

Petra Forte Tavčer

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za tekstilstvo, grafiko in oblikovanje,
Snežniška 5, 1000 Ljubljana, Slovenija

Degumiranje svile

Silk Degumming

Strokovni članek/Professional article

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

Korespondenčna avtorica/Corresponding author:

prof. dr. Petra Forte Tavčer

E-pošta: petra.forte@ntf.uni-lj.si

ORCID iD: 0009-0006-3621-9014

Izvleček

Degumiranje svile je ključen postopek predobdelave naravne svile *Bombyx mori* L. pri katerem se odstrani sericin – hidrofilni, amorfni protein, ki povezuje fibroinske filamente dvojne niti. Odstranitev sericina, ki pomeni 20–30 % mase surove svile, bistveno vpliva na mehanske, optične in barvne lastnosti končnega materiala. V članku so predstavljene sestava surove svile, kemijski in fizikalni mehanizmi odstranjevanja sericina, pregled tradicionalnih in sodobnih tehnologij degumiranja ter njihov vpliv na strukturo in lastnosti fibroina. Poseben poudarek je namenjen trajnostnim metodam in sodobni uporabi fibroina in sericina kot visokovrednih biomaterialov za netekstilne aplikacije.

Ključne besede: svila, degumiranje, sericin, fibroin, predobdelava, trajnostni postopki, biomateriali

Abstract

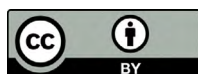
Degumming is a key pretreatment step in the processing of natural Bombyx mori silk, during which sericin – the hydrophilic, amorphous protein that binds the fibroin filaments of the twin filament – is removed. Eliminating sericin, which accounts for 20–30% of the mass of raw silk, significantly affects the mechanical, optical and dyeing properties of the final material. This article presents the composition of raw silk, the chemical and physical mechanisms of sericin removal, an overview of traditional and modern degumming technologies, and their influence on the structure and properties of fibroin. Special emphasis is placed on sustainable methods and on the contemporary use of fibroin and sericin as high-value biomaterials for non-textile applications.

Keywords: silk, degumming, sericin, fibroin, pretreatment, sustainable processes, biomaterials

1 Uvod

Svila je naravni proteinski polimer z izjemnimi mehanskimi, optičnimi in biokompatibilnimi lastnostmi, ki že stoletja velja za enega najdragocenejših tekstilnih materialov. Pridobiva se iz kokonov sviloprežke *Bombyx mori* L., katere gosenica se v zaključni razvojni fazi popolnoma zapre v kokon, sestavljen

iz ene same, neprekinjene dvojne niti, dolge več kot kilometer. Kokon je zgrajen iz fibroina, ki tvori trdno, hierarhično organizirano vlaknasto strukturo, ter iz sericina, ki deluje kot naravno lepilo med vlakni. Zaradi svoje molekularne urejenosti svila združuje visoko natezno trdnost, elastičnost, zračnost in prijeten



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.

otip, kar ji omogoča široko uporabo v tradicionalnem tekstilstvu. V zadnjih desetletjih pa se zanimanje za svilo močno povečuje tudi v biomedicini, regenerativnem inženirstvu, elektroniki in trajnostnem oblikovanju materialov, kjer regenerirani fibroinski in sericinski materiali ponujajo funkcionalne, okolju prijazne alternative sintetičnim polimerom.

Surova svila vsebuje približno 70–80 % fibroina in 20–30 % sericina, ki obdaja in povezuje fibroinska filamentna vlakna. Fibroin je visokokristaliničen strukturni protein z značilnimi ponavljajočimi se motivi glicin-alanin, ki tvorijo β -liste s kristaliničnostjo okoli 50–60 %, kar zagotavlja mehansko stabilnost in visoko natezno trdnost. Sericin je hidrofilen, nekristaliničen protein z visokim deležem serina in karboksilnih aminokislin, ki se hitro topi ali hidrolizira v vodi, predvsem v alkalnem in encimskem okolju [1–3].

Medtem ko fibroin pripomore k trdnosti, prožnosti in lesku, sericin poslabšuje vpojnost barvil, povzroča togost in rumenenje ter povečuje hidrofilnost. Poleg tega lahko sericin pri občutljivih posameznikih povzroča kožne alergijske reakcije, kar dodatno omejuje njegovo prisotnost v končnih izdelkih. Zato je njegova odstranitev nujna za kakovostno predelavo svile in doseganje optimalnih fizikalnih in estetskih lastnosti [4].

Odstranjevanje sericina, imenovano degumiranje, je ključen postopek v predelavi svile, saj omogoča pridobivanje mehkih, sijočih in kakovostnih fibroinskih vlaken. Tradicionalno se degumiranje izvaja v alkalnih milnih kopelih pri povišanih temperaturah, napredni postopki, kot so encimsko, ultrazvočno in mikrovalovno degumiranje, pa omogočajo bolj selektivno odstranitev sericina, manjšo porabo energije in boljšo ohranitev fibroinske strukture [5].

Degumiranje poteka v več fazah proizvodnje, pri čemer se prvi, delni del postopka izvaja že med odvijanjem kokonov. Kokoni so najprej namočeni v vroči vodi z dodatkom mila ali blagih detergentov, kar omoči in delno raztopi sericin ter omogoči gladko odvijanje neprekinjene dvojne niti. V tej fazi sericin ni v celoti odstranjen, saj še vedno zagotavlja potrebno trdnost in stabilnost niti, ki bi se sicer med

odvijanjem pretrgala. Popolno degumiranje poteka šele po odvijanju, na prejah ali tkaninah, kjer se večina preostalega sericina odstrani z namakanjem in segrevanjem v milnih ali blagih alkalnih raztopinah. Ta postopek se lahko izvaja ročno ali industrijsko v posebnih degumirnih kotlih, rotacijskih bobnih, parnih kotlih ali ultrazvočnih napravah.

Degumiranje temelji predvsem na hidrolizi peptidnih vezi v sericinu, raztapljanju nizkomolekularnih frakcij sericina in motenju vodikovih vezi ter šibkih intermolekularnih interakcij [6]. Ključno je, da se sericin odstrani selektivno, brez poškodb fibroina.

Popolno degumiranje izboljša navzemanje barvil, poveča belino, omehča otip, homogenizira površino vlaken in izboljša stabilnost pri nadaljnjih obdelavah [5].

2 Postopki degumiranja in njihov vpliv na fibroin

Alkalno degumiranje je najpogosteje uporabljena industrijska metoda, ki vključuje milo in natrijev karbonat pri temperaturah 90–100 °C. Postopek je učinkovit, a lahko vodi v delno hidrolizo fibroina in posledično v zmanjšanje natezne trdnosti [6].

Pri encimskem degumiranju se uporabljajo proteaze, kot so papain, subtilizin in tripsin, ki selektivno hidrolizirajo sericin, medtem ko fibroinske strukture ostanejo večinoma nedotaknjene. Prednosti encimske obdelave so nizka temperatura, manjša poraba kemikalij in boljša ohranitev strukture fibroina [7].

Kislo degumiranje poteka v kopeli z dodatkom blagih organskih kislin, kot sta očetna ali citronska kislina. Pri tem se sericin le delno odstrani. Metoda je manj učinkovita in pri daljših obdelovalnih časih povečuje tveganje za hidrolizo fibroina [6].

Degumiranje z nasičeno paro omogoča zmanjšano uporabo kemikalij in krajši čas obdelave. Pri tem pa je odstranitev sericina pogosto nepopolna [8].

Ultrazvočna kavitacija pospešuje penetracijo kopeli v vlakna in mehansko odstranjevanje sericina. Postopek se pogosto uporablja kot dopolnilo klasič-

nim postopkom, saj poveča učinkovitost in skrajša čas obdelave [6].

Tudi mikrovalovi povečajo gibanje molekul in pospešijo hidrolizo sericina, kar omogoča krajši čas

obdelave, manjšo porabo energije in manjši okoljski vpliv [9].

V preglednici 1 so zbrani pogoji degumiranja za najpogostejše uporabljene postopke [10].

Preglednica 1: Pogoji degumiranja svile

Reagent	Konc.	Temp. (°C)	Čas (min)	Kopelno razmerje	Vpliv na fibroin
Na ₂ CO ₃	1 g/L	90	60	1:40	Čista površina vlaken z le nekaj usedlinami in tankim slojem preostalega sericina
Sečnina	8 mol/L	90	180	1:30	Malo ali nič ostankov sericina; povprečen premer delcev
Citronska kislina	15 %	98	30	1:20	Zelo gladka površina s finimi vzdolžnimi progami; konformacija se ne spremeni
Proteaza	1–3 %	50	120	1:30	Izjemno gladka površina brez ostankov sericina; vlakna svetlejša
Ultrazvok	–	60	30	1:200	Preostali sericin na vlaknih; zmanjšanje mehanske trdnosti

Degumiranje pomembno vpliva na mehanske, barvne in optične lastnosti svile. Blagi postopki, kot sta encimsko in ultrazvočno degumiranje, povzročajo minimalne spremembe v natezni trdnosti, saj ohranjajo fibroinske strukture skoraj nedotaknjene. Nasprotno pa lahko alkalni postopki, predvsem ob povišani temperaturi in daljšem času delovanja, povzročijo delno hidrolizo fibroina in zmanjšanje natezne trdnosti za 10–20 % [5].

Po odstranitvi sericina vlakna postanejo kris-

talinična in stabilna, pa tudi bolj hidrofobna na površini, s čimer se afiniteta nekaterih barvil dejansko zmanjša, a omogoča enakomernejši navzem barvil. S tem se povečata izčrpanost barvil in jakost barvnih tonov, kar je še zlasti pomembno pri kislih in reaktivnih barvilih, ki se vežejo neposredno na funkcionalne skupine fibroina [4].

Odstranitev sericina vpliva tudi na optične lastnosti: zaradi bolj homogenega površinskega profila fibroina se povečajo značilen svileni lesk, optična

Preglednica 2: Primerjava okolju prijaznih postopkov degumiranja svile s konvencionalnimi metodami

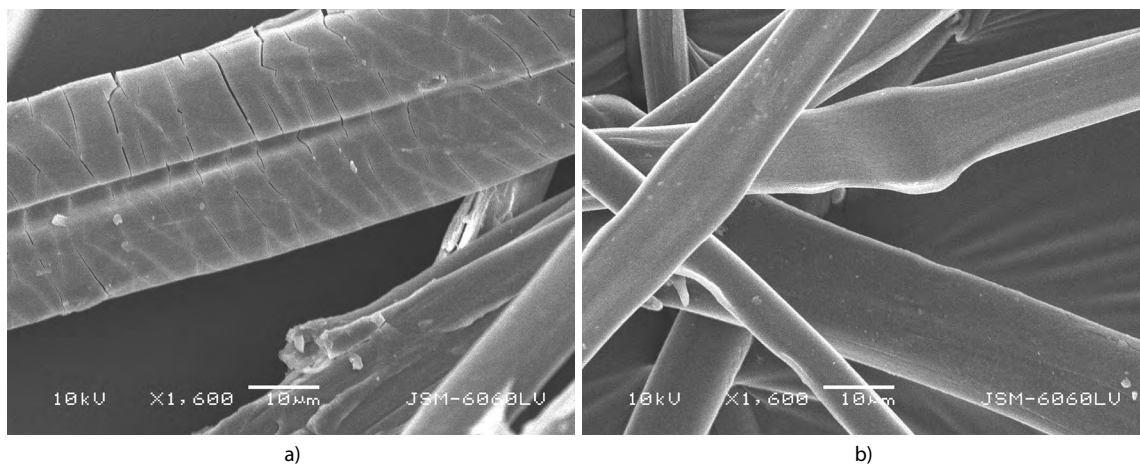
Postopek degumiranja	Prednosti	Omejitve
Konvencionalno (milo/alkalijske)	Zelo preprost in široko uveljavljen postopek	Kemikalij ni mogoče reciklirati; fibroin se lahko poškoduje; velika poraba vode in energije
Kislinsko	Gladka in čista površina vlaken; povečana natezna trdnost	Rahlo zmanjšan navzem barvila
Encimsko	Blagi procesni pogoji; široka izbira encimov; majhne poškodbe fibroina; visoka specifičnost in učinkovitost	Razmeroma visoki stroški; možnost hitre deaktivacije encimov
S CO ₂ v superkritični tekočini	Recikliranje CO ₂ ; manjše poškodbe fibroina	Zahtevna oprema; potrebni sta kislina predobdelava in ultrazvočna naknadna obdelava
Parno	Nižji stroški; brez dodajanja kemikalij	Pomanjkanje preverjenih industrijskih aplikacij
Ultrazvočno	Izboljšana učinkovitost odstranjevanja sericina; manjša poraba vode in kemikalij	Ponavadi so potrebni dodatni reagenti (milo, alkalijske, kisline ali encimi); nizek energijski izkoristek

čistost ter gladkost, ki močno vplivajo na vizualno kakovost svile.

Konvencionalno degumiranje z milom, alkalijski ali kombinacijo mila in alkalij izkazuje nekatere prednosti, kot sta preprost postopek in široka uporabnost, a uporabljenih kemikalij ni mogoče reciklirati, svilni fibroin se lahko poškoduje, zahteve glede porabe vode in energije pa so visoke. Okolju

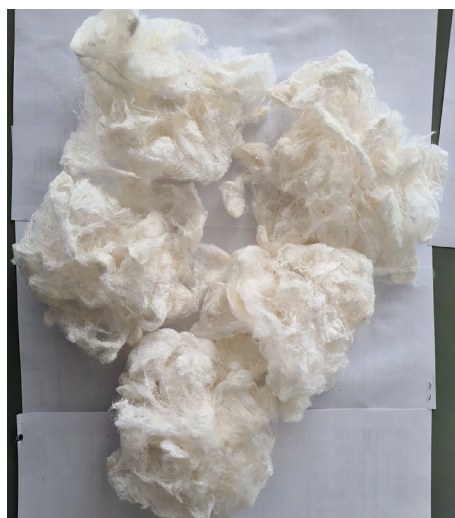
prijaznejši načini encimskega, kislinkega, parnega, CO₂-superkritičnega ter ultrazvočnega degumiranja imajo nekatere prednosti, a tudi omejitve [11]. V preglednici 2 so prikazane prednosti in omejitve posameznih načinov degumiranja svile (12).

Na sliki 1 so prikazana svileni vlakna pred obdelavo z milom in natrijevim karbonatom v vroči kopeli in po njej.



Slika 1: SEM-posnetek svile: a) pred degumiranjem z vročo vodo in b) po njem; povečava: 1600-×

Po degumiranju je svila sicer svetlejša, a ima še vedno naravni rumenkasti odtenek in se pred barvanjem praviloma beli z vodikovim peroksidom [13]. Na sliki 2 so prikazana degumirana in beljena svileni vlakna, pridobljena neposredno s kokonov.



Slika 2: Degumirana beljena svileni vlakna

3 Vrednotenje degumiranja

Za določitev, ali je bil sericin popolnoma odstranjen iz svilenih filamentov, se uporabljajo kvantitativne in kvalitativne metode vrednotenja.

Kvantitativno vrednotenje: Stopnjo degumiranja določimo z merjenjem izgube mase s tehtanjem vlaken pred obdelavo in po njej. Ker je sericin hidrofilen, je treba meritve izvajati v suhem stanju, da se preprečijo napake zaradi vezane vode.

Indeks beline (WI): pred degumiranjem imajo svileni filamenti nižjo belino zaradi sericina, voskov, barvil in nečistoč. Po odstranitvi teh snovi se WI poveča, kar daje svilenim vlaknom značilen sijaj in gladkost.

Kvalitativno vrednotenje: Pri barvanju s pikrinsko kislino in karminom se fibroin obarva rumeno, ker adsorbira le pikrinsko kislino, sericin pa se obarva rdeče, ker absorbira pikrinsko kislino in karmin. Če svila ostane rdeča, je prisoten sericin, če postane rumena, je sericin odstranjen.

Za sericin so značilne funkcionalne skupine ($-OH$, $-NH$, $-COOH$), ki jih fibroin nima, zato analiza FTIR zelo dobro pokaže razliko med sericinom in fibroinom.

4 Sodobna uporaba fibroina in sericina za netekstilne namene

Sodobna uporaba svilenih proteinov presega tradicionalne tekstilne aplikacije, saj fibroin in sericin postajata vsestranska biomateriala v biomedicini, elektroniki, prehranski industriji in farmacevtskih aplikacijah. Njuna uporabnost izhaja iz kombinacije biokompatibilnosti, biorazgradljivosti, mehanske trdnosti, sposobnosti tvorjenja filmov in možnosti kemijske modifikacije [14].

Svljeni fibroin se lahko s serijo postopkov pretvori v vodotopno regenerirano beljakovino. Raztopine fibroinske beljakovine je mogoče predelati v filme, tridimenzionalne porozne materiale, mikrokapsule, gele in nanovlakna za različne načine uporabe [10].

Regenerirani fibroin se pogosto uporablja v tkivnem inženirstvu kot ogrodje za regeneracijo hrustanca, kože, kosti, živčnih vlaken in žilnih struktur. V farmaciji je dragocen pri razvoju sistemov za kontrolirano sproščanje zdravil, saj omogoča enkapsulacijo in stabilizacijo številnih učinkovin, med njimi tudi antibiotikov in citostatikov [15]. Regenerirani fibroin se uporablja tudi v biorazgradljivi elektroniki kot dielektrični material, substrat za upogljive elektronske elemente in sestavni del biološko razgradljivih senzorjev in baterij. Zaradi optične čistosti in stabilnosti je primeren za optična vlakna, fotonske materiale in nanolitografske aplikacije [5, 10, 16].

Sericin, ki je dolgo veljal za odpadni produkt degumiranja, se čedalje bolj uveljavlja kot biološko aktiven polimer. V kozmetiki se uporablja zaradi svoje sposobnosti vezave vode in antioksidativnih lastnosti, medtem ko se v medicini uveljavlja kot material za obloge ran, hidrogele in hemostatske materiale. V živilski industriji deluje kot stabilizator,

emulgator, nosilec bioaktivnih snovi ali kot film pri užitni embalaži. Poleg tega se uporablja v naprednih funkcionalnih premazih, kot so protimikrobni premazi za medicinske pripomočke, bioaktivni premazi implantatov in biosenzorji [17, 18].

5 Sklep

Degumiranje je osrednji proces v predobdelavi svile, saj določa njene mehanske, optične in barvne lastnosti. Tradicionalni postopki so učinkoviti, vendar okoljsko obremenjujoči in manj selektivni. Sodobne metode – encimske, ultrazvočne in mikrovalovne – ponujajo trajnostne in fibroinu prijaznejše alternative. V zadnjih letih se sericin in fibroin uveljavljata kot visokovredna biomateriala za številne netekstilne aplikacije. Razvoj biotehnologije in trajnostne kemije omogoča procese z manjšim okoljskim vplivom ter boljši izkoristek naravnih polimernih surovin, kar je pomemben korak v smeri trajnostne tekstilne industrije.

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

Viri

1. Basu, A. (Ed.). (2015). *Advances in silk science and technology*. Woodhead Publishing.
2. Seo, S.-J., Das, G., Shin, H.-S., & Patra, J. K. (2023). Silk sericin protein materials: characteristics and applications in food-sector industries. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(5), 4951. <https://doi.org/10.3390/ijms24054951>
3. Mondal, M., Trivedy, K., & Kumar, S. N. (2007). The silk proteins, sericin and fibroin in silkworm, *Bombyx mori* Linn.. A review. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 5(2), 63–76

4. Toprak, T., Akgün, M., & Anis, P. (2020). Effects of environmentally friendly degumming methods on some surface properties, physical performances and dyeing behaviour of silk fabrics. *Industria Textila*, 71(4), 380–387. <https://doi.org/10.35530/it.071.04.1675>
5. DeBari, M. K., King III, C. I., Altgold, T. A., & Abbott, R. D. (2021). Silk fibroin as a green material. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 7(8), 3530–3544. <https://doi.org/10.1021/acsbomaterials.1c00493>
6. Rastogi, S., & Kandasubramanian, B. (2020). Processing trends of silk fibers: Silk degumming, regeneration and physical functionalization. *The Journal of The Textile Institute*, 111(12), 1794–1810. <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1727269>
7. More, S. V., Chavan, S., & Prabhune, A. A. (2018). Silk degumming and utilization of silk sericin by hydrolysis using alkaline protease from *Beauveria* Sp. (MTCC 5184): A Green Approach. *Journal of Natural Fibers*, 15(3), 373–383. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1330718>
8. Wang, R., Zhu, Y., Shi, Z., Jiang, W., Liu, X., & Ni, Q.-Q. (2018). Degumming of raw silk via steam treatment. *Journal of Cleaner Production*, 203, 492–497. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.286>
9. Jaya Prakash, N., Shanmugarajan, D., Wang, X., & Kandasubramanian, B. (2022). Enhancement of mechano-structural characteristics of silk fibroin using microwave assisted degumming. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 30, 100902. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100902>
10. Huang, L., Shi, J., Zhou, W., & Zhang, Q. (2023). Advances in preparation and properties of regenerated silk fibroin. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(17), 13153. <https://doi.org/10.3390/ijms241713153>
11. Anis, P., Çapar, G., Toprak, T., & Yener, E. (2016). Sericin removal from silk fibers with eco-friendly alternative methods. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 26(4), 361–369. <https://izlik.org/JA46WA38JD>
12. Zhu, L., et al. Lin, J., Pei, L., Luo, Y., Li, D., & Huang, Z. (2022). Recent advances in environmentally friendly and green degumming processes of silk for textile and non-textile applications. *Polymers*, 14(4), 659. <https://doi.org/10.3390/polym14040659>
13. Anis, P., Toprak, T., Yener, E., & Capar, G. (2018). Investigation of the effects of environmentally friendly degumming methods on silk dyeing performance. *Textile Research Journal*, 89(7), 1286–1296. <https://doi.org/10.1177/0040517518767156>
14. Wang, K., Ma, Q., Zhou, H.-T., Zhao, J.-M., Cao, M., & Wang, S.-D. (2023). Review on fabrication and application of regenerated *Bombyx mori* silk fibroin materials. *AUTEX Research Journal*, 23(2), 164–183. <https://doi.org/10.2478/aut-2021-0059>
15. Aramwit, P., Siritientong, T., & Srichana, T. (2012). Potential applications of silk sericin, a natural protein from textile industry by-products. *Waste Management & Research*, 30(3), 217–224. <https://doi.org/10.1177/0734242X11404733>
16. Allardyce, B. J., Rajkhowa, R., Dilley, R. J., Atlas, M. D., Kaur, J., & Wang, X. (2016). The impact of degumming conditions on the properties of silk films for biomedical applications. *Textile Research Journal*, 86(3), 275–287. <https://doi.org/10.1177/0040517515586166>
17. Jo, Y.-Y., Kweon, H., & Oh, J.-H. (2020). Sericin for tissue engineering. *Applied Sciences*, 10(23), 8457. <https://doi.org/10.3390/app10238457>
18. Zhao, Z.-L., & Zhang, Y.-Q. (2020). Greener degumming production of layered sericin peptides from a silkworm cocoon and their physicochemical characteristics and bioactivities in vitro. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121080. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121080>