

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Eva ŠKVORC

VPLIV OBLIKE IN VELIKOSTI GRANULATA NA KAKOVOST 3D TISKANJA

Diplomsko delo

Slovenj Gradec, marec 2026

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

VPLIV OBLIKE IN VELIKOSTI GRANULATA NA KAKOVOST 3D TISKANJA

Diplomsko delo

Študentka:	Eva ŠKVORC
Študijski program:	Tehnologija polimerov
Mentor:	viš. pred. Silvester BOLKA
Somentorica:	asist. Teja PEŠL

Slovenj Gradec, marec 2026

IZJAVA

Podpisana Eva Škvorc 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;
- soglašam z javno dostopnostjo diplomskega dela v knjižnici Fakultete za tehnologijo polimerov v Slovenj Gradcu. 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

Iskreno se zahvaljujem svojemu mentorju, viš. pred. Silvestru Bolki, za strokovno pomoč, usmeritve in podporo pri pisanju tega diplomskega dela. Posebna zahvala gre tudi somentorici, asist. Teji Pešl, za dragocene nasvete in spodbudo med pripravo in izvedbo raziskav. Prav tako se zahvaljujem laborantu Marku Verčkovniku, ki mi je pomagal pri izvedbi 3D tiska in z nasveti pripomogel k uspešni realizaciji eksperimentalnega dela.

Zahvaljujem se svoji družini in fantu za vso pomoč, potrpežljivost in podporo v času študija in pisanja diplomskega dela. Hvaležna sem tudi prijateljem za spodbudne besede, razumevanje in dodatno motivacijo.

Izjava o omejitvi odgovornosti: Ta projekt je financiral Evropski sklad za regionalni razvoj (ESRR) v okviru sporazuma o dodelitvi sredstev št. 101084037. Vendar so izražena stališča in mnenja izključno avtorjeva in ne odražajo nujno stališč in mnenj Evropske unije ali Izvajalske agencije Evropskega sveta za inovacije in MSP (EISMEA). Niti Evropska unija niti organ, ki dodeljuje sredstva, zanje ne moreta biti odgovorna.



**Funded by
the European Union**

POVZETEK

Vpliv oblike in velikosti granulata na kakovost 3D tiskanja

V diplomskem delu smo preučevali vpliv oblike in velikosti granulata ter vsebnosti recikliranih steklenih vlaken na kakovost tridimenzionalnega (3D) tiskanja. Raziskava je bila izvedena v okviru projekta DeremCo, katerega cilj je ponovna uporaba sekundarnih surovin in razvoj trajnostnih kompozitov. V delu je bila uporabljena matrica iz akrilonitril butadien stirena (ABS), ki je bila ojačana z različnimi deleži recikliranih steklenih vlaken ter kompatibilizatorjem na osnovi stiren-etilen-butilen-stirena (SEBS). Eksperimentalni del je vključeval pripravo granulata, 3D tisk preizkušancev ter izvedbo mehanskih, termičnih in reoloških analiz. Uporabljene metode so zajemale natezni in upogibni preizkus, dinamično mehansko analizo (DMA), termogravimetrično analizo (TGA), diferenčno dinamično kalorimetrijo (DSC), meritev indeksa tečenja taline (MFI) ter optično mikroskopijo anorganskih ostankov po analizi TGA in prelomnih površin po preizkusu Charpy. Posebna pozornost je bila namenjena izbiri optimalne oblike granulata, saj ta vpliva na proces 3D tiskanja, predvsem na homogen volumski pretok taline skozi ekstruder in možnost zamažitve šobe pri 3D tisku. Najboljše mehanske lastnosti je izkazal vzorec s 94,5 % ABS, 5,0 % recikliranih steklenih vlaken, 0,5 % kompatibilizatorja na osnovi SEBS MAH in 0,3 % antioksidanta, zato je bil uporabljen kot osnova za nadaljnje serije z višjimi deleži vlaken. Dodatek steklenih vlaken je povečal togost in trdnost kompozitov, vendar se pri višjih vsebnostih niso dosegla sorazmerna izboljšanja. To je potrdila tudi optična mikroskopija, pri kateri je bila opažena slaba omočenost vlaken in praznine na mejnih ploskvah steklenih vlaken in matrice. Analize TGA in DSC so pokazale, da delež vlaken bistveno ne vpliva na temperaturo razpada matrice, vpliva pa na količino ostanka po razpadu ter na toplotno kapaciteto. Meritev MFI je potrdila, da ima izbrani granulati primerno viskoznost za uporabo pri 3D tisku. Povzamemo lahko, da optimalna oblika granulata in zmerne deleže vlaken omogoča uspešno 3D tiskanje z recikliranimi ojačitvami. Čeprav višji deleži vlaken izboljšajo toplotno odpornost, slabša omočenost omejuje prenos napetosti in s tem vpliva na slabše mehanske lastnosti. Rezultati potrjujejo potencial uporabe recikliranih steklenih vlaken kot sekundarnega vira ojačitve v polimernih kompozitih, vendar hkrati nakazujejo na potrebo po nadaljnjih raziskavah za izboljšanje omočenosti in homogenosti kompozitov.

Ključne besede:

3D tiskanje, ABS kompoziti, reciklirana steklena vlakna, termična in mehanska analiza, optična mikroskopija.

SUMMARY

The influence of the shape and size of the granulate on the quality of 3D printing

In this thesis, we investigated the influence of granulate shape and size, as well as the content of recycled glass fibers, on the quality of three-dimensional (3D) printing. The research was carried out within the framework of the DeremCo project, whose aim is the reuse of secondary raw materials and the development of sustainable composites. The matrix used was acrylonitrile butadiene styrene (ABS), reinforced with different contents of recycled glass fibers and a compatibilizer based on styrene–ethylene–butylene–styrene (SEBS). The experimental part included granulate preparation, 3D printing of specimens, and the implementation of mechanical, thermal, and rheological analyses. The applied methods comprised tensile and flexural tests, dynamic mechanical analysis (DMA), thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC), melt flow index (MFI) measurement, and optical microscopy of inorganic residues after TGA analysis and fracture surfaces after the Charpy test. Special attention was devoted to selecting the optimal granulate shape, as it affects the 3D-printing process, particularly the uniform volumetric melt flow through the extruder and the risk of nozzle clogging during printing. The best mechanical properties were exhibited by sample, which contains 94.5% ABS, 5.0% recycled glass fibers, 0.5% compatibilizer based on SEBS MAH, and 0.3% antioxidant and was therefore used as the basis for further series with higher fiber contents. The addition of glass fibers increased the stiffness and strength of the composites; however, higher fiber contents did not lead to proportional improvements. This was also confirmed by optical microscopy, where poor fiber wetting and voids at the fiber–matrix interfaces were observed. TGA and DSC analyses showed that fiber content did not significantly affect the decomposition temperature of the matrix, but it did affect the amount of residue after decomposition and the heat capacity. MFI measurements confirmed that the selected granulate exhibits suitable viscosity for 3D-printing applications. In conclusion, it can be summarized that an optimal granulate shape combined with a moderate fiber content enables successful 3D printing with recycled reinforcements. Although higher fiber contents improve thermal resistance, poor wetting limits stress transfer and consequently reduces mechanical properties. The results confirm the potential of using recycled glass fibers as a secondary source of reinforcement in polymer composites, while at the same time indicating the need for further research to improve wetting and homogeneity of composites.

Keywords:

3D printing, ABS composites, recycled glass fibers, thermal and mechanical analyses, optical microscopy.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Opis področja in namen diplomskega dela	1
1.2	Cilji in teze	1
1.3	Uporabljene metode	2
2	TEORETIČNI DEL	3
2.1	Tridimenzionalno tiskanje	3
2.1.1	Zgodovina 3D tiskanja	3
2.2	Tehnologija 3D tiskanja	3
2.2.1	Tehnologija tiskanja SLA	4
2.2.2	Tehnologija tiskanja SLS	5
2.2.3	Tehnologija tiskanja FDM	6
2.2.4	Tehnologija tiskanja FGF	7
2.3	Nabor materialov	9
2.4	Polimeri	9
2.4.1	Termoplasti	10
2.4.2	Duroplasti	10
2.4.3	Elastomeri	10
2.5	Akrilonitril butadien stiren	11
2.6	Kompozitni materiali	12
2.7	Steklena vlakna	12
2.8	Pregled dosedanjih raziskav na področju vpliva oblike in velikosti granulata na kakovost 3D tiskanja	13
3	EKSPERIMENTALNI DEL	14
3.1	Uporabljeni materiali	14
3.2	Priprava vzorcev in njihova sestava	14
3.2.1	Kompavndiranje	15
3.2.2	Nasipna gostota	17
3.2.3	3D tisk	17
3.3	Metode preiskav	20
3.3.1	Natezni test	20
3.3.2	Upogibni test	21
3.3.3	Udarne žilavost po Charpyju	22
3.3.4	Dinamična mehanska analiza	23
3.3.5	Termogravimetrična analiza	24
3.3.6	Diferenčna dinamična kalorimetrija	25
3.3.7	Indeks tečenja taline	26
3.3.8	Optična mikroskopija	27
4	REZULTATI IN DISKUSIJA	29
4.1	Meritve mehanskih lastnosti	29
4.1.1	Natezni test	29

4.1.2	Upogibni test	32
4.1.3	Udarne žilavost po Charpyju	33
4.1.4	Dinamična mehanska analiza	34
4.2	Meritve toplotnih lastnosti	36
4.2.1	Termogravimetrična analiza	36
4.2.2	Diferenčna dinamična kalorimetrija	37
4.3	Meritve reoloških lastnosti	39
4.3.1	Indeks tečenja taline	39
4.4	Meritve morfoloških lastnosti	39
4.4.1	Optična mikroskopija	39
5	SKLEP	44
	SEZNAM LITERATURE IN VIROV	46
	SEZNAM SLIK	48
	SEZNAM TABEL	50
	SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV	51
	SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC	52
	PRILOGE	53
	Priloga 1: Grafi nateznih testov	53
	Priloga 2: Grafi upogibnih testov	59
	Priloga 3: Grafi DMA analiz	64
	Priloga 4: Grafi analiz TGA	67
	Priloga 5: Grafi analiz DSC	71
	Priloga 6: Posnetki optičnega mikroskopa	75

1 UVOD

1.1 Opis področja in namen diplomskega dela

3D tiskanje predstavlja hitro razvijajočo se tehnologijo, ki omogoča izdelavo kompleksnih prostorskih objektov s postopnim nalaganjem materiala plast za plastjo [1,2]. Med različnimi tehnikami 3D tiskanja ima tehnologija 3D tiskanja z granulatom (FGF) (ang. fused granular fabrication) poseben pomen, saj namesto filamentov uporablja granuliran material, kar omogoča večjo fleksibilnost pri uporabi recikliranih materialov in s tem zmanjšuje okoljski vpliv [3,4]. V okviru projekta DeremCo, katerega cilj je recikliranje materialov iz odsluženih vetrnih elektrarn, ima uporaba recikliranih steklenih vlaken v ABS matrici potencial za izboljšanje mehanskih lastnosti kompozitov, kar lahko prispeva k trajnostnim rešitvam v industriji polimerov.

Namen diplomskega dela je analizirati vpliv oblike in velikosti granulata na kakovost 3D tiskanja z ABS matrico, ki vsebuje različne deleže recikliranih steklenih vlaken. Osredotočili se bomo na ugotavljanje povezave med parametri granulata in končnimi mehanskimi, toplotnimi ter optičnimi lastnostmi tiskanih izdelkov, s čimer bomo prispevali k optimizaciji 3D tiska iz recikliranih materialov.

1.2 Cilji in teze

Glavni cilj diplomskega dela je ugotoviti, kako oblika in velikost granulata vplivata na kakovost FGF 3D tiskanih izdelkov z ABS matrico, ki vsebuje različne deleže recikliranih steklenih vlaken. Sprotni cilji so:

- določiti optimalne parametre kompavndiranja ABS matrice z različnimi deleži recikliranih steklenih vlaken,
- izdelati granulati v različnih dolžinah in premerih,
- izvesti FGF 3D tiskanje vzorcev in optimizirati tiskanje za vsako kombinacijo materiala,
- karakterizirati termične, mehanske in optične lastnosti tiskanih vzorcev ter oceniti njihov vpliv na končno kakovost izdelkov,
- identificirati optimalno obliko granul in
- preučiti vpliv velikosti in debeline granul ter delež steklenih vlaken na termične, mehanske in ostale lastnosti.

Hipoteze, postavljene v diplomskem delu, so:

- večji delež steklenih vlaken bo izboljšal natezno trdnost in udarno žilavost tiskanih izdelkov,
- spremembe v velikosti granulata bodo vplivale na termično stabilnost in kakovost tiska in
- optimalna kombinacija oblike in velikosti granulata bo prispevala k izboljššanemu optičnemu izgledu tiskanih izdelkov.

Omejitve diplomskega dela so povezane predvsem z možnostmi neenakomerne razporeditve steklenih vlaken med kompavndiranjem ter s tveganjem zamašitve šobe pri tiskanju z granulatom večjih dimenzij. Velike granule lahko povzročijo manjši volumski pretok termoplastičnega kompozita in s tem nižjo togost in trdnost 3D tiskanih izdelkov. Prav tako lahko visoke hitrosti tiskanja vodijo do slabše medoslojne adhezije in poroznosti izdelkov.

1.3 Uporabljene metode

V diplomskem delu bomo pripravili lastne kompozitne materiale s kompavndiranjem recikliranega ABS in različnih deležev steklenih vlaken na dvopolžnem ekstruderju LABTECH LTE 20-44, ki se nahaja na Fakulteti za tehnologijo polimerov (FTPO). Nastali filament bomo granulirali s pomočjo granulatorja SCHEER in pridobljeni granulati uporabili za FGF 3D tiskanje vzorcev na industrijskem tiskalniku Tumaaker BIGFOOT PRO DUAL. Mehanske lastnosti bomo določili s pomočjo univerzalnega trgalnega stroja Shimadzu, AG-X plus 10 kN, udarno žilavost s Charpy LY-XJJD5, dinamične mehanske lastnosti z dinamičnim mehanskim analizatorjem Perkin Elmer, DMA 8000, termične lastnosti pa bomo analizirali z diferenčno dinamično kalorimetrij Mettler Toledo, DSC 2 in termogravimetrično analizo Mettler Toledo, TGA/DSC 3+. Merjenje reoloških lastnosti bomo opravili z LIYI MFI LY-RR, optični videz izdelkov pa bomo ovrednotili z uporabo optičnega mikroskopa Keyence VHX 7000.

Diplomsko delo je sestavljeno iz teoretičnega dela, kjer so opisane tehnologije 3D tiskanja, lastnosti ABS materiala in steklenih vlaken ter postopek kompavndiranja. V eksperimentalnem delu so predstavljeni priprava materialov, uporabljene metode in izvedba 3D tiskanja vzorcev. V poglavju rezultatov in diskusije so prikazani rezultati meritev mehanskih, termičnih in optičnih lastnosti ter analiza vpliva oblike in velikosti granulata na kakovost natisnjenih izdelkov. Delo se zaključi s sklepom, v katerem so povzete ugotovitve in podani predlogi za nadaljnje raziskave.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Tridimenzionalno tiskanje

3D tiskanje, imenovano tudi proizvodnja z dodajanjem materiala (AM) (ang. additive manufacturing), je hitro rastoča tehnologija za izdelovanje trdnih prostorskih objektov z digitalnimi načrti v računalniško podprtem oblikovanju (CAD) (ang. computer-aided design). Koncept temelji na ustvarjanju 3D objekta z dodajanjem materiala plast za plastjo, ki se na koncu pretvorijo v objekt, ki je prototip, polizdelek ali pa kar končni izdelek. Prednosti, ki jih imajo tehnologije 3D tiskanja pred konvencionalnimi postopki, se kažejo v izdelavi kompleksnejših oblik in manjši porabi materiala. Razvoj materialov predstavlja možnost uporabe 3D tiskalnikov na več področjih od izdelave prototipov, medicine in vse do živilske industrije [1,2,5].

2.1.1 Zgodovina 3D tiskanja

3D tiskanje, znano tudi kot aditivna proizvodnja, ima svoje začetke v 80. letih. Prva tehnologija 3D tiskanja, imenovana laserska stereolitografija (SLA), je bila patentirana leta 1986 s strani Charlesa Hulla. Hull je razvil postopek, ki uporablja fotopolimerne smole in ultravijolično svetlobo za ustvarjanje 3D objektov plast za plastjo. Ta tehnologija je omogočala hitrejšo izdelavo prototipov, kar je bilo revolucionarno v proizvodnji in inženirstvu. Leta 1987 je Hull soustanovil podjetje 3D systems, ki je razvilo prvi komercialno dostopni 3D tiskalnik, imenovan SLA-1. SLA-tehnologija je temeljila na uporabi svetlobno občutljive tekočine, ki se je zamrežila, ko je bila izpostavljena ultravijolični svetlobi. V začetku 90. let so se pojavile nove tehnologije 3D tiskanja, kot je selektivno lasersko sintranje (SLS), ki ga je razvil Dr. Carl Deckard na univerzi v Teksasu. V istem času je bila razvita tudi tehnologija tiskanja s taljenjem in nanašanjem materiala (FDM) (ang. fused deposition modeling), ki jo je patentiral Scott Crump leta 1989. Crump je ustanovil podjetje Stratasys, ki je postalo eno vodilnih proizvajalcev 3D tiskalnikov. Od leta 2000 dalje je 3D tiskanje postalo dostopnejše in bolj razširjeno, zlasti v industrijskih panogah, kot so avtomobilska, letalska in medicinska industrija. Uporabljali so ga za hitro izdelavo prototipov in proizvodnjo manjših serij izdelkov. Po preteku patentov za nekatere ključne tehnologije, zlasti za FDM, je 3D tiskanje postalo dostopnejše širokemu krogu uporabnikov. Pojavile so se številne različice namiznih 3D tiskalnikov, ki so bile cenovno dostopne tako posameznikom kot tudi manjšim podjetjem [5–7].

2.2 Tehnologija 3D tiskanja

3D tiskanje je tehnološki proces, ki z dodajanjem materiala ustvari 3D objekt. Obstaja več vrst tiskalnikov, vsi pa delujejo po principu nanašanja slojev, ki ustvarijo končni model. Temu postopku strokovno lahko rečemo slojevita tehnologija. Danes se za poimenovanje uporablja izraz 3D tiskanje. Tehnologija 3D tiskanja se uporablja tudi za izdelavo končnih izdelkov in ne samo za izdelavo prototipov. Uporablja se tudi za

personalizirane izdelke, prilagojene željam vsakega posameznika. Pojem imenujemo hitro izdelovanje (angl. rapid prototyping). Zajema veliko različnih tehnologij in obstaja več različnih razdelitev, a jih v splošnem lahko razdelimo glede na postopek nastajanja izdelka in vrsto vhodnega materiala [1,2,5].

Prednosti 3D tiskanja so [5]:

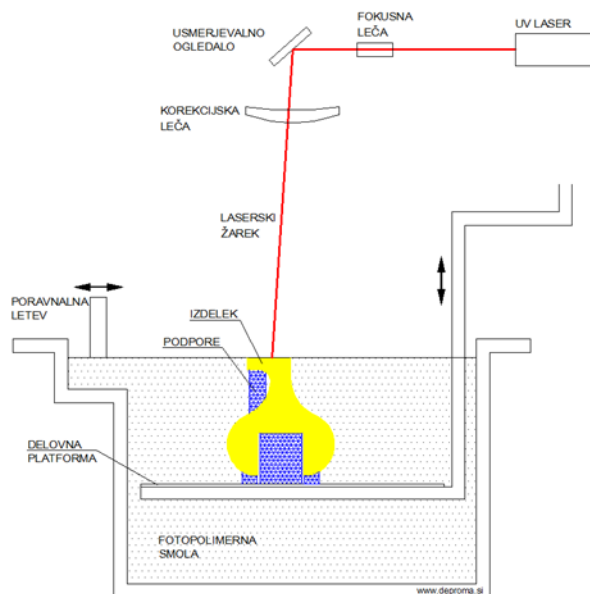
- izdelava zahtevnih oblik, ki jih ni mogoče izdelati z drugimi metodami,
- prilagoditev vsakega posameznega izdelka brez potrebe po novem orodju,
- ne potrebujemo kalupov ali modelov za izdelavo,
- hitra in enostavna izdelava prototipov, ki je za oblikovalce in končnega kupca cenovno ugodnejša in omogoča vizualizacijo približka končnega izdelka, popravki pa ne predstavljajo dodatnega stroška,
- bistveno manj odpadkov, saj večina konvencionalnih postopkov izdelave temelji na postopku odvzema materiala, kar privede do velike količine odrezkov in drugega materiala. Pri 3D tiskanju zaradi tehnologije spajanja materiala porabimo natanko toliko, kot ga je potrebno za izdelavo posameznega kosa.

Slabosti 3D tiskanja so [5]:

- omejena natančnost izdelave (3D tiskalniki so danes natančni od približno 20 do 100 mikronov in se ne morejo primerjati z izdelavo po postopkih izdelave za doseganje visokih toleranc.);
- manjša izbira materialov, barv in površine (Čeprav je danes na trgu prisotnih zelo veliko materialov, med katerimi so po večini polimeri, kovine in kompoziti, je to še vedno malo v primerjavi z drugimi tehnologijami, ki omogočajo tudi različne strukture površine.);
- omejena trdnost in žilavost, zato pri nekaterih tehnologijah 3D tiskanja lahko pride do neenakomernih mehanskih lastnosti skozi prerez objekta;
- višji stroški ob masovni proizvodnji (kljub vsem prednostim je 3D tiskanje še vedno v zaostanku, ko pride do masovne proizvodnje).

2.2.1 Tehnologija tiskanja SLA

Osnovni princip delovanja temelji na uporabi tekoče smole, ki se utrjuje s pomočjo svetlobe, običajno UV-laserja. Tiskalnik s pomočjo laserja natančno izriše sloje modela na površini tekoče smole. Ko laser posveti na določeno točko, se smola zamreži. Ko je prva plast modela zaključena, se plošča dvigne za debelino sloja, nova sveža plast tekočega fotopolimera pa steče pod prejšnjo zamreženo plast. Zamreževanje se nato ponavlja plast za plastjo, dokler ne nastane celoten model [5,8]. Na sliki 1 je shematsko prikazan postopek tiskanja SLA.



Slika 1: Shematski prikaz tiskanja SLA [9]

Prednosti tehnologije SLA sta:

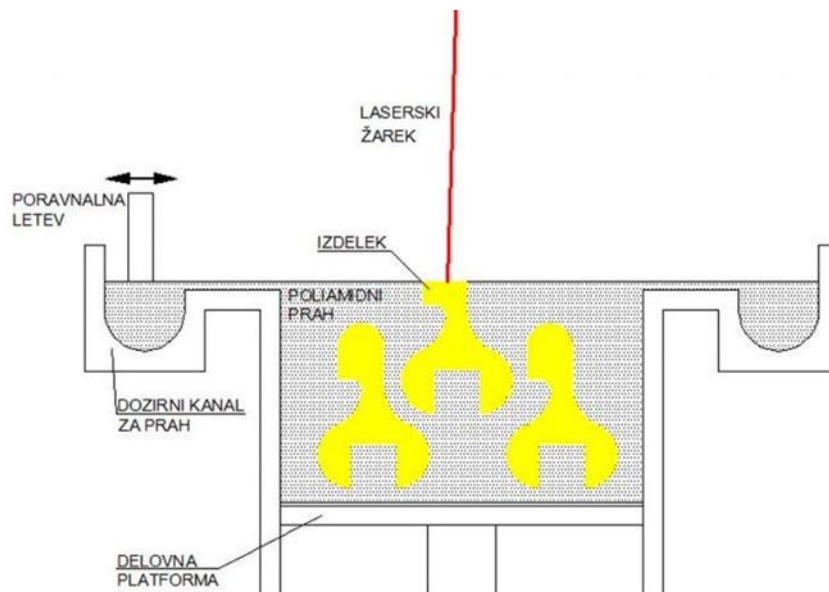
- visoka natančnost in zaključek površine,
- relativno visoka hitrost.

Slabosti tehnologije SLA so [5]:

- uporaba podpor,
- ekološko negativen vpliv polimerov in sredstev za čiščenje,
- potrebno je naknadno zamreževanje gotovega izdelka,
- manjša trdnost izdelkov.

2.2.2 Tehnologija tiskanja SLS

Postopek za izdelavo temelji na uporabi laserskega žarka, ki selektivno sintra (stali ali utrdi) praškaste materiale, kot so plastika, kovina ali keramika, v trdo strukturo. Deluje tako, da se v tiskalnik nanese tanka plast prahu, običajno debela med 50 do 100 μm . Laser selektivno sintra (stali) delce prahu, kjer je potrebno, za ustvarjanje plasti objekta. Ko je plast končana, se na vrh nanese nova plast prahu in tako se postopek ponavlja, dokler ni celoten objekt natisnjen. Plošča z materialom se spušča z vsakim dokončanim slojem. Praškasti material mora biti dovolj sipek za pravilno nanašanje. Prah, ki obkroža objekt, deluje tudi kot podporni material za previse izdelka, zato dodatne podpore pri tej tehnologiji tiskanja niso potrebne [5,10]. Na sliki 2 je shematsko prikazan postopek tiskanja SLS.



Slika 2: Shematski prikaz tiskanja SLS [11]

Prednosti tehnologije SLS so:

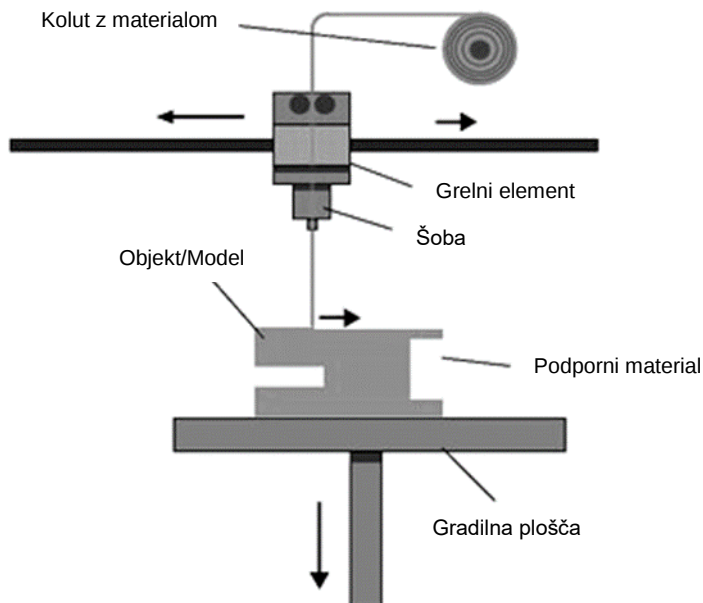
- natančnost,
- hitrost,
- podpore niso potrebne,
- izbira materialov.

Slabosti tehnologije SLS sta [5]:

- potreba po inertni atmosferi,
- relativno velika poraba energije.

2.2.3 Tehnologija tiskanja FDM

Tehnologijo FDM uvrščamo med tehnologije ekstrudiranja materiala. Deluje na osnovi modeliranja s spajanjem slojev in je danes zaradi preproste konstrukcije in velikega nabora uporabnih materialov najbolj razširjena. Posebej priljubljena je med industrijskimi uporabniki in domačimi uporabniki. Tehnologija FDM uporablja postopek iztiskavanja termoplastičnega materiala skozi šobo (ekstruder), ki ga nadzoruje računalnik. Material se neprekinjeno nalaga na osnovno ploščo ali na predhodno natisnjeni material plast za plastjo. Krmiljenje stroja je izvedeno računalniško, kar omogoča izdelavo neposredno po digitalnem modelu. 3D model se s programsko opremo razdeli na tanke plasti. Ta programska oprema generira g-kodo, ki natančno določa potovanje šobe in kako bo tiskalnik ustvarjal objekt plast za plastjo. Ob dokončanju vsakega sloja se izvede pomik plošče za višino sloja. Večina namiznih 3D tiskalnikov uporablja tehnologijo FDM za tisk termoplastov, saj so ti cenovno ugodnejši in enostavni za tiskanje [1,5,6]. Na sliki 3 je shematsko prikazan postopek tiskanja FDM.



Slika 3: Shematski prikaz tiskanja FDM [12]

Prednosti tehnologije FDM so:

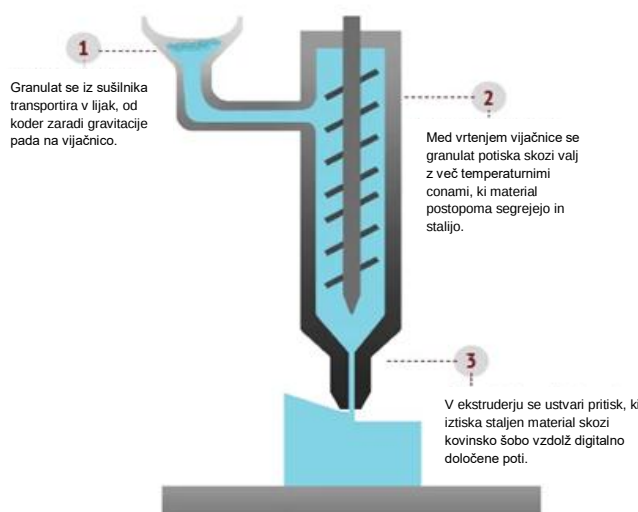
- cenovna dostopnost,
- enostavnost uporabe,
- raznolikost materialov,
- domača uporaba,
- hitro prototipiranje.

Slabosti tehnologije FDM so [5,6]:

- omejena ločljivost,
- možnost napak pri tisku,
- omejen spekter materialov.

2.2.4 Tehnologija tiskanja FGF

Tehnologija FGF je inovativna tehnologija 3D tiskanja, ki temelji na uporabi granuliranega materiala, kot je granulat termoplastov namesto filamentov. Granulat se iz sušilnika transportira v zalogovnik, kjer se dovaja do polža. Granulat se transportira skozi ekstruder z ogrevalnimi conami, kar omogoča, da se material postopoma tali. Znotraj ekstruderja nastane tlak v talini termoplasta in iztisne material iz kovinske šobe. Ker bomo v diplomskem delu uporabili to tehnologijo, bo v nadaljevanju podrobneje razložena [3,13]. Na sliki 4 je shematsko prikazan postopek tiskanja FGF.



Slika 4: Shematski prikaz tiskanja FGF [14]

Komponente FGF tiskalnika so:

- Lijak (zalogovnik) za granulat: služi za shranjevanje in dovajanje granulata v ekstruder. Omogoča neprekinjeno podajanje materiala v proces tiskanja.
- Ekstruder: grelec, ki tali granulat in ga potisne skozi šobo. Ekstruderji pri FGF tiskalnikih so močnejši kot pri FDM zaradi večje količine materiala, ki ga morajo obdelati.
- Šoba: odgovorna je za natančno nanašanje staljenega materiala na podlago. Lahko ima različne premere, odvisno od natančnosti in hitrosti tiskanja.
- Tiskalna miza: površina, na katero se nanašajo sloji materiala. Ta je pogosto večja, saj je tehnologija zasnovana za tiskanje velikih objektov.

Prednosti tehnologije FGF so predvsem stroškovna učinkovitost, kajti granulat je cenejši od filamentov, kar pomeni, da je ta tehnologija stroškovno učinkovitejša, zlasti pri večjih količinah. Tehnika omogoča hitro izdelavo večjih komponent in zmanjša potrebo po pretvorbi granul v filament, kar izboljša ekonomičnost in trajnost. Zaradi večjih premerov šob in zmogljivejših ekstruderjev lahko tiskalniki FGF proizvajajo objekte veliko hitreje kot tradicionalni tiskalniki FDM. Ta tehnologija 3D tiskanja je posebej primerna za tiskanje večjih objektov, na primer avtomobilskih delov, konstrukcijskih elementov ali celo arhitekturnih struktur. Omogoča uporabo različnih vrst plastike, vključno z recikliranimi materiali in materiali, ojačanimi z ogljikovimi ali steklenimi vlakni, kar omogoča večjo trdnost izdelkov. Kljub temu da omogoča večjo raznolikost materialov kot FDM, je še vedno omejena na termoplastične materiale, ki se lahko talijo in ekstrudirajo. Tehnologija FGF je lahko tudi bolj trajnostna, saj omogoča uporabo recikliranih materialov ali industrijskih odpadkov kot virov za izdelavo granulata. Uporablja se predvsem v industrijskih sektorjih, kjer je potrebno izdelovati večje in trdnjše izdelke, na primer v avtomobilski industriji, gradbeništvu, letalski industriji, proizvodnji pohištva, prototipiranju in tako dalje. Ima pa tudi tehnične omejitve. Ker ima običajno šobe z večjim premerom in posledično uporabljamo

debelejše sloje, je natančnost nižja kot pri tehnologijah, ki uporabljajo šobe z manjšim premerom in tanjšimi sloji, zato se uporablja predvsem za večje in manj podrobne objekte. Zaradi večjih količin materiala in kompleksnosti ekstrudiranja je potrebna bolj robustna in zmogljiva strojna oprema. Ta tehnologija se hitro razvija, zlasti v smeri uporabe bolj trajnostnih in recikliranih materialov ter povečanja natančnosti. V prihodnosti lahko pričakujemo, da bo imela ta tehnologija veliko vlogo na področjih, kjer so potrebni veliki, hitri in stroškovno učinkoviti izdelki. V primerjavi z drugimi metodami 3D tiskanja ta predstavlja pomembno orodje za industrijsko proizvodnjo, saj omogoča tiskanje izdelkov, ki jih z drugimi metodami zaradi velikosti ali hitrosti ne bi bilo mogoče natisniti [3,13,15].

2.3 Nabor materialov

Poznamo več vrst materialov za namen 3D tiskanja. Odvisni so predvsem od tehnologije, ki jo uporabljamo. Pri tehnologiji FGF je najbolj razširjena uporaba termoplastov, kot so ABS, ki ga bomo kasneje podrobneje opisali, saj smo ga uporabili pri eksperimentalnem delu, polimlečna kislina (PLA), poliamid (PA), polikarbonat (PC) in drugi. Pri tehnologiji FGF, ki smo jo uporabili pri eksperimentalnem delu, smo uporabili granulato. V primeru tehnologije FDM je material v obliki filamenta navit na kolut. Pri tehnologiji SLA je osnovni material iz tekočih fotopolimerov, praškasti materiali pa se uporabljajo pri tehnologiji SLS [5,6,16].

2.4 Polimeri

Polimeri so velike molekule, ki so sestavljene iz manjših enot, ki jih imenujemo monomeri. Polimere delimo na naravne in sintetične. Naravni polimeri so celuloza, ki jo najdemo v rastlinah, beljakovine, kot sta kolagen ali hemoglobin, nukleinske kisline, DNA in RNA in kavčuk, ki je lahko tudi sintetičen. Sintetični polimeri pa so na primer polietilen, polipropilen, poliamidi (najlon: uporablja se v tekstilu), poliuretani (uporabljajo se v penah in lepilih) in drugi. Polimeri imajo različne lastnosti, kot so elastičnost, trdnost in odpornost na kemikalije, kar jim omogoča uporabo v številnih industrijah, kot so embalažna, tekstilna, medicina in elektronska industrija. Pogosto se uporabljajo kot filament v 3D tisku zaradi svoje prilagodljivosti, trpežnosti in enostavne obdelave. Različni tipi polimernih filamentov imajo različne lastnosti, ki vplivajo na končni izdelek [17,18].

Glede na lastnosti polimere delimo v tri skupine [17,18]:

- termoplasti,
- duroplasti in
- elastomeri.

2.4.1 Termoplasti

Termoplasti so vrsta polimerov, ki se ob segrevanju mehčajo ali talijo, kar omogoča njihovo oblikovanje in preoblikovanje. Ko se ohladijo, ponovno postanejo trdni brez spremembe kemijske strukture, zato so primerni za 3D tiskanje z ekstrudiranjem materiala. Njihova dobra lastnost je ta, da se termoplasti lahko reciklirajo ali preoblikujejo brez izgube osnovnih lastnosti. Lažje jih je oblikovati z različnimi tehnikami. Lahko so mehki in fleksibilni (termoplastični poliuretan (TPU)) ali trdi in odporni (ABS, PA, PLA ...). Zaradi svoje prilagodljivosti in sposobnosti preoblikovanja se termoplasti uporabljajo v različnih industrijah, kot so embalažna, avtomobilska industrija, elektronika. Njihova sposobnost recikliranja pa jih naredi tudi okolju prijaznejše v primerjavi z nekaterimi drugimi materiali [17,18].

2.4.2 Duroplasti

Duroplasti so vrsta polimerov, ki se po oblikovanju ne morejo ponovno mehčati ali preoblikovati tako kot termoplasti. Za razliko od njih, ki jim segrevanje omogoči mehčanje, so duroplasti po zamreževanju (navadno po segrevanju ali s pomočjo kemijskih reakcij) običajno trajno trdni. Ta lastnost je posledica njihove kemijske zgradbe. Molekule v duroplastih so med seboj močno prepletene in tvorijo trdno, trirazsežno mrežo kovalentnih vezi. Če sta njihovi dobri lastnosti trdnost in odpornost, je slaba lastnost, da jih ni moč ponovno uporabiti, zato se jih reciklira s sežiganjem [6,17].

Glavni predstavniki duroplastov so [6,17]:

- epoksidne smole,
- poliesterske smole,
- poliuretanske smole,
- aminoplasti in
- fenoplasti.

2.4.3 Elastomeri

Elastomeri so vrsta polimerov z elastičnimi lastnostmi, kar pomeni, da se lahko ob raztezanju ali upogibanju močno deformirajo, a se nato vrnejo v svojo prvotno obliko. To elastičnost zagotavlja posebna molekularna zgradba elastomerov. Dolge polimerne verige so ohlapno povezane med seboj in tvorijo fleksibilno mrežo. Večina elastomerov je odpornih na nizke temperature, nekateri pa so tudi na visoke. Najpogostejši elastomerni materiali so različne vrste gum, ki se uporabljajo predvsem za blažilce, avtomobilske pnevmatike in jermene. Elastomeri združujejo prožnost, trpežnost in odpornost, kar jih dela nepogrešljive v številnih aplikacijah, v katerih je potrebna kombinacija elastičnosti in trdnosti [17].

2.5 Akrilonitril butadien stiren

ABS je sintetičen polimer in eden izmed najpogostejše uporabljenih materialov v tehnologiji 3D tiskanja, zlasti pri tehnologiji FDM. Je vsestranski in zelo priljubljen zaradi svojih dobrih mehanskih lastnosti, kot so trdnost, vzdržljivost in odpornost na toploto. Nastal je kot rezultat razvoja in izboljšav v kemijski industriji v prvi polovici 20. stoletja. Njegov izvor je mogoče zaslediti v zgodnjih 40. letih 20. stoletja, ko so raziskovalci združili tri različne monomere – akrilonitril, butadien in stiren –, da bi ustvarili material z odličnimi mehanskimi in kemičnimi lastnostmi. Akrilonitril prispeva k trdnosti, odpornosti na kemikalije in toplotni stabilnosti materiala, butadien je odgovoren za žilavost in odpornost na udarce, stiren pa materialu daje površinsko trdoto in enostavnost predelave. Svojo popularnost je začel pridobivati v 50. in 60. letih, ko sta podjetji Bayer in DuPont začeli razvijati komercialno proizvodnjo in aplikacije za ta material. Ena najbolj znanih in zgodnjih aplikacij ABS je bila proizvodnja kock LEGO, pri katerih so začeli uporabljati ta material že v poznih 50. letih zaradi njegove trpežnosti in možnosti natančne obdelave. ABS se raztopi v acetonu, ki ga zgladi in polira površino. Enostavno ga je brusiti, zato obstaja kar nekaj možnosti za naknadno obdelavo, kar je pozitivna lastnost, saj se tiskani deli nagibajo k zvijanju in imajo lahko slab oprijem plasti, zato so nastavitve temperature še posebej pomembne za filamente ABS in njihove nagnjenosti h krčenju. Veljal je za najbolj priljubljen material za 3D tisk, dokler niso razvili PLA. Kljub temu velja za eno najboljših izbir materiala, saj je cenovno dostopen, vzdržljiv in še posebej pomemben v komercialnih aplikacijah tako za hitro izdelavo prototipov kot za končne izdelke [5,17-19].

Prednosti ABS materiala so [5,17,19,20]:

- Dobre mehanske lastnosti: material je znan kot tog, žilav in trpežen. Je odporen na vročino, elektriko in vsakdanje kemikalije. Je nekoliko prožen in zato manj krhek kot PLA.
- Enostavna naknadna uporaba: po tisku se ga enostavno obdeluje. Lahko ga barvamo, peskamo ali zgladimo z acetonom, kar omogoča, da dosežemo gladko površino in boljši estetski videz.
- Kemijska odpornost: ABS je odporen na različne vsakdanje kemikalije in omogoča uporabo v okoljih, kjer so prisotna olja, kisline in drugi kemijski reagenti.
- Razpoložljivost: je široko dostopen material in je na voljo v številnih barvah in tipih, kar omogoča prilagoditev različnim potrebam in projektom.
- Učinkovitost: z ustreznimi nastavitvami lahko dosega dobre rezultate pri 3D tisku, kar je še posebej koristno pri izdelavi funkcionalnih prototipov.

Slabosti ABS materiala so [5,17,19,20]:

- Močni in strupeni hlapi: znano je, da med 3D tiskanjem ABS oddaja večjo količino nevarnih hlapnih spojin, kot je stiren, in neprijeten vonj.
- Krčenje in deformacija: ima visoko stopnjo krčenja med hlajenjem, kar lahko povzroči deformacije. To je še posebej opazno pri večjih kosih, pri katerih lahko neenakomerno hlajenje vpliva na obliko.

- Težavnost 3D tiskanja: ABS je nekoliko zahtevnejši za tiskanje v primerjavi s PLA. Zahteva višje temperature za ekstrudiranje in pogosto potrebuje ogrevano tiskalno podlago za zmanjšanje krčenja.
- Odpornost na UV-svetlobo: lahko izgubi barvo in postane krhek, če je izpostavljen dolgotrajnemu UV-sevanju. To omejuje njegovo uporabo na prostem, razen če je zaščiten z dodatnimi premazi.

2.6 Kompozitni materiali

Kompozitni materiali so materiali, ki so sestavljeni iz dveh ali več različnih komponent, ki se s kompavndiranjem združijo, da ustvarijo nov material z izboljšanimi lastnostmi. Vsaka komponenta ohrani svoje ločene fizikalne ali kemične lastnosti, vendar skupaj delujejo sinergistično, kar omogoča, da kompozitni material doseže lastnosti, ki jih noben od posameznih materialov sam ne bi imel. Kompozitni materiali so sestavljeni iz dveh glavnih komponent. Prva komponenta je osnova ali matrica, ki je običajno osnovni material in drži vse skupaj. To je lahko polimer, kovina ali keramika, v našem primeru je to ABS. Matrica zagotavlja osnovno obliko in ščiti ojačitve pred zunanjimi vplivi, kot so mehanske obremenitve ali okoljski pogoji. Druga osnovna komponenta pa so ojačitve. Le te dajejo kompozitu izboljšane mehanske lastnosti, kot so trdnost, trdota, togost ali odpornost proti udarcem. Ojačitveni materiali so lahko v obliki prahu (keramika, kovina), v obliki tekočin ali v obliki vlaken (ogljikova ali steklena vlakna). Zaradi svoje sposobnosti združevanja so kompozitni materiali zelo uporabni in vse bolj priljubljeni [21].

2.7 Steklena vlakna

So ena najpogostejših vrst ojačitev. Glede na uporabo so lahko izdelana iz različnih vrst stekla. So tanka vlakna iz stekla, ki se uporabljajo za izboljšanje lastnosti osnovne matrice. Priljubljena so zaradi svoje kombinacije nizke gostote, visoke trdnosti, odpornosti na korozijo in nizke cene. Imajo visoko natezno trdnost, kar pomeni, da se težko lomijo ali raztezajo. Klub svoji trdnosti so zelo lahka, kar je prednost pri aplikacijah, kjer je pomembno zmanjšanje mase. Kot smo že prej omenili, so odporna na kemikalije, vlago in okoljske vplive, kar jih naredi idealne za uporabo v agresivnih okoljih. Odporna so na visoke temperature in so električno izolativna. Uporaba steklenih vlaken v kompozitih je zelo pogosta, saj jih uporabljajo kot ojačitveni material in izdelan kompozit je znan kot stekleno-vlakneni kompozit (angl. Glass-fiber reinforced plastics ali GFRP). Izdelujejo se s taljenjem stekla, ki se nato vleče v tanka vlakna skozi majhne šobe. Ta vlakna se lahko uporabijo kot dolga vlakna ali pa se sekljajo v krajše dolžine, odvisno od specifične uporabe [22,23].

Poznamo več tipov steklenih vlaken, in sicer:

- A-steklo,
- C-steklo,
- E-steklo,

- AE-steklo in
- S-steklo.

Vlakna, ki se uporabljajo za strukturne kompozite, običajno spadajo v kategorijo E-stekla. Od vseh vlaken, ki so na voljo za strukturno okrepitev in ojačitev, se E-steklo največ uporablja in je cenovno najugodnejše. Kljub vsem pozitivnim lastnostim, ki jih imajo steklena vlakna v kompozitih, imajo tudi slabe lastnosti, kot so manjša togost in to, da so manj odporna na udarce kot nekateri drugi ojačitveni materiali [22,23].

2.8 Pregled dosedanjih raziskav na področju vpliva oblike in velikosti granulata na kakovost 3D tiskanja

V literaturi je poudarjeno, da je FDM-tehnologija zaradi uporabe filamenta enotnega premera procesno stabilna in omogoča predvidljiv volumetrični pretok taline. Nasprotno pa je tehnologija FGF bistveno občutljivejša na obliko in velikost granulata, saj se material v ekstruder podaja v obliki nehomogenih delcev, kar oteži ohranjanje konstantnega pretoka [3,24].

Raziskave kažejo, da neenotna velikost granulata povzroča nestabilno ekstrudiranje, kar povečuje verjetnost zamašitve šobe. Poleg tega je ugotovljeno, da nepravilna oblika delcev negativno vpliva na transport po polžu, kar povzroča neenakomerno taljenje in odstopanja v debelini slojev [24].

Eksperimentalne študije recikliranih materialov dodatno potrjujejo pomembnost ustrezne granulacije. Pri FGF-tiskanju PC je bilo ugotovljeno, da preveliki delci povzročajo nestabilno ekstruzijo in slabšo medplastno adhezijo, zato je bilo potrebno granulato predhodno presejati na frakcije pod 5 mm. Podobno je bilo pri tiskanju PC in PC/ABS opaženo, da delci, večji od 3 mm, povzročajo temperaturna odstopanja in zmanjšano dimenzijsko natančnost, medtem ko enakomerna granulacija pomembno izboljša adhezijo slojev [24].

Raziskave recikliranih polietilen tereftalata (PET) in polietilen tereftalat glikola (PETG) nakazujejo, da neenakomerna velikost delcev povzroča nastanek zračnih mehurčkov in nepopolno taljenje, kar vodi v zmanjšane mehanske lastnosti tiskanih izdelkov. Numerične simulacije taljenja granulata prav tako potrjujejo, da različni časi taljenja delcev različnih velikosti povzročajo viskozno neskladje in s tem slabšo medplastno adhezijo [25].

Povzamemo lahko, da optimalna oblika ter enakomerna velikost granulata predstavljata temeljni pogoj za stabilen potek procesa FGF, homogeno taljenje in zanesljive mehanske lastnosti natisnjenih izdelkov. Te ugotovitve predstavljajo izhodišče diplomskega dela, v katerem smo preučevali vpliv oblike in velikosti granulata na kakovost FGF-tridimenzionalno tiskanih ABS-kompozitov.

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Uporabljeni materiali

V eksperimentalnem delu smo s pomočjo kompavndiranja pripravili 5 različnih kompozitnih materialov, ki so vsi imeli kot termoplastično matrico uporabljen recikliran material ABS. Pri prvem vzorcu, ki je vseboval 5 % steklenih vlaken, pa smo naredili še 4 variante različnega granulata, pri katerih smo opazovali obnašanje različne dolžine in širine granulata med 3D tiskom.

V vzorcih smo uporabili kombinacijo naslednjih materialov oziroma dodatkov:

- ABS Polylac PA-757HJ01 – Chimei corporation,
- antioksidant AT 10 – Amik Italia
- dodatek rGFRP – Technol in
- kompatibilizator Graftabond SEBS MAH 02520 – Graft polymer.

3.2 Priprava vzorcev in njihova sestava

Vzorci smo pripravili s pomočjo kompavndiranja, tako da smo najprej natančno natehtali vse materiale oziroma dodatke za vsak vzorec posebej. Za eksperimentalni del smo pripravili 5 različnih kompozitnih materialov označenih z 822_2023_0215_01, 822_2023_0215_02, 822_2023_0215_03, 822_2023_0215_04 in 822_2023_0215_05. V tabeli 1 so prikazane točne vrednosti sestave vzorcev.

Tabela 1: Sestava vzorcev

Vzorec	ABS Polylac PA-757HJ01 (%)	AT 10 (%)	rGFRP-Technol (%)	Graftabond SEBS MAH 02520 (%)
822_2023_0215_01	94,5	0,3	5,0	0,5
822_2023_0215_02	88,7	0,3	10,0	1,0
822_2023_0215_03	83,2	0,3	15,0	1,5
822_2023_0215_04	77,7	0,3	20,0	2,0
822_2023_0215_05	72,2	0,3	25,0	2,5

Pri vzorcu 822_2023_0215_01 smo pripravili še 4 različne variante granulata z različnimi dolžinami in premeri, ki so prikazane na sliki 5, v tabeli 2 pa so prikazane povprečne dolžine in premeri za vsak vzorec.

Tabela 2: Variante granulata vzorca 822_2023_0215_01

Vzorec	Dolžina (mm)	Premer (mm)
822_2023_0215_01_1	2,01	1,98
822_2023_0215_01_2	3,82	1,89
822_2023_0215_01_3	5,11	1,86
822_2023_0215_01_4	2,45	2,76



Slika 5: Variante granulata vzorcev

Pri 3D tisku različnih vrst granulata vzorca 822_2023_0215_01 smo ugotovili, da se najbolje tiska vzorec 822_2023_0215_01_1, zato smo ostale vzorce (822_2023_0215_02, 822_2023_0215_03, 822_2023_0215_04 in 822_2023_0215_05) granulirali na enako dolžino in premer kot vzorec 822_2023_0215_01_1.

3.2.1 Kompavndiranje

Kompavndiranje je proces, v katerem se različni materiali, običajno polimeri, kombinirajo z dodatki, polnili ali ojačitvami, da se izboljšajo njihove mehanske, toplotne in druge lastnosti. Glavni cilj kompavndiranja je ustvariti polimerne materiale z določenimi lastnostmi, ki so primerne za posebne aplikacije. Ta proces vključuje mehansko mešanje komponent pri nadzorovanih pogojih temperature in tlaka ter je ključnega pomena v industriji predelave polimerov za prilagoditev materialov končni uporabi [26].

V laboratoriju na FTPO smo najprej zmleli odpadni ABS z mlinom za mletje termoplastov Wanner, kot je prikazano na sliki 6. Nato smo pripravili vzorce, katerih sestavo lahko vidimo v tabeli 1. Vzorce smo pripravili na dvopolžnem ekstruderju LABTECH – LTE 20-44, kot je prikazano na sliki 7. Gre za korotirajoči ekstruder s

premerom polžev 20 mm in L/D razmerjem 44, ki se uporablja za pripravo polimernih mešanic in kompozitov. Ekstruder ima gravimetrične dozirnike, zato materiala ni bilo treba dozirati ročno. Ekstrudiran filament smo vodili skozi vodno kopel do granulatorja SCHEER. Gre za laboratorijski granulator, ki omogoča razrez ekstrudiranega filamenta na granulāt z uporabo rotirajočega rezila. Velikost granulata je odvisna od hitrosti podajanja in hitrosti rezanja. Pridobljen granulāt je bil različnih dolžin in premerov, kot je prikazano v tabeli 2.



Slika 6: Mlin za mletje termoplastov Wanner



Slika 7: Dvopolžni ekstruder in granulator

Parametri ekstrudiranja so prikazani v tabeli 3. Ekstrudiran filament smo na koncu dali v sušilno komoro Memmert in ga osušili na vlažnost 0,1 %. Sušilna komora omogoča kontrolirano sušenje materiala pri nastavljeni temperaturi in času.

Tabela 3: Parametri ekstrudiranja

Parametri	Vrednosti
Temperature od lijaka do šobe	165, 170, 175, 180, 185, 190, 195, 200, 200, 200 in 200 °C
Obrati ekstrudiranja	300 min ⁻¹
Kapaciteta doziranja	5,00 kg/h

3.2.2 Nasipna gostota

Poleg kemijske sestave in oblike delcev je bila za posamezne granulirane kompozite določena tudi nasipna gostota, ki opisuje razmerje med maso in prostornino granulata v razsutem stanju. Ta parameter je pomemben, saj vpliva na podajanje materiala v ekstruder in enakomernost taljenja.

Nasipna gostota je bila izračunana na osnovi razmerja med maso vzorca in prostornino merilne posode (136 cm³). Rezultati so prikazani v tabeli 4.

Tabela 4: Nasipna gostota posameznih vzorcev

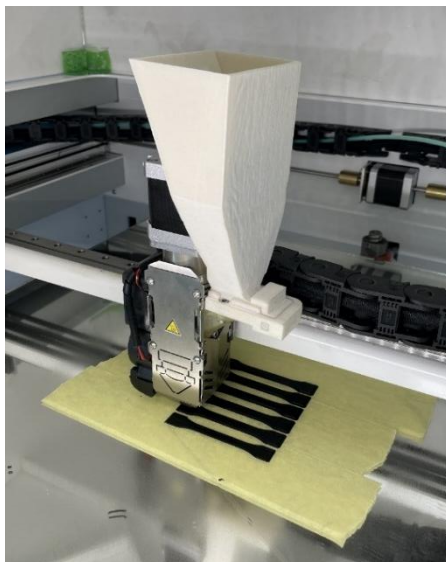
Vzorec	Nasipna gostota (g/cm ³)
822_2023_0215_01_1	0,608
822_2023_0215_01_2	0,604
822_2023_0215_01_3	0,597
822_2023_0215_01_4	0,589
822_2023_0215_02	0,569
822_2023_0215_03	0,533
822_2023_0215_04	0,474
822_2023_0215_05	0,448

Čeprav so bili granulati serij 822_2023_0215_02 do 822_2023_0215_05 pripravljeni iz iste osnovne surovine kot vzorec 822_2023_0215_01_1 in imajo podobno obliko delcev, se njihova nasipna gostota postopno zmanjšuje z večanjem deleža steklenih vlaken. To kaže, da na nasipno gostoto ne vpliva le geometrija delcev, temveč tudi njihova mikrostruktura in površinska hrapavost, ki jo povečujejo vlakna. Večja vsebnost vlaken povzroči manj homogeno kompaktnost granulata, zaradi česar se v nasutem stanju oblikuje več praznin med delci, kar se odraža v nižji efektivni nasipni gostoti.

Višja nasipna gostota omogoča stabilnejše podajanje materiala v ekstruder, medtem ko granulati z nižjo nasipno gostoto vsebuje več zraka med delci in povzroča neenakomerno taljenje.

3.2.3 3D tisk

Za pripravo testnih vzorcev smo uporabili tehnologijo 3D tiska, ki omogoča izdelavo 3D predmetov s postopnim nalaganjem slojev materiala. 3D tiskanje smo izvajali na FTPO s pomočjo 3D tiskalnika Tumaaker BIGFOOT PRO DUAL, na katerem smo tiskali testne epruvete za namen nadaljnjih preiskav, kot je prikazano na sliki 8.



Slika 8: 3D tisk epruвет

Granulat smo pred tiskanjem sušili v sušilni komori Memmert pri temperaturi 73 °C približno 6 ur in 15 minut oziroma dokler ni bila dosežena vlaga 0,1 %. S tem je bila vsebnost vlage znižana na raven, ki preprečuje napake pri 3D tiskanju, kot so nastanek mehurčkov, slab oprijem med plastmi ali slabša kakovost površine. Sušenje je bilo izvedeno na FTPO, postopek sušenja granulata pa je prikazan na sliki 9, kjer je vidno razporejanje granulata na pladnjih v laboratorijski pečici pri nastavljeni temperaturi sušenja.



Slika 9: Sušenje granulata

3D tisk testnih vzorcev smo izvajali z uporabo tehnike FGF, ki uporablja granulat kot vhodni material. Temperatura šobe (250 °C), vhodna temperatura (170 °C) in temperatura podlage (60 °C) so bile konstantne za vse vzorce, medtem ko smo relativno hitrost tiskanja (%) in hlajenje (delež ventilatorja) prilagajali glede na

obnašanje materiala med tiskanjem (tabela 5). Za vse vzorce smo uporabili šobo s premerom 0,8 mm, višina sloja je znašala 0,25 mm. Pred začetkom tiskanja pa je bil natisnjen skirt s petimi začetnimi sloji, kar je omogočilo enakomeren pretok materiala in stabilno nanašanje prve plasti.

Tabela 5: Parametri 3D tiska

Vzorec	Delež ventilatorja (%)	Relativna hitrost tiskanja (%)
822_2023_0215_01_1	20	140
822_2023_0215_01_2	20	140
822_2023_0215_01_3	20	140
822_2023_0215_01_4	20	140
822_2023_0215_02	10	250
822_2023_0215_03	10	250
822_2023_0215_04	10	250
822_2023_0215_05	10	250

Za izboljšanje oprijema prve plasti na tiskalno podlago smo uporabili lepilni sprej 3DLAC in rumen slikopleskarski trak, kar je omogočilo enakomerno nanašanje materiala ter zmanjšalo tveganje za odstopanje vzorcev med tiskanjem. Na sliki 10 sta prikazana lepilni sprej in slikopleskarski trak, ki sta bila uporabljena za izboljšanje oprijema prve plasti med 3D tiskom.



Slika 10: Lepilni sprej in rumen slikopleskarski trak

Med tiskanjem smo spremljali kakovost nanosa posameznih slojev in morebitne napake pri spajanju med sloji, saj so ti kritični za doseganje optimalne mehanske trdnosti. Po potrebi smo parametre prilagodili, da smo zagotovili enakomeren nanos materiala in preprečili deformacije, ki bi vplivale na nadaljnje teste.

Na osnovi izmerjenega MFI vzorca 822_2023_0215_01_1, ki je znašal 15,2 g/10 min, smo določili referenco za viskoznost materiala in s tem okvirne začetne parametre tiskanja. Nadaljnje parametre smo nato prilagodili posameznim vzorcem glede na

njihovo obnašanje med tiskanjem, da smo zagotovili enakomeren nanos materiala in preprečili napake pri spajanju slojev.

Pri vzorcu 822_2023_0215_01 smo preizkusili štiri različne variante granulata z različno dolžino in premerom delcev. Granulat 822_2023_0215_01_1, ki je imel krajše delce, se je izkazal za najprimernejšega, saj je gibanje polža potekalo enostavneje in brez težav. Granulat 822_2023_0215_01_2 se je izkazal za bolj tekočega pri ekstrudiranju in je omogočal zelo hitro tiskanje, vendar je pri prvih nastavitvah prihajalo do prevelikega doziranja materiala in prepočasnega ohlajanja. Pri granulatu 822_2023_0215_01_3 so se granule pogosto zatikale v območju ekstruderja, kar smo zaznali po povečanem hrupu naprave, in ni bilo mogoče tiskati s hitrostjo višjo od določene maksimalne vrednosti. Vzorec 822_2023_0215_01_4 je povzročal več težav zaradi večjega premera granul. Kljub tem omejitvam smo uspešno izdelali vse testne preizkušance za nadaljnje mehanske in termične analize.

Vzorci serije 822_2023_0215_02 – 822_2023_0215_05 so bili natisnjeni z granulati, ki so imeli geometrijo enako kot granulat 822_2023_0215_01_1, ki je bil izbran kot optimalen zaradi najbolj stabilnega obnašanja med tiskanjem. Zato pri njihovem tisku nismo zaznali posebnih težav, enaki parametri pa so omogočili uspešno izdelavo vseh preizkušancev za nadaljnje analize.

3.3 Metode preiskav

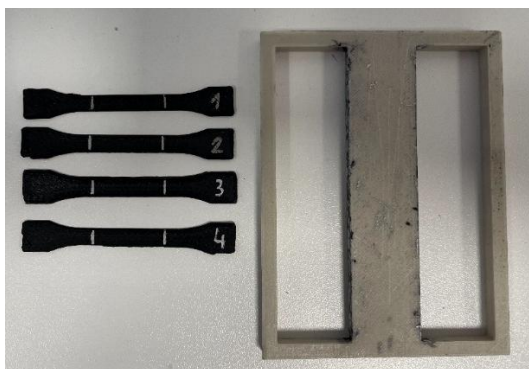
3.3.1 Natezni test

Natezni test smo izvedli v laboratoriju na FTPO, pri čemer smo vzorce vpenjali med dve čeljusti trgalnega stroja Shimadzu, AG-X plus 10 kN, kot je prikazano na sliki 11. Pred začetkom testiranja je bilo treba napravo ustrezno kalibrirati, pri čemer vzorec še ni bil vpet. Vzorci, ki smo jih uporabili, so bili tipa 1BA v skladu s standardom ISO 527, kar določa tudi razmak med čeljustmi, ki je znašal 50 mm.



Slika 11: Trgalni stroj Shimadzu, AG-X plus 10 kN

Na vzorce smo pred vpenjanjem s pomočjo šablone narisali črtice v razmiku 2 cm, kot je prikazano na sliki 12, da smo lahko med testom natančno spremljali njihov raztezek do 0,4 %. Nato smo vzorce previdno vpeli med čeljusti, pri čemer je bila sila prednapetja 30 N. Med testiranjem smo vzorce obremenjevali s konstantno hitrostjo v skladu z metodo, predpisano v standardu ISO 527, ki je znašala do raztezka 0,4 % 1 mm/min, potem 50 mm/min do preloma, in pri tem merili odziv vzorca v obliki sile in pomika.



Slika 12: Šablona za epruvete

Rezultati meritev so vključevali togost oziroma natezni E modul (E_t), natezno trdnost (σ_m), raztezek pri natezni trdnosti (ϵ_m) ter raztezek pri porušitvi (ϵ_{tb}).

3.3.2 Upogibni test

Upogibni test smo izvedli v laboratoriju na FTPO prav tako kot natezni test na trgalnem stroju Shimadzu, AG-X plus 10 kN, kot je prikazano na sliki 13, kjer smo vzorec namestili na dve podpori. Pred začetkom testa je bilo treba napravo ustrezno kalibrirati, pri čemer vzorec še ni bil vpet. V skladu s standardom ISO 178 smo preverili razmak med podporami, ki je moral biti 64 mm, z vsako podporo oddaljeno 32 mm od sredine vzorca.



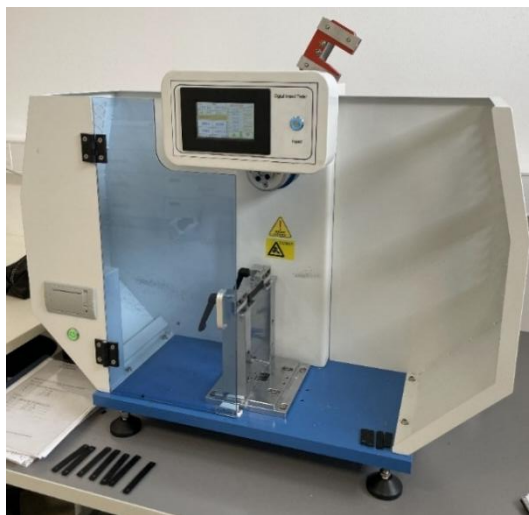
Slika 13: Upogibni test na trgalnem stroju Shimadzu, AG-X plus 10 kN

Ko smo vzorec enakomerno položili na podpori, smo poskrbeli, da je bila sredina vzorca natančno pod zgornjo čeljustjo. Med testiranjem smo vzorec obremenjevali s konstantno hitrostjo 2 mm/min, prav tako določeno po standardu ISO 178, in pri tem merili odziv vzorca v obliki sile in pomika.

Rezultati testa so vključevali togost (upogibni E modul (E_f)), maksimalno upogibno trdnost (σ_{fM}), raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti (ϵ_{fM}) in upogibni raztezek pri poružitvi (ϵ_{fB}).

3.3.3 Udarne žilavost po Charpyju

Udarne žilavost po Charpyju smo testirali v laboratoriju na FTPO na napravi za merjenje udarne žilavosti Charpy LY-XJJD5, kot je prikazano na sliki 14, pri čemer smo vzorec namestili med dve podpori. Test smo izvedli v skladu s standardom ISO 179, pri čemer smo merili razliko v potencialni energiji kladiva, ki je bila potrebna za porušitev vzorca. Uporabili smo vzorce brez zareze, kot je prikazano na sliki 15, kakor predpisuje standard, prav tako je bilo kladivo zasnovano v skladu z ISO 179.



Slika 14: Naprava za merjenje udarne žilavosti Charpy LY-XJJD5



Slika 15: Vzorec brez zareze

Pred začetkom testa je bilo treba napravo pravilno kalibrirati. Uporabili smo kladivo z energijo 2 J.

3.3.4 Dinamična mehanska analiza

DMA smo izvedli v laboratoriju na FTPO na napravi Perkin Elmer DMA 8000, kot je prikazano na sliki 16. Test omogoča spremljanje dinamičnih mehanskih lastnosti materiala v odvisnosti od hitrosti deformacije in temperature, pri čemer vzorec obremenjujemo s sinusoidno deformacijo in merimo njegov odziv.



Slika 16: Naprava Perkin Elmer, DMA 8000

Test smo izvajali v načinu dvojne prižeme (Dual Cantilever – Rectangle). Rezultati analize so vključevali vrednosti dinamičnega E modula (E') pri 30 °C, temperature držanja oblike pri obremenitvi 500 MPa (HDT), modul izgub (E'') pri temperaturi v bližini temperature steklastega prehoda (T_g), temperature vrha $\tan \delta$ ter maksimalne vrednosti faktorja izgub ($\tan \delta$), prav tako pa so lahko rezultati analize togost v odvisnosti od temperature, steklasti prehod, kristaliničnost, temperatura uporabe, sposobnost dušenja, vsebnost ojačeval/polnil, homogenost, kakovost kompatibilizacije.

Začetni parametri so bili nastavljeni na 25 °C in končno temperaturo 150 °C, frekvenca 1 Hz, amplituda 0,020 mm in hitrost segrevanja 2 °C/min. Pred začetkom testa smo vzorec, ki mora biti dolžine 47 mm, širine 5 mm in debeline 2 mm ter vzporednih stranic, vpeli med čeljusti. Pri čemer smo pazili, da je bil nameščen pravilno – sredinsko po višini ter levo-desno, kot je prikazano na sliki 17.



Slika 17: Vstavljena epruveta

3.3.5 Termogravimetrična analiza

TGA smo izvedli v laboratoriju na FTPO z napravo Mettler Toledo, TGA/DSC 3+, kot je prikazano na sliki 18. Ta analiza omogoča spremljanje spremembe mase materiala med programiranim segrevanjem v kontrolirani atmosferi, kar omogoča vpogled v različne lastnosti materiala.



Slika 18: Naprava Mettler Toledo, TGA/DSC 3+

Rezultati oz. termogrami TGA vključujejo toplotno odpornost, potek kemijskih procesov ter spremembo mase glede na temperaturo in čas. Prav tako z analizo določimo izhlapevanje, sublimacijo, vsebnost anorganskih polnil, kakovost polimernih materialov, mešanice polimerov, vsebnost lahkih komponent, degradacijo, toplotno stabilnost in oksidacijsko stabilnost.

Pri obdelavi podatkov smo spremljali temperaturo začetka razgradnje (T_{d1}), ki označuje začetek glavnega razpadnega procesa, deleže masnih izgub v posameznih razpadnih segmentih ter končni ostanek mase, ki predstavlja količino anorganskih polnil in ogljikovega ostanka po oksidativnem izgorevanju (saje).

Za meritve smo uporabljali vzorce mase od 5 mg do 50 mg. Meritve smo izvajali v dveh zaporednih temperaturnih segmentih. V prvem segmentu je bil vzorec segrevan od 40 °C do 550 °C s hitrostjo 10 K/min v dušikovi atmosferi (N₂) s pretokom 20 ml/min, pri čemer smo spremljali termično stabilnost in razgradnjo organskih komponent. Po doseženi temperaturi 550 °C je sledil drugi segment, v katerem je bil vzorec 20 minut izpostavljen kisikovi atmosferi (O₂) s pretokom 20 ml/min z namenom oksidativnega izgorevanja preostalih anorganskih ostankov. Zajem podatkov je potekal v časovnem intervalu 1 s, kar je omogočilo natančno določitev poteka razgradnje v obeh segmentih.

3.3.6 Diferenčna dinamična kalorimetrija

DSC smo izvedli v laboratoriju na FTPO z napravo Mettler Toledo, DSC 2, kot je prikazano na sliki 19. Ta metoda omogoča merjenje toplotnega toka, ki se med fizikalno ali kemijsko spremembo vzorca porabi (endotermna sprememba) ali sprosti (eksotermna sprememba). Z DSC spremljamo razliko v toplotnem toku med vzorcem in referenco (praznim lončkom), medtem ko poteka nadzorovano segrevanje, ohlajanje ali vzdrževanje konstantne temperature v kontrolirani atmosferi.



Slika 19: Naprava Mettler Toledo, DSC 2

Vzorci so imeli maso med 5 in 14 mg. Za zagotovitev dobrega stika med vzorcem in dnom lončka smo uporabljali tanke, ravne in čiste delce granulata. Pri granularanih vzorcih smo površino predhodno poravnali s skalpelom, da smo pridobili ravno kontaktno površino.

Analizirali smo drugo segrevanje, saj ta segment predstavlja toplotne lastnosti brez vpliva predhodne toplotne zgodovine materiala. Prvo segrevanje je bilo uporabljeno za oceno lastnosti, povezanih s predelavo in termično zgodovino vzorcev.

Postopek je potekal v osmih zaporednih segmentih. Najprej je bil vzorec izotermno zadržan pri 0 °C za 5 minut. Nato je sledilo segrevanje od 0 °C do 180 °C s hitrostjo 10 K/min, temu pa izotermni segment pri 180 °C za 5 minut. V naslednjem koraku je bilo izvedeno ohlajanje s 180 °C na 0 °C s hitrostjo 10 K/min, nato pa ponovno izotermno zadrževanje pri 0 °C za 5 minut. Postopek se je nadaljeval s segrevanjem od 0 °C do 180 °C s hitrostjo 10 K/min z izotermnim segmentom pri 180 °C za 5 minut. Meritve so se zaključile z ohlajanjem s 180 °C na 0 °C s hitrostjo 10 K/min. Meritve so potekale v atmosferi dušika (N_2) s pretokom 20 ml/min.

Pri obdelavi rezultatov smo določili ključne termične parametre:

- temperaturo taljenja (T_m) in entalpijo taljenja (ΔH_m),
- temperaturo kristalizacije (T_c) in entalpijo kristalizacije (ΔH_c),
- temperaturo steklastega prehoda (T_g),
- spremembo toplotne kapacitete (ΔC_p).

Ti parametri omogočajo oceno kristaliničnosti, toplotne stabilnosti, prisotnosti nečistoč ter morebitnih razlik v termični zgodovini vzorcev. Rezultati meritev tako predstavljajo pomemben vpogled v toplotno obnašanje materiala in vpliv dodanih polnil ali ojačitev na termične lastnosti.

3.3.7 Indeks tečenja taline

MFI smo določali v laboratoriju na FTPO na napravi LIYI MFI LY-RR, kot je prikazano na sliki 20. Ta analiza omogoča merjenje masnega pretoka taline skozi kapilaro pri določeni temperaturi in obremenitvi v skladu s standardom ISO 1133. Rezultati meritev vključujejo reološke lastnosti materiala pri predelovalni temperaturi, pri čemer je končni rezultat izražen kot masni pretok taline (g/10 min). Vzorci so morali biti predhodno posušeni, da smo zagotovili ponovljivost rezultatov.



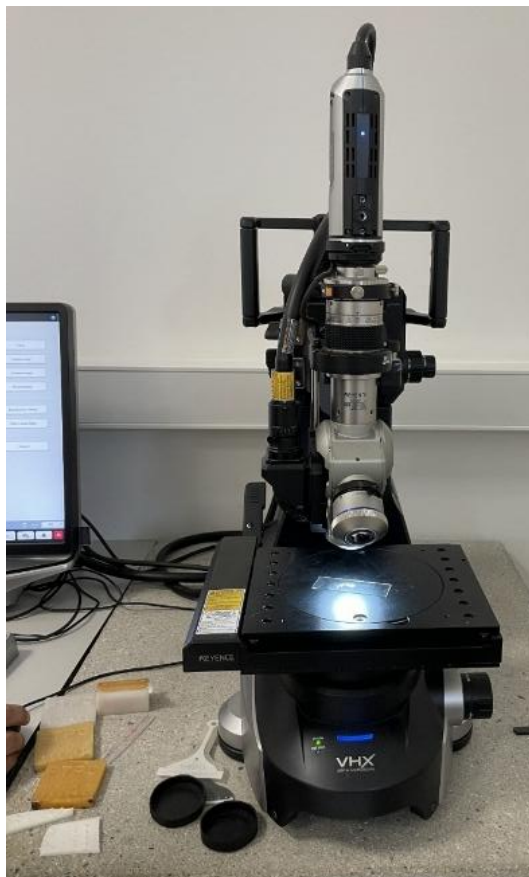
Slika 20: Naprava LIYI MFI LY-RR

Metode izvajanja so vključevale nastavitve temperature (običajno predelovalne temperature) in obremenitev, kot je navedeno v tehničnem listu materiala. Vzorec smo stehali, posušili v analizatorju vlage ter nato nasuli v segreto napravo. Vstavili smo kapilarno šobo in obtežitveno palico z ustrežno utežjo. Ko se je palica premaknila do prve označene črte, smo pričeli z meritvijo.

Naprava je nato v petih zaporednih pet sekundnih intervalih samodejno odrezala pet odrezkov dolžine približno 20 mm. MFI smo določili samo za granulat 822_2023_0215_01_1. Ohlajene odrezke smo stehali in izračunali njihovo povprečno maso (0,127 g), na podlagi katere je naprava izračunala končni rezultat $MFI = 15,24 \text{ g/10 min}$.

3.3.8 Optična mikroskopija

Optična mikroskopija je bila izvedena za vizualizacijo mikrostrukture vzorcev in analizo dolžin ter premerov vlaken. Postopek smo izvedli na FTPO z optičnim mikroskopom Keyence VHX 7000, ki je prikazan na sliki 21 in omogoča visokoločljivo slikanje površinskih struktur in analizo morebitnih pomanjkljivosti, kot so neenakomerno porazdeljena vlakna, poroznost, razpoke ali mikrorazpoke, neoprijemanje med vlakni in matrico.



Slika 21: Naprava Keyence VHX 7000

Za analizo dolžine ter premere vlaken pod različnimi povečavami (50 $\times$, 200 $\times$, 1000 $\times$) smo vzeli vzorce po zaključenem postopku TGA, ko je vzorec razpadel. Anorganske ostanke po analizi TGA smo prenesli na objektna stekelca in jih namestili na mikroskopsko mizico. Posnetke smo zajeli z uporabo integrirane programske opreme mikroskopa, ki omogoča natančne meritve dolžin, premerov in površinskih značilnosti posameznih vlaken.

Po analizi Charpy smo dodatno analizirali tudi prelomne površine vzorcev. Slike so bile zajete pri različnih povečavah (500 $\times$, 1500 $\times$) z namenom opazovanja stanja vlaken na prelomni površini in morebitnih razlik v morfologiji loma. Posnetke smo analizirali s programsko opremo mikroskopa, ki omogoča natančno merjenje dimenzij in beleženje opaženih značilnosti.

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Meritve mehanskih lastnosti

4.1.1 Natezni test

V prilogi 1 so na slikah od 33 do 38 podane krivulje nateznih testov za posamezne vzorce. Rezultati meritev so prikazani v tabeli 6, v kateri so zajete mehanske lastnosti, kot so natezni E modul, natezna trdnost ter pripadajoči raztezki.

Za vzorce 822_2023_0215_01_1 do 822_2023_0215_01_4 so bile izmerjene posamezne vrednosti, saj je bil za vsak vzorec opravljen po en preizkus.

Pri vzorcih 822_2023_0215_01 do 822_2023_0215_05 so navedene povprečne vrednosti, izračunane iz petih meritev. Vsi preizkusi so bili izvedeni skladno s standardom ISO 527-1.

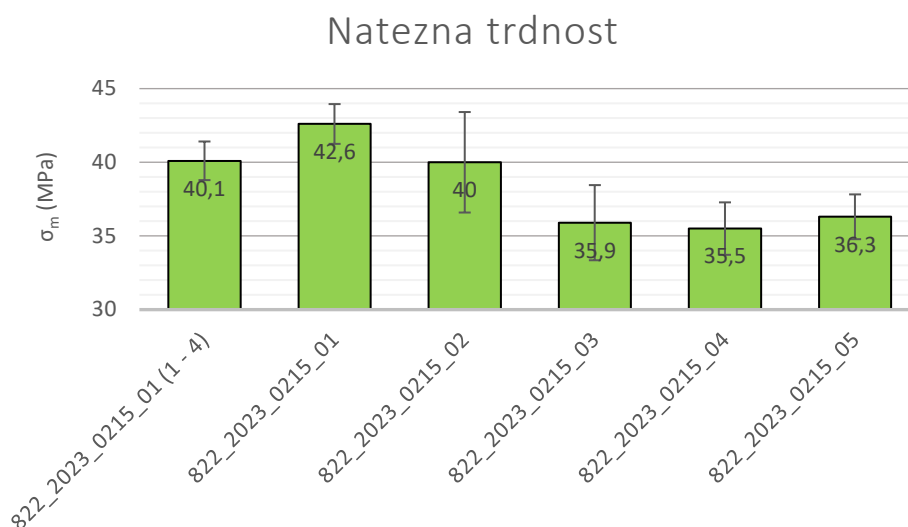
Tabela 6: Tabela za natezni test

Vzorec	E_t (GPa)	σ_m (MPa)	ϵ_m (%)	ϵ_{tb} (%)
822_2023_0215_01_1	2,5	38,5	4,2	7,0
822_2023_0215_01_2	2,1	41,5	3,5	5,2
822_2023_0215_01_3	2,2	39,7	3,3	9,0
822_2023_0215_01_4	2,2	40,8	4,5	6,5
822_2023_0215_01	$2,3 \pm 0,14$	$42,6 \pm 1,4$	$3,2 \pm 0,07$	$6,6 \pm 1,56$
822_2023_0215_02	$2,1 \pm 0,16$	$40,0 \pm 3,4$	$3,0 \pm 0,06$	$3,2 \pm 0,23$
822_2023_0215_03	$2,2 \pm 0,06$	$35,9 \pm 2,6$	$2,5 \pm 0,17$	$2,5 \pm 0,16$
822_2023_0215_04	$2,3 \pm 0,19$	$35,5 \pm 1,8$	$2,6 \pm 0,15$	$2,7 \pm 0,17$
822_2023_0215_05	$2,2 \pm 0,14$	$36,3 \pm 1,5$	$2,7 \pm 0,11$	$2,8 \pm 0,20$

Med vzorci 822_2023_0215_01_1 do 822_2023_0215_01_4, ki vsebujejo enak delež rGFRP (5 %) in 0,5 % SEBS, se je pokazal vpliv oblike granulata na mehanske lastnosti. Najvišji natezni E modul ($E_t = 2,54$ GPa) je dosegel vzorec 822_2023_0215_01_1, kar kaže na največjo togost materiala. Najvišjo natezno trdnost ($\sigma_m = 41,5$ MPa) je imel vzorec 822_2023_0215_01_2, medtem ko je vzorec 822_2023_0215_01_1 izkazal najnižjo trdnost ($\sigma_m = 38,5$ MPa). Razlike med vzorci so sicer relativno majhne (standardna deviacija (STD) = 1,31 MPa), vendar dovolj izrazite, da nakazujejo vpliv oblike granulata.

Vpliv sestave materiala na natezno trdnost je prikazan na sliki 22, kjer so podane povprečne vrednosti natezne trdnosti za združen vzorec 822_2023_0215_01 (1–4) ter za vzorce 822_2023_0215_01 do 822_2023_0215_05 skupaj s pripadajočimi STD. Združeni vzorec na sliki 24 (822_2023_0215_01 (1–4)) izkazuje natezno trdnost okoli 40 MPa, medtem ko ima vzorec 822_2023_0215_01 nekoliko višjo povprečno vrednost. Opaziti je, da se z naraščajočim deležem rGFRP natezna trdnost materiala postopno znižuje, in sicer iz vrednosti 42,6 MPa pri vzorcu 822_2023_0215_01 na 35,5–36,3 MPa pri vzorcih z višjo vsebnostjo vlaken. Kljub določenemu raztrosu

meritev, ki je razviden iz STD, je trend zniževanja natezne trdnosti jassen in ponovljiv, kar kaže na omejen prenos napetosti med rGFRP in ABS-matrico pri višjih deležih vlaken.



Slika 22: Grafični prikaz rezultatov natezne trdnosti

Raztezek pri pretrgu je bil najvišji pri vzorcu 822_2023_0215_01_3 ($\epsilon_{tb} = 8,95 \%$) in najnižji pri vzorcu 822_2023_0215_01_2 ($\epsilon_{tb} = 5,23 \%$), kar potrjuje večjo variabilnost (STD = 1,55 %). Ta je lahko posledica neenakomernega podajanja granulata v ekstruder in nepopolne porazdelitve rGFRP v ABS-matrici (slika 23).

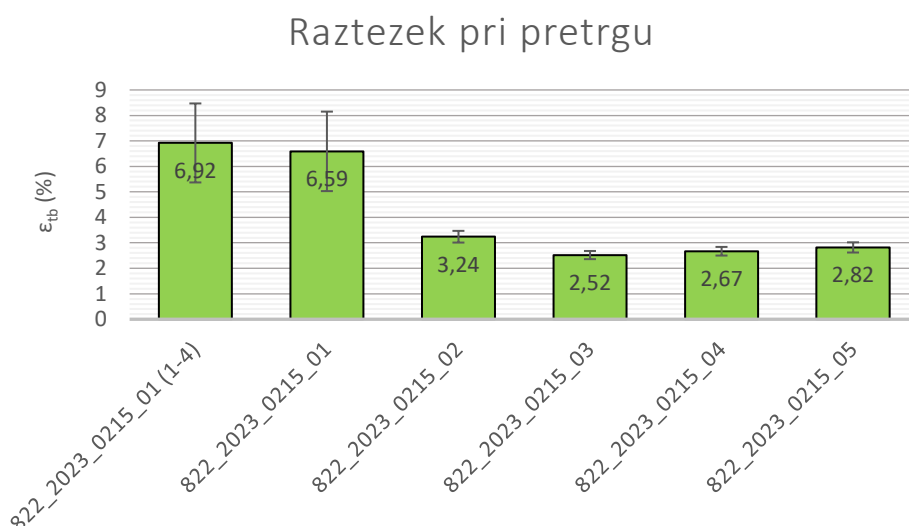
Rezultate nateznega testa je smiselno povezati z obnašanjem granulata med 3D tiskanjem. Granulat 1 (822_2023_0215_01_1) se je v polžu gibal enostavneje, kar je omogočalo stabilno podajanje delcev in posledično bolj homogeno porazdelitev rGFRP, kar se kaže v najvišjem modulu togosti. Granulat 2 (822_2023_0215_01_2) se je lažje talil in ekstrudiral ter omogočal zelo hitro tiskanje, vendar je zaradi oblike delcev prihajalo do predoziranja materiala in slabšega hlajenja, kar se lahko odrazi v manjši duktilnosti (nižji ϵ_{tb}). Granulat 3 (822_2023_0215_01_3) se je zatikal v območju ekstruderja (kar se je zaznalo tudi kot značilen zvok), kar je omejevalo hitrost tiskanja in povzročilo lokalne nehomogenosti v materialu. Granulat 4 (822_2023_0215_01_4) se je izkazal kot najmanj primeren, saj pri tiskanju ni bilo mogoče doseči stabilnih pogojev, kar se je odražalo tudi v manj konsistentnih mehanskih lastnostih.

Na podlagi dobljenih rezultatov in opažene predelovalnosti je bil za nadaljnje testiranje izbran vzorec 822_2023_0215_01_1, ki je izkazal najboljše razmerje med mehanskimi lastnostmi in stabilnostjo pri 3D tisku.

Vzorci 822_2023_0215_01 do 822_2023_0215_05 predstavljajo nadaljevanje raziskave vpliva vsebnosti rGFRP na mehanske lastnosti. Vzorec 822_2023_0215_01 (5 % rGFRP, 0,5 % SEBS) predstavlja povprečje petih meritev pri izbrani geometriji granulata 822_2023_0215_01_1. Trdnost je višja od posameznih meritev vzorcev

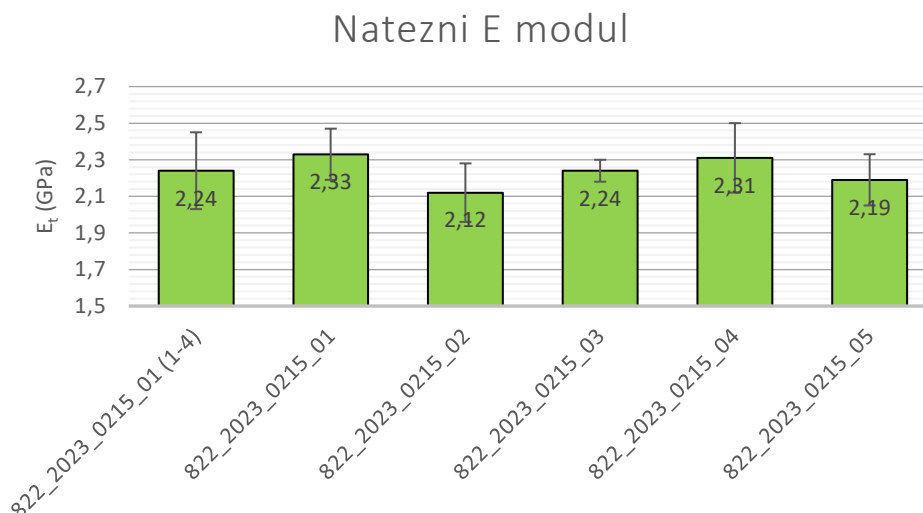
822_2023_0215_01_1 do 822_2023_0215_01_4, kar pripisujemo statistični variabilnosti in dejstvu, da gre tukaj za povprečje več ponovitev.

Pri vzorcih 822_2023_0215_02 do 822_2023_0215_05 se sistematično povečuje delež rGFRP (od 10 do 25 % rGFRP) in SEBS (od 1 do 2,5 %). Vrednosti natezne trdnosti se pri teh vzorcih znižujejo (od 40,0 do 35,5–36,3 MPa), raztezek pri pretrgu pa opazno pade (od 3,24 do 2,52–2,82 %), kar kaže na večjo krhkost kompozita. To je razvidno iz grafičnega prikaza na sliki 23.



Slika 23: Grafični prikaz rezultatov raztezka pri pretrgu

Natezni E modul ostane v območju od 2,12 do 2,31 GPa (slika 24), kar potrjuje, da visoki deleži rGFRP brez idealne disperzije ne prinesejo dodatne togosti. Pričakovano bi bilo, da več rGFRP poveča togost, vendar rezultati kažejo, da se modul praktično ne spreminja. To nakazuje, da učinkovitost prenosa napetosti z rGFRP na ABS-matrico ni optimalna, najverjetneje zaradi slabše disperzije in homogenosti. Hkrati se z večanjem deleža vlaken natezna trdnost sistematično zmanjšuje, kar potrjuje, da se v materialu povečuje krhkost in število iniciacijskih mest za porušitev.



Slika 24: Grafični prikaz rezultatov nateznega E modula

Skupno lahko zaključimo, da oblika granulata pomembno vpliva tako na predelovalnost pri 3D tisku kot na mehanske lastnosti končnega kompozita. Povečevanje vsebnosti rGFRP sicer zmanjša duktilnost in natezno trdnost, ne poveča pa togosti v pričakovani meri, kar nakazuje na omejitve uporabljenega postopka predelave in kakovosti disperzije rGFRP v ABS-matrico.

4.1.2 Upogibni test

V prilogi 2 so na slikah od 39 do 43 podane krivulje upogibnih testov za vsak vzorec posebej. Rezultati so povzeti v tabeli 7, v kateri so podane povprečne mehanske lastnosti vzorcev 822_2023_0215_01 do 822_2023_0215_05, in sicer upogibni E modul, maksimalna upogibna trdnost, upogibni raztezek pri maksimalni napetosti ter raztezek pri porušitvi.

Tabela 7: Tabela za upogibni test

Vzorec	E_f (GPa)	σ_{fM} (MPa)	ϵ_{fM} (%)	ϵ_{fB} (%)
822_2023_0215_01	$2,05 \pm 0,08$	$56,9 \pm 2,4$	$4,28 \pm 0,05$	$7,17 \pm 0,43$
822_2023_0215_02	$2,27 \pm 0,11$	$55,9 \pm 2,6$	$3,82 \pm 0,15$	$4,76 \pm 0,25$
822_2023_0215_03	$2,50 \pm 0,06$	$55,0 \pm 0,4$	$3,66 \pm 0,34$	$4,25 \pm 0,49$
822_2023_0215_04	$2,57 \pm 0,08$	$52,5 \pm 1,2$	$3,73 \pm 0,04$	$4,22 \pm 0,20$
822_2023_0215_05	$2,37 \pm 0,06$	$44,4 \pm 1,2$	$3,23 \pm 0,13$	$3,41 \pm 0,16$

Najvišjo maksimalno upogibno trdnost je dosegel vzorec 822_2023_0215_01 ($\sigma_{fM} = 56,86$ MPa; $E_f = 2,05$ GPa), ki vsebuje 5 % rGFRP in 0,5 % SEBS. Rezultat kaže na dobro ravnoesje med togostjo in duktilnostjo kompozita. Vzorec 822_2023_0215_02 (10 % rGFRP, 1 % SEBS) je kljub višji vsebnosti ojačitve dosegel nekoliko nižjo maksimalno upogibno trdnost ($\sigma_{fM} = 55,85$ MPa), kar bi lahko nakazovalo na manjšo enakomernost porazdelitve vlaken ali začetne napake v strukturi. Z nadaljnjim povečevanjem deleža vlaken (od 15 do 25 % rGFRP pri vzorcih 822_2023_0215_03

do 822_2023_0215_05) se maksimalna upogibna trdnost postopno znižuje od 54,95 MPa pri vzorcu 822_2023_0215_03 do 44,37 MPa pri vzorcu 822_2023_0215_05. STD so bile pri vseh vzorcih nizke (STD = 0,39 do 2,58 MPa), kar potrjuje dobro ponovljivost meritev in stabilnost postopka.

Upogibni E modul se med serijami razlikuje manj izrazito. Začetna vrednost pri vzorcu 822_2023_0215_01 je bila 2,05 GPa, nato se je z višjimi deleži rGFRP povečala do 2,57 GPa pri 822_2023_0215_04, pri najvišjem deležu (822_2023_0215_05) pa se je ponovno znižala na 2,37 GPa. Ta trend nakazuje, da dodatek rGFRP do določene mere prispeva k povečanju togosti, vendar pri najvišjih koncentracijah učinek oslabi, kar je verjetno posledica slabše disperzije rGFRP in nastanka napak v matrici. STD so bile nizke (STD = 0,06 do 0,11 GPa), kar potrjuje zanesljivost meritev.

Raztezki pri maksimalni upogibni trdnosti in pri porušitvi se z naraščajočo vsebnostjo rGFRP zmanjšujejo. Vzorec 822_2023_0215_01 je dosegel najvišji raztezek pri porušitvi (7,17 %), kar nakazuje na večjo duktilnost materiala pri najnižjem deležu rGFRP. Že pri vzorcu 822_2023_0215_02 vrednost pade na 4,76 %, nato se pri vzorcih 822_2023_0215_03 in 822_2023_0215_04 stabilizira na okoli 4,2 do 4,3 %, medtem ko doseže najnižjo vrednost 3,41 % pri 822_2023_0215_05. STD raztezkov so bile nizke (STD = 0,04 do 0,49 %), kar potrjuje zanesljivost rezultatov. Nekoliko višja variabilnost se pojavi pri vzorcu 822_2023_0215_03, kjer STD pri raztezu pri porušitvi znaša 0,49 %, kar lahko nakazuje na manj homogeno porazdelitev rGFRP. Opažen trend večje variabilnosti pri vmesnih deležih in bolj enotnih lastnosti pri višjih deležih je skladen z rezultati nateznega testa.

Sklepno lahko rečemo, da upogibni test potrjuje ugotovitve nateznega testa: z višjimi deleži rGFRP se mehanske lastnosti materiala slabšajo v smislu trdnosti in duktilnosti, medtem ko se togost poveča le do določene meje, nato pa rahlo upade. To potrjuje, da dodatek rGFRP v ABS-matrico brez optimalne disperzije in medfazne adhezije ne omogoča učinkovitega prenosa napetosti, kar omejuje mehansko učinkovitost kompozita. Na podlagi dobljenih rezultatov lahko sklepamo, da so vzorci z višjim deležem ABS-matrice in nižjim deležem rGFRP (npr. 822_2023_0215_01) primernejši za aplikacije, pri katerih sta ključna višja upogibna trdnost in večja duktilnost.

4.1.3 Udarna žilavost po Charpyju

Rezultati udarne žilavosti, prikazani v tabeli 8, kažejo opazno zmanjševanje odpornosti materiala proti udarcem z naraščajočo vsebnostjo rGFRP in elastomera SEBS. Najvišjo vrednost (14,62 kJ/m²) je dosegel vzorec 822_2023_0215_01 (94,5 % ABS Polylac, 5 % rGFRP, 0,5 % SEBS), kar kaže na ugodno razmerje med togostjo, trdnostjo in sposobnostjo absorpcije udarne energije, pri čemer nizka vsebnost polnila in ojačitvenih komponent omogoča večjo duktilnost materiala.

Tabela 8: Charpy test – udarna žilavost – zbrani rezultati

Vzorec	Udarna žilavost (kJ/m ²)	Standardna deviacija (kJ/m ²)
822_2023_0215_01	14,6	1,4
822_2023_0215_02	11,6	2,2
822_2023_0215_03	11,0	1,9
822_2023_0215_04	9,2	1,4
822_2023_0215_05	7,6	0,8

Z naraščajočim deležem rGFRP (do 25 %) in SEBS (do 2,5 %) pri vzorcu 822_2023_0215_05 je udarna žilavost znatno upadla na 7,64 kJ/m². To potrjuje, da višji delež rGFRP sicer poveča togost in natezno trdnost, vendar hkrati zmanjša sposobnost materiala, da absorbira udarno energijo brez loma. rGFRP delujejo kot togi ojačitveni elementi, ki povečajo krhkost, medtem ko povečana vsebnost SEBS ne zadošča za učinkovito kompenzacijo tega učinka. Vzrok je verjetno v slabši disperziji ali nezadostni adheziji med fazami.

Posebej izrazit je padec med vzorcema 822_2023_0215_01 in 822_2023_0215_02, kjer se z zvišanjem vsebnosti rGFRP s 5 % na 10 % in SEBS z 0,5 % na 1 % vrednost udarne žilavosti zmanjša za približno 21 %. To kaže, da že zgodnje povečanje toge faze pomembno vpliva na obnašanje kompozita pri udarnih obremenitvah. Nadaljnje zmanjševanje vrednosti pri vzorcih 822_2023_0215_03, 822_2023_0215_04 in 822_2023_0215_05 sledi istemu trendu ter potrjuje pomen mikrostrukturne homogenosti in ravnovesja med duktilnostjo ter trdnostjo.

STD rezultatov so bile nizke (0,77 do 2,21 kJ/m²), kar potrjuje dobro ponovljivost meritev. Nekoliko večja variabilnost pri vzorcih 822_2023_0215_02 (STD = 2,21 kJ/m²) in 822_2023_0215_03 (STD = 1,89 kJ/m²) lahko nakazuje na manj homogeno porazdelitev rGFRP v teh serijah, medtem ko so bile vrednosti pri vzorcih 822_2023_0215_04 in 822_2023_0215_05 bolj enotne. Opažen trend je skladen z rezultati nateznega in upogibnega testa, kjer so imeli vzorci z vmesnimi deleži rGFRP prav tako večje sipanje lastnosti, pri višjih deležih pa so se lastnosti stabilizirale.

Sklepno lahko povzamemo, da udarni test potrjuje trende, opažene pri nateznem in upogibnem testu. Višji deleži rGFRP povečajo togost, vendar bistveno zmanjšajo duktilnost in žilavost, kar vodi do krhkejšega obnašanja kompozita. Vzorci z nižjimi deleži rGFRP in večjim deležem ABS-matrice (npr. 822_2023_0215_01) se zato izkažejo kot primernejši za aplikacije, pri katerih je ključna večja odpornost proti udarcem.

4.1.4 Dinamična mehanska analiza

V prilogi 3 so na slikah od 44 do 48 podane krivulje analize DMA za vsak vzorec posebej. Rezultati so zbrani v tabeli 9, v kateri so podane vrednosti dinamičnega modula E', modula izgub E'', temperature T_g, temperature vrha tan δ ter maksimalne vrednosti tan δ.

Tabela 9: DMA – zbrani rezultati

Vzorec	Dinamični E modul pri 30°C (GPa)	HDT pri 500 MPa (°C)	E" (GPa)	Tan delta (°C)	Tan delta (-)
822_2023_0215_01_1	1,71	111,6	1,44 (pri 97,2 °C)	117,9	1,461
822_2023_0215_01_2	1,72	111,9	1,46 (pri 98,8 °C)	118,5	1,600
822_2023_0215_01_3	1,71	111,1	1,34 (pri 97,6 °C)	118,1	1,620
822_2023_0215_01_4	1,71	111,1	1,30 (pri 94,2 °C)	118,3	1,426
822_2023_0215_02	0,76	93,2	0,55 (pri 85,0 °C)	110,2	1,608
822_2023_0215_03	0,74	95,0	0,55 (pri 87,4 °C)	110,6	1,597
822_2023_0215_04	0,96	98,0	0,69 (pri 86,3 °C)	110,1	1,544
822_2023_0215_05	0,81	92,3	0,56 (pri 80,6 °C)	109,7	1,616

Rezultati kažejo, da so vzorci 822_2023_0215_01_1 do 822_2023_0215_01_4 dosegli najvišje vrednosti dinamičnega E modula pri 30 °C in najvišje vrednosti HDT. Njihov dinamični E modul se je z višanjem temperature zniževal počasneje, kar nakazuje na boljšo toplotno stabilnost in boljšo medfazno adhezijo med ABS-matrico in rGFRP. Najvišjo togost in temperaturno stabilnost je dosegel vzorec 822_2023_0215_01_2 (1,72 GPa pri 30 °C; 1,46 GPa pri 98,79 °C), kar potrjuje optimalno razmerje med disperzijo rGFRP in vsebnostjo elastomera SEBS.

Pri vzorcih 822_2023_0215_02 do 822_2023_0215_05 so bile izmerjene bistveno nižje vrednosti dinamičnega E modula (0,96–0,74 GPa pri 30 °C), ki se v bližini steklastega prehoda dodatno znižajo na 0,69–0,55 GPa. S tem se hkrati znižajo tudi temperature držanja oblike (98–92 °C), kar pomeni zmanjšano temperaturno stabilnost materiala.

Poleg glavnega maksimuma tan δ , ki označuje steklasti prehod, je bilo pri nekaterih vzorcih opaziti še manjši hribček v območju med 80 °C in 90 °C. Ta pojav verjetno izvira iz sproščanja notranjih napetosti, ki so nastale med postopkom 3D tiskanja zaradi neenakomernega ohlajanja plasti oz. še bolj verjetno zaradi steklastega prehoda matrice rGFRP. Pri segrevanju v testu DMA se te napetosti delno sprostijo, kar se odrazi kot povečano dušenje oziroma sekundarni maksimum tik pod temperaturo T_g .

Vrednosti faktorja izgub so bile pri vzorcih 822_2023_0215_02 do 822_2023_0215_05 nekoliko višje (1,54–1,62) kot pri seriji 822_2023_0215_01_1 do 822_2023_0215_01_4 (1,43–1,62), hkrati pa se njihov maksimum pojavlja pri nižjih temperaturah. To kaže, da povečana vsebnost SEBS sicer izboljša sposobnost notranjega dušenja in absorpcijo mehanske energije, vendar zmanjša togost in temperaturno odpornost kompozita.

Sklepno lahko rečemo, da DMA potrjuje rezultate nateznega in upogibnega testa: vzorci z nižjim deležem rGFRP (5 %) in manjšim deležem SEBS (0,5 %) ohranjajo višjo togost, večjo temperaturno stabilnost (višji E' , T_g in HDT) ter bolj uravnotežene mehanske lastnosti. Pri višjih deležih vlaken in SEBS pa se toplotna stabilnost

zmanjša, material pa kaže večje notranje dušenje in večjo krhkost. Serija 822_2023_0215_01_1 do 822_2023_0215_01_4 je izkazala najbolj uravnotežene lastnosti med togostjo, elastičnostjo in temperaturno stabilnostjo, saj je pri enaki sestavi dosegla najvišje in najbolj ponovljive vrednosti.

4.2 Meritve toplotnih lastnosti

4.2.1 Termogravimetrična analiza

V prilogi 4 so na slikah od 49 do 56 podane krivulje analize TGA za vsak vzorec posebej. V tabeli 10 so zbrane vrednosti temperature degradacije, delež razpada, saj ter ostanka.

Tabela 10: Tabela za TGA

Vzorec	T _{dt} (°C)	Razpad 1 (%)	Saje (%)	Ostanek (%)
822_2023_0215_01_1	422,8	96,0	1,5	2,5
822_2023_0215_01_2	422,2	95,8	1,5	2,7
822_2023_0215_01_3	421,7	96,3	1,5	2,3
822_2023_0215_01_4	422,7	94,1	1,8	4,0
822_2023_0215_02	420,1	90,3	4,6	5,1
822_2023_0215_03	420,0	88,6	3,1	8,3
822_2023_0215_04	420,0	85,4	2,4	12,2
822_2023_0215_05	420,4	82,6	2,1	15,3

Rezultati kažejo, da so imeli vzorci 822_2023_0215_01_1 do 822_2023_0215_01_3 zelo podobne vrednosti začetne temperature razpada in deleža ostankov po razpadu. To potrjuje, da oblika granulata pri enaki sestavi ne vpliva bistveno na termično stabilnost ABS-matrice. Vzorec 822_2023_0215_01_4 pa je nekoliko odstopal z višjim ostankom (4,04 %) in nižjim deležem razpada. Takšno odstopanje je lahko posledica manj homogene disperzije rGFRP v matrici, lokalno večje vsebnosti rGFRP zaradi variabilnosti pri kompavndiranju ali pa eksperimentalne variabilnosti pri samem testu TGA.

Pri vzorcih 822_2023_0215_02 do 822_2023_0215_05, kjer se povečujeta delež rGFRP (10–25 %) in SEBS (1–2,5 %), se je glavna degradacija materiala pri vseh pojavila pri približno 420 °C in predstavlja večino mase matrice. Dodatek rGFRP in SEBS ne vplivata bistveno na temperaturo degradacije, vplivata pa na količino ostanka po razpadu, ki se z naraščajočim deležem rGFRP izrazito povečuje. Izmerjene vrednosti so nekoliko nižje od dodanega deleža rGFRP, ker med testom TGA razpade tudi matrica rGFRP. Iz rezultatov lahko zaključimo, da je v rGFRP med 50 % in 60 % steklenih vlaken.

Sklepno lahko zapišemo, da TGA potrjuje dobro toplotno stabilnost vseh vzorcev, saj se glavna degradacija pojavi pri približno 420 °C. Dodatek rGFRP in kompatibilizatorja bistveno ne vpliva na temperaturo degradacije matrice, vpliva pa na količino ostanka,

ki narašča z večanjem deleža vlaken. To potrjuje, da TGA analiza učinkovito potrjuje prisotnost in količino anorganskega polnila, medtem ko termična stabilnost ABS-matrice ostaja praktično nespremenjena.

4.2.2 Diferenčna dinamična kalorimetrija

V prilogi 5 so na slikah od 57 do 64 podane krivulje testov DSC za posamezne vzorce. Rezultati so prikazani v tabelah 10-12, v katerih so podane vrednosti temperatur taljenja in temperatur kristalizacije, entalpij taljenja in kristalizacije, T_g ter sprememb toplotne kapacitete.

Tabela 11: Tabela za DSC

VZOREC	1. SEGREVANJE – Segment 2			
	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	T_g (°C)	ΔC_p (J/gK)
822_2023_0215_01_1	138,0	1,31	105,1	0,214
822_2023_0215_01_2	138,0	1,33	104,5	0,049
822_2023_0215_01_3	132,6	1,66	105,1	0,105
822_2023_0215_01_4	139,0	1,79	106,3	0,174
822_2023_0215_02	137,6	1,97	103,5	0,142
822_2023_0215_03	137,7	1,79	104,4	0,231
822_2023_0215_04	137,0	1,52	102,9	0,150
822_2023_0215_05	137,3	1,34	103,4	0,090

Tabela 11 prikazuje rezultate prvega segrevanja. Pri vseh vzorcih je bilo opaženo taljenje v območju 132–139 °C. Vrednosti entalpije taljenja ($\Delta H_m \approx 1,3$ – $1,9$ J/g) so relativno nizke, kar je značilno za amorfne polimere, kot je ABS, kjer kristaliničnost praktično ne nastopa. Zaznana tališča izvirajo predvsem iz faze SAN (akrilonitril stiren). Temperature steklastega prehoda se med vzorci razlikujejo le rahlo; vzorci z višjim deležem SEBS imajo nekoliko nižji T_g , kar kaže na povečano gibljivost polimernih verig. Dodatek rGFRP ta učinek delno omeji, kar se odraža v nižjih spremembah toplotne kapacitete ($\Delta C_p \approx 0,05$ – $0,25$ J/gK).

Tabela 12: Tabela za DSC

VZOREC	1. OHLAJANJE – Segment 4			
	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	T_g (°C)	ΔC_p (J/gK)
822_2023_0215_01_1	120,8	1,04	102,6	0,049
822_2023_0215_01_2	120,5	1,21	100,5	0,103
822_2023_0215_01_3	120,2	1,30	101,3	0,079
822_2023_0215_01_4	118,2	1,32	99,5	0,080
822_2023_0215_02	121,6	1,82	100,1	0,042

VZOREC	1. OHLAJANJE – Segment 4			
822_2023_0215_03	121,2	1,34	101,4	0,046
822_2023_0215_04	121,0	1,25	100,6	0,032
822_2023_0215_05	119,8	1,00	100,5	0,036

Pri ohlajanju (tabela 12) so bile temperature kristalizacije (T_c) v območju 118–121 °C, $\Delta H_c \approx 1,00$ –1,82 J/g (najvišja pri vzorcu 822_2023_0215_02). T_g med ohlajanjem je ≈ 99 –102 °C, kar je nekoliko nižje kot pri prvem segrevanju (učinek sproščanja toplotne zgodovine in notranjih napetosti). ΔC_p ob T_g je $\approx 0,032$ –0,103 J/gK; trend nižjih ΔC_p pri višjih deležih rGFRP potrjuje omejevanje segmentne gibljivosti zaradi toge (vlakenske) faze.

Tabela 13: Tabela za DSC

VZOREC	2. SEGREVANJE – Segment 6			
	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	T_g (°C)	ΔC_p (J/gK)
822_2023_0215_01_1	139,3	1,42	106,2	0,162
822_2023_0215_01_2	139,3	1,57	106,2	0,138
822_2023_0215_01_3	139,2	1,58	105,9	0,169
822_2023_0215_01_4	141,7	1,69	107,1	0,182
822_2023_0215_02	138,9	1,99	104,6	0,182
822_2023_0215_03	139,0	1,78	105,1	0,322
822_2023_0215_04	138,3	1,63	103,9	0,178
822_2023_0215_05	139,5	1,51	104,6	0,131

Pri drugem segrevanju (tabela 13) so bile temperature taljenja (T_m) podobne kot pri prvem segrevanju (≈ 138 –141 °C), entalpije taljenja (ΔH_m) pa so se gibale med 1,4 in 1,9 J/g. T_g so bile rahlo višje (≈ 104 –107 °C) kot pri prvem segrevanju, kar kaže na stabilizacijo amorfnе faze po izničenju toplotne zgodovine. ΔC_p je $\approx 0,131$ –0,322 J/gK; najvišjo vrednost izmeri vzorec 822_2023_0215_03 ($\approx 0,322$ J/gK), kar nakazuje, da se pri vmesnem deležu rGFRP prispevek SEBS k elastičnosti in notranjem dušenju izrazi najizraziteje (ravnovesje med mehčalnim učinkom SEBS in togostnim učinkom rGFRP).

DSC potrjuje pretežno amorfen značaj kompozitov ABS/SEBS/rGFRP. SEBS povečuje gibljivost in ΔC_p (disipativni odziv), rGFRP pa jo omejuje (nižji ΔC_p , višja togost), zato o opazovanem ΔC_p in T_g odloča ravnovesje med obema fazama. Temperature in entalpije taljenja ostajajo nizke in med vzorci primerljive (SAN-faza), kar kaže, da dodatki nimajo bistvenega vpliva na talilno obnašanje. Rezultati so skladni z DMA in mehanskimi testi: z naraščajočim deležem rGFRP se sistem vede bolj togo in manj duktilno, učinek SEBS pa se pokaže v višjem ΔC_p in večjem notranjem dušenju, posebej pri 1. segrevanju in pri vmesnih vsebnostih rGFRP.

4.3 Meritve reoloških lastnosti

4.3.1 Indeks tečenja taline

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati MFI za izbrani granulat. Namen analize je bil oceniti talilno fluidnost materiala pri predelovalnih pogojih in s tem napovedati njegovo procesno obnašanje med 3D tiskanjem. Izmerjena vrednost MFI je podana v tabeli 14.

Tabela 14: MFI test – zbrani rezultati

	822_2023_0215_01_1
MFI (g/10 min)	15,24

Dobljeni rezultat se uvršča v tipičen razpon za ABS, ki znaša približno 10–20 g/10 min (pri 220 °C, 10 kg). To potrjuje, da ima uporabljena sestava zadostno talilno fluidnost za stabilno ekstruzijo in nadaljnje 3D tiskanje.

Relativno visoka vrednost MFI pomeni, da material pri obdelovalni temperaturi izkazuje nižjo navidezno viskoznost, kar omogoča enakomerno podajanje granulata v ekstruder. To potrjuje tudi dobro procesno obnašanje vzorca 822_2023_0215_01_1, opazovano med tiskanjem.

Vrednost MFI smo uporabili kot izhodiščni podatek za določitev procesnih parametrov (temperatura, hitrost podajanja) pri 3D tiskanju. Vendar je treba poudariti omejitve: ker se delež rGFRP in SEBS med granulati razlikuje, MFI za 822_2023_0215_01_1 ni neposredno prenosljiv na ostale formulacije. Pri materialih z višjim deležem rGFRP lahko pričakujemo nižji efektivni pretok (večjo navidezno viskoznost), zato smo končno optimizacijo parametrov izvedli empirično na tiskalniku.

4.4 Meritve morfoloških lastnosti

4.4.1 Optična mikroskopija

V prilogi 6 so na slikah od 65 do 76 prikazane značilne slike optične mikroskopije ostankov po TGA. Optično mikroskopijo smo izvedli na vzorcih 822_2023_0215_02 do 822_2023_0215_05, kjer se vsebnost rGFRP postopno povečuje od 10 do 25 %. Vzorci serije 822_2023_0215_01 (01_1 do 01_4) so sicer po analizi TGA pokazali ostanek 2–4 %, kar potrjuje prisotnost steklenih vlaken, vendar je bil delež prenizek, da bi bile meritve dolžine in premera vlaken reprezentativne. Zato so bile nadaljnje analize osredotočene na vzorce 822_2023_0215_02 do 822_2023_0215_05.

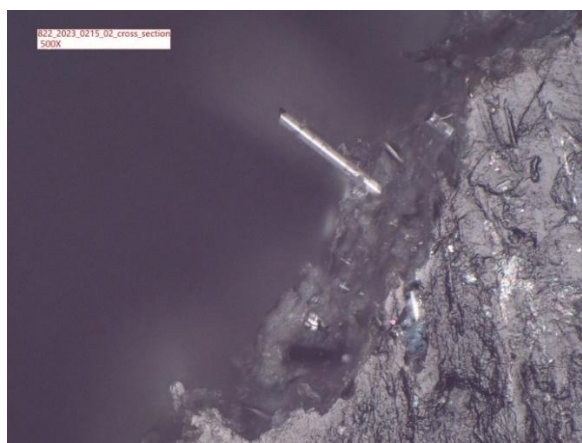
Rezultati meritev so zbrani v tabeli 15. Povprečne dolžine steklenih vlaken so se gibale med 296 µm (vzorec 822_2023_0215_04) in 380 µm (vzorec 822_2023_0215_05). Posamezna vlakna so dosegla skoraj 950 µm, kar potrjuje, da so se daljša vlakna delno ohranila tudi po procesiranju. Minimalne izmerjene vrednosti (80–110 µm) kažejo, da je med predelavo prišlo do fragmentacije vlaken zaradi strižnih napetosti v

ekstruderju. Povprečni premeri vlaken so bili precej konstantni (16–18 μm), kar je skladno s tipičnimi dimenzijami steklenih vlaken. STD pri dolžinah so bili višji (170–210 μm), kar nakazuje heterogeno porazdelitev vlaken in naključnost razpada, medtem ko so bili pri premerih nizki (≈ 4 –6 μm), kar potrjuje enakomerno debelino vlaken.

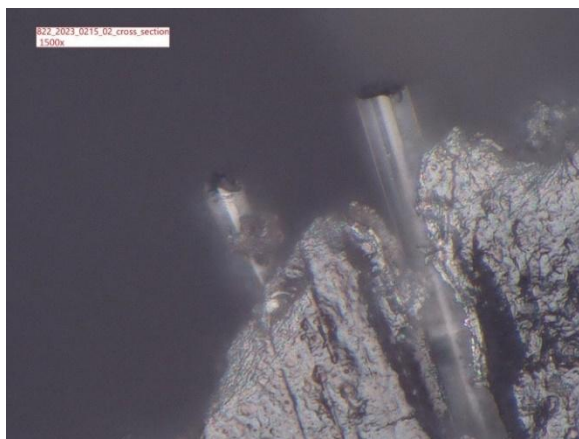
Tabela 15: Rezultati optične mikroskopije steklenih vlaken po TGA (dolžina in premer vlaken)

	Max	Min	AVG	STD
822_2023_0215_02 dolžina (μm)	717	82	300	169
822_2023_0215_03 dolžina (μm)	760	63	309	209
822_2023_0215_04 dolžina (μm)	709	107	297	199
822_2023_0215_05 dolžina (μm)	950	109	380	200
822_2023_0215_02 premer (μm)	25,0	11,2	17,6	4
822_2023_0215_03 premer (μm)	23,5	10,8	17,6	5
822_2023_0215_04 premer (μm)	31,2	12,0	17,7	6
822_2023_0215_05 premer (μm)	26,8	11,9	16,7	5

Za oceno omočenosti rGFRP v ABS-matrici smo analizirali prečne preseke preizkušancev po preizkusu Charpy pri povečavah 500 $\times$ in 1500 $\times$. V nadaljevanju so predstavljene slike (slike 25–32) za vsak vzorec, nato pa interpretacija opažanj.

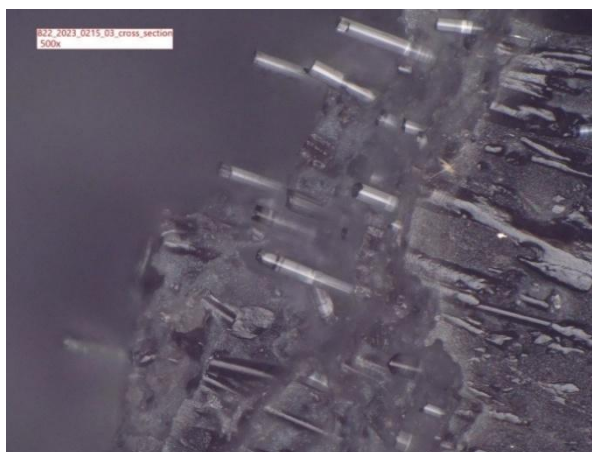


Slika 25: Prečni prerez vzorca 822_2023_0215_02 pri povečavi 500 $\times$

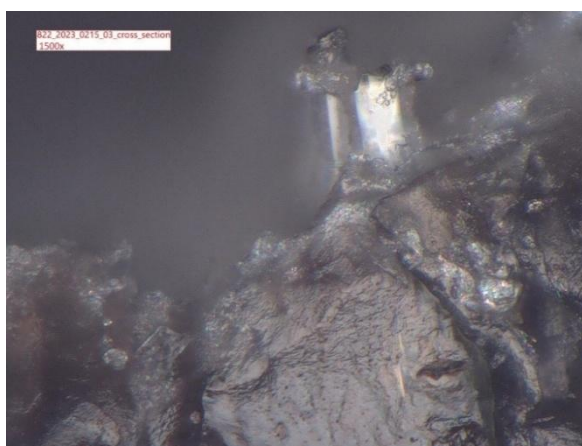


Slika 26: Prečni prerez vzorca 822_2023_0215_02 pri povečavi 1500×

V vzorcu 822_2023_0215_02 je stik vlakno–matrica najboljši med analiziranimi vzorci. Prisotne so lokalne praznine, vendar manj izrazite kot pri vzorcih z večjim deležem rGFRP.

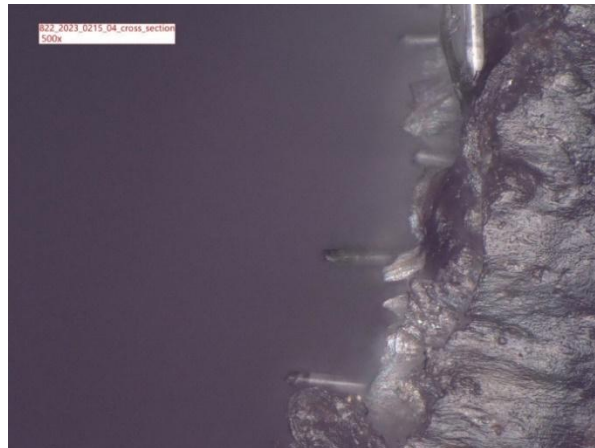


Slika 27: Prečni prerez vzorca 822_2023_0215_03 pri povečavi 500×

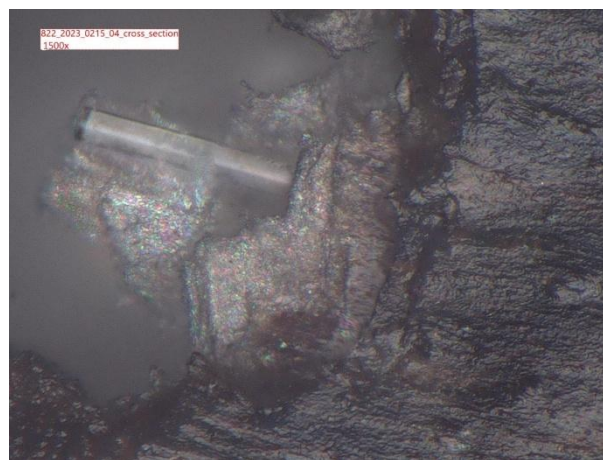


Slika 28: Prečni prerez vzorca 822_2023_0215_03 pri povečavi 1500×

Pri vzorcu 822_2023_0215_03 je več praznin okoli vlaken, kar nakazuje šibkejšo medfazno adhezijo in posledično slabši prenos napetosti z matrice na vlakna.

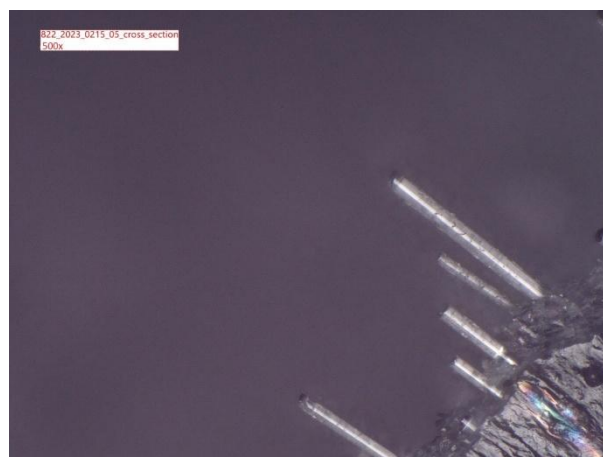


Slika 29: Prečni prerez vzorca 822_2023_0215_04 pri povečavi 500×



Slika 30: Prečni prerez vzorca 822_2023_0215_04 pri povečavi 1500×

Praznine so izrazite pri 822_2023_0215_04, stik vlakno–matrica je slabši, kar je skladno tudi z nekoliko nižjimi mehanskimi lastnostmi.



Slika 31: Prečni prerez vzorca 822_2023_0215_05 pri povečavi 500×



Slika 32: Prečni prerez vzorca 822_2023_0215_05 pri povečavi 1500×

Za vzorec 822_2023_0215_05 je opažena heterogena kombinacija dobro omočenih in slabo omočenih vlaken, kar odraža kompleksno mikrostrukturo pri najvišjem deležu rGFRP.

Pričakovano bi bilo, da bi uporaba kompatibilizatorja SEBS izboljšala adhezijo med fazama, vendar slike kažejo, da je bil njegov učinek omejen – kar delno pojasnjuje manj izrazito izboljšanje mehanskih lastnosti pri višjih vsebnostih rGFRP.

Optična mikroskopija potrjuje trende, opažene pri TGA in mehanskih testih: z večanjem deleža rGFRP se poveča količina ostanka in povprečna dolžina rGFRP, vendar se pri višjih vsebnostih pojavijo težave z omočenostjo rGFRP v ABS-matrici. To omejuje učinkovit prenos napetosti in pojasnjuje, zakaj večji delež rGFRP ni prinesel sorazmernega izboljšanja mehanskih lastnosti. Treba je poudariti, da optična mikroskopija omogoča le kvalitativno oceno omočenosti, saj gre za vizualno metodo; natančnejša analiza interakcij med fazami bi zahtevala vrstično elektronsko mikroskopijo (SEM).

5 SKLEP

V diplomskem delu smo raziskovali vpliv oblike in velikosti granulata ter deleža rGFRP na lastnosti 3D tiskanih termoplastičnih kompozitov na osnovi ABS. Osrednji cilj je bil preveriti, kako različna priprava granulata in vsebnost rGFRP vplivata na mehanske, termične in morfološke lastnosti izdelkov ter njihovo primernost za 3D tisk.

Rezultati so pokazali, da oblika in velikost granulata ne vplivata bistveno na termično stabilnost, kar so potrdile analize TGA in DSC. Vsi vzorci so imeli glavni razpad pri približno 420 °C, pri čemer dodatek rGFRP in kompatibilizatorja ni pomembno vplival na temperaturo degradacije. DSC je pokazal značilne prehode ABS-matrice, pri čemer so bile razlike med vzorci majhne in brez jasnega trenda, povezanega z obliko granulata.

Pri mehanskih lastnostih se je potrdilo, da večji delež rGFRP vpliva na spremembo obnašanja kompozita. V nateznem testu so vzorci z višjimi vsebnostmi rGFRP pokazali večjo togost in višji natezni E modul, medtem ko je natezna trdnost pri višjih deležih rGFRP začela upadati. Podobno je bilo pri upogibnem testu, kjer so rezultati nakazali izboljšanje togosti, ne pa tudi sorazmernega povečanja trdnosti. Preizkus udarne žilavosti je pokazal, da so višji deleži rGFRP vodili k nižji žilavosti, kar je posledica slabšega prenosa napetosti z matrice na rGFRP in možne slabše omočenosti.

Analiza optične mikroskopije ostankov po TGA je potrdila, da so se vlakna med procesiranjem delno skrajšala, povprečne dolžine pa so se gibale med 296 in 380 µm, kar je približno tretjina do polovica dolžin, ki jih navaja proizvajalec. Premeri vlaken so ostali konstantni (≈16–18 µm), kar potrjuje, da procesiranje bistveno ne vpliva na geometrijo preseka. Na presečnih slikah po testih Charpy so bila opažena vlakna večinoma slabo omočenih površin, pogosto z jasno ločitvijo od matrice in prazninami okoli njih. Le pri vzorcu 822_2023_0215_02 je bil stik nekoliko boljši, medtem ko so višji deleži vlaken kazali izrazitejšo težavo z omočenostjo. To pojasnjuje, zakaj povečanje deleža vlaken ni vedno prineslo sorazmernega izboljšanja mehanskih lastnosti.

Hipoteze, postavljene na začetku, so bile delno potrjene. Višji delež rGFRP je res izboljšal togost, ni pa izboljšal žilavosti in trdnosti v pričakovani meri. Natezna trdnost se je z naraščajočim deležem rGFRP zmanjšala iz približno 42,6 MPa na 35–36 MPa, raztezek pri pretrgu pa iz približno 6,6 % na približno 2,5–2,8 %. Spremembe v obliki in velikosti granulata niso bistveno vplivale na termično stabilnost, kar potrjuje podoben potek razgradnje pri vseh vzorcih (okoli 420 °C), so pa vplivale na proces 3D tiskanja, saj so se pri večjih granulah pojavljale težave z zamašitvijo šobe in neenakomernim tokom materiala. V zvezi z optičnim videzom izdelkov se je izkazalo, da je najboljše rezultate dajala kombinacija granulata srednje velikosti (vzorec 822_2023_0215_01_1), ki je omogočila stabilen pretok in enakomernejši nanos materiala.

Omejitve raziskave so bile povezane predvsem z nepopolno homogenostjo pri kompavndiranju in z možnostjo, da optična mikroskopija ne poda popolne slike omočenosti vlaken. Za bolj natančno oceno bi bila potrebna analiza SEM, ki bi omogočila jasnejši vpogled v interakcijo med fazama.

Sklepno lahko povzamemo, da rGFRP v ABS-matrici predstavljajo obetaven dodatek za povečanje togosti 3D tiskanih kompozitov, vendar se njihova učinkovitost omeji zaradi slabše omočenosti in lomljenja vlaken med procesiranjem. Udarne žilavost se je z naraščajočim deležem rGFRP zmanjšala iz 14,6 kJ/m² na 7,6 kJ/m², kar potrjuje večjo krhkost materiala pri višjih deležih vlaken. Najbolj uravnoteženo kombinacijo lastnosti je pokazal vzorec 822_2023_0215_02, pri katerem je bila dosežena dobra togost ob še sprejemljivih drugih lastnostih. Nadaljnje raziskave bi morale biti usmerjene v izboljšanje omočenosti rGFRP s prilagoditvijo vrste in količine kompatibilizatorja ter v optimizacijo procesnih parametrov 3D tiskanja, da bi se čim bolj zmanjšale pomanjkljivosti, opažene pri višjih deležih rGFRP.

SEZNAM LITERATURE IN VIROV

- [1] S. Dul, L. Fambri, A. Pegoretti, Fused deposition modeling with ABS-graphene nanocomposites, *Compos. PART A*. (2016). <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.03.013>.
- [2] T. Rayna, L. Striukova, From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation, *Technol. Forecast. Soc. Chang.* (2015). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.023>.
- [3] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, Additive manufacturing technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, 2018.
- [4] M. Reich J., A. Woern L., N. Tanikella G., J. Pearce M., Mechanical Properties and Applications of Recycled Polycarbonate Particle Material Extrusion-Based Additive Manufacturing, *MDPI*. 54 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12101642>.
- [5] T. Muck, I. Križanovskij, 3D-tisk, Pasadena, Ljubljana, 2015.
- [6] Ivan Anžel, Jože Balič, Oki Blatnik, Franc Čuš, Igor Drstvenšek, Mirko Ficko, Janez Grum, Niko Herakovič, et al., *Moderno proizvodno inženirstvo*, 2010.
- [7] A. Chapman, The complete history of 3D printing, (2022) 1–8. <https://ultimaker.com/learn/the-complete-history-of-3d-printing/> (accessed October 6, 2024).
- [8] 3D Printing, *Encycl. Comput. Graph. Games*. (2024) 26–26. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23161-2_300021.
- [9] Deproma d.o.o., SLA – stereolitografija, (2019). <https://www.deproma.si/tehnologije/3d-tisk/sla-stereolitografija/> (accessed October 6, 2024).
- [10] Selective Laser Sintering, *CIRP Encycl. Prod. Eng.* (2014) 1095–1095. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_100414.
- [11] Deproma d.o.o., SLS – selektivno lasersko sintranje, (2018). <https://www.deproma.si/tehnologije/3d-tisk/sls-selektivno-lasersko-sintranje/> (accessed October 6, 2024).
- [12] K. Haghsefat, T. Liu, FDM 3D Printing Technology and Its Fundamental Properties, in: *ICIRES - International Conference on Innovation and Research in Engineering Sciences*, Tbilisi, Georgia, 2020.
- [13] D. Tlegenov, Y., Xu, X., Qian, Fused Granular Fabrication(FGF): A review of the technology and Applications, *J. Manuf. Process.* 31 (2018) 797–808.
- [14] JuggBot 3D, Fused Granulate Fabrication (FGF), (2024). <https://juggbot3d.com/fused-granulate-fabrication/> (accessed October 6, 2024).
- [15] I. Kauppila, 3D Printing & CNC: A Guide to the Best Hybrid 3D Printers, *All3DP*. (2022). <https://all3dp.com/1/3d-printing-cnc-guide-to-hybrid-additive-subtractive-manufacturing/?utm> (accessed October 6, 2024).
- [16] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, D. Hui, 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective, *Compos. Part B Eng.* 110 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.

-
- [17] R.A. Donald, P.F. Pradeep, J.W. Wendelin, *The Science and Engineering of Materials*, 6th ed., 2011.
- [18] A.B. Strong, *Plastics: Materials and Processing*, Pearson Prenatice Hall, Up. Saddle River, NJ. 12 (2006). <https://doi.org/10.1080/10426919708935166>.
- [19] J.D. Moore, Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) - a review, *Composites*. 4 (1973) 118–130. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(73\)90585-5](https://doi.org/10.1016/0010-4361(73)90585-5).
- [20] D. Hunger J., T. Wheelen L., *Essentials of Strategic Management*, 5th ed., 2010. <https://doi.org/10.34156/9783791057705>.
- [21] Defense Technical Information Center, *Composite materials handbook*, 2002. [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(85\)90127-5](https://doi.org/10.1016/0378-3804(85)90127-5).
- [22] Phelps Industrial Products LLC, *Fiberglass – Types, Properties, and Applications* | Phelps Industrial Products, (2019). <https://www.phelpsgaskets.com/blog/fiberglass--types-properties-and-applications-across-industries> (accessed 06 October 2024).
- [23] Prince-Lund Engineering PLC, *Glass Fiber Types Used in Structural FRP Reinforcement*, Princlund.Com. (2024). <https://www.princlund.com/glass-fiber.html#gsc.tab=0> (accessed 06 October 2024).
- [24] A. Romani, M. Levi, J.M. Pearce, Recycled polycarbonate and polycarbonate / acrylonitrile butadiene styrene feedstocks for circular economy product applications with fused granular fabrication-based additive manufacturing, *Sustain. Mater. Technol.* 38 (2023) e00730. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00730>.
- [25] P. Quoc, K. Nguyen, J. Panta, T. Famakinwa, C. Yang, A. Ahmed, M. Stapleton, D. Sassaman, S. Snabes, C. Craff, Influences of printing parameters on mechanical properties of recycled PET and PETG using fused granular fabrication technique, *Polym. Test.* 132 (2024).
- [26] Muralisrinivasan N S, *Introduction to Polymer Compounding: Machinery and Technology*, Vol. 2, Smithers Rapra, 2015.

SEZNAM SLIK

Slika 1: Shematski prikaz tiskanja SLA [9]	5
Slika 2: Shematski prikaz tiskanja SLS [11]	6
Slika 3: Shematski prikaz tiskanja FDM [12]	7
Slika 4: Shematski prikaz tiskanja FGF [14]	8
Slika 5: Variante granulata vzorcev	15
Slika 6: Mlin za mletje termoplastov Wanner	16
Slika 7: Dvopolžni ekstruder in granulator	16
Slika 8: 3D tisk epruvet	18
Slika 9: Sušenje granulata	18
Slika 10: Lepilni sprej in rumen slikopleskarski trak	19
Slika 11: Trgalni stroj Shimadzu, AG-X plus 10 kN	20
Slika 12: Šablona za epruvete	21
Slika 13: Upogibni test na trgalnem stroju Shimadzu, AG-X plus 10 kN	21
Slika 14: Naprava za merjenje udarne žilavosti Charpy LY-XJJD5	22
Slika 15: Vzorec brez zareze	22
Slika 16: Naprava Perkin Elmer, DMA 8000	23
Slika 17: Vstavljena epruveta	24
Slika 18: Naprava Mettler Toledo, TGA/DSC 3+	24
Slika 19: Naprava Mettler Toledo, DSC 2	25
Slika 20: Naprava LIYI MFI LY-RR	27
Slika 21: Naprava Keyence VHX 7000	28
Slika 22: Grafični prikaz rezultatov natezne trdnosti	30
Slika 23: Grafični prikaz rezultatov raztezka pri pretrgu	31
Slika 24: Grafični prikaz rezultatov nateznega E modula	32
Slika 25: Prečni prerez vzorca 822_2023_0215_02 pri povečavi 500×	40
Slika 26: Prečni prerez vzorca 822_2023_0215_02 pri povečavi 1500×	41
Slika 27: Prečni prerez vzorca 822_2023_0215_03 pri povečavi 500×	41
Slika 28: Prečni prerez vzorca 822_2023_0215_03 pri povečavi 1500×	41
Slika 29: Prečni prerez vzorca 822_2023_0215_04 pri povečavi 500×	42
Slika 30: Prečni prerez vzorca 822_2023_0215_04 pri povečavi 1500×	42
Slika 31: Prečni prerez vzorca 822_2023_0215_05 pri povečavi 500×	42
Slika 32: Prečni prerez vzorca 822_2023_0215_05 pri povečavi 1500×	43
Slika 33: Graf nateznega testa za vzorce 822_2023_0215_01_1 822_2023_0215_01_4	- 53
Slika 34: Graf nateznega testa za vzorec 822_2023_0215_01	54
Slika 35: Graf nateznega testa za vzorec 822_2023_0215_02	55
Slika 36: Graf nateznega testa za vzorec 822_2023_0215_03	56
Slika 37: Graf nateznega testa za vzorec 822_2023_0215_04	57
Slika 38: Graf nateznega testa za vzorec 822_2023_0215_05	58
Slika 39: Graf upogibnega testa za vzorec 822_2023_0215_01	59
Slika 40: Graf upogibnega testa za vzorec 822_2023_0215_02	60
Slika 41: Graf upogibnega testa za vzorec 822_2023_0215_03	61

Slika 42: Graf upogibnega testa za vzorec 822_2023_0215_04	62
Slika 43: Graf upogibnega testa za vzorec 822_2023_0215_05	63
Slika 44: Graf krivulj DMA analize za vzorce 822_2023_0215_01-1 - 822_2023_0215_01-4	64
Slika 45: Graf krivulj DMA analize za vzorec 822_2023_0215_02	64
Slika 46: Graf krivulj DMA analize za vzorec 822_2023_0215_03	65
Slika 47: Graf krivulj DMA analize za vzorec 822_2023_0215_04	65
Slika 48: Graf krivulj DMA analize za vzorec 822_2023_0215_05	66
Slika 49: Graf krivulj analize TGA za vzorec 822_2023_0215_01-1	67
Slika 50: Graf krivulj analize TGA za vzorec 822_2023_0215_01-2	67
Slika 51: Graf krivulj analize TGA za vzorec 822_2023_0215_01-3	68
Slika 52: Graf krivulj analize TGA za vzorec 822_2023_0215_01-4	68
Slika 53: Graf krivulj analize TGA za vzorec 822_2023_0215_02	69
Slika 54: Graf krivulj analize TGA za vzorec 822_2023_0215_03	69
Slika 55: Graf krivulj analize TGA za vzorec 822_2023_0215_04	70
Slika 56: Graf krivulj analize TGA za vzorec 822_2023_0215_05	70
Slika 57: Graf krivulj analize DSC za vzorec 822_2023_0215_01-1	71
Slika 58: Graf krivulj analize DSC za vzorec 822_2023_0215_01-2	71
Slika 59: Graf krivulj analize DSC za vzorec 822_2023_0215_01-3	72
Slika 60: Graf krivulj analize DSC za vzorec 822_2023_0215_01-4	72
Slika 61: Graf krivulj analize DSC za vzorec 822_2023_0215_02	73
Slika 62: Graf krivulj analize DSC za vzorec 822_2023_0215_03	73
Slika 63: Graf krivulj analize DSC za vzorec 822_2023_0215_04	74
Slika 64: Graf krivulj analize DSC za vzorec 822_2023_0215_05	74
Slika 65: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_02 pri povečavi 50×	75
Slika 66: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_02 pri povečavi 200×	75
Slika 67: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_02 pri povečavi 1000×	76
Slika 68: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_03 pri povečavi 50×	76
Slika 69: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_03 pri povečavi 200×	77
Slika 70: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_03 pri povečavi 1000×	77
Slika 71: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_04 pri povečavi 50×	78
Slika 72: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_04 pri povečavi 200×	78
Slika 73: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_04 pri povečavi 1000×	79
Slika 74: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_05 pri povečavi 50×	79
Slika 75: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_05 pri povečavi 200×	80
Slika 76: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_05 pri povečavi 1000×	80

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Sestava vzorcev	14
Tabela 2: Variante granulata vzorca 822_2023_0215_01	14
Tabela 3: Parametri ekstrudiranja	17
Tabela 4: Nasipna gostota posameznih vzorcev	17
Tabela 5: Parametri 3D tiska	19
Tabela 6: Tabela za natezni test	29
Tabela 7: Tabela za upogibni test	32
Tabela 8: Charpy test – udarna žilavost – zbrani rezultati	34
Tabela 9: DMA – zbrani rezultati	35
Tabela 10: Tabela za TGA	36
Tabela 11: Tabela za DSC	37
Tabela 12: Tabela za DSC	37
Tabela 13: Tabela za DSC	38
Tabela 14: MFI test – zbrani rezultati	39
Tabela 15: Rezultati optične mikroskopije steklenih vlaken po TGA (dolžina in premer vlaken)	40

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

E_t - natezni E modul (GPa)

σ_m - natezna trdnost (MPa)

ε_m - raztezek pri natezni trdnosti (%)

ε_{tb} - raztezek pri pretrgu (%)

E_f - upogibni E modul (GPa)

σ_{fM} - maksimalna upogibna trdnost (MPa)

ε_{fM} - upogibni raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti (%)

ε_{fB} - upogibni raztezek pri poružitvi (%)

E' - dinamični Emodul (GPa)

E'' - modul izgub (MPa)

$\tan \delta$ - faktor izgub (-)

T_g - temperatura steklastega prehoda (°C)

T_{d1} - temperatura degradacije (°C)

T_m - tališče (°C)

T_c - temperatura kristalizacije (°C)

ΔH_m - talilna entalpija (J/g)

ΔH_c - entalpija kristalizacije (J/g)

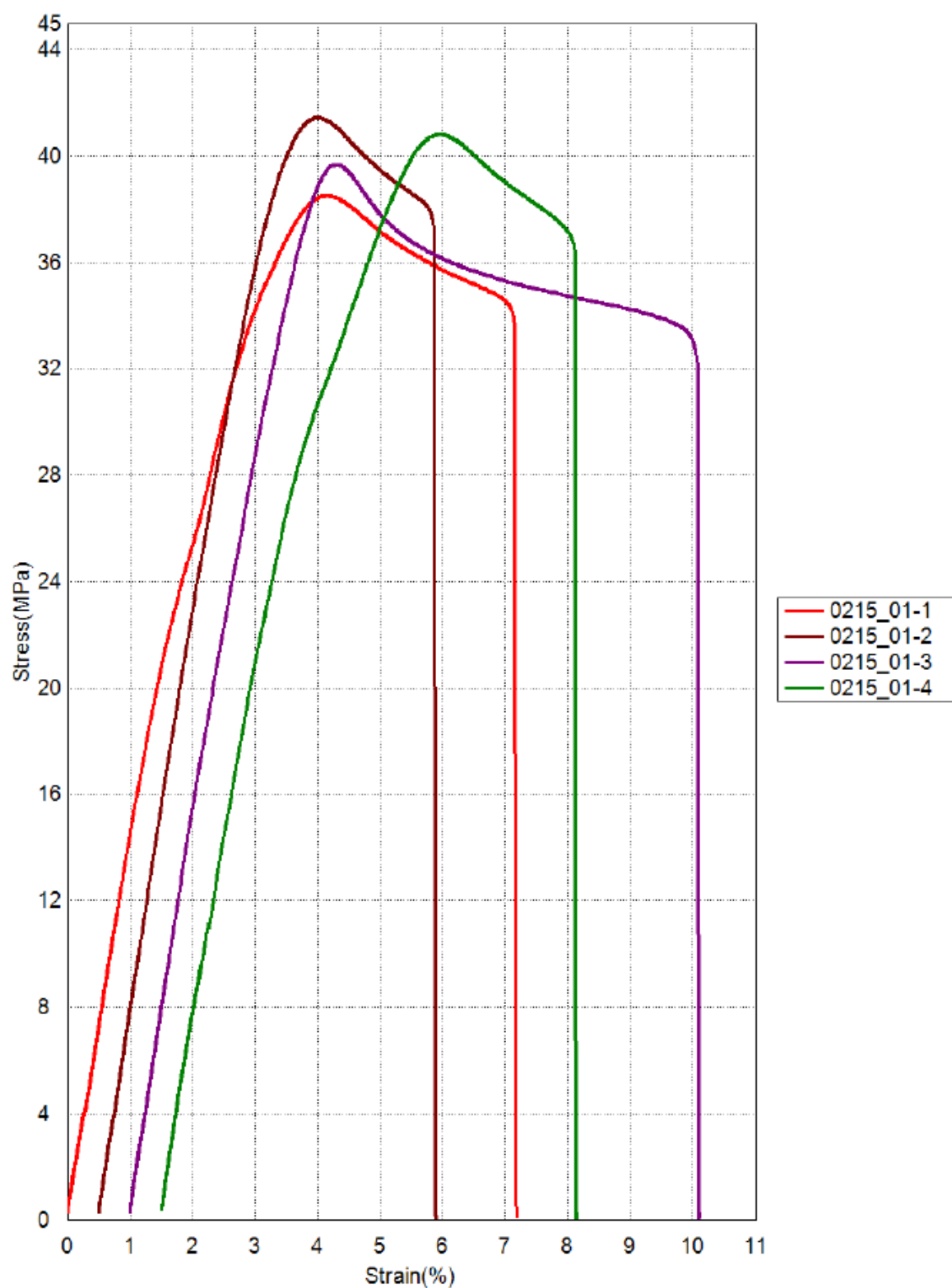
ΔC_p - sprememba specifične toplote pri konstantnem tlaku (J/gK)

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

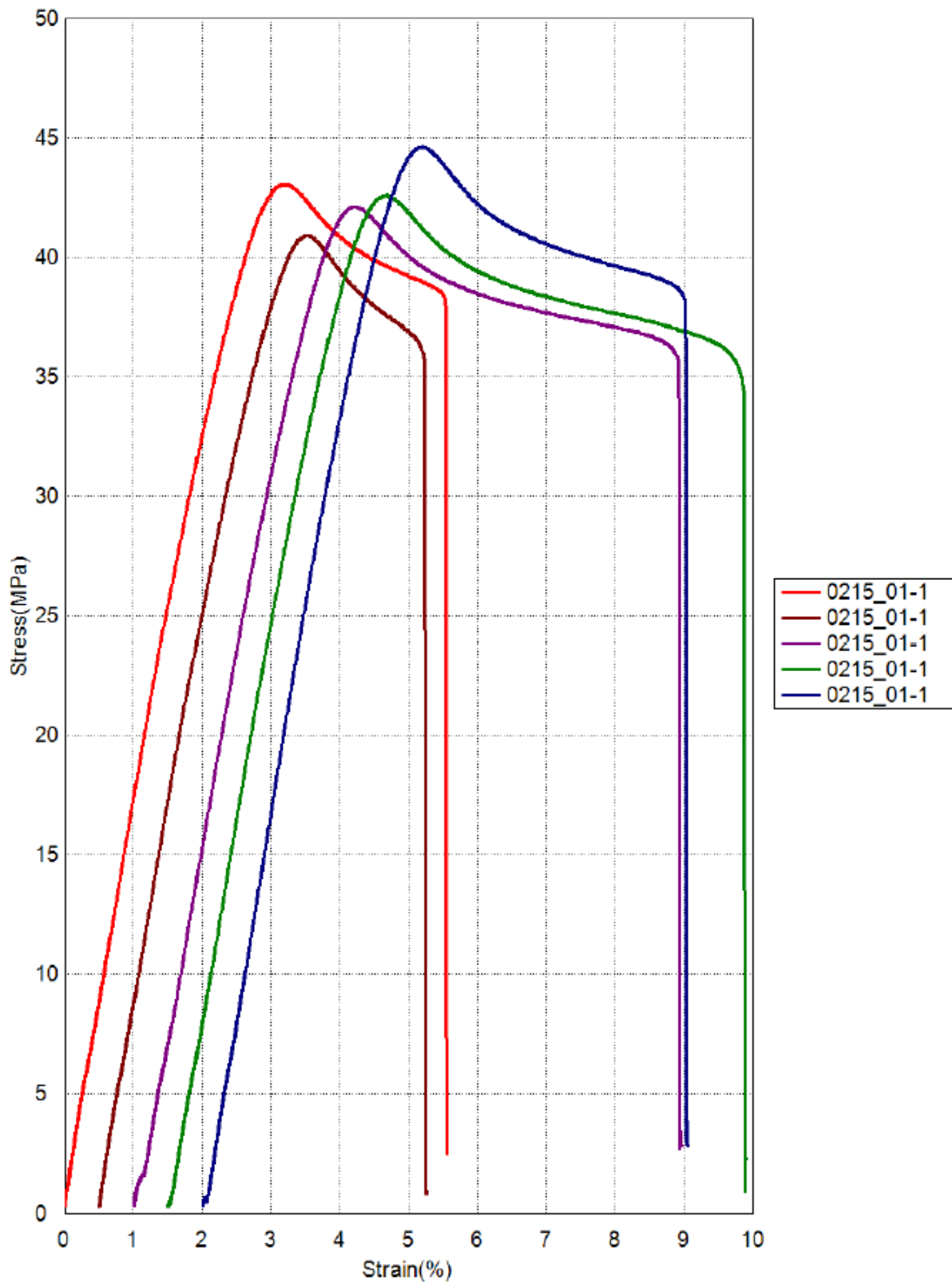
3D - tridimenziionalen
ABS - akrilonitril butadien stiren
SEBS - stiren-etilen-butilen-stiren
DMA - dinamična mehanska analiza
TGA - termogravimetrična analiza
DSC - diferenčna dinamična kalorimetrija
MFI - indeks tečenja taline (ang. melt flow index)
FGF - postopek 3D tiskanja z granulatom (ang. fused granular fabrication)
FTPO - Fakulteta za tehnologijo polimerov
AM - proizvodnja z dodajanjem materiala (ang. additive manufacturing)
CAD - računalniško podprto oblikovanje (ang. computer-aided design)
SLA - laserska stereolitografija
SLS - selektivno lasersko sintranje
FDM - tiskanje s taljenjem in nanašanjem materiala (ang. fused deposition modeling)
PLA - polimlečna kislina
PA - poliamid
PC - polikarbonat
TPU - termoplastični poliuretan
PET - polietilen teretalat
PETG - polietilen terefralat glikol
STD - standardna deviacija
SEM - vrstična elektronska mikroskopija (ang. scanning electron microscopy)

PRILOGE

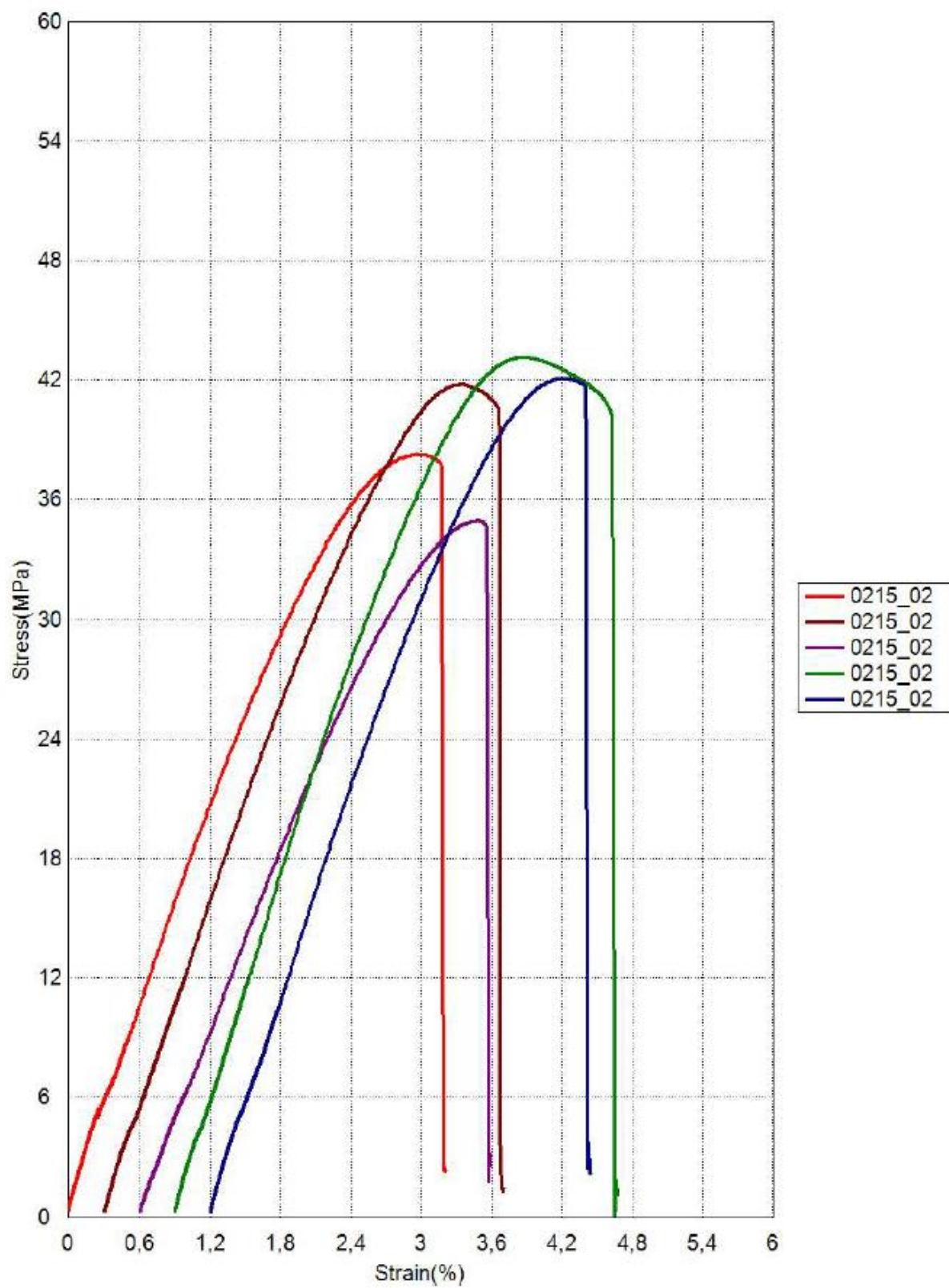
Priloga 1: Grafi nateznih testov



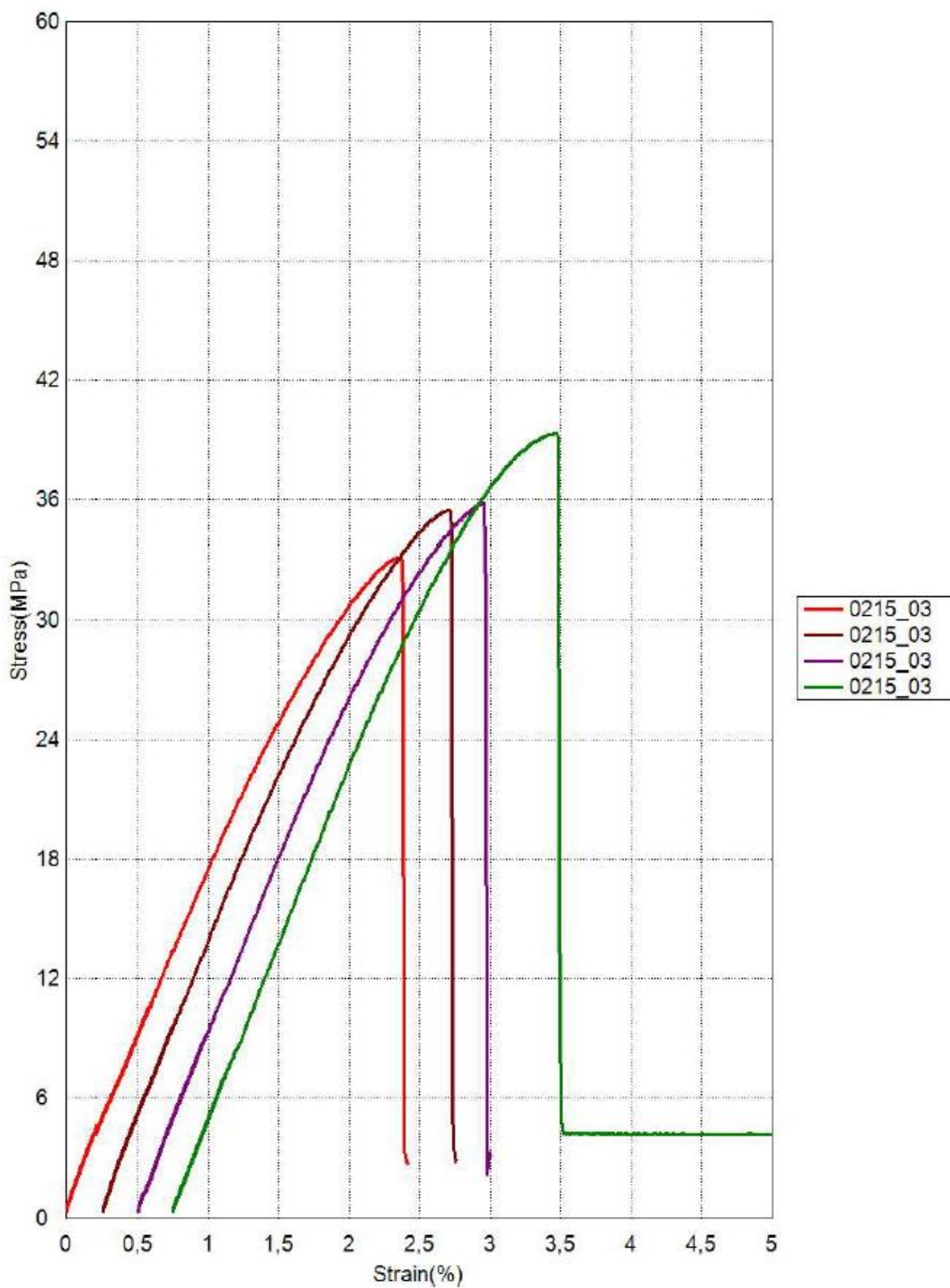
Slika 33: Graf nateznega testa za vzorce 822_2023_0215_01_1 - 822_2023_0215_01_4



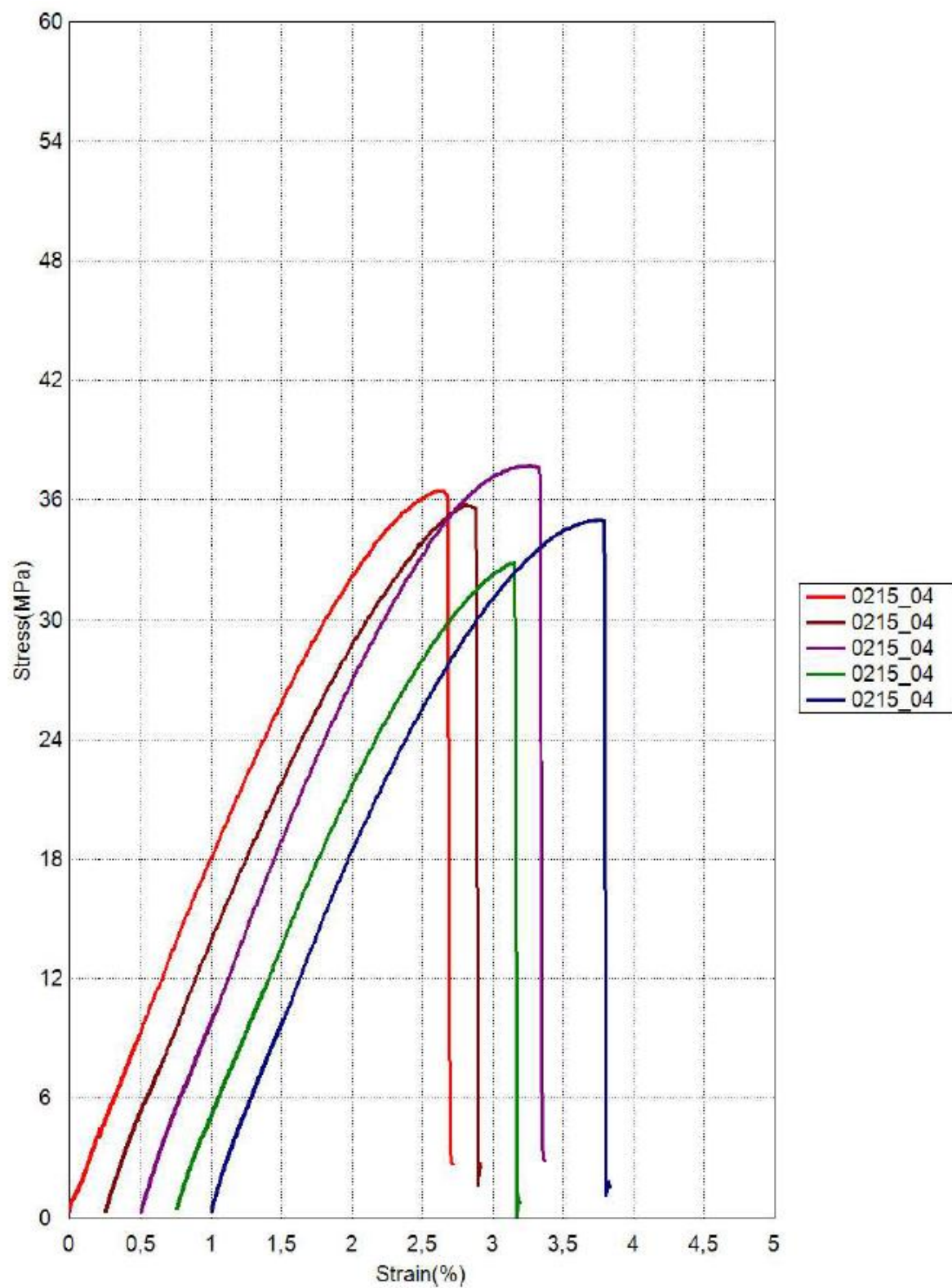
Slika 34: Graf nateznega testa za vzorec 822_2023_0215_01



Slika 35: Graf nateznega testa za vzorec 822_2023_0215_02



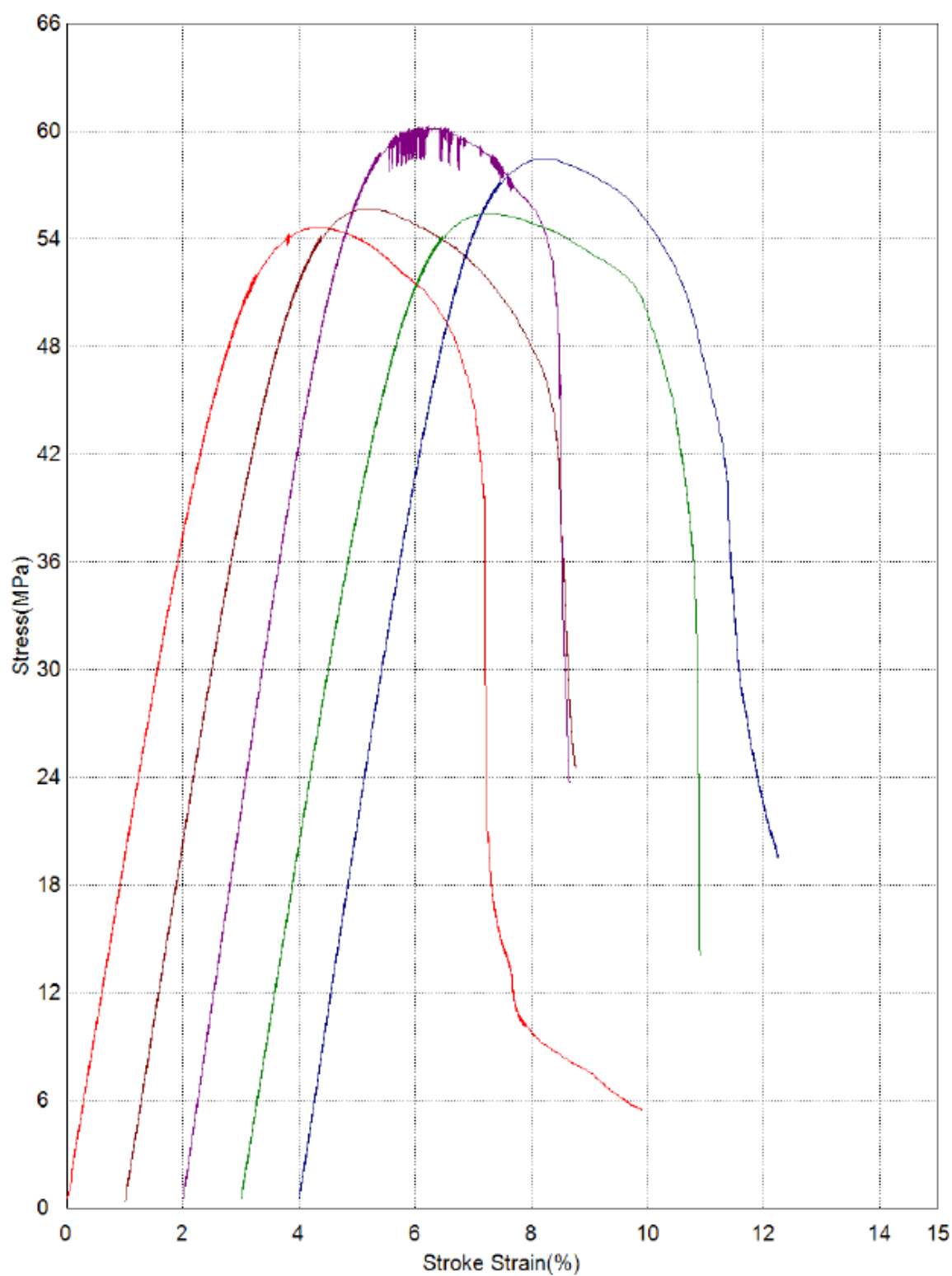
Slika 36: Graf nateznega testa za vzorec 822_2023_0215_03



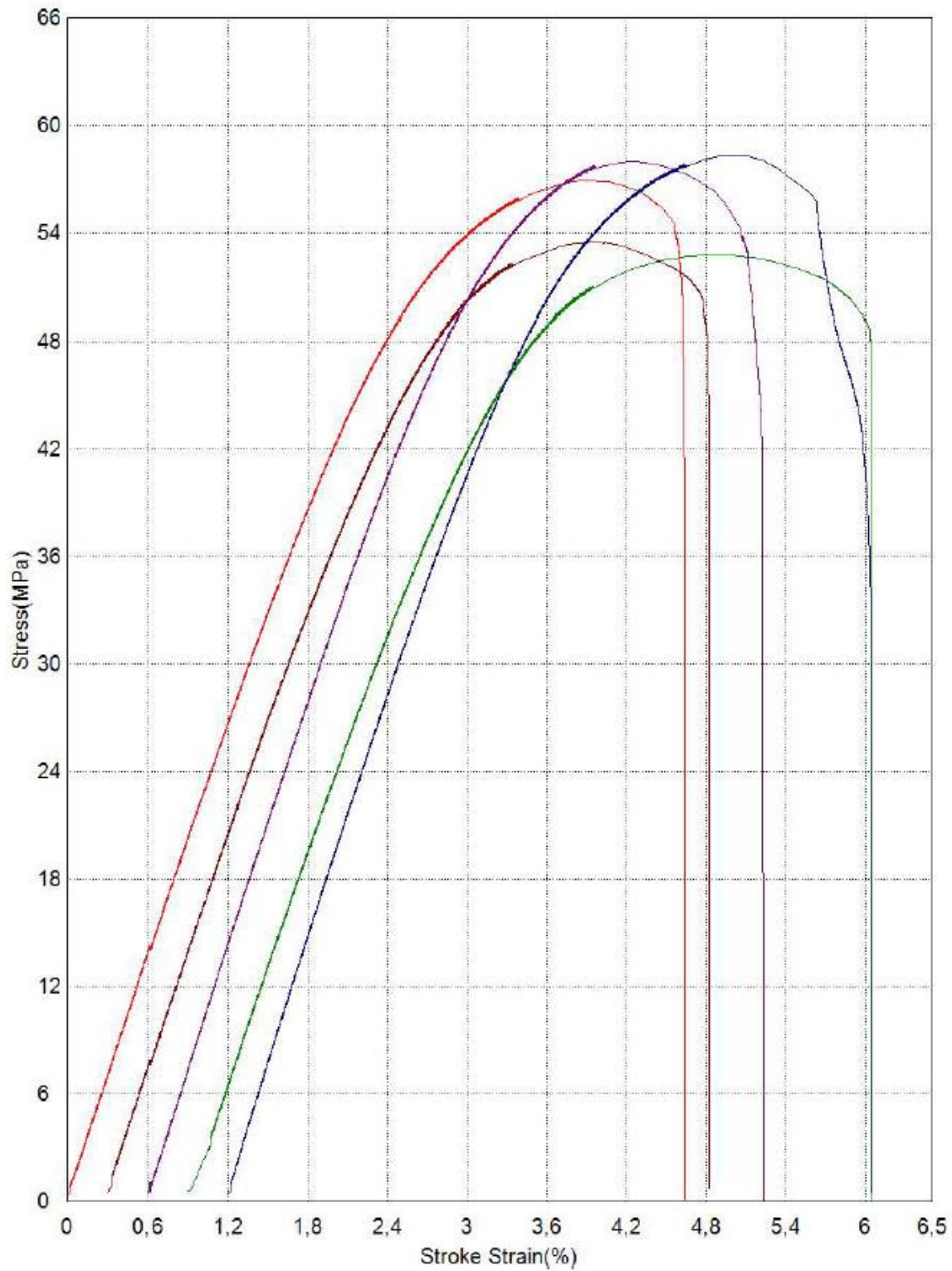
Slika 37: Graf nateznega testa za vzorec 822_2023_0215_04



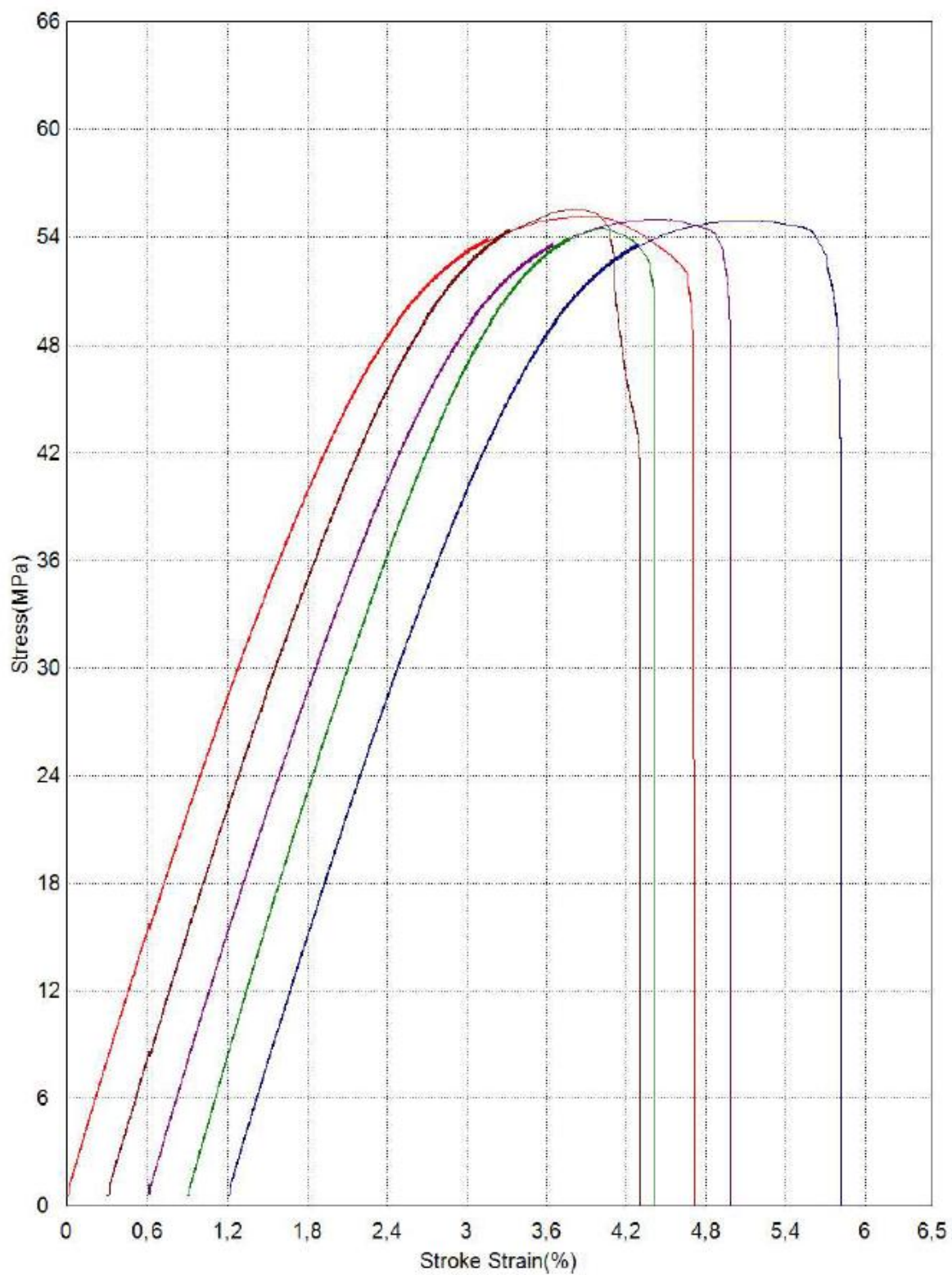
Slika 38: Graf nateznega testa za vzorec 822_2023_0215_05

Priloga 2: Grafi upogibnih testov

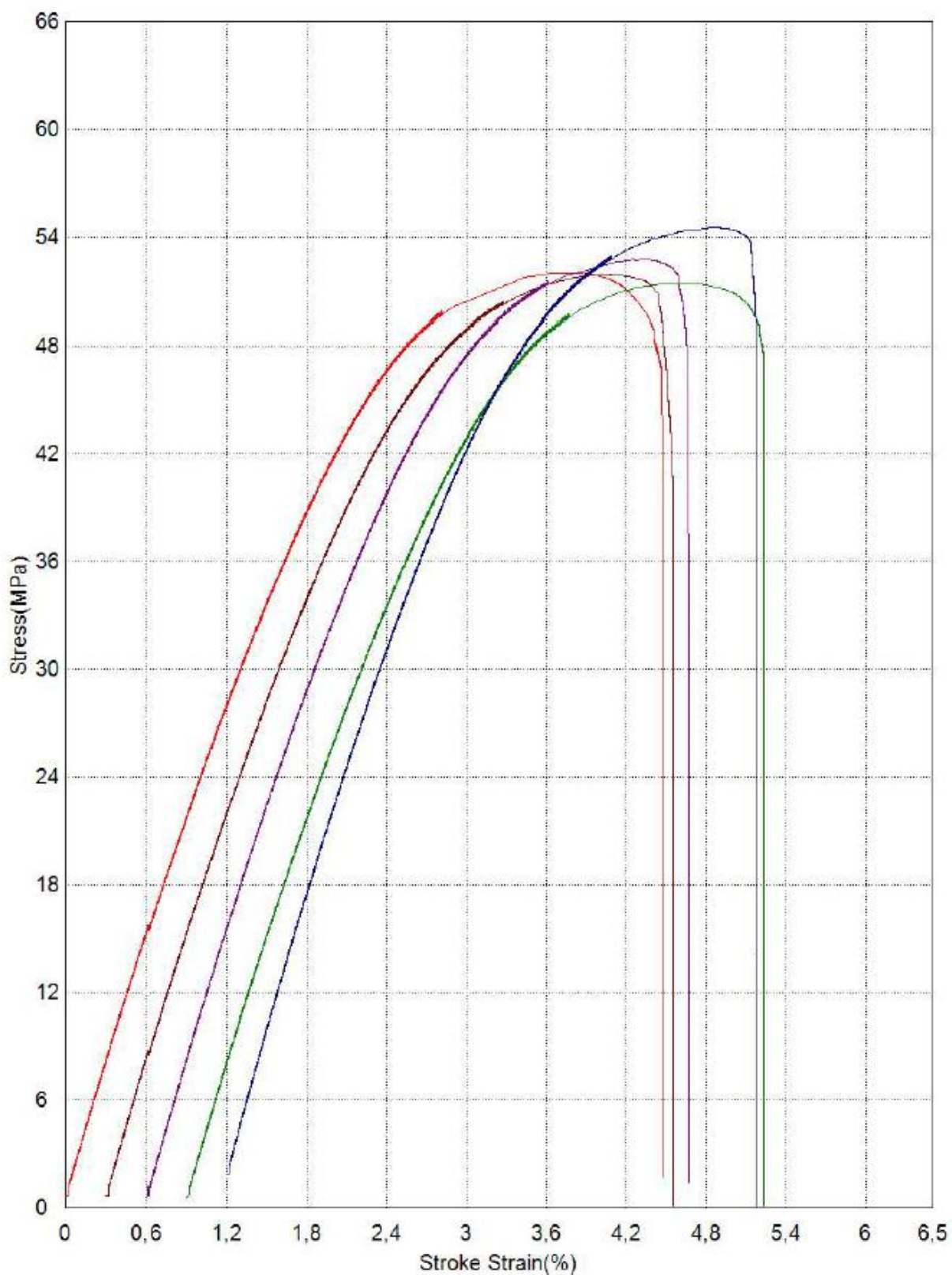
Slika 39: Graf upogibnega testa za vzorec 822_2023_0215_01



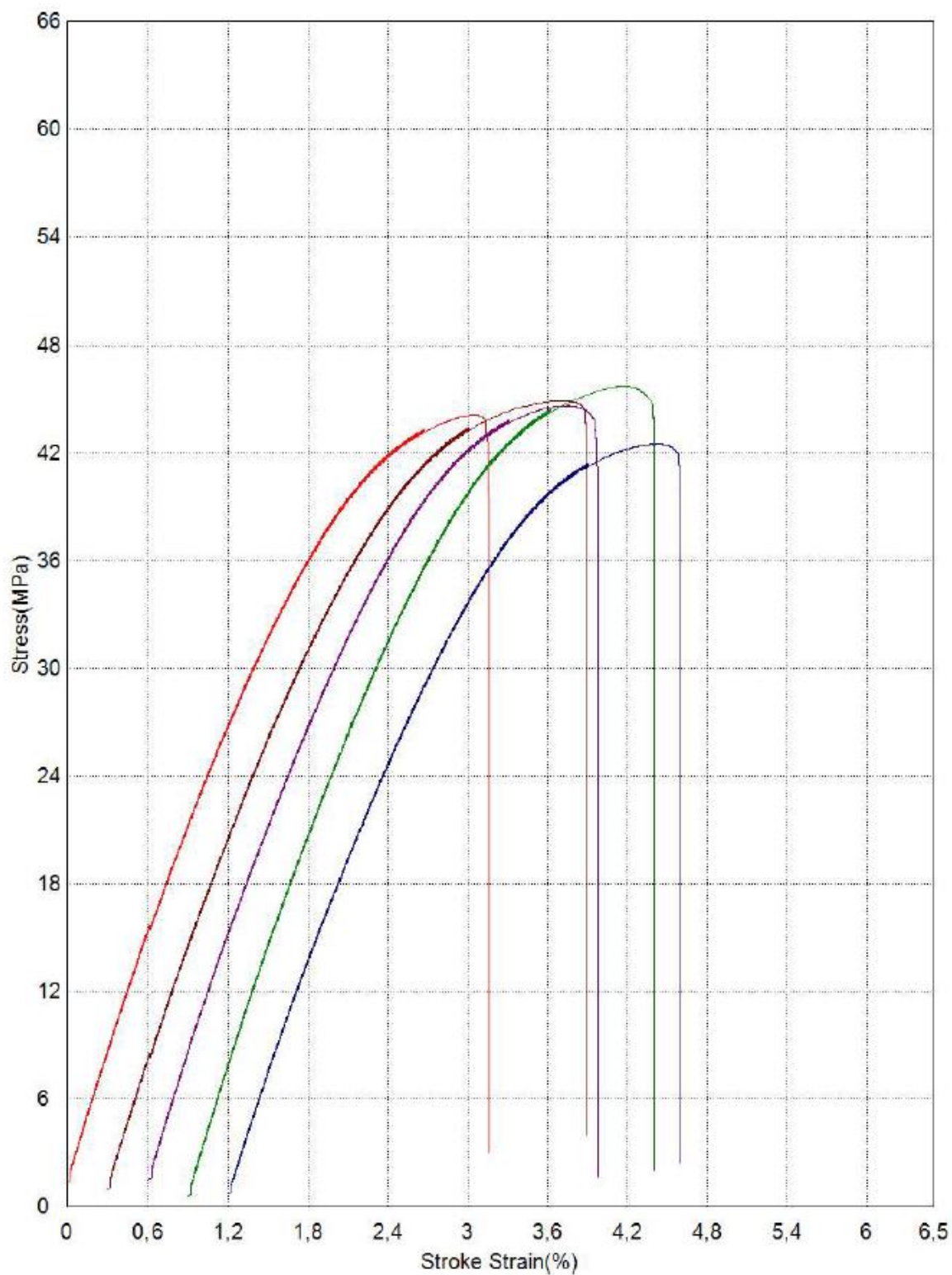
Slika 40: Graf upogibnega testa za vzorec 822_2023_0215_02



Slika 41: Graf upogibnega testa za vzorec 822_2023_0215_03

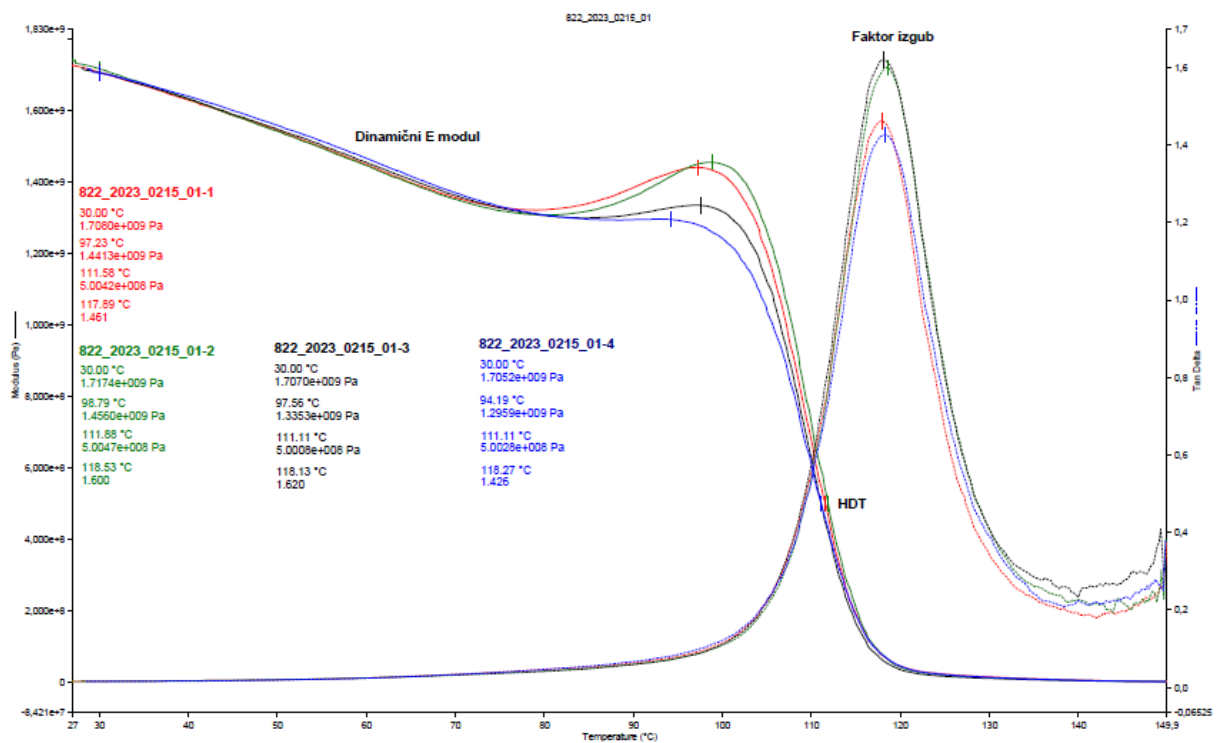


Slika 42: Graf upogibnega testa za vzorec 822_2023_0215_04

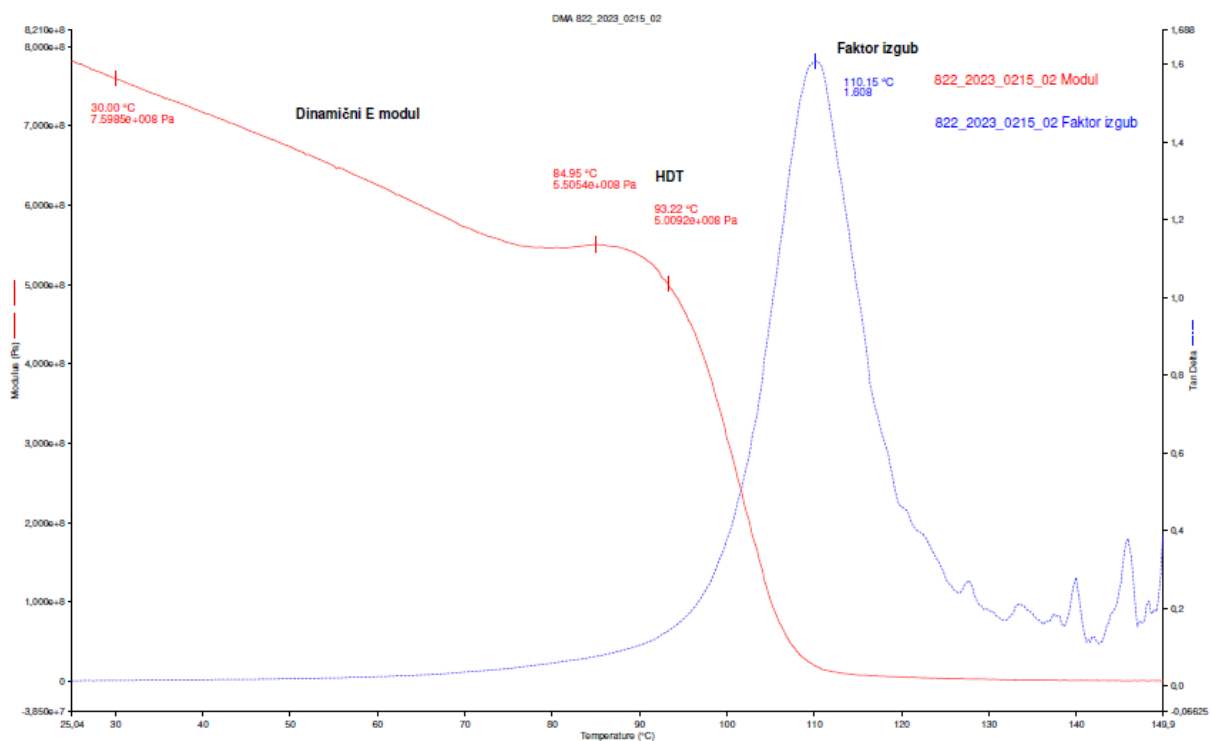


Slika 43: Graf upogibnega testa za vzorec 822_2023_0215_05

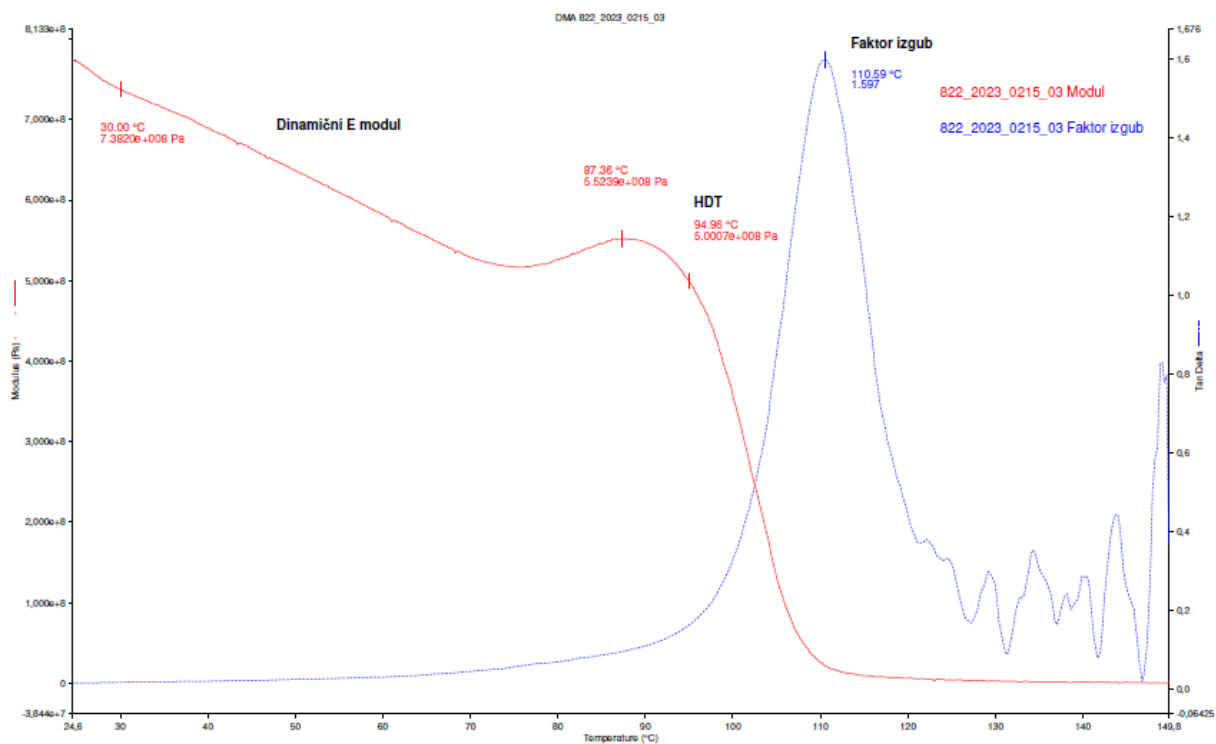
Priloga 3: Grafi DMA analiz



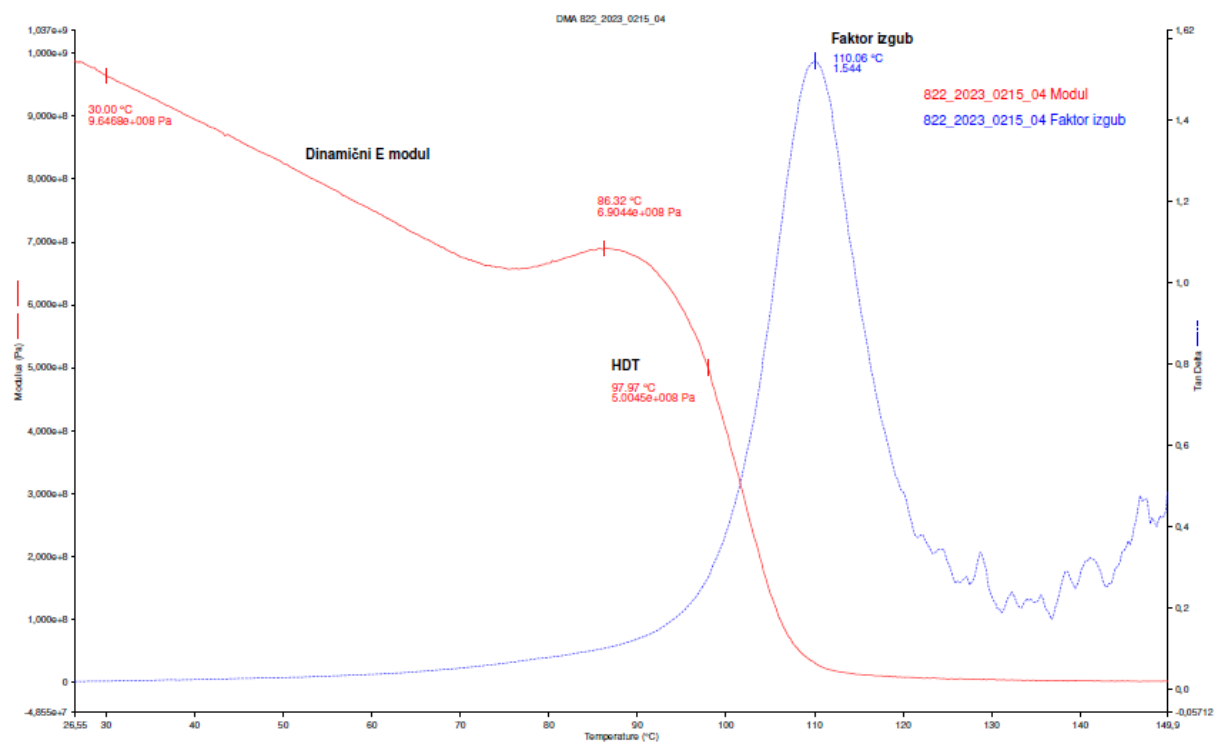
Slika 44: Graf krivulj DMA analize za vzorce 822_2023_0215_01-1 - 822_2023_0215_01-4



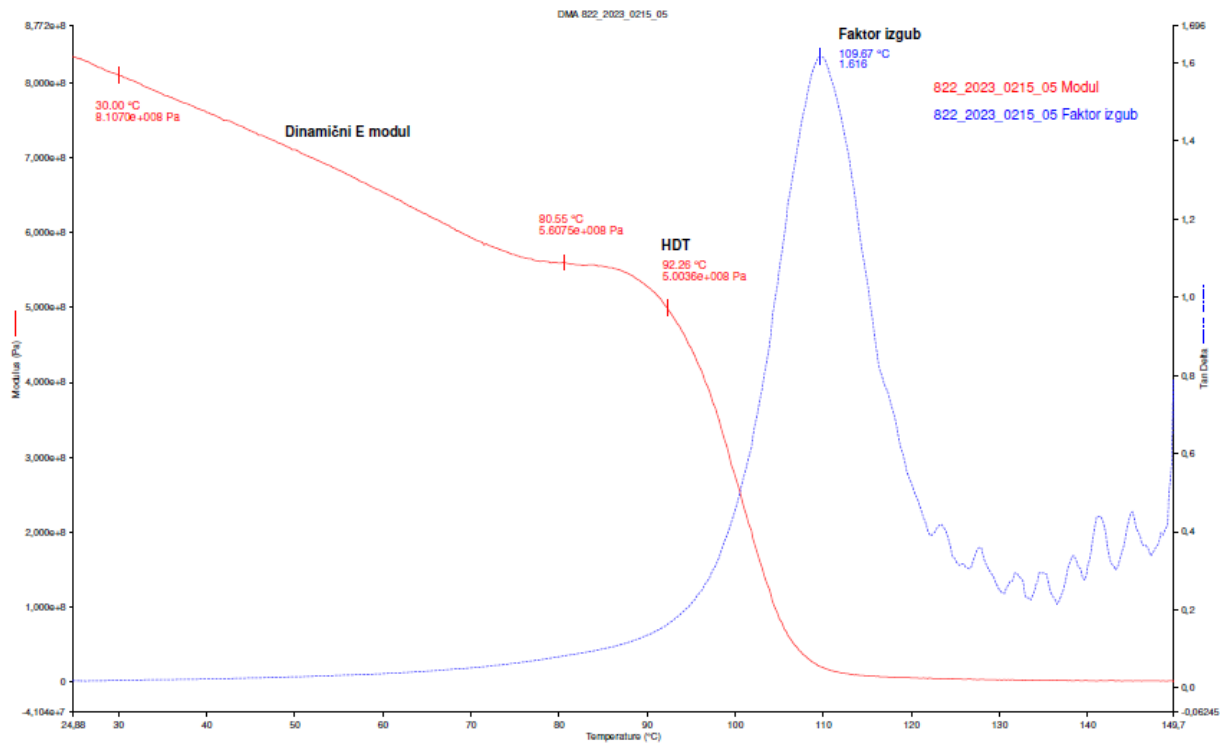
Slika 45: Graf krivulj DMA analize za vzorec 822_2023_0215_02



Slika 46: Graf krivulj DMA analize za vzorec 822_2023_0215_03

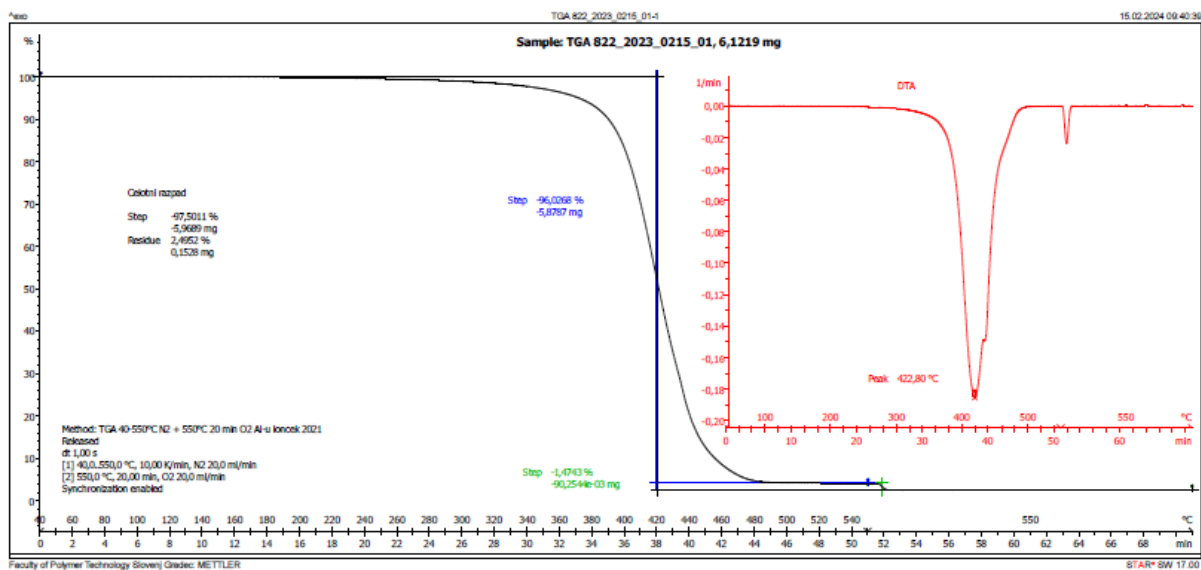


Slika 47: Graf krivulj DMA analize za vzorec 822_2023_0215_04

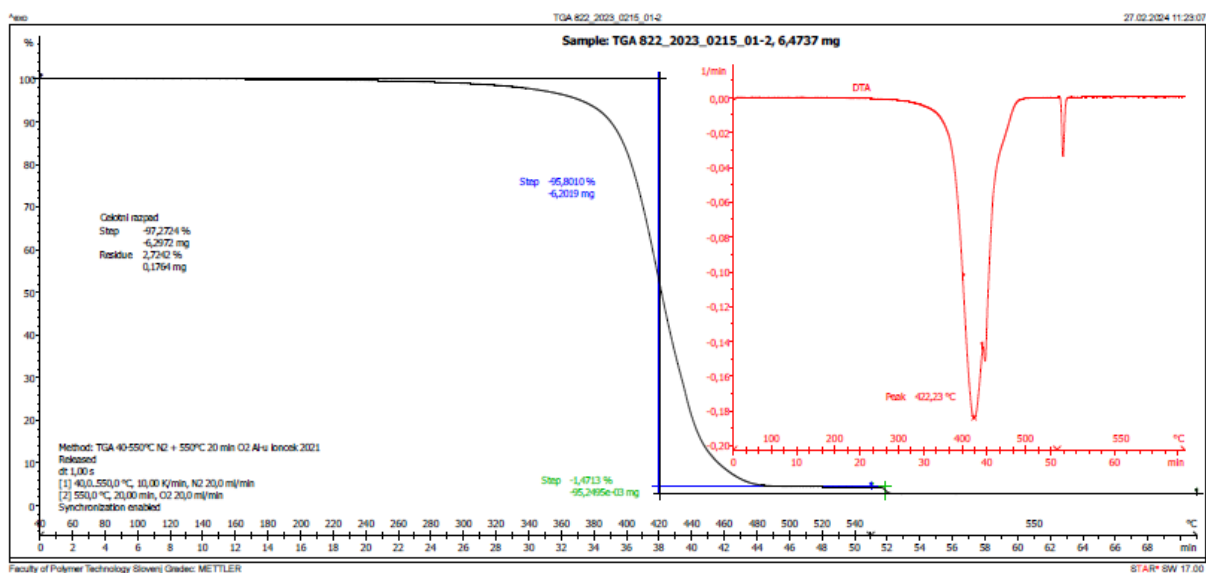


Slika 48: Graf krivulj DMA analize za vzorec 822_2023_0215_05

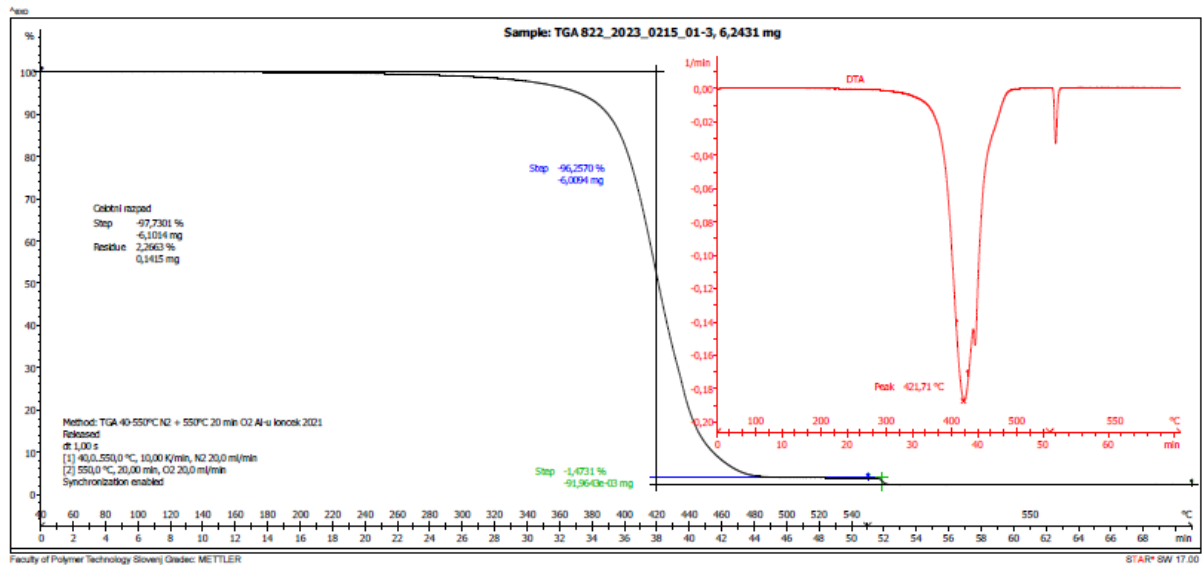
Priloga 4: Grafi analiz TGA



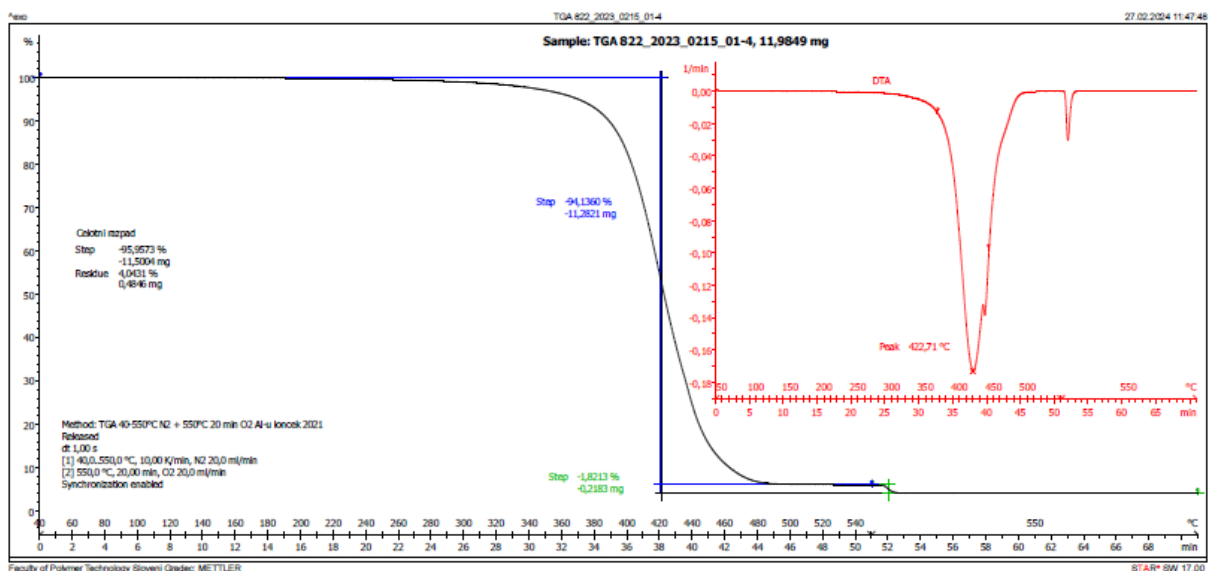
Slika 49: Graf krivulj analize TGA za vzorec 822_2023_0215_01-1



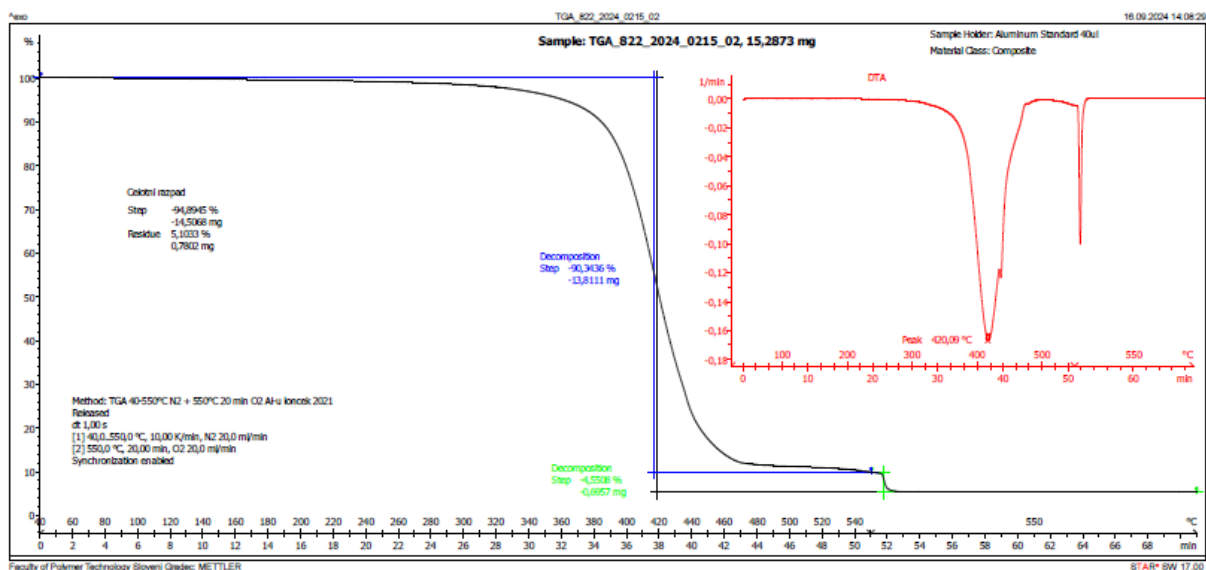
Slika 50: Graf krivulj analize TGA za vzorec 822_2023_0215_01-2



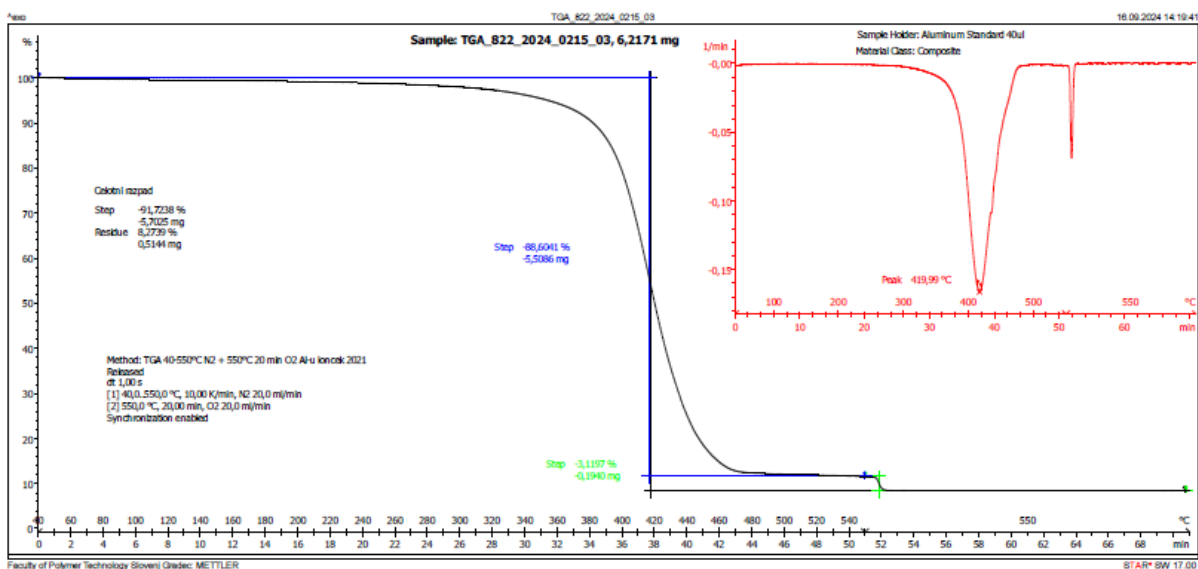
Slika 51: Graf krivulj analize TGA za vzorec 822_2023_0215_01-3



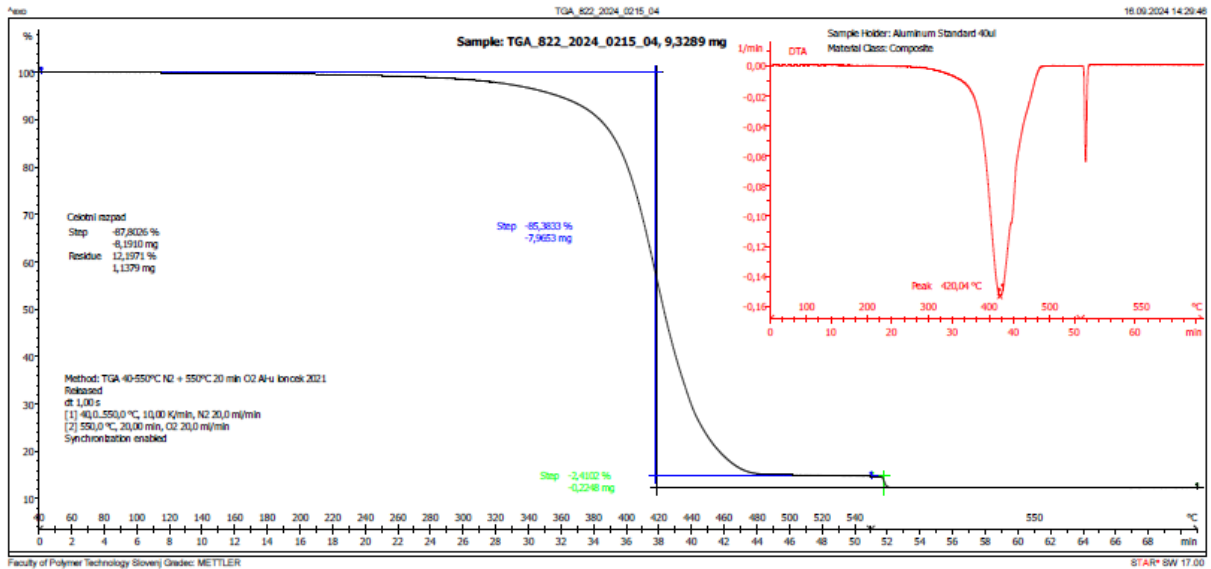
Slika 52: Graf krivulj analize TGA za vzorec 822_2023_0215_01-4



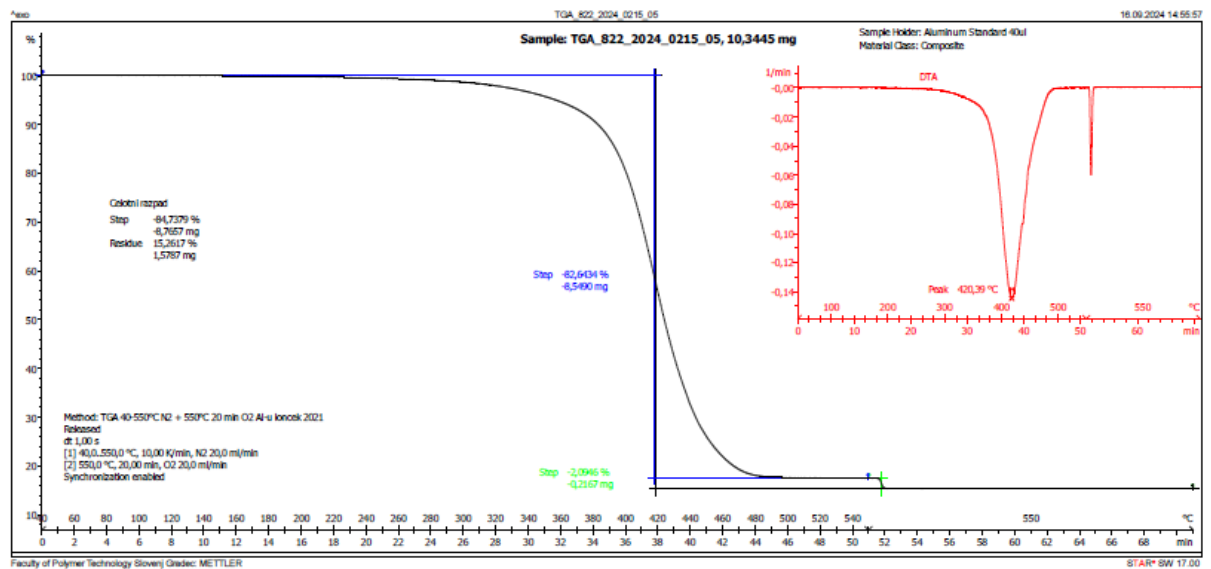
Slika 53: Graf krivulj analize TGA za vzorec 822_2023_0215_02



Slika 54: Graf krivulj analize TGA za vzorec 822_2023_0215_03

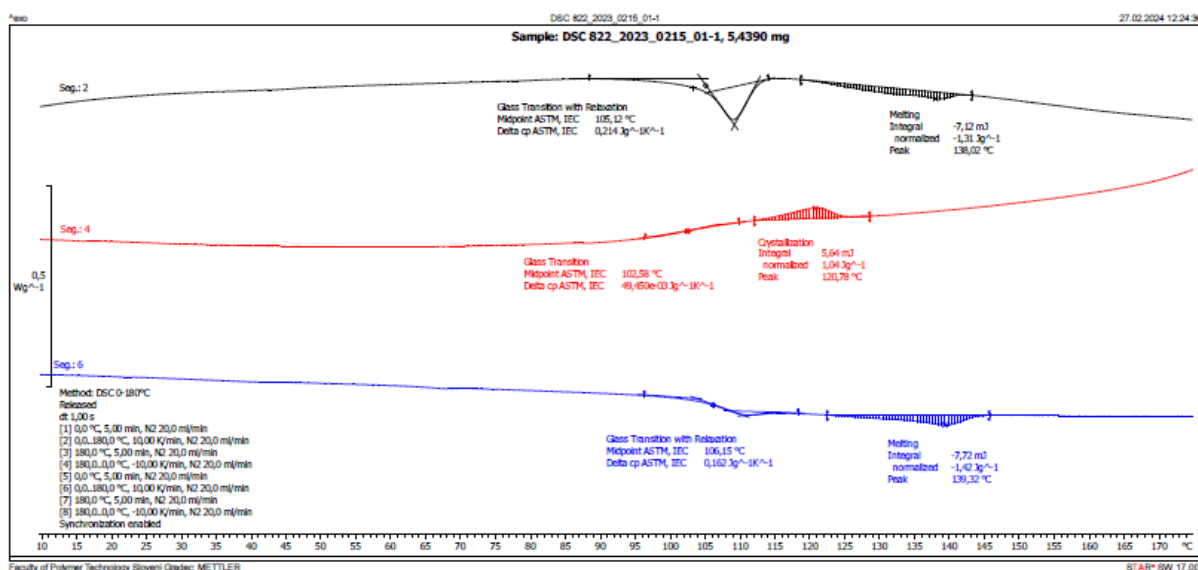


Slika 55: Graf krivulj analize TGA za vzorec 822_2023_0215_04

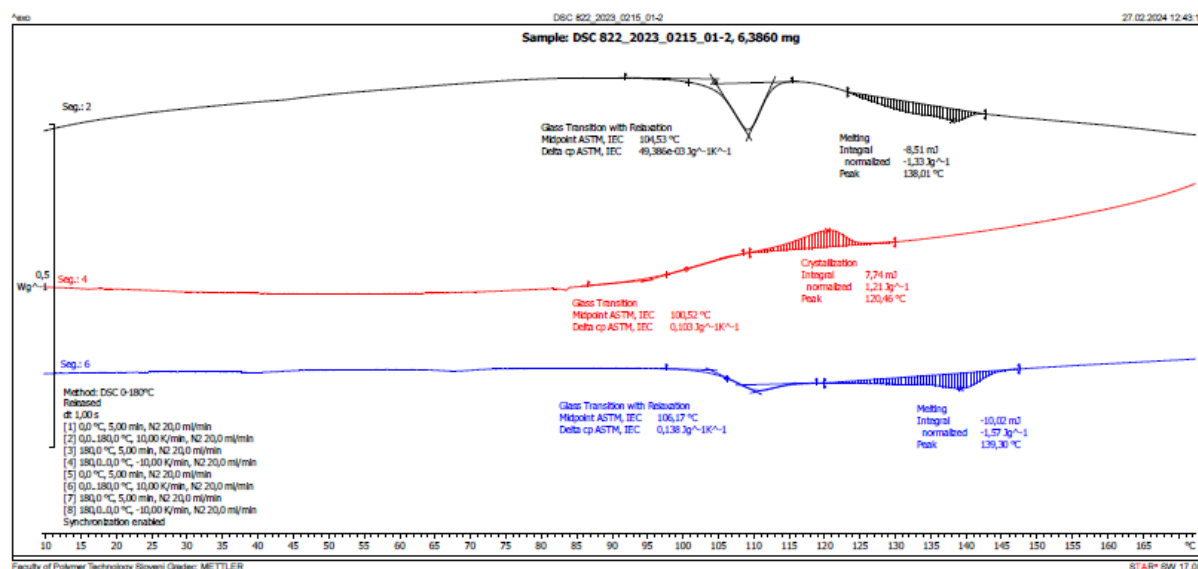


Slika 56: Graf krivulj analize TGA za vzorec 822_2023_0215_05

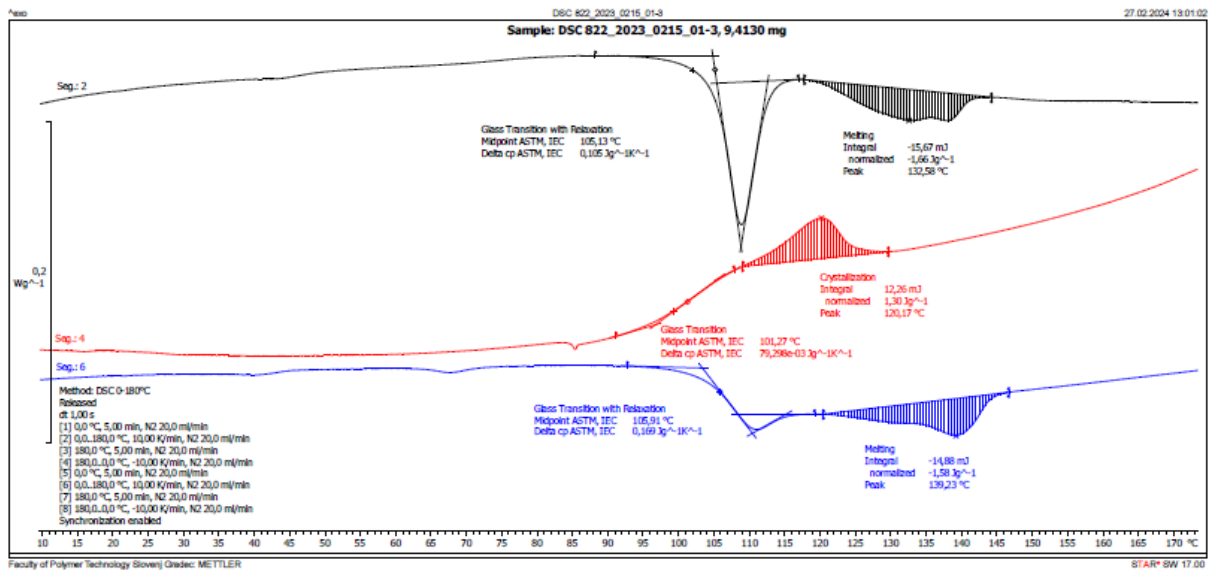
Priloga 5: Grafi analiz DSC



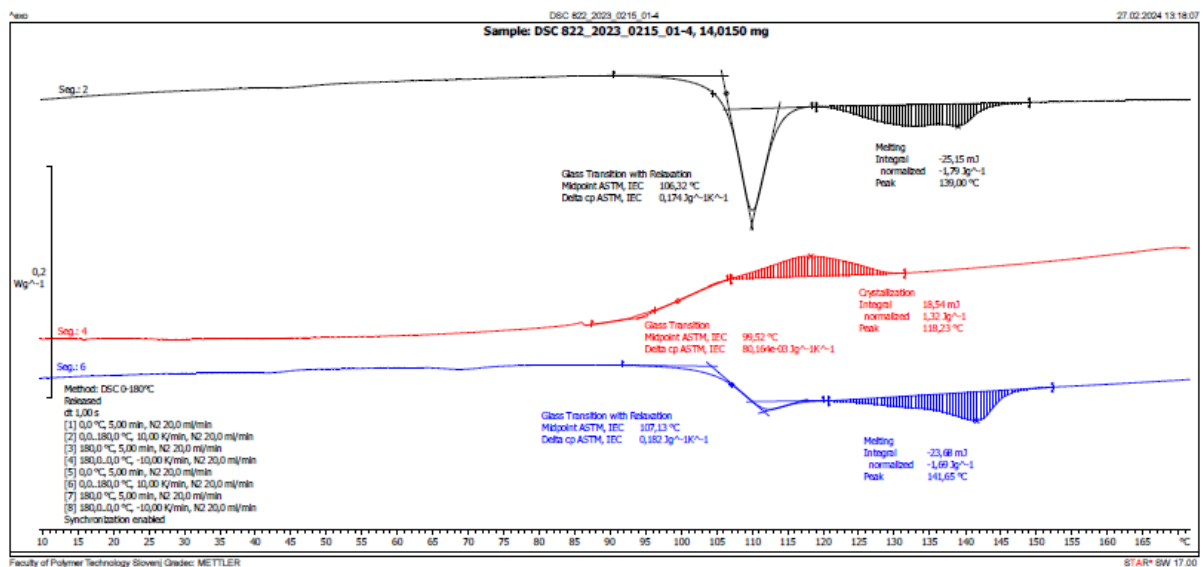
Slika 57: Graf krivulj analize DSC za vzorec 822_2023_0215_01-1



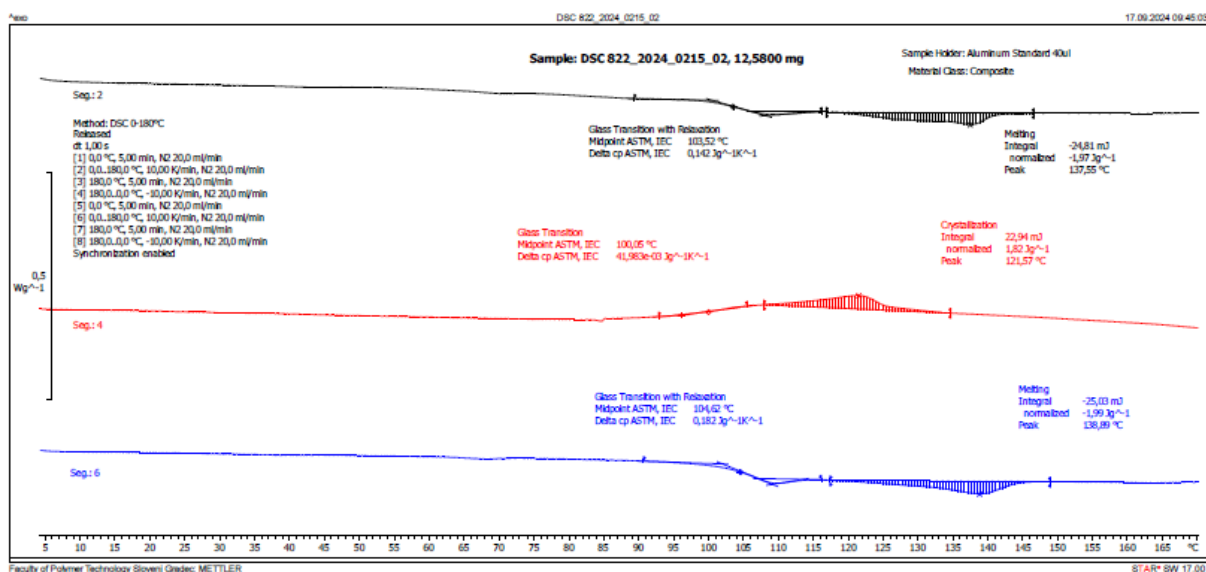
Slika 58: Graf krivulj analize DSC za vzorec 822_2023_0215_01-2



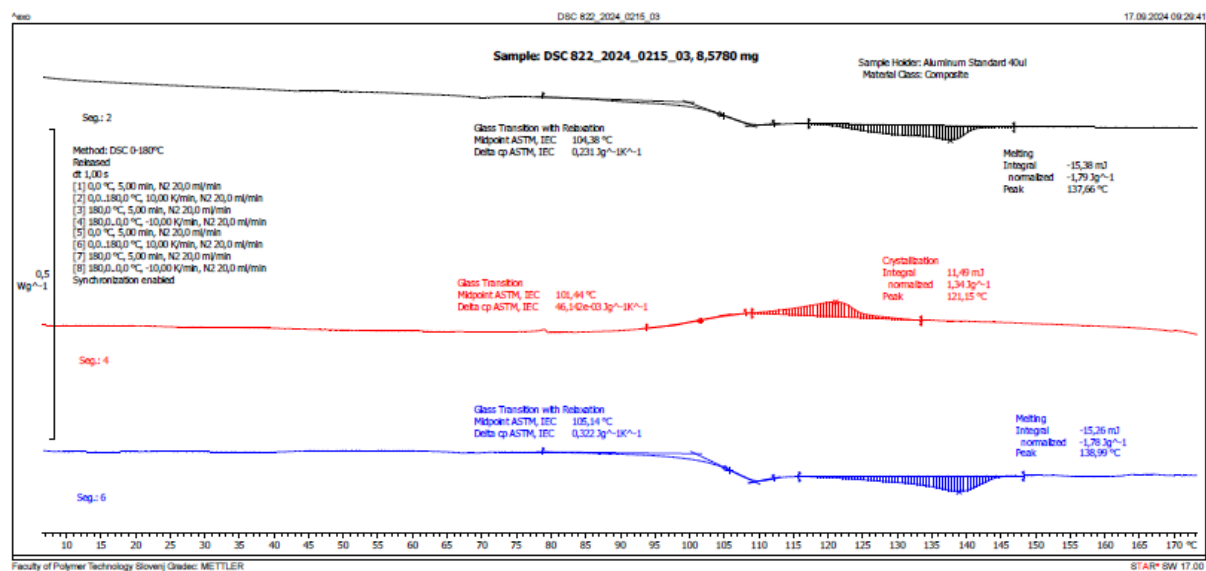
Slika 59: Graf krivulj analize DSC za vzorec 822_2023_0215_01-3



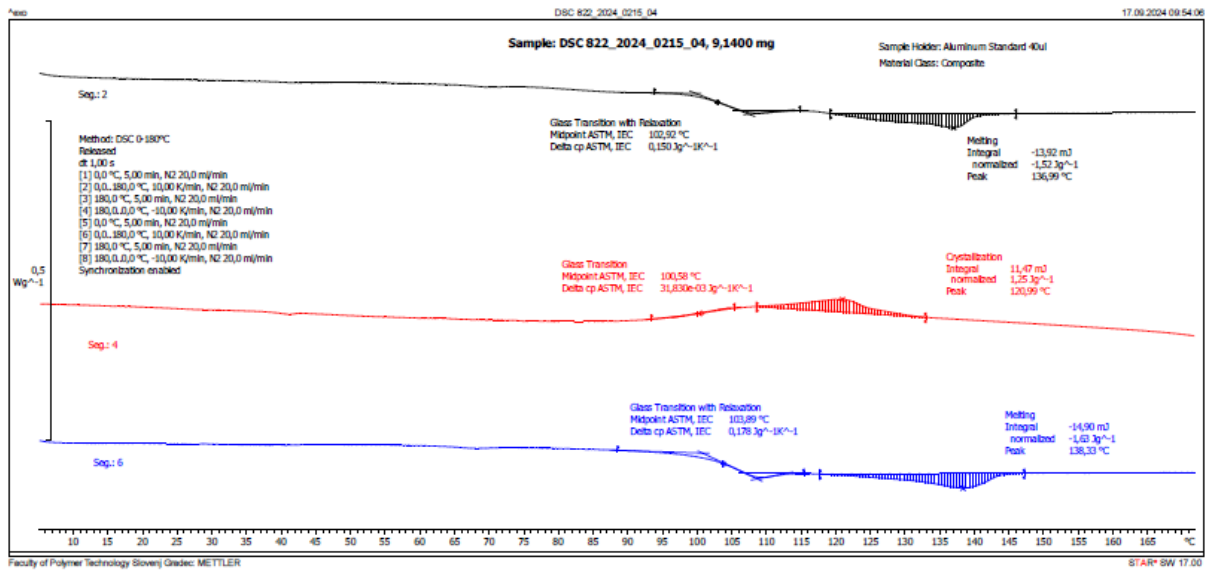
Slika 60: Graf krivulj analize DSC za vzorec 822_2023_0215_01-4



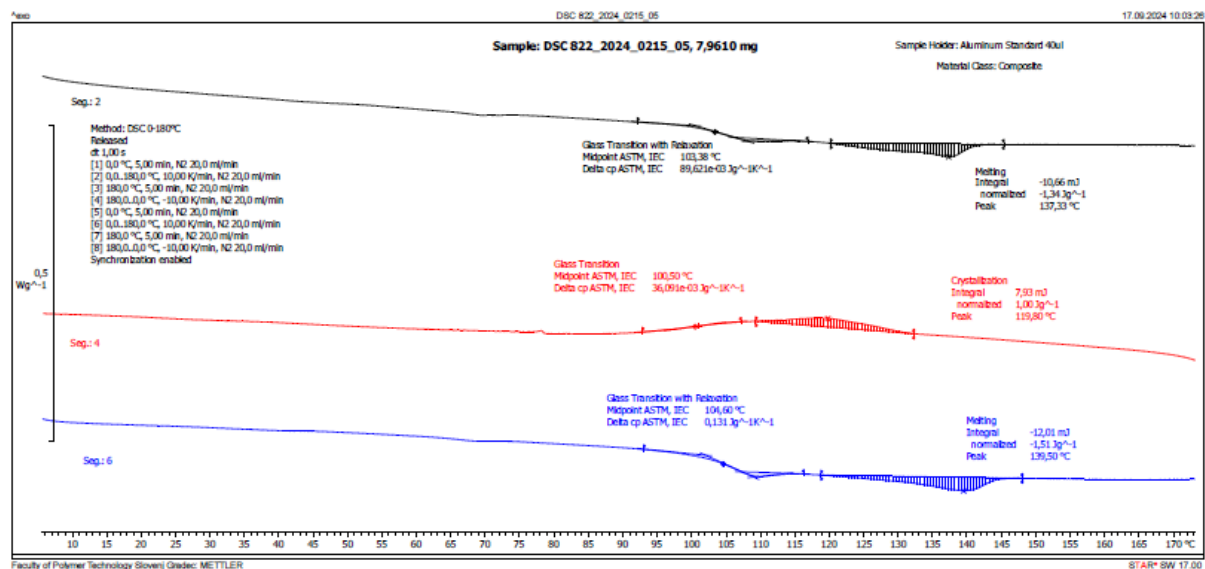
Slika 61: Graf krivulj analize DSC za vzorec 822_2023_0215_02



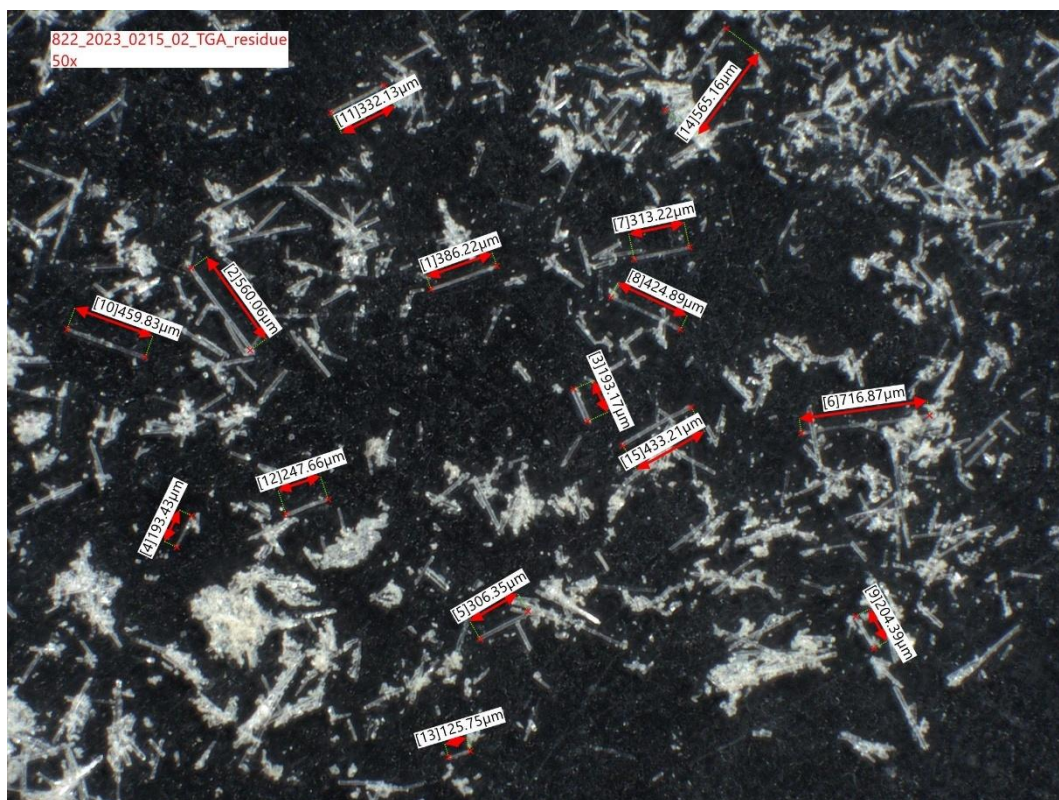
Slika 62: Graf krivulj analize DSC za vzorec 822_2023_0215_03



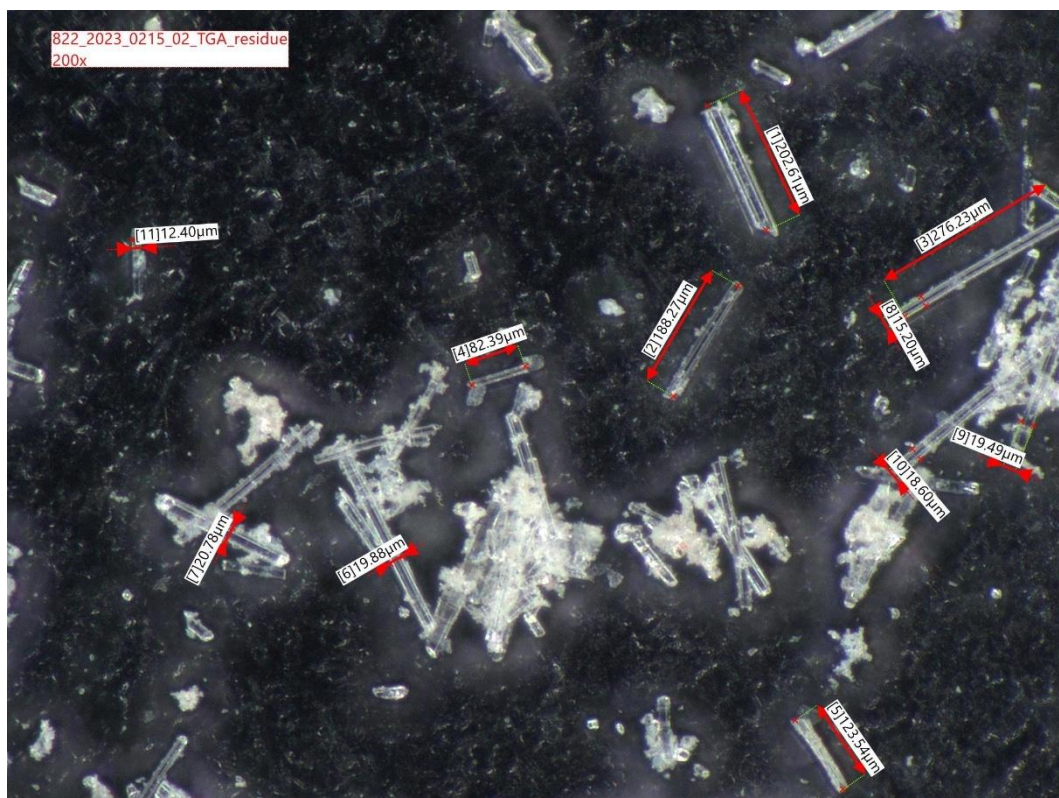
Slika 63: Graf krivulj analize DSC za vzorec 822_2023_0215_04



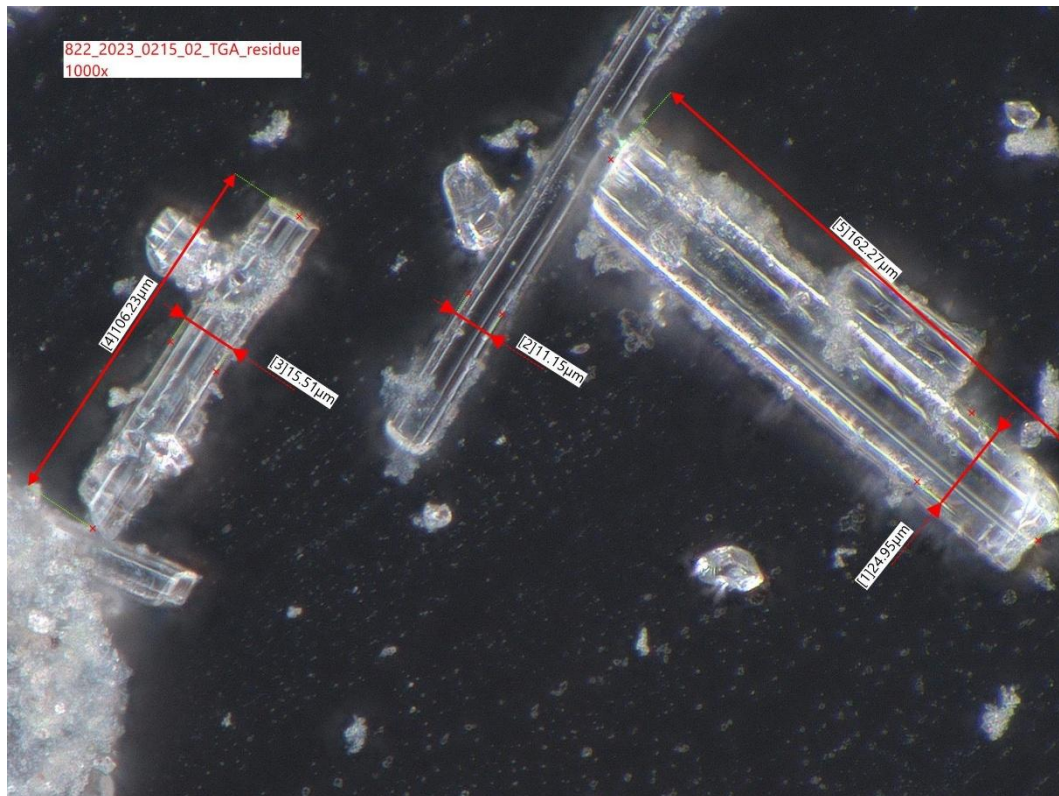
Slika 64: Graf krivulj analize DSC za vzorec 822_2023_0215_05

Priloga 6: Posnetki optičnega mikroskopa

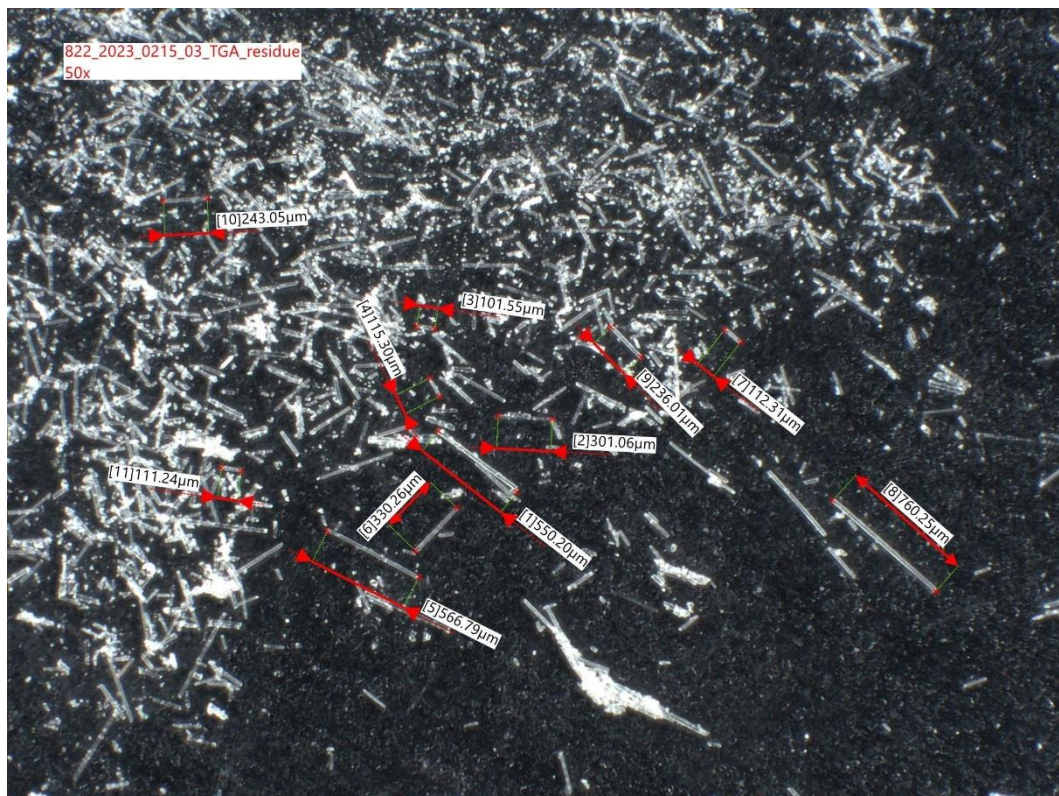
Slika 65: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_02 pri povečavi 50×



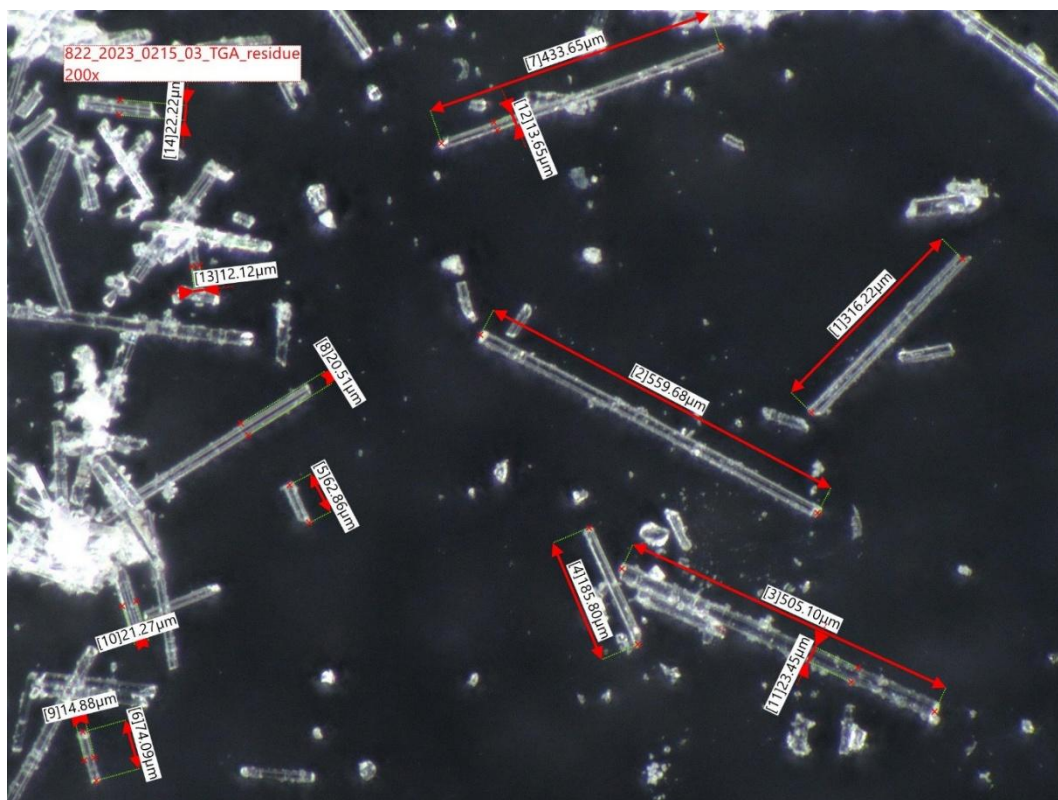
Slika 66: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_02 pri povečavi 200×



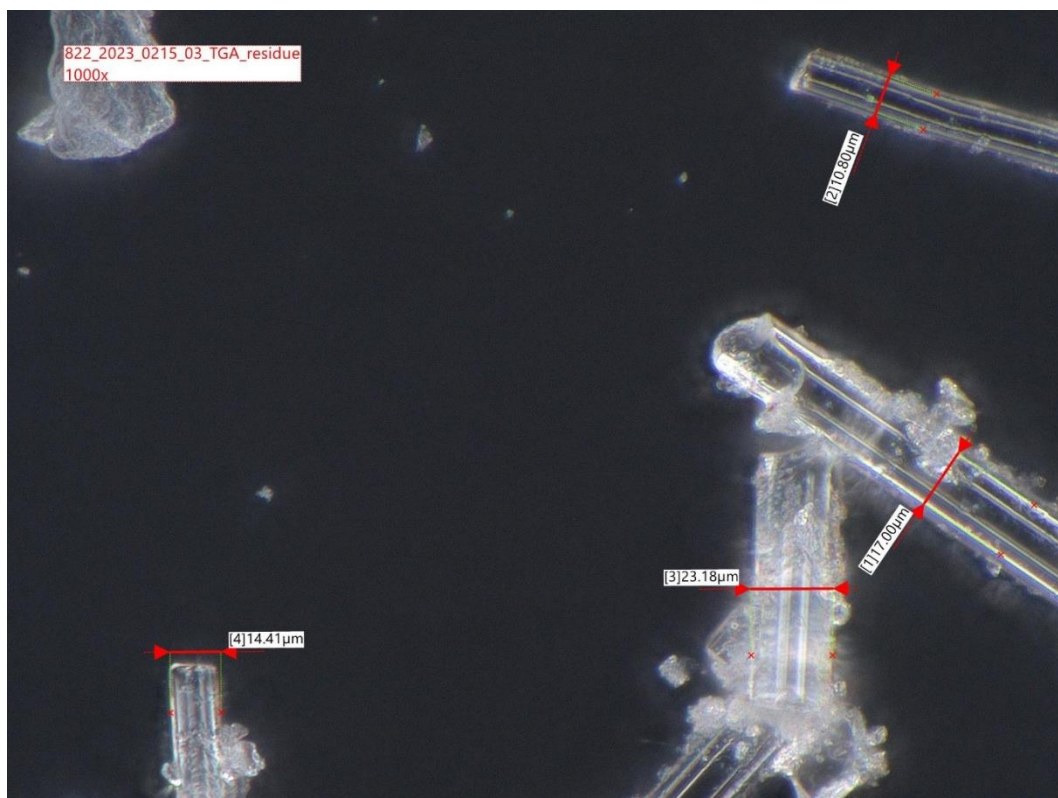
Slika 67: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_02 pri povečavi 1000×



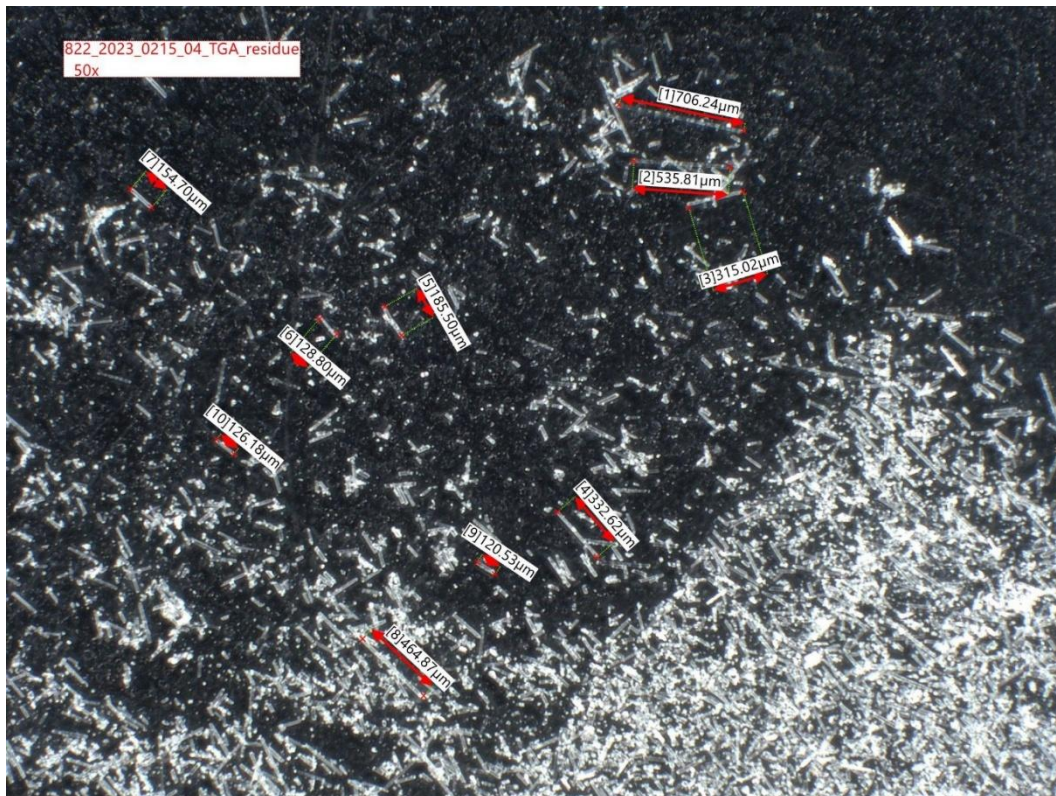
Slika 68: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_03 pri povečavi 50×



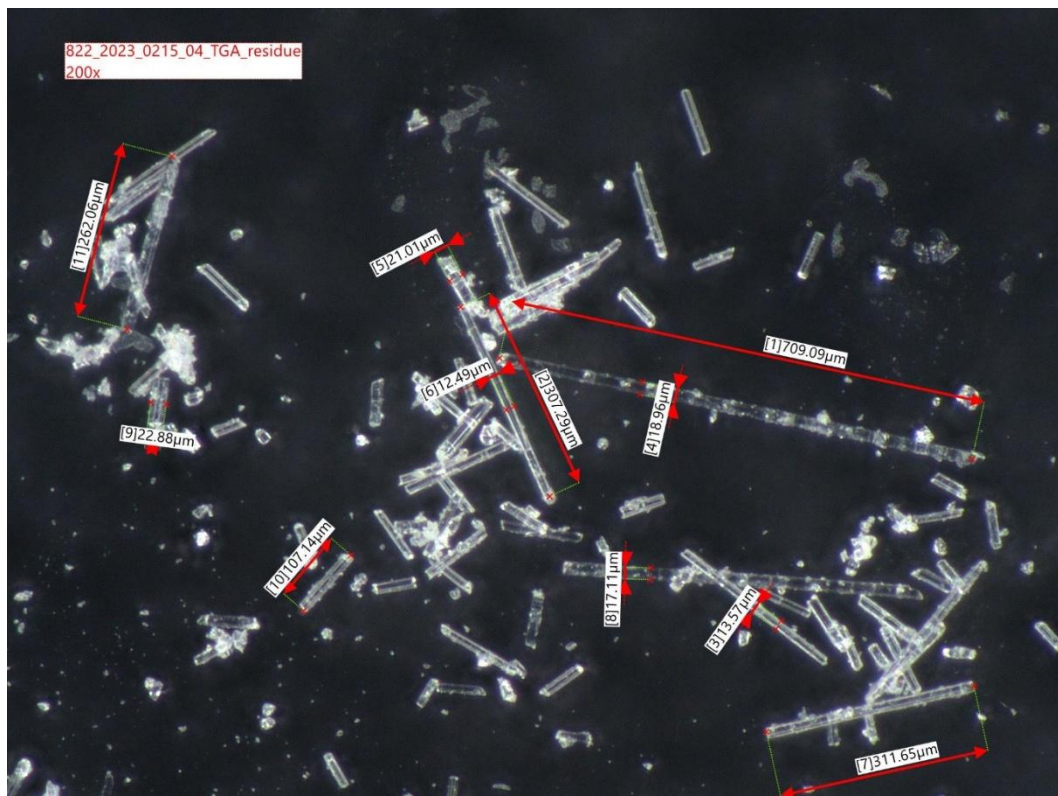
Slika 69: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_03 pri povečavi 200×



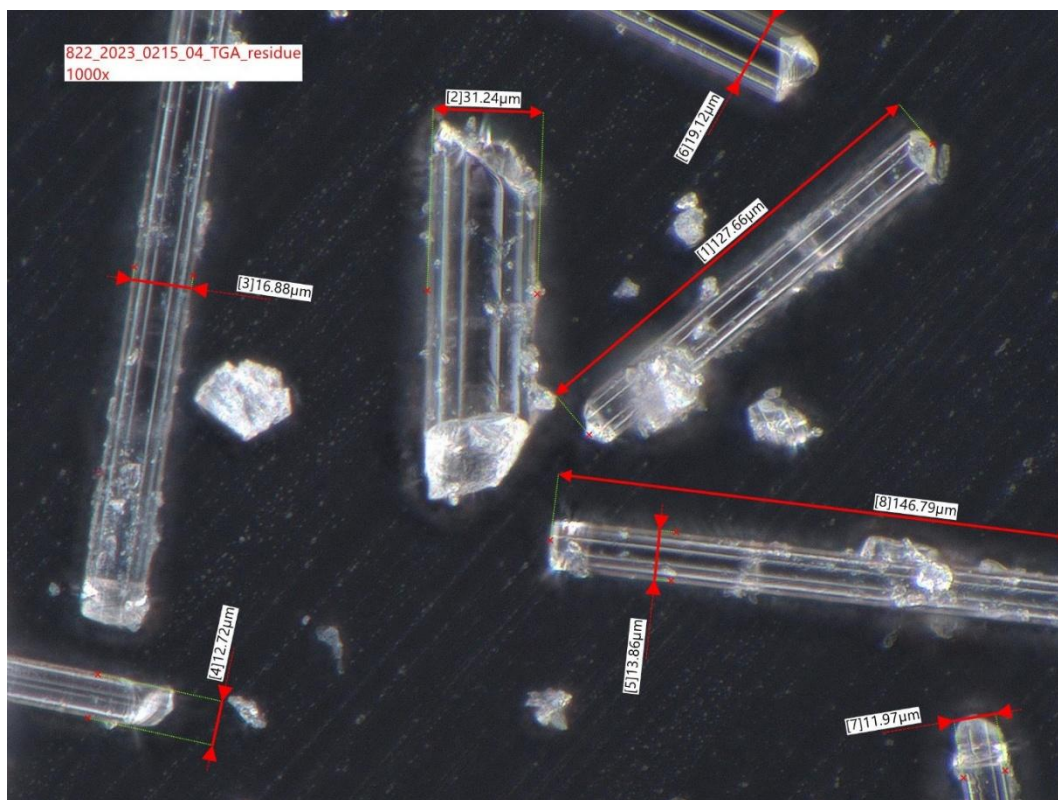
Slika 70: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_03 pri povečavi 1000×



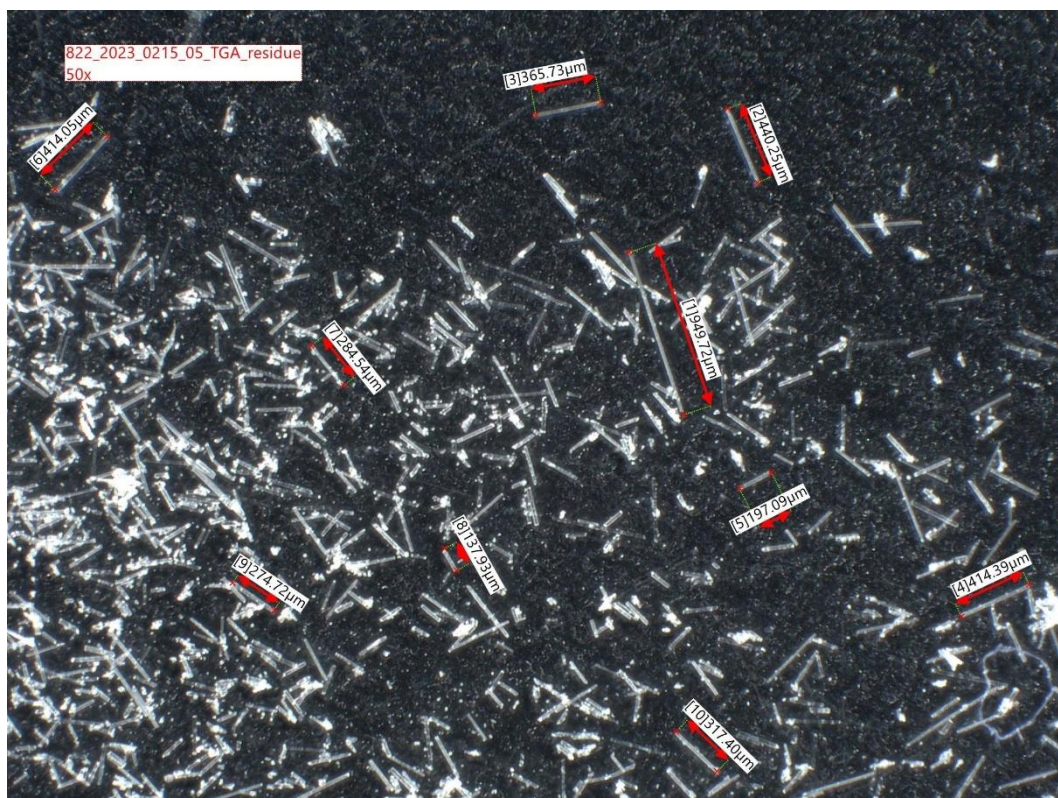
Slika 71: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_04 pri povečavi 50×



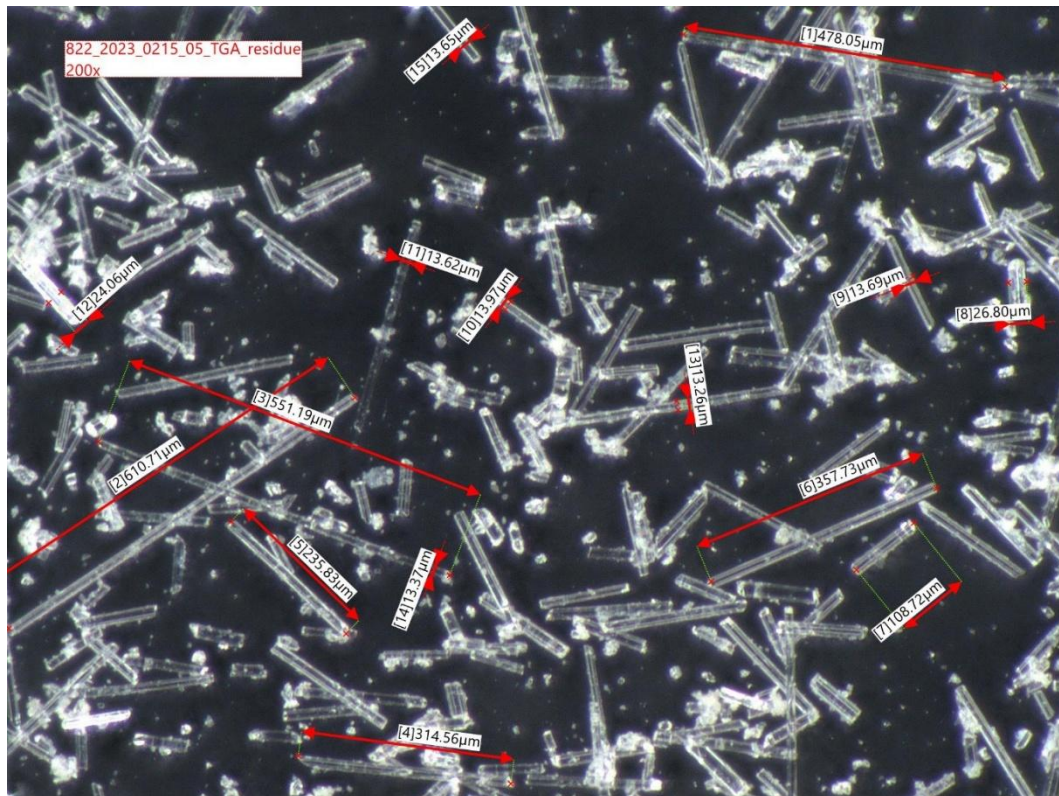
Slika 72: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_04 pri povečavi 200×



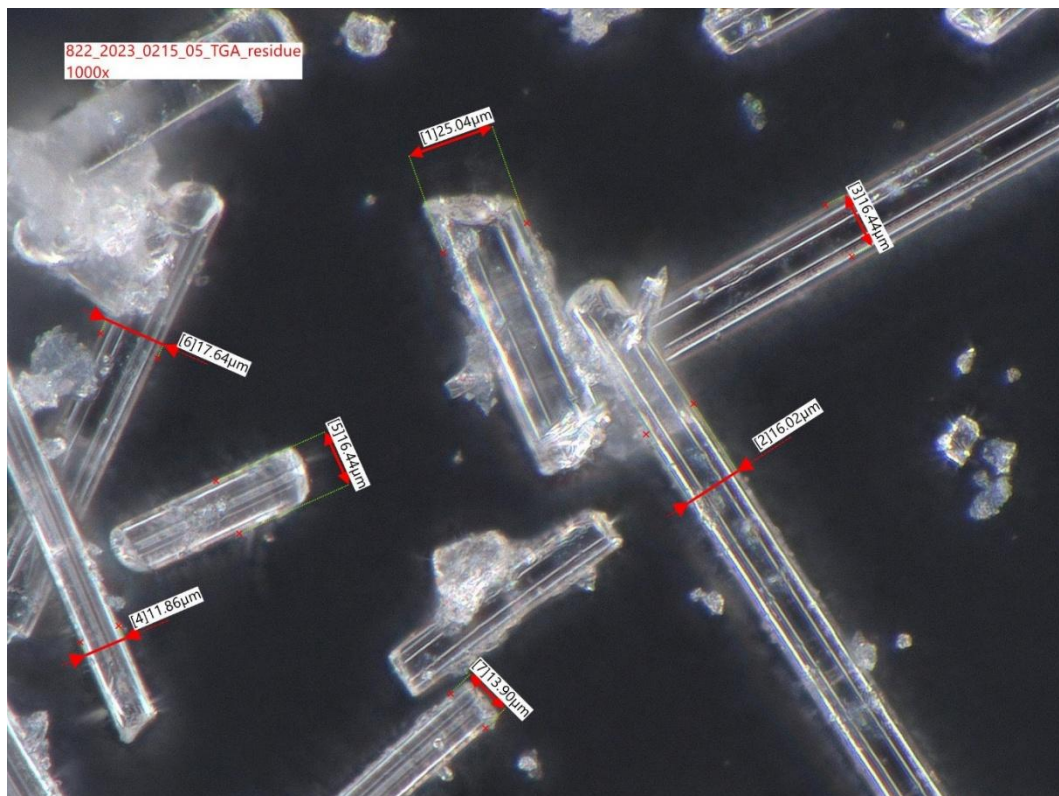
Slika 73: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_04 pri povečavi 1000×



Slika 74: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_05 pri povečavi 50×



Slika 75: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_05 pri povečavi 200×



Slika 76: Ostanek po analizi TGA vzorca 822_2023_0215_05 pri povečavi 1000×