DOI broj: 10.5937/rudarstvo26104M

ZNAČAJ MODIFIKOVANJA PRIRODNE POVRŠINE MINERALA

THE SIGNIFICANCE OF MODIFYING THE NATURAL SURFACE OF MINERALS

Slavica Mihajlović*, Nataša Đorđević, Srđan Matijašević, Vladan Kašić, Ana Radosavljević - Mihajlović

[1]Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Franše d'Epera 86, Beograd, Srbija

s.mihajlovic@itnms.ac.rs

Apstrakt

Cilj rada je da se pokaže mogućnost izmene prirodne površine minerala kao i značaj njihove primene kao punioca u različitim industrijama. Prirodni mineralni punioci su ekološki prihvatljiviji u poređenju sa sintetičkim. Njihova biorazgradivost i manji negativni uticaj na životnu sredinu tokom proizvodnje i odlaganja doprinose smanjenju zagađenja. Odgovarajućim postupkom modifikovanja, prirodnim mineralima se poboljšavaju fizička i hemijska svojstava čime se proširuje polje primene. U radu je ukazano na inovativnu klasu kompozitnih materijala na bazi polimera koji imaju bolja mehanička i termička svojstva kada im se dodaju mineralni punioci. Takođe, ukazano je na mogućnost modifikovanja, kako polimera, tako i samog mineralnog punioca. Istraživanja u ovoj oblasiti ne gube na atraktivnosti imajući u vidu ekološke probleme sa kojim se današnja civilizacija suočava na globalnom nivou. Postoji sve veća potreba za pronalaženjem alternativnih, održivijih rešenja u proizvodnji kompozitnih materijala. Njihova primena treba da bude održiva alternativa tradicionalnim materijalima kako bi se smanjili negativni uticaji na životnu sredinu.

***Ključne reči**: prirodni minerali, punioci, površinsko modifikovanje, polimeri.*

Abstract

This paper aims to demonstrate the potential for modifying the natural surface of minerals and to emphasize their importance as fillers in various industries. Compared to synthetic fillers, natural mineral fillers are more environmentally friendly because they are biodegradable and have a lower environmental impact during production and disposal.

Through appropriate modification processes, the physical and chemical properties of natural minerals can be enhanced, thereby expanding their applications. This paper highlights an innovative class of polymer-based composite materials that exhibit improved mechanical and thermal properties when mineral fillers are incorporated. Both the polymer matrix and the mineral filler itself can be modified to achieve superior performance. Research in this field remains highly relevant given the global environmental challenges faced today. There is a growing need for alternative, more sustainable solutions in composite material production. Their application represents a sustainable alternative to traditional materials, helping to mitigate negative environmental impacts.
Keywords: *natural minerals, fillers, surface modification, polymers.*

1. Uvod

Modifikovanje površine minerala je široko proučavana oblast u nauci o materijalima i hemijskom inženjerstvu i dobijeni rezultati su objavljeni brojnim naučnim člancima. Modifikovanje ima za cilj da promeni fizička i hemijska svojstva minerala za specifične primene, kao što je poboljšanje njihovih performansi kao adsorbenata, katalizatora ili komponenti u kompozitnim materijalima. Sva istraživanja, koja su prikazana u radovima o modifikovanju površine minerala, mogu se svrstati u nekoliko oblasti:
A) Metode i mehanizmi modifikovanja
B) Modifikovanje specifičnih vrsta minerala
C) Primena

A) Metode i mehanizmi modifikovanja. Radovi o metodama i mehanizmima modifikovanja objedinjuju principe, procese i mehanizme različitih tehnika modifikovanja. Razmatraju se metode za poboljšanje funkcionalnih karakteristika mineralnih prahova. Analiziraju se različite metode modifikovanja, uključujući adsorpciju, interkalaciju, kiselinsko/termičko modifikovanje, kalemljenje i premazivanje. Takođe, u ovoj oblasti istraživanja prikazuju se i osnovne karakteristike uobičajenih modifikujućih sredstava i principi na kojima se zasnivaju metode za procenu stepena modifikovanja [1, 2].
Metode modifikovanja površine minerala se mogu svrstati u tri osnovne grupe i to:
1. Hemijske metode: zasnovane su na primeni sredstava za vezivanje (kao što su silani), kiselina ili alkalija za uvođenje funkcionalnih grupa, poboljšanje kompatibilnosti sa polimerima ili nagrizanje površine. Od hemijskih metoda najčešće se primenjuju:

-Modifikovanje površinskim hemijskim premazivanjem: adsorpcija ili hemijska reakcija modifikatora površine, kao što je sredstvo za vezivanje, surfaktant ili silan, na površinu minerala.
-Modifikovanje reakcijom taloženja: premazivanje mineralnih čestica taloženjem supstance na njihovu površinu putem hemijske reakcije.
-Modifikovanje površine plazmom: tretman površine plazmom radi stvaranja funkcionalnih grupa ili radikala.
-Tretmani kiselinama/alkalijama: primena kiselina ili alkalija za nagrizanje ili modifikovanje površinske strukture i hemijskog sastava.
2. Fizičke metode: obuhvataju tehnike kao što su: termička obrada, mehanohemijsko modifikovanje usitnjavanjem (mlevenje kako bi se promenila veličina i morfologija čestica) ili modifikovanje površine plazmom radi promene površinske energije i hrapavosti.
3. Prevlačenje/kalemljenje: podrazumeva nanošenje organske materije, neorganskih oksida ili nanočestica na površinu minerala zbog stvaranja novog funkcionalnog sloja ili hemijsko taloženje iz pare.

B) Modifikovanje specifičnih vrsta minerala. Studije sa ovom tematikom su usmerene na modifikovanje tačno određenih minerala poput minerala glina (montmorilonit, kaolinit), zeolita ili sulfidnih, karbonatnih i drugih minerala. Tako npr. izučava se primena prirodnih i sintetičkih organskih materija za premazivanje minerala gline, analizirajući rezultujuće promene u koloidnoj stabilnosti i međupovršinskim svojstvima kroz metode kao što su adsorpcija gasa azota i reologija. Takođe, predmet istraživanja može da bude i povećanje adsorpcionog kapaciteta određene mineralne vrste. Tako, npr. modifikovanjem surfaktantima, kiselinama i polimerima, montmorilonitske gline povećavaju svoj adsorpcioni kapacitet za zagađivače poput teških metala i fenola [3-5].
C) Primena. Obuhvata istraživanja koja pokazuju kako se modifikovani minerali primenjuju u specifičnim oblastima, kao što su sanacija životne sredine, ojačavanje materijala ili prerada minerala [6-9]. Modifikovani minerali imaju primenu, kao dodaci za različite namene: kompozitni materijali (primenjuju se u vazduhoplovstvu, automobilskoj industriji i građevinarstvu); premazi i boje (za poboljšanje kvaliteta, adhezije i otpornosti na vremenske uslove); lepkovi i zaptivači (za poboljšanje svojstava i veka trajanja) i adsorbenti (za kontrolu zagađenja i uklanjanje zagađivača).
Modifikovanjem površine minerala ostvaruje se bolja kompatibilnost (bolja veze između mineralnog punila i okolnog matričnog materijala, kao što je polimer u

kompozitu); poboljšavaju se svojstava kao što je površinska energija minerala, kvašljivost, električne karakteristike i performanse adsorpcije; nova funkcionalnost (mineral dobija novu funkciju kako bi se zadovoljili specifični uslovi primene); bolje performanse (npr. poboljšanje čvrstoće na udar, zatezne čvrstoće ili čvrstoće na savijanje u plastikama, poboljšanje adhezije u premazima i smanjenje viskoznosti tokom obrade); veća stabilnost (npr. poboljšanje otpornosti materijala na oštećenja vodom ili bolja termička stabilnost).

Osnovni principi modifikovanja minerala se baziraju na trajnom vezivanju određenog sredstva za modifikovanje (višemasne kiseline, soli masnih kiselina, razna ulja, masti) na površinu mineralne čestice punioca. Sredstvo se ne može ukloniti sa površine punioca hidrolizom, ekstrakcijom ili bilo kojim drugim mehanizmom kojem kompozit punilac/matrica može biti izložen tokom upotrebe. Modifikovanjem se hidrofobizira površina punioca interakcijom organskih grupa sa matricom. Ova interakcija uspostavlja trajnu vezu između sredstva za vezivanje i drugog materijala, npr. polimera, putem hemijske reakcije. Modifikatori površine poboljšavaju svojstva udara, zatezanja, savijanja i dielektrična svojstva u polimernim materijalima i elastomerima; stabilnost premaznog filma, adheziju podloge, otpornost na vremenske uslove kao i vek trajanja premaza. Produžavaju vek trajanja lepkova i zaptivača, poboljšavaju adheziju podloge i kohezivnu čvrstoću. Površinski modifikovani minerali se lako i dobro disperguju čime se ostvaruje maksimalni kontakt minerala i matrice čime se smanjiju troškovi mešanja i utrošak energije [10-13].

2. Prirodni minerali kao punioci u polimernim materijalima

Imajući u vidu ekološke probleme sa kojim se društvo suočava postoji sve veća potreba za pronalaženjem alternativnih, održivijih rešenja u proizvodnji kompozitnih materijala. Jedan od takvih materijala su polimeri ojačani prirodnim mineralima. Ovi materijali su kombinacija biorazgradivih polimera sa prirodnim materijalima, kao što su kaolin, talk, liskun, bentonit, silicijum dioksid, kalcijum karbonat i dr. Imaju primenu u građevinarstvu, automobilskoj industriji, u proizvodnji ambalaže, nameštaja, higijenskih proizvoda i dr. Njihova sve veća popularnost je posledica ne samo njihovih ekoloških prednosti, već i sve boljih mehaničkih i estetskih svojstava, što im omogućava široku upotrebu u različitim industrijama [14].

Prirodni polimeri ojačani mineralima su inovativna klasa kompozitnih materijala koji postaju sve važniji u različitim industrijskim sektorima. Sastoje se od polimerne

matrice, koja može biti sintetičkog ili prirodnog porekla i ojačanjem u obliku prirodnih minerala. Prirodni polimeri ojačani mineralima su kompoziti u kojima prirodni minerali služe kao ojačanja, poboljšavajući mehanička i termička svojstva polimerne matrice [15].

Na osnovu vrste matrice koju sadrže, kompoziti se mogu podeliti na:
1. Termoplastični matrični kompoziti: sadrže termoplastične polimere kao matricu, koja se može više puta obrađivati pod toplotom.
2. Kompoziti sa termoreaktivnom matricom: sadrže termoreaktivne polimere koji se ne mogu ponovo obrađivati nakon očvršćavanja [16].
Postoji veliki broj različitih praškastih punilaca koji imaju primenu u kompozitnim materijalaima, ali posebno mesto imaju silikati. Njihove prednosti su sposobnost interakcije sa organskom materijom, uprkos njihovoj hidrofilnoj prirodi i mogućnosti razdvajanja formiranih struktura u slojeve debljine nanometara. Slojeviti silikati karakterišu se specifičnom strukturom, u kojoj su tetraedarski i oktaedarski slojevi, respektivno, povezani. U zavisnosti od rasporeda ovih slojeva, postoje različite vrste silikata, na primer, sa troslojnim paketima tipa 2:1 ili dvoslojnim paketima tipa 1:1. Silikati se međusobno razlikuju i po strukturi i po svojstvima [17]. Bentonit i montmorilonit pripadaju grupi slojevitih silikata. Njihova struktura je zasnovana na troslojnim paketima, između kojih postoje samo Van der Valsove interakcije. Kaolinit, s druge strane, je primer dvoslojnog silikata, u kome slojevi interaguju putem vodoničnih veza. Halojzit, koji je takođe materijal iz grupe dvoslojnih silikata, karakteriše se slojevitom cevastom strukturom koja je važna zbog njegove uloge kao komponente koja poboljšava izolaciju u izolacionim prostirkama [17, 18].
Prirodni polimeri ojačani mineralima su napredni kompozitni materijali koji kombinuju svojstva polimera sa prednostima prirodnih minerala. Zahvaljujući svojim jedinstvenim mehaničkim, termičkim i ekonomskim svojstvima, mogu uspešno da zamene tradicionalne kompozite, nalazeći široku primenu u mnogim industrijskim sektorima. Njihov razvoj i primena doprinose efikasnijim i održivijim tehnološkim rešenjima [19]. Modifikovanje polimera prirodnim mineralima omogućava prilagođavanje njihovih svojstava specifičnim zahtevima različitih industrijskih primena. Ojačavanje različitih polimera, kao što su termoplastika, termoreaktivni polimeri, elastomeri i inženjerski polimeri, mineralima omogućava dobijanje materijala sa boljim mehaničkim, termičkim i hemijskim svojstvima. Uz pomoć dodatih minerala svojstva polimera se prilagođavaju različitim industrijskim oblastima što doprinosi njihovoj široj primeni i efikasnosti [20].

Primena polimera ojačanih prirodnim mineralima imaju velike prednosti. Prvo, upotreba prirodnih minerala kao punilaca smanjuje potrebu za petrohemijskim sirovinama, što doprinosi smanjenju emisije ugljen-dioksida i drugih gasova staklene bašte. Zatim, biorazgradivi polimeri prirodno se razlažu, što smanjuje količinu otpada koji se odlaže na deponije čime se smanjuje zagađenje životne sredine. Upotreba poljoprivrednog otpada (npr. stabljika lana), kao sirovina za polimere ojačane mineralima doprinosi dodatnoj vrednosti ovih materijala i promoviše ekonomiju zatvorenog kruga. Takođe, za proizvodnja polimera ojačanih prirodnim mineralima najčešće je neophodno manje energije u poređenju sa utrošenom energijom koja je neophodna za proizvodnju tradicionalnih kompozitnih materijala. Time se smanjuje potrošnja prirodnih resursa [21-23]. U industriji se proizvode različite vrste polimera, koji obično formiraju heterogene sisteme (polimeri u smeši se ne mešaju) ili ređe, homogene sisteme (mešanje se odvija na molekularnom nivou), što omogućava stabilnu smešu sa veoma malim dimenzijama dispergovane faze-manjim od 1 nm. U heterogenim sistemima, dimenzija dispergovane faze je iznad 100 nm, a takve smeše su obično termodinamički nestabilne. Njihova stabilnost se može postići fizičkim ili hemijskim modifikovanjem polimera [24].

2.1. Modifikovanje polimera

Fizičko modifikovanje polimera podrazumeva promenu strukture kroz orijentaciju, nukleaciju, formiranje polimernih kompleksa, kao i promenu stepena disperzije. Takođe, dolazi do promena u supramolekularnoj strukturi faza (izvan samih molekula), veličini međupovršinskih zona i interakcija između čestica na međupovršinskoj zoni, što se postiže dodavanjem kompatibilizatora ili modifikovanjem površine. Kompatibilizatori su kompatibilni sa dva polimera različitih svojstava, jer imaju grupe u svojim molekulima koje se mogu fizički ili hemijski vezati za dva polimera, respektivno. **Hemijsko modifikovanje polimera**, koje uključuje procese kao što su kopolimerizacija, razmena funkcionalnih grupa i umrežavanje, može dovesti do promena parametara kao što su indeks topljenja, udarna čvrstoća, modul elastičnosti i dr. Dodavanjem aktivnih funkcionalizovanih ili kalemljenih polimera može se dobiti proizvod sa željenim fizičko-hemijskim i mehaničkim svojstvima, dobrom kompatibilnošću i optimalnim površinskim svojstvima [25].

2.2. Modifikovanje mineralnih punilaca u polimeru

U industrijskoj proizvodnji i preradi polimernih materijala dodaju se različite vrste mineralnih punilaca kako bi se smanjili troškovi proizvodnje, poboljšala mehanička svojstva ili dala posebna svojstva plastici. Punioci treba da budu hemijski inertni prema matrici, dobro dispergovana i da pokazuju dobru adheziju na polimeru. Mineralni punioci, kao što su kvarc, silicijum dioksid, dolomit ili kaolin, ispunjavaju ove zahteve. U zavisnosti od krupnoće punioci, kao aditivi, mogu biti aktivni (0,01-1 μm) i pasivni (1-50 μm). Kako bi se poboljšala disperzija punioca u polimeru, kao i adhezija, nekada je neophodno izvršiti modifikovanje prirodne površine punioca i tako izmeniti njihova površinska svojstva. Primer je modifikovanje krečnjaka, odnosno glavnog minerala kalcita, stearinskom kiselinom, u slučaju kada se krečnjak koristi kao punilac u polivinil hloridu (PVC). Uvođenje kompatibilizatora takođe može poboljšati mešanje punioca sa polimerom i pokrenuti reakcije između njih. Kompatibilizatori kod polimera su aditivi (često blok-kopolimeri) koji se dodaju polimernim mešavinama da bi se poboljšala njihova kompatibilnost, smanjila površinska napetost na granici faza i omogućila bolja veza između različitih polimera ili polimera i punioca, što rezultira materijalom sa poboljšanim mehaničkim svojstvima [7, 26].

3. Zaključak

Istraživanja u oblasti materijala zasnovana na naučnim tumačenjima ukazuju na značajan potencijal prirodnih minerala kao punilaca, što je povezano sa njihovim dobrim mehaničkim i hemijskim svojstvima. Integracija prirodnih mineralnih punilaca u biokompozite donosi brojne prednosti u pogledu poboljšanih mehaničkih svojstava i održivosti. Njihova upotreba može dovesti do inovativnih rešenja koja su efikasnija, ekološki prihvatljivija i isplativija. Uvođenje prirodnih materijala u industriju doprinosi razvoju održivih materijala. Jedna od oblasti gde se koriste mineralni punioci je industrija polimera. Kako bi se poboljšala disperzija punioca u matrici, adhezija i kompatibilnost vrši se modifikovanje prirodne površine mineralnog punioca. Polimeri ojačani materijalima na bazi prirodnih minerala imaju primenu u različitim industrijskim sektorima, kao što su građevinska, automobilska i industrija pakovanja hrane. Njihova primena treba da bude održiva zamena tradicionalnim materijalima, čime se smanjuje negativan uticaj na životnu sredinu. Pored svojih mehaničkih prednosti, prirodna mineralna

punila su ekološki prihvatljivija u poređenju sa sintetičkim. Njihova biorazgradivost i manji uticaj na životnu sredinu tokom proizvodnje i odlaganja doprinose smanjenju zagađenja. Uprkos napretku u tehnologiji proizvodnje polimera ojačanih mineralima, postoji potreba za daljim poboljšanjem procesa kako bi se dobili materijali sa još boljim svojstvima.

Zahvalnica: Autori se zahvaljuju Ministarstvu nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije na finansijskoj podršci istraživanjima (ugovor 451-03-33/2026-03/200023).

4. Literatura

[1] Mihajlović, S., Vučinić, D., Sekulić, Ž., Milićević, S. & Kolonja, B. (2013). Mechanism of stearic acid adsorption to calcite. *Powder Technology*, *245*, 208-216. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591013003227

[2] Bao, S. (2021). Modification of Mineral Surfaces and Microstructures. In: Song, S., Li, B. (eds) Adsorption at Natural Minerals/Water Interfaces. Engineering Materials. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-54451-5_3

[3] Liao, Ch., Wu, X., Zou, L., Liu, Y. & Chen, Zh. (2022). Research Progress on the Modification Methods of Clay Minerals. *Applied Science and Innovative Research*, *6*(4), 35-44. https://doi.org/10.22158/asir.v6n4p35

[4] Senila, M. & Cadar, O. (2024). Modification of natural zeolites and their applications for heavy metal removal from polluted environments: Challenges, recent advances, and perspectives. *Heliyon*, *10*(3), e25303. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25303

[5] Mihajlović, S., Sekulić, Ž., Daković, A., Vučinić, D., Jovanović, V. & Stojanović, J. (2009). Surface properties of natural calcite filler treated with stearic acid. *Journal Ceramics-Silikaty*, *53*(4), 268-275. https://www.ceramics-silikaty.cz/2009/pdf/2009_04_268.pdf

[6] Mihajlović, S., Sekulić, Ž., Vučinić, D., Jovanović, V. i Kolonja, B. (2012). Ispitivanje mehaničkih osobina polivinil-hlorida sa dodatkom modifikovanog kalcita kao punioca. *Hemijska industrija*, *66*(5), 787-794. http://www.ache.org.rs/HI/HI_sadrzaj.html

[7] Mihajlović, S., Sekulić, Ž., Daković, A., Vučinić, D. i Kragović, M. (2009). Mehaničke osobine PVC mešavine koja sadrži modifikovani kalcit. *Izgradnja*, *63*(11-12), 511-516.

[8] Mihajlović, S., Radulović, D., Sekulić, Ž., Jovanović, V. & Kašić, V. (2015). Influence of hidrofobized limestone as a filler on the mechanical properties of PVC. *Proceedings of 47th International October Conference on Mining and Metallurgy*. (pp. 21-24). Bor Lake, Bor: Mining and Metallurgy Institute Bor and Technical Faculty Bor, Univesity of Belgrade.

[9] Bahmanzadegan, F. & Ghaem, A. (2024). Modification and functionalization of zeolites to improve the efficiency of CO_2 adsorption: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *9*, 100564. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100564
[10] Kuhn, Ch. & Ciullo, P. (1996). *Three-Mineral surface modification, Industrial Minerals and Their Uses*. A Handbook & Formulary, 83-97.
https://doi.org/10.1016/B978-081551408-4.50004-1
[11] Mihajlović, S., Sekulić, Ž., Radulović, D., Jovanović, V. & Kašić, V. (2014). Coating of calcite-solution method. *Proceedings of 46th International October Conference on Mining and Metallurgy*. (pp. 346-349). Bor Lake, Bor: Univesity of Belgrade-Technical Faculty in Bor and Mining and Metallurgy Institute Bor.
[12] Mihajlović, S. (2011). *Fizičko-hemijsko modifikovanje kalcita stearinskom kiselinom*. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
[13] Sekulić, Ž., Mihajlović, S., Daković, A., Kragović, M. & Stanić, T. (2009). Modification of calcite with stearic acid using the solution method. *7th Industrial Minerals Simposium and Exhibition.* (pp. 213-217). Kusadasi, Izmir, Turkey.
[14] Fajdek-Bieda, A. & Wroblewska, A. (2024). The Use of Natural Minerals as Reinforcements in Mineral-Reinforced Polymers: A Review of Current Developments and Prospects. *Polymers*, *16*(17), 2505. https://doi.org/10.3390/polym16172505
[15] Jang, B., Costache, M. & Wilkie, Ch. (2005). The relationship between thermal degradation behavior of polymer and the fire retardancy of polymer/clay nanocomposites. *Polymer*, *46*(24), 10678-10687. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.08.085
[16].de Seixas, G.B., de Queiroz, H.F.M., Neto, J.S.S. & Banea, M.D. (2023). Effect of water on the mechanical and thermal properties of natural fibre reinforced hybrid composites. *Journal of Composite Materials*, *57*(11), 1941-1958.
https://doi.org/10.1177/00219983231166570
[17] Manikantan, M.R. & Varadharaju, N. (2011). Preparation and properties of polypropylene-based nanocomposite films for food packaging. *Packaging Technology and Science, 24*, 191-209. https://doi.org/10.1002/pts.925
[18] Sionkowski, G. & Kaczmarek, H. (2010). Polymers with silver nanoparticles-selected systems, preparation, properties and applications. *Polimery, 55*(7-8), 545-551.
https://polimery.ichp.vot.pl/index.php/p/article/view/1039
[19] Tripathy, P. & Biswas, S. (2022). Mechanical and thermal properties of mineral fiber based polymeric nanocomposites: A review. *Polymer-Plastics Technology and Materials, 61*(13), 1385-1410. https://doi.org/10.1080/25740881.2022.2061996

[20] Mysiukiewicz, O., Kosmela, P., Barczewski, M. & Hejna, A. (2020). Mechanical, thermal and rheological properties of polyethylene-based composites filled with micrometric aluminum powder. *Materials, 13*(5), 1242. https://doi.org/10.3390/ma13051242
[21] Jagadeesh, P., Mavinkere Rangappa, S., Puttegowda, M., Suyambulingam, I. & Siengchin, S. (2023). Thermal analysis of sustainable and micro-filler basalt reinforced polymer biocomposites for lightweight applications. *Journal of Building Engineering, 79*, 107869. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107869
[22] da Silveira, P.H.P.M., da Conceição, M.d.N., de Pina, D.N., de Moraes Paes, P.A., Monteiro, S.N., Tapanes, N.d.L.C.O., da Conceição Ribeiro, R.C. & Bastos, D.C. (2024). Impact of different mineral reinforcements on HDPE composites: Effects of melt flow index and particle size on physical and mechanical properties. *Polymers, 16*(14), 2063. https://doi.org/10.3390/polym16142063
[23] Ponnusamy, P.G. & Mani, S. (2022). Life cycle assessment of manufacturing cellulose nanofibril-reinforced chitosan composite films for packaging applications. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 27*, 380-394. https://doi.org/10.1007/s11367-022-02035-y
[24] Iwko, J. (2009). Zachowanie się Tworzyw Sztucznych w Warunkach Pożarowych. Część - Pomiary Palności oraz Metody Uniepalniania Tworzyw Sztucznych. *czne i Chemia, 6*, 24-29.
[25] Panda, P. & Mohapatra, R. (2025). Transforming polymers: Innovative physical and chemical modification techniques for advanced functional applications. *Mini-Reviews in Organic Chemistry, 22*(7), 706-717. https://doi.org/10.2174/0118756298367223250112224739
[26] Song, D., Dong, Ch., Ragauskas, A. & Deng, Y. (2009). Filler modification with polysaccharides or their derivatives for improved paper properties. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 3*(4), 321-334. DOI: 10.1166/jbmb.2009.1042

Slavica Mihajlović s.mihajlovic@itnms.ac.rs
https://orcid.org/0000-0003-0904-3878
Nataša Djordjević n.djordjevic@itnms.ac.rs;
https://orcid.org/0000-0002-2353-6751
Srdjan Matijašević s.matijasevic@itnms.ac.rs;
https://orcid.org/0000-0002-3897-8085
Vladan Kašić v.kasic@itnms.ac.rs;
https://orcid.org/0000-0002-4430-567X
Ana Radosavljević Mihajlović a.radosavljevic@itnms.ac.rs
https://orcid.org/ 0000-0002-9194-161X