

**Mina ŠIBALIĆ**

Mašinski fakultet

minasibalic@edu.ucg.ac.me

Mentor: prof. dr Aleksandar Vujović

## EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE OPTIMALNIH PARAMETARA ZA 3D ŠTAMPANJE PVA MATERIJALA KONTROLOM ADHEZIONE NAGE IZMEĐU SLOJEVA

UDK 681.625.9

**Sažetak:** „Nove tehnologije“ kao što su 3D Tehnologije, sve više se primenjuju u svetu kao jedne od vodećih metoda u procesu proizvodnje različitih složenih reinterpetacija predmeta. Potreba da se materijal za proizvodnju određenih delova promeni je proistekla razvojem tehnologije i željom da se ti predmeti unaprede, kako njihove fizičke tako i mehaničke karakteristike. Od novih materijala očekuje se da elementima pružaju veću otpornost, izdržljivost, u nekim slučajevima i elastičnost, čime se povećava rok trajanja a samim tim i upotrebnost vrednost. Pored određenih karakteristika koje se traže od novih materijala, bitno je voditi računa i o njihovom ekološkom aspektu, da li su oni pogodni za reciklažu, koliki im je životni vek, itd. Kroz ovaj rad su predstavljeni rezultati eksperimentalnog istraživanja parametara za štampanje PVA (*polyvinil alkohola*) materijala. Formiranjem seta optimalnih parametara za štampanje pomenutog materijala, formira se baza kao osnova koja će dalje biti obogaćena česticama određenog biološkog porekla u cilju dobijanja novog polimera boljih mehaničkih svojstava. Rad se bavi teorijskim i eksperimentalnim istraživanjem. Istraživački deo predstavlja opis aditivnih tehnologija kao vodećih tehnologija proizvodnje delova u Industriji 4.0, dok je cilj rada sproveden kroz eksperimentalni deo. U uvodnim poglavljima rada dat je kratak pregled dosadašnjih istraživanja tehnologija 3D štampanja sa posebnim naglaskom na 3D štampanje zasnovano na ekstruziji istopljenog filameta. Spominju se principi, izazovi i najčešće korišćeni polimeri. Poseban fokus je stavljen na PVA materijal koji se ispituje u eksperimentalnom delu rada, a koji do sada nema veliku primenu za 3D štampanje zasnovano na ekstruziji. U drugoj celini rada govori se o eksperimentalnom istraživanju i koji su to fiksni a koji varijabilni parametri. Prilikom štampanja uzoraka, varijabilni parametri su debljina sloja i temperatura na dodatnom silikonskom grejaču na glavi štampača, dok su temperatura štampanja, temperatura podloge i ostali parametri koji mogu da se podešavaju u softveru CURA u ovom istraživanju konstantni za sve uzorke. Za pripremu samog eksperimenta, korišćen je softver CURA, u kome se podešavaju ovi parametri kao i orijentacija štampanog uzorka i veoma je bitna stavka u lancu proizvodnje gotovog proizvoda, dok je za testiranje korišćen *Thony softver*. Treća celina rada se odnosi na analizu prikupljenih rezultata

i generalizacija tih rezultata u vidu formiranog zaključka. Nakon završenih ispitivanja materijala ustanovljena maksimalna sila je 135,833 N, dobijena pri parametrima štampanja koji iznose: temperatura na dodatom grejaču je između 170–180 °C i debljini sloja od 0,2 mm.

**Ključne riječi:** trodimenzionalno štampanje, PVA materijal, mehanička svojstva, optimalni parametri, ekologija

## UVOD

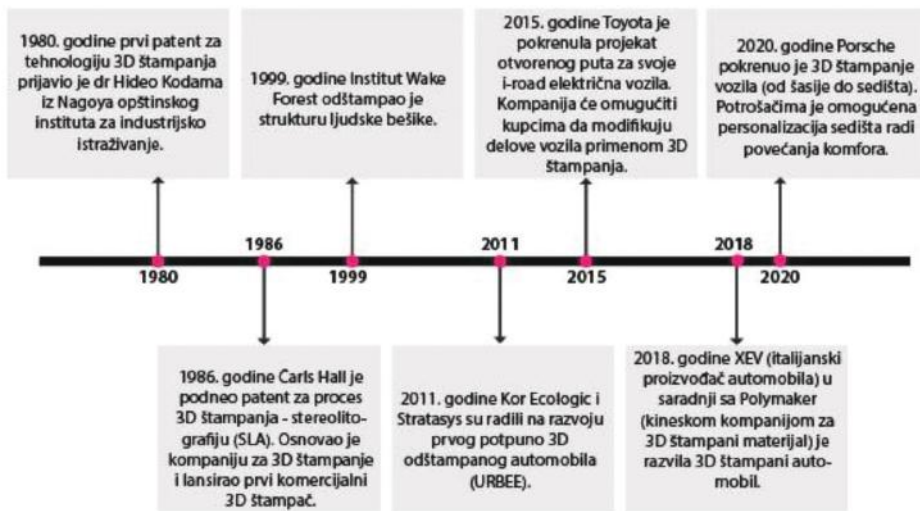
Brz razvoj aditivne proizvodnje, daje širok opseg tema za razmatranje i ispitivanja. Među tehnologijama 3D štampanja, aditivna proizvodnja koja je zasnovana na ekstruziji, poznata i kao fuzionisano modeliranje taloženjem (FDM) ili proizvodnja fuzionisanih filamenata (FFF), jedan je od najčešće korišćenih procesa. Postoji potražnja za ciljanim razvojem materijala za 3D štampanje zasnovano na ekstruziji (Jin, 2020). U ovom kontekstu, ovaj rad će pokriti postupak eksperimentalnog istraživanja optimalnih parametara već postojećeg materijala za 3D štampanje, čiji će se rezultati kasnije koristiti u svrhu formiranja novog materijala na bazi prirodnih čestica. Sa aspekta ekologije, ovo je takođe, veoma bitna tema, jer se bavi razvijanjem polimera za 3D štampanje od biološkog materijala, koji je mnogo pogodniji za reciklažu i njegovo kasnije tretiranje, nego što su to PLA, PETG ili neka druga plastika.

Aktuelna istraživanja, akcenat stavljaju na detaljnije objašnjenje osnova aditivnih tehnologija, ispitivanje novih materijala i adekvatnost njihove primene u različitim industrijama. Doktorska disertacija Minde Jin *Material development for extrusion-based 3D printing* iz 2020. godine, daje uvid u različite 3D tehnologije, kao i jedno zasebno poglavlje koje je skoncentrisano na trodimenzionalnom štampanju na bazi ekstruzije, koji su to benefiti ove tehnologije kao i njeni nedostaci. Naredno poglavlje u knjizi je bazirano na polimerima koji se koriste u tehnologiji štampanja ekstruzijom (Jin, 2020).

Kroz dostupnu literaturu provlače se objašnjenja o različitosti primene aditivnih tehnologija, kao i koju glavnu ulogu u industriji one imaju, smanjenje vremena proizvodnje, kao i proizvodnja lakših delova. Ove teme su obrađene u knjizi *Additive Manufacturing Technologies – Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing* autora Ian Gibson, Brent Strucker i David W. Rosen (Gibson, I., Rosen, D. W., Strucker, 2010).

Primena PVA materijala za izradu medicinskih pomagala u cilju boljeg, naprednijeg i lakšeg lečenja po pacijente je kao tema obrađena u različitim naučnim časopisima. Neki od radova koji se bave ovom temom su rad koji je izdat u zborniku radova *Annals of 3D printed Medicine* „Polymeric biomaterials for 3D printing in Medicine: An overview“ autora Raffaele Pugliese, Benedetta Beltrami, Stefano Regondi, Christian Lunetta iz 2021. godine (Pugliese, R., et al. 2021), rad autora Jeff Mason, Sarah Visintini i Teo Quay, „An Overview of Clinical Applications of 3D Printing and Bioprinting“ (Mason, Visintini and Quay, 2016) i deset godina

star rad koji je izdat u časopisu *Ultrasound in medicine and biology* „Current and emerging applications of 3D printing in medicine“ autora Chya-Yan Liam, Murat Guvendiren (Liaw, C., Guvendire, 2017), što pokazuje da se na primeni 3D tehnologija intenzivno radi i konstantno se teži ka njenom poboljšanju. Na Slici br. 1, prikazana je vremenska prava razvoja trodimenzionalnih tehnologija.



Slika 1. Dijagram vremenske linije razvoja trodimenzionalnih tehnologija

Nedavna dostignuća u procesima aditivne proizvodnje takođe, su tema aktuelnih istraživanja. Održive tehnologije su od vitalnog značaja, u šta se ulažu veliko vreme i novac. U današnje vreme, 3D štampa je prihvaćena od strane skoro svih industrija, što ukazuje na povezanost industrije i tehnologije. Mnoge studije su pokazale da su nove tehnologije promenile metode za razvoj određenih proizvoda. Jedan od radova koji ukazuje na to je rad grupe autora John Y. Zhang, Janam K. Pandya, David Julian McClements, Jiakai Lu i Amanda J. Kinchla, *Advancements in 3D food printing: a comprehensive overview of properties and opportunities* (Zhang *et al.*, 2022). Trodimenzionalno štampanje se velikom brzinom razvija i trenutno ima veliki broj novih tipova 3D štampača koji se uključuju u proizvodnju. Rad iz 2020. godine, pod nazivom *Overview on Lithium-Ion Battery 3D-Printing By Means of Material Extrusion* autora A. Maurel, S. Grugeon, M. Armand, B. Fleutot, Matthieu Courty, K. Prashantha, C. Davoisne, H. Torrtajada, S. Panier i L. Dupont (Maurel *et al.*, 2020), kroz detaljan opis različitih tehnologija 3D štampe, upućuje ka sledećoj generaciji litijum-jonskih baterija, koje su dobijene tehnologijom ekstruzije materijala.

Da bi se ispunila očekivanja koja su nametnuta poboljšanjem tehnologije, napretkom industrije i dr. potrebno je da postoje adekvatni materijali koji mogu da idu u korak sa prethodno navedenim istraživanjima. Karakteristike materijala i njegova primena u određenim industrijama pravi veliku razliku. Zbornik radova *Procedia Manufacturing* je 2019. godine, u svom izdanju publikovala rad pod

nazivom „An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications“ autora N. Shahrubudin, T. C. Lee i R. Ramlan 2017. godine (Shahrubudin, Lee and Ramlan, 2019). U časopisu *Composite Structures* je izdat rad autora Pedram Parandoush i Dong Lin, na temu „A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites“ (Parandoush, P., Lin, D., 2017) koji dokazuje da su kompozitni materijali omogućili proizvodnju veoma kastomizovanih delova sa znatno poboljšanim mehaničkim karakteristikama u poređenju sa već postojećim polimerima. Časopis *Journal of Biological Engineering* izdao je rad na temu „Recent advances in 3D printing of biomaterials“ autora Helena N Chia i Benjamin M Wu, 2015. godine (Chia and Wu, 2015).

Automobilska industrija se svakodnevno suočava sa novim izazovima, novi trendovi dizajna i tehnološka primena podstiču kompanije da razvijaju nove modele. Smanjenje vremena za izlazak na tržište jednako je važno kao i smanjenje vremena za pripremu alata. O ovome govori rad autora R. Leal, F. M. Barreiros, L. Alves, F. Romeiro, J. C. Vasco, M. Santos i C. Marto, na temu „Additive manufacturing tooling for the automotive industry“ koji je objavljen u časopisu *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2017. godine (Leal, R., et al. 2017). Master rad na temu *Design and fabrication of a new class of cutting tool material using additive manufacturing* iz 2016. godine (Baldock, 2016), ima za cilj da izvrši uticaj u oblasti tehnologije proizvodnje alata kroz eksploataciju aditivne proizvodnje i generisanje novih materijala. Upotreba aditivne proizvodnje za stvaranje hibridnog alata za sečenje sa potpuno novom makrostrukturom predstavlja značajan pomak od trenutne prakse, nosi visok stepen mogućnosti i zbog toga je inovativno.

Godine 2011, Thomas Campbell, Christopher Williams, Olga Ivanova i Banning Garrett su svojim naučnim radom postavili pitanje *Could 3D Printing Change the World?* (Campbell, T., et al. 2011)

Aditivne tehnologije danas dobijaju na popularnosti delom zbog velikog broja jeftinih 3D štampača koji su dostupni na tržištu, a delom i zato što je 3D štampanje postalo popularno ne samo kod prosečnih potrošača i malih preduzeća, već i kod velikih automobilskih i vazduhoplovnih kompanija. Ova tehnologija je jedna od najbrže rastućih industrija i očekuje se da će ona dovesti do promene paradigme u prerađivačkoj industriji sa značajnim uticajima na nacionalnu i globalnu ekonomiju. Paralelno sa automatizacijom, aditivne tehnologije se smatraju kamenom temeljcem trenutne industrijske faze Industrija 4.0 (Baldock, 2016). Prednost vremena se ne odnosi samo na vreme koje je potrebno za samu izradu određenog dela. Ubrzanje celokupnog procesa proizvodnje se oslanja na činjenicu da se koriste kompjuteri tokom celog procesa proizvodnje. Aditivne tehnologije karakteriše rečenica *Ono što vidiš to i proizvodiš* (Gibson, I., Rosen, D. W., Strucker, 2010).



**Slika 2.** Šematski prikaz procesnog lanca aditivnih tehnologija (1. 3D CAD Model; 2. CAD Model u softveru – slicer; 3. Dodavanje i taloženje sloj po sloj)

Predmet istraživanja su mehaničke karakteristike PVA materijala, u zavisnosti od različitih parametara pri FDM (*fused deposition modeling*) metodi štampanja. Najvažniji parametri za 3D štampanje su visina sloja, temperatura štampanja, hlađenje tokom štampanja, prečnik mlaznice, brzina mlaznice, protok materijala, procenat popunjavanja unutrašnjosti predmeta, širina zida, temperatura sloja, temperatura okoline i orijentacija radnog komada. Varirajući parametri u ovom istraživanju su visina sloja i temperatura dodatog grejača. Tretman grejanja, preko dodatog silikonskog grejača na glavi, ima uticaj na poboljšanje zateznih svojstava i smanjenje mehaničkih anizotropija FDM štampanih delova.

Cilj ovog rada je optimizacija parametara za 3DP PVA materijala, koji će se kasnije koristiti kao osnova za novi bio-polimer. PVA materijal ima veliku raznovrsnost upotrebe, ali kada je u pitanju FDM proces, on je još uvek u „fazi prilagođavanja“. Optimizacija parametara za 3D štampanje će omogućiti inženjerima da dalje rade na materijalu uz dodavanje različitih komponenti u bazu.

Ovaj rad postavlja tri hipoteze i jedno istraživačko pitanje, koji redom glase:

**Prva hipoteza glasi:** *Vlažnost materijala ima značaj kada je u pitanju kvalitet odštampanog dela i mehaničke karakteristike PVA materijala.* Rezultati istraživanja pokazuju da je najveća zatezna čvrstoća dobijena od PVA elektronavrtenih nanovlakana pri najnižoj relativnoj vlažnosti (Raksa, A., *et al.* 2021).

**Druga hipoteza glasi:** *Snaga između slojeva eksponencijalno raste sa smanjenjem debljine sloja.* Pretpostavka je da sa manjom debljinom sloja može da se dobije veća snaga između slojeva, zbog dužeg vremena štampanja, samim tim i dužoj izloženosti temperaturi.

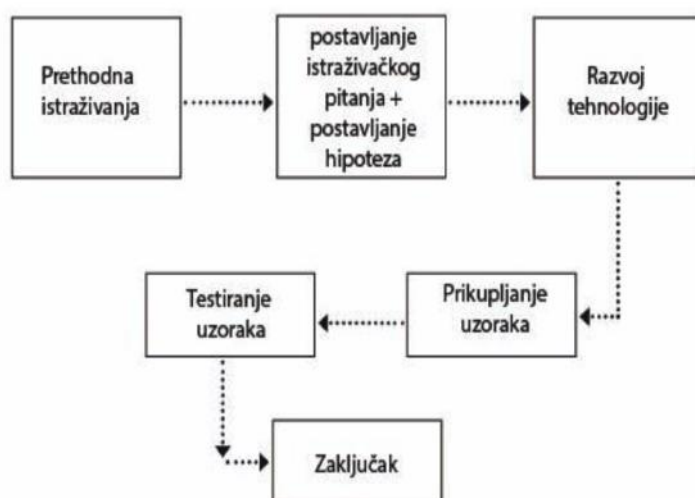
**Treća hipoteza glasi:** *Dodavanjem toplote zatezna čvrstoća PVA materijala se povećava.* Analogno drugoj hipotezi, dodatni grejač na glavi štampača treba da poboljša mehaničke karakteristike, tačnije, da poveća zateznu čvrstoću.

Istraživačko pitanje glasi: *Koji je optimalni odnos parametara za dobijanje najveće adhezione sile između slojeva?*

Celokupni pregled dosadašnjih istraživanja pokazuje raznolikost upotrebe aditivnih tehnologija, kao i različite materijale koji se primenjuju. Predmet i cilj ovog rada jesu upravo eksperimentalno istraživanje koje služi da pomogne u pronalaženju osnove za novi ekološki filament.

## METODE

Istraživanje koje će biti prikazano kroz ovaj rad čine teorijski i eksperimentalni deo. Kroz teorijski deo istraživanja će se analizirati postojeća teorijska osnova kao i rezultati dobijeni eksperimentalnim istraživanjem prikazani kroz dostupnu literaturu. Fokus teorijskog istraživanja će biti na pregledu literature dosadašnjih zaključaka o karakteristikama PVA materijala, aditivnih tehnologija 3D štampanja kao i analiziranju konkretnih prednosti i mana FDM metode. Eksperimentalni deo rada sproveden je kroz štampanje 3D uzoraka uz promenu parametara i testiranje adhezione snage između slojeva na specijalizovanoj mašini za merenje zatezne čvrstoće. Na Slici br. 3, je predstavljen grafički prikaz metodologije izvođenja rada.



Slika 3. Grafički prikaz metodologije izvođenja rada korak po korak

Metodologija sprovođenja istraživanja je podeljena na segmente. Prvi segment daje kratak pregled dosadašnjih istraživanja tehnologija 3D štampanja sa naglaskom na metodu 3D štampanja ekstruzijom zagrejanog materijala (FDM). Drugi deo govori o eksperimentalnom istraživanju i fiksnim ili promenljivim parametrima. Treća celina se odnosi na analizu prikupljenih rezultata i sumiranje u postupku definisanja zaključka.

Kako bi se dobio što verodostojniji rezultat neophodan je dovoljan broj uzornih primeraka tokom čije štampe će biti varirani parametri. Minimalan broj uzornih primeraka za dobijanje uporedivih rezultata variranih parametara je četrdeset i pet. Iskustvo prethodno sprovedenog istraživanja su pokazala da je dodavanje toplotne energije preko silikonskog grejača nestabilno. Neophodan je konstantni nadzor tokom sprovođenja štampe uzornih primeraka zbog čega je očekivano vreme štampanja ukupnog broja uzoraka  $\approx 100$  sati. Analiza postojećih teorijskih osnova ukazuje na tendenciju PVA materijala da prikuplja vlagu iz vazduha, zbog čega je neophodno unapred predvideti način čuvanja i tretiranja materijala kada se

ne koristi za štampanje. Kroz eksperimentalnu studiju na mašini specijalizovanoj za merenje zatezne čvrstoće, biće merene maksimalne sile pri kojima se slojevi delaminiraju.

Kvantitativni podaci dobijeni tokom eksperimentalnog merenja će biti sistematizovani i generalizovani kako bi se dobio grafički prikaz uticaja varijabilnih parametara na adhezionu snagu između slojeva.

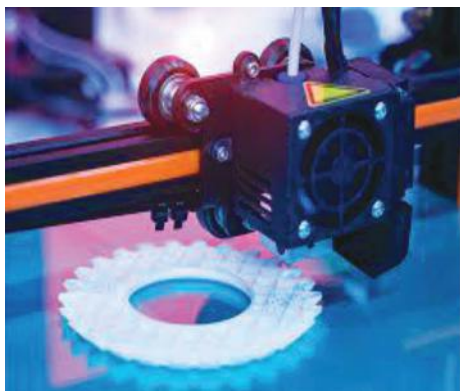
## IZVOĐENJE EKSPERIMENTA I REZULTATI

Procesni lanac izvođenja eksperimenta prikazanog u ovom radu se sastoji iz tri dela, a to su:

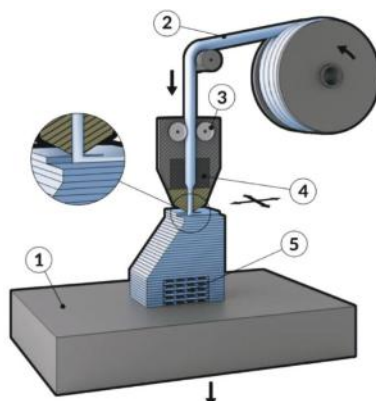
- priprema materijala i uzoraka za štampanje;
- štampanje epruveta – uzoraka;
- testiranje.

### Metoda 3D štampanja ekstruzijom zagrejanog materijala (fused deposition modeling metoda – FDM metoda)

Modeliranje fuzionog taloženja (FDM) razvijeno je kasnih 1980-ih godina. Ovim postupkom nanosi se nit rastopljenog materijala, obično od plastičnih filamenata, na podlogu uz upotrebu pokretne glave. Materijal se zagreva do temperature malo iznad tačke topljenja unutar glave, zatim se ekstrudira kroz mlaznicu na podlogu i hladi dok se ne očvrstne i formira sloj (Crump, 1991).

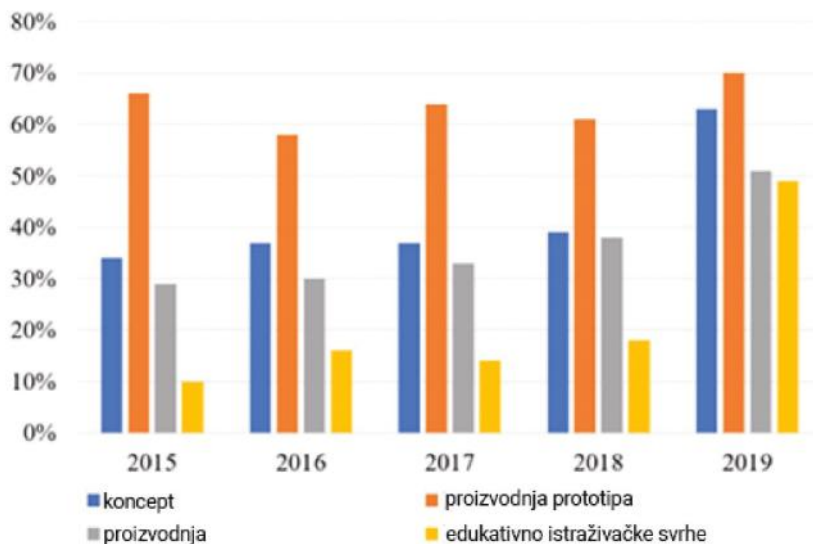


Slika 4. FDM 3D štampač



Slika 5. Delovi 3D štampača: 1) krevet, 2) filament, 3) glava štampača, 4) grejač glave, 5) odštampani deo

FDM je jedna od najbrže rastućih metoda aditivne tehnologije koja se koristi za štampanje PVA materijala. Trodimenzionalno štampanje, kontinuirano poboljšava tehnologiju aditivne proizvodnje, štampanjem lakih i kompleksnih struktura, koje se teško dobijaju uz pomoć drugih proizvodnih tehnologija. Podela tehnologije aditivne proizvodnje od 2015. godine do 2019. godine, kroz izradu prototipa, proizvodnju, istraživački sektor i proizvodnju mehaničkih delova je grafički prikazano na Slici br. 6. Vidljivo je da se 3D štampanje najviše koristi za proizvodnju prototipa tokom svih godina, a da je rast ove tehnologije u konkretnoj proizvodnji još uvek na nižem nivou.



**Slika 6.** Procentualna distribucija aditivne proizvodnje (AM) od 2015. Do 2019. Godine u proizvodnji prototipa, industriji istraživanja i obrazovanja i proizvodnji mehaničkih delova

Unapređenjem tehnologije aditivne proizvodnje, ova metoda se proširila na medicinu, vazduhoplovstvo, autoindustriju, hranu i druge inženjerske industrije, zbog velikih prednosti u vidu proizvodnje kompleksnih delova. Cenovno je prihvatljivije, kratko vreme proizvodnje i mogućnost ponavljanja. Izvodljivost proizvodnje složenog dizajna, isplativost, kratko vreme isporuke i ponovljivost su karakteristike koje se traže kada je u pitanju korišćenje aditivne proizvodnje.

### Priprema materijala i uzoraka za štampanje

PVA je hidrofilni sintetički plimer sa polukristalnom, ravnom cik-cak strukturom i dobrim mehaničkim svojstvima (Musa, B. H., Hameed, N. J. 2020). Rastvorljiv je u vodi zbog svog povišenog polariteta, netoksičnosti i visoke biokompatibilnosti (Pervez, M. N., *et al.* 2020). Ukoliko se PVA materijal ostavi na vazduhu dugo, može postati vlažan, zbog čega je bitno da se materijal osuši svaki put pre upotrebe. Prilikom izvođenja ovog eksperimenta, materijal je sušen na 40 °C preko noći (u periodu od 18:00h i 7:30h). Na Slici 7, je prikazan dehidrator.





a)

b)

Slika 7. a) upravljačka tabla dehidratora podešena na 40 C; b) PVA filament postavljen u dehidrator

Sama priprema uzoraka pred štampanje izvršena je u softveru CURA koji je napravljen kao podrška 3D štampačima koji se uglavnom koriste prilikom FDM štampanja. Veliki broj proizvođača uz svoje 3D štampače prodaju softvere koji su projektovani od strane njihovih inženjera. CURA je aplikacija otvorenog koda, što omogućava korisnicima integraciju sa CAD softverima drugih proizvođača. CURA je preferirani softver za 3D štampanje za Ultimaker 3D štampače, ali kao što je već rečeno, može da se koristiti i sa drugim štampačima. Ultimaker CURA radi tako što uslovno rečeno seče datoteku modela korisnika na slojeve i generiše G kod, koji je specifičan za određeni štampač. Kada se završi, G kod se može poslati na štampač za proizvodnju fizičkog objekta.

Različita podešavanja u softveru utiču na određene karakteristike odštampanog dela. U zavisnosti od svrhe dela koji štampano, potrebno je podesiti parametre.

Parametri koji se podešavaju:

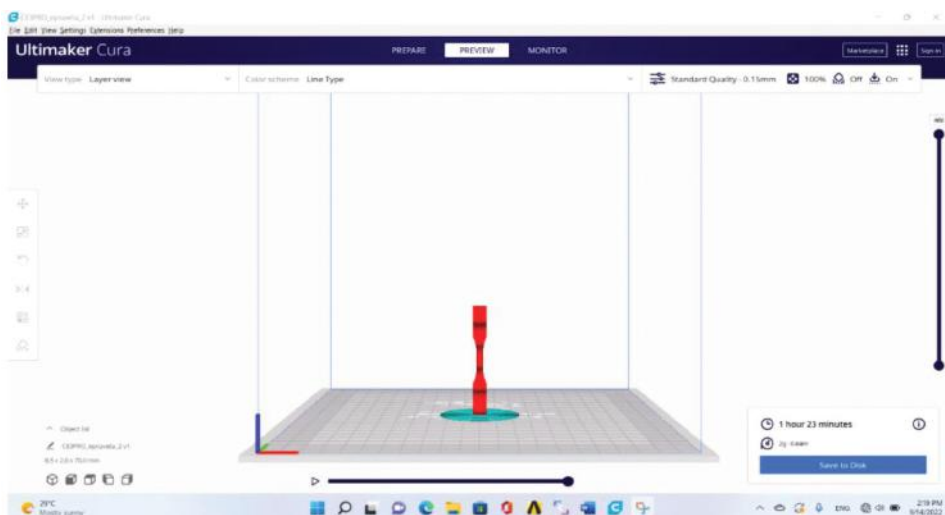
- Podešavanja štampanja (*Print Settings*) – *super quality/dynamic quality/ standard quality/low quality*.
- Kvalitet (*Quality*) – visina sloja (sa smanjenjem debljine sloja, povećava se vreme za koje je deo gotov, poboljšava se rezolucija odštampanog dela i obrnuto).
- Zidovi (*Walls*) – debljina zida (debljina zida u horizontalnom pravcu, podeljen sa širinom linije zida definiše broj zidova), broj linija zidova,

horizontalna ekspanzija (količina ofseta primenjena na sve poligone u svakom sloju, pozitivne vrednosti mogu kompenzovati prevelike rupe, negativne vrednosti mogu kompenzovati premale rupe).

- Krajnja/početna debljina (*Top/Bottom thickness*) – debljina početnog/krajnjeg sloja u printu. Taj broj podeljen sa visinom sloja definiše broj krajnjih/početnih slojeva.
- Popunjenost (*Infill*) – linija i *zig-zag infil* naizmenično menjaju smer sloja, smanjujući potrošnju materijala. Određeni patenti se štampaju u potpunosti na svakom sloju, dok se kod nekih menja način štampanja da bi se obezbedila jednaka distribucija snage u svakom pravcu.
- Materijal (*Material*) – temperatura štampanja i temperatura kreveta.
- Brzina (*Speed*) – brzina štampanja.
- Putanja (*Travel*) – *z hop* povlačenje (kada se vrši povlačenje tada se krevet spušta. Pojavljuje se razmak između kreveta i glave, što sprečava slučajno udaranje glave o print).
- Hlađenje (*Cooling*) – omogućava hlađenje printa dok se on štampa. Ventilatori poboljšavaju kvalitet printa.

Pripremljen CAD model uzorka, sačuvan je u STL formatu i uvozi se u Softver CURA (*slicer*), u kome se podešavaju parametri za štampanje. U ovom softveru takođe možemo da vidimo gabaritne mere predmeta koji štampamo i ukoliko te mere nisu adekvatne, moguće je da predmet povećamo tj. smanjimo u softveru. Sem veličine samog predmeta, možemo da menjamo njegovu orijentaciju.

Orijentacija prilikom štampanja je veoma bitna. U zavisnosti od toga, za šta nam je predmet namenjen, postavljamo ga tako da ima što manje potrebe za *support*-om. Nekada je moguće izbeći potrebu za *support*-om u celosti ako je predmet adekvatno orijentisan. Sa druge strane orijentacija je veoma bitna kada su u pitanju štampani uzorci namenjeni za određeno testiranje. U zavisnosti od toga šta testiramo, treba voditi računa kako se model orijentiše. U ovom radu za testiranje adhezije snage između slojeva, tj. znamo da se testira delaminacija slojeva, jasno je da slojevi treba da budu upravni na pravac istezanja, tj. sile. U slučaju da merimo izduženje slojeva, tada bi orijentacija bila drugačija, sloj bi bio postavljen u pravcu u kome deluje sila.



Slika 8. Vertikalno postavljena epruveta za štampanje

Materijal se postavlja za štampanje neposredno pre početka štampanja u *Polybox* kutiju koja služi da napravi određenu atmosferu oko materijala kako bi on mogao da se koristi duži vremenski period bez sušenja. Na Slici br. 9, prikazan je *Polybox*. Slika 10 prikazuje radno okruženje.



Slika 9. Polybox kutija



Slika 10. Radno okruženje

Takođe, pored same pripreme uzoraka za štampanje u odgovarajućem softveru, potrebno je izvršiti kalibrisanje 3D štampača i pripremiti ga za štampanje. Loša kalibracija kreveta, ne može da da dobar print. Ukoliko je glava štampača previše daleko, ili previše blizu, materijal se neće lepiti za podlogu. Dalje, ako je krevet pod nekim minimalnim uglom, na jednom delu će se taložiti više materijala nego na drugom delu. Greške ovog tipa mogu da dovedu do greške u samom startu štampanja, kada dobijeni proizvod nema nikakav oblik, tj. izgleda kao opiljak, što je prikazano na Slici broj 11.



Slika 11. Opiljak – greška u pripremi parametara za štampanje i loše kalibracije 3D štampača

### Štampanje epruveta – uzoraka

Uzorci su se štampali na *Ender Pro-3 3D štampaču*. U prethodnom poglavlju, naglašeno je da se materijal postavlja na 3D štampač neposredno pred njegovo korišćenje. Razlog zbog koga se on tada postavlja i po završetku štampanja opet skida je sklonost PVA materijala ka absorbovanju vlažnosti iz vazduha. Konstantnim skidanjem i postavljanjem filameta nam omogućava da materijal zadrži svoju vlažnost (u ovom slučaju suvost) što duže. Prvobitno materijal je postavljen na štampač, gde je bio izložen trenutnim uslovima vlažnosti. Uzorci odštampani tada su testirani, ali nisu uključeni u celokupnu analizu rezultata. Nakon nekoliko odštampanih uzoraka, materijal je postavljen u, gore pomenuti, *Polybox* koji služi da održi vlažnost materijala tokom štampanja. Prilikom štampanja uzoraka varirani su sledeći parametri:

- debljina sloja i
- temperatura na dodatom grejaču na glavi štampača;

dok su nepromenljivi parametri:

- temperatura glave,
- temperatura kreveta,
- gustina popunjenosti uzorka.

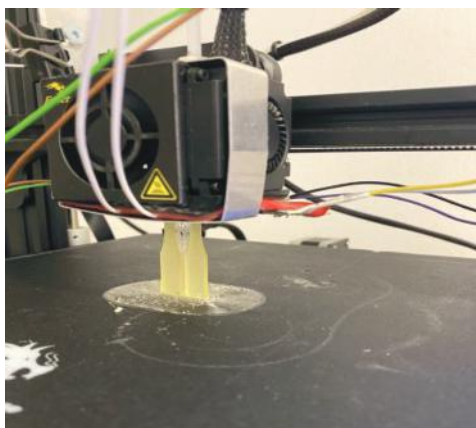
U Tabeli broj 1, su prikazani parametri za štampanje.

Tabela 1. Parametri za štampanje uzoraka po broju serije

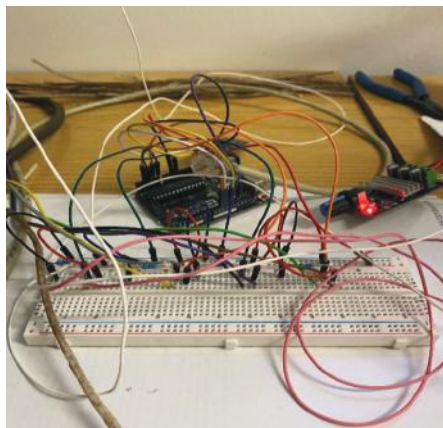
Broj testa	Temperatura glave [C]	Temperatura kreveta [C]	Gustina popunjenosti [%]	Visina sloja [mm]	Temperatura grejača [C]
1	210	30	100	0.1	150–160
2	210	30	100	0.15	150–160
3	210	30	100	0.2	150–160
4	210	30	100	0.1	170–180
5	210	30	100	0.15	170–180
6	210	30	100	0.2	170–180
7	210	30	100	0.1	130–140
8	210	30	100	0.2	130–140
9	210	30	100	0.15	130–140

Temperatura je uzimana u rasponu od 10 stepeni iz razloga što je dodati silikonski grejač bio nestabilan. Ovo je potencijalno moglo da dovede do greške kod kasnijeg testiranja zatezne čvrstoće.

Na Slici broj 12 i 13, su prikazani dodati silikonski grejač na glavi štampača i arduino mikrokontroler preko koga se on podešava.



Slika 12. Grejač na glavi štampača



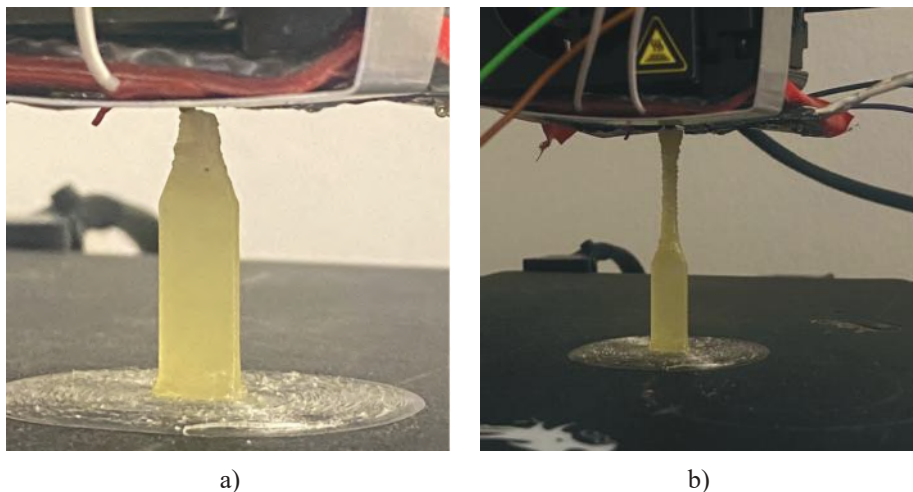
Slika 13. Arduino mikrokontrolera

## Testiranje uzoraka

Prilikom prvog štampanja uzorka, dobijena epruveta nije bila zadovoljavajućeg kvaliteta, tj. nije bila za upotrebu. Potrebno je pronaći najadekvatniji način za štampanje (podesiti vreme čekanja, najkraće vreme za koje sme da se završi jedan sloj pre početka štampanja sledećeg i dr.) jer je dolazilo do greške, tj. neadekvatno odštampane epruvete.

Razlog zbog koga je prvi uzorak bio neodgovarajući je veličina same epruvete, previše je mala, tj. tokom štampanja veoma brzo se prelazi na sledeći sloj. Glava štampača dodatno zagreva prethodne slojeve i sa povećanjem visine epruvete, gubi se njen predviđen oblik. U sledećoj iteraciji podešeno je minimalno vreme jednog sloja, to je minimalno vreme koje glava štampača treba da provede u jednom sloju, pre prelaska na drugi. To funkcioniše tako da pod uslovom da glava završi štampanje određenog sloja pre isteka zadatog vremena, treba da se udalji i da sačeka početak sledećeg. Ova funkcija je neznatno poboljšala krajnji izgled epruvete.

Na Slici broj 14, se vidi da u trenutku štampanja uzanog dela (vrata) epruvete, dolazi do lošeg taloženja materijala. Razlog zbog koga se ovo dešavalo je što materijal nije mogao da se ohladi jer ga je konstantno zagrevao novi sloj, površina jednog sloja je veoma mala. Podešavanjem različitih vremena čekanja nije postignut zadovoljavajući kvalitet.



Slika 14. Štampanje epruvete

Na Slici broj 15, je prikazana gornja polovina epruvete i kako se menja njen oblik prilikom pregrevanja materijala, dok je na Slici broj 16, prikazana donja polovina epruvete čije je štampanje prekinuto u momentu pregrevanja materijala. Na istoj slici se mogu videti crne tačke koje ukazuju na izgoreli materijal.



**Slika 15.** Gornja polovina epruvete sa greškom



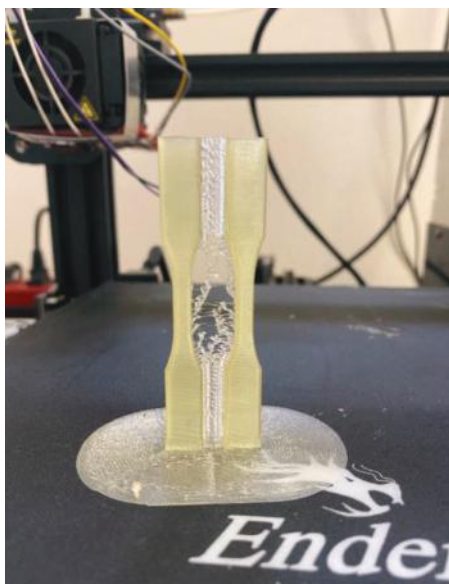
**Slika 16.** Donja polovina epruvete, do momenta pojavljivanja greške

Menjanjem različitih vremenskih parametara, nakon nekoliko iteracija, nije dobijen adekvatan izgled epruvete. Problem lošeg printa, prevaziđen je dodavanjem još jedne epruvete u pripremnom softveru CURA, koja je imala za cilj da odmakne glavu štampača od prve epruvete i da joj da prostor da se ohladi koliko je potrebno. Na Slici broj 17 su prikazane dobra (gornja) i loša (donja) epruveta.

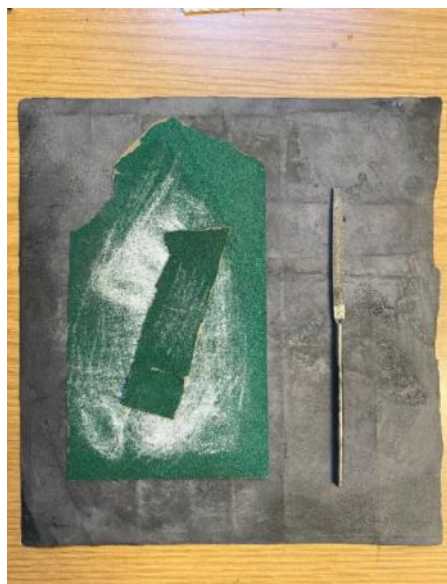


**Slika 17.** Poređenje dobre i loše epruvete

U zavisnosti od variranih parametara, bilo je potrebno da opcija *retract filament* (opcija koja definiše da li će između dve epruvete, u praznom prostoru, filament da se uvuče u glavu ili će slobodno praviti paukovu mrežu) bude uključena tj. ugašena. Istovremeno se pokazalo bolje da je ta opcija uvek ugašena. To dovodi do potrebe za postprocesuiranjem epruvete, njihovo razdvajanje i čišćenje.



Slika 18. Odštampan par epruveta



Slika 19. Pribor koji je korišćen za postprocesuiranje

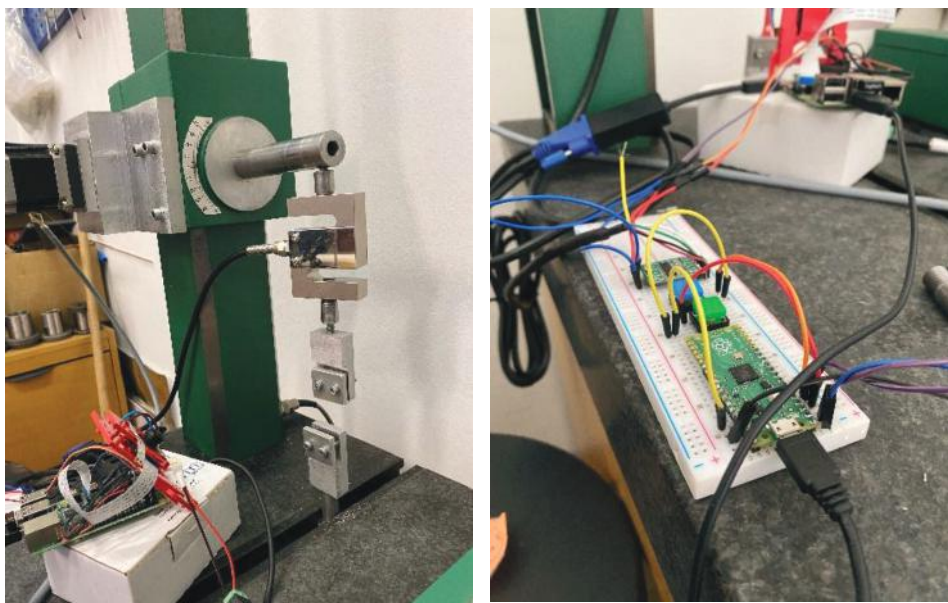
Mnogi faktori mogu biti uzrok za loš print. Zbog toga postoji procedura koju je potrebno ispratiti, da bi se verovatnoća nastanka greške smanjila na minimum, jer greške pri štampanju značajno dodaju ukupnom vremenu koje je potrebno za štampanje.

### Testiranje uzoraka

Testiranje adhezione snage između slojeva vršeno je na specijalno napravljenoj mašini koja meri maksimalnu snagu pri istezanju uzoraka. Mašina je prvobitno projektovana za upotrebu do sile od 500 N. Teoretski, test uređaji izdržavaju do 1500 N, međutim, sa trenutnim napajanjem od 24 V mašina dostiže približno 450 N. Ukoliko postoji potreba za većom silom, dva izvora mogu da se kombinuju sa naponom od 32 V, kada je maksimalna sila izmerena bila 830 N. To nije preporučljivo za ovu mašinu jer je koračni motor već prilično napregnut.

Ograničenje je kontroler motora, koji prenosi samo 30 V i 2,5 A, motor se može napajati sa 4 A (maksimalni napon nije dat, ali je preporučeno napajanje koje radi za takav motor 70 V). Pri većim naponima bi se postigle veće sile. Sledeće ograničenje je merač sile, koji je dimenzionisan za merenje sila do 1000 N. Čeljusti na mašini su projektovane za ispitivanje filameta debljine 1,75 mm, tako da su na ispitnim primercima većih dimenzija moguća opterećenja na savijanje jer sile na viljušci nisu centrirane. Kontroler koračnog motora je povezan na *RRP Pico*. RPI 4 indirektno uzima u obzir merenje sile. Na desktop računaru se prikazuje kako raste sila i u momentu pucanja epruvete ta sila pada na 0 N, tako da se uzima maksimalna vrednost koju je sila dostigla pre pojavljivanja nule na ekranu. Na Slici 20, je prikazana mašina na kojoj je izvršeno testiranje.





a)

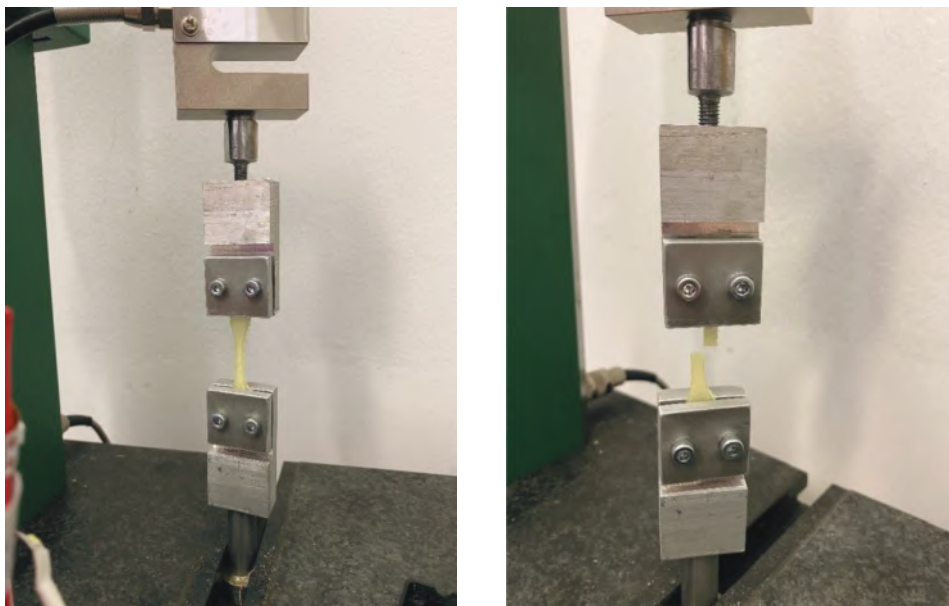
b)

Slika 20. Mašina za istezanje, korišćena za testiranje

Nedostatak na ovoj mašini je taj što viljuške za prihvatanje uzoraka nisu centrirane i može doći do uvijanja samog uzorka prilikom njegovog stezanja. Kako su uzorci po prirodi krhki nakon štampanja, dešavalo se da tokom stezanja, usled nepažnje, dolazi do pucanja uzorka. Viljuška se skuplja i širi preko arduino mikrokontrolera pritiskanjem na zeleni, tj. plavi taster.

Isti parametri za štampanje su ponovljeni šest puta, kako bi iz dobijenih rezultata mogao da se izvuče zaključak, to jeste da se potvrde ili opovrgnu postavljene hipoteze i da se da odgovor na istraživačko pitanje.

Kao što je već rečeno, varirani parametri su debljina sloja i temperatura na dodatom grejaču na glavi štampača. Temperatura na grejaču bila je kontrolisana preko *Arduino mikrokontrolera*, koji je očitavao temperaturu, kao i preko točkića koji je služio da se temperatura promeni. Proces je bio veoma nestabilan, što se tiče temperature. Planirano je bilo da se uzimaju uzorci za tačno određenu temperaturu, ali zbog nestabilnosti, opseg temperature je 10 stepeni. Na Slici 21, prikazan je uzorak na mašini pre i posle istezanja.



a)

b)

Slika 21. Postavljena epruveta a) pre testiranja; b) nakon istezanja

## DISKUSIJA

Testirano je šest uzoraka za svaki broj serije iz Tabele 1. U Tabelama od 2 do 10, prikazani su dobijeni rezultati za svaku seriju.

Tabela 2. Vrijednosti izmerene sile za uzorke iz prve serije

Broj epruvete [n]	Sila [N]
1.1	111.9711
1.2	118.7113
1.3	Pukla prilikom stezanja
1.4	116.5833
1.5	111.7161
1.6	110.916

**Tabela 3.** Vrednosti izmerene sile za uzorke iz druge serije

Broj epruvete [n]	Sila [N]
2.1	88.3261
2.2	86.5460
2.3	90.2472
2.4	98.274
2.5	93.9943
2.6	90.7386

**Tabela 4.** Vrednosti izmerene sile za uzorke iz treće serije

Broj epruvete [n]	Sila [N]
3.1	128.9865
3.2	133.1641
3.3	123.4704
3.4	125.3571
3.5	132.9238
3.6	130.7503

**Tabela 5.** Vrednosti izmerene sile za uzorke iz četvrte serije

Broj epruvete [n]	Sila [N]
4.1	117.6065
4.2	113.5536
4.3	122.1859
4.4	123.4025
4.5	118.2709
4.6	125.4251

**Tabela 6.** Vrednosti izmerene sile za uzorke iz pete serije

Broj epruvete [n]	Sila [N]
5.1	92.5016
5.2	95.4352
5.3	Pukla prilikom stezanja
5.4	90.9409
5.5	98.3559
5.6	100.353

**Tabela 7.** Vrednosti izmerene sile za uzorke iz šeste serije

<b>Broj epruvete [n]</b>	<b>Sila [N]</b>
6.1	125.2597
6.2	128.8517
6.3	130.7226
6.4	134.6259
6.5	132.1638
6.6	135.8333

**Tabela 8.** Vrednosti izmerene sile za uzorke iz sedme serije

<b>Broj epruvete [n]</b>	<b>Sila [N]</b>
7.1	86.0923
7.2	84.8859
7.3	87.8666
7.4	92.2694
7.5	82.2278
7.6	Pukla prilikom stezanja

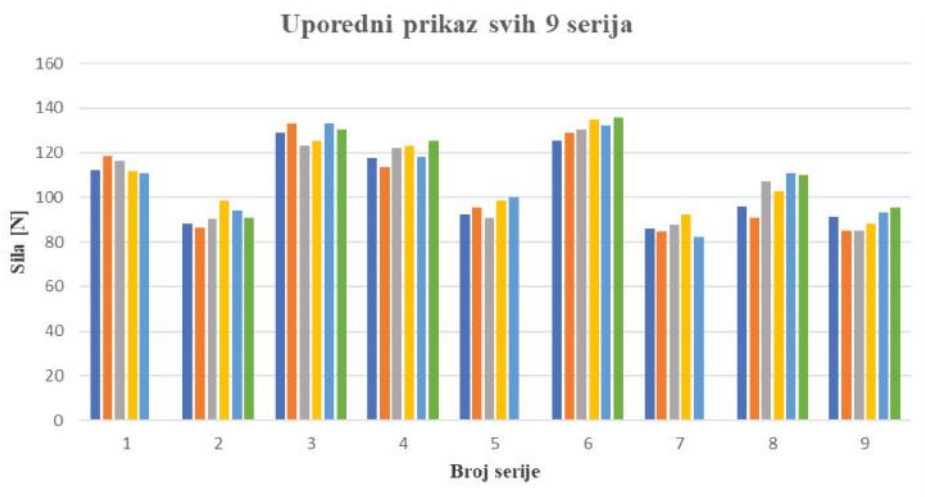
**Tabela 9.** Vrednosti izmerene sile za uzorke iz osme serije

<b>Broj epruvete [n]</b>	<b>Sila [N]</b>
8.1	95.8026
8.2	90.6935
8.3	106.8843
8.4	102.9322
8.5	110.9772
8.6	109.8734

**Tabela 10.** Vrednosti izmerene sile za uzorke iz devete serije

<b>Broj epruvete [n]</b>	<b>Sila [N]</b>
9.1	91.2871
9.2	85.1917
9.3	85.3584
9.4	87.9567
9.5	93.4562
9.6	95.6078

Iz Tabela br. 2–10, možemo da uočimo da je najveća dobijena sila postignuta tokom merenja uzoraka iz šeste serije, a to se takođe jasno vidi i sa Slike broj 22, gde je dat uporedni prikaz izmerenih sila svih uzoraka podeljenih po serijama.



**Slika 22.** Grafički prikaz izmereni sila uzoraka podeljenih po serijama

U Tabeli 11 su izdvojeni varirani parametri za koje je dobijena maksimalna sila od 135, 83 N.

**Tabela 11.** Izdvojene veličine parametara za seriju šest i maksimalna izmerena sila

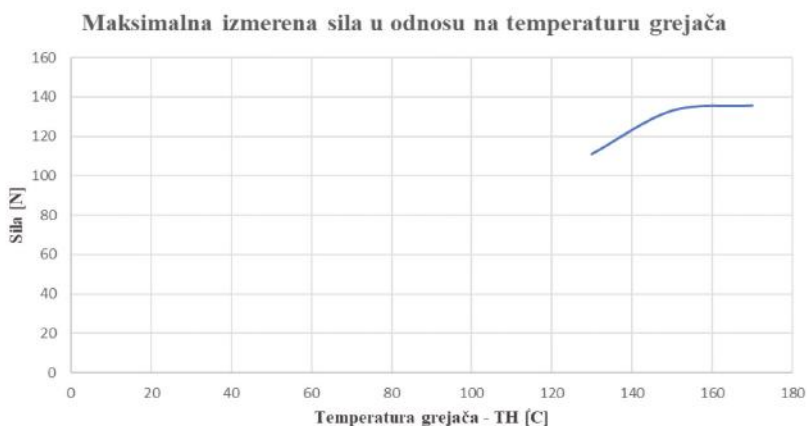
Maksimalna izmerena sila [N]	Veličine variranih parametara	
	Temperatura na grejaču [°C]	Visina sloja [mm]
135,83	170-180	0,2

Sa grafika na Slici broj 23, možemo da zaključimo da debljina sloja od 0,15 mm daje najslabiju izmerenu silu. Što govori da je delaminacija slojeva najveća u tom slučaju. Ovakav izgled grafika može da ukaže na potencijalne slabosti ovog ispitivanja, čije bi se greške svakako ispravile u daljem istraživanju.



**Slika 23.** Maksimalna izmerena sila u zavisnosti od debljine sloja

Na Slici broj 24, prikazan je grafik maksimalne izmerene sile u odnosu na temperaturu dodatog grejača. Izmerena sila za temperaturu od 130–140 °C je značajno manja od izmerenih sila za temperaturu od 150–160 °C i 170–180 °C, koje približno daju jednake rezultate.



**Slika 24.** Maksimalne izmerene sile u odnosu na temperaturu grejača

Dobijeni rezultat pokazuje da druga hipoteza, koja glasi (radi podsećanja): *Snaga između slojeva eksponencijalno raste sa smanjenjem debljine sloja*, nije potvrđena. Takođe, možemo da potvrdimo prvu i treću hipotezu koje glase po redu: *Vlažnost materijala ima značaj kada je u pitanju kvalitet odštampanog dela i mehaničke karakteristike PVA materijala* i *Dodavanjem toplote zatezna čvrstoća PVA materijala se povećava*.

Budući pravci istraživanja će biti usmereni na davanje kompletnog odgovora na istraživačko pitanje *Koji je optimalni odnos parametara za dobijanje najveće adhezivne sile između slojeva*.

## **ZAKLJUČAK**

Aditivna proizvodnja (AM) se razvija dalje od same izrade prototipa kako bi omogućila proizvodnju delova za krajnju upotrebu u velikom broju aplikacija.

Uticaj nestabilnosti dodatog silikonskog grejača na tačnost rezultata nije ispitana, ali se ona uzima u obzir za dalji tok istraživanja. Za ispitivanje koje je sprovedeno u ovom radu, korišćeno je više različitih programa.

Mehaničke karakteristike delova odštampanih nekom od aditivnih tehnologija su veoma bitne i testiraju se za svaki materijal ponaosob. Odštampani uzorci koji su stajali na vazduhu pre testiranja su značajno promenili fleksibilnost, dosta su elastičniji i zbog toga nisu ušli u analizu ukupnih rezultata. Buduća istraživanja mogu da idu u smeru ispitivanja uzoraka koji su ostavljeni na vazduhu neko vreme pre istezanja, uporednoj analizi rezultata u odnosu na uzorke koji su testirani odmah nakon štampanja i donošenje zaključka koji uzorci daju bolje rezultate.

## **ZAHVALNOSTI:**

Ekperimentalni deo ovog rada sproveden je tokom studijskog boravka u Ljubljani na Fakultetu za strojništvo, Univerziteta u Ljubljani, u laboratoriji za Alternativne tehnologije.

**LITERATURA**

- Baldock, J. (2016). *Design and fabrication of a new class of cutting tool material using additive manufacturing* (Doctoral dissertation). RMIT University.
- Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., & Garrett, B. (2011). *Technologies, potential, and implications of additive manufacturing*. Washington: Atlantic Council.
- Chia, H. N., & Wu, B. M. (2015). Recent advances in 3D printing of biomaterials. *Journal of biological engineering*, 9(1), 1-14. <https://doi.org/10.1186/s13036-015-0001-4>
- Crump, S. S. (1991). Fused deposition modeling (FDM): putting rapid back into prototyping. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Rapid Prototyping* (pp. 354-357).
- Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies*. Cham, Switzerland: Springer.
- Jin, M. (2020) *Material development for extrusion-based 3D printing*. Bayreuth: University of Bayreuth.
- Leal, R., Barreiros, F. M., Alves, L., Romeiro, F., Vasco, J. C., Santos, M., & Marto, C. (2017). Additive manufacturing tooling for the automotive industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 1671-1676. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0239-8>
- Liaw, C. Y., & Guvendiren, M. (2017). Current and emerging applications of 3D printing in medicine. *Biofabrication*, 9(2), 024102. <http://dx.doi.org/10.1088/1758-5090/aa7279>
- Mason, J., Visintini, S. & Quay, T. (2016) An Overview of Clinical Applications of 3-D Printing and Bioprinting, *CADTH Issues in Emerging Health Technologies*. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31211545>
- Maurel, A., Grugeon, S., Armand, M., Fleutot, B., Courty, M., Prashantha, K., ... & Dupont, L. (2020). Overview on lithium-ion battery 3D-printing by means of material extrusion. *ECS Transactions*, 98(13), 3. <http://dx.doi.org/10.1149/09813.0003ecst>
- Musa, B. H., & Hameed, N. J. (2020). Study of the mechanical properties of polyvinyl alcohol/starch blends. *Materials today: proceedings*, 20, 439-442. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.161>
- Parandoush, P., & Lin, D. (2017). A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures*, 182, 36-53. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>
- Pervez, M. N., Stylios, G. K., Liang, Y., Ouyang, F., & Cai, Y. (2020). Low-temperature synthesis of novel polyvinylalcohol (PVA) nanofibrous membranes for catalytic dye degradation. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121301. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121301>
- Pugliese, R., Beltrami, B., Regondi, S., & Lunetta, C. (2021). Polymeric biomaterials for 3D printing in medicine: An overview. *Annals of 3D Printed Medicine*, 2, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.stlm.2021.100011>



- Raksa, A., Numpaisal, P. O., & Ruksakulpiwat, Y. (2021). The effect of humidity during electrospinning on morphology and mechanical properties of SF/PVA nanofibers. *Materials Today: Proceedings*, 47, 3458-3461. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.459>
- Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. J. P. M. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286-1296. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>
- Zhang, J. Y., Pandya, J. K., McClements, D. J., Lu, J., & Kinchla, A. J. (2022). Advancements in 3D food printing: A comprehensive overview of properties and opportunities. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(17), 4752-4768. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1878103>

## EXPERIMENTAL STUDY OF OPTIMAL PARAMETERS FOR 3D PRINTING OF PVA MATERIAL BY CONTROLLING INTERLAYER ADHESION STRENGTH

**Abstract:** “New Technologies”, such as 3D technologies, are increasingly being applied worldwide as leading methods in the production process of various complex reinterpretations of objects. The need to change the material for the production of certain parts has arisen from the development of technology and the desire to improve the physical and mechanical characteristics of these objects. New materials are expected to provide greater resistance, durability, and in some cases, elasticity, thereby increasing their lifespan and utility value. In addition to specific characteristics sought from new materials, it is important to consider their environmental aspect, such as their suitability for recycling, their lifespan, etc. This study presents the results of experimental research on printing parameters for Polyvinyl Alcohol (PVA) material. By forming a set of optimal parameters for this material, a base is established as a foundation that will be further enriched with particles of specific biological origin in order to obtain a new polymer with improved mechanical properties. The study focuses on both theoretical and experimental research. The research section describes additive technologies as the leading part of production technologies in Industry 4.0, while the goal of the study is carried out through the experimental research. The entire study is divided into three main parts. The introductory chapters provide a brief overview of previous research on 3D printing technologies, with a particular emphasis on extrusion-based 3D printing, and the methods used in this study. It discusses principles, challenges, and commonly used polymers. Special attention is given to PVA material, which is examined in the experimental part of the study and has not been widely used for extrusion-based 3D printing thus far. The second part of the study focuses on experimental research and identifies fixed and variable parameters. During the printing of samples, the variable parameters are layer thickness and temperature on an additional silicone heater on the printer head, while printing temperature, bed temperature, and other parameters that can be adjusted in CURA software are constant for all samples in this research. For the preparation of the experiment, CURA software was used, where these parameters are adjusted, along with the orientation of the printed sample, which is a crucial element in the production chain of the final product, while the Thony software was used for testing. The third part of the study relates to the analysis of collected results and the generalization of those results in the form of a conclusion. After conducting material tests, the maximum force obtained was found

to be 135.833 N, achieved with printing parameters of a heater temperature between 170–180 °C and a layer thickness of 0.2 mm.

**Key words:** three-dimensional printing, PVA material, mechanical properties, optimal parameters, ecology



### Mašinski fakultet

**MINA ŠIBALIĆ** je rođena u Beogradu 27. avgusta 1997. godine. U toku svog školovanja od 2004. godine pohađala je nastavu u Srbiji, Ujedinjenom Kraljevstvu, Francuskoj, USA, Sloveniji i Crnoj Gori. Doktorand je na Mašinskom fakultetu u Podgorici, gde je završila osnovne, specijalističke i master studije. Tokom studiranja aktivno se bavila vannastavnim aktivnostima, kao

i učešćem u ERASMUS+ programu razmene studenata. Do sada je tokom studiranja bila autor i koautor stručnih i naučnih radova koji su prezentovani na međunarodnim konferencijama i objavljeni u referentnim časopisima. Trenutno je kao istraživač zaposlena u Italijanskom Nacionalnom Institutu za Astrofiziku u Napulju, na projektu CUBES.