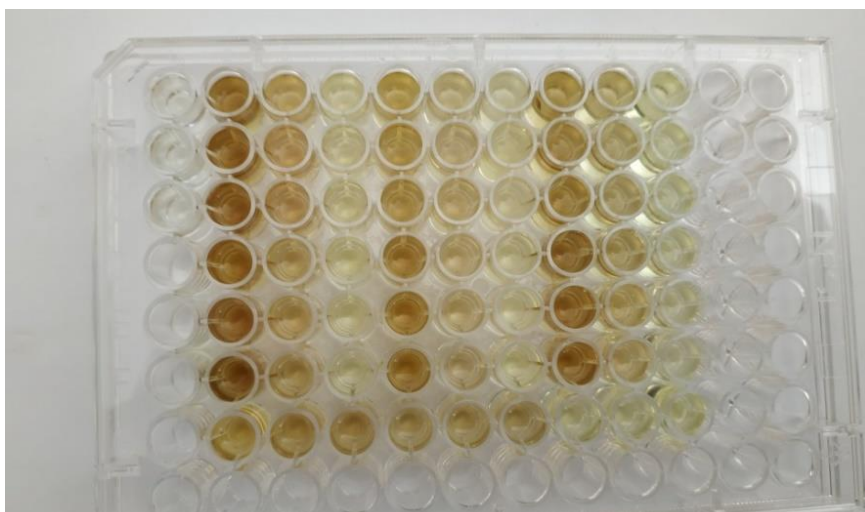


Rys. 13. Suma długości (cm) korzeni powstałych na *S. hookeriana* po przetrzymywaniu w wodzie plazmowanej

Fig. 13. Lengths sum (cm) of roots formed on *S. hookeriana* after holding in plasma activated water

### 5.3. Wpływ plazmy na poziom IAA w sadzonkach zielnych

W wyniku przeprowadzonych badań z sadzonek zielnych chryzantem uzyskano roztwory, które, dzięki analizie HPLC, pozwoliły określić stężenie IAA w badanym materiale roślinnym (fot. 16). Po analizie okazało się, że stężenie IAA w blaszce liściowej, łodydze i korzeniach jest zróżnicowane i w większości kombinacji różni się istotnie od kombinacji kontrolnej. W przypadku analizy zawartości IAA w blaszce liściowej okazało się, że prawie wszystkie wyniki różnią się istotnie od kontroli. Największa zawartość tego składnika była w kombinacji z azotem jako gazem roboczym aplikowanym przez 1 min i wynosiła 105,2387 µg/g świeżej masy, a najmniejsza w kombinacji kontrolnej – 44,7859 µg/g. Wysokie stężenie IAA uzyskano również w kombinacji z powietrzem aplikowanym przez 1 min oraz z powietrzem aplikowanym przez 5 min. W przypadku analizy roztworów z łodygi najwyższy poziom IAA był w kombinacji z azotem aplikowanym przez 2 min oraz z azotem aplikowanym przez 1 min. Najniższy poziom IAA był w kombinacji plazmy z powietrzem aplikowanym przez 2 min (tab. 24, rys. 14–17).



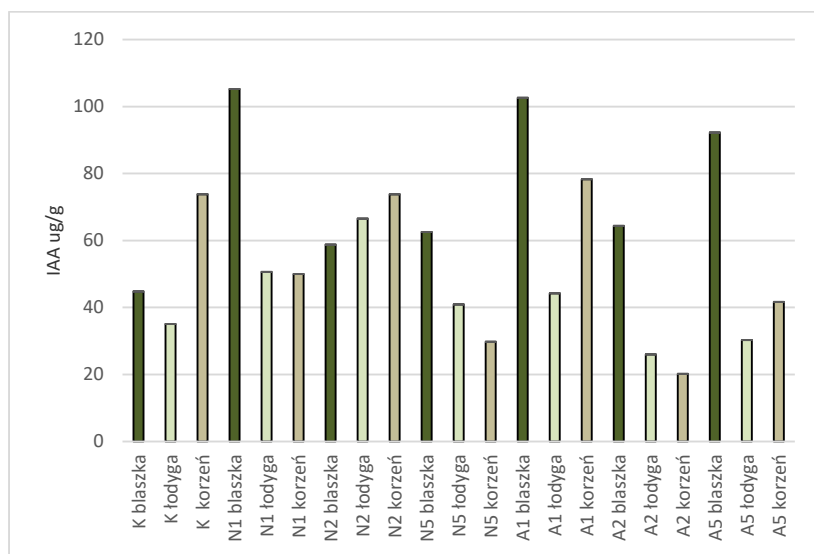
Fot. 16. Uzyskane roztwory wykorzystane do oceny stężenia IAA w sadzonkach chryzantem  
 Phot. 16. The obtained solutions were used to assess the of IAA concentration in chrysanthemum seedlings

Tabela 24. Zawartość IAA w świeżej masie sadzonek chryzantem traktowanych plazmą  
 Table 24. IAA content in fresh weight of plasma-treated chrysanthemum seedlings

| Kombinacja doświadczalna<br>Combination experimental | Zawartość IAA ( $\mu\text{g/g}$ )<br>IAA content ( $\mu\text{g/g}$ ) |                |                |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|
|                                                      | blaszka liściowa<br>leaf plate                                       | łodyga<br>stem | korzeń<br>root |
| Kontrola/Control                                     | 44,7859c*                                                            | 35,07751bc     | 73,80953b      |
| Powietrze 1 min/ Air 1 min                           | 102,6124b                                                            | 44,24095de     | 78,29670b      |
| Powietrze 2 min/ Air 2 min                           | 64,3790a                                                             | 25,99466a      | 20,19740a      |
| Powietrze 5 min/ Air 4 min                           | 92,2365b                                                             | 30,28342ab     | 41,67841a      |
| Azot 1 min/ Nitrogen 1 min                           | 105,2387b                                                            | 50,63471e      | 49,99167ab     |
| Azot 2 min/ Nitrogen 2 min                           | 58,7773ac                                                            | 66,53411f      | 73,80457b      |
| Azot 5 min/ Nitrogen 5 min                           | 62,5543a                                                             | 40,91676cd     | 29,77562a      |

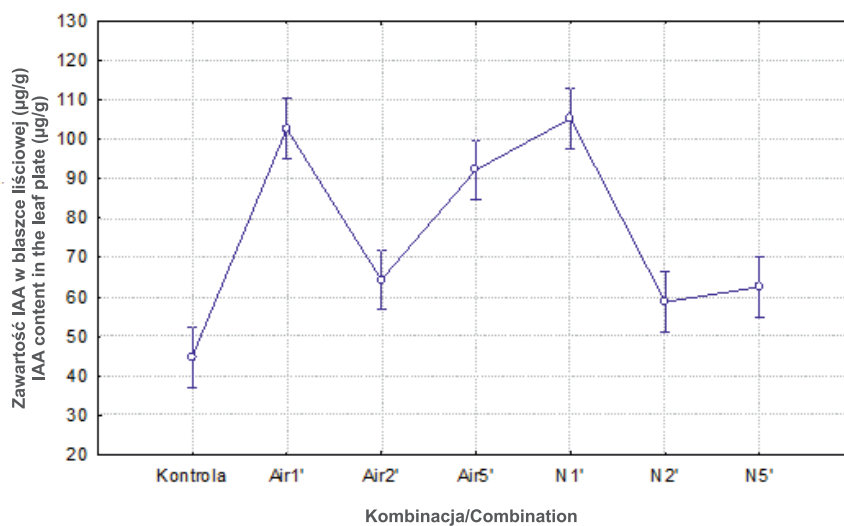
\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).



Rys. 14. Zawartość IAA (µg/g) w korzeniu, łodydze i blaszce liściowej chryzantem

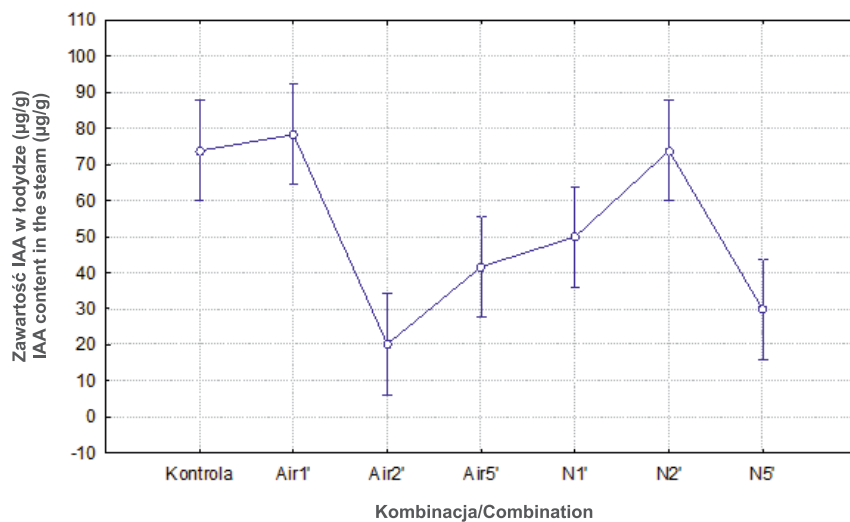
Fig. 14. IAA content (µg/g) in the root, stem and leaf plate of chrysanthemums



Rys. 15. Zawartość IAA (µg/g) w blaszce liściowej chryzantem traktowanych plazmą niskotemperaturową

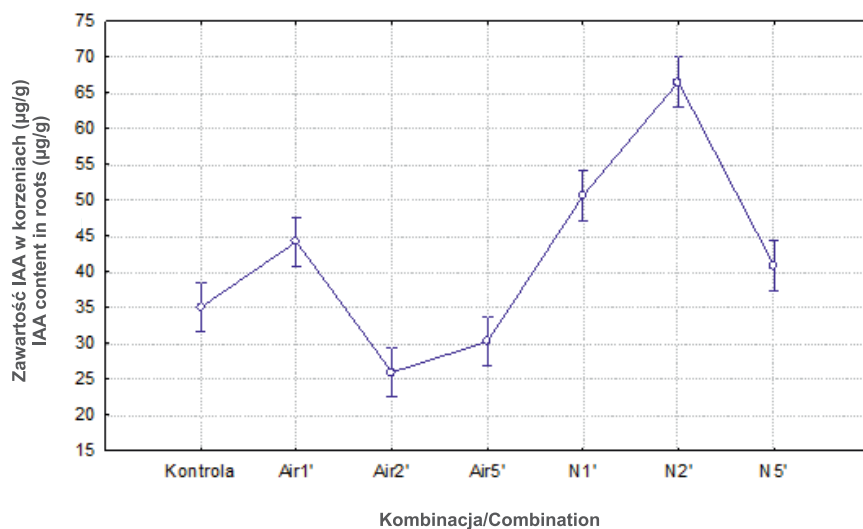
Fig. 15. IAA content (µg/g) in the leaf plate of chrysanthemums treated with low-temperature plasma





Rys. 16. Zawartość IAA (µg/g) w łodydze chryzantem traktowanych plazmą

Fig. 16. IAA content (µg/g) in the stem of plasma-treated chrysanthemums



Rys. 17. Zawartość IAA (µg/g) w korzeniach chryzantem traktowanych plazmą niskotemperaturową

Fig. 17. IAA content (µg/g) in chrysanthemum roots treated with low-temperature plasma

#### 5.4. Ocena wpływu plazmy niskotemperaturowej na bioróżnorodność grzybów na sadzonkach zdrewniałych wierzby

Zaobserwowano, że najwyższe wartości indeksu chorobowego wystąpiły u *S. hookeriana*, a najmniejsze u *S. gracilistyla* (tab. 25). W doświadczeniu oceniającym działanie plazmy niskotemperaturowej na patogeny zasiedlające sadzonki wierzby uzyskano 426 izolatów z *S. gracilistyla* oraz 459 izolatów z *S. hookeriana*. Należały one do 20 gatunków. Najliczniej uzyskiwano izolaty *A. alternata*, stanowiące podobny odsetek izolatów dla dwóch badanych gatunków wierzby – 26% i 21%. Izolowano także groźny gatunek *Fusarium oxysporum* – odpowiednio 2% oraz 4%. Zwrócić też należy uwagę na gatunki grzybów, które mogą być groźne dla pędów wierzby, zwłaszcza w przypadku bardziej liczniejszego wystąpienia. W nieco mniejszych ilościach zanotowano takie grzyby jak *Trichothecium roseum* – odpowiednio 4% oraz 7% na poszczególnych gatunkach wierzby. W mniejszej ilości pojawiały się *B. cinerea* – 7% oraz 8%, a także *Truncatella truncata* – 11% oraz 9% wszystkich wyosobnień. Można zaobserwować, że najwięcej wyosobnień grzybów było w kombinacji kontrolnej, w której nie stosowano żadnych zabiegów ochronnych na obu badanych gatunkach wierzby. Najmniej izolatów notowano w kombinacji, w której odkazano fragmenty sztobrów podchlorynem sodu. Dotyczyło to obu badanych gatunków wierzby. Porównując izolacje ze sztobrów pobranych z 3 gatunków wierzby i traktowanych plazmą niskotemperaturową, gdy gazem roboczym było powietrze, można zaobserwować nieznacznie mniej izolatów w kombinacji z 5-minutowym czasem aplikacji plazmy. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku sztobrów traktowanych plazmą z azotem jako gazem roboczym (tab. 26 i 27).

Tabela 25. Nasilenie porażenia ukorzenianych pędów wierzby

Table 25. Infection intensity of rooted willow shoots

| Kombinacja<br>Combination  | Średni indeks chorobowy (%)<br>Average disease index (%) |                         |
|----------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------|
|                            | <i>Salix gracilistyla</i>                                | <i>Salix hookeriana</i> |
| Kontrola/Control           | 0,75a*                                                   | 3,00a                   |
| Powietrze 1 min/ Air 1 min | 0,00a                                                    | 1,50a                   |
| Powietrze 2 min/ Air 2 min | 0,25a                                                    | 1,75a                   |
| Powietrze 5 min/ Air 5 min | 0,25a                                                    | 2,25a                   |
| Azot 1 min/ Nitrogen 1 min | 0,50a                                                    | 1,25a                   |
| Azot 2 min/ Nitrogen 2 min | 0,75a                                                    | 1,25a                   |
| Azot 5 min/ Nitrogen 5 min | 0,25a                                                    | 2,00a                   |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).

Tabela 26. Liczba izolatów grzybów wyizolowanych z pędów *S. gracilistyla* po zastosowaniu plazmy

Table 26. Number of fungal isolates isolated from *S. gracilistyla* shoots after plasma treatment

| Gatunek grzyba<br>Fungus species                        | Kombinacja doświadczalna<br>Experimental combination |    |     |     |     |     |     |     | Razem (%)<br>Sum (%) |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------|
|                                                         | KO                                                   | ST | AI' | A2' | A5' | N1' | N2' | N5' |                      |
| <i>Aspergillus brasiliensis</i> Varga, Frisvad & Samson | 5                                                    | –  | 2   | –   | –   | 5   | –   | –   | 12(3,0)              |
| <i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keiss.                | 25                                                   | 6  | 17  | 16  | 14  | 16  | 13  | 6   | 113(26,0)            |
| <i>Botrytis cinerea</i> Pers. ex Fries.                 | 12                                                   | 3  | –   | –   | 6   | 8   | –   | –   | 29(7,0)              |
| <i>Chaetomium cochlioides</i> Palliser                  | 6                                                    | –  | –   | –   | –   | 2   | 2   | –   | 10(2,0)              |
| <i>Cladosporium cladosporioides</i>                     | 11                                                   | 2  | 6   | –   | –   | –   | –   | 2   | 21(5,0)              |
| <i>Epicoccum nigrum</i> Link                            | 5                                                    | 2  | 20  | 16  | 10  | 13  | 13  | 2   | 81(19,0)             |
| <i>Fusarium avenaceum</i> (Fr.) Sacc.                   | 2                                                    | –  | –   | 2   | 4   | 4   | 4   | –   | 16(4,0)              |
| <i>Fusarium equiseti</i> (Corda) Sacc                   | 5                                                    | –  | –   | –   | –   | –   | 6   | –   | 11(3,0)              |
| <i>Fusarium oxysporum</i> Schlecht.                     | 4                                                    | –  | 2   | 2   | –   | –   | –   | –   | 8(2,0)               |
| <i>Penicillium expansum</i> Link ex S.F.Gray            | 8                                                    | –  | 4   | –   | 15  | –   | –   | –   | 27(6,0)              |
| <i>Rhizopus stolonifer</i> (Ehrenb.) Vuill.             | 6                                                    | 2  | 5   | –   | –   | –   | 2   | –   | 15(4,0)              |
| <i>Truncatella truncata</i> (Lév.) Steyaert             | 20                                                   | –  | 7   | 15  | –   | –   | 5   | –   | 47(11,0)             |
| <i>Trichoderma harzianum</i> Rifai                      | 4                                                    | 4  | 2   | 2   | 3   | 3   | 2   | –   | 20(5,0)              |
| <i>Trichothecium roseum</i> (Pers.) Link                | 6                                                    | –  | –   | –   | –   | 8   | 2   | –   | 16(4,0)              |
| Razem                                                   | 119                                                  | 19 | 65  | 53  | 52  | 59  | 49  | 10  | 426(100,0)           |

KO – kontrola, ST – sterylizowane NaOCl, AI' – powietrze 1 min, A2' – powietrze 2 min, A5' – powietrze 5 min, N1' – azot 1 min,

N2' – azot 2 min, N5' – azot 5 min.

KO – control, ST – sterilized NaOCl, AI' – air 1 min, A2' – air 2 min, A5' – air 5 min, N1' – nitrogen 1 min, N2' – nitrogen 2 min, N5' – nitrogen 5 min.

Tabela 27. Liczba izolatów grzybów wyizolowanych z pędów *S. hookeriana* po zastosowaniu plazmy  
 Table 27. Number of fungal isolates isolated from *S. hookeriana* shoots after plasma treatment

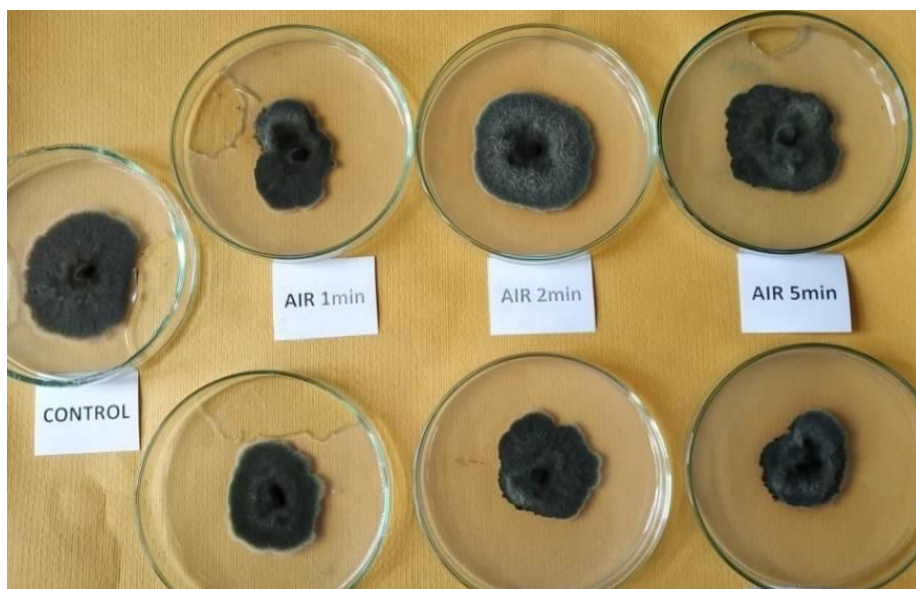
| Gatunek grzyba<br>Fungus species                        | Kombinacja<br>Combination |    |     |     |     |     | Razem (%)<br>Sum (%) |
|---------------------------------------------------------|---------------------------|----|-----|-----|-----|-----|----------------------|
|                                                         | KO                        | ST | A1' | A2' | A5' | N1' |                      |
| <i>Aspergillus brasiliensis</i> Varga, Frisvad & Samson | 11                        | 2  | 3   | 2   | –   | 9   | 31(7,0)              |
| <i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keiss.                | 28                        | 6  | 18  | 13  | 4   | 16  | 99(21,0)             |
| <i>Botrytis cinerea</i> Pers.ex Fries.                  | 12                        | 2  | 8   | 2   | 2   | 6   | 35(8,0)              |
| <i>Epicoccum nigrum</i> Link                            | 14                        | 4  | –   | 30  | –   | –   | 56(12,0)             |
| <i>Fusarium avenaceum</i> (CordaexFries) Sacc.          | 2                         | 2  | –   | –   | –   | 5   | 9(2,0)               |
| <i>Fusarium equiseti</i> (Corda) Sacc                   | 12                        | 3  | –   | –   | 2   | 3   | 22(5,0)              |
| <i>Fusarium oxysporum</i> Schlecht.                     | 8                         | –  | 4   | –   | –   | 3   | 17(4,0)              |
| <i>Clonostachys rosea</i> (Link) Schroers               | 4                         | 2  | 3   | –   | –   | 4   | 13(3,0)              |
| <i>Penicillium expansum</i> Link ex S.F.Gray            | 5                         | 5  | –   | 4   | 2   | –   | 19(4,0)              |
| <i>Penicillium janthinellum</i> Biourge                 | 4                         | –  | 3   | –   | 4   | 4   | 15(3,0)              |
| <i>Truncatella truncata</i> (Lév.) Steyaert             | 12                        | 2  | 4   | 3   | 7   | 11  | 44(9,0)              |
| <i>Boeremia inoxydabilis</i> (Boerema & Vegh)           | 9                         | 2  | –   | 2   | –   | –   | 18(4,0)              |
| <i>Stemphyllium botryosum</i> (Enjoji) W.Yam.           | 7                         | –  | 5   | 3   | –   | 2   | 17(4,0)              |
| <i>Trichoderma koningii</i> Oud.                        | 14                        | 5  | –   | 2   | 4   | 2   | 33(7,0)              |
| <i>Trichothecium roseum</i> (Pers.) Link                | 11                        | 2  | 6   | 4   | –   | 3   | 31(7,0)              |
| Razem                                                   | 153                       | 37 | 54  | 65  | 25  | 68  | 459(100,0)           |

KO – kontrola, ST – sterylizowane NaOCl, A1' – powietrze 1 min, A2' – powietrze 2 min, A5' – powietrze 5 min, N1' – azot 1 min, N2' – azot 2 min, N5' – azot 5 min.

KO – kontrola, ST – sterylizowane NaOCl, A1' – air 1 min, A2' – air 2 min, A5' – air 5 min, N1' – nitrogen 1 min, N2' – nitrogen 2 min, N5' – nitrogen 5 min.

### 5.5. Ocena wpływu plazmy niskotemperaturowej na wybrane gatunki grzybów *in vitro*

W doświadczeniu zaobserwowano różnice we wzroście grzybni (tab. 28). Na podstawie tych wyników wyliczono indeks hamowania wzrostu grzybni, który nie był wysoki. Najwyższy dotyczył kombinacji z aplikacją plazmy z powietrzem przez 120 s i 300 s (tab. 29). W przypadku *A. alternata* największe przyrosty notowano w kombinacji kontrolnej i w kombinacji z powietrzem jako gazem roboczym aplikowanym przez 120 s (fot. 17, rys. 18). Najszybszy wzrost grzybni zaobserwowano w przypadku *B. cinerea*. Już po 7 dniach wszystkie szalki, niezależnie od kombinacji, były całkowicie zarośnięte grzybnią (fot. 18, rys. 19). Brak zróżnicowania wzrostu spowodował niemożność analizy statystycznej polegającej na operowaniu na wariancjach, dlatego nie było możliwe zastosowanie w tym przypadku metody analizy wariancji z powtarzanymi pomiarami, co miało miejsce przy ocenie innych grzybów. W przypadku *T. roseum* największe przyrosty grzybni notowano w kombinacji kontrolnej. Duży wzrost grzybni dotyczył także kombinacji z powietrzem jako gazem roboczym przy aplikacji plazmy przez 60 s i 300 s (fot. 19, rys. 20).



Fot. 17. Wzrost *A. alternata* na szalkach z PDA po aplikacji plazmy  
Phot. 17. *A. alternata* growth on PDA plates after plasma application

Tabela 28. Średnica kolonii grzybów rosnących na pożywce PDA przy różnym czasie aplikacji plazmy niskotemperaturowej  
 Table 28. Diameter of fungal colonies growing on PDA medium at different times of low-temperature plasma application

| Gatunek grzyba<br>Fungus species | Liczba dni po aplikacji<br>The number of days<br>after application | Średnica kolonii (cm)<br>Colony diameter (cm) |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                                  |                                                                    | KO                                            | A1'  | A2'  | A5'  | N1'  | N2'  | N5'  |
| <i>Alternaria alternata</i>      | 7                                                                  | 5,10                                          | 4,60 | 5,55 | 5,30 | 4,90 | 4,90 | 5,10 |
|                                  | 14                                                                 | 6,55                                          | 5,30 | 6,25 | 5,70 | 5,20 | 5,00 | 5,35 |
|                                  | 21                                                                 | 6,75                                          | 5,30 | 7,20 | 6,25 | 5,45 | 5,35 | 5,45 |
| <i>Botrytis cinerea</i>          | 7                                                                  | 9,00                                          | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 9,00 |
|                                  | 14                                                                 | 9,00                                          | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 9,00 |
|                                  | 21                                                                 | 9,00                                          | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 9,00 |
| <i>Truncatella truncata</i>      | 7                                                                  | 7,45                                          | 7,80 | 7,25 | 7,40 | 7,80 | 7,00 | 7,10 |
|                                  | 14                                                                 | 8,05                                          | 8,15 | 7,55 | 8,40 | 8,45 | 8,10 | 8,10 |
|                                  | 21                                                                 | 8,35                                          | 8,35 | 7,85 | 8,50 | 8,65 | 8,40 | 8,80 |
| <i>Trichotecium roseum</i>       | 7                                                                  | 6,35                                          | 4,60 | 4,10 | 4,15 | 4,25 | 4,70 | 4,75 |
|                                  | 14                                                                 | 6,55                                          | 5,15 | 4,30 | 4,50 | 4,60 | 4,85 | 5,10 |
|                                  | 21                                                                 | 6,70                                          | 6,35 | 5,05 | 6,35 | 5,30 | 5,05 | 5,40 |

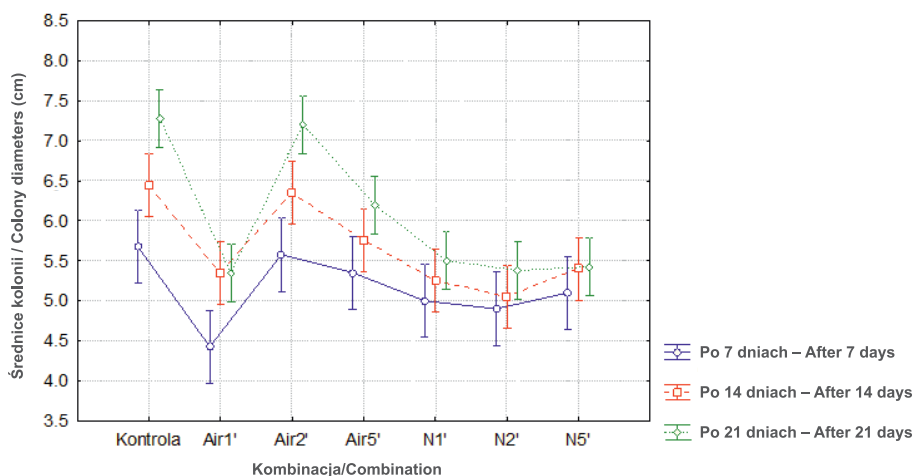
KO – kontrola, A1' – powietrze 1 min, A2' – powietrze 2 min, A5' – powietrze 5 min, N1' – azot 1 min, N2' – azot 2 min, N5' – azot 5 min.  
 KO – control, A1' – air 1 min, A2' – air 2 min, A5' – air 5 min, N1' – nitrogen 1 min, N2' – nitrogen 2 min, N5' – nitrogen 5 min.

Tabela 29. Indeks hamowania wzrostu kolonii grzybów rosnących na agarze ziemniaczano-glukozowym (PDA) przy różnych czasach aplikacji plazmy

Table 29. Index of colony inhibition of fungi growing on potato-glucose agar (PDA) at different times of plasma application

| Gatunek grzyba<br>Fungus species | Liczba dni po aplikacji<br>The number of days<br>after application | Hamowanie wzrostu grzybnii w kombinacjach<br>Inhibition of mycelium growth in combinations<br>(%) |      |      |      |      |      |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
|                                  |                                                                    | A1'                                                                                               | A2'  | A5'  | N1'  | N2'  | N5'  |
| <i>Alternaria alternata</i>      | 7                                                                  | 9,8                                                                                               | 2,6  | 7,0  | 14,0 | 14,0 | 10,5 |
|                                  | 14                                                                 | 19,1                                                                                              | 4,6  | 13,0 | 20,6 | 23,7 | 18,3 |
|                                  | 21                                                                 | 27,4                                                                                              | 1,4  | 14,4 | 25,3 | 26,7 | 25,3 |
| <i>Botrytis cinerea</i>          | 7                                                                  | 0,0                                                                                               | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
|                                  | 14                                                                 | 0,0                                                                                               | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
|                                  | 21                                                                 | 0,0                                                                                               | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| <i>Trichotecium roseum</i>       | 7                                                                  | 27,6                                                                                              | 35,4 | 34,6 | 33,1 | 26,0 | 25,2 |
|                                  | 14                                                                 | 21,4                                                                                              | 34,4 | 31,3 | 29,8 | 26,0 | 22,1 |
|                                  | 21                                                                 | 5,2                                                                                               | 24,6 | 5,2  | 20,9 | 24,6 | 19,4 |

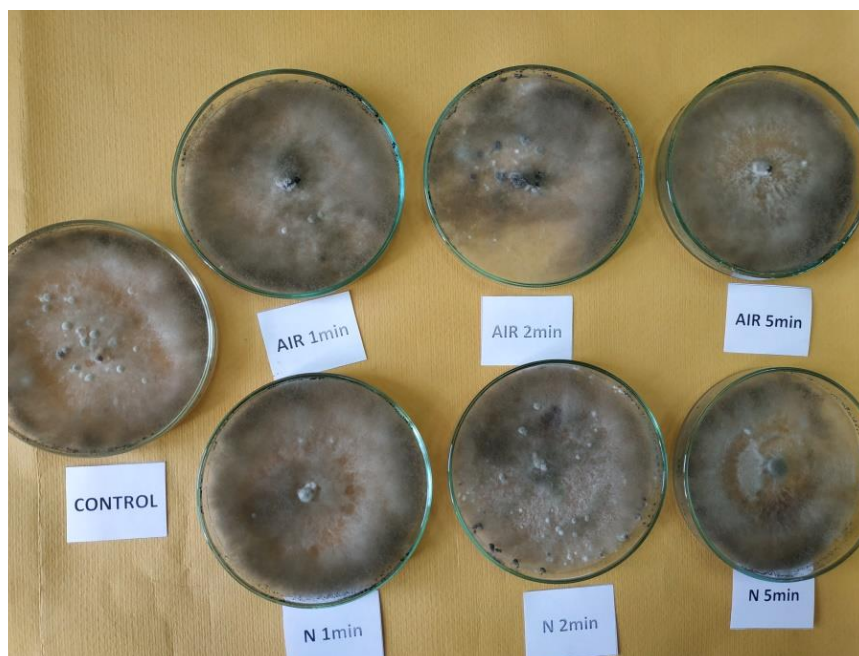
A1' – powietrze 1 min, A2' – powietrze 2 min, A5' – powietrze 5 min, N1' – azot 1 min, N2' – azot 2 min, N5' – azot 5 min.  
A1' – air 1 min, A2' – air 2 min, A5' – air 5 min, N1' – nitrogen 1 min, N2' – nitrogen 2 min, N5' – nitrogen 5 min.



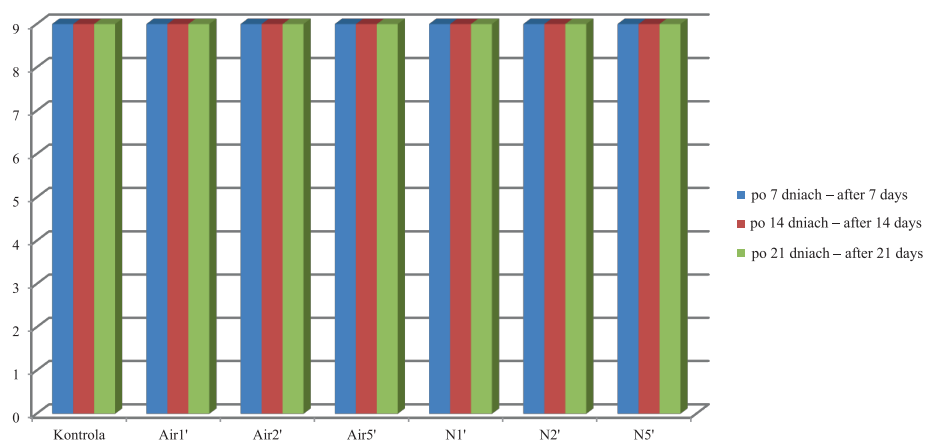
Rys. 18. Średnice kolonii (cm) *A. alternata* po aplikacji plazmy

Fig. 18. Colony diameters (cm) of *A. alternata* after plasma application

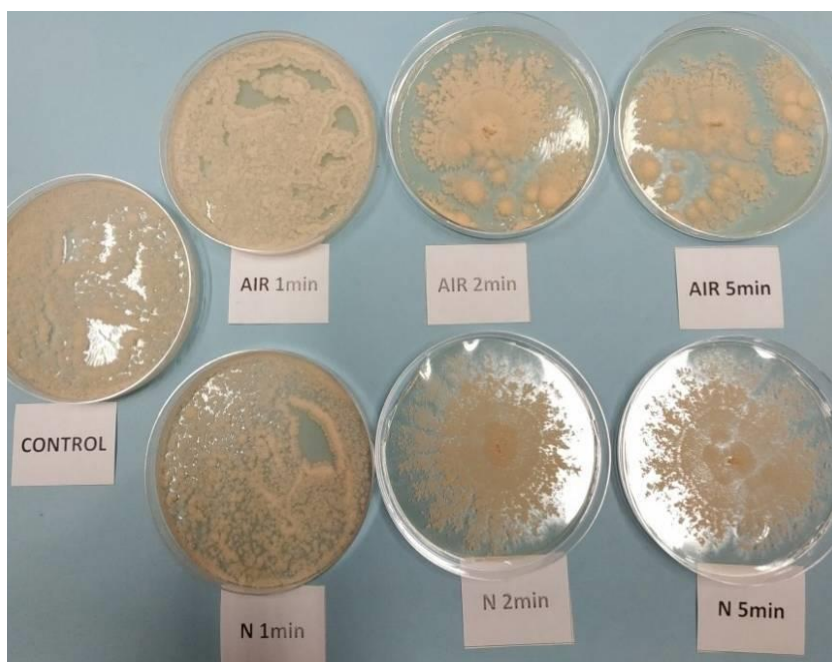




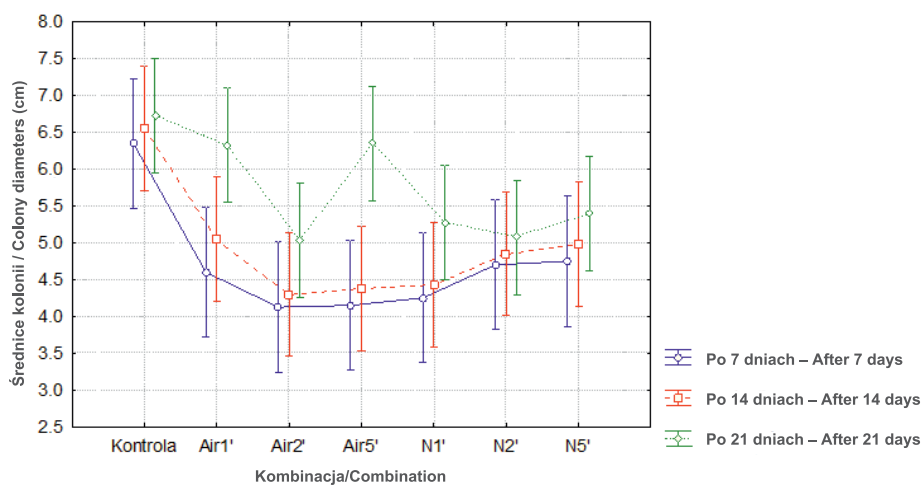
Fot. 18. Wzrost *B. cinerea* na szalkach z PDA po aplikacji plazmy  
 Phot. 18. Growth of *B. cinerea* on PDA plates after plasma application



Rys. 19. Średnice kolonii *B. cinerea* (cm) po aplikacji plazmy  
 Fig. 19. Diameters of *B. cinerea* colonies (cm) after plasma application



Fot. 19. Kolonie *T. roseum* na szalkach z PDA po aplikacji plazmy  
 Phot. 19. *T. roseum* colonies on PDA plates after plasma application



Rys. 20. Średnice kolonii (cm) grzybnii *T. roseum* po aplikacji plazmy  
 Fig. 20. Colony diameters (cm) of *T. roseum* mycelium after plasma application

Tabela 30. Średnia liczba kolonii grzybów rosnących na pożywce MEA w różnym czasie aplikacji plazmy niskotemperaturowej  
 Table 30. Average number of colonies of fungi growing on the MEA medium at different times of low-temperature plasma application

| Gatunek grzyba<br>Fungus species | Nr szalki<br>The number of plates | Liczba kolonii po 72 h (szt.)<br>Colonies number after 72 h (pcs.) |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                  |                                   | kontrola<br>control                                                | A1'   | A2'   | A5'   | N1'   | N5'   |
| <i>Alternaria alternata</i>      | 1                                 | 40                                                                 | 35    | 25    | 21    | 36    | 32    |
|                                  | 2                                 | 36                                                                 | 36    | 27    | 34    | 32    | 33    |
|                                  | 3                                 | 42                                                                 | 30    | 27    | 19    | 31    | 30    |
| Średnia/Average                  |                                   | 39,3                                                               | 33,67 | 26,33 | 24,47 | 33,00 | 31,67 |
| <i>Botrytis cinerea</i>          | 4                                 | 39                                                                 | 39    | 29    | 20    | 36    | 37    |
|                                  | 5                                 | 34                                                                 | 34    | 27    | 21    | 31    | 32    |
|                                  | 6                                 | 38                                                                 | 31    | 29    | 25    | 30    | 32    |
| Średnia/Average                  |                                   | 37,00                                                              | 34,67 | 28,33 | 22,00 | 32,33 | 33,67 |
| <i>Trichotecium roseum</i>       | 7                                 | 65                                                                 | 65    | 50    | 48    | 52    | 53    |
|                                  | 8                                 | 59                                                                 | 57    | 47    | 40    | 59    | 59    |
|                                  | 9                                 | 71                                                                 | 60    | 58    | 51    | 61    | 59    |
| Średnia/Average                  |                                   | 65,00                                                              | 60,67 | 51,67 | 46,33 | 57,33 | 57,00 |
|                                  |                                   |                                                                    |       |       |       |       | 51,00 |

A1' – powietrze 1 min, A2' – powietrze 2 min, A5' – powietrze 5 min, N1' – azot 1 min, N2' – azot 2 min, N5' – azot 5 min.

A1' – air 1 min, A2' – air 2 min, A5' – air 5 min, N1' – nitrogen 1 min, N2' – nitrogen 2 min, N5' – nitrogen 5 min.

Analizowano też wpływ plazmy na żywotność zarodników na pożywce MEA. Zaobserwowano, że w przypadku ocenianych 3 gatunków grzybów najmniej kolonii wyrosło na MEA na szalkach traktowanych plazmą przez 5 min. Dotyczyło to kombinacji, w których gazem roboczym było powietrze oraz azot. Najniższa średnia liczba wyrosniętych kolonii dotyczyła grzyba *B. cinerea*, gdy gazem roboczym było powietrze (tab. 30). Uzyskane wyniki posłużyły do obliczenia procentu hamowania wzrostu. Potwierdzono, że największy procent hamowania uzyskano w przypadku *B. cinerea*, gdy gazem roboczym było powietrze przy 1 min aplikacji plazmy (tab. 31, fot. 20–22).

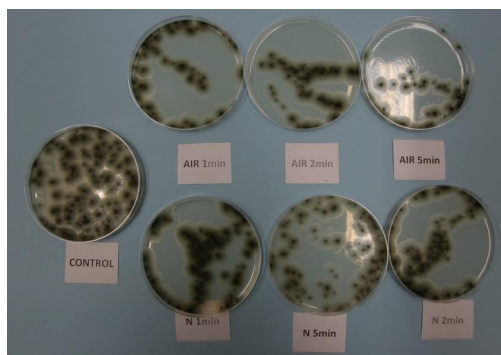
Tabela 31. Wzrost kolonii grzybów w stosunku do kontroli nietraktowanej plazmą rosnących na pożywce MEA przy różnym czasie aplikacji plazmy

Table 31. Growth of fungal colonies relative to the control not treated with plasma growing on MEA medium at different times of plasma application

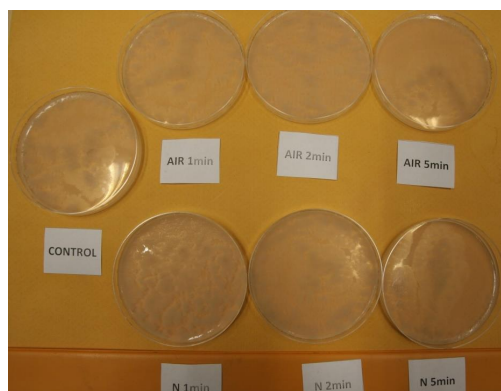
| Gatunek grzyba<br>Fungus species | Powstałe kolonie względem kombinacji kontrolnej (%)<br>Resulting colonies relative to the control combination (%) |       |       |        |        |       |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|--------|--------|-------|
|                                  | A1'                                                                                                               | A2'   | A5'   | N1'    | N2'    | N5'   |
| <i>Alternaria alternata</i>      | 87,50                                                                                                             | 62,50 | 52,50 | 90,00  | 80,00  | 72,50 |
|                                  | 100,00                                                                                                            | 75,00 | 94,40 | 88,90  | 91,70  | 66,70 |
|                                  | 71,40                                                                                                             | 64,30 | 45,20 | 73,80  | 71,40  | 66,70 |
| Średnia/Average                  | 86,30                                                                                                             | 67,27 | 64,03 | 84,23  | 81,03  | 68,63 |
| <i>Botrytis cinerea</i>          | 100,00                                                                                                            | 74,40 | 51,30 | 92,30  | 94,90  | 89,70 |
|                                  | 100,00                                                                                                            | 79,40 | 61,80 | 91,20  | 94,10  | 91,20 |
|                                  | 81,60                                                                                                             | 76,30 | 65,80 | 78,90  | 84,20  | 84,20 |
| Średnia/Average                  | 93,87                                                                                                             | 76,70 | 59,63 | 87,47  | 91,07  | 88,37 |
| <i>Trichothecium roseum</i>      | 84,60                                                                                                             | 76,90 | 73,80 | 80,00  | 81,50  | 75,40 |
|                                  | 96,60                                                                                                             | 79,70 | 67,80 | 100,00 | 100,00 | 71,20 |
|                                  | 84,50                                                                                                             | 81,70 | 71,80 | 85,90  | 83,10  | 87,30 |
| Średnia/Average                  | 88,57                                                                                                             | 79,43 | 71,13 | 88,63  | 88,20  | 77,97 |

A1' – powietrze 1 min, A2' – powietrze 2 min, A5' – powietrze 5 min, N1' – azot 1 min, N2' – azot 2 min, N5' – azot 5 min.

A1' – air 1 min, A2' – air 2 min, A5' – air 5 min, N1' – nitrogen 1 min, N2' – nitrogen 2 min, N5' – nitrogen 5 min.



Fot. 20. Rozwój *A. alternata* na szalkach z MEA po aplikacji plazmy  
 Phot. 20. Development of *A. alternata* on MEA dishes after plasma application



Fot. 21. Rozwój *B. cinerea* na szalkach z MEA po aplikacji plazmy  
 Phot. 21. Development of *B. cinerea* on MEA dishes after plasma application



Fot. 22. Rozwój *T. roseum* na szalkach z MEA po aplikacji plazmy  
 Phot. 22. Growth of *T. roseum* on MEA dishes after plasma application

## 5.6. Ocena fitotoksycznego działania ozonu i plazmy

Działanie fitotoksyczne ozonu na liściach chryzantem zaobserwowano już 2 dni po ozonowaniu. Na chryzantemach w kombinacji kontrolnej oraz opryskanych fungicydem Rovral Flo 255 SC czy insektycydem Karate Zeon 050 CS nie zanotowano objawów nekrozy. Najwyższe wskaźniki fitotoksyczności wystąpiły w kombinacjach z aplikacją ozonu przez 10 min i wynosiły 4,5 i 5,0. Różniły się istotnie statystycznie od kombinacji kontrolnej i kombinacji, w której stosowano chemiczny środek ochrony roślin – zarówno fungicyd, jak i insektycyd. Tydzień i 2 tygodnie po ozonowaniu nastąpił wzrost uszkodzenia liści we wszystkich 3 kombinacjach (fot. 23 i 24). Dwa tygodnie po zabiegu ozonowania najbardziej rozległe nekrozy na liściach, połączone z zamieraniem roślin, zaobserwowano w kombinacjach, w których ozon był aplikowany przez 10 min, zwłaszcza tam, gdzie chryzantemy były zainfekowane *B. cinerea* (tab. 32 i 33).



Fot. 23. Liście chryzantem zainfekowane *B. cinerea* uszkodzone przez ozon

Phot. 23. Chrysanthemum leaves infected with *B. cinerea* damaged by ozone



Fot. 24. Objawy fitotoksycznego działania ozonu obserwowane na liściach chryzantem zasiedlonych przez mszyce

Phot. 24. Symptoms of ozone phytotoxicity observed on chrysanthemum leaves infested by aphids

Tabela 32. Fitotoksyczność na chryzantemach zainfekowanych *B. cinerea* po zabiegu ozonowania

Table 32. Phytotoxicity on *B. cinerea* infected chrysanthemums after ozonization

| Kombinacja<br>Combination                                                     | Liczba dni po zabiegu<br>The number of days after surgery |       |       |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------|-------|
|                                                                               | 2                                                         | 7     | 14    |
| Kontrola bezwzględna<br>Absolute control                                      | 0,00a*                                                    | 0,00a | 0,00a |
| Ozon 2 min<br>Ozone 2 min                                                     | 1,00b                                                     | 1,50b | 2,75b |
| Ozon 10 min<br>Ozone 10 min.                                                  | 1,40b                                                     | 2,50c | 4,50c |
| Ozon 10 min/30 min<br>Ozone 10 min/30 min                                     | 2,10c                                                     | 3,75d | 5,00c |
| Kontrola względna (Rovral Flo 255 SC)<br>Relative control (Rovral Flo 255 SC) | 0,00a                                                     | 0,00a | 0,00a |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).

Tabela 33. Średnia fitotoksyczność na chryzantemach zasiedlonych przez *Myzus persicae* po zabiegu z wykorzystaniem ozonu

Table 33. Average phytotoxicity on chrysanthemums infested with *Myzus persicae* after treatment with ozone

| Kombinacja<br>Combination                                                     | Liczba dni po zabiegu<br>The number of days after surgery |         |         |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------|---------|
|                                                                               | 2                                                         | 7       | 14      |
| Kontrola bezwzględna<br>Absolute control                                      | 0,00a*                                                    | 0,00a   | 0,00a   |
| Ozon 2 min<br>Ozone 2 min                                                     | 0,50ab                                                    | 1,00abc | 1,50bcd |
| Ozon 10 min<br>Ozone 10 min                                                   | 1,00abc                                                   | 1,00abc | 2,25de  |
| Ozon 10 min/30 min<br>Ozone 10 min/30 min                                     | 1,25bcd                                                   | 1,75cd  | 3,25e   |
| Kontrola względna (Rovral Flo 255 SC)<br>Relative control (Rovral Flo 255 SC) | 0,00a                                                     | 0,00a   | 0,00a   |

\* Wartości oznaczone tą samą literą w kolumnach nie różnią się od siebie istotnie (przy  $\alpha = 0,05$ ).

\* Values designated with the same letter in columns do not significantly differ (at  $\alpha = 0.05$ ).





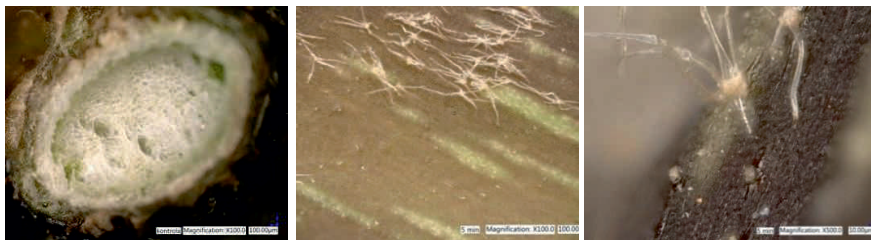
A

B

C

Fot. 25. Przekrój łodygi *E. fortunei* – kontrola (A), powietrze 5 min (B) oraz azot 5 min (C) pod mikroskopem

Phot. 25. Cross-section of *E. fortunei* stem – control (A), 5 min air (B) and 5 min nitrogen (C) under the microscope



A

B

C

Fot. 26. Przekrój łodygi i uszkodzenie włosków *H. helix* – kontrola (A), powietrze 5 min (B) oraz azot 5 min (C) pod mikroskopem

Phot. 26. Cross-section of the stem and damage to *H. helix* hairs – control (A), 5 min air (B) and 5 min nitrogen (C) under the microscope



A

B

C

Fot. 27. Przekrój łodygi *C. grandiflorum* – kontrola (A), powietrze 5 min (B) oraz azot 2 min (C) pod mikroskopem

Phot. 27. Cross-section of *C. grandiflorum* stem – control (A), 5 min air (B) and nitrogen 2 min (C) under the microscope



Fot. 28. Przekrój łodygi *P. variegatus* – kontrola (A), powietrze 5 min (B) oraz azot 5 min (C) pod mikroskopem

Phot. 28. Cross-section of *P. variegatus* stem – control (A), 5 min air (B) and 5 min nitrogen (C) under the microscope

Analizując makroskopowo i mikroskopowo pędy wierzby traktowane plazmą, nie zaobserwowano uszkodzeń. Pod mikroskopem 3D sadzonek półzdrewniałych i zielnych zaobserwowano jednak niewielkie uszkodzenia widoczne na przekroju pędów, zwłaszcza przy dłuższych czasach aplikacji. Były to niewielkie przebarwienia skórki, a na pędach *H. helix* widoczne były uszkodzenia włosków (fot. 25–28). Uszkodzenia te mogły być częściowo związane z podwyższoną temperaturą, jaka powstawała po opuszczeniu reaktora przez plazmę i była wyraźnie wyższa przy czasie aplikacji wynoszącym 300 s (tab. 34).

Tabela 34. Średnia temperatura zanotowana na przekrojach ukorzenianych roślin podczas aplikacji plazmy niskotemperaturowej

Table 34. Average temperature recorded on sections of rooted plants during low-temperature plasma application

| Kombinacja<br>Combination  | Temperatura roślin poddanych aplikacji plazmy (°C)<br>Temperature of plants after plasma application (°C) |                     |                                   |                                |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
|                            | <i>Eonymus fortunei</i>                                                                                   | <i>Hedera helix</i> | <i>Chrysanthemum grandiflorum</i> | <i>Pleioblastus variegatus</i> |
| Kontrola/Control           | 20,0                                                                                                      | 20,0                | 20,0                              | 20,0                           |
| Powietrze 1 min/ Air 1 min | 34,0                                                                                                      | 31,9                | 31,4                              | 34,2                           |
| Powietrze 2 min/ Air 1 min | 35,2                                                                                                      | 31,7                | 39,0                              | 37,2                           |
| Powietrze 5 min/ Air 1 min | 41,0                                                                                                      | 38,0                | 40,5                              | 35,8                           |
| Azot 1 min/ Nitrogen 1 min | 31,5                                                                                                      | 33,0                | 33,0                              | 32,0                           |
| Azot 2 min/ Nitrogen 2 min | 34,0                                                                                                      | 36,8                | 34,7                              | 36,6                           |
| Azot 5 min/ Nitrogen 5 min | 41,2                                                                                                      | 39,3                | 37,2                              | 37,1                           |

## 6. DYSKUSJA

### 6.1. Ocena wpływu ozonu na agrofagi

W przeprowadzonych badaniach zaobserwowano silne ograniczenie w rozprzestrzenianiu się grzybni *B. cinerea* oraz mszyc na sąsiednie rośliny po aplikacji ozonu. Na chryzantemach stwierdzono wyraźne ograniczanie rozwoju grzybni *B. cinerea*, zwłaszcza przy 10 min aplikacji i 30 min przetrzymywania roślin w szczelnym pomieszczeniu. Literatura dotycząca wykorzystania ozonu podkreśla możliwość jego stosowania do inaktywacji mikroorganizmów, hamowania procesów gnilnych powodowanych przez grzyby, niszczenia pozostałości pestycydów i tępienia szkodników [Mari i in. 2003, Normov i in. 2014, Soares i in. 2020]. Najczęściej potwierdza się silne ograniczanie *B. cinerea* na przechowywanych owocach. Po 48 h aplikacji ozonu notowano prawie całkowitą eliminację tego patogenu podczas przechowywania jabłek, winogron, borówki i marchwi [Sharpe i in. 2009]. Podobne obserwacje prowadzone były w komorach przechowalniczych po sztucznej infekcji owoców winorośli, gdzie ozon w dużym stopniu ograniczał rozprzestrzenianie się *B. cinerea* [Feliziani i Romanazzi 2011]. Na ziemniakach jednak *B. cinerea* rozwijał się bardziej na uszkodzonych przez ozon tkankach [Krupa i in. 2001]. Zaobserwowano też, że potraktowanie ozonem w stężeniu 3 ppm powodowało zahamowanie wzrostu grzybni powietrznej i tworzenie zarodników na uszkodzonych brzoskwiń zaszczepionych *B. cinerea* i przechowywanych przez 4 tygodnie w 5°C i 90-procentowej wilgotności względnej. Po ponownym umieszczeniu brzoskwiń w atmosferze otoczenia zarodnikowanie zostało wznowione. Zawartość ozonu w przechowalni wynosząca 0,3 g/cm<sup>3</sup> przez okres 7 tygodni w temperaturze 5°C skutecznie hamowała rozwój *B. cinerea* na winogronach [Palou i in. 2002]. Zaobserwowano też, że dawkowanie ozonu w stężeniu

0,3 g/cm<sup>3</sup> znacząco ograniczało gnicie winogron porażonych przez *B. cinerea*, co zapewniało ich 40-dniowy okres przechowywania [Vlassi i in. 2018]. Skuteczność ozonu w ograniczeniu *B. cinerea* na winogronach potwierdził też De Simone i współautorzy [2020]. Fumigacja ozonem nie powodowała zmiany barwy owoców oraz zawartości chlorofilu. Sanityzacja z wykorzystaniem ozonu ograniczała też patogeny z rodzajów *Penicillium* i *B. cinerea*, zwłaszcza na przechowywanych gruszkach [Mari i in. 2003]. Grzybnia *B. cinerea* na przechowywanych borówkach traktowanych ozonem zwijała się i pękała [Zhou i in. 2019a]. Zaobserwowano też ograniczający wpływ ozonu na *Puccinia graminis* i *Blumeria graminis* na zbożach. Należy podkreślić, że poza ograniczaniem rozwoju patogenów, ozon odgrywa też istotną rolę w aktywacji enzymów antyoksydacyjnych w przechowywanych owocach i warzywach, a także w sokach [Almeida i in. 2015, Zhang i in. 2020]. Uwzględniając odpowiednie stężenie i czas aplikacji, w celu uniknięcia fitotoksyczności, ozon staje się poważną alternatywą dla chemicznych środków ochrony roślin, które jako niedozwolone pozostałości mogą znajdować się w spożywanych plonach, zagrażając zdrowiu konsumentów.

W przeprowadzonych badaniach ozon ograniczał znacząco liczebność populacji mszyc zasiedlających chryzantemy. Kombinacja z ozonem aplikowanym przez 10 min i 30-minutowym czasem przechowywania roślin w zamkniętej komorze wykazywała najwyższy wskaźnik zahamowania ich liczebności po 2, 7 i 14 dniach od aplikacji. Hamowanie liczebności mszyc przez oprysk insektycydem było bardzo silne, ale po 14 i 30 dniach od aplikacji obserwowano znaczny wzrost ich liczby. Mogło być to związane z faktem, że pyretroidy charakteryzują się szybkim, ale stosunkowo krótkim działaniem owadobójczym [Schleier III i Paterson 2011]. To silne działanie ozonu na szkodniki jest często potwierdzane w literaturze. Najczęściej wymienia się ozon jako czynnik zwalczający szkodniki w przechowywanym ziarnie [Kells i in. 2001] i produktach mącznych [Keivanloo i in. 2014]. Aplikacja ozonu w stężeniu 50 ppm silnie ograniczała procesy fizjologiczne i aktywność wołka kukurydzowego [Sousa i in. 2016]. Silny wpływ ozonu na owady, a zwłaszcza na mszyce, potwierdzają liczne publikacje [Warrington 1989, Brown i in. 1992, Ebihara i in. 2013, Isikber i Athanassiou 2015, Telesnicki i in. 2015]. Związane jest to m.in. z wpływem ozonu na DNA organizmów [Ito i in. 2005]. Z drugiej jednak strony zauważono, że rośliny iglaste uszkodzone wcześniej przez zanieczyszczenia spowodowane przez ozon atmosferyczny były słabiej zasiedlane przez mszyce chociaż różnice pomiędzy kombinacjami nie były znaczne [Holopainen 2002]. Jednak w badaniach mszyc zasiedlających pszenicę traktowaną ozonem w różnych czasach aplikacji nie zaobserwowano istotnych różnic pomiędzy kombinacjami, mimo że ozon zmniejszał potencjał antyoksydacyjny wewnątrz tkanek roślinnych [Telesnicki i in. 2018]. W pewnych

przypadkach może być to związane z tym, że uszkodzone tkanki roślin mogą też indukować powstawanie mechanizmów obronnych w roślinach i chronić je przed dalszym zasiedlaniem [Gosset i in. 2009].

Ozon troposferyczny może indukować reakcje obronne roślin na mszyce [Menéndez i in. 2010]. Wykazano, że rośliny narażone na działanie ozonu wykazują zwiększoną produkcję i szybkie gromadzenie się kwasu salicylowego, który wzmacnia początkowy sygnał oksydacyjny i jest zaangażowany w szlak obronny wywołany atakiem mszyc. Sygnał jest przesyłany w całej roślinie, nawiązując komunikację między różnymi tkankami roślinnymi [Menéndez i in. 2009]. Podobna indukcja reakcji obronnych rośliny powodowana przez różne czynniki może być związana z wytwarzaniem lotnych izoprenoidów (VIP), które są produkowane i emitowane przez rośliny jako ochrona przed mszycami [Dancewicz i in. 2016]. Dowiedziono też, że ozon jako reaktywna forma tlenu podnosi poziom kwasu abscysynowego (ABA), głównego czynnika pobudzającego aparat szparkowy do zamykania się, co może być związane z reakcjami obronnymi roślin [McAdam i in. 2017]. Wzrost metabolizmu reaktywnych form tlenu powoduje aktywizację wrodzonej zdolności roślin do radzenia sobie z negatywnymi czynnikami zewnętrznymi [Kaur i in. 2021].

## **6.2. Wpływ plazmy niskotemperaturowej na rośliny i procesy fizjologiczne**

W przeprowadzonym doświadczeniu oceniającym wpływ plazmy na ukorzenianie się pędów roślin ozdobnych zaobserwowano, że dłuższy czas ekspozycji na pędy przez plazmę, zwłaszcza gdy gazem roboczym było powietrze, powodował zwiększoną liczbę korzeni, powstałych pędów i większą ich sumaryczną długość. Najwięcej korzeni posiadały sztabry wierzby pozostawione na 300 s na działanie plazmy i w tym przypadku można mówić o pozytywnym wpływie tego czynnika. Jednak dłuższy czas aplikacji plazmy na sztabry miał niewielki wpływ na wzrost masy przez sadzonki. W przypadku *S. gracilistyla* lepsze wyniki zaobserwowano po aplikacji plazmy z azotem jako gazem roboczym, natomiast *S. hookeriana* reagowały bardziej na plazmę z powietrzem przy dłuższym czasie aplikacji. W przeprowadzonych badaniach okazało się także, że im dłuższy był czas ekspozycji na działanie plazmy niskotemperaturowej, tym więcej było korzeni i były one dłuższe. Najwięcej korzeni posiadały sztabry wierzby wystawione przez 300 s na działania plazmy. Jednak dłuższy czas aplikacji plazmy na sztabry miał niewielki wpływ na przyrost masy przez te sadzonki. Liczne są badania dotyczące poszukiwania skutecznych sposobów ukorzeniania sadzonek zdrewniałych, gatunków łatwiej tworzących korzenie przybyszowe, takich jak *Salix* sp., *Populus* sp., *Jasminum* sp.,

a także trudniejszych jak *Pinus* sp. czy *Olea* sp. [Altamura 1996, Porfirio i in. 2016]. W przypadku sztobrów zdrewniałych, szukając innych czynników związanych z ukorzeniem, zaobserwowano, że rozmiar cięcia wpływa negatywnie na ukorzenie i na zmniejszenie się liczby korzeni przybyszowych [Awan i in. 2012].

Odwrotną tendencję obserwuje się natomiast w przypadku sadzonek półzdrewniałych i zielnych. Ukorzenie poprawia się wraz ze wzrostem rozmiaru cięcia, co można przypisać większym zapasom węglowodanów, większej ilości nagromadzonych endogennych auksyn i większej liczbie kompetentnych komórek [De Oliveira i in. 2003, Haq i in. 2009]. Podobne wyniki uzyskano po aplikacji plazmy na półzdrewniałe i zdrewniałe pędy ukorzenianych gatunków roślin w badaniach własnych. W przypadku półzdrewniałych pędów *Eonymus fortunei* i *Hedera helix* plazma z powietrzem jako gazem roboczym, najbardziej stymulowała rozwój nowych korzeni. Podobnie było w przypadku zielnych sadzonek *Chrysanthemum grandiflorum*. Jedynie w przypadku zielnych sadzonek *Pleioblastus variegatus* największe przyrosty nowych korzeni zaobserwowano po aplikacji plazmy, gdy gazem roboczym był azot, i niewiele mniejsze przyrosty po aplikacji z powietrzem. Najnowsza literatura wspomina też o pozytywnym wpływie plazmy na tworzenie się nowych korzeni na sadzonkach. Podobne wyniki uzyskano po aplikacji plazmy na zielne sadzonki trawy *Zoysia Willd.* gdy po aplikacji plazmą z helem jako gazem roboczym poprawiły się parametry biometryczne sadzonek i jak się przypuszcza, mogło być to związane z większą przepuszczalnością tkanek i wchłanianiem wody [Li i in. 2019a]. Podobne wyniki uzyskano, traktując plazmą sadzonki zielne innego gatunku trawy *Eremochloa phiuroides* [Li i in. 2019b]. W badaniach własnych także zaobserwowano pozytywny wpływ plazmy na tworzenie się korzeni sadzonek chryzantem. Wprawdzie uznawane są one za roślinę łatwą do ukorzeniania i niezbyt podatną na czynniki egzogenne [Sagee i in. 1992], podobnie jak *Salix* sp. czy *H. helix*, które posiadają wyspecjalizowane komórki umożliwiające szybkie tworzenie korzeni przybyszowych [Hartmann i in. 1990, Altamura 1996], jednak dla szybszego procesu ukorzeniania często wykorzystuje się chemiczne preparaty. Dobry wpływ na szybkie ukorzenie się chryzantem poprzez zastosowanie biostymulatora z dodatkiem aloesu oraz wyciągu z kory wierzby zaobserwował w badaniach również Wise i współautorzy [2020]. Mitra i inni [2014] opisują zdolność plazmy do poprawy zdrowotności materiału rozmnożeniowego i pobudzania jego rozwoju. Potwierdzają to liczni autorzy, którzy badali wpływ plazmy na procesy fizjologiczne zachodzące w roślinach [Sarinont i in. 2016, Pawłat i in. 2018, Terebun i in. 2021]. Powstające reaktywne formy tlenu i azotu (RONS) oddziaływały na kiełkowanie i wzrost młodych roślin kminku [Shashikanthalu i in. 2020]. Plazma, w której wykorzystywano tlen jako gaz roboczy, wpływała też znacząco na parametry biometryczne materiału



rozmnożeniowego czosnku, co prowadziło do zwiększonego wzrostu korzeni i wyższego plonu [Holc i in. 2019]. Podobne pozytywne efekty na parametry biometryczne różnych gatunków roślin były związane z zastosowaniem innego czynnika fizycznego – biostymulacji laserowej [Metwally i in. 2013]. Także stymulacja tkanek roślin polem elektromagnetycznym powodowała istotny wpływ na procesy fizjologiczne [Vian i in. 2016]. W związku z ograniczaniem chemicznych stymulatorów wzrostu poszukuje się wciąż alternatywnych, niechemicznych metod wpływających na procesy fizjologiczne. Zwraca się uwagę na możliwość wykorzystania zjawiska somatycznej embriogenezy w tworzeniu i wykorzystaniu w biotechnologii kalusa [Nawrot-Horabik 2015]. Liczni autorzy potwierdzają wpływ plazmy na proces kiełkowania i związane z nim procesy fizjologiczne i biochemiczne w nasionach [Dhayal i in. 2006, Henselová i in. 2012, Kitazaki i in. 2012, Černak 2016, Attri i in. 2020, Mazandarani i in. 2020]. Zaobserwowano, że po traktowaniu nasion pszenicy plazmą, poza poprawą kiełkowania nastąpił wzrost wysokości roślin, długości korzeni i powierzchni liści [Jiang i in. 2014a, Sohan i in. 2021]. Pozytywny wpływ aplikacji plazmy na nasiona polega na wzmocnieniu odporności roślin na stres środowiskowy poprzez aktywizację istotnych dla fizjologii roślin enzymów, co udowodniono w badaniach na roślinach kminku [Yasamani Masouleh i in. 2020] oraz orzechów ziemnych [Ahmed i in. 2021]. Plazma aplikowana na nasiona podnosi siłę i energię kiełkowania i wzrost nowych siewek poprzez zjawisko synergizmu [Silva i in. 2020, Song i in. 2020] oraz zwiększenie zwilżalności nasion [Brust i in. 2021, Dufour i in. 2021]. Przy wykorzystaniu argonu jako gazu roboczego plazma poprawiała właściwości biometryczne kiełkujących nasion ryżu i zwiększała znacząco aktywność enzymatyczną [Billah i in. 2021], a także zmniejszała działanie kwasu abscysynowego (ABA), który hamuje procesy kiełkowania ryżu [Suriyasak i in. 2021]. Wpływ plazmy na procesy biochemiczne związane z aktywnością katalazy opisuje Puač i in. [2018]. Wielu autorów podkreśla że znaczący wpływ na rozwój roślin po aplikacji plazmy mają tworzące się RONS, zwiększona aktywność enzymów hydrolitycznych i przez to szybszy wzrost i rozwój roślin [Mhamdi i Van Breusege 2018, Sharma i Singh 2020]. Liczne prace potwierdzają wpływ plazmy na wzrost ilości chlorofilu, polifenoli oraz przeciwutleniaczy [Henselová i in. 2012, Hayashi i in. 2015, Ji i in. 2016]. Otrzymane wyniki badań potwierdzają przydatność zastosowania stymulacji roślin plazmą w celu przyspieszenia wzrostu. Świadczy o tym m.in. stwierdzony przyrost biomasy roślin doświadczalnych w porównaniu z kombinacją kontrolną. Korzystnym tego skutkiem jest poprawa procesu ukorzeniania wynikająca ze zwiększenia masy oraz długości wytworzonych korzeni i pędów, a także zwiększenie przyrostu kallusa wpływające pozytywnie na proces gojenia ran roślin po zabiegach pielęgnacyjnych. Możliwe, że różnice względem kombinacji



kontrolnej mogłyby być większe, gdyby zmniejszyć odległość plazmowanych roślin od głowicy z 4 cm, jak miało to miejsce w przeprowadzonych badaniach, do 2 cm, jak to opisuje Li i współautorzy [2019b], ponieważ nie potwierdziły się obawy fitotoksycznego działania plazmy. W związku z tym w przyszłych doświadczeniach będzie można znacznie zmniejszyć tę odległość. Proponowany sposób obróbki plazmowej daje w perspektywie realne oszczędności ekonomiczne oraz przyczynia się do poprawy jakości oferowanych na rynku produktów roślinnych [Stryczewska i in. 2013]. W przeprowadzonych badaniach woda plazmowana także oddziaływała na liczbę i długość tworzących się korzeni. Nie była to jednak różnica istotna statystycznie. Nie obserwowano wprawdzie na początku żadnych objawów chorobowych na sadzonkach, jednak pod koniec doświadczenia zaczęły się one pojawiać. Może to być związane z tym, że wpływ PAW na mikroorganizmy jest krótkotrwały i możliwe, że należałoby rozważyć zastąpienie jednorazowej aplikacji okresowym podawaniem świeżo przygotowanej PAW, jak to ma miejsce w uprawie roślin w glebie lub podłożach inertnych [Judée i in. 2018, Schmidt i in. 2019, Šimečková i in. 2020]. Żeby poprawić wykorzystanie plazmy coraz częściej stosuje się ją w połączeniu z aerozolami [Stancampiano i in. 2019]. Liczne badania potwierdzają też pozytywny wpływ wody plazmowanej na czystość mikrobiologiczną artykułów spożywczych, co jest związane z działaniem licznych związków odpowiedzialnych za reakcje utleniania i redukcji, powstających w wyniku traktowania wody plazmą [Thirumdas i in. 2018, Piskarev 2019], szczególnie efektywnych w zwalczaniu szkodliwych bakterii [Kučerová i in. 2020]. Istotna jest stabilność parametrów powodujących biobójcze właściwości wody plazmowanej, która może wynosić od kilku minut do kilku godzin i zależy od pH, temperatury i koncentracji  $H_2O_2$  oraz  $HNO_3$  [Ikawa i in. 2016]. Powstający ozon i nadtlenek wodoru określa właściwości chemiczne PAW i od tego, które reaktywne formy tlenu czy azotu dominują, zależą procesy biochemiczne i działanie przeciwbakteryjne [Julák i in. 2018, Machala i in. 2019]. Woda plazmowana wpływa na reakcje chemiczne w środowisku komórki, aktywizuje różne procesy obronne roślin, takie jak tworzenie reaktywnych form tlenu, antyoksydantów oraz biogennych amin, które zwiększają tolerancję na stres [Gierczik i in. 2020]. Czynnikiem ten w uprawie winorośli indukował powstanie odporności na patogeny [Laurita i in. 2020]. Na uwagę zasługuje fakt, że poza potwierdzeniem bakteriobójczych i grzybobójczych właściwości wody plazmowanej udowodniono, że aplikacja PAW do gleby nie wpływa negatywnie na parametry fizyczne czy chemiczne środowiska, może dostarczać potrzebny azot i w związku z tym może być wykorzystywana w rolnictwie zrównoważonym [Šimečková i in. 2020]. Udowodniony też został silny wpływ PAW na kiełkowanie, zaopatrzenie w minerały i dalszy rozwój roślin pomidora, co można też traktować jako wsparcie nawożenia azotem [Ranieri i in. 2021].

Wielu autorów podkreśla, że plazma, indukując powstawanie lotnych związków organicznych (VOC), wpływających na biofortyfikację roślin, może w przyszłości zastąpić chemiczne środki ochrony roślin [Brilli i in. 2019]. Zaobserwowano także wzrost poziomu IAA w nasionach fasoli mung traktowanych wodą plazmowaną [Zhou i in. 2019b]. W przeprowadzonych badaniach zanotowano też wpływ plazmy na zawartość hormonu IAA w sadzonkach chryzantem. Zawartość IAA była zróżnicowana w różnych częściach sadzonek. Najwyższy poziom IAA zanotowano w blaszce liściowej, mniej w korzeniu, a najmniej w łodydze. Najwyższe poziomy zanotowano, gdy gazem roboczym był azot. Wpływ aplikacji plazmy niskotemperaturowej na poziom hormonu IAA w sadzonkach przedstawiono w pracy Szabó i in. [2014] oraz Li i in. [2019a, 2019b]. Należy dodać, że plazma zwiększa pobór wody i wpływa na hormony roślinne, a to ma decydujący wpływ na procesy związane z ukorzenianiem [Agulló-Antón i in. 2014, Ling i in. 2014, Yan i in. 2014, Porfirio i in. 2016]. Reaktywne formy tlenu i azotu (RONS) generowane w plazmie powodują molekularną aktywację procesów w komórkach roślin [Apell i Hirt 2004]. RONS biorą udział w poprawie ukorzeniania poprzez aktywację biosyntezy IAA [Gutierrez i in. 2012]. W przeprowadzonym badaniu plazma generowała produkcję IAA podczas ukorzeniania, ponieważ wzrost poziomu IAA obserwowano w badanych sadzonkach poddanych plazmowaniu. Potwierdzają to także badania Liao i współautorów [2010], którzy udowodnili pozytywny wpływ tworzących się reaktywnych form tlenu na zawartość IAA w tkankach chryzantem i przez to na powstawanie nowych korzeni. Wyniki mogą sugerować, że stymulacja ukorzeniania przez plazmę może być skorelowana z produkcją IAA. Wielokrotnie odnotowano wzajemne oddziaływanie między RONS a hormonami związanymi z rozwojem, takimi jak auksyny i cytokininy [Diaz-Vivancos i in. 2015, Bielach i in. 2017, Mhamdi i Van Breusegem 2018]. Pozytywny wpływ plazmy na fitohormony w kiełkujących nasionach koniczyzny traktowanych plazmą przez 5 i 7 min udowodnił Mildażiené i in. [2021]. Potwierdza się też wpływ plazmy na tworzenie się kwasu jasmonowego współpracującego z fitohormonami w celu ograniczania stresu abiotycznego związanego ze środowiskiem [Wang i in. 2020]. Mildażiené i współautorzy [2019] wykazali, że plazma niskotemperaturowa aplikowana przez 7 min zwiększyła zawartość kwasu giberellinowego (GA) w nasionach słonecznika i zwiększyła ich zdolność kiełkowania o 10–24%. Zwiększony poziom GA promuje aktywność amylazy, która ulega degradacji i wpływa na kiełkowanie. Badania innych autorów wskazują, że w zainfekowanych roślinach następuje znaczne obniżenie tempa fotosyntezy [Silveira i in. 2019]. Z drugiej jednak strony zaobserwowano pozytywny wpływ plazmy na procesy fotosyntezy w młodych siewkach [Saber i in. 2018]. Potwierdza to też D'Addazio i współautorzy [2020]. Pozytywny wpływ wody plazmowanej na parametry foto-

syntezy udowodniano też po traktowaniu kukurydzy i jęczmienia [Yemeli i in. 2021], a także szpinaku [Ji i in. 2016]. Podobnie obserwowano wzrost zawartości chlorofilu w rozwijających się roślinach kminku [Shashikanthalu i in. 2020], pszenicy [Kučerová i in. 2019], a także ryżu wyrosłego z nasion traktowanych plazmą [Billah i in. 2021, Hashizume i in. 2021]. Wpływ plazmy na zawartość chlorofilu, parametry fotosyntezy i asymilację  $\text{CO}_2$  został też potwierdzony w badaniach na pszenicy [Saber i in. 2019] i kukurydzy [Chanioti i in. 2021]. W przechowywanej sałacie przy niższych czasach aplikacji zaobserwowano najpierw wzrost, a przy dłuższych czasach aplikacji spadek poziomu maksymalnej wydajności fotosyntetycznej [Baier i in. 2013]. Z drugiej jednak strony, zaobserwowano, że w przypadku stresu roślin, związanego z suszą, tworzące się reaktywne formy tlenu mogą uszkodzić białka i błonę chloroplastu, zmniejszyć zawartość chlorofilu i osłabić aktywność enzymów, powodując przez to zahamowanie fotosyntezy [Farooq i in. 2012, Liu i in. 2013]. Zaobserwowano też, że woda plazmowana zastosowana na rosnące rośliny kukurydzy powodowała obniżenie parametrów fotosyntezy [Škarpá i in. 2020]. Zaobserwowano również, że wysoki poziom ozonu, który jest obecny jako element plazmy niskotemperaturowej, powodował zmniejszenie szybkości asymilacji  $\text{CO}_2$ , niższą przewodność szparkową i wydajność fotosyntezy [Guo i in. 2018, Li i in. 2019a]. Przez to, że plazma jest uznawana za czynnik wpływający na konwersję gazów cieplarnianych ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ) przy pomocy odpowiednich katalizatorów może w przyszłości być przydatna do produkcji użytecznych związków chemicznych lub paliw odnawialnych [Bogaerts i Neyts 2018, Stryczewska 2020, George i in. 2021].

### 6.3. Wpływ plazmy na grzyby

Korzystnym skutkiem działania plazmy jest dekontaminacja mikrobiologiczna wpływająca na redukcję chorobotwórczych mikroorganizmów, co w konsekwencji ogranicza infekcje roślin. Stymulacja plazmowa pozwala więc na ograniczenie ilości stosowanych w rolnictwie środków chemicznych, przez co jest przyjazna dla środowiska. Badając wpływ plazmy niskotemperaturowej na grzyby bytujące na sadzonkach wierzby zaobserwowano, że najliczniej występował *A. alternata* i *B. cinerea*. Znaną i istotną rolę wśród chorób wierzby odgrywa rdza, która występuje zwłaszcza na liściach [Głowacka i in. 2017] i do zapobiegania jej rozwojowi używano plazmy niskotemperaturowej przed wysadzeniem sadzonek do gruntu. Jest to związane z tym, że plazma niskotemperaturowa posiada udowodnione właściwości fungistatyczne [Waskow i in. 2018]. W przeprowadzonych badaniach skupiono się jednak na grzybach bytujących na materiale rozmnożeniowym w postaci bezlistnych sztobrów. W badaniach własnych po aplikacji plazmy

zaobserwowano wpływ tego czynnika na grzyby bytujące na pędach wierzby. Stwierdzono, że mimo zastosowania plazmy na końcówki ukorzenianych później pędów, występowała dość duża liczba patogenicznych grzybów. W większości przypadków dłuższy czas aplikacji powodował ograniczenie grzybów jednak w przypadku *S. hookeriana* i izolowanego grzyba *Epicoccum nigrum* można podejrzewać, że plazma niskotemperaturowa może nawet stymulować rozwój tego gatunku wykorzystywanego w biologicznej ochronie [Lee i in. 2020]. Plazma niskotemperaturowa ogranicza liczne patogeny pochodzenia grzybowego, co potwierdzają w swoich badaniach liczni autorzy [Tyczkowska-Sieroń i Markiewicz 2014, Starek i in. 2019]. Wpływ plazmy z argonem jako gazem roboczym na kiełkowanie i rozwój *Fusarium oxysporum* udowodnił też Panngom i in. [2014]. Skuteczność wykorzystania plazmy do sterylizacji potwierdza Dzimitrowicz i in. [2014]. Zaobserwowano też istotne ograniczenie grzybów z rodzaju *Fusarium* po użyciu plazmy do dezynfekcji porażonych nasion [Šera i in. 2019, Świecimska i in. 2020]. Znane są doświadczenia, w których plazma niskotemperaturowa ograniczała takie grzyby jak *A. alternata*, *Fusarium culmorum*, *T. roseum*, *Aspergillus flavus* czy *A. clavatus* [Zahoranová i in. 2016, 2018]. Potwierdzono też wysoką skuteczność plazmy niskotemperaturowej oraz pola elektromagnetycznego w ograniczaniu grzybów z rodzaju *Fusarium*, *Stemphyllium* czy *A. alternata* zasiedlających nasiona roślin motylkowych [Filatova i in. 2012]. Wpływ na ograniczanie *B. cinerea* na chryzantemach miało też promieniowanie gamma [Chu i in. 2015]. Podobne wyniki też uzyskali Dasan i in. [2015] w ograniczaniu grzybów z rodzaju *Aspergillus* przy pomocy plazmy stosowanej na powierzchnię orzechów. Niszczące działanie na grzyby z tego rodzaju spowodowane było zmianami struktury strzępki oraz zmianami w DNA [Šimončicová i in. 2018, Waskow i in. 2018]. Liczni autorzy potwierdzają wpływ plazmy na ograniczanie procesów biochemicznych w grzybach i aktywację licznych enzymów, zwłaszcza antyoksydacyjnych, w roślinach wpływających na ich biofortyfikację i przez to poprawę odporności [Kitazaki i in. 2012, Jiang i in. 2014a, Shapoursadeh i in. 2016]. Zwiększa się aktywność dysmutazy ponadtlenkowej i reduktazy azotanowej, które chronią roślinę przed warunkami stresowymi [Sharma i Singh 2020]. Może więc być plazma postrzegana jako potencjalny element ochrony roślin i pewnych przypadkach alternatywny dla chemicznych środków ochrony roślin. Również potwierdzony jest silny wpływ plazmy na wirusy np. PPV na śliwie [Milusheva i in. 2020] i bakterie np. *Xantomonas* sp. na pomidorze [Perez i in. 2019]. W rozważaniach na temat przyczyn tego oddziaływania zwraca się też uwagę na skuteczne ograniczanie produkcji ergosterolu, ważnego składnika budulcowego ścian komórek grzybów. Potwierdzono to w badaniach *Candida albicans*, powodującego choroby skóry u człowieka [Tyczkowska-Sieroń i Markiewicz 2014, Rahimi-Verki i in. 2016]. Stwierdza się też

wpływ reaktywnych form tlenu i azotu (RONS) wytwarzanych przez reaktor plazmowy na niszczenie komórek nowotworowych [Graves 2014] oraz licznych gatunków bakterii i grzybów tworzących biofilm w szpitalach, zagrażających zdrowiu człowieka [Gupta i Ayan 2019]. Jednak skuteczność działania biobójczego zależy od użytego gazu roboczego, czasu aplikacji i odległości od zwalczanego organizmu [Puligundla i Mok 2018, Mucko i in. 2020]. W przeprowadzonych badaniach własnych na wybranych gatunkach grzybów dość niska skuteczność mogła wynikać z tego, że 4-centymetrowa odległość była zbyt duża od sadzonek. Należy też zauważyć, że dłuższy czas aplikacji plazmy nie spowodował większego ograniczenia grzybów pożytecznych takich jak *Trichoderma* sp. czy *E. nigrum*, które są gatunkami wykorzystywanymi w biologicznej ochronie roślin, a wręcz przeciwnie – można podejrzewać, że stymulował ich rozwój. Badania te jednak wymagają potwierdzenia na większej liczbie gatunków. Niektórzy badacze udowadniają, że plazma niskotemperaturowa może stymulować rozwój pożytecznych gatunków grzybów takich jak drożdże [Kitazaki i in. 2012]. Zaobserwowano pozytywny wpływ plazmy na grzyby w uprawie należące do *Basidiomycota* takie jak *Ganoderma lucidum*, używane w przemyśle farmaceutycznym do produkcji leków, a także *Lentinula edodes* wykorzystywane w przemyśle spożywczym [Tsukamoto i in. 2003, Haertel i in. 2014, Ma i in. 2018]. Autorzy przewidują możliwość szerszego wykorzystania tego czynnika w przemysłowej produkcji grzybów używanych w przemyśle spożywczym lub do produkcji leków. Analizując działanie plazmy na *A. alternata*, *B. cinerea* oraz *T. roseum in vitro* wykazano że indeksy hamowania nie były zróżnicowane zarówno w badaniach na pożywce PDA, jak i MEA, ale szczególnie w przypadku PDA zwiększały się przy dłuższym czasie aplikacji plazmy. W badaniach przeprowadzonych *in vitro* przez Go i współautorów [2018] zaobserwowano 100-procentowe hamowanie wzrostu grzybnii *A. alternata* i *B. cinerea*. Zhou i współautorzy [2019a] potwierdzają, że plazma niskotemperaturowa powodowała w badaniach *in vitro* fałdowanie i zapadanie się grzybnii *B. cinerea*. Zanotowano też, że na nasionach plazma po 4 min aplikacji ograniczała rozwój *T. roseum* [Zahoranová i in. 2016]. Inne badania potwierdzają, że *Gibberella fujikuroi*, groźny patogen ryżu, skutecznie był hamowany na pożywce PDA przez traktowanie plazmą, uzyskując 92-procentowy współczynnik zahamowania wzrostu po aplikacji przez 120 s [Jo i in. 2014]. Z innych badań wynika, że zastosowanie technologii plazmowej do zwalczania patogenów powoduje uszkodzenie błony komórkowej, zakłócenie równowagi ciśnienia osmotycznego, wymywanie płynu wewnątrzkomórkowego i składników odżywczych, co prowadzi do uszkodzenia i zamierania komórek grzybów [Joshi i in. 2011, Lunov i in. 2014, Pizá i in. 2018, Siddique i in. 2018]. Ponadto tlen i azot stykające się podczas aplikacji plazmy rozkładają się na aktywne formy i jako RONS powodują uszkodzenie błony

komórkowej drobnoustrojów [Song i in. 2009, Xiong i in. 2010, Lu i in. 2014, Stryczewska 2020], zabijając lub tylko uniemożliwiając rozmnażanie [Adhikari i in. 2020]. Woda plazmowana jest też bogatym źródłem azotanów i azotynów, które w wysokim stężeniu posiadają działanie bakterio- i grzybobójcze [Pawłat i in. 2019]. Udowodniono też dużą skuteczność ograniczania *B. cinerea* w zainfekowanej tkance *Cannabis sativa* traktowanej przez 10 min plazmą [Jerushalmi i in. 2020]. W badaniach wykonanych *in vitro* i na owocach czereśni zaobserwowano, że 5-minutowa aplikacja plazmy w znacznym stopniu ograniczała rozwój *B. cinerea* i *A. alternata*, niszcząc strukturę zarodników poprzez aktywację RONS i promieniowanie UV [Ambrico i in. 2020]. Silne ograniczenie liczby zarodników *Fusarium fujikuroi* w wodzie oraz na nasionach ryżu uzyskano po 10 min aplikacji plazmy [Kang i in. 2015]. Inaktywacja zarodników *Aspergillus niger*, *Cladosporium cladosporioides*, *Penicillium citrinum* oraz *Chaetomium* sp. traktowanych plazmą z argonem na szalkach Petriego, nastąpiła w czasie krótszym od 1 s [Park i in. 2004]. Wielu autorów podkreśla, że na skuteczność procesów niszczenia zarodników grzybów ma wpływ rodzaj użytego generatora plazmy i gaz roboczy [Puligundla i Mok 2018, Stryczewska 2020]. W przeprowadzonych badaniach *in vitro* na wybranych gatunkach grzybów niższa w porównaniu z innymi autorami skuteczność w hamowaniu rozwoju grzybnii mogła wynikać ze zbyt dużej odległości głowicy reaktora plazmowego od grzybnii. Konieczne wydaje się więc przetestowanie innych sposobów aplikacji plazmy przy minimalnej odległości od grzybnii, biorąc jednak pod uwagę ryzyko rozpuszczenia się pożywki w związku z wytwarzającą się wysoką temperaturą. Du i Yan [2017] używali plazmy z mieszaniną wody destylowanej i powietrza do sterylizacji powierzchni, zwalczając *Escherichia coli*, podkreślali ważną rolę odległości między reaktorem a próbką.

Poszukując alternatywnych rozwiązań w zwalczaniu grzybów, wykorzystuje się też liczne grzyby antagonistyczne czy też wyciągi z roślin. Do ograniczania *B. cinerea* wykorzystywano entomopatogenicznego grzyba *Metarhizium anisopliae*, który, generując VOC, silnie ograniczał patogen na przechowywanych pomidorach [Sarven i in. 2020]. Silny wpływ na zmiany morfologiczne grzybnii *A. alternata* i *B. cinerea* pod wpływem wyciągu z grapefruita zaobserwowała w swych badaniach Jamiołkowska [2011]. Zmiany te jednak były znacznie silniejsze przy testowanych fungicydach z grupy analogów strobiluryny i pomimo dużej skuteczności tej metody, zwłaszcza przy dużej presji patogenu i częstej aplikacji tych samych preparatów, może pojawiać się zjawisko odporności patogenów. Natomiast badania Stompor-Chrzan [2003] wykazały, iż wyciągi z wielu surowców roślinnych (m.in. z bazylii ogrodowej, bylicy estragon, cząbra ogrodowego, lubczyku lekarskiego) ograniczały rozwój grzybnii *A. alternata*. Na rynku dostępnych jest coraz więcej środków ochrony roślin na bazie naturalnych składników. Wielu



autorów eksponuje również naturalne olejki eteryczne, które są ważne w walce z patogenami roślin. Vitoratos i in. [2013] udowodnili, że olejki z tymianku, oregano i cytryny hamują rozwój grzybnii i zarodników *B. cinerea*.

#### 6.4. Fitotoksyczne oddziaływanie ozonu i plazmy na badane rośliny

Ozon i plazma niskotemperaturowa mogą też wpływać negatywnie na rośliny. W przeprowadzonych badaniach zanotowano silne fitotoksyczne oddziaływanie ozonu na badane rośliny. Liście chryzantem były uszkodzone, zwłaszcza przy długim czasie aplikacji i przetrzymywaniu roślin w zamkniętym pomieszczeniu w kombinacjach z *B. cinerea* oraz z mszycami. Znana jest fitotoksyczność ozonu zarówno pochodzącego z atmosfery, jak i wytworzonego przez ozonatory, który powoduje chlorozę i brązowienie liści [Krupa i in. 2001]. Literatura omawia głównie problemy związane z ozonem troposferycznym. Obserwuje się negatywny wpływ ozonu występującego w atmosferze na uprawy pszenicy, kukurydzy, ryżu i wielu innych roślin [Van Dingenen i in. 2009]. Podwyższony poziom ozonu zmniejsza wydajność fotosyntezy, zawartość chlorofilu, indukuje starzenie się liści rośliny niezależnie od gatunku [Guo i in. 2018]. Należy zauważyć, że wysoka zawartość kwasu askorbinowego wpływa na ograniczenie stresu związanego z wysokim stężeniem ozonu [Chen i Gallie 2005]. Licznie występują doniesienia o fitotoksyczności ozonu i jego negatywnym wpływie na fotosyntezę i aktywizację ROS, zwłaszcza w ekosystemach naturalnych przy uwzględnieniu zmian klimatycznych [Fuhrer 2003, Tetteh i in. 2015, Tiwari i Agrawal 2018, Grulke i Heath 2020]. W wielu krajach wprowadza się nawet monitoring poziomu ozonu troposferycznego i preparaty chroniące rośliny przed jego wpływem, np. tiomocznik etylenu [Khan i in. 2021]. Wynikają z tego duże obawy przed aplikacją tego niewątpliwie skutecznego, zwłaszcza w przechowywaniu, czynnika w ochronie roślin w trakcie wegetacji. Z drugiej strony należy dodać, że inne czynniki takie jak nawozy i adiuwanty niewłaściwie stosowane mogą być także fitotoksyczne dla roślin [Roszyk i in. 2006]. Dlatego też poszukiwania skutecznych i bezpiecznych dla roślin sposobów ochrony prowadzą do zainteresowania plazmą niskotemperaturową, która, wykorzystując podobne procesy i różne sposoby aplikacji, wydaje się być znacznie bardziej bezpieczna dla roślin [Sarinont i in. 2017]. Potwierdzają to przeprowadzone badania. Wprawdzie zanotowano niewielkie uszkodzenia włosków na pędach poddanych działaniu plazmy, ale były to zmiany niewielkie i nie zanotowano uszkodzeń tkanek i nekroz jak obserwowano w przypadku aplikacji ozonu. Poza niewątpliwym wpływem plazmy na kontaminację owoców czy warzyw notowano przypadki, gdy aplikacja plazmy pozytywnie oddziaływała na barwę przechowywanych jabłek a negatywnie na przechowywaną marchew



[Baier i in. 2015]. Poza niewątpliwym pozytywnym wpływem plazmy niskotemperaturowej na wiele parametrów należy zauważyć, że reaktory plazmowe mogą powodować zmiany w polu elektromagnetycznym, co może mieć wpływ na pracujące urządzenia [Mazurek 2020].

Poszukiwanie alternatywnych niechemicznych metod wpływających na procesy fizjologiczne oraz zwalczanie agrofagów jest w ostatnich latach związane z tendencjami do większego ograniczania stosowania chemicznych środków ochrony roślin i większej troski o bioróżnorodność. Poszukując alternatywnych metod ochrony, wszyscy mają nadzieję na pobudzenie naturalnych procesów w agroekosystemach w celu ograniczania organizmów szkodliwych i troski o bioróżnorodność [Mrówczyński i Remlein-Starosta 2013, Jamiołkowska i in. 2017]. Dlatego też aktualnie coraz bardziej ważnym elementem jest niechemiczna ochrona roślin. Poszukując alternatywnych metod ochrony, naukowcy i praktycy mają nadzieję na pobudzenie naturalnych procesów w agroekosystemach w celu ograniczania agrofagów i troski o bioróżnorodność [Jamiołkowska i in. 2017]. Dlatego też w obecnych czasach bardzo ważnym elementem jest niechemiczna ochrona roślin. Należy podkreślić, że poszukiwanie możliwości zwalczania patogenów przy użyciu metod niechemicznych jest zgodne z obowiązującymi zasadami integrowanej ochrony roślin. Integrowana ochrona roślin ma za zadanie ograniczenie stosowania środków ochrony roślin na rzecz metody biologicznej, agrotechnicznej, fizycznej oraz hodowlanej. Wszystkie kraje należące do Unii Europejskiej posiadają nakaz stosowania integrowanej ochrony roślin przez użytkowników profesjonalnych. W Polsce obowiązek ten wszedł w życie w styczniu 2014 r. [Gacek i in. 2016, Jamiołkowska i in. 2017]. Ochrona roślin z wykorzystaniem ozonu czy plazmy staje się coraz bardziej popularna zwłaszcza w sytuacji częstego wykrywania niedopuszczalnych pozostałości środków ochrony roślin w płodach rolnych [Miszczak 2016].

## 7. WNIOSKI

Wyniki badań uzyskane z doświadczeń objętych tematem pracy pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Wpływ plazmy niskotemperaturowej na ukorzenianie sadzonek wybranych gatunków roślin uzależniony jest od zastosowanego gazu roboczego, czasu aplikacji i gatunku rośliny.

2. Biorąc pod uwagę fakt, że największa liczba korzeni sadzonek zdrewniałych *Salix gracilistyla* oraz półzdrewniałych *Pleioblastus variegatus* tworzyła się po 300 s aplikacji plazmy z azotem jako gazem roboczym, taki schemat powinien być stosowany do stymulacji ukorzeniania sadzonek badanych gatunków roślin.

3. W związku z tym, że plazma z powietrzem jako gazem roboczym najlepiej stymulowała rozwój nowych korzeni sadzonek zdrewniałych *Salix hookeriana*, obydwóch gatunków zielnych oraz *Hedera helix* z półzdrewniałych, pomimo braku wpływu na wzrost świeżej masy zaleca się wprowadzić ją w celu aktywizacji procesu ukorzeniania wymienionych gatunków roślin.

4. Wykorzystanie plazmy z powietrzem jako gazem roboczym wydaje się bardziej obiecujące w terenie, z powodu łatwości wykonania zabiegu i znacznego obniżenia kosztów aplikacji w porównaniu z innymi gazami, ponieważ w tym przypadku generator plazmy pobiera powietrze z otoczenia i nie wymaga transportowania ciężkich butli z azotem.

5. W celu stymulowania procesów tworzenia nowych korzeni u różnych gatunków wierzby należy także rozważyć stosowanie wody plazmowanej przy czasie aplikacji powyżej 300 s oraz bliższej niż 4 cm odległości od głowicy reaktora.

6. W związku z tym, że najwyższe poziomy hormonu IAA odnotowano w roślinach po zastosowaniu plazmy z azotem, zwłaszcza w blaszce liściowej, taki rodzaj gazu roboczego lepiej niż powietrze aktywizuje procesy ukorzeniania.

7. Najlepszym sposobem ograniczania rozwoju *B. cinerea* oraz liczebności populacji mszyc zasiedlających chryzantemy jest aplikacja ozonu przez 10 min i przechowywanie roślin przez 30 min w szczelnym pomieszczeniu.

8. Należy jednak unikać dłuższego niż 10 min czasu aplikacji ozonu i przetrzymywania żywych roślin w zamkniętym pomieszczeniu, bowiem takie warunki sprzyjają silnemu oddziaływaniu fitotoksycznemu na rośliny zielne uwzględnione w doświadczeniu.

9. Biorąc pod uwagę fakt, że plazma niskotemperaturowa stosowana bezpośrednio na *A. alternata*, *B. cinerea* oraz *Trichothecium roseum* w warunkach *in vitro* hamowała rozwój ww. gatunków, może być postrzegana jako potencjalny element ochrony roślin przed tymi patogenami, w pewnych przypadkach alternatywny dla chemicznych środków ochrony roślin.

10. W związku z tym, że plazma, niezależnie od czasu aplikacji, działała ograniczająco na grzyby zasiedlające sztobry tylko przez krótki czas, tj. w momencie zastosowania, jednak słabiej niż podchloryn sodu i nie miała istotnego wpływu na zmniejszenie liczby grzybów patogenicznych na sadzonkach wierzb, można ją zalecać jako uzupełnienie procesu uwalniania materiału szkółkarskiego od czynników infekcyjnych.

11. W związku z niskim ryzykiem fitotoksyczności plazmy niskotemperaturowej dla włosków i głębszych tkanek pędów badanych sadzonek, można ją uwzględnić w ochronie roślin w okresie wegetacji.

## Streszczenie

W latach 2016–2020 przeprowadzono doświadczenia dotyczące działania ozonu i plazmy niskotemperaturowej na agrofagi oraz wpływu plazmy na ukorzenianie się sadzonek zdrewniałych, półzdrewniałych i zielnych. W pierwszym doświadczeniu aplikowano ozon na chryzantemy rosnące w fitotronie, które były wcześniej zainfekowane przez *Botrytis cinerea* i zasiedlone przez mszyce. Pomiarzy wysokości roślin, indeksów chorobowych oraz współczynnika śmiertelności wykazały znaczny wpływ ozonu na ograniczanie agrofagów jednak towarzyszyło temu silne fitotoksyczne oddziaływanie. Dlatego kolejne doświadczenia dotyczyły plazmy niskotemperaturowej, w których materiał badawczy stanowiły zdrewniałe pędy 2 gatunków wierzby: *Salix gracilistyla* i *Salix hookeriana*, półzdrewniałe pędy 2 gatunków ozdobnych: *Eonymus fortunei* i *Hedera helix*, a także zielne pędy 2 gatunków roślin ozdobnych: *Chrysanthemum grandiflorum* i *Pleioblastus variegatus*. Po aplikacji plazmy przy pomocy generatora plazmy niskotemperaturowej, wytworzonego na Politechnice Lubelskiej, przy zastosowaniu kombinacji z wykorzystaniem 2 gazów roboczych: powietrza i azotu, w 3 czasach aplikacji: 60 s, 120 s i 300 s. Określono następujące cechy morfologiczne: masę sadzonek przed aplikacją i po aplikacji plazmy, różnicę masy sadzonek, liczbę i łączną długość powstałych korzeni oraz liczbę i łączną długość powstałych pędów. Analiza badanych cech wykazała zróżnicowanie pomiędzy kombinacjami a największe oddziaływanie dotyczyło w większości aplikacji plazmy z powietrzem jako gazem roboczym, przy 300-sekundowym czasie aplikacji. Analizowano także wpływ wody plazmowanej na tworzenie korzeni i pędów 2 gatunków wierzby: *S. gracilistyla* i *S. hookeriana*. Zaobserwowano wpływ aplikacji plazmy na przyrost masy sadzonek i proces ukorzeniania. Kolejne doświadczenie było związane z wpływem plazmy na szkodliwe grzyby zasiedlające sadzonki wierzby. Na innych sadzonkach nie obserwowano objawów chorobowych. Zaobserwowano, że na badanych wierzbach najliczniej wystąpił *Alternaria alternata*, *B. cinerea* oraz *Epicoccum nigrum*.

W większości przypadków dłuższy czas aplikacji powodował ograniczenie rozwoju grzybów. W kolejnym doświadczeniu zaobserwowano, że działanie plazmy na wybrane gatunki grzybów: *A. alternata*, *B. cinerea* oraz *Trichothecium roseum* w warunkach *in vitro* okazało się hamujące i że indeksy hamowania były nieznacznie zróżnicowane, zarówno w badaniach prowadzonych na pożywce PDA, jak i MEA, i zwiększały się przy wyższych czasach aplikacji plazmy. Analizując zawartość hormonu IAA, zaobserwowano wpływ plazmy na zawartość IAA w sadzonkach chryzantem. Zawartość IAA była zróżnicowana w różnych częściach sadzonek. Najwyższy poziom IAA zanotowano w blaszce liściowej, mniej w korzeniu, a najmniej w łodydze. Najwyższe poziomy zanotowano, gdy gazem roboczym był azot. Oceniano też negatywny wpływ ozonu i plazmy na badane rośliny. Zaobserwowano silne fitotoksyczne oddziaływanie ozonu. Liście badanych chryzantem były uszkodzone, zwłaszcza w kombinacjach przy długim czasie aplikacji i przetrzymywaniu roślin po ozonowaniu. W przypadku plazmy niskotemperaturowej zanotowano tylko niewielkie uszkodzenia włosków, co może sugerować większą przydatność plazmy do stosowania podczas wegetacji roślin.

## Summary

Influence of ozone and low-temperature plasma on biometric features and health of selected vegetatively propagated plant species

In the years 2016–2020, experiments were carried out on the effect of ozone and low-temperature plasma on pests and on the effect of plasma on the rooting of woody, semiwoody and herbaceous cuttings. In the first experiment, ozone was applied to chrysanthemums growing in a phytotron that had previously been infected with *Botrytis cinerea* and colonized by aphids. Measurements of plant height, infestation indices and mortality rates showed a significant effect of ozone on the reduction of pests, however, it was accompanied by a strong phytotoxic effect. Therefore, subsequent experiments concerned low-temperature plasma. In the next experiment, the research material consisted of woody shoots of 2 species of willow: *Salix gracilistyla* and *Salix hookeriana*, semiwoody shoots of 2 ornamental species: *Eonymus fortunei* and *Hedera helix*, as well as herbaceous shoots of 2 species of ornamental plants: *Chrysanthemum grandiflorum* and *Pleioblastus variegatus*. After the application of the plasma with a low-temperature plasma generator produced at the Lublin University of Technology using a combination of 2 working gases: air and nitrogen at 3 times: 60 sec., 120 sec. and 300 sec. The following morphological features were determined: the weight of seedlings before and after plasma application, the difference the weight of the cuttings, the number and total length of the resulting roots, and the number and total length of the resulting shoots. The analysis of the tested features showed a difference between the combinations and the greatest impact was in most applications of plasma with air as the working gas at a 300-second application time. The influence of plasma water on the formation of roots and shoots of two species of willow: *S. gracilistyla* and *S. hookeriana* was also analyzed. The effect of plasma application on the weight gain of seedlings and the rooting process was observed. Another experience was related to the effect of plasma on harmful fungi inhabiting willow

seedlings. No disease symptoms were observed on other seedlings. It was observed that the most numerous occurrences on the examined willows were *Alternaria alternata*, *B. cinerea* and *Epicoccum nigrum*. In most cases, the longer application time reduced the fungus. In another experiment, it was observed that the plasma effect on selected fungal species: *A. alternata*, *B. cinerea* and *Trichothecium roseum* *in vitro* turned out to be inhibitory and that the inhibition indices were slightly different in both the PDA and MEA test methods, and increased at higher plasma application times. By analyzing the content of the IAA hormone, the effect of plasma on the content of IAA in chrysanthemum seedlings was observed. The highest level of IAA was recorded in the leaf blade, less in the root and the lowest in the stem. The IAA content varied in different parts of the seedlings. The highest levels were recorded when the working gas was nitrogen. The negative influence of ozone and plasma on the tested plants was also assessed. A strong phytotoxic effect of ozone has been observed. The leaves of the chrysanthemums tested were damaged especially in combinations with a long time of application and keeping the plants after ozonation. In the case of low-temperature plasma, only slight damage to the hairs was noted, which may suggest greater suitability of the plasma for use during plant vegetation.



- Abbott W.S., 1925. A Method of computing the effectiveness of an insecticide. *J. Am. Mosq. Control Assoc.* 3(2), 302-303.
- Abdel-Wahhab M.A., Sehab A.F., Hassanien F.R., El-Nemr S.E., Amra H.A., Abdel-Alim H.A., 2011. Efficacy of ozone to reduce fungal spoilage and aflatoxin contamination in peanuts. *IJNRS* 2(4), 1-14.
- Abiru T., Mitsugi F., Ikegami T., Ebihara K., Aoqui S., Nagahama K., 2015. Environmental application of electrical discharge for ozone treatment of soil. *Inform. Autom. Pomiary Gospod. Ochr.* Śr. 4, 42-44. <https://doi.org/10.5604/20830157.1176573>
- Adamska I., 2005. Grzyby pasożytnicze roślin z rodzaju *Betula* sp. i *Salix* sp. Wyd. AR Szczecin, 419-429.
- Adhikari B., Pangomm K., Veerana M., Mitra S., Park G., 2020. Plant disease control by non-thermal atmospheric-pressure plasma. *Front. Plant Sci.* 11, 77. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00077>
- Agathokleous E., Feng Z., Oksanen E., Sicard P., Wang Q., Saitanis C.J., Araminiene V., Blande J.D., Hayes F., Calatayud V., Domingos M., Veresoglou S.D., Peñuelas J., Wardle D.A., De Marco A., Li Z., Harmens H., Yuan X., Vitale M., Paoletti E., 2020. Ozone affects plant, insect, and soil microbial communities: A threat to terrestrial ecosystems and biodiversity. *Sci. Adv.* 6, eabc1176. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc1176>
- Agulló-Antón M.Á., Fernández-Ayela A., Fernández-García N., Nicolás C., Albacete A., Pérez-Alfocea F., Sánchez-Bravo J., Pérez-Pérez J.M., Acosta M. 2014. Early steps of adventitious root-ing: morphology, hormonal profiling and carbohydrate turnover in carnation stem cuttings. *Physiol. Plant.* 150, 446-462.
- Ahmed N., Masood A., Siow K.S., Wee M.F.M.R., Auliya R.Z., Ho W.K., 2021. Effect of H<sub>2</sub>O-based low-pressure plasma (LPP) treatment on the germination of bambara groundnut seeds. *Agro-nomy* 11, 338. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020338>
- Ali H.B., 2017. Seasonal population abundance of the chrysanthemum aphids (Homoptera, Aphididae) in the middle of Iraq with pictorial key to species. *Bull. Iraq nat. Hist. Mus.* 14(4), 315-328. <https://doi.org/10.26842/binhm.7.2017.14.4.0315>
- Almeida F.D.L., Cavalcante R.S., Cullen P.J., Frias J.M., Bourke P., Fernandes F.A.N., Rodrigues S., 2015. Effects of atmospheric cold plasma and ozone on prebiotic orange juice. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 32, 127-135. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2015.09.001>
- Altamura M., 1996. Root histogenesis in herbaceous and woody explants cultured in vitro. A critical review. *Agronomie* 16, 589-602.
- Ambrico P.F., Śimek M., Rotolo C., Morano M., Minafra A., Ambrico M., Pollastro S., Gerin D., Faretra F., De Miccolis Angelini R.M., 2020. Surface dielectric barrier discharge plasma: a suitable

- measure against fungal plant pathogens. Sci. Report. 10, 3673. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60461-01>
- Apell K., Hirt H., 2004. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. Annu. Rev. Plant Biol. 55, 373–399.
- Arcury T.A., Quandt S.A., 2003. Pesticides at work and at home: exposure of migrant farmworkers. Lancet 362(9400), 2021. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(03\)15027-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(03)15027-1)
- Arya A., 2010. Recent advances in the management of fungal pathogens of fruit crops. W: A. Arya, A.E. Perello (red.), Management of fungal plant pathogens. CAB International, 3–13.
- Asogwa E.U., Dongo L.N., 2009. Problems associated with pesticide usage and application in Nigerian cocoa production: A review. Afr. J. Agric. Res. 4(8), 675–683. [http://www.academicjournals.org/AJAR, ISSN 1991-637X \[dostęp: 10.04.2021\].](http://www.academicjournals.org/AJAR, ISSN 1991-637X [dostęp: 10.04.2021].)
- Attri P., Ishikawa K., Okumura T., Koga K., Shiratani M., 2020. Plasma agriculture from laboratory to farm: A review. Processes 8, 1002. <https://doi.org/10.3390/pr8081002>
- Awan A.A., Ullah E., Abbas S.J., Khan O., Masroor S., 2012. Growth response of various olive cultivars to different cutting lengths. Pak. J. Agric. Sci. 49, 315–318.
- Baciak M., Warminiński K., Beś A., 2015. Oddziaływanie wybranych gazowych zanieczyszczeń powietrza na rośliny drzewiaste. Leśne Pr. Badaw. 76(4), 401–409. <https://doi.org/10.1515/frp-2015-0039>
- Baier M., Ehlbeck J., Knorr D., Herppich W.B., Schlüter O., 2015. Impact of plasma processed air (PPA) on quality parameters of fresh produce. Postharvest Biol. Technol. 100, 120–126. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.09.015>
- Baier M., Foerster J., Schnabel U., Knorr D., Ehlbeck J., Herppich W.B., Schlüter O., 2013. Direct non-thermal plasma treatment for the sanitation of fresh corn salad leaves: Evaluation of physical and physiological effects and antimicrobial efficacy. Postharvest Biol. Technol. 84, 81–87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.03.022>
- Baier M., Gorgen M., Ehlbeck J., Knorr D., Herppich W.B., Schlüter O., 2014. Non-thermal atmospheric pressure plasma: Screening for gentle process conditions and antibacterial efficiency on perishable fresh produce. Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 22, 147.
- Bakula T., 2013. Ozon i mechanizmy jego działania. Wyd. UWM Olsztyn, 9–24.
- Balawejder M., Antos P., Sadło S., 2013. Potential of ozone utilization for reduction of pesticide residue in food of plant origin. A review. Rocz. Państw. Zakł. Hig. 64(1), 13–18.
- Baldanov B.B., Ranzhurov T.V., Sordonova M.N., Budazhapov L.V., 2020. Changes in the properties and surface structure of grain seeds under the influence of a glow discharge at atmospheric pressure. Plasma Phys. Rep. 46, 110–114. <https://doi.org/10.1134/S1063780X2001002X>
- Barkai-Golan R., 2001. Postharvest diseases of fruits and vegetables – development and control. Elsevier Science B.V., Netherlands, ss. 418.
- Barnett H.L., Hunter B.B., 1972. Illustrated genera of imperfect fungi. Burgess Publishing Co., Minneapolis.
- Belkind A., Gershan S., 2008. Plasma cleaning of surfaces. From Vacuum Technology & Coating.
- Beltran F., 1996. Theoretical aspects of the kinetics of competitive first reactions of ozone in  $O_3/H_2O_2$  and  $O_3/UV$  oxidation process. Ozone Sci. Eng. 22, 109–127.
- Białoszewski D., Bocian E., Tyski S., 2012. Ozonoterapia oraz zastosowanie ozonu w dezynfekcji. UM Warszawa, 177–183.
- Bielach A., Hrtyan M., Tognetti V.B., 2017. Plants under stress: Involvement of auxin and cytokin-in. Int. J. Mol. Sci., 18, 1427. <https://doi.org/10.3390/ijms18071427>
- Bieniek J., Żołnierz-Rusinek A., 2008. Wierzba *Salix viminalis* jak źródło energii odnawialnej na przykładzie Kotliny Kłodzkiej. Wyd. UP Wrocław, 111–117.
- Billah M., Karmakar S., Mina F.B., Haque M.N., Rashid M.M., Hasan M.F., Acharjee U.K., Talukder M.R., 2021. Investigation of mechanisms involved in seed germination enhancement, enzymatic activity and seedling growth of rice (*Oryza sativa* L.) using LPDBD (Ar+Air) plasma. Arch. Biochem. Biophys. 698, 108726. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2020.108726>

- Biń A., 1995. Zastosowanie ozonu w oczyszczaniu wody i uzdatnianiu ścieków. *Pol. Instal.* 6, 28–31.
- Bodenhausen N., Somerville V., Desir A., Walser J.C., Borghi L., van der Heijden M.G.A., Schlaeppli K., 2019. Petunia and arabidopsis – specific root microbiota responses to phosphate supplementation. *Phytobiomes J.* 3, 112–124. <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-12-18-0057-R>
- Bogaerts A., Neyts E.C., 2018. Plasma technology: An emerging technology for energy storage. *ACS Energy Lett.* 3, 1013–1027. <https://doi.org/10.1021/acsenenergylett.8b00184>
- Bonde M.R., Murphy C.A., Bauchan G.R., Luster D.G., Palmer C.L., Nester S.E., Revell J.M., Berner D.K., 2015. Evidence for systemic infection by *Puccinia horiana*, causal agent of chrysanthemum white rust, in chrysanthemum. *Phytopathology* 105(1), 91–98. <http://dx.doi.org/10.1094/PHYTO-09-13-0266-R>
- Booth C., 1971. The genus *Fusarium*. Wyd. CMI, Kew, Surrey.
- Bordens K.S., Abbott B.B., 2008. Research design and methods. A process approach, wyd. 7. McGraw-Hill, New York, ss. 432.
- Bormashenko E., Shapira Y., Gryniov R., Whyman G., Bormashenko Y., Drori E., 2015. Interaction of cold radiofrequency plasma with seeds of beans (*Phaseolus vulgaris*). *J. Exp. Bot.* 66(13), 4013–4021. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv206>
- Bozkurt D., Kwiatkowski M., Terebun P., Diatczyk J., Pawłat J., 2017. Potential DBD-jet applications for preservation of nutritive compounds on the example of vitamin C in water solutions. W: M. Pawłowska, L. Pawłowski (red.), *Environmental engineering*. Taylor & Francis Group, London.
- Brelles M.G., 2012. Biological and environmental application of gas discharge plasmas. California State Polytechnic University, CA, USA.
- Brilli F., Loreto F., Baccelli I., 2019. Exploiting plant volatile organic compounds (VOCs) in agriculture to improve sustainable defense strategies and productivity of crops. *Front. Plant Sci.* 10, 264. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00264>
- Brisset J.-L., Pawłat J., 2016. Chemical effects of air plasma species on aqueous solutes in direct and delayed exposure modes: discharge, post-discharge and plasma activated water. *Plasma Chem. Plasma Process.* 36, 355–381. <https://doi.org/10.1007/s11090-015-9653-6>
- Brown V.C., McNeill S., Ashmore M.R. 1992. The effects of ozone fumigation on the performance of the black bean aphid, *Aphis fabae* Scop., feeding on broad beans, *Vicia faba* L. *Agric. Ecosyst. Environ.* 38(1–2), 71–78. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(92\)90168-B](https://doi.org/10.1016/0167-8809(92)90168-B)
- Brust H., Nishime T.M.C., Wannicke N., Mui T.S.M., Horn S., Quade A., Weltmann K.-D., 2021. A medium-scale volume dielectric barrier discharge system for short-term treatment of cereal seeds indicates improved germination performance with long-term effects. *J. Appl. Phys.* 129, 044904. <https://doi.org/10.1063/5.0033369>
- Burkey K., Tisdale R., Zobel R., Ray S., Pursley W., 2020. Interactive effects of elevated ozone and temperature on growth and yield of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under field conditions. *Agronomy* 10, 1803. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111803>
- Bustos L.M.B., Ueno A.C., Di Leo T.D., Crocco C.D., Martínez-Ghersa M.A., Molina-Montenegro M.A., Gundel P.E., 2020. Maternal exposure to Ozone modulates the endophyte-conferred resistance to Aphids in *Lolium multiflorum* Plants. *Insects* 11, 548. <https://doi.org/10.3390/insects11090548>
- Butscher D., Zimmermann D., Schuppler M., von Rohr R.P., 2016. Plasma inactivation of bacterial endospores on wheat grains and polymeric model substrates in a dielectric barrier discharge. *Food Control* 60, 636–645.
- Cape J.N., 2008. Surface ozone concentrations and ecosystem health: past trends and a guide to future protections. *Sci. Total Environ.* 400, 257–269. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.025>
- Capuana M., 2020. A review of the performance of woody and herbaceous ornamental plants for phytoremediation in urban areas. *iForest* 13, 139–151. <https://doi.org/10.3832/ifer3242-013>

- Carlisle L., de Wit M.M., DeLonge M.S., Iles A., Calo A., Getz C., Ory J., Munden-Dixon K., Galt R., Melone B., Knox R., Press D., 2019. Transitioning to sustainable agriculture requires growing and sustaining an ecologically skilled workforce. *Front. Sustain. Food Syst.* 3, 96. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00096>
- Cataldo F., 2006. Ozone degradation of biological macromolecules: Proteins, hemoglobin, RNA, and DNA. *Ozone Science & Engineering* 28, 317–328. <https://doi.org/10.1080/01919510600900290>
- Chanioti S., Katsenios N., Efthimiadou A., Stergiou P., Xanthou Z.M., Giannoglou M., Dimitrakellis P., Gogolides E., Katsaros G., 2021. Pre-sowing treatment of maize seeds by cold atmospheric plasma and pulsed electromagnetic fields: Effect on plant and kernels characteristics. *Australian J. Crop Sci.* 15(02), 251–259. <https://doi.org/10.21475/ajcs.21.15.02.p2932>
- Chen Y.Q., Cheng J.H., Sun D.W., 2020. Chemical, physical and physiological quality attributes of fruit and vegetables induced by cold plasma treatment: Mechanisms and application advances. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 60(16), 2676–2690. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1654429>
- Chen Z., Gallie D.R., 2005. Increasing tolerance to ozone by elevating foliar ascorbic acid confers greater protection against ozone than increasing avoidance. *Plant Physiol.* 138, 1673–1689. <https://doi.org/10.1104/pp.105.062000>
- Chu E.H., Shin E.J., Park H.J., Jeong R.D., 2015. Effect of gamma irradiation on *Botrytis cinerea* causing gray mold and cut chrysanthemum flowers. *Res. Plant Dis.* 21(3), 193–200. <http://dx.doi.org/10.5423/RPD.2015.21.3.193>
- Costa H.S., Robb K.L., Wilen C.A., 2002. Field trials measuring the effects of ultraviolet-absorbing greenhouse plastic films on insect populations. *J. Econ. Entomol.* 95(1), 113–120.
- Ćwintal M., Sowa P., Goliasz S., 2010. Wpływ mikroelementów (B, Mo) i stymulacji laserowej na wartość siewną nasion koniczniny czerwonej. *Acta Agrophys.* 15(1), 65–76.
- Černak M., 2016. Effect of cold atmospheric pressure plasma on the wheat seedlings vigor and on the inactivation of microorganisms on the seeds surface. *Plasma Chem. Plasma Process.* 36, 397.
- Dad S., Abro M.A., Baloch A., Jan G., Abdulle Y.A., Baloch R.A., Anwar M., 2018. In vitro evaluation of selected fungicides and botanical extracts against *Botryodiplodia theobromae*, responsible for guava decline. *Pak. J. Biotechnol.* 15 (4), 893–897.
- D'Addazio V., Silva J.V.G., Jardim A.S., Longue L.L., Santos R.A.A., Fernandes A.A., Silva M.B., Silva D.M., Santos T.A., Schmildt E.R., Pfenning L.H., Falqueto A.R., 2020. Silicon improves the photosynthetic performance of black pepper plants inoculated with *Fusarium solani* f. sp. *piperis*. *Photosynthetica* 58(3), 692–701. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.182>
- Daeschlein G., Scholz S., VonWoedke T., Niggemeier M., Kindel E., Brandenburg R., Weltman K.D., Jürgen M., 2011. In vitro killing of clinical fungal strains by low-temperature atmospheric-pressure plasma jet. *IEEE Transactions Plasma Sci.* 39(2), 815–821. <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2063441>
- Dancewicz K., Sznajder K., Załuski D., Kordan B., Gabryś B., 2016. Behavioral sensitivity of *Myzus persicae* to volatile isoprenoids in plant tissues. *Entomol. Exp. Appl.* 160, 229–240. <https://doi.org/10.1111/eea.12480>
- Danelski W., Badowska-Czubik T., Rozpara E., 2016. Possibility of limiting the number of Aphids (Homoptera: Aphidoidea) with plant extract, decoction and infusions in organic cultivation of apple. *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 61(3), 77–81.
- Darmanin M., Kozak D., Mallia J.O., Blundell R., Gatt R., 2020. Generation of plasma functionalized water: Antimicrobial assessment and impact on seed germination. *Food Control.* <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107168>
- Dasan B.G., Mutlu M., Boyaci I.H., 2015. Decontamination of *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus* spores on hazelnut via atmospheric pressure fluidized bed plasma reactor. *Int. J. Food Microbiol.* 216, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.09.006>
- Dasan B.G., Boyaci I.H., 2017. Effect of cold atmospheric plasma on inactivation of *Escherichia coli* and physicochemical properties of apple, orange, tomato juices, and sour cherry nectar. *Food Bioproc. Tech.* 11(2). <https://doi.org/10.1007/s11947-017-2014-0>

- Da Silva D.L.S., De Lima Farias M., De Oliveira Vitoriano J., Alves Junior C., Torres S.B., 2018. Use of atmospheric plasma in germination of *Hybanthus calceolaria* (L.) Schulze-Menz Seeds. *Rev. Caatinga*, Mossoró, 31(3), 632–639. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252018v31n311rc>
- Dawood N., 2020. Effect of RF plasma on Moringa seeds germination and growth. *J. Taibah Univ. Sci.* 14(1), 279–284. <https://doi.org/10.1080/16583655.2020.1713570>
- Dáder B., Fereres A., Moreno A., Trębicki P., 2016. Elevated CO<sub>2</sub> impacts bell pepper growth with consequences to *Myzus persicae* life history, feeding behaviour and virus transmission ability. *Sci. Report.* 6, 19120. <https://doi.org/10.1038/srep19120>
- De Groot G.J.J.B., Hundt A., Murphy A.B., Bange M.P., Mai-Prochnow A., 2018. Cold plasma treatment for cotton seed germination improvement. *Sci. Report.* 8, 14372. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32692-9>
- Deising H.B., Reimann S., Pascholati S.F., 2008. Mechanisms and significance of fungicide resistance. *Braz. J. Microbiol.* 39(2), 286–295.
- De Meyer G., Bigirimana J., Elad Y., Höfte M. 1998. Induced systemic resistance in *Trichoderma harzianum* T39 biocontrol of *Botrytis cinerea*. *Eur. J. Plant Pathol.* 104, 279–286.
- De Oliveira A.F., Pasqual M., Chalfun N.N.J., de A. Regina, M., Rincón C.D.R., 2003. Influência do número de nós em estacas semilenhosas de oliveira (*Olea europaea* L.) no enraizamento sob câmara de nebulização. *Ciênc. Agrotec.* 27, 332–338.
- De Simone N., Pace B., Grieco F., Chimienti M., Tyibilika V., Santoro V., Capozzi V., Colelli G., Spano G., Russo P., 2020. *Botrytis cinerea* and table grapes: A review of the main physical, chemical, and bio-based control treatments in post-harvest. *Foods* 9, 1138. <https://doi.org/10.3390/foods9091138>
- De Souza A., García D., Sueiro L., Gilart F., 2014. Improvement of the seed germination, growth and yield of onion plants by extremely low frequency non-uniform magnetic fields. *Sci. Hortic.* 176, 63–69.
- Dhayal M., Lee S.Y., Park S.U., 2006. Using low-pressure plasma for *Carthamus tinctorium* L. seed surface modification. *Vacuum* 80(5), 499–506. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2005.06.008>
- Diaz-Vivancos., Simone A., Kiddle G., Foyer C.H., 2015. Glutathione – linking cell proliferation to oxidative stress. *Free Radic. Biol. Med.* 89, 1154–1164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2015.09.023>
- Dłużniewska J., 2012. Occurrence of fungal diseases on willow (*Salix* sp.) plantations of different age. *Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin* 52(4), 988–990.
- Dobrynin D., Fridman G., Fridman A., 2009. Physical and biological mechanisms of direct plasma interaction with living tissue. *New J. Phys.* 11, 115020. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/11/115020>
- Dominguez-Serrano D., Yáñez-Morales M.J., García-Velasco R., Alanís-Martínez I., Segura-León O., 2016. First report of *Chrysanthemum morifolium* leaf spot caused by *Alternaria* species in Mexico. *Plant Dis.* 100(3), 647. <http://dx.doi.org/10.1094/PDIS-06-15-0723-PDN>
- Domsch K.H., Gams W., 1980. *Compendium of soil fungi*. Academic Press, London.
- Donatelli M., Magarey R.D., Bregaglio S., Willocquet L., Whish J.P.M., Savary S., 2017. Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. *Agric. Syst.* 155, 213–224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.019>
- Druege U., Franken P., Hajirezaei M.R., 2016. Plant hormone homeostasis, signaling, and function during adventitious root formation in cuttings. *Front. Plant Sci.* 7, 381–394. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00381>
- Du C., Yan J., 2017. Surface sterilization by atmospheric pressure non-thermal plasma. W: C. Du, J. Yan (red.), *Plasma remediation technology for environmental protection*. Springer, Singapore, 61–73.
- Dufour T., Gutierrez Q., Bailly C., 2021. Sustainable improvement of seeds vigor using dry atmospheric plasma priming: Evidence through coating wettability, water uptake, and plasma reactive chemistry. *J. Appl. Phys.* 129, 084902. <https://doi.org/10.1063/5.0037247>

- DuToit L.J., Derie M.L., Pelter G.Q., 2004. Prevalence of *Botrytis* spp. in onion seed crops in the Columbia Basin of Washington. *Plant Dis.* 88, 1061–1068.
- Dzimitrowicz A., Jamróz P., Nowak P., 2014. Sterylizacja za pomocą niskotemperaturowej plazmy, generowanej w warunkach ciśnienia atmosferycznego. *PW, Wrocław*, 195–200.
- Ebihara K., Stryczewska H.D., Mitsugi F., Ikegami T., Sakai T., Pawlat J., Teii S., 2012. Recent development of ozone treatment for agricultural soil sterilization and biomedical prevention. *Prz. Elektrotech.* 88(6).
- Ebihara K., Mitsugi F., Ikegami T., Nakamura N., Hashimoto Y., Yamashita Y., Baba S., Stryczewska H., Pawlat J., Teii S., Sung T., 2013. Ozone mist spray sterilization for pest control in agricultural management. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 61(02), 24318.
- European Commission, 2018. Commission regulation (EU 2018/1500) concerning the non-renewal of approval of the active substance thiram, and prohibiting the use and sale of seeds treated with plant protection products containing thiram, in accordance with Regulation (EC) No 1107/2009 of the European Parliament and of the Council concerning the placing of plant protection products on the market, and amending Commission Implementing Regulation (EU) No 540/2011, *Official Journal of the European Union* City, 3.
- Emberson L.D., Pleijelb H., Ainsworth E.A., van den Berg M., Ren W., Osborn S., Mills G., Pandeya D., Dentenard F., Bükera P., Ewertg F., Koebled R., Van Dingenend R., 2018. Ozone effects on crops and consideration in crop models. *Eur. J. Agron.* 100, 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.06.002>
- EPA, 1999. Alternative disinfectants and oxidants guidance manual, publication, 815 R 99014. United States Environmental Protection Agency.
- EPPO, 1989. General introduction to the EPPO Guidelines for Efficacy Evaluation of Plant Protection Products. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin* 19, 183–195.
- EPPO, 1997. EPPO Standards PP 1/23(2). Ocena skuteczności insektycydów. *Mszyce roślin ozdobnych. EPPO Bulletin*, 41–42.
- EPPO, 2002. EPPO Standards PP 1/165 (3). *Botryotinia fuckeliana* on ornamentals. *EPPO Bulletin* 32, 311–366.
- EPPO, 2014. EPPO Standards PP 1/135(4). Efficacy evaluation of plant protection products. Phytotoxicity assessment. *EPPO Bulletin* 37, 265–273.
- EPPO, 2019. Normes OEPP EPPO Standards. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin* 49 (3), 418–420.
- Esterio M., Auger J., Ramos C., Garcia H., 2007. First report of fenhexamid resistant isolates of *Botrytis cinerea* on grapevine in Chile. *Disease Notes. APS.* <https://doi.org/10.1094/PDIS-91-6-0768C>
- Fallik E., Grinberg S., Alkaline S., Lurie S., 1996. The effectiveness of post-harvest hot water dipping on the control of gray and black moulds in sweet red pepper (*Capsicum annuum*). *Plant Pathol.* 45, 644–699.
- Faoro F., Iriti M., 2007. Callose synthesis as a tool to screen chitosan efficacy in inducing plant resistance to pathogens. *Caryologia* 60(1–2), 121–124.
- Farias M.F., Saad J.C.C., 2005. Crescimento e guardião de crisântemo cultivado em vaso sob ambiente protegido. *Hortic. Bras.* 23(3), 740–745 [po portugalsku].
- Farooq M., Hussain M., Wahid A., Siddique K.H.M., 2012. Drought stress in plants: An overview. W: R. Aroca (red.), *Plant responses to drought stress.* <https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-01>
- Fedele G., Bove F., Gonzalez-Domingue E., Rosi V., 2020. A generic model accounting for the interactions among pathogens, host plants, biocontrol agents, and environment, with parameterization for *Botrytis cinerea* on grapevines. *Agronomy* 10(222), 1–21. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020222>
- Feizollahi E., Iqdam B., Vasanthan T., Thilakarathna M.S., Roopesh M.S., 2020. Effects of atmospheric-pressure cold plasma treatment on deoxynivalenol degradation, quality parameters, and germination of barley grains. *Appl. Sci.* 10, 3530. <https://doi.org/10.3390/app10103530>



- Feliziani E., Romanazzi G., 2011. Evaluation of alternatives to fungicide to control postharvest gray mold alone or with ozone storage in grapes. *Plant Dis. Manag. Rep.* 6, SMF032.
- Filatova I., Azharonok V., Shik A., Antoniuk A., Terletska N. 2012. Fungicidal effects of plasma and radiowave pretreatment on seeds of grain crops and legumes. W: Z. Machala, K. Hensel, Y. Akishev (red.), *Plasma for biodecontamination, medicine and food security*. NATO Science for Peace and Security Series A, Chem. Biol. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-2852-3\\_36](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2852-3_36)
- Fiscus E.L., Booker F.L., Burkey K.O., 2005. Crop responses to ozone: uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning. *Plant Cell Environ.* 28, 997–1011.
- Fuhrer J., 2003. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO<sub>2</sub>, ozone, and global climate change. *Agric. Ecosyst. Envir.* 97, 1–20. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00125-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00125-7)
- Fuhrer J., 2009. Ozone risk for crops and pastures in present and future climates. *Naturwissenschaften* 96, 173–194. <https://doi.org/10.1007/s00114-008-0468-7>
- Gacek E., Głazek M., Matyjaszczyk E., Pruszyński G., Pruszyński S., Stobiecki S., 2016. *Metody ochrony w integrowanej ochronie roślin*. Wyd. CDR Brwinów, Oddz. Poznań.
- Gamliel A., 2010. Application aspects of integrated Pest Managemet. *J. Plant Pathol.* 92(4, Supl.), 23–26.
- Gantner M., Guzek D., Najda A., Brodowska M., Górka-Horczyzak E., Wojtasik-Kalinowska I., Godziszewska J., 2016. Oxidative and microbial stability of poultry meatballs added with coriander extracts and packed in cold modified atmosphere. *Int. J. Food Prop.* <http://dx.doi.org/10.1080/10942912.2016.1243125>
- George A., Shen B., Craven M., Wang Y., Kang D., Wu C., Tu X., 2021. A review of non-thermal plasma technology: A novel solution for CO<sub>2</sub> conversion and utilization. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 135, 109702. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109702>
- Gierczik K., Vukušić T., Kovács L., Székely A., Szalai G., Milošević S., Kocsy G., Kutasi K., Galiba G., 2020. Plasma-activated water to improve the stress tolerance of barley. *Plasma Process Polym.* 17, e1900123. <https://doi.org/10.1002/ppap.201900123>
- Gilman J.G., 1957. *A manual of soil fungi*. The Iowa State Coll. Press. Iowa.
- Gleń-Karolczyk K., Boligłowa E., 2015. Porównanie fungicydalnych właściwości olejku geraniowego i olejku z drzewa herbacianego. *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 60(3), 57–62.
- Gładyszewska B., 2004. Matematyczne metody oceny wpływu procesów przedśiewnej stymulacji na kiełkowanie nasion. *Acta Agrophys.* 3(3), 443–452.
- Głowacka B., Sowińska A., Janiszewski W., Rosa-Gruszecka A., Pudełko M., Łukaszewicz J., Krajewski S., 2017. Środki ochrony roślin, środki biobójcze oraz produkty do rozkładu pni drzew leśnych zalecane do stosowania w leśnictwie w roku 2017. IBL, Sękocin Stary.
- Go S.M., Kim H.S., Park M.R., Jeong R.D., 2018. Effect of non-thermal atmospheric plasma treatment on *Alternaria alternata* and *Botrytis cinerea*. *J. Agric. Life Environ. Sci.* 30(3), 161–169. <https://doi.org/10.22698/jales.20180018>
- Golinowska M., 2009. Nakłady na chemiczną ochronę roślin w gospodarstwach wielkoobszarowych na początku XXI wieku. *J. Agribus. Rural Dev.* 2(12), 53–60.
- Gong D., Bi Y., Li S., Li Y., Wang Y., 2019. Trichothecium roseum infection promotes ripening of harvested muskmelon fruits and induces the release of specific volatile compound. *J. Plant Pathol.* <https://doi.org/10.1007/s42161-018-00231-0>
- Gordillo-Vázquez F.J., 2008. Air plasma kinetics under the influence of sprites. *J. Phys. D.: Appl. Phys.* 41, 234016.
- Gosset V., Harmel N., Göbel C., Francis F., Haubruge E., Wathelet J.P., du Jardin P., Feussner I., Fauconnier M.L., 2009. Attacks by a piercing-sucking insect (*Myzus persicae* Sultzer) or a chewing insect (*Leptinotarsa decemlineata* Say) on potato plants (*Solanum tuberosum* L.) induce differential changes in volatile compound release and oxylipin synthesis. *J. Exp. Bot.* 60(4), 1231–1240. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp015>
- Graves D.B., 2014. Reactive species from cold atmospheric plasma: implications for cancer therapy. *Plasma Process. Polym.* 11, 1120–1127. <https://doi.org/10.1002/ppap.201400068>



- Grotowska M., Janda K., Jakubczyk K., 2018. Wpływ pestycydów na zdrowie człowieka. *Pomernian J. Life Sci.* 64(2), 42–50.
- Grulke N.E., Heath R.L., 2020. Ozone effects on plants in natural ecosystems. *Plant Biol.* 22(1), 12–37. <https://doi.org/10.1111/plb.12971>
- Guo H., Sun Y., Yan H., Li C., Ge F., 2018. O<sup>3</sup>-induced leaf senescence in tomato plants is ethylene signaling-dependent and enhances the population abundance of *Bemisia tabaci*. *Front. Plant Sci.* 9, 764. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00764>
- Guo H., Sun Y., Yan H., Li C., Ge F., 2020. O<sup>3</sup>-induced priming defense associated with the abscisic acid signaling pathway enhances plant resistance to *Bemisia tabaci*. *Front. Plant Sci.* 11, 93. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00093>
- Gupta T.T., Ayan H., 2019. Application of non-thermal plasma on biofilm: A Review. *Appl. Sci.* 9, 3548. <https://doi.org/10.3390/app9173548>
- Gutierrez L., Mongelard G., Floková K., Pacurar D.I., Novák O., Staswick P., Kowalczyk M., Pacurar M., Demailly H., Geiss G., Bellini C., 2012. Auxin controls *Arabidopsis* adventitious root initiation by regulating jasmonic acid homeostasis. *Plant Cell.* 24, 2515–2527.
- Haertel B., Backer C., Schulze C., Funke A., Wurster M., von Woedtke T., Lindequist U., 2014. Plasma-based stimulation of biotechnological processes in *Ganoderma lucidum* mycelia as example for a eukaryotic organism. *Plasma Med.* 4(1–4), 17–28.
- Hamberg L., Lemola J., Hantula J., 2017. The potential of the Decay fungus *Chondrostereum purpureum* in the biocontrol of broadleaved tree species. *Fungal Ecol.* 30, 67–75.
- Hammer P.E., Yang S.F., Reid M.S., Marois J.J. 1990. Postharvest control of *Botrytis cinerea* infections on cut roses using fungistatic storage atmospheres. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 115, 102–107.
- Haq I.U., Ahmad T., Hafiz I.A., Abbasi N.A., 2009. Influence of micro cutting sizes and IBA Concentrations on *in vitro* rooting of olive cv: Dolce agogia. *Pak. J. Bot.* 4, 1213–1222.
- Hartmann H., Kester D., Davies F., 1990. Plant propagation. Principles and practices, 5 wyd. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Hashizume H., Kitano H., Mizuno H., Abe A., Yuasa G., Tohno S., Tanaka H., Ishikawa K., Matsumoto S., Sakakibara H., Nikawa S., Maeshima M., Mizuno M., Hori M., 2021. Improvement of yield and grain quality by periodic cold plasma treatment with rice plants in a paddy field. *Plasma Process Polym.* 18(1). <https://doi.org/10.1002/ppap.202000181>
- Hawrylak-Nowak B., Dresler S., Matraszek-Gawron R., Oszczyda Z., Pogorzalet M., 2018. The water treated with low-frequency low-pressure glow plasma enhances the phytoavailability of selenium and promotes the growth of selenium-treated cucumber plants. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* 17(4), 10–116. <https://doi.org/10.24326/asphc.2018.4.10>
- Hayashi N., Ono R., Shiratani M., Yonesu A., 2015. Antioxidative activity and growth regulation of Brassicaceae induced by oxygen radical irradiation. *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 06GD01. <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.06GD01>
- Henselová M., Slováková L., Martinka M., Zahoranová A., 2012. Growth, anatomy and enzyme activity changes in maize roots induced by treatment of seeds with low-temperature plasma. *Biologia* 67, 490–497. <https://doi.org/10.2478/s11756-012-0046-5>
- Himanen S.J., Nerg A.M., Nissinen A., Stewart C.N. Jr., Poppy G.M., Holopainen J.K., 2009. Elevated atmospheric ozone increases concentration of insecticidal *Bacillus thuringiensis* (Bt) Cry1Ac protein in *Bt Brassica napus* and reduces feeding of a Bt target herbivore on the non-transgenic parent. *Environ. Pollut.* 157, 181–185. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.07.006>
- Hiscox J., O'Leary J., Boddy L., 2018. Fungus wars: basidiomycete battles in wood decay. *Stud. Mycol.* 89, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.simyco.2018.02.003>
- Hojnik N., Modic M., Žigon D., Kovač J., Jurov A., Dickenson A., Walsh J.L., Cvelbar U., 2021. Cold atmospheric pressure plasma-assisted removal of aflatoxin B1 from contaminated corn kernels. *Plasma Process Polym.* 18. <https://doi.org/10.1002/ppap.202000163>

- Holc M., Primc G., Iskra J., Titan P., Kovač J., Mozetič M., Junkar I., 2019. Effect of oxygen plasma on sprout and root growth, surface morphology and yield of garlic. *Plants* 8, 462. <https://doi.org/10.3390/plants8110462>
- Hollingsworth R.G., Armstrong J.W., 2005. Potential of temperature, controlled atmospheres and ozone fumigation to control trips and mealybugs on ornamental plants for export. *J. Econ. Entomol.* 98(2), 289–298.
- Holopainen J.K., Kainulainen P., Oksanen J., 1997. Growth and reproduction of aphids and levels of free amino acids in Scots pine and Norway spruce in an open-air fumigation with ozone. *Glob. Change Biol.* 3, 139–147.
- Holopainen J.K., 2002. Aphid response to elevated ozone and CO<sub>2</sub>. *Entomol. Exp. Appl.* 104, 137–142.
- Hudson J.B., Sharma M., Vimalanathan S., 2009. Development of a practical method for using ozone gas as a virus decontaminating agent. *Ozone Sci. Eng.* 31, 216–223.
- Hui Y., Wang D., You Y., Shao C., Zhong C., Wang H., 2020. Effect of low temperature plasma treatment on biological characteristics and yield components of wheat seeds (*Triticum aestivum* L.). *Plasma Chem. Plasma Process.* <https://doi.org/10.1007/s11090-020-10104-z>
- Hunová I., Novotný R., Uhlířová H., Vráblík T., Horálek J., Lomský B., Srámek V., 2010. The impact of ambient ozone on mountain spruce forests in the Czech Republic as indicated by malondialdehyde. *Env. Pollution* 158, 2393–2401. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.04.006>
- Ignatowicz S., 1992. Możliwość wykorzystania promieniowania jonizującego w kwarantannie roślin. *Materiały Sesji Naukowej IOR Poznań* 32(1), 80–87.
- Ignatowicz S., 2020. Skuteczność zabiegów ozonowania w dezaktywacji koronawirusa SARS-CoV-2. *Przem. Spoż.* 74(9), 12. <https://doi.org/10.15199/65.2020.9.2>
- Ikawa S., Tani A., Nakashima Y., Kitano K., 2016. Physicochemical properties of bactericidal plasma-treated water. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 49(42), 5401.
- Isikber A.A., Athanassiou C.G., 2015. The use of ozone gas for the control of insects and microorganisms in stored products. *J. Stored Prod. Res.* 64, 139e145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jspr.2014.06.006>
- Ito K., Inoue S., Hiraku Y., Kawanishi S., 2005. Mechanism of site-specific DNA damage induced by ozone. *Mutat. Res.* 585, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2005.04.004>
- Jablonowski H., Schmidt-Bleker A., Weltmann K.D., von Woedtke T., Wende K., 2018. Non-touching plasma-liquid interaction – where is aqueous nitric oxide generated?. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 20, 25387–25398. <https://doi.org/10.1039/c8cp02412j>
- Jacewski B., Urbaniak J., Kwiatkowski P., Pusz W., 2019. Microfungal diversity of *Juncus trifidus* L. and *Salix herbacea* L. at isolated locations in the Sudetes and Carpathian Mountains. *Acta Mycol.* 54(1), 1–15. <https://doi.org/10.5586/am.1118>
- Jackson D.M., Eckel R.V.W., Rufty T.W., Heagle A.S., 1999. Survival and development of tobacco aphids on tobacco plants grown under elevated levels of ozone. *Tobacco Sci.* 43, 47–57.
- Jakab-Ilyefalvi Z., Pamfil D., Clapa D., Fira A., 2012. The effect of heat treatment and *in vitro* chemotherapy mediated by 2-thiouracil on plum pox virus (PPV) content in meristem regenerated plum plants. *Ann. Romanian Soc. Cell Biol.* XVII(1), 101–110.
- Jakubiak M., 2012. Degraded lands biological reclamation using modern methods of stimulating the growth of selected varieties of willows (*Salix* sp.). *Pol. J. Environ. Stud.* 21(5A), 129–133.
- Jamiołkowska A., 2011. Laboratory effect of azoxystrobin (Amistar 250 SC) and grapefruit extract (Biosept 33 SL) on growth of fungi colonizing zucchini plants. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* 10(2), 245–257.
- Jamiołkowska A., Kowalski R., 2012. *In vitro* estimate of influence of *Silphium perfoliatum* L. leaves extract on some fungi colonizing the pepper plants. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* 11(3), 43–55.
- Jamiołkowska A., Hetman B., 2016. Mechanizm działania preparatów biologicznych stosowanych w ochronie roślin przed patogenami. *Ann. UMCS Sec. E Agricultura* LXXI (1), 13–29.

- Jamiołkowska A., Kopacki M., 2016. Efektywność ekonomiczna chemicznej ochrony chryzantem (*Chrysanthemum* sp.) w tunelu foliowym. Ann. UMCS Sec. E Agricultura LXXI (2), 93–99.
- Jamiołkowska A., Hetman B., Skwaryło-Bednarz B., Kopacki M., 2017. Integrowana ochrona roślin w Polsce i Unii Europejskiej oraz prawne podstawy jej funkcjonowania. Ann. UMCS Sec. E Agricultura 72(1), 103–111.
- Jamiołkowska A., Księżniak A., Gałązka A., Hetman B., Kopacki M., Skwaryło-Bednarz B., 2018. Impact of abiotic factors on development of the community of arbuscular mycorrhizal fungi in the soil: a review. Int. Agrophys. 32(1), 133–140. <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0090>
- Jamiołkowska A., Michałek W., 2019. Effect of mycorrhiza inoculation of pepper seedlings (*Capsicum annuum* L.) on the growth and protection against *Fusarium oxysporum* infection. Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus 18(1), 161–169. <https://doi.org/10.24326/asphc.2019.1.16>
- Jamwal K., Bhattacharya S., Puri S., 2018. Plant growth regulator mediated consequences of secondary metabolites in medicinal plants. J. Appl. Res. Med. Aromat. Plants 9, 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2017.12.003>
- Janda M., Machala Z., Niklová A., Martišovič V., 2012. The streamer-to-spark transition in a transient spark: a dc-driven nanosecond-pulsed discharge in atmospheric air. Plasma Sources Sci. Technol. 21, 045006. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/21/4/045006>
- Jaroszuk-Ścisł J., Kurek E., Trytek M., 2014. Efficiency of indoleacetic acid, gibberellic acid and ethylene synthesized *in vitro* by *Fusarium culmorum* strains with different effects on cereal growth. Biologia 69(3), 281–292. <https://doi.org/10.2478/s11756-013-0328-6>
- Jaroszuk-Ścisł J., Tyśkiewicz R., Nowak A., Ozimek E., Majewska M., Hanaka A., Tyśkiewicz K., Pawlik A., Janusz G., 2019. Phytohormones (auxin, gibberellin) and ACC deaminase *in vitro* synthesized by the mycoparasitic *Trichoderma* DEMTkZ3A0 strain and changes in the level of auxin and plant resistance markers in wheat seedlings inoculated with this strain conidia. Int. J. Mol. Sci., 20, 4923. <https://doi.org/10.3390/ijms20194923>
- Jerushalmi S., Maymon M., Dombrovsky A., Freeman S., 2020. Effects of cold plasma, gamma and e-beam irradiations on reduction of fungal colony forming unit levels in medical cannabis inflorescences. J. Cannabis Res. 2, 12. <https://doi.org/10.1186/s42238-020-00020>
- Jerzy M., Krzywińska A., 2005. Rozmnażanie wegetatywne roślin ozdobnych. PWRiL Poznań.
- Jerzy M., Breś W., 2011. Seasonal changes of photoperiodic response and inflorescence quality in pot cultivars of *Chrysanthemum* x *grandiflorum* grown in greenhouse. Acta Agrobot. 64(4), 85–90.
- Ji S.H., Choi K.H., Pengkit A., Im J.S., Kim J.S., Kim Y.H., Park Y., Hong E.J., Jung S.K., Choi E.H., 2016. Effects of high voltage nanosecond pulsed plasma and micro DBD plasma on seed germination, growth development and physiological activities in spinach. Arch. Biochem. Biophys. 605, 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2016.02.028>
- Jiang J., He X., Li L., Li J., Shao H., Xu Q., Ye R., Dong Y., 2014a. Effect of cold plasma treatment on seed germination and growth of wheat. Plasma Sci. Technol. 16(1), 54–58. <https://doi.org/10.1088/1009-0630/16/1/12>
- Jiang J., Li J., Dong Y., 2018. Effect of cold plasma treatment on seedling growth and nutrient absorption of tomato. Plasma Sci. Technol. 20, 044007. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aaa0bf>
- Jiang J., Lu Y., Li J., Li L., He X., Shao H., Dong Y., 2014b. Effect of seed treatment by cold plasma on the resistance of tomato to *Ralstonia solanacearum* (Bacterial Wilt). PLoS ONE 9(5), 1–6.
- Jiayun T., Rui H., Xiaoli Z., Ruoting Z., Weiwen C., Size Y., 2014. Effects of atmospheric pressure air plasma pretreatment on the seed germination and early growth of *Andrographis paniculata*. Plasma Sci. Technol. 16(3), 260.
- Jo Y.K., Cho J.M., Tsai T.C., Staack D., Kang M.H., Roh J.H., Shin D.B., Cromwell W., Gross D., 2014. A non-thermal plasma seed treatment method for management of a seedborne fungal pathogen on rice seed. Crop Sci. 54, 796–803. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.05.0331>
- Joshi S.G., Cooper M., Yost A., Paff M., Ercan U.K., Fridman G., Friedman G., Fridman A., Brooks A.D., 2011. Nonthermal dielectric-barrier discharge plasma-induced inactivation involves

- oxidative DNA damage and membrane lipid peroxidation in *Escherichia coli*. *Antimicrob. Agents Chemother.* 55, 1053–1062. <https://doi.org/10.1128/aac.01002-10>
- Judée F., Simon S., Bailly C., Dufour T. 2018. Plasma-activation of tap water using DBD for agromony applications: Identification and quantification of long lifetime chemical species and production/consumption mechanisms. *Water Res.* 133, 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.035>
- Julák J., Hujacová A., Scholtz V., Khun J., Holada K., 2018. Contribution to the chemistry of plasma-activated water. *Plasma Phys. Rep.* 44(1), 125–136. <https://doi.org/10.1134/S1063780X18010075>
- Kang M.H., Pengkit A., Choi K., Jeon S.S., Choi H.W., Shin D.B., Choi E.H., Uhm H.S., Park G., 2015. Differential inactivation of fungal spores in water and on seeds by ozone and arc discharge plasma. *PLoS ONE* 10, e0139263. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139263>
- Karem M.H., Ibrahim M.K., Al-Kaeath N.A., 2019. Evaluation of some plant extracts using to reduce pathogenicity of fungus (*Rhizoctonia solani*). *Plant Arch.* 19(1), 1089–1092.
- Kaur S., Vian A., Chandel S., Singh H.P., Batish D.R., Kohli R.K. 2021. Sensitivity of plants to high frequency electromagnetic radiation: cellular mechanisms and morphological changes. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09563-9>
- Keivanloo E., Namaghi H.S., Khodaparast M.H.H., Hatefi S., 2013. Susceptibility of immature stages of the Indian meal moth, *Plodia interpunctella* Hübner (Lepidoptera: Pyralidae) to ozonated water. *J. Crop Prot.* 2 (4), 443–451.
- Keivanloo E., Namaghi H.S., Khodaparast M.H.H., 2014. Effects of low ozone concentrations and short exposure times on the mortality of immature stages of the Indian meal moth, *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae). *J. Plant Prot. Res.* 54(3), 267–271.
- Kells S.A., Mason L.J., Maier D.E., Woloshuk C.P., 2001. Efficacy and fumigation characteristics of ozone in stored maize. *J. Stored Prod. Res.* 37, 371–382.
- Khan S., Nazneen S., Khan S., Ali N., 2021. Effects of ozone phytotoxicity in reducing the yield and nutritional quality of chilli (*Capsicum annuum* L.). *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 8889–8897. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11139-7>
- Kiecana I., Mielniczuk E., Perkowski J., Goliński P., 2005. Porażenie wierz przez *Fusarium poae* (Peck.) Wollenw. oraz zawartość mikotoksyn w ziarnie owsa. *Acta Agrobot.* 58(2), 91–102.
- Kirkpatrick M.J., Dodet B., Odic E., 2007. Atmospheric pressure humid argon DBD plasma for the application of sterilization – measurement and simulation of hydrogen, oxygen, and hydrogen peroxide formation. *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.* 1(1), 96–101.
- Kitazaki S., Koga K., Shiratani M., Hayashi N., 2012. Growth control of dry yeast scalable atmospheric-pressure dielectric barrier discharge plasma irradiation. *Jpn. J. Appl. Phys.* 51(11S). <https://doi.org/10.1143/JJAP.51.11PJ02>
- Klima K., Kieć J., Lepiarczyk A., Synowiec A., 2014. Impact of laser beams treatment on the biomass yield and energy value of multiflora rose. *Agric. Eng.* 3(151), 57–63. <https://doi.org/10.14654/ir.2014.151.057>
- Kołaciński Z., 2004. Plasma treated waste destruction. ASEM Workshop on Europe-Asia Cooperation on clean technologies, organized by European Commission and Vietnamese Academy of Science, Hanoi.
- Kopacki M., Wagner A., 2006. Effect of some fungicides on mycelium growth of *Fusarium avenaceum* pathogenic to chrysanthemum (*Dendranthema grandiflora* Tzvelev). *Agron. Res.* 4, 237–240.
- Kopacki M., Wagner A., Michałek W., 2016. Pathogenicity of *Fusarium oxysporum*, *Fusarium avenaceum* and *Sclerotinia sclerotiorum* and its effect on photosynthetic activity of chrysanthemum plants. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* 15(3), 59–70.
- Kopacki M., Parafiniuk S., Skwaryło-Bednarz B., 2018. Fungi colonizing chrysanthemums plants cultivated in the field in different protection systems. *Fresenius Environ. Bull.* 27(5), 2751–2760.

- Kordas L., Pusz W., Czapka T., Kacprzyk R., 2015. The effect of low-temperature plasma on fungus colonization of winter wheat grain and seed quality. *Pol. J. Environ. Stud.* 24(1), 379–384.
- Kowalyszyn S.J., Konyk G.S., 2015. Wykorzystanie przedsewnej stymulacji elektrycznej nasion ży-cicy trwałej (*Lolium perenne* L.) dla pozyskiwania hodowlanego materiału wyjściowego. *Acta Agrophys.* 22(1), 55–66.
- Kramer A., Bekeschus S., Matthes R., Bender C., Stope M.B., Napp M., Schauer F., 2015. Cold phys-ical plasmas in the field of hygiene-relevance, significance, and future applications. *Plasma Proc-ess. Polym.* 12(12), 1410–1422.
- Krupa S., McGrath M.T., Andersen C.P., Booker F.L., Burkey K.O., Chappelka A.H., Chevone B.I., Pell E.J., Zilinskas B.A., 2001. Ambient ozone and plant health. *Plant Dis.* 85(1), 1–12.
- Krupski P., Kwiatkowski M., Terebun P., Diatczyk J., Stryczewska H.D., Pawłat J., Machala Z., Hensel K., 2016. Zastosowanie reaktora plazmowego „Miniaturized GlidArc” w usuwa-niu kontami-natu bakteryjnego z powierzchni teflonu. *Prz. Elektrotech.* 92(6), 127–130. <https://doi.org/10.15199/48.2016.06.25>
- Kučerová K., Henselová M., Slovákova L., Hensel K., 2019. Effects of plasma activated water on wheat: Germination, growth parameters, photosynthetic pigments, soluble protein content, and antioxidant enzymes activity. *Plasma Process. Polym.* 16, e1800131. <https://doi.org/10.1002/ppap.201800131>
- Kučerová K., Machala Z., Hensel K., 2020. Transient spark discharge generated in various N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> gas mixtures: reactive species in the gas and water and their antibacterial effects. *Plasma Chem. Plasma Process.* 40, 749–773. <https://doi.org/10.1007/s11090-020-10082-2>
- Kurzin N.N., Normova T.A., Belovolov M.O., 2014. Corn yield increase by the use of ozone as a pre-plant stimulator. *Mat. Konf. : Fundamental science and technology – promising developments IV (2)*. North Charleston, USA.
- Kwiatkowski M., Terebun P., Krupski P., Samoń R., Diatczyk J., Pawłat J., Stryczewska H., 2014. Wła-ściwości i zastosowania reaktorów plazmowych typu dysza plazmowa. *Inform. Autom. Pomiar* Gospod. Ochr. Śr. 3, 31–35. <https://doi.org/10.5604/20830157.1121341>
- Kýzek S., Holubova L., Medvecká V., Zahoranova A., Ševčovičova A., Galova E., 2017. Genotoxic effect of low temperature plasma treatment on plant seeds. *Toxicol. Lett.* 119. <http://dx.doi.org/10.1016/j.toxlet.2017.07.333>
- Lakshman D.K., Cloyd R.A., Chastagner G.A., 2019. Integrated management of diseases and pests on ornamental geophytes: challenges and progress. *Acta Hort.* 1237, 13–32. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1237.3>
- Laskowska M., Bogusławska-Wąs E., Kowal P., Hołub M., Dąbrowski W., 2016. Skuteczność sto-sowania niskotemperaturowej plazmy w mikrobiologii i medycynie. *ZUT, Szczecin*, 172–181.
- Laurita R., Contaldo N., Zambon Y., Bisag A., Canel A., Gherardi M., Laghi G., Bertaccini A., Colombo V., 2020. The use of plasma-activated water in viticulture: Induction of resistan-ce and agronomic performance in greenhouse and open field. *Plasma Process. Polym.* 8(1). <https://doi.org/10.1002/ppap.202000206>
- Lee A., Lin A., Shah K., Singh H., Miller V., Rao S.G., 2016. Optimization of non-thermal plasma treatment in an in vivo model organism. *PLoS ONE* 11(8), e0160676. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160676>
- Lee A.J., Cadelis M.M., Kim S.H., Swift S., Copp B.R., Villas-Boas S.G., 2020. Epipyron A, a broad-spectrum antifungal compound produced by *Epicoccum nigrum* ICMP 19927. *Molecules* 25, 5997. <https://doi.org/10.3390/molecules25245997>
- Levy R., Jouvenaz D.P., Cromroy H.L., 1974. Tolerance of tyree species if insects to prolonged expo-sures to ozone. *Environ. Entomol.* 3, 184–185.
- Li L., Guo H., Zong J., 2019. Influence of low-vacuum helium cold plasma pre-treatment on the ro-oting and root growth of zoysiagrass (*Zoysia Willd.*) stolon cuttings. *Plasma Sci. Technol.* 21(5), 055504. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aaf368>

- Li S., Courbet G., Ourry A., Ainsworth E.A., 2019. Elevated ozone concentration reduces photosynthetic carbon gain but does not alter leaf structural traits, nutrient composition or biomass in switchgrass. *Plants* 8, 85. <https://doi.org/10.3390/plants8040085>
- Li Y.G., Xi X., Wen S.Y., Li Y.M., 2013. The research of inhibition mechanism and the application on *Botrytis cinerea* of 5% potash alum water solution. *Adv. Mat. Res.* 647, 548–553. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.647.548>
- Liao W.B., Xiao H.L., Zhang M.L., 2010. Effect of nitric oxide and hydrogen peroxide on adventitious root development from cuttings of ground-cover chrysanthemum and associated biochemical changes. *J. Plant Growth Regul.* 29, 338–348.
- Liesebach M., Zaspel I., Stauber T., 2001. Monitoring of *Melampsora* rusts in *Salix*. *J. For. Sci.* 47(2), 119–122.
- Liesebach M., Naujoks G., 2004. Approaches on vegetative propagation of difficult-to-root *Salix caprea*. *Plant Cell, Tissue Organ Cult.* 79, 239–247.
- Lin S., Martin D.E., Taylor N.J., Gabriel C.K., 2017. Occurrence of *Phytophthora chrysanthemi* causing root and stem rot on garden mums in the United States. *Plant Dis.* 101(6). <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-16-1714-PDN>
- Ling L., Jiafeng J., Jiangang L., Minchong S., Xin H., Hanliang S., Yuanhua D., 2014. Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean. *Sci. Rep.* 4, 5859. <https://doi.org/10.1038/srep05859>
- Ling L., Jiangang L., Minchong S., 2016. Improving seed germination and peanut yields by cold plasma treatment. *Plasma Sci. Technol.* 18(10), 1027–1033.
- Lipa J.J., Pruszyński S., 2010. Stan wykorzystania metod biologicznych w ochronie roślin w Polsce i na świecie. *Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin* 50(3), 1033–1043.
- Liu C.Y., Zhang F., Zhang D.J., Srivastava A.K., Wu Q.S., Zou Y.N., 2018. Mycorrhiza stimulate root hair growth and IAA synthesis and transport in trifoliate orange under drought stress. *Sci. Rep.* 8, 1978.
- Liu D., Wu L., Naeem M.S., Liu H., Deng X., Xu L., Zhou W., 2013. 5-Aminolevulinic acid enhances photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and antioxidant system in oilseed rape under drought stress. *Acta Physiol. Plant.* 35, 2747–2759.
- Liu Y.B., 2005. Ultralow oxygen treatment for postharvest control of *Nasonovia ribisnigri* (Homoptera: Aphididae) on iceberg lettuce. *J. Econ. Entomol.* 98, 1899–1904.
- Liu Y.B., 2008. Ultralow oxygen treatment for postharvest control of western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae), on iceberg lettuce I. Effects of temperature, time, and oxygen level on insect mortality and lettuce quality. *Postharvest Biol. Technol.* 49, 129–134.
- Lu Q., Liu D., Song Y., Zhou R., Niu J., 2014. Inactivation of the tomato pathogen *Cladosporium fulvum* by an atmospheric-pressure cold plasma jet. *Plasma Process. Polym.* 11, 1028–1036. <https://doi.org/10.1002/ppap.201400070>
- Lukes P., Dolezalova E., Sisrova I., Clupek M., 2014. Aqueous phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water: Evidence for the formation of peroxynitrite through a pseudo-second-order post-discharge reaction of  $H_2O_2$  and  $HNO_2$ . *Plasma Sources Sci. Technol.* 23, 015019.
- Lunin V.V., Popovich M.P., Tkachenko S.N., 1998. Physical chemistry of ozone. Moscow State University, ss. 480.
- Lunov O., Zablotskii V., Churpita O., Chánová E., Syková E., Dejneka A., Kubinová S., 2014. Cell death induced by ozone and various non-thermal plasmas: therapeutic perspectives and limitations. *Sci. Rep.* 4, 7129. <https://doi.org/10.1038/srep07129>
- Łomnicki A., 2014. Wprowadzenie do statystyki dla przyrodników. Wyd. Naukowe PWN.
- Łozowicka B., Jankowska M., 2016. Comparison of the effects of water and thermal processing on pesticide removal in selected fruits and vegetables. *J. Elem.* 21(1), 99–111. <https://doi.org/10.5601/jelem.2015.20.2.917>



- Machala Z., Tarabová B., Sersenová D., Janda M., Hensel K., 2019. Chemical and antibacterial effects of plasma activated water: correlation with gaseous and aqueous reactive oxygen and nitrogen species, plasma sources and air flow conditions. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 52(3) 034002.
- Maharachchikumbura S.S.N., Guo L.D., Chuksatiro E., Bahkali A.H., Hyde K.D., 2011. Pestalotiopsis-morphology, phylogeny, biochemistry and diversity. *Fungal Divers.* 50, 167–187. <https://doi.org/10.1007/s13225-011-0125-x>
- Ma Y., Zhang Q., Zhang Q., He H., Chen Z., Zhao Y., Wei D., Kong M., Huang Q., 2018. Improved production of polysaccharides in *Ganoderma lingzhi* mycelia by plasma mutagenesis and rapid screening of mutated strains through infrared spectroscopy. *PLoS ONE* 13(9), e0204266. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204266>
- Ma Z., Michailides T.J., 2005. Genetic structure of *Botrytis cinerea* populations from different host plants in California. *Plant Dis.* 89, 1083–1089. <https://doi.org/10.1094/PD-89-1083>
- Makarska E., Michalak M., Wesołowska-Trojanowska M., 2004. Wpływ światła lasera na wartość siewną oraz poziom antyoksydantów wybranych odmian pszenicy ozimej. *Acta Agrophys.* 4(2), 407–417.
- Mancini V., Romanazzi G., 2014. Seed treatments to control seedborne fungal pathogens of vegetable crops. *Pest Manag. Sci.* 70, 860–868. <https://doi.org/10.1002/ps.3693>
- Marcinkowska J., 2012. Oznaczanie rodzajów grzybów sensu lato ważnych w fitopatologii. *PWRiL Warszawa*, ss. 508.
- Mari M., Bertolini P., Pratella G.C. 2003. Non-conventional methods for the control of post-harvest pear diseases. *J. Appl. Microbiol.* 94, 761–766.
- Marquenie D., Geeraerd A.H., Lammertyn J., Soontjens C., Van Impe J.F., Michiels C.W., Nicolai B.M., 2003. Combinations of pulsed white light and UV-C or mild heat treatment to inactivate conidia of *Botrytis cinerea* and *Monilia fructigena*. *Int. J. Food Microbiol.* 85(1–2), 185–196. [https://doi.org/10.1016/s0168-1605\(02\)00538-x](https://doi.org/10.1016/s0168-1605(02)00538-x)
- Matra K., 2017. Atmospheric non-thermal argon-oxygen plasma for sunflower seedling growth improvement. *Jpn. J. Appl. Phys.* 57(1S), 01AG03. <https://doi.org/10.7567/JJAP.57.01AG03>
- Mavroedi V.I., Shaw M.W., 2005. Sensitivity distributions and cross-resistance patterns of *Mycosphaerella graminicola* to fluquinconazole, prochloraz and azoxystrobin over a period of 9 years. *Crop Prot.* 24, 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2004.07.014>
- Mazandarani A., Goudarzi S., Ghafoorifard H., Eskandari A. 2020. Evaluation of DBD. plasma effects on barley seed germination and seedling growth. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, TPS12369. <https://doi.org/10.1109/TPS.2020.3012909>
- Mazurek P.A., Pawłat J., 2016. Badania natężeń pól elektrycznych i magnetycznych generowanych przez instalację reaktorów plazmowych. *Rocz. Ochr. Środowiska* 18, 567–578.
- Mazurek P.A., Pawłat J., Kwiatkowski M., 2015. Badanie zaburzeń przewodzących w torze zasilania reaktorów DBD i GlidArc. *Prz. Elektrotech.* 11, 50–53.
- Mazurek P.A., 2019. Wpływ przepływu gazu roboczego na zaburzenia przewodzone w torze zasilania trójfazowego reaktora plazmowego typu GlidArc. *Prz. Elektrotech.* 95(3), 37–40. <https://doi.org/10.15199/48.2019.03.09>
- Mazurek P., 2020. Chosen aspects of the electromagnetic compatibility of plasma reactors with gliding arc discharges. *Appl. Sci.* 10, 3789. <https://doi.org/10.3390/app10113789>
- McAdam E.L., Brodribb T.J., McAdam S.A.M., 2017. Does ozone increase ABA levels by nonenzymatic synthesis causing stomata to close?. *Plant Cell Environ.* 40, 741–747. <https://doi.org/10.1111/pce.12893>
- Meier U., 2001. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. *BBCH-Monograph*. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin (DE). <http://www.bba.de/veroeff/bbch/bbcheng.pdf>
- Melamies I.A., 2016. Pretreatment of LED lights. *Turn the future. Adhesion* 13(2), 15–18.
- Menéndez A.I., Romero A.M., Folcia A.M., Martínez-Ghersa M.A., 2009. Getting the interactions right: Will higher O<sub>3</sub> levels interfere with induced defenses to aphid feeding. *Basic Appl. Ecol.* 10(3), 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2008.03.010>



- Menéndez A.I., Folcia A.M., Vizgarra L., Romero A.M., Martínez-Ghersa M.A., 2013. Impact of plant and aphid stress history on infestation in arugula plants. *Entomol. Exp. Appl.* 149, 128–137. <https://doi.org/10.1111/eea.12116>
- Menéndez A.I., Romero A.M., Folcia A.M., Martínez-Ghersa M.A., 2010. Aphid and episodic O<sub>3</sub> injury in arugula plants (*Eruca sativa* Mill) grown in open-top field chambers. *Agric. Ecosyst. Envi-ron.* 135, 10–14. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.08.005>
- Metwally S.A., Abou-Ellail M., Abo-Leila B.H., Aboud K.A., 2013. Effect of laser radiation on the growth, anatomical and biochemical genetic markers of *Celosia argentea* plants. *Int. J. Acad. Res.* 5(3), 200–206. <https://doi.org/10.7813/2075-4124.2013/5-3/A.28>
- Mhamdi A., Van Breusegem F., 2018. Reactive oxygen species in plant development. *Development* 145, dev164376. <https://doi.org/10.1242/dev.164376>
- Michailides T.J., Elmer P.A.G., 2000. Botrytis gray mold of kivi fruit caused by *Botrytis cinerea* in the United States and New Zealand. *Plant Dis.* 84(3), 208–212.
- Mildažienė V., Aleknavičiute V., Žukienė R., Paužaite G., Naucienė Z., Filatova I., Lyushkevich V., Haimi P., Tamošiune I., Baniulis D., 2019. Treatment of common sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds with radio-frequency electromagnetic field and cold plasma induces changes in seed phytohormone balance, seedling development and leaf protein expression. *Sci. Rep.* 9, 6437. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42893-5>
- Mildažienė V., Ivankov A., Paužaite G., Naucienė Z., Žukienė R., Degutyte-Fomins L., Pukalskas A., Venskutonis P.R., Filatova I., Lyushkevich V., 2021. Seed treatment with cold plasma and electromagnetic field induces changes in red clover root growth dynamics, flavonoid exudation, and activates nodulation. *Plasma Process. Polym.* 18(1). <https://doi.org/10.1002/ppap.202000160>
- Milusheva S., Nacheva L., Benova E., Marinova P., Dimitrova N., Georgieva-Hristeva A., 2020. Experiments on plum pox virus inactivation from micropropagated plum plants through non-thermal plasma treatment. *Plant Prot. Bull.* 60(2), 83–90. <https://doi.org/10.16955/bitkorb.653564>
- Mina F.B., Billah M., Rahman S., Das S., Karmakar S., Acharjee U.K., Hasan F., 2021. Convalescent plasma: alternative or promising therapy?. *J. Glob. Antimicrob. Resist.* 24, 246–248. <https://doi.org/10.1016/j.jgar.2021.01.001>
- Miszczak A., 2016. Badanie pozostałości środków ochrony roślin w ramach urzędowej kontroli ich stosowania. In *Hort Skierniewice*.
- Mitra A., Li Y., Klämpf T., Shimizu T., Jeon J., Morfill G., Zimmermann J., 2014. Inactivation of surface-borne microorganisms and increased germination of seed specimen by cold atmospheric plasma. *Food Bioprocess. Technol.* 7, 645–653.
- Moisan M., Barbeau J., Crevier M.-C., Pelletier J., Philip N., Saoudi B., 2002. Plasma sterilization. Methods and mechanisms. *Pure Appl. Chem.* 74(3), 349.
- Monci F., Garcia-Andres S., Sanchez-Campos S., Fernandez-Muñoz R., Diaz-Pendón J.A., Moriones E., 2019. Use of systemic acquired resistance and whitefly optical barriers to reduce tomato yellow leaf curl disease damage to tomato crops. *Plant Dis.* 103, 1181–1188. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-18-1069-RE>
- Monder M.J., 2016. Study on propagation of shrub and pillar roses by hardwood cuttings with auxins reparations. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* 15(4), 173–183.
- Mrówczyński M., Remlein-Starosta D., 2013. Metodyka integrowanej ochrony wierzby krzewiastych dla producentów biomasy. IOR PIB, Poznań.
- Mucko J., Dobosz R., Strzelecki R., 2020. Dielectric barrier discharge systems with HV generators and discharge chambers for surface treatment and decontamination of organic products. *Energies* 13, 5181. <https://doi.org/10.3390/en13195181>
- Mueller D.S., Hung Y.C., Oetting R.D., Iersel M.W., Buck J.W., 2003. Evaluation of electrolyzed oxidizing water for management of powdery mildew on gerbera daisy. *Plant Dis.* 87, 965–969.
- Muhammad A.I., Xiang Q., Liao X., Liu D., Ding T., 2018. Understanding the impact of nonthermal plasma on food constituents and microstructure-A Review. *Food Bioproc. Tech.* 11, 463–486. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-2042-9>

- Mülner P., Bergna A., Wagner P., Sarajlić D., Gstötenmayr B., Dietel K., Grosch R., Cernava T., Berg G., 2019. Microbiota associated with sclerotia of soilborne fungal pathogens – a novel source of biocontrol agents producing bioactive volatiles. *Phytobiomes J.* 3(2), 125–135. <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-11-18-0051-R>
- Mystkowska J., Dąbrowski J.R., Kowal K., Niemirowicz K., Car H., 2013. Physical and chemical properties of deionized water and saline treated with low-pressure and low-temperature plasma. *Chemik* 67, 722–724.
- Nagrale D.T., Gaikward A.P., Sharma L., 2013. Morphological and cultural characterization of *Alternaria alternata* (Fr.) Keissler blight of gerbera. *J. Appl. Nat. Sci.* 5, 171–178.
- Navarro M.O.P., Piva A.C.M., Simionato A.S., Spago F.R., Modolon F., Emiliano J., Azul A.M., Chrysafidis A.L., Andrade G., 2019. Bioactive compounds produced by biocontrol agents driving plant health. W: V. Kumar, R. Prasad, M. Kumar, D. Choundhary (red.), *Microbiome in plant health and disease*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8495-0\\_15](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8495-0_15)
- Navarro S., deBruin T., Montemayor A.R., Finkelman S., Rindner M., Dias R. 2007. Use of biogenerated atmospheres of stored commodities for quality preservation and insect control, with particular reference to cocoa beans. *Integrated Protection of Stored Products IOBC-WPRS Bulletin* 30(2), 197–204.
- Nawalany G., Herbut P., Sokołowski P., 2014. Analiza techniczna i kierunki rozwoju przechowalni warzyw i owoców w rejonie Skalbmierza. PAN Kraków, 217–226.
- Nawrot-Chorabik K., 2015. Zastosowanie tkanki kalusa w biotechnologii drzew lesnych: badania *in vitro*. *Kosmos. Probl. Nauk Biol.* 64(307), 305–317.
- Nawrot J., Olejarski P., 2007. Alternatywne metody zwalczania owadów szkodników magazynowych. *IOR Poznań*, 32–39.
- Niemira B., Sites J., 2008. Cold plasma inactivates *Salmonella stanley* and *Escherichia coli* O157:H7 inoculated on Golden Delicious apples. *J. Food Prot.* 71(7), 1357–1365.
- Noctor G., Mhamdi A., Foyer C.H., 2016. Oxidative stress and antioxidative systems: recipes for successful data collection and interpretation. *Plant Cell Environ.* 39, 1140–1160. <https://doi.org/10.1111/pce.12726>
- Normov D.A., Pozhidaev D.V., Sulejmanov A.E., 2014. The ozone-air mixture impact on harmful microflora in the forage. *Mat. Konf. "Fundamental science and technology – promising developments" IV*, 2, 157–160.
- Ohta T., 2016. Plasma in agriculture. W: N.N. Misra, O.K. Schlüter, P.J. Cullen (red.), *Cold plasma in food and agriculture: fundamentals and applications*. Academic Press, ss. 728.
- Oliveira Longa C.M., Palma L., Tosi S., 2005. Conidial fungi from *Salix herbacea* leaf litter and their growth temperature preferences. *Bol. Micol. "Lazarillo"* 20, 91–95.
- Oliveira M.S., Amiri A., Zuniga A.I., Peres N.A., 2017. Sources of primary inoculum of *Botrytis cinerea* and their impact on fungicide resistance development in commercial strawberry fields. *Plant Dis.* 101, 1761–1768. <https://doi.org/10.1094/PDIS-02-17-0203-RE>
- Osman Y.A.H., El Tobgy K.M.K., El Sherbini E.S.A., 2009. Effect of laser radiation treatments on growth, yield and chemical constituents of fennel and coriander plants. *J. Appl. Sci. Res.* 5(3), 244–252.
- Ozimek E., Jaroszuk-Sciseł J., Bohacz J., Kornilłowicz-Kowalska T., Tyskiewicz R., Słomka A., Nowak A., Hanaka A., 2018. Synthesis of indoleacetic acid, gibberellic acid and ACC-deaminase by *mortierella* strains promote winter wheat seedlings growth under different conditions. *Int. J. Mol. Sci.* 19, 3218. <https://doi.org/10.3390/ijms19103218>
- Palou L., Crisosto C.H., Smilanick J.L., Adaskaveg J.E., Zoffoli J.P., 2002. Effects of continuous 0.3 ppm ozone exposure on decay development and physiological responses of peaches and table grapes in cold storage. *Postharvest Biol. Technol.* 24, 39–48.
- Pankaj S.K., Keener K.M. 2017. Cold plasma: background, applications and current trends. *Curr. Opin. Food Sci.* 16, 49–52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cofs.2017.07.008>

- Panneton B., Vincent C., Fleurat-Lessard F., 2001. Plant protection and physical control methods the need to protect crop plants. W: C. Vincent, B. Panneton, F. Fleurat-Lessard (red.), Physical control methods in plant protection. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04584-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04584-8_1)
- Panngom K., Lee S.H., Park D.H., Sim G.B., Kim Y.H., 2014. Non-thermal plasma treatment diminishes fungal viability and upregulates resistance genes in a plant host. PLoS ONE 9(6), e99300. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099300>
- Paoletti E., Contran N., Bernasconi P., Günthardt-Goerg M.S., Vollenweider P., 2009. Structural and physiological responses to ozone in Manna ash (*Fraxinus ornus* L.) leaves of seedlings and mature trees under controlled and ambient conditions. Sci. Total Environ. 407, 1631–1643.
- Park J.C., Park B.J., Han D.W., Lee D.H., Lee I.S., Hyun S.O., Chun M.S., Chung K.H., Aihara M., Takatori K., 2004. Fungal sterilization using microwave-induced argon plasma at atmospheric pressure. J. Microbiol. Biotechnol. 14, 188–192.
- Pauzaite G., Malakauskiene A., Nauciene Z., Zukiene R., Filatova I., Lyushkevich V., Azarko I., Mildažiene V., 2018. Changes in Norway spruce germination and growth induced by presowing seed treatment with cold plasma and electromagnetic field: Short-term versus long-term effects. Plasma Agric. 15(2S). <https://doi.org/10.1002/ppap.201700068>
- Pawłat J., Diatczyk J., Stryczewska H.D., 2011. Low-temperature plasma for exhaust gas purification from paint shop – a case study. Prz. Elektrotech. 1, 245–248.
- Pawłat J., 2013. Atmospheric pressure plasma jet for decontamination purposes. Eur. Phys. J. Appl. Phys. 61, 2012120431.
- Pawłat J., Diatczyk J., Gunaydin-Dasan B., Onal-Ulusoy B., Mok Y.S., 2017. Mini glidearc plasma reactor for biological decontamination. Eur. J. Med. Technol. 1(14), 29–32.
- Pawłat J., Starek A., Sujak A., Terebun P., Kwiatkowski M., Budzeń M., Andrejko D., 2018. Effects of atmospheric pressure plasma jet operating with DBD on *Lavatera thuringiaca* L. seeds' germination. PLoS ONE 13(4), e0194349. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194349>
- Pawłat J., Terebun P., Kwiatkowski M., Tarabová B., Kovalová Z., Kučerová K., Machala Z., Janda M., Hensel K., 2019. Evaluation of oxidative species in gaseous and liquid phase generated by mini gliding arc discharge. Plasma Chem. Plasma Process. 39, 627–642. <https://doi.org/10.1007/s11090-019-09974-9>
- Pazarlar S.A., Cetinkaya N.A., Bor M.B.C., Ozdemir F.B., 2017. Ozone triggers different defence mechanisms against powdery mildew (*Blumeria graminis* DC. Speer f. sp. *tritici*) in susceptible and resistant wheat genotypes. Funct. Plant Biol. 44(10), 1016–1028. <https://doi.org/10.1071/FP17038>
- Pedley K.F., 2009. PCR-based assays for the detection of *Puccinia horiana* on chrysanthemums. Plant Dis. 93, 1252–1258. <http://dx.doi.org/10.1094/PDIS-93-12-1252>
- Perez S.M., Biondi E., Laurita R., Proto M., Sarti F., Gherardi M., Bertaccini A., Colombo V., 2019. Plasma activated water as resistance inducer against bacterial leaf spot of tomato. PLoS ONE 14(5), e0217788. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217788>
- Pietruszewski S., Kornarzyński K., 2002. Technika wspomagania kiełkowania nasion pomidorów przy użyciu pola elektrycznego oraz modelowanie tego procesu z wykorzystaniem krzywej logistycznej. Acta. Sci. Pol. Tech. Agr. 1(1), 83–88.
- Piskarev I.M., 2019. Production of chemically active water using pulsed radiation of spark discharge plasma. J. Phys. Conf. Ser. 1383, 012028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1383/1/012028>
- Piwoni A., 2007. Health status of two plantations of tulip near Pulawy and fungi isolated from foliar parts and bulbs. Electron. J. Pol. Agric. Univ. 10(4). <http://www.ejpau.media.pl/volume10/issue4/art-07.html> [dostęp: 14.04.2021]
- Pizá M.C.P., Prevosto L., Zilli C., Cejas E., Kelly H., Balestrasse K., 2018. Effects of non-thermal plasmas on seedborne Diaporthe/Phomopsis complex and germination parameters of soybean seeds. Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 49, 82–91.

- Podbielska M., Szpyrka E., Matyaszek A., Kurdziel A., Rupař J., Słowik-Borowiec M., 2014. Pozostałości ditiokarbaminianów w owocach, warzywach i ziołach z terenu południowo-wschodniej Polski w latach 2011–2013. *Prog. Plant Prot.* 54(3), 293–297. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14199/ppp-2014-047>
- Popp J., Pető K., Nagy J., 2013. Pesticide productivity and food security. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 243–255. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0105-x>
- Porfirio S., Silva M., Cabrita M.J., Azadi Peixe A., 2016. Reviewing current knowledge on olive (*Olea europaea* L.) adventitious root formation. *Sci. Hortic.* 198, 207–226. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.034>
- Przybysz A., Gawrońska H., Gajc-Wolska J., 2014. Biological mode of action of a nitrophenolates – based biostimulant: case study. *Front. Plant Sci.* 5, 713. <https://doi.org/0.3389/fpls.2014.00713>
- Ptaszek M., Gryczka U., Migdał W., Orlikowski L.B., 2010. Wykorzystanie metody radiacyjnej do eliminowania *Sclerotinia sclerotiorum* w podłożach. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 554, 183–188. <https://doi.org/10.1007/s10658—016-1067-7>
- Puać N., Škoro N., Spasić K., Živković S., Milutinović M., Malović G., Petrović Z.L., 2018. Activity of catalase enzyme in *Paulownia tomentosa* seeds during the process of germination after treatments with low pressure plasma and plasma activated water. *Plasma Process. Polym.* 15, e1700082. <https://doi.org/10.1002/ppap.201700082>
- Puligundla P., Mok C., 2018. Inactivation of spores by nonthermal plasmas. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 34, 143. <https://doi.org/10.1007/s11274-018-2527-3>
- Pusz W., Urbaniak J., 2017. Foliar diseases of willows (*Salix* spp.) in selected locations of Karkonosze Mts. (the Giant Mts). *Eur. J. Plant Pathol.* 148, 45–51.
- Rahimi-Verki N., Shapoorzadeh A., Razzaghi-Abyaneh M., Atyabi S.M., Shams-Ghahfarokhi M., Jahanshiri Z., Gholami-Shabani M., 2016. Cold atmospheric plasma inhibits the growth of *Candida albicans* by affecting ergosterol biosynthesis and suppresses the fungal virulence factors *in vitro*. *Photodiagn. Photodyn. Ther.* 13, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2015.12.007>
- Rameau C., Bertheloot J., Leduc N., Andrieu B., Foucher F., Sakr S., 2015. Multiple pathways regulate shoot branching. *Front. Plant Sci.* 5, 741. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00741>
- Ramirez J.E.G., 2019. Ozone effects on plants: two opposite sides of the same coin. *Biomed J. Sci. Tech. Res.* 19(3). <https://doi.org/BJSTR.MS.ID.003297>
- Randeniya L.K., de Groot G.J.J.B., 2015. Non-thermal plasma treatment of agricultural seeds for stimulation of germination, removal of surface contamination and other benefits: A review. *Plasma Process. Polym.* 12, 608–623. <https://doi.org/10.1002/ppap.201500042>
- Ranieri P., Sponsel N., Kizer J., Rojas-Pierce M., Hernández R., Gatiboni L., Grunden A., Stapelmann K., 2021. Plasma agriculture: Review from the perspective of the plant and its ecosystem. *Plasma Process. Polym.* 18(1). <https://doi.org/10.1002/ppap.202000162>
- Raniszewski G., Wiak S., Pietrzak Ł., Szymanski Ł., Kolacinski Z., 2017. Influence of plasma jet temperature profiles in arc discharge methods of carbon nanotubes synthesis. *Nanomaterials* 7, 50. <https://doi.org/10.3390/nano7030050>
- Raper K., Thom C., Fennel D., 1949. A manual of the Penicillium. The Williams and Wilkins Co., Baltimore.
- Rataj-Guranowska M., Pukacka A., 2012. Kompendium symptomów chorób roślin i morfologii ich sprawców. IOR-PIB, Poznań.
- Raudonius S., 2017. Application of statistics in plant and crop research: important issues. *Zemdirbyste* 104(4), 377–382. <https://doi.org/10.13080/z-a.2017.104.048>
- Remlein-Starosta D., 2007. Choroby roślin energetycznych. *Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin* 47(4), 352–354.
- Reddy D.S., Lahta M.P., 2012. Bio-efficacy of new molecules and botanicals against chrysanthemum aphid, *Macrosiphoniella sanbarni* (Koch). *Pest Manag. Hortic. Ecosyst.* 18(2), 222–223.
- Riddick E.W., 2017. Identification of conditions for successful aphid control by ladybirds in greenhouses. *Insects* 8(38). <https://doi.org/10.3390/insects8020038>

- Rifna E.J., Ramanan K.R., Mahendran R., 2019. Emerging technology applications for improving seed germination. Trends Food Sci. Technol. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.029>
- Roszyk J., Nowosielski O., Breś W., 2006. Tolerancja liści pomidora i kalafiora na wybrane adiuwanty. Acta Agrophys. 7(4), 991–1001.
- Rout G.R., 2006. Effect of auxins on adventitious root development from single node cuttings of *Camellia sinensis* (L.) Kuntze and associated biochemical changes. Plant Growth Regul. 48, 111–117. <https://doi.org/10.1007/s10725-005-5665-1>
- Royintarat T., Seesuriyachan P., Boonyawan D., Choid E.H., Wattanutchariya W., 2019. Mechanism and optimization of non-thermal plasma-activated water for bacterial inactivation by under-water plasma jet and delivery of reactive species underwater by cylindrical DBD plasma. Curr. Appl. Phys. 19, 1006–1014.
- Saberi M., Modarres-Sanavy S.A.M., Zare R., Ghomi H., 2018. Amelioration of photosynthesis and quality of wheat under nonthermal radio frequency plasma treatment. Sci. Rep. 8, 11655. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30200-7>
- Saberi M., Modarres-Sanavy S.A.M., Zare R., Ghomi H., 2019. Improvement of photosynthesis and photosynthetic productivity of winter wheat by cold plasma treatment under haze condition. J. Agr. Sci. Tech. 21 (Suppl.), 1889–1904.
- Sadło S., Szpyrka E., Piechowicz B., Antos P., Józefczyk R., Balawejder M., 2017. Reduction of captan, boscalid and pyraclostrobin residues on apples using water only, gaseous ozone, and ozone aqueous solution. Ozone Sci. Eng. 39(2), 97–103. <https://doi.org/10.1080/01919512.2016.1257931>
- Sachadyn-Król M., Materska M., Chilczuk B., Karaś M., Jakubczyk A., Perucka I., Jackowska I., 2016. Ozone-induced changes in the content of bioactive compounds and enzyme activity during storage of pepper fruits. Food Chem. 211, 59–67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.023>
- Sagee O., Raviv M., Medina S., Becker D., Cosse A., 1992. Involvement of rooting factors and free IAA in the rootability of citrus species stem cuttings. Sci. Hortic. 51, 187–195.
- Salata B., Rudnicka-Jezińska W., 1979. Grzyby (Mycota), workowce (Ascomycetes), pierwogrzybowe (Protomycetales), czuprynkowe (Cheatomiales). XII, PAN, PWN Warszawa–Kraków.
- Samóń R., Czapínski J., Grządziel J., Płonka M., Pawłat J., Diatczyk J., 2014. Ocena działania bakteriobójczego niskotemperaturowej plazmy nierównowagowej generowanej w reaktorze RF. Europ. J. Med. Technol. 2(3), 17–26.
- Sarig P., Zahavi T., Zutkhi Y., Yannai S., Liskar N., Ben-Arie R., 1996. Ozone for the control of postharvest decay of table grapes caused by *Rhizopus stolonifera*. Physiol. Mol. Plant Pathol. 48, 403–415.
- Sarinont T., Amano T., Attri P., Koga K., Hayashi N., Shiratani M., 2016. Effects of plasma irradiation using various feeding gases on growth of *Raphanus sativus* L. Arch. Biochem. Biophys. 605, 129–140.
- Sarinont T., Katayama R., Wada Y., Koga K., Shiratani M., 2017. Plant growth enhancement of seeds immersed in plasma activated water. MRS Advances 2, 995–1000.
- Sarven M.S., Hao Q., Deng J., Yang F., Wang G., Xiao Y., Xiao X., 2020. Biological control of tomato gray mold caused by *Botrytis cinerea* with the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae*. Pathogens 9, 213. <https://doi.org/10.3390/pathogens9030213>
- Sauer J.A., Shelton M.D., 2002. High temperature controlled atmosphere for post-harvest control of Indian meal moth (Lepidoptera: Pyralidae) on preserved flowers. J. Stored Prod. Res. 95(5), 1074–1078.
- Schalekamp M., 1989. Ozone technology in Switzerland yesterday, today and tomorrow. Proceedings of II International Conference on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, HAKONE '89, Technical University of Lublin.
- Schleier III J.J., Paterson R.K.D., 2011. Pyrethrins and pyrethroid insecticide. W: Lopez O., Fernandez-Bolanos J. (red.), Green trends in insect control. 94–131. <http://dx.doi.org/10.1039/9781849732901-00094>

- Schlüter O., Ehlbeck J., Hertel C., Habermeyer M., Roth A., Engel K.H., Holzhauser T., Knorr D., Eisenbrand G., 2013. Opinion on the use of plasma processes for treatment of foods. *Mol. Nutr. Food Res.* 57, 920–927. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201300039>
- Schmidt M., Hahn V., Altrock B., Gerling T., Gerber I.C., Weltmann K.D., von Woedtke T., 2019. Plasma-activation of larger liquid volumes by an inductively-limited discharge for antimicrobial purposes. *Appl. Sci.* 9, 2150. <https://doi.org/10.3390/app9102150>
- Sellami M., Ghariania B., Louatia H., Mileda N., Gargouria Y., 2013. Biological activities of extracts of different spices and plants. *Int. J. Curr. Eng. Technol.* 3(3), 1051–1060.
- Shapourszadeh A., Rahimi-Verki N., Atyabi S.M., Shams-Ghahfarokhi M., Jahanshiri Z., Irani S., Razzaghi-Abyaneh M., 2016. Inhibitory effects of cold atmospheric plasma on the growth, ergosterol biosynthesis, and keratinase activity in *Trichophyton rubrum*. *Arch. Biochem. Biophys.* 608, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2016.07.012>
- Sharma P., Jha A.B., Dubey R.S., Pessarakli M., 2012. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *J. Bot.* 217037. <https://doi.org/10.1155/2012/217037>
- Sharma P., Sharma M., Raja M., Shanmugam V., 2014. Status of Trichoderma research in India: A review. *Indian Phytopath.* 67(1), 1–19.
- Sharma R., Singh S.V., 2020. Plasma application to seed as germination and growth enhancer. *Agriallis* 2(8), 14–18.
- Sharpe D., Fan L., McRae K., Walker B., MacKay R., Doucette C., 2009. Effects of ozone treatment on *Botrytis cinerea* and *Sclerotinia sclerotiorum* in relation to horticultural product quality. *J. Food Sci.* 74(6), M250–M257. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01234.x>
- Shashikanthalu S.P., Ramireddy L., Radhakrishnan M., 2020. Stimulation of the germination and seedling growth of *Cuminum cyminum* L. seeds by cold plasma. *J. Appl. Res. Med. Aromat. Plants* 18, 100259. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2020.100259>
- Siciliano I., Spadaro D., Prella A., Vallauri D., Cavallero M.C., Garibaldi A., Gullino M.L., 2016. Use of cold atmospheric plasma to detoxify hazelnuts from aflatoxins. *Toxins* 8(125). <https://doi.org/10.3390/toxins8050125>
- Siddique S.S., Hardy G.E.S.J., Bayliss K.L., 2018. Cold plasma: a potential new method to manage postharvest diseases caused by fungal plant pathogens. *Plant Pathol.* 67, 1011–1021. <https://doi.org/10.1111/ppa.12825>
- Silva B.A., Silva J.R., Moecke E.S., Scussel V.M., 2020. Effect of cold plasma treatment on fungi inactivation and germination of maize grains (*Zea mays* L.). *IOSR J. Agric. Vet. Sci.* 13(7), 28–32. <https://doi.org/10.9790/2380-1307032832>
- Silveira P.R., Milagres P.O., Corrêa E.F., Aucique-Pérez C.E., Wordell Filho J.A., Rodrigues F.A., 2019. Changes in leaf gas exchange, chlorophyll a fluorescence, and antioxidants in maize leaves infected by *Exserohilum turcicum*. *Biol. Plant.* 63, 643–653. <https://doi.org/10.32615/bp.2019.130>
- Sivachandiran L., Khacef A., 2017. Enhanced seed germination and plant growth by atmospheric pressure cold air plasma: combined effect of seed and water treatment. *RSC Advances* 7, 1822–1832. <https://doi.org/10.1039/C6RA24762H>
- Skirgiełło A., Zadara M., Ławrynowicz M., 1979. Grzyby (*Mycota*), Glonowce (*Phycomycetes*), pleśniowce (*Mucorales*), kłębiankowe (*Endogonales*). X. PAN, PWN Warszawa.
- Skoczko I., 2013. Rozkład pestycydów metodą Fentoma z wykorzystaniem  $\text{MgO}_2$ . *Rocz. Ochr. Środowiska* 15, 1460–1473.
- Skoczko I., Ignatowicz K., 2002. Dependence of sorption of phenoxyacetic herbicides on their physico-chemical properties. *Pol. J. Environ. Stud.* 11(4), 339–344.
- Skryplonek K., 2016. Zimna plazma jako niekonwencjonalna metoda utrwalania żywności. *Inż. Przetw. Spoż.* 4, 28–33.
- Soares C., Gomez E., Dahlke F., De Rolt C., Plentz P., Dantas M., Scussel V., 2020. Use of IoT to real-time monitoring of storage silo and ozone gas fungal decontamination strategy. *Int. J. Comput. Appl.* 175(16), 0975–8887.



- Sohan M.S.R., Hasan M., Hossain M.F., Sajib S.A., Miah M., Iqbal A., Karmakar S., Alam J., Khalid Bin Ferdaus K., Kabir A.H., Rashid M., Talukder M.R., Reza A., 2012. Improvement of seed germination rate, agronomic traits, enzymatic activity and nutritional composition of bread wheat (*Triticum aestivum*) using low-frequency glow discharge plasma. *Plasma Chem. Plasma Process.* 41, 923–944. <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10158-7>
- Song A., Zhao S., Chen S., Jiang J., Chen S., Li H., Chen Y., Chen X., Fang W., Chen F., 2013. The abundance and diversity of soil fungi in continuously monocropped chrysanthemum. *Sci. World J.* <http://dx.doi.org/10.1155/2013/632920>
- Song H.P., Kim B., Choe J.H., Jung S., Moon S.Y., Choe W., Jo C., 2009. Evaluation of atmospheric pressure plasma to improve the safety of sliced cheese and ham inoculated by 3-strain cocktail *Listeria monocytogenes*. *Food Microbiol.* 26, 432–436. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.02.01019376467>
- Song J., Fan L., Hildebrand P.D., Forney C.F., 2000. Biological effects of corona discharge on onions in a commercial storage facility. *Horttechnology* 10(3), 608–612.
- Song J.S., Kim S.B., Ryu S., Oh J., Kim D.S., 2020. Emerging plasma technology that alleviates crop stress during the early growth stages of plants: A review. *Front. Plant Sci.* 11, 988. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00988>
- Sousa A.H., Faroni L.R.D.A., Pimentel M.A.G., Silva G.N., Guedes R.N.C., 2016. Ozone toxicity to *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) populations under selection pressure from ozone. *J. Stored Prod. Res.* 65, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2015.11.001>
- Stachowiak M., 2006. Wydajność pracy i struktura czasu pracy przy wykonywaniu chemicznych zabiegów ochrony roślin w szklarniach technika zamglawiania na gorąco i użyciu zamglawiacza typu K30/10 w uprawach pomidorów szklarniowych. *Zesz. Nauk. UP Wrocław. Rolnictwo*, 317–322.
- Stancampiano A., Galligani T., Gherardi M., Machala Z., Maguire P., Colombo V., Pouvesle J.M., Robert E., 2019. Plasma and aerosols: challenges, opportunities and perspectives. *Appl. Sci.* 9, 3861. <https://doi.org/10.3390/app9183861>
- Stanciu O., Juan C., Miere D., Loghin F., Mañes J., 2017. Presence of enniatins and beauvericin in romanian wheat samples from raw material to products for direct human consumption. *Toxins* 9, 189.
- Starek A., Pawłat J., Chudzik B., Kwiatkowski M., Terebun P., Sagan A., Andrejko D., 2019. Evaluation of selected microbial and physicochemical parameters of fresh tomato juice after cold atmospheric pressure plasma treatment during refrigerated storage. *Sci. Rep.* 9, 8407. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44946-1>
- Starek A., Sagan A., Andrejko D., Chudzik B., Kobus Z., Kwiatkowski M., Terebun P., Pawłat J., 2020. Possibility to extend the shelf life of NFC tomato juice using cold atmospheric pressure plasma. *Sci. Rep.* 10, 20959. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77977-0>
- Stasiulewicz-Paluch A.D., Wachowska U., 2015. Ekotoksyczność i fitotoksyczność środków ochrony roślin wobec grzybów ryzosferowych i siewek pszenicy ozimej. *Inż. Ekolog.* 45, 106–113. <https://doi.org/10.12912/23920629/60603>
- Stompor-Chrzan E., 2003. Zróżnicowanie oddziaływania ekstraktów roślinnych na wzrost grzybnia *Alternaria alternata* (Fr.) Keissler. *Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin* 43(2), 947–950.
- Stryczewska H.D., 2011. Technologie zimnej plazmy. Wytwarzanie, modelowanie, zastosowania. *Elektryka* 1(217), 41–61.
- Stryczewska H.D., Jakubowski T., Kalisiak S., Giżewski T., Pawłat J., 2013. Power systems of plasma reactors for non-thermal plasma generation. *J. Adv. Oxid. Technol.* 16(1), 52–62.
- Stryczewska H.D., 2020. Supply systems of non-thermal plasma reactors. Construction review with examples of applications. *Appl. Sci.* 10, 3242. <https://doi.org/10.3390/app10093242>
- Suchocka M., 2008. Zdolności regeneracyjne drzew i ich odporność na uszkodzenia w środowisku miejskim. *Człow. Śr.* 32(1–2), 5–18.



- Suhem K., Matan N., Nisoa M., Matan N., 2013. In vitro and in vivo antifungal activities of various gas species under plasma jet treatment against brown rice cereal spoilage molds. *Int. Food Res. J.* 20(2), 947–951.
- Suriyasak C., Hatanaka K., Tanaka H., Okumura T., Yamashita D., Attri P., Koga K., Shiratani M., Hamaoka N., Ishibashi Y., 2021. Alterations of DNA methylation caused by cold plasma treatment restore delayed germination of heat-stressed rice (*Oryza sativa* L.) seeds. *ACS Agric. Sci. Technol.* 1, 5–10. <https://dx.doi.org/10.1021/acsagscitech.0c00070>
- Szabó V., Magyar L., Hrotkó K., 2016. Effect of leaf spray treatments on rooting and quality of *Prunus mahaleb* (L.) cuttings. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* 15(1), 77–87.
- Szabó V., Németh Z., Sárvári A., Végvári G., Hrotkó K., 2014. Effect of biostimulator and leaf fertilizers on *Prunus mahaleb* L. stockplants and their cuttings. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* 13(6), 113–125.
- Śliwka M., 2005. Wykorzystanie biostymulacji laserowej roślin do zwiększenia przyrostu ich biomasy oraz zdolności bioremediacyjnych. Obieg pierwiastków w przyrodzie. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa.
- Świecimska M., Tulik M., Šerá B., Golińska P., Tomeková J., Medvecká V., Bujdaková H., Oszaiko T., Zahoranová A., Šerý M., 2020. Non-thermal plasma can be used in disinfection of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seeds infected with *Fusarium oxysporum*. *Forests* 11, 837. <https://doi.org/10.3390/f11080837>
- Šera B., Spatenka P., Šerý M., Vrchotova N., Hruskova I., 2010. Influence of plasma treatment on wheat and oat germination and early growth. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 38(10), 2963–2974.
- Šera B., Šerý M., 2018. Non-thermal plasma treatment as a new biotechnology in relation to seeds, dry fruits, and grains. *Plasma Sci. Technol.* 20, 044012. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aaacc6>
- Šera B., Zahoranová A., Bujdakova H., Šerý M., 2019. Disinfection from pine seeds contaminated with *Fusarium circinatum* Nirenberg & O'Donnell using non-thermal plasma treatment. *Rom. Rep. Phys.* 71, 701.
- Šimečková J., Krčma F., Klofáč D., Dostál L., Kozáková Z., 2020. Influence of plasma-activated water on physical and physical-chemical soil properties. *Water* 12, 2357. <https://doi.org/10.3390/w12092357>
- Šimončicová J., Kaliňáková B., Kováčík D., Medvecká V., Lakatoš B., Kryštofová S., Hoppanová L., Palušková V., Hudecová D., Ďurina P., Zahoranová A., 2018. Cold plasma treatment triggers antioxidative defense system and induces changes in hyphal surface and subcellular structure of *Aspergillus flavus*. *Appl. Microb. Biotechnol.* 102(15), 6647–6658. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9118-y>
- Škarpa P., Klofáč D., Krčma F., Šimečková J., Kozáková Z., 2020. Effect of plasma activated water foliar application on selected growth parameters of maize (*Zea mays* L.). *Water* 12, 3545. <https://doi.org/10.3390/w12123545>
- Takigawa K., Ueno K., Nagatomo T., Mitsugi F., Ikegami T., Ebihara K., Nakamura N., Hashimoto Y., Yamashita Y., 2012. Experiment of pest control with portable ozone mist device, [online:] [www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc21/ID136.pdf](http://www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc21/ID136.pdf). [dostęp: 15.04. 2021]
- Tang Q., Fang L., 2015. First report of *Trichothecium roseum* causing trunk disease of *Acer buergerianum* in China. *Plant Dis.* 99(12), 1864. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-15-0595-PDN>
- Tappi S., Berardinelli A., Ragni L., Rosa M.D., Guarnieri A., Rocculi P., 2014. Atmospheric gas plasma treatment of fresh-cut apples. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 21, 114–122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2013.09.012>
- Telesnicki M.C., Martínez-Ghersa M.A., Arneodo J.D., Ghersa C.M., 2015. Direct effect of ozone pollution on aphids: revisiting the evidence at individual and population scales. *Entomol. Exp. Appl.* 155(1), 71–79. <https://doi.org/10.1111/eea.12288>
- Telesnicki M.C., Martínez-Ghersa M.A., Ghersa C.M., 2018. Plant oxidative status under ozone pollution as predictor for aphid population growth: The case of *Metopolophium dirhodum*

- (Hemiptera: Aphididae) in *Triticum aestivum* (Poales: Poaceae). *Biochem. Syst. Ecol.* 77, 51e56. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2018.02.004>
- Terebun P., Kwiatkowski M., Starek A., Reuter S., Mok Y.S., Pawlat J., 2021. Impact of short time atmospheric plasma treatment on onion seeds. *Plasma Chem. Plasma Process.* <https://doi.org/10.1007/s11090-020-10146-3>
- Tetteh R., Yamaguchi M., Wada Y., Izuta T. 2015. Effects of ozone on growth, net photosynthesis and yield of two African varieties of *Vigna unguiculata*. *Environ Pollut.* 196, 230-238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2014.10.008>.
- Thirumdas R., Kothakota A., Annapure U., Siliveru K., Blundell R., Gatt R., Valdramidis V.P., 2018. Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. *Trends Food Sci. Technol.* 77, 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.007>
- Tiwari S., Agrawal M., 2018. Tropospheric ozone and its impacts on crop plants. Springer International Publishing 207. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71873-63>
- Tivendale N.D., Cohen J.D., 2015. Analytical history of auxin. *J. Plant Growth Regul.* 34, 708-722. <https://doi.org/10.1007/s00344-015-9519-4>
- Trajdos J., Snopczyński T., Sadowski J., 2017. Pozostałości herbicydów w roślinach uprawnych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 588, 113-127. <https://doi.org/10.22630/ZPPNR.2017.588.11>
- Trolinger J., McGovern R.J., Elmer W.H., Rechcigl N., Shoemaker C.M., 2017. Diseases of chrysanthemum. W: *Handbook of florists' crops diseases*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32374-9\\_16-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32374-9_16-1)
- Tseng C.C., Li C., 2008. Inactivation of surface viruses by gaseous ozone. *J. Environm. Health.* 70 (10), 56-62.
- Tsukamoto S., Maeda T., Ikeda M., Akiyama H., 2003. Nonthermal biological treatment using discharge plasma produced by Pulsed Power 7. Application of pulsed high voltage for mushroom culturing. *J. Plasma Fusion Res. Ser.* 79(1), 39-42. <https://doi.org/10.1585/jspf.79.39>
- Turechek W.W., Myhre O., Slovin J., Peres N.A., 2020. The use of aerated steam as a heat treatment for managing angular leaf spot in strawberry nursery production and its effect on plant yield. *PhytoFrontiers*. <https://doi.org/10.1094/PHYTOFR-08-20-0012-R>
- Turk M.A., Tawaha A.M., 2003. Allelopathic effect of black mustard (*Brassica nigra* L.) on germination and growth of wild oat (*Avena fatua* L.). *Crop Prot.* 22, 673-677. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(02\)00241-7](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(02)00241-7)
- Tyczkowska-Sieroń E., Kapica R., Markiewicz J., Tyczkowski J., 2018. Linear microdischarge jet for microbiological applications. *Plasma Med.* 8(1). <https://doi.org/10.1615/Plasma-Med.2018024459>
- Tyczkowska-Sieroń E., Markiewicz J., 2014. Inaktywacja grzybów z rodzaju *Candida* przy użyciu zimnej plazmy atmosferycznej – na drodze ku nowej metodzie eradykacji grzybic powierzchniowych. *Med. Dośw. Mikrobiol.* 66, 121-129.
- Tzortzakis N., Singleton I., Barnes J., 2008. Impact of low-level atmospheric ozone-enrichment on black spot and anthracnose rot of tomato fruit. *Post. Biol. Technol.* 47, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.06.004>
- Valiuškaite A., Uselis N., Kviklydis D., Lanauskas J., Rasiukevičiute N., 2017. The effect of sustainable plant protection and apple tree management on fruit quality and yield. *Zemdirbyste* 104(4), 353-358. <https://doi.org/10.13080/z-a.2017.104.045>
- Van Dingenen R., Dentener F.J., Raes F., Krol M.C., Emberson L., 2009. The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation. *Atmos. Environ.* 43(3), 604-618. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.033>
- Vaze N.D., Park S., Brooks A.D., Fridman A., Joshi S.G., 2017. Involvement of multiple stressors induced by non-thermal plasma-charged aerosols during inactivation of airborne bacteria. *PLoS ONE* 12(2), e0171434. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171434>

- Velichko I., Gordeev I., Shelemin A., Nikitin D., Brinar J., Pleskunov P., Choukourov A., Pazderů K., Pulkrábek J., 2019. Plasma jet and dielectric barrier discharge treatment of wheat seeds. *Plasma Chem. Plasma Process.* 39, 913–928. <https://doi.org/10.1007/s11090-019-09991-8>
- Verkley G.J.M., Quaadvlieg W., Shin H.D., Crous P.W., 2013. A new approach to species delimitation in *Septoria*. *Stud. Mycol.* 75, 213–305. <https://doi.org/10.3114/sim0018>
- Vian A., Davies E., Gendraud M., Bonnet P., 2016. Plant responses to high frequency electromagnetic fields. *BioMed Res. Int.*, 1830262. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1830262>
- Vitoratos A., Bilalis D., Karkanis A., Efthimiadou A., 2013. Antifungal activity of plant essential oils against *Botrytis cinerea*, *Penicillium italicum* and *Penicillium digitatum*. *Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj Napoca* 41(1), 86–92.
- Vlassi E., Vlachos P., Kornaros M., 2018. Effect of ozonation on table grapes preservation in cold storage. *J. Food Sci. Technol.* 55(6), 2031–2038. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3117-y>
- Volin J.C., Denes F.S., Young R.A., Park S.M.T., 2000. Modification of seed germination performance through cold plasma chemistry technology. *Crop Sci.* 40(6), 1706–1718. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.4061706x>
- Wagg S., Mills G., Hayes F., Wilkinson S., Cooper D., Davies W.J., 2012. Reduced soil water availability did not protect two competing grassland species from the negative effects of increasing background ozone. *Environ. Pollut.* 165, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.02.010>
- Wagner A., Hetman B., Kopacki M., Jamiołkowska A., Krawiec P., Lipa T., 2013. Laboratory effect of Boni Protect containing *Aureobasidium pullulans* (de Bary) Arnoud in the control of some fungal diseases of apple fruit. *Acta Agrobot.* 66(1), 77–88.
- Walorczyk S., Kopeć I., Szpyrka E., 2016. Pesticide residue determination by gas chromatography-tandem mass spectrometry as applied to food safety assessment on the example of some fruiting vegetables. *Food Anal. Methods* 9 (5), 1155–1172. <https://doi.org/10.1007/s12161-015-0292-6>
- Wang J., Song L., Gong X., Xu J., Li M., 2020. Functions of jasmonic acid in plant regulation and response to abiotic stress. *Int. J. Mol. Sci.* 21, 1446. <https://doi.org/10.3390/ijms21041446>
- Wannicke N., Wagner R., Stachowiak J., Nishime T.M.C., Ehlbeck J., Weltmann K.D., Brust H., 2021. Efficiency of plasma-processed air for biological decontamination of crop seeds on the premise of unimpaired seed germination. *Plasma Process. Polym.* 18, e2000207. <https://doi.org/10.1002/ppap.202000207>
- Wan-Norafikach O., Lee H.L., Norazizah A., Mohamed-Hafiz A., 2016. Repellency effects of an ozone-producing air purifier against medically important insect vectors. *Trop. Biomed.* 33, 396–402.
- Warrington S., 1989. Ozone enhances the growth rate of cereal aphids. *Agric. Ecosyst. Environ.* 26(1), 65–68. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(89\)90039-X](https://doi.org/10.1016/0167-8809(89)90039-X)
- Waskow A., Betschart J., Butscher D., Oberbossel G., Klöti D., Büttner-Mainik A., Adamcik J., von Rohr P.R., Schuppler M., 2018. Characterization of efficiency and mechanisms of cold atmospheric pressure plasma decontamination of seeds for sprout production. *Front. Microbiol.* 9, 3164. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03164>
- Wenzel H., 1948. Zur Erfassung des Schadenausmasses in Pflanzenschutzversuchen. *Pflanzenschutz-Ber.* 15, 81–84
- Wiktor A., Śledź M., Nowacka M., Witrowa-Rajchert D., 2013. Możliwości zastosowania niskotemperaturowej plazmy w technologii żywności. *Żywność Nauka Technol. Jakość* 5(90), 5–14.
- Williamson B., Tudzynski B., Tudzynski P., Van Kan J.A.L., 2007. *Botrytis cinerea*: the cause of grey mould disease. *Mol. Plant Pathol.* 8(5), 561–580. <https://doi.org/10.1111/J.1364-3703.2007.00417.X>
- Wise K., Gilla H., Selby-Phamb J., 2020. Willow bark extract and the biostimulant complex Root Nectar® increase propagation efficiency in chrysanthemum and lavender cuttings. *Sci. Hortic.* 263, 109108. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109108>
- Włodarek A., Robak J., 2013. Możliwości stosowania środków pochodzenia naturalnego w ochronie sałaty w uprawie polowej i pod osłonami. *Zesz. Nauk. Ins. Ogrod.* 21, 117–126.

- Włodarek A., Sobolewski J., Robak J., 2016. Possibilities of integrated protection against *Alternaria* leaf spot (*Alternaria* spp.) of Chinese cabbage using three different groups of plant protection products. *Prog. Plant Prot.* 56 (2), 150–154. <https://doi.org/10.14199/ppp-2016-025>
- Wojdyła A., Orlikowski L.B., Zdonek Z., 1988. Biologia, szkodliwość i możliwość chemicznego zwalczania *Rhizoctonia solani* Kühn na złocieniach. *Prac. Inst. Sad. i Kw. iac.* 12(B), 215–223.
- Wolny-Koładka K., Pawłat J., Terebun P., Kwiatkowski M., Diatczyk J., 2017. Ocena możliwości zastosowania plazmy niskotemperaturowej w celu higienizacji zmieszanych odpadów komunalnych służących do produkcji paliwa alternatywnego. *Prz. Elektrotech.* 93(11), 209–213. <https://doi.org/10.15199/48.2017.11.43>
- Woloshuk F., Mendez F., Maier D.E., Mason L., Woloshuk C.P., 2003. Penetration of ozone into columns of stored grains and effects on chemical performance chemical composition and processing performance. *J. Stored Prod. Res.* 39 (1), 33–44.
- Woźniak M., Gałązka A., 2019. Mikrobiom ryzosfery i jego korzystny wpływ na rośliny – aktualna wiedza i perspektywy. *Post. Mikrobiol.* 58(1), 59–69. <https://doi.org/10.21307/PM-2019.58.1.059>
- Woźny A., Rymarz D., 2017. Ukorzenianie sadzonek chryzantemy wielokwiatowej z zastosowaniem diod elektroluminescencyjnych. *Pol. J. Sustain. Dev. (Online)* 21(2), 153–160. <https://doi.org/10.15584/pjsd.2017.21.2.17>
- Xia X., Shao Y., Jiang J., Ren L., Chen F., Fang W., Guan Z., Chen S., 2014. Gene expression profiles responses to aphid feeding in chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium*). *BMC Genomics* 15(1), 1050. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-1050>
- Xiong Z., Lu X. P., Feng A., Pan Y., Ostrikov K., 2010. Highly effective fungal inactivation in He + O<sub>2</sub> atmospheric-pressure nonequilibrium plasmas. *Phys. Plasmas* 17, 123502. <https://doi.org/10.1063/1.3526678>
- Xu G.J., Chen F.D., 2009. Isolation and identification of *Alternaria* sp. causing black spot in chrysanthemum (*Dendranthema × grandiflorum*). *Jiangsu J. Agric. Sci.* 25(4), 752–757.
- Yan Y.H., Li J.L., Zhang X.Q., Yang W.Y., Wan Y., Ma Y.M., Zhu Y.Q., Peng Y., Huang L.K., 2014. Effect of naphthalene acetic acid on adventitious root development and associated physiological changes in stem cutting of *Hemarthria compressa*. *PLoS ONE* 9, e90700.
- Yang J., Erriah B., Hu C.T., Reiter E., Zhu X., Carmona-Sepulveda V.I.P., Ward M.D., Kahr B., 2020. A deltamethrin crystal polymorph for more effective malaria control. *Proc. Natl. Acad. Sci.* <https://doi.org/10.1073/pnas.2013390117>.
- Yao S.L., Ying S.H., Feng M.G., Hatting J.L. 2010. *In vitro* and *in vivo* responses of fungal bio-control agents to gradient doses of UV-B and UV-A irradiation. *BioControl* 55, 413–422. <https://doi.org/10.1007/s10526-009-9265-2>
- Yasamani Masouleh F., Barzin G., Entezari M., Davari Mahabadi T., Pishkar L., 2020. Effects of non-thermal atmospheric plasma on physiological characteristics of black cumin. *Iran. J. Plant Physiol.* 11(1), 3473–3480.
- Yemeli G.B.N., Švubová R., Kostolani D., Kyzek S., Machala Z., 2021. The effect of water activated by nonthermal air plasma on the growth of farm plants: Case of maize and barley. *Plasma Process. Polym.* 18(1), <https://doi.org/10.1002/ppap.202000205>
- Yesuraja I., Ebenezar E.G., 2021. Management of wilt disease of chrysanthemum caused by *Fusarium oxysporum* f.sp. chrysanthemi. *J. Pharmacogn. Phytochem.* 10(1), 2490–2493.
- Yeung A.W.K., Tzvetkov N.T., Jóźwik A., Horbanczuk O.K., Polgar T., Pieczynska M.D., Sampino S., Nicoletti F., Berindan-Neagoe I., Battino M., Atanasov A.G., 2020. Food toxicology: quantitative analysis of the research field literature. *Int. J. Food Sci. Nutr.* 71, 13–21. <https://doi.org/10.1080/09637486.2019.1620184>
- Zahoranová A., Henselová M., Hudecová D., Kaliňáková B., Kováčik D., Medvecká V., Černák M., 2016. Effect of cold atmospheric pressure plasma on the wheat seedlings vigor and on the inactivation of microorganisms on the seeds surface. *Plasma Chem. Plasma Process.* 36(2), 397–414.

- Zahoranová A., Hoppanova L., Simoncicova J., Tuekova Z., Medvecká V., Hudecova D., Kalinakova B., Kovacik D., Cernak M., 2018. Effect of cold atmospheric pressure plasma on maize seeds: enhancement of seedlings growth and surface microorganisms inactivation. *Plasma Chem. Plasma Process.* 38(5), 969–988. <https://doi.org/10.1007/s11090-018-9913-3>
- Zalécenia Ochrony Roślin na lata 2016–2017, t. 4: Rośliny ozdobne, rośliny zielarskie. Wyd. IOR Poznań.
- Zhang H., Zhang X., Dong C., Zhang N., Ban Z., Li L., Yu J., Hu Y., Chen C., 2020. Effects of ozone treatment on SOD activity and genes in postharvest cantaloupe. *RSC Adv.* 10, 17452–17460. <https://doi.org/10.1039/d0ra00976h>
- Zhang J., Yuan H., Yang Q., Li M., Wang Y., Li Y., Ma X., Tan F., Wu R., 2017. The genetic architecture of growth traits in *Salix matsudana* under salt stress. *Hortic. Res.* 4, 17024. <https://doi.org/10.1038/hortres.2017.24>
- Zhao S., Chen X., Deng S., Dong X., Song A., Yao J., Fang W., Chen F., 2016. The effects of fungicide, soil fumigant, bio-organic fertilizer and their combined application on chrysanthemum *Fusarium* wilt controlling, soil enzyme activities and microbial properties. *Molecules* 21, 526. <https://doi.org/10.3390/molecules21040526>
- Zhou D., Wang Z., Tu S., Chen S., Peng J., Tu K., 2019. Effects of cold plasma, UV-C or aqueous ozone treatment on *Botrytis cinerea* and their potential application in preserving blueberry. *J. Appl. Microb.* 127 (1), 175–185. <https://doi.org/10.1111/jam.14280>
- Zhou R., Lia J., Zhou R., Zhanga X., Yang S., 2019. Atmospheric-pressure plasma treated water for seed germination and seedling growth of mung bean and its sterilization effect on mung bean sprouts. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 53, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.08.006>
- Zhou Y., Deng L., Zeng K., 2014. Enhancement of biocontrol efficacy of *Pichia membranaefaciens* by hot water treatment in postharvest diseases of citrus fruit. *Crop Prot.* 63, 89–96.
- Zimowska B., Król E.D., 2018. Effect of selected preparations on growth and development *Boeremia strasseri*, the casual agent of black stem and rhizomes rot of peppermint (*Mentha piperita*). *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* 17(1), 3–12. <https://doi.org/10.24326/asphc.2018.1.1>