

Studies on reducing the causes of *Fusarium* blight of winter wheat seedlings using modern forms of sulfur, copper and bioproducts

Badania nad ograniczeniem sprawców fuzaryjnej zgorzeli siewek pszenicy ozimej z zastosowaniem nowoczesnych form siarki, miedzi i bioproduktów



DOI: 10.15199/62.2026.2.5

Terpenoid S, Cu lignosulfonate, Cu heptagluconate (single and in mixts.), and substances contg. *Bacillus velezensis* and *B. amyloliquefaciens* were used to control *Fusarium* blight of wheat seedlings and compared with the synthetic fungicide tebuconazole. In vitro tests, Cu heptagluconate and its mixt. with terpenoid S completely inhibited mycelial growth of *F. culmorum* and *F. avenaceum*, similarly to tebuconazole. Cu lignosulfonate demonstrated high efficacy, while terpenoid S alone slightly limited mycelial growth. In the blotter test, tebuconazole showed the highest efficacy in reducing seedling blight, followed by Cu lignosulfonate. Cu lignosulfonate also positively affected biometric parameters of seedlings, demonstrating dual fungicidal and biostimulating effects.

Keywords: seed treatments, *Fusarium*, seedling blight, sulphur terpenoids, copper heptagluconate, lignosulfate copper, *Bacillus*

Badaniom poddano produkty zawierające siarkę terpenoidową, lignosulfonian miedzi, heptaglukonian miedzi (pojedynczo i w mieszaninach) oraz substancje zawierające w swoim składzie *Bacillus velezensis* i *B. amyloliquefaciens*, porównując je z syntetycznym fungicydem zawierającym jako substancję czynną tebukonazol. W testach *in vitro* heptaglukonian miedzi oraz jego mieszanina z siarką terpenoidową całkowicie zahamowały wzrost grzybni *Fusarium culmorum* i *F. avenaceum* podobnie jak tebukonazol. Lignosulfonian miedzi wykazały wysoką skuteczność, natomiast sama siarka terpenoidowa nieznacznie ograniczała wzrost grzybni. W teście bibułowym największą skutecznością w ograniczaniu zgorzeli siewek charakteryzował się tebukonazol, a następnie lignosulfonian miedzi. Lignosulfonian miedzi pozytywnie wpływał również na parametry biometryczne siewek, wykazując podwójne działanie fungicydowe i biostymulujące. Wyniki wskazują, że skompleksowane formy miedzi mogą stanowić skuteczną alternatywę dla syntetycznych fungicydów w integrowanej ochronie pszenicy przed grzybami rodzaju *Fusarium*.

Słowa kluczowe: zaprawianie, *Fusarium*, zgorzel siewek, siarka terpenoidowa, heptaglukonian miedzi, lignosulfonian miedzi, *Bacillus*

Siarka i miedź od dawna odgrywają kluczową rolę w ochronie roślin, a ich związki są powszechnie stosowane jako fungicydy¹⁾. W praktyce rolniczej wykorzystuje się głównie 2 formy siarki, elementarną oraz wapno siarkowe^{2,3)}. Odzyskiwanie siarki stanowi istotny proces w przemyśle

naftowym i gazowym, polegający na usuwaniu siarkowodoru (H_2S) i jego przekształceniu w siarkę elementarną. Prowadzi się to w 2-etapowym (termicznym i katalitycznym) procesie Clausa. Alternatywą są metody biologiczne, w których bakterie, utleniając siarczki, katalizują H_2S



Dr inż. Jakub DANIELEWICZ (ORCID: 0000-0003-0252-8573) w roku 2021 uzyskał stopień doktora w dziedzinie nauk rolniczych, w dyscyplinie rolnictwo i ogrodnictwo. Jest pracownikiem Zakładu Mykologii w Instytucie Ochrony Roślin – Państwowym Instytucie Badawczym w Poznaniu. Jest cenionym ekspertem w dziedzinie stosowania fungicydów w Polsce. Specjalność – szkodliwość grzybów chorobotwórczych, badanie skuteczności fungicydów i biopreparatów, tworzenie programów ochrony roślin rolniczych oraz doradztwo w zakresie ochrony roślin.



Dr Ewa JAJOR (ORCID: 0000-0002-4412-1766) pracuje w Instytucie Ochrony Roślin – Państwowym Instytucie Badawczym w Poznaniu, gdzie prowadzi badania nad metodami chemicznej i niechemicznej ochrony upraw rzepaku, zbóż i innych roślin rolniczych przed organizmami chorobotwórczymi. Od lat zajmuje się rozwiązywaniem praktycznych problemów występujących z rolnictwie. Realizowała wiele projektów badawczych finansowanych przez polskie i zagraniczne organizacje budżetujące rozwój nauki. Jest autorką ponad 300 publikacji naukowych w czasopiśmie krajowych i zagranicznych oraz atlasów chorób roślin, metodyk i programów ochrony roślin, a także ponad 100 artykułów popularnonaukowych w prasie fachowej upowszechniającej dokonania nauki w zakresie szeroko rozumianej ochrony roślin. Specjalność – badania odporności roślin, w tym rzepaku, na patogeny.

*** Adres do korespondencji:**

Zakład Mykologii, Instytut Ochrony Roślin – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Władysława Węgorka 20, 60-318 Poznań, tel.: (61) 864-91-36, fax: (61) 864-90-01, e-mail: j.danielewicz@iorpib.poznan.pl

do biosiarki w obecności powietrza⁴). Otrzymaną siarkę elementarną mieli się i mikronizuje, a następnie tworzy zawiesiny poprawiające pokrycie roślin²). Wapno siarkowe uzyskuje się poprzez gotowanie siarki z wapnem gaszonym $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w wodzie³). Siarka elementarna, uznawana za najstarszy fungicyd, ze względu na małą toksyczność w środowisku stanowi istotny element integrowanej ochrony roślin⁵). Siarka odgrywa kluczową rolę w mechanizmach obronnych roślin, m.in. w syntezie enzymów siarkowych i glutationu, którego utlenianie może wywołać stres oksydacyjny, a tym samym zaburzać transport elektronów. Oprócz właściwości ochronnych, siarka jest także ważnym składnikiem odżywczym i pełni ważną funkcję w metabolizmie roślin^{6, 7}). Wykazano również, że obecność siarki może zwiększyć skuteczność działania miedzi¹).

Miedź jest pierwiastkiem powszechnie występującym w skorupie ziemskiej, a jej głównymi źródłami są złoża mineralne siarczkowe i tlenkowe⁸). W Polsce przeważają rudy siarczkowe, występujące głównie w obszarach woj. dolnośląskiego. Dzięki eksploatacji i zarządzaniu tymi złożami KGHM Polska Miedź SA utrzymuje silną pozycję w światowym górnictwie miedziowym. Najważniejsze minerały zawierające miedź to chalkozyn (Cu_2S), bornit (Cu_5FeS_4) i chalkopiryt (CuFeS_2). W 2024 r. bilansowe zasoby złóż miedzi w kraju wynosiły 3 547,57 mln t rudy o średniej zawartości ok. 1,5% Cu ^{9, 10}). Wydobycie miedzi prowadzone jest metodą podziemną, natomiast w procesach powierzchniowych dochodzi do rozkładu siarczków i utlenienia $\text{Cu}(\text{I})$ do $\text{Cu}(\text{II})$, czego efektem jest powstanie siarczanu miedzi. Z roztworów CuSO_4 można uzyskać zasadowy siarczan lub wodorotlenek $\text{Cu}(\text{OH})_2$, który po ogrzaniu przekształca się w tlenek CuO ⁸). Związki te, a także kompleksy miedzi z kwasem heptaglukonowym lub biopolimerami ligninowymi stosuje się w ochronie roślin¹¹). Miedź jako fungicyd zaburza aktywność enzymatyczną, przepuszczalność błon komórkowych i metabolizm energetyczny patogenów¹²). Z uwagi na możliwość akumulacji w glebie i wpływ na organizmy niecelowe, jej stosowanie ogranicza się do niezbędnych dawek¹³). Kompleksowe formy miedzi są lepiej pobierane, łatwiej przemieszczają się w roślinie i są bardziej neutralne dla środowiska¹⁴), zachowując przy tym skuteczność porównywalną z klasycznymi preparatami¹¹).

Zaprawianie nasion jest jedną z podstawowych metod ograniczania występowania chorób powodowanych przez grzyby. Obecnie dostępnych jest wiele fungicydów przeznaczonych do ochrony materiału siewnego¹⁵). Jedną z ważniejszych substancji czynnych fungicydów jest tebukonazol należący do grupy chemicznej triazoli. Jako inhibitor demetylacji steroli blokuje aktywność enzymu 14α -demetylasy i stanowi jedną z substancji czynnych (s.cz.) szeroko stosowanych, wykazujących silne działanie ograniczające rozwój grzybów chorobotwórczych^{16, 17}). Jednak środki chemiczne mogą osłabić wigor i wzrost roślin, zaburzyć aktywność mikroorganizmów glebowych, a ich nadmierne stosowanie prowadzi do akumulacji substancji chemicznych w środowisku oraz rozwoju odporności u patogenów na stosowane substancje^{15, 18, 19}).

Z tego względu coraz częściej poszukuje się alternatyw, takich jak bioprodukty lub produkty na bazie związków miedzi i siarki^{11, 20}). Bakterie *Bacillus velezensis* i *Bacillus amyloliquefaciens* należą do grupy ryzobakterii wspomagających wzrost roślin i wykazują działanie ograniczające rozwój grzybów chorobotwórczych^{21, 22}). *B. velezensis* produkuje metabolity wtórne, m.in. lipopeptydy i poliketyny, które hamują rozwój patogenów oraz aktywują odporność systemową roślin²⁰). Istotną rolę w ograniczaniu wzrostu patogenów odgrywają również mikroorganizmy *B. amyloliquefaciens*, zdolne do syntezy sideroforów, proteazy, katalazy i chitynazy²³).

Areał uprawy zbóż na świecie zapewnia utrzymanie globalnego bezpieczeństwa żywnościowego²⁴). Spośród uprawianych zbóż największy areał zajmuje pszenica, która jest ważnym źródłem energii i białka²⁵). Wśród patogenów zagrażających uprawom szczególnie groźne są grzyby rodzaju *Fusarium*: *F. avenaceum* (Fr.) Sacc. i *F. culmorum* (W.G.Sm.) Sacc. Mogą one powodować skażenie ziarna mykotoksynami, takimi jak: deoksyniwalenol (DON) i niwalenol (NIV)²⁶⁻²⁸). Grzyby rodzaju *Fusarium* są głównymi sprawcami zgorzeli siewek w zbożach i stanowią poważne zagrożenie we wczesnych fazach rozwojowych roślin, prowadząc do obniżenia wschodów, zahamowania wzrostu oraz znacznych strat plonów^{29, 30}). Szczególnie *F. culmorum* oraz *F. graminearum* są odpowiedzialne za zgorzel siewek, fuzaryjną zgorzel podstawy źdźbła i korzeni, fuzariozę kłosów, co w konsekwencji wpływa na jakość i ilość uzyskiwanych



Dr inż. Joanna HOROSZKIEWICZ (ORCID: 0000-0002-2964-4593) pracuje w Instytucie Ochrony Roślin – Państwowym Instytucie Badawczym w Poznaniu. Jest autorką ok. 150 publikacji naukowych. Jest również redaktorem kilkunastu monografii oraz recenzentem prac naukowych, a także promotorem prac realizowanych na studiach podyplomowych oraz promotorem pomocniczym prac doktorskich. Specjalność – metody chemicznej i niechemicznej ochrony upraw roślin rolniczych przed patogenami.



Prof. dr hab. Marek KORBAS (ORCID: 0000-0002-5536-1853) w roku 2012 otrzymał tytuł profesora nauk rolniczych. Jest autorem wielu prac naukowych i popularnonaukowych z zakresu chorób roślin rolniczych i zwalczania ich sprawców. Jest często zapraszany prelegentem i popularyzatorem fachowej wiedzy o nowoczesnej ochronie roślin przed sprawcami chorób na konferencjach i szkoleniach organizowanych dla pracowników naukowych, służb rolniczych, służb ochrony roślin i rolników. Specjalność – choroby roślin rolniczych i ogrodniczych.

zbiorów^{30, 31}). Złożoność problemu wymienionych patogenów oraz ich zdolność do produkcji mykotoksyn dodatkowo komplikuje ich zwalczanie^{31, 32}).

Celem pracy była ocena zastosowania nowoczesnych form siarki, miedzi i produktów zawierających bakterie rodzaju *Bacillus* w ograniczaniu rozwoju sprawców fuzaryjnej zgorzeli siewek pszenicy.

Część doświadczalna

Materiały

W badaniach materiał stanowiło 7 produktów zawierających siarkę terpenoidową oraz 2 formy miedzi: lignosulfonian miedzi i heptaglukonian miedzi, zastosowane pojedynczo i w mieszaninie z siarką terpenoidową, oraz bakterie: *B. velezensis* i *B. amyloliquefaciens*. Działanie zastosowanych w doświadczeniu kombinacji badawczych porównano z syntetycznym fungicydem zawierającym tebukonazol, substancję czynną z grupy chemicznej triazoli. W badaniach wykorzystano 6 izolatów grzybów rodzaju *Fusarium* wyizolowanych z ziarna pszenicy: *F. culmorum* – 3 (nr izolatów: 018Fc/2024, 019Fc/2024, 024Fc/2025) oraz *F. avenaceum* – 3 (nr izolatów: 14Fa/2024, 17Fa/2025, 33Fa/2025), z kolekcji Zakładu Mykologii IOR-PIB.

Materiał roślinny do badań wzrostu grzybnii pozyskano, pobierając kłosa z pól pszenicy w latach 2024–2025 w woj. wielkopolskim.

Metodyka badań

Badanie wzrostu grzybnii *in vitro*

Wykonano 2 typy doświadczeń, na które składały się badania wzrostu grzybnii *Fusarium* spp. w warunkach *in vitro* oraz test bibułowy, w którym oceniano skuteczność produktów w ograniczaniu głównych sprawców fuzaryjnej zgorzeli siewek (*Fusarium* spp.) oraz ich wpływ na cechy biometryczne siewek pszenicy. Charakterystykę zastosowanych w obu doświadczeniach kombinacji eksperymentalnych oraz ich dawki podano w tabeli 1.

Ziarniaki pobrane z porażonych kłosów odkażono, a następnie umieszczono na podłożu PDA (*potato dextrose agar*). Kolonie grzybów wyrastające z fragmentów materiału roślinnego przeszczepiono i poddano dalszej inkubacji. Grzyby identyfikowano na podstawie oceny cech morfologicznych kolonii i makrokonidiów, wykorzystując dostępne klucze mykologiczne. Uzyskane jednozarodnikowe izolaty *F. culmorum* (3) i *F. avenaceum* (3) przechowywane były w laboratorium Zakładu Mykologii Instytutu Ochrony Roślin – PIB.

Testowane produkty dodawano do sterylnego podłoża agarowo-glukozowo-ziemniaczanego (PDA) schłodzonego do 45°C w takich ilościach, aby uzyskać odpowiednie stężenie substancji czynnej odpowiadające warunkom polowym (tabela 1). Otrzymaną mieszaninę pożywki i testowanych środków wylewano na płytki Petriego. Kombinację kontrolną stanowiło czyste podłoże PDA (bez dodatku bada-

Table 1. Experimental combinations used in both experiments and their characteristics

Tabela 1. Zastosowane w obu doświadczeniach kombinacje eksperymentalne i ich charakterystyka

Kombinacja	Zawartość	Dawka w testach	
		<i>in vitro</i> odpowiadająca dawce polowej, L/ha	bibułowym do zaprawiania ziarna, L/100 kg ziarna*
Siarka terpenoidowa	zawartość S 760 g/L	2,0	2,0
Lignosulfonian miedzi	zawartość Cu 60 g/L, skomplexowana z lignosulfonianem	1,0	1,0
Heptaglukonian miedzi	zawartość Cu 70 g/L, skomplexowana z kwasem heptaglukonowym	1,0	1,0
Siarka terpenoidowa + lignosulfonian miedzi	j.w.	2,0 + 1,0	2,0 + 1,0
Siarka terpenoidowa + heptaglukonian miedzi	j.w.	2,0 + 1,0	2,0 + 1,0
<i>Bacillus velezensis</i> szczep KT 27	8,0 · 10 ⁸ CFU/L	1,0	1,0
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> szczep QST 713	5,5 · 10 ¹⁰ CFU/L	2,0	2,0
Tebukonazol	60 g/L	0,5	0,05
Kontrola	-	-	-

*+ 500 mL H₂O



Dr hab. Roman KIERZEK, prof. IOR-PIB (ORCID: 0000-0001-9373-7703), jest dyrektorem Instytutu Ochrony Roślin – Państwowego Instytutu Badawczego. Jego główne obszary badawcze obejmują optymalizację stosowania herbicydów w uprawach polowych i małoobszarowych, wpływ adiuwantów i techniki aplikacji na efektywność zabiegów, badania odporności chwastów na herbicydy oraz ocenę nowych metod zwalczania chwastów. Specjalność – techniki ochrony roślin, ze szczególnym uwzględnieniem regulacji zachwaszczenia w uprawach rolniczych.



Dr inż. Monika GRZANKA (ORCID: 0000-0003-1470-7026) w roku 2018 ukończyła studia z zakresu rolnictwa na Wydziale Rolnictwa i Bioinżynierii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Stopień doktora w dziedzinie nauk rolniczych, w dyscyplinie rolnictwo i ogrodnictwo uzyskała w 2022 r. Pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Agronomii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Specjalność – ochrona roślin, zmiany formy substancji aktywnej lub parametrów cieczy opryskowej, stres roślin wywołany przez różne czynniki, selektywność preparatów w stosunku do roślin uprawnych oraz biologiczna ochrona i biostymulacja roślin.

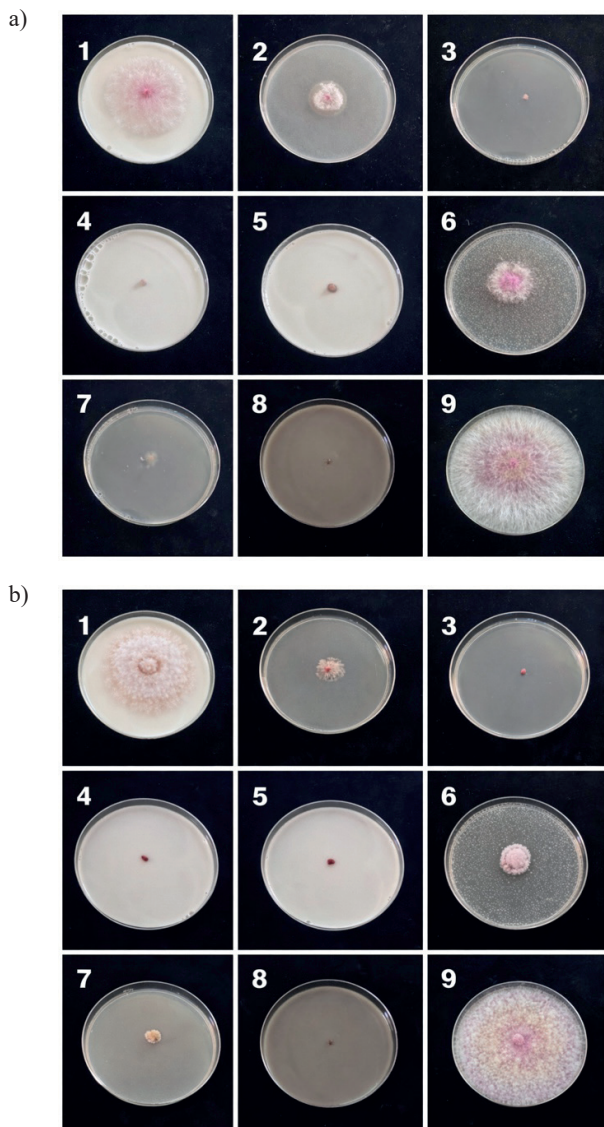


Fig. 1. Growth of *F. culmorum* (a) and *F. avenaceum* (b) on PDA medium; numbers in the image correspond to the combination numbers

Rys. 1. Wzrost *F. culmorum* (a) i *F. avenaceum* (b) na pożywce PDA; liczby na zdjęciu odpowiadają numerom kombinacji

nych substancji). Krążki poszczególnych kultur izolatów *F. culmorum* oraz *F. avenaceum* o średnicy 4 mm umieszczano na zestalonym podłożu w płytkach Petriego, w ich centralnej części. Płytki inkubowano w temp. 20°C w kontrolowanych warunkach komory Binder (Sanyo Electric Japan – Incubator MIR-254, PHC Europe BV, Etten-Leur, Holandia). Inkubację prowadzono w temp. 20°C przez 14 h

w dzień i w 14°C przez 10 h w nocy, przy wilgotności 50%. Doświadczenie przeprowadzono w 3 powtórzeniach w 3 seriach, a wyniki stanowią średni wynik z przeprowadzonych doświadczeń dla wymienionych 3 izolatów 2 badanych gatunków *Fusarium*. Średnicę kultur w każdej kombinacji mierzono po zarosnięciu przez grzybnę powierzchni podłoża w danym obiekcie kontrolnym. Obliczano średni wzrost grzybni w mm oraz procent hamowania wzrostu grzybni wg wzoru (1):

$$\text{Procent hamowania} = \frac{[(\text{Kontrola} - \text{Kombinacja}) / \text{Kontrola}] \cdot 100}{(1)}$$

Wyniki analizowano statystycznie za pomocą jednoczynnikowej analizy wariancji (ANOVA) oraz testu Kruskala i Wallisa w celu oceny istotności różnic między kombinacjami. Zastosowano test *t*-Studenta dla porównania każdej kombinacji z kontrolą nietraktowaną, na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Test bibułowy

W teście bibułowym wykorzystano ziarno pszenicy ozimej (*Triticum aestivum* L.) odmiany Euforia. Ziarniaki inokulowano uprzednio przygotowaną zawiesiną grzybni i zarodników *F. culmorum* oraz *F. avenaceum* o stężeniu 10^6 w 1 mL, a następnie osuszano. Do przygotowania inokulum wykorzystano mieszaninę wymienionych 6 izolatów *Fusarium* spp. otrzymanych poprzez hodowlę czystych kultur na PDA. Tak przygotowane ziarniaki zaprawiano testowanymi produktami za pomocą laboratoryjnej zaprawiarki HEGE 11 (Wintersteiger, Bad Sassendorf, Niemcy) przeznaczonej do zaprawiania małych ilości nasion różnymi typami zapraw (tabela 1).

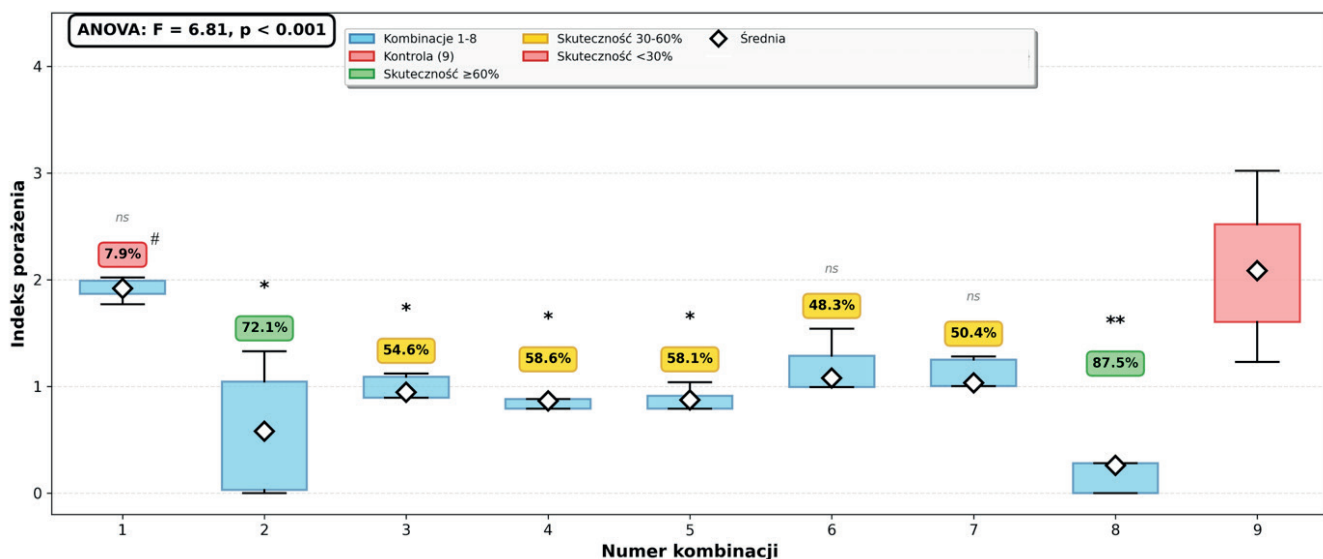
Zaprawione ziarno umieszczano na zwilżonej bibule filtracyjnej w odstępach 2 cm, po 25 ziarniaków dla powtórzenia, a następnie delikatnie zawijano. Test przeprowadzono w 4 powtórzeniach na kombinację, w 2 seriach. Rulony przygotowane z bibuły filtracyjnej umieszczano w szafie termostaticznej, gdzie zapewniono stałą wilgotność oraz temp. 21°C. Inkubację prowadzono przez 10 dni. Po jej zakończeniu przeprowadzono ocenę wizualną porażenia siewek wg skali określającej stopień nasilenia objawów chorobowych (w skali od I do IV, gdzie IV to całkowicie porażony ziarniak i siewka). Obliczono indeks porażenia (*IP*) oraz skuteczność działania badanych produktów wg wzoru Abbotta (2):



Dr hab. Łukasz SOBIECH, prof. UPP (ORCID: 0000-0002-2584-9911), w roku 2008 ukończył studia na Wydziale Rolnictwa Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, uzyskując stopień magistra rolnictwa. W 2013 r. uzyskał stopień doktora nauk rolniczych, a w 2021 r. stopień doktora habilitowanego w dziedzinie nauk rolniczych, w dyscyplinie rolnictwo i ogrodnictwo na Wydziale Rolnictwa, Ogrodnictwa i Bioinżynierii UPP. Pracuje na stanowisku profesora w Katedrze Agronomii UPP. Specjalność – zagadnienia związane z ochroną roślin, ze szczególnym uwzględnieniem problemów uodpornienia chwastów na herbicydy oraz wykorzystania adiuwantów w praktyce rolniczej, a także formułację środków ochrony roślin i nawozów oraz niechemiczna ochrona roślin.



Dr hab. Zuzanna SAWINSKA, prof. UPP (ORCID: 0000-0002-7030-3221) w roku 1999 ukończyła studia na Wydziale Rolniczym (obecnie Wydział Rolnictwa, Ogrodnictwa i Biotechnologii) obecnego Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Pracuje na stanowisku profesora w Katedrze Agronomii tej uczelni. Specjalność – agronomia, ochrona roślin, szczególnie ochrona fungicydowa, usługi ekosystemowe, systemy uprawy roli.



Istotność różnic w porównaniu z kontrolą oznaczono gwiazdkami: *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$, ns – różnice nieistotne statystycznie (test t-Studenta). # – inhibicja wyrażona jako procent redukcji w porównaniu z kontrolą nietraktowaną

Fig. 2. The effect of the tested products on reducing the occurrence of *Fusarium* seedling blight caused by *Fusarium* spp.; numbers on the chart correspond to the combination numbers

Rys. 2. Wpływ badanych produktów na ograniczanie występowania zgorzeli siewek powodowanej przez *Fusarium* spp.; liczby na wykresie odpowiadają numerom kombinacji

$$IP = \frac{(n_{II} \times 0,25) + (n_{III} \times 0,75) + (n_{IV} \times 1,0)}{n_I + n_{II} + n_{IV}} \quad (2)$$

w którym I oznacza brak objawów, II porażenie < 50% powierzchni siewki, III porażenie > 50% powierzchni siewki, a IV porażenie 100% powierzchni siewki.

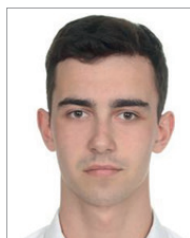
Następnie wykonano pomiary biometryczne dla 10 losowo wybranych siewek z każdej kombinacji doświadczalnej. Mierzono następujące cechy morfologiczne: (i) wysokość części nadziemnej (cm), (ii) długość korzenia (cm), (iii) masę świeżą części nadziemnej (g) i (iv) masę świeżą korzenia (g). Dla parametrów biometrycznych obliczono średnie wartości wraz z odchyleniami standardowymi.

Wyniki badań i ich omówienie

Zastosowane w doświadczeniu *in vitro* nowoczesne formy związków mineralnych, takie jak siarka terpenoidowa, heptaglukonian miedzi, lignosulfonian miedzi i ich mieszaniny, oraz produktów zawierających bakterie *B. amy-*

loliquefaciens i *B. velezensis* wpłynęły na hamowanie wzrostu grzybni *F. culmorum* i *F. avenaceum* (tabela 2, rys. 1). Syntetyczna substancja czynna, tebukonazol, całkowicie zahamowała wzrost grzybni obu badanych grzybów rodzaju *Fusarium*. Oprócz kombinacji porównawczej całkowite zahamowanie wzrostu grzybni obu badanych gatunków grzybów stwierdzono po dodaniu do pożywki agarowo-glukozowo-ziemniaczanej heptaglukonianu miedzi oraz mieszaniny heptaglukonianu miedzi z siarką terpenoidową, a dla izolatów *F. avenaceum* także mieszaniny lignosulfonianu miedzi z siarką terpenoidową.

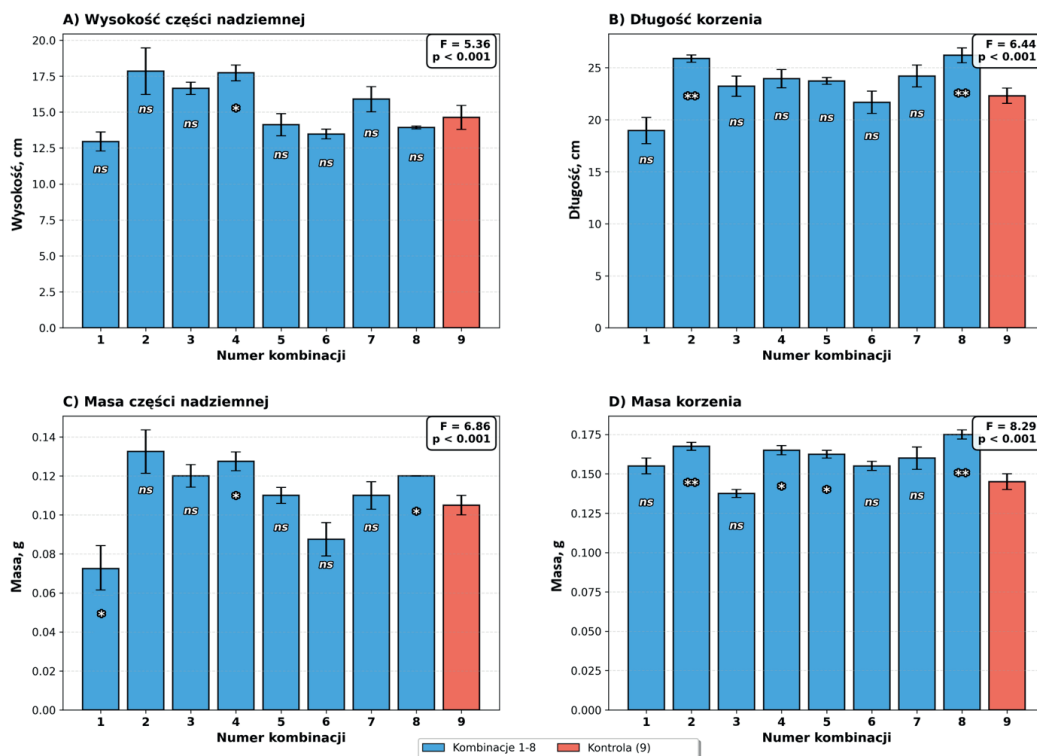
Całkowita inhibicja wzrostu grzybni *F. culmorum* i *F. avenaceum* po zastosowaniu heptaglukonianu miedzi oraz jego mieszaniny z siarką terpenoidową jest zgodna z doniesieniami innych autorów wskazującymi na przewagę form skompleksowanych nad tradycyjnymi związkami miedzi. Grzanka i współpr.¹¹⁾ wykazali, że preparaty zawierające heptaglukonian miedzi i lignosulfonian miedzi skutecznie hamowały rozwój patogenów *Fusarium* na poziomie porównywalnym z fungicydem z grupy chemicznej triazoli.



Mgr inż. Arkadiusz FILIPCZAK (ORCID: 0009-0009-8899-4938) w roku 2023 ukończył studia na kierunku rolnictwo na Wydziale Rolnictwa, Ogrodnictwa i Biotechnologii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Od 2023 r. jest doktorantem w Szkole Doktorskiej tej samej uczelni, gdzie realizuje pracę doktorską dotyczącą wykorzystania preparatów mikrobiologicznych w stymulacji wzrostu oraz ochronie roślin w Katedrze Agronomii. Specjalność – ochrona roślin, ze szczególnym uwzględnieniem metod niechemicznych, biostymulacji roślin oraz reakcji roślin uprawnych na różne czynniki stresowe; rozwiązania wpisujące się w koncepcję rolnictwa regeneratywnego.



Prof. dr hab. Jan BOCIANOWSKI (ORCID: 0000-0002-0102-0084) w roku 1998 ukończył studia na Wydziale Matematyki i Informatyki Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu, po których podjął pracę w Pracowni Biometrii Instytutu Genetyki Roślin PAN w Poznaniu. W 2004 r. uzyskał stopień doktora nauk rolniczych. W 2005 r. rozpoczął pracę w Katedrze Metod Matematycznych i Statystycznych Akademii Rolniczej im. A. Cieszkowskiego w Poznaniu (obecnie Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu). W 2014 r. uzyskał stopień doktora habilitowanego w dziedzinie nauk rolniczych, w dyscyplinie agronomia, specjalność biometria. W 2025 r. otrzymał tytuł profesora nauk rolniczych w dyscyplinie rolnictwo i ogrodnictwo. Specjalność – opracowywanie nowych oraz stosowanie istniejących metod statystycznych i matematycznych w badaniach dotyczących wielu dziedzin (m.in.: genetyka i hodowla roślin i zwierząt, biologia, ochrona roślin, agronomia, stomatologia, technologia drewna).



Istotność różnic w porównaniu z kontrolą: *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$ (test t-Studenta); wszystkie parametry wykazały istotne różnice między kombinacjami (ANOVA, $p < 0,001$)

Fig. 3. The effect of the tested products on the biometric parameters of plants; numbers on the chart correspond to the combination numbers

Rys. 3. Wpływ badanych produktów na parametry biometryczne roślin; liczby na wykresie odpowiadają numerom kombinacji

Table 2. Average mycelium growth (mm) \pm SD for the studied *Fusarium* fungi (in vitro)

Tabela 2. Wpływ badanych produktów na średni wzrost \pm SD grzybni izolatów *Fusarium* spp. w warunkach in vitro

Obiekt	Ograniczanie wzrostu grzybni rodzaju <i>Fusarium</i>			
	<i>F. culmorum</i> , mm (średnia \pm SD)	procent hamowania, %	<i>F. avenaceum</i> , mm (średnia \pm SD)	procent hamowania, %
Siarka terpenoidowa	47,3 \pm 6,2**	47,4	68,3 \pm 14,2 ns	24,1
Lignosulfonian miedzi	5,0 \pm 2,5***	94,4	10,0 \pm 0,0***	88,9
Heptaglukonian miedzi	0,0 \pm 0,0***	100,0	0,0 \pm 0,0***	100,0
Siarka terpenoidowa + lignosulfonian miedzi	7,0 \pm 1,0***	92,2	0,0 \pm 0,0***	100,0
Siarka terpenoidowa + heptaglukonian miedzi	0,0 \pm 0,0***	100,0	0,0 \pm 0,0***	100,0
<i>Bacillus velezensis</i>	32,7 \pm 2,7***	63,7	19,0 \pm 0,6***	78,9
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	25,7 \pm 1,2***	71,5	12,0 \pm 1,0***	86,7
Tebukonazol	0,0 \pm 0,0***	100,0	0,0 \pm 0,0***	100,0
Kontrola	90,0 \pm 0,0	0,0	90,0 \pm 0,0	0,0

Istotność różnic: *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$, ns – nieistotne (test t-Studenta); inhibicja wyrażona jako procent redukcji wzrostu w porównaniu z kontrolą

Drugi wynik dla obu badanych grzybów, poza wymienionymi powyżej kombinacjami, w których zastosowane związki wpłynęły na całkowitą inhibicję, uzyskano po



Dr hab. Stanisław PARAFINIUK, prof. UPL (ORCID: 0000-0002-8566-6527) pracuje w Katedrze Eksploatacji Maszyn i Zarządzania Procesami Produkcyjnymi na Wydziale Inżynierii Produkcji Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Jest twórcą autorskiej koncepcji elektronicznego stołu rowkowego – stacji diagnostycznej wykorzystywanej do certyfikacji rozpylaczy polowych. Jego badania obejmują również zagadnienia związane z biomasą i energetyką odnawialną, w tym peletowanie biomasy zielonej. Jest członkiem kolegium Wydziału Inżynierii Produkcji i aktywnie uczestniczy w życiu akademickim uczelni. Specjalność – inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz nauki chemiczne.

do dodania do pożywki lignosulfonianu miedzi. Wartości ograniczania wzrostu grzybni wynosiły 94,4% dla *F. culmorum* i 88,9% dla *F. avenaceum*. Zastosowana bez dodatku związków miedzi siarka terpenoidowa ograniczała wzrost grzybni *F. culmorum* o 47,4%, a w przypadku *F. avenaceum* o 24,1%. Trzeba zaznaczyć, że dla tego związku stwierdzono największe odchylenie standardowe spośród kombinacji dla obu badanych grzybów.

Zastosowane w badaniach preparaty zawierające bakterie *Bacillus* spp. wykazały zróżnicowaną skuteczność. Bakterie lepiej ograniczały wzrost *F. avenaceum* (86,7% dla *B. amyloliquefaciens* i 78,9% dla *B. velezensis*) niż *F. culmorum* (odpowiednio 71,5 i 63,7%), co mogło wskazywać na specyficzność gatunkową działania tych mikroorganizmów.

Table 3. Percentage change in biometric parameters compared to the control without the tested products (positive values indicate growth stimulation, negative values its inhibition)

Tabela 3. Procentowa zmiana parametrów biometrycznych względem kontroli nietraktowanej badanymi produktami (wartości dodatnie oznaczają stymulację wzrostu, wartości ujemne jego hamowanie)

Obiekt	Parametry biometryczne			
	wysokość źdźbła, cm	długość korzenia, cm	masa źdźbła, g	masa korzenia, g
Siarka terpenoidowa	-11,5%	-15,0%	-31,0%*	+6,9%
Lignosulfonian miedzi	+22,1%	+16,0%**	+26,2%	+15,5%**
Heptaglukonian miedzi	+13,8%	+4,1%	+14,3%	-5,2%
Siarka terpenoidowa + lignosulfonian miedzi	+21,2%*	+7,4%	+21,4%*	+13,8%*
Siarka terpenoidowa + heptaglukonian miedzi	-3,4%	+6,4%	+4,8%	+12,1%*
<i>Bacillus velezensis</i>	-7,9%	-2,8%	-16,7%	+6,9%
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	+8,7%	+8,5%	+4,8%	+10,3%
Tebukonazol	-4,8%	+17,5%**	+14,3%*	+20,7%**

Istotność: *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$ (test t-Studenta)

Jednakże w teście bibułowym skuteczność obu preparatów bakteryjnych w ograniczaniu zgorzeli siewek wynosiła ok. 50%. Wpływ na większość parametrów biometrycznych dla *B. velezensis* był negatywny, natomiast dla *B. amyloliquefaciens* zanotowano wzrost parametrów biometrycznych o 5–10% w porównaniu z kontrolą.

Zaprawianie nasion stanowi jedną z podstawowych metod ograniczania występowania chorób powodowanych przez patogeny występujące w glebie i materiale siewnym^{33, 34}. W przeprowadzonym teście bibułowym preparaty zastosowane do zaprawiania ziarna pszenicy, inokulowanego wcześniej mieszaniną zarodników grzybów rodzaju *Fusarium*, wykazały zróżnicowane działanie w ograniczaniu sprawców fuzaryjnej zgorzeli siewek (rys. 2). Najlepiej rozwój sprawców choroby ograniczyło zastosowanie tebukonazolu jako s.c.z., uzyskano 87,5% skuteczności (indeks porażenia 0,26). Zastosowanie do zaprawiania ziarna produktu zawierającego lignosulfonian miedzi również istotnie statystycznie wpłynęło na ograniczenie choroby, indeks porażenia wynosił 0,58 (skuteczność 72,1%). Istotne statystycznie różnice i ponad 50% skuteczności ograniczania fuzaryjnej zgorzeli siewek zanotowano także po aplikacji do zaprawiania ziarna pszenicy mieszaniny siarki terpenoidowej z lignosulfonianem miedzi (58,6%) i z heptaglukonianem (58,1%) oraz heptaglukonianem zastosowanym pojedynczo (54,6%).

Balmas i współpr.³⁵ badali zastosowanie tebukonazolu skompleksowanego z β -cyklodekstryną w zwalczaniu fuzaryjnej zgorzeli podstawy źdźbła pszenicy twardej, wykazując wysoką skuteczność tego rozwiązania. Jednakże jak podkreślają Lamichhane i współpr.¹²) oraz Kachhap i współpr.³⁶), konieczne jest poszukiwanie alternatyw dla syntetycznych fungicydów ze względu na rosnące ograniczenia regulacyjne, rozwój odporności patogenów oraz wymogi dotyczące redukcji chemicznych środków ochrony roślin.

Rozbieżność między wynikami dotyczącymi skuteczności ograniczania rozwoju grzybów rodzaju *Fusarium in vitro* a tymi otrzymanymi w teście bibułowym może wynikać z różnic w warunkach doświadczalnych oraz z faktu, że skuteczność bioproduktów jest silnie uzależniona od

warunków środowiskowych, w tym temperatury, wilgotności i obecności innych mikroorganizmów^{29, 30}.

W przeprowadzonym doświadczeniu oprócz oceny zdrowotności wykonano także pomiary biometryczne siewek wyrosłych z inokulowanych, a następnie zaprawionych ziarniaków. Ocena wysokości źdźbła wykazała, że największe siewki wyrosły po zaprawieniu ziarna lignosulfonianem miedzi, średnio 17,85 cm (rys. 3). Wykonane pomiary biometryczne długości korzeni wykazały istotną różnicę po zastosowaniu do zaprawiania tebukonazolu, średnio 26,20 cm, oraz lignosulfonianu miedzi 25,88 cm (rys. 3). Analiza masy źdźbła wykazała największy wpływ lignosulfonianu miedzi, mieszaniny siarki terpenoidowej z lignosulfonianem miedzi oraz *ex aequo* heptaglukonianu miedzi i tebukonazolu (rys. 3). Średnia waga siewki wynosiła odpowiednio 0,133, 0,128 i 0,120 g. Średnio największą masę korzenia stwierdzono u siewek zaprawionych tebukonazolem (0,175 g). Na tym samym poziomie istotności, różnice stwierdzono po zastosowaniu produktu zawierającego lignosulfonian miedzi (0,168 g). Przy niższym poziomie istotności ($p < 0,05$) stwierdzono różnice po zaprawieniu ziarna mieszaninami siarki terpenoidowej z lignosulfonianem miedzi oraz heptaglukonianem miedzi, które wynosiły odpowiednio 0,165 i 0,162 g.

Wurzer i współpr.³⁷) podkreślają potencjał lignosulfonianów w rolnictwie jako biostymulatorów wspierających rozwój roślin. W przeprowadzonych badaniach zaobserwowano, że lignosulfonian miedzi nie tylko skutecznie ograniczał rozwój patogenów, ale także pozytywnie wpływał na parametry biometryczne siewek pszenicy, co sugeruje jego podwójne działanie, zarówno fungicydowe, jak i biostymulujące.

Podsumowując wszystkie badane cechy biometryczne, największe różnice w porównaniu z kontrolą uzyskano, stosując lignosulfonian miedzi (16,0–26,2% wzrostu w stosunku do kontroli) oraz mieszaninę siarki terpenoidowej z lignosulfonianem miedzi (7,4–21,4%) (tabela 3). W przypadku tebukonazolu dla 3 badanych cech biometrycznych wartości te wynosiły 14,3–20,7%.

Jeden z badanych do zaprawiania produktów na 4 spośród badanych cech biometrycznych uzyskał wartości mniejsze

niż w kombinacji kontrolnej dla wysokości źdźbła, długości korzenia oraz masy źdźbła (tabela 3). Dotyczyło to eksperymentalnego zastosowania preparatu zawierającego siarkę terpenoidową. Uzyskane wyniki badań z testu bibułowego wskazują na nieprzydatność tego produktu do zastosowania w formie zaprawy do zwalczania fuzaryjnej zgorzeli siewek. Dane te pokrywają się z uzyskanymi wynikami skuteczności ograniczania fuzaryjnej zgorzeli siewek, która wynosiła 7,9%.

Podsumowanie

Wyniki badań wskazują, że preparaty zawierające heptaglukonian i lignosulfonian miedzi, zwłaszcza w kombinacji z siarką terpenoidową, mogą być skutecznie wykorzystywane, po sprawdzeniu w warunkach polowych, w integrowanych programach ochrony pszenicy przed grzybami rodzaju *Fusarium*. Ich zastosowanie może przyczynić się do zmniejszenia stosowania syntetycznych fungicydów, zapobiegania rozwojowi odporności patogenów, poprawy kondycji siewek poprzez dostarczanie składników odżywczych oraz ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko. Wymaga to jednak potwierdzenia w warunkach polowych uwzględniających różne warunki glebowo-klimatyczne i ocenę długoterminowego wpływu na mikrobiom glebowy, optymalizacji dawek i terminów aplikacji, a także badania nad możliwością łączenia różnych metod w strategiach integrowanych.

Bakterie rodzaju *Bacillus* mogą natomiast stanowić wartościowe uzupełnienie strategii ochrony, szczególnie w systemach rolnictwa ekologicznego lub jako element rotacji z syntetycznymi fungicydami. Jednak ich skuteczność w warunkach polowych może być zmienna i wymaga dalszych badań nad optymalizacją formułacji, metod aplikacji i warunków przechowywania.

Badania sfinansowano ze środków Instytutu Ochrony Roślin – Państwowego Instytutu Badawczego w Poznaniu.

Otrzymano: 30-12-2025 Zrecenzowano: 13-01-2026
Zaakceptowano: 14-01-2026 Opublikowano: 17-02-2026

LITERATURA

- [1] G. Bleyer, S. Schumacher, R. Fuchs, *OENO One* 2024, **58**, nr 1, 1, DOI: 10.20870/oenone.2024.58.1.7429.
- [2] S.M. Griffith, J.E. Woodrow, J.N. Seiber, *Pest. Manag. Sci.* 2015, **71**, nr 11, 1485, DOI: 10.1002/ps.4067.
- [3] <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/LimeSulfurTR2015.pdf>, dostęp 27.10.2025 r.
- [4] M. Abdel Hamid, T.M. Aboul-Fotouh, M.A. El-Shafie, *J. Eng. Appl. Sci.* 2024, **71**, 27, DOI: 10.1186/s44147-023-00356-9.
- [5] J.S. Williams, R.G. Cooper, *Plant Pathol.* 2004, **53**, nr 3, 263, DOI: 10.1111/j.0032-0862.2004.01010.x.
- [6] O.P. Narayan, P. Kumar, B. Yadav, M. Dua, A.K. Johri, *Plant Signal. Behav.* 2023, **18**, nr 1, 2030082, DOI: 10.1080/15592324.2022.2030082.
- [7] T. Wang, Y. Yang, M. Liu, H. Liu, H. Liu, Y. Xia, L. Xun, *Antioxidants* 2022, **11**, nr 3, 576, DOI: 10.3390/antiox11030576.
- [8] <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/NOPCopperProductsTR2022.pdf>, dostęp 28.10.2025 r.
- [9] Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Rudy miedzi i srebra, <https://www.pgi.gov.pl/surowce/metaliczne/rudy-cu-ag.html>, dostęp 31.10.2025 r.
- [10] KGHM Polska Miedz SA, The Management Board's Report on the Activities of the Company and the Group in 2024, Lubin, 2025. <https://kghm.com/sites/default/files/2025-03/MBs%20report%20on%20activities%20in%202024.pdf>, dostęp 31.10.2025 r.
- [11] M. Grzanka, Ł. Sobiech, A. Filipczak, J. Danielewicz, E. Jajor, J. Horoszkiewicz, M. Korbas, *Agriculture* 2024, **14**, 139, DOI: 10.3390/agriculture14010139.
- [12] J.R. Lamichhane, E. Osdaghi, F. Behlau, J. Köhl, J.B. Jones, J.N. Aubertot, *Agron. Sustain. Dev.* 2018, **38**, 28, DOI: 10.1007/s13593-018-0503-9.
- [13] K. Weitbrecht, S. Schwab, C. Rupp, E. Bieler, M. Dürrenberger, G. Bleyer, S. Schumacher, H. Kassemeyer, R. Fuchs, E. Schlücker, *Crop Prot.* 2021, **139**, 105382, DOI: 10.1016/j.cropro.2020.105382.
- [14] A.I. González-Hernández, E. Llorens, C. Agustí-Brisach, B. Vicedo, T. Yuste, A. Cerveró, C. Ledó, P. García-Augustin, L. Lepeña, *Proc. 18th Int. Conf. Organic Fruit-Growing*, Hohenheim 2018.
- [15] K. Kardava, V. Tetz, M. Vecherkovskaya, G. Tetz, *Front. Plant Sci.* 2023, **14**, 1176553, DOI: 10.3389/fpls.2023.1176553.
- [16] Z. Yuan, H. Ma, Y. Jin, Z. Peng, C. Wang, Y. Hou, *J. Agric. Food Chem.* 2025, **73**, nr 21, 12630.
- [17] P. Leroux, C. Albertini, A. Gautier, M. Gredt, A.S. Walker, *Pest. Manage. Sci.* 2007, **63**, nr 7, 688, DOI: 10.1002/ps.1390.
- [18] M. Baćmaga, J. Wyszowska, J. Kucharski, *Int. J. Mol. Sci.* 2024, **25**, nr 15, 8104, DOI: 10.3390/ijms25158104.
- [19] L.I. Rangel, R.E. Spanner, M.K. Ebert, S.J. Pethybridge, E.H. Stukenbrock, R. de Jonge, G.A. Secor, M.D. Bolton, *Mol. Plant Pathol.* 2020, **21**, nr 8, 1020, DOI: 10.1111/mp.12962.
- [20] A. Künstler, G. Gullner, A.L. Ádám, J. Koložváriné Nagy, L. Király, *Plants* 2020, **9**, nr 12, 1705, DOI: 10.3390/plants9121705.
- [21] M.F. Rabbee, M.S. Ali, J. Choi, B.S. Hwang, S.C. Jeong, K.H. Baek, *Molecules* 2019, **24**, 1046, DOI: 10.3390/molecules24061046.
- [22] S. Nithyapriya, S. Lalitha, R.Z. Sayyed, M.S. Reddy, D.J. Dailin, H.A. El Enshasy, N. Luh Suriani, S. Herlambang, *Sustainability* 2021, **13**, 5394, DOI: 10.3390/su13105394.
- [23] V. Baard, O.O. Bakare, A.I. Daniel, M. Nkomo, A. Gokul, M. Keyster, A. Klein, *Pathogens* 2023, **12**, 254, DOI: 10.3390/pathogens12020254.
- [24] J.L. Hatfield, C. Dold, *Front. Plant Sci.* 2018, **9**, 224, DOI: 10.3389/fpls.2018.00224.
- [25] I. Podgórska-Kryszczuk, E. Solarzka, M. Kordowska-Wiater, *Pathogens* 2022, **11**, 86, DOI: 10.3390/pathogens11010086.
- [26] I. Karlsson, P. Persson, H. Friberg, *Front. Microbiol.* 2021, **12**, 628373, DOI: 10.3389/fmicb.2021.628373.
- [27] E.A. Chandler, D.R. Simpson, M.A. Thomsett, P. Nicholson, *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 2003, **62**, 355, DOI: 10.1016/S0885-5765(03)00092-4.
- [28] B. Kosiak, M. Torp, E. Skjerve, U. Thrane, *Acta Agric. Scand. Sect. B*, 2003, **53**, 168, DOI: 10.1080/09064710310018118.
- [29] G.M. Dal Bello, C.I. Mónaco, M.R. Simón, *World J. Microbiol. Biotechnol.* 2002, **18**, 627, <https://doi.org/10.1023/A:1016898020810>.
- [30] M.R. Khan, S. Fischer, D. Egan, F.M. Doohan, *Phytopathology* 2006, **96**, nr 4, 386, doi: 10.1094/PHTO-96-0386. PMID: 18943420.
- [31] T. Siber, E. Petrović, J. Čosić, V. Bušić, D. Gašo-Sokač, K. Vrandečić, *Appl. Sci.* 2025, **15**, nr 14, 7889, <https://doi.org/10.3390/app15147889>.
- [32] L. Sella, K. Gazzetti, C. Castiglioni, W. Schäfer, F. Favaron, *Phytopathology* 2014, **104**, 1201.
- [33] I. Afzal, T. Javed, M. Amirkhani, A.G. Taylor, *Agriculture* 2020, **10**, 526, DOI: 10.3390/agriculture10110526.
- [34] L. Capo, A. Zappino, A. Reyneri, M. Blandino, *Agronomy* 2020, **10**, 784, DOI:10.3390/agronomy10060784.
- [35] V. Balmas, G. Delogu, S. Sposito, D. Rau, Q. Migheli, *J. Agric. Food Chem.* 2006, **54**, 480, <https://doi.org/10.1021/jf0523014>.
- [36] B. Kachhap, S. Pandey, M. Banerjee, A.K. Pandey, N. Kumari, *Curr. Agric. Res. J.* 2025, **13**, nr 2, <http://dx.doi.org/10.12944/CARJ.13.2.3>.
- [37] G. Wurzer, H. Hettegger, R. Bischof, K. Fackler, A. Pottthast, T. Rosenau, *Holzforchung* 2022, **76**, nr 2, 155, <https://doi.org/10.1515/hf-2021-0114>.