

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Nejc JESENKO

**RECIKLIRANJE TERMOPLASTIČNEGA  
KOMPOZITA Z DODATKOM ODPADNEGA  
DUROPLASTIČNEGA KOMPOZITA**

Diplomsko delo

Slovenj Gradec, december 2024

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

# **RECIKLIRANJE TERMOPLASTIČNEGA KOMPOZITA Z DODATKOM ODPADNEGA DUROPLASTIČNEGA KOMPOZITA**

Diplomsko delo

|                    |                            |
|--------------------|----------------------------|
| Študent:           | Nejc JESENKO               |
| Študijski program: | Tehnologija polimerov      |
| Mentor:            | viš. pred. Silvester BOLKA |
| Somentorica:       | asist. Teja PEŠL           |
| Delovni mentor:    | Gašper BERGANT             |

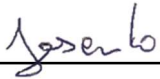
Slovenj Gradec, december 2024

## IZJAVA

Podpisani Nejc Jesenko 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, december 2024

Podpis: 

## **ZAHVALA**

Najprej bi se rad zahvalil staršem, ki so me spodbujali na študijski poti. Zahvalil bi se mentorjem in podjetju Polycom, da sem lahko razpolagal z napravami in pridobil naslov ter material. Diplomsko naloga je bila izvedena v okviru projekta DeremCo.

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 od avtorjev 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**

### **Recikliranje termoplastičnega kompozita z dodatkom odpadnega duroplastičnega kompozita**

V tej diplomski nalogi smo s pomočjo raziskav literature in praktičnega dela raziskovali vpliv dodatka reciklata duroplastičnega kompozita (rGFRP) na lastnosti recikliranega poliamida 6 s 30 % steklenih vlaken (PA 6 GF30). S pomočjo kompavnderja smo naredil mešanico s 5 % in 15 % rGFRP ter 1 % in 3 % kompatibilizatorja. Vzorcem smo po brizganju testirali mehanske in termične lastnosti. Izvedli smo analizo diferenčne dinamične kalorimetrije (DSC), temperaturno in frekvenčno modularen DSC (TOPEM), termomehansko analizo (TMA), termogravimetrično analizo (TGA), dinamično mehansko analizo (DMA), udarno žilavost, upogibni test ter natezni test. Ostanek TGA vzorca smo analizirali še z mikroskopom, kjer smo določili dolžine in premere steklenih vlaken. Po meritvah smo evalvirali rezultate, ki so kazali na izboljšanje nekaterih mehanskih lastnosti.

#### **Ključne besede:**

Kompavnder, brizganje, rGFRP, PA 6 GF30, reciklaža.

## **SUMMARY**

### **Recycling of thermoplastic composite with the addition of waste thermoset composite**

In this thesis, the researchers studied the impact of incorporating recycled duroplastic composite (rGFRP) on the properties of recycled PA 6 GF30. A mixture was created using a blender with 5 % and 15 % rGFRP, as well as 1 % and 3 % compatibilizer. The mechanical and thermal properties of the samples were then tested using various tests such as differential dynamic calorimetry (DSC), temperature and frequency modular DSC (TOPEM), thermomechanical analysis (TMA), thermogravimetric analysis (TGA), dynamic mechanical analysis (DMA), impact toughness, bending test, and tensile test. Additionally, the TGA samples were analyzed using a microscope to determine the lengths and diameters of the glass fibers. The results indicated an improvement in certain mechanical properties.

#### **Keywords:**

Compavnder, injection molding, rGFRP, PA 6 GF30, recycling.

**KAZALO VSEBINE**

|          |                                                                                    |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>UVOD</b>                                                                        | <b>1</b>  |
| 1.1      | Opis področja dela in opredelitev problema                                         | 1         |
| 1.2      | Cilji, teze ter omejitve                                                           | 2         |
| 1.2.1    | Cilji                                                                              | 2         |
| 1.2.2    | Hipoteze ali trditve                                                               | 2         |
| 1.2.3    | Omejitve                                                                           | 2         |
| 1.3      | Opis dela                                                                          | 2         |
| <b>2</b> | <b>TEORETIČNI DEL</b>                                                              | <b>3</b>  |
| 2.1      | Kompavndiranje                                                                     | 3         |
| 2.2      | Mletje                                                                             | 4         |
| 2.3      | Izboljšava reciklata z dodatkom duroplastičnega ojačevala in<br>kompatibilizatorja | 5         |
| 2.4      | PA 6 GF30                                                                          | 7         |
| 2.4.1    | Vlakna                                                                             | 8         |
| 2.4.2    | Matrica                                                                            | 9         |
| 2.4.3    | Sušenje                                                                            | 9         |
| <b>3</b> | <b>EKSPERIMENTALNI DEL</b>                                                         | <b>11</b> |
| 3.1      | Uporabljeni materiali                                                              | 11        |
| 3.2      | Priprava vzorcev – DoE                                                             | 11        |
| 3.3      | Kompavndiranje in brizganje vzorcev za testiranje                                  | 11        |
| 3.4      | Karakterizacija                                                                    | 12        |
| 3.4.1    | DSC                                                                                | 12        |
| 3.4.2    | DSC TOPEM                                                                          | 13        |
| 3.4.3    | TGA                                                                                | 13        |
| 3.4.4    | DMA                                                                                | 13        |
| 3.4.5    | TMA                                                                                | 14        |
| 3.4.6    | Mikroskopija                                                                       | 14        |
| 3.4.7    | Charpy                                                                             | 14        |
| 3.4.8    | Natezni test                                                                       | 15        |
| 3.4.9    | Upogibni test                                                                      | 15        |
| <b>4</b> | <b>REZULTATI IN DISKUSIJA</b>                                                      | <b>16</b> |
| 4.1      | Rezultati predelave pri različnih deležih polnila                                  | 16        |
| 4.1.1    | DSC                                                                                | 16        |
| 4.1.2    | DSC TOPEM                                                                          | 16        |
| 4.1.3    | TGA                                                                                | 16        |
| 4.1.4    | TMA                                                                                | 17        |
| 4.1.5    | DMA                                                                                | 17        |
| 4.1.6    | TMA                                                                                | 18        |
| 4.1.7    | Mikroskopija                                                                       | 18        |
| 4.1.8    | Charpy                                                                             | 19        |

---

|                      |           |
|----------------------|-----------|
| 4.1.9 Natezni test   | 21        |
| 4.1.10 Upogibni test | 23        |
| <b>5 SKLEP</b>       | <b>26</b> |

## 1 UVOD

### 1.1 Opis področja dela in opredelitev problema

V industriji s povečevanjem obsega dela dobimo tudi več odpadkov v obliki dolivkov in mersko neustreznih kosov. Odpad za proces nima doprinosa, zato ga je potrebno v čim večji meri predelati v izdelke. Za brizganje je potrebno odpad mleti, pri čemer pa ne dobimo enakomernih delcev; te dobimo s pomočjo kompavndiranja [1 – 4].

V nekaterih industrijah je vedno bolj zaželeno dodajanje vsaj določenega deleža reciklata, posledično pa lahko izdelek označijo kot recikliran, zelen, naravi prijaznejši ali ekološki. Recikliranje lahko poteka na različne načine. Poznamo fizikalno, kemijsko in mehansko reciklažo. Pri mehanski reciklaži najhitreje pridemo od odpadka do izdelka. Za mehansko reciklažo se uporablja mletje, regranulacija ali kompavndiranje. Za fizikalno in kemijsko reciklažo je potrebno predhodno mletje, kjer se fizično poškodujejo ojačevala, kot so steklena vlakna. Regranulacija pomeni, da mlet odpadni material predelamo z ekstruderjem, kjer nastopi termična degradacija. V predhodnih primerih v reciklat nismo ničesar dodali, pri kompavndiranju pa pri procesu dodajamo razne dodatke, kot so ojačevala, mehčala, antioksidanti itd. Z dodatki izboljšamo predelovalnost ter mehanske lastnosti materiala [1, 5, 6].

Ko želimo vsaj ohraniti lastnosti pri reciklaži, moramo dodati dodatke, kot so ojačevala, kompatibilizatorji in antioksidanti. V našem primeru bomo z dodatkom duroplastičnega odpada naredili up-cycling, s tem pa želimo doseči izboljšanje trdnosti, pri čemer bomo čim manj vplivali na ostale lastnosti [2, 7, 8].

PA 6 GF30 je že visoko polnjen, vlakna pa vplivajo na mehanske lastnosti. Steklena vlakna, z zadostno dolžino in obdelano površino, izboljšajo natezno trdnost, vendar poslabšajo raztezek pri pretrgu. Prvotna vlakna se nam bodo zaradi mehanske degradacije med procesom skrajšala, kar bo vplivalo na mehanske lastnosti [9 – 11].

Poliamidi vežejo nase vlago, voda in amidna skupina pa tvorita vodikove vezi. Vlaga pri poliamidih vpliva na mehanske lastnosti, zato jih pred predelavo ustrezno posušimo in po postopku brizganja navlažimo. Med predelavo je polimer izpostavljen visokim temperaturam in ob prisotnosti vlage nastanejo podobni pogoji kot pri sintezi, ki pa je ravnotežna reakcija, kar pomeni, da nam bi del poliamida depolimeriziral [12 – 14].

V diplomskem delu želimo narediti up-cycling PA 6 GF30 z dodajanjem mletega rGFRP v deležu 5 % in 15 %, ki bo obdelan s kompatibilizatorjem 1 % in 3 %.

## **1.2 Cilji, teze ter omejitve**

### **1.2.1 Cilji**

Glavni cilj diplomskega dela je bil določiti vpliv deleža reciklata duroplastičnega kompozita ter kompatibilizatorja na mehanske lastnosti recikliranega termoplastičnega kompozita. Izvedli smo dizajn eksperimenta (DoE) za mlevec in delež reciklata duroplastičnega kompozita (DoE s 4 serijami).

Spoznali smo metode za določevanje lastnosti materiala (natezni, upogibni testi, DMA, DSC, DSC TOPEM, TGA, mikroskop (ostanek po TGA), TMA (za  $\alpha$ ), meritve udarne in zarezne udarne žilavosti).

### **1.2.2 Hipoteze ali trditve**

Pričakovali smo, da se bosta togost in trdnost materialu zvišali ob dodatku rGFRP ter dovolj visokem deležu kompatibilizatorja XILOY™ IG360.

### **1.2.3 Omejitve**

Pri dodatku 15 % rGFRP reciklatu PA 6 GF30 smo pričakovali težave pri kompavndiranju zaradi visokega deleža polnila.

## **1.3 Opis dela**

Osnovni material smo najprej zmleli in mu določili najboljšo kombinacijo med rGFRP (5 % in 15 %) in kompatibilizatorjem (1 % in 3 %). Z optimalnimi deleži smo izvedli dvojno reciklažo materiala. Za vsako serijo smo porabili 10 kg granulata. Na Fakulteti za tehnologijo polimerov (FTPO) smo brizgali epruvete za testiranje materiala in v laboratoriju FTPO izvedli karakterizacijo.

## 2 TEORETIČNI DEL

### 2.1 Kompavndiranje

Kompavndiranje (slika 1) je postopek predelave plastike, ki omogoča ustvarjanje mešanic materialov s ciljem pridobiti specifične mehanske, termične, kemične in optične lastnosti. Gre za proces, pri katerem se različni dodatki, polnila, ojačitvena sredstva in pigmenti zmešajo s polimernim osnovnim materialom (matrico), da se dosežejo želene karakteristike mešanice [1, 2, 4].



*Slika 1: Dvopolžni ekstruder [15]*

Začetni korak pri kompavndiranju je izbira osnovnega polimernega materiala in sušenje le-tega do ustrezne vlažnosti. Ustrezno osušen material je predpogoj, da se zagotovi prave lastnosti predelanega termoplasta, kot so trdnost, toplotna odpornost in žilavost [1, 2, 4].

Različni dodatki, kot so stabilizatorji, antistatične snovi, UV absorberji, polnila in ojačevala, se izberejo glede na zahtevane končne lastnosti. Dodatki lahko izboljšajo odpornost na staranje, toplotno stabilnost in druge specifične lastnosti [1, 2, 4].

Mešanje sestavin je ključno, da dosežemo homogenost. Material se lahko dozira kot mešanica ali se meša šele v kompavnderju, v katerega ga gravimetrično dozirajo avtomatski dozirniki, ki omogočajo enakomerno porazdelitev dodatkov in polnil po osnovnem polimernem materialu [1, 2, 4].

Med kompavndiranjem se lahko pojavijo kemične reakcije, interakcije med komponentami ter fizikalna in termična degradacija materiala. Te reakcije lahko vplivajo na končne lastnosti kompavnda [1, 2, 4].

Končni rezultat kompavndiranja je mešanica (kompozit) z želenimi lastnostmi. Ta se lahko uporablja za različne proizvodne procese, kot so ekstruzija, brizganje plastike in ostali procesi za predelavo termoplastov [1, 2, 4].

Kompavndiranje je ključen postopek pri oblikovanju in prilagajanju termoplastov za širok spekter aplikacij. Razumevanje osnovnih principov in vplivov kompavndiranja na lastnosti termoplastov je bistveno za uspešno izvedbo proizvodnih procesov in pripravo materialov z optimalnimi lastnostmi [1, 2, 4].

## 2.2 Mletje

Mletje termoplastov je ključni proces v recikliranju, ki omogoča ponovno uporabo in zmanjšanje vpliva na okolje. Ta postopek vključuje razbijanje večjih termoplastičnih kosov na manjše delce (slika 2), ki jih je mogoče obdelati in uporabiti za proizvodnjo novih izdelkov. Mletje termoplastov se izvaja z namenom pridobitve recikliranih surovin, ki se lahko vključijo nazaj v proizvodni cikel. V primeru mletja dolivkov in mersko neustreznih kosov pa je optimalno, da mletje poteka že poleg stroja [2].



*Slika 2: Mletina osnovnega materiala*

Termoplastični odpadki se najprej zberejo in ločijo glede na vrsto (npr. polietilen tereftalat - PET, polietilen viske gostote - HDPE, polietilen nizke gostote LDPE itd.), saj se različne vrste termoplastov različno obnašajo med mletjem in zaradi potreb nadaljnje obdelave do izdelkov [2].

V nekaterih primerih je potrebno termoplastične delce očistiti, da se odstranijo umazanija, ostanki barv in drugih nečistoč. To je še posebej pomembno za visokokakovostno recikliranje. Korak ločevanja pa ni potreben, če se izmet zbira interno po tipu materiala [2].

Mletino - zmlete termoplastične delce je mogoče uporabiti kot surovino za različne proizvodne procese, kot so ekstruzija, brizganje plastike in 3D tiskanje. Te surovine lahko vključujejo določene dodatke za izboljšanje lastnosti recikliranih materialov [2].

Mletje plastike je bistven korak pri doseganju ciljev trajnostnega razvoja in zmanjševanju količine termoplastičnih odpadkov. Pomembno je zagotoviti učinkovit in kakovosten proces mletja, da se lahko reciklirani materiali uporabijo za izdelovanje novih izdelkov, s čimer se zmanjša potreba po proizvodnji svežih termoplastov iz neobnovljivih surovin [1, 2].

### **2.3 Izboljšava reciklata z dodatkom duroplastičnega ojačevala in kompatibilizatorja**

V procesu recikliranja termoplastov je ključno doseči čim višjo kakovost recikliranega materiala, da se omogoči njegova uporaba v različnih aplikacijah. Eden od pristopov k izboljšanju kakovosti reciklata je dodajanje duroplastičnih ojačeval in kompatibilizatorjev. Ta pristop lahko znatno vpliva na mehanske in termične lastnosti recikliranega materiala, prav tako pa lahko s tem zmanjšamo porabo nove (sveže) plastike in znižamo uporabo neobnovljivih surovin, ki so potrebne za izdelavo plastike [2].

Duroplastična ojačevala so običajno steklena ali ogljikova vlakna. Dodatek teh ojačeval v termoplastično matrico poveča trdnost, togost in odpornost na udarce recikliranega materiala. S tem se lahko poveča njegova uporabnost v zahtevnejših aplikacijah, kot sta avtomobilska industrija ali gradbeni sektor [2].

Pri recikliranju se uporabljajo različni tipi plastike, ki so lahko med seboj in z ojačevalom slabo združljivi. To vpliva na homogenost in lastnosti končnega recikliranega materiala. Kompatibilizatorji (slika 3) so snovi, ki se dodajajo za izboljšanje združljivosti med različnimi vrstami plastike ter med matrico in ojačevalom. Ti dodatki omogočajo boljše mešanje ter bolj enakomerno porazdelitev različnih komponent v recikliranem materialu. S tem se doseže bolj stabilen in predvidljiv material z zelenimi lastnostmi. V raziskavah so prišli do spoznanja, da v fazi recikliranja predhodni kompatibilizator degradira [2].

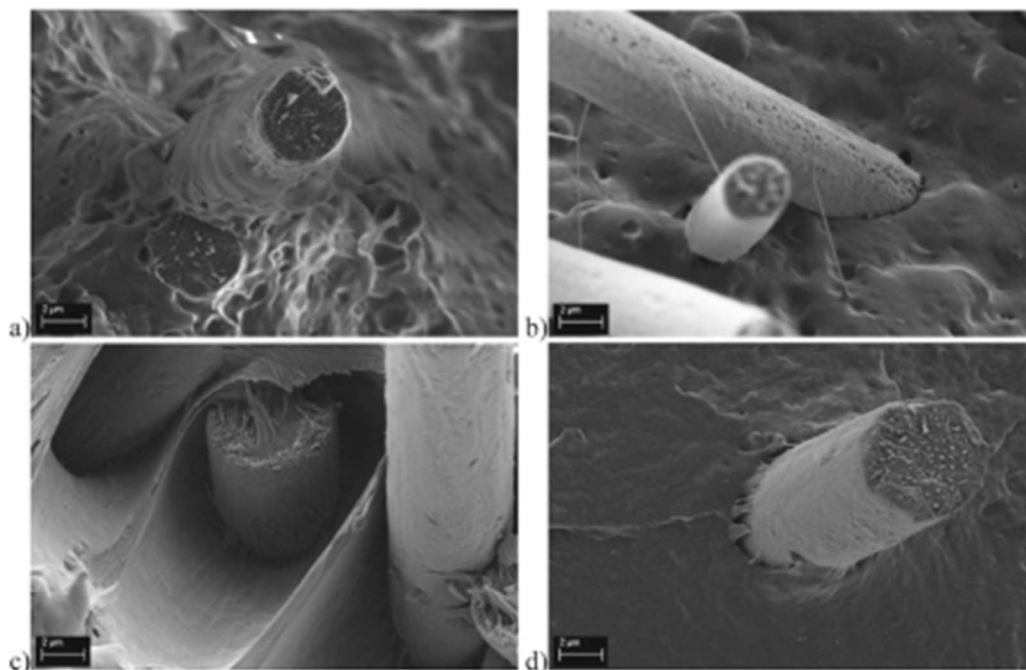


*Slika 3: Kompatibilizator*

Uporaba duroplastičnih ojačeval in kompatibilizatorjev v termoplastičnem reciklatu ima lahko pozitiven vpliv na okolje. S povečanjem trdnosti in življenjske dobe recikliranega materiala se lahko podaljša njegova uporabnost, kar zmanjšuje potrebo po uporabi plastike iz osnovnih virov. To lahko prispeva k zmanjšanju količine odpadkov in energije, porabljene za proizvodnjo novih materialov [2].

Kljub potencialnim koristim obstajajo tudi izzivi pri dodajanju ojačeval in kompatibilizatorjev v reciklat. Natančno določanje optimalnih razmerij, postopkov mešanja in vpliva na lastnosti končnega izdelka zahteva temeljite raziskave. Prav tako je pomembno oceniti vpliv teh dodatkov na stroške in celoten cikel izdelave [2].

Če povzamemo, dodajanje duroplastičnih ojačeval in kompatibilizatorjev reciklatu plastike ima potencial za izboljšanje njegove kakovosti, trdnosti in uporabnosti. Ta pristop ima tudi trajnostni vidik, saj lahko prispeva k zmanjšanju porabe neobnovljivih surovin in količine odpadkov. Raziskave in razvoj na tem področju so ključni za optimizacijo teh dodatkov ter njihov pozitiven vpliv na proces recikliranja [2].

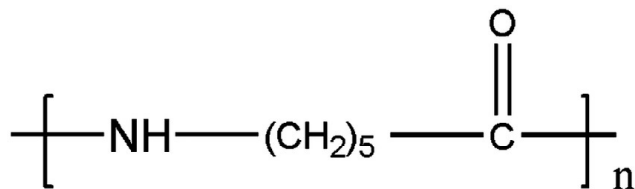


Slika 4: Površina na lomu a) PP rCF20 brez kompatibilizatorja, b) PP rCF20 kompavndiran s kompatibilizatorjem, c) PA rCF20 kompavndiran brez kompatibilizatorja, d) PA rCF20 kompavndiran s kompatibilizatorjem [2]

V raziskavi Laurikainen P. in ostalih so opazili, da so pri materialu PA/rCF, kjer so bila vlakna obdelana s kompatibilizatorjem (slika 4), imela 100 % višji modul v primerjavi s kompozitom, kjer vlakna niso bila obdelana. Pri natezni trdnosti je bila razlika med kompozitom z obdelanimi steklenimi vlakni in neobdelanimi 45 %. Boljše lastnosti je imel kompozit z obdelanimi vlakni [16].

## 2.4 PA 6 GF30

Poliamid (PA) je široko uporabljen material na področju inženirskih materialov, posebej v avtoindustriji, ker je uporabljen zaradi svojih termičnih in mehanskih lastnosti. Sestavljen je iz verige petih CH<sub>2</sub> skupin, NH skupine ter CO skupine; struktura je prikazana na sliki 5.



Slika 5: Ponavljajoča enota PA 6 [17]

PA 6 GF30 je kompozit s 30 % vsebnostjo steklenih vlaken. Kompoziti so materiali, ki so sestavljeni iz matrice ter ojačevala. V našem primeru je matrica PA 6, ojačevalo pa so steklena vlakna, ki so bila predhodno v materialu, ter dodana rGFRP [9].

V raziskavi so opazili, da so z dodatkom steklenih vlaken vplivali na mehanske in termične lastnosti prvotnega materiala, kar je vidno v spodnji tabeli 1. Pri dodatku 20

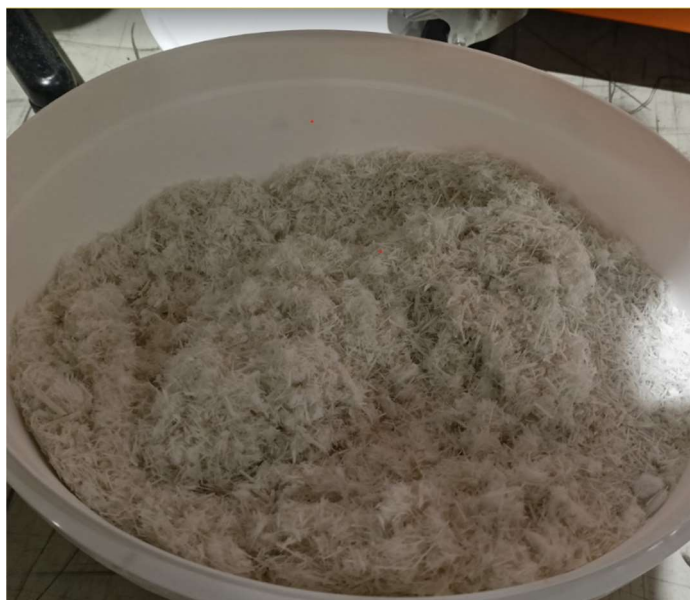
% steklenih vlaken se je natezna trdnost izboljšala za 88 %, dodatnih 10 % steklenih vlaken pa nanjo ni vplivalo; za sam PA 6 so izmerili natezno trdnost 42,8 MPa. Z dodatkom steklenih vlaken se je zvišal tudi natezni E modul [9].

*Tabela 1: Primerjava nateznega E modula, temperature steklastega prehoda ter temperature držanja oblike med PA 6, PA 6 z dodatkom 20 % GF in PA 6 z dodatkom 30 % GF*

| Vzorec              | PA 6 | PA 6 + 20 % GF | PA 6 + 30 % GF |
|---------------------|------|----------------|----------------|
| Youngov modul (MPa) | 981  | 1864           | 2225           |
| Tg (°C)             | 55,3 | 78,2           | 78,8           |
| HDT pri 1,82 MPa    | 45,4 | 84,1           | 95,9           |

#### 2.4.1 Vlakna

Vlakna so komponenta kompozitnih materialov, v večina primerih gre za ojačevala. Poznamo jih več vrst od naravnih do umetnih. Naš kompozit bo vseboval steklena vlakna, ki so bila predhodno v materialu, ter dodana rGFRP (slika 6). Kompoziti lahko vsebujejo kratka vlakna, dolga vlakna, polnila, kroglice ali ploskovita polnila/ojačevala. Med vlakni so steklena vlakna najbolj razširjena zaradi dobrih mehanskih lastnosti ter cenovne dostopnosti. Vlakna lahko ločimo še po dolžini na kratka vlakna, ki so dolga do 2 mm, dolga vlakna, ki imajo dolžino med 2 in 50 mm, ter neskončna vlakna, ki presegajo 50 mm. Poleg dolžine pa je pri vlaknih pomemben tudi premer ter razmerje med le-tem in dolžino vlakna (L/D razmerje). L/D razmerje vrednosti 1 predstavlja sferičen delec, z višanjem vrednosti pa je vlakno čedalje daljše in/ali tanjše in ima s tem več površine, ki je relevantna pri obremenitvi kompozita [2].



*Slika 6: Primer rGFRP*

V raziskavi so PA 6 dodajali steklena vlakna, ki so jih reciklirali iz steklenih tkanin, ki so jih predhodno prečistili z etanolom in nato zmleli z mlinom z velikostjo sita 6 mm.

Vlakna so nato osušili v peči na 70 °C. Svoja vlakna so nato primerjali s komercialnimi. V spodnji tabeli 2 so razvidne razlike [9].

**Tabela 2: Primerjava lastnosti rGF, uporabljenih v raziskavi, s S steklenimi vlakni in E steklenimi vlakni**

| Lastnost steklenih vlaken | rGF   | S-steklo | E-steklo |
|---------------------------|-------|----------|----------|
| Natezna trdnost (GPa)     | 0,80  | 4,89     | 3,45     |
| Natezni E modul (GPa)     | 72,76 | 86,9     | 72,3     |
| Raztezek (%)              | 1,17  | 5,7      | 4,8      |
| Premer (μm)               | 12,11 | 8-16     | 6-17     |
| Cena (USD/kg)             | 0,50  | 10       | 9        |

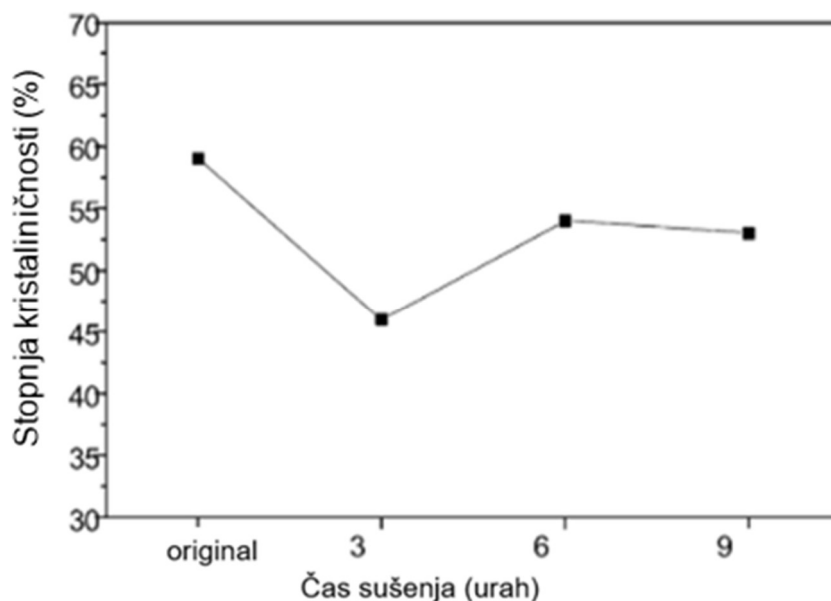
## 2.4.2 Matrica

Med matricami lahko ločimo dva glavna tipa, duroplaste in termoplaste. Duroplasti se večinsko uporabljajo v izdelkih, kjer kot ojačevalo nastopajo tkanine ali mate vlakna. Med bolj uporabljenimi duroplasti so epoksid, poliuretan, vinilester in poliester. Pri termoplastih pa kot ojačevala večinsko nastopajo krajša vlakna zaradi načina predelave (brizganje). Med termoplasti je v avtoindustriji najbolj prisoten PA.

## 2.4.3 Sušenje

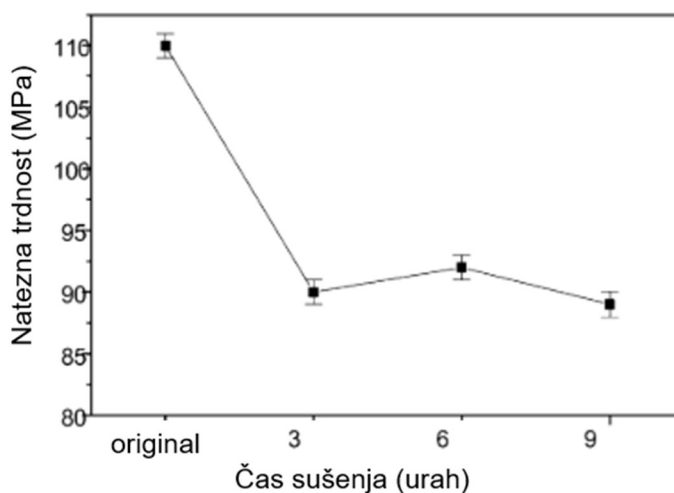
PA je delnokristaliničen polimer. Njegova struktura omogoča tvorbo vodikove vezi, amorfna faza pa zelo dobro veže vodo. Absorbira več kot 8 % vode na lastno maso pri 100 % relativni vlažnosti. Absorpcija vode pa vpliva tudi na staranje materiala ter na mehanske lastnosti. Zaradi vode, vezane z vodikovo vezjo, so molekule lažje gibljive, posledično pa se znižuje temperatura steklastega prehoda. Voda lahko tudi prekine vezi med poliamidnimi verigami in s tem znižuje natezno trdnost materiala. Poslabšanje lastnosti pri vlažnem materialu pa je tudi posledica vpliva vode na interakcije med matrico in ojačevalom [13].

V raziskavi A. G. Pedrosova so opazili, kako čas sušenja vpliva na končne lastnosti materiala. V poskusu so mlet material sušili 3, 6 in 9 ur. Material so karakterizirali in opazili, da je minimalen potreben čas sušenja 6 ur. S TGA metodo so pokazali, da so po 6 urah iz vzorca izločili 50 % vode, po dodatnih 3 urah pa le 18,8 % več. Pri vzorcih, sušenih 6 ur, so izmerili tudi višjo stopnjo kristaliničnosti (slika 7) kot pri vzorcu, sušenem 3 ure. Stopnja kristaliničnosti se je znižala v primerjavi z originalnim materialom, vendar se po času sušenja, daljšem od 6 ur, ni zviševala, kar bi nakazovalo temperaturno degradacijo PA.



Slika 7: Vpliv časa sušenja na stopnjo kristaliničnosti – x os predstavlja čas sušenja v urah, y os pa stopnjo kristaliničnosti v odstotkih [12]

Padec stopnje kristaliničnosti materiala pa vpliva tudi na njegove mehanske in kemične lastnosti. S slike 8 je razviden rezultat analize natezne trdnosti materiala kot funkcija časa sušenja. Tu je razviden padec natezne trdnosti med svežim materialom ter materialom, ki je bil izpostavljen sušenju ter posledično termični degradaciji [11, 12].



Slika 8: Odvisnost natezne trdnosti od časa sušenja za svež material - x os predstavlja čas sušenja v urah, y os pa natezno trdnost v megapaskalih [12]

### 3 EKSPERIMENTALNI DEL

#### 3.1 Uporabljeni materiali

V podjetju Polycom smo uporabili mlevec PA 6 GF30. Material je komercialno poimenovan Ultramid B3HG6 HSP BK23346, proizvajalca BASF. Od podjetja AMIK ITALIA S.P.A. smo uporabili antioksidat, rGFRP iz FTPO ter kompatibilizator XILOY IG360 podjetja Urorium Netherlands B.V.

#### 3.2 Priprava vzorcev – DoE

Za dizajn eksperimenta smo imeli dve spremenljivki: delež kompatibilizatorja ter delež rGFRP. Mlet material, PA 6 GF30, je bil sušen v Polycomu v sušilniku Motan Bins s prostornino 150 L. Sušen je bil 5 ur pri 80 °C. Za pripravo vzorcev granulata smo uporabili kompavnder Labtech LTE 26-48 s premerom polža 26 mm in L/D razmerjem 48:1. V spodnji tabeli 3 so predstavljene verzije vzorcev, kot referenco pa smo uporabili mletino, ki smo ji dodali le antioksidant.

*Tabela 3: Sestava vzorcev*

| Vzorec           | Masa (g) | % rGFRP Technol | % AT 10 | % XILOY™ IG360 | % rPA 6 GF30 - Ultramid B3HG6 HSP BK23346 |
|------------------|----------|-----------------|---------|----------------|-------------------------------------------|
| 822_2024_0186_00 | 10000    | 0               | 0,3     | 0              | 99,7                                      |
| 822_2024_0186_01 | 10000    | 5               | 0,3     | 1              | 93,7                                      |
| 822_2024_0186_02 | 10000    | 15              | 0,3     | 1              | 83,7                                      |
| 822_2024_0186_03 | 10000    | 5               | 0,3     | 3              | 91,7                                      |
| 822_2024_0186_04 | 10000    | 15              | 0,3     | 3              | 81,7                                      |
| 822_2024_0186_05 | 10000    | 10              | 0,3     | 2              | 87,7                                      |

#### 3.3 Kompavndiranje in brizganje vzorcev za testiranje

Material za vzorce smo pripravili s kompavndiranjem. Pogoji kompavndiranja so predstavljeni v tabeli 4. Po kompavndiranju in granulaciji pred procesom brizganja smo sušili 9 ur pri temperaturi 80 °C.

Za brizganje testnih epruvet smo uporabili brizgalni stroj Krauss Maffei CX 50-180 s premerom polža 30 mm. Brizganje referenčnih vzorcev je potekalo brez težav, za druge vzorce smo zaradi ostajanja kosov na dolivni strani morali spreminjati parametre. Rešitev je bila znižanje temperature temperirne naprave z 80 °C na 70 °C. Potrebno je bilo tudi odmikanje dozirne enote ter znižanje temperature šobe, da smo imeli dolivke brez dodatne izvlečene plastike. V spodnji tabeli 5 so predstavljeni optimirani pogoji brizganja. Za vsako različico materiala smo nabrizgali po 80 kosov, od tega smo za zadnjih 20 kosov zamenjali delni oblikovni vložek, da smo dobili preizkušance z zarezo.

Tabela 4: Pogoji kompavndiranja

|                         | Pogoji   |       |     |            |
|-------------------------|----------|-------|-----|------------|
| Cona                    | Šoba - 3 | 4 - 6 | 7-9 | 10 - lijak |
| Temperatura (°C)        | 245      | 240   | 235 | 230        |
| Obrati polžev (obr/min) | 250      |       |     |            |

Tabela 5: Pogoji brizganja

| Parameter                      | Vrednost |     |     |          |     |
|--------------------------------|----------|-----|-----|----------|-----|
| Temperaturni profil (°C)       | Šoba     | 4   | 3   | 2        | 1   |
|                                | 225      | 230 | 220 | 215      | 210 |
| Pot plastificiranja (mm)       | 18       |     |     |          |     |
| Dekompresija (mm)              | 1        |     |     |          |     |
| Preklop (mm)                   | 4,5      |     |     |          |     |
| Naknadni tlak                  | 2        |     |     | 1        |     |
|                                | 200 bar  |     |     | 1000 bar |     |
|                                | 1 s      |     |     | 7 s      |     |
| Čas hlajenja (s)               | 13       |     |     |          |     |
| Protitlak (bar)                | 30       |     |     |          |     |
| Obrati plastificiranja (1/min) | 60       |     |     |          |     |
| Zapiralna sila (kN)            | 500      |     |     |          |     |
| Brizganje                      | 2        |     |     | 1        |     |
|                                | 20 mm/s  |     |     | 80 mm/s  |     |
|                                | 2000 bar |     |     | 2000 bar |     |
|                                | /        |     |     | 6 mm     |     |

### 3.4 Karakterizacija

#### 3.4.1 DSC

DSC oziroma diferenčna dinamična kalorimetrija je ena od tehnologij termične analize. Pri DSC naprava meri energijsko absorpcijo ali desorpcijo med gretjem in hlajenjem. Meritve prilagodi glede na temperature referenčne celice pri enaki moči segrevanja. Vzorec ima pri specifičnih temperaturah, pri katerih se dogajajo spremembe, večjo potrebo po energiji ali pa jo lahko več odda. V primeru steklastega prehoda ter taljenja komori z vzorcem temperatura stagnira kljub temu, da je bila dodana enaka količina energije kot referenci. Temperatura začne ponovno naraščati, ko je prehod stanja končan. Pri spremembah, kot je kristalizacija, pa vzorec sprošča energijo, kar imenujemo tudi eksotermni proces, in se temperatura komore poviša brez dodane energije. Vzorec je v času meritev v inertni atmosferi.

Z DSC meritvijo smo našim vzorcem določili temperaturo steklastega prehoda ( $T_g$ ), temperaturo tališča ( $T_m$ ), talilno entalpijo ( $\Delta H_m$ ), temperaturo kristalizacije ( $T_c$ ), entalpijo kristalizacije ( $\Delta H_c$ ) ter specifično toploto ( $C_p$ ) vzorcev.

Meritve smo izvedli z napravo Mettler Toledo DSC 2. Uporabili smo aluminijaste lončke volumna 40  $\mu\text{L}$ , kamor smo z natančnostjo 4 decimalnih mest natehtali 3-8 mg vzorca. Med meritvijo se je s pomočjo dušika s pretokom 20 mL/min ohranjala inertna atmosfera. Najprej je naprava s pomočjo segrevanja od 0 °C do 260 °C, s hitrostjo segrevanja 10 °C/min, 5-minutnega izotermnega segmenta ter ohlajanja s hitrostjo ohlajanja 10 °C/min izbrisala termično zgodovino materiala. Potem se je cikel ponovil, iz tega pa smo razbrali prej našteje želene karakteristike materiala.

### 3.4.2 DSC TOPEM

Temperaturno in frekvenčno modularen DSC (TOPEM) je tehnika DSC meritve. Ta omogoča meritev specifične toplote materiala ( $C_p$ ), kar nam pove zmožnost materiala za hranjenje toplotne energije in je definirana z enoto J/kgK.

Meritev je potekala z vzorci, ki so bili pomerjeni z DSC-jem, ti so že imeli znano termično zgodovino. Meritev je potekala tako, da smo vzorec najprej 1 minuto temperirali na 0 °C, nato se je med meritvijo vzorec segrel od 0 °C do 280 °C s hitrostjo segrevanja 1 °C/min.

### 3.4.3 TGA

Termogravimetrična analiza (TGA) je analiza, ki meri spremembo mase v odvisnosti od časa, temperature in atmosfere. S pomočjo te analize smo vzorcu s pomočjo termograma določili vsebnost vlage, temperaturo dekompozicije, z dodatkom kisika pa smo določili še delež oksidativne snovi. Določili smo tudi delež ostanka, v našem primeru so bila to steklena vlakna.

Naprava, ki smo jo uporabili za meritev, je bila Mettler Toledo TGA/DSC 3+. Test je potekal z vzorci v aluminijastih lončkih volumna 40  $\mu\text{L}$ . Lonček z vzorcem smo postavili v komoro, kjer smo ga tehtali in med tem segreli od 40 °C do 550 °C. Vzorec smo v prvem delu meritve prepihovali z dušikom (20 mL/min), v drugem delu pa 20 min pri konstantni temperaturi 550 °C dodajali 20 mL/min kisika.

### 3.4.4 DMA

S tehniko dinamične mehanske analize (DMA) proučujemo mehanske in viskoelastične lastnosti materiala v odvisnosti od temperature, časa, frekvence, napetosti, atmosfere ali kombinacije le-teh. Pri DMA smo merili silo, ki smo jo vložili v vzorec, da smo ga frekvenčno odklonili za določeno razdaljo. Med meritvijo smo zviševali temperaturo. Iz meritev smo določili dinamični E modul ( $E'$ ), modul izgub ( $E''$ ), temperaturo steklastega prehoda ( $T_g$ ) ter faktor izgub ( $\tan \delta$ ).

Test smo izvedli z napravo Perkin Elmer DMA 8000. Pripravljeno epruveto smo vpeli z dvojno prižmo in ga obremenili s frekvenco 1 Hz ter amplitudo 0,02 mm. Merilno komoro smo med meritvijo segreli do 200 °C s hitrostjo segrevanja 2 °C/min.

### 3.4.5 TMA

S pomočjo termomehanske analize (TMA) smo določali spremembe dimenzij vzorca v odvisnosti od temperature. Vzorec smo segrevali in ga pri tem izpostavili določeni mehanski obremenitvi, ki je delovala pravokotno na površino vzorca. Celica je zaznala spremembo dimenzij vzorca pri določeni temperaturi. Iz tega podatka je izračunala temperaturni koeficient dolžinskega raztezka, ki je bil enakomeren le v določenem temperaturnem območju. Iz meritev smo lahko razbrali temperaturo steklastega prehoda, saj je pri tej temperaturi vzorec prešel iz bolj urejenega delno kristaliničnega stanja v amorfno, kjer je med verigami več prostora, zato se vzorcu dimenzije močno povečajo.

Za meritev smo iz vzorca izrezali kocko z dolžino stranice 3 mm, natančno površino vzorca smo določili s pomočjo mikroskopa. Vzorec smo v napravo TMA/SDTA 2+ namestili med dva silikatna diska. Med meritvijo smo imeli v komori inertno atmosfero. Vzorec smo med meritvijo segreli od 22 °C do 150 °C s hitrostjo segrevanja 2 °C/min in ga potem s hitrostjo ohlajanja 10 °C/min ohladili nazaj na 22 °C, potem pa smo segrevanje in ohlajanje ponovili. Med meritvijo je bil vzorec obremenjen s silo 0,025 N. Karakterizirali smo drugo segrevanje.

### 3.4.6 Mikroskopija

Za potrebe mikroskopskih analiz smo uporabili digitalni mikroskop Keyence VHX 7000, ki omogoča povečavo od 20x do 2000x. Omogoča zajemanje dvo- in trodimenzionalnih slik ter merjenje dimenzij. Omogoča tudi meritve hrapavosti, vsebnost komponent ter nečistoč.

Mi smo s pomočjo mikroskopa preučili ostanek TGA analize. Vzorce smo analizirali pri 50, 200 in 1000-kratni povečavi. Pri 50-kratni povečavi smo merili dolžine steklenih vlaken, pri 200-kratni dolžine in premere vlaken in pri 1000-kratni povečavi premere vlaken. S tem smo lahko določili mehansko degradacijo vlaken in razlike v debelini vlaken ter njihovo L/D razmerje.

### 3.4.7 Charpy

Charpyev test oziroma test udarne žilavosti je test, pri katerem merimo razliko med vloženo energijo in preostalo energijo po poružitvi testiranega vzorca. Razlika teh dveh je energija, ki je bila potrebna za porušitev vzorca, oziroma udarna žilavost našega materiala. Za test smo uporabili testne epruvete po ISO 179 standardu, ki določa dimenzije testnega vzorca, postavitev le-tega v napravi, princip in napravo za merjenje. Za meritve smo imeli vzorce z zarezo in vzorce brez zareze. Da smo dosegli porušitev vzorca, smo kladivu dodali utež, ki smo jo določili s pomočjo podatkov, dobljenih iz tehničnega lista materiala.

Vzorce smo testirali z napravo CHARPY LY-XJJDS, skladno z ISO 179 standardom. Meritev smo izvedli z 10 epruvetami vsakega vzorca (10 z in 10 brez zareze). Pri vseh

meritvah je razmak med podporama znašal 60 mm. Testne epruvete z zarezo smo testirali s kladivom z 2 J, epruvete brez zareze pa s 5 J. Naprava med kalibracijo meri izgubo zaradi trenja, ki jo nato upošteva pri meritvah.

### 3.4.8 Natezni test

Natezni test spada med mehanske analize materiala. Ta se uporablja za določevanje mehanskih lasti materiala. Testne parametre ter obliko in dimenzijo epruvet določa standard ISO 527. Meritev je potekala tako, da smo vzorce vpeli vzdolžno med dve čeljusti, ki smo jih nato s konstantno hitrostjo oddaljevali, dokler nismo porušili oziroma pretrgali vzorcev. Med testom sta se merila sila ter raztezek. Med meritvijo smo vzorec najprej elastično obremenili, pri čemer bi se po prenehanju obremenitve povrnil nazaj v prvotno stanje. Ob nadaljevanju obremenitve se vzorec plastično deformira in na koncu poruši. Plastična deformacija je ireverzibilna.

Kot rezultat nateznega testa smo dobili natezno trdnost ( $\sigma_m$ ), natezni E modul ( $E_t$ ), raztezek pri natezni trdnosti ( $\epsilon_m$ ) ter raztezek pri pretrgu ( $\epsilon_{tb}$ ).

Testna naprava, ki smo jo uporabili za testiranje, je Shimadzu AG-X plus 10 kN. Teste smo izvedli po standardu ISO 527, ki predpisuje dimenzije in način testiranja. Testne epruvete so imele debelino 2 mm in širino 5 mm. Test je do raztezka 0,25 % potekal s hitrostjo 1 mm/min, nato pa do porušitve epruvete s hitrostjo 50 mm/min. Začetna razdalja med čeljustma je bila 50 mm. Zaradi spremljanja raztezka s pomočjo kamere smo na vzorce s šablono narisali 2 vzporedni črti; ti je lahko detektirala kamera in določila raztezek. Pred meritvijo smo epruvete prednapeli s silo 3 N. Za meritve smo potrebovali po 5 epruvet na vzorec.

### 3.4.9 Upogibni test

Upogibni test je mehanska analiza, ki smo jo uporabili za določanje mehanskih lastnosti našega materiala. Za upogibni test smo uporabili tritočkovno pripravo za upogibno testiranje, v katero smo vstavili standardni vzorec. Priprava sestoji iz dveh stacionarnih podpor in tretje, ki z zgornje strani obremeni preizkušanec s silo. Vzorec med testom obremenimo s konstantno hitrostjo, dokler ga ne porušimo oziroma se prelomi. Med upogibnim testom merimo silo, s katero se nam epruveta upira ter pot, za katero se preizkušanec skrivi. Med meritvijo preizkušanec najprej obremenimo elastično, nato plastično, dokler se ne prelomi.

S pomočjo upogibnega testa smo vzorcem določili maksimalno upogibno trdnost ( $\sigma_{fM}$ ), upogibni raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti ( $f_M$ ), upogibni E modul ( $E_f$ ) in upogibni raztezek pri porušitvi ( $\epsilon_{fB}$ ).

Testiranje vzorcev smo opravili s pomočjo naprave Shimadzu AG-X plus 10 kN po ISO 178 standardu. Ta določa, da je širina preizkušanca 10 mm in njegova debelina 4 mm. Predpisana razdalja med podporama, ki smo ju uporabili, je 64 mm, hitrost pomika pa 2 mm/min.

## 4 REZULTATI IN DISKUSIJA

### 4.1 Rezultati predelave pri različnih deležih polnila

#### 4.1.1 DSC

Zbrani rezultati DSC testov so prikazani v tabeli 6.

*Tabela 6: Rezultati DSC meritev*

| Vzorec           | $T_g$ (°C) | $C_p$ (J/gK) | $T_c$ (°C) | $\Delta H_c$ (J/g) | $T_m$ (°C) | $\Delta H_m$ (J/g) |
|------------------|------------|--------------|------------|--------------------|------------|--------------------|
| 822_2024_0186_00 | 52,4       | 0,029        | 189,2      | 43,64              | 219,8      | 44,91              |
| 822_2024_0186_01 | 51,2       | 0,021        | 188,5      | 30,24              | 220,2      | 31,02              |
| 822_2024_0186_02 | 50,5       | 0,026        | 188,9      | 36,22              | 219,6      | 37,82              |
| 822_2024_0186_03 | 52,4       | 0,021        | 188,5      | 38,98              | 219,7      | 40,98              |
| 822_2024_0186_04 | 52,5       | 0,017        | 188,5      | 36,09              | 219,4      | 38,31              |
| 822_2024_0186_05 | 52,1       | 0,022        | 188,5      | 37,90              | 219,4      | 37,90              |

Z dodatkom rGFRP nismo bistveno vplivali na temperaturo tališča, temperatura kristalizacije se tudi ni spremenila, znižali pa sta se entalpija kristalizacije in talična entalpija.

#### 4.1.2 DSC TOPEM

Zbrani rezultati DSC TOPEM so prikazani v tabeli 7. V splošnem so vrednosti specifične toplote vzorcev nižje v primerjavi z referenčnim vzorcem. Manjši vpliv ima kompatibilizator, vendar rezultati kažejo, da imajo vzorci z višjim deležem kompatibilizatorja višje vrednosti. Delež steklenih vlaken bolj vpliva na specifično toploto in so vrednosti višje pri nižjem deležu dodanih rGFRP.

*Tabela 7: Rezultati DSC TOPEM meritev*

| Vzorec           | $C_p$ pri 20 °C (J/gK) | $C_p$ pri 100 °C (J/gK) | $C_p$ pri 260 °C (J/gK) |
|------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 822_2024_0186_00 | 1,35                   | 2,06                    | 2,95                    |
| 822_2024_0186_01 | 1,28                   | 1,93                    | 2,78                    |
| 822_2024_0186_02 | 1,16                   | 1,76                    | 2,43                    |
| 822_2024_0186_03 | 1,29                   | 1,94                    | 2,73                    |
| 822_2024_0186_04 | 1,19                   | 1,88                    | 2,64                    |
| 822_2024_0186_05 | 1,34                   | 2,00                    | 2,88                    |

#### 4.1.3 TGA

Zbrani rezultati TGA analiz so prikazani v tabeli 8.

**Tabela 8: Rezultati TGA meritev**

| Vzorec           | T <sub>d1</sub> (°C) | Razpad 1 (%) | Razpad 2 (%) | Vlaga (%) | Ostane (%) |
|------------------|----------------------|--------------|--------------|-----------|------------|
| 822_2024_0186_00 | 453,9                | 67,40        | 2,01         | 0,68      | 29,92      |
| 822_2024_0186_01 | 450,9                | 66,94        | 1,49         | 0,65      | 30,92      |
| 822_2024_0186_02 | 449,4                | 64,29        | 1,35         | 0,65      | 33,71      |
| 822_2024_0186_03 | 452,1                | 65,87        | 1,98         | 1,03      | 31,12      |
| 822_2024_0186_04 | 448,9                | 64,92        | 1,53         | 0,94      | 32,61      |
| 822_2024_0186_05 | 449,9                | 66,24        | 1,13         | 1,02      | 31,61      |

Pri rezultatih TGA meritve iz zgornje tabele je razviden delež dodanih rGFRP (stolpec Ostane), na ostale deleže in temperaturo razpada pa z dodatkom rGFRP in kompatibilizatorja nismo bistveno vplivali.

#### 4.1.4 TMA

Iz TMA meritev, podanih v tabeli 9, je razviden nižji temperaturni koeficient raztezka pred T<sub>g</sub> in zvišanje v primerjavi z referenco po T<sub>g</sub>.

**Tabela 9: Rezultati TMA meritev**

| Vzorec           | $\alpha$ pred T <sub>g</sub> /po T <sub>g</sub> (ppm/K) | T <sub>g</sub> (°C) |
|------------------|---------------------------------------------------------|---------------------|
| 822_2024_0186_00 | 107,74/166,00                                           | 59,2                |
| 822_2024_0186_01 | 99,89/170,78                                            | 62,6                |
| 822_2024_0186_02 | 107,92/172,24                                           | 60,2                |
| 822_2024_0186_03 | 105,01/165,21                                           | 59,8                |
| 822_2024_0186_04 | 106,03/176,24                                           | 58,4                |
| 822_2024_0186_05 | 97,22/171,47                                            | 52,7                |

#### 4.1.5 DMA

V tabeli 10 so rezultati DMA meritev. Iz teh lahko razberemo padec temperature steklastega prehoda in zvišanje dinamičnega E modula.

**Tabela 10: Rezultati DMA meritev**

| Vzorec           | Dinamični E modul pri 30 °C/50 °C/100 °C/150 °C (GPa) | T <sub>g,tan δ</sub> (°C) | Tan δ (-)     |
|------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------|---------------|
| 822_2024_0186_00 | 5,49 / 4,49 / 1,99 / 1,64                             | 66,4                      | 0,111         |
| 822_2024_0186_01 | 6,28 / 4,96 / 2,23 / 1,75                             | 64,6                      | 0,112         |
| 822_2024_0186_02 | 6,26 / 4,73 / 2,38 / 1,69                             | 62,7 / 112,8              | 0,103 / 0,071 |
| 822_2024_0186_03 | 5,95 / 4,15 / 2,14 / 1,66                             | 59,6                      | 0,109         |
| 822_2024_0186_04 | 6,17 / 4,22 / 2,25 / 1,59                             | 57,7 / 112,5              | 0,104 / 0,073 |
| 822_2024_0186_05 | 5,77 / 4,06 / 2,07 / 1,62                             | 59,7                      | 0,110         |

Pri rezultatih DMA meritev lahko v zgornji tabeli za vzorca 822\_2024\_0186\_02 in 822\_2024\_0186\_04 poleg znižanja temperature steklastega prehoda opazimo še en podatek. To občutno višjo temperaturo steklastega prehoda lahko pripišemo

karakteristiki kompozita, iz katerega smo pridobili rGFRP. Ta prehod je bežno opazen pri vseh vzorcih, razen pri referenci, je pa močnejše izražen v vzorcih z višjim deležem rGFRP.

#### 4.1.6 TMA

Iz TMA meritev, podanih v tabeli 11, je razviden nižji temperaturni koeficient raztezka pred  $T_g$  in zvišanje v primerjavi z referenco po  $T_g$ .

*Tabela 11: Rezultati TMA meritev*

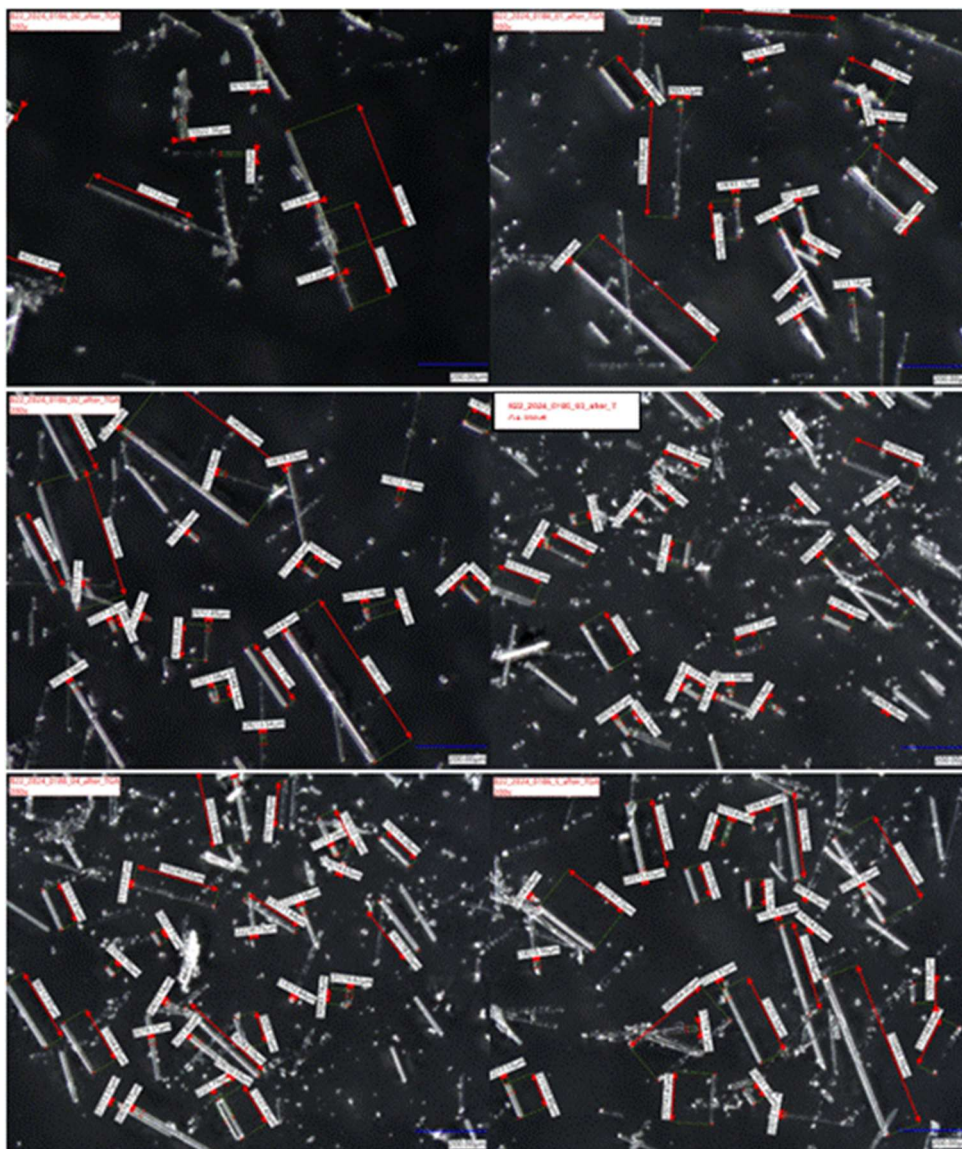
| Vzorec           | $\alpha$ pred $T_g$ /po $T_g$ (ppm/K) | $T_g$ (°C) |
|------------------|---------------------------------------|------------|
| 822_2024_0186_00 | 107,74/166,00                         | 59,2       |
| 822_2024_0186_01 | 99,89/170,78                          | 62,6       |
| 822_2024_0186_02 | 107,92/172,24                         | 60,2       |
| 822_2024_0186_03 | 105,01/165,21                         | 59,8       |
| 822_2024_0186_04 | 106,03/176,24                         | 58,4       |
| 822_2024_0186_05 | 97,22/171,47                          | 52,7       |

#### 4.1.7 Mikroskopija

Meritve, izvedene pri mikroskopiji, so zbrane v tabeli 12. V povprečju so najdaljša steklena vlakna prisotna v referenčnem vzorcu, v drugih vzorcih pa so prisotna še rGFRP, ki pa so prinesla več variabilnosti. Pri vzorcih z višjim deležem kompatibilizatorja smo namerili daljša vlakna in nižjo variabilnost. Primerljivo so bila vlakna daljša tudi v vzorcih z višjim deležem vlaken. Variabilnost dolžine pa je bila nižja pri vzorcih z več kompatibilizatorja. Meritve dolžine so sicer precej subjektive, saj jih izvedemo na delu vzorca, kjer so vlakna najlepše ločena. Pod tabelo je slika 9, na kateri so vlakna vzorcev po TGA analizi pri 200-kratni povečavi.

*Tabela 12: Povprečna dolžina steklenih vlaken*

| Vzorec               | Dolžina steklenih vlaken ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------------|--------------------------------------------|
| 822_2024_0186_00     | 291                                        |
| 822_2024_0186_00 STD | 110                                        |
| 822_2024_0186_01     | 163                                        |
| 822_2024_0186_01 STD | 104                                        |
| 822_2024_0186_02     | 206                                        |
| 822_2024_0186_02 STD | 130                                        |
| 822_2024_0186_03     | 181                                        |
| 822_2024_0186_03 STD | 90                                         |
| 822_2024_0186_04     | 227                                        |
| 822_2024_0186_04 STD | 99                                         |
| 822_2024_0186_05     | 246                                        |
| 822_2024_0186_05 STD | 89                                         |



Slika 9: Steklena vlakna vzorcev po TGA analizi

#### 4.1.8 Charpy

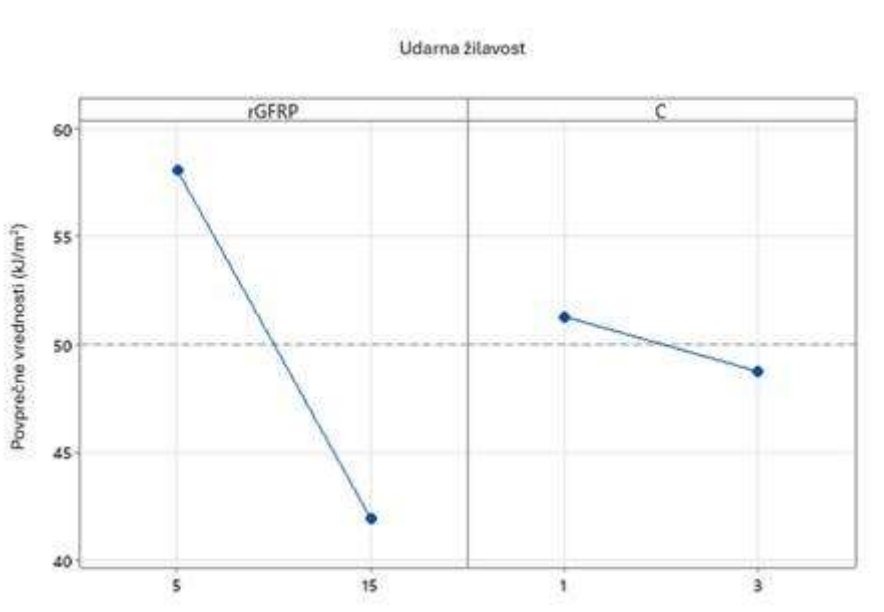
V tabeli 13 so prikazani zbrani rezultati udarne in zarezne udarne žilavosti.

Tabela 13: Rezultati udarne in zarezne udarne žilavosti

| Vzorec               | Udarne žilavost (kJ/m <sup>2</sup> ) | Zarezna udarne žilavost (kJ/m <sup>2</sup> ) |
|----------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|
| 822_2024_0186_00     | 64,2                                 | 10,3                                         |
| 822_2024_0186_00 STD | 6,4                                  | 0,8                                          |
| 822_2024_0186_01     | 60,0                                 | 10,7                                         |
| 822_2024_0186_01 STD | 4,1                                  | 0,8                                          |
| 822_2024_0186_02     | 42,5                                 | 8,4                                          |
| 822_2024_0186_02 STD | 3,0                                  | 0,6                                          |
| 822_2024_0186_03     | 56,0                                 | 10,7                                         |
| 822_2024_0186_03 STD | 2,7                                  | 1,2                                          |
| 822_2024_0186_04     | 41,4                                 | 8,2                                          |
| 822_2024_0186_04 STD | 2,0                                  | 0,7                                          |
| 822_2024_0186_05     | 56,3                                 | 10,2                                         |
| 822_2024_0186_05 STD | 2,7                                  | 1,4                                          |

Oba testa udarne žilavosti imata enak trend, le da pri zarezni udarni žilavosti vzorec 822\_2024\_0186\_01 preseže lastnosti reference. Meritve kažejo boljše lastnosti materiala s 5 % rGFRP ter s srednjimi vrednostmi. Kompatibilizator na žilavost materiala ni imel bistvenega vpliva. Večje razlike med vzorci so vidne pri meritvah udarne žilavosti pri preizkušancih brez zarezne.

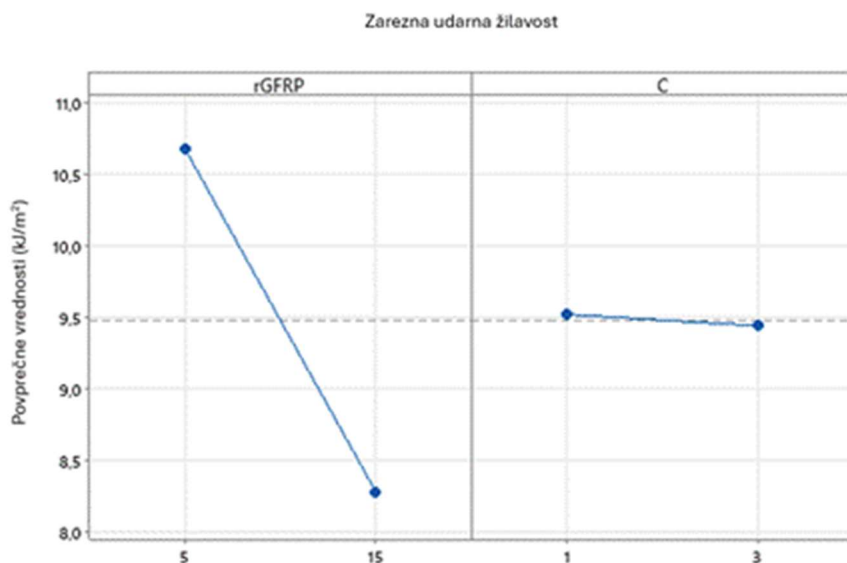
Slika 10 prikazuje vpliv dodanega rGFRP in kompatibilizatorja na udarno žilavost. Iz grafa je razvidno, da je imel kompatibilizater zelo nizek vpliv v primerjavi z vplivom deleža steklenih vlaken, kjer je nižji delež dodanih vlaken in kompatibilizatorja izkazal boljše rezultate.



Slika 10: DoE graf udarne žilavosti

Slika 11 prikazuje vpliv dodanega rGFRP in kompatibilizatorja na zarezno udarno žilavost. Iz grafa je razvidno, da je imel kompatibilizater zelo nizek vpliv v primerjavi z

vplivom deleža steklenih vlaken, kjer je nižji delež dodanih vlaken in kompatibilizatorja izkazal boljše rezultate.



Slika 11: DoE graf zarezne udarne žilavosti

#### 4.1.9 Natezni test

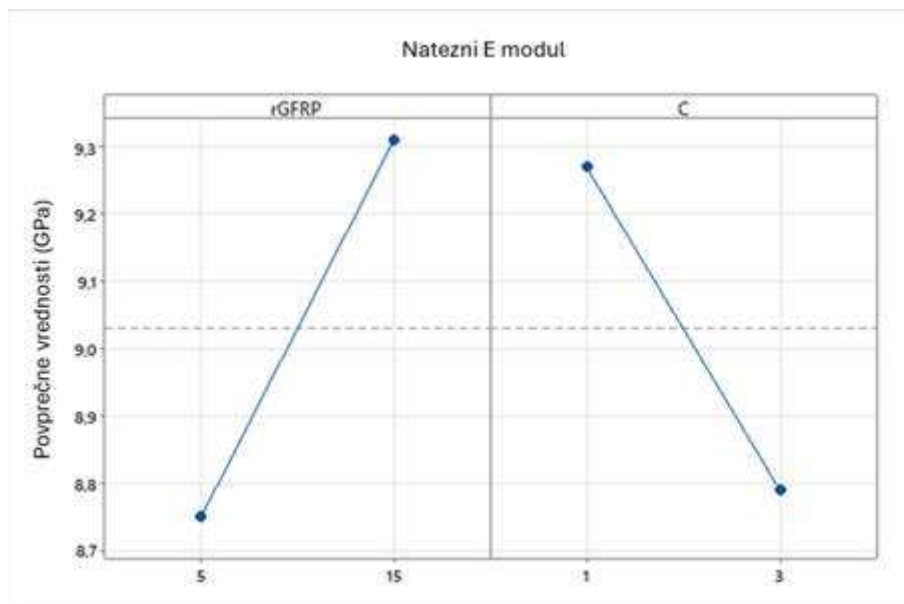
Zbrane rezultate nateznega testa prikazuje tabela 14.

Tabela 14: Rezultati nateznih testov

| Vzorec               | $E_t$ (GPa) | $\sigma_m$ (MPa) | $\epsilon_m$ (%) | $\epsilon_{tb}$ (%) |
|----------------------|-------------|------------------|------------------|---------------------|
| 822_2024_0186_00     | 8,5         | 136,9            | 4,39             | 4,77                |
| 822_2024_0186_00 STD | 1,4         | 1,3              | 0,04             | 0,08                |
| 822_2024_0186_01     | 8,9         | 141,6            | 4,31             | 4,83                |
| 822_2024_0186_01 STD | 0,7         | 1,2              | 0,21             | 0,29                |
| 822_2024_0186_02     | 9,6         | 136,5            | 3,79             | 3,87                |
| 822_2024_0186_02 STD | 1,0         | 1,3              | 0,04             | 0,07                |
| 822_2024_0186_03     | 8,6         | 135,0            | 4,15             | 4,74                |
| 822_2024_0186_03 STD | 0,5         | 1,8              | 0,06             | 0,12                |
| 822_2024_0186_04     | 9,0         | 131,3            | 3,70             | 3,82                |
| 822_2024_0186_04 STD | 0,4         | 0,5              | 0,08             | 0,12                |
| 822_2024_0186_05     | 8,8         | 133,4            | 4,20             | 4,67                |
| 822_2024_0186_05 STD | 0,2         | 0,8              | 0,06             | 0,23                |

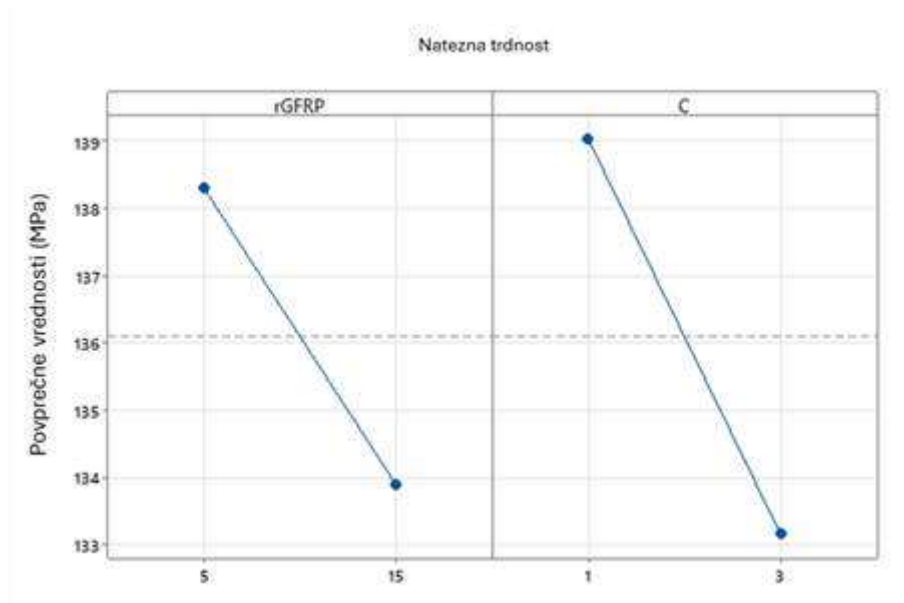
Na natezni E modul materiala je imela največji vpliv količina dodanih vlaken. Oba vzorca, kjer smo dodali 15 % rGFRP, sta izkazala višji vrednosti. Pri vseh pa je bila meritev višja kot pri referenci. Rezultati kažejo, da je nižji delež kompatibilizatorja imel boljši vpliv na natezni E modul materiala. Razvidno je da ima vzorec z nižjo vsebnostjo kompatibilizatorja in steklenih vlaken boljše lastnosti kot vzorec s srednjimi vrednostmi. Slika 12 prikazuje vpliv dodanega rGFRP in kompatibilizatorja na natezni E modul. Z

višanjem deleža rGFRP in nižanjem deleža kompatibilizatorja se natezni E modul zvišuje. Malenkost večji vpliv ima delež rGFRP kot kompatibilizator.



Slika 12: DoE graf nateznega E modula

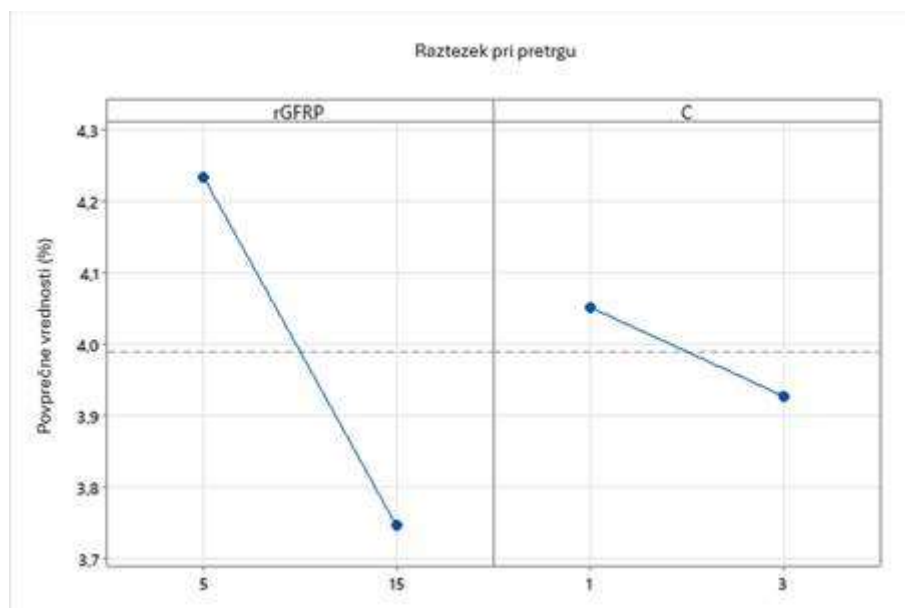
Pri natezni trdnosti sta imela najboljše vrednosti vzorca z višjim deležem kompatibilizatorja, kar je bilo opaženo že pri nateznem E modulu in je prikazano na sliki 13. Vzorec z več steklenimi vlakni in 3 % kompatibilizatorja je izkazal primerljiv rezultat z referenčnim vzorcem. Na natezno trdnost je imel večji vpliv kompatibilizator, pri obeh dodatkih pa je bila natezna trdnost višja pri nižjem deležu.



Slika 13: DoE graf natezne trdnosti

Raztezek se je po večini vzorcem znižal v primerjavi z referenčnim vzorcem, na sliki 14 pa opazimo, da je bil raztezek najnižji pri vzorcih s 15 % dodanih rGFRP.

Kompatibilizator ni imel tako močnega vpliva kot delež steklenih vlaken. Je pa vzorec z 1 % kompatibilizatorja izkazal višje vrednosti kot vzorec s 3 %.



Slika 14: DoE graf raztezka pri pretrgu

#### 4.1.10 Upogibni test

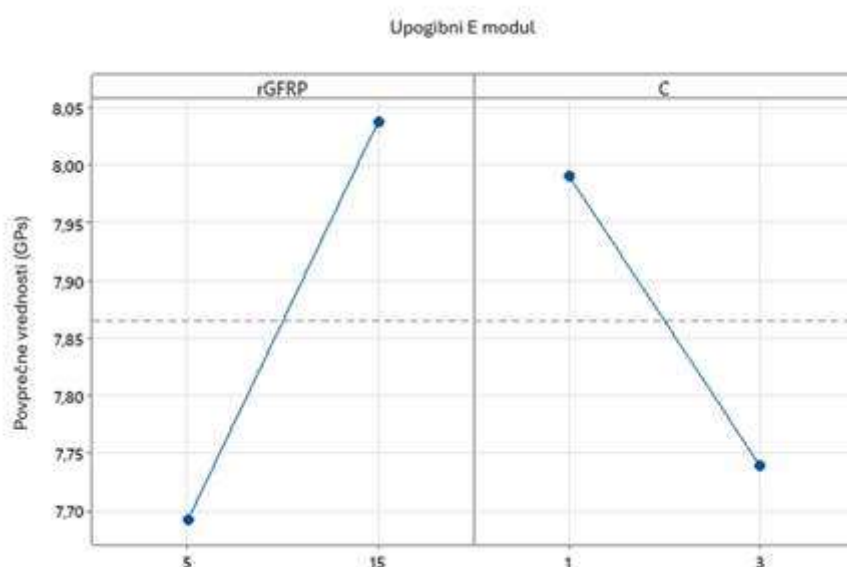
V tabeli 15 so rezultati meritev upogibnega testa. Če primerjamo vzorce z referenco, se nam je raztezek poslabšal, najnižji raztezek pa je imel vzorec z več steklenimi vlakni in manjšim deležem kompatibilizatorja. Iz tega lahko razberemo, da je kompatibilizator izboljšal raztezke. V primeru upogibnega E modula so imeli boljše rezultate vzorci z manj kompatibilizatorja. Pri upogibni trdnosti je najboljši rezultat dosegel vzorec z manj vlakni in manj kompatibilizatorja, pri več steklenih vlaknih pa je višja koncentracija kompatibilizatorja na rezultat vplivala pozitivno.

Tabela 15: Rezultati upogibnega testa

| Vzorec               | $E_f$ (GPa) | $\sigma_{fM}$ (MPa) | $\epsilon_{fM}$ (%) | $\epsilon_{fB}$ (%) |
|----------------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 822_2024_0186_00     | 7,1         | 200,1               | 4,87                | 5,05                |
| 822_2024_0186_00 STD | 0,1         | 1,5                 | 0,11                | 0,08                |
| 822_2024_0186_01     | 7,8         | 206,7               | 4,35                | 4,46                |
| 822_2024_0186_01 STD | 0,1         | 1,5                 | 0,14                | 0,16                |
| 822_2024_0186_02     | 8,2         | 196,7               | 3,47                | 3,52                |
| 822_2024_0186_02 STD | 0,1         | 0,6                 | 0,03                | 0,03                |
| 822_2024_0186_03     | 7,6         | 196,7               | 4,56                | 4,77                |
| 822_2024_0186_03 STD | 0,1         | 0,9                 | 0,17                | 0,19                |
| 822_2024_0186_04     | 7,9         | 189,6               | 3,74                | 3,82                |
| 822_2024_0186_04 STD | 0,0         | 1,1                 | 0,07                | 0,09                |
| 822_2024_0186_05     | 7,4         | 194,9               | 4,66                | 4,82                |
| 822_2024_0186_05 STD | 0,1         | 1,0                 | 0,12                | 0,11                |

Pri upogibnem testu smo za vse merjene mehanske lastnosti materiala dobili primerljiv trend meritvam nateznega testa.

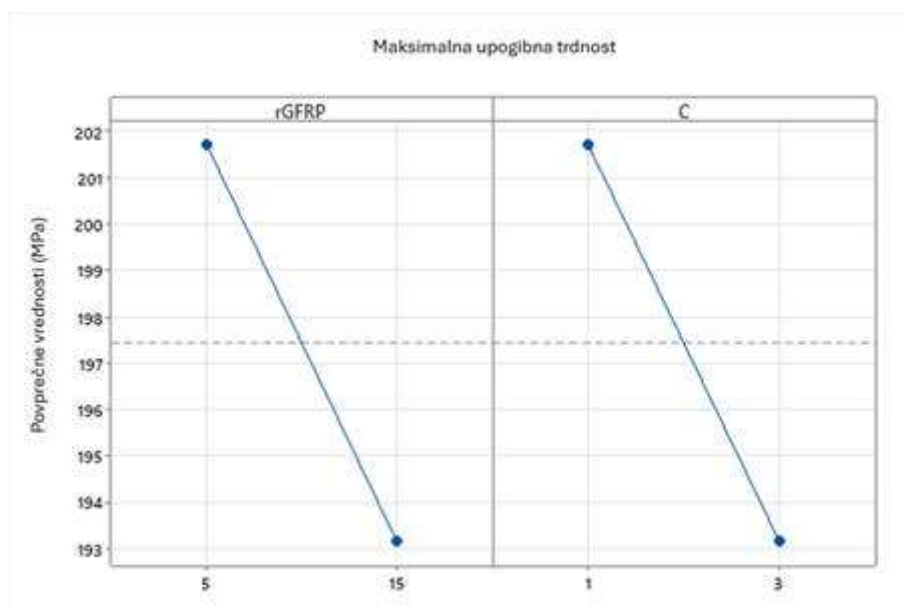
Na upogibni E modul materiala je imela največji vpliv količina dodanih vlaken. Oba vzorca, kjer smo dodali po 15 % rGFRP, sta izkazala višji rezultat, kar je razvidno tudi na sliki 15. Pri vseh pa je bil meritev višji kot pri referenci. Rezultati kažejo, da je nižji delež kompatibilizatorja imel boljši vpliv na upogibni E modul materiala. Razvidno je, da ima vzorec z nižjo vsebnostjo kompatibilizatorja in steklenih vlaken boljše lastnosti kot vzorec s srednjimi vrednostmi rGFRP ter kompatibilizatorja. Delež steklenih vlaken je imel večji vpliv kot delež kompatibilizatorja.



Slika 15: DoE graf upogibnega E modula

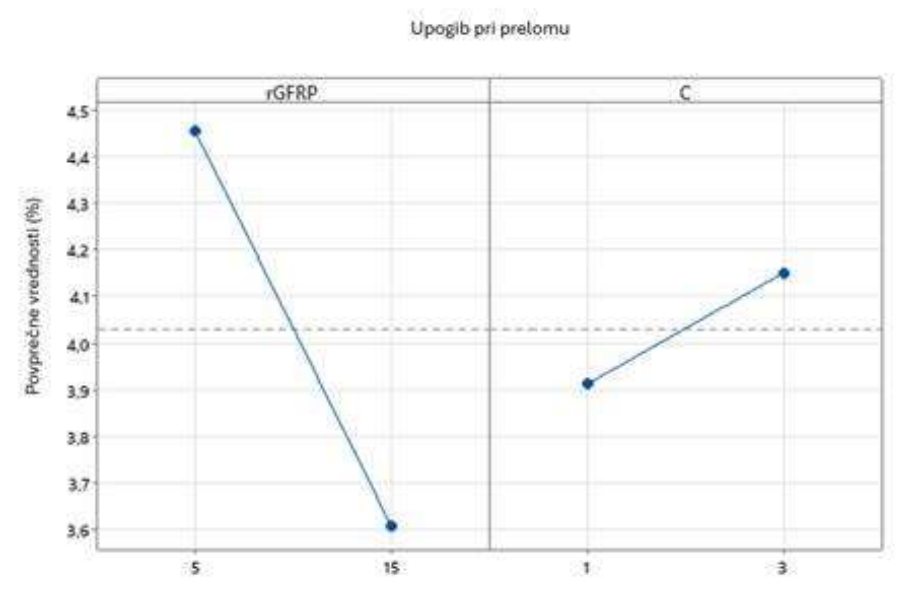
Pri upogibni trdnosti sta imela najboljše vrednosti vzorca z nižjim deležem kompatibilizatorja, kar je razvidno tudi na sliki 16 in je bilo opaženo že pri upogibnem

E modulu. Vzorec z več steklenimi vlakni in tremi odstotki kompatibilizatorja je izkazal primerljiv rezultat meritvi referenčnega vzorca. Na upogibno trdnost sta oba deleža mela podoben vpliv.



Slika 16: DoE graf maksimalne upogibne trdnosti

Upogibni raztezek se je večini vzorcev znižal v primerjavi z referenčnim. Opazimo pa, da je bil raztezek najnižji pri obeh vzorcih s 15 % rGFRP. Kompatibilizator ni imel večjega opazno določljivega vpliva. Na sliki 17 je razvidno, da ima vzorec s 5 % rGFRP višjo vrednost upogiba pri prelomu kot vzorec s 15 % rGFRP, vpliv kompatibilizatorja je manjši, bolje pa vpliva 3 % kot 1 %.



Slika 17: DoE graf upogiba pri prelomu

## 5 SKLEP

V diplomskem delu smo raziskali vpliv dodatka rGFRP in kompatibilizatorja na lastnosti PA 6 GF30, pomagali pa smo si z metodo DoE. Material smo pripravili na kompavnderju Labtech LTE 26-48 v podjetju Polycom, nato smo nabrizgali vzorce na FTPO in jih karakterizirali. Predvideli smo težave pri kompavndiranju vzorcev z dodatkom 15 % rGFRP, ki so se tudi realizirale s težavami mašenja lijaka do kompavnderja. Posledično je bilo potrebno lijak večkrat izprazniti. Pri zadnjih vzorcih smo si pomagali s sejanjem rGFRP, kar je pomagalo pri razbijanju segregacij rGFRP. Zaradi težav pri ekstrudiranju mogoče nismo imeli enakomerne porazdelitve steklenih vlaken po našem vzorcu.

Glavni cilj diplomskega dela je bil določiti vpliv deleža reciklata duroplastičnega kompozita ter kompatibilizatorja na mehanske lastnosti recikliranega termoplastičnega kompozita. Izvedli smo dizajn eksperimenta (DoE) za mlevec in delež reciklata duroplastičnega kompozita.

Tezo, ki smo jo postavili, smo z izdelavo diplomskega dela potrdili, saj sta se togost in trdnost materialu zvišali ob dodatku rGFRP ter dovolj visokem deležu kompatibilizatorja XILOY™ IG360. Na mehanske lastnosti materiala je imel večji vpliv delež steklenih vlaken kot delež kompatibilizatorja. Višjo togost in trdnost pa so izkazali vzorci z dodatkom 5 % rGFRP.

Možnost dodatnih raziskav bi lahko bila vpliv načina pridobivanja rGFRP na njihovo kakovost, dolžino in sposobnost obdelovalnosti ter vpliv načina dodajanja steklenih vlaken v material (ročno mešanje, stransko doziranje ...) na dolžino vlaken v produktu ter homogenost materiala.

**SEZNAM LITERATURE IN VIROV**

- [1] M. Shamsuyeva, H.J. Endres, *Plastics in the context of the circular economy and sustainable plastics recycling: Comprehensive review on research development, standardization and market, Compos. Part C Open Access*. 6 (2021) 100168. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100168>.
- [2] M. Colledani, *Engineering and Construction Systemic Circular Economy Solutions for Fiber Reinforced Composites*, (2022) <https://doi.org/10.1007/978-3-031-22352-5>.
- [3] P. Zamudio-Ramírez, *Economics of automobile recycling*, (2005).
- [4] N. León Albiter, O. Santana Pérez, M. Klotz, K. Ganesan, F. Carrasco, S. Dagréou, M.L. Maspoch, C. Valderrama, *Implications of the Circular Economy in the Context of Plastic Recycling: The Case Study of Opaque PET, Polymers (Basel)*. 14 (2022) 1–16. <https://doi.org/10.3390/polym14214639>.
- [5] I. Vollmer, M.J.F. Jenks, M.C.P. Roelands, R.J. White, T. van Harmelen, P. de Wild, G.P. van der Laan, F. Meirer, J.T.F. Keurentjes, B.M. Weckhuysen, *Beyond Mechanical Recycling: Giving New Life to Plastic Waste, Angew. Chemie - Int. Ed.* 59 (2020) 15402–15423. <https://doi.org/10.1002/anie.201915651>.
- [6] A. Mayyas, A. Qattawi, M. Omar, D. Shan, *Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review, Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 1845–1862. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.012>.
- [7] Y. Wang, X. Chang, Z. Chen, Y. Zhong, T. Fan, *Impact of subsidy policies on recycling and remanufacturing using system dynamics methodology: A case of auto parts in China, J. Clean. Prod.* 74 (2014) 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.023>.
- [8] D.I. Wilson, *What is rheology?, Eye*. 32 (2018) 179–183. <https://doi.org/10.1038/eye.2017.267>.
- [9] V. Unnikrishnan, O. Zabihi, Q. Li, M. Ahmadi, M.R.G. Ferdowsi, T. Kannangara, P. Blanchard, A. Kiziltas, P. Joseph, M. Naebe, *Multifunctional PA6 composites using waste glass fiber and green metal organic framework/graphene hybrids, Polym. Compos.* 43 (2022) 5877–5893. <https://doi.org/10.1002/pc.27002>.
- [10] R. Article, M. Ramesh, L.N. Rajeshkumar, N. Srinivasan, D.V. Kumar, D. Balaji, *Influence of filler material on properties of fiber-reinforced polymer composites: A review*, (2022) 898–916.
- [11] Z.A. Mohd Ishak, A. Ariffin, R. Senawi, *Effects of hygrothermal aging and a silane coupling agent on the tensile properties of injection molded short glass fiber reinforced poly(butylene terephthalate) composites, Eur. Polym. J.* 37 (2001) 1635–1647. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(01\)00033-7](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(01)00033-7).
- [12] A.G. Pedroso, L.H.I. Mei, J.A.M. Agnelli, D.S. Rosa, *The influence of the drying process time on the final properties of recycled glass fiber reinforced polyamide 6, Polym. Test.* 21 (2002) 229–232. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(01\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(01)00074-5).
- [13] P.Y. Le Gac, M. Arhant, M. Le Gall, P. Davies, *Yield stress changes induced by water in polyamide 6: Characterization and modeling, Polym. Degrad. Stab.* 137 (2017) 272–280. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.02.003>.

- 
- [14] I. Ksouri, O. De Almeida, N. Haddar, Long term ageing of polyamide 6 and polyamide 6 reinforced with 30% of glass fibers: physicochemical, mechanical and morphological characterization, *J. Polym. Res.* 24 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10965-017-1292-6>.
- [15] 75036-8464667, (2024).
- [16] P. Laurikainen, S. Palola, A.D. La Calle, C. Elizetxea, S. García-Arrieta, E. Sarlin, Fiber Resizing, Compounding and Validation BT - Systemic Circular Economy Solutions for Fiber Reinforced Composites, in: M. Colledani, S. Turri (Eds.), Springer International Publishing, Cham, 2022: pp. 125–140. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22352-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22352-5_7).
- [17] The-chemical-structure-of-Pa6, (2024).

**SEZNAM SLIK**

|                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1: Dvopolžni ekstruder [15]                                                                                                                                                                              | 3  |
| Slika 2: Mletina osnovnega materiala                                                                                                                                                                           | 4  |
| Slika 3: Kompatibilizator                                                                                                                                                                                      | 6  |
| Slika 4: Površina na lomu a PP rCF20 brez kompatibilizatorja, b PP rCF20 kompavniran s kompatibilizatorjem, c PA rCF20 kompavndiran brez kompatibilizatorja, d PA rCF20 kompavndiran s kompatibilizatorjem [2] | 7  |
| Slika 5: Ponavljajoča enota PA 6 [17]                                                                                                                                                                          | 7  |
| Slika 6: Primer rGFRP                                                                                                                                                                                          | 8  |
| Slika 7: Vpliv časa sušenja na stopnjo kristaliničnosti – x os predstavlja čas sušenja v urah, y os pa stopnjo kristaliničnosti v odstotkih [12]                                                               | 10 |
| Slika 8: Odvisnost natezne trdnosti od časa sušenja za svež material - x os predstavlja čas sušenja v urah, y os pa natezno trdnost v megapaskalih [12]                                                        | 10 |
| Slika 9: Steklена vlakna vzorcev po TGA analizi                                                                                                                                                                | 19 |
| Slika 10: DoE graf udarne žilavosti                                                                                                                                                                            | 20 |
| Slika 11: DoE graf zarezne udarne žilavosti                                                                                                                                                                    | 21 |
| Slika 12: DoE graf nateznega E modula                                                                                                                                                                          | 22 |
| Slika 13: DoE graf natezne trdnosti                                                                                                                                                                            | 22 |
| Slika 14: DoE graf raztezka pri pretrgu                                                                                                                                                                        | 23 |
| Slika 15: DoE graf upogibnega E modula                                                                                                                                                                         | 24 |
| Slika 16: DoE graf maksimalne upogibne trdnosti                                                                                                                                                                | 25 |
| Slika 17: DoE graf upogiba pri prelomu                                                                                                                                                                         | 25 |

**SEZNAM TABEL**

|                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Primerjava nateznega E modula, temperature steklastega prehoda ter temperature držanja oblike med PA 6, PA 6 z dodatkom 20 % GF in PA 6 z dodatkom 30 % GF ..... | 8  |
| Tabela 2: Primerjava lastnosti rGF, uporabljenih v raziskavi, s S steklenimi vlakni in E steklenimi vlakni .....                                                           | 9  |
| Tabela 3: Sestava vzorcev .....                                                                                                                                            | 11 |
| Tabela 4: Pogoji kompavndiranja .....                                                                                                                                      | 12 |
| Tabela 5: Pogoji brizganja .....                                                                                                                                           | 12 |
| Tabela 6: Rezultati DSC meritev .....                                                                                                                                      | 16 |
| Tabela 7: Rezultati DSC TOPEM meritev .....                                                                                                                                | 16 |
| Tabela 8: Rezultati TGA meritev .....                                                                                                                                      | 17 |
| Tabela 9: Rezultati TMA meritev .....                                                                                                                                      | 17 |
| Tabela 10: Rezultati DMA meritev .....                                                                                                                                     | 17 |
| Tabela 11: Rezultati TMA meritev .....                                                                                                                                     | 18 |
| Tabela 12: Povprečna dolžina steklenih vlaken.....                                                                                                                         | 18 |
| Tabela 13: Rezultati udarne in zarezne udarne žilavosti .....                                                                                                              | 20 |
| Tabela 14: Rezultati nateznih testov .....                                                                                                                                 | 21 |
| Tabela 15: Rezultati upogibnega testa .....                                                                                                                                | 24 |

**SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV**

$m$  - masa (kg)

$\varepsilon_{fB}$  - upogibni raztezek pri poružitvi (GPa)

$E_f$  - upogibni E modul (GPa)

$\varepsilon_{fM}$  - upogibni raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti (%)

$\sigma_{fM}$  - maksimalna upogibna trdnost (MPa)

$\varepsilon_{tb}$  - raztezek pri pretrgu (%)

$\varepsilon_m$  - raztezek pri natezni trdnosti (%)

$E_t$  - natezni E modul (GPa)

$\sigma_m$  - natezna trdnost (MPa)

$\varepsilon_{fb}$  - raztezek pri poružitvi (%)

$\tan \delta$  - modul izgub (/)

$C_p$  - specifična toplota (J/gK)

$\Delta H_c$  - kristalizacijska entalpija (J/g)

$T_c$  - temperatura kristalizacije (°C)

$\Delta H_m$  - talilna entalpija (J/g)

$T_m$  - temperatura tališča (°C)

$T_g$  - temperatura steklastega prehoda (°C)

$\alpha$  - temperaturni koeficient dolžinskega raztezka (ppm/K)

---

**SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC**

ISO - Mednarodna organizacija za standardizacijo (angl. *International Organisation for Standardisation*)

FTPO - Fakulteta za tehnologijo polimerov

DSC - diferenčna dinamična kalorimetrija

DMA - dinamična mehanska analiza

TGA - termogravimetrična analiza

TMA - termomehanska analiza

DoE - dizajn eksperimenta

PA 6 GF30 - poliamid 6 s 30 % steklenih vlaken

rGF - reciklirana steklena vlakna

rGFRP - polimer ojačan z recikliranimi steklenimi vlakni

LDPE - polietilen nizke gostote

HDPE - polietilen visoke gostote

PET - polietilen tereftalat