

Barbara Simončič, Brigita Tomšič

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta Univerze v Ljubljani, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija

Trajnostna kemijska apretura svile z navdihom iz narave

Sustainable Chemical Finishing of Silk Inspired by Nature

Strokovni članek/Professional article

Prispelo/Received 12–2025 • Sprejeto/Accepted 1–2026

Korespondenčna avtorica/Corresponding author:

prof. dr. Barbara Simončič

E-pošta: barbara.simoncic@ntf.uni-lj.si

ORCID iD: 0000-0002-6071-8829

Izvleček

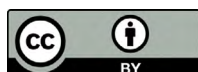
V prispevku so predstavljene prednosti in pomanjkljivosti svile kot naravnega proteinskega tekstilnega vlakna ter možnosti njene funkcionalizacije s kemijsko apreturo z uporabo biopolimerov in bioosnovanih spojin, pridobljenih iz različnih rastlinskih in živalskih virov. Med sredstvi za doseganje protimikrobnih lastnosti izstopajo hitozan in izbrane bioaktivne spojine ter naravna barvila s protimikrobnim učinkom. Za izboljšanje ognjevarnih lastnosti sta predstavljeni fitinska kislina in amonijev fitat, s fosforjem bogati spojini z učinkovitim mehanizmom zaviranja gorenja. Za doseganje UV-zaščite so predstavljeni naravni UV-absorberji s konjugiranimi sistemi, ki učinkovito absorbirajo UVA- in UVB-sevanje. Za zaščito pred insekti so izpostavljena eterična olja z dokazano repelentno aktivnostjo. Podrobno so predstavljene kemijske strukture uporabljenih bioaktivnih spojin, njihov izvor in mehanizmi zaščitnega delovanja.

Ključne besede: svila, kemijska apretura, biopolimeri, bioosnovane spojine, mehanizmi delovanja

Abstract

The paper discusses the advantages and limitations of silk as a natural protein-based textile fibre, as well as its potential for functionalisation through chemical finishing with biopolymers and bio-based compounds derived from various plant and animal sources. Among the agents providing antimicrobial properties, chitosan, selected bioactive compounds and natural dyes with antimicrobial activity are highlighted. To enhance flame retardancy, phytic acid and ammonium phytate–phosphorus-rich compounds with effective flame-inhibiting mechanisms are introduced. For UV protection, natural UV absorbers with conjugated systems capable of efficiently absorbing UVA and UVB radiation are presented. For insect protection, essential oils with proven repellent activity are emphasised. The paper provides a detailed account of the chemical structures of applied bioactive compounds, their origins and their protective mechanisms of action.

Keywords: silk, chemical finishing, biopolymers, bio-based compounds, mechanisms of action



Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution CC BY 4.0 licence (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Authors retain ownership of the copyright for their content, but allow anyone to download, reuse, reprint, modify, distribute and/or copy the content as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publisher. This journal does not charge APCs or submission charges.

1 Uvod

Svila, naravno proteinsko vlakno, pridobljeno pretežno iz kokonov sviloprejk, je že od antičnih civilizacij uveljavljena kot prestižen tekstilni material [1]. Njena superiorna kombinacija estetskih in udobnostnih lastnosti, njene inherentne lastnosti, kot so visoka natezna trdnost, nizka plosčinska masa, ugodno uravnavanje vlage, gladka površina ter značilen optični sijaj, omogočajo njeno široko uporabo v oblačilni in dekorativni industriji. Poleg tega svila zaradi svoje netoksičnosti, biokompatibilnosti in biološke razgradljivosti dobiva čedalje večji pomen kot biomaterial za različne biomedicinske aplikacije [2].

Kljub številnim prednostim pa svila izkazuje tudi vrsto pomanjkljivosti, ki pomembno omejujejo njeno uporabnost v visokozahtevni tehniki in zaščitnih aplikacijah. Zaradi proteinske narave vlaken, sestavljenih iz fibroina in sericina, je svila občutljiva na mikrobno razgradnjo, njena hidrofilnost pa pripomore k povečanju rasti in prenosa mikroorganizmov. Posledično ne daje zadostne higienske zaščite pri nošenju in ne preprečuje prenosa patogenov, kar je ključno za medicinske tekstilije. Kot beljakovinsko vlakno izkazuje nezadostno ognjevarnost in se ob izpostavitvi plamenu hitro vname. Zato pogosto ne izpolnjuje strogih standardov požarne varnosti, zahtevanih za notranjo opremo. Podobno kot volna je svila dovzetna za napad tekstilnih insektov, kar lahko med skladiščenjem povzroči nepopravljivo materialno škodo. Zaradi občutljivosti svile na UV-sevanje dolgotrajna izpostavljenost svetlobi vodi do bledenja barv in slabšanja mehanskih lastnosti, ob tem pa svila uporabniku ne daje zadostne UV-zaščite.

Za premagovanje teh omejitev je v tekstilnem inženirstvu ključna uporaba kemijske apreture, s katero je mogoče svili podeliti specifične funkcionalne lastnosti, kot so protimikrobnost, ognjevarnost, UV-zaščita in zaščita pred insekti [3]. Tradicionalna kemijska apreturna sredstva sicer zagotavljajo visoko učinkovitost, vendar pa pogosto ne sledijo načelom trajnostnega razvoja in zelene kemije [4]. Zato je prehod na trajnostne bioosnovane apreture

izjemno pomemben, vendar ostaja pogosto omejen zaradi manjše učinkovitosti, slabše pralne obstojnosti, razvojne nezrelosti ter zahtevnejše vključitve v obstoječe industrijske procese.

Kljub tem izzivom napredek na področju biopolimerov, bioosnovanih aktivnih snovi in okolju prijaznih postopkov kemijske apreture kaže na realne možnosti oblikovanja trajnostne funkcionalizacije svile. To odpira priložnost za razvoj visokozmogljivih svilenih tekstilij z dodano vrednostjo, namenjenih naprednim tehničnim, zaščitnim in biomedicinskim aplikacijam.

2 Funkcionalna apretura z uporabo biopolimerov in bioosnovanih spojin

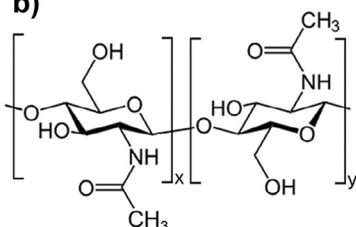
2.1 Protimikrobna apretura

Med naravnimi protimikrobnimi sredstvi zavzema osrednje mesto hitozan (slika 1), ki je polisaharid, pridobljen z deacetilacijo hitina, ki je takoj za celulozo drugi najpogostejše zastopani biopolimer in se pretežno nahaja v lupinah kozic, tetivah in lupinah rakov in jastogov, celičnih stenah kvasovk in gliv ter povrhnjici žuželk [5]. Protimikrobna aktivnost hitozana je neposredno odvisna od njegove molekulske mase, stopnje deacetilacije in pH. Na splošno protimikrobna aktivnost hitozana narašča z naraščajočo stopnjo deacetilacije, kar pomeni z naraščanjem števila aminoskupin v makromolekuli, ter z znižanjem molekulske mase in pH-medija [6]. Tako je stopnja deacetilacije večine tržnih produktov hitozana višja od 85 %. Protimikrobna aktivnost hitozana se močno poveča v kislem pH-mediju, ki omogoča protonacijo aminoskupin, kar hkrati poveča njegovo topnost v vodni raztopini. Da protimikrobno delovanje ne bi bilo odvisno od pH-medija, se danes kot protimikrobna sredstva uporabljajo različni derivati hitozana s kvarternimi amonijevimi skupinami (slika 1d), ki v strukturi vključujejo stalno kationsko skupino in zato izkazujejo odlično protimikrobno učinkovitost v širokem pH-območju [7].

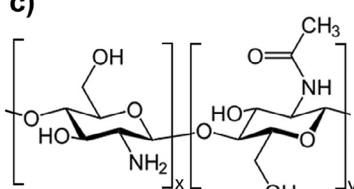
a)



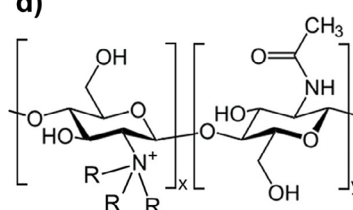
b)



c)



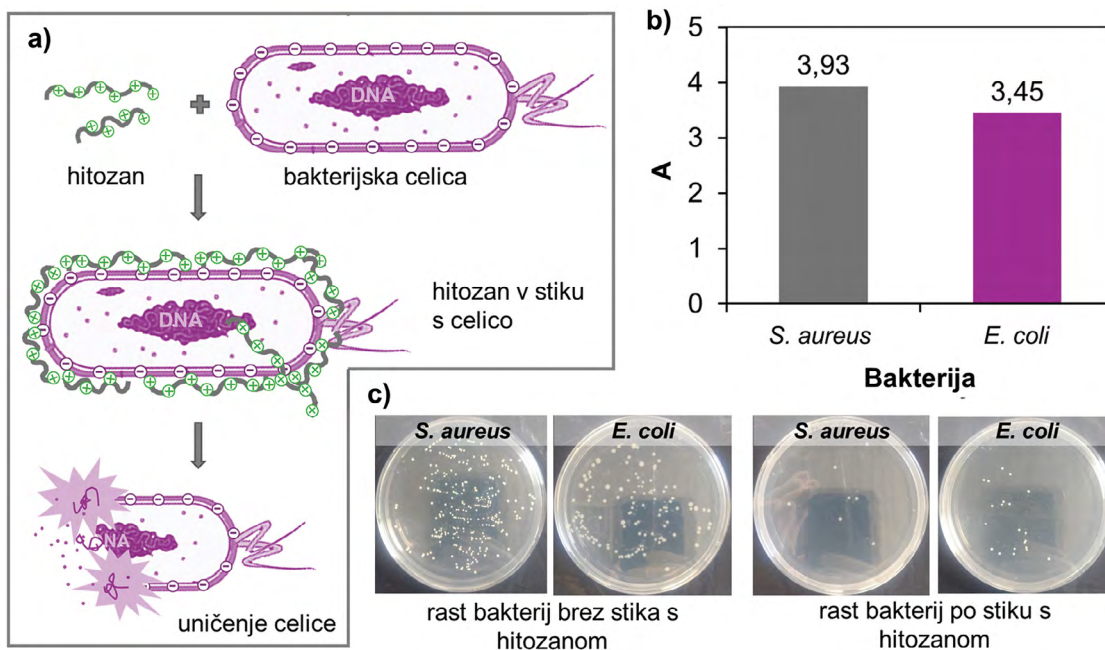
d)



Slika 1: Pomembni viri hitina (a), kemijska struktura hitina (b), hitozana (c) in kvarterne soli hitozana (R je metilna skupina ali daljša alkilna skupina) (d) [8]

Mehanizem protimikrobnega delovanja hitozana temelji na tvorbi elektrostatskih privlačnih interakcij med kationskimi skupinami hitozana in negativno

nabito celično membrano mikroorganizmov (slika 2a) [9]. Privlačne elektrostatske sile povzročijo poškodbo celične membrane in povečano prepustnost,



Slika 2: Shematski prikaz mehanizma protimikrobnega delovanja hitozana prek elektrostatskega privlaka med kationskimi skupinami hitozana in negativno nabito celično membrano mikroorganizma ter penetracijo v celico in vezanjem na DNA (a), protibakterijska aktivnost, A, 1 wt % hitozana na svileni tkanini za grampozitivno bakterijo *Staphylococcus aureus* in gramnegativno bakterijo *Escherichia coli* (b), rast preživelih bakterij na hranilnem agarju po opravljenem protibakterijskem testu svilene tkanine z 1 wt % hitozanom (c, d)

kar vodi do iztekanja ionov, nukleotidov in beljakovin ter posledično do izgube celične homeostaze in smrti mikroorganizma. Oligomeri hitozana lahko zaradi svoje nižje molekulske mase in velike gibljivosti prodrejo v notranjost celice mikroorganizma, kjer se vežejo na deoksiribonukleinsko kislino ter s tem zavrejo sintezo ribonukleinske kisline in beljakovin. To zavre rast mikroorganizmov in povzroči njihovo odmiranje. Hitozan deluje protimikrobno na širok spekter bakterij in tudi gliv. Njegova minimalna inhibitorna koncentracija je odvisna od vrste mikroorganizma. Na splošno velja, da je učinkovitejši za grampozitivne kot gramnegativne bakterije (slika 2b,c), a so podatki v literaturi tudi kontradiktorni. Če so makromolekule hitozana kemijsko kovalentno vezane na površino vlaken prek zamreževala, se ne sproščajo z vlaken v okolico, temveč na njihovi površini oblikujejo biološko bariero za mikroorganizme. Tako uničijo le mikroorganizme, ki se adsorbirajo na površino tekstilije. Apretura pa je obstojna na večkratno pranje [10].

Vendar pa hitozan ni edino naravno protimikrobno sredstvo, temveč protimikrobno delujejo tudi nekatere bioaktivne spojine in naravna barvila, ki se nahajajo v rastlinskih izvlečkih in predstavljajo sekundarne rastlinske metabolite (slika 3) [7, 11–14]. Med njimi so najpomembnejši tanini, flavonoidi, antrakinoni in kurkuminoidi, katerih naloga je zaščititi rastline pred različnimi mikroorganizmi. Mehanizem njihovega protimikrobnega delovanja je raznolik in neposredno odvisen od kemijske strukture spojine. Nekatere izmed spojin se vežejo na celično membrano mikroorganizma, jo destabilizirajo, povečajo njeno prepustnost ter s tem povzročijo uhajanje citoplazme, kar je za mikroorganizem uničujoče. Lahko tvorijo tudi komplekse s celičnimi beljakovinami in encimi ter tako motijo celični metabolizem. Nekatere sintetizirajo kisikove reaktivne zvrsti, ki povzročijo oksidativni stres in s tem poškodujejo celične komponente. Večini od teh spojin pripisujejo tudi protivnetne in antioksidativne lastnosti. V tekstilstvu so se kot

a)



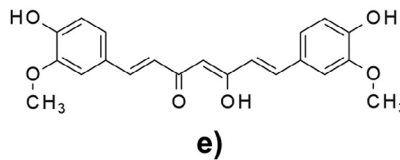
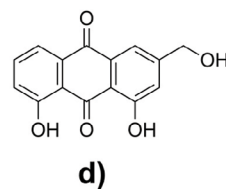
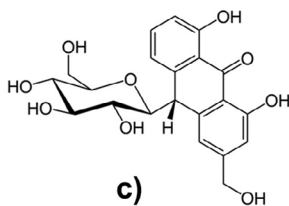
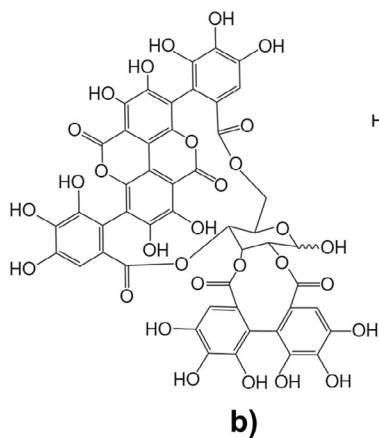
granatno jabolko



Aloe vera



kurkuma



Slika 3: Pomembni viri bioaktivnih spojin s protimikrobnim delovanjem (a), kemijska struktura punikalagina (b) [16], aloina B (c) [17], aloe emodina (d) [18] in kurkumina (e) [19]

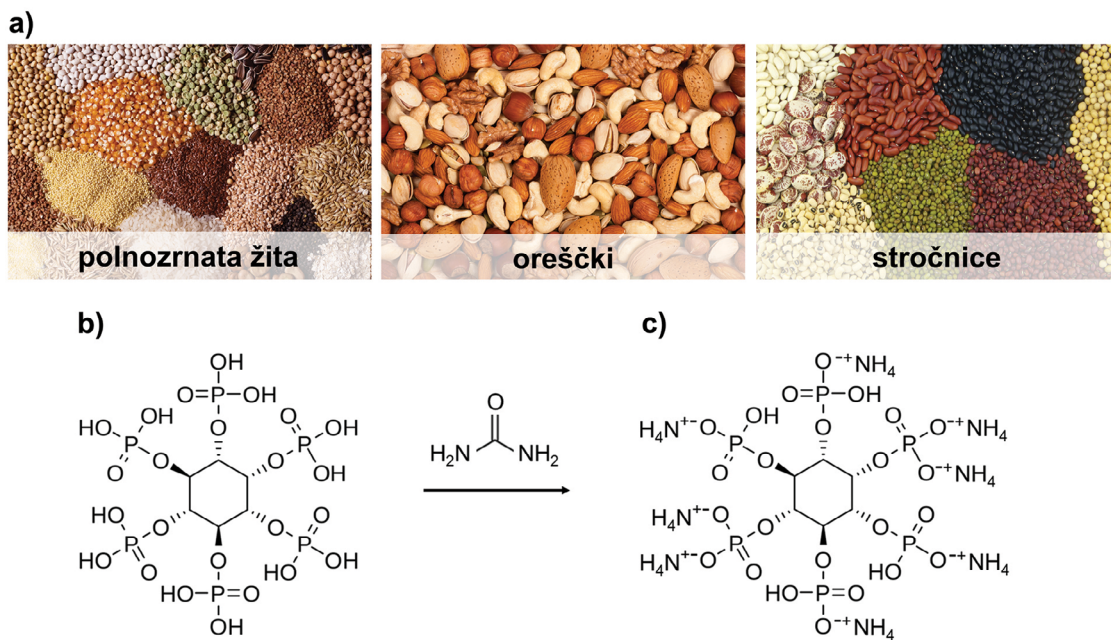
protimikrobna sredstva že uveljavili izvlečki lupin granatnega jabolka, listov čajevca in aloe vere, korenike kurkume, lubja cimeta in cvetov sivke [15]. Pomembna pomanjkljivost bioaktivnih spojin je, da nimajo velike afinitete do tekstilnih vlaken, se iz njih z lahkoto izlužijo in zato nanosi niso pralno obstojni.

2.2 Ognjevarna apretura

Naravna ognjevarna sredstva imajo velik gospodarski pomen, saj so bila v preteklih desetletjih številna zelo učinkovita ognjevarna sredstva, predvsem na podlagi halogenskih in fosforhalogenskih spojin prepovedana za prodajo zaradi svoje karcinogenosti, mutagenosti, bioakumulativnosti in persistentnosti [20]. In prav prepoved njihove uporabe je vodila do novih pristopov za razvoj nestrupenih ognjevarnih sredstev iz obnovljivih virov, med njimi tudi biomakromolekul in biosnovanih ognjevarnih snovi. Med biomolekulami so se kot ognjevarna sredstva že uveljavili različni proteini, kot so kazeini in sirotkini proteini, ter deoksiribonukleinska kislina [21], med biosnovanimi spojinami pa fitinska kislina in nje-

na sol amonijev fitat [22]. Te molekule so bogate s fosforjem in dušikom, ki pomembno pripomoreta k zaviranju gorenja.

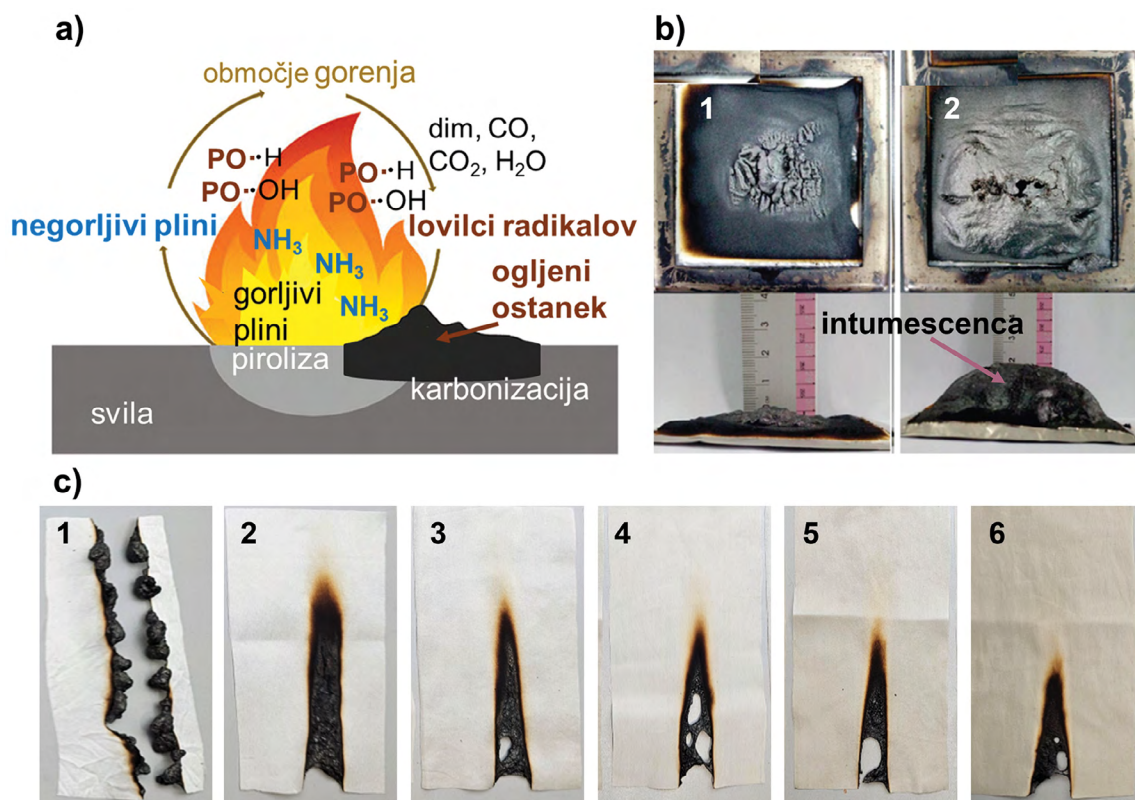
Fitinska kislina in amonijev fitat sta danes že splošno uporabljeni naravni ognjevarni sredstvi za tekstilije, tudi svilene [23–25]. Vir fitinske kisline so različne rastline, kjer deluje kot zaščita pred oksidacijo in vir fosforja. Nahaja se v semenskih ovojnicah nekaterih žit, v ovojnicah oreškov, semenih stročnic ter v sončničnih, bučnih, sezamovih in lanenih semenih (slika 4a). Pridobiva se iz stranskih produktov prehrabne industrije, največkrat s kislinsko ali encimsko ekstrakcijo. Fitinska kislina vključuje v svoji strukturi šest fosfatnih skupin (slika 4b), kar pomeni visoko, približno 28-odstotno vsebnost fosforja. Mehanizem njenega ognjevarnega delovanja temelji na razgradnji fosfatnih skupin pri termičnem razpadu in sproščanju fosforne in oligofosforne kisline, ki katalizirata dehidracijo in karbonizacijo organske matrice ter pospešita tvorbo toplotno stabilnega ogljenega ostanka [26]. Ta preprečuje dostop kisika in toplote do preostalega organskega materiala, kar močno upočasni gorenje.



Slika 4: Pomembni rastlinski viri fitinske kisline (a) in sinteza amonijevega fitata (c) iz fitinske kisline (b) [27] v prisotnosti sečnine

Največja pomanjkljivost fitinske kisline je njen kisli karakter, zaradi česar lahko povzroči hidrolitični razpad tekstilij. Zato je fitinsko kislino nadomestil amonijev fitat (slika 4c), ki nastane pri reakciji fitinske kisline s sečnino. Kombinacija fosforja in dušika v strukturi omogoča sinergijski učinek pri ognjevarnem delovanju. Medtem ko fosforne in oligofosforne kisline pospešijo tvorbo ogljenega ostanka, se hkrati iz amonijevih skupin sproščajo plini (npr. NH_3 , H_2O), ki povzročijo nabrekanje (intumescenco)

ogljenega sloja ter s tem nastanek porozne zaščitne pene (slika 5a) [25, 28]. Ta penasti ogljeni sloj deluje kot toplotna in kisikova pregrada, ki zavira nadaljnje gorenje ter zmanjšuje hitrost sproščanja toplote. Poleg tega sproščeni plini redčijo vnetljive produkte v plinski zmesi, ki obdaja vlakna, kar dodatno izboljša ognjevarno učinkovitost. Zato nanos amonijevega fitata že pri nizkih koncentracijah povzroči samougasnitev svilene tkanine (slika 5b).



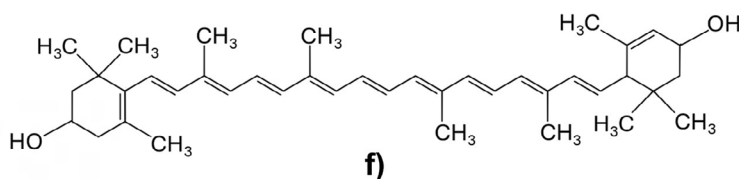
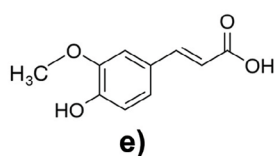
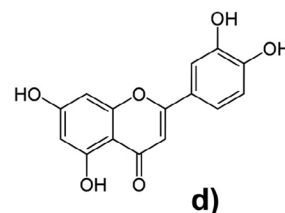
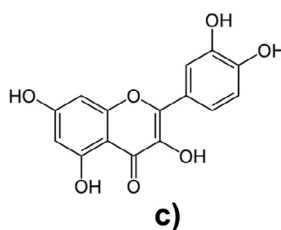
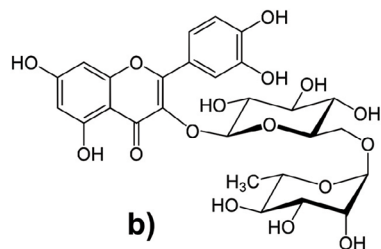
Slika 5: Mehanizem ognjevarnega delovanja amonijevega fitata (a), intumescenčni ogljeni ostanek po izgoritvi vzorca neapretirane svilene tkanine (1) in vzorca svilene tkanine (2), apretirane z 10-odstotno raztopino amonijevega fitata (b) (ponatis z dovoljenjem iz [25], avtorske pravice Elsevier 2023), fotografije vzorcev neapretirane svilene tkanine (1) in vzorcev svilene tkanine, apretirane z naraščajočo koncentracijo (2 – najnižja, 6 – najvišja) amonijevega fitata po opravljenem vertikalnem testu gorenja (c)

2.3 Zaščita pred UV-žarki

Zaradi svoje multifunkcionalnosti so nekateri naravni UV-absorberji že izpodrinili sintetična UV-zaščitna sredstva, kot so benzotriazoli in benzofenoni [29, 30]. So sekundarni rastlinski metaboliti, ki rastline

zaščitijo pred poškodbami z UV-žarki. Med njimi so pomembni flavonoidi, tanini, fenolne kisline, karotenoidi in kumarini, ekstrahirani iz različnih rastlinskih delov (slika 6).

a)

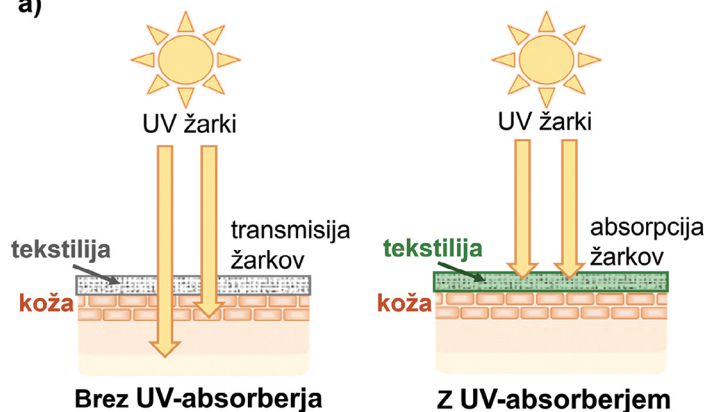


Slika 6: Pomembni viri bioaktivnih spojin z UV-zaščitnim delovanjem (a), kemijska struktura rutina (b) [32], kvercetina (c) [33], luteolina (d) [34], ferulne kisline (e) [35] in luteina (f) [36]

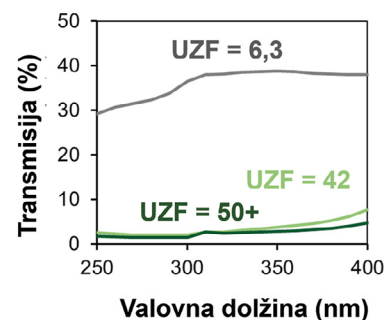
Mehanizem delovanja naravnih UV-absorberjev je neposredno povezan z njihovo kemijsko strukturo, saj so to aromatske spojine s konjugiranimi vezmi, ki so sposobne absorbirati energijo UVA (z valovno dolžino 320–400 nm) in UVB (280–320 nm) območij in jo pretvoriti ter sprostiti kot toplotno

energijo (slika 7). Ker večina teh spojin vključuje tudi hidroksilne funkcionalne skupine, ki lahko lovijo proste radikale, nastale med izpostavljenostjo UV-sevanju, delujejo antioksidativno, kar zmanjša verjetnost oksidativnih poškodb, nastalih na tekstilih [30, 31]. To pomeni veliko prednost naravnih

a)



b)



Slika 7: Mehanizem delovanja UV-absorberja na tekstiliji (a) (povzeto po [30]), transmissijski spekter in ultravijolični zaščitni faktor (UZF) neapretirane svilene tkanine (siva barva) in vzorcev svilene tkanine, apretirane z različnima UV-absorberjema (zelena barva) (c)

UV-absorberjev pred sintetičnimi pripravki, ki tega delovanja ne izkazujejo.

Med flavonoidi, ki so najučinkovitejši in najbolj fotostabilni naravni UV-absorberji za uporabo na tekstilih, zavzemata osrednji mesti rutin (slika 6b), ki je flavonolni glikozid in se največkrat pridobiva z ekstrakcijo olupkov citrusov ter listov in cvetov ajde, in kvercetin (slika 6c), katerega najbogatejši vir so zunanji sloji lupine čebule [24]. Za doseg visokih ultravijoličnih zaščitnih faktorjev (UZF) in hkratne večfunkcionalnosti se lahko flavonoidi uporabljajo v kombinaciji s tanini, kumarini ali karotenoidi, saj s tem zagotovijo absorpcijo UV-žarkov v širokem spektralnem območju, tekstilijam pa dajo tudi hkratne odlične antioksidativne, protimikrobne in protivnetne lastnosti, kot tudi barvo [37–39].

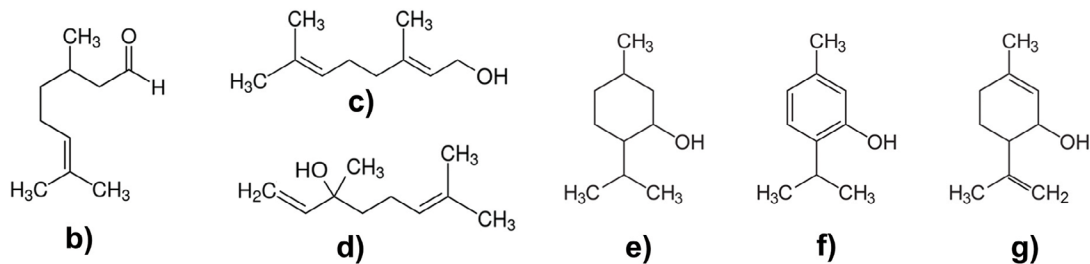
2.4 Zaščita pred insekti

Zaščita pred insekti je zgodovinsko in evolucijsko pogojena, saj so insekti kot prenašalci bolezni že od prazgodovine pomenili tveganje za preživetje ljudi. Medtem ko so za zatiranje različnih insektov v 19. stoletju uporabljali naravne pripravke na podlagi arzena, nikotina in piretrina, je v 20. stoletju sledil velik razmah sintetičnih organskih insekticidov,

med njimi dikloro-difenil-trikloroetan, ki so jih pozneje množično prepovedali ali močno omejili njihovo uporabo zaradi visoke bioakumulativnosti, rakotvornosti, povzročitve hormonskih motenj pri ljudeh in strupenosti za številne živali [40]. Pri tem so zaradi dolgoletne uporabe sintetičnih insekticidov številni insekti postali odporni proti njim.

Uporaba naravnih sredstev za zaščito pred insekti je v današnjem času pridobila velik pomen, saj je bolj trajnostna, okolju prijazna, varna in dolgoročno učinkovita alternativa sintetičnim insekticidom [40, 41]. Že naši predniki so rastline, ki vsebujejo specifične spojine in s svojim vonjem odganjajo žuželke, sadili v domačem okolju, prav tako pa iz njih delali pripravke za zatiranje insektov. Med njimi so zelo učinkovita eterična olja, pridobljena iz limonske trave (med njimi citronela), evkaliptusa, sivke, žajblja, poprove mete, bazilike, rožmarina in čajevca. Le-ta vključujejo naravne terpenoide (slika 8), sekundarne rastlinske metabolite, ki imajo zaščitno funkcijo kot repelenti in odganjajo različne insekte. Njihovo delovanje temelji na več hkratnih mehanizmi, ki vključujejo blokiranje vohalnih receptorjev insektov, motenje njihovega živčnega sistema, aktivacijo senzoričnih kanalov, ki insektom povzročijo draženje

a)

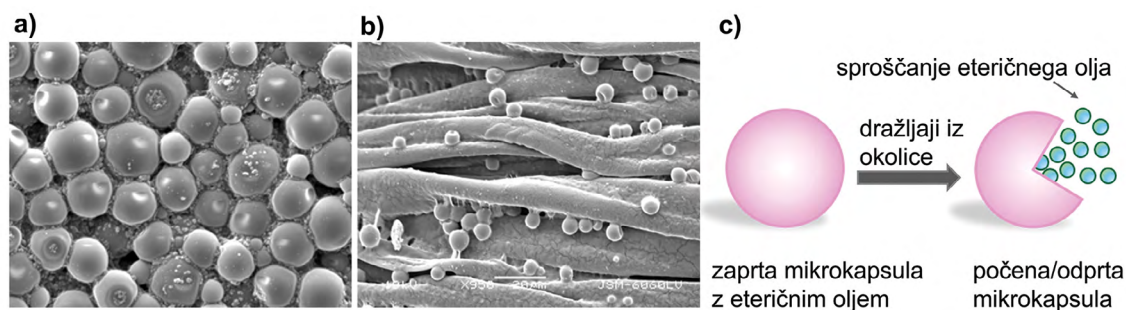


Slika 8: Pomembni rastlinski viri eteričnih olj (a), kemijska struktura citronelala (b) [42], geraniola (c) [43], linalola (d) [44], mentola (e) [45], timola (f) [46] in limonena (g) [47]

oziroma stresni odziv, in maskiranje telesnih vonjav gostitelja. Ker so naravni repelenti hitro razgradljivi na svetlobi, ne pomenijo dolgotrajne kontaminacije ter so zato tudi manj nevarni za ljudi in čebele.

Pomembna pomanjkljivost eteričnih olj kot zaščitnih sredstev pred insekti so slaba topnost v vodi, kemijska nestabilnost in visoka hlapnost. Za povečanje stabilnosti bioaktivnih spojin in zagoto-

vitev nadzorovanega sproščanja s tekstilije eterična olja nano- ali mikrokapsulirajo in jih nanašajo v prisotnosti veziv (sliki 9a in 9b) [48, 49]. Glede na strukturo nano- oziroma mikrokapsul se iz njih sproščajo zaradi trenja, pod vplivom vlage ali temperature, lahko tudi s časom (slika 9c). To bistveno podaljša in poveča učinkovitost njihovega repelentnega delovanja.



Slika 9: Disperzija mikrokapsul z eteričnim oljem (a), mikrokapsule na površini tekstilnih vlaken (b), shematični prikaz nadzorovanega sproščanja eteričnega olja iz počene oziroma odprte mikrokapsule zaradi dražljajev iz okolice (c)

3 Sklep

Raziskava potrjuje, da imajo biopolimeri in bioosnovane spojine velik potencial kot kemijska apreturna sredstva v naprednih plemenitilnih postopkih za doseg večfunkcionalnih zaščitnih lastnosti tekstilij. Ne pomenijo le tehnološkega izziva, temveč tudi priložnost za preoblikovanje tekstilij, tudi svilenih, v visokozmogljive, okoljsko odgovorne materiale. Razumevanje povezave med kemijskimi strukturami naravnih učinkovin in mehanizmi njihovega delovanja pomembno pripomore k njihovi učinkoviti uporabi. Optimizacija postopkov njihovega nanosa in razvoj inovativnih pristopov za povečanje pralne obstojnosti apretur pa še vedno ostajata aktualni in pereči raziskovalni temi.

Zahvala: Raziskava je bila opravljena v okviru velikega interdisciplinarnega projekta Univerze v Ljubljani Nova evropska svila. Avtorici se zahvaljujeta študentki Maji Blagojevič za fotografije vertikalnega testa gorenja (slika 5c) in asist. dr. Barbari Golja za

vrstična elektronska mikroskopska posnetka disperzije mikrokapsul in tekstilnih vlaken z nanosenimi mikrokapsulami (sliki 9a in 9b).

Raziskava je bila izvedena v okviru velikega interdisciplinarnega projekta Univerze v Ljubljani z naslovom Nova evropska svila (NES).

Viri

1. Babu, K. M. (2013). *Silk: Processing, properties and application* (1st ed.). Woodhead Publishing.
2. Wang, H.-Y., Zhang, Y., Zhang, M., & Zhang, Y.-Q. (2024). Functional modification of silk fibroin from silkworms and its application to medical biomaterials: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 259(1), 129099. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.129099>
3. Schindler, W. D., & Hauser, P. J. (2004). *Chemical finishing of textiles*. Woodhead Publishing.

4. Raj, A., Chowdhury, A., & Ali, S. W. (2022). Green chemistry: Its opportunities and challenges in colouration and chemical finishing of textiles. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 27, 100689. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100689>
5. Yadav, M., Goswami, P., Paritosh, K., Kumar, M., Pareek, N., & Vivekanand, V. (2019). Seafood waste: A source for preparation of commercially employable chitin/chitosan materials. *Biore-source and Bioprocessing*, 6(8), 1-20. <https://doi.org/10.1186/s40643-019-0243-y>
6. Yu, Y., Su, Z., Peng, Y., Zhong, Y., Wang, L., Xin, M., & Li, M. (2025). Recent advances in modifications, biotechnology, and biomedical applications of chitosan-based materials: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 289, 138772. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138772>
7. Simončič, B., & Tomšič, B. (2017). Recent concepts of antimicrobial textile finishes. In K. L. Mittal & T. Bahners (Eds.), *Textile finishing: Recent developments and future trends* (pp. 3–68). John Wiley & Sons.
8. Chitosan. (2026, February 3). In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Chitosan>
9. Li, J., & Zhuang, S. (2020). Antibacterial activity of chitosan and its derivatives and their interaction mechanism with bacteria: Current state and perspectives. *European Polymer Journal*, 138, 109984. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109984>
10. Simončič, B., & Tomšič, B. (2010). Structures of novel antimicrobial agents for textiles. *Textile Research Journal*, 80(16), 1721–1737. <https://doi.org/10.1177/0040517510363193>
11. Babu, K. M., & Ravindra, K. B. (2015). Bioactive antimicrobial agents for finishing of textiles for health care products. *The Journal of The Textile Institute*, 106(7), 706–717. <https://doi.org/10.1080/00405000.2014.936670>
12. Repon, M. R., Islam, T., Islam, T., Ghorab, A. E., & Rahman, M. M. (2023). Cleaner pathway for developing bioactive textile materials using natural dyes: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 48793–48823. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26131-0>
13. Hossain, M. M., Islam, T., Jalil, M. A., Rakibuzzaman, S. M., Surid, S. M., Zayed, M. R. I., Talukder, A., & Hossain, S. (2024). Advancements of eco-friendly natural antimicrobial agents and their transformative role in sustainable textiles. *SPE Polymers*, 5, 241–276. <https://doi.org/10.1002/pls2.10135>
14. Shams Nateri, A., & Shams Nateri, F. (2025). Ecofriendly and sustainable antibacterial functionalization of medical textiles using natural dyes: A review. *Results in Chemistry*, 17, 102589. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102589>
15. Mao, D., & Xu, H. (2024). The antimicrobial potential of plant-based natural dyes for textile dyeing: A systematic review using PRISMA. *AUTEX Research Journal*, 24(1), 20240016. <https://doi.org/10.1515/aut-2024-0016>
16. Punicalagin. (2025, July 18). In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Punicalagin>
17. Aloin B [Image]. (2023, August 3). In *Wikimedia Commons*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aloin_B.svg
18. Aloe emodin. (2026, January 18). In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Aloe_emodin
19. Turmeric. (2026, January 13). In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Turmeric>
20. Šehić, A., ForteTavčer, P., & Simončič, B. (2016). Flame retardants and environmental issues = Ognjevarna sredstva in okoljski vidiki. *Tekstilec*, 59(3), 196–205. <http://www.tekstilec.si/wp-content/uploads/2016/09/196-205.pdf>
21. Malucelli, G. (2019). Biomacromolecules and bio-sourced products for the design of flame retardant fabrics: Current state of the art and future perspectives. *Molecules*, 24, 3774. <https://doi.org/10.3390/molecules24203774>
22. Liu, Y., Zhang, A., Cheng, Y., Li, M., Cui, Y., & Li, Z. (2023). Recent advances in biomass phy-tic acid flame retardants. *Polymer Testing*, 124, 108100. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108100>

23. Sykam, K., Försth, M., Sas, G., Restás, Á., & Das, O. (2021). Phytic acid: A bio-based flame retardant for cotton and wool fabrics. *Industrial Crops and Products*, 164, 113349. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113349>
24. Huang, Y.-T., Jin, W.-J., Guan, J.-P., Cheng, X.-W., & Chen, G. (2021). Functionalization of silk fabric using phytate urea salt for durable flame retardant performance. *Materials Today Communications*, 28, 102673. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102673>
25. Cheng, X.-W., Song, J.-Y., Cui, M.-L., Dong, S., & Guan, J.-P. (2023). Reactive phytate-based intumescent flameretardant toward sustainable and durable functional coating of silk fabric. *Materials Today Sustainability*, 24, 100528. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100528>
26. Li, P., Wang, B., Xu, Y.-J., Jiang, Z., Dong, C., Liu, Y., & Zhu, P. (2019). Ecofriendly flameretardant cotton fabrics: Preparation, flame retardancy, thermal degradation properties and mechanism. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(23). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b05523>
27. Phytic acid. (2026, January 10). In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Phytic_acid
28. Zuo, C., Guo, Y., Jiang, L., Yu, D., Chen, X., Ren, Y., & Liu, X. (2023). Fabrication of durable flame retardant PAN fibers through bio-based ammonium phytate surface modification and highly efficient thermal oxidation. *European Polymer Journal*, 196, 112304. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112304>
29. Mavrič, Z., Tomšič, B., & Simončič, B. (2018). Recent advances in the ultraviolet protection finishing of textiles = Najsodobnejši izsledki na področju plemenitenja tekstilij za zaščito pred ultravijoličnim sevanjem. *Tekstilec*, 61(3), 201–220. <https://doi.org/10.14502/Tekstilec2018.61.201-220>
30. Milutinov, J., Pavlović, N., Ćirin, D., Atanacković Krstonošić, M., & Krstonošić, V. (2024). The potential of natural compounds in UV protection products. *Molecules*, 29(22), 5409. <https://doi.org/10.3390/molecules29225409>
31. Šmid, S., Verbič, A., Fras Zemljič, L., & Gorjanc, M. (2023). Ecofinishing of cotton with chitosan and giant goldenrod (*Solidago gigantea* Aiton) aqueous extract for development of antioxidant and UV protective textiles. *Journal of Natural Fibers*, 20(2), 1–13. <https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2253371>
32. Rutin. (2025, December 7). In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Rutin>
33. Quercetin (2025, December 24). In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Quercetin>
34. Luteolin (2026, January 11). In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Luteolin>
35. Ferulic acid. (2026, January 7). In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Ferulic_acid
36. Zhao, Z., Ci, F., Pang, H., Yu, O., Dong, R., & Xing, A. (2022). Advances in research on natural distribution, biosynthesis, detection, bioactivity, and application of lutein. *ACS Agricultural Science & Technology*, 2(2), 258–269. <https://doi.org/10.1021/acsagscitech.1c00284>
37. Calniquer, G., Khanin, M., Ovadia, H., Linniewiel-Hermoni, K., Stepensky, D., Trachtenberg, A., Sedlov, T., Braverman, O., Levy, J., & Sharoni, Y. (2021). Combined effects of carotenoids and polyphenols in balancing the response of skin cells to UV irradiation. *Molecules*, 26(7), 1931. <https://doi.org/10.3390/molecules26071931>
38. Chen, X., Deng, Z., Zheng, L., Zhang, B., Luo, T., & Li, H. (2021). Interaction between flavonoids and carotenoids on ameliorating oxidative stress and cellular uptake in different cells. *Foods*, 10(2), 3096. <https://doi.org/10.3390/foods10123096>
39. Hamoda, D. M., Abdelghaffar, R. A., ElBisi, M. K., ElMasry, H. M., & Elgohary, D. H. (2025). Functionalization of extracted materials from plant-based sources with chitosan as eco-friendly raw materials for multifunctional textiles. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 37, 47. <https://doi.org/10.1007/s44444-025-00006-w>

40. Coetzee, D., Militky, J., & Venkataraman, M. (2022). Functional coatings by natural and synthetic agents for insect control and their applications. *Coatings*, 12(4), 476. <https://doi.org/10.3390/coatings12040476>
41. Chatha, S. A. S., Asgher, M., Asgher, R., Hussain, A. I., Iqbal, Y., Hussain, S. M., Bilal, M., Salem, F., & Iqbal, H. M. N. (2019). Environmentally responsive and anti-bugs textile finishes: Recent trends, challenges, and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 690, 667–682. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.520>
42. Citronellal. (2025, July 5). In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Citronellal>
43. Geraniol. (2025, December 19). In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Geraniol>
44. Linalool. (2025, June 2). In *Wikipedia* <https://en.wikipedia.org/wiki/Linalool>
45. Menthol. (2026, January 27). In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Menthol>
46. Thymol. (2025, December 29). In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Thymol>
47. Limonen. (2025, August 7). In *Wikipedia*. <https://sl.wikipedia.org/wiki/Limonen>
48. Tariq, H., Rehman, A., Raza, Z. A., Kishwar, F., & Abid, S. (2024). Recent progress in the microencapsulation of essential oils for sustainable functional textiles. *Polymer Bulletin*, 81, 7585–7629. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-05092-x>
49. Naz, S., Javaid, S., Rehman, S. U., & Razzaq, H. (2025). Recent advances in polymer nanoencapsulation of essential oils for multi-functional textile finishing. *Materials Advances*, 6(8), 2460–2476. <https://doi.org/10.1039/D4MA01285B>