

ROLA KRZEMU W OCHRONIE ROŚLIN PRZED PATOGENAMI GRZYBOWYMI

THE ROLE OF SILICON IN PROTECTING PLANTS AGAINST FUNGAL PATHOGENS

Dominika Kufka - „Poltegor-Institut” Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław

DOI: 10.5604/01.3001.0055.6123

Streszczenie

Krzem, mimo że nie jest uznawany za pierwiastek niezbędny dla wzrostu roślin, odgrywa istotną rolę w zwiększaniu ich odporności na stresy biotyczne i abiotyczne. Liczne badania wskazują, że związki krzemu – zwłaszcza ortokrzemiany i kwas ortokrzemowy wykazują działanie fungistatyczne, wspomagając ochronę roślin przed patogenami grzybowymi. Mechanizmy te obejmują wzmocnienie ścian komórkowych, indukcję odporności systemicznej (SAR) oraz modyfikację właściwości chemicznych powierzchni liści, ograniczającą rozwój patogenów. Krzem korzystnie wpływa także na mikrobiom glebowy, wspierając mikroorganizmy antagonistyczne wobec grzybów chorobotwórczych. W kontekście rosnącego znaczenia zrównoważonego rolnictwa, krzem i jego związki stanowią obiecującą, ekologiczną alternatywę dla chemicznych fungicydów w profilaktyce chorób roślin.

Słowa kluczowe: krzem, ortokrzemiany, kwas ortokrzemowy, odporność roślin, fungistatyczność, patogeny grzybowe, nawozy krzemowe, zrównoważone rolnictwo

Abstract

Although silicon is not classified as an essential element for plant growth, it plays a crucial role in enhancing plant tolerance to both biotic and abiotic stresses. Numerous studies have demonstrated that silicon compounds—particularly orthosilicates and orthosilicic acid exhibit fungistatic properties, supporting plant protection against fungal pathogens. The mechanisms involved include strengthening of cell walls through silica gel deposition, induction of systemic acquired resistance (SAR), and modification of leaf surface chemistry that inhibits pathogen development. Silicon also improves soil microbial balance by promoting beneficial microorganisms antagonistic to pathogenic fungi. In the context of sustainable agriculture, silicon and its derivatives emerge as promising ecological alternatives to conventional chemical fungicides in the prevention of fungal diseases.

Keywords: silicon, orthosilicates, orthosilicic acid, plant resistance, fungistatic activity, fungal pathogens, silicon fertilizers, sustainable agriculture

Wstęp

Choroby grzybowe należą do najpoważniejszych czynników ograniczających plonowanie i jakość upraw rolniczych na całym świecie. Szacuje się, że patogeny grzybowe mogą powodować straty rzędu 10–20% globalnej produkcji rolnej, a w warunkach sprzyjających infekcjom – nawet powyżej 40% [15]. Największe zagrożenie stanowią m.in. mączniaki, rdze, fuzariozy oraz szara pleśń, które atakują zarówno zboża, jak i rośliny warzywne, sadownicze czy ozdobne [4]. W tradycyjnych systemach produkcji ochrona

roślin przed tymi patogenami opiera się głównie na stosowaniu fungicydów chemicznych. Jednak rosnąca odporność grzybów na substancje czynne, wysokie koszty preparatów, a także ich negatywny wpływ na środowisko i zdrowie człowieka powodują, że poszukuje się alternatywnych, bardziej zrównoważonych metod ochrony.

Jednym z intensywnie badanych kierunków jest zastosowanie krzemu (Si) i jego pochodnych w profilaktyce chorób grzybowych. Choć pierwiastek ten nie jest zaliczany do grupy makro- ani mikroelementów niezbędnych dla roślin, liczne badania dowodzą jego istotnego wpływu na

wzrost, rozwój oraz odporność organizmów roślinnych. Krzem odgrywa szczególną rolę w zwiększaniu tolerancji na stresy biotyczne i abiotyczne np. infekcje patogenów, suszę, zasolenie, czy toksyczność metali ciężkich [16]. W ostatnich latach coraz większe znaczenie przypisuje się formom łatwo przyswajalnym, takim jak kwas ortokrzemowy, który jest dostępny zarówno w postaci nawozów dolistnych, jak i doglebowych.

Mechanizm działania krzemu w ochronie roślin ma charakter wielopłaszczyznowy. Z jednej strony pierwiastek ten uczestniczy w fizycznym wzmocnieniu ścian komórkowych, poprzez odkładanie krzemionki amorficznej, co utrudnia wnikanie strzępek grzybów do tkanek. Z drugiej – krzem działa jak elitor odporności systemicznej (SAR), aktywujący mechanizmy obronne [11]. Wpływa również na chemizm powierzchni liści, ograniczając dostępność substancji odżywczych dla patogenów i hamując kiełkowanie zarodników. Nie bez znaczenia jest także jego rola w środowisku glebowym – krzem sprzyja rozwojowi mikroorganizmów antagonistycznych wobec grzybów chorobotwórczych oraz poprawia strukturę gleby, zwiększając jej zdolność do utrzymania równowagi biologicznej.

W kontekście strategii integrowanej ochrony roślin oraz zasad rolnictwa zrównoważonego, krzem jawi się jako ekologiczna i bezpieczna alternatywa dla tradycyjnych fungicydów chemicznych. Regularne stosowanie nawozów krzemowych może znacząco ograniczyć częstość występowania infekcji grzybowych, poprawić kondycję roślin oraz zmniejszyć konieczność stosowania środków chemicznych. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy dotyczącego fungistatycznego działania krzemu oraz jego wpływu na zdrowotność roślin.

Charakterystyka krzemu i jego związków w środowisku glebowym

Krzem (Si) jest drugim po tlenie najobficiej występującym pierwiastkiem w glebie i stanowi od 25 do 35% jej masy [16]. W środowisku naturalnym występuje głównie w postaci krzemionki i krzemianów, które tworzą strukturę minerałów ilastych, kwarców oraz skał magmowych. Pomimo tak dużej powszechności, jedynie niewielka część całkowitego krzemu w glebie jest dostępna dla roślin. Jego biodostępność zależy od formy chemicznej, w jakiej występuje, a także od właściwości fizykochemicznych gleby, takich jak pH, zawartość materii organicznej, aktywność biologiczna oraz stopień wilgotności. W glebach krzem występuje w trzech głównych formach: (I) krzem związany strukturalnie – stanowi część sieci krzemianowej minerałów pierwotnych (np. kwarcu, skaleni, miki) oraz wtórnych (ilastych). Jest to forma krzemu praktycznie niedostępna dla roślin; (II) krzem amorficzny – pochodzi z wietrzenia minerałów krzemianowych lub wytrącania się z roztworów bogatych w krzemionkę. Krzem w takiej formie uwalniany jest do gleby powoli; (III) krzem rozpuszczony (modyfikacje kwasu ortokrzemowego) – jest to forma przyswajalna biologicznie.

Rośliny pobierają krzem w postaci kwasu ortokrzemowego, który powstaje w wyniku powolnego wietrzenia minerałów krzemianowych lub rozpuszczania nawozów krzemowych. W glebie reakcje te są kontrolowane przez pH oraz obecność jonów konkurencyjnych (np. Fe^{3+} , Al^{3+}). Największą

rozpuszczalność kwas ortokrzemowy wykazuje w zakresie pH 6,5–8,0, dlatego gleby o odczynie lekko zasadowym sprzyjają jego biodostępności [8, 16]. Ważnym elementem cyklu krzemowego w glebie są mikroorganizmy [6] – bakterie i grzyby mineralizujące, takie jak *Bacillus spp.*, *Pseudomonas spp.* czy *Aspergillus niger*. Produkują one kwasy organiczne (np. cytrynowy, szczawiowy), które przyspieszają rozpuszczanie minerałów krzemianowych, zwiększając tym samym ilość dostępnych form H_4SiO_4 [2, 17]. Dodatkowo mikroorganizmy te mogą tworzyć biogeniczne krzemiany, które pełnią funkcję bufora między formami trudno- i łatwo przyswajalnymi. Krzem wspomaga również rozwój bakterii mobilizujących składniki pokarmowe (np. fosfor, wapń), co poprawia ogólną żyzność gleby. Zwiększenie populacji pożytecznych mikroorganizmów konkurujących o przestrzeń i zasoby prowadzi do biologicznego ograniczenia patogenów glebowych, takich jak *Fusarium spp.*, *Rhizoctonia solani* czy *Pythium ultimum* [12].

Kwas ortokrzemowy jest formą termodynamicznie nietrwałą – w wyższych stężeniach i przy zmianie pH ulega polimeryzacji, tworząc oligomery i koloidy krzemionki. W warunkach naturalnych proces ten jest hamowany przez obecność jonów metali alkalicznych (np. K^+ , Na^+), które stabilizują roztwór. Dzięki temu związki takie jak krzemian potasu (K_2SiO_3) czy krzemian sodu (Na_2SiO_3) znajdują zastosowanie w nawożeniu i ochronie roślin, jako źródła łatwo dostępnego i stabilnego krzemu [3]. Krzem wpływa nie tylko na rośliny, ale również na ogólną żyzność gleby. Poprawia jej strukturę agregatową, zwiększa porowatość oraz zdolność zatrzymywania wody, co sprzyja rozwojowi mikroflory glebowej. W glebach ubogich w krzem obserwuje się wyższą podatność na degradację i erozję, a rośliny z takich środowisk wykazują obniżoną odporność na stresy środowiskowe. Regularne stosowanie nawozów krzemowych – zarówno mineralnych, jak i naturalnych (np. mączki bazaltowej) – pozwala utrzymać równowagę chemiczną i biologiczną gleby [10], a tym samym ograniczać rozwój patogenów grzybowych w strefie ryzosfery.

Mechanizmy działania krzemu w ochronie przed patogenami grzybowymi

Krzem, choć nie wykazuje bezpośredniego działania toksycznego wobec patogenów, znacząco ogranicza rozwój chorób grzybowych poprzez złożone mechanizmy fizyczne, biochemiczne i fizjologiczne. Działanie to ma charakter pośredni (fungistatyczny) i polega na wzmacnianiu struktury rośliny oraz modulacji jej metabolizmu obronnego. W efekcie rośliny traktowane krzemem wykazują wyższą odporność na infekcje i mniejszą podatność na stres środowiskowy [9, 14].

Jednym z najlepiej udokumentowanych mechanizmów działania krzemu jest udział w tworzeniu mechanicznej bariery ochronnej (Ryc.1). Po pobraniu przez system korzeniowy w postaci kwasu ortokrzemowego, krzem jest transportowany do tkanek nadziemnych, gdzie ulega polimeryzacji i odkłada się w postaci żelu krzemionkowego. Powstające warstwy krzemionki odkładają się w ścianach komórkowych epidermy oraz w skórcie liści i łodyg. Tworzą one tzw. fitolitowy pancerz, który utrudnia wnikanie strzępek grzybów do komórek roślinnych oraz ogranicza uszkodzenia mechaniczne i transpirację. Badania na zbożach (m.in. *Oryza sativa*

i *Triticum aestivum*) wykazały, że rośliny o wyższym poziomie krzemu w tkankach mają istotnie grubsze ściany komórkowe i mniejszą liczbę infekcji powodowanych przez *Magnaporthe oryzae*, *Puccinia spp.* i *Erysiphe graminis*. Ponadto krzem zwiększa sztywność tkanek mechanicznych, co redukuje pękanie epidermy i wylęganie zbóż, a tym samym zmniejsza liczbę ran stanowiących wrota infekcji dla patogenów [6].

Krzem pełni również funkcję elicitorową [5], aktywując mechanizmy odporności systemicznej (SAR – *Systemic Acquired Resistance*). Nie działa więc wyłącznie jako bariera fizyczna, ale także jako modulator odpowiedzi obronnej rośliny [7]. Krzem wpływa również na mikrośrodowisko powierzchni roślin, czyniąc je mniej przyjaznym dla patogenów. Odkładanie krzemionki w kutykuli i woskach liściowych prowadzi do zmniejszenia przepuszczalności i obniżenia poziomu wolnych cukrów na powierzchni, co ogranicza dostęp pożywienia dla grzybów saprotroficznych [6]. Krzem nie działa jak klasyczny fungicyd, nie niszczy patogenów bezpośrednio, lecz wzmacnia naturalną odporność roślin [13], ograniczając tym samym konieczność interwencji chemicznej. Regularne stosowanie nawozów krzemowych prowadzi do utrzymywania roślin w stanie tzw. podwyższonej gotowości obronnej (*priming effect*), dzięki czemu infekcje mają łagodniejszy przebieg lub nie dochodzi do ich rozwoju. Dodatkowo krzem wpływa na bilans wodny roślin, poprawiając ich odporność na stres abiotyczny (susza, zasolenie), co pośrednio redukuje

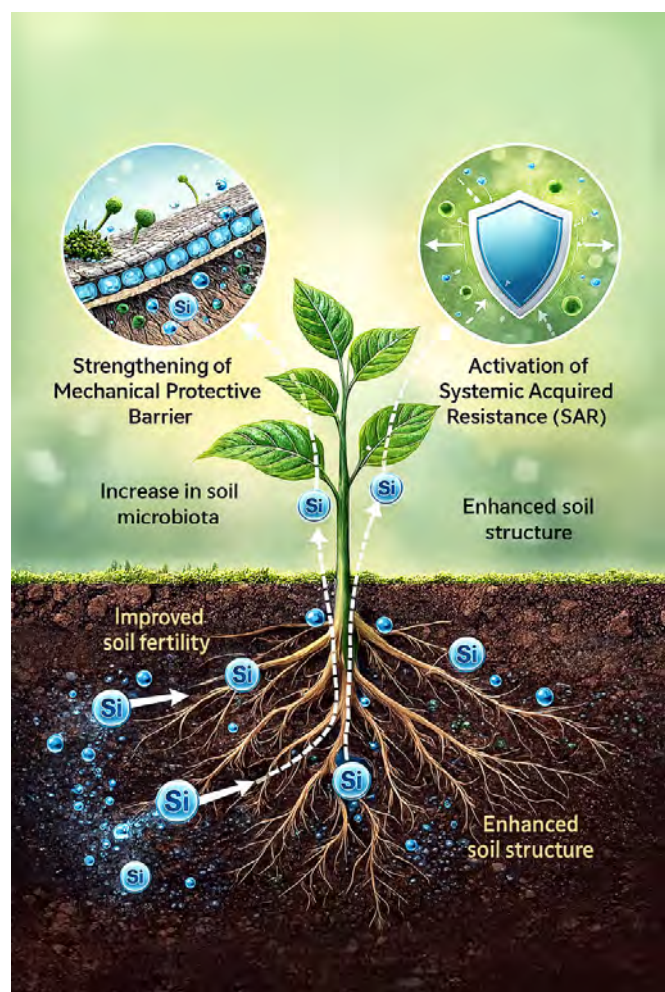
podatność na infekcje grzybowe. Tkanki o odpowiednim uwodnieniu i niższym poziomie stresu oksydacyjnego są mniej podatne na kolonizację patogenów [1, 7].

Podsumowanie

W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie tzw. rolnictwem regeneratywnym i niskoemisyjnym, którego celem jest odbudowa zasobów biologicznych gleby i ograniczenie użycia środków syntetycznych. Krzem wpisuje się w założenia tego podejścia, ponieważ jest pierwiastkiem naturalnym, nietoksycznym i występującym powszechnie w środowisku. Współczesne rolnictwo stoi także przed wyzwaniem pogodzenia wysokiej produktywności z ochroną środowiska i zdrowia publicznego. Coraz częściej podkreśla się konieczność ograniczenia stosowania pestycydów chemicznych, które prowadzą do zanieczyszczenia gleby, wód i żywności, a także sprzyjają powstawaniu odporności u patogenów. Odpowiedzią na te problemy jest koncepcja zintegrowanej ochrony roślin (IPM – *Integrated Pest Management*), której celem jest minimalizacja presji agrofagów przy wykorzystaniu metod biologicznych, agrotechnicznych i chemicznych w sposób zrównoważony. W tym kontekście krzem i jego pochodne stanowią cenny element tej strategii, ponieważ łączą wysoką skuteczność profilaktyczną z bezpieczeństwem ekologicznym.

Mechanizmy działania krzemu w ochronie roślin są wieloaspektowe i obejmują zarówno oddziaływania fizyczne (wzmocnienie tkanek), jak i biochemiczne (indukcja odporności, modulacja metabolizmu) oraz ekologiczne (wpływ na mikrobiom). Ich synergiczne działanie powoduje, że krzem nie eliminuje patogenów bezpośrednio, lecz czyni rośliny mniej podatnymi na infekcje, zwiększając ich zdolność do samoregulacji i obrony. Dzięki temu krzem stanowi kluczowy element nowoczesnych, biologicznie zrównoważonych strategii ochrony roślin.

Publikacja zrealizowana w ramach środków na utrzymanie i rozwój potencjału badawczego „Poltegor-Institut” – Instytutu Górnictwa Odkrywkowego nr 19-7-011/N.



Ryc. 1. Wpływ krzemu na wzmocnienie bariery liści, aktywacja SAR i poprawę żyzności gleby

Fig. 1. The effect of silicon on strengthening the leaf barrier, activating SAR and improving soil fertility

Literatura

- [1] Dou Z., Abdelghany A.E., Zhang H., Feng H., Zhang Y., i in. 2023. *Exogenous silicon application improves fruit yield and quality of drip-irrigated greenhouse tomato by regulating physiological characteristics and growth under combined drought and salt stress*. Scientia Horticulturae, 321, 112352.
- [2] Etesami H., Jeong B.R. 2022. *Chapter 19 - Biodissolution of silica by rhizospheric silicate-solubilizing bacteria*, Academic Press, Silicon and Nano-silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement, Progress and Prospects; p. 265-276.
- [3] Etesami H., Jeong B.R. Frans J.M. Maathuis F.J.M., Schaller J. 2023. *Exploring the potential: Can arsenic (As) resistant silicate-solubilizing bacteria manage the dual effects of silicon on As accumulation in rice?* Science of The Total Environment, 903, 10, 166870.
- [4] Instytut Ochrony Roślin-PIB, <https://www.agrofagi.com.pl/274,ocena-zagrozenia-agrofagiem>.
- [5] Jha S., Yadav A., 2023. *Chapter 6 - Assessment of carbon and fullerene nanomaterials for sustainable crop plants growth and production. In Plant Biology, sustainability and climate change, Engineered Nanomaterials for Sustainable Agricultural Production, Soil Improvement and Stress Management*. Academic Press, 145-160.
- [6] Kowalska J., Krzysińska J., Łukaszyk J., 2023. *Rola krzemu we wzroście roślin w świetle badań*. ZAGADNIENIA DORADZTWA ROLNICZEGO 3 (113), p. 104-115.
- [7] Kumar A., Choudhary A., Kaur H. i in. 2025. *Exploring the role of silicon in enhancing sustainable plant growth, defense system, environmental stress mitigation and management*. Discov Appl Sci 7, 406. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06866-w>.
- [8] Ma J.F., Takahashi E. 2002. *Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1-294.
- [9] Ma, J.F.; Yamaji, N. 2006. *Silicon uptake and accumulation in higher plants*. Trends Plant Sci., 11, 392–397.
- [10] Maliszewski M. 2021. *Preliminary studies of the physico-chemical properties of basalt rock flour from the męcinka mine in lower silesia*. Mining Science, 28, 175–187. doi: 10.37190/msc212813.
- [11] Meena M., Yadav G., Sonigra P, Nagda A., Mehta T., Swapnil P., Harish, Marwal A. 2022. *Role of elicitors to initiate the induction of systemic resistance in plants to biotic stress*. Plant Stress, 5, 100103, <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100103>.
- [12] Nawaz M., Shabbir S., Manzoor N., Xu H., Wang Z., Arshad K.T., Zohaib A., Farooq T.H., Sun J. 2025. *Recent advances in biofertilizer development*. Agric. Nutr. Pollut. Clim. Change, pp. 271-309, 10.1007/978-3-031-80912-5_10.
- [13] Njenga K. W., Nyaboga E., Wagacha J. M., Mwaura F. B. 2017. *Silicon Induces Resistance to Bacterial Blight by Altering the Physiology and Antioxidant Enzyme Activities in Cassava*. World Journal of Agricultural Research, 5, 1, pp 42-51.
- [14] Snyder G.H., Matichenkov V.V., Datnoff L.E. 2007. *Silicon*. In *Handbook of Plant Nutrition*; Taylor & Francis Group: Oxfordshire; 19, p. 551.
- [15] Steinberg G., Sarah J. Gurr S.J., 2020. *Fungi, fungicide discovery and global food security*. Fungal Genetics and Biology, 144, 103476. doi.org/10.1016/j.fgb.2020.103476.
- [16] Tripathi, P., Subedi S., Khan A.L., Chung Y-S., Kim Y., 2021. *Silicon Effects on the Root System of Diverse Crop Species Using Root Phenotyping Technology*. Plants, 10(5), 885. DOI: 10.3390/plants10050885.
- [17] Xu Q., Li P., Lu Y., Feng Z., Yan H., i in. 2025. *Microbial roles in sodium detoxification and silicon bioavailability for improved soil quality and plant tolerance and productivity*. Plant Stress, 18, 101001.