

UNIVERZA V MARIBORU  
FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO

Rok KOROŠEC

**RECIKLIRANI POLIMERNI KOMPOZITI KOT INOVATIVNI  
MATERIALI**

Magistrsko delo  
študijskega programa 2. stopnje  
Tehniško varstvo okolja

Maribor, januar 2019



# **RECIKLIRANI POLIMERNI KOMPOZITI KOT INOVATIVNI MATERIALI**

Magistrsko delo

Študent: Rok KOROŠEC  
Študijski program: študijski program 2. stopnje  
Tehniško varstvo okolja  
Mentor: doc. dr. Mihael BRUNČKO

Maribor, januar 2019



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

Smetanova ulica 17  
2000 Maribor, Slovenija

Številka: TVO-BM0040

Datum in kraj: 20.06.2018, Maribor

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Statut UM-UPB12, Uradni list RS, št. 29/2017) izdajam:

#### SKLEP O ZAKLJUČNEM DELU

**ROKU KOROŠČU**, študentu magistrskega študijskega programa druge stopnje **TEHNIŠKO VARSTVO OKOLJA**, se dovoljuje izdelati zaključno delo.

Tema zaključnega dela je pretežno s področja **Katedre za energetska, procesna in okoljska inženirstvo**.

Mentor: **doc. dr. MIHAEL BRUNČKO**

Somentor: /

Zunanji delovni somentor: /

Naslov zaključnega dela: **Reciklirani polimerni kompoziti kot inovativni materiali**

Naslov zaključnega dela v angleškem jeziku: **Recycled Polymer Composites as Innovative Materials**

Rok za izdelavo in oddajo zaključnega dela je: **20.06.2019**. Zaključno delo je potrebno izdelati skladno z »Navodili za pripravo magistrskega dela« in ga v treh izvodih oddati v pristojnem referatu članice. Hkrati se odda tudi izjava mentorja o ustreznosti zaključnega dela ter poročilo o preverjanju podobnosti z drugimi deli.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na Senat članice v roku 10 delovnih dni od dneva prejema sklepa.

Dekan:

red. prof. dr. Bojan Dolšek



Obvestiti:

- kandidata,
- mentorja,
- odložiti v arhiv.

**FS**

www.fs.um.si | fs@um.si | t +386 2 220 7500 | f +386 2 220 7990 | TRR: 0110 0609 0102 935 | ID DDV: SI71674705

## IZJAVA

Podpisani \_\_\_\_\_, izjavljam, da:

- je magistrsko delo rezultat lastnega raziskovalnega dela,
- predloženo delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršnekoli izobrazbe po študijskem programu druge fakultete ali univerze,
- so rezultati korektno navedeni,
- nisem kršil-a avtorskih pravic in intelektualne lastnine drugih,
- soglašam z javno dostopnostjo magistrskega dela v Knjižnici tehniških fakultet ter Digitalni knjižnici Univerze v Mariboru, v skladu z Izjavo o istovetnosti tiskane in elektronske verzije zaključnega dela.

Maribor, \_\_\_\_\_

Podpis: \_\_\_\_\_

## **ZAHVALA**

*Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Mihaelu BRUNČKU za pomoč in vodenje pri opravljanju diplomskega dela.*

*Zahvaljujem se tudi podjetju TURNAPLAST d.o.o za pomoč pri izdelavi testirancev ter red. prof. dr. Ivanu ANŽELU.*

*Posebna zahvala velja staršem, ki so mi omogočili študij.*

## RECIKLIRANI POLIMERNI KOMPOZITI KOT INOVATIVNI MATERIALI

**Ključne besede:** Recikliranje, polimeri, polimerni kompoziti, ponovna uporaba, upogibni preizkus, odpadna plastika, odpadki, injekcijsko brizganje, odpadni polimerni materiali, mikrostrukturne lastnosti.

**UDK klasifikacija:** 620.284:678.7(043.2).

### POVZETEK

*Znano je, da se poraba polimernih materialov iz dneva v dan povečuje. Posledično izrazito narašča tudi količina polimernih odpadkov, ki vstopajo na trg. Čim hitreje je potrebno najti pot, ki nas bo vodila do učinkovite izrabe sekundarnih polimernih surovin.*

*To raziskovalno delo je opravljeno z namenom karakterizacije mehanskih in mikrostrukturnih lastnosti mešanic kompozitov s polimerno matico iz recikliranih polimerov v kombinaciji z različnimi polnili. V laboratoriju smo izvedli analizo ekstrudiranega materiala ter določili vpliv različnih pogojev izdelave na končno karakteristiko samega kompozita. Delo predstavlja tudi možnosti uporabe takšnega materiala in standarde, ki jih takšen kompozitni produkt mora izpolniti za uspešen prodor na trg.*

*Raziskava je pokazala, da imajo kompozitni materiali s polimerno matico iz recikliranega polimera karakteristike, ki so povsem primerljive s karakteristikami primarnih polimernih materialov. Potrdili smo tezo, da je iz recikliranih polimernih materialov skupaj s kombinacijo različnih polnil mogoče izdelati preproste izdelke s primerljivimi ali celo izboljšanimi karakteristikami, ki so tako primerni za vsakdanjo uporabo.*

## RECYCLED POLYMER COMPOSITES AS INNOVATIVE MATERIALS

**Key words:** Recycling, polymer, polymer composites, material reuse, flexural test, waste plastic, waste, injection moulding, waste polymer materials, microstructural characteristics.

**UDK clasification:** 620.284:678.7(043.2).

### ABSTRACT

*It is well known that the consumption of Polymeric materials is increasing day by day.*

*Consequently, the quantity of polymeric waste which is entering the market is also rapidly increasing. In order to reduce the problem we need to find a path, that will lead us to the efficient use of secondary polymeric raw materials.*

*This research work is carried out with the purpose of characterizing the mechanical and microstructural properties of composites based on recycled polymers with combination of various fillers. In the laboratory we have performed an analysis of the extruded material and determined the influence of the different manufacturing conditions on the final characteristic of the composite itself. The work also presents the possibilities of using such material and the standards that such a composite product must fulfill in order to be successfully implemented on today's demanding market.*

*The study showed that composite materials with polymer base consisting only recycled polymers have characteristics that are completely comparable to the characteristics of primary polymer materials. We have confirmed the thesis that simple products with comparable or even improved characteristics can be made by recycled polymeric materials, together with a combination of various fillers and are therefore suitable for everyday use.*

# KAZALO VSEBINE

|          |  |               |
|----------|--|---------------|
| <b>1</b> | <b>UVOD .....</b>  | <b>- 1 -</b>  |
| 1.1      | Namen raziskave.....   | - 1 -         |
| 1.2      | Uporabljene metode dela .....  | - 2 -         |
| 1.3      | Predpostavke magistrskega dela .....   | - 3 -         |
| <b>2</b> | <b>TEORETIČNE OSNOVE .....</b>   | <b>- 4 -</b>  |
| 2.1      | Problematika na področju odpadnih polimernih materilov .....                       | - 4 -         |
| 2.2      | Možnosti uporabe odpadnih polimernih materialov .....                              | - 5 -         |
| 2.3      | Produkti iz odadnih polimernih materialov in njihove lastnosti ...                 | - 7 -         |
| 2.4      | Polimerni kompoziti .....  | - 8 -         |
| 2.5      | Polnila .....  | - 12 -        |
| 2.6      | Proces izdelave polimernih kompozitov .....  | - 15 -        |
| 2.7      | Standardi in merila za izdelke / materiale iz odpadnih polimernih materialov ..... | - 17 -        |
| <b>3</b> | <b>EKSPERIMENTALNI DEL .....</b>   | <b>- 20 -</b> |
| 3.1      | Uvod v eksperiment .....   | - 20 -        |
| 3.2      | Potek eksperimenta (izvedba) .....   | - 20 -        |
| 3.2.1    | Izbor komponent kompozita in priprava mešanic materiala. ....                      | - 20 -        |
| 3.2.2    | Injekcijsko brizganje.....   | - 23 -        |
| 3.2.3    | Karakterizacija mehanskih lastnosti .....  | - 27 -        |
| 3.2.4    | Karakterizacija mikrostrukture .....   | - 29 -        |
| <b>4</b> | <b>REZULTATI .....</b>   | <b>- 33 -</b> |
| 4.1      | Rezultati upogibnega preizkusa in materialografske analize kompozita A.....        | - 33 -        |
| 4.2      | Rezultati upogibnega preizkusa in materialografske analize kompozita B.....        | - 37 -        |



|            |   |               |
|------------|---|---------------|
| <b>4.3</b> | <b>Rezultati upogibnega preizkusa in materialografske analize</b> |               |
|            | <b>kompozita D.....</b>   | <b>- 40 -</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Rezultati upogibnega preizkusa in materialografske analize</b> |               |
|            | <b>kompozita E.....</b>   | <b>- 42 -</b> |
| <b>4.5</b> | <b>Rezultati upogibnega preizkusa in materialografske analize</b> |               |
|            | <b>kompozita F .....</b>  | <b>- 45 -</b> |
| <b>5</b>   | <b>DISKUSIJA.....</b>   | <b>- 48 -</b> |
| <b>6</b>   | <b>SKLEPI .....</b>   | <b>- 53 -</b> |
| <b>7</b>   | <b>VIRI LITERATURE.....</b>                                       | <b>- 54 -</b> |

## UPORABLJENE KRATICE

**EU** - Evropska unija

**PET** - Polietilen tereftalat

**LDPE** - Polietilen nizke gostote

**LLDPE** - Linearni polietilen nizke gostote

**HDPE** - Polietilen visoke gostote

**PP** - Polipropilen

**PS** - Polistiren

**PVC** - Polivinil klorid

**ABS** - Akrilonitril butadien stiren

**CEN** - Evropska organizacija za standardizacijo

**ISO** - Svetovna organizacija za standardizacijo

**EN** - Evropski narodi

**E<sub>m</sub>** - elastični modul matice

**E<sub>p</sub>** - elastični modul delcev

**V<sub>m</sub>** - volumski delež matice

**V<sub>p</sub>** - volumski delež delcev

**E<sub>c</sub>** - elastični modul kompozita

**σ<sub>fM</sub>** - upogibna trdnost (MPa)

**σ<sub>fc</sub>** - predpisana upogibna napetost (MPa)

**ε<sub>fB</sub>** - upogibni raztezek pri zlomu (%)

**ε<sub>fB</sub>** - upogibni raztezek pri predpisani upogibni napetosti (%)

**E<sub>f</sub>** - upogibni elastični modul E<sub>f</sub> (MPa)

**T<sub>g</sub>** - temperatura steklarskega prehoda

**T<sub>m</sub>** – temperatura tališča

# 1 UVOD

Družba in svet, v katerem živimo, se nenehno spreminjata. Človekove potrebe iz dneva v dan rastejo, zato človeštvo neprestano stremi k napredku, raziskovanju, ekonomski in gospodarski rasti. Za zadovoljevanje svojih potreb je človek v veliki večini primerov pripravljen prekomerno poseči v naravo, ki pa se temu na vse načine upira. Prav zaradi tega se človeštvo k sreči vedno bolj zaveda, da je za naš obstoj nujno potrebno zdravo okolje. Predvsem v razvitih državah sveta v ospredje prihaja sonaravni oziroma trajnostni razvoj, čeprav pri tem še zdaleč nismo tako uspešni, kot bi si želeli. Ker se bomo v tem magistrskem delu osredotočili predvsem na problematiko ravnanja z odpadnimi polimernimi materiali, bomo v tem okviru predvsem izpostavil problematiko odpadnih polimernih materialov, čeprav je drugih ekološki problemov, s katerimi se bo moralo človeštvo prej ali slej spoprijeti, še ogromno.

Vsako delovanje razvite družbe na neki stopnji povzroči nastanek odpadkov, velik del le teh predstavlja plastični odpad, ki se ga je treba znebiti, saj tako ali drugače ovira naše življenje. Prav zato so odpadki eden izmed največjih problemov sodobne družbe. Reševanja tega problema se lotevamo na različne načine. Ekološki standardi, ki jih je postavila Evropska unija, so zelo visoki in zahtevajo predelavo velike količine odpadkov. Strošek takega ravnanja je iz dneva v dan višji, zato je nujno, da dane materiale izkoristimo kar najbolj učinkovito. S proizvodnjo se povečuje tudi povpraševanje po primarnih surovinah, iz katerih je izdelana večina proizvodov, vendar pa je zaloga primarnih surovin omejena, zato naraščajo tudi cene materialov, ki so potrebni za izdelavo določenega izdelka. Učinkovit finančni in ekološki odgovor na to stanje je pridobivanje sekundarnih surovin iz odpadkov, v našem primeru predvsem odpadne embalaže, ki ima v Sloveniji velik ekološki in ekonomski potencial. Pridobivanje sekundarnih surovin iz odpadnega materiala je že splošno uveljavljena storitev, vendar se pri takšni dejavnosti srečujemo tudi z nekaj negativnimi stranmi, kot je na primer ločevanje materialov, ki je zahtevno, zamudno in finančno zelo obremenjujoče.

## 1.1 Namen raziskave

V sklopu magistrskega dela bomo raziskovali in preizkušal različne karakteristike mešanic odpadnega polimernega materiala v kombinaciji z različnimi materiali (polnili).

Eden iz med ciljev je tudi predstavitev učinkov takšnega procesa in novo nastalih kompozitnih materialov tako na okolje kot na ljudi. V laboratoriju za raziskave materialov bomo analizirali ekstrudiran kompozit z matico iz recikliranega polimernega materiala ter določili vpliv različnih pogojev ekstrudiranja na končni izdelek. Eden od ciljev je odgovoriti na vprašanje o smiselnosti uporabe odpadnega polimernega materiala v kombinaciji z različnimi polnili pri izdelavi preprostih izdelkov iz plastike in tako pripomoči k zmanjšanju količine zavrženega polimernega materiala.

Raziskati želimo tudi standarde in merila, ki jih je potrebno izpolniti, da se takšen izdelek/material lahko pojavi na trgu in da je tudi tržno zanimiv.

Z raziskavo želimo torej delno raziskati smiselnost uporabe izključno recikliranih polimerov z različnimi polnili v industriji. Ekstrudirane kompozitne materiale bomo previdno obdelali, natančno analizirali s pomočjo materialografske analize ter na njih s pomočjo standardizirane naprave za izvedbo mehanskih preizkusov izvedli tudi tritočkovni upogibni preizkus. Na podlagi primerjave rezultatov bomo podali zaključke.

## 1.2 Uporabljene metode dela

Magistrsko delo je sestavljeno iz teoretičnega in raziskovalnega dela.

Za lažje razumevanje bomo v prvem delu naloge uporabili deskriptivno metodo. Predstavili bomo pojme in osnovno teorijo obravnavanega področja. Ob tem bomo uporabili literaturo tako domačih kot tujih avtorjev. Uporabili bomo tudi metodo kompilacije na podlagi knjig, člankov in strokovnih revij, v veliko pomoč pa nam bodo tudi internetni viri.

Drug del magistrskega dela bo temeljil na raziskavi in testiranjih mehanskih lastnosti in mikrostrukture v magistrskem delu izdelanih kompozitov iz recikliranih polimernih materialov. Raziskava bo izvedena na različnih vzorcih materiala, ki bo procesiran v izdelek preko industrijskega postroja, zagotovljenega s strani partnerja v industriji. Pridobljeni podatki bodo objektivno analizirani in primerjani med seboj. Na osnovi spoznanj in analize različnih materialov bomo podali ugotovitve. V sklepnem delu so prikazane teoretične in praktične ugotovitve. Podano je tudi mnenje o smiselnosti rešitve problema s takšno tehnologijo.

### **1.3 Predpostavke in omejitve magistrskega dela**

Predpostavljamo, da za razvoj polimernega kompozita z idealnimi lastnostmi potrebujemo zelo veliko časa in ogromno različnih kombinacij polimerov in polnil. Ker so naši viri in čas omejeni, bomo izvedli kompromis.

Idealen kompozit, katerega večinski delež predstavlja odpadni polimerni material, ne obstaja. Ker takšen material ne obstaja, kompozit tako nikakor ne more popolnoma nadomestiti polimerov kot primarne vhodne surovine v zahtevnih izdelkih. Obstaja samo mešanica materialov, ki ob primernih parametrih poda najboljše rezultate s stališča kakovosti, vzdržljivosti ter obstojnosti.

Pri zbiranju podatkov in karakterizaciji mehanskih lastnosti in mikrostrukture se bomo omejili predvsem na dostopne in široko uporabne odpadne polimere. Predpostavljamo, da bomo s pomočjo karakterizacije mehanskih lastnosti in mikrostrukture dobili dovolj točne in potrebne podatke.

## 2 TEORETIČNE OSNOVE

### 2.1 Problematika na področju odpadnih polimernih materialov

Polimeri so pomemben material za naše gospodarstvo. Svetovna proizvodnja polimerov eksponentno raste že od leta 1960, medtem ko je do leta 2014 proizvodnja dosegla že 311 milijonov ton. Po nekaterih napovedih bo do leta 2050 dosegla proizvodnjo okoli 1,2 milijarde ton letno. Evropska industrija polimernih materialov igra ključno vlogo v gospodarstvu EU, saj ima 1,45 milijona zaposlenimi in ustvari okoli 350 milijard prometa. V Evropi porabimo več kot 40% polimernih materialov za uporabo v embalažne namene, 20% se uporablja pri gradnji in manj kot 10% v avtomobilski industriji. Pri polimernih materialih, ki so gonilo našega gospodarstva, je treba obravnavati številna okoljska vprašanja, povezana z njihovo proizvodnjo, uporabo in predelavo po koncu njihove življenjske dobe. Zunanji učinki niso sistematično vključeni v ceno samega materiala ali končnega proizvoda. Več kot 90% plastike se danes proizvede iz fosilnih goriv tako, da proizvodnja plastike povzroča približno 400 milijonov ton emisij toplogrednih plinov na svetovnem nivoju. Če se bodo dosedanji trendi nadaljevali, bi lahko do leta 2050 v industriji polimernih materialov porabili 20% svetovne porabe nafte in posledično prispevali do 15% skupnih letnih emisij ogljika. Dolgoročno je ločitev proizvodnje plastike od fosilnih goriv nujno potrebna. Zraven rešitve v obliki recikliranja bi kot vhodno surovino lahko uporabljali tudi CO<sub>2</sub> in biomaso, vendar je potrebno njihov obstoj in vplive na okolje še bolje oceniti. [11]

Potrebno je razviti inovativne postopke za pretvorbo mešanega polimernega odpada nazaj v čiste polimere ter popolnoma eliminirati prisotnost materialov, ki naredijo plastiko neprimerno za reciklažo. [11]

Ponovna uporaba in recikliranje izrabljenih polimernih materialov je še vedno zelo nizka, še zlasti če jo primerjamo z drugimi materiali iz odpadnih tokov. Leta 2014 je EU ustvarila približno 25 milijonov ton komunalnih plastičnih odpadkov, od katerih je bilo le 30% recikliranih. Približno 31% takšnega odpada konča na odlagališčih, 39% plastike pa se sežge. EU izvozi skoraj polovico plastike, zbrane za recikliranje. Največji problem so tukaj gospodarske korenine ter tržni pogoji za odpad polimernih materialov (visoki fiksni stroški recikliranja v primerjavi z nizko tržno ceno nedotaknjene surovine), saj vsi učinki polimernih materialov na okolje niso upoštevani. [11]

Do takšnega stanja je privedlo veliko različnih elementov, kot so na primer: majhne količine nekaterih vrst polimernih materialov, izgube v procesu, vprašanja kakovosti (vprašanja, povezana s prisotnostjo dodatkov ali mešanja različnih vrst polimerov) ter šibke spodbude za trg sekundarnih polimernih materialov. Zelo velik problem pa je nastal predvsem pri polimernih materialih, ki jih uporabimo samo enkrat. (npr. embalažni materiali, saj le ti pogosto niso razviti tako, da bi se jih dalo kar najlažje reciklirati. [11])

## 2.2 Možnosti uporabe odpadnih polimernih materialov

Možnosti uporabe odpadne plastike je veliko, kljub temu pa so proizvajalci dokaj omejeni pri uporabi recikliranega materiala. Pogosto problem nastane že pri sami barvi materiala. Vhodni material, ki ima na primer mešani barvni vzorec, je uporaben samo za določene aplikacije, kot so na primerne prosojni filmi, vrečke v distribucijskem sektorju ter gradbeni material. V splošnem so to aplikacije, ki ne zahtevajo specifičnih barvnih meril in ne potrebujejo točno določenega izgleda. Možnosti uporabe postanejo večje, če je material svetle barve. Najbolj prisotna vrsta končne uporabe za takšne polimerne materiale so zato temne plastične folije in embalažni vsebniki. PET embalaža se običajno reciklira v zaprti zanki sistemov za ločeno zbiranje odpadne embalaže in je tudi eden izmed najbolj problematičnih materialov za mešanje z ostalimi polimernimi materiali, saj lahko ob recikliranju v zrak izpušča antimon in phthalates.

Velike količine LDPE in HDPE so trenutno iz reciklirane odpadne embalaže; tradicionalno se ti materiali uporabljajo za aplikacije, ki zahtevajo temno barvo. Zaradi razvoja tehnologije za barvno sortiranje pa se veliko takšnega materiala uporablja tudi v druge namene.

PVC je relativno težko reciklirati. Kot postpotrošniški material je običajno zelo onesnažen z drugimi materiali, vendar se stanje tudi na tem področju spreminja.

PP je težko hitro ločiti od drugih poliolefinov, kar zmanjšuje njegovo učinkovitost pri recikliranju. Pogosto ga pretopijo skupaj z glavnim poliefinom (PE), kar seveda zmanjšuje kvaliteto reciklata; tako PP ali PE. [10]

Nekatere aplikacije zahtevajo posebno stroge zahteve glede vsebnosti nečistoč, predvsem so to materiali, ki so v stiku z živili. Takšnih materialov ni mogoče pridobiti iz virov, ki niso povezani s hrano razen, če je bila pri materialu izvedena dodatna dekontaminacija.

Tudi dekontaminacija v nekaterih primerih ne more zagotoviti zadostne kvalitete materiala, ki bi preprečil kontaminacijo hrane, zato se v takšnih primerih izvedela večplastna embalaža.

Glavni izziv industrije recikliranih polimernih materialov je predvsem ta, da takšna industrija zahteva velike količine recikliranega materiala, izdelane s strogimi specifikacijami, a mora kljub vsemu biti cenovno konkurenčna v primerjavi s primarnim materialom. [10]

Ko se plastični odpadki zberejo in obravnavajo, jih je potrebno pretvoriti v uporaben končni izdelek ali pa jih reciklirati v sekundarno surovino, iz katere naredimo nove produkte neposredno ali pa v kombinaciji s primarno surovino.

Možnost uporabe recikliranih polimerov je odvisna od kakovosti in polimerne homogenosti materiala. Čist polimerni material ima večjo vrednost in več možnosti za končno uporabo kot mešan in kontaminiran polimerni material. [10]

|      |  |
|------|--|
| HDPE | Zabojniki, igrače, industrijska embalaža in folija, nekatere cevi    |
| LDPE | Folija, vrečke, igrače, cevi, izolacija kablov                       |
| PET  | Vlakna, platenke, embalaža za hrano, sintetična izolacija            |
| PP   | Folije, ovoji za baterije, deli za avtomobile, električne komponente |
| PS   | Termo izolacija, kasete, lončki, električne naprave                  |
| PVC  | Okvirji za okna, cevi, talne obloge, žlebovi...                      |

Tabela 1.2: Tipična uporaba različnih polimernih materialov

Cilj reciklažne industrije je na splošno, da ostane material v isti vlogi, kot jo je imel pred recikliranjem, saj je na ta način lažje izkoristiti lastnosti polimernih materialov in njegovih dodatkov ter tako lažje izpolniti zahteve, ki so potrebne za tehnično in zakonodajno dokumentacijo.

Kot je bilo že rečeno, pa ni enostavno pridobiti homogenih odpadkov, saj so zaprti sistemi, ki vsebujejo homogene plastične materiale učinkoviti, vendar so dražji od sistemov za mešan odpad polimernih materialov, ki je odvisen od konstantno razvijajoče se tehnologije ločevanja. Zaradi omenjenih razlogov tako večina polimernih materialov konča v tako imenovanem "downcycling" ciklu.

Potrebno pa je poudariti, da se povečuje trend uporabe odpadne plastike v tako imenovanih plastičnih kompozitih v sklopu zgoraj omenjenega downcyclinga. Pri takšnih produktih, polimerne materiale zmešamo skupaj z različnimi polnili, ki materialu dodelijo popolnoma nove lastnosti in možnosti uporabe. Industrija stremi k povečanju uporabe takšnih materialov, saj so ti cenovno dokaj ugodni ter ponujajo raznolike možnosti za proizvodnjo izdelkov. [10]



## 2.3 Produkti iz odpadnih polimernih materialov in njihove lastnosti

Izdelava izdelkov iz recikliranih polimernih materialov ne vpliva pozitivno samo na okolje, ampak ima pozitivne učinke tudi za uporabnika, zlasti ko je takšen izdelek uporabljen na prostem. Takšni izdelki so odporni na gnitje, rjavenje, korozijo ter težave s termiti.

Obstaja izjemno malo materialov, ki lahko bolje kljubujejo elementom narave kot kompozitni materiali z matico iz polimernega materiala. Izdelki iz teh materialov prav tako ne oksidirajo kot na primer aluminij in z lahkoto prenašajo celotne vplive narave, vključno s toploto in soncem. Takšni produkti prav tako nikoli ne potrebujejo barvanj, medtem ko na primer lesni produkti potrebujejo redno vzdrževanje. Ko je kompozitni izdelek izdelan, je barva primešana v matico, kar pomeni, da v življenjski dobi izdelka barvanje ni potrebno.

Obstaja veliko različnih aplikacij za uporabo takšnih materialov. Izdelki zagotavljajo vrhunsko storitev in so izjemno vzdržljivi. [10]

Omenjeni material se vse pogosteje uporablja v:

- **kmetijstvu , vinogradništvu, ribogojstvu** ( kocke, kmetijske ograje, vrata, staje za živali, stojnice, itd);
- **tehniki** (zidovi, pešpoti, ograje, robniki);
- **vrtnarstvu** (ograje, vrti robovi, kompostni zaboji);
- **industriji** (industrijska tla, tesnila, palete, varnostni stebri, tovorna tla, itd);
- **gradbeništvu** (stoli, mize, klopi, preproge, parki, oprema za igrišča, signalizacija; pešpoti, mostovi, zidovi, kritina, tlaki, cevi);
- **transportna infrastruktura** (hrupne ovire, znakovne table, ograje);
- **morska infrastruktura** (pomoli, piloti, pregrade, kritina).

Če se odločimo, za uporabo takšnih materialov, ne le da veliko pridobimo, ampak tudi doprinesemo k ohranjanju gozdov, saj se za veliko večino zgoraj omenjenih aplikacij sedaj uporablja les. Uporabni so tako rekoč na vseh področjih in v vseh klimatskih razmerah. Edina slabost, ki trenutno obstaja, je ta, da podrobne lastnosti takšnih materialov danes še niso široko raziskane.



Slika 1.2: Primeri uporabe kompozitov z matico iz recikliranih polimernih materialov

## 2.4 Polimerni kompoziti

Mnoge sodobne tehnologije zahtevajo materiale z nenavadnimi kombinacijami lastnosti, ki jih običajne kovine, keramika in polimerni materiali ne morejo zadovoljiti. Kombinacije in razponi materialnih lastnosti so se in se še razširjajo z razvojem kompozitnih materialov. Na splošno velja, da je kompozit večfazni material, ki ima pomemben delež lastnosti obeh konstitutivnih faz in je izdelan tako, da je realizirana boljša kombinacija lastnosti.

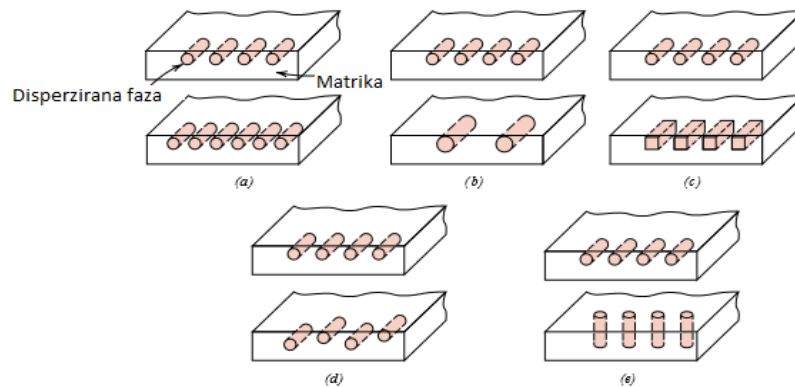
Kompozitni materiali niso le umetno izdelani, pač pa se številni pojavljajo tudi v naravi.

Primer za to je les, ki sestoji iz močnih celuloznih vlaken, ki jih obdaja in drži tako imenovani lignin. Tudi kost je sestavni del močnega vendar mehkega beljakovinskega kolagena in trdega ter krhkega mineralnega apatita. [18]

V našem kontekstu je kompozit torej večfazni material, ki je v nasprotju z naravnimi kompoziti umetno izdelan. Faze v umetno izdelanih kompozitih morajo biti kemijsko drugačne in ločene z vmesnikom. Večina kovinskih zlitin in mnogih keramičnih materialov zato ne spada v to opredelitev, ker so njihove večfazne faze oblikovane kot posledica naravnih pojavov. Pri oblikovanju kompozitnih materialov so znanstveniki in inženirji genialno združili različne kovine, keramike in polimere, da bi proizvedli novo generacijo materialov. [18]

Večina kompozitov je bila ustvarjena za izboljšanje kombinacij mehanskih lastnosti, kot so togost, žilavost, tako pri povišani kot sobni temperaturi. Veliko sestavljenih materialov ima le

dve fazi; ena se imenuje matrika in je neprekinjena ter obdaja drugo fazo, ki jo pogosto imenujemo utrjevalna faza. Lastnosti kompozitov so funkcija lastnosti sestavnih faz, njihovih relativnih količin ter geometrije disperzirane faze. "Geometrija razpršene faze" v tem kontekstu pomeni obliko, velikost, porazdelitev delcev ter njihovo orientacijo, prikazano na sliki 2.2.

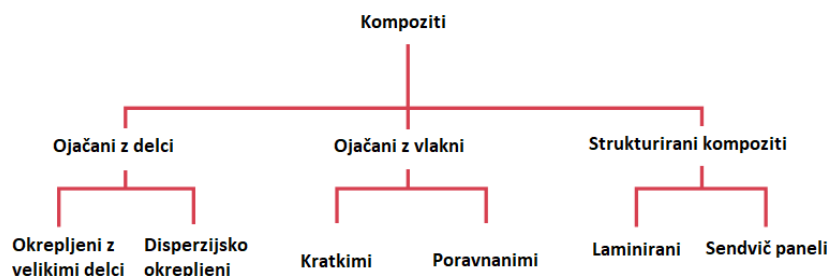


Slika 2.2: Shematski prikaz različnih geometrijskih in prostorskih karakteristik delcev dispergirane faze, ki imajo vpliv na lastnosti kompozita: a) koncentracija, b) velikost, c) oblika, d) distribucija, e) orientacija

Preprosta shema za klasifikacijo kompozitnih materialov je prikazana na sliki zgoraj in je sestavljena iz treh glavnih delitev: kompoziti, okrepljeni z delci, vlakni ter strukturirani kompoziti. Za vsako od naštetih delitev obstajata nadaljnji dve podkategoriji.

Dispergirana faza za kompozite, okrepljene z delci, je enakomerna, to pomeni, da so dimenzije delcev približno enake v vseh smereh. Za kompozite, okrepljene z vlakni, ima disperzijska faza geometrijo vlakna (veliko razmerje dolžine proti premeru).

Strukturirani kompoziti pa so sestavljeni iz kombinacije kompozitov in homogenih materialov.



Slika 3.2: Klasifikacijska shema različnih kompozitnih materialov

V nadaljevanju bomo natančneje obravnavali samo kompozite, okrepljene z delci, saj so le ti pomembni v primeru naše raziskave. Kot je prikazano na sliki 3.2, so kompoziti okrepljeni z delci, razdeljeni na dve podskupini, in sicer v kompozite okrepljene z velikimi delci in majhnimi delci, ki imajo utrjevalni učinek. [18]

Razlika temelji na načinu utrditve oziroma na različnih mehanizmih utrjevanja.

Izraz "velik" se uporablja predvsem za to, da se nazorno pokaže, da gre za mehanizme, ki jih ne analiziramo na atomski ravni, saj se za to uporablja mehanika kontinuum.

Za večino kompozitov, okrepljenih z velikimi delci, je faza delcev težja in trdnejša od matrike. Ti okrepljeni delci težijo k omejevanju gibanja matrične faze v bližini vsakega delca. V bistvu matrika prenese nekatere napetosti na delce, ki tako nosijo del skupne zunanje obremenitve. Stopnja utrditve ali izboljšanja mehanskega obnašanja je odvisna od jakosti vezave na matriko.

Polnila tako spreminjajo ali izboljšujejo lastnosti materiala, njegov namen in / ali nadomestijo nekaj volumna polimera z manj dragim materialom – polnilom. Delci imajo lahko precej različnih geometrij, vendar morajo imeti v vseh smereh približno enake dimenzije. Za učinkovito ojačitev morajo biti delci majhni in enakomerno porazdeljeni po matriki. Poleg tega tudi volumenski delež obeh faz vpliva na lastnosti materiala; mehanske lastnosti se povečujejo z naraščajočo vsebnostjo delcev. Za odvisnost elastičnega modula od volumskega deleža sestavnih faz za dvofazni kompozit sta podana dva matematična izraza. Ti enačbi, ki ju imenujemo tudi pravila mešanja, napovedujeta, da se elastični modul materiala mora nahajati med zgornjo mejo in spodnjo mejo, ki jo predstavljata naslednji enačbi: [18]

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p$$

$E_m$ -Elastični modul matice

$E_p$ -Elastični modul delcev

*Enačba 1.2: Enačba, ki predstavlja zgornjo mejo*

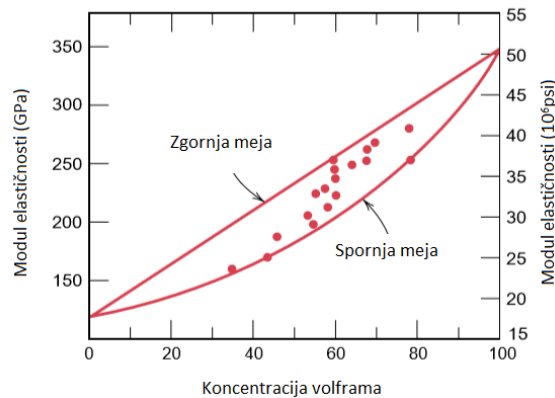
$V_m$ - volumski delež matice

$V_p$ - volumski delež delcev

$$E_c(l) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m}$$

$E_c$ - Elastični modul kompozita

*Enačba 2.2: Enačba, ki predstavlja spodnjo mejo*



Slika 4.2: Odvisnost modula elastičnosti od volumskega deleža volframovih disperzoidov v matici bakra

Slika 4.2 prikazuje krivulje zgornje in spodnje meje za baker-volframov kompozit, v katerem je volfram faza, ki se nahaja v obliki delcev. Eksperimentalne podatkovne točke padejo med obema krivuljama. [18]

Kompoziti, utrjeni z velikimi delci, se uporabljajo pri vseh treh vrstah materialov (kovine, polimeri in keramika). Tako elastomere kot plastomere pogosto okrepiamo z različnimi trdnimi materiali. Tako bi bila na primer uporaba sodobnih gum v industriji močno omejena, če je ne bi utrdili s trdimi delci (npr. črn ogljik). Črni ogljik je sestavljen iz zelo majhnih sferičnih delcev ogljika, proizvedenih z zgorevanjem zemeljskega plina ali olja v ozračju, ki ima le omejen dovod zraka. Pri dodajanju tega materiala vulkanizirani gumi to poveča natezno trdnost, žilavost in odpornost proti pojavu razpok ter obrabi. [18]

Pri disperzijsko utrjenih kompozitih so delci običajno veliko manjši, s premerom med 10 in 100 nm. Interakcije delcev in matrike, ki vodijo k utrditvi, se pojavljajo na atomski ali molekularni ravni. Medtem ko matrika nosi večji del bremena, majhni razpršeni delci ovirajo ali zavirajo gibanje dislokacij. Plastična deformacija je torej omejena tako, da se izboljša natezna trdnost ter trdota.

Kovine in kovinske zlitine je mogoče okrepiti in utrjevati z enakomerno disperzijo večvolumskih odstotkov delcev zelo trdega in inertnega materiala. Dispergirana faza je lahko kovinska ali nekovinska. Pogosto se pri tem uporabljajo oksidni materiali. Utrditveni mehanizem torej vključuje interakcije med delci in dislokacijami znotraj matrice. Utrditev je obstojna tudi pri povišanih temperaturah in daljših časovnih obdobjih, saj so dispergirani delci izbrani tako, da ne reagirajo z matrično fazo. Na primer visoko temperaturno trdnost nikljevih zlitin se lahko močno izboljša z dodatkom okoli 3 vol% torijevega oksida ( $\text{ThO}_2$ ) v obliki

popolnoma dispergiranih delcev; ta material je znan kot torijsko-disperziran (ali  $T_D$ ) nikelj. S spreminjanjem deleža posameznih sestavin v polimernih mešanicah lahko sicer pripravimo mešanice s širokim spektrom fizikalnih lastnosti, vendar je za nadaljnjo diverzifikacijo različnih tipov mešanic pomembna še uporaba dodatkov (aditivov), ki omogočajo pripravo materialov z izboljšanimi predelovalnimi in uporabnimi lastnostmi. V ta namen so pomembni zlasti dodatki, kot so mineralna polnila, zaviralci gorljivosti, toplotni in svetlobni stabilizatorji. S teoretičnega in aplikativnega vidika so pomembni ternarni kompoziti npr. Elastomer/elastomer/polnilo. [18]

Kot primer navajamo ternarni kompozit polipropilen/elastomer/polnilo. Nizko udarno žilavost izotaktičnega polipropilena pri temperaturi pod  $T_g$  lahko izboljšamo z dodatkom od 5 do 20 prostorninskih odstotkov elastomera. Elastomerni vključki delujejo kot koncentradorji napetosti in sprejmejo mehansko energijo brez nadaljevanja rasti makroskopskih razpok. K plastomeru jih dodajamo zaradi zmanjšanja togosti, povečanja udarne žilavosti in odpornosti na lom. V dostopni literaturi je na voljo le malo raziskav o gorljivosti polimernih mešanic, medtem ko je bistveno več del objavljenih o toplotni in svetlobni degradaciji. Tudi če ne obstajajo kemijske interakcije med sestavinami mešanice, je možno, da je gorljivost mešanice bistveno drugačna kot tista, ki bi jo pričakovali na podlagi principa aditivnosti. Učinkovitost zaviralcev gorljivosti je tudi močno odvisna od morfologije polimerne mešanice. V odvisnosti od sistema je toplotna stabilnost boljša ali slabša glede na tisto, ki bi jo predvidevali na podlagi masnega deleža sestavin mešanice. Obnašanje mešanice je odvisno predvsem od kemijskih lastnosti polimerov in mehanizmov njihove degradacije. Interakcije med polimeri lahko stabilizirajo bolj nestabilni polimer ali povečajo degradacijo bolj stabilne sestavine. [18]

## 2.5 Polnila

Polnila se v industriji polimernih materialov običajno uporabljajo zaradi dveh razlogov. Uporabljajo se z namenom zmanjšanja stroškov, prav tako pa se pogosto uporabljajo za izboljšanje karakteristik polimernega materiala, kot so togost, trdota, odpornost na ogenj in obrabo.

Polnila (filerji) v 99% primerov kemijsko ne reagirajo s polimerno matrico, zato so zelo pomembne mehanske lastnosti omenjenih polnil. Glavne lastnosti, od katerih je odvisna uspešnost polnila, so oblika delcev in površina. Velikost in oblika polnila v veliki meri določata mehanske lastnosti polimernega kompozita. Vlaknasti in prizmatični delci tako

navadno povečajo vlečno in fleksibilno trdnost v vseh treh dimenzijah polimernega kompozita, medtem ko polnila, oblikovana kot krogle in kocke, ne izboljšajo zgoraj omenjenih lastnosti. [4]

Kosmičem ali ploščam podobna polnila lahko po navadi izboljšajo mehanske lastnosti samo v dveh dimenzijah, ker se med ekstrudiranjem običajno usmerijo v smeri toka polimerne matice.

Znano je, da vsa polnila, ki jih dodajamo polimernim materialom, povečajo dimenzijsko in termično stabilnost. Delci se gibljejo povprečno v velikosti od 1 do 10 mikronov za naravne minerale in do 30 mikronov za steklene kroglice. Večji delci polnil ustvarijo tudi večje koncentracije napetosti. Na splošno velja, da majhni delci bolje izboljšajo trdnost od večjih. Razlike v velikosti delcev so najpogosteje v območju od 20: 1 do 40: 1. Površina polnila se lahko razlikuje od  $20\text{m}^2 / \text{g}$  za glino do  $1\text{m}^2 / \text{g}$  za silicijev dioksid. Površina in stopnja omočljivosti polnila pomagata določiti viskoznost materiala pri procesu ekstrudiranja in modeliranja. Polnila z dobro omočljivostjo so lažje pretočna, kar vodi do izboljšanih mehanskih lastnosti, toda če je površina polnila prevelika, potem je po navadi na voljo premalo polimernega materiala, ki bi polnila vezal, kar vodi do slabe razpršenosti polnila in neenakomernih lastnosti materiala/izdelka. Raziskave so pokazale, da začnejo delci, večji od 10-20 mikronov, resno vplivati na odpornost materiala na udarce. Prav tako je potrebno omeniti, da grobi delci povzročijo slabo površinsko obdelavo in posledično nizek sijaj. Takšna polnila lahko koristimo, če želimo, da ima izdelek matirano površino.[5]

Najpogosteje uporabljena polnila so kalcijev karbonat (apnenec), magnezijevi silikati (talk), kalcijev sulfat (mavec), kalcijev silikat, barijev sulfat ter lesna moka. V obratih, kjer predelujejo odpadne polimerne materiale, se kot polnila pojavljajo tudi reciklirano drobljeno steklo in reciklirana vulkanizirana guma v obliki pelet. Lahko pa uporabljamo tudi organska polnila, ki vključujejo drevesno lubje, moko ali živalsko perje. V naši raziskavi bomo uporabili sledeča polnila:

- **kalcijev carbonat**



Kalcijev carbonat je najpogostejše polnilo za plastiko.

Predstavlja več kot polovico vseh anorganskih polnil, ki se uporabljajo v industriji polimernih materialov. Pogosto ga

Slika 5.2: Kalcijev karbonat

kopljejo v kamnolomih v obliki apnenca ali marmorja. Dodajanje kalcijevega karbonata v polimeren material zmanjša natezno trdnost, poveča pa elastični modul ter gostoto. Ne samo da dodajanje tega materiala zniža stroške končnega izdelka, ampak mu doda tudi površinski sijaj ter izboljša žilavost. Najpogosteje se uporablja v industriji PVC-ja. To polnilo bomo uporabili, saj je cenovno privlačno in obljublja znatno izboljšanje nekaterih mehanskih lastnosti. [4]

- **drobljeno steklo**

Uporaba drobljenega stekla kot polnila v industriji polimerov še ni zelo prisotna, vendar nekatera inovativna podjetja za polnilo pri izdelavi izdelkov iz recikliranih plastičnih mas že uporabljajo to vrsto polnila, ki se je tudi pri našem poizkusu izjemno dobro obnesel, saj material z razliko od npr. apnenca na sebe ne vleče vlage in ga je tako tudi nekoliko lažje dodajati v samo mešanico polimera. Kot je znano, je raznobarvno steklo izjemno težko učinkovito reciklirati, zato je njegova uporaba v naši raziskavi izjemno zanimiva in morda



Slika 6.2: Drobljeno steklo

ponuja nove priložnosti v industriji. Dodajanje drobljenega stekla v plastiko poveča tudi gostoto. Ne samo da dodajanje tega materiala zniža stroške končnega izdelka, ampak mu doda tudi površinski sijaj ter izboljša žilavost.[4]

- **reciklirana vulkanizirana guma**



Slika 7.2: Reciklirana guma

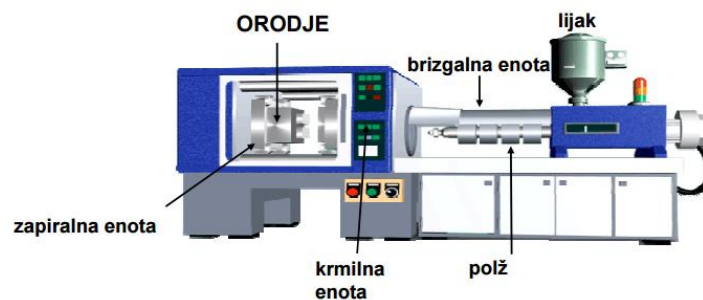
Uporaba reciklirane vulkanizirane gume v industriji polimernih materialov v zadnjem času strmo narašča. Kot je znano je odpadno gumo težko učinkovito reciklirati, zato je ponovna uporaba tega material v industriji tudi tržno zanimiva. Dodajanje reciklirane vulkanizirane gume v polimerni material natezno trdnost materiala in deformabilnost znotraj elastičnega območja poveča pa gostoto. V našem raziskovalnem delu jo bomo uporabili predvsem zato, ker jo je kot recikliran produkt težko ponovno uporabiti.[4]



## 2.6 Proces izdelave polimernih kompozitov

Injekcijsko brizganje je najbolj razširjen proces oblikovanja plastičnih mas, pri katerem brizgamo stopljen polimerni material v orodje ali matrico. Tehnologija omogoča brizganje različnih izdelkov, od enostavnejših do velikih in tehnološko zahtevnejših izdelkov.

Dandanes je injekcijsko brizganje zelo razširjeno, saj se lahko uporablja tako za masovno proizvodnjo kot tudi za izdelavo posameznih testnih primerkov. Brizgalne naprave se med seboj ločijo predvsem po sili zapiranja orodja, ki je lahko od 200 kN za majhne laboratorijske naprave in do 100.000 kN v velikih industrijskih strojih. Polži so običajno tristopenjski, s premerom od 25mm do 250mm. Razmerja med dolžino in premerom na kvadrat  $(L/D)^2$  pa se običajno gibljejo med 18 in 25. Najpogosteje imajo polži hod med 2,5 do 4D, v velikih postrojih pa lahko dosežejo tudi 25D. Polž v cilindru je po navadi ogrevan s pomočjo obročnih keramičnih grelnikov, ogrevana pa je tudi sama šoba na stroju [6, 12].



Slika 8.2: Stroj za injekcijsko brizganje

Sam proces brizganja je sestavljen iz naslednjih korakov [12]:

1. **zapiranje orodja:** Zapiralna enota zapre obe polovici orodja.
2. **brizganje:** Pred brizganjem najprej nasujemo umetno maso v obliki zrnec v lijak. Od tu ti padejo v lijak, kjer se stopijo, polž pa jih potiska naprej. Ko se akumulira dovolj stopljenega materiala, se polž pomakne naprej in potisne stopljeno plastiko skozi šobo v orodje.
3.  **dodatno doziranje:** Potem ko je polimerni material dodan v orodje, sledi pavza, v kateri se doda primanjkljaj mase zaradi krčenja pri strjevanju.
4. **ohlajanje:** Polimerni material pustimo, da se ohladi in strdi v orodju.
5. **odpiranje orodja:** Ločimo obe polovici orodja.
6. **izmet izdelka:** Izdelek vzamemo iz orodja, ga obrežemo, ostanke pa lahko po navadi zopet uporabimo.

Injekcijsko brizganje je relativno nov način predelave polimerov, ki pa se je v zadnjem času zelo razširil. Ima tako dobre kot slabe lastnosti. [12] Dobre lastnosti so:

- velike proizvodne zmogljivosti;
- ne zmanjševanje visokih toleranc izdelkov pri velikih serijah;
- lahko uporabimo različne materiale;
- visoka stopnja avtomatizacije;
- majhna količina odpadkov;
- malo potrebne obdelave po brizganju.

Slabe lastnosti pa so: [12]

- visoki stroški nakupa orodja;
- obratovalni stroški so lahko visoki;
- oblika izdelkov mora biti taka, da se jih lahko vbrizga v orodje.

Material se dovaja v stroj preko dozirnih enot, ki avtomatizirano dodajajo snov iz zalogovnikov ali manjših silosov, v manjših napravah ali pa pri manjših serijah pa lahko material dovajamo tudi ročno. Material najprej potuje v ogrevan cilinder, znotraj katerega se vrtilni polž, ki z vrtenjem gnete material in ga potiska naprej v komoro za plastificiranje. Samo trenje med materialom doprinese 20% potrebne toplote za taljenje mase. Preostalih 80% toplote pa proizvedejo električni grelci, pritrjeni na cilinder, v katerem se vrtilni polž. Ko se nabere dovolj stopljene mase, se polž ustavi, sledi pa premik brizgalne enote k zaprtemu orodju in vbrizg mase z aksialnim gibom polža. Pomembno je, da je tok mase laminaren, saj se v primeru turbulentnega toka v izdelku pojavijo napake. Masa se prične ohlajati takoj, ko pride v stik s hladnim orodjem. Ko je orodje napolnjeno, prične delovati naknadni tlak, ki zaradi krčenja pri strjevanju dodatno dozira maso v kalup. Naknadni tlak deluje, dokler ni izdelek dovolj trden in tog za odstranitev iz orodja in je pomemben predvsem zaradi estetskega videza izdelka. Tlak ni povsod enak. Največji je pri dolivu, najmanjši pa v delih izdelka, ki so bili zadnji zapolnjeni. Sledi umik brizgalne enote z namenom zmanjšanja prenosa toplote na orodje. Orodje se odpre, izdelek se sname, med tem pa že poteka nov krog doziranja materiala po zgoraj opisanem postopku. Orodje se ne sme odpreti, preden temperatura izdelka ne pade pod določeno vrednost, saj mora biti izdelek za odstranitev dovolj trden. [6, 12]

Postopek brizganja se odvija pri visokih tlakih in visokih temperaturah. Tlaki brizganja so od 500 do 2500 bar. Sile so odvisne od tlaka brizganja in od površine, ki je pravokotna na smer brizganja. Delitev orodja mora biti izvedena tako, da se lahko izdelek neovirano odstrani. Ravno delitev orodja pa je hkrati največja šibka točka v orodju. Rezultanta sil skuša odpreti orodje; da naprava temu kljubuje, pa mora imeti dovolj veliko zapiralno silo. Temperature brizganja so od 120 do 350°C in so odvisne od tipa materiala. Temperatura valja je višja od temperature mase, saj jo merimo s pomočjo termoelementov na šobah in cilindru. Dlje kot masa ostane v cilindru, bolj se bo njena temperatura približala temperaturi samega cilindra. Pomembno je, da masa v cilindru ne ostane več kot 4 vbrizge, saj se s podaljševanjem časa, ki ga masa prebije v cilindru, slabšajo karakteristike izdelka. Delo, potrebno za pripravo (mešanje in gnetenje) mase je odvisno od hitrosti, dolžine in časa, rotacije polža ter sile, potrebne za doziranje – zadrževalni tlak. Višji kot je zadrževalni tlak, več dela je potrebnega za pripravo mas, ta je bolj pregnetena in ima višjo temperaturo. Orodje, v katerega se vbrizgava masa, je po navadi hladnejše. Temperatura orodja se lahko giblje med 0°C in 150°C. V orodju so kanali, po katerih se pretaka medij. Po navadi je ta medij voda ali olje. Ko se orodje odpre, se izdelek odstrani s pomočjo izmetačev, ki so po navadi podolgovati ali okrogli. Razporejeni so po obodu ali pa po sredini modela, vsekakor pa ne smejo biti nameščeni na površini, ki je vidna na končnem izdelku, saj na izdelku ostanejo sledi izmetačev. Ko je izdelek dovolj ohlajen, se orodje odpre in gibljivi del se pomakne stran do nastavljenе oddaljenosti. Nato prične cilindri potiskati izmetače iz orodja. Hitrost, sila in dolžina izmetavanja se nastavljajo na stroju. Izdelki po navadi padejo iz orodja v posebne zbiralnike. Izmetači se vrnejo na prvotno pozicijo s pomočjo vzmeti, gibov cilindra ali pa povratnikov v orodju. [3]

## **2.7 Standardi in merila za izdelke / materiale iz odpadnih polimernih materialov**

Tehnične specifikacije in standardi se v industriji uporabljajo z namenom vzpostavitve reference za določanje cen, klasifikacijo in nadzor kvalitete. Obstaja širok spekter standardov, ki nadzirajo kvaliteto in tehnične zahteve za odpadno plastiko, reciklate in izdelke iz recikliranega polimernega materiala. Standardi podajajo testne specifikacije in metode, katere morajo biti zadoščene, večinoma pa je potrebno tem standardom zadostiti predvsem prostovoljno in temeljijo na konsenzu. Kljub temu da standardizacija kompozitnih izdelkov z

matico iz recikliranega polimernega materiala še ni potrebna, se nekateri zakoni v Evropski uniji vseeno nanašajo na njih. [6]

Tukaj je potrebno izpostaviti izjemo, ki se nanaša na izdelavo produktov, ki so v stiku z živili, saj za takšne produkte obstaja zakonodaja, ki ji je nujno potrebno slediti.

EN standardi so zagotovljeni iz strani CEN, evropske organizacije za standarde. CEN sodeluje z ISO (Internacionalna organizacija za standarde). CEN ima 33 internacionalnih članov. V članicah so EN standardi izvedeni s strani nacionalnih organov za standardizacijo. Ni potrebno, da je produkt usklajen s standardom CEN. Ustrežanje standardu EN je tako odvisno samo od proizvajalca in njegovih namenov. Kljub neobvezujočim standardom pa proizvajalci le tem po navadi poizkušajo zadostiti, saj s tem produkt lažje pošljejo na trg in le tega lažje prodajo, saj večina kupcev standarde tudi zahteva. EN standardi, prikazani v tabeli 3 definirajo kvalitativne parametre in testne postopke za specifične reciklate, ki so lahko obvezni ali opcijski. Mejne vrednosti teh parametrov so odvisne od dogovora med proizvajalcem in naročnikom. Vsak standard vključuje sklic na relevanten ISO in EN standard. [6,16]

| Kvalitativni parametri v EN ISO 15347 standardih |  |
|--|--|
| Velikost serije                                  | Zahtevano (teža ali volumen)                               |
| Oblika odpadka                                   | Zahtevano (kosmiči, ...)                                   |
| Večinski delež polimera                          | Zahtevano (procent teže)                                   |
| Barva  | Zahtevano (vizualni pregled)                               |
| Zgodovina odpadka                                | Zahtevano po standardu EN 15343                            |
| Udarna trdnost                                   | Opcijsko po standardu EN ISO 179-1 in 179-2 ali EN ISO 180 |
| Natezna trdnost                                  | Opcijsko po standardu EN ISO 527                           |
| Masni pretok taline                              | Opcijsko po standardu EN ISO 1133                          |
| Vsebnost vlage                                   | Opcijsko po standardu EN 12099                             |

Tabela 2.2: Kvalitativni parametri v EN ISO 15347 standardih

Tudi ameriška agencija za standardizacijo je izdelala sklop standardov in testov, ki se uporabljajo za testiranje in standardizacijo končnih izdelkov iz predelane odpadne plastike.

Zbrali smo jih v tabeli 4. [16]

| Test                  | Standard           | Opis   |
|-----------------------|--------------------|--|
| Strukturne lastnosti  | ASTM 790           | Test, ki preverja strukturne lastnosti, kot so upogibnost, elastični modul in deformacija. |
|                       | AS/NZS 1170.1:2002 | Smernice za izdelavo izračunov nosilnosti  |
|                       | AS1657-1992        | Specialne zahteve za načrtovanje, inštaliranje platform, pohodnih poti, stopnic in lestev. |
|                       | AS 2156.2 - 2001   | Specialne zahteve za izdelavo poti in struktur na zavarovanih naravnih območjih            |
| Odpornost proti zdrsu | AS/NZS 4586-2004   | Klasifikacija odpornosti proti zdrsu   |
| Absorbcija vode       | ASTM D 570         | Test določa relativno vrednost absorpcije vode iz strani plastike, ko                      |

|                         |                   |   |
|-------------------------|-------------------|---|
|                         |                   | med potopom v vodo  |
| Odstranitev vijaka      | D 6117            | Test preizkuša zmožnost trdne povezave materiala in vijaka.                 |
| Gorljivost              | AS/ISO9239.1 2003 | Testira se odpornost objekta na ogenj, ki prihaja iz sevalnega telesa.      |
|                         | STM E 84          | Testira gorljivost gradbenih materialov (širjenje plamenov in gostota dima) |
| Odpornost na kemikalije | ASTM D543         | Test ocenjuje odpornost plastike na kemikalije                              |

*Tabela 3.2: Sklop standardov, ki se uporabljajo za testiranje in standardizacijo izdelkov iz predelanih odpadnih polimernih materialov*

## **3 EKSPERIMENTALNI DEL**

### **3.1 Uvod v eksperiment**

V nadaljevanju magistrskega dela bo predstavljeno raziskovalno delo, v okviru katerega smo izdelali različne kompozite ter raziskali njihove lastnosti. Izdelali smo 6 različnih vzorcev ter na vsakem izvedli upogibni preizkus ter karakterizacijo mikrostrukture.

### **3.2 Potek eksperimenta (izvedba)**

Eksperiment smo razdelili v 4 faze, in sicer :

1. izbor komponent kompozita in priprava mešanic materiala,
2. injekcijsko brizganje,
3. karakterizacija mehanskih lastnosti,
4. karakterizacija mikrostrukture.

V prvi fazi smo analizirali različne možne kombinacije materialov. Osredotočili smo se predvsem na lahko dostopne in med odpadki pogosto prisotne materiale, saj smo želeli, da bi bili rezultati čim bolj realni in ponovljivi tudi na industrijski ravni.

V drugi fazi smo vnaprej pripravljene mešanice vbrizgali v kalup na stroju za brizganje plastike Klaus Maffei M 80-380 CX.

Karakterizacijo mehanskih lastnosti ter mikrostrukture smo izvedli v Laboratoriju za materiale na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru.

#### **3.2.1 Izbor komponent kompozita in priprava mešanic materiala.**

Na podlagi raziskave trga, obstoječih podjetij ter zapisov smo prišli do zaključka, da uporabimo dva različna polimerna reciklata, iz katerih bomo pripravili več različnih mešanic osnovnega materiala in polnil. Odločili smo se za recikliran PE- polietilen in recikliran PP- polipropilen v obliki granul, in sicer zato, ker sta prav PP in PE materiala, ki se v največji meri pojavljata na trgu v obliki reciklata, prav tako pa sta znana po odličnih karakteristikah za izdelavo najrazličnejših izdelkov.

Potrebno je tudi poudariti, da je možnih ogromno različnih mešanic polimernih materialov, vsaka s svojimi prednostmi in slabostmi. Ker naša raziskava tako časovno kot tudi finančno omogoča preizkus samo izbranih mešanic, smo na podlagi analize dostopnega gradiva izbrali po našem mnenju najbolj primerne mešanice materialov. Ne izključujemo možnosti, da bi se morda katera izmed drugih mešanic odrezala bolje.

- **PE- polietilen**

**Kemijska formula:**  $(C_2H_4)_n$

**T<sub>g</sub>:** -125°C

**T<sub>m</sub>:** 109°C – 130°C

**Gostota:**

- LDPE (polietilen nizke gostote) razvejan: 0.914 do 0.94 g/cm<sup>3</sup>
- LLDPE (linearni polietilen nizke gostote) : 0.918 do 0.943 g/cm<sup>3</sup>
- HDPE (polietilen visoke gostote) : 0.94 do 0.96 g/cm<sup>3</sup>

PE se pridobiva s polimerizacijo etilena po različnih postopkih, ki dajejo polietilene z različnimi lastnostmi (npr. visoko in nizkotlačni postopek), kot so: LDPE, MDPE, HDPE in LDPE. Material je nepolaren, delno kristaliničen termoplast z različnimi stopnjami razvejanosti, od katere je odvisna kristaliničnost od 60 do 80% pri HDPE. PE skoraj ne navzema vode. [8]

Mehanske in kemijske lastnosti so odvisne od kristaliničnosti (gostote) in od polimerizacijske stopnje (talilni indeks MFI). Z naraščajočo gostoto (linearnostjo) PE naraščajo natezna in upogibna trdnost, togost, trdota, temperaturna obstojnost, odpornost proti kemikalijam in topilom, padajo pa transparentnost, napetostno-korozijska obstojnost in fleksibilnost produkta. Odvisno od kristaliničnosti je tog ali mehak. HDPE ne teži k lezenju (sorazmerno velika časovna odvisnost mehanskih lastnosti). Le ta se pojavlja predvsem pri LDPE. Barva nepobarvanega je mlečno bela, le pri zelo tankih folijah je skoraj prozoren. V vseh barvah je pokrivno sposoben. Material ima odlične elektroizolacijske lastnosti. Dielektrične lastnosti so skoraj neodvisne od gostote, talilnega indeksa, temperature in frekvence. Visokofrekvenčno ogrevanje ni možno. Pogosto ima močan elektrostatičen naboj, zato se dodajajo antistatiki. Prevodnost zvišamo z dodatkom 25 do 30% saj. Zgornja temperatura uporabe za HDPE je 95°C, za kratek čas lahko tudi višja. Lomljivost nastopi pri približno -50°C, pri višji

molekulski masi še nižje. Kristalinično talilno območje je med 125 do 140°C. PE gori z modrikastim plamenom, pri gorenju žareče kaplja. [8]

- **PP- polipropilen**

**Kemijska formula:**  $(C_3H_6)_n$

**T<sub>g</sub>:** -10 °C

**T<sub>m</sub>:** 175 °C

**Gostota:** od 0,895 do 0.92 g/cm<sup>3</sup>

Struktura materiala je delno kristalinična. Je nepolaren termoplast s kristaliničnostjo med 60 in 70%, kar je posledica izotaktične ureditve metilnih skupin. Kopolimerizati z etilenom imajo višjo udarno trdnost (tudi pri nižjih temperaturah) in so vremensko bolj obstojni. Nepobarvan je rahlo transparenten do kristalno bel, ima visok površinski sijaj. V vseh barvah je pokrivno sposoben. Material ima višjo togost, trdoto in trdnost, toda nižjo zarezno udarno žilavost kot PE. Za visoko zahtevne konstrukcijske dele ga ojačimo s steklenimi vlakni. Električne lastnosti so podobne kot pri PE. Dielektrične lastnosti so neodvisne od frekvence, zato ni možno visokofrekvenčno ogrevanje. Kljub visokim izolacijskim lastnostim se pogosto elektrostatično naelektri, zato se dodajajo antistatiki. Pri višjih temperaturah se čisti PP nagiba k oksidaciji (kljub stabilizaciji PP tipov). Gornja temperatura uporabnosti na zraku je 110°C, pri močno stabiliziranih in ojačanih tipih tudi višja. Temperatura lomljivosti je pri 0°C, pri modificiranih tipih nižja. Kristalinično talilno območje je od 158-168°C. Gorljivost je podobna kot pri PE. [9]

Kot smo že omenili v poglavju 2.5, smo reciklirani polimerni material in polnila izbrali na podlagi analize dostopnih dokumentov.

Matica v obliki granul:

- recikliran PP- polipropilen
- recikliran PE- polietilen v obliki HDPE .

V podjetju TURNAPLAST d.o.o. so nam iz izkušenj svetovali, da naj delež polnil ne presega 30% , zato smo se odločili, da se teh načel tudi držimo. V kolikor bi delež presegal 30%, bi to lahko znatno vplivalo na karakteristike izdelanega materiala, prav tako pa bi imelo negativen vpliv na stroje za brizganje plastike, predvsem iz vidika obrabe bobna in dozirnega vijaka.



Polnila, ki smo jih uporabili (poglavje 2.5), smo načrtno izbrali na osnovi njihovih karakteristik in možnosti reciklaže. Sprva smo izdelali 4 različne mešanice materialov, vsake po 17 kg in jih poimenovali s črkami A, B, C, D, E, F. Mešanice smo s pomočjo digitalne tehtnice natančno odmerili in zmešali v mešalni posodi ter jih porazdelili v dozirne posode.

| Oznaka | Sestava mešanice   |
|--------|--|
| A      | <b>70% PP + 20% reciklirane gume + 10% CaCO<sub>3</sub> (apnenca v prahu)</b><br>11,9kg PP + 3,4kg reciklirane gume + 1,7kg CaCO <sub>3</sub> (apnenca v prahu)    |
| B      | <b>70% PP + 20% stekla + 10% reciklirane gume</b><br>11,9kg PP + 3,4kg Stekla v prahu + 1,7kg Reciklirane gume   |
| C      | <b>70% HDPE + 30% CaCO<sub>3</sub> (apnenca v prahu)</b><br>11,9kg HDPE + 5,1kg CaCO <sub>3</sub> (apnenca v prahu)  |
| D      | <b>70% HDPE + 20% CaCO<sub>3</sub> (apnenca v prahu) + 10% reciklirane gume</b><br>11,9kg HDPE + 3,4kgCaCO <sub>3</sub> (apnenca v prahu) + 1,7kg reciklirane gume |
| E      | <b>70% HDPE + 30% stekla v prahu</b><br>11,9kg HDPE + 5,1kg stekla v prahu   |
| F      | <b>70% HDPE + 20% stekla v prahu + 10% reciklirane gume</b><br>11,9kg HDPE + 3,4kg stekla v prahu + 1,7kg reciklirane gume   |

Tabela 4.3: Sestava izbranih mešanic za pripravo kompozitov

### 3.2.2 Injekcijsko brizganje

Izdelava je potekala na stroju za brizganje plastike Krauss Maffei KM 80 - 380 CX z naslednjimi karakteristikami:

| Podatki o stroju: Krauss Maffei KM 80 - 380 CX   |                    | Injekcijska enota    |                            |
|--|--------------------|----------------------|----------------------------|
| Vpenjalna sila, največ                           | 800 kN             | Premer vijaka        | 40 mm                      |
| Sila za oblikovanje, največ                      | 55,3 kN            | Razmerje D/Š         | 20                         |
| Premična plošča za gibanje produktov - odpiranje | 31,1 kN            | Tlak vbrizga         | 1860bar                    |
| Premična plošča za gibanje produktov - zapiranje | 22kN               | Prostornina kapice   | 201 cm <sup>3</sup>        |
| Velikost modela (h x v)                          | 670 mm x<br>670 mm | Največja masa vbrizg | 183 g                      |
| Razdalja med cilindri (h x v)                    | 420 mm x<br>420 mm | Hitrost vbrizgavanja | 126 cm <sup>3</sup> /<br>s |

|                                  |               |                          |             |
|----------------------------------|---------------|--------------------------|-------------|
| Odprt kalup (razdalja)           | 500 mm        | Hitrost vijaka           | 295 l / min |
| Višina kalupa                    | 250 mm        | Plastifikacijska hitrost | 21,8 g / s  |
| Hitrost hidravličnega iztiskanja | 150 mm        | Tlak šobe                | 50 kN       |
| Sila izmetača naprej / nazaj     | 22,6 / 9,9 kN | Največja masa kalupa     | 995 kg      |

Tabela 5.3: Podatki o stroju za brizganje plastike Krauss Maffei KM 80-380CX

- Izdelava preizkušanca A

| Temperature cilindrov v °C | Prirobnica | 1   | 2   | 3   | 4   | Šoba |
|----------------------------|------------|-----|-----|-----|-----|------|
| /                          | 60         | 205 | 215 | 220 | 220 | 215  |

Tabela 6.3: Temperature v različnih stopnjah kompresijskega cilindra pri izdelavi kompozita A

Temperaturo cilindra, znotraj katerega poteka polž, smo postopoma zviševali (glede na dolžino). V prirobnici je bila tako temperatura 60°C in se nato preko sektorjev zviševala do 220°C (razvidno iz tabele 6.3). Temperaturo na brizgalni šobi smo zaradi dobrega brizganja spet nekoliko znižali. Orodje smo zaradi primerne ohlajanja mase vzdrževali na temperaturi 55°C.

|                   |                     |                       |        |
|-------------------|---------------------|-----------------------|--------|
| Nakladalni tlak 1 | 1450bar, 10 sekund  | Protitlak             | 80bar  |
| Brizganje 1       | 40mm/s pri 1550 bar | Položaj 1             | 30mm   |
| Čas cikla         | 34s                 | Pot                   | 5mm    |
| Čas hlajenja      | 15s                 | Zapiralna sila orodja | 50ton  |
| Čas brizganja     | 0.65 s              | Izmetavanje           | 20x2mm |
| Masa blazine      | 4.2 mm              | Premer polža          | 40mm   |
| Hitrost doziranja | 70 l/min            | Odpiranje orodja      | 250mm  |

Tabela 7.3: Karakteristike cikla izdelave za kompozit A

- **Izdelava preizkušanca B**

| Temperature cilindrov v °C | Prirobnica | 1   | 2   | 3   | 4   | Šoba |
|----------------------------|------------|-----|-----|-----|-----|------|
| /                          | 50         | 205 | 215 | 220 | 220 | 215  |

Tabela 8.3: Temperature v različnih stopnjah kompresijskega cilindra pri izdelavi kompozita

**B**

Temperaturo cilindra, znotraj katerega poteka polž, smo postopoma zviševali (glede na dolžino). V prirobnici je bila tako temperatura 50°C in se nato preko sektorjev zviševala do 220°C (razvidno iz tabele 8.3). Temperaturo na brizgalni šobi smo zaradi dobrega brizganja spet nekoliko znižali. Tokrat je temperatura orodja na dolivni strani znašala 55°C.

Karakteristike cikla izdelave so zelo podobne karakteristikam pri izdelavi testiranca A, saj gre za enak material z drugačno % vrednostjo polnil.

Za malenkost se je povečal le čas cikla in masa blazine, kar pomeni, da se mešanica B brizga nekoliko slabše kot mešanica A.

|                   |                     |                       |        |
|-------------------|---------------------|-----------------------|--------|
| Nakladalni tlak 1 | 1450bar, 10 sekund  | Protitlak             | 80bar  |
| Brizganje 1       | 40mm/s pri 1550 bar | Položaj 1             | 30mm   |
| Čas cikla         | 34s                 | Pot                   | 5mm    |
| Čas hlajenja      | 15s                 | Zapiralna sila orodja | 50ton  |
| Čas brizganja     | 0.66 s              | Izmetavanje           | 20x2mm |
| Masa blazine      | 5.4 mm              | Premer polža          | 40mm   |
| Hitrost doziranja | 70 l/min            | Odpiranje orodja      | 250mm  |

Tabela 9.3: Karakteristike cikla izdelave za kompozit B

- **Izdelava preizkušanca C**

Pri izdelavi preizkušanca pod oznako C smo naleteli na problem, zaradi katerega stroj za brizganje plastike ni bil zmožen sprejeti materiala in izdelati izdelke. Ugotovili smo, da polnilo CaCo<sub>3</sub> (apnenec v prahu), ki ima velik % deleža v mešanici in kombinaciji s HDPE, na sebe veže vlago iz prostora. Vlaga se v prvem sektorju bobna, kjer se začne cikel taljenja upari in povzroči razmere, ki aktivirajo senzor pritiska v bobnu, ki le tega avtomatsko zaustavi. Ta problem je relativno hitro mogoče rešiti s sušenjem vhodnega materiala v posebnih sušilcih, vendar je ta postopek časovno zelo zahteven, zato ga na dan poizkusa nismo bili zmožni izvesti. 30% delež CaCo<sub>3</sub> smo tako zamenjali s 30% deležem drobljenega

stekla, ki ima podobne lastnosti kot  $\text{CaCO}_3$ , vendar le ta na sebe ne veže vlage. Mešanico smo poimenovali s črko E .

- **Izdelava preizkušanca D**

Tudi pri izdelavi preizkušancev D smo naleteli na podobne težave, vendar je bil tokrat stroj zmožen izdelati nekaj izdelkov, preden se je zaradi zgoraj omenjenega problema proces ustavil. S pomočjo mehanskega pritiska materiala na vhod v boben smo proces sicer lahko ponovno zagnali, vendar smo se odločili, da preizkus prekinemo in tudi v tem primeru delež  $\text{CaCO}_3$  zamenjamo z enakim deležem mletega stekla.

- **Izdelava preizkušanca E**

| Temperature cilindrov v °C | Prirobnica | 1   | 2   | 3   | 4   | Šoba |
|----------------------------|------------|-----|-----|-----|-----|------|
| /                          | 50         | 205 | 215 | 220 | 220 | 215  |

Tabela 10.3: Temperature v različnih stopnjah kompresijskega cilindra pri izdelavi kompozita

*E*

Temperaturo cilindra, znotraj katerega poteka polž, smo postopoma zviševali (glede na dolžino). V prirobnici je bila tako temperatura  $50^\circ\text{C}$  in se nato preko sektorjev zviševala do  $220^\circ\text{C}$  (razvidno iz tabele 10.3). Temperaturo na brizgalni šobi smo zaradi dobrega brizganja spet nekoliko znižali. Tokrat je temperatura orodja na dolivni strani znašala  $55^\circ\text{C}$ .

|                   |                     |                       |        |
|-------------------|---------------------|-----------------------|--------|
| Nakladalni tlak 1 | 1450bar, 10 sekund  | Protitlak             | 80bar  |
| Brizganje 1       | 40mm/s pri 1550 bar | Položaj 1             | 30mm   |
| Čas cikla         | 34s                 | Pot                   | 5mm    |
| Čas hlajenja      | 15s                 | Zapiralna sila orodja | 50ton  |
| Čas brizganja     | 0.66 s              | Izmetavanje           | 20x2mm |
| Masa blazine      | 5.4 mm              | Premer polža          | 40mm   |
| Hitrost doziranja | 70 l/min            | Odpiranje orodja      | 250mm  |

Tabela 11.3: Karakteristike cikla izdelave za kompozit E

- **Izdelava preizkušanca F**

| Temperature cilindrov v °C | Prirobnica | 1   | 2   | 3   | 4   | Šoba |
|----------------------------|------------|-----|-----|-----|-----|------|
| /                          | 50         | 205 | 215 | 220 | 220 | 215  |

Tabela 12.3: Temperature v različnih stopnjah kompresijskega cilindra pri izdelavi kompozita

F

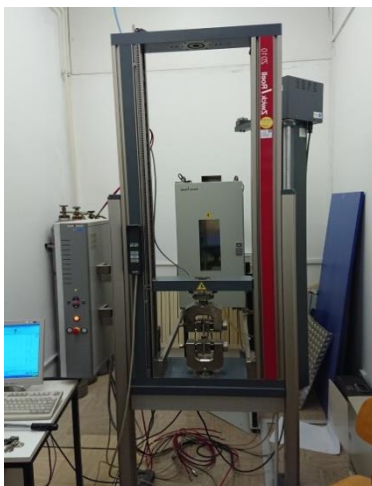
Tudi pri tem testirancu smo temperaturo cilindra glede na dolžino postopoma zviševali do zadnje cone v stroju, ki je imela temperaturo 220°C. Temperatura orodja je tudi tokrat znašala 55°C.

|                   |                     |                       |        |
|-------------------|---------------------|-----------------------|--------|
| Nakladalni tlak 1 | 1450bar, 10 sekund  | Protitlak             | 80bar  |
| Brizganje 1       | 40mm/s pri 1550 bar | Položaj 1             | 30mm   |
| Čas cikla         | 34s                 | Pot                   | 5mm    |
| Čas hlajenja      | 15s                 | Zapiralna sila orodja | 50ton  |
| Čas brizganja     | 0.66 s              | Izmetavanje           | 20x2mm |
| Masa blazine      | 5.4 mm              | Premer polža          | 40mm   |
| Hitrost doziranja | 70 1/min            | Odpiranje orodja      | 250mm  |

Tabela 13.3: Karakteristike cikla izdelave za kompozit F

### 3.2.3 Karakterizacija mehanskih lastnosti

- Upogibni preizkus



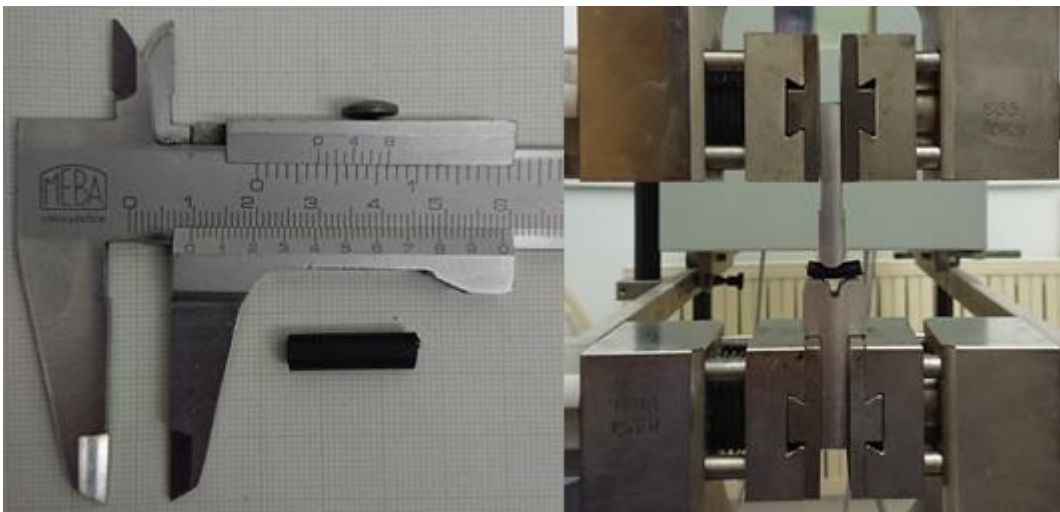
Slika 9.3: Naprava za izvajanje mehanskih preizkusov

Mehanske lastnosti izdelanih kompozitov bomo določili s tritočkovnim upogibnim preizkusom.

Upogibni preizkus polimerov uporabljamo predvsem za bolj krhke materiale, kjer natezna trdnost ni dovolj signifikantna. Za preizkus smo izbrali napravo za izvajanje mehanskih preizkusov ZWICH/ROELL Z010, na kateri lahko izvedemo vrsto različnih mehanskih preizkusov.

V našem primeru smo napravo opremili z orodjem za izvedbo tritočkovnega upogibnega preizkusa. Pri upogibnem preskusu preizkušavec konstantnega premera leži na dveh podporah, obremenimo pa jo na sredini s pritisno silo, ki narašča s konstantnim pomikom. Preskus je končan, ko preizkušavec

poči oz. ko dosežemo maksimalno vrednost. Preizkusna naprava nam posname diagram, iz njega pa dobimo podatke, ki nam služijo za oceno polimerov na upogibno obremenitev. Na ordinati diagrama odčitamo maksimalno silo, na abscisi pa pripadajoči upogib. Upogibni modul elastičnosti je razmerje med napetostjo in raztezkom v začetnem proporcionalnem delu diagrama. Strmina premice oz. modul elastičnosti nam podaja značilnost materiala - togi materiali imajo strmo premico, elastični materiali pa položno premico. V našem primeru smo izdelali 20mm vzorce s konstantnim premerom 6mm. Naše orodje na katerih smo vzorce testirali je imelo 13mm razdaljo med upornima točkama. Za vsak testiran material smo izvedli 3 identične zaporedne preizkuse. [17]



Slika 10.3: preizkušavec (levo) in izvajanje upogibnega preizkusa (desno)

Najpomembnejši rezultati upogibnega preizkusa so:

- upogibna trdnost  $\sigma_{FM}$  (MPa),
- predpisana upogibna napetost  $\sigma_{fc}$  (MPa),
- upogibni raztezek pri zlomu  $\epsilon_{fB}$  (%),
- upogibni raztezek pri predpisani upogibni napetosti  $\epsilon_{fB}$  (%),
- upogibni elastični modul  $E_f$  (MPa),
- standard: SIST EN ISO 178 (metoda je akreditirana).

Upogibna trdnost za testiravec z okroglim prerezom: [13]

$$\sigma_{fs} = \frac{F_f L}{\pi R^3}$$

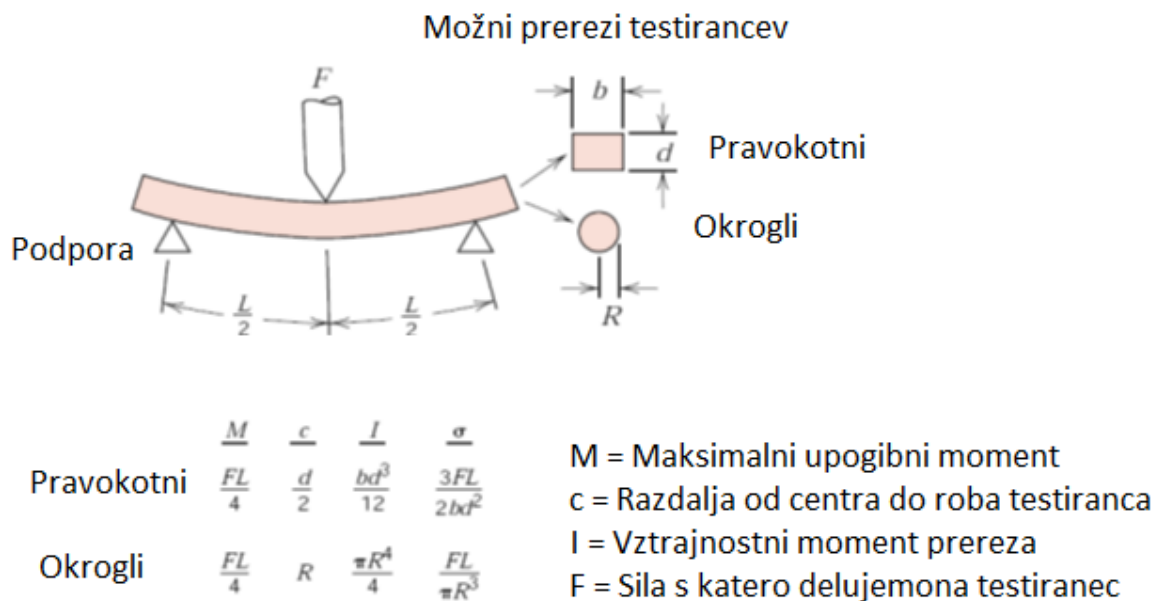
$F_f$  - obremenitev

$L$  - razdalja med podporama

$b$  - širina

$d$  - višina

$R$  - polmer preizkušanca



Slika 11.3: Možni prerezi testirancev pri upogibnem preizkusu. Vir: [13]

### 3.2.4 Karakterizacija mikrostrukture

Karakterizacijo mikrostrukturnih lastnosti smo izvedli z materialografsko analizo, ki se začne z ustreznim jemanjem vzorcev, njihovo pripravo in se konča z analizo.

Uspešnost materialografske analize temelji predvsem na temeljiti pripravi vzorca, saj metode elektronske in svetlobne mikroskopije zahtevajo popolnoma ravno ter optično gladko površino. Pogoje za nastanek slike danega vzorca je potrebno doseči v večstopnjem pripravljalnem postopku. Izvajanje teh postopkov pomeni poseg v notranjost vzorca, ki ima za posledico bolj ali manj izrazito spreminjanje njegove mikrostrukture v površinskem sloju vzorca. [15]

- **Potek priprave materialografskih vzorcev**

Materialografski vzorec v našem primeru predstavlja kompaktni kos polimernega kompozita z ravno, gladko in zadostno kontrastno raziskovalno površino, ki omogoča opazovanje mikrostrukturnih elementov in sestavin, značilnih za njegovo notranjost. Kot pripravljalni postopek je zato pomembno brušenje in tudi zato se standardni materialografski vzorec imenuje obrus. Za različne materiale se načeloma uporablja različne pripravljalne tehnike. Za naše vzorce smo uporabili naslednji potek dela:

Najprej smo si zastavili načrt vzorčenja in odvzeli vzorce. Jemanje vzorcev je makroskopska sprememba oblike osnovnega telesa, ki jo izvedemo z ustreznimi obdelovalnimi sredstvi. V našem primeru je bil to nož. Pri tem neizogibno nastopi bolj ali manj izrazita sprememba mikrostrukture na ločilni površini kot tudi motnje pod površino delca. Postopek je treba izvesti previdno ter poskrbeti, da obdržimo mikrostrukturne spremembe na minimumu. Prav tako moramo paziti, da ohranimo na minimumu tudi termično obremenitev. Vsakemu preizkušancu smo prečno na smer brizganja odrezali majhen kos ter ga navpično vložili v posebno posodico s hladno polimerno maso za vlaganje vzorcev. Ker naši vzorci samostojno niso stali navpično, smo v maso dodali tudi posebno kovinsko sponko. Vzorci morajo biti v maso vloženi čisti ter razmaščeni. Vzorce smo pustili v masi sušiti 2 uri in jih nato z rezkalnikom označili.



*Slika 12.3: Vzorec pripravljen na nadaljnjo obdelavo*

Sledil je postopek brušenja. Brušenje pomeni mehansko obdelavo in s tem porušitev zgradbe posamičnega kristalita v polikristalni snovi ali monokristalu. Posamična zrna abrazivnega papirja prevladajo vezne sile med kristalnimi elementi in s tem zraven glajenja povzročijo tvorbo in spremembo mikrostrukturnih napak v podpovršinskem delu. Obdelovalni proces tako vpliva na podpovršinsko cono, pri čemer prihaja do plastične deformacije. Pomembno vlogo igrajo tudi dislokacije (njihovo nastajanje, gibanje in medsebojno reagiranje).



Vseh šest vzorcev smo položili v napravo za avtomatsko pripravo vzorcev Buhler EcoMet 250, ki je poskrbela, da so vsi vzorci bili brušeni pod enakimi pogoji.



*Slika 13.3: Naprava za avtomatsko pripravo obrusov Buhler EcoMet 250*

Brušenje smo izvedli v več korakih. Ker se pri razrezu vzorcev pojavi moteno področje v razponu 100-500 $\mu$ m, je bilo potrebno površino pričeti brusiti z dokaj grobim brusnim papirjem. Pričeli smo z brusilni papirjem granulacije 120, nadaljevali s 320, 800, 1000 in končali z brusnim papirjem granulacije 2500. Vsak korak je bil izveden pod enakimi pogoji, in sicer: čas brušenja 5 minut, hitrost vrtenja podlage 200 obratov na minuto in s pritrisno silo 20N. Med brušenjem je naprava poskrbela tudi za konstanten pritok vode, ki je zmanjšala trenje in hitro odvajala nastalo toploto, kar je zelo pomembno, saj lahko pri višjih temperaturah pride do kemične reakcije ali poškodbe vzorcev. Po vsakem koraku smo vzorce temeljito oprali pod tekočo vodo. Po brušenju smo se odločili za avtomatsko poliranje vzorcev z isto napravo, vendar smo tokrat za podlago namestili klobučevino skupaj z nekaj mililitrov 1 $\mu$ m diamantne suspenzije (MetaDi COMBO) polirnega sredstva. Poliranje predstavlja postopek preparacije materialografskih vzorcev, pri katerem zmanjšamo hrapavost, nastalo pri brušenju, s čimer postopoma dosežemo bleščečo in optično gladko površino. Polirna sredstva izvajajo zraven rezilnega delovanja še močno drgnjenje, ki povzroča poglobitev deformiranega področja, ki je pri mehanskem poliranju prisotno v veliko večji meri kot pri brušenju. [15]

Tokrat smo na napravi povečali čas obdelovanja na 15 minut ter znižali silo na 15N. Po poliranju smo vzorce pregledali ter ugotovili, da se je na površini testirancev pojavil sloj klobučevine, ki nam je preprečeval vpogled na strukturo. Do tega je verjetno prišlo zaradi abrazivnih delcev v naših vzorcih, ki so uničili površino klobučevine. Zaradi slabega rezultata

smo postopek brušenja ponovili od začetka. Po brušenju z brusnim papirjem granulacije 2500 smo se tokrat odločili za ročno poliranje vzorcev na isti površini z istim polirnim sredstvom. Naš cilj je bil doseči čim bolj gladko površino vzorcev. Polirali smo vsak vzorec posebej, dokler nismo dosegli želenega rezultata. Po poliranju smo vzorce temeljito oprali pod tekočo vodo in splahnili z alkoholom, nato smo vzorce posušili.

Materialografska priprava mora omogočiti razpoznavanje elementov mikrostrukture, in sicer zanesljivo, nepopačeno in neponarejeno, na zadostni ravni, gladki, nemoteni in kontrastni površini vzorca. Zaradi majhne globinske ostrine svetlobnega mikroskopa mora biti površinska hrapavost pod  $0,1\mu\text{m}$ . [15]

Karakterizacijo mikrostrukture smo izvedli s pomočjo optične mikroskopije. Optična mikroskopija sodi v področje vizualnih materialografij, ki sloni na opazovanju polirane in kontrastirane površine vzorca v vidni svetlobi. Glede na naloge te analize in lastnosti raziskovanega gradiva so možni različni načini osvetljevanja in upodabljanja.

Za raziskavo smo uporabili svetlobni mikroskop Nikon EIPHOT 300 pri povečavah od 50 do 1000-krat.



*Slika 14.3: Svetlobni mikroskop, uporabljen pri karakterizaciji mikrostrukture*

Za opazovanje makrostrukture izdelanih testirancev smo uporabili stereomikroskop Bressen Advance Ico, ki nam omogoča povečavo vzorca do 10-krat.

## 4 REZULTATI

V sledečem poglavju so zbrani rezultati upogibnih preizkusov, izračunane vrednosti upogibne trdnosti ( $\sigma_{fs}$ ) ter prikazani posnetki karakterizacije makro- in mikrostrukture, posnete s stereo ter svetlobnim mikroskopom.

### 4.1 Rezultati upogibnega preizkusa in materialografske analize kompozita

#### A

Sestava: 70% PP + 20% reciklirane gume + 10% CaCO<sub>3</sub> (apnenca v prahu)

Analiza vzorcev v poliranem stanju je podrobno razkrila mikrostrukturo kompozita. Tako kot pri ostalih vzorcih gre tudi tukaj za disperzno mikrostrukturo z neurejeno razporeditvijo delcev.

Iz mikroposnetkov je lepo razvidno, da so delci gume in kalcijevega karbonata izrazito neenakomerno razvrščeni po matriki. Delci gume so v primerjavi z delci kalcijevega karbonata veliko večji, morda celo preveliki za uporabo pri brizganju polimernih materialov, praviloma pa so dobro vključeni v matico, ki jo v tem primeru predstavlja reciklat polipropilena. Delež delcev reciklirane gume je 20%, kar na podlagi pregleda mikrostrukture sicer ni možno sklepati. Meje med matico in obema polniloma so lepo vidne. Z vključevanjem kalcijevega karbonata kot polnila se je materialu povečala upogibna trdnost, hkrati pa ga uspešno uporabljamo kot polnilo, ki zmanjšuje stroške primarnega materiala in izboljšuje mehanske lastnosti. Za ta vzorec smo izdelali tudi poseben preizkušane, pri katerem smo znižali temperaturo brizganja za 30°C z namenom, da bi preverili, kako temperatura brizganja vpliva na lastnosti materiala. Iz izračuna upogibne trdnosti lahko razberemo, da se je upogibna trdnost z znižanjem temperature brizganja nekoliko znižala, iz pregleda mikrostrukture pa je lepo razvidno, da se je v materialu pojavilo nekaj manjših poroznih mest, ki so posledica nižje temperature brizganja in posledične slabše zapolnitve mest. Test smo izvedli na treh preizkušancih. Posamični rezultati so prikazani v tabeli 14.4. Kot je bilo pričakovano, se preizkušanci niso dokončno prelomili, zato je stroj meritev avtomatsko ustavil pri maksimalnem upogibu 3,2mm. Največja sila, ki smo jo izmerili pri preizkušancih iz kompozita A, je bila 721,68N pri maksimalnem upogibu 3,2mm. Iz serije treh preizkušancev smo dobili povprečno silo 709,90N. Iz diagrama 2.4 in 3.4 v katerem je prikazana odvisnost upogiba od sile, s katero delujemo na preizkušane, lahko razberemo, da

se preizkušanelec najprej elastično deformira (krivulja med točkama A in B), nato pa sledi plastična deformacija (krivulja od točke B do C). V točki C se preizkušanelec poruši (dosežena je maksimalna sila, iz katere smo izračunali upogibno trdnost).

Za kompozit A, ki je bil brizgan pod nižjo temperaturo, smo izvedli samo en preizkus. Iz tabele 15.4 je razvidno, da je bila tukaj največja izmerjena sila 685,96N pri maksimalnem upogibu. Iz diagrama 2.4 je lepo razvidno, da na kompozit A najbolj vpliva sila v območju med 200N in 400N, medtem ko je vpliv na začetku in koncu delovanja sile podoben.

Povprečna upogibna trdnost preizkušancev A je bila 108,79 MPa, preizkušancev A<sub>t</sub> pa 105,12 MPa. Med točkama A in B se kompozit nahaja v elastičnem območju imenovanem tudi Hookovem področju, saj se bi na tej točki preizkušanelec po razbremenitvi vrnil v prvotno stanje. V tem področju je natezna napetost premosorazmerna z relativnim raztezkom. Zakon velja dokler sila ne prekorači meje elastičnosti. Med točkama B in C pa je preizkušanelec v plastičnem področju.

| Št. | Fmaks.<br>N | ε Fmaks.<br>mm | Serijski<br>Št = 3 | Fmaks.<br>N | ε Fmaks.<br>mm |
|-----|-------------|----------------|--------------------|-------------|----------------|
| 1   | 709,52      | 3,20           | X                  | 709,90      | 3,20           |
| 2   | 721,68      | 3,20           | S                  | 11,78       | 0,00           |
| 3   | 698,49      | 3,20           | v                  | 1,63        | 0,01           |

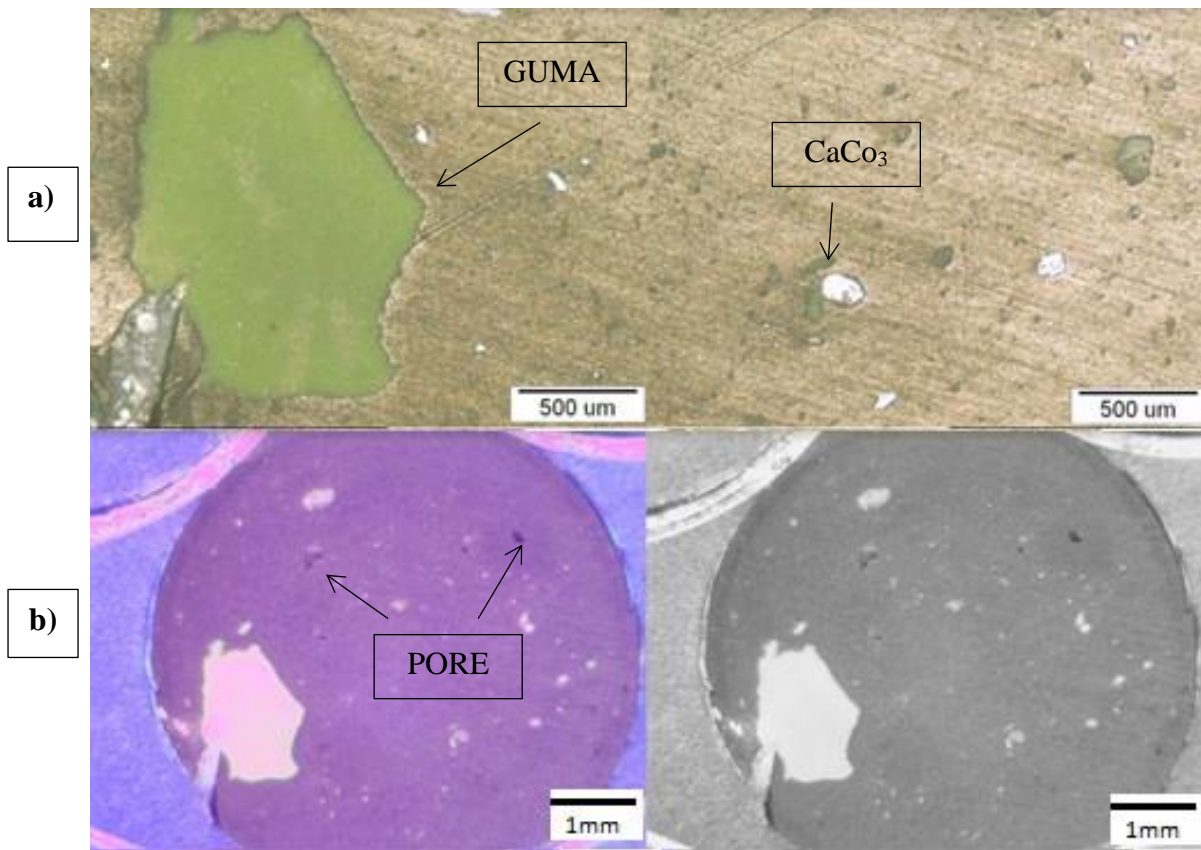
Tabela 14.4: Rezultati upogibnega preizkusa za kompozit A

$$\sigma_{fs} = \frac{F \times L}{\pi \times R^3} = \frac{709,90 \text{ N} \times 13 \text{ mm}}{3,142 \times 27 \text{ mm}^3} = 108,79 \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)}$$

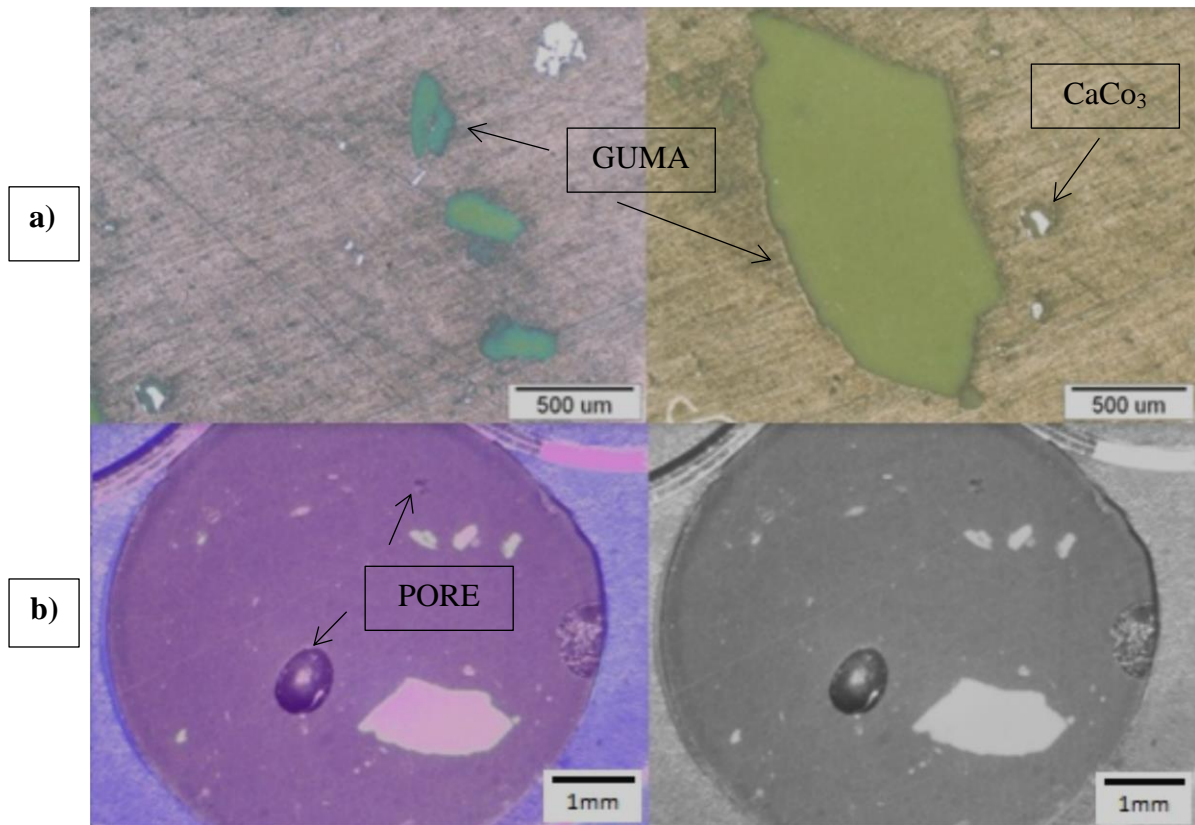
| Št. | Fmaks.<br>N | ε Fmaks.<br>mm | Serijski<br>Št = 3 | Fmaks.<br>N | ε Fmaks.<br>mm |
|-----|-------------|----------------|--------------------|-------------|----------------|
| 1   | 685,96      | 3,20           | X                  | 685,96      | 3,20           |

Tabela 15.4: Rezultati upogibnega preizkusa kompozita A, ki je bil vbrizgan pod drugačnimi pogoji

$$\sigma_{fs} = \frac{F \times L}{\pi \times R^3} = \frac{685,96 \text{ N} \times 13 \text{ mm}}{3,142 \times 27 \text{ mm}^3} = 105,12 \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)}$$



Slika 15.4: Mikrostruktura kompozita A, izdelanega pod spremenjenimi pogoji (a) posnetek iz svetlobnega mikroskopa (b) posnetek makrostrukture s stereo mikroskopom



Slika 16.4: Mikrostruktura kompozita A (a) posnetek iz svetlobnega mikroskopa (b) posnetek makrostrukture s stereomikroskopom

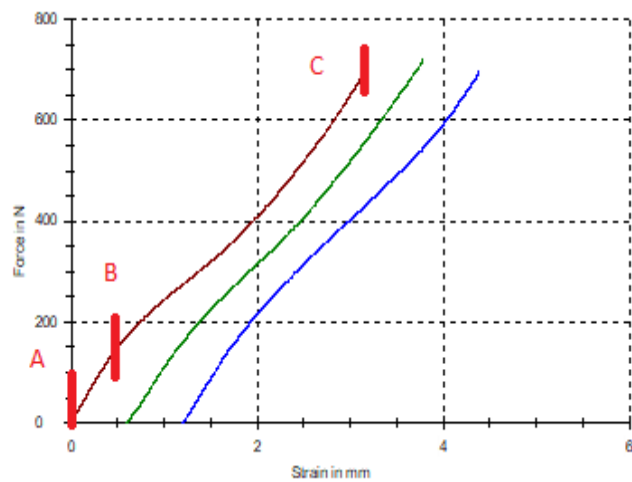


Diagram 1.4: (F-Δl) sila – upogib diagram za kompozit A

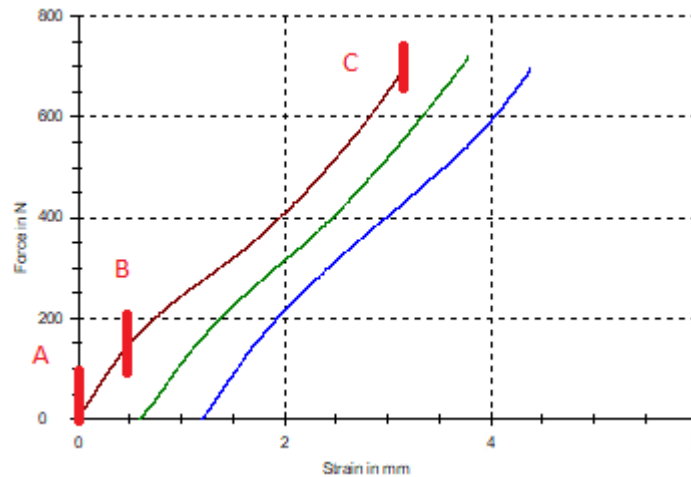


Diagram 2.4:  $(F-\Delta l)$  sila – upogib diagram za kompozit A zabrizgan pod spremenjenimi pogoji

## 4.2 Rezultati upogibnega preizkusa in materialografske analize kompozita B

### Sestava: 70% PP + 20% stekla + 10% reciklirane gume

Na sliki je razvidno, da so v tem preizkušancu v matico, ki jo predstavlja polipropilen, vključeni tako delci gume (zelena barva) kot delci stekla (bela barva). Tudi pri tem preizkušancu se je pokazalo, da so delci reciklirane gume praviloma veliko večji od delcev stekla ter so tudi veliko bolj nehomogenih oblik, katere so posledica karakteristik gume pri visokih pritiskih in temperaturah. Delci gume in stekla so po vzorcu razpršeni neurejeno in neenakomerno. Tudi v tem primeru gre za disperzno mikrostrukturo. Guma materialu zagotavlja prožnost. Majhni delci predstavljajo delce drobljenega stekla in so precej nehomogenih velikosti. Meja med matico in polniloma je lepo vidna. Opazimo lahko, da imajo delci stekla precej ostrejše robove kot delci gume in se zato nekoliko bolje vežejo s samo matico. Tako kot pri ostalih vzorcih, ki vsebujejo drobljeno steklo, lahko tudi pri tem vzorcu opazimo pore, ki so posledica vlage in prisotnosti plinov.

Test smo izvedli na treh preizkušancih. Posamični rezultati so prikazani v tabeli 16.4. Kot je bilo pričakovano, se preizkušanci niso dokončno prelomili, zato je stroj meritev avtomatsko ustavil pri upogibu 3,2mm. Največja sila, ki smo jo izmerili pri preizkušancih iz tega kompozita, je bila 773,64N, in sicer pri testiranju preizkušanca št 1. Iz serije treh

preizkušancev smo dobili povprečno silo 742,26N. V diagramu 4.4 je prikazana odvisnost upogiba od sile, s katero delujemo na preizkušane.

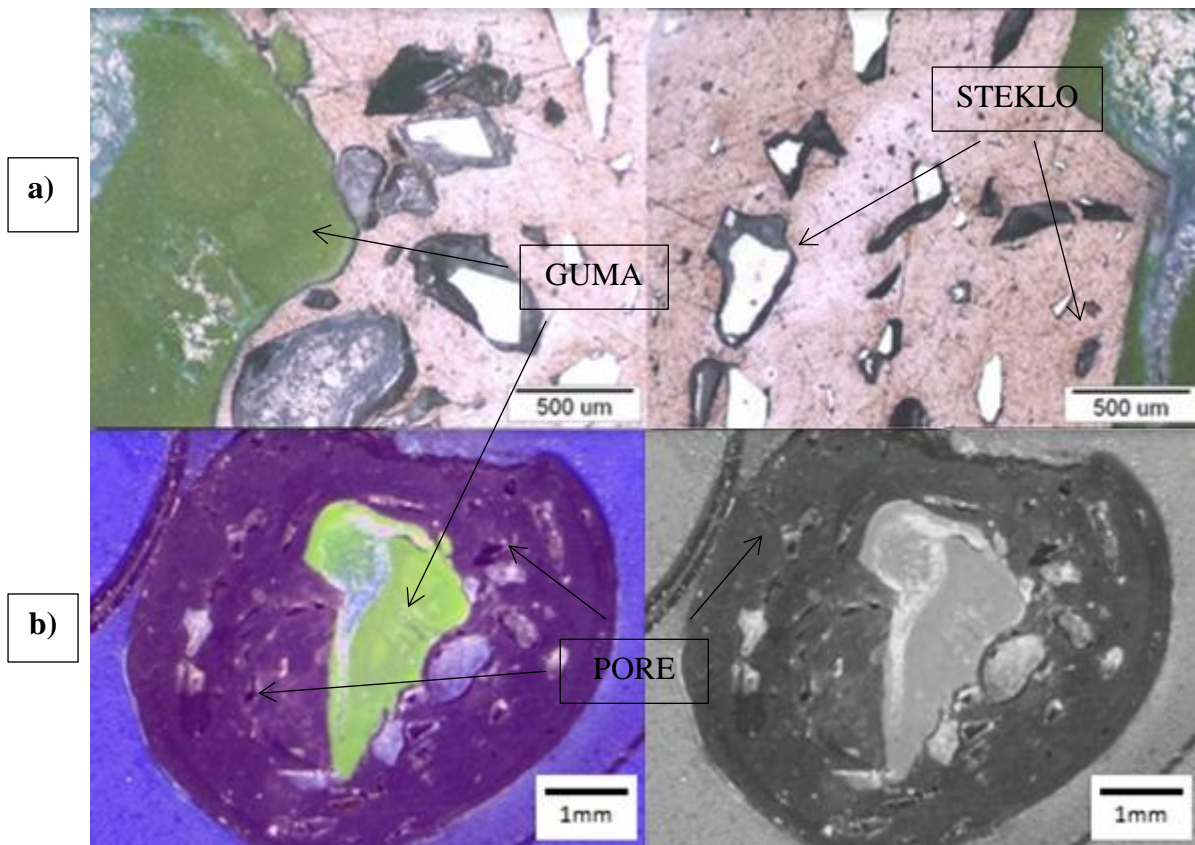
Razberemo lahko, da se preizkušane najprej elastično deformira (krivulja med točkama A in B), nato pa sledi plastična deformacija (krivulja od točke B do C). V točki C se preizkušane poruši (dosežena je maksimalna sila, iz katere smo izračunali upogibno trdnost). Iz diagrama 4.4 je lepo razvidno, da na kompozit B najbolj vpliva sila v območju med 200N in 450N, medtem ko je vpliv na začetku in koncu delovanja sile podoben. Krivulje so nekoliko položnejše predvsem zaradi prisotnosti gume, ki je bolj elastična kot ostala polnila. Povprečna upogibna trdnost preizkušancev B je bila 117,74 MPa. Med točkama A in B se tudi kompozit B nahaja v elastičnem območju tako imenovanem Hookovem področju, saj se bi na tej točki preizkušane po razbremenitvi vrnil v prvotno stanje. V tem področju je natezna napetost premosorazmerna z relativnim raztežkom. Zakon velja dokler sila ne prekorači meje elastičnosti. Med točkama B in C pa se preizkušane nahaja v plastičnem področju. Po prehodu v to območje vrnitev v prvotno stanje ni več mogoča. Na začetku krivulje preizkušance 2 lahko opazimo tudi deformacijo, ki je posledica zdrsa/premika samega preizkušance.

|     | Fmaks  | ε    |  | Serijs | Fmaks. | ε    |
|-----|--------|------|--|--------|--------|------|
| Št. | N      | Mm   |  | Št = 3 | N      | Mm   |
| 1   | 773,64 | 3,20 |  | x      | 742,26 | 3,20 |
| 2   | 730,76 | 3,20 |  | s      | 27,49  | 0,00 |
| 3   | 722,38 | 3,20 |  | v      | 3,70   | 0,02 |

Tabela 16.4: Rezultati upogibnega preizkusa za kompozit B

$$\sigma_{fs} = \frac{F \times L}{\pi \times R^3} = \frac{742,26 \text{ N} \times 13 \text{ mm}}{3,142 \times 27 \text{ mm}^3} = 113,74 \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)}$$





Slika 17.4: Mikrostruktura kompozita B (a) posnetek iz svetlobnega mikroskopa (b) posnetek makrostrukture s stereo mikroskopom

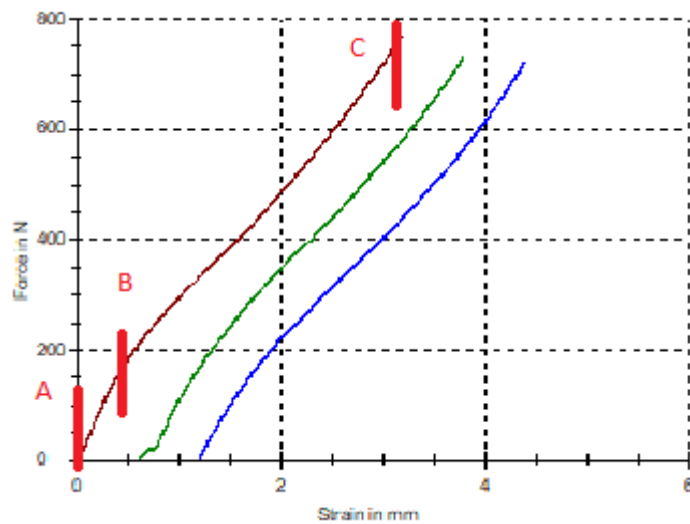


Diagram 3.4:  $(F-\Delta l)$  sila – upogib diagram za kompozit B

### 4.3 Rezultati upogibnega preizkusa in materialografske analize kompozita

#### D

Sestava: 70% HDPE + 20% CaCO<sub>3</sub> (apnenca v prahu) + 10% reciklirane gume

Na sliki 19 iz makro- in mikrostrukture je razvidno, da so v tem preizkušancu v matico, ki jo predstavlja polietilen, vključeni tako delci gume (zelena barva) kot delci kalcijevega karbonata. Delci reciklirane gume so praviloma veliko večji ter nepravilnih oblik, katere so posledica karakteristik gume, ki je vbrizgana pri visokem tlaku in temperaturi. Delci gume in kalcijevega karbonata so po vzorcu razpršeni neurejeno in neenakomerno. Tudi v tem primeru gre za disperzirano mikrostrukturo. Guma materialu zagotavlja prožnost. Majhni delci predstavljajo kalcijev karbonat, katerega delci so precej neenakomerne velikosti.

Delci polnila so v vzorec dobro vključeni, vendar v preizkušancu lahko pazimo tudi porozno mesto, ki je verjetno nastalo zaradi hitrega vbrizga in prevelikih delcev polnila. Takšna mesta lahko povzročijo hitrejše širjenje napak po samem materialu in posledično povzročijo upad skupne upogibne trdnosti. Pore so v večini primerov posledica prisotnosti plinov in vlage, prisotnih v polimerni talini. V veliki meri jih lahko preprečimo s sušenjem polimerne mešanice pred brizganjem.

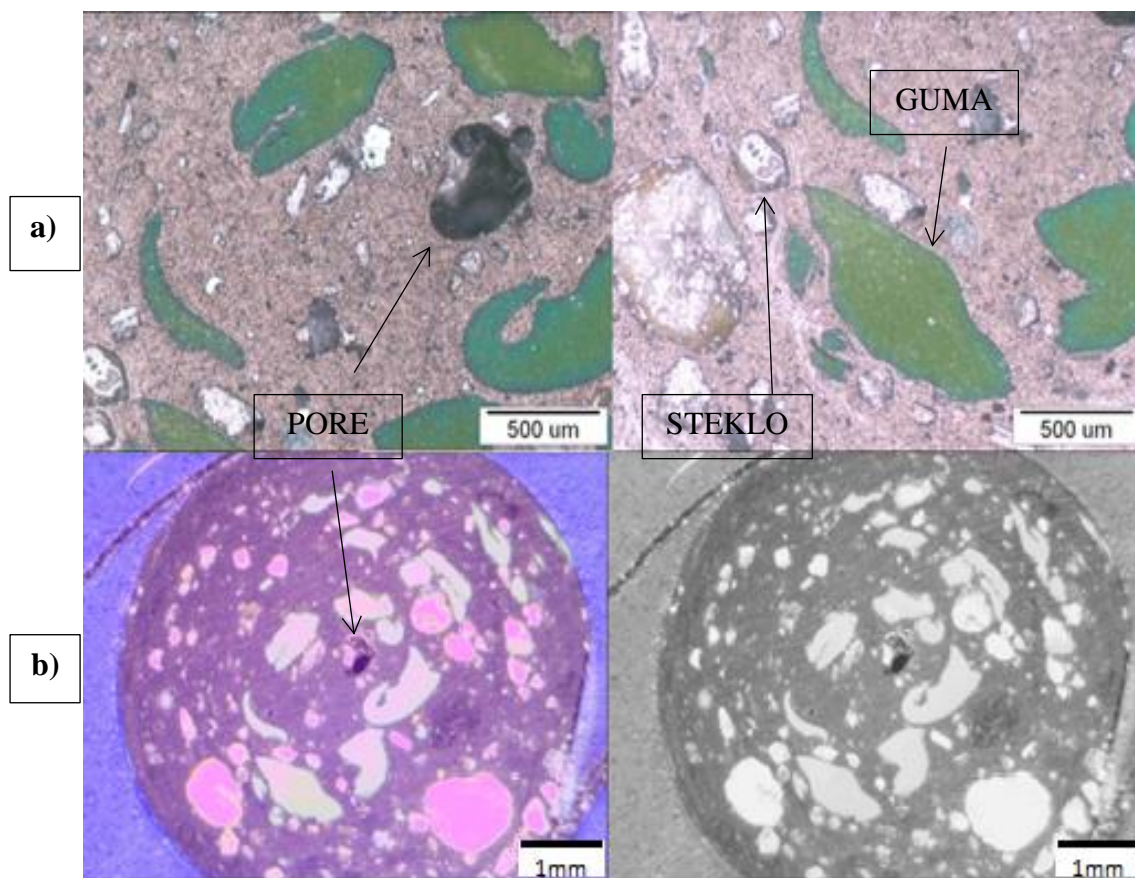
Tudi pri tem materialu smo test smo izvedli na treh preizkušancih. Posamični rezultati so prikazani v tabeli 17.4. Kot je bilo pričakovano, se preizkušanci tudi tukaj niso dokončno prelomili, zato je stroj meritev avtomatsko ustavil pri upogibu 3,2mm. Največja sila, ki smo jo izmerili pri preizkušancih iz tega kompozita, je bila 890,53N pri maksimalnem upogibu 3,2mm, in sicer pri preizkušancu številka 3. Najmanjšo silo, s katero smo dosegli maksimalni upogib 3,2mm, smo uporabili na preizkušancu številka ena, in sicer 775,48N. Iz serije treh preizkušancev smo dobili povprečno silo 820,46N, katero smo uporabili pri izračunu upogibne trdnosti.

Odvisnost upogiba od dodane sile, s katero smo delovali na preizkušanelec, je prikazana v diagramu 5.4. Med točkama A in B se kompozit nahaja v elastičnem območju (Hookovem področju), med B in C pa v plastičnem področju. Iz diagrama 5.4 je razvidno, da je vpliv na začetku delovanja sile manjši. Na kompozit D najbolj vpliva sila v območju med 200N in 500N. Pri silah nad 500N se vpliv sile ponovno zmanjša, vendar je še vedno nekoliko večji kot na samem začetku delovanja sile. Povprečna upogibna trdnost preizkušancev D je bila 125,73 MPa.

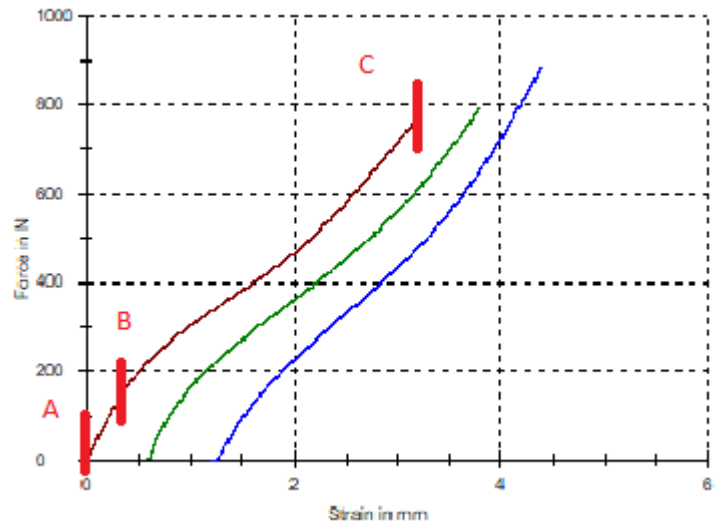
|        | Fmaks. | $\varepsilon$<br>Fmaks |  | Serija | Fmaks  | $\varepsilon$<br>Fmaks |
|--------|--------|------------------------|--|--------|--------|------------------------|
| N<br>r | N      | mm                     |  | n = 3  | N      | mm                     |
| 1      | 775,48 | 3,20                   |  | X      | 820,46 | 3,20                   |
| 2      | 795,37 | 3,20                   |  | S      | 61,49  | 0,00                   |
| 3      | 890,53 | 3,20                   |  | v      | 7,49   | 0,01                   |

Tabela 17.4: Rezultati upogibnega preizkusa za kompozit D

$$\sigma_{fs} = \frac{F \times L}{\pi \times R^3} = \frac{820,46 \text{ N} \times 13 \text{ mm}}{3,142 \times 27 \text{ mm}^3} = 125,73 \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)}$$



Slika 18.4: Mikrostruktura kompozita D(a) posnetek iz svetlobnega mikroskopa (b) posnetek makrostrukture s stereo mikroskopom

Diagram 4.4:  $(F-\Delta l)$  sila – upogib diagram za kompozit D

#### 4.4 Rezultati upogibnega preizkusa in materialografske analize kompozita E

##### Sestava: 70% HDPE + 30% stekla v prahu

Analiza vzorcev v poliranem stanju je podrobno razkrila strukturo kompozita. Iz povečav je lepo razvidno, da so delci stekla dokaj neenakomerno razporejeni po matici, torej gre tudi v tem primeru za neurejeno razporeditev delcev. Mikrostruktura je disperzna, delci stekla pa so različnih velikosti, praviloma imajo ostre robove ter so dobro vključeni v matico, ki jo v tem primeru predstavlja rekliklat polietilena. Delež delcev stekla je okoli 30%. Vključevanje stekla kot polnila je materialu povečala upogibno trdnost. Na sliki iz stereomikroskopa je videti, kot da je v vzorcu prišlo do poroznih predelov, vendar je v tem primeru napačen vtis povzročil odboj svetlobe, ki se s površine poliranih delcev odbija drugače kot s površine, ki ni popolnoma ravna.

Posamični rezultati testiranja 3 preizkušancev kompozitnega materiala E so prikazani v tabeli 18.4. Kot je bilo pričakovano, se preizkušanci tudi tukaj niso dokončno prelomili, zato je stroj meritev avtomatsko ustavil pri upogibu 3,2mm. Največja sila, ki smo jo izmerili pri preizkušancih iz tega kompozita, je bila 913,54N pri maksimalnem upogibu 3,2mm, in sicer pri preizkušancu številka 2. Najmanjšo silo, s katero smo dosegli maksimalni upogib 3,2mm,

smo uporabili na preizkušancu številka ena, in sicer 877,31N. Iz serije treh preizkušancev smo dobili povprečno silo 896,87N, katero smo uporabili pri izračunu upogibne trdnosti.

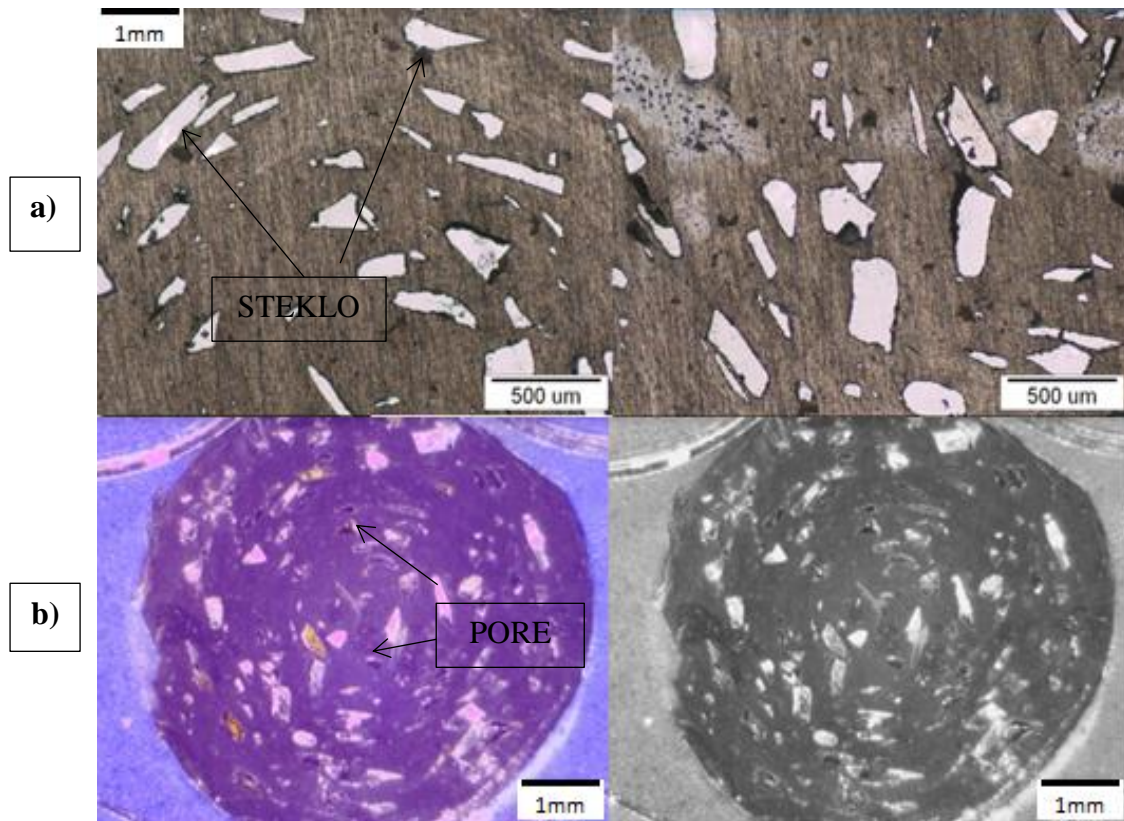
Iz diagrama 7.4, v katerem je prikazana odvisnost upogiba od sile, s katero delujemo na preizkušane, lahko razberemo, da se preizkušane najprej elastično deformira (krivulja med točkama A in B), nato pa sledi plastična deformacija (krivulja od točke B do C). V točki C se preizkušane poruši (dosežena je maksimalna sila, iz katere smo izračunali upogibno trdnost). Iz diagrama 7.4 je opazno, da vsebnost stekla očitno dobro pripomore k sami trdnosti materiala. Diagrami tega kompozita imajo očitno strmejšo tendenco, prav tako pa je razlika med usmerjenostjo grafa nekoliko manj opazna kot pri ostalih kompozitih. Povprečna upogibna trdnost preizkušancev E je bila 137,44 MPa. .

Med točkama A in B (diagram 7.4) se kompozit nahaja v elastičnem območju imenovanem tudi Hookovem področju, saj se bi na tej točki preizkušane po razbremenitvi vrnil v prvotno stanje. V tem področju je natezna napetost premosorazmerna z relativnim raztezkom. Zakon velja dokler sila ne prekorači meje elastičnosti. Med točkama B in C pa je preizkušane v plastičnem področju.

|     | Fmaks. | $\epsilon$<br>Fmaks. |  | Serija | Fmaks. | $\epsilon$<br>Fmaks. |
|-----|--------|----------------------|--|--------|--------|----------------------|
| Št. | N      | Mm                   |  | Št = 3 | N      | mm                   |
| 1   | 877,31 | 3,20                 |  | x      | 896,87 | 3,20                 |
| 2   | 913,54 | 3,20                 |  | s      | 18,29  | 0,00                 |
| 3   | 899,74 | 3,20                 |  | v      | 2,04   | 0,00                 |

Tabela 18.4: Rezultati upogibnega preizkusa za kompozit E

$$\sigma_{fs} = \frac{F \times L}{\pi \times R^3} = \frac{896,87 \text{ N} \times 13 \text{ mm}}{3,142 \times 27 \text{ mm}^3} = 137,44 \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)}$$



Slika 19.4: Mikrostruktura kompozita E (a) posnetek iz svetlobne mikroskopa, (b) posnetek makrostrukture s stereo mikroskopom

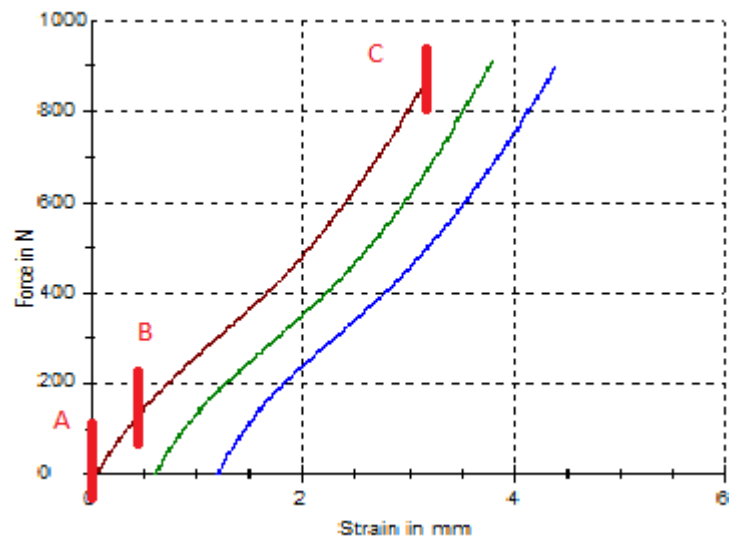


Diagram 5.4:  $(F-\Delta l)$  sila – upogib diagram za kompozit E

## 4.5 Rezultati upogibnega preizkusa in materialografske analize kompozita

### F

#### Sestava: 70% HDPE + 20% Stekla v prahu + 10% Reciklirane gume

Na sliki iz mikroskopske povečave je razvidno, da so v tem preizkušancu v matico, ki jo predstavlja polietilen, vključeni tako delci gume (zelena barva) kot delci drobljenega stekla. Jasno je videti, da so v tem primeru predvsem delci gume v tem preizkušancu izrazito nehomogeno razporejeni, kar je morda lahko posledica nehomogeno zmešanega vhodnega materiala. Tudi pri tem preizkušancu lahko opazimo poroznim formam podobne oblike, vendar gre tudi tukaj za odboj svetlobe, ki nam daje napačno predstavo. Tudi tukaj gre za disperzijsko mikrostrukturo in neurejeno razporeditev delcev po kompozitu. Delci stekla so tudi v tem primeru nehomogenih oblik. Delež stekla v prahu v testirancu povečuje trdnost materiala, vendar svojega dela v primerjavi s  $\text{CaCO}_3$  ne opravi tako dobro, kar je razvidno tudi iz rezultata upogibne trdnosti.

Test je bil izveden na treh preizkušancih. Posamični rezultati so prikazani v tabeli 19.4. Kot je bilo pričakovano, se preizkušanci tudi tukaj niso dokončno prelomili, zato je stroj meritev avtomatsko ustavil pri upogibu 3,2mm. Največja sila, ki smo jo izmerili pri preizkušancih iz tega kompozita, je bila 822,98N pri maksimalnem upogibu 3,2mm, in sicer pri preizkušancu številka 2. Najmanjšo silo, s katero smo dosegli maksimalni upogib 3,2mm, smo uporabili na preizkušancu številka 3, in sicer 764,21. Iz serije treh preizkušancev smo dobili povprečno silo 800,82N, katero smo uporabili pri izračunu upogibne trdnosti.

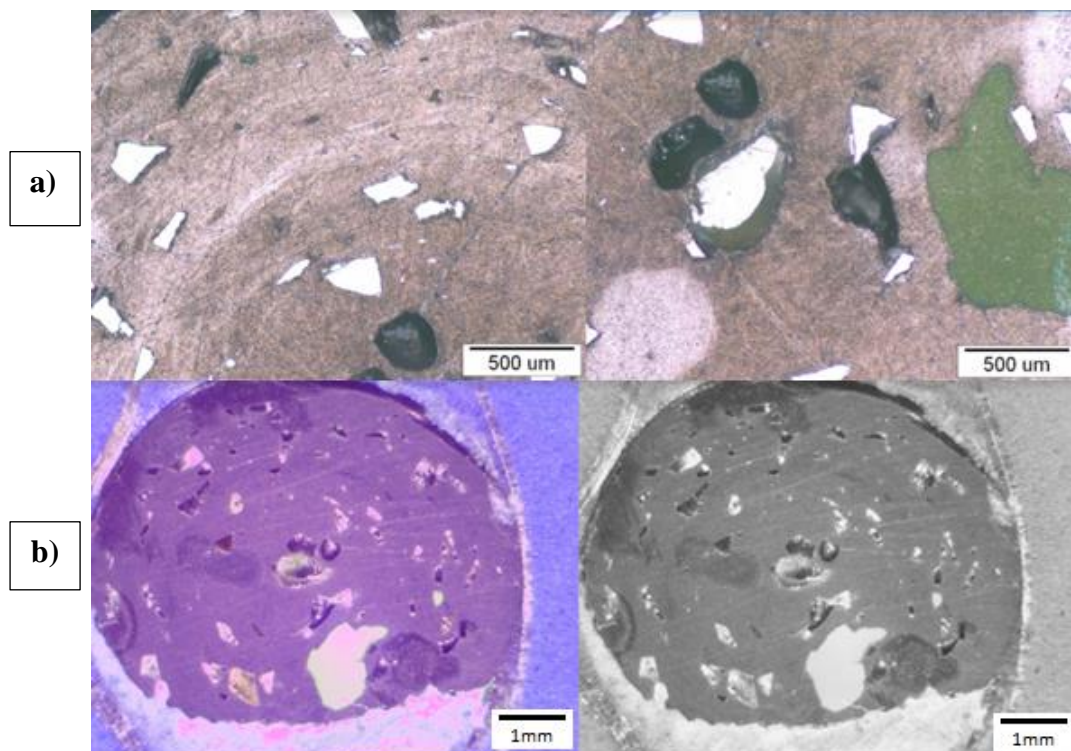
V diagramu 8.4 je prikazana odvisnost upogiba od sile, s katero delujemo na preizkušane. Sila na začetku delovanja na kompozit iz zmesi F nima velikega vpliva. V območju med 200N in 400N pa lahko opazimo največji vpliv sile na preizkušance. Sila nad 400N ima manjši vpliv kot v srednjem območju, vendar lahko kljub temu opazimo razliko med začetno in končno fazo. Takšno spremembo lahko pripišemo gumi, ki je prisotna v tem kompozitu. Povprečna upogibna trdnost preizkušancev F je bila 122,72 MPa. Iz diagrama 7.4 je razvidno, da se preizkušanec najprej elastično deformira (krivulja med točkama A in B), nato pa sledi plastična deformacija (krivulja od točke B do C). V točki C se preizkušanec poruši. Tukaj je dosežena tudi maksimalna sila, iz katere smo izračunali upogibno trdnost. Med točkama A in B se kompozit nahaja v elastičnem območju imenovanem tudi Hookovem področju, saj se bi na tej točki preizkušanec po razbremenitvi vrnil v prvotno stanje. V tem področju je natezna napetost premosorazmerna z relativnim raztezkom. Zakon velja dokler

sila ne prekorači meje elastičnosti. Med točkama B in C pa je preizkušanec v plastičnem področju. Če preizkušanec doseže to območje to pomeni, da vrnitev v prvotno stanje ni več mogoča.

| Št. | Fmaks.<br>N | ε Fmaks.<br>Mm | Serija<br>Št = 3 | Fmaks.<br>N | ε Fmaks.<br>mm |
|-----|-------------|----------------|------------------|-------------|----------------|
| 1   | 815,26      | 3,20           | x                | 800,82      | 3,20           |
| 2   | 822,98      | 3,20           | s                | 31,94       | 0,00           |
| 3   | 764,21      | 3,20           | v                | 3,99        | 0,01           |

Tabela 19.4: Rezultati upogibnega preizkusa za kompozit F

$$\sigma_{fs} = \frac{F \times L}{\pi \times R^3} = \frac{800,82 \text{ N} \times 13 \text{ mm}}{3,142 \times 27 \text{ mm}^3} = 122,72 \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)}$$



Slika 20.4: Mikrostruktura kompozita F (a) posnetek iz svetlobnega mikroskopa, (b) posnetek makrostrukture s stereomikroskopom



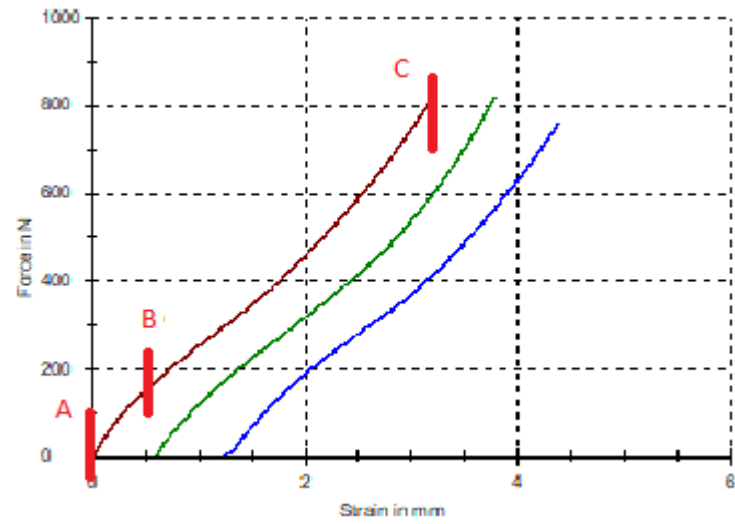


Diagram 6.4: ( $F-\Delta l$ ) sila – upogib diagram za kompozit F

## 5 DISKUSIJA

Pred razpravo o dobljenih rezultatih je potrebno izpostaviti nekaj možnih ovir in napak, katerim smo bili podvrženi pri izvajanju raziskave. Stroji za brizganje polimernih materialov so prilagojeni željam kupca in so po navadi prilagojeni točno določeni vhodni surovini. Večino prilagoditev lahko opazimo predvsem v obliki polža in valja, v katerem se polž vrti. Ker so takšne prilagoditve zelo drage, smo bili primorani uporabiti obstoječe naprave z obstoječimi prilagoditvami. Takšna posplošitev sistema bi lahko prinesla nekaj % odstopanje pri končnih rezultatih, saj mešanje in taljenje mase v polžu ni bilo optimalno. Pri izdelavi preizkušancev smo polimerni material z deležem polnila dodajali direktno v napravo za brizganje polimernega materiala. Omenjena posplošitev je lahko pripeljala do morda nehomogenih vzorcev. Prav tako je lahko prišlo do manjših odstopanj pri sami velikosti preizkušancev.

Oviro pri implementaciji novih materialov bi lahko povzročile tudi emisije škodljivih plinov iz naprave med samim ekstrudiranjem, še posebno če materiala predhodno ne bi posušili ali pa bi naprava brizgala polimeren kompozit pri previsoki temperaturi.

Takšnih meritev v sklopu te magistrske naloge nismo izvajali, saj smo se osredotočili predvsem na karakteristike samega izdelanega materiala. Meritve so lahko predmet nadaljnjega raziskovanja v primeru implementacije novega materiala.

Prav tako je potrebno poudariti, da je možnih ogromno različnih polimernih mešanic. Vsaka s svojimi prednostmi in slabostmi. Ker naša raziskava tako časovno kot tudi finančno omogoča preizkus samo izbranih mešanic, smo na podlagi analize dostopnega gradiva izbrali po našem mnenju najbolj primerne mešanice materialov. Ne izključujemo pa možnosti, da bi se morda katera izmed drugih mešanic odrezala bolje.

Pri razlagi je potrebno omeniti, da se po vstavitvi preizkušancev v orodje le s predobremenitveno silo tudi obremeni in tako ustvari korigirano točko 0, ki predstavlja začetek meritve.

Analiza rezultatov našega eksperimentalnega dela je pokazala, da se mehanske lastnosti z večanjem deleža polnila izboljšujejo. Osnova (matrika) zagotavlja izdelku nosilnost, obremenitve pa prenaša na vključke, ki preprečujejo nastajanje in širjenje razpok, hkrati pa predstavlja tudi zaščito, ki ščiti delce (polnila) pred vplivom okolice. [13]

Omenjena teza drži, kar se je pokazalo tudi v našem primeru.

| Material                                 | E                     | D   | F                              | B                              | A  | A <sub>T</sub>                           |
|--|-----------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--|--|
| Upogibna trdnost N/mm <sup>2</sup> (MPa) | 137,44                | 125,73                                    | 122,72                         | 113,74                         | 108,79                                   | 105,12                                   |
| Delež polnila                            | 70% HDPE + 30% stekla | 70% HDPE + 20 CaCO <sub>3</sub> + 10 guma | 70% HDPE + 20%stekla + 10%guma | 70% PP + 20% stekla + 10% guma | 70% PP + 20% guma + 10%CaCO <sub>3</sub> | 70% PP + 20% guma + 10%CaCO <sub>3</sub> |

Tabela 20.5: Primerjava upogibne trdnosti izdelanih kompozitov

Kot je razvidno iz tabele 20.5, se je po pričakovanju najboljši odrezal vzorec E, saj je zaradi velike vsebnosti recikliranega stekla v prahu (30%), ki dobro vpliva na skupno trdnost materiala, dosegel največjo upogibno trdnost, ki je bila pri tem preizkušancu 137,44 MPa. Takšen material bi lahko torej bil primeren za aplikacije, ki od izdelka zahtevajo veliko trdnost, vendar pa bi bil manj primeren za aplikacije, ki od izdelka zahtevajo povišano elastičnost. Podoben rezultat bi dosegli, če bi vzorcu namesto drobljenega stekla v istih masnih deležih dodali CaCO<sub>3</sub>, ki ima na preizkušance podoben učinek. Po pregledu ostalih rezultatov, ki so izdelani z isto matriko, lahko celo sklepamo, da ima CaCO<sub>3</sub> na trdnost izdelka boljši vpliv kot drobljeno steklo. To nam potrjujeta tudi rezultata testiranj preizkušancev pod imenom D in F, pri katerih smo zamenjali samo polnilo CaCO<sub>3</sub> in drobljeno steklo, masni deleži ter ostale komponente pa so ostale nespremenjene. Tukaj je potrebno poudariti, da CaCO<sub>3</sub> pri velikih masnih deležih lahko povzroči probleme pri samem vbrizgavanju, saj to polnilo na sebe hitro vleče vlago. Nastali problem lahko obidemo s predhodnim sušenjem materiala v posebej zato namenjenih sušilnih sistemih. Iz pregleda rezultatov lahko trdimo, da je reciklirani HDPE v kombinaciji z različnimi polnili primernejši za aplikacije, ki od materiala zahtevajo višjo trdnost kot reciklat PP, ki je pri preizkusih praviloma dosegal nižje rezultate. Takšen material je primeren za preproste produkte, kot so npr: železniški tramovi, obcestne označbe ali pa celo za inovativen gradbeni material. S stališča upogibne trdnosti se je najslabše izkazala mešanica A, kar je bilo zaradi velike vsebnosti reciklirane gume in posledično velike elastičnosti tudi pričakovati. Dokazali smo tudi, da dodajanje reciklirane rafinerirane gume v preizkušance dokazano zmanjšuje trdnost in poveča prožnost samega materiala, kar je razvidno iz primerjave upogibne trdnosti med materialoma A, ki vsebuje 20% reciklirane gume, in materialom B, ki vsebuje 10 masnih procentov reciklirane gume.

Materiale z večjim masnim deležem gume lahko torej uporabimo v produktih, ki zahtevajo več prožnosti; to so lahko na primer različne pohodne podlage, prekrivne plošče, strešne kritine, itd.

Tudi s spreminjanjem temperature brizganja lahko pomembno vplivamo na končne karakteristike materiala. Dokazali smo, da je znižanje temperature vbrizga za 30°C v našem primeru pomembno vplivalo na karakteristike materiala. Pri primerjavi materiala z oznako A in A<sub>t</sub>, ki se razlikujeta samo po temperaturi vbrizga, lahko opazimo, da se je upogibna trdnost pri materialu, vbrizganem pri nižji temperaturi, zmanjšala za okoli 3,5 MPa, kar je verjetno posledica slabšega brizganja in nastalih praznih prostorov v sami mikrostrukturi materiala, ki so nastali, ker je material pri brizgu slabše tekkel.

Guma se je na splošno izkazala kot primerno polnilo, saj je pri večjih temperaturah bolj viskozna in se uspešno veže z matrico. V našem primeru smo sicer opazili, da so bili delci gume preveliki, saj so v nekaterih preizkušancih zavzeli tudi do 50% površine, zato bi v prihodnje svetovali uporabo reciklirane gume manjših granulacij, saj se manjši delci tako veliko lažje in uspešneje vključijo v matriko. Delci takšne velikosti so tako primerni samo za izdelke z večjim volumnom. Velikost vključenih delcev nasploh igra pomembno vlogo pri končnih karakteristikah materiala. Manjše delce lahko uspešneje vključimo v matriko, prav tako pa se nanje lažje prenašajo obremenitve, ki jih delci prestrezajo. Z manjšimi vključki lahko lažje dosežemo tudi bolj homogeno razporeditev v matriki. Pri mikroskopski analizi smo tudi opazili, da je pri naših preizkušancih v večini primerov prišlo do neenakomerno razporejenih delcev polnil v matriki, za kar je v prvi vrsti po vsej verjetnosti kriv nehomogen vhodni material. Ker so vsa polnila, ki so dodana recikliranima polimernima materialoma, inertna, lahko sklepamo, da med materiali ni prišlo do nekontroliranih kemijskih reakcij, ki bi lahko bile vzrok za širjenje napak po materialu. To nam potrdi tudi pregled mikrostrukture vzorcev.

Težavo z nehomogenim vhodnim materialom bi lahko preprosto rešili tako, da bi bila mešanica predhodno ekstrudirana z eno- ali dvovijačnim ekstrudorjem, dobili bi pelete sestavljene iz zelenih sestavin, le te pa nato dozirali v stroj za injekcijsko brizganje.

Praznine in pore, ki smo jih pri nekaterih materialih opazili v matici, lahko povzročijo zmanjšanje nosilnosti preizkušanca in vplivajo na skupno upogibno trdnost materiala.

Takšnim napakam se bi v prihodnje lahko izognili z optimiranjem temperature vbrizga, hlajenja, z dodajanjem manjših delcev polnil, uporabo ekstrudorja za predhodno obdelavo materiala ter sušenjem vhodnega materiala. Potrebno je poudariti, da našim preizkušancem

nismo dodajali različnih aditivov, kot so na primer UV stabilizatorji, ki se po navadi v izdelke dodajajo v manjših količinah in bistveno ne vplivajo na mehanske karakteristike produkta. Z dodajanjem polnil, kot so  $\text{CaCO}_3$  in drobljeno steklo, smo pomembno povišali tudi termično obstojnost samega produkta, saj smo znižali % deleža polimera, ki so praviloma občutljivejši na temperaturo.

Prav vse naše preizkušance lahko uvrstimo v skupino plastičnih polimerov, ki imajo krivuljo podobno kot kovine. Začetek deformacije je elastičen nato pa nastopi izrazita plastična deformacija, ki se nato zaključi z porušitvijo. V našem primeru porušitev makroskopsko ni vidna, saj so se v točki porušitve v mikrostrukturi pojavile razpoke na mejni površini matica ter polnila, prav tako pa je prišlo do pojava razpok v krhkem polnilu. Zaradi pojava teh razpok se v točki porušitve drastično zmanjša nosilni prerez preizkušanca, kar vodi do sunkovitega padca sile (za več 10% od  $F_{\max}$ ). Zaradi nenadnega padca sile, naprava ustavi preizkus, predvsem iz varnostnega razloga, da ne bi prišlo do trčenja čeljusti orodja za izvedbo upogibnega preizkusa. Ker imamo opravka s preizkušanci s žilavo matico in pretežno krhkimi polnili do popolne porušitve preizkušancev ni prišlo.

Plastična deformacija do katere je prišlo pri vseh preizkušancih je prisotna predvsem pri delno kristalnih plastomerih, ko napetost preseže napetost tečenja. Pri teh materialih so med kristalnimi lamelami in sferoliti majhna (vezna) območja amorfnе faze. Polimerne verige iz kristalnega področja se nadaljujejo v amorfnо in naprej v naslednje kristalno področje. Trajno deformacijo teh materialov ne povzročajo gibanje dislokacij, ampak se gibljejo verige, ki se raztegnejo, rotirajo, drsijo in razpletajo ter tako povzročijo trajno deformacijo. Za krivulje v plastičnem področju je značilno zmanjšanje napetosti, potem ko je dosežena napetost tečenja. To se pri naših krivuljah zgodi ob oznaki črke B. Iz rezultatov preizkusa je razvidno, da smo pomembno povečali trdnostne lastnosti preizkušanih materialov kar potrjuje tudi tezo, da lahko pri delno kristalnih polimerih izboljšamo trdnost s povečanjem prostorninskega deleža kristalnih področij. Potrebno pa je tudi omeniti, da so elastične lastnosti plastomerov odvisne tudi od temperature preizkušancev. [19]

Namen tega magistrskega dela ni bil raziskati nov visoko tehnološki material, pač pa raziskati kompozitni material, ki bi bil primeren za večje in preproste izdelke, hkrati pa bi omogočil ponovno izrabo odpadnih polimernih materialov in pripomogel k reševanju vse bolj izpostavljenе problematike odpadne plastike.

Seveda bi za detajlno analizo potrebovali veliko več sredstev, opreme in časa, vendar smo z opravljenim delom v osnovi dokazali, da je s kombinacijo različnih odpadnih polimernih

materialov in polnil mogoče narediti uporaben izdelek, ki popolnoma služi svojemu namenu, tako kot bi služil, če bi bil izdelan iz primarnega polimernega materiala. V prihodnje bi bilo smotrno podrobneje raziskati tudi vpliv temperature na same vzorce, vpliv faktorjev hlajenja kalupov, prav tako bi bilo zelo zanimivo raziskati, kakšne karakteristike bi imel material, če bi obe uporabljeni matici med seboj zmešali in mešanici nato dodali različna polnila.

Z magistrskim delom smo postavili odlične temelje za nadaljnjo raziskavo kompozitnih materialov iz odpadnih polimernih materialov ter dokazali, da je tudi iz takšnih materialov mogoče izdelati uporabne produkte.

Takšne vrste materiali se lahko uporabijo tudi za inovativne produkte ter kot nadomestek materialov, ki so pod vremenskimi vplivi dosti manj obstojni. Tukaj bi še posebej izpostavili možnost uporabe takšnih kompozitnih materialov v železniškem prometu. Dokazano je, da takšni materiali prenašajo tudi velike tlačne obremenitve in so zato zelo primerni za izdelavo železniških pragov, saj so v nasprotju z lesom veliko trpežnejši in odpornejši na vremenske vplive. Po mehanskih karakteristikah prekosijo tudi novodobne betonske pragove saj so bolj odporni na vremenske vplive, hkrati pa so okolju prijazni in ponujajo možnost za recikliranje, tudi ko se jim življenjska doba izteče.

Prav zaradi zgoraj omenjenih karakteristik bi bilo smiselno raziskati tudi možnost uporabe takšnih materialov pri novodobni gradnji predvsem nizkih in preprostih objektov.

Pomembno se je tudi zavedati, da je uporaba takšnih materialov v občestni infrastrukturi (predvsem pri občestnih količkih in smerokazih) v nekaterih evropskih državah že postala stalnica, saj so se izkazali kot izjemno vzdržljivi ter preprosti za uporabo in vzdrževanje.

Razvoj takšnih materialov in inovativnih oblik uporabe teh materialov je že danes izjemnega pomena, saj odpadni polimerni materiali predstavljajo pereč ekološki problem, hkrati pa nam ponujajo izjemne možnosti za razvoj in nadaljnjo uporabo. Na trgu obstaja še veliko različnih izdelkov, ki so sedaj izdelani iz primarnih surovin, hkrati pa so povsem primerni, da jih izdelamo iz inovativnih polimernih kompozitov, ki bodo v prihodnje zagotovo predstavljali enega od temeljev reciklažne industrije in ugodno vplivali na okolje ter posledično na kvaliteto življenja na našem planetu.

## 6 SKLEPI

Brez polimernih materialov praktično ni sveta, ki ga danes poznamo, zato so raziskave možnosti in lastnosti novih materialov, proizvedenih iz sekundarnih surovin, nujno potrebne in zaželeno.

Na začetku raziskovalnega dela smo si zastavil vprašanje, ali je uporaba izključno odpadnih polimernih materialov v kombinaciji z različnimi polnili za izdelavo preprostih in geometrijsko zahtevnejših izdelkov iz polimernih odpadnih materialov smiselna ali ne. Z analizo materiala, trga ter različnih možnosti smo prišli do zaključka, da je uporaba takšnega odpadnega polimernega materiala s kombinacijo polnil v industriji vsekakor možna in v določenih primerih, kjer gre za preproste izdelke, tudi smiselna (možni produkti so omenjeni v poglavju 2.3). Izdelki, izdelani iz takšnih materialov se lahko povsem primerjajo ali celo presežejo karakteristike izdelkov, izdelanih iz primarnih surovin. Hkrati pa takšni izdelki ponujajo možnost sekundarne izrabe polimernih materialov in posledično zmanjšujejo oz. pripomorejo k reševanju problematike samih polimernih odpadkov.

Iz naših preizkusov lahko razberemo nekaj osnovnih lastnosti takšnega materiala, ki pa za nadaljnji razvoj vsekakor potrebuje še nekatere druge preizkuse ter poglobljene analize, ki so lahko predmet našega dela v prihodnje. Smiselno bi bilo opraviti predvsem natezni in tlačni preizkus ter nekaj fizikalno-kemičnih preizkusov s poudarkom na določanju fizikalnih lastnosti takšnih materialov. Problematika odpadkov je postala eden od največjih, če ne največji problem sodobnega človeka, česar se je potrebno tudi zavedati in ob tem dejstvu tudi razvijati bodoče tehnologije.

## 7 VIRI LITERATURE

- [1] Anton Kočar. 2016. Vpljiv hladnih spojev na mehanske lastnosti polimernih materialov. Magistrsko delo, Maribor: Univerza v Mariboru, Fakulteta za upravo. Strojništvo. Dostopno na: <https://dk.um.si/Dokument.php?id=108294> [18.03.2017]
- [2] Charles A. Harper, Handbook of Plastic Processes. New jersey: John Wiley & Sons, 2006
- [3] Dejan Anžej. 2008. Brizganje plastičnih mas s plinom. Diplomsko delo, Maribor: Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo. Dostopno na: <https://dk.um.si/Dokument.php?id=7223> [16.12.2017]
- [4] Functional fillers [svetovni splet]. Phantom plastic. 2016. Dostopno na: <http://phantomplastics.com/functional-fillers/> [25.02.2018]
- [5] Mineral Fillers Improve Plastics [svetovni splet]. Machine Design. Dostopno na: <http://www.machinedesign.com/materials/mineral-fillers-improve-plastics> [21.01.2018]
- [6] O tehnologiji brizganja [svetovni splet]. Orpal. Dostopno na: <http://orpal.si/storitve/tehnologija-brizganja> [11.02.2018]
- [7] P.K. Mallick, S. Newman. Composite Materials Technology. New York: Hanser Publishers, 1996.
- [8] Polimerni materiali [svetovni splet]. First. Dostopno na: <http://www.fist.si/polietilen> [17.11.2017]
- [9] Polimerni materiali [svetovni splet]. First. Dostopno na: <http://www.fist.si/polipropilen> [17.11.2017]
- [10] Products from recyclates [svetovni splet] Ecobuy. 2017. Dostopno na: [https://static1.squarespace.com/static/5212c4fae4b088f3b6718038/t/52a7ce10e4b08568b8f7ff65/1386728976066/EcoBuy\\_Factsheet-1\\_v2.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5212c4fae4b088f3b6718038/t/52a7ce10e4b08568b8f7ff65/1386728976066/EcoBuy_Factsheet-1_v2.pdf) [17.11.2017]
- [11] Rok Korošec. 2014. Sedanja problematika in okoljsko-ekonomska vizija sistema ravnanja z ločeno odpadno embalažo v Sloveniji. Diplomsko delo, Maribor: Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo. Dostopno na: <https://dk.um.si/Dokument.php?id=65310> [03.12.2018]
- [12] Injekcijsko brizganje [svetovni splet]. Laboratorij za preoblikovanje Univerze v Ljubljani. Dostopno na: <http://lab.fs.uni-lj.si/lap/html/pages/si-polimerna-gradiva-tehnologije-injekcijsko-brizganje.htm> [12.02.2018]



[13] Ivan Anžel, sodobni inženirski materiali: študijska literatura. Maribor, Fakulteta za strojništvo, 2005.

[14] Jean-Michel Charrier, Polymeric Materials and Processing. New York: Hanser Publishers, 1998.

[15] Savo Spaić, Metalografska analiza, Ljubljana, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Oddelek za metalurgijo, 1993.

[16] Standard list [svetovni splet] Ecobuy. Dostopno na: [https://textileexchange.org/wp-content/uploads/2016/06/GRS-v3-Consolidated-Feedback-and-Response-PUBLIC\\_0.pdf](https://textileexchange.org/wp-content/uploads/2016/06/GRS-v3-Consolidated-Feedback-and-Response-PUBLIC_0.pdf) [02.12.2017]

[17] Upogibni preizkus polimerov [svetovni splet] Lotric Certificiranje. Dostopno na: <http://lotric-certificiranje.si/laboratoriji/laboratorij-za-kovine-mehanske-preiskave-in-mikroskopijo/upogibni-preskus-polimerov/> [15.11.2017]

[18] Callisten William, Material science and engineering: An Introduction. New York: John Wiley & Sons inc., 2007.

[19] Franc Zupanič, Ivan Anžel, Gradiva: Visokošolski učbenik. Maribor, Fakulteta za strojništvo, 2007.

**IZJAVA O AVTORSTVU IN ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE OBLIKE  
ZAKLJUČNEGA DELA**

UNIVERZA V MARIBORU

FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO

(ime članice UM)

**IZJAVA O AVTORSTVU IN ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE OBLIKE ZAKLJUČNEGA  
DELA**Ime in priimek študent-a/-ke: ROK KOROŠECŠtudijski program: TEHNIŠKO VARSTVO OKOLJANaslov zaključnega dela: RECIKLIRANI POLIMERNI KOMPOZITI KOT INOVATIVNI  
MATERIALIMentor: doc. dr. Mihael BRUNČKO

Somentor: \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

Podpisan-i/-a študent/-ka ROK KOROŠEC

- izjavljam, da je zaključno delo rezultat mojega samostojnega dela, ki sem ga izdelal/-a ob pomoči mentor-ja/-ice oz. somentor-ja/-ice;
- izjavljam, da sem pridobil/-a vsa potrebna soglasja za uporabo podatkov in avtorskih del v zaključnem delu in jih v zaključnem delu jasno in ustrezno označil/-a;
- na Univerzo v Mariboru neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi zaključno delo javnosti na svetovnem spletu preko DKUM; sem seznanjen/-a, da bodo dela deponirana/objavljena v DKUM dostopna široki javnosti pod pogoji licence Creative Commons BY-NC-ND, kar vključuje tudi avtomatizirano indeksiranje preko spleta in obdelavo besedil za potrebe tekstovnega in podatkovnega rudarjenja in ekstrakcije znanja iz vsebin; uporabnikom se dovoli reproduciranje brez predelave avtorskega dela, distribuiranje, dajanje v najem in priobčitev javnosti samega izvirnega avtorskega dela, in sicer pod pogojem, da navedejo avtorja in da ne gre za komercialno uporabo;
- dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v zaključnem delu in tej izjavi, skupaj z objavo zaključnega dela;
- izjavljam, da je tiskana oblika zaključnega dela istovetna elektronski obliki zaključnega dela, ki sem jo oddal/-a za objavo v DKUM.

Uveljavljam permisivnejšo obliko licence Creative Commons: \_\_\_\_\_ (navedite obliko)

---

**Začasna nedostopnost:**

Zaključno delo zaradi zagotavljanja konkurenčne prednosti, zaščite poslovnih skrivnosti, varnosti ljudi in narave, varstva industrijske lastnine ali tajnosti podatkov naročnika:

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_(naziv in naslov naročnika/institucije) ne sme biti javno dostopno do \_\_\_\_/\_\_\_\_(datum odloga javne objave ne sme biti daljši kot 3 leta od zagovora dela). To se nanaša na tiskano in elektronsko obliko zaključnega dela.

---

**Temporary unavailability:**

To ensure competition priority, protection of trade secrets, safety of people and nature, protection of industrial property or secrecy of customer's information, the thesis

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_(institution/company name and address) must not be accessible to the public till \_\_\_\_/\_\_\_\_(delay date of thesis availability to the public must not exceed the period of 3 years after thesis defense). This applies to printed and electronic thesis forms.

---

Datum in kraj:

Podpis študent-a/-ke:

Podpis mentor-ja/-ice: \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

(samo v primeru, če delo ne sme biti javno dostopno)

Ime in priimek ter podpis odgovorne osebe naročnika in žig:

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

(samo v primeru, če delo ne sme biti javno dostopno)