

Primjena metabolita endofitnih gljiva u ekološkoj zaštiti bilja

Sažetak

Endofitne gljive su mikroorganizmi koji žive unutar biljnih tkiva bez izazivanja simptoma bolesti, pri čemu stvaraju simbiotske odnose od kojih uključeni organizmi imaju koristi. Ove gljive sintetiziraju širok spektar sekundarnih metabolita, bioaktivnih spojeva koji igraju ključnu ulogu u njihovom razvoju, ali i u otpornosti biljaka na biotičke i abiotičke stresove. Sekundarni metaboliti endofitnih gljiva pokazali su značajan potencijal kao prirodne antifungalne tvari te se istražuju kao alternativa kemijskim fungicidima, koji često imaju negativne učinke na okoliš i ljudsko zdravlje. Unatoč velikom broju identificiranih metabolita i dokazanoj učinkovitosti u laboratorijskim uvjetima, njihova široka primjena u poljoprivredi još uvijek nije postignuta. Glavni izazovi uključuju pravna ograničenja, varijabilnost učinkovitosti u stvarnim uvjetima, komercijalnu neisplativost te nedovoljnu prihvaćenost među poljoprivrednicima. U ovom pregledu analiziraju se ključni razlozi koji ograničavaju širu primjenu sekundarnih metabolita endofitnih gljiva te se razmatraju potencijalna rješenja i buduće perspektive razvoja ovih bioaktivnih spojeva u zaštiti bilja.

Ključne riječi: endofitne gljive, sekundarni metaboliti, bioaktivni spojevi, antifungalne tvari, zaštita bilja

Uvod

Pretpostavlja se da sve biljne vrste na planeti sadrže barem nekoliko vrsta endofitnih gljiva. Utvrđeno je više od 1.000.000 endofitskih vrsta gljiva unutar preko 300.000 biljnih vrsta. Međutim, njihova funkcija unutar biljaka još uvijek nije dovoljno istražena (Fouda i sur., 2015.). Endofiti poboljšavaju ukupnu otpornost biljaka na sušu, salinitet, teške metale i druge toksične čimbenike iz okoliša (Grabka i sur., 2022.). zbog toga što se brzo prilagođavaju uvjetima okoliša (Rana i sur., 2019.).

Endofitne gljive

Endofitne gljive imaju ključnu ulogu u ekologiji biljaka jer ne samo da proizvode bioaktivne spojeve, već utječu i na rast i zdravlje biljaka. Njihova prisutnost može inducirati sistemsku otpornost biljaka, čime se smanjuje potreba za kemijskim pesticidima. Osim toga, interakci-

¹ izv. prof. dr. sc. **Jelena Ilić**, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek, Vladimira preloga 1, Osijek, Hrvatska
Autor za korespondenciju: jelena.ilic@fazos.hr

je između endofita i njihovih biljnih domaćina mogu povećati toleranciju biljaka na stresne uvjete kao što su suša, visoke temperature i prisutnost toksičnih metala u tlu.

Proučavanje ovih gljiva također otvara mogućnosti za razvoj novih strategija u biološkoj kontroli biljnih bolesti. Korištenje endofitnih gljiva ili njihovih sekundarnih metabolita u poljoprivredi može pridonijeti održivijem pristupu zaštiti bilja, smanjenju upotrebe sintetičkih pesticida te povećanju otpornosti usjeva na biotičke i abiotičke stresove. No, iako postoji velik potencijal za njihovu komercijalizaciju, još uvijek postoji niz regulatornih, tehnoloških i ekoloških izazova koje je potrebno prevladati prije njihove široke primjene.

Endofitne gljive proizvode različite sekundarne metabolite, bioaktivne spojeve niske molekularne težine. S obzirom na njihove biološke osobine, endofitne gljive imaju potencijal za primjenu u ekološkoj zaštiti bilja kao bio-proizvodi koji bi mogli smanjiti potrebu za kemijskim fungicidima. Međutim, korištenje živih organizama donosi određene izazove, budući da su podložni utjecajima vremenskih uvjeta, biljke domaćina te ostalih mikroorganizama. Alternativno, korištenje bioaktivnih spojeva koje proizvode gljive može omogućiti veću kontrolu nad njihovim učinkom.

Sekundarni metaboliti

Pojam "sekundarni metabolizam" prvi je primijenio Julius Sachs 1873. godine. Među širokim spektrom sekundarnih metabolita koje proizvode gljive, posebice endofiti, mnogi posjeduju antimikrobna svojstva (Eliopoulos i Mantzoukas, 2025.). Analize provedene tijekom posljednja dva desetljeća identificirale su 132 kemijske strukture s antifungalnim svojstvima. Poliketidi su najzastupljeniji među njima (53%), a slijede ih terpenoidi (13%), neribosomi peptidi (10%), fenoli (7%), alkaloidi (7%) i alifatski spojevi (5%).

Unatoč velikom broju laboratorijskih i terenskih istraživanja koja potvrđuju antifungalnu aktivnost gljivičnih endofita, Europska unija (EU) je do sada odobrila vrlo mali broj izolata za uporabu protiv fitopatogena, a nijedan od odobrenih proizvoda nije baziran na metabolitima. Pouzdanost primjene sekundarnih metabolita veća je od primjene živih organizama jer njihovo djelovanje nije toliko podložno vanjskim uvjetima. Primjena živih gljiva u poljoprivredi nailazi na izazove zbog nepredvidivosti njihova ponašanja u različitim uvjetima, dok izolirani metaboliti nude stabilniju alternativu.

Osim učinkovitosti, potrebno je procijeniti potencijalne negativne učinke primjene gljiva i njihovih metabolita na ljude, životinje i okoliš. Neki metaboliti mogu imati toksične učinke na neciljane organizme, uključujući insekte, biljke i sisavce, što može ograničiti njihovu primjenu. Regulacije u EU i drugim zemljama strogo kontroliraju uporabu novih bioaktivnih tvari kako bi se osigurala sigurnost potrošača i okoliša.

Neki od najperspektivnijih metabolita trenutno u istraživanju uključuju gliotoksin, destruksin i mikotoksine s niskom toksičnošću za neciljane organizme. Njihova primjena u suzbijanju gljivičnih bolesti biljaka pokazuje obećavajuće rezultate, osobito u integriranim sustavima zaštite bilja gdje se kombiniraju s drugim biološkim ili kemijskim strategijama. Povećana istraživanja u području metabolomike i sintetske biologije također bi mogla olakšati prilagodbu i optimizaciju ovih spojeva za praktičnu primjenu (Segaran i sur., 2025).

Buduća istraživanja trebala bi se usmjeriti na razumijevanje mehanizama djelovanja ovih metabolita, njihovu stabilnost u različitim uvjetima te mogućnosti formulacije proizvoda koji bi mogli biti komercijalno isplativi. Također, interdisciplinarni pristup, uključujući mikrobiologiju, kemiju, agronomiju i biotehnologiju, bit će ključan za daljnji razvoj ove perspektivne oblasti.

Izazovi u primjeni sekundarnih metabolita

Jedan od ključnih izazova u istraživanju i primjeni sekundarnih metabolita endofitnih gljiva je njihova proizvodnja u dovoljnoj količini. Iako laboratorijska ispitivanja često pokazuju obećavajuće rezultate, masovna proizvodnja bioaktivnih spojeva može biti zahtjevna i skupa. Tehnike fermentacije, optimizacija uvjeta rasta i genetsko inženjerstvo potencijalna su rješenja koja bi mogla omogućiti veću dostupnost ovih spojeva za primjenu u zaštiti bilja (Rigobelo, 2025.; Varma i sur., 2025.).

S druge strane, jedan od glavnih razloga ograničene primjene sekundarnih metabolita u poljoprivredi je i skepticizam poljoprivrednika, koji smatraju da biološki proizvodi nisu jednako učinkoviti kao kemijski fungicidi. Istraživanja pokazuju da većina bioloških proizvoda može smanjiti pojavu bolesti, ali rijetko potpuno eliminira patogene. Samo u slučajevima gdje su metaboliti izolirani i sintetski optimizirani, poput derivata grizeofulvina, utvrđena je veća učinkovitost u usporedbi s kemijskim fungicidima.

Dodatni izazov predstavlja komercijalizacija ovih proizvoda (Sundh i Eilenberg, 2021.). Proces razvoja, proizvodnje i komercijalizacije biofungicida temeljenih na metabolitima zahtijeva značajna financijska ulaganja, sofisticiranu tehnologiju i specijalizirano znanje. Konvencionalne kemijske tvrtke često nisu spremne prilagoditi se novim metodama proizvodnje, dok su biotehnoške tvrtke suočene s visokim troškovima istraživanja i regulatornim preprekama. Partnerstva između istraživačkih institucija i industrije mogu olakšati ovaj prijelaz, kao što je slučaj u nekim zemljama poput Španjolske, gdje su vladine politike potaknule takve suradnje.

Pored regulatornih prepreka, postoji i pitanje stabilnosti i dosljednosti djelovanja biofungicida u različitim agroekološkim uvjetima. Za razliku od sintetičkih proizvoda koji imaju predvidljivo djelovanje, sekundarni metaboliti endofitnih gljiva mogu biti osjetljivi na promjene u temperaturi, vlažnosti i sastavu tla. To može rezultirati nestabilnim učinkom na patogene, što dodatno otežava njihovu širu primjenu.

Tablica 1. Problemi primjene sekundarnih metabolita gljiva

Table 1. Problems of using secondary metabolites of fungi

1. Znanstveni izazovi	6. Kompleksnost spojeva i biosinteze
2. Tehnološki izazovi	7. Proizvodnja, stabilnost i skalabilnost
3. Regulatorne prepreke	8. Striktni propisi i dugotrajni proces odobrenja
4. Ekonomski faktori	9. Visoki troškovi i tržišna održivost
5. Ekološki izazovi	10. Sigurnost i utjecaj na okoliš

Unatoč izazovima, razvoj biofungicida temeljenih na metabolitima nudi niz prednosti u usporedbi s konvencionalnim fungicidima. Sekundarni metaboliti često imaju specifičan način djelovanja, što smanjuje mogućnost razvoja otpornosti kod patogena. Osim toga, mnogi od ovih spojeva su biorazgradivi i manje štetni za okoliš u usporedbi s kemijskim pesticidima. Održiva poljoprivreda sve više prepoznaje važnost ekološki prihvatljivih metoda zaštite bilja, što bi moglo potaknuti daljnja ulaganja u istraživanja i razvoj biofungicida (Poveda i sur., 2025.).

Konačno, budućnost komercijalizacije biofungicida temeljenih na sekundarnim metabolitima ovisit će o uspjehu u prevladavanju regulatornih prepreka, osiguravanju stabilnosti proizvoda i stvaranju ekonomski isplativih modela proizvodnje. Razvoj tehnološki naprednih formulacija koje poboljšavaju stabilnost metabolita u različitim uvjetima mogao bi značajno povećati njihovu učinkovitost i prihvaćenost na tržištu. Također, edukacija poljoprivrednika o prednostima i pravilnoj primjeni ovih proizvoda ključna je za njihovu širu primjenu.

Ulaganja u biotehnološke inovacije, zajedno s podrškom regulatornih tijela i industrije, mogla bi omogućiti širu upotrebu biofungicida u poljoprivredi, smanjujući ovisnost o sintetičkim pesticidima i doprinoseći održivijem sustavu proizvodnje hrane.

Zaključak

Unatoč velikom potencijalu endofitnih gljiva i njihovih metabolita u kontroli gljivičnih bolesti, njihova široka primjena tek je u začetku. Nedostatak industrijskih studija o komercijalnoj proizvodnji ovih spojeva i regulatorne prepreke dodatno usporavaju razvoj.

Proces razvoja biofungicida temeljenog na metabolitima uključuje višestruke faze, od izolacije gljiva, identifikacije metabolita, optimizacije fermentacije, do razvoja komercijalnih formulacija i terenskih testiranja. Većina istraživačkih studija fokusira se na početne faze, dok su procesi optimizacije, komercijalizacije i regulatornog odobrenja još uvijek nedovoljno razvijeni.

Dodatni izazov predstavlja visoka varijabilnost u proizvodnji sekundarnih metabolita, budući da na njihovu biosintezu utječu uvjeti uzgoja, vrsta hranjivih podloga i interakcije s drugim mikroorganizmima. Osim toga, stabilnost ovih spojeva u komercijalnim formulacijama i njihova dugoročna pohrana zahtijevaju napredne tehnološke pristupe kako bi se osigurala učinkovitost proizvoda na tržištu.

Regulatorni okvir u Europskoj uniji i drugim dijelovima svijeta postavlja stroge kriterije za odobravanje novih biofungicida, što produžuje i poskupljuje proces njihove registracije. Za razliku od kemijskih fungicida, koji su u uporabi desetljećima i imaju jasno definirane postupke odobrenja, biofungicidi moraju proći dugotrajna testiranja kako bi se dokazala njihova sigurnost za ljude, okoliš i neciljane organizme.

Unatoč ovim izazovima, interes za biološku zaštitu bilja raste zbog sve strožih propisa o smanjenju uporabe sintetskih pesticida i sve veće svijesti o ekološkoj održivosti. Sekundarni metaboliti endofitnih gljiva nude niz prednosti, uključujući specifičnost djelovanja, nižu vjerojatnost razvoja otpornosti patogena te manji utjecaj na okoliš u usporedbi s konvencionalnim pesticidima.

Uspješna primjena ovih bioproizvoda u poljoprivrednoj proizvodnji zahtijeva jaču suradnju između istraživačkih institucija i industrije te potporu javnih politika koje potiču inovacije u biološkoj zaštiti bilja. Primjeri iz nekih zemalja, poput Španjolske i Nizozemske, pokazuju da financijske potpore i regulatorne olakšice mogu ubrzati komercijalizaciju biofungicida.

Ako se ovi izazovi prevladaju, sekundarni metaboliti endofitnih gljiva mogli bi postati ključna alternativa konvencionalnim kemijskim fungicidima u održivoj poljoprivredi, pridonoseći zdravijem okolišu i sigurnijoj proizvodnji hrane.

Literatura

Eliopoulos, P. A., & Mantzoukas, S. (2025). *Fungal Metabolites as Crop Pest Controllers. In Fungal Metabolites for Agricultural Applications: Biostimulation and Crop Protection by Fungal Biotechnology (pp. 137-162). Cham: Springer Nature Switzerland.*

- Fouda, A. H., Hassan, S. E. D., Eid, A. M., & Ewais, E. E. D. (2015).** Biotechnological applications of fungal endophytes associated with medicinal plant *Asclepias sinaica* (Bioss.). *Annals of Agricultural Sciences*, 60(1), 95-104.
- Grabka, R., d'Entremont, T. W., Adams, S. J., Walker, A. K., Tanney, J. B., Abbasi, P. A., & Ali, S. (2022).** Fungal endophytes and their role in agricultural plant protection against pests and pathogens. *Plants*, 11(3), 384.
- Poveda, J., Santamaría, Ó., Diez, J. J., & Martín-García, J. (2025).** Mycorrhizal Fungi as a Source of Metabolites for Agricultural Applications. In *Fungal Metabolites for Agricultural Applications: Biostimulation and Crop Protection by Fungal Biotechnology* (pp. 39-58). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Rana, K. L., Kour, D., Sheikh, I., Dhiman, A., Yadav, N., Yadav, A. N., ... & Saxena, A. K. (2019).** Endophytic fungi: biodiversity, ecological significance, and potential industrial applications. *Recent advancement in white biotechnology through fungi: volume 1: diversity and enzymes perspectives*, 1-62.
- Rigobelo, E. C. (2025).** Endophytic Filamentous Fungi as Sources of Metabolites for Agricultural Applications. In *Fungal Metabolites for Agricultural Applications: Biostimulation and Crop Protection by Fungal Biotechnology* (pp. 1-20). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Segaran, G., Shah, P., Gurumurthy, J., & Sathiavelu, M. (2025).** Fungal Metabolites as Crop Pathogen Controllers. In *Fungal Metabolites for Agricultural Applications: Biostimulation and Crop Protection by Fungal Biotechnology* (pp. 105-135). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Sundh, I., & Eilenberg, J. (2021).** Why has the authorization of microbial biological control agents been slower in the EU than in comparable jurisdictions?. *Pest Management Science*, 77(5), 2170-2178.
- Varma, J., Zala, U., Pankaj, P. P., Upadhye, V. J., & Shrivastav, A. (2025).** Bioactive Compounds for Food, Agricultural and Health Sector: Opportunities and Challenges. *Biotechnological Intervention in Production of Bioactive Compounds: Biosynthesis, Characterization and Applications*, 57-72.

Prispjelo/Received: 10.3.2025.

Prihvaćeno/Accepted: 8.4.2025.

Professional paper

Application of endophytic fungal metabolites in ecological plant protection

Abstract

Endophytic fungi are microorganisms that inhabit plant tissues without causing disease symptoms, forming symbiotic relationships that benefit both parties. These fungi synthesize a wide array of secondary metabolites, bioactive compounds that are crucial for their development and enhance plant resistance to biotic and abiotic stress factors. The secondary metabolites produced by endophytic fungi have demonstrated significant potential as natural antifungal agents and are being explored as alternatives to chemical fungicides, which often have adverse effects on the environment and human health. Despite the identification of numerous metabolites and their proven efficacy in laboratory settings, their widespread adoption in agriculture remains unachieved. Key challenges include legal restrictions, variability in effectiveness under real-world conditions, lack of commercial viability, and insufficient acceptance among farmers. This review examines the primary obstacles to the broader application of secondary metabolites from endophytic fungi and discusses potential solutions and future prospects for the development of these bioactive compounds in plant protection.

Keywords: endophytic fungi, secondary metabolites, bioactive compounds, antifungal substances, plant protection