

<https://doi.org/10.15255/KUI.2025.046>

KUI-17/2026

Izvorni znanstveni rad

Prispjelo 15. listopada 2025.

Prihvaćeno 11. prosinca 2025.

Mehaničko recikliranje poliamidne niti za košnju: rješenje ili gubitak vremena?

M. Jakić*, A. Pastuović, M. Nikola Mužek i S. Perinović Jozić

Ovo djelo je dano na korištenje pod
Creative Commons Attribution 4.0
International License

Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet, Ruđera Boškovića 35, 21 000 Split

5th ZORH
CONFERENCE

Sažetak

U ovom radu provedeno je mehaničko recikliranje niti za košnju u laboratorijskom dvopužnom ekstruderu. Procijenjen je utjecaj mehaničkog recikliranja na strukturu, toplinska svojstva i toplinsku postojanost materijala od kojeg su izrađene niti za košnju. Primjenom infracrvene spektroskopije s Fourierovom transformacijom (FT-IR) utvrđeno je da su niti izrađene od poli(ε-kaprolaktama), odnosno poliamida 6 (PA6). Ekstrudiranje nije utjecalo na strukturu PA6. Toplinska svojstva niti za košnju određena su primjenom diferencijalne pretražne kalorimetrije (DSC). Rezultati su ukazali na to da je ekstrudiranje imalo utjecaj na pakiranje i slaganje lanaca, odnosno uzrokovalo početak kristalizacije PA6 iz taljevine pri višoj temperaturi. Utjecaj mehaničkog recikliranja na toplinsku postojanost niti za košnju istraživao je primjenom termogravimetrijske analize (TG). Temeljem vrijednosti karakterističnih parametara (T_{onset} i T_{max}) može se zaključiti da mehaničko recikliranje ne narušava toplinsku postojanost PA6. Mehaničko recikliranje može biti potencijalno rješenje zbrinjavanja rabljenih niti za košnju.

Ključne riječi

Nit za košnju, mehaničko recikliranje, ekstrudiranje, poliamid

1. Uvod

Polimeri su posljednjih desetljeća postali nezamjenjivim materijalima u suvremenom društvu, od industrije i medicine do predmeta za svakodnevnu uporabu. Njihova svestranost, trajnost, lakoća obrade i pristupačna cijena omogućili su brojne inovacije.¹ S druge strane, masovna upotreba dovela je do značajnih ekoloških problema, kao što je sve veća akumulacija plastičnog otpada u okolišu, što je postalo globalnim problemom. Posebno je zabrinjavajuća pojava mikroplastike, a u novije vrijeme i nanoplastike koje je danas moguće pronaći u tlu, vodi i zraku.¹ Polimerni materijali intenzivno se upotrebljavaju i u poljoprivredi za zaštitu usjeva od štetnika i bolesti, za pakiranje poljoprivrednih proizvoda tijekom transporta i skladištenja, u obliku folija, vreća i spremnika.² Jedan od značajnih primjera upotrebe polimera u poljoprivredi jesu poliamidne (PA) niti za košnju koje se upotrebljavaju za rezanje trave, korova, grmlja i ostale vegetacije. Zahvaljujući istaknutim mehaničkim svojstvima i otpornosti na habanje, za izradu niti najčešće se upotrebljavaju poliamid 6 (PA6) i poliamid 66 (PA66).³

Tržište niti za košnju bilježi značajan globalni porast. Procjenjuje se da je vrijednost globalnog tržišta okruglih niti za košnju iznosila približno 150 milijuna USD u 2024. godini s projekcijama rasta na 250 milijuna USD do 2033. godine. Druge procjene navode da je ukupno tržište niti za košnju doseglo 1,04 milijarde USD u 2021. godini s očekivanim porastom na 1,23 milijarde USD do kraja



Slika 1 – Ostaci niti za košnju u prirodi

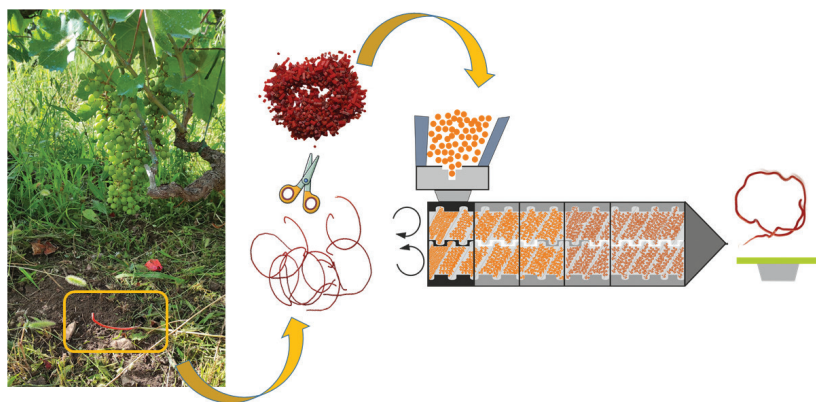
Fig. 1 – Trimmer line residue in the environment

2025. Navedeni podatci ukazuju na veliku količinu polimernog materijala koji se godišnje proizvodi i upotrebljava u svrhu izrade niti za košnju. S obzirom na to da je riječ o nitima koje se upotrebljavaju u trimerima, nužno je naglasiti da uslijed fizičkog kontakta niti s vegetacijom, tlom i kamenjem neizbježno dolazi do mehaničkog usitnjavanja polimernog materijala i nastanka mikroplastike.^{4,5} Poliamidne niti za košnju nisu biorazgradive te tijekom i nakon košenja ostaci niti zaostaju u travi, što posljedično uzrokuje onečišćenje okoliša (slika 1). Međutim, ako bi se nakon košnje ostaci niti koji se više ne mogu upotrijebiti u trimeru za košnju odvojeno prikupili, može se provesti njihovo mehaničko recikliranje. Mehaničko recikliranje prikupljenih poliamidnih niti predstavlja moguće rješenje za ponovnu uporabu, odnosno smanjenje plastičnog otpada. Prednosti i mane mehaničkog recikliranja prikazane su u tablici 1.

* Autor za dopisivanje: izv. prof. dr. sc. Miće Jakić

E-pošta: mice.jakic@ktf-split.hr

Napomena: Rezultati ovog istraživanja predstavljani su na 5. međunarodnoj ZORH konferenciji – susretu znanstvenika, stručnih djelatnika i studenata na temu zaštite okoliša u Republici Hrvatskoj (5. ZORH konferencija), održanoj od 9. do 11. travnja 2025. na Kemijsko-tehnološkom fakultetu Sveučilišta u Splitu



Slika 2 – Prikupljanje, obrada i mehaničko recikliranje niti za košnju
Fig. 2 – Collection, treatment, and mechanical recycling of trimmer line

Tablica 1 – Prednosti i mane mehaničkog recikliranja poliamida
Table 1 – Advantages and disadvantages of mechanical polyamide recycling

Mehaničko recikliranje poliamida: prednosti i mane	
Prednosti	Lit.
niski troškovi obrade u odnosu na druge metode	6
stvara se manje otpada tijekom procesa	6
manja potrošnja energije u usporedbi s kemijskim ili toplinskim recikliranjem	6
procesi su brzi i lako se može izvesti <i>scale-up</i> na industrijsku primjenu	6
može se izravno dobiti sirovina za daljnju obradu	6
očuvanje značajnog dijela mehaničkih svojstava	7–9
Mane	Lit.
degradacija polimernih lanaca sa svakim ciklusom	6
visoki troškovi predobrade	6, 9
nemogućnost neograničenog recikliranja i opadanje kvalitete sa svakim ciklusom	6
nekompatibilnost s drugim polimerima	6
potencijalno smanjenje mehaničkih svojstava	6, 7

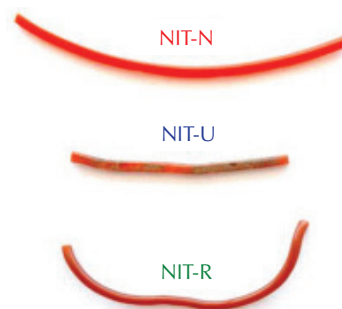
S obzirom na navedeno, ostatci niti za košnju prikupljeni su na lokalnom poljoprivrednom zemljištu te su niti obrađene i mehanički reciklirane u laboratorijskom dvopužnom ekstruderu. Procijenjen je utjecaj mehaničkog recikliranja na strukturu i toplinska svojstva, odnosno toplinsku postojanost niti za košnju. Zaključeno je da mehaničko recikliranje predstavlja može bitno rješenje zbrinjavanja prikupljenih rabljenih niti za košnju.

2. Eksperimentalni dio

2.1. Mehaničko recikliranje

Niti za košnju prikupljene su tijekom proljeća 2024. godine na poljoprivrednom zemljištu obiteljskog poljoprivrednog gospodarstva (OPG) Ninčević Zoran, točnije na lokacijama Arapovac, Grudine i Dvorine u gradu Solinu, Hrvatska. Na spomenutim lokacijama uzgajaju se smokve, vinova loza i masline te se zemljište redovito održava, odnosno kosi, pri čemu se upotrebljava kvadratna nit promjera 2,7 mm. Niti su prikupljene odmah po završetku košnje na svakom pojedinom zemljištu i isjeckane na sitne komadiće koji su, s ciljem uklanjanja zaostale zemlje i trave, temeljito oprani u destiliranoj vodi i naposljetku osušeni u sušioniku (105 °C, 1 h). Mehaničko recikliranje osušenih komadića niti za košnju provedeno je ekstrudiranjem u dvopužnom laboratorijskom ekstruderu HAAKE MiniLab 3 (Thermo Scientific), pri temperaturi od 240 °C i brzini pužnih vijaka od 100 okr min⁻¹ (slika 2). Dobivena reciklirana nit je kružnog presjeka s promjerom koji odgovara promjeru mlaznice ekstrudera i iznosi 2,5 mm.

Na slici 3 dan je usporedni prikaz nove niti (iz originalnog pakiranja), prikupljene rabljene niti i reciklirane niti za košnju.



Slika 3 – Usporedni prikaz nove (NIT-N), rabljene (NIT-U) i reciklirane (NIT-R) niti za košnju

Fig. 3 – Comparison of a new (NIT-N), used (NIT-U), and recycled (NIT-R) trimmer line

2.2. Karakterizacija niti za košnju

2.2.1. Infracrvena spektroskopija s Fourierovom transformacijom (FT-IR)

FT-IR spektrogrami snimljeni su primjenom spektrofotometra Spectrum Two (Perkin Elmer, SAD) u području valnih brojeva $4000 - 450 \text{ cm}^{-1}$ uz rezoluciju od 4 cm^{-1} . Primijenjena je tehnika univerzalne prigušene totalne refleksije (engl. *Universal Attenuated Total Reflectance*, UATR) na kristalu dijamanta. Dobiveni spektrogrami obrađeni su primjenom Perkin Elmer Spectrum IR programske podrške.

2.2.2. Diferencijalna pretražna kalorimetrija

Toplinska svojstva, odnosno karakteristični prijelazi određeni su primjenom diferencijalnog pretražnog kalorimetra Netzsch DSC 300 Caliris Classic (NETZSCH-Gerätebau GmbH, Njemačka), kalibriranog indijem i stabiliziranom 1 h. Ispitivanje je provedeno u inertnoj atmosferi dušika ($20 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$) u temperaturnom području od -20 °C do 300 °C brzinom zagrijavanja/hlađenja od 10 °C min^{-1} u skladu s uvjetima normi HRN ISO 11357-2: 2020 i HRN EN ISO 11357-3: 2018. Svi uzorci su najprije ohlađeni od 25 do -20 °C te su na toj temperaturi zadržani 3 min. Zatim su zagrijani do 300 °C (prvo zagrijavanje) i na toj temperaturi zadržani 3 min. Nakon toga su uzorci ohlađeni na -20 °C (krivulja hlađenja) te pri toj temperaturi zadržani 3 min. Konačno, uzorci su još jednom zagrijani na 300 °C (drugo zagrijavanje). Uzorci mase $10 \pm 0,5 \text{ mg}$ prešanjem su zatvoreni u aluminijske posudice probušenih poklopaca. Dobivene DSC krivulje svedene su na jediničnu masu (normalizirane), dok su karakteristične značajke određene primjenom NETZSCH Proteus Thermal Analysis 9.4.4. programske podrške.

2.2.3. Termogravimetrijska analiza (TG)

Neizotermna toplinska razgradnja provedena je primjenom termogravimetra Perkin Elmer TGA 8000 u tempe-

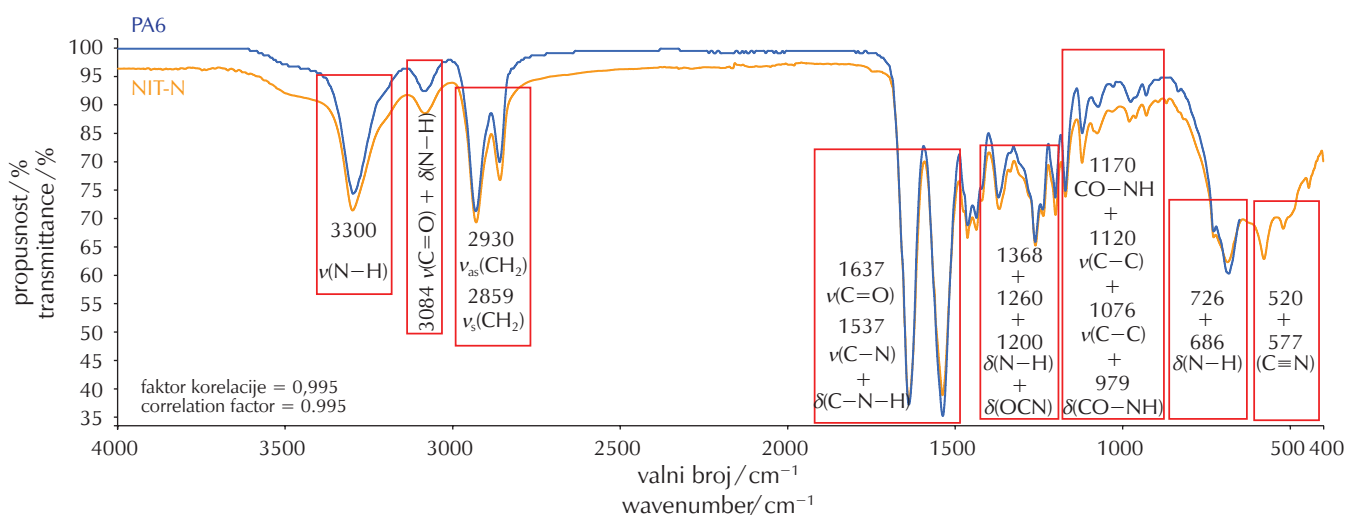
raturnom području $30 - 600 \text{ °C}$. Uzorci mase $5 \pm 0,5 \text{ mg}$ razgrađeni su u struji dušika ($40 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$) pri brzini zagrijavanja od 10 °C min^{-1} . Rezultat neizotermne toplinske razgradnje su termogravimetrijske (TG) i odgovarajuće diferencijalne termogravimetrijske (DTG) krivulje iz kojih su za svaki stupanj razgradnje određeni sljedeći parametri: temperatura početka razgradnje (T_{onset}), temperatura pri kojoj uzorak izgubi 5 % početne mase ($T_{5\%}$), temperatura pri maksimalnoj brzini razgradnje (T_{max}), maksimalna brzina razgradnje (R_{max}), konačna ostatna masa (m_f) i gubitak mase u pojedinom stupnju razgradnje (Δm). Navedeni parametri određeni su primjenom Perkin Elmer Pyris programske podrške.

3. Rezultati i rasprava

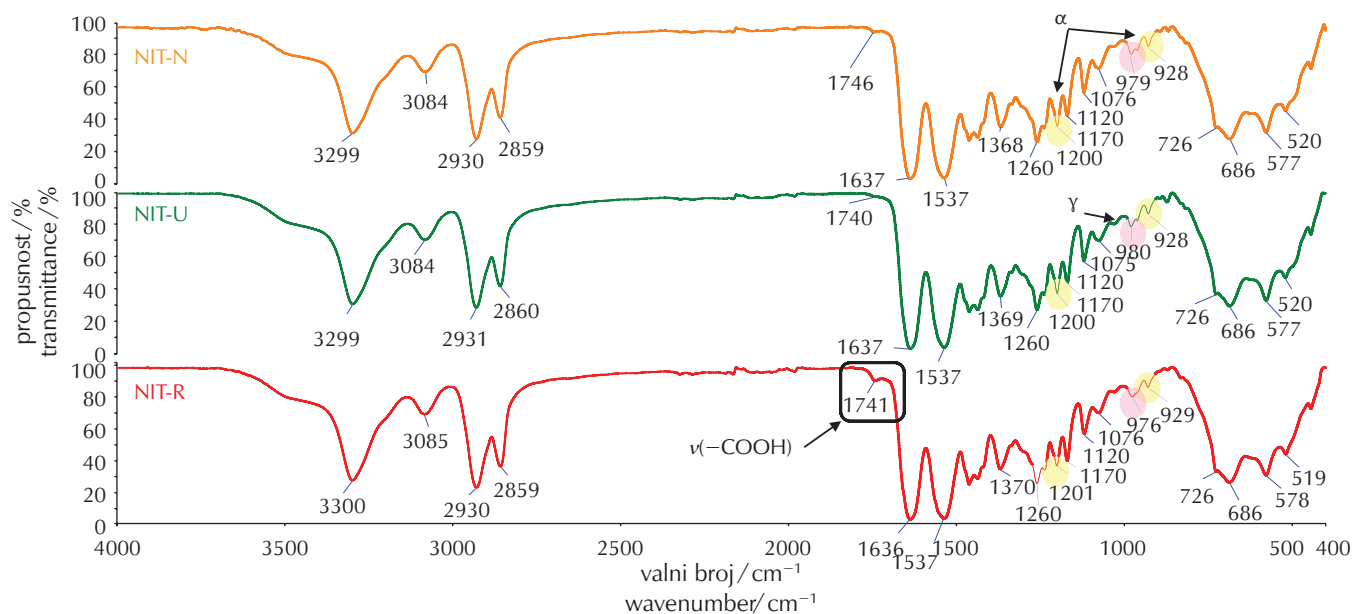
3.1. Infracrvena spektroskopija s Fourierovom transformacijom

Infracrvena spektroskopija primijenjena je s dvostrukim ciljem; (i) identifikacija materijala, odnosno (ii) procjena možebitnog utjecaja mehaničkog recikliranja na kemijsku strukturu materijala od kojeg je izrađena nit za košnju. Spektroskopiranje uzoraka provedeno je na uređaju Perkin Elmer Spectrum Two, koji sadrži opširnu bazu spektrograma različitih polimera i polimernih materijala. Pretraživanjem navedene baze utvrđeno je da spektrogram uzorka nove niti za košnju odgovara spektrogramu poli(ϵ -kaprolaktamu) odnosno poliamidu 6 (PA6). Također, pretragom dostupne literature^{10,11} potvrđene su apsorpcijske vrpce karakteristične za PA6, a najvažnije su prikazane na slici 4.

Normalizirani spektrogrami nove, rabljene i reciklirane niti za košnju prikazani su na slici 5. Detaljnom usporedbom prikazanih spektrograma može se zaključiti da nema značajnih razlika u položaju, širini i intenzitetu apsorpcijskih vrpca, odnosno postupci košenja (NIT-U) i mehaničkog recikliranja (NIT-R) nisu imali utjecaj na kemijsku strukturu PA6 (NIT-N).



Slika 4 – Usporedni prikaz FT-IR spektrograma nove niti za košnju (NIT-N) i PA6 iz Spectrum Two baze podataka
Fig. 4 – Comparison of FT-IR spectrogram of new trimmer line (NIT-N) and PA6 from Spectrum Two database

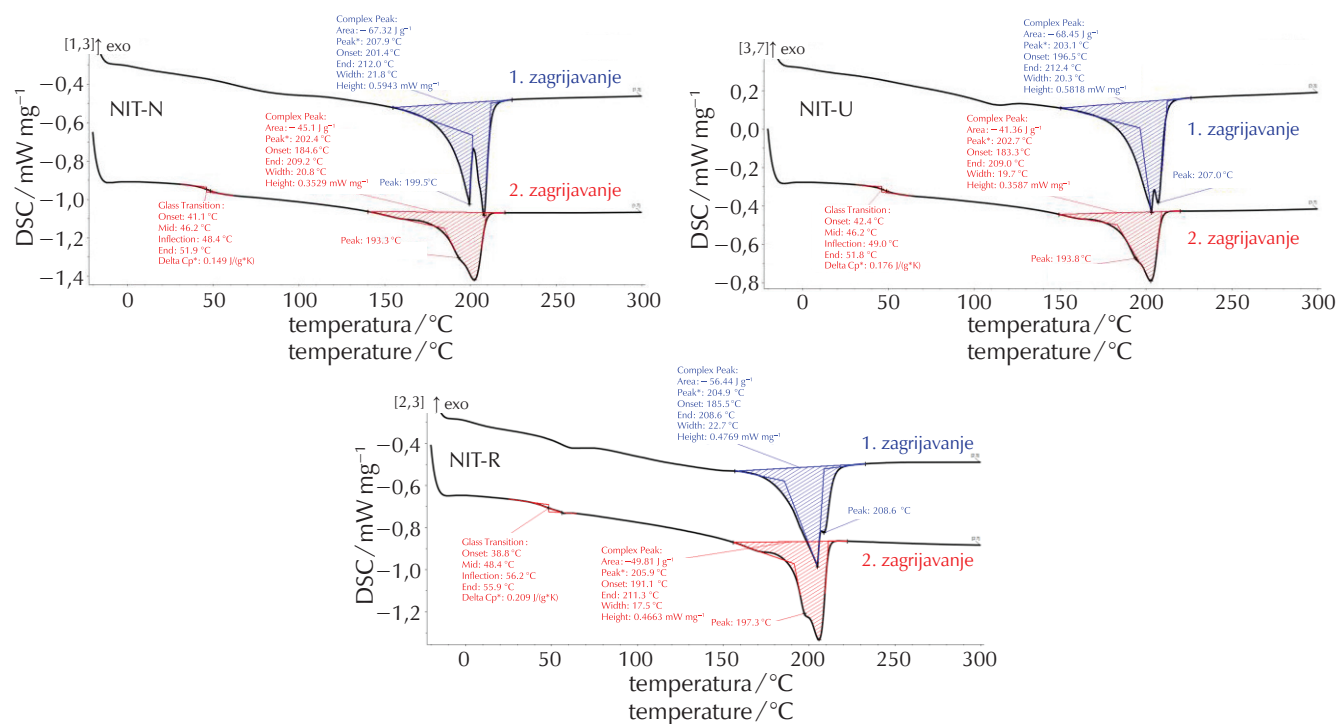


Slika 5 – Usporedni prikaz FT-IR spektara nove (NIT-N), rabljene (NIT-U) i reciklirane (NIT-R) niti za košnju
Fig. 5 – Comparison of FT-IR spectra of the new (NIT-N), used (NIT-U), and recycled (NIT-R) trimmer line

3.2. Diferencijalna pretražna kalorimetrija

Diferencijalna pretražna kalorimetrija, kao temeljna metoda analize toplinskih svojstava polimera, primijenjena je u svrhu procjene utjecaja mehaničkog recikliranja na karakteristične toplinske prijelaze materijala od kojeg je izrađena nit za košnju. Normalizirane DSC krivulje zagri-

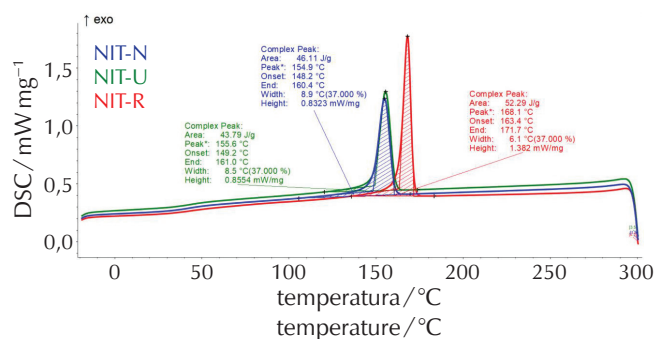
javanja istraživanih uzoraka poliamida 6 prikazane su na slici 6. DSC krivulja nove niti (NIT-N) pokazuje da je PA6 kristalast polimer sa staklištem ($T_{ei,g}$) pri 41 °C, odnosno ($T_{1/2,g}$) pri 46 °C uz specifični toplinski kapacitet (ΔC_p) od 0,154 J g⁻¹ °C⁻¹, određeno iz drugog zagrijavanja prema normi HRN ISO 11357-2: 2020.



Slika 6 – Usporedni prikaz prvog i drugog zagrijavanja normaliziranih DSC krivulja nove (NIT-N), rabljene (NIT-U) i reciklirane (NIT-R) niti za košnju

Fig. 6 – Comparison of the first and second heating normalised DSC curves of the new (NIT-N), used (NIT-U), and recycled (NIT-R) trimmer line

Isto tako, DSC krivulja prvog zagrijavanja prikazuje karakteristično taljenje PA6, koje se očituje kroz dva istaknuta minimuma (pika) pri 200 i 208 °C. Istaknuti minimumi, praktički identičnog intenziteta, karakteristični su za PA6 i pripisuju se taljenju α i γ kristalnih faza. Dokaz o postojanju navedenih kristalnih faza jasno je vidljiv i na slici 5, odnosno vrpce pri 1200 i 928 cm^{-1} pripisuju se α kristalnoj fazi, a vrpca pri 979 cm^{-1} γ kristalnoj fazi.¹¹ Termodinamički gledano, α kristalna faza je dominantno stabilnija u odnosu na γ kristalnu fazu te u pravilu uzorci PA6 manjeg promjera sadrže uglavnom α strukturu. Međutim, ako je riječ o uzorcima većeg promjera, potrebno je više vremena za taljenje jezgre uzorka, što omogućava formiranje γ strukture.¹² Međutim, na krivulji drugog zagrijavanja, nakon procesa kristalizacije jasno se uočava minimum taljenja α kristalne faze (208 °C), dok svojevrсно “rame” (200 °C) predstavlja γ kristalnu fazu. Do identičnih zaključaka došli su *Mondragon i sur.*¹¹, koji su proveli toplinsko-mehaničko recikliranje odbačenih ribarskih mreža izrađenih od PA6. Isti trend uočava se također i kod rabljene niti za košnju (slika 6).



Slika 7 – Normalizirane DSC krivulje hlađenja – usporedni prikaz nove (NIT-N), rabljene (NIT-U) i reciklirane (NIT-R) niti za košnju

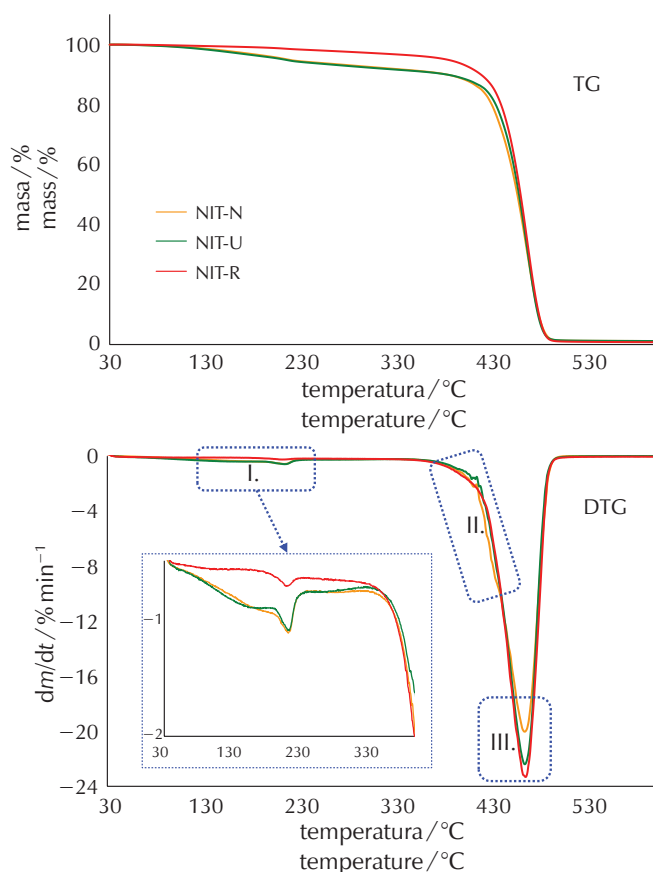
Fig. 7 – Normalized DSC cooling curves – comparison of the new (NIT-N), used (NIT-U), and recycled (NIT-R) trimmer line

S druge strane, iz DSC krivulje hlađenja na slici 7, nova nit za košnju pokazuje jedinstveno kristalište pri 155 °C, (T_{pc}) uz entalpiju kristalizacije (ΔH_c) od 46,1 J g^{-1} , određeno prema normi HRN ISO 11357-3: 2018. Detaljnom usporedbom staklišta, tališta i kristališta, kao i odgovarajućih entalpija, rabljena nit pokazuje gotovo identične vrijednosti kao i nova nit, slike 6 i 7. Stoga se može zaključiti da komercijalna upotreba niti prilikom košnje trave trimerom nije imala utjecaj na toplinska svojstva PA6. Međutim, reciklirana nit, u odnosu na novu i rabljenu nit za košnju, pokazuje više vrijednosti staklišta ($T_{1/2,g} = 48$ °C), tališta ($T_{pm1} = 197$ °C; $T_{pm2} = 206$ °C) i kristališta ($T_{pc} = 168$ °C). Razlika je osobito izražena pri kristalizaciji iz taljevine, slika 7. Dodatna toplinsko-mehanička obrada rabljene niti prilikom ekstrudiranja u dvopužnom ekstruderu posljedično je uzrokovala raniji početak kristalizacije NIT-R iz taljevine uz istaknuti uži maksimum krivulje kristalizacije u

odnosu na novu nit. Uočena razlika može se pripisati heterofaznoj nukleaciji,¹³ odnosno povezati s rekristalizacijom α i γ kristalnih faza.^{11,12} Detaljnim pregledom DSC krivulje prvog zagrijavanja reciklirane niti za košnju, jasno se može uočiti da je minimum pri nižoj temperaturi (205 °C) koji odgovara taljenju γ kristalne faze intenzivniji i širi u odnosu na minimum taljenja α kristalne faze (209 °C). Uzimajući u obzir da su u ovom radu upotrijebljeni uzorci PA6 većeg promjera (2,7 mm), moglo bi se zaključiti da se NIT-R dominantno sastoji od γ strukture. Koja struktura će biti dominantna, ovisi o gustoći pakiranja alkilnih lanaca i duljini vodikovih veza; veća gustoća i kraće vodikove veze rezultiraju nastankom stabilnije α strukture. Isto tako, više brzine kristalizacije pogoduju očuvanju γ strukture.¹² Međutim, na krivulji drugog zagrijavanja (slika 6), nakon procesa kristalizacije reciklirane niti opet se, kao i u slučaju nove niti, uočava “rame” (197 °C) koje predstavlja γ kristalnu fazu. Utjecaj postupka prerade, odnosno procesa ekstrudiranja i injekcijskog prešanja, na strukturu i toplinska svojstva PA6 već su istraživani.¹⁴ Autori istraživanja također su zamijetili uži maksimum krivulje kristalizacije, kao i višu vrijednost kristališta recikliranog PA6. Potonji autori navedeno pripisuju smanjenju duljine lanaca makromolekula, odnosno djelomičnoj toplinsko-mehaničkoj razgradnji PA6 tijekom recikliranja. Djelomična razgradnja može se povezati sa spektrogramom uzorka NIT-R (slika 5), odnosno istaknutom vrpcom pri 1741 cm^{-1} koja odgovara vibraciji rastezanja karboksilne skupine ($-\text{COOH}$), koja može nastati kao rezultat oksidacije peptidnih veza PA6 tijekom recikliranja.¹⁴ Istaknuta vrpca vidljiva je i na spektrogramu nove niti, ali manjeg intenziteta (“rame”). Temeljem svega navedenog može se zaključiti da je ekstrudiranje pri danoj temperaturi kojoj je PA6 bio izložen određeno vrijeme imalo djelomičan utjecaj na pakiranje i slaganje lanaca, kao i na vodikove veze u strukturi PA6.

3.3. Termogravimetrijska analiza

Polimerni materijali podložni su procesu razgradnje, kako tijekom proizvodnje tako i prilikom komercijalne uporabe. Razgradnja podrazumijeva kemijske i fizikalne promjene u strukturi polimera koje rezultiraju neželjenim promjenama uporabnih svojstava, što je moguće procijeniti, odnosno predvidjeti primjenom termogravimetrijske analize. TG i DTG krivulje toplinske razgradnje uzoraka niti za košnju snimljene u struji dušika pri brzini zagrijavanja od 10 °C min^{-1} prikazane su na slici 8. Odgovarajući parametri toplinske razgradnje dani su u tablici 2. Toplinska razgradnja nove niti za košnju, odnosno PA6, odvija se kroz tri prividna razgradna stupnja (I. / II. / III.), što se očituje pojavom triju minimuma (pik) na odgovarajućoj DTG krivulji. Prvi razgradni stupanj (do 214 °C) može se pripisati izdvajanju vlage (adsorbirana voda)^{14,15}, dok je drugi stupanj vidljiv u obliku “ramena” na odgovarajućoj DTG krivulji. Najveći gubitak mase (84,2 %) događa se u trećem, koji je ujedno i glavni stupanj razgradnje PA6. Konačno, razgradnja nove niti završava se gotovo bez ostatka uz ostatnu masu od 1,3 %.



Slika 8 – Usporedni prikaz TG i DTG krivulja nove (NIT-N), rabljene (NIT-U) i reciklirane (NIT-R) niti za košnju

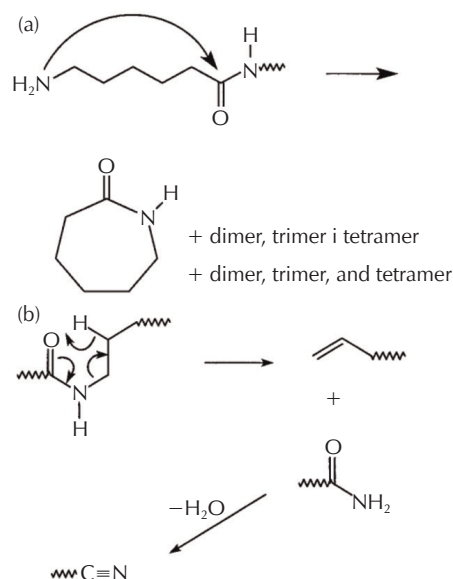
Fig. 8 – Comparison of TG and DTG curves of the new (NIT-N), used (NIT-U) and recycled (NIT-R) trimmer line

Tablica 2 – Parametri toplinske razgradnje uzoraka niti za košnju pri brzini zagrijavanja od 10 °C min⁻¹

Table 2 – Parameters of thermal degradation of the trimmer line samples at heating rate of 10 °C min⁻¹

Uzorak/ Sample	$T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{onset}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}}/^{\circ}\text{C}$	$R_{\text{max}}/\%$ min^{-1}	$\Delta m/\%$	$m_i/\%$
I						
NIT-N	216	133	214	0,6	7,5	92,5
NIT-U	213	127	214	0,6	7,7	92,3
NIT-R	382	156	213	0,2	3,1	97,0
II						
NIT-N	–	391	411	2,3	7,0	85,5
NIT-U	–	386	408	1,7	5,9	86,5
NIT-R	–	–	–	–	–	–
III						
NIT-N	–	440	464	20,0	84,2	1,3
NIT-U	–	440	464	22,4	85,3	1,1
NIT-R	–	439	465	23,3	96,0	0,9

Mehanizam toplinske razgradnje PA6 već je detaljno istraživani u literaturi.^{16–20} Holland i Hay¹⁷ zaključuju da se tijekom razgradnje PA6 odvijaju dva procesa: intramolekulski “end-biting” (slika 9a) i reakcija prijenosa vodika (slika 9b).



Slika 9 – Mehanizam toplinske razgradnje PA6: (a) intramolekulski “end-biting” i (b) prijenos vodika¹⁷

Fig. 9 – Mechanisms of thermal degradation of PA6: (a) intramolecular end-biting, and (b) hydrogen transfer¹⁷

S druge strane, Draye i sur.¹⁸ smatraju da razgradnja PA6 uključuje mehanizam depolimerizacije (“unzipping”), pri čemu se izdvaja kaprolaktam monomer, i nasumično cijepanje lanca (piroliza amida). Herrera i sur.¹⁹ istraživali su kinetiku razgradnje poliamida i zaključili da se razgradnja svih istraživanih poliamida, pa tako i PA6, odvija u jednom stupnju razgradnje uz izdvajanje kaprolaktama. Međutim, potonji autori naglašavaju da su mjerenja pri nižim brzinama zagrijavanja (1 °C min⁻¹) potvrdila da se istodobno odvijaju dva usporedna procesa razgradnje, što se očituje pojavom dvaju stupnjeva razgradnje. Konačno, Didovets i sur.¹⁶ potvrdili su hipotezu koju su postavili Holland i Hay¹⁷, uz izdvajanje kaprolaktama kao glavnog produkta razgradnje. Temeljem navedenoga može se zaključiti da treći stupanj razgradnje nove niti odgovara glavnom stupnju razgradnje PA6 gdje se gubitak mase u iznosu od 84,2 % može pripisati izdvajanju kaprolaktama. Toplinska razgradnja rabljene niti u potpunosti je identična novoj niti, odnosno odvija se kroz tri stupnja uz praktički iste vrijednosti parametara toplinske razgradnje (tablica 2). S druge strane, toplinska razgradnja reciklirane niti za košnju odvija se kroz dva stupnja razgradnje, gdje drugi stupanj odgovara trećem stupnju razgradnje nove i rabljene niti. Detaljnim uvidom u tablicu 2 i sliku 8, u odnosu na novu nit, vidljiva je neznatna razlika u vrijednosti parametara T_{onset} (440 → 439 °C) i T_{max} (464 → 465 °C), pri čemu nakon razgradnje NIT-R zaostaje svega 0,9 % početne mase. Dobiveni rezultati ne potvrđuju indicije o djelomičnoj razgradnji tijekom recikliranja utvrđene primjenom FT-IR i DSC analize. Stoga, može se

zaključiti da mehaničko recikliranje provedeno u dvopužnom laboratorijskom ekstruderu nije utjecalo na toplinsku stabilnost poliamida 6, odnosno materijala od kojeg su izrađene istraživane niti za košnju.

4. Zaključak

Temeljni cilj ovog istraživanja bio je utvrditi mogućnost mehaničkog recikliranja prikupljenih poliamidnih niti za košnju. FT-IR spektroskopijom pronađeno je da su istraživane niti izrađene od poliamida 6, odnosno da uslijed recikliranja nije došlo do značajnih promjena strukture istraživanih niti za košnju. Temeljem toplinskih svojstava određenih primjenom DSC analize potvrđen je djelomični utjecaj ekstrudiranja na pakiranje i slaganje lanaca u strukturi PA6. Međutim, mehaničko recikliranje nije narušilo toplinsku postojanost poliamida 6, temeljem čega se može zaključiti da predstavlja potencijalno rješenje zbrinjavanja niti za košnju. Navedeni zaključak potrebno je potvrditi karakterizacijom mehaničkih svojstava i morfološkom analizom poliamidnih niti za košnju, što će biti predmet budućih istraživanja.

ZAHVALA

U ovom istraživanju rabljena je oprema nabavljena putem projekta *Funkcionalna integracija Sveučilišta u Splitu, PMF-ST, PF-ST te KTF-ST kroz razvoj znanstveno-istraživačke infrastrukture u Zgradi tri fakulteta (EK-EFRR-KK.01.1.1.02.0018)*.

List of abbreviations and symbols

Popis kratica i simbola

PA6	– poliamid 6 – polyamide 6
PA66	– poliamid 66 – polyamide 66
FTIR	– infracrvena spektroskopija s Fourierovom transformacijom – Fourier transform infrared spectroscopy
ν_s	– simetrično rastezanje – symmetrical stretching
ν_{as}	– asimetrično rastezanje – asymmetrical stretching
δ	– savijanje (deformacija) u ravnini – bending (deformation) in plane
DSC	– diferencijalna pretražna kalorimetrija – differential scanning calorimetry
$T_{ei,g}$	– ekstrapolirana početna temperatura staklastog prijelaza – extrapolated onset temperature of glass transition
$T_{1/2,g}$	– temperatura polovice visine staklastog prijelaza – glass transition midpoint temperature
ΔC_p	– specifični toplinski kapacitet – specific heat capacity
T_{pc}	– temperatura u maksimumu kristalizacije – peak crystallisation temperature

T_{pm}	– temperatura u minimumu taljenja – peak melting temperature
ΔH_c	– entalpija kristalizacije – enthalpy of crystallisation
TG	– termogravimetrijska analiza – thermogravimetric analysis
T_{onset}	– temperatura početka razgradnje – onset temperature
$T_{5\%}$	– temperatura pri kojoj uzorak izgubi 5 % početne mase – temperature at 5 % mass loss
T_{max}	– temperatura pri maksimalnoj brzini razgradnje – temperature at maximum degradation rate
R_{max}	– maksimalna brzina razgradnje – maximum degradation rate
m_f	– konačna ostatna masa – final mass
Δm	– gubitak mase za pojedini stupanj razgradnje – mass loss

References

Literatura

1. J. R. Jambeck, I. Walker-Franklin, Primer: The impacts of plastics' life cycle, *One Earth* **6** (6) (2023) 600–606, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.05.015>.
2. K. Lewicka, I. Szymanek, D. Rogacz, M. Wrzalik, J. Łagiewka, A. Nowik-Zajac, I. Zawierucha, S. Coseri, I. Puiu, H. Falfushynska, P. Rychter, Current trends of polymer materials' application in agriculture, *Sustainability* **16** (2024) 8439, doi: <https://doi.org/10.3390/su16198439>.
3. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/d2/2a/6e/1a8f1396a1f7b5/WO2013057748A1.pdf> (5. 10. 2025.)
4. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/multi-sided-nylon-string-trimmer-line-market/> (5. 10. 2025.)
5. URL: https://www.cognitivemarketresearch.com/round-nylon-string-trimmer-line-market-report#request_sample (5. 10. 2025.)
6. V. Hirschberg, D. Rodrigue, Recycling of polyamides: Processes and conditions, *J. Polym. Sci.* **61** (17) (2023) 1937–1958, doi: <https://doi.org/10.1002/pol.20230154>.
7. C.-E. Pelin, A. Fica, E. Andronescu, A. Stefan, G. Pelin, Recycling and reusing polyamide 6 extruded waste products to manufacture carbon fiber based composites, *Ann. Ser. Phys. Chem. (Acad. Rom. Sci., Online)* **2** (2) (2017) 91–105.
8. R. Singh, R. Kumar, N. Ranjan, R. Penna, F. Fraternali, On the recyclability of polyamide for sustainable composite structures in civil engineering, *Compos. Struct.* **184** (2018) 704–713, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.036>.
9. G. Tonsi, C. Maesani, S. Alini, M. A. Ortenzi, C. Pirola, Nylon recycling processes: a brief overview, *Chem. Eng. Trans.* **100** (2023) 727–732, doi: <https://doi.org/10.3303/CET23100122>.
10. S. Siddique, L. Kwoffie, K. Addae-Afoakwa, K. Yates, J. Njuguna, The crystallinity and thermal degradation behaviour of polyamide 6/Oil Based Mud Fillers (PA6/OBMFs) nanocomposites, *Polym. Degrad. Stab.* **159** (2019) 139–152, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdgradstab.2018.11.004>.
11. G. Mondragon, G. Kortaberria, E. Mendiburu, N. González, A. Arbelaiz, C. Peña-Rodriguez, Thermomechanical recycling of polyamide 6 from fishing nets waste, *J. Appl. Polym. Sci.* **137** (10) (2020) 48442, doi: <https://doi.org/10.1002/app.48442>.

12. A. Yebra-Rodrígueza, P. Alvarez-Lloretb, C. Cardellb, A. B. Rodríguez-Navarro, Crystalline properties of injection molded polyamide-6 and polyamide-6/montmorillonite nanocomposites, *Appl. C. Sci.* **43** (2009) 91–97, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.07.010>.
13. S. Venkataramani, J. H. Lee, M. G. Park, S. C. Kim, Structure and properties of polyamide-6 & 6/66 clay nanocomposites, *J. Macromol. Sci. Chem. A.* **46** (2008) 65–73, doi: <https://doi.org/10.1080/10601320802515399>.
14. O. V. Semperger, A. Suplicz, The degradation during recycling of polyamide 6 produced by anionic ring-opening polymerization of ϵ -caprolactam, *Sci. Rep.* **13** (2023) 17130–17141, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44314-0>.
15. F. Pasciucco, D. Rossi, E. Maccaferri, I. Pecorini, L. Giorgini, M. Seggiani, Recycling polyamide 6 fishing nets and carbon fibers for the development of novel sustainable composites: Properties and LCA process analysis, *J. Clen. Prod.* **486** (2025) 144634–144649, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144634>.
16. Y. Didovets, M. Z. Brela, Theoretical study on the thermal degradation process of nylon 6 and polyhydroxybutyrate, *Phys. Chem.* **2** (2022) 334–346, doi: <https://doi.org/10.3390/physchem2040024>.
17. B. J. Holland, J. N. Hay, Thermal degradation of nylon polymers, *Polym. Int.* **49** (2000) 943–948, doi: [https://doi.org/10.1002/1097-0126\(200009\)49:9<943::AID-PI400>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/1097-0126(200009)49:9<943::AID-PI400>3.0.CO;2-5).
18. A.-C. Draye, O. Persenaire, J. Brožek, J. Roda, T. Košek, Ph. Dubois, Thermogravimetric analysis of poly(ϵ -caprolactam) and poly[(ϵ -caprolactam)-co-(ϵ -caprolactone)] polymers, *Polymer* **42** (2001) 8325–8332, doi: [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00352-4](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00352-4).
19. M. Herrera, G. Matuschek, A. Kettrup, Main products and kinetics of the thermal degradation of polyamides, *Chemosphere* **42** (2001) 601–607, doi: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00233-2](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00233-2).
20. S. Pashaei, S. P. Siddaramaiah, M. M. Avval, A. A. Syed, Thermal degradation kinetics of nylon6/GF/crysnano nanoclay nanocomposites by TGA, *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.* **17** (2011) 141–151, doi: <https://doi.org/10.2298/CICE-Q101007064P>.

SUMMARY

Mechanical Recycling of Polyamide Trimmer Line: A Solution or a Waste of Time?

Miće Jakić*, Anna Pastuović, Mario Nikola Mužek, and Sanja Perinović Jozić

In this work, trimmer lines were mechanically recycled using a laboratory-scale twin-screw extruder. The influence of mechanical recycling on the material's structure, thermal properties, and thermal stability was evaluated. Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) confirmed that the trimmer lines were composed of poly(ϵ -caprolactam), or polyamide 6 (PA6). Mechanical recycling did not affect the structure of PA6. The thermal properties of the trimmer lines were analysed by differential scanning calorimetry (DSC). The results indicated that extrusion influenced chain packing and rearrangement, leading to crystallisation of PA6 from the melt at a higher temperature. The effect of mechanical recycling on the thermal stability of the trimmer lines was investigated using thermogravimetric analysis (TG). Based on the characteristic parameter (T_{onset} and T_{max}) values, it can be concluded that mechanical recycling did not deteriorate the thermal stability of PA6. Mechanical recycling can be a potential solution for recycling of used trimmer lines.

Keywords

Trimmer line, mechanical recycling, extrusion, polyamide

University of Split, Faculty of Chemistry
and Technology, Rudera Boškovića 35,
21 000 Split, Croatia

Original scientific paper
Received October 15, 2025
Accepted December 11, 2025