David Gluhić[1]

Stručni rad

Ekstrakti pinofita i kompleksirani bakar (Cu) kao moderni induktori otpornosti vinove loze

Sažetak

Suvremeno vinogradarstvo u Hrvatskoj, suočava se s velikim izazovima koji obuhvaćaju klimatske promjene, sve intenzivniji pritisak fitopatogenih organizama (posebice plamenjače vinove loze uzrokovane oomicetom Plasmopara viticola) te sve strože regulatorne mjere Europske unije usmjerene na smanjenje unosa teških metala i klasičnih zaštitnih sredstava u agroekosustave. Tradicionalna primjena kontaktnih bakrenih fungicida, iako dugovječna u praksi, nosi rizik od nakupljanja elementarnog bakra u tlu i pojave fitotoksičnosti. Kao održiva alternativa i nadopuna klasičnim programima zaštite nameće se koncept inducirane otpornosti (elicitacije) primjenom prirodnih biostimulativnih spojeva. Ovaj rad razmatra sinergijski učinak ekstrakata pinofita (četinjača) i kompleksiranog bakra (Cu) kao modernih induktora imuniteta vinove loze. Dok biljni ekstrakti bogati sekundarnim metabolitima djeluju kao signali napada patogenih organizama koji kod trsa pokreću sintezu fitoaleksina (poput stilbena) i jačaju stanične stijenke, tehnološki napredan kompleksirani bakar osigurava visoku sistemičnu pokretljivost i mikronutritivnu aktivaciju obrambenih enzima uz višestruko niže doze čistog bakra po hektaru. Primjena ovih elicitora omogućuje učinkovitu kontrolu bolesti, čuva mikrobiom tla te podržava ciljeve zelene i održive vinogradarske proizvodnje u Hrvatskoj.

Ključne riječi: *vinova loza, ekstrakti pinofita, kompleksirani bakar, elicitori, sustavno stečena otpornost (SAR), plamenjača (Plasmopara viticola), fitoaleksini*

Uvod

Agroekološki kontekst i izazovi suvremenog vinogradarstva

Vinova loza (*Vitis vinifera* L.) jedna je od gospodarski najvažnijih i najintenzivnijih drvenasta kultura u Hrvatskoj, ali je istovremeno i kultura koja zahtijeva visok stupanj zaštite od bolesti i štetnika. Klimatske promjene, koje donose češće i obilnije oborine praćene visokim temperaturama tijekom proljetnih i ljetnih mjeseci, stvaraju idealne uvjete za razvoj važnih biljnih bolesti. Među njima, plamenjača vinove loze, koju uzrokuje oomicet *Plasmopara viticola*, predstavlja trajnu prijetnju gospodarskoj održivosti vinograda, jer u uvjetima povoljnim za infekciju može uzrokovati totalne štete na trsu i značajno smanjiti visinu i kvalitetu prinosa (Gessler i sur., 2011; Taibi i sur., 2023).

Ograničenja tradicionalne kemijske zaštite i regulatorni pritisak

Tradicionalna zaštita vinove loze u konvencionalnom, ali i u ekološkom vinogradarstvu, povijesno se uvelike oslanjala na primjenu bakrenih preparata (poput bakar-hidroksida,

1 Dr.sc. ***David Gluhić****, Veleučilište Rijeka, Poljoprivredni odjel Poreč, Karla Huguesa 6, 52 440 Poreč*
Autor za koresponednciju: ***dgluhic@veleri.hr***

bakar-oksiklorida i bordoške juhe). Iako su ovi kontaktni fungicidi visoko učinkoviti u suzbijanju plamenjače, njihova dugotrajna i prekomjerna primjena rezultira kumulacijom elementarnog bakra (Cu) u gornjim slojevima tla. Bakar je perzistentan teški metal koji se ne razgrađuje, što dovodi do njegove toksičnosti za korijenov sustav vinove loze, inhibicije rasta korisnih mikrorganizama u tlu te narušavanja ravnoteže mikroflore i faune (posebno glista i mikoriznih gljiva). Zbog ovih razloga, Europska unija ograničila je uporabu bakra na maksimalno 28 kg/ha tijekom sedmogodišnjeg razdoblja, odnosno prosječno 4 kg Cu/ha godišnje, zbog rizika akumulacije bakra u tlima i mogućih negativnih učinaka na neciljane organizme (European Commission, 2018).

Paradigmatski pomak u novom pristupu: Od kurative i kontakta prema induciranoj otpornosti
Stoga se suvremeni pristup zaštiti vinove loze od bolesti okreće održivim rješenjima koje ne ovise isključivo o direktnom uništavanju patogena na površini lista, već o jačanju unutarnjih obrambenih mehanizama same biljke. Koncept **inducirane rezistencije** ili **elicitacije,** omogućuje da se vinova loza pripremi na napad patogena prije nego što dođe do ekonomskih značajnih šteta u vinogradu. Induktori otpornosti predstavljaju obećavajući alat za smanjenje ovisnosti o konvencionalnim fungicidima u zaštiti od bolesti vinove loze, pogotovo u kontekstu promjene agroekoloških uvjeta (Salinari i sur., 2007; Adrian i sur., 2017).

Uvođenje sinergijske kombinacije **botaničkih ekstrakata pinofita** (četinjača) i **kompleksiranog bakra (Cu)** predstavlja inovativan iskorak u tom smjeru. Dok biljni ekstrakti bogati sekundarnim metabolitima služe kao prirodni signali (elicitori) koji bude unutar staničnu obranu trsa, napredna tehnologija kompleksiranja bakra omogućuje značajno smanjenje ukupne količine unesenog bakra uz istodobnu visoku pokretljivost u biljnom tkivu. Cilj ovoga rada jest prikazati mehanizme djelovanja ove inovativne kombinacije te njezinu ulogu u unaprjeđenju otpornosti vinove loze i ostvarivanju ciljeva održive vinogradarske proizvodnje u novim agroekološkim uvjetima.

II. Fiziološki temelji elicitacije i obrambeni mehanizmi vinove loze

Mehanizam djelovanja elicitora i prepoznavanje signala
Suvremena zaštita bilja sve se više temelji na konceptu **elicitacije** – procesu u kojem specifične kemijske tvari (elicitori) potiču biljku na aktivaciju njezinih urođenih obrambenih mehanizama. Za razliku od klasičnih zaštitnih sredstava koja djeluju kurativno ili direktno toksično na patogene (baktericidno ili fungicidno), elicitori djeluju kao induktori bioloških signala. Koncept inducirane otpornosti temelji se na aktivaciji prirodnih obrambenih mehanizama biljke prije pojave infekcije, pri čemu se aktiviraju signalni putevi povezani sa salicilnom i jasmoničnom kiselinom te nastaje sustavno stečena otpornost (SAR) (Klessig i sur., 2018; Zhang i sur., 2025).

Kada se ekstrakti pinofita i kompleksirani bakar primjene folijarno na vinovu lozu (*Vitis vinifera* L.), stanice u pokožici i mezofilu lista prepoznaju ove komponente putem specifičnih receptorskih proteina na plazmatskoj membrani. Ovo prepoznavanje simulira prisutnost ili napad patogena, pokretanjem kaskade unutar staničnih reakcija poznatih kao sustavno stečena otpornost (**SAR** - *Systemic Acquired Resistance*) i induktivna sistemska otpornost (**ISR**). Kao rezultat, trs podiže stupanj pripravnosti još prije nego što patogen (poput oomiceta *Plasmopara viticola*) uopće uspije ostvariti penetraciju kroz puči ili kutikulu (Bavaresco, Lucini i Gatti, 2019, Toffolatti i sur., 2016).

Uloga unutar staničnih signalnih puteva (Salicilna i jasmonična kiselina)
Aktivacija imuniteta vinove loze odvija se kroz dobro definirane endogene signalne putove koji uključuju biljne hormone:

- **Put salicilne kiseline (SA):** Prvenstveno se aktivira u interakciji s biotrofnim i hemibiotrofnim patogenima, u koje spada i uzročnik plamenjače vinove loze (*Plasmopara viticola*) te uzročnik pepelnice (*Erysiphe necator*). Porast razine SA unutar biljnih tkiva potiče ekspresiju gena zaduženih za sintezu obrambenih proteina. Salicilna kiselina ključni je biljni hormon uključen u obranu od biotrofnih i hemibiotrofnih patogena te predstavlja jedan od glavnih regulatora SAR odgovora. (Klessig i sur., 2018; Gao i sur., 2011)
- **Put jasmonične kiseline (JA) i etilena (ET):** Djeluje sinergijski ili komplementarno, a često se aktivira u uvjetima mehaničkog oštećenja ili prisutnosti nekrotrofnih patogena, poput truleži bobica (*Botrytis cinerea*). Jasmonična kiselina i etilen imaju važnu ulogu u regulaciji inducirane sistemske otpornosti (ISR) te koordiniraju obrambene odgovore na različite vrste stresa. (Hamiduzzaman i sur., 2005, Zhang i sur., 2025; Wang i sur., 2021)

Kombinacija botaničkih ekstrakata i bakra modulira ove puteve, omogućujući ravnotežu u odgovoru vinove loze na stres, bez iscrpljivanja njezinih energetskih resursa koji su potrebni za rast i razvoj lisne mase i grozdova.

Strukturne i biokemijske promjene u tkivu trsa
Kao kruna imunološkog odgovora induciranog elicitorima, u tkivu vinove loze dolazi do niza fizioloških i biokemijskih adaptacija:

- **Sinteza fitoaleksina:** Vinova loza posjeduje specifičan obrambeni arsenal – stilbene, od kojih je najpoznatiji **resveratrol** te njegovi oligomeri (viniferini). Elicitacija snažno potiče enzime iz skupine stilben-sintaza, što rezultira nakupljanjem ovih antimikrobnih spojeva na mjestu potencijalnog napada patogena. Aktivacija stilben-sintaze i nakupljanje resveratrola smatraju se važnim dijelom obrambene reakcije vinove loze na napad patogena. (Jiao i sur., 2016; Marant i sur., 2024)
- **Lignifikacija i jačanje stanične stijenke:** Potiče se sinteza i polimerizacija lignina, suberina te unakrsno povezivanje strukturnih proteina u staničnoj stijenki. Time se stvara fizička prepreka koja mehanički onemogućuje prodor hifa patogena u unutrašnjost lista (Taiz i sur., 2015).
- **Aktivacija obrambenih enzima:** Zabilježeno je značajno povećanje aktivnosti enzima povezanih s patogenezom (**PR-proteini**), kao što su kitinaze i glukanaze (koje razgrađuju stanične stijenke gljiva) te peroksidaze i polifenoloksidaze koje sudjeluju u detoksikaciji i zaštiti tkiva (Agrios, 2005).

III. Uloga ekstrakata pinofita (četinjača) u indukciji otpornosti
Fitokemijski profil i sastav sekundarnih metabolita
Ekstrakti dobiveni iz vrsta porodice četinjača (*Pinaceae* i *Cupressaceae*, poznatih kao pinofiti) predstavljaju riznicu biološki aktivnih spojeva koji u prirodi služe samom drveću kao primarna linija obrane od fitopatogenih gljivica, bakterija i biljojeda. Fitokemijske analize ovih ekstrakata otkrivaju složenu smjesu sekundarnih metabolita u koju prvenstveno spadaju:

- **Terpenoidi i eterična ulja:** Monoterpeni, seskviterpeni i diterpeni koji posjeduju visoku membransku permeabilnost i antimikrobno djelovanje.
- **Smolne kiseline:** Specifični spojevi (poput abietinske i pimarne kiseline) koji sudjeluju u blokiranju rana i sprječavanju prodora patogena u drvenasta tkiva.
- **Polifenolni spojevi i tanini:** Snažni prirodni antioksidansi i adstringensi koji inhibiraju enzimske aktivnosti patogena.



Slika 1. Pinophytal MIX, posebno formulirani preprat na bazi ekstrakta bora (pinofita) i bakra u organskom kompleksu za primjenu u uzgoju vinove loze (proizvođač Artal, Španjolska)
Figure 1. Pinophytal MIX, a specially formulated product based on pine (conifer) extract and copper in an organic complex for use in grapevine cultivation (manufacturer: Artal, Spain)

Mehanizam djelovanja botaničkih ekstrakata na vinovu lozu
Kada se ovi ekstrakti primijene folijarno na vinovu lozu, njihove komponente ne djeluju samo kao pasivna zaštita, već prvenstveno kao **biološki elicitori**. Budući da su biljne stanice evolucijski razvile sposobnost prepoznavanja specifičnih struktura stranih organskih spojeva (tzv. MAMPs - *Microbe-Associated Molecular Patterns* ili sličnih signala iz okoliša), prisutnost terpena i polifenola iz pinofita prepoznaje se kao signal blagog stresa ili početne infekcije. Ovaj signal pokreće unutar staničnu signalnu kaskadnu reakciju bez izazivanja stvarne štete ili nekroze tkiva. Kao rezultat, vinova loza sintetizira vlastite obrambene tvari unaprijed, podižući svoju unutarnju otpornost na nadolazeće infekcije, posebice u uvjetima visoke vlažnosti zraka koja pogoduje razvoju plamenjače ili neke druge bolesti (Heloir i sur., 2019).

Sinergijski učinak s biološkim i abiotičkim aspektima
Osim direktne indukcije obrambenih mehanizama, ekstrakti pinofita u vinogradarstvu donose dodatne fiziološke prednosti za trs kako je prikazano u slijedećoj tablici:

- **Ublažavanje abiotičkog stresa:** Zahvaljujući visokom udjelu antioksidansa, ekstrakti pomažu vinovoj lozi da lakše podnese oksidativni stres uzrokovan jakim

Tablica 1. Ključne fiziološke i ekološke prednosti primjene ekstrakata pinofita u vinogradarstvu
Table 1. Key physiological and ecological benefits of applying pinophyte extracts in viticulture

Aspekt / Prednost	Mehanizam djelovanja	Utjecaj na vinovu lozu i proizvodnju
Ublažavanje abiotičkog stresa	Visok udjel antioksidansa	Pomaže lozi u lakšem podnošenju oksidativnog stresa uzrokovanog UV zračenjem, visokim ljetnim temperaturama ili sušom.
Očuvanje korisnog mikrobioma	Selektivno poticanje imuniteta (za razliku od sintetskih fungicida)	Ne uništava korisnu mikrofloru te čuva prirodnu ravnotežu epifitskih (korisnih) mikroorganizama na površini lista i bobicama.
Ekološka prihvatljivost	Prirodno porijeklo bez sintetskih ostataka i rezidua	Ne ostavlja štetne rezidue u grožđu, što osigurava visoku kvalitetu vina i usklađenost sa suvremenim propisima.

IV. Prednosti kompleksiranog bakra u odnosu na tradicionalne bakrene fungicide

Tehnologija kompleksiranja i kemijska stabilnost

Tradicionalni bakreni fungicidi (poput bakar-hidroksida, bakar-oksiklorida ili osnovnog bakrenog sulfata) primjenjuju se u obliku netopljivih ili slabo topljivih čestica koje nakon folijarne primjene ostaju na površini kutikule lista. Zbog svoje visoke netopivosti, ovi pripravci ovise o oborinama i vlazi kako bi se oslobodili slobodni bakreni ioni () koji djeluju toksično na spore patogena.

S druge strane, **kompleksirani bakar** koristi naprednu tehnologiju u kojoj su ioni bakra kemijski vezani (helatizirani ili kompleksirani) za organske nosače, kao što su glukonska kiselina, aminokiseline, peptidi ili lignosulfonati. Ova organska matrica osigurava potpunu topljivost u vodi, kemijsku stabilnost u tank-mješavini te sprječava taloženje i reakcije s drugim tvarima (Brunetto i sur., 2016, Komarek i sur., 2010).

Sistemična mobilnost i translokacija u biljci

Jedna od ključnih prednosti kompleksiranog bakra u odnosu na konvencionalne kontaktne fungicide jest njegova **sistemična pokretljivost**:

- **Usvajanje kroz kutikulu:** Zahvaljujući organskom kompleksu, bakreni ioni lakše prolaze kroz voštanu kutikulu i stomatarne otvore lista bez rizika od fitotoksičnosti (opekotina na lišću).
- **Provodni sustav:** Kompleksirani se bakar nakon usvajanja translocira kroz biljni sustav – ksilem i floem – dospijevajući u vršne izboje, mlađe listove i dijelove biljke koji rastu nakon tretmana. Tradicionalni bakar ostaje fiksiran isključivo na mjestu gdje je kapljica pala, ostavljajući novo izraslo tkivo nezaštićenim.

Mikronutritivna uloga bakra i modulacija oksidativnog učinka

U kontekstu indukcije imuniteta, bakar nije samo fungistatik, već esencijalni mikronutrijent koji u niskim, nekritičnim koncentracijama sudjeluje u ključnim fiziološkim procesima vinove loze:

- **Kofaktor u enzimima:** Bakar je sastavni dio enzima poput citokrom-c-oksidaze i superoksid-dismutaze (SOD), koji su presudni za stanično disanje i neutralizaciju toksičnih radikala (Chen i sur., 2022; Xu i sur., 2024).
- **Kontrolirani oksidativni učinak:** Primjena kompleksiranog bakra u mikrokoličinama potiče blagi, unutar stanični oksidativni učinak. Taj signal aktivira obrambene gene vinove loze i potiče sintezu lignina za jačanje staničnih stijenki, oponašajući prirodnu reakciju na napad patogena.

Značajno smanjenje unosa elementarnog bakra u agroekosustav vinograda

Zahvaljujući visokoj biološkoj iskoristivosti i sinergijskom djelovanju s ekstraktima pinofita, kompleksirani bakar omogućuje postizanje jednake ili čak veće učinkovitosti u zaštiti vinove loze uz **višestruko niže doze čistog elementarnog bakra po hektaru**. Dok se kod klasičnih bakrenih preparata unosi i do nekoliko kilograma bakra godišnje po hektaru, kompleksirani oblici smanjuju taj unos na minimum. Time se izravno sprječava trajna kumulacija teških metala u tlu, štiti korijenov sustav trsa te čuva osjetljiva ravnoteža korisne mikroflore i faune u vinogradarskom tlu (La Torre i sur., 2018, Wightwick i sur., 2008).



Slika 2. Zdrava lisna masa i grozdovi kod redovne primjene induktora otpornosti (preparat Pinophytal MIX, 4 tretmana x 2,5 lit/ha tijekom vegetacije)
Figure 2. Healthy foliage and grape clusters following regular application of resistance inducers (Pinophytal MIX product, 4 treatments x 2.5 L/ha during the vegetation period)

V. Praktična primjena u vinogradarstvu i integrirana zaštita nasada
Integracija elicitora u redovne programe zaštite vinove loze
Primjena kombinacije ekstrakata pinofita i kompleksiranog bakra predstavlja ključni iskorak prema održivoj i preciznoj poljoprivredi. U suvremenim sustavima integrirane zaštite bilja (IPM - *Integrated Pest Management*), cilj više nije potpuno oslanjanje na kurativna prskanja nakon što je infekcija već nastupila, već preventivno podizanje otpornosti samog trsa. Korištenjem ovih bioloških elicitora stvara se unutarnji "štit" koji smanjuje agresivnost patogena i omogućuje značajno smanjenje upotrebe sintetskih fungicida širokog spektra i velikih doza klasičnih bakrenih preparata. To je osobito važno u godinama s nepovoljnim vremenskim prilikama, kada je pritisak plamenjače iznimno visok, a propisi nalažu strogo ograničenje primjene bakrenih i ostalih fungicida (Aziz i sur., 2003., Gauthier i sur., 2014)

Kritični rokovi i fenofaze primjene u vinogradu
Kako bi se postigao maksimalan učinak indukcije imuniteta, primjena ekstrakata pinofita i kompleksiranog bakra mora biti usklađena s najosjetljivijim fenofazama vinove loze (*Vitis vinifera* L.):

- **Kretanje vegetacije i porast izboja (fenofaze po BBCH skali 13–15):** Prva primjena u rano proljeće služi "buđenju" obrambenog sustava trsa nakon zimskog mirovanja. U ovoj fazi kompleksirani bakar osigurava mikronutritivnu podršku razvoju novih, osjetljivih listova i jačanju staničnih stijenki.
- **Faza neposredno prije i nakon cvatnje (BBCH 53–69):** Ovo je kritično razdoblje s najvećim rizikom od infekcija plamenjačom (*Plasmopara viticola*) zbog brzog rasta zelene mase i visoke osjetljivosti cvatova i mladih bobica. Elicitacija u ovoj fazi potiče sintezu fitoaleksina (stilbena) i štiti mlade organe u trenutku kada su najranjiviji.
- **Razdoblje zatvaranja grozda i rasta bobica (BBCH 75–79):** Primjena u ovoj fazi održava visoku razinu otpornosti pokožice bobica na gljivična oboljenja, uz istovremeno izbjegavanje opasnosti od stvaranja neželjenih mrlja i ostataka (rezidua) na grožđu prije berbe.

Mogućnosti kombiniranja i sinergijski učinak u tank-mješavini
Zahvaljujući naprednoj tehnologiji kompleksiranja, preparati ove tehnologije pokazuju izvrsnu kompatibilnost u tank-mješavinama s drugim sredstvima za zaštitu bilja ili folijarnim gnojivima. U praksi se često koriste u kombinaciji sa smanjenim dozama kontaktnih fungi-

cida, pri čemu elicitori preuzimaju ulogu pojačivača otpornosti, a niske doze bakra osiguravaju osnovnu zaštitnu barijeru. Time se postiže puna učinkovitost u suzbijanju bolesti uz višestruko niže ekološko opterećenje vinograda i okoliša.

VI. Zaključak i smjernice za održivu budućnost vinogradarstva

Sinteza ključnih spoznaja

Suvremeni izazovi u vinogradarstvu, uvjetovani klimatskim promjenama, jačim pritiskom fitopatogenih organizama poput plamenjače (*Plasmopara viticola*) ili pepelnice (*Erysiphe necator*) te sve strožim regulatornim zahtjevima Europske unije, nalažu nužan odmak od isključivo konvencionalnih metoda zaštite. Primjena sinergijske kombinacije **ekstrakata pinofita** i **kompleksiranog bakra** predstavlja inovativan, znanstveno utemeljen iskorak prema održivom uzgoju vinove loze.

Kroz proces elicitacije, biljni ekstrakti bogati sekundarnim metabolitima uspješno simuliraju prisutnost štetnog patogena i potiču vinovu lozu na aktivaciju unutarstaničnih obrambenih mehanizama – uključujući sintezu fitoaleksina (stilbena), lignifikaciju staničnih stijenki i sintezu obrambenih proteina. Istodobno, napredna tehnologija kompleksiranja bakra osigurava visoku sistemičnu pokretljivost, mikronutritivnu podršku i optimalnu enzimsku aktivnost trsa uz višestruko niže doze čistog elementarnog bakra po hektaru.

Doprinos očuvanju okoliša i kvaliteti uroda

Uvođenjem ovih bioloških induktora imuniteta u redovnu praksu postižu se višestruki agroekološki i ekonomski učinci:

- **Zaštita tla i mikrobioma:** Značajnim smanjenjem unosa teških metala, poput bakra, sprječava se njihova toksična kumulacija u tlu, čime se čuvaju korisni mikroorganizmi, mikorizne gljive i cjelokupna edafska fauna.
- **Zdravstvena ispravnost i rezidue:** Izostanak štetnih ostataka na grožđu osigurava visok standard sirovine za proizvodnju vrhunskih vina, u skladu s globalnim trendovima ekološki osviještenog tržišta.
- **Jačanje otpornosti na stres:** Trsovi tretirani elicitorima pokazuju bolju otpornost ne samo na biotske nego i na abiotičke stresove (poput suše i visokih temperatura), čime se dugoročno čuva vitalnost i dugovječnost nasada.

Smjernice za budućnost održivog vinogradarstva

Uključivanje ekstrakata pinofita i kompleksiranog bakra u programe integrirane zaštite bilja (IPM) nije samo ekološki kompromis, već strateška investicija u stabilnost i profitabilnost vinogradarske proizvodnje. Buduća istraživanja i stručna praksa trebali bi biti usmjereni na daljnju optimizaciju rokova primjene s obzirom na lokalne mikroklimatske uvjete i specifične kultivare, s krajnjim ciljem stvaranja otpornijih, stabilnijih i ekološki održivijih sustava uzgoja vinove loze.

Pregled literature

Adrian, M., Trouvelot, S., Confais, J., Daire, X. i Poinssot, B. (2017). *Plant defense inducers: Application in grapevine protection and mechanisms of action. Phytopathologia Mediterranea, 56(3), 353–369.*

Agrios, G. N. (2005). *Plant pathology (5th ed.). Elsevier Academic Press.*

Aziz, A., Poinssot, B., Daire, X., Adrian, M., Bézier, A., Lambert, B., Joubert, J. M. i Pugin, A. (2003). *Laminarin elicits defense responses in grapevine and induces protection against Botrytis cinerea and Plasmopara*

viticola. Molecular Plant-Microbe Interactions, 16(12), 1118–1128. https://doi.org/10.1094/MPMI.2003.16.12.1118

Bavaresco, L., Lucini, L. i Gatti, M. (2019). *The use of elicitors to enhance plant defense and grape quality in Vitis vinifera L. Molecules, 24(17), 3165. https://doi.org/10.3390/molecules24173165*

Brunetto, G., Melo, G. W. B. de, Toselli, M., Quartieri, M., Tagliavini, M. i Comin, J. J. (2016). *The use of copper in vineyard systems: Potential impacts on soil and grapevine, and management strategies. Ciência e Agrotecnologia, 40(6), 633–645.*

Chen, G., Li, J., Han, H., Du, R. i Wang, X. (2022). *Physiological and molecular mechanisms of plant responses to copper stress. International Journal of Molecular Sciences, 23(21), 12950. https://doi.org/10.3390/ijms232112950*

European Commission. (2018). Commission Implementing Regulation (EU) 2018/1981 of 13 December 2018 renewing the approval of the active substances copper compounds, as candidates for substitution, 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 the Annex to Commission Implementing Regulation (EU) No 540/2011. Official Journal of the European Union.

Gao, X., Wheeler, T., Li, Z., Kenerley, C. M., He, P. i Shan, L. (2011). *Silencing GhNDR1 and GhMKK2 compromises cotton resistance to Verticillium wilt. The Plant Journal, 66(2), 293–305. https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2011.04491.x*

Gauthier, A., Trouvelot, S., Kelloniemi, J., Frettinger, P., Wendehenne, D., Daire, X., Joubert, J.-M., Ferrarini, A., Delledonne, M., Flors, V. i Poinssot, B. (2014). *The sulfated laminarin triggers a stress transcriptome before priming the SA- and ROS-dependent defenses during grapevine's induced resistance against Plasmopara viticola. PLoS ONE, 9(2), e88145. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088145*

Gessler, C., Pertot, I. i Perazzolli, M. (2011). *Plasmopara viticola: A review of the pathogen, its interaction with the grapevine and its management. Phytopathologia Mediterranea, 50(1), 3–21.*

Hamiduzzaman, M. M., Jakab, G., Barnavon, L., Neuhaus, J.-M. i Mauch-Mani, B. (2005). *β-Aminobutyric acid-induced resistance against downy mildew in grapevine acts through the potentiation of callose formation and jasmonic acid signaling. Molecular Plant-Microbe Interactions, 18(8), 819–829. https://doi.org/10.1094/MPMI-18-0819*

Héloir, M.-C., Adrian, M., Brulé, D., Claverie, J., Cordelier, S., Daire, X., Dorey, S., Gauthier, A., Lemaître-Guillier, C., Negrel, J., Trdá, L., Trouvelot, S., Vandelle, E. i Poinssot, B. (2019). *Recognition of elicitors in grapevine: From MAMP and DAMP perception to induced resistance. Frontiers in Plant Science, 10, 1117. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01117*

Jiao, Y., Xu, W., Duan, D., Wang, Y. i Nick, P. (2016). *A stilbene synthase allele from a Chinese wild grapevine confers resistance to powdery mildew by recruiting salicylic acid signalling for efficient defence. Journal of Experimental Botany, 67(19), 5841-5856. https://doi.org/10.1093/jxb/erw351*

Klessig, D. F., Choi, H. W. i Dempsey, D. A. (2018). *Salicylic acid and its function in plant immunity. Molecular Plant-Microbe Interactions, 31(12), 1296–1307.*

Komárek, M., Čadková, E., Zemanová, V., Oulehle, F. i Boháčová, M. (2010). *Evaluation of different approaches to copper phytotoxicity alleviation in agricultural soils. Environmental and Experimental Botany, 69(2), 127–139.*

La Torre, A., Caradonia, F., Battaglia, V. i Mancini, F. (2018). *Copper in plant protection: Current status and prospects. Phytopathologia Mediterranea, 57(2), 201–236.*

Marant, B., Crouzet, J., Flourat, A. L., Jeandet, P., Aziz, A. i Courot, E. (2024). *Key-enzymes involved in the biosynthesis of resveratrol-based stilbenes in Vitis spp.: A review. Phytochemistry Reviews, 23, 1125–1148.*

Salinari, F., Giosuè, S., Rossi, V., Tubiello, F. N., Rosenzweig, C. i Gullino, M. L. (2007). *Downy mildew outbreaks on grapevine under climate change: Elaboration and application of an empirical-statistical model. EPPO Bulletin, 37(2), 317–326. https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.2007.01126.x*

Taibi, O., Fedele, G., Salotti, I. i Rossi, V. (2023). *Infection Risk-Based Application of Plant Resistance Inducers for the Control of Downy and Powdery Mildews in Vineyards. Agronomy, 13(12), 2959. https://doi.org/10.3390/agronomy13122959*

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M. i Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development (6th ed.). Sinauer Associates.*

Toffolatti, S. L., Longa, C. M. O. i Vercesi, A. (2016). *Plasmopara viticola: A review on downy mildew of grapevine and management strategies. Pathogens, 5(2), 35. https://doi.org/10.3390/pathogens5020035*

Wang, Y., Mostafa, S., Zeng, W. i Jin, B. (2021). *Function and mechanism of jasmonic acid in plant responses to abiotic and biotic stresses. International Journal of Molecular Sciences, 22(16), 8568. https://doi.org/10.3390/ijms22168568*

Wightwick, A. M., Mollah, M. R., Partington, D. L. i Allinson, G. (2008). *Copper fungicide residues in Australian vineyard soils. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 56(7), 2457–2463.*

Xu, E., Liu, Y., Gu, D., Zhan, X., Li, J., Zhou, K., Zhang, P. i Zou, Y. (2024). *Molecular mechanisms of plant responses to copper: From deficiency to excess. International Journal of Molecular Sciences, 25, 6993. https://doi.org/10.3390/ijms25136993*

Zhang, Z., Niu, Z., Chen, Z., Zhao, Y. i Yang, L. (2025). *Review of the pathogenic mechanism of grape downy mildew (Plasmopara viticola) and strategies for its control. Microorganisms, 13(6), 1279. https://doi.org/10.3390/microorganisms13061279*

Prispjelo/Received: 9.9.2026. ***Prihvaćeno/Accepted: 12.10.2026.***

Professional paper

Conifer extracts and complexed copper (Cu) as modern resistance inducers in grapevines

Abstract

Modern viticulture in Croatia is facing major challenges that include climate change, increasingly intensive pressure from phytopathogenic organisms (particularly grapevine downy mildew caused by the oomycete Plasmopara viticola), and increasingly strict European Union regulatory measures aimed at reducing the input of heavy metals and conventional plant protection products into agroecosystems. Although long established in practice, the traditional application of contact copper fungicides carries the risk of elemental copper accumulation in the soil and the occurrence of phytotoxicity. The concept of induced resistance (elicitation) through the application of natural biostimulatory compounds emerges as a sustainable alternative and complement to conventional protection programs. This paper examines the synergistic effect of conifer (pinophyte) extracts and complexed copper (Cu) as modern inductors of grapevine immunity. While plant extracts rich in secondary metabolites act as signals of pathogen attack that trigger the synthesis of phytoalexins (such as stilbenes) in the grapevine and strengthen cell walls, technologically advanced complexed copper ensures high systemic mobility and micronutritional activation of defense enzymes at multiples lower doses of pure copper per hectare. The application of these elicitors enables effective disease control, preserves the soil microbiome, and supports the goals of green and sustainable viticultural production in Croatia.

Keywords: *grapevine, conifer extracts, complexed copper, elicitors, systemic acquired resistance (SAR), downy mildew (Plasmopara viticola), phytoalexins*