

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Manca KRUMPAČNIK

**VPLIV DODAJANJA RECIKLIRANEGA
POLIPROPILENA LASTNEMU RECIKLATU
POLIPROPILENA NA PREDELOVALNE IN
MEHANSKE LASTNOSTI**

Diplomsko delo

Slovenj Gradec, december 2024

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

**VPLIV DODAJANJA RECIKLIRANEGA
POLIPROPILENA LASTNEMU RECIKLATU
POLIPROPILENA NA PREDELOVALNE IN
MEHANSKE LASTNOSTI**

Diplomsko delo

Študentka:	Manca KRUMPAČNIK
Študijski program:	Tehnologija polimerov
Mentor:	viš. pred. Silvester BOLKA
Somentorica:	asist. Teja PEŠL
Delovni mentor:	Jure POPOVIČ, mag. inž. str.

Slovenj Gradec, december 2024

IZJAVA

Podpisana Manca Krumpačnik izjavljam, da:

- je bilo predloženo diplomsko delo opravljeno samostojno pod mentorstvom;
- predloženo diplomsko delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršnekoli izobrazbe na drugi fakulteti ali univerzi;
- diplomsko delo zaradi zagotavljanja konkurenčne prednosti, varstva industrijske lastnine ali tajnosti podatkov naročnika ne sme biti javno dostopno do 1.1.2026.

Po preteku časovno omejenega javnega dostopa v skladu s 1. odstavkom 21. člena in 23. členom Zakona o avtorski in sorodnih pravicah (Ur. l. RS, št. 16/2007-UPB in spremembe) dovoljujem, da se zgoraj navedeno diplomsko delo shrani v Knjižnici Fakultete za tehnologijo polimerov. Na Fakulteto za tehnologijo polimerov neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve diplomskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi diplomsko delo javnosti na svetovnem spletu preko repozitorija DiRROS.

Slovenj Gradec, _____

Podpis: _____

ZAHVALA

Zahvaljujem se somentorju Juretu Popoviču, mag. inž. str., za vso strokovno pomoč, svetovanje, spodbujanje in potrpežljivost pri pisanju diplomskega dela.

Zahvaljujem se tudi mentorju viš. pred. Silvestru Bolki in somentorici asist. Teji Peši za strokovno vodenje, nasvete in pomoč pri opravljanju eksperimentalnega dela in izdelavi diplomskega dela.

Prav tako se zahvaljujem kolektivu v kemijskem laboratoriju TAB IPM, d. o. o., za vse znanje, ki so ga prenesli name, ter za vso spodbudo in skrb, ki so mi ju namenjali med pripravo diplomskega dela.

Posebno zahvalo pa namenjam družini, fantu Juretu, sošolcem, predavateljem in prijateljem, ki so me podpirali in spodbujali med študijem.

POVZETEK

Vpliv dodajanja recikliranega polipropilena lastnemu reciklatu polipropilena na predelovalne in mehanske lastnosti

V tem diplomskem delu smo raziskovali učinke dodajanja tržnega recikliranega polipropilena (PCW PP) k recikliranemu polipropilenu iz odpadnih akumulatorskih baterij (rPP). Osrednji cilj je bil določiti optimalno količino PCW PP, ki bi jo lahko zmešali z rPP, pri tem pa ohranili želene lastnosti materiala. Vpliv različnih deležev PCW PP smo preverili z analizo mehanskih, toplotnih in reoloških lastnosti dobljenih produktov. Raziskave smo se lotili tako, da smo pripravili osem različnih kompavndiranih vzorcev, ki so bili pripravljene z uporabo dvopolžnega ekstruderja, vključno z enim referenčnim vzorcem, ki je bil usklajen z želenimi lastnostmi. V referenčnem vzorcu je bila uporabljena standardna formulacija podjetja TAB-IPM, d. o. o., v poskusnih vzorcih pa so bile dodane različne količine PCW PP. Po kompavndiranju in granuliranju smo vzorce nabrizgali v preizkušance. Mehanske lastnosti smo ovrednotili z nateznimi in upogibnimi preizkusi, meritvami udarne žilavosti po Charpyju in dinamično mehansko analizo. Toplotne lastnosti smo ovrednotili z uporabo diferencialne dinamične kalorimetrije (DSC) in termogravimetrične analize (TGA). Reološke lastnosti so bile izmerjene z indeksom tečenja taline (MFI). Med raziskovanjem smo opazili, da so vsi vzorci pokazali višji natezni modul E v primerjavi z referenčnim vzorcem. Prišlo je do opaznega zmanjšanja udarne žilavosti z naraščajočo vsebnostjo PCW PP, kar ponazarja tipičen kompromis med nateznim modulom in odpornostjo proti udarcem. Določene mešanice PCW PP in rPP so dosegle zahtevane lastnosti, kar kaže na to, da smo našli primerna razmerja rPP in PCW PP za praktično uporabo. Spremenljivost lastnosti vhodnih materialov je povzročila raztros lastnosti končnih kompavndiranih materialov, kar je predstavljalo manjši izziv pri interpretaciji rezultatov. Po raziskavi smo lahko zaključili, da je dodajanje PCW PP k rPP izvedljivo, ne da bi bistveno spremenili lastnosti končnega materiala. Ugotovitve poudarjajo možnost povečane uporabe recikliranih materialov v proizvodnji polipropilena, kar prispeva k prizadevanjem za trajnost. Največji izziv za doseganje dosledne kakovosti končnih izdelkov predstavlja heterogenost odpadnih materialov, ki so na voljo za reciklažo. To diplomsko delo podpira industrijsko uporabnost mešanja recikliranih materialov, kar spodbuja ekološke koristi. Prihodnje študije bi se morale osredotočiti na optimizacijo postopka mešanja oziroma homogenizacijo lastnosti recikliranega materiala. Koristne bi bile nadaljnje preiskave dolgoročne učinkovitosti in trajnosti takšnih recikliranih mešanic. Jih bo nekoč mogoče ponovno reciklirati?

Ključne besede:

Recikliran polipropilen (rPP), tržni recikliran polipropilen (PCW PP), mehanske lastnosti, reološke lastnosti, tržne lastnosti.

SUMMARY

The influence of adding market recyclate to our own recyclate of polypropylene on the proces and mechanical properties

In this thesis, we investigated the effects of adding commercial recycled polypropylene (PCW PP) to recycled polypropylene from waste battery accumulators (rPP) on processing, mechanical properties, thermal properties, and rheological properties. The central goal was to determine the optimal amount of PCW PP that could be mixed with rPP while maintaining the desired material properties. The research objectives were to analyze the impact of different proportions of PCW PP on the mechanical, thermal, and rheological properties of rPP and to determine the feasibility of producing a recycled polypropylene blend that meets specific property requirements. We approached the research by preparing eight different compounded samples using a twin-screw extruder, including one reference sample aligned with the desired properties. The reference sample used the standard formulation of TAB-IPM d.o.o., while the experimental samples had varying amounts of PCW PP added. After compounding and granulation, the samples were injection molded into test specimens. We tested the mechanical properties using tensile, flexural, and impact tests. Thermal properties were evaluated using Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermogravimetric Analysis (TGA). Rheological properties were measured by the Melt Flow Index (MFI). During the research, we observed that all samples showed a higher tensile E modulus compared to the reference sample. There was a noticeable decrease in impact toughness with increasing PCW PP content, illustrating the typical trade-off between tensile modulus and impact resistance. Specific blends of PCW PP and rPP achieved the required properties, indicating suitable ratios of rPP and PCW PP for practical use. The variability in the properties of the input materials caused inconsistent properties in the final compounded materials, presenting a minor challenge in interpreting the results. Following the research, we concluded that adding PCW PP to rPP is feasible without significantly altering the material properties. The findings highlight the potential for increased use of recycled materials in polypropylene production, contributing to sustainability efforts. However, the heterogeneity of recycled materials remains a challenge for achieving consistent quality in final products. This thesis supports the industrial applicability of mixing recycled materials, promoting environmental benefits. Future studies should focus on optimizing the blending process and improving the consistency of recycled material properties. Further investigations into the long-term performance and durability of such recycled blends under various environmental conditions would be beneficial.

Keywords:

Recycled Polypropylene (rPP), Commercial Recycled Polypropylene (PCW PP), Mechanical Properties, Rheological Properties, Thermal Properties.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Cilji in teze	2
1.2	Predpostavke in omejitve	2
1.3	Uporabljene metode	2
2	TEORETIČNI DEL	4
2.1	Polimeri	4
2.2	Klasifikacija polimerov	4
2.3	Polipropilen	5
2.4	Recikliranje termoplastov	6
2.4.1	Koraki v procesu mehanskega recikliranja	7
2.4.2	Vpliv mehanskega recikliranja na lastnosti PP	8
3	EKSPERIMENTALNI DEL	10
3.1	Analiza različnih PCW PP različnih dobaviteljev	10
3.2	Določitev maksimalnega deleža PCW PP	10
3.3	Uporabljeni materiali	10
3.4	Priprava vzorcev	11
3.4.1	Ekstrudiranje	11
3.4.2	Brizganje	12
3.5	Metode preiskav	12
3.5.1	Meritve MFI	12
3.5.2	Meritve gostote	14
3.5.3	Meritve mehanskih lastnosti	15
3.5.4	Meritve toplotnih lastnosti	20
4	REZULTATI IN DISKUSIJA	23
4.1	Rezultati meritve MFI	23
4.2	Rezultati meritve gostote	23
4.3	Rezultati mehanskih lastnosti	24
4.3.1	Rezultati nateznega preizkusa	24
4.3.2	Rezultati upogibnega preizkusa	26
4.4	Rezultati zarezne udarne žilavosti	28
4.5	Rezultati dinamičnega modula E	29
4.6	Rezultati meritev toplotnih lastnosti	31
4.6.1	Rezultati TGA	31
4.6.2	Rezultati DSC	32
5	SKLEP	33
	SEZNAM LITERATURE IN VIROV	34
	SEZNAM SLIK	36
	SEZNAM TABEL	38

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV	39
SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC	40
PRILOGE	41
Priloga 1: Rezultati preizkusa nateznih lastnosti	41
Priloga 2: Rezultati preizkusa upogibnih lastnosti	45
Priloga 3: Grafi meritve dinamičnega E modula	49
Priloga 4: Krivulje TGA	55
Priloga 5: Krivulje DSC	59

1 UVOD

Onesnaževanje okolja v zadnjih desetletjih predstavlja vedno večji problem. Veliko k temu prispeva tudi odpadna plastika, ki se je ne ločuje pravilno in je posledično ne moremo reciklirati v takšni meri, kot bi jo sicer lahko [1]. Zaradi vsestranskosti, nizke mase in relativno nizkih stroškov proizvodnje je plastika eden ključnih materialov modernega časa [2]. Velika večina proizvedene plastike je primarne pridelave, torej iz fosilnih goriv (pravimo ji tudi original, čisti ali »virgin« material), kar s sabo prinese številne negativne vplive na okolje [1]. Plastika, ki temelji na fosilnih gorivih, je nagnjena k onesnaževanju skozi celoten življenjski cikel, torej vse od proizvodnje, med uporabo in po njej. Z nepravilnim ravnanjem z odpadki konča veliko plastike v naravi. V okolju lahko preživi več let in potencialno vstopi v prehranjevalno verigo. To negativno vpliva na zdravje rastlin, živali in ljudi [2]. V letu 2021 je bilo na svetu proizvedenih 390,7 milijona ton plastike, od tega 90,2 % plastike na bazi fosilnih goriv, 8,3 % reciklirane plastike in 1,5 % iz naravnih surovin. Evropa proizvede nekoliko manj plastike na osnovi fosilnih goriv (87,6 %) ter nekoliko več reciklirane plastike (10,1 %) in bioplastike (2,3 %) [3]. Največji problem pri proizvodnji predstavljata kakovost in cena recikliranih izdelkov v primerjavi s tistimi, ki so izdelani na novo. Pogosto je kot surovino enostavneje in ceneje uporabiti novo plastiko [1].

Podjetje TAB, d. d., je proizvajalec akumulatorjev. Slovenska zakonodaja od proizvajalcev akumulatorjev in baterij z uredbo o ravnanju z baterijami in akumulatorji ter odpadnimi baterijami in akumulatorji zahteva, da na svoje stroške zagotovijo zbiranje odpadnih prenosnih baterij in akumulatorjev od končnih uporabnikov, distributerjev in izvajalcev javne službe ter obdelavo in recikliranje tako zbranih odpadnih prenosnih baterij in akumulatorjev [4]. Hčerinsko podjetje TAB-IPM, d. o. o., v okviru katerega je nastalo to diplomsko delo, bistveno prispeva k povečanju stopnje reciklaže akumulatorjev in s tem k varovanju okolja. Koncept obsega ekološko in odjemalcem prilagojeno proizvodnjo polipropilenskega (PP) granulata, ki je sestavljen iz recikliranih materialov in nadgrajen v visokokakovostne PP mešanice in kompozite. Recikliran PP (rPP) iz odpadnih akumulatorjev (natančneje iz njihovih ohišij) se uporablja za proizvodnjo novih ohišij akumulatorjev. V zadnjih letih je iz tega naslova na voljo vedno manj lastnega rPP, ki pa ima edinstvene lastnosti, zato v podjetju iščemo rešitve, kako nadomestiti primanjkljaj lastnega rPP. Morebitna rešitev bi lahko bila v dodajanju rPP iz drugih industrij, kar bomo raziskovali v tem diplomskem delu [5].

PP je delno kristaliničen termoplastični polimer. Nudi kombinacijo dobrih mehanskih in kemičnih lastnosti. PP zagotavlja odlično odpornost proti organskim topilom. Gre za polimer nizke gostote, kar nam daje produkte z manjšo maso. PP ima nizko absorpcijo vlage, je temperaturno odporen, poltog material. Ima odlično odpornost proti kislinam in alkalijam, vendar slabo odpornost proti aromatskim, alifatskim in kloriranim topilom [6].

V našem primeru gre za PP kopolimer, kjer je osnovnemu materialu zaradi ugodne kombinacije mehanskih lastnosti dodan polietilen (PE). Mešanje PP z relativno fleksibilnimi PE izboljša njegovo žilavost. To je edinstven pristop za recikliranje, katerega namen je ohraniti ali izboljšati lastnosti recikliranih materialov.

1.1 Cilji in teze

Glavni cilj diplomskega dela je ugotoviti, koliko drugega tržnega reciklata polipropilena (PCW PP) lahko primešamo našemu lastnemu rPP, da ohranimo lastnosti izdelanega materiala znotraj zahtevanih vrednosti naših kupcev.

Sprotni cilji diplomskega dela so:

- v 1. fazi opraviti zahtevane analize na različnih PCW PP različnih dobaviteljev in na podlagi rezultatov izbrati dva najprimernejša za nadaljnje analize;
- v 2. fazi računsko ugotoviti maksimalne deleže PCW PP, ki se lahko dodajo našemu rPP;
- v 3. fazi kompavndirati rPP z izračunanimi maksimalnimi deleži PCW PP in polovičnimi maksimalnimi deleži PCW PP;
- v 4. fazi s postopkom brizganja pripraviti preizkušance za karakterizacijo mehanskih in toplotnih lastnosti;
- v 5. fazi analizirati vpliv dodajanja PCW PP na lastni rPP.

1.2 Predpostavke in omejitve

Predpostavljamo, da bomo s poskusom dodajanja različnih deležev PCW PP lahko našli ustrezen delež, s katerim bomo ohranili zahtevane lastnosti našega rPP. Problem lahko nastane pri določanju masnih deležev posameznih komponent, ker se bodo ti določali na podlagi MFI, za katerega ne velja linearno mešalno pravilo, ampak se bomo zanesli na izkušnje iz pretekle proizvodnje. Prav tako lahko zaradi nehomogeno zmešanega vhodnega materiala pričakujemo nekonstantne lastnosti kompavndiranega materiala.

1.3 Uporabljene metode

Pri pripravi diplomskega dela smo zbirali, pregledali in preštudirali literaturo o polipropilenu, vplivu recikliranja na lastnosti polipropilena in vplivu dodajanja recikliranega materiala čistemu polipropilenu na mehanske in termične lastnosti. Pripravili smo lastno materialno mešanico, izvedli teste mehanskih in toplotnih lastnosti materiala ter ovrednotili dobljene rezultate. Teste smo opravili na opremi Fakultete za tehnologijo polimerov in v kemijskem laboratoriju podjetja TAB-IPM, d. o. o.

Vzorci smo karakterizirali z metodami za opredeljevanje polimernih materialov, in sicer smo uporabili:

- merjenje indeksa tečenja taline (MFI);

- merjenje gostote;
- merjenje nateznih in upogibnih lastnosti z napravo za natezni in upogibni preizkus;
- merjenje zarezne udarne žilavosti po Charpyju pri -20 °C ;
- merjenje dinamičnega modula E in modula izgub z dinamično mehansko analizo (DMA);
- merjenje toplotnih lastnosti z diferenčno dinamično kalorimetrijo (DSC) in termogravimetrično analizo (TGA).

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Polimeri

Polimeri so zelo velike molekule ali makromolekule, nastale z združitvijo številnih manjših molekul, ki so povezane s kovalentno vezjo. Te manjše enote prej imenujemo monomeri, ki jih s polimerizacijo pretvorimo v polimere. Pravzaprav ima beseda "polimer" grški izvor, ki pomeni "številni člani". Naravni polimeri obstajajo že od zgodnjih časov planeta Zemlja. Samo življenje je povezano s polimeri od dezoksiribonukleinske kisline (DNA), ribonukleinske kisline (RNA) in beljakovin, ki so bistvenega pomena za vse znane oblike življenja. Celuloza, lignin, škrob in naravni kavčuk so le nekateri od primerov naravnih polimerov. V 19. stoletju so naravne polimere začeli kemično modificirati za proizvodnjo številnih materialov, kot sta vulkanizirana guma in celulozid. Sintetični polimeri so razmeroma sodobni materiali, ki so vstopili na tehnološko in praktično sceno šele v prvih desetletjih 20. stoletja. To jih naredi zelo drugačne od nekaterih drugih materialov, ki so človeštvu poznani že stoletja ali tisočletja. Ker se sintetične polimere ustvarja s kemijskimi reakcijami, je možnosti za sintezo različnih polimerov praktično neskončno. Omejeni smo le s kemikalijami in termodinamičnimi zakoni ter z ustvarjalnostjo kemikov za sintetične polimere. Uporaba polimerov je zelo razširjena v vsakdanjem življenju, na primer za oblačila, obutev, izdelke za osebno nego, pohištvo, električne in elektronske aparate, embalažo, avtomobilske dele, premaze, barve, lepila, gume ipd. Seznam je neskončen, teh nekaj primerov nam da predstavijo o pomembnosti sintetičnih polimerov v sodobni družbi, v smislu njihove uporabnosti kot ekonomske vrednosti, ki jo predstavljajo [7].

2.2 Klasifikacija polimerov

Obstaja veliko različnih klasifikacij polimerov glede na strukturo, način nastanka, stopnjo kristaliničnosti, taktičnost, biorazgradljivost, obseg proizvodnje itd. [7]. Najpogostejša klasifikacija polimerov je povezana z njihovim odzivom na toploto. Na podlagi tega jih lahko razdelimo na tri različne vrste polimerov. Razvrstimo jih lahko kot termoplaste, duroplaste in elastomere.

Termoplasti so linearni ali razvejani polimeri, ki ob zadostni izpostavljenosti toploti postanejo viskoelastična tekočina. V tem stanju jih je mogoče oblikovati v poljubne oblike z različnimi tehnikami obdelave, zato predstavljajo večji delež proizvodnje polimerov na svetu. Prav tako jih lahko po segrevanju vrnemo v njihovo prvotno stanje. Znotraj termoplastov lahko opazimo dve različni vrsti: delno kristalinične in amorfne [8].

Delno kristalinični termoplasti so sestavljeni iz visoko prepletenih makromolekul, povezanih s sekundarnimi ali van der Waalsovimi vezmi. Delno kristalinični termoplasti imajo strukturo, ki je delno urejena v kristale, zato so pod temperaturo steklastega

prehoda (T_g) trdni. Za tovrstne termoplaste je pomembno, da poznamo temperaturo tališča (T_m), pri kateri se začnejo kristali v strukturi taliti. Stopnja kristaliničnosti je tista, ki zelo vpliva na T_m delno kristaliničnih termoplastov [9].

Druga vrsta termoplastov so amorfni termoplasti, kjer so molekule med seboj povezane tudi s sekundarnimi ali van der Waalsovimi vezmi, vendar v primerjavi z delno kristaliničnimi termoplasti amorfni termoplasti ne morejo kristalizirati, saj njihova struktura med strjevanjem ostane neurejena. Zaradi odsotnosti kristalne zgradbe imajo amorfni termoplasti prozoren videz in so krhki. Amorfni termoplasti imajo območje uporabe do T_g [8, 9].

Po drugi strani so elastomeri zamreženi polimeri, kar pomeni, da so makromolekule med seboj povezane s primarnimi ali kovalentnimi vezmi, vendar je stopnja zamreženosti v elastomerih nizka. Elastomeri imajo zmožnost visokih raztezkov in se hitro povrnejo v prvotno obliko, brez trajnih deformacij [8].

Zadnja skupina polimerov, znana kot duroplasti, so polimeri z visoko stopnjo zamreženosti. Ker je gibanje verig omejeno z visoko stopnjo navzkrižnega povezovanja (cross-link), so duroplasti bolj togi in temperaturno obstojni kot termoplasti. Zanje je značilno, da se jih ne da ponovno termično preoblikovati, variti in reciklirati [8].

2.3 Polipropilen

PP je bil odkrit 11. marca 1954 v Milanu (Italija) kot rezultat preizkusa, ki ga je v svojem laboratoriju izvedel Giulio Natta. V istem letu se je začela komercialna proizvodnja v Italiji, Nemčiji in ZDA. Od takrat naprej je PP postal eden izmed najpomembnejših sintetičnih polimerov [10]. PP je delno kristalinični termoplast, pridobljen iz monomera propena, in ima kemijsko formulo $(C_3H_6)_n$. Je ekonomičen material, ki nudi kombinacijo ugodnih fizikalnih, kemičnih, mehanskih, toplotnih in električnih lastnosti, ki jih ne najdemo pri nobenem drugem termoplastu. Njegove lastnosti pa lahko dodatno modificiramo s primešavanjem različnih dodatkov in polnil. Ključne lastnosti PP so togost, žilavost, kristalna struktura, nizka gostota, raznolikost oblik in kompatibilnost z dodatki. Poleg naštetega ga je mogoče 100-% reciklirati. Zaradi visoke žilavosti in togosti je posebej primeren za inženirsko rabo, kjer se zahtevajo dobre mehanske lastnosti. K temu prispeva kristalna struktura PP, ki mu daje mehansko stabilnost. Nizka gostota polipropilena nam nudi izdelke z nižjo težo, kar je ugodno za aplikacije, kjer je teža ključnega pomena. PP je na voljo v homopolimernih in kopolimernih oblikah, kar proizvajalcem omogoča prilagodljivost pri izbiri vrste, ki najbolje ustreza njihovim posebnim potrebam. Homopolimer PP se uporablja večinoma za embalažo, tekstil, zdravstvo, cevi, avtomobilsko in električno uporabo, kopolimerni PP pa za izdelke, ki zahtevajo lep videz, ali za izdelke, ki zahtevajo višjo žilavost, na primer akumulatorska ohišja. Najznačilnejše tehnologije obdelave so ekstrudiranje, brizganje in 3D-tisk.

PP je kompatibilen z dodatki, kar nam omogoča, da popravimo oziroma izboljšamo nekatere pomanjkljivosti materiala. Na primer PP ima slabo odpornost proti UV. Dodatek sterično oviranih aminskih stabilizatorjev svetlobe (HALS) poveča odpornost PP proti UV-sevanju. To podaljša življenjsko dobo v primerjavi z nemodificiranim PP [6].

2.4 Recikliranje termoplastov

Glavne težave pri zmožnosti recikliranja so različne strukture (molekularne, kristalne), ki jih imata polimer in stalna izguba fizikalnih lastnosti (viskoznost, natezni modul E). To je posledica postopka ekstrudiranja, ki povzroči razgradnjo polimera zaradi dejavnikov, kot sta oksidacija ali razpad verige. Izguba fizikalnih lastnosti negativno vpliva na končno učinkovitost recikliranih polimerov. Da bi se temu izognili, med ekstrudiranjem dodajamo različne dodatke, s katerimi želimo doseči ali celo preseči lastnosti novega polimera oziroma čistega materiala. To predstavlja dodaten strošek, zaradi katerega reciklirani materiali težko tekmujejo z novimi [11].

Obstajajo štiri načini recikliranja plastike: kemično recikliranje, energetska predelava, mehansko recikliranje in ponovna uporaba plastičnih izdelkov. Ponovna uporaba je postopek, s katerim polimer uporabimo brez spreminjanja njegove strukture.

S kemičnim recikliranjem razgradimo polimerno verigo, da dobimo monomer, tega lahko ponovno uporabimo ali ponovno polimeriziramo z oblikovanjem novih verig ali s taljenjem monomera v olja ali pline za uporabo v drugih procesih. Obstajajo različni postopki kemičnega recikliranja, kot sta depolimerizacija in piroliza. Pri depolimerizaciji se molekulske vezi razcepijo in nastanejo monomeri, nato pa se molekularne vezi uporabljene plastike rekombinira in s tem proizvede ogljikovodike. Pri pirolizi pa gre za kemično razgradnjo z odsotnostjo zraka, pri kateri nastajajo olja in plini. Običajno se uporablja za snovi z visoko molekulsko maso, ki jih ni mogoče očistiti s fizikalnimi postopki, kot sta kristalizacija ali destilacija. Piroliza ni ekonomsko donosna za recikliranje polimerov s slabo toplotno prevodnostjo, saj bi reciklaža zahtevala večjo količino energije.

Energetska predelava je postopek recikliranja, pri katerem se energija pridobi s sežigom polimera. To je dober način uporabe nekoristnih polimerov, tako da se jih pretvori v energijo, ki jo lahko uporabimo pri ogrevanju vode za različne sisteme za ustvarjanje energije. Običajno se sežig uporablja za tisto plastiko, ki je ni mogoče reciklirati na druge načine, ker ne more biti ekonomsko donosna. Glavni problem je onesnaženje, ki ga povzroči ta proces, kot so emisije, ki nastanejo v procesu gorenja, na primer CO₂, ki prispeva k učinku tople grede.

Mehansko recikliranje temelji na fizikalnih postopkih. Pri tem se kemijska sestava polimera ne spremeni. Je relativno enostavno in poceni, vendar primerno le za določene polimere oziroma kombinacije le-teh. Kadar odpadki niso predhodno ločeni,

se polimere loči po vrstah ter nato pretali in granulira v ekstruderju. To je najpogostejša metoda predelovanja odpadne plastike.

Z ekstrudiranjem polimer izgubi nekatere začetne lastnosti zaradi več mehanizmov razgradnje polimernih verig, kar pa lahko izboljšamo z uporabo dodatkov ali s primešavanjem svežega materiala [11].

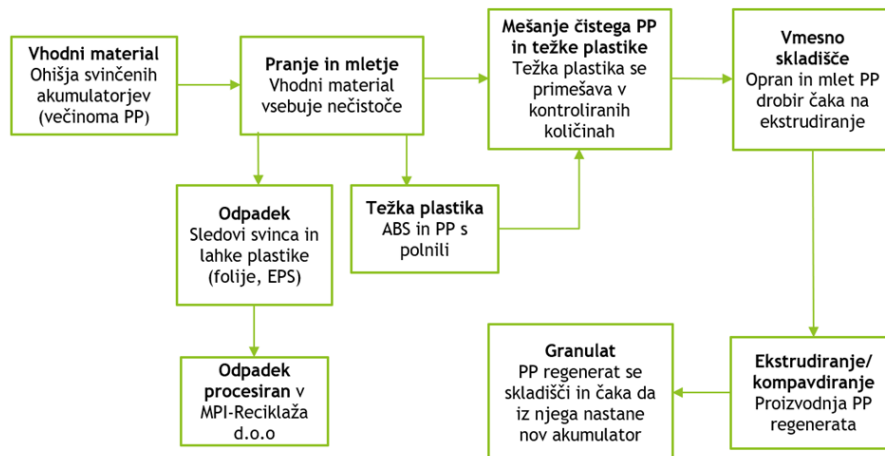
2.4.1 Koraki v procesu mehanskega recikliranja

Mehansko recikliranje termoplastov vključuje več korakov za pretvorbo plastičnih odpadkov nazaj v uporaben material. Glavni koraki, ki so običajno vključeni v postopek mehanskega recikliranja, so:

- zbiranje odpadkov: zbiranje termoplastičnih odpadkov iz različnih virov, kot so gospodinjstva, industrije in trgovski obrati;
- ročno ali avtomatizirano razvrščanje: termoplasti se ločijo po vrsti in barvi z ročnim razvrščanjem ali z uporabo avtomatiziranih sistemov, kot je strojni vid;
- čiščenje: razvrščene termoplaste je treba očistiti, da se odstranijo vsa umazanija, nalepke in lepila. To lahko vključuje pranje z detergenti in vodo. Očiščene termoplaste posušimo, da odstranimo vlago;
- mletje: očiščen material se nato zmelje in nareže na majhne kosmiče ali granule. To olajša rokovanje in obdelavo materiala v naslednjih korakih;
- Ločevanje: material lahko ločimo z ločevanjem po gostoti ali z elektrostatičnim ločevanjem;
- kompavndiranje in ekstrudiranje: zmlet in ločen material se nato kompavndira in granulira. V fazi kompavndiranja se materialu dodajo razni dodatki, kot so stabilizatorji, polnila in barvila. Po potrebi se reciklatu doda tudi čisti termoplast;
- nadzor kakovosti: na proizvedenem reciklatu je treba opraviti karakterizacijo termičnih, mehanskih in reoloških lastnosti, da se lahko zagotovi zelena kakovost materiala za določeno uporabo.

Znotraj obrata za reciklažo je treba izvajati ukrepe za zmanjšanje vpliva procesa recikliranja na okolje, kot so energetske učinkoviti stroji in ustrezno ravnanje z odpadki [12].

V TAB-IPM, d. o. o., reciklirajo PP iz enega samega vira, to je iz svinčenih akumulatorjev, za izdelavo katerih vsi največji proizvajalci uporabljajo PP z zelo podobnimi lastnostmi. Tudi zbiranje akumulatorjev je zakonsko urejeno in gre (vsaj v EU) za dobro uveljavljeno prakso. Tako nimamo težav z razvrščanjem odpadkov oziroma prebiranjem PP iz širokega spektra različnih polimerov. Postopek reciklaže je prikazan na sliki 1.



Slika 1: Postopek reciklaže podjetja TAB IPM, d. o. o.

2.4.2 Vpliv mehanskega recikliranja na lastnosti PP

Na področju mehanskega recikliranja PP in vpliva le-tega na reološke, mehanske in termične lastnosti je bilo opravljenih že kar nekaj raziskav. Do zdaj je bilo ugotovljeno, da se pri mehanskem recikliranju običajno pojavi povečanje MFI v primerjavi s čistim PP. To se zgodi zaradi cepitve verige in zmanjšanja molekulske mase med procesom recikliranja, zaradi česar so polimerne verige krajše in se poveča njihov pretok pod vplivom toplote. Višji MFI je lahko koristen za nekatera področja uporabe, ki zahtevajo lažji pretok [13, 14].

Gostota rPP običajno ostaja precej podobna gostoti neobdelanega materiala. Vendar lahko pride do manjših odstopanj zaradi vnosa raznih nečistoč ali polnil med postopkom recikliranja. V primerih, ko je rPP pomešan s polnili ali kompozitnimi materiali, se lahko gostota zaradi dodatkov poveča. Konkreten primer iz raziskave o mehanskem recikliranju kompozitov s čistim PP je pokazal, da so vrednosti čistega PP z gostoto $0,9 \text{ g/cm}^3$ postopoma naraščale z višanjem odstotka rPP, in sicer je bila najvišja dosežena gostota približno $0,93 \text{ g/cm}^3$, kar nakazuje, da so anorganske nečistoče iz rPP povečale gostoto v primerjavi s čistim PP [15].

Po mehanskem recikliranju PP je na splošno možno opaziti nekolikšno znižanje natezne trdnosti rPP v primerjavi s svežim PP. Zmanjšanje natezne trdnosti pripisujejo toplotni in oksidativni razgradnji, do katerih pride med predelavo, kar razgradi strukturo polimera in vodi do zmanjšanih medmolekulskih interakcij. Vendar pa lahko elastični modul včasih ostane razmeroma stabilen, odvisno od obsega razgradnje in dodajanja neobdelanega materiala ali ojačeval. V eni od raziskav so bile opažene različne natezne lastnosti med rPP in čistim PP, predvsem se je razlika pojavila pri natezni trdnosti in nateznem modulu E, ki sta za čisti PP višja za 15 % in 17 %. Slabše natezne lastnosti so verjetno posledica mehanskih lastnosti recikliranega PP, saj se te med večkratnimi cikli predelave slabšajo [16].

Udarne žilavost rPP se na splošno v primerjavi s čistim PP zniža. Ponavljajoča se izpostavljenost visoki temperaturi in strigu med recikliranjem lahko povzroči krhkost, zaradi česar je polimer manj odporen proti udarcem. Za ublažitev tega zmanjšanja se včasih uporabljajo ojačitveni materiali ali mešanje s čistim PP, kar lahko pomaga ohraniti ali povečati odpornost recikliranega materiala proti udarcem [16].

Recikliranje vpliva na toplotno stabilnost PP. Pri rPP je pogosto opažena zmanjšana toplotna stabilnost zaradi razgradnje, ki poteka med ponavljajočim se taljenjem in predelavo, vendar pa lahko z dodajanjem čistega PP delno obnovimo ali celo izboljšamo toplotno stabilnost v primerjavi z rPP. Pri eni izmed raziskav je bila pri TGA opažena majhna razlika (7 °C) pri začetni temperaturi razgradnje med rPP in čistim PP, podobno pa je bilo tudi pri največji temperaturi razgradnje, ki je bila višja za rPP (457,1 °C) kot za čisti PP (451,8 °C). Ostanek pri 700 °C je bil dvakrat višji za rPP kot za čisti PP, z višanjem deleža rPP pa ostanek še narašča, kar je verjetno posledica prisotnosti anorganskih polnil v rPP. Boljša toplotna stabilnost rPP in njegovih mešanic v primerjavi s čistim PP je bila preverjena s časom oksidativne razgradnje (OIT). Termooksidativna razgradnja lahko poslabša lastnosti PP. Vrednost OIT je bila dvakrat višja za rPP v primerjavi s čistim PP, in sicer 6,8 min v primerjavi s samo 3,0 min. Ti rezultati podpirajo dobro toplotno stabilnost rPP glede na dobljene rezultate TGA [14, 16].

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Analiza različnih PCW PP različnih dobaviteljev

V prvi fazi eksperimentalnega dela smo opravili analize na različnih PCW PP različnih dobaviteljev in na podlagi rezultatov izbrati dva najprimernejša za nadaljnje analize. Pri izbiri materialov smo se osredotočali predvsem na MFI, saj nismo želeli izbrati materiala s previsokim MFI. Analizirali smo 8 PCW PP, rezultati pa so prikazani v tabeli 1.

Po opravljenih analizah smo se odločili, da bomo za eksperimentalni del uporabili PCW PP 1 in PCW PP 2, saj sta imela najugodnejši MFI in ostale lastnosti, kot so delež saj, delež PE in gostota. PCW PP 5 je imel ugoden MFI, a previsok delež saj (7 %), zato smo ga iz izbora izločili. Prav tako je imel ugoden MFI PCW PP 8, a smo po analizi DSC ugotovili, da vsebuje material nekoliko previsok delež PE (22 %).

Tabela 1: Rezultati meritev MFI PCW PP

Vzorec	MFI (g/10 min)
PCW PP 1 (Optima)	8,1
PCW PP 2 (Grosuplje)	8,3
PCW PP 3 (Granulat black E)	9,6
PCW PP 4 (Drobljenec PP/PE F)	14,6
PCW PP 5 (granulat Pakistan D)	7,6
PCW PP 6 (drobljenec Ger. M)	13,0
PCW PP 7 (drobljenec class A)	13,2
PCW PP 8 (granulat FIBB 2)	8,5

3.2 Določitev maksimalnega deleža PCW PP

Po izboru dveh PCW PP je sledilo določevanje maksimalnega deleža PCW PP. Prvotni načrt je bil računsko določiti maksimalni delež PCW PP, ki ga bomo dodali rPP, a smo se na podlagi dobavljivosti materiala odločili, da bo naš maksimalni delež PCW PP 25 %.

3.3 Uporabljeni materiali

Za pripravo vzorcev smo uporabili naslednje materiale:

- osnovni material: rPP v obliki drobljenca iz mletih ohišij akumulatorjev, ki ga je zagotovilo podjetje TAB-IPM, d. o. o. Gre za mešanico PP in PE, pri kateri je minimalni delež PP 80 %;
- granulat PCW PP 1 (Optima);
- granulat PCW PP 2 (Grosuplje);
- svež PP za nižanje MFI;
- dodatek 1 kot deaktivator kovin in primarni (fenolni) antioksidant;
- dodatek 2 kot procesni in dolgotrajni termični stabilizator;

- dodatek 3 kot fenolni antioksidant, ki podaljša dolgoročno termično stabilnost;
- dodatek 4 kot barvilo.

3.4 Priprava vzorcev

V tabeli 2 je prikazana sestava naših vzorcev. Osnova za naše vzorce je bil akumulatorski drobljenec podjetja TAB-IPM, d. o. o., ki smo mu dodali maksimalne deleže in polovične maksimalne deleže PCW PP, barvilo ter praškaste dodatke.

Tabela 2: Sestava vzorcev

Vzorec	Skupna količina (g)	rPP (%)	PCW PP 1 Optima (%)	PCW PP 2 Grosuplje (%)	Svež PP (%)	Dodatek 1 (%)	Dodatek 2 (%)	Dodatek 3 (%)	Dodatek 4 (%)
822_2024_0018_00	3000	99,1	0	0	0	0,06	0,17	0,27	0,4
822_2024_0018_01	3000	74,1	25	0	0	0,06	0,17	0,27	0,4
822_2024_0018_02	3000	70,1	25	0	4	0,06	0,17	0,27	0,4
822_2024_0018_03	3000	74,1	0	25	0	0,06	0,17	0,27	0,4
822_2024_0018_04	3000	70,1	0	25	4	0,06	0,17	0,27	0,4
822_2024_0018_05	3000	82,6	12,5	0	4	0,06	0,17	0,27	0,4
822_2024_0018_06	3000	82,6	0	12,5	4	0,06	0,17	0,27	0,4
822_2024_0018_07	3000	70,1	12,5	12,5	4	0,06	0,17	0,27	0,4

3.4.1 Ekstrudiranje

Po pripravi vzorcev smo predhodno zmešan material ekstrudirali na dvopolžnem ekstruderju LABTECH - LTE 20-44 in ga granulirali s pomočjo granulatorja Scheer SGS 25-E4, ki sta prikazana na sliki 2.



Slika 2: Ekstruder LABTECH - LTE 20-44 in granulator Scheer SGS 25-E4

Ekstruder ima premer polžev 20 mm in 11 grelnih con, zadnja grelna cona je šoba. Material vseh 8 vzorcev smo ekstrudirali pri enakih pogojih. Obrati polžev so bili 600 obr./min, obrati doziranja pa 450 obr./min. Tlak na šobi je bil 18 barov. Filament smo po ekstruziji vodili skozi vodno kopel in ga granulirali. V tabeli 3 so navedene temperature grelcev od lijaka do šobe.

Tabela 3: Temperature grelcev od lijaka do šobe

Cona	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temperatura (°C)	190	190	195	200	205	210	215	220	225	230	230

3.4.2 Brizganje

Po pripravi granulata smo vzorce brizgali na brizgalnem stroju BOY® 35 E, na katerem smo uporabili kontrolni sistem Procan ALPHA® 2, in sicer pod pogoji, prikazanimi v tabeli 4.

Tabela 4: Parametri brizganja

Parameter	Temperatura lijaka (°C)	Temperatura šobe (°C)	Nastavljena omejitev tlaka brizganja (MPa)	Hitrost brizganja (mm/s)	Naknadni tlak (MPa)	Čas naknadne ga tlaka (s)
Vrednost	195	220	160	13	160	3

3.5 Metode preiskav

Za opazovanje reoloških lastnosti smo merili MFI, mehanske lastnosti smo izmerili z nateznim, upogibnim in udarnim preizkusom po Charpyju ter dinamično mehansko analizo. Termične lastnosti pa smo opazovali z meritvami DSC in TGA.

3.5.1 Meritve MFI

Podatki o polimerni reologiji se uporabljajo pri določanju, ali je to vrsto polimera mogoče ekstrudirati in oblikovati v praktičen in uporaben izdelek ali ne. Poznavanje reologije polimerov nam pomaga pri določanju optimalne zasnove predelovalne opreme, kot so geometrije polža ekstruderja, različne oblike kalupov za brizgalne stroje in mešalne naprave. To kaže, da je v postopkih predelave polimerov razumevanje njihove reologije ključnega pomena za učinkovito načrtovanje izdelkov, izbiro materialov in postopkov izdelave [17]. Proizvajalci PP redno zagotavljajo podatke, ki so v korelaciji z molekulsko maso. Te podatke pridobimo z meritvijo, imenovano indeks tečenja taline (MFI). Meritve MFI so poceni in relativno enostavne. MFI je instrumentalna tehnika, ki meri hitrost tečenja termoplastov. Meri se z instrumentom, ki ga imenujemo ekstruzijski plastometer. Metoda in parametri merjenega polimernega materiala so opredeljeni s standardom ISO 1133. Testni vzorec predstavlja granulat polimernega materiala z maso okoli 5 g, ki ga segrejemo na temperaturo tečenja (T_f)

in obremenimo s silo bata, da talina steče skozi kapilaro. MFI je določen z maso PP, ekstrudirano v času 10 minut pri 230 °C z uporabo obremenitve bata 2,16 kg. MFI izražamo v merski enoti g/10 min ali dg/min. Enačba 1 prikazuje izračun MFI [10, 18].

$$MFI (230\text{ }^{\circ}\text{C}, 2,16\text{ kg}) = (600 \times m)/t \quad (1),$$

pri čemer je:

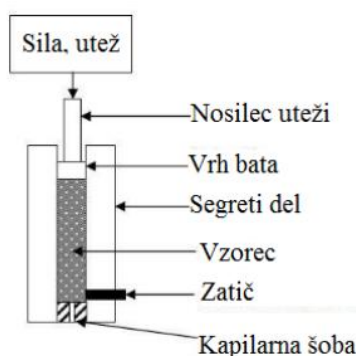
- m - masa vzorca (g),
- t - čas tečenja taline (s).

Meritve MFI smo izvedli na ekstruzijskem plastometru Tinius Olsen, model MP600 controller/timer 3 (slika 3), v skladu s standardom ISO 1133. Za meritev MFI smo uporabili 5,5 g granulata polimernega materiala. Meritev smo izvedli pri 230 °C, z uporabo 2,16 kg uteži in hitrostjo vzorčenja 5 s.



Slika 3: Ekstruzijski plastometer Tinius Olsen, model MP600 controller/timer

Slika 4 prikazuje sestavne dele naprave za merjenje MFI.



Slika 4: Osnovni deli naprave za merjenje MFI [17]

3.5.2 Meritve gostote

Gostota je pogosto edini parameter, ki je najbolj jasno povezan s fizikalnimi in mehanskimi lastnostmi PP. Pri mnogih polimerih so lastnosti odvisne od stopnje kristaliničnosti (npr. togost, trdota, kemijska odpornost) in se zvišujejo z naraščanjem gostote. Druge lastnosti (npr. odpornost proti plinom in tekočinam, žilavost, upogibna trdnost) pa se z višanjem gostote zmanjšujejo [19].

Na osnovi gostote lahko ugotavljamo možne fizikalne ali kemične spremembe v strukturi PP pri njegovi predelavi. Sprememba gostote nas opozarja na motnje v procesu in narekuje preverjanje procesa. Pri izvajanju meritve vzorec potopimo v tekočino, ki ga ne raztaplja ali ne poškoduje, in izmerimo prostornino izpodrinjene tekočine. Iz mase predmeta in tako izmerjene prostornine izračunamo gostoto snovi. Ta metoda se uporablja za določanje gostote plastičnih materialov, predvsem PP in PP/PE v etanolu.

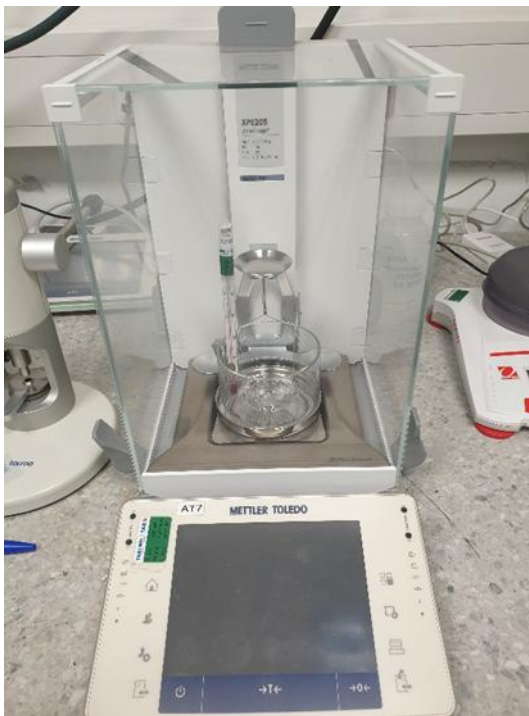
Gostoto izračunamo po enačbi 2:

$$\rho_S = \frac{m_{S,A} \cdot \rho_{IL}}{m_{S,A} - m_{S,IL}} \quad (2),$$

pri čemer je:

- ρ_S - gostota vzorca (g/cm^3),
- $m_{S,A}$ - masa vzorca na zraku (g),
- $m_{S,IL}$ - masa vzorca v tekočini (etanolu) (g),
- ρ_{IL} - gostota tekočine (etanola) pri 23 °C (g/cm^3).

Meritve gostote smo izvedli na analitski tehtnici Mettler Toledo (slika 5). Za preizkus smo uporabili tri paralelke. Pri preizkusu smo uporabili < 99,8-% etanol pri temperaturi 22 °C, v katerem smo nato tehtali naše vzorce. Pred analizo vzorcev smo analizirali tudi kontrolni vzorec z že znano gostoto, da smo preverili natančnost uporabljene metode.



Slika 5: Analitska tehtnica Mettler Toledo za merjenje gostote

3.5.3 Meritve mehanskih lastnosti

Kadar izbiramo material za določeno aplikacijo, nas navadno zanimajo predvsem njegove mehanske lastnosti. V našem primeru so to: natezna trdnost oziroma meja tečenja, upogibna trdnost, udarna žilavost in dinamični modul E. Določimo jih z mehanskimi preizkusi. Mehansko preizkušanje materialov vključuje ocenjevanje njihovih fizikalnih lastnosti, da bi razumeli njihovo obnašanje pod različnimi silami in pogoji [20].

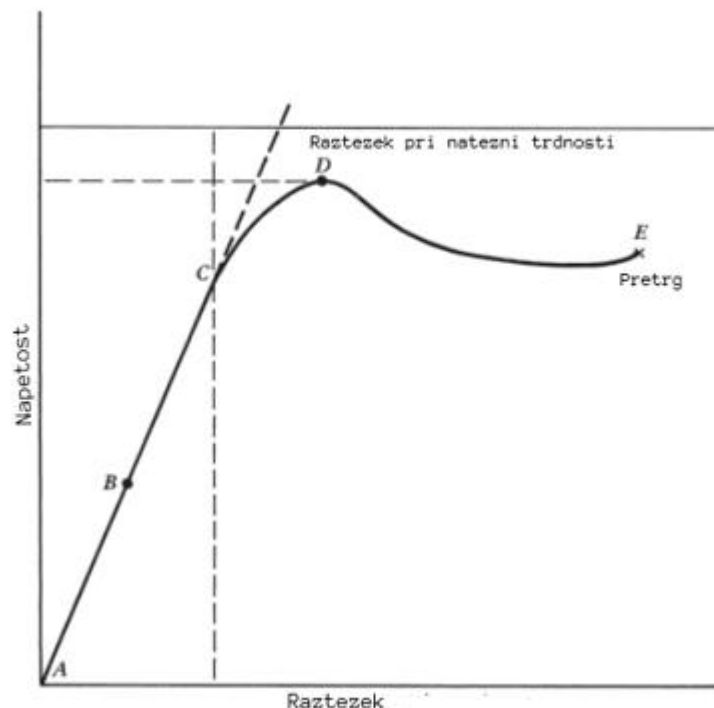
Mehanski preizkusi se delijo na statične in dinamične mehanske preizkuse [20, 21]:

- statični mehanski preizkusi – počasna, enakomerna, naraščajoča obremenitev. Statični preizkusi se uporabljajo za kontrolo kakovosti, analizo okvar, izbiro materiala in dimenzioniranje nosilnih elementov;
- dinamični mehanski preizkusi – sunkovita, nihajoča, menjajoča obremenitev. Povejo nam, kako odporen je material proti raznim udarcem, vibracijam, ponavljajočim se gibom.

Pri mehanskih preizkusih spremljamo tudi spremembo oblike preizkušancev. Spremembi oblike pravimo deformacija, ki jo delimo na elastično (po končani obremenitvi se vzorec vrne v prvotno obliko) in plastično (trajna deformacija vzorca) [21].

Natezni preizkus

Natezni preizkus se lahko obravnava kot temeljni preizkus za določanje mehanskih lastnosti materiala. Izvedemo ga tako, da preizkušance vpneemo v dve vertikalno postavljeni čeljusti, ki sta postavljeni ena nad drugo, in jih natezno obremenimo. Preizkušanec do pretrga raztezamo s konstantno naraščajočo silo. Obremenitev se povečuje s standardno določeno hitrostjo. Zabeleži se krivulja napetost–raztezek, kot je prikazano na sliki 6 [20, 22].



Slika 6: Napetostno-deformacijska krivulja [20]

Pri grafu proučujemo deformacijsko obnašanje in določimo [20]:

- natezni modul E (E_t (GPa)) – napetost, s katero se material upira proti elastični deformaciji pri delovanju sile nanj;
- natezno trdnost (σ_m (MPa)) – napetost na meji elastičnosti;
- raztezek pri natezni trdnosti (ϵ_m (MPa)) – prvo točko na krivulji, pri kateri se raztezek poveča, ne da bi se povečala napetost;
- raztezek pri pretrgu (ϵ_{tb} (%)) – spremembo dolžine na enoto originalne dolžine.

Natezni preizkus smo izvedli v skladu s standardom ISO 527. Vzorce za natezni test smo preizkušali na univerzalnem stroju za testiranje mehanskih lastnosti Shimadzu AG-X plus. Za avtomatizirano in natančno beleženje poteka preizkusa smo uporabili program Trapezium X. Merilna dolžina za meritev nateznega modula E je bila 50 mm, merjena z ekstenziometrom SIE-560A/560SA. Hitrost do raztezka 0,3 % je bila 1 mm/min, nato pa 50 mm/min do pretrga. Pripravili in preizkusili smo 5 epruvel vsakega vzorca.

V tabeli 5 so prikazani podatki o vzorcih, ki smo jih uporabili za natezni preizkus.

Tabela 5: Podatki o vzorcih za izvajanje meritev nateznih lastnosti

Vzorec	Debelina vzorca (mm)	Širina vzorca (mm)	Dolžina vzorca (mm)	Površina prečnega preseka (mm ²)
822_2024_0018_00	3,90	9,84	115	38,36
822_2024_0018_01	3,94	9,85	115	38,82
822_2024_0018_02	3,91	9,80	115	38,30
822_2024_0018_03	3,90	9,81	115	38,30
822_2024_0018_04	3,89	9,85	115	38,31
822_2024_0018_05	3,94	9,85	115	38,75
822_2024_0018_06	3,90	9,86	115	38,43
822_2024_0018_07	3,90	9,86	115	38,48

Upogibni preizkus

V praksi je upogibna obremenitev najpogostejša, zato je dobro preizkusiti, kakšne upogibne napetosti prenese naš material. Izvedemo lahko tritočkovni ali štiritočkovni upogibni preizkus. Danes se v praksi uporablja večinoma tritočkovni upogibni preizkus, zato smo se ga poslužili tudi mi [20]. Upogibni preizkus po ISO 178 se uporablja za določanje upogibnih lastnosti duroplastov in termoplastov. Najpogostejši rezultati, pridobljeni s tem preizkusom, so:

- upogibni modul E – (E_f (GPa)) (izračuna se iz začetnega naklona krivulje napetosti in deformacije);
- maksimalna upogibna trdnost – (σ_{fM} (MPa));
- upogibni raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti – (ϵ_{fM} (%)).

Pri duktilni plastiki se upogibna napetost običajno določi pri določenem upogibu.

Upogibne sile in upogib merimo, da lahko določimo ekstremno napetost vlaken in deformacijo vzorca, iz katerih lahko izračunamo rezultate posameznih preizkusov v obliki enotočkovnih podatkov [23, 24].

Vzorci za upogibni preizkus smo preizkušali na istem stroju, kot smo izvedli natezni preizkus. Za avtomatizirano in natančno beleženje poteka preizkusa smo uporabili program Trapezium X. Dolžina merilnega dela vzorca je bila 80 ± 2 mm, širina 10 ± 2 mm, debelina pa 4 ± 2 mm. Razdalja med podporama je bila 64 mm. Upogibni test smo izvedli po ISO 178.

Podatki o vzorcih, uporabljenih za upogibni test, so prikazani v tabeli 6.

Tabela 6: Podatki o vzorcih za upogibni test

Vzorec	Debelina vzorca (mm)	Širina vzorca (mm)
822_2024_0018_00	3,91	9,83
822_2024_0018_01	3,88	9,85
822_2024_0018_02	3,89	9,85
822_2024_0018_03	3,89	9,82
822_2024_0018_04	3,80	9,78
822_2024_0018_05	3,78	9,86
822_2024_0018_06	3,89	9,87
822_2024_0018_07	3,90	9,86

Meritev zarezne udarne žilavosti po Charpyju

Udarne žilavost je sposobnost materiala, da prenese nenadne in močne udarce brez zloma ter se pogosto meri v joulih (J). Udarne žilavost je pogosto odločilni dejavnik pri izbiri materialov, še posebej za tiste, ki se uporabljajo na področjih, kjer bi lahko naleteli na dinamične obremenitve z visoko stopnjo deformacije, kot so avtomobilske komponente in varnostna oprema.

Dejavniki, ki vplivajo na udarno žilavost, so:

- zgradba materiala – različni materiali imajo različne udarne žilavosti glede na njihovo molekularno strukturo in vezavo;
- temperatura – udarna žilavost se običajno zniža pri nižjih temperaturah, saj postanejo materiali bolj krhki;
- zarez – prisotnost zarez ali napak lahko bistveno zniža udarno žilavost, saj koncentrirajo napetost.

Preizkus udarne žilavosti po Charpyju je standardiziran preizkus (ISO 179-2), ki določa količino energije, ki jo absorbira material med lomom. Ta absorbirana energija je merilo žilavosti materiala in se uporablja za proučevanje krhko-duktilnega prehoda v materialih. Preizkus udarne žilavosti po Charpyju nam pomaga ugotoviti tudi prehodno temperaturo, pri kateri se materiali spremenijo iz duktilnih v krhke. Pomaga pri ocenjevanju obnašanja materiala pod nenadno obremenitvijo ali udarcem.

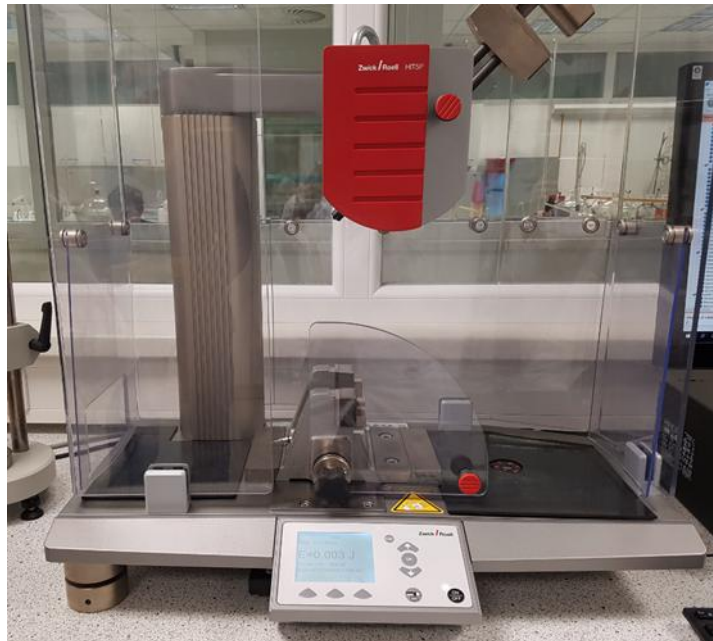
Pri preizkusu tako imenovano Charpyjevo kladivo spustimo iz določene lege, običajno $\alpha_1 = 160^\circ$, kladivo pa zadene preizkušanec v svoji najnižji legi ($\alpha = 0^\circ$). Preizkušanec je v najnižji legi kladiva postavljen med dve podpori, ki sta med seboj oddaljeni 40 mm. Energijo za prelom preizkušanca lahko izračunamo iz razlike v višini nihajnega kladiva v začetni legi in višini, do katere je nihajno kladivo zanihalo, ko je prelomilo preizkušanca. Preizkus se lahko izvede pri različnih temperaturah, da se prouči, kako temperatura vpliva na žilavost materiala.

Preizkus udarne žilavosti po Charpyju smo izvedli v skladu s standardom ISO 179-2, in sicer na instrumentalni napravi Zwick/Roell, prikazani na sliki 7, z udarnim kladivom

5 J. Pripravili smo 10 preizkušancev za vsak vzorec. Preizkušanci so imeli standardne dimenzije za preizkus udarne žilavosti, in sicer:

- dolžina: 80 ± 2 mm;
- širina: 10 ± 2 mm;
- debelina: 4 ± 2 mm.

Preizkušance smo pred preizkušanjem 3 ure hladili na temperaturi -20 °C. Pri preizkusu smo zagotovili, da je zareza v materialu usmerjena stran od udarnega kladiva.



Slika 7: Naprava za merjenje udarne žilavosti Zwick/Roell

Za izvajanje preizkusov smo uporabili program Test Expert II, ki nam je omogočil avtomatizirano in natančno beleženje poteka preizkusa. Vse deformacije in obremenitve med udarnim lomom so bile dokumentirane, kar nam omogoča podrobnejšo analizo energijske absorpcije med lomom.

Meritve dinamičnih mehanskih lastnosti

Dinamična mehanska analiza (DMA) je tehnika, pri kateri se na vzorec ciklično nanaša majhna deformacija. Z DMA merimo mehanske lastnosti polimernih materialov kot funkcijo temperature, časa, frekvence, napetosti ali kombinacije teh parametrov. Izraz DMA se uporablja tudi za analizator, ki izvaja test. DMA zazna deformacijo, ki jo povzroči sinusna sila, in izmeri odziv materiala na uporabljeno silo. Lastnosti, kot sta elastičnost in viskoznost, se izračunata iz izmerjene napetosti in deformacije, ki sta prikazani kot funkcija temperature ali časa. Za razliko od statične analize, ki se ukvarja s silami v ravnotežju, dinamična analiza upošteva sile in gibanja, ki se spreminjajo s časom. Ta vrsta analize nam pomaga napovedati in ovrednotiti odziv materiala, ko je ta izpostavljen dinamičnim silam (vibracije, udarci, sunki in podobno) [25, 26].

Vzorci smo testirali z dinamičnim mehanskim analizatorjem Perkin Elmer DMA 8000. Najprej smo 1 min zadrževali temperaturo 25 °C, nato pa smo vzorce segreli do 150 °C s hitrostjo segrevanja 2 °C/min. Frekvenca je bila 1 Hz, amplituda pa 0,02 mm.

V tabeli 7 so prikazani podatki o vzorcih, pripravljenih za DMA.

Tabela 7: Podatki o vzorcih za DMA

Vzorec	Debelina (mm)	Širina (mm)	Dolžina (mm)
822_2024_0018_00	2,26	3,89	12,6
822_2024_0018_01	1,94	3,76	12,6
822_2024_0018_02	2,31	3,80	12,6
822_2024_0018_03	1,83	3,76	12,6
822_2024_0018_04	1,76	3,86	12,6
822_2024_0018_05	1,70	4,01	12,6
822_2024_0018_06	1,84	3,86	12,6
822_2024_0018_07	1,80	3,83	12,6

3.5.4 Meritve toplotnih lastnosti

Meritve toplotnih lastnosti izvajamo s skupino tehnik, s katerimi merimo spremembe fizikalnih ali kemijskih lastnosti materialov kot funkcijo časa ali temperature, pri čemer temperaturo programiramo. Ta je lahko konstantna (se ne spreminja) ali pa jo zvišujemo z izbrano hitrostjo segrevanja [25].

Diferenčna dinamična kalorimetrija

DSC je tehnika toplotne analize, pri kateri merimo spremembo toplotne kapacitete (C_p) kot funkcijo temperature, oziroma je metoda, ki temelji na merjenju toplotnega toka skozi preiskovani vzorec. Z DSC določimo količino toplote, ki se ali porabi (endotermna sprememba) ali sprosti (eksotermna sprememba) med fizikalno ali kemijsko spremembo vzorca na podlagi temperaturne razlike med vzorcem in referenčnim materialom. Uporabljamo jo predvsem za karakterizacijo materialov, pri katerih zasledujemo njihovo obnašanje pri različnih temperaturah in njihovo sestavo [9, 25, 26].

Poznamo dve vrsti kalorimetrov. Prva je DSC s kompenzacijo moči (power compensated DSC), ki meri razliko v toplotnem toku med vzorčno in referenčno celico. Pri tej tehniki se temperatura in referenca nadzorujeta neodvisno z uporabo ločenih enakih peči. Druga vrsta kalorimetrov pa je DSC, ki meri razliko v temperaturi med obema celicama (heat flux DSC), ki se nato uporabi za izračun razlike v toplotnem toku. Pri tej vrsti pa sta vzorec in referenca v eni pečici. Temperaturno območje meritev je od -100 do 600 °C [25, 26].

Vse vzorce smo pred termičnimi meritvami z nožem razrezali na manjše koščke z maso $3 \pm 0,5$ mg in jih stehali na mikrotehnici Mettler Toledo XPR2U, ki je prikazana

na sliki 8. Za analizo smo uporabili 40- μ l aluminijaste lončke in pokrovčke, v katere smo položili vzorce. Meritve mas so morale biti čim bolj natančne (zaradi vpliva na rezultate meritev), zato smo jih stehali na stotinko miligrama natančno. Za vsak vzorec smo opravili eno paralelko. Vzorec smo po tehtanju položili v aluminijasto posodico, jo pokrili z aluminijastim pokrovčkom, v katerega smo predhodno naredili tri luknjice in jo zatisnili na namenski stiskalnici Mettler Toledo, prikazani na sliki 9.



Slika 8: Mikrotehnica Mettler Toledo XPR2U



Slika 9: Namenska stiskalnica Mettler Toledo

Za analizo termičnih lastnosti smo uporabili napravo Mettler Toledo DSC 3+, prikazano na sliki 10. Teste smo izvajali v N₂ atmosferi s pretokom 30 ml/min.



Slika 10: Mettler Toledo DSC 3+

Vzorci smo najprej segrevali z $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ od $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, nato je sledil izotermni segment pri $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, potem smo vzorec ohlajali z $-5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ od $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, nakar je sledilo še drugo segrevanje od $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ s $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Termogravimetrična analiza

TGA ali termogravimetrija (TG) je tehnika, pri kateri se masa polimera meri kot funkcija temperature ali časa, medtem ko je vzorec podvržen nadzorovanemu temperaturnemu programu v kontrolirani atmosferi. Temperaturna območja za komercialne TGA so običajno okoli $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ali več, kar je zadostna zgornja meja za analizo polimerov. Čistilni plin, ki teče skozi tehniko, ustvarja atmosfero, ki je lahko inertna, kot so dušik, argon ali helij, ali oksidativna, kot sta zrak ali kisik. Pri polimerih je redukcijska atmosfera redko potrebna. Vsebnost vlage v čistilnem plinu se lahko spreminja od suhega do nasičenega.

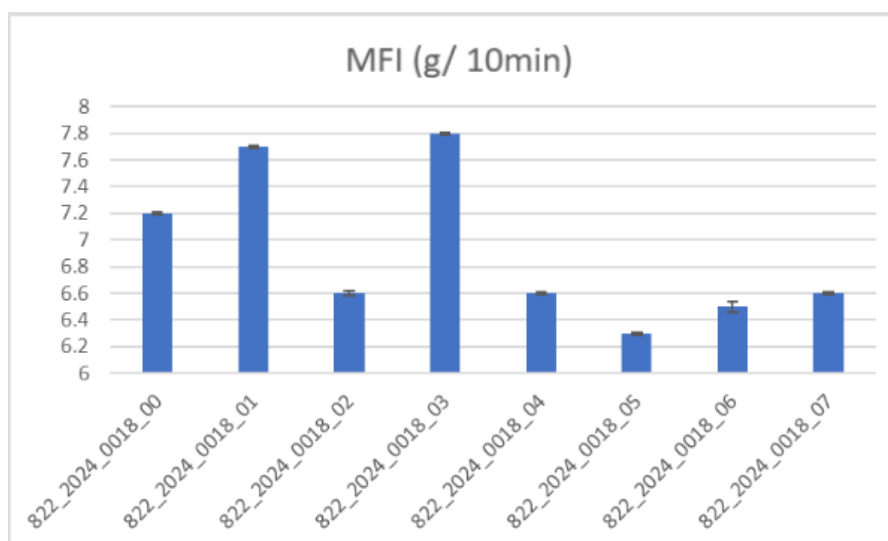
Polimeri na splošno kažejo izgubo mase, čeprav je mogoče opaziti povečanje mase pred razgradnjo pri počasnih stopnjah segrevanja v oksidativni atmosferi. Izgubo mase predstavljajo hlapne komponente, kot so absorbirana vlaga, ostanki topil, ostanki dodatkov ali oligomeri z nizko molekulsko maso (ti običajno izhlapijo med sobno temperaturo in $300\text{ }^{\circ}\text{C}$). Te procese izgube mase lahko karakteriziramo s TGA in s tem pridobimo informacije, kot so sestava, stopnja strjevanja in toplotna stabilnost. Kinetiko teh procesov je mogoče določiti tudi za modeliranje in napoved strjevanja, toplotne stabilnosti in staranja zaradi termičnih in termooksidativnih procesov [27].

Vzorci smo analizirali v dveh stopnjah segrevanja v dveh različnih atmosferah. V prvem segmentu smo vzorec segreli iz $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ s hitrostjo $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ v N_2 atmosferi s pretokom $20\text{ ml}/\text{min}$, nato pa iz $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ s hitrostjo $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ v O_2 atmosferi s pretokom $20\text{ ml}/\text{min}$.

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Rezultati meritve MFI

Meritve MFI služijo kot pokazatelj tečenja materiala. Višji MFI pomeni lažje tečenje oziroma nižjo viskoznost, nižji MFI pa težje tečenje materiala in višjo viskoznost materiala. Na sliki 11 so podani rezultati meritve MFI. Naš cilj je bil doseči MFI 7 ± 1 g/10 min.



Slika 11: Rezultati meritve MFI

Pričakovali smo, da bo dodatek 25 % PCW PP1 (vzorec 822_2024_0018_01) in dodatek 25 % PCW PP2 (vzorec 822_2024_0018_03), brez dodatka čistega PP, občutno povešal MFI našemu rPP, kar se je izkazalo za pravilno predvidevanje, saj smo z dodajanjem povešali MFI našemu osnovnemu materialu za 0,5–0,6 g/10 min. Virgin PP smo uporabili za nižanje MFI in dodajanje tega je znižalo MFI vzorcju 822_2024_0018_02 za 1,1 g/10 min in vzorcju 822_2024_0018_04 za 1,2 g/10 min. Najnižji MFI je imel vzorec 822_2024_0018_05 z dodatkom 12,5 % PP PCW1 in 4 % virgin PP. Vsi vzorci imajo MFI znotraj želenih vrednosti.

4.2 Rezultati meritve gostote

Gostota nam poda informacije, prek katerih lahko ugotavljamo možne fizikalne ali kemijske spremembe v strukturi materiala pri njegovi predelavi, prav tako pa nam da vedeti, kakšna bo končna masa izdelka. Čisti PP kopolimer ima običajno gostoto med $0,87 \text{ g/cm}^3$ in $0,91 \text{ g/cm}^3$. V želji, da se po čistosti in lastnostih čim bolj približamo virgin materialu, smo si zadali, da mora biti po reciklaži gostota materiala med $0,90 \text{ g/cm}^3$ in $0,92 \text{ g/cm}^3$. Rezultati meritve gostote so prikazani v tabeli 8.

Tabela 8: Rezultati meritve gostote

Vzorec	Gostota (g/cm ³)	Standardna deviacija (g/cm ³)
822_2024_0018_00	0,910	0,000
822_2024_0018_01	0,920	0,001
822_2024_0018_02	0,920	0,000
822_2024_0018_03	0,920	0,002
822_2024_0018_04	0,920	0,001
822_2024_0018_05	0,920	0,001
822_2024_0018_06	0,920	0,001
822_2024_0018_07	0,920	0,001

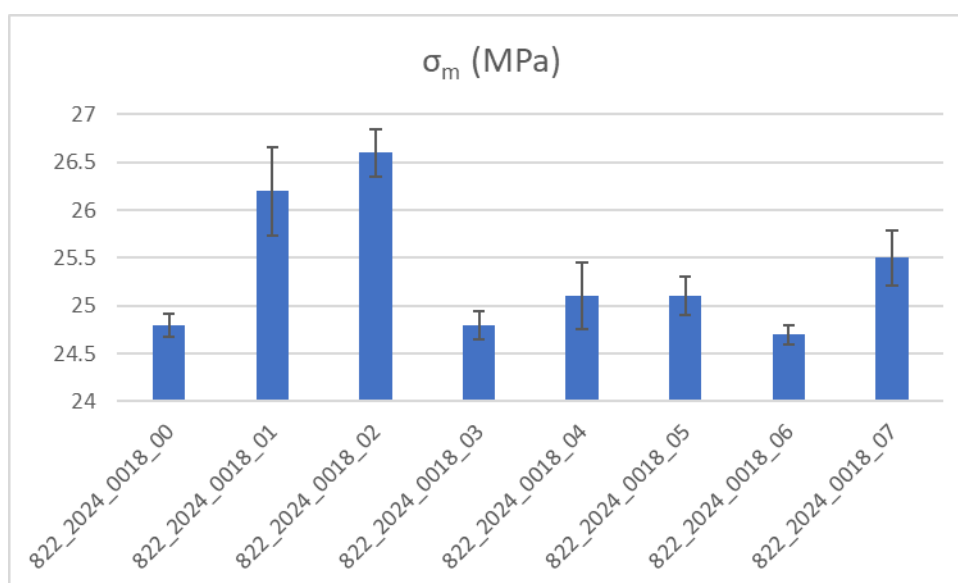
4.3 Rezultati mehanskih lastnosti

Poleg kemijske sestave imata na mehanske lastnosti precejšen vpliv tudi kakovost brizganja testnih epruvet in vsebnost nečistoč oziroma tujkov, ki predstavljajo najšibkejšo točko preizkušanca (npr. zračni mehurček, košček lesa itd.).

4.3.1 Rezultati nateznega preizkusa

Pri nateznem preizkusu smo vzorce obremenili natezno – torej v njegovi vzdolžni smeri. Med preizkusom smo merili silo in razteg. Pod naraščajočo silo se je vzorec najprej elastično deformiral, nato pa je sledila plastična deformacija vse do zloma. Naš cilj je bil doseči natezni modul E najmanj 1,15 GPa. Na sliki 12 so prikazani rezultati σ_m .

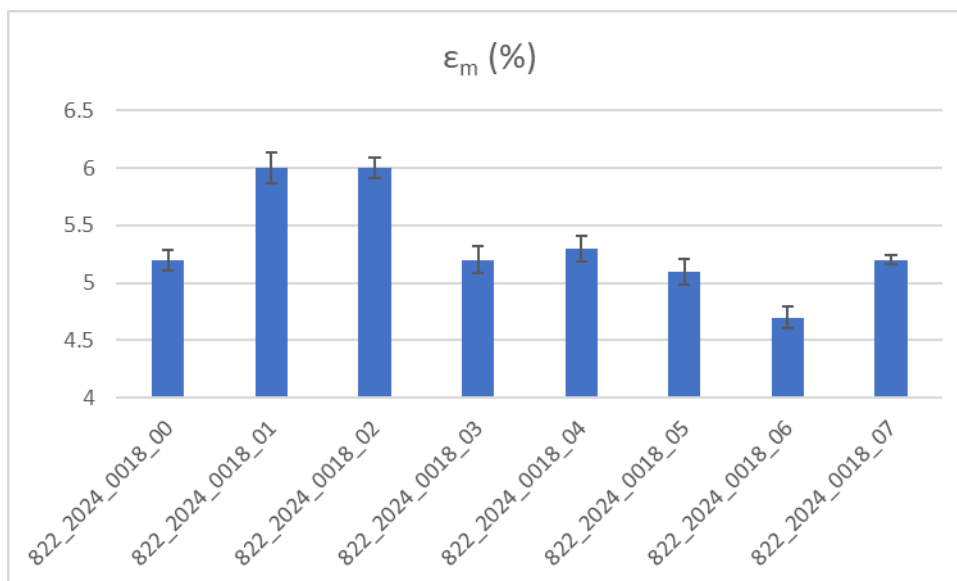
Grafi meritev vzorcev so v prilogi 1, in sicer na slikah 21–29.



Slika 12: Rezultati natezne trdnosti

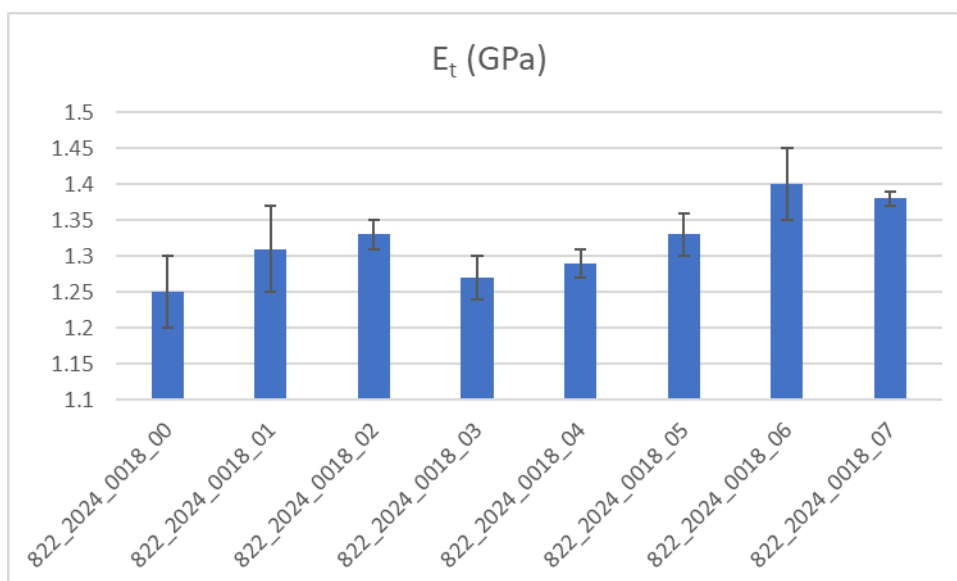
Najvišjo σ_m sta imela vzorca 822_2024_0018_02 in 822_2024_0018_01, kar nam pove, da dodajanje 25 % PCW PP 1 zvišuje σ_m našemu drobljencu. Dodatek 4 %

čistega PP pa je še dodatno povišal σ_m vzorcu 822_2024_0018_02. Povišanje σ_m zaradi dodajanja PCW PP 1 lahko opazimo tudi pri vzorcih 822_2024_0018_05 in 822_2024_0018_07, kjer smo ga našemu osnovnemu materialu dodali 12,5 %. Sklepamo, da je σ_m pri vzorcu 822_2024_0018_07 povečal dodatek 4 % čistega PP. Dodajanje PCW PP 2 ni vplivalo na σ_m našega osnovnega materiala, kar lahko vidimo po tem, da imata naša reprezentativna vzorca 822_2024_0018_00 in 822_2024_0018_03 enako σ_m , s tem, da je dodatek 4 % čistega PP ponovno nekoliko zvišal σ_m . Dodajanje PCW PP je imelo enak vpliv na σ_m kot na ε_m , kar je razvidno iz slike 13.



Slika 13: Rezultati raztezka pri natezni trdnosti

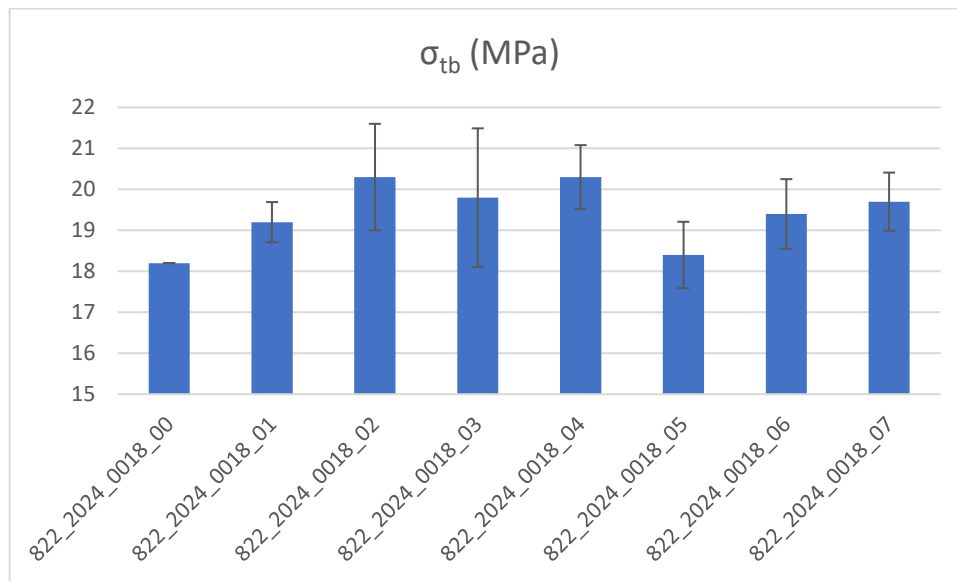
Na sliki 14 vidimo rezultate E_t .



Slika 14: Rezultati nateznega modula E

Cilj nam je bil doseči E_t nad 1150 MPa oziroma nad 1,15 GPa, kar smo dosegli pri vseh preizkušancih. Najbližje želenemu E_t je bil naš referenčni vzorec 822_2024_0018_00, ki je imel tudi najnižji E_t izmed vseh preizkušancev. Oba PCW PP sta našemu osnovnemu materialu povišala E_t . Dodatek PCW PP 1 je zvišal E_t bolj kot PCW PP 2, prav tako smo z dodajanjem 4 % čistega PP za malenkost zvišali E_t . Najvišji E_t je bil izmerjen preizkušancema 822_2024_0018_06 in 822_2024_0018_07, ki jima je skupno to, da smo jima dodali 12,5 % PCW PP 2 in 4 % čistega PP, kar ni pričakovano, glede na to, da smo z dodajanjem 25 % PCW PP 2 le za nekoliko povišali E_t našemu rPP.

Na sliki 15 so prikazani rezultati σ_{tb} .

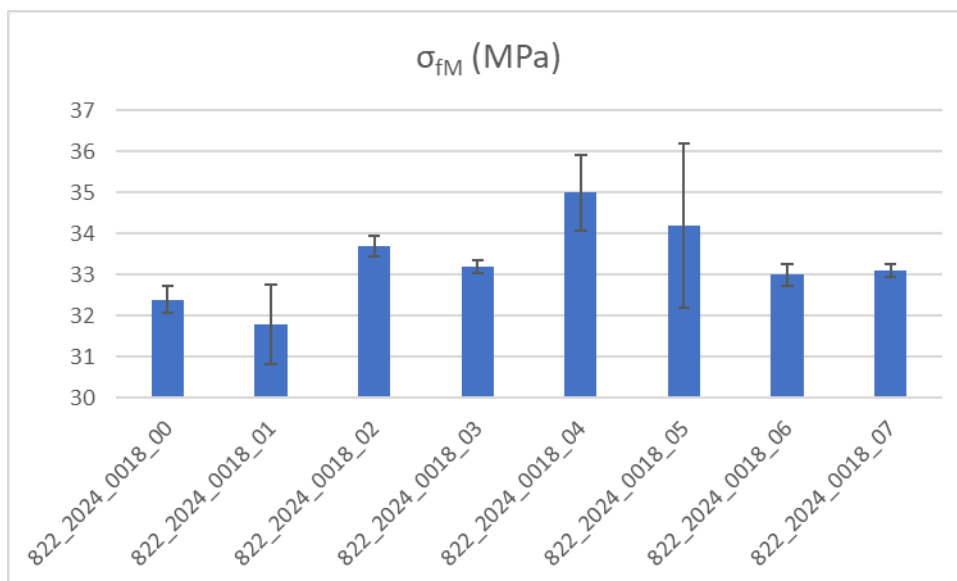


Slika 15: Rezultati pretržne trdnosti

Najnižjo σ_{tb} smo izmerili naši referenci 822_2024_0018_00 in preizkušancu 822_2024_0018_05, ki smo mu dodali 12,5 % PCW PP 1 in 4 % čistega PP. Oba PCW PP sta povišala σ_{tb} našemu rPP, za malenkost bolj dodajanje PCW PP 2, čeprav smo z dodajanjem 25 % obeh PCW PP v kombinaciji s 4 % čistega PP dosegli enak vpliv na σ_{tb} našega rPP.

4.3.2 Rezultati upogibnega preizkusa

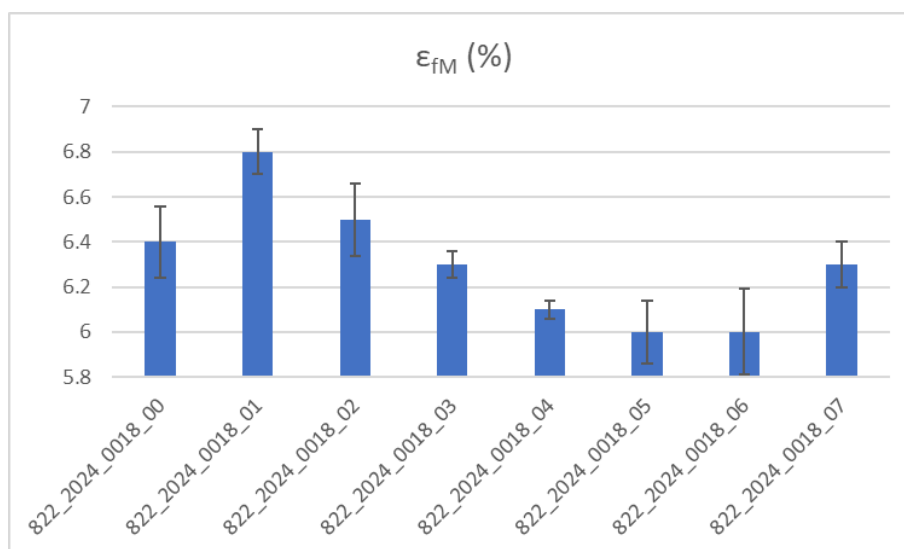
Grafi meritev vzorcev so v prilogi 2, in sicer na slikah 29–36. Na sliki 16 so prikazani rezultati maksimalne upogibne trdnosti (σ_{fM}).



Slika 16: Rezultati maksimalne upogibne trdnosti

Izmerjeni rezultati σ_{fM} segajo od vrednosti 31,8 MPa do 35,0 MPa, kar pomeni, da v σ_{fM} ni bilo drastičnih razlik, ampak dovolj, da lahko analiziramo, kako dodajanje PCW PP vpliva na naš osnovni material. Najnižjo σ_{fM} smo izmerili vzorcu 822_2024_0018_01, kar v primerjavi z našim referenčnim vzorcem pomeni, da dodajanje PCW PP1 zniža σ_{fM} . Če pa istemu vzorcu dodamo 4 % čistega PP, se mu σ_{fM} poveča na 33,7 MPa. To pomeni, da dodatek PCW PP1 v kombinaciji s 4 % čistega PP poveča σ_{fM} v primerjavi z našim referenčnim vzorcem. Najvišjo σ_{fM} smo izmerili vzorcu 822_2024_0018_04, ki je kombinacija dodajanja PCW PP 2 in 4 % čistega PP, prav tako pa ima vzorec 822_2024_0018_03 višjo σ_{fM} kot naš referenčni vzorec, kar pomeni, da nam dodajanje PCW PP 2 poveča σ_{fM} .

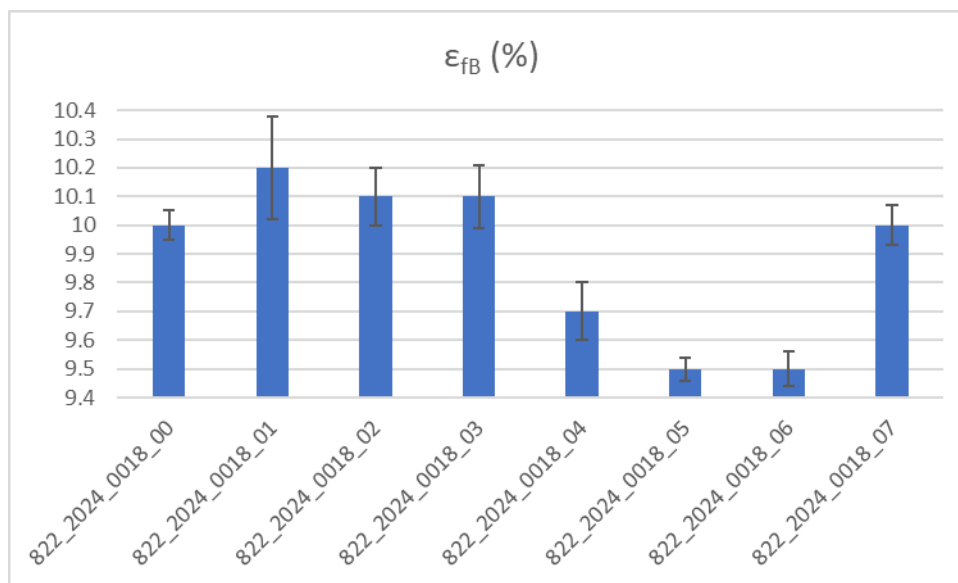
Na sliki 17 so prikazane izmerjene vrednosti upogibnega raztezka pri maksimalni upogibni trdnosti (ϵ_{fM}).



Slika 17: Rezultati upogibnega raztezka pri maksimalni upogibni trdnosti

Izmerjene vrednosti ϵ_f segajo od 6,0 % do 6,8 %, kar pomeni, da so med našimi preizkušanci zgolj majhne razlike. Najnižji ϵ_f smo izmerili preizkušancema 822_2024_0018_05 in 822_2024_0018_06, ki jima s 6,1 % ϵ_f sledi preizkušanec 822_2024_0018_04. Iz tega lahko sklepamo, da dodajanje 12,5 % PCW PP 1 ali PCW PP 2 zniža ϵ_f našemu osnovnemu materialu. Najvišji ϵ_f smo izmerili preizkušancu 822_2024_0018_01 in 822_2024_0018_02, kar pomeni, da dodatek PCW PP 1 zviša ϵ_f , dodatek čistega PP pa ga nekoliko zniža. Glede na izmerjene vrednosti ϵ_f preizkušancev 822_2024_0018_03 in 822_2024_0018_04 pa lahko sklepamo, da dodatek PCW PP 2 zniža ϵ_f našemu osnovnemu materialu.

Na sliki 18 so prikazane izmerjene vrednosti upogibnega raztezka pri porušitvi (ϵ_{fB}).



Slika 18: Rezultati upogibnega raztezka pri porušitvi

Izmerjene vrednosti ϵ_{fB} so med 9,5 % in 10,2 %. Najnižji ϵ_{fB} smo izmerili preizkušancema 822_2024_0018_05 in 822_2024_0018_06, kar nam pove, da dodajanje 12,5 % PCW PP 1 ali PCW PP 2 zniža ϵ_{fB} našemu osnovnemu materialu. Najvišji ϵ_{fB} smo izmerili preizkušancu 822_2024_0018_01, kar pomeni, da dodajanje PCW PP 1 zviša ϵ_{fB} našemu osnovnemu materialu, ne glede na to, ali mu dodamo še 4 % čistega PP (preizkušanec 822_2024_0018_02). Dodajanje 25 % PCW PP 2 prav tako za 0,1 % poviša ϵ_{fB} našemu osnovnemu materialu, če dodamo še 4 % čistega PP (822_2024_0018_04), pa dobimo nižji ϵ_{fB} v primerjavi z našim referenčnim vzorcem.

4.4 Rezultati zarezne udarne žilavosti

V tabeli 9 so prikazani rezultati meritve udarne žilavosti in standardna deviacija meritve. Naš cilj je bil doseči udarno žilavost najmanj 3,0 kJ/m².

Tabela 9: Rezultati meritve udarne žilavosti

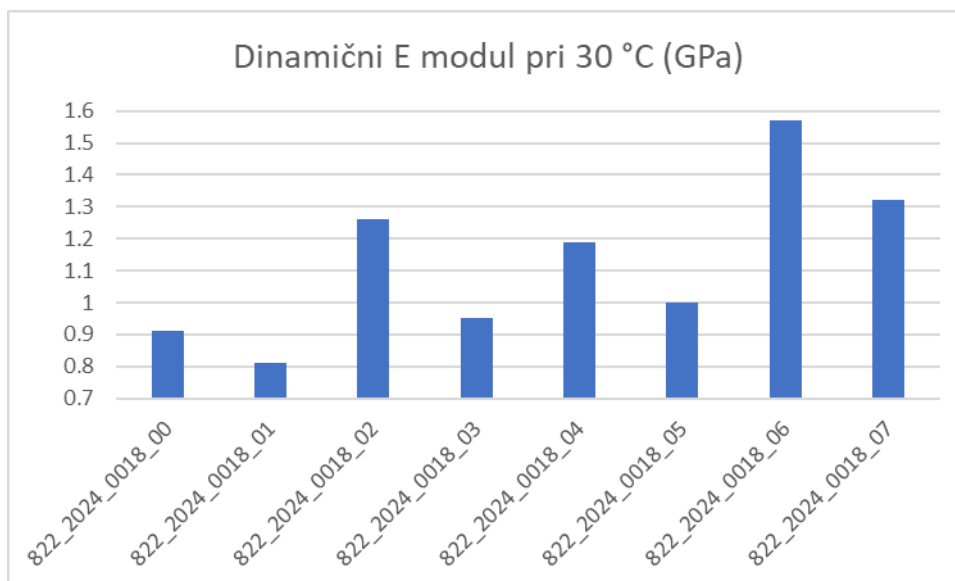
Vzorec	Zarezna udarna žilavost (kJ/m ²)	Standardna deviacija (kJ/m ²)
822_2024_0018_00	3,4	0,4
822_2024_0018_01	3,0	0,2
822_2024_0018_02	2,7	0,3
822_2024_0018_03	2,9	0,2
822_2024_0018_04	2,9	0,2
822_2024_0018_05	2,8	0,1
822_2024_0018_06	2,9	0,2
822_2024_0018_07	2,2	0,3

Vzorec 822_2024_0018_00 je služil kot referenčni vzorec. Našim zahtevam ustreza samo vzorec 822_2024_0018_01, ki mu je dodatek 25 % PCW PP 1 znižal zarezno udarno žilavost za 0,4 kJ/m². Vzorec 822_2024_0018_02 ima kljub dodatku 4 % čistega PP še dodatno znižano zarezno udarno žilavost, kar pomeni, da ima PCW PP1 večji vpliv na zarezno udarno žilavost kot čistega PP. Izmerjene vrednosti zarezne udarne žilavosti pri vzorcih 822_2024_0018_03 in 822_2024_0018_04 so enake, kar nam pove, da dodatek 4 % čistega PP nima bistvenega vpliva na izboljšanje zarezne udarne žilavosti, kadar je prisoten PCW PP 2. Najnižjo zarezno udarno žilavost je mogoče opaziti pri vzorcu 822_2024_0018_07, kar pomeni, da kombinacija obeh PCW PP povzroči večje znižanje zarezne udarne žilavosti v primerjavi z drugimi vzorci.

4.5 Rezultati dinamičnega modula E

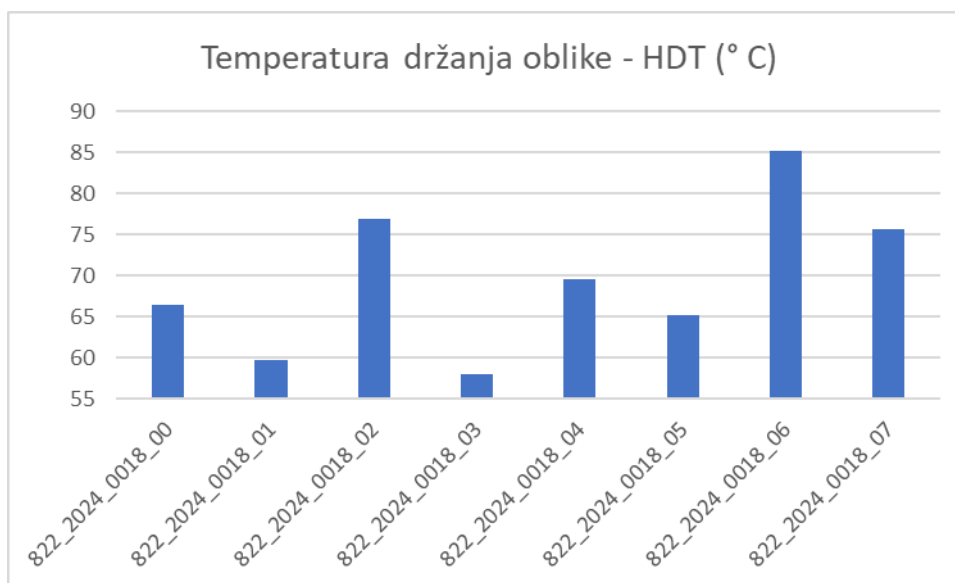
Temperatura držanja oblike (angl. heat deflection temperature – HDT) je merilo odpornosti polimera na deformacijo pod dano obremenitvijo pri povišani temperaturi oziroma temperatura, pri kateri dinamični modul E vzorca pade na 0,5 GPa. Grafi meritev vzorcev so v prilogi 3, in sicer na slikah 37–44.

Slika 19 prikazuje dinamični modul E različnih vzorcev pri temperaturi 30 °C. Vrednosti dinamičnega modula E se med različnimi vzorci razlikujejo, kar kaže na razlike v togosti pri 30 °C. Vzorec 822_2024_0018_06 ima najvišji dinamični modul E pri 1,57 GPa, kar nakazuje, da je najbolj tog med vzorci pri tej temperaturi. To pomeni, da z dodajanjem 12,5 % PCW PP 2 v kombinaciji s 4 % čistega PP dosežemo najvišjo togost. Najnižji dinamični modul E smo izmerili vzorcu 822_2024_0018_01, kar nam pove, da smo z dodajanjem 25 % PCW PP 1 znižali dinamično togost našemu osnovnemu materialu.



Slika 19: Dinamični modul E pri 30 °C

Slika 20 prikazuje temperaturo držanja oblike naših vzorcev. Najnižjo HDT smo dosegli pri vzorcih 822_2024_0018_01 in 822_2024_0018_03, kar pomeni, da nam dodajanje 25 % PCW PP zniža HDT, če tem 25 % PCW PP dodamo še 4 % čistega PP, pa dobimo višjo HDT od našega reprezentativnega vzorca. Najvišjo HDT smo izmerili vzorcu 822_2024_0018_06, kar pomeni, da je dodajanje 12,5 % PCW PP 2 v kombinaciji s 4 % čistega PP najbolj optimalno, če je naš cilj doseči čim višjo HDT.



Slika 20: Temperatura držanja oblike

4.6 Rezultati meritev toplotnih lastnosti

4.6.1 Rezultati TGA

Rezultati TGA so razvidni v tabeli 10. Grafi meritev vzorcev so v prilogi 4, in sicer na slikah 45–52.

Tabela 10: Rezultati TGA

Vzorec	T _{d1} (°C)	Razpad 1 (%)	Saje (%)	Anorganski ostanek (%)
822_2024_0018_00	462,8	98,65	0,02	1,33
822_2024_0018_01	463,2	98,32	0,02	1,66
822_2024_0018_02	463,2	99,60	0,01	0,39
822_2024_0018_03	462,5	98,98	0,01	1,01
822_2024_0018_04	433,9	99,97	0,03	0,00
822_2024_0018_05	455,6	99,03	0,00	0,97
822_2024_0018_06	462,4	98,69	0,01	1,30
822_2024_0018_07	461,6	99,42	0,01	0,57

Analiza TGA prikazuje enostopenjski razpad, pri katerem gre za razpad polimerov. Vidimo lahko tudi vsebnost saj in anorganskega ostanka.

T_{d1} predstavlja temperaturo razgradnje vzorca, natančneje temperaturo, pri kateri pride do prve večje izgube mase. Temperature razgradnje so pri večini vzorcev med 461,6 °C in 463,2 °C. Največje odstopanje je pri vzorcih 822_2024_0018_04 in 822_2024_0018_05. Razlog za odstopanje bi lahko bila spremenljivost lastnosti rPP, saj sta vzorca sestavljena iz različnih PCW PP.

Razpad označuje odstotek izgube mase med fazo primarne razgradnje. Vsem vzorcem smo izmerili visok delež razgradnje, in sicer od približno 98,32 % do 99,97 %, kar pomeni, da se večina vzorca razgradi v tej fazi. Največjo izgubo mase smo izmerili pri vzorcu 822_2024_0018_04, najnižjo pa pri vzorcu 822_2024_0018_01, kar pomeni, da pri dodajanju PCW PP 1 dobimo manjši delež razpada kot pri dodajanju PCW PP 2.

Stolpec saje prikazuje odstotek izgorelega ogljika ali saje. Predstavlja maso, ki zgori ob preklopu v kisikovo atmosfero. Vrednosti so zelo nizke, in sicer od 0,00 % do 0,03 %, kar kaže na učinkovito zgorevanje.

Anorganski ostanek predstavlja odstotek negorljivega materiala, ki ostane po termični analizi. Vrednosti segajo od 0,00 % do 1,66 %, kar nakazuje, da je v vzorcih prisotna majhna količina anorganskega materiala. Najnižjo vsebnost anorganskega ostanka smo izmerili vzorcu 822_2024_0018_04, ki smo mu dodali 25 % PCW PP 2 in 4 % čistega PP. Najvišjo vrednost anorganskega ostanka smo izmerili vzorcu 822_2024_0018_01, ki smo mu dodali 25 % PCW PP 1. Iz tega lahko sklepamo, da vsebuje PCW PP 1 več anorganskega ostanka. Anorganski ostanek predstavljajo razni

anorganski dodatki, ojačevalci ali polnila. Anorganski ostanek nam pomaga ugotoviti, ali material vsebuje neželene nečistoče, ki lahko vplivajo na njegove lastnosti.

4.6.2 Rezultati DSC

V tabeli 11 so prikazani rezultati meritev DSC. Grafi meritev vzorcev so v prilogi 5, in sicer na slikah 52–60.

Tabela 11: Rezultati DSC

Vzorec	Vsebnost PP (%)	Vsebnost PE (%)	ΔH_m (J/g)	ΔH_c (J/g)	T_m PP (°C)	T_m PE (°C)	T_c PP (°C)	T_c PE (°C)
822_2024_0018_00	86,8	13,2	88,2	89,1	165,5	125,7	127,9	116,6
822_2024_0018_01	87,3	12,7	85,0	83,5	164,3	125,7	126,8	116,6
822_2024_0018_02	89,4	10,6	87,7	89,5	165,0	125,9	126,7	116,5
822_2024_0018_03	86,0	14,0	90,7	88,6	165,1	125,9	127,4	117,1
822_2024_0018_04	86,2	13,8	88,9	83,9	165,4	126,1	127,3	117,0
822_2024_0018_05	86,7	13,3	91,1	86,9	165,5	125,9	126,7	116,5
822_2024_0018_06	85,6	14,4	83,6	77,7	165,2	125,9	127,3	117,1
822_2024_0018_07	86,2	13,8	89,2	83,3	164,8	125,9	127,0	116,8

Glede na to, da smo med sabo mešali različne reciklate PP, le da so ti bili iz različnih virov in različnih čistosti, je bilo pričakovano, da se termične lastnosti v primerjavi z referenčnim vzorcem ne bodo bistveno spreminjale. Najvišjo vsebnost PP smo izmerili pri vzorcu 822_2024_0018_02, drugo najvišjo pa pri vzorcu 822_2024_0018_01, kar nam pove, da dodatek PCW PP 1 zvišuje vsebnost PP našemu osnovnemu materialu. Prav tako pa lahko na podlagi podatkov iz zgornje tabele vidimo, da dodatek PCW PP 2 znižuje vsebnost PP našemu osnovnemu materialu.

Talilna entalpija je termodinamična lastnost, ki predstavlja količino energije, potrebno za spremembo snovi iz trdne faze v tekočo fazo pri konstantnem tlaku in konstantni temperaturi. To energijo material absorbira med fazno spremembo in je potrebna za premagovanje sil, ki držijo molekule skupaj v trdnem stanju. Najvišja talilna entalpija je razvidna pri vzorcih 822_2024_0018_03 in 822_2024_0018_05, kar je zanimivo, saj sta bila tema vzorcema dodana dva različna PCW PP. Dodatek 25 % PCW PP 1 znižuje talilno entalpijo glede na naš referenčni vzorec, medtem ko dodatek PCW PP 2 zvišuje talilno entalpijo. Od vseh izmerjenih vrednosti najbolj izstopa vzorec 822_2024_0018_06, kar je zanimivo, glede na to, da smo ugotovili, da dodajanje PCW PP 2 znižuje talilno entalpijo našemu osnovnemu materialu.

5 SKLEP

V diplomskem delu smo raziskali vpliv dodajanja PCW PP rPP. Ugotovili smo, da je mešanje PCW PP z rPP izvedljivo brez bistvenega ogrožanja zelenih lastnosti materiala. Z različnimi analizami smo identificirali optimalne mešanice, ki so ohranile mehanske, toplotne in reološke lastnosti v sprejemljivih mejah.

Pri mehanskih analizah je dodatek PCW PP povzročil povišanje nateznega modula E za vse vzorce v primerjavi z referenčnim materialom, kar je pozitiven rezultat za področja uporabe, ki zahtevajo večjo togost. Ko pa se je vsebnost PCW PP povečala, je prišlo do opaznega zmanjšanja zarezne udarne žilavosti, kar je poudarilo kompromis med togostjo materiala in odpornostjo. Analiza upogibnih lastnosti je pokazala, da medtem ko je dodatek PCW PP nekoliko znižal upogibni modul E v primerjavi z referenčnim vzorcem, so vrednosti še vedno ostale v zelenem območju. Dinamične mehanske lastnosti so pokazale, da so materiali ostali razmeroma stabilni v testiranem temperaturnem območju. To nakazuje, da so mešanice primerne za izdelovanje akumulatorskih škatel, saj ohranjajo zanesljivo mehansko delovanje. Konsistentnost termičnih lastnosti kaže, da bi material lahko obvladal podobne pogoje termične obdelave, kar je ključnega pomena za ohranjanje učinkovitosti. Meritve MFI so pokazale, da so značilnosti tečenja izdelanih mešanic ostale znotraj zelenega območja, kar zagotavlja nespremenjeno predelovanje materiala. Dodani PCW PP je nekoliko povišal MFI, kar bi lahko bilo koristno za nekatere proizvodne postopke, čeprav je bil za prilagoditev tega učinka po potrebi uporabljen čisti PP. Vrednosti gostote mešanic so bile znotraj ciljnega območja, kar kaže, da dodatek PCW PP ni povzročil bistvenih odstopanj od zelene gostote materiala, je pa jo nekoliko povišal. To je ključnega pomena za ohranjanje specifikacij glede mase in splošnih značilnosti delovanja končnega izdelka.

Na splošno rezultati kažejo na potencial za uporabo večjih količin recikliranega materiala v proizvodnji PP, kar bi znatno prispevalo k trajnosti v industriji plastike. Naleteli smo na izzive, kot je spremenljivost lastnosti vhodnega materiala, vendar uspešna identifikacija primernih mešalnih razmerij poudarja potencial za praktično uporabo.

Nekaj težav je povzročala heterogenost vhodnih materialov in smo zato dobili nekoliko spremenljive lastnosti vzorcev, kar bi lahko izboljšali s prihodnjimi raziskavami, kjer bi se osredotočili na optimizacijo tehnik mešanja, da bi dosegli boljšo homogenost, kar bi lahko zmanjšalo spremenljivost lastnosti in izboljšalo splošne mehanske lastnosti. V nadaljnje bi se lahko prav tako raziskalo, kako se rPP obnesejo v dolgotrajnih okoljskih pogojih ali kakšni sta vzdržljivost in sprememba na primer udarne žilavosti po več ciklih recikliranja, saj bi s tem lahko ocenili, ali lahko te mešanice ohranijo svoje zelene lastnosti delovanja za praktično uporabo.

SEZNAM LITERATURE IN VIROV

- [1] E. P. – Directorate General for Communication, Plastic waste and recycling in the EU: facts and figures, (2023).
- [2] Firew Gameda, THE DANGER OF SINGLE-USE FOSSIL-BASED PLASTICS, (2023). <https://www.smartsolve.com/news/save-the-planet-why-there-should-be-a-mandatory-shift-from-single-use-fossil-based-plastics-to-eco-friendly-bio-based-packaging-materials> (accessed January 3, 2024).
- [3] PlasticsEurope AISBL, EPRO, Plastics-the Facts, 2022.
- [4] Služba vlade RS za zakonodajo, Uredba o ravnanju z baterijami in akumulatorji ter odpadnimi baterijami in akumulatorji, (2021). <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED5201#> (accessed June 18, 2023).
- [5] TAB d.d, RECIKLAŽA – TAB, (2023). <https://www.tab.si/recycling/?lang=sl#> (accessed June 18, 2023).
- [6] OMNEXUS: The material selection platform, Comprehensive Guide on Polypropylene (PP), (2023). https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polypropylene-pp-plastic?gclid=Cj0KCCQjw98ujBhCgARIsAD7QeAixYFxDHpTpYJg5FX9mort3BG01-DEvTgH_0mlmrXQxpuTShTIwR0caAgT-EALw_wcB (accessed June 16, 2023).
- [7] E. SaldívarSaldívar-Guerra, E. Vivaldo-Lima, PART I BASIC CONCEPTS 1 INTRODUCTION TO POLYMERS AND POLYMER TYPES, 2013.
- [8] Aumnate Chuanchom, Rudolph Natalie, Sarmadi Majid, Recycling of Polypropylene/Polyethylene Blends: Effect of Chain Structure on the Crystallization Behaviors, (2019).
- [9] M. Hotko, Termomehanska analiza polikarbonata, polivinil klorida in polimetil metakrilata, Maribor, 2015.
- [10] S. Publishing, M. Scrivener, P. Carmical, Introduction to Industrial Polypropylene, 2012.
- [11] C. A. Tarazona, Effect of recycling and additives on physical properties of Polypropylene (PP), Ljubljana, 2020.
- [12] D. Črešnar, Krmiljenje togosti in trdnosti recikliranega polipropilena (rPP) z dodatkom odpadnega papirja s postopkom brizganjeR, Slovenj Gradec, 2023.
- [13] N. Bahlouli, D. Pessey, C. Raveyre, J. Guillet, S. Ahzi, A. Dahoun, J. M. Hiver, Recycling effects on the rheological and thermomechanical properties of polypropylene-based composites, Mater Des 33 (2012) 451–458. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.049>.

- [14] S. A. Stoian, A. R. Gabor, A. M. Albu, C. A. Nicolae, V. Raditoiu, D. M. Panaitescu, Recycled polypropylene with improved thermal stability and melt processability, *J Therm Anal Calorim* 138 (2019) 2469–2480. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08824-2>.
- [15] P. Brachet, L. T. Høydal, E. L. Hinrichsen, F. Melum, Modification of mechanical properties of recycled polypropylene from post-consumer containers, *Waste Management* 28 (2008) 2456–2464. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.021>.
- [16] C. Badini, O. Ostrovskaya, G. Bernagozzi, R. Lanfranco, S. Miranda, Recycling of Polypropylene Recovered from a Composting Plant: Mechanical Behavior of Compounds with Virgin Plastic, *Recycling* 8 (2023). <https://doi.org/10.3390/recycling8040062>.
- [17] Z. M. Ariff, A. Ariffin, Rheological Behaviour of Polypropylene Through Extrusion and Capillary Rheometry, 2014. <https://www.researchgate.net/publication/236737926>.
- [18] W. Grellmann, S. Seidler, *Polymer Testing*, 2nd ed., Hanser Publications, 2013.
- [19] V. Kholodovych, W. J. Welsh, *Densities of Amorphous and Crystalline Polymers*, 2007.
- [20] M. Žigon, Hausberger Andreas, *Preizkušanje in karakterizacija polimernih materialov ter zagotavljanje kakovosti: Mehanska analiza*, (2018).
- [21] J. Bezjak, *Preiskava materiala*, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana, 1993.
- [22] Illinois Tool Works Inc., *Tensile testing - introduction*, (2023). <https://www.instron.com/en-us/resources/test-types/tensile-test> (accessed February 25, 2024).
- [23] Zwick Roell, *ISO 178 | 3-točkovni upogibni preskus plastike*, (2024). <https://www.zwickroell.com/sl/industrije/plastika/termoplastika-in-termo-odporni-brizgani-materiali/3-tockovno-upogibno-preskusanje-iso-178/> (accessed March 25, 2024).
- [24] Zwick Roell, *Testing of Plastics and Rubber*, (n. d.). https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/Brochures_EN/Industry_Brochures/99_269_Testing_of_Plastics_and_Rubber_E_EN.pdf (accessed March 25, 2024).
- [25] M. Žigon, Hausberger Andreas, *Preizkušanje in karakterizacija polimernih materialov in zagotavljanje kakovosti: Termične in termomehanske analize - 3. sklop predavanj*, Fakulteta Za Tehnologijo Polimerov (2023).
- [26] L. Marolt, *Primerjava viskoelastičnih lasnosti gumenih zmesi, merjenih z DMA in TMA*, Krško, 2023.
- [27] D. J. Menczel Joseph, B. R. Prime, *Thermal analysis of polymers - Fundamentals and Applications*, 2009.

SEZNAM SLIK

Slika 1: Postopek reciklaže podjetja TAB IPM, d. o. o.	8
Slika 2: Ekstruder LABTECH - LTE 20-44 in granulater Scheer SGS 25-E4	11
Slika 3: Ekstruzijski plastometer Tinius Olsen, model MP600 controller/timer	13
Slika 4: Osnovni deli naprave za merjenje MFI [17]	13
Slika 5: Analitska tehtnica Mettler Toledo za merjenje gostote	15
Slika 6: Napetostno-deformacijska krivulja [20]	16
Slika 7: Naprava za merjenje udarne žilavosti Zwick/Roell	19
Slika 8: Mikrotehtnica Mettler Toledo XPR2U	21
Slika 9: Namenska stiskalnica Mettler Toledo	21
Slika 10: Mettler Toledo DSC 3+	22
Slika 11: Rezultati meritve MFI	23
Slika 12: Rezultati natezne trdnosti	24
Slika 13: Rezultati raztezka pri natezni trdnosti	25
Slika 14: Rezultati nateznega modula E	25
Slika 15: Rezultati pretržne trdnosti	26
Slika 16: Rezultati maksimalne upogibne trdnosti	27
Slika 17: Rezultati upogibnega raztezka pri maksimalni upogibni trdnosti	27
Slika 18: Rezultati upogibnega raztezka pri porušitvi	28
Slika 19: Dinamični modul E pri 30 °C	30
Slika 20: Temperatura držanja oblike	30
Slika 21: Graf preizkusa nateznih lastnosti vzorca 822_2024_0018_00	41
Slika 22: Graf preizkusa nateznih lastnosti vzorca 822_2024_0018_01	41
Slika 23: Graf preizkusa nateznih lastnosti vzorca 822_2024_0018_02	42
Slika 24: Graf preizkusa nateznih lastnosti vzorca 822_2024_0018_03	42
Slika 25: Graf preizkusa nateznih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_04	43
Slika 26: Graf preizkusa nateznih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_05	43
Slika 27: Graf preizkusa nateznih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_06	44
Slika 28: Graf preizkusa nateznih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_06	44
Slika 29: Graf preizkusa upogibnih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_00	45
Slika 30: Graf preizkusa upogibnih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_01	45
Slika 31: Graf preizkusa upogibnih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_02	46
Slika 32: Graf preizkusa upogibnih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_03	46
Slika 33: Graf preizkusa upogibnih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_04	47
Slika 34: Graf preizkusa upogibnih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_05	47
Slika 35: Graf preizkusa upogibnih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_06	48
Slika 36: Graf preizkusa upogibnih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_07	48
Slika 37: Graf meritve dinamičnega modula E za vzorec 822_2024_0018_00	49
Slika 38: Graf meritve dinamičnega modula E za vzorec 822_2024_0018_01	49
Slika 39: Graf meritve dinamičnega modula E za vzorec 822_2024_0018_02	50
Slika 40: Graf meritve dinamičnega modula E za vzorec 822_2024_0018_03	50
Slika 41: Graf meritve dinamičnega modula E za vzorec 822_2024_0018_04	51
Slika 42: Graf meritve dinamičnega modula E za vzorec 822_2024_0018_05	51

Slika 43: Graf meritve dinamičnega modula E za vzorec 822_2024_0018_06	52
Slika 44: Graf meritve dinamičnega modula E za vzorec 822_2024_0018_07	52
Slika 45: Krivulja TGA za vzorec 822_2024_0018_00	55
Slika 46: Krivulja TGA za vzorec 822_2024_0018_01	55
Slika 47: Krivulja TGA za vzorec 822_2024_0018_02	56
Slika 48: Krivulja TGA za vzorec 822_2024_0018_03	56
Slika 49: Krivulja TGA za vzorec 822_2024_0018_04	57
Slika 50: Krivulja TGA za vzorec 822_2024_0018_05	57
Slika 51: Krivulja TGA za vzorec 822_2024_0018_06	58
Slika 52: Krivulja TGA za vzorec 822_2024_0018_07	58
Slika 53: Krivulja DSC za vzorec 822_2024_0018_00	59
Slika 54: Krivulja DSC za vzorec 822_2024_0018_01	59
Slika 55: Krivulja DSC za vzorec 822_2024_0018_02	60
Slika 56: Krivulja DSC za vzorec 822_2024_0018_03	60
Slika 57: Krivulja DSC za vzorec 822_2024_0018_04	61
Slika 58: Krivulja DSC za vzorec 822_2024_0018_05	61
Slika 59: Krivulja DSC za vzorec 822_2024_0018_06	62
Slika 60: Krivulja DSC za vzorec 822_2024_0018_07	62

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Rezultati meritev MFI PCW PP	10
Tabela 2: Sestava vzorcev	11
Tabela 3: Temperature grelcev od lijaka do šobe	12
Tabela 4: Parametri brizganja	12
Tabela 5: Podatki o vzorcih za izvajanje meritev nateznih lastnosti	17
Tabela 6: Podatki o vzorcih za upogibni test	18
Tabela 7: Podatki o vzorcih za DMA	20
Tabela 8: Rezultati meritve gostote	24
Tabela 9: Rezultati meritve udarne žilavosti	29
Tabela 10: Rezultati TGA	31
Tabela 11: Rezultati DSC	32

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

- ρ - gostota (kg/m^3)
 m - masa (kg)
 m_v - masa vzorca (g)
 t - čas tečenja taline (s)
 ρ_s - gostota vzorca (g/cm^3)
 $m_{s,A}$ - masa vzorca na zraku (g)
 $m_{s,IL}$ - masa vzorca v tekočini (etanolu) (g)
 ρ_{IL} - gostota tekočine (etanola) pri 23 °C (g/cm^3)
 E_t - natezni modul E (MPa)
 σ_m - natezna trdnost
 ϵ_m - raztezek pri natezni trdnosti (%)
 ϵ_{tb} - raztezek pri pretrgu (%)
 T_f - temperatura tečenja (°C)
 C_3H_6 - propen
 CO_2 - ogljikov dioksid
 E' - dinamični E modul (GPa)
 E'' - modul izgub (GPa)
 E''/E' - faktor izgub (–)
 α_1 - kot najvišje lege udarnega kladiiva (°)
 α_0 - kot najnižje lege udarnega kladiiva (°)
 C_p - entalpija (J/g)
 T_g - temperatura steklastega prehoda (°C)
 E_f - upogibni modul E (GPa)
 σ_{fM} - maksimalna upogibna trdnost (MPa)
 ϵ_{fM} - upogibni raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti (%)

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

TAB -Tovarna akumulatorskih baterij

PP - polipropilen

rPP - recikliran polipropilen

PE - polietilen

PCW PP - tržni reciklat polipropilena (angl. post consumer waste polypropylene)

MFI - indeks tečenja taline (angl. melt flow index)

DMA - dinamična mehanska analiza (angl. dynamic mechanical analysis)

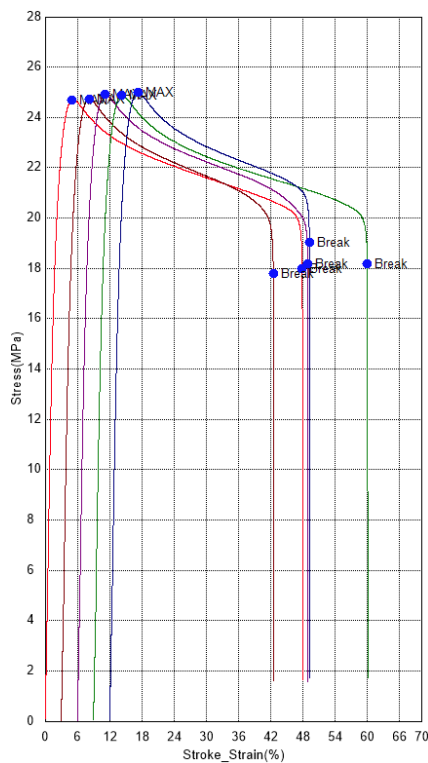
DSC - diferencialna dinamična kalorimetrija (angl. differential scanning calorimetry)

TGA - termogravimetrična analiza (angl. thermogravimetric analysis)

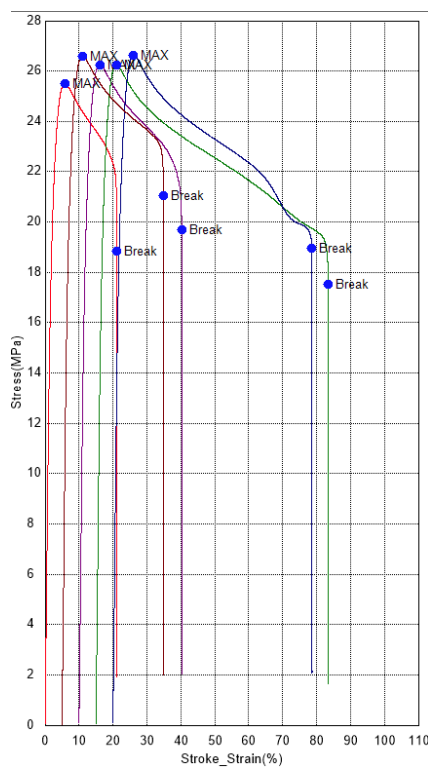
TG - termogravimetrija (angl. thermogravimetry)

PRILOGE

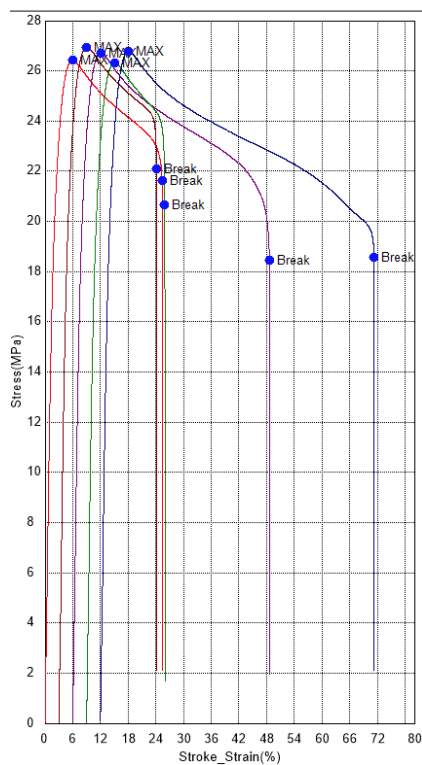
Priloga 1: Rezultati preizkusa nateznih lastnosti



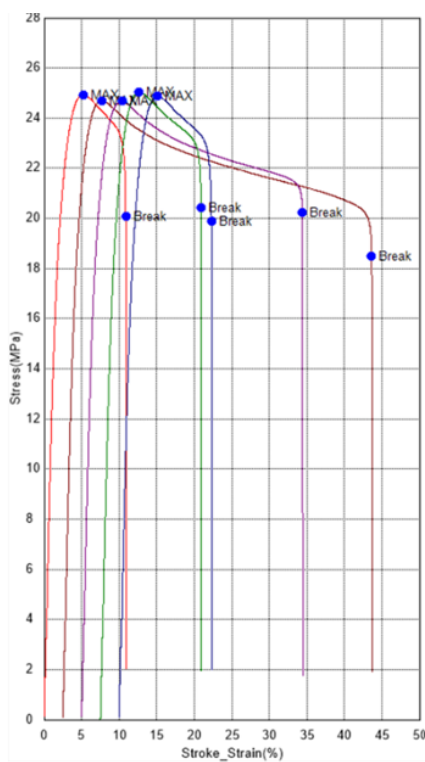
Slika 21: Graf preizkusa nateznih lastnosti vzorca 822_2024_0018_00



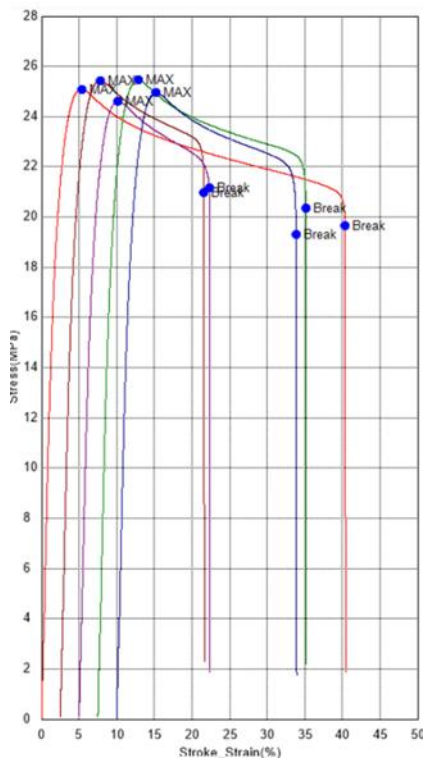
Slika 22: Graf preizkusa nateznih lastnosti vzorca 822_2024_0018_01



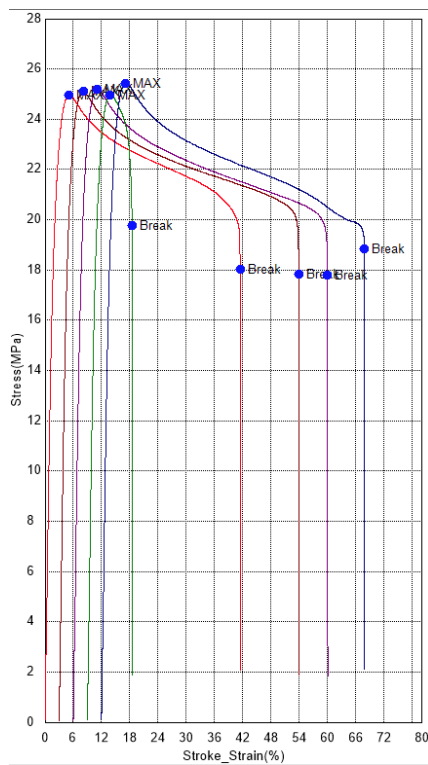
Slika 23: Graf preizkusa nateznih lastnosti vzorca 822_2024_0018_02



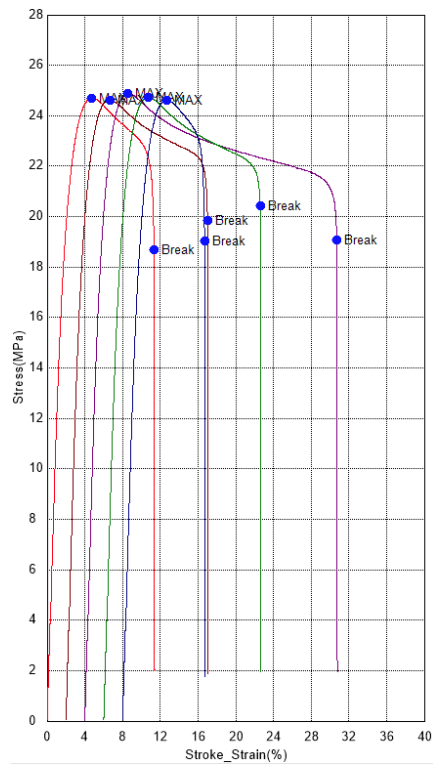
Slika 24: Graf preizkusa nateznih lastnosti vzorca 822_2024_0018_03



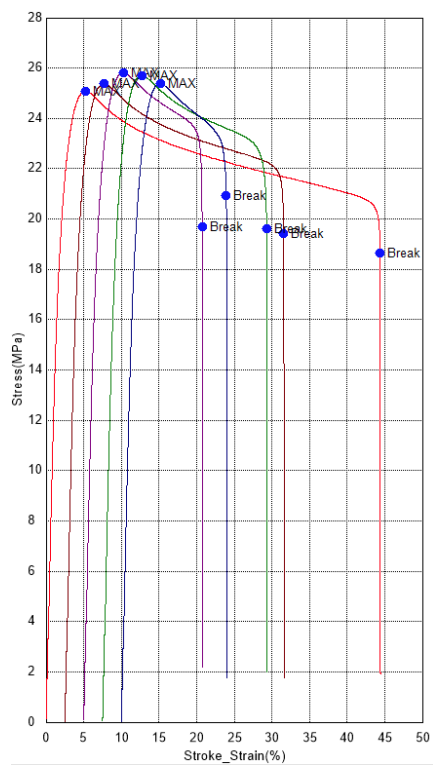
Slika 25: Graf preizkusa nateznih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_04



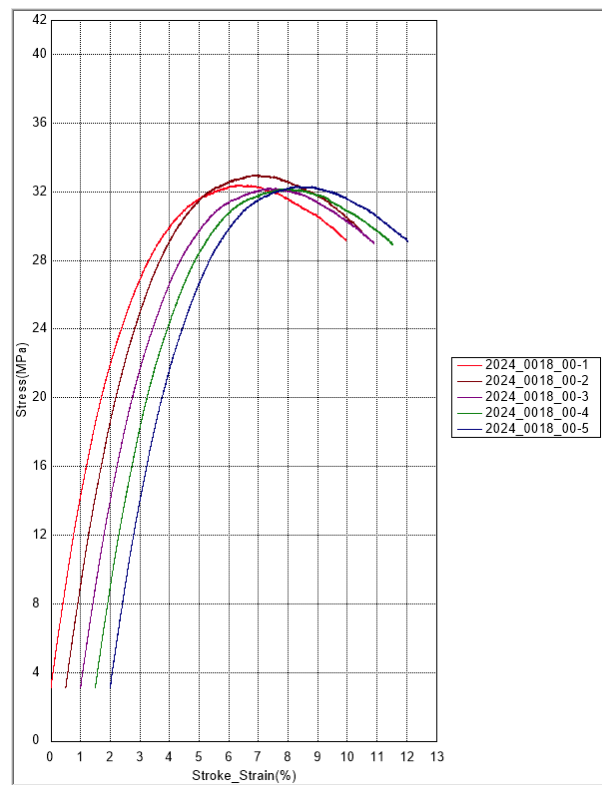
Slika 26: Graf preizkusa nateznih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_05



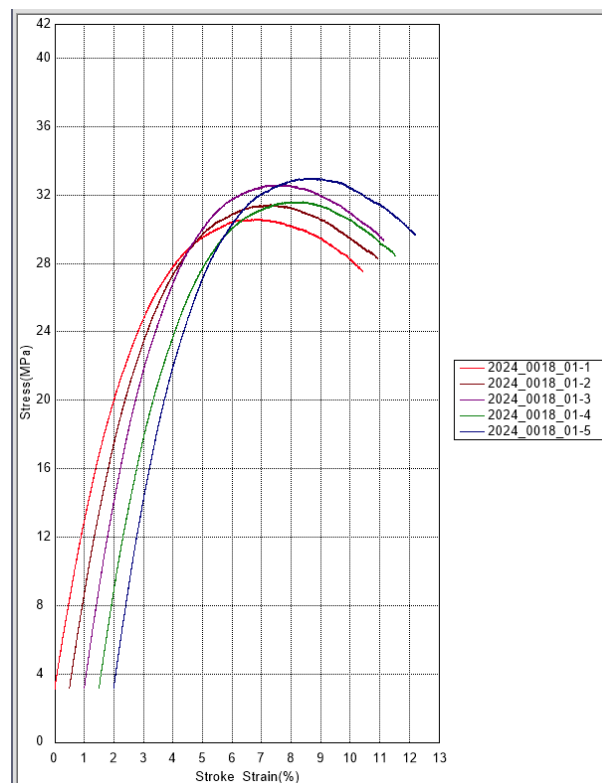
Slika 27: Graf preizkusa nateznih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_06



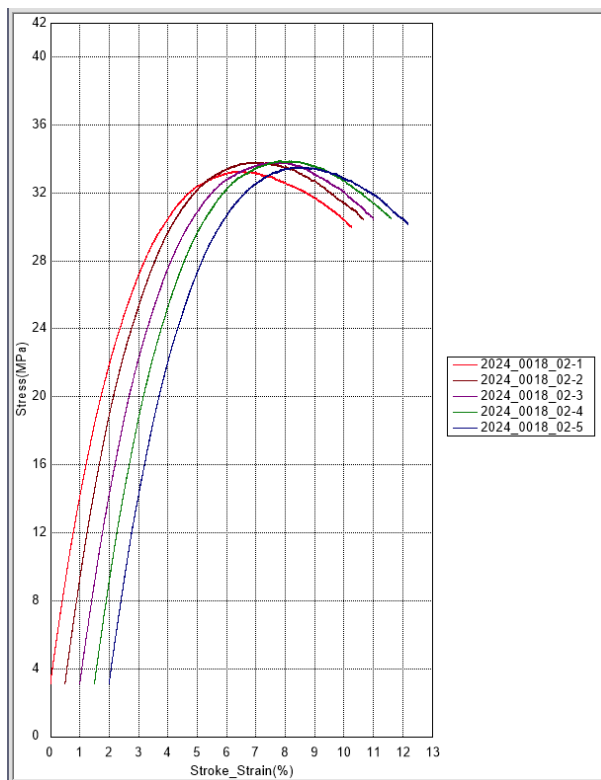
Slika 28: Graf preizkusa nateznih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_07

Priloga 2: Rezultati preizkusa upogibnih lastnosti

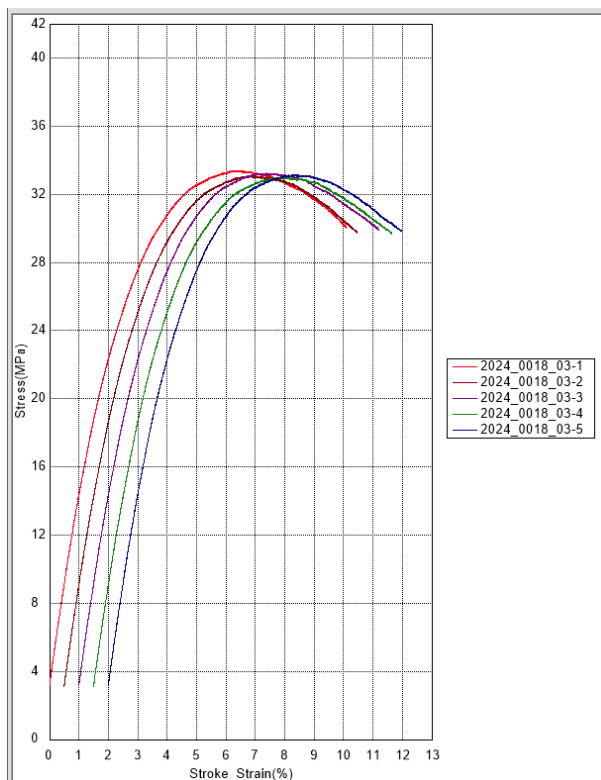
Slika 29: Graf preizkusa upogibnih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_00



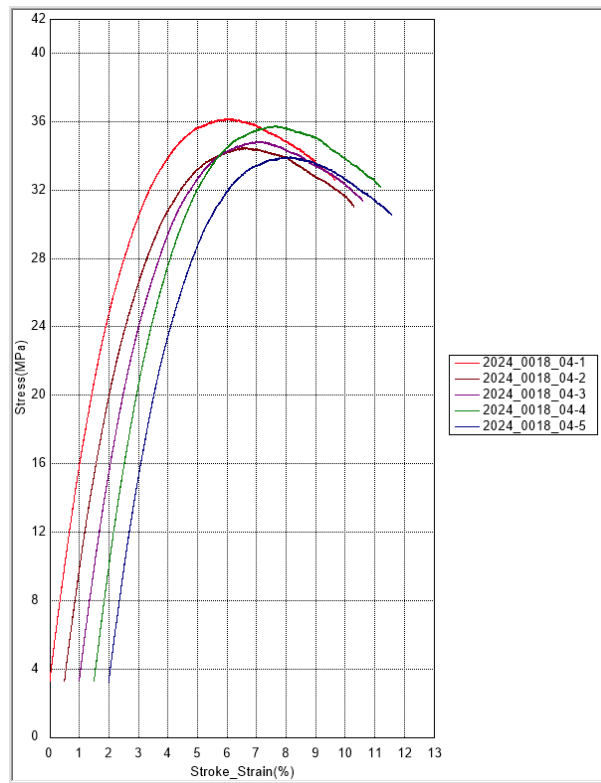
Slika 30: Graf preizkusa upogibnih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_01



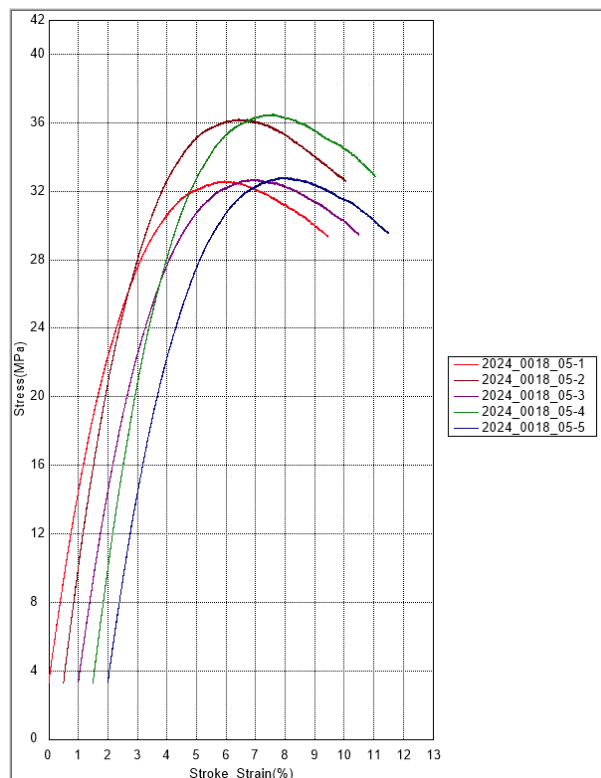
Slika 31: Graf preizkusa upogibnih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_02



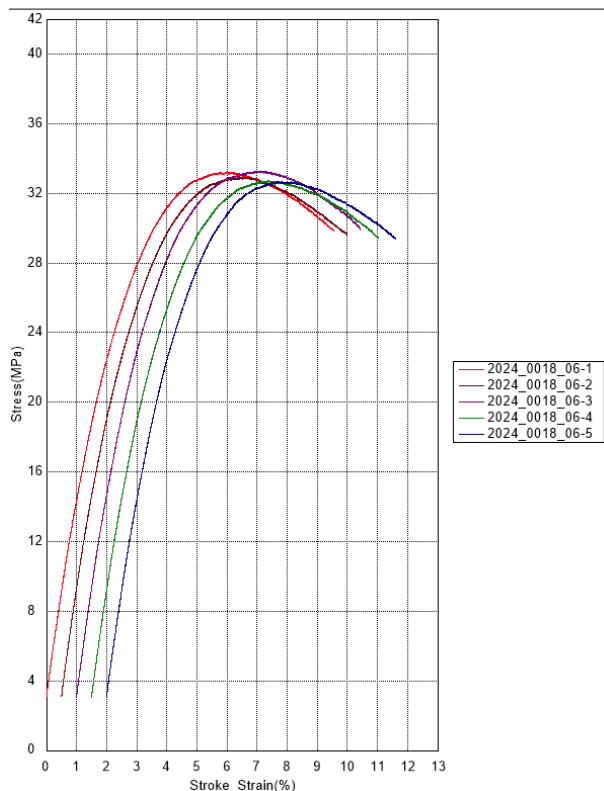
Slika 32: Graf preizkusa upogibnih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_03



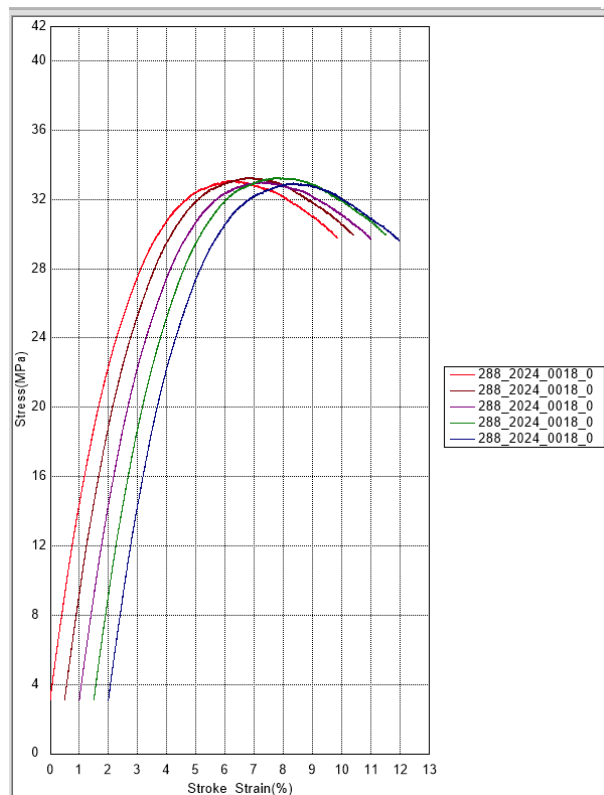
Slika 33: Graf preizkusa upogibnih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_04



Slika 34: Graf preizkusa upogibnih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_05

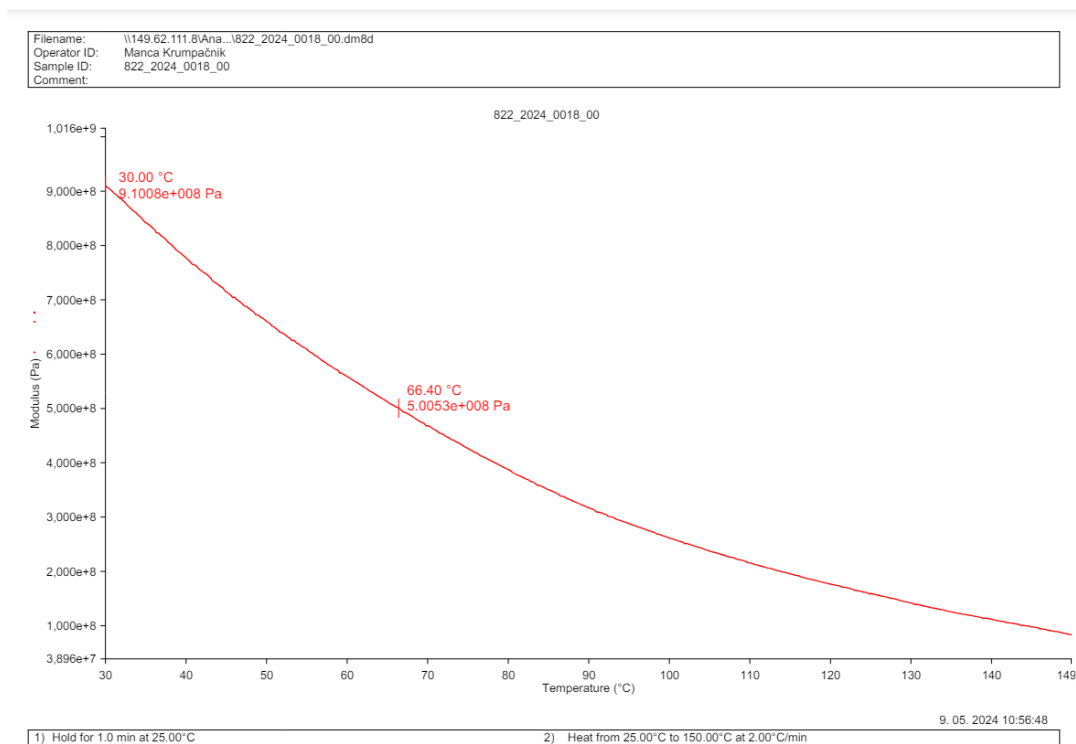


Slika 35: Graf preizkusa upogibnih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_06

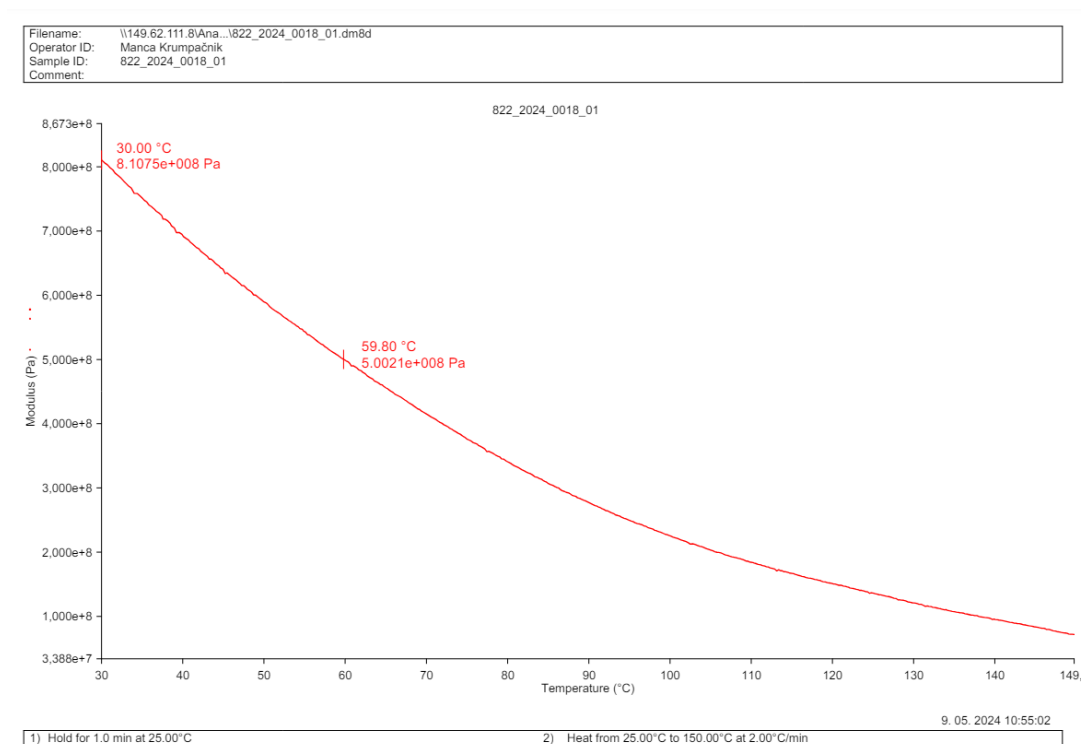


Slika 36: Graf preizkusa upogibnih lastnosti za vzorec 822_2024_0018_07

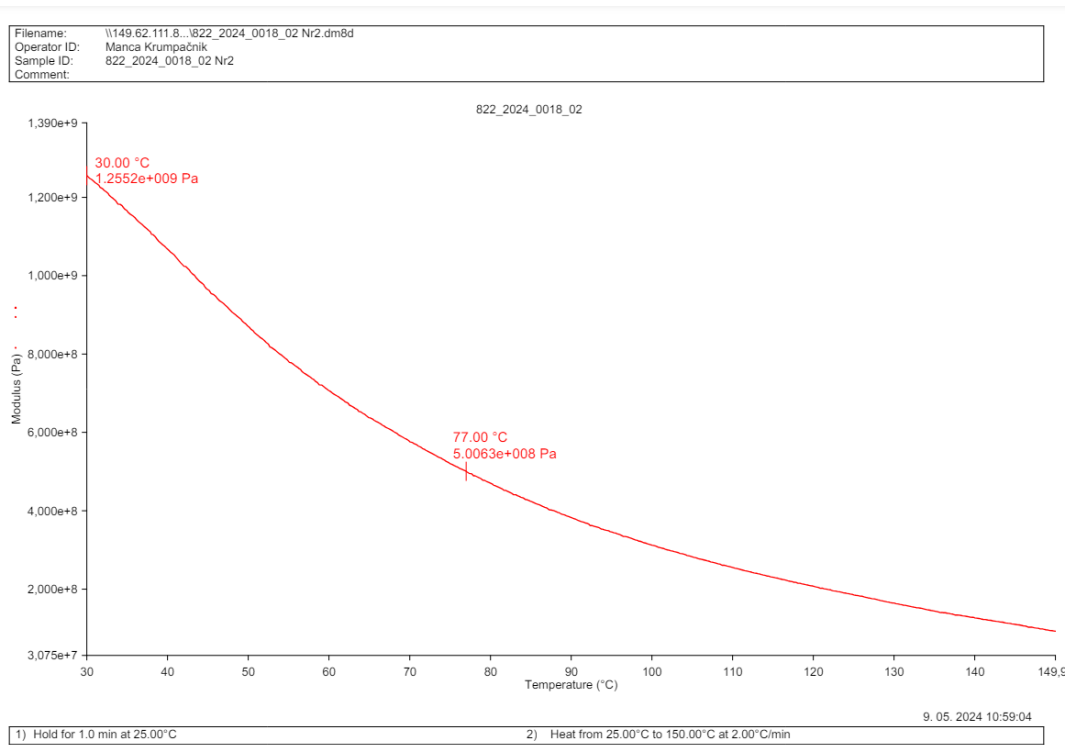
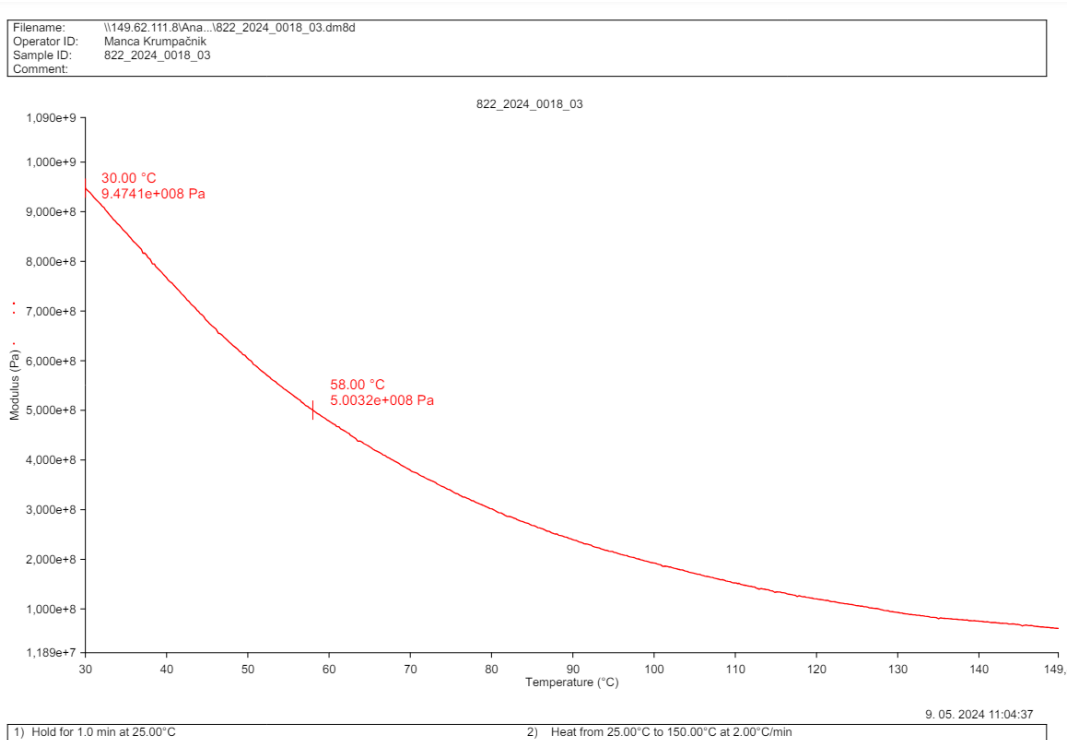
Priloga 3: Grafi meritve dinamičnega E modula

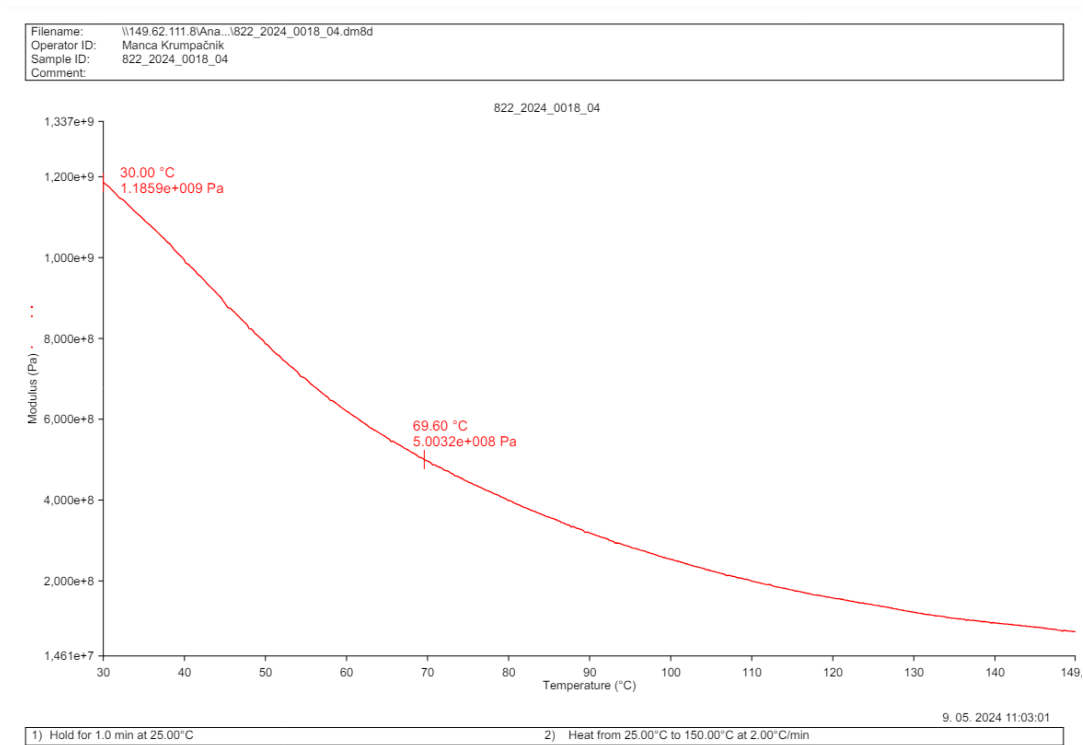
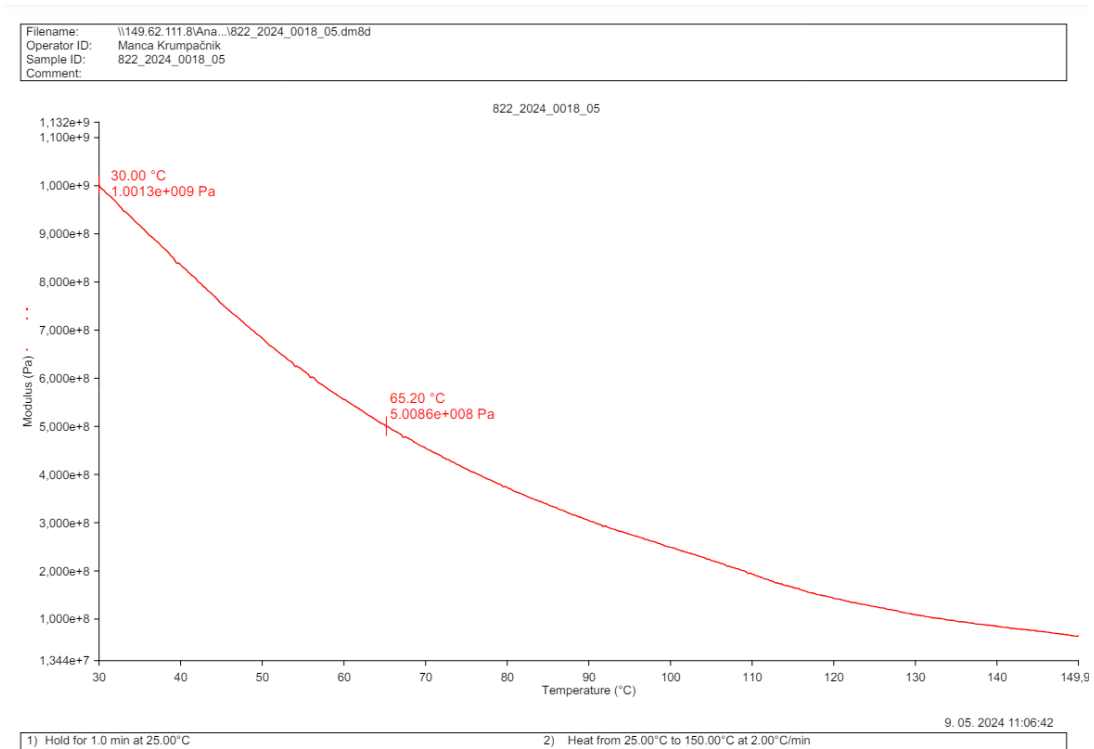


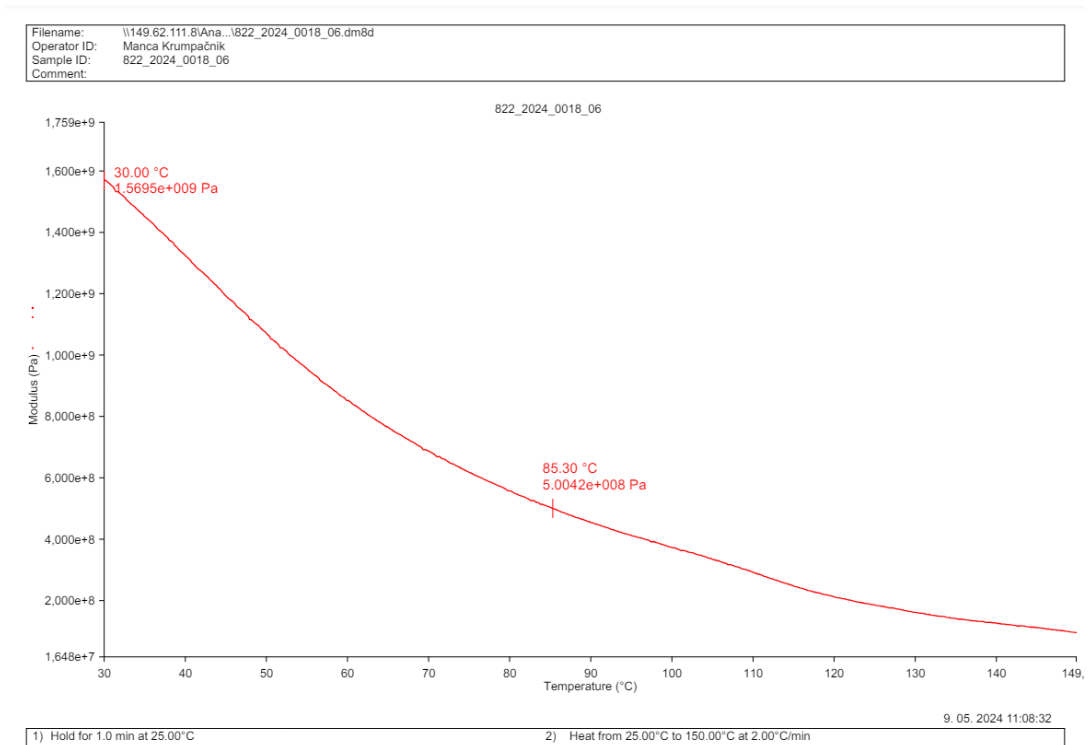
Slika 37: Graf meritve dinamičnega modula E za vzorec 822_2024_0018_00



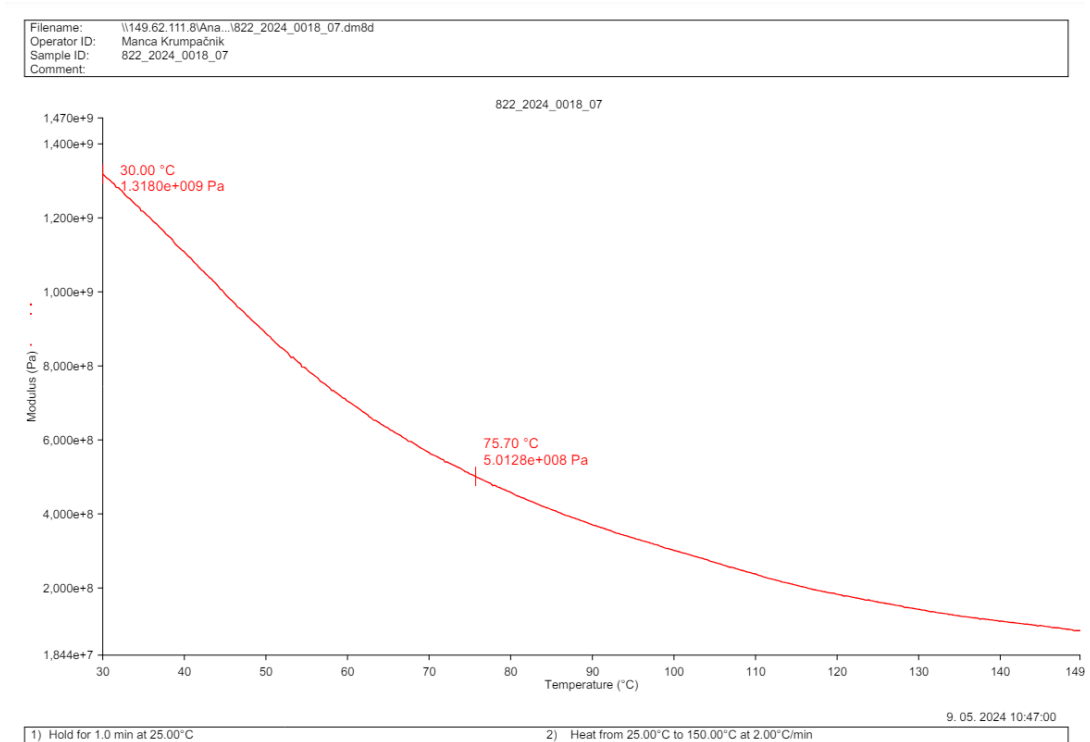
Slika 38: Graf meritve dinamičnega modula E za vzorec 822_2024_0018_01

Slika 39: Graf meritve dinamičnega modula E za vzorec 822_2024_0018_02Slika 40: Graf meritve dinamičnega modula E za vzorec 822_2024_0018_03

Slika 41: Graf meritve dinamičnega modula E za vzorec 822_2024_0018_04Slika 42: Graf meritve dinamičnega modula E za vzorec 822_2024_0018_05

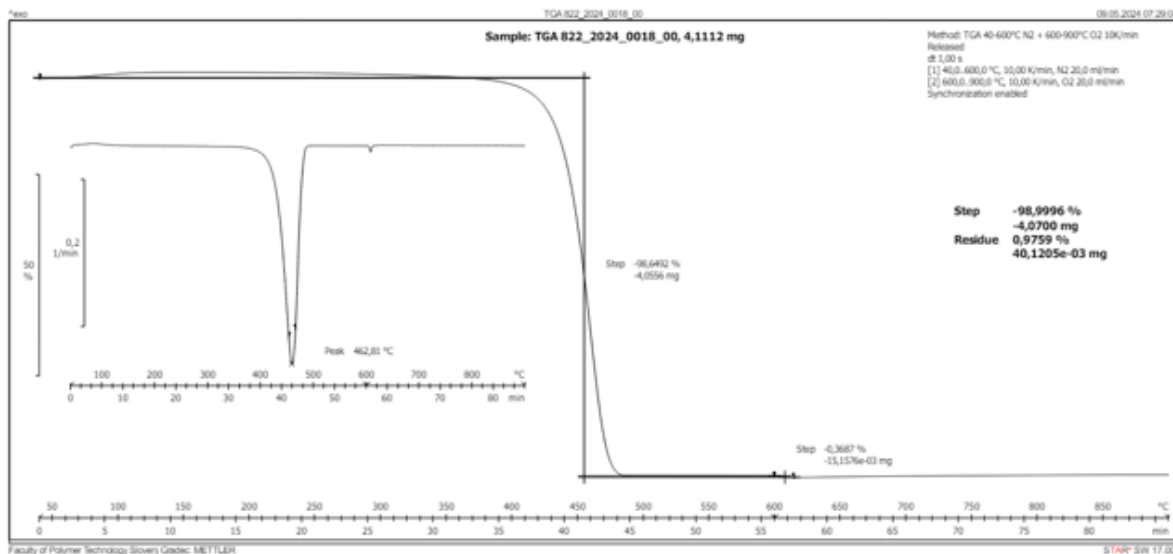


Slika 43: Graf meritve dinamičnega modula E za vzorec 822_2024_0018_06

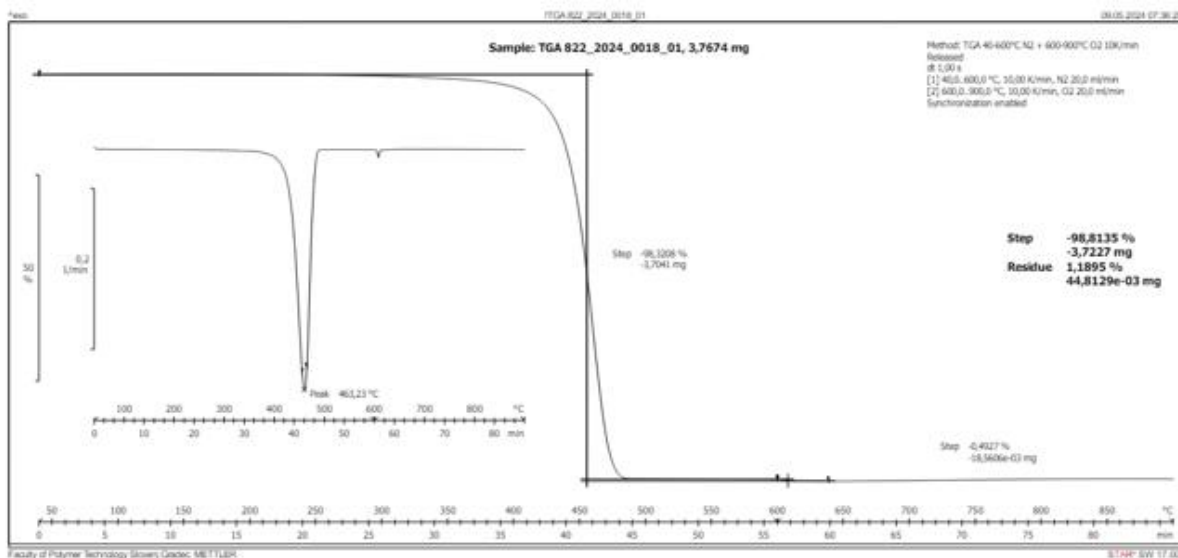


Slika 44: Graf meritve dinamičnega modula E za vzorec 822_2024_0018_07

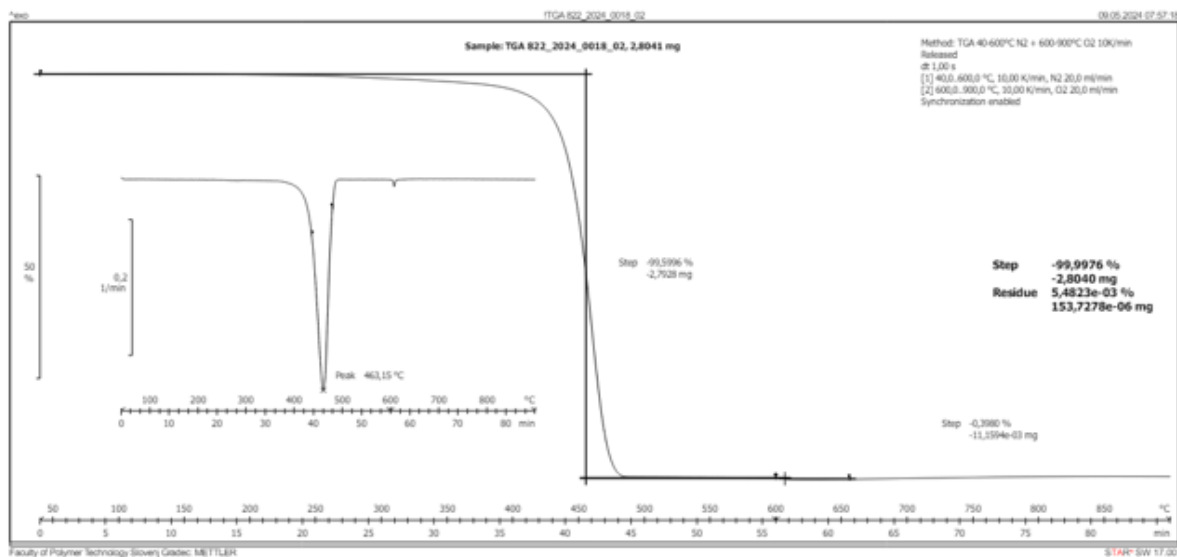
Priloga 4: Krivulje TGA



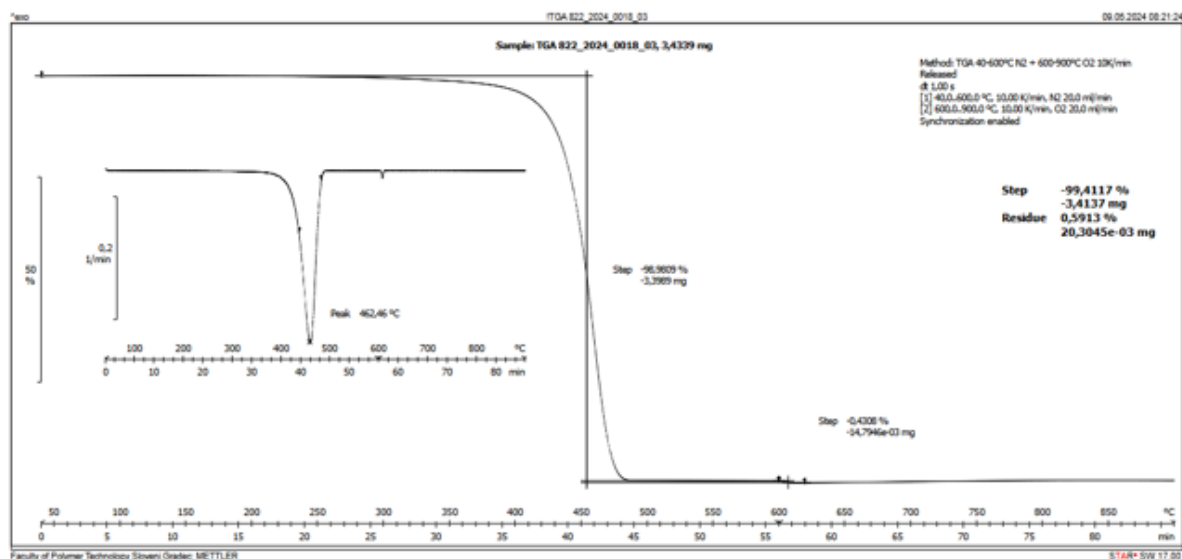
Slika 45: Krivulja TGA za vzorec 822_2024_0018_00



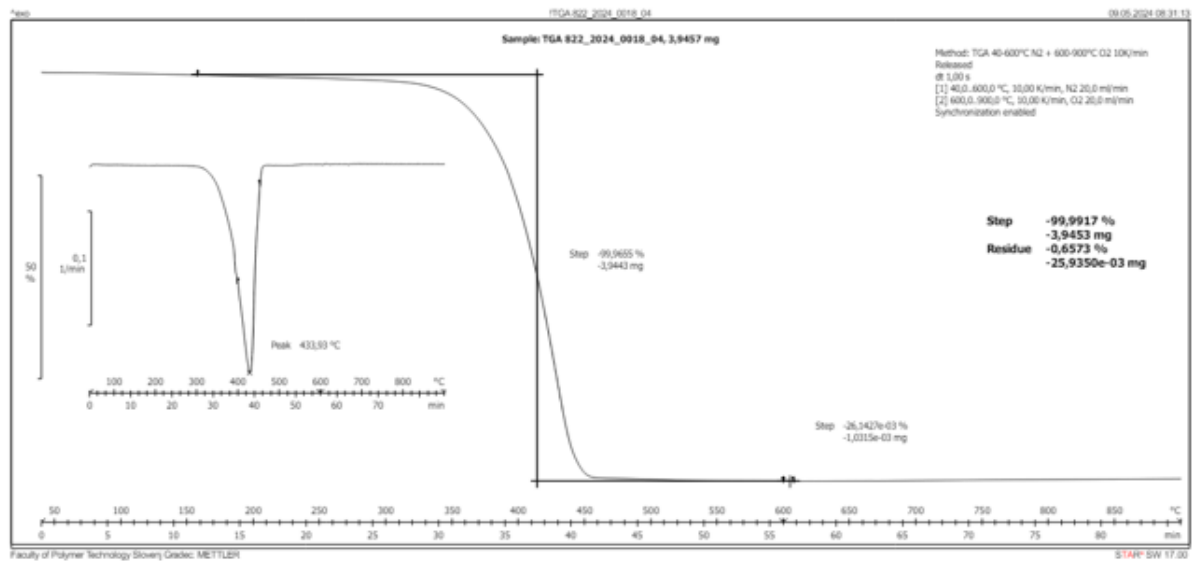
Slika 46: Krivulja TGA za vzorec 822_2024_0018_01



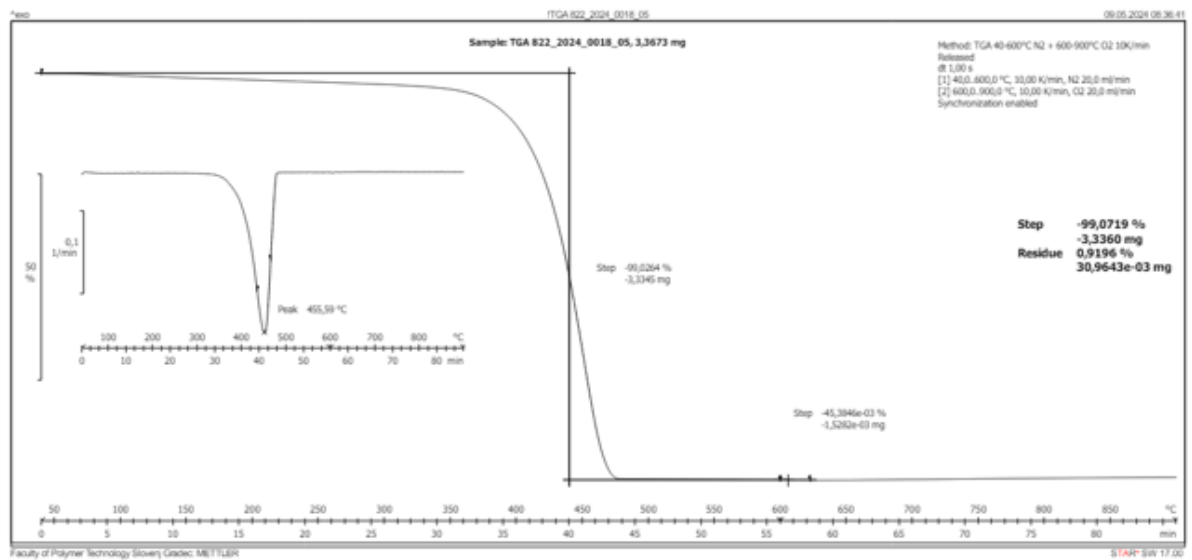
Slika 47: Krivulja TGA za vzorec 822_2024_0018_02



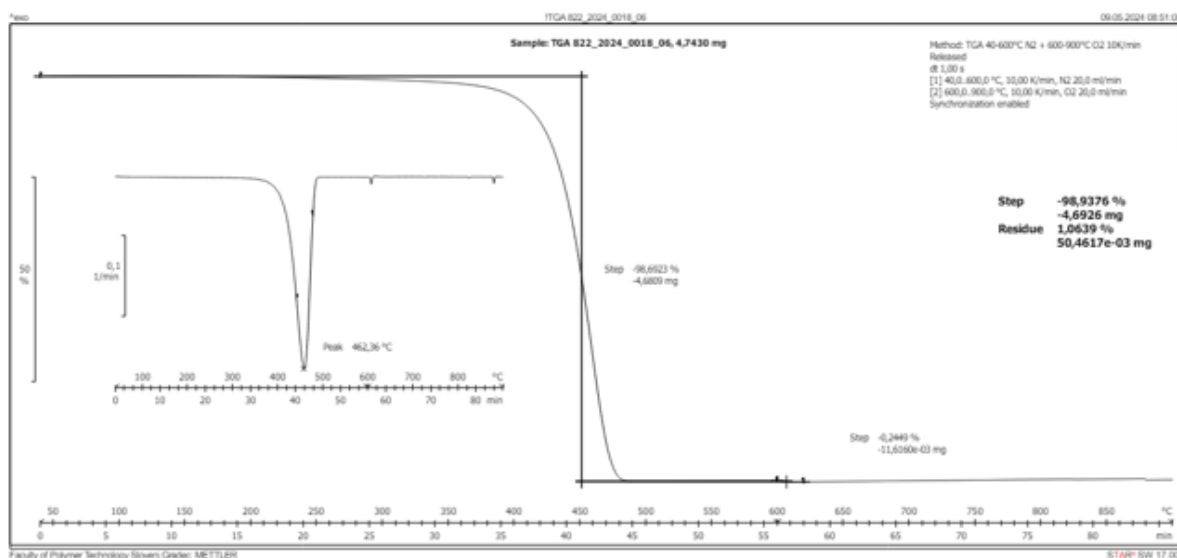
Slika 48: Krivulja TGA za vzorec 822_2024_0018_03



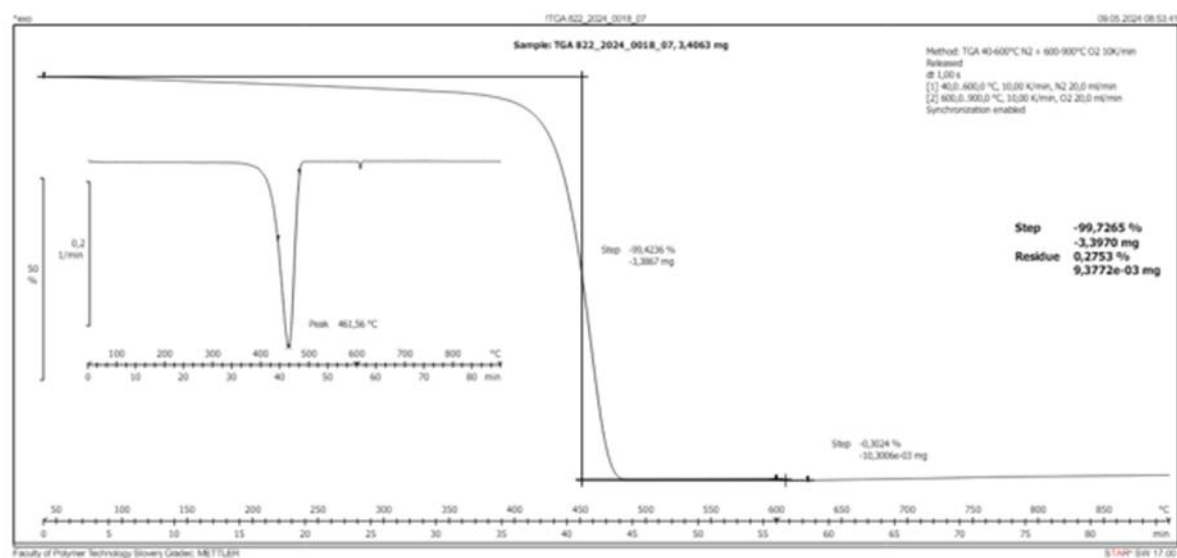
Slika 49: Krivulja TGA za vzorec 822_2024_0018_04



Slika 50: Krivulja TGA za vzorec 822_2024_0018_05

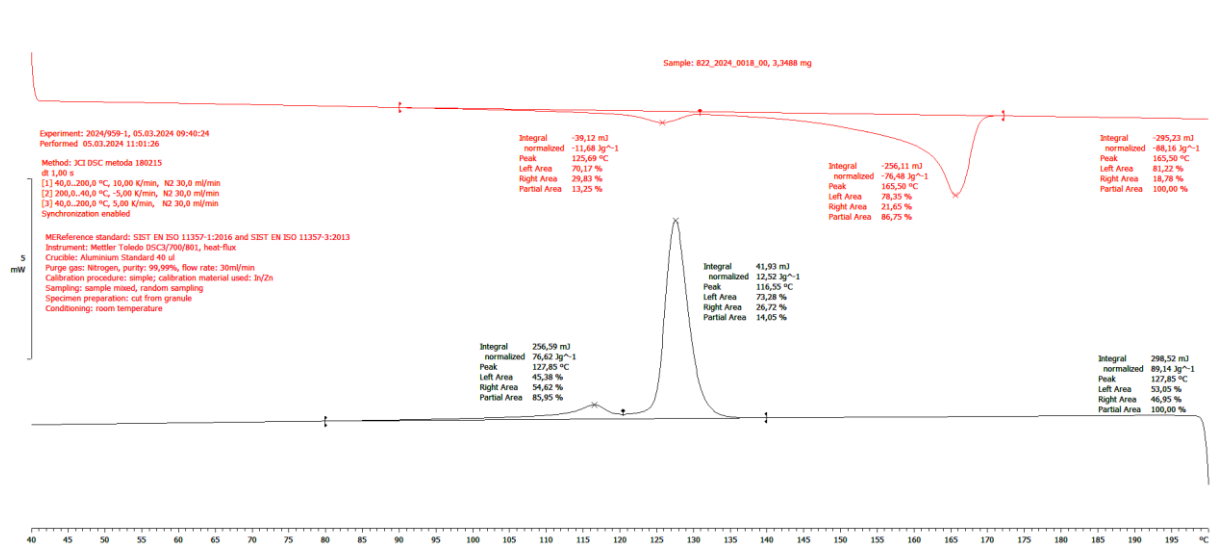


Slika 51: Krivulja TGA za vzorec 822_2024_0018_06

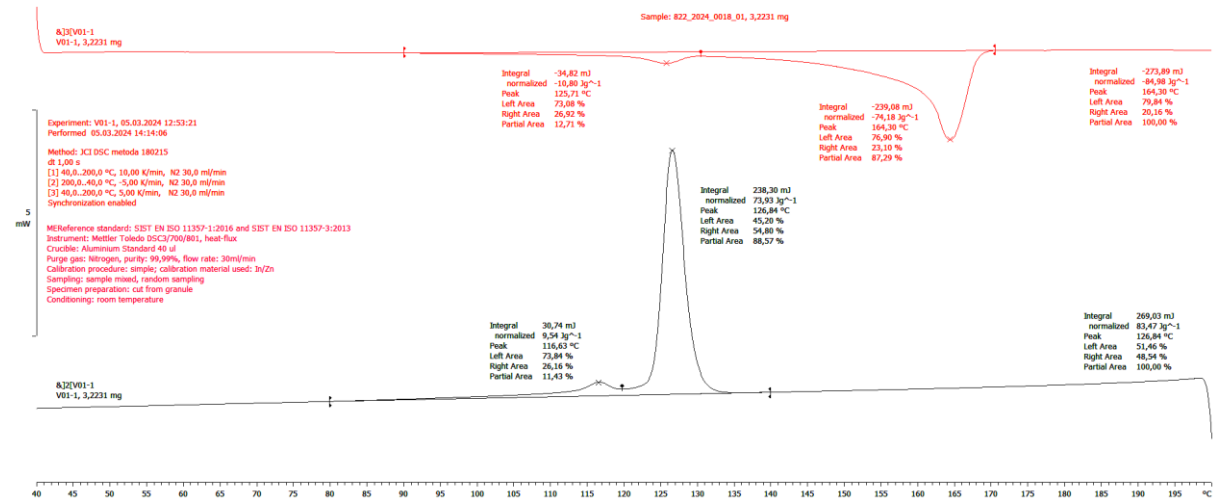


Slika 52: Krivulja TGA za vzorec 822_2024_0018_07

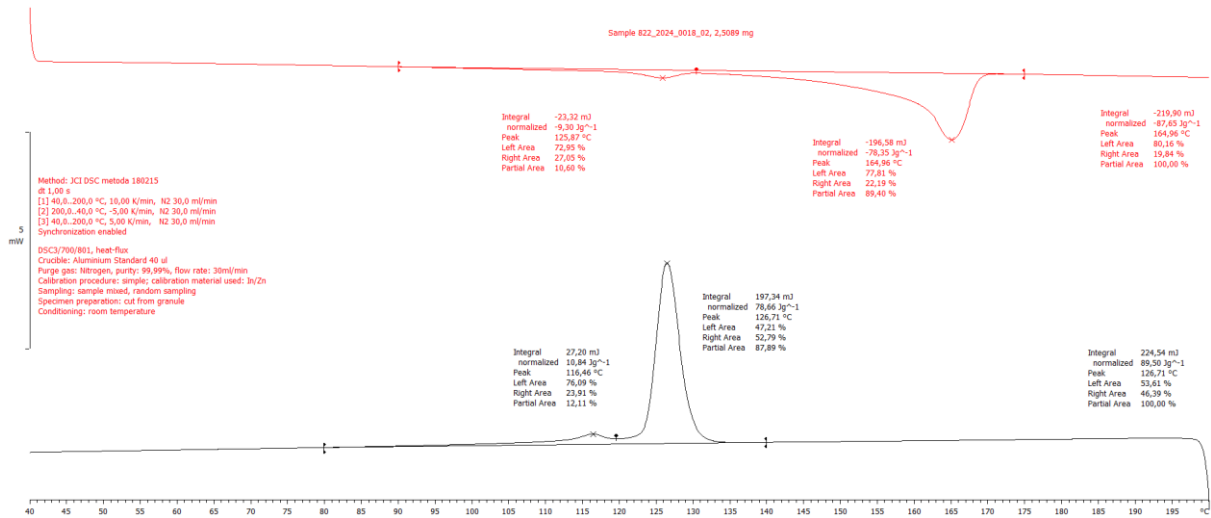
Priloga 5: Krivulje DSC



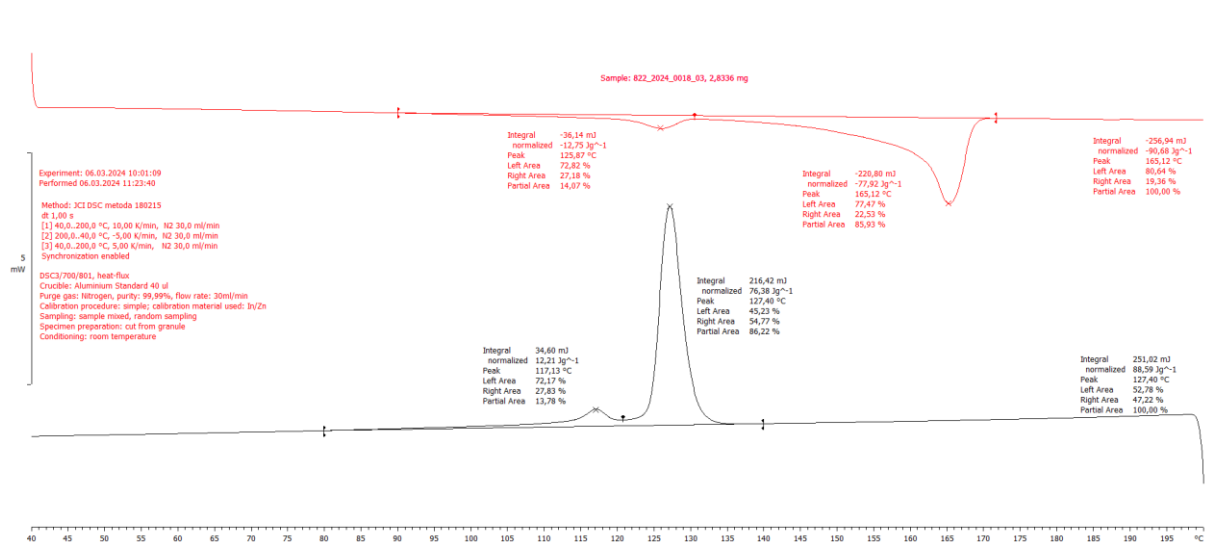
Slika 53: Krivulja DSC za vzorec 822_2024_0018_00



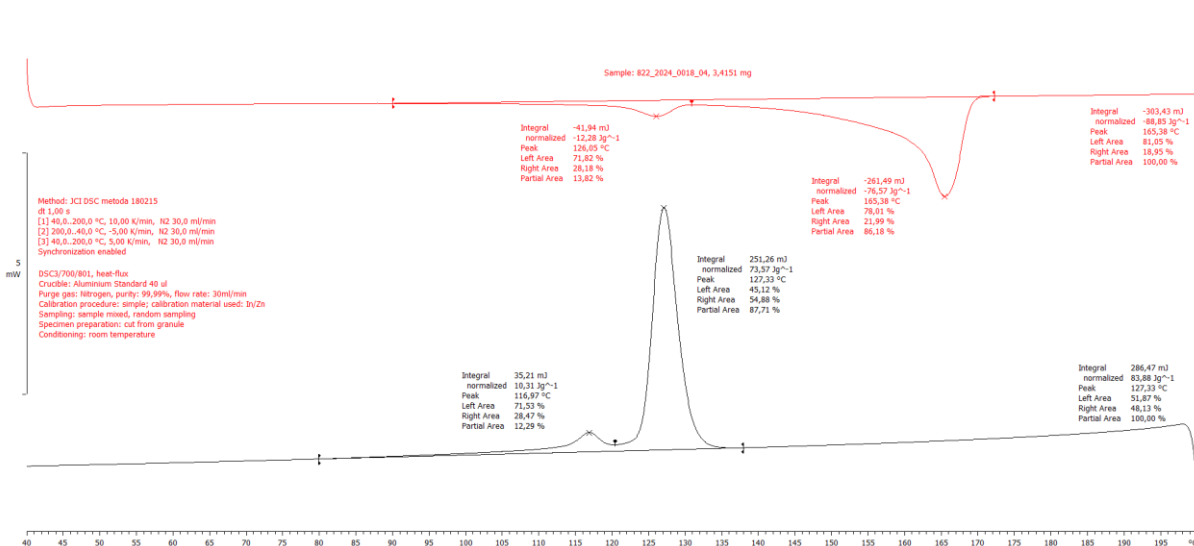
Slika 54: Krivulja DSC za vzorec 822_2024_0018_01



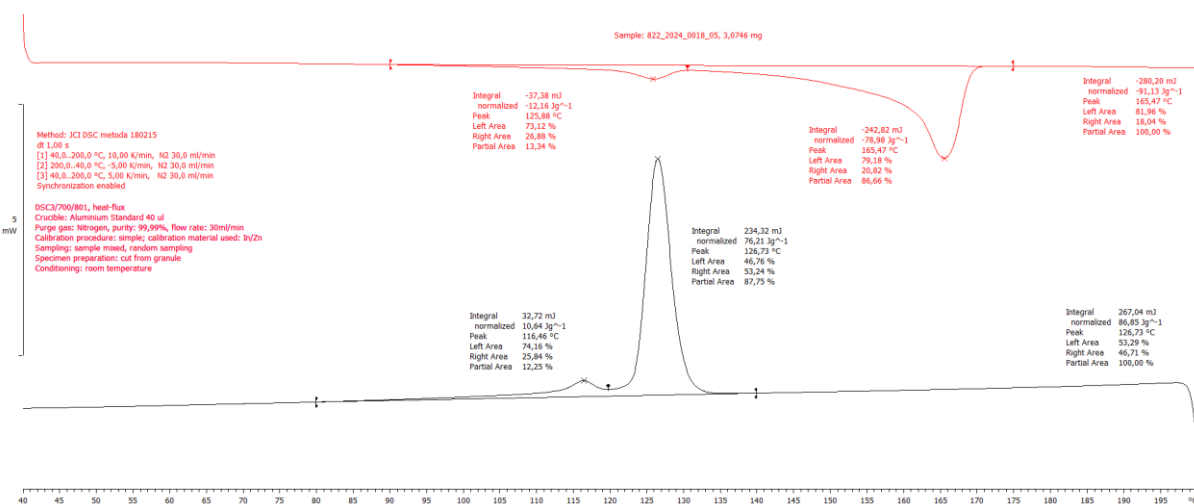
Slika 55: Krivulja DSC za vzorec 822_2024_0018_02



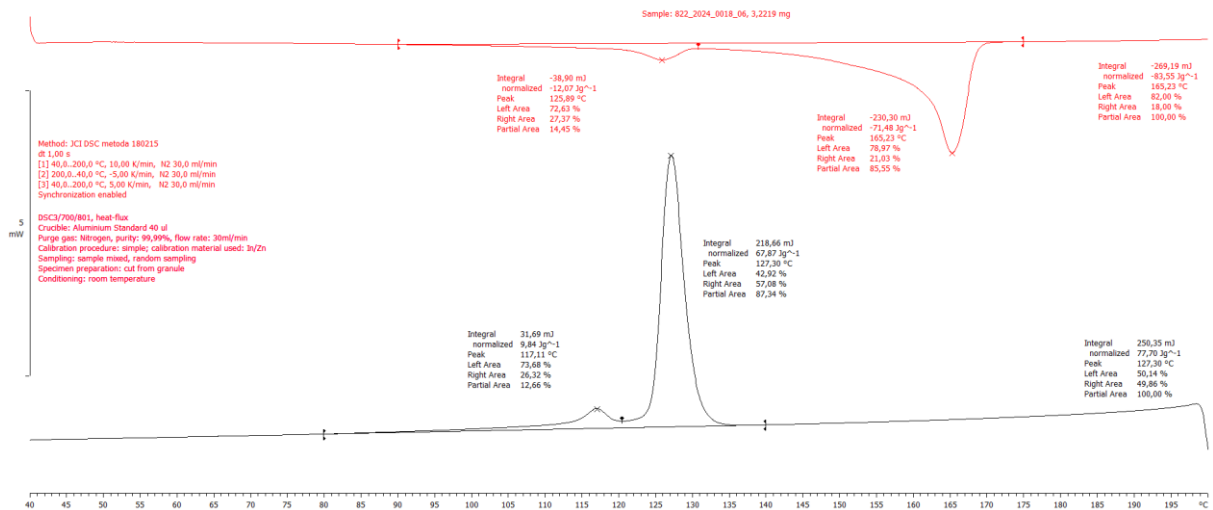
Slika 56: Krivulja DSC za vzorec 822_2024_0018_03



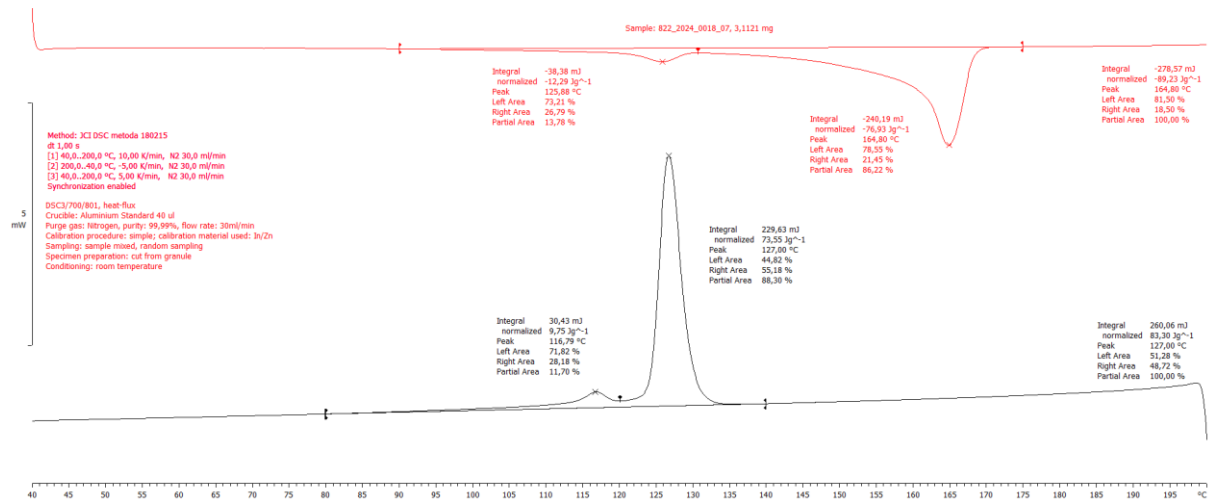
Slika 57: Krivulja DSC za vzorec 822_2024_0018_04



Slika 58: Krivulja DSC za vzorec 822_2024_0018_05



Slika 59: Krivulja DSC za vzorec 822_2024_0018_06



Slika 60: Krivulja DSC za vzorec 822_2024_0018_07