

Aditivna proizvodnja od recikliranog polimernog materijala

Barišić, Klara

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:832283>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-01**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Klara Barišić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Mladen Šercer, dipl. ing.

Student:

Klara Barišić

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Mladen Šerceru i asistentu mag.ing. Tomislavu Breškiju na pomoći pri izradi rada, Phd. Stud. Dipl.-Ing. Lukas Hentschelu sa odjela za aditivnu proizvodnju na Montan Universität-u u Loebenu za izradu filamenata za ispitivanje, doc. dr. sc. Ani Pilipović na pomoći pri ispitivanju uzoraka i svojoj majci dipl. ing. građ. Emiliji Barišić na pomoći sa lingvističkim i pravopisnim nedoumicama.

Klara Barišić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

| | |
|-------------------------------------|---------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum: | Prilog: |
| Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3 | |
| Ur. broj: 15 - 1703 - 20 - | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Klara Barišić Mat. br.: 0035206131

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Aditivna proizvodnja od recikliranog polimernog materijala

Naslov rada na engleskom jeziku: Additive manufacturing of recycled polymer material

Opis zadatka: Primjena aditivnih tehnologija danas ima široku primjenu u procesu razvoja kako novih proizvoda i prototipova tako i pri izradi i projektiranju različitih alata i predmeta. Razvoj industrije potaknuo je potrebu za izradom sve kompliciranijih geometrija proizvoda koje se ne mogu ostvariti klasičnim metodama izrade zbog čega se sve više prelazi na aditivnu proizvodnju. Upravo iz razloga kompleksnosti i kompliciranosti geometrije tiskanog proizvoda, što često podrazumijeva primjenu potpornih struktura, a može rezultirati i lošim proizvodima, nastaje otpad ne samo tijekom aditivne proizvodnje već i nakon isteka životnog vijeka tiskanog proizvoda. Očuvanje okoliša nameće potrebu ponovnog iskorištavanja nastalog otpada. Mnogobrojni su radovi objavljeni na temu mogućnosti aditivne proizvodnje od izvornih polimernih materijala dok se značajno manji njihov broj odnosi na aditivnu proizvodnju od recikliranih polimernih materijala.

U radu je potrebno opisati osnovne polimerne materijale i aditivne postupke. Za odabrani izvorni polimerni materijal i postupak tiskanja potrebno je usporediti neka mehanička svojstva tiskanog proizvoda sa svojstvima istog ali recikliranog polimernog materijala.

U radu je potrebno navesti primljenu pomoć i upotrijebljenu literaturu.

Zadatak zadan:
15. svibnja 2020.

Datum predaje rada:
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mladen Šercer

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

| | |
|---|-------------------------------------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA..... | III |
| POPIS OZNAKA | IV |
| SAŽETAK..... | V |
| SUMMARY | VI |
| 1 UVOD..... | 1 |
| 2 TEORIJSKI DIO | 2 |
| 2.1 ADITIVNA PROIZVODNJA..... | 2 |
| 2.1.1 VRSTE ADITIVNE PROIZVODNJE..... | 3 |
| 2.2 POLIMERNI MATERIJALI | 6 |
| 2.2.1 Polimerni materijali u aditivnoj proizvodnji..... | 6 |
| 2.2.2 Polilaktična kiselina (PLA)..... | 7 |
| 2.3 RECIKLIRANI POLIMERNI MATERIJALI..... | 8 |
| 2.3.1 Načini recikliranja..... | 9 |
| 2.4 PROIZVODNI POSTUPAK DOBIVANJA FILAMENTA ZA 3D PRINTANJE... 11 | |
| 2.4.1 Reciklirani polimeri za proizvodnju filamenata..... | 12 |
| 3 EKSPERIMENTALNI DIO | 13 |
| 3.1 CILJ ISPITIVANJA..... | 13 |
| 3.2 METODOLOGIJA ISPITIVANJA..... | 13 |
| 3.3 PLAN POKUSA | 16 |
| 3.4 MATERIJAL | 18 |
| 3.5 REZULTATI ISPITIVANJA..... | 21 |
| 3.5.1 Izvorni PLA | 21 |
| 3.5.2 Reciklirani PLA | 25 |
| 4 ZAKLJUČAK..... | 29 |
| 5 LITERATURA | 30 |
| 6 PRILOZI..... | Error! Bookmark not defined. |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1: Primjena AP u određenim industrijama [1] | 3 |
| Slika 2: FDM tehnologija (1-filament, 2-zupčanici, 3-grijač, 4-esktrudirani filament) [3] | 5 |
| Slika 3: Jednopusni ekstruder [17] | 11 |
| Slika 4: Dijelovi jednopusnog ekstrudera [18] | 11 |
| Slika 5: Original Prusa i3 MK3 | 14 |
| Slika 6: Primjer isprintanih epruveta | 14 |
| Slika 7: Epruveta u kidalici | 15 |
| Slika 9: Epruveta nakon pucanja | 15 |
| Slika 10: Skica centralno-kompozitnog plana pokusa s 2 parametra | 16 |
| Slika 11: Jednopusni ekstruder korišten u izradi recikliranog filameta | 18 |
| Slika 12: Jedinica za hlađenje i namotavanje filameta | 19 |
| Slika 13: Veličina promjera filameta izvornog PLA u odnosu na duljinu | 19 |
| Slika 14: Veličina promjera filameta recikliranog PLA u odnosu na duljinu | 20 |
| Slika 15: 3D dijagram vlačne čvrstoće [MPa] izvornog PLA u ovisnosti o temperaturi podloge [°C] i temperaturi mlaznice [°C] | 23 |
| Slika 16: 2D dijagram vlačne čvrstoće [MPa] izvornog PLA u ovisnosti o temperaturi podloge [°C] i temperaturi mlaznice [°C] | 23 |
| Slika 17: 3D dijagram modula elastičnosti [MPa] izvornog PLA u ovisnosti o temperaturi podloge [°C] i temperaturi mlaznice [°C] | 24 |
| Slika 18: 2D dijagram modula elastičnosti [MPa] izvornog PLA u ovisnosti o temperaturi podloge [°C] i temperaturi mlaznice [°C] | 24 |
| Slika 19: : 3D dijagram vlačne čvrstoće [MPa] recikliranog PLA u ovisnosti o temperaturi podloge [°C] i temperaturi mlaznice [°C] | 27 |
| Slika 20: 2D dijagram vlačne čvrstoće [MPa] recikliranog PLA u ovisnosti o temperaturi podloge [°C] i temperaturi mlaznice [°C] | 27 |
| Slika 21: 3D dijagram modula elastičnosti [MPa] recikliranog PLA u ovisnosti o temperaturi podloge [°C] i temperaturi mlaznice [°C] | 28 |
| Slika 22: 2D dijagram modula elastičnosti [MPa] recikliranog PLA u ovisnosti o temperaturi podloge [°C] i temperaturi mlaznice [°C] | 28 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1: Temperature podloge i mlaznice printera..... | 17 |
| Tablica 2: Temperaturni profil ekstrudiranja filamenta | 19 |
| Tablica 3: Rezultati ispitivanja izvornog PLA | 22 |
| Tablica 4: Rezultati ispitivanja recikliranog PLA..... | 26 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-----------|-------------|--|
| 3D | - | trodimenzionalno |
| PLA | - | polilaktična kiselina |
| AP | - | aditivna proizvodnja |
| CAD | - | computer-aided design |
| SLA | - | stereolitografija |
| DLP | - | obrada izravnom svjetlosti („direct light processing“) |
| SLS | - | selektivno srašćivanje laserom („selective laser sintering“) |
| FDM | - | taložno srašćivanje materijala („fused deposition modeling“) |
| STL | - | format datoteke koji opisuje 3D model trokutastom mrežom |
| CNC | - | računala numerička kontrola („computer numeric control“) |
| PVC | - | poli(vinil klorid) |
| PUR | - | poliuretan |
| PET | - | poli(etilen-tereftalat) |
| PS | - | polistiren |
| EPS | - | ekspandirani polistiren |
| PE | - | polietilen |
| PP | - | polipropilen |
| PLA | - | polilaktična kiselina |
| ABS | - | akronitril-butadien stirel |
| PETG | - | poli(etilen-tereftalat) |
| PEEK | - | polieter-eter ketona |
| PEI | - | polieterimida |
| R_m | N/mm^2 | vlačna čvrstoća |
| F_{max} | N | maksimalna sila kod vlačnog ispitivanja |
| A_0 | mm^2 | početna površina presjeka |
| T | $^{\circ}C$ | temperatura |

SAŽETAK

U ovom radu ukratko su opisane metode aditivne proizvodnje, te su kroz medij 3D printanja istražene mogućnosti uporabe polimera. Uz postupke aditivne proizvodnje u ovom radu su također opisane vrste polimera, polimeri korišteni u aditivnoj proizvodnji te mogućnost primjene recikliranih polimera u aditivnoj proizvodnji, kao i način dobivanja filameta za 3D printanje. U eksperimentalnom dijelu ovog rada nastojalo se usporediti rastezne čvrstoće recikliranog i izvornog polimera pod nazivom polilaktična kiselina (PLA) na epruvetama dobivenim 3D printanjem. Usporedbom rezultata dvaju ispitivanja, te na temelju informacija danih u teorijskom dijelu rada, u zaključku se raspravlja o prikladnosti recikliranja polimera kao načina zbrinjavanja polimernog otpada u kontekstu aditivne proizvodnje, ali i šire.

Ključne riječi: 3D printanje, recikliranje polimera, PLA

SUMMARY

This thesis concisely describes methods of 3D printing, and investigates the possibilities of polymer recovery through the 3D printing technologies. Types of polymers, polymers used in additive manufacturing, the possibilities of using recycled polymers in 3D printing and the production of filaments for use in 3D printing is also described. The experimental part of the thesis examines the flexural strength of recycled and virgin 3D printed PLA. The results are compared and discussed, alongside the information given in the theoretical part of the thesis, in order to establish whether recycling is suitable as part of the solution for polymer waste management in terms of additive manufacturing, and in general.

Key words: 3D printing, polymer recycling, PLA

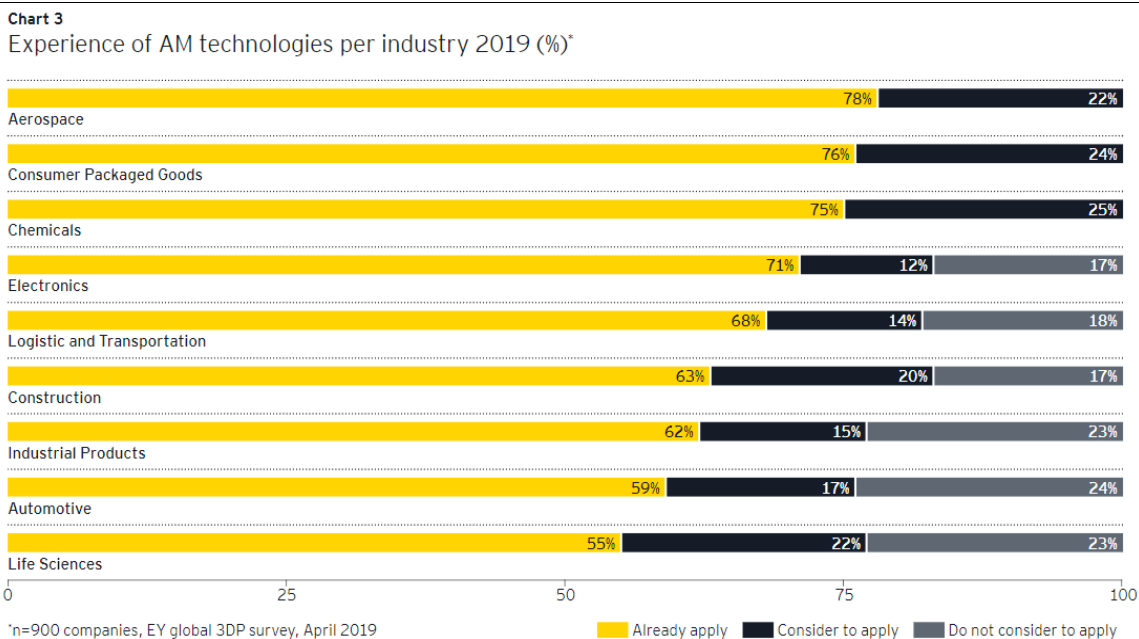
1 UVOD

Početak dvadesetog stoljeća u zamahu je bio drugi val industrijske revolucije koji je obilježio čitavo stoljeće. Razvitak novih i uzbudljivih tehnologija, otkriće modernih materijala, rast populacije, potrošnje i prometno povezivanje svijeta dovelo je do globalizacije gotovo čitavog planeta. No, već krajem stoljeća počela su se postavljati pitanja održivosti takvog načina gospodarstva. Potreba za kontinuiranim rastom ekonomije dovela je do tržišta koje traži veću proizvodnju iz godine u godinu, a koja je zadovoljena proizvodnjom jednokratnih proizvoda i proizvoda kratkog roka trajanja. Nažalost, zajednička svijest o zbrinjavanju otpada koji se generira takvim načinom proizvodnje nije slijedila rast gospodarstva te se otpad godinama akumulirao na odlagalištima otpada, ali i u okolišu, što je dovelo do zagađenja. Među tim otpadom najviše pažnje je stekao plastični otpad. Plastika je materijal koji je zbog svog dugog vremena razgradnje i potencijalne toksičnosti za žive organizme nekompatibilan sa prirodnim svijetom, ali koji je u isto vrijeme zbog široke primjenjivosti i praktičnosti postao okosnica svakodnevnog života ljudi u 21. stoljeću. Do sada su se razvila tri načina zbrinjavanja plastičnog otpada: energetska, kemijska i materijalna uporaba. U vidu suvremene težnje za cirkularnim, odnosno održivim gospodarstvom, materijalna uporaba, drugim imenom recikliranje, se nametnula kao poželjno rješenje. U ovom radu će se kroz kontekst inovativne tehnologije aditivne proizvodnje istražiti težnje industrije recikliranja da održi korak s nedovoljno reguliranom industrijom proizvodnje plastike te mogućnost da reciklirani materijal postane ekonomski konkurentan.

2 TEORIJSKI DIO

2.1 ADITIVNA PROIZVODNJA

Kao što samo ime govori, aditivna proizvodnja (AP) utilizira „dodavanje“ materijala na samoga sebe kako bi generirala trodimenzionalan proizvod gradeći ga sloj po sloj u visinu, za razliku od konvencionalnih metoda oduzimanja materijala (rezanje, bušenje, glodanje, tokarenje itd.). Aditivna proizvodnja se zato naziva i - „3D printanjem“, odnosno trodimenzionalnim tiskanjem. Od začetaka aditivne tehnologije do trenutka pisanja ovog rada prošlo je tek četrdesetak godina. Brz razvitak i komercijalizacija ukazuje na današnju potrebu za postupcima kojima se omogućuje brz, jeftin i jednostavan („user-friendly“) način osmišljavanja, ispitivanja i proizvodnje novih proizvoda. Aditivnim tehnologijama značajno je skraćeno vrijeme potrebno da se od ideje dođe do gotovog fizičkog modela, čime je proces stvaranja prototipova znatno pojednostavljen i financijski olakšan, a potrebe tržišta su lakše zadovoljene. Zbog aditivnog načina rada tehnologijom 3D printa predmeti složene geometrije proizvode se jednako brzo i efikasno kao i predmeti jednostavne geometrije. Materijali korišteni u aditivnoj proizvodnji uključuju metale, polimere, keramike pa čak i beton. Upravo zbog navedenih karakteristika su postupci aditivne tehnologije napredovali od eksperimentalnih tehnologija osamdesetih godina prošlog stoljeća do današnje čvrste pozicije u industriji, ali i izvan nje. Statistički podaci o aditivnoj proizvodnji pokazuju da je svemirska industrija vodeća u primjeni aditivnih tehnologija sa čak 78% tvrtki koje ih aktivno koriste te ostalih 22% tvrtki koje razmatraju korištenje u bliskoj budućnosti. Budući da je svemirska industrija prvak u korištenju novih tehnologija, iz činjenice da je AP našla mjesto u toj industriji može se iščitati njezin značaj. Sljedeći veliki korisnici AP-a su industrija potrošne ambalaže, kemijska industrija te ostali kao što je vidljivo iz tablice:



Slika 1: Tablica primjena AP u određenim industrijama [1]

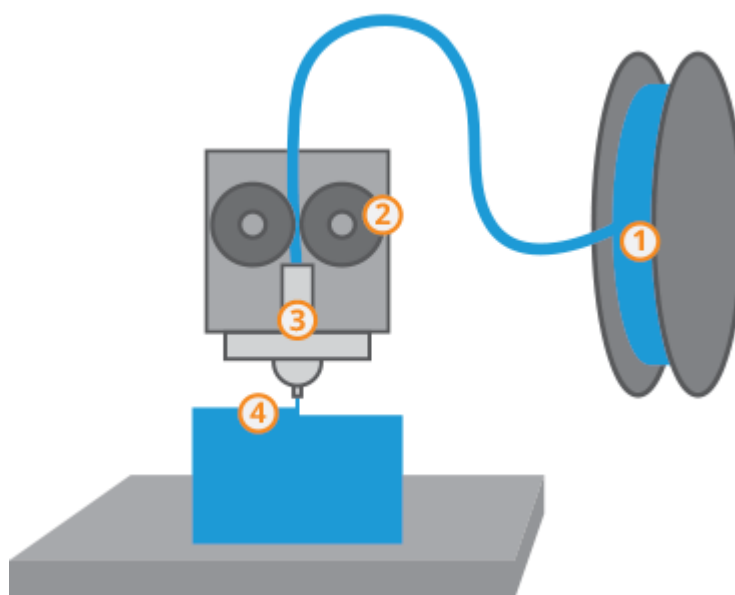
No, prema podacima s internetske stranice 3dinsider.com porasla je i potražnja za komercijalnim 3D printerima. Od 2015. do 2017. godine prodaja „desktop“ 3D printera je porasla za gotovo 90% što pokazuje kako su proizvođači prepoznali kupce i njihove potrebe i izvan industrije, te da se aditivna tehnologija razvija i u smjeru koji je otvoren za širu javnost, a ne samo za specijalizirane industrije. Također, oprema za 3D printanje je sada već nezaobilazan dio asortimana na svjetskim i domaćim sveučilištima i u ostalim obrazovnim ustanovama, te se na tržištu rada nalazi sve više stručnjaka za ove tehnologije, što znači kako AP sazrijeva iz dana u dan.

2.1.1 VRSTE ADITIVNE PROIZVODNJE

Generalno, svim postupcima aditivne proizvodnje zajednička je CAD (computer-aided design) izrada željenog modela na računalu i „rezanje“ (eng. slicing) tog modela pomoću softvera na slojeve zadane debljine koji se prilikom proizvodnje „slažu“ jedan na drugoga tvoreći stvarni model. Neki od postupaka AP-a sinteriraju te slojeve iz veće količine materijala, npr. iz bazena smolastih materijala ili iz podloge praškastog materijala, dok drugi postupci utiliziraju tehnologiju ekstrudiranja, odnosno nanošenja materijala. Slijedi pregled postupaka aditivne proizvodnje iz polimernih materijala[2]:

- **Postupci fotopolimerizacije** zasnivaju se na skrućivanju foto-osjetljivih polimera pomoću svjetlosti. Smolasti polimer se obasja svjetloću određene valne duljine čime se pokreće kemijska reakcija kojom se polimer u kadici skrućuje, a zatim se kadica pomiče za visinu sloja i obasjava se idući presjek koji se povezuje sa skrutnutim presjekom ispod njega. Tvorevine se mogu dobiti osvjetljavanjem smole LASER-om ultraljubičaste svjetlosti ili digitalnim izvorom svjetla poput projektoru. Ako se radi o laseru ta tehnologija se naziva stereolitografijom (SLA), te se presjek iscrtava linijskim kretanjem lasera, a ako se radi o projektoru ili digitalnom zaslonu čitav presjek se obasjava istovremeno, odnosno čitav presjek se istovremeno skrutne te se ta tehnologija naziva „direct light processing“ (DLP) ili u prijevodu obrada izravnom svjetlosti.
- **Postupci srašćivanja praškastih materijala** temelje se na spajanju čestica praha pod utjecajem izvora energije poput vrućeg zraka ili lasera. Najpoznatiji takav postupak je selektivno srašćivanje laserom (eng. selective laser sintering, SLS) Praškati materijal se nanosi na podlogu u sloju debljine pojedinog sloja „narezanog“ modela koji se printa te se zatim laserom iscrtava geometrija presjeka. Slojevi praškastog materijala opetovano se nanose sve dok se ne iscrtaju svi presjeci modela. Na kraju se sinterirani model izvlači iz nakupine praškastog materijala.
- **Postupci raspršivanja materijala** (eng. material jetting) temelje se na principu tiskanja tintom. Tekući polimer se uz pomoć mlaznica raspršuje na podlogu u obliku presjeka i skrućuje pod djelovanjem UV svjetla, podloga se pomiče za visinu sloja te se postupak ponavlja dok se ne dobije gotov izradak. Ovaj postupak omogućuje istovremeno korištenje više mlaznica, a samim time i istovremeno korištenje različitih materijala prilikom izrade jednog modela. Dobiva se visokodetaljni model izvrsne rezolucije i izvrsne kvalitete površine.
- **Postupci taložnog srašćivanja materijala** (eng. fused deposition modeling, FDM) temelje se na postupku ekstrudiranja. FDM je naziv pod licencom tvrtke Stratasys koja je tehnologiju plasirala na tržište i licencirala 1988. godine, a s prestankom licence 2009. ova je tehnologija postala pristupačnija javnosti i trenutno je

najrašireniji postupak 3D printanja. Ovim postupkom tvorevine se dobivaju tako da se plastomer u obliku dugačke namotane niti pomoću zupčanika hrani u glavu printera, odnosno u glavu ekstrudera. Nit se uz pomoć grijača grije na određenu temperaturu te se tako omekšani polimer ekstrudira kroz sapnicu i taloži na podlogu printera. Glava printera ravninskim kretanjem iscrtava geometriju pojedinog presjeka modela, pomičući se u vis okomito na podlogu nakon svakog iscrtanog presjeka. Tako se materijal taložeći spaja i tvori 3D model. Shematski prikaz dan je na slici 2.



Slika 2: FDM tehnologija (1-filament, 2-zupčanici, 3-grijač, 4-esktrudirani filament) [3]

Uobičajne širine niti koja se u kontekstu 3D printanja polimera zove filament su 1,75 mm i 2,85 mm, a rezolucije printanja, odnosno debljine slojeva koje se mogu postići kreću se u desetinama milimetra. Promjer sapnice može biti 0,25 mm, 0,6 mm, 0,8 mm, a standardni promjer je 0,4 mm.

Neovisno o postupku aditivne proizvodnje, 3D računalni model predmeta koji se izrađuje se pomoću programa za rezanje pretvara iz STL datoteke u G-code datoteku. G-code je programski jezik za numeričku kontrolu kretanja, te se osim u aditivnoj proizvodnji koristi i u CNC proizvodnji. U njemu su sadržane upute koje printeru govore koje kretnje mora odraditi kako bi proizveo željeni izradak. Upute sadrže informacije o vrsti i brzini kretanje glave printera i podloge, temperaturama printanja te pokretanju i završavanju printanja, te su podjeljenje u slojeve po kojima se printa izradak.

2.2 POLIMERNI MATERIJALI

Polimerni materijali, ili kolokvijalno „plastike“, koriste se tek od 1950-ih godina. Proizvodnja plastike kontinuirano raste posljednjih sedamdeset godina, a 1989. godine je volumen proizvedene plastike premašio volumen proizvedenog čelika te godine [4]. 2018. godine proizvodnja plastike u svijetu dosegla je 360 milijuna tona, od kojih je 62 milijuna proizvedeno u Europi [5]. Razlog tomu jest što su sintetički polimeri¹ u usporedbi s tradicionalnijim materijalima otporni na koroziju, lakše se oblikuju, znatno su manje gustoće od metala, a dugotrajniji i boljih mehaničkih svojstava od prirodnih materijala (npr. prirodnih vlakana) te su kao takvi pristupačniji za masovnu proizvodnju i primjenu.

Najčešće korišteni polimerni materijali danas su poliolefini, poli(vinil klorid) (PVC), poliuretani (PUR), poli(etilen-tereftalat) (PET) i polistiren (PS, EPS) [5]. U kategoriju poliolefina spadaju tzv. jednokratne plastike, odnosno polietileni (PE) i polipropilen (PP) koji se koriste u industriji potrošačkih dobara: pakiranja hrane, igrački, bočica za kozmetičke proizvode, jednokratnih plastičnih vrećica itd., dok se PVC koristi većinom u građevinarstvu. PUR najčešće dolazi u obliku pjene, a PET se koristi za izradu plastičnih boca. Ovi se polimeri dobivaju polimerizacijom monomera koji se dobiva iz sirovina nafte i prirodnog plina.

2.2.1 Polimerni materijali u aditivnoj proizvodnji

- *Fotoosjetljivi polimeri*

Najčešće korišteni fotoosjetljivi polimeri su epoksidne smole i monomeri/oligomeri akrilata i metakrilata [6].

- *Praškasti polimeri*

Najčešće korišteni praškasti polimeri su poliamidi [7].

- *Polimerni materijali u obliku niti*

Budući da je ekstrudiranje najrašireniji postupak prerade polimera, filament koji se koristi u FDM tehnologiji 3D printanja su raznovrsni, a jedino ograničenje je niska temperatura tališta. Najčešće korišteni materijali su polilaktična kiselina (PLA), akronitril-butadien stirel (ABS), poli(etilen-tereftalat) (PET) i modificirani glikol-poli(etilen-tereftalat) (PETG). Osim njih, postoje i takozvani termoplasti visokih

¹ Osim sintetičkih polimera o kojima se raspravlja u ovom radu postoje i prirodni polimeri poput svile, vune, celuloze, prirodne gume i dr.

performansa poput polieter-eter ketona (PEEK) i polieterimida (PEI, popularno zvan ULTEM) koji imaju izvrsna mehanička svojstva, kemijsku otpornost i postojanost tih svojstava pri temperaturama do čak 250°C te se koriste u već spomenutoj aero- i svemirskoj industriji [8].

2.2.2 Polilaktična kiselina (PLA)

U eksperimentalnom dijelu ovog rada koristit će se epruvete izrađene od PLA polimer. PLA je biopolimer, što znači da se ne proizvodi iz nafte ili prirodnog plina već iz biomase poput škroba kukurza, škroba šećerne trske i sl. Njegova građevna jedinica (monomer) je laktična kiselina koje se dobiva fermentacijom škroba. Razgradnja je moguća ako je polimer izložen temperaturi od barem 60°C i vlazi. Temperatura staklišta PLA je (55-65)°C ovisno o sadržaju komonomera, a temperatura tališta je (160-180)°C. U amorfonom stanju PLA je proziran, a stupanj prozirnosti smanjuje se povećanjem kristalnosti polimera. PLA se najčešće koristi u proizvodnji tekstila i pakiranju proizvoda [9].

2.3 RECIKLIRANI POLIMERNI MATERIJALI

Proces proizvodnje polimera započinje ekstrakcijom ugljikovodika iz neobnovljivih izvora energije (nafta, ugljen, prirodni plin). Iz sirovine se kemijskim procesima dobivaju monomeri, građevne jedinice polimera, koji se polimerizacijom spajaju u polimere. Daljnjom preradom polimera dobivaju se polimerni materijali iz kojih se izrađuju proizvodi. Suvremeni način života bio bi gotovo nezamisliv bez proizvoda načinjenih od polimernih materijala, a najvećim dijelom proizvoda koji su namjenjeni za jednokratnu upotrebu, čime se postavlja pitanje zadovoljavanja potreba tržišta s obzirom na to da se većina plastike proizvodi iz navedenih neobnovljivih izvora te pitanje zbrinjavanja tih proizvoda nakon njihovog kratkog životnog vijeka. No, budući da se tek oko 4% svjetske potrošnje fosilnih goriva (neobnovljivih izvora energije) koristi u proizvodnji polimera [10], pitanje (ne)zbrinjavanja 'iskorištenih' polimera nameće se kao relevantnije. Otpadna plastika se reciklira, spaljuje ili odlaze na odlagalištima otpada. Prema podacima iz prve globalne analize proizvodnje, upotrebe i zbrinjavanja plastike, od 1950. godine tek 9% od 6300 Mt plastičnog otpada je reciklirano, 12% spaljeno, a 79% je akumulirano na legalnim i ilegalnim odlagalištima otpada [11]. Poznato je da je plastika sveprisutna u okolišu², a budući da nijedna plastika u širokoj upotrebi danas nije biorazgradiva, te je vrijeme potrebno da se razgradi veće od nekoliko stotina godina, jasno je da odlaganje plastike nije prikladna opcija zbrinjavanja. Alarmantan utjecaj plastičnog otpada na prirodni svijet i ravnotežu ekosustava diljem planeta ponukao je na razmišljanje i promjene na području sakupljanja i zbrinjavanja otpada. Europski zeleni plan, jedna od šest prioritarnih strategija Europske komisije za razdoblje 2019.-2024. , kao jednu od glavnih inicijativa nalaže prijelaz na tzv. 'kružno gospodarstvo', a što uključuje i 'izradu plana istraživanja i razvoja za kružnu plastiku' [12]. Neki od ciljeva predstavljeni 2018. godine uključuju prijelaz na isključivo reciklirane ili materijale s mogućnošću recikliranja pri proizvodnji plastičnih pakiranja do 2030. godine, dizanje standarda i povećanje efikasnosti skupljanja i recikliranja plastike sa recikliranjem više od 50% plastičnog otpada, povećanje europskog kapaciteta opreme i postrojenja za recikliranje, integriranje projektiranja i proizvodnje plastičnih dobara s postupcima recikliranja kako bi se omogućilo recikliranje što većeg broja proizvoda [13]. Stav Europske unije prema plastičnom

² Čak i na dnu Marijanske brazde, najdubljoj točki na planeti, nađena je plastična vrećica.

otpadu odraz je rastuće globalne zabrinutosti za utjecaj plastike na okoliš i jasan pokazatelj smjera razvoja svjetskog gospodarstva.

2.3.1 Načini recikliranja

- **Primarno recikliranje**

Primarno recikliranje odnosno re-ekstruzija označava samo fizikalno recikliranje polimera. Polimerni otpad se bez ikakve obrade vraća u proces prerade. Direktno se zagrijava i ponovno ekstrudira. Primarno recikliranje se uobičajno odvija interno u postrojenjima koja obrađuju polimerne materijale. Takva postrojenja primarnim recikliranjem ponovno iskorištavaju višak materijala ili 'škart'.

- **Sekundarno recikliranje**

Sekundarno recikliranje predstavlja mljevenje otpada na veličinu granulata i ponovno korištenje umjesto izvornog materijala, ili u kombinaciji. Kod sekundarnog recikliranja najvažniji korak je razvrstavanje i dobava polimernog otpada sa što manje nečistoća. Također, vrlo važan korak je čišćenje otpada (vodom ili kemijski ako se moraju maknuti ostaci boja ili ljepila) kako bi se ograničila količina nečistoća u konačnom proizvodu. Sekundarno recikliranje je primjenjivo kod plastika načinjenih od jedne vrste polimera (PE, PP, PVC, PET)

- **Tercijarno recikliranje**

Tercijarno, odnosno kemijsko recikliranje odnosi se na razgradnju polimera na manje građevne jedinice, molekule, u kapljevitom ili plinovitom stanju. Produkt tercijarnog recikliranja se zatim koristi kao sirovina za proizvodnju novih polimera ili u petrokemiji. Tercijarno recikliranje razlikuje se od primarnog i sekundarnog u tome što se kod tercijarnog odvija kemijska reakcija [14].

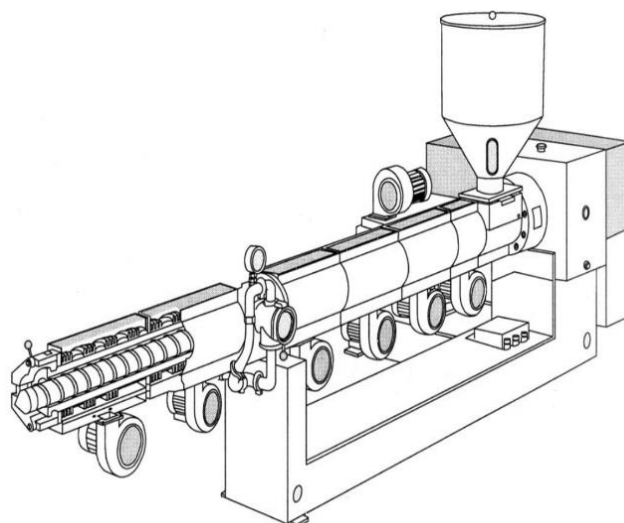
Proces recikliranja polimera započinje samom proizvodnjom polimera. Sastav polimernog materijala koji se koristi za izradu nekog proizvoda značajno utječe na mogućnost recikliranja. Naprimjer, u polimere se često dodaju različiti aditivi kako bi se poboljšala mehanička svojstva, povećala estetska vrijednost ili olakšala obrada. Smjesa polimernog otpada istog polimera sadrži velik broj pomiješanih aditiva koji na nepoznat način, a često negativno, djeluju na svojstva recikliranog polimera. Nadalje, degradacija polimera pri

preradi polimernog materijala (višestrukim zagrijavanjima) ili degradacija kroz životni vijek polimernog proizvoda pod utjecajem radnih opterećenja ili atmosferilija ograničavaju mogućnost dobivanja recikliranog polimera sa svojstvima sličnima izvornom³ polimeru, što znači da se recikliranjem dobivaju materijali lošije kvalitete, odnosno dolazi do 'down-cycling-a'. Sljedeći problem pri reciklaži polimera je razvrstavanje polimernog otpada u kategorijama po vrsti polimera od koje su načinjeni. Ovo je vrlo bitan korak zbog izrazite međusobne nekompatibilnosti polimera koji su danas najviše u upotrebi. Zasad ne postoje dovoljno dobro razrađeni mehanizmi razvrstavanja. Zbog sličnosti u vrijednosti gustoće metode razdvajanja koje se zasnivaju na plutanju ili centrifugi mogu uspješno razdvojiti samo frakcije polimera, ali ne i svaki polimer pojedinačno. Također, visoka razina nepolimernih nečistoća u polimerima skupljenim iz kućnog otpada dodatno onemogućuje dobivanje recikliranog polimera dostatne kvalitete [15][16]. Zbog navedenih tehnoloških poteškoća, reciklirani polimeri su i dalje nekonkurentni izvornim materijalima, te su time ekonomski neisplativi.

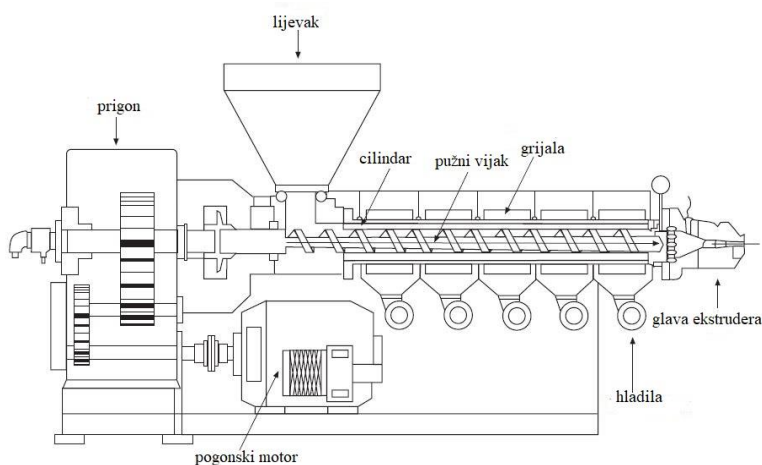
³ Izvorni, odnosno nerekicirani materijal

2.4 PROIZVODNI POSTUPAK DOBIVANJA FILAMENTA ZA 3D PRINTANJE

Uobičajeno, sirovina za FDM tehnologiju dolazi u obliku ekstrudata širine 1.75 mm i 2.85 mm. Ekstrudat, koji se u kontekstu 3D printanja zove filament, izrađuje se korištenjem ekstrudera. Ekstrudiranje se sastoji od hranjenja sirovog materijala u alat, njegovog taljenja i kontinuiranog protiskivanja polimerne taljevine kroz alat do skrućivanja u željeni oblik ekstrudata. Alat koji se koristi za ekstrudiranje naziva se ekstruder, preciznije jednopužni ekstruder. Kao što je vidljivo na slici 4 glavni dijelovi ekstrudera su lijevak za dobavu granulata, pogonski motor i prigon, cilindar u kojemu se nalazi pužni vijak, grijala i hladila koja reguliraju temperaturu taljevine koja se protiskuje kroz cilindar, te glava ekstrudera kroz koju prolazi taljevina. Po izlasku iz glave ekstrudera, ekstrudat se obično kontrolirano hladi u vodenoj kupki i onda namotava.



Slika 3: Jednopužni ekstruder [17]



Slika 4: Dijelovi jednopužnog ekstrudera [18]

Ekstrudiranje je najrašireniji postupak prerade polimera [17], a na tržištu čak postoje i ekstruderi za kućnu upotrebu, što znači da se za 3D printanje može koristiti veliki broj različitih materijala. Željeni oblik ekstrudata za 3D print mora biti u toleranciji $\pm 0,05$ mm što bi za standardnu veličinu filameta 1,75 mm značilo da se smije kretati između 1,70 mm i 1,80 mm. Ova veličina tolerancije je iznimno bitna kod 'hranjenja' niti filameta u glavu ekstrudera te o njoj ovisi gladak protok te niti kroz zupčanike do grijača čime se smanjuje rizik od grešaka pri printanju, poput zaglavlivanja niti ili nejednake količine istisnute rastaljene niti tokom cijelog procesa printanja. Valjane dimenzije promjera se postižu manualnom ili digitalnom provjerom nakon hlađenja ekstrudata i podešavanjem brzine ekstrudiranja.

2.4.1 Reciklirani polimeri za proizvodnju filamenata

Filament od recikliranog polimera se najjednostavnije može dobiti sekundarnom (ili primarnom) reciklažom. Neiskorišteni ostatak materijala nakon printanja, materijal koji je služio kao potporna konstrukcija tokom printanja ili odgovarajući plastični otpad može se skupiti, po potrebi očistiti te samljeti u fini granulata pogodan za ekstruziju. Vodeće tvrtke u proizvodnji opreme za 3D printanje poput Stratasys-a nude usluge povrata materijala kako bi se reciklirao [19]. Također postoje kućni sustavi za ekstruziju filamenata, poput onih firme Filabot, koji koriste ostatke od printanja za proizvodnju novih filamenata. Budući da je svako ponovno zagrijavanje polimera nepoželjno u vidu mehaničkih svojstava i kvalitete, neki proizvođači 3D printera okrenuli su se proizvodnji printera koji koriste polimer u obliku granulata direktno u printanju, npr. printer firme Massive Dimension [20]. S problematikom nejednačnosti oblika čestica plastike samljevane sa ciljem primarne reciklaže suočili su se proizvođači prototipnog printera GigabotX implementirajući 2 jedinice grijanja u sustav printera koji printa direktno iz samljevane plastike. Aditivna proizvodnja izvrstan je primjer cirkularne proizvodnje s minimiziranom količinom otpada. S aditivnom proizvodnjom moguće je već u fazi izrade predmeta minimizirati potrošeni materijal, za razliku od tehnologija kojima se materijal oduzima kako bi se dobio izradak, a sa razvojem printera koji su u mogućnosti koristiti reciklirani materijal uspješno se zatvara krug proizvodnje.

3 EKSPERIMENTALNI DIO

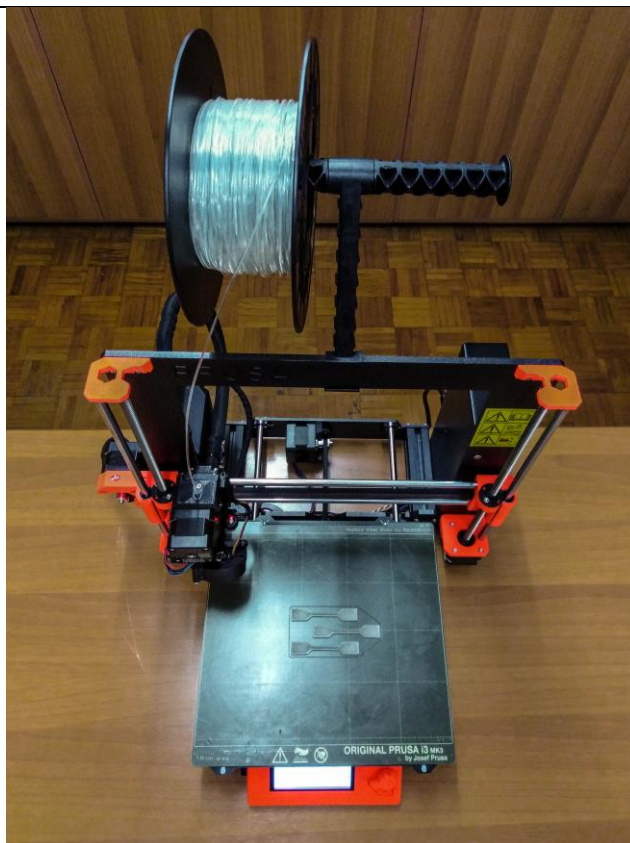
3.1 CILJ ISPITIVANJA

Cilj ispitivanja je usporediti mehanička svojstva recikliranog PLA s rasteznim svojstvima izvornog PLA kako bi se utvrdilo je li recikliranje pogodan način uporabe polimera u kontekstu njihovih mehaničkih svojstava, odnosno, cilj je proučiti na koji način recikliranje djeluje na mehanička svojstva polimera, te proučiti kako parametri temperature mlaznice i podloge printera utječu na rastezna svojstva PLA.

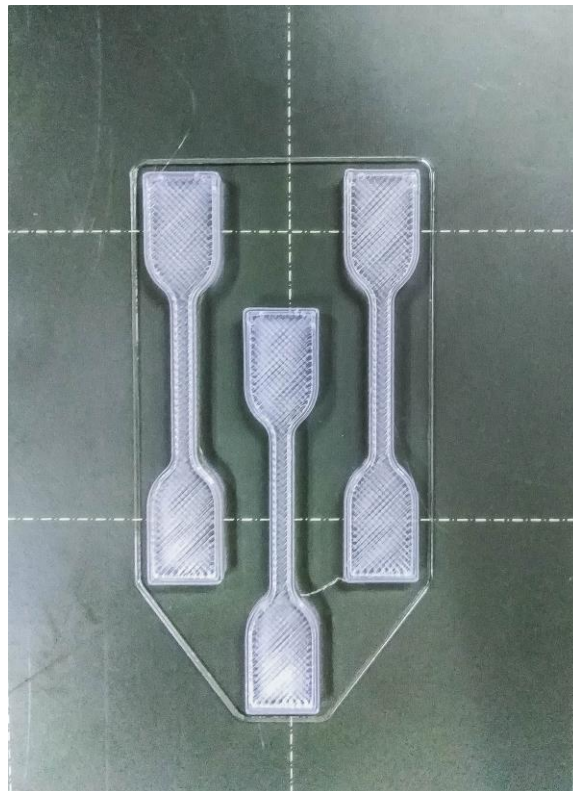
3.2 METODOLOGIJA ISPITIVANJA

Prema normi HR EN ISO 527-1:2019 ispitana je rastezna čvrstoća materijala. Rastezna čvrstoća definirana je naprezanjem kojeg izaziva maksimalna sila na početnu površinu presjeka epruvete ($R_m = F_{\max}/A_0$) nakon koje materijal „slabi“ odnosno gubi čvrstoću. Prilikom vlačnog ispitivanja mjerena je sila kojom se djeluje na epruvetu te je zabilježena najveća vrijednost sile kojoj je epruveta bila izložena. Također je bilježena deformacija epruvete ekstenziometrom.

Epruvete na kojima je provedeno ispitivanje dobivene su printanjem na stolnom FDM printeru modela ORIGINAL PRUSA i3 MK3, marke PRUSA. Isptivanje je provedeno na kitalici marke SHIMADZU, a rezultati su interpretirani u software-u Minitab. Mjerno područje kitalice jest 20 mm, a razmak između čeljusti 45 mm. Temperatura ispitivanja bila je 22°C. Brzina kidanja bila je 1 mm/min. Nakon vlačnog ispitivanja uspoređeni su rezultati dvaju materijala.



Slika 5: Original Prusa i3 MK3



Slika 6: Primjer isprintanih epruveta



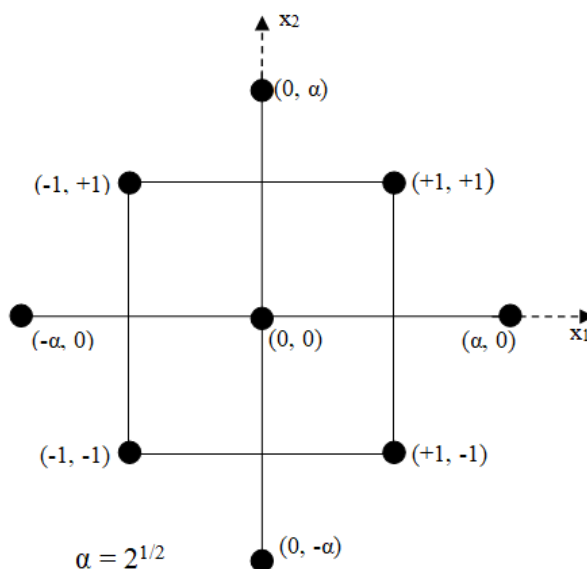
Slika 7: Epruveta u kraljici



Slika 8: Epruveta nakon pucanja

3.3 PLAN POKUSA

Plan pokusa je centralno-kompozitni s dva parametra: temperaturom podloge printera i temperaturom mlaznice. Provedena su 2 usporedna mjerenja na recikliranom i djevičanskom materijalu. Centralno kompozitni plan sastoji se od $2k$ stanja u osima, $2k$ stanja u vrhovima i stanjima u centru, gdje je k broj faktora odnosno parametara, a stanje je u ovom slučaju kombinacija temperatura mlaznice i podloge printera [21]. Za svako mjerenje ukupno je 13 stanja pokusa od kojih je 5 centralno. Za svako stanje ispitane su 3 epruvete, čineći ukupno 39 ispitanih epruveta za pojedini materijal. Odziv pokusa je rastezna, odnosno vlačna, čvrstoća i modul elastičnosti.



Slika 9: Skica centralno-kompozitnog plana pokusa s 2 parametra

U tablici su prikazane stvarne vrijednosti temperatura pri kojima su se printale epruvete za ispitivanje prema njihovom položaju na skici plana.

| x_1 | x_2 | $T_{\text{podloga}} [^{\circ}\text{C}]$ | $T_{\text{mlaznica}} [^{\circ}\text{C}]$ |
|--------|--------|---|--|
| -1 | -1 | 30 | 190 |
| -1 | 1 | 30 | 230 |
| 1 | -1 | 70 | 190 |
| 1 | 1 | 70 | 230 |
| 0 | 0 | 50 | 210 |
| 0 | 0 | 50 | 210 |
| 0 | 0 | 50 | 210 |
| 0 | 0 | 50 | 210 |
| 0 | 0 | 50 | 210 |
| 0 | 0 | 50 | 210 |
| 1,414 | 0 | 78 | 210 |
| -1,414 | 0 | 22 | 210 |
| 0 | 1,414 | 50 | 238 |
| 0 | -1,414 | 50 | 182 |

Tablica 1: Temperature podloge i mlaznice printera

3.4 MATERIJAL

U ispitivanju su korištena dva materijala: izvorni i reciklirani PLA. Filament od izvornog PLA dobiven je iz peleta PLA ekstrudiranjem, a filament od recikliranog PLA dobiven je mljevenjem iskorištenog PLA te ekstrudiranjem iz samljevenih granula, simulirajući proces recikliranja. Oba filamenta izradio je Phd. Stud. Dipl.-Ing. Lukas Hentschel sa odjela za aditivnu proizvodnju na Montan Universität-u u Loebenu, te su podaci dobiveni iz izvještaja o ekstrudiranju. Prvotno je korišten maleni ekstruder pod nazivom 3DEVO za ekstrudiranje oba filamenta, no zbog nepravilnih oblika granula reciklata proces ekstrudiranja recikliranog filamenta je bio bezuspješan, odnosno ekstruder nije mogao primiti takve oblike granula. Nadalje, za ponovljeni proces ekstrudiranja recikliranog filamenta korišten je jednopužni ekstruder Filtertestsystem FT-E20T-MP-IS (Collin GmbH). Dakle, izvorni filament je ekstrudiran na 3DEVO ekstruderu, a reciklirani filament za ekstruderu marke Collin.



Slika 10: Jednopužni ekstruder korišten u izradi recikliranog filamenta

Na ekstruderu Filtertestsystem FT-E20T-MP-IS nalaze se 4 neovisna grijača na kojima se zasebno namještaju temperature kako bi granulat jednolično i postepeno omekšao do dolaska u mlaznicu. U ovom procesu korištena je mlaznica promjera 1,9 mm. Uz temperature mlaznica, postoje još dva parametra koja utječu na proces ekstrudiranja, a to su brzina rotacije pužnog vijka unutar ekstrudera i tlak kojim se omekšani polimer istiskuje kroz mlaznicu.

U tablici su dani podaci o vrijednostima parametara ekstrudiranja.

| T_1 [°C] | T_2 [°C] | T_3 [°C] | T_{mlaznica} [°C] | brzina vijka [okr/min] | tlak [bar] |
|------------|------------|------------|----------------------------|------------------------|------------|
| 195 | 200 | 205 | 205 | 100 | 120 |

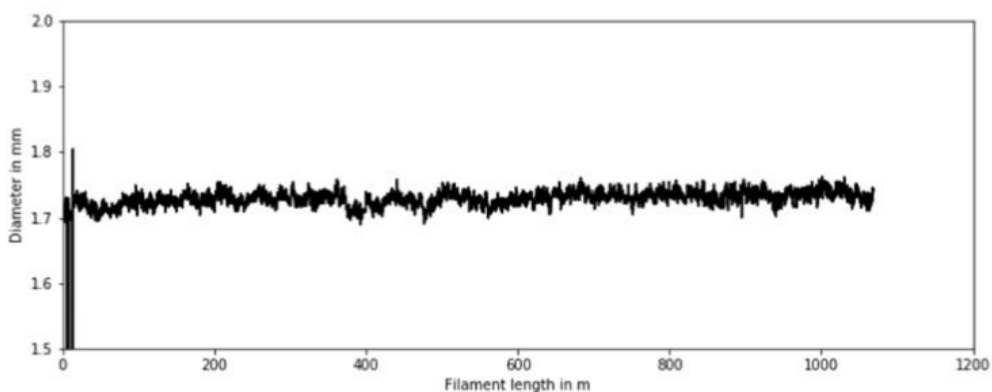
Tablica 2: Temperaturni profil ekstrudiranja filameta

Po izlasku iz mlaznice ekstrudat se hladio u vodenoj kupki i namotavao na špulu. Na slici je prikazana kadica s toplom vodom i jedinica za namotavanje, kao i jedinica za kontrolu dimenzije filameta.

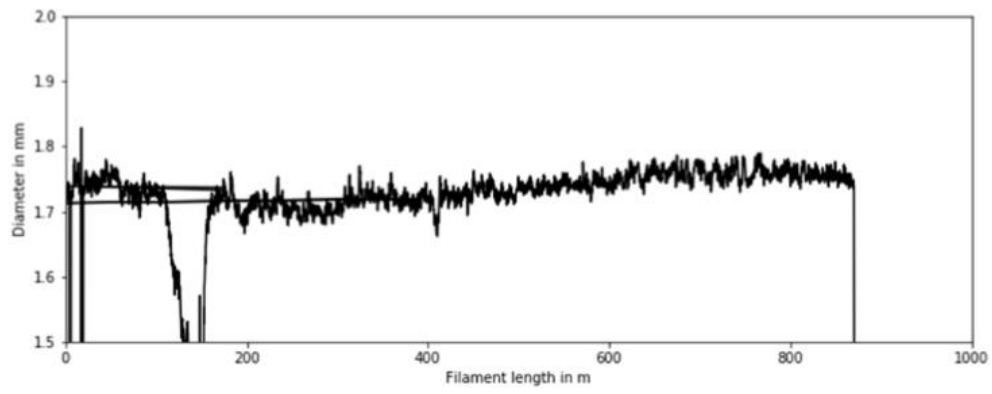


Slika 11: Jedinica za hlađenje i namotavanje filameta

Rezultati kontrole dimenzije ekstrudata na idućoj stranici pokazuju kako je filament unutar zadovoljavajućih dimenzija.



Slika 12: Veličina promjera filameta izvornog PLA u odnosu na duljinu



Slika 13: Veličina promjera filameta recikliranog PLA u odnosu na duljinu

3.5 REZULTATI ISPITIVANJA

Rezultati ispitivanja grafički su prikazani koristeći program Minitab 17. Na slikama 14, 15, 16 i 17 prikazani su rezultati kidanja epruveta od izvornog PLA, a na slikama 18, 19, 20 i 21 prikazani su rezultati kidanja epruveta od recikliranog PLA.

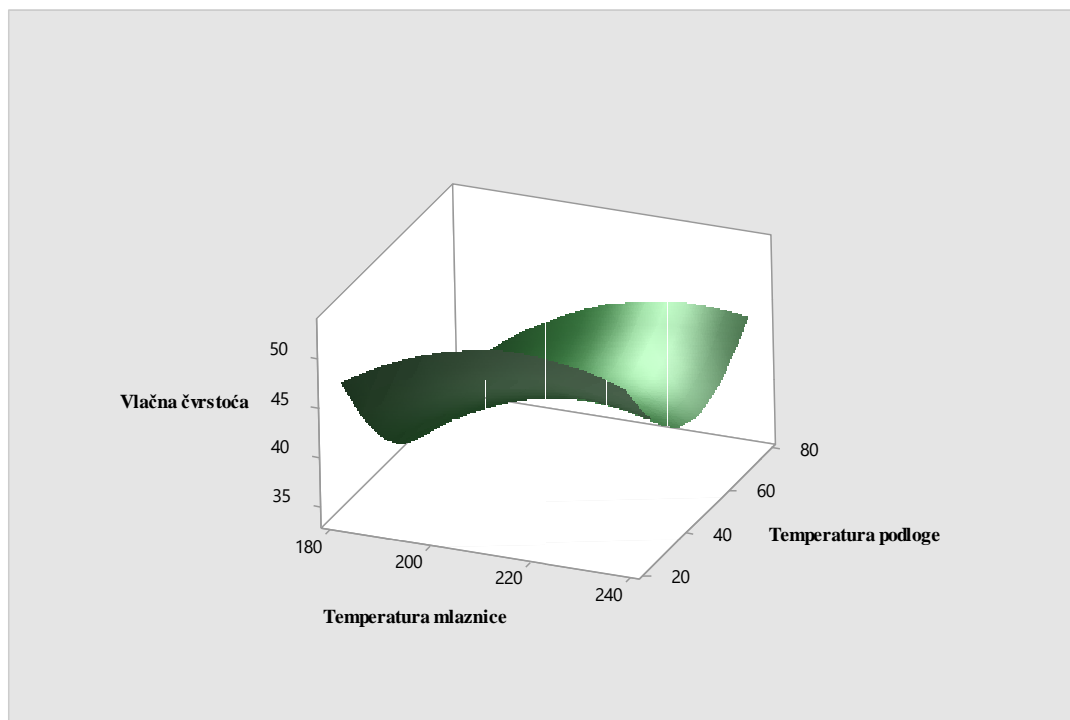
3.5.1 Izvorni PLA

Grafički prikaz rezultata mjerenja vlačne čvrstoće sedlastog je oblika u smjeru x-osi što upućuje na to da su najveće vrijednosti čvrstoće dobivene na epruvetama printanim sa temperaturama podloge ispod 30°C i iznad 70°C, i središnjim temperaturama mlaznice. Ipak, sedlo je blago zakrenuto oko y-osi u pozitivnom smjeru, što znači da se povećanjem temperature mlaznice povećava vrijednost čvrstoće, te su više vrijednosti vlačne čvrstoće postignute pri temperaturama mlaznica iznad 220°C. Najmanje vrijednosti čvrstoće dobivene su kod epruveta printanih na temperaturi podloge između 50°C i 70°C i temperaturi mlaznice ispod 190°C. Najveća vrijednost vlačne čvrstoće je kod seta epruveta printanih na temperaturi podloge 30°C i temperaturi mlaznice 230°C, a prosjek tih triju vrijednosti jest 49,91 MPa. Najmanje vrijednosti vlačne čvrstoće zabilježene su kod seta epruveta printanih na temperaturi podloge 50°C i temperaturi mlaznice 182°C, a prosjek tih triju vrijednosti jest 32,08 MPa. U centralnim stanjima pokusa, na temperaturi podloge 50°C i temperaturi mlaznice 210°C, prosjek vrijednosti čvrstoća jest 41,41 MPa, a vrijednosti se nalaze u rasponu od 8,45 MPa. Raspon vrijednosti vlačne čvrstoće u svim stanjima je 17,83 MPa, a prosjek je 42,94 MPa.

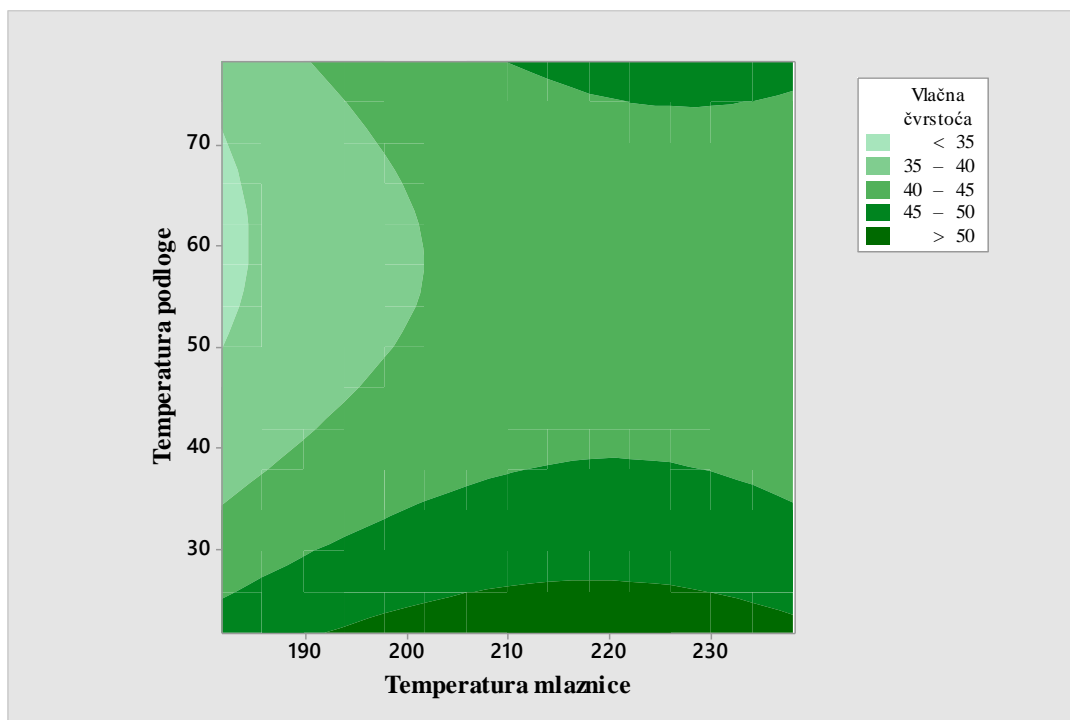
Grafički prikaz modula elastičnosti E ima oblik slova U u yz-ravnini, što znači da su najveće vrijednosti postignute na epruvetama printanim na temperaturama podloge ispod 30°C i iznad 70°C, te gotovo jednoliko na cijelom rasponu temperatura mlaznice. Najviša vrijednost modula postignuta je kod seta epruveta printanih na 230°C i 30°C, a iznosi 2092,76 MPa, odnosno 2,09 GPa. Najmanja vrijednost modula postignuta je kod seta epruveta printanih na 210°C i 50°C i iznosi 1384,40 MPa, odnosno 1,38 GPa. To je ujedno i jedno od pet centralnih stanja pokusa. Srednja vrijednost modula kod epruveta printanih pri tim temperaturama (210°C i 50°C) jest 1520,30 MPa, odnosno 1,52 GPa, a raspon vrijednosti je 0,281 GPa. Raspon vrijednosti modula elastičnosti u svim stanjima je 0,71 GPa, a prosjek je 1,65 GPa.

| Temperatura mlaznice [°C] | Temperatura podloge [°C] | Vlačna čvrstoća [MPa] | Modul elastičnosti [MPa] |
|---------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 238,00 | 50,00 | 41,11 | 1610,02 |
| 230,00 | 30,00 | 49,91 | 2092,76 |
| 230,00 | 70,00 | 43,65 | 1542,86 |
| 210,00 | 78,00 | 44,94 | 1874,11 |
| 210,00 | 22,00 | 49,43 | 1803,54 |
| 210,00 | 50,00 | 43,73 | 1665,40 |
| 210,00 | 50,00 | 45,87 | 1637,90 |
| 210,00 | 50,00 | 37,84 | 1491,72 |
| 210,00 | 50,00 | 40,32 | 1422,07 |
| 210,00 | 50,00 | 41,83 | 1384,40 |
| 190,00 | 30,00 | 48,29 | 1900,90 |
| 190,00 | 70,00 | 39,19 | 1491,23 |
| 182,00 | 50,00 | 32,08 | 1481,68 |

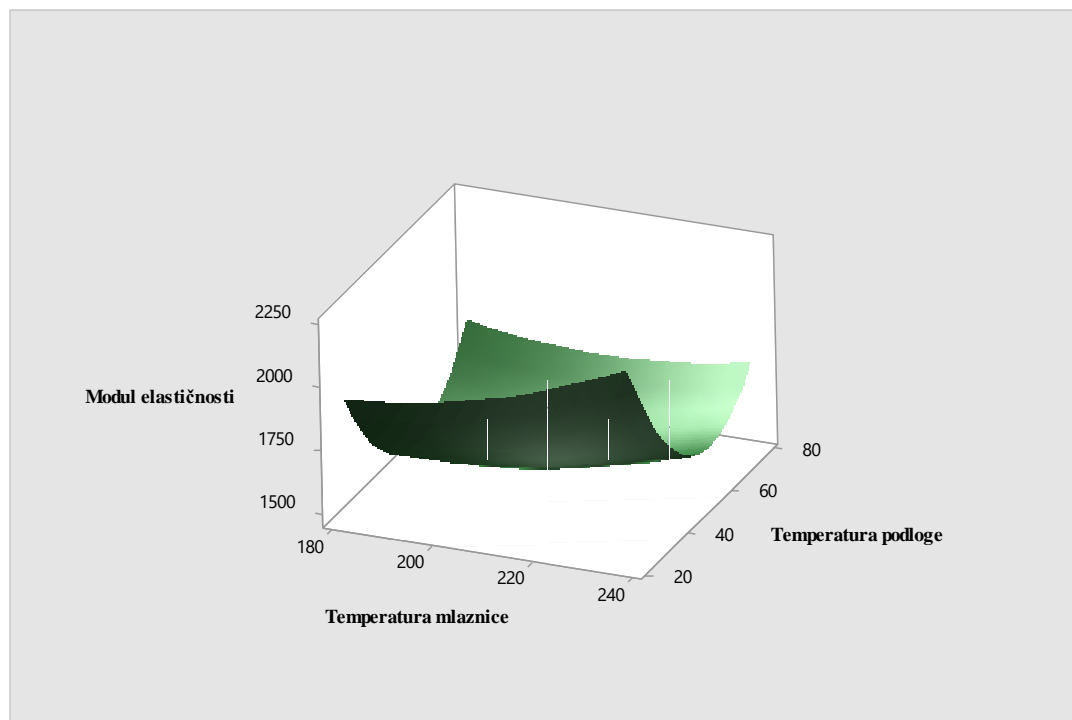
Tablica 3: Rezultati ispitivanja izvornog PLA



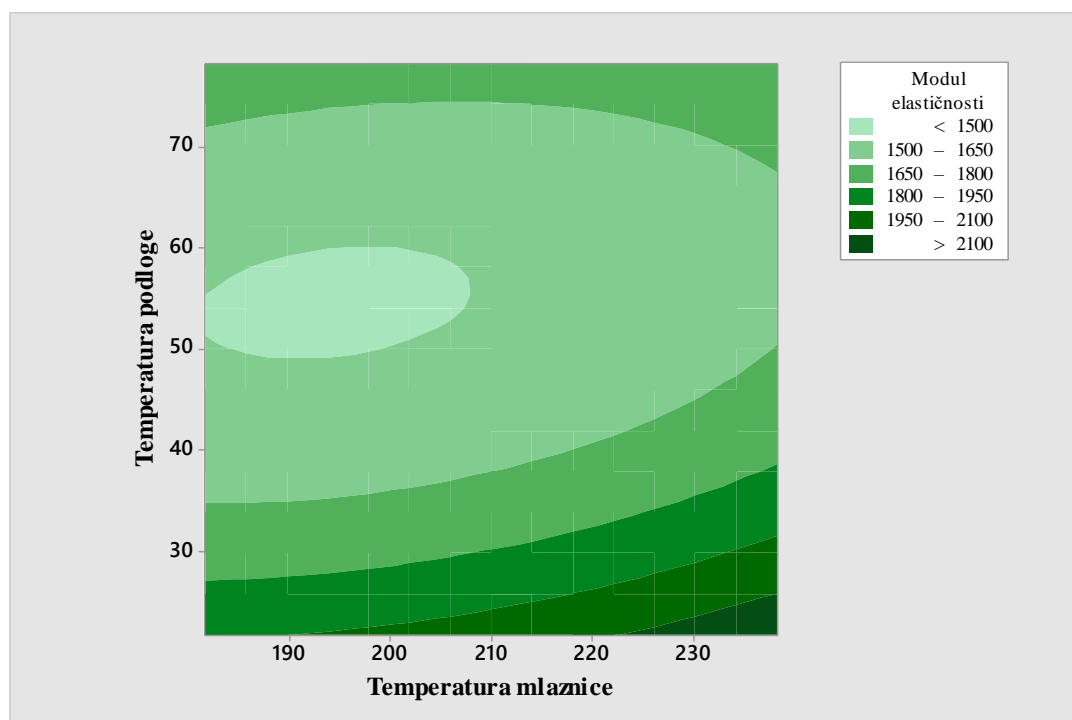
Slika 14: 3D dijagram vlačne čvrstoće [MPa] izvornog PLA u ovisnosti o temperaturi podloge [°C] i temperaturi mlaznice [°C]



Slika 15: 2D dijagram vlačne čvrstoće [MPa] izvornog PLA u ovisnosti o temperaturi podloge [°C] i temperaturi mlaznice [°C]



Slika 16: 3D dijagram modula elastičnosti [MPa] izvornog PLA u ovisnosti o temperaturi podloge [°C] i temperaturi mlaznice [°C]



Slika 17: 2D dijagram modula elastičnosti [MPa] izvornog PLA u ovisnosti o temperaturi podloge [°C] i temperaturi mlaznice [°C]

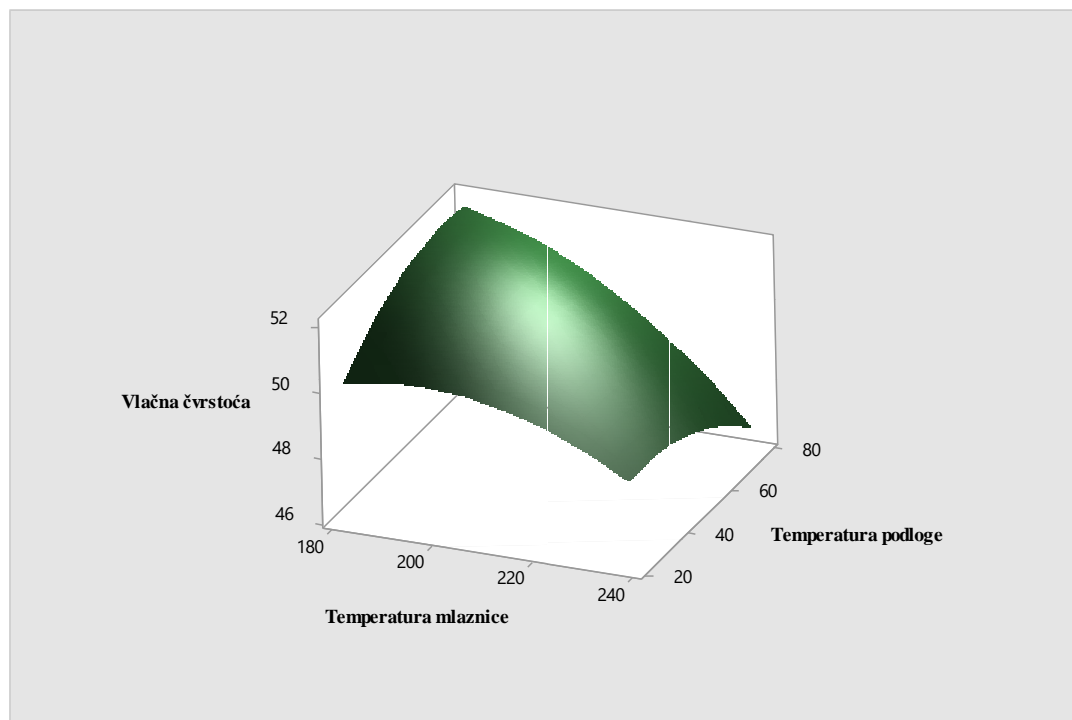
3.5.2 Reciklirani PLA

Grafički prikazi rezultata ispitivanja recikliranog PLA nemaju specifični oblik poput rezultata ispitivanja izvornog PLA. Iz slike 19 vidljivo je da su najveće vrijednosti vlačne čvrstoće zabilježene kod epruveta koje su bile printane na najnižim temperaturama mlaznice, a najvišim temperaturama podloge. Tako je najveća vrijednost vlačne čvrstoće zabilježena kod jednog od setova epruveta printanih na temperaturama središnjeg stanja pokusa (210°C i 50°C), a ta vrijednost je 56,40 MPa. Zanimljivo, najmanja vrijednost čvrstoće je također zabilježena kod jednog od setova epruveta iz središnjeg stanja pokusa, a ta vrijednost iznosi 44,83 MPa. Prosjek svih 5 setova epruveta printanih na temperaturama središnjeg stanja pokusa je 50,8 MPa, u rasponu od 11,57 MPa, a prosjek vlačnih čvrstoća svih 13 setova epruveta je 50,34 MPa.

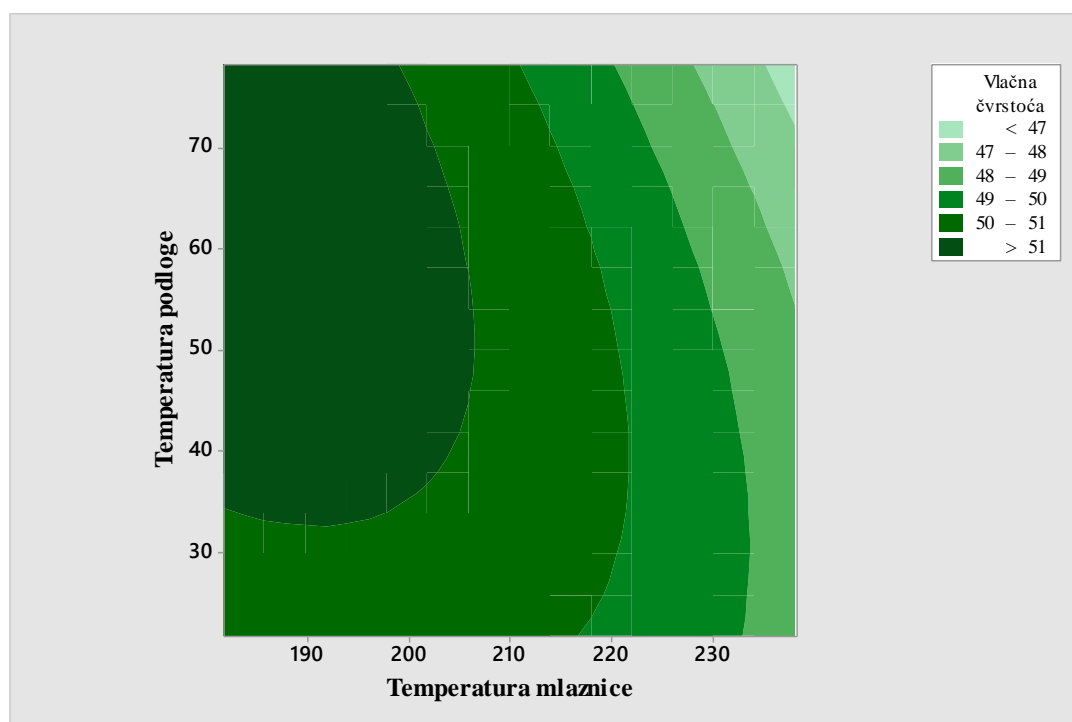
Prema slikama 18 i 19 najveće vrijednosti modula elastičnosti postignute su kod epruveta printanih na najmanjim temperaturama mlaznice, ispod 190°C, i najmanjim temperaturama podloge, ispod 30°C. Najveća vrijednost dobivena je kod epruveta printanih na 210°C i 22°C i iznosi 2782,91 MPa. Najniža vrijednost dobivena je kod epruveta printanih na 230°C i 30°C i iznosi 1833,88 MPa. Prosjek vrijednosti modula elastičnosti iz pet centralnih stanja pokusa jest 2294,77 MPa, odnosno 2,29 GPa, a raspon vrijednosti je 0,34 GPa. Prosjek vrijednosti svih modula elastičnosti je 2,25 GPa, a raspon je 0,95 GPa.

| Temperatura mlaznice [°C] | Temperatura podloge [°C] | Vlačna čvrstoća [MPa] | Modul elastičnosti [MPa] |
|---------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 238,00 | 50,00 | 45,16 | 2137,67 |
| 230,00 | 30,00 | 52,05 | 1833,88 |
| 230,00 | 70,00 | 50,33 | 1906,99 |
| 210,00 | 22,00 | 48,92 | 2782,91 |
| 210,00 | 50,00 | 56,40 | 2478,90 |
| 210,00 | 50,00 | 51,82 | 2336,90 |
| 210,00 | 50,00 | 44,83 | 2324,95 |
| 210,00 | 50,00 | 53,17 | 2191,98 |
| 210,00 | 50,00 | 47,78 | 2141,11 |
| 210,00 | 78,00 | 49,73 | 1946,67 |
| 190,00 | 30,00 | 50,53 | 2432,01 |
| 190,00 | 70,00 | 50,67 | 2102,34 |
| 182,00 | 50,00 | 52,98 | 2624,87 |

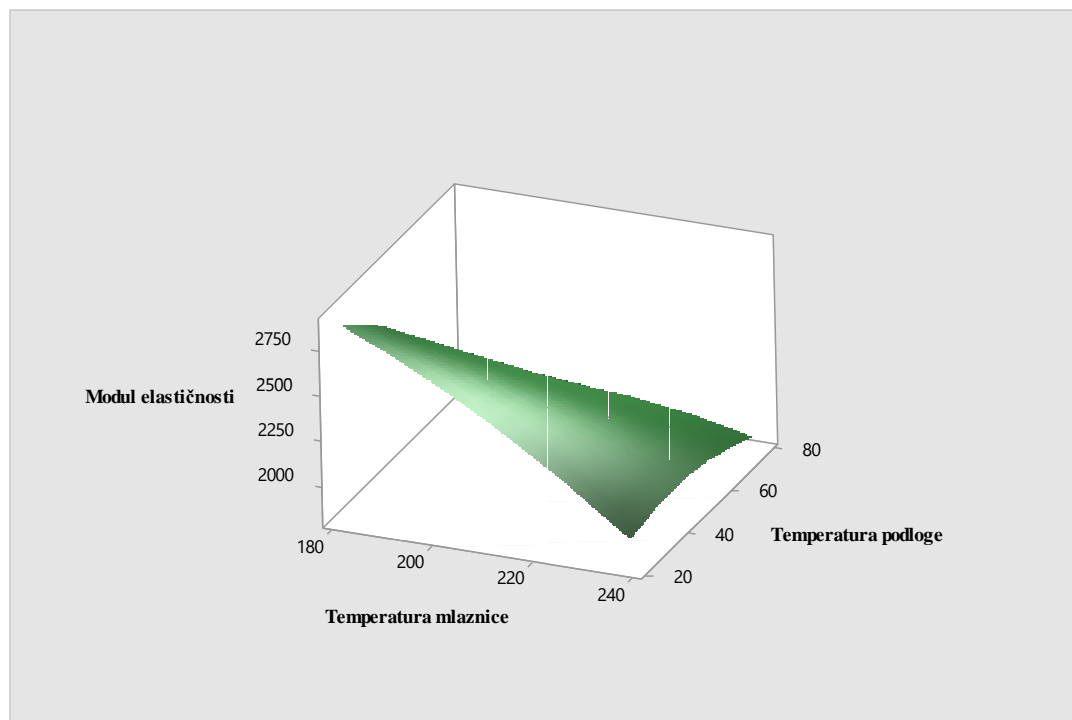
Tablica 4: Rezultati ispitivanja recikliranog PLA



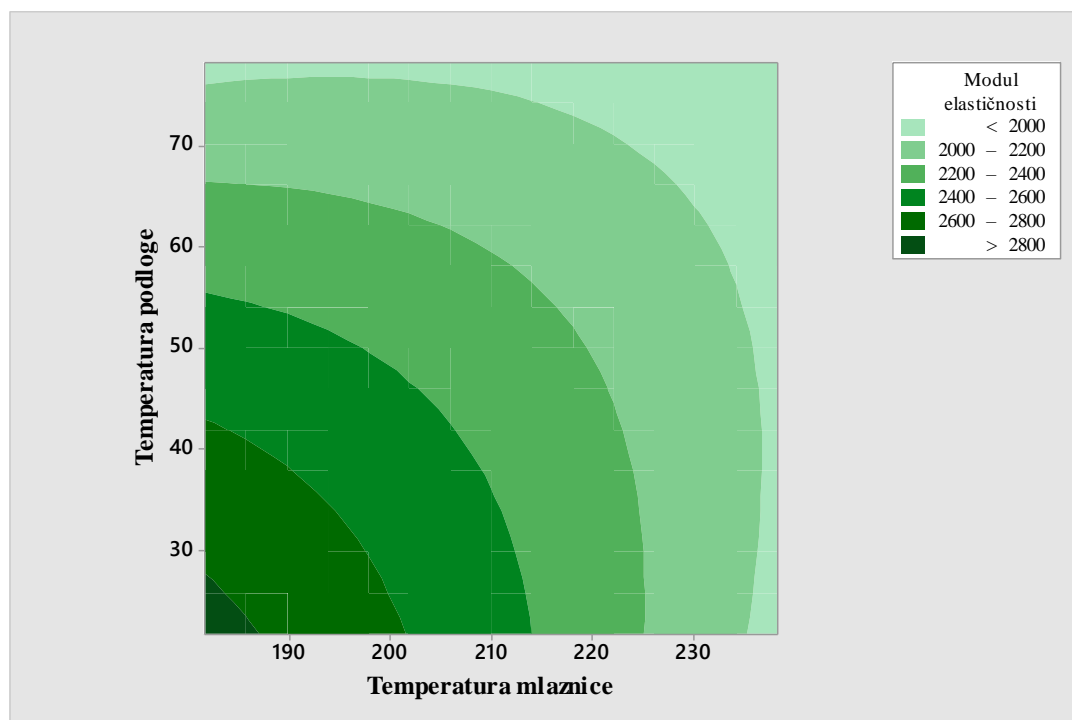
Slika 18: : 3D dijagram vlačne čvrstoće [MPa] recikliranog PLA u ovisnosti o temperaturi podloge [°C] i temperaturi mlaznice [°C]



Slika 19: 2D dijagram vlačne čvrstoće [MPa] recikliranog PLA u ovisnosti o temperaturi podloge [°C] i temperaturi mlaznice [°C]



Slika 20: 3D dijagram modula elastičnosti [MPa] recikliranog PLA u ovisnosti o temperaturi podloge [°C] i temperaturi mlaznice [°C]



Slika 21: 2D dijagram modula elastičnosti [MPa] recikliranog PLA u ovisnosti o temperaturi podloge [°C] i temperaturi mlaznice [°C]

4 ZAKLJUČAK

Cilj eksperimentalnog dijela bio je utvrditi utjecaj jednostrukog primarnog recikliranja na rastezna svojstva PLA, te provjeriti na koji način promjena temperatura podloge i mlaznice printera utječe na ta svojstva. Uspoređivana su svojstva vlačne čvrstoće i modula elastičnosti. Vlačna čvrstoća (odnosno aritmetička sredina 13 vlačnih čvrstoća dobivenih ispitivanjem) izvornog PLA je 42,94 MPa, odnosno za 7,4 MPa manja od vlačne čvrstoće recikliranog PLA. Također, modul elastičnosti recikliranog PLA veći je za 0,6 od modula elastičnosti izvornog PLA koji iznosi 1.65 GPa. Budući da su rezultati različiti od očekivanih, pri tumačenju tih rezultata mora se uzeti u obzir način ekstrudiranja filameta koji su korišteni za izradu ispitnih tijela. Epruvete iz izvornog PLA ekstrudirane su koristeći 3DEVO ekstruder, a epruvete iz recikliranog PLA ekstrudirane su koristeći veći ekstruder, marke Collin GmbH. Iz ovih rezultata, dakle, možemo postaviti jednu od mogućih hipoteza da je uzrok viših vrijednosti vlačne čvrstoće i modula elastičnosti kod recikliranog PLA upravo viša kvaliteta izrade tog filameta koristeći veći ekstruder, što bi se moglo utvrditi ili opovrgnuti daljnjim ispitivanjem. Također, mogao bi se istražiti odnos jakosti utjecaja različitih parametara u procesu recikliranja poput parametara koji su se javili u ispitivanju u ovom radu, a koji utječu na cijenu proizvoda, npr. kvaliteta procesa recikliranja u odnosu na tražena mehanička svojstva i sl, odnosno moglo bi se odrediti postoji li optimalan odnos cijene izrade predmeta od recikliranih polimernih materijala i mehaničkih svojstava tih predmeta koji bi zadovoljio potrebe tržišta. Promatrajući rezultate koji su dobiveni pri različitim temperaturama printanja epruveta također ne možemo sa sigurnošću utvrditi na koji način ti parametri utječu na rastezna svojstva PLA zbog nedosljednosti rezultata kroz dva ispitivanja. Naime, pri temperaturama koje bi trebale biti optimalne za printanje PLA, 210°C na mlaznici i 50°C na podlozi printera, rezultati ispitivanja izvornog PLA su sljedeći: vlačna čvrstoća manja je za 1,58 MPa od prosjeka i modul elastičnosti manji je za 0,13 GPa od prosjeka. Kod recikliranog PLA vrijednosti čvrstoće i modula epruveta printanih na tim temperaturama vrlo su blizu prosjeka vrijednosti čvrstoće i modula svih epruveta. Uzevši u obzir takve rezultate, jasno je da za određivanje utjecaja temperatura mlaznice i podloge na rastezna svojstva 3D printanih dijelova iz PLA treba provesti daljnja ispitivanja, odnosno ponoviti postupak sa većim brojem ispitnih tijela izrađenih na jednak način i koristeći 3D printer koji ima mogućnost bolje kontrole tih temperatura.

5 LITERATURA

- [1] EY, “3D printing: hype or game changer?,” p. 64, 2019, [Online]. Available: https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/en_gl/topics/advisory/ey-3d-printing-game-changer.pdf.
- [2] “Additive manufacturing technologies: An overview | 3D Hubs.” <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/> (accessed Aug. 06, 2020).
- [3] “fdm-3d-printing-diagram | 3 Space.” <https://3space.com/services/3d-printing/fdm/fdm-3d-printing-diagram/> (accessed Aug. 06, 2020).
- [4] PlasticsEurope, “World Plastics Materials Demand 2015 by Types,” *Plast. Mark. Res. Gr. / Consult. Mark. Ind. GmbH*, p. 8, 2015, [Online]. Available: [https://committee.iso.org/files/live/sites/tc61/files/The Plastic Industry Berlin Aug 2016 - Copy.pdf](https://committee.iso.org/files/live/sites/tc61/files/The%20Plastic%20Industry%20Berlin%20Aug%202016%20-%20Copy.pdf).
- [5] Plastics Europe and EPRO, “Plastics - the Facts 2019,” p. 38, 2019, [Online]. Available: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>.
- [6] “Photopolymer - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/Photopolymer#3D_printing (accessed Aug. 08, 2020).
- [7] M. Schmid, A. Amado, and K. Wegener, “Polymer powders for selective laser sintering (SLS),” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1664, no. May, 2015, doi: 10.1063/1.4918516.
- [8] V. Plc *et al.*, “Polyether ether ketone - Wikipedia,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Polyether_ether_ketone#Properties.
- [9] R. Hagen, *Polylactic Acid*, vol. 10. Elsevier B.V., 2012.
- [10] “Oil Consumption.” https://www.bpf.co.uk/press/oil_consumption.aspx (accessed Jul. 23, 2020).
- [11] R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, “Production, use, and fate of all plastics ever made,” *Sci. Adv.*, vol. 3, no. 7, pp. 25–29, 2017, doi: 10.1126/sciadv.1700782.
- [12] Europska komisija, “Savez za kružno gospodarstvo u području plastike : više od 100 potpisnica obvezalo se na upotrebu deset milijuna tona reciklirane plastike u novim proizvodima do 2025 .,” pp. 2018–2019, 2019.

-
- [13] EC, "A European Strategy for Plastics," *Eur. Com.*, no. July, p. 24, 2018, doi: 10.1021/acs.est.7b02368.
- [14] "Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review | Elsevier Enhanced Reader." <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0956053X09002190?token=9917C04FBDE6E434C795AD947B9B5FD2CBB96C528AF8E2398BA9D3E3FA437C5A77C8FA693B078AA9B7A3B76DF3A04002> (accessed Aug. 10, 2020).
- [15] K. Pivnenko, L. G. Jakobsen, M. K. Eriksen, A. Damgaard, and T. F. Astrup, "Challenges in plastics recycling," *Proc. Fifteenth Waste Manag. Landfill Symp. Sardinia 2015*, 2015.
- [16] B. Björkner, A. Pontén, E. Zimerson, and M. Frick, *Plastic materials*. 2011.
- [17] P. Raos and M. Šercer, "PROIZVODNJA I PRIMJENA POLIMER."
- [18] "Single Screw Extrusion – SuThai Plastic Extrusion Machinery." <https://suthaimachine.com/2016/10/25/single-screw-extrusion/> (accessed Jul. 21, 2020).
- [19] "Recycling with Stratasys: Recyclables, Reusables and Returns | Stratasys." <https://www.stratasys.com/recycling> (accessed Aug. 11, 2020).
- [20] "MDPH2 - Pellet Head Extruder – Massive Dimension." <https://massivedimension.com/collections/extruders/products/mdphe-v1-pellet-head-extruder-system> (accessed Aug. 11, 2020).
- [21] H. Cajner, "Uvod u planiranje i analizu pokusa."