

UTJECAJ PARAMETARA ISPISA NA MEHANIČKA SVOJSTVA I DIMENZIJSKU TOČNOST U FDM TEHNOLOGIJI

Vukoja, Jakov

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:202922>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-24**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
STRUČNI DIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVO

JAKOV VUKOJA

**UTJECAJ PARAMETARA ISPISA NA
MEHANIČKA SVOJSTVA I DIMENZIJSKU
TOČNOST U FDM TEHNOLOGIJI**

DIPLOMSKI RAD

KARLOVAC, 2024. godina

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
STRUČNI DIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVO

JAKOV VUKOJA

**UTJECAJ PARAMETARA ISPISA NA
MEHANIČKA SVOJSTVA I DIMENZIJSKU
TOČNOST U FDM TEHNOLOGIJI**

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

dr. sc. Tihana Kostadin, prof. struč. stud.

KARLOVAC, 2024. godina

 VELEUČILIŠTE U KARLOVCU Karlovac University of Applied Sciences	Klasa: 602-11/___-01/___
ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA	Datum:

Ime i prezime	JAKOV VUKOJA		
OIB / JMBG			
Adresa			
Tel. / Mob./e-mail			
Matični broj studenta	0110618041		
JMBAG	0248072298		
Studij (staviti znak X ispred odgovarajućeg studija)	preddiplomski	X specijalistički diplomski	
Naziv studija	STRUČNI DIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVA		
Godina upisa	2021.		
Datum podnošenja molbe	05.10.2023.		
Vlastoručni potpis studenta/studentice			

Naslov teme na hrvatskom: UTJECAJ PARAMETARA ISPISA NA MEHANIČKA SVOJSTVA I DIMENZIJSKU TOČNOST U FDM TEHNOLOGIJI	
Naslov teme na engleskom: INFLUENCE OF PRINTING PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES AND DIMENSIONAL ACCURACY IN FDM TECHNOLOGY	
Opis zadatka: Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu potrebno je objasniti 3D ispis, kao i povijest 3D ispisa, te vrste materijala za ispis. Potrebno je također napraviti podjelu parametara i navesti iste. U eksperimentalnom dijelu rada istražiti utjecaj parametara ispisa na mehanička svojstva i dimenzijsku točnost. Predstaviti uređaj za 3D ispis, materijal koji će se koristiti za ispitivanje, navesti parametre kroz koje će se provoditi ispitivanja. Predstaviti softvere kao i alate za pripremu 3D modela. Izraditi potrebne 3D modele, odnosno uzorke na kojima će se pronaći ispitivanja. Analizirati utjecaj parametara na mehanička svojstva i dimenzijsku točnost. Na kraju napisati zaključak. Rad urediti prema uputama, kako je navedeno na web stranicama Veleučilišta.	
Mentor: dr. sc. Tihana Kostadin, prof. struč. stud	Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

IZJAVA

Ovim putem izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno, koristeći se stečenim znanjem tijekom studija, dostupnom stručnom literaturom i internetskim izvorima.

Zahvaljujem svojoj obitelji na neizmornoj podršci tijekom cijelog studija te svojoj mentorici dr. sc. Tihani Kostadin na stručnom vodstvu i savjetima.

Karlovac, 2024.

Jakov Vukoja

SAŽETAK

U ovom istraživanju analiziran je utjecaj parametara FDM procesa (kao što su brzina ispisivanja, temperatura mlaznice, debljina sloja i postotak ispune) na mehanička svojstva i dimenzijsku točnost uzoraka iz PLA materijala koji su proizvedeni korištenjem 3D ispisa. Teorijski dio rada obuhvaća opis aditivne proizvodnje, različite tehnologije koje se koriste, prednosti i nedostatke aditivnih tehnologija te detaljno objašnjenje FDM procesa i PLA materijala. U eksperimentalnom dijelu rada, PLA uzorci su proizvedeni FDM postupkom s variranjem parametara, nakon čega je ispitano kako ti parametri utječu na rezultate ispitivanja.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja, aditivna tehnologija, FDM, PLA.

SUMMARY

This study investigates the influence of FDM process parameters (such as printing speed, nozzle temperature, layer thickness, and infill percentage) on the mechanical properties and dimensional accuracy of samples from PLA material produced using 3D printing. The theoretical part of the research encompasses an overview of additive manufacturing, various technologies employed, advantages and disadvantages of additive technologies, and a detailed explanation of the FDM process and PLA material. In the experimental section, PLA samples were manufactured using the FDM process with parameter variations, followed by an examination of how these parameters affect the testing results.

Keywords: additive manufacturing, additive technology, FDM, PLA

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	VIII
POPIS TABLICA.....	XI
POPIS OZNAKA.....	X
POPIS KRATICA	XI
1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKE OSNOVE.....	2
2.1. Što je 3D ispis.....	2
2.2. Klasifikacija aditivne proizvodnje	7
2.2.1. MEX – Ekstrudiranje materijala.....	8
2.2.2. VPP – Fotopolimerizacija u kadi	11
2.2.3. MJT Raspršivanje materijala.....	13
2.2.4. SHL - Laminiranje	14
2.2.5. PBF – Stapanje naslage praha	16
2.2.6. DED – Taloženje usmjerenom energijom.....	21
2.2.7. BJT - Rapršivanje veziva	23
2.3. Materijali u FDM tehnologiji	24
2.3.1. ABS.....	24
2.3.2. ASA.....	24
2.3.3. PLA.....	24
2.3.4. PETG	25
2.3.5. Najlon	25
2.3.6. Polikarbonat.....	26
2.3.7. Filamenti s metalnim punjenjem.....	26
3. EKSPERIMENTALNI DIO	27
3.1. 3D pisač i materijal	27
3.2. Ispitivanje utjecaja parametara na mehanička svojstva	29
3.2.3. Konstruiranje epruvete.....	30
3.2.4. Rezanje epruvete.....	31
3.2.4.1. <i>Određivanje parametara epruvete za ispitivanje</i>	37
3.2.4.2. <i>Izrada G-koda u programu</i>	38
3.2.5. Priprema i ispisivanje epruveta	39
3.3. Ispitivanje na kidalici.....	40
3.4. Rezultati i analiza	43
3.4.1 Rezultati i analiza varijacije parametra visine sloja.....	44

3.4.2 Rezultati i analiza varijacije parametra temperature mlaznice	45
3.4.3 Rezultati i analiza varijacije parametra postotka ispunjenosti	45
3.4.4 Rezultati i analiza varijacije parametra brzine.....	46
3.5. Ispitivanje utjecaja parametara na dimenzijsku točnost.....	47
3.5.1. Ispitivanje utjecaja brzine ispisivanja na dimenzijsku točnost	47
3.5.1.1. <i>Analiza rezultata utjecaja brzine ispisivanja na dimenzijsku točnost..</i>	48
3.5.2. Ispitivanje utjecaja temperature mlaznice na dimenzijsku točnost	49
3.5.2.1. <i>Analiza rezultata temperature mlaznice na dimenzijsku točnost</i>	49
3.5.3. Ispitivanje utjecaja visine sloja na dimenzijsku točnost.....	51
3.5.3.1. <i>Analiza rezultata utjecaja visine sloja na dimenzijsku točnost</i>	52
4. ZAKLJUČAK	54
LITERATURA	55

POPIS SLIKA

Slika 1 Primjer 3D modela izrađen u CAD programu.....	3
Slika 2 Određivanje parametara ispisa	4
Slika 3 3D model unutar programa za rezanje.....	4
Slika 4 Ispisivanje objekta.....	5
Slika 5 Primjer gotovog ispisa.....	6
Slika 6 Klasifikacija aditivine proizvodnje.....	8
Slika 7 Vrste ekstrudera MEX procesa [3].....	9
Slika 8 Proces FDM tehnologije [3].....	10
Slika 9 Proces Stereolitografije [5].....	11
Slika 10 PolyJet postupak [5].....	13
Slika 11 proces Laminiranja [8].....	14
Slika 12 SLS proces [10]	17
Slika 13 SLM tehnologija [12]	18
Slika 14 Stajni trap aviona izrađen SLM tehnologijom [11]	19
Slika 15 Proces EBM tehnologije [12].....	20
Slika 16 Procesi DED tehnologije- (A) Taloženje materijala laserom i (B) Taloženje materijala elektronskim snopom [13]	21
Slika 17 Proces tehnologije 3D tiskanja [14].....	23
Slika 18 Uređaj Ender 3 v2 Neo [16]	27
Slika 19 ecoPLA filament [17].....	28
Slika 20 Dimenzije epruvete po normi HRN EN ISO 527-2	30
Slika 21 Primjer gotovog 3D modela epruvete za ispitivanje	31
Slika 22 Program UltiMaker Cura - 1. Odabir uređaja; 2. Odabir materijala i mlaznice; 3. Podešavanje parametara; 4. Rezanje.....	32
Slika 23 Popis parametara koji se mogu varirati.....	32
Slika 24 Postavke kvalitete	34
Slika 25 Postavke brzine	35
Slika 26 Postavke Materijala.....	36
Slika 27 Postavke ispune.....	36
Slika 28 Primjeri ispune 3D modela [18]	37
Slika 29 Prikaz pred pregleda 3D modela.....	38
Slika 30 kidalica Shimadzu AG-X	40
Slika 31 Mjerenje epruvete	40
Slika 32 a) epruveta prije vlačnog ispitivanja, b) epruveta nakon ispitivanja.....	41
Slika 33 Slika dijagrama vlačnog ispitivanje epruvete TI3-I	42
Slika 34 Epruvete prije i nakon ispitivanja.....	42
Slika 35 Prikaz 3D modela uzorka za ispitivanje [19]	48
Slika 36 Odnos kvalitete uzorka i brzine ispisivanja	48
Slika 37 Odnos kvalitete uzorka i temperature mlaznice	50
Slika 38 Prikaz razlike uzorka, a) uzorak ispisan na 205°C, b) uzorak ispisan na 250°C	51
Slika 39 Odnos kvalitete uzorka i visine sloja	52
Slika 40 Prikaz razlike uzorka, a) uzorak ispisan na 0,1mm, b) uzorak ispisan na 0,3mm	53

POPIS TABLICA

Tablica 1 Podjela PBF tehnologija	16
Tablica 2 Specifikacije Ender 3 V2 Neo [16]	28
Tablica 3 Varijacije parametara ispisivanja	38
Tablica 4 Rezultati vlačnog ispitivanja za epruvete TI3 I, TI3 II i TI3 III	42
Tablica 5 Rezultati ispitivanja	43
Tablica 6 Rezultati ispitivanja - visina sloja	44
Tablica 7 Rezultati ispitivanja - temperatura mlaznice	45
Tablica 8 Rezultati ispitivanja - postotak ispunjenosti	45
Tablica 9 Rezultati ispitivanja - brzina ispisivanja	46

POPIS OZNAKA

OZNAKA	JEDINICA	OPIS
F_m	N	maksimalna sila
F_e	N	sila loma
R_m	N/mm ²	maksimalna vlačna čvrstoća
R_k	N/mm ²	konačno naprezanje
Δl	mm	produljenje
a	mm	debljina epruvete
b	mm	širina epruvete
B	mm	širina glave epruvete
h	mm	visina glave epruvete
l_o	mm	početna mjerna duljina epruvete
l_e	mm	ispitna duljina epruvete
l_t	mm	ukupna duljina epruvete
t	°C	temperatura
v	mm/s	brzina
h_s	mm	visina sloja

POPIS KRATICA

KRATICA	ZNAČENJE
3D	trodimenzionalan
PLA	poliaktična kiselina
ABS	akrilonitril butadien stiren
PA	poliamid
PC	polikarbonat
PETG	polietilentereftalat glikol
Stl	standardni jezik trokuta
MEX	ekstrudiranje materijala
VPP	fotopolimerizacija u kadi
SLA	sterolitografija
MJT	raspršavanje materijala
PJ	PolyJet
SHL	laminiranje
LOM	proizvodnja laminiranih objekata
UC	ultrazvučno učvršćivanje
PBF	stapanje naslage praha
SLS	selektivno lasersko sraščivanje
SLM	selektivno lasersko taljenje
EBM	taljenje elektronskim snopom
DED	taloženje usmjerenom energijom

1. UVOD

U posljednjih nekoliko godina, aditivne tehnologije, posebice 3D ispis, doživjele su značajan napredak kako u industriji tako i u istraživanju. Ova tehnologija omogućuje slojevitu izradu trodimenzionalnih objekata iz digitalnih modela, otvarajući brojne mogućnosti u proizvodnji. Međutim, kako bi 3D ispis postao široko prihvaćen u različitim sektorima industrije, ključno je razumjeti kako različiti parametri procesa utječu na konačna svojstva i dimenzijsku točnost proizvoda.

U prvom dijelu rada pružen je pregled tehnologija 3D ispisa, ističući prednosti i nedostatke pojedinih tehnologija. Navedeni i opisani su materijali koji se koriste u FDM tehnologiji. Treće poglavlje opisuje metodologiju istraživanja, korištene materijale i opremu, kao i eksperimentalni postupak. U završnom četvrtom dijelu su rezultati i diskusija, zajedno sa zaključkom cijelog rada.

Cilj ovog diplomskog rada jest istražiti utjecaj parametara 3D ispisa na mehanička svojstva i dimenzijsku točnost proizvoda. Takvo istraživanje je presudno za optimizaciju procesa ispisa radi osiguranja visoke kvalitete i pouzdanosti proizvoda. Kroz sustavno eksperimentalno ispitivanje parametara kao što su brzina ispisa, temperatura mlaznice, debljina sloja i postotak ispunjenosti očekuje se dobivanje korisnih saznanja za unaprjeđenje procesa 3D ispisa.

2. TEORIJSKE OSNOVE

2.1. Što je 3D ispis

3D ispis (trodimenzionalan ispis), poznat kao i aditivna tehnologija, je tehnologija koja omogućava stvaranje fizičkih objekata sloj po sloj. Umjesto tradicionalnih metoda odstranjivanja materijala iz bloka ili oblikovanjem materijala u kalupima, aditivna proizvodnja dodaje materijal sloj po sloj kako bi stvorila predmete. Ova tehnika omogućava brzu izradu prototipa kao i složenih geometrijskih oblika koji bi bili teški ili nemogući za proizvodnju konvencionalnim metodama.

3D pisac je proizvodni stroj koji stvara fizičke objekte prema dizajnu 3D modela koristeći jednu od aditivnih proizvodnih metoda koja dodaje slojeve materijala jedan na drugi. Materijal (filament) pisaca može biti u krutom, praškastom ili tekućem stanju.

Najčešće su to polimerni materijali kao što su PLA (poliaktična kiselina), ABS (akrilonitril butadien stiren), PA (poliamidi), epoksidne smole, PETG (polietilentereftalat glikol), ali mogu se koristiti i kompozitni materijali, keramike, čelika, aluminijska, titana i druge legure za dobivanje određenih mehaničkih svojstava. [1] [2]

Aditivna proizvodnja može se izvoditi različitim postupcima, ali načelo proizvodnje uvijek je isto, a izrada se može podijeliti u sljedeće faze: [1]

1. Dobivanje 3D modela (3D konstruiranje, parametarske metode, preuzimanje s interneta, 3D skener)
2. Pretvaranje 3D modela u format za ispis (.stl)
3. Podešavanje parametara ispisa i generiranje G-koda (ili nekog drugog koda)
4. Ispisivanje
5. Uklanjanje i čišćenje (dodatna obrada).

Proces 3D ispisa počinje sa izradom 3D modela. Na slici 1 prikazan je primjer 3D modela. Model je digitalna prezentacija čvrstog objekta koji se sastoji od mnogo točaka u prostoru, spojenih različitim geometrijskim oblicima poput trokuta, ravnih te zaobljenih ploha i slično.



Slika 1 Primjer 3D modela izrađen u CAD programu

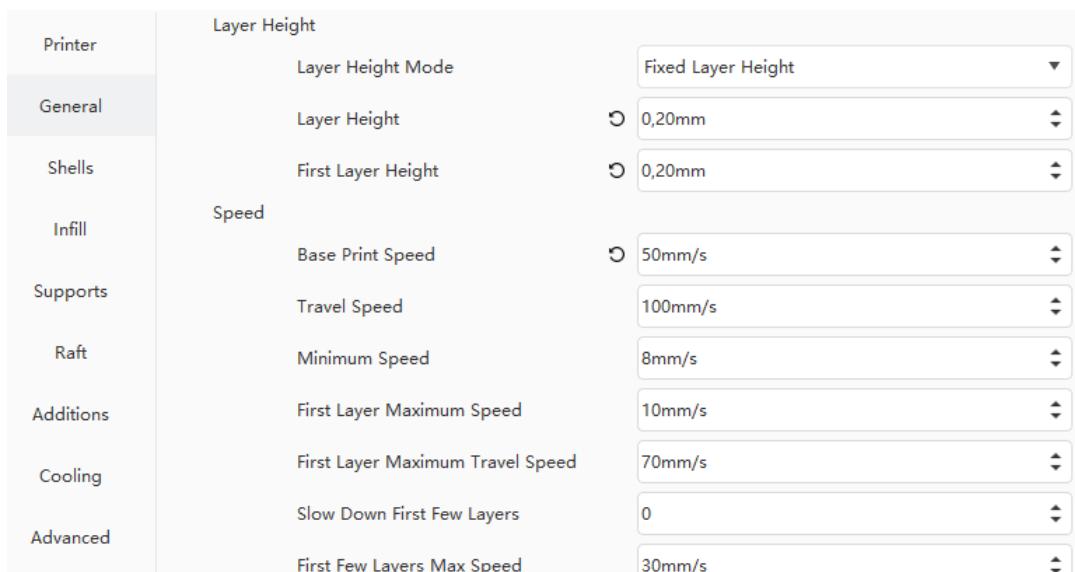
Postoji mnogo načina kako dobiti 3D model poput računalnih programa, skenera i kamera, čak i parametarskih matematičkih jednadžbi.

- 3D modeli mogu se konstruirati u CAD (Computer Aided Design) software poput CATIA, SOLIDWORKS, OnShape i sl.
- 3D skeneri mogu snimiti cijele površine objekta kako bi napravili 3D model.
- Parametarske metode koriste matematičke jednadžbe kako bi stvorili 3D model. Ta metoda se može koristiti na online stranicama.
- Postoje i mnoge internetske stranice poput Thingiversa gdje se gotovi modeli mogu naći i koristiti u privatne, kao i u komercijalne svrhe.

Najčešći format datoteke za ispis je STL (engl. Standard Triangulation Language), a dobio je ime po postupku stereolitografije koji prikazuje mrežu trokuta kako bi se što bolje mogla opisati površina modela.

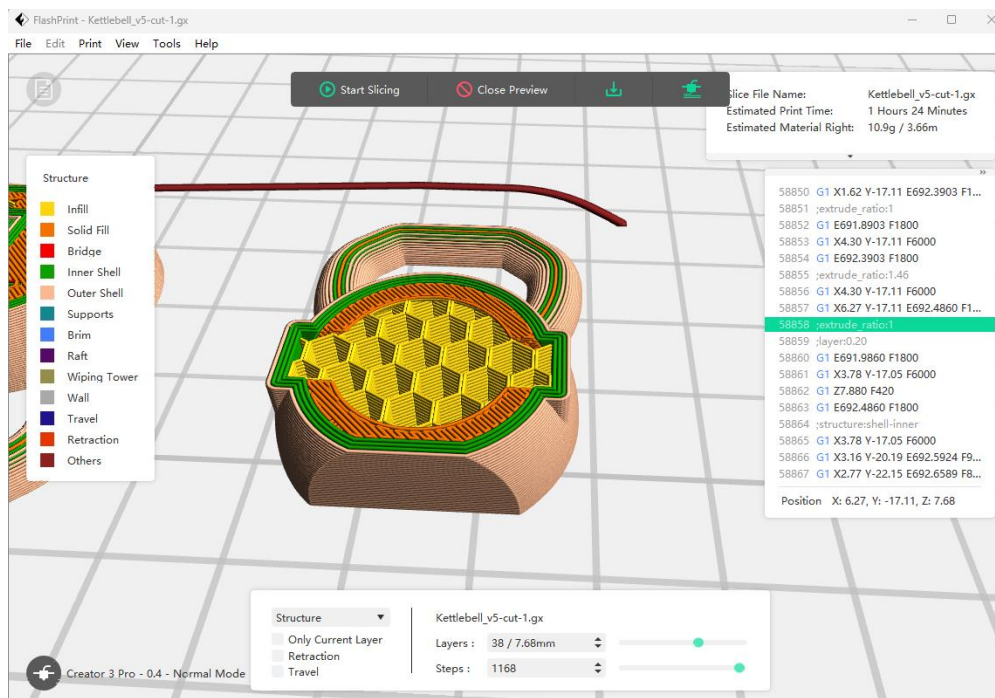
Postoje i mnogi drugi formati kao što su AMF (engl. Additive Manufacturing File), OBJ (engl. Object file format), 3MF (engl. 3D Manufacturing Format) i drugi.

Nakon što model bude u upotrebljivom obliku datoteke, koristi se „slicing“ software kako bi se model razdvojio na slojeve pogodne za ispisivanje i pripremio se za ispis. Software za rezanje prema postavkama parametara provjerava greške, reže model na slojeve, po potrebi dodaje potpore i stvara uzorke ispune unutrašnjosti.



Slika 2 Određivanje parametara ispisa

Prije takozvanog rezanja potrebno je odrediti parametre ispisa (slika 2), koji će definirati mehanička svojstva kao i dimenzijsku točnost. Neki od tih parametara su temperatura mlaznice, brzina ispisivanja, temperatura podloge, postotak ispunje i dr.



Slika 3 3D model unutar programa za rezanje

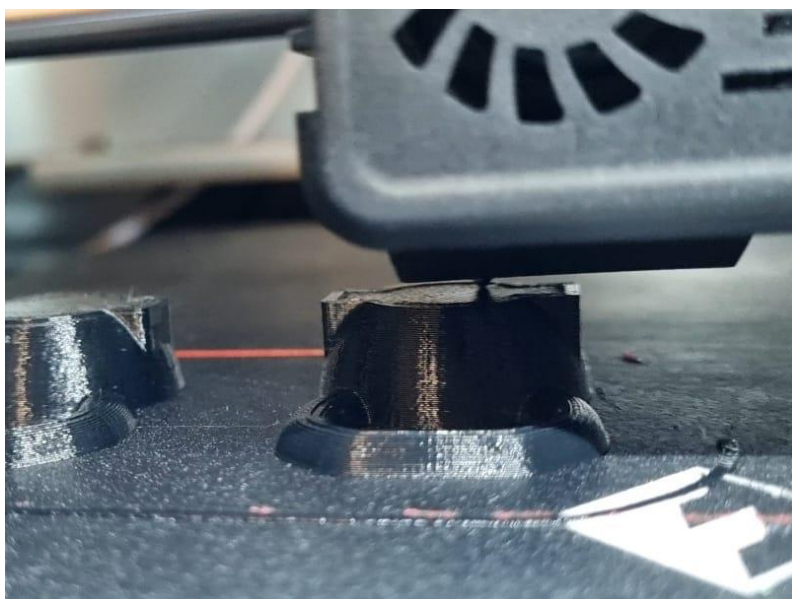
Na slici 3 prikazan je 3D model unutar programa za rezanje, vidljivi su svi slojevi koje će pisač slagati jedan na drugi. Također se vidi unutarnja ispuna, koja služi kako bi se smanjila potrošnja materijala.

Programi za rezanje pretvaraju 3D model u G-kod koji 3D pisač slijedi kako bi ispisao objekt, sloj po sloj. On pisaču generira instrukcije, koji put ispisa treba pratiti, kada da pali i gasi ventilatore.

Nakon što je program za rezanje završen, informacije o rezanom modelu zatim se prenose na pisač povezivanjem računala sa SD karticom, USB, a noviji moderniji pisači se mogu povezati i sa WiFi.

Ovisno o vrsti 3D pisača mogu se koristiti različiti materijali poput plastike, metala, keramike, stakla i hrane, a više o materijalima nalazi se u narednom poglavlju.

Nakon podešavanja parametara kreće ispisivanje objekta, koje može trajati od nekoliko minuta, pa čak i više desetaka sati. 3D pisač metodično i precizno slijedi upute, u ovom slučaju prateći liniju plastike (ili nekog drugog materijala) sloj po sloj (vidi sliku 4).



Slika 4 Ispisivanje objekta

Nakon šta je ispis završen, mogu biti potrebne neke dorade prije samog kraja procesa, poput čišćenja i uklanjanje bilo kakvog nepotrebnog materijala. Na slici 5 prikazan je primjer gotovog ispisa. Postoji nekoliko različitih metoda za postizanje određene površinske teksture, neke od obrada su brušenje, poliranje, čak i korištenje boja kako bi se dobio raznobojan umjetnički 3D ispis.



Slika 5 Primjer gotovog ispisa

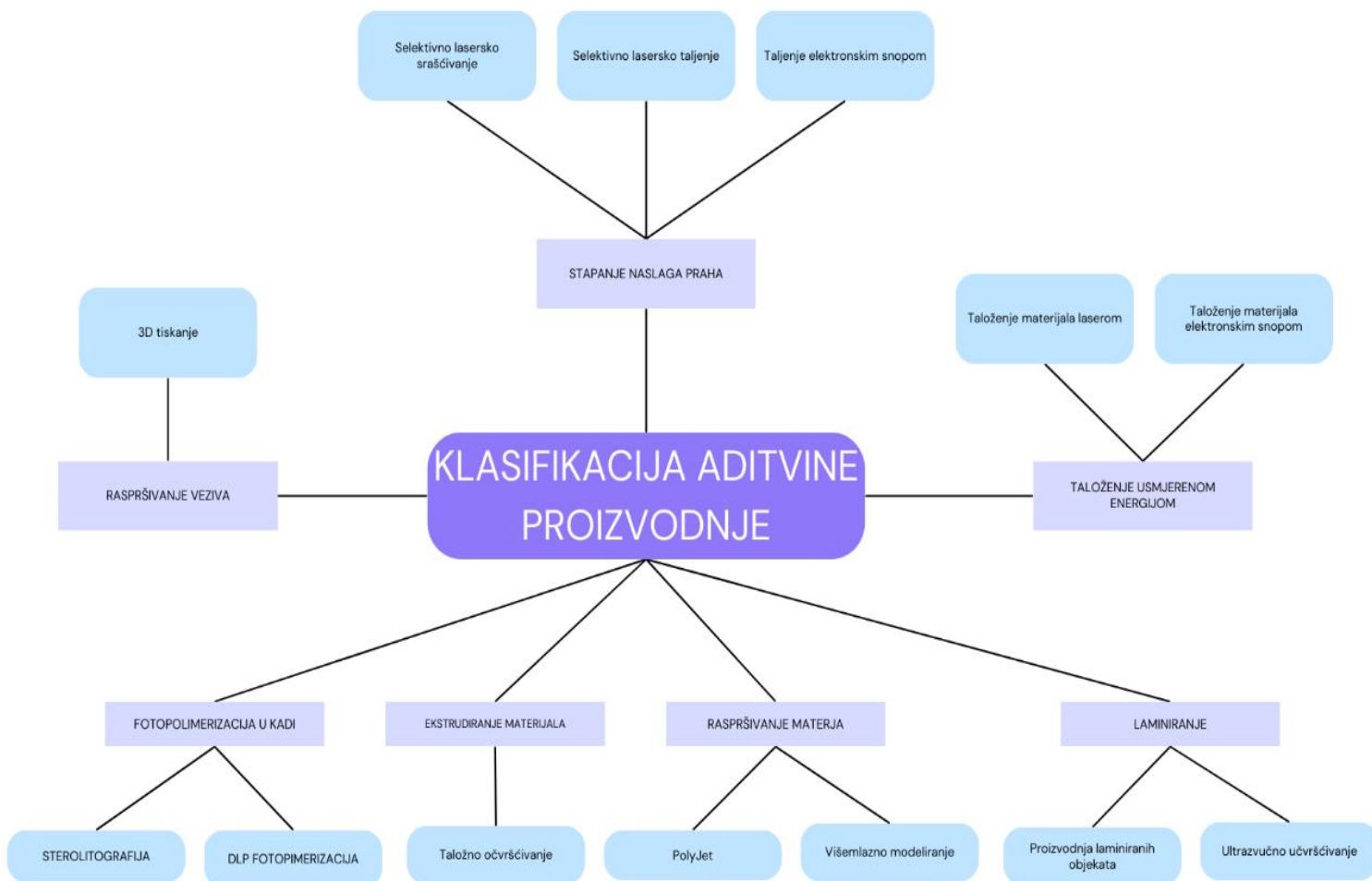
2.2. Klasifikacija aditivne proizvodnje

Klasifikacija postupaka aditivne proizvodnje može se napraviti prema nekoliko kategorija. Neki od postupaka aditivne proizvodnje imaju određene sličnosti u procesu, materijalu, tipu stroja, završnoj obradi površine, geometrijskom obliku, potrebnom naknadnoj obradi, itd.

Prema ISO 52,900 aditivna proizvodnja može se podijeliti u 7 kategorija: [3]

1. MEX (engl. Material Extrusion) – Ekstrudiranje materijala
FDM (engl. Fused Material Modeling) – Taložno očvršćivanje
2. VPP (engl. Vat photopolymerization) - Fotopolimerizacija u kadi
SLA (engl. Stereolithography) – Sterolitografija
3. MJT (engl. Material jetting) – Raspršivanje materijala
PJ (engl. PolyJet) – PolyJet
MJM (engl. MultiJet Modeling) – Višemlazno modeliranje
4. SHL (engl. Sheet lamination) – Laminiranje
LOM (engl. Laminated Object Manufacturing) - Proizvodnja laminiranih objekata
UC (engl. Ultrasonic Consolidation) – Ultrazvučno učvršćivanje
5. PBF (engl. Powder bed fusion) – Stapanje naslage praha
SLS (engl. Selective Laser Sintering) – Selektivno lasersko srašćivanje
SLM (engl. Selective Laser Melting) – Selektivno lasersko taljenje
EMB (engl. Electron Beam Melting) – Taljenje elektronskim snopom
6. DED (engl. Direct energy desposition) – Taloženje usmjerenom energijom
LENS (engl. Laser Engineered Net Shaping)– Direktno taloženje materijala laserom
7. BJT (engl. Binder jetting) - Raspršivanje veziva
3DP – 3D tiskanje(engl. 3D Printing)

Na slici 6 je prikazana klasifikacija aditivne proizvodnje.



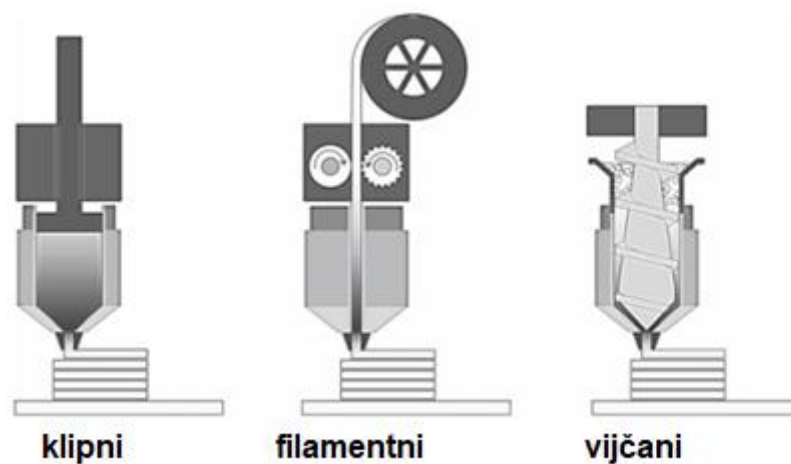
Slika 6 Klasifikacija aditivne proizvodnje

2.2.1. MEX – Ekstrudiranje materijala

Ekstrudiranje materijala je aditivna proizvodnja koja se sastoji od ekstruzije mekog materijala kroz mlaznicu i nanošenja takvog materijala u slojevima kako bi stvorili trodimenzionalnu strukturu. Najčešće korišteni tipovi MEX (Material Extrusion) ekstrudera su klipni, filamentni i vijčani (slika 7). FDM (engl. Fused Material Molding) Taložno očvršćivanje je postupak koji spada u klasifikaciju tehnologije ekstrudiranja materijala. Procesi aditivne proizvodnje temeljeni na ekstruziji materijala su među najčešće korištenima, posebno kada se radi s termoplastima i termoplastičnim kompozitima. Uspoređujući ovaj proces s drugim procesima aditivne proizvodnje može se reći da je jeftin i vrlo jednostavan za upotrebu. Stoga je glavna prednost MEX procesa brza i ekonomska reprodukcija standardnih komponenti ili prototipova s

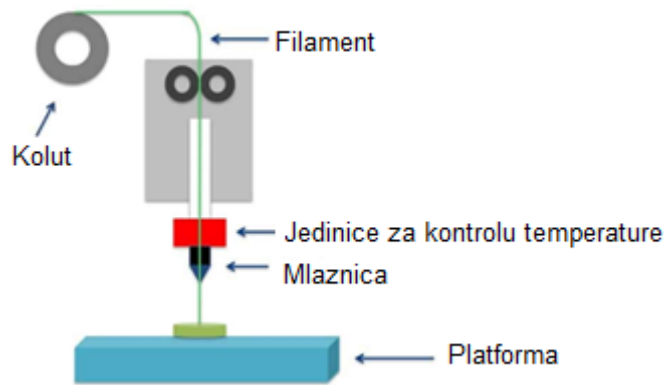
različitim polimernim materijalima, legurama metala s niskim talištem i drugim materijalima. [3]

Većina MEX strojeva opremljena je jednom glavom za ekstruziju, a postoji mogućnost dodavanja dviju ili više ekstruzijskih jedinica kako bi se omogućila izrada više materijalnih komponenti. U međuvremenu su razvijeni novi uređaji koji omogućuju više materijalno ispisivanje s jednim mlazom spajanjem različitih filamenata prije nego što se dovode u ekstruder, npr. Palette 2S proizveden od strane tvrtke Mosaic Manufacturing Ltd. (Toronto, ON, Kanada) ili više materijalna jedinica tvrtke Prusa Research (Prag, Češka Republika). [3]



Slika 7 Vrste ekstrudera MEX procesa [3]

Tehnologija taložnog očvršćavanja uključuje ekstrudiranje materijala (filamenta) kroz mlaznicu pomoću sile ili tlaka, prema unaprijed definiranom putu, te sloj po sloj povezivanje materijala samim sobom (ili sekundarnim materijalom). Nakon što se sloj završi, platforma za izgradnju se pomakne prema dolje ili glava ekstrudera prema gore, novi sloj se ispisuje i veže na prethodni. Proces je prikazan na slici 8. [3]



Slika 8 Proces FDM tehnologije [3]

Glavni nedostaci aditivne proizvodnje ekstrudiranja materijala su: [3]

- Grublja površina
- Vidljivost linija između slojeva
- Niža točnost (preciznost) i brzina ispisivanja
- Anizotropna mehanička svojstva
- Potreba za potporne strukture.

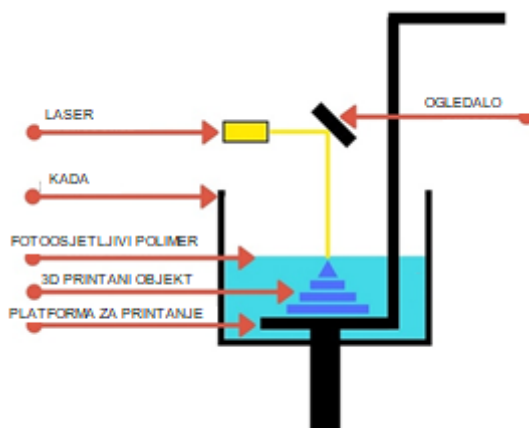
Prednosti su: [3]

- Pristupačnost i jednostavnost upotrebe
- Širok spektar materijala
- Prilagodljivost
- Manje otpada
- Cjenovna prihvatljivost.

2.2.2. VPP – Fotopolimerizacija u kadi

Fotopolimerizacija u kadi (VPP) je vrsta aditivne proizvodnje koja se temelji na fotopolimerizaciji. Princip rada je korištenje ultraljubičastih zraka koje očvršćuju tekuće fotopolimerne materijale sloj po sloj. [3]

Stereolitografija (SLA) je tehnologija aditivne proizvodnje koja se oslanja na fotopolimerizaciju u kadi. [4]



Slika 9 Proces Stereolitografije [5]

Helij-kadmij ili argon laser generira i fokusira UV svjetlo na prvi sloj, a nakon što je prvi sloj ocrtan, podloga se spušta za debljinu sljedećeg sloja. Četka prelazi preko površine kako bi se izbjegli mjehurići zraka u proizvodu. Potporne strukture su neophodne kako bi se spriječile deformacije tijekom ispisivanja, a nakon završetka čišćenja predmet se dodatno učvršćuje u UV komori. Proces je prikazan na slici 9. [3]

Materijal korišten u SLA procesu je fotoosjetljivi polimer koji se nalazi u tekućem obliku ili smoli, uglavnom su to akrilatni ili epoksidni fotopolimeri. Većina parametara kod SLA 3D pisača je unaprijed postavljena te se ne može mijenjati, osim visine sloja i orijentacije modela. Uobičajena visina sloja je između 25 i 1000 mikrona, što utječe na kvalitetu izrade i trajanje procesa. [3]

Stereolitografija se koristi za prototipiranje, funkcionalne dijelove, za izradu kalupa za lijevanje, brizganje plastike i sl. [4]

Prednosti korištenja SLA postupka: [3]

- Dobra brzina ispisivanja
- Visoka preciznost i kvaliteta površinskog sloja
- Mogućnost izrade vrlo tankih slojeva.

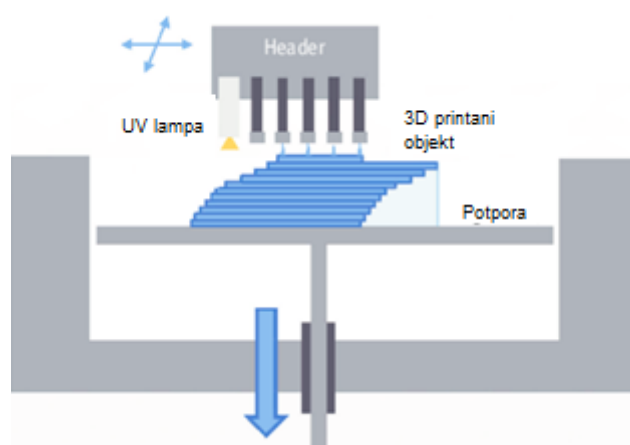
Nedostaci korištenja SLA postupka: [3]

- Visoki troškovi materijala
- Uporaba potporne strukture
- Mogućnost korištenja malog broja materijala (samo fotopolimeri)
- Proizvod može biti prilično lomljiv
- Potreban je poseban prostor za uređaj jer fotopolimeri razvijaju štetne plinove
- Potrebna naknadna obrada
- Skupo održavanje lasera.

2.2.3. MJT Raspršivanje materijala

U postupku aditivne proizvodnje raspršivanja materijala tekući materijal stvrdnjava se kroz proces fotopolimerizacije. To je isti proces koji se koristi u postupku fotopolimerizacije u kadi. [3]

PolyJet tehnologija razvijena je početkom 21. stoljeća kombinirajući dobre karakteristike stereolitografije i 3D ispisa. [3]



Slika 10 PolyJet postupak [5]

Prije početka procesa fotopolimer se zagrijava kako bi bio viskozniji i time se bolje raspršivao. Dva različita materijala koriste se za ispisivanje, jedan za model, a drugi za potporne strukture, što olakšava kasniju ručnu obradu. U ovoj metodi objekt se gradi raspršivanjem materijala po radnoj podlozi koji se potom očvršćuje ultraljubičastim zrakama. Proces je prikazan na slici 10. [6]

Prednosti: [3]

- Visoka preciznost i detalji
- Više materijalni ispis
- Brza izrada prototipa
- Glatke površine.

Nedostaci: [3]

- Visoki troškovi

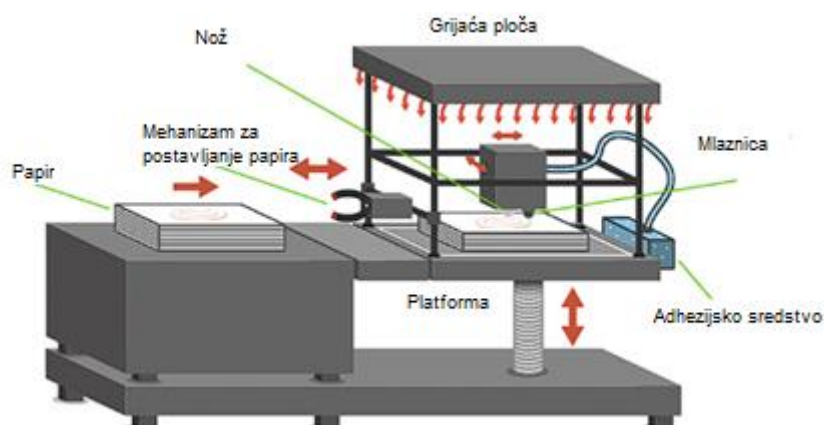
- Zahtjevno održavanje
- Ograničen izbor materijala
- Ograničena veličina ispisa.

Proces se koristi u automobilske industriji, za proizvodnju igračaka, obuće, nakita i dr. [3]

2.2.4. SHL - Laminiranje

Laminiranje je postupak aditivne proizvodnje u kojoj se tanki listovi materijala povezuju list po list (sloj po sloj) kako bi se stvorio željeni oblik koji se zatim reže u 3D objekt. [7]

Proizvodnja laminiranih objekata (LOM) je tehnologija koja spada u aditivni proces laminiranja. Na slici 11 prikazan je proces laminiranja. U ovom procesu materijal je namotan na zagrijani valjak gdje se premazuje adhezijskim sredstvom koje povezuje slojeve dok se odvija. Laser se koristi za rezanje oblika zadanog parametrima za ispisivanje, a svaki sloj se lijepi za površinu ili prethodni sloj. Nakon spuštanja radne površine, višak materijala se uklanja namatanjem na drugi valjak. Taj postupak se ponavlja sve dok se ne postigne željeni oblik predmeta. [7]



Slika 11 proces Laminiranja [8]

Glavne prednosti: [3]

- Relativno brza izrada
- Niska cijena materijala
- Visoka preciznost
- Smanjenje otpada
- Mogućnost izrade prototipa i malih serija
- Mogućnost izrade velikih proizvoda.

Nedostaci su: [3]

- Skupa oprema
- Potrebna naknadna obrada
- Ograničenost materijala
- Složenost upravljanja procesom.

2.2.5. PBF – Stapanje naslage praha

Stapanje naslage praha je jedan od procesa aditivne proizvodnje. U ovom procesu koristi se izvor energije direktno na materijal, kako bi se otopio ili sinterirao metal, polimer i keramički materijal. [3]

Tehnologije PBF najlakše je razlikovati s obzirom na izvor energije (prikazano u tablici 1).

Tablica 1 Podjela PBF tehnologija

VRSTA	EMB	SLM	SLS
IZVOR ENERGIJE	Elektronski snop	Lasersko taljenje	Lasersko sinteriranje

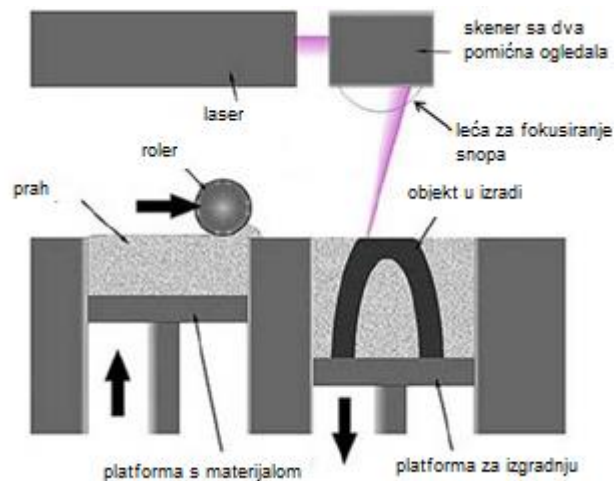
Stapanje naslage praha koristi izvor topline kako bi sloj po sloj spojio čestice praha, pretvarajući sirovinu u čvrste dijelove. Uobičajeno tehnologije PBF rade u kontroliranim atmosferama, kako bi sirovina bila obrađena u pravilnim uvjetima, izbjegavajući oksidaciju i omogućavajući da se prah može ponovo koristiti nakon svake izrade. EMB (engl. Electron Beam Melting - taljenje elektronskim snopom) koristi vakuumsku komoru, dok se kod SLS (engl. Selective Laser Sintering – selektivno lasersko sinteriranje) i SLM (engl. Selective Laser Melting – selektivno lasersko taljenje) koristi se komora s inertnim plinovima (argon, helij) da bi se spriječila površinska oksidacija materijala pri povišenoj temperaturi. [3]

Selektivno lasersko sinteriranje koristi laser kao izvor energije (uobičajeno CO₂ laser od 10 000 nm) kako bi sinterirao polimerni prah kao najlon (PA12) i PEKK (politerketonketon) u čvrsti dio. [9]

SLS uređaj sinterira prah sloj po sloj, na temperaturi malo ispod njihove temperature taljenja (oko 85%), laser anatomski spaja ciljane čestice (slika 12).

Glavne komponente SLS tehnologije: [9]

- Komora za izradu
- Sustav isporuke praha
- Uređaj za ponovo nanošenje praha
- Ogledalo za skeniranje
- Laser.



Slika 12 SLS proces [10]

Prednosti SLS tehnologije: [3]

- Potporne strukture nisu potrebne
- Vrlo precizni (20-150 μm)
- Prijanjanje među slojevima je odlično
- Izotropna mehanička svojstva
- Mogućnost ispisivanja više predmeta odjednom.

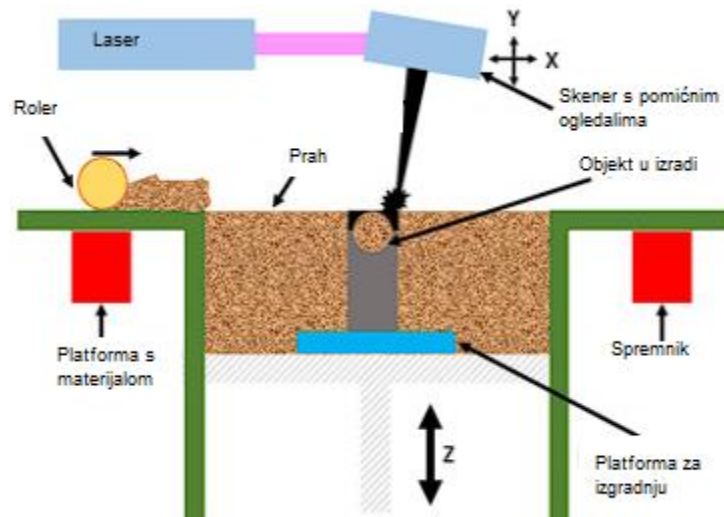
Nedostaci SLS tehnologije: [3]

- Visoka cijena potrošnog materijala
- Kompleksnost tehnologije
- Potrebna dodatna obrada za bolji završni izgled
- Zahtjeva mnogo čišćenja.

SLS tehnologija primjenjuje se u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji jer su dijelovi izdržljiviji i robusniji u usporedbi s drugim tehnologijama aditivne proizvodnje. Također se široko koristi i u drugim industrijama kao u npr. medicini, obrazovanju, dizajnu i robotici. [3]

Selektivno lasersko taljenje isto kao i SLS koristi laser kao izvor topline/energije, samo što u ovom slučaju laser ne sinterira prah nego ga topi. Ovaj proces se primjenjuje na prahove metala kao što su: nehrđajući čelik, titan i njegove legure, te kod aluminijskih legura. U ovom procesu ključno je imati inertnu atmosferu (argon, helij) kako bi spriječili oksidaciju ili nitriranje materijala. [3]

U SLM procesu laser je usmjeren kroz sustav leća, te se laserska zraka reflektira od zrcala do radne površine. Zrcalo se koristi kako bi se laserska zraka kontrolirala i kretala po x i y osi. Pri završetku taljenja sloja praha, radna površina (platforma) se pomiče prema dolje, dok četka nanosi novi sloj svježeg praha iz spremnika na radnu površinu i SLM proces se ponavlja. Proces SLM tehnologije je prikazan na slici 13. [9]



Slika 13 SLM tehnologija [12]

Za razliku od SLS procesa potrebne su potporne strukture, u trenutku kad se metal tali i sinterira on postaje teži od praha, te bi bez potpornih struktura jednostavno potonuo kroz prah. S obzirom na to koriste se potporne strukture kod provrta, kuteva većih od 45° i slično.

Prednosti SLM tehnologije: [11]

- Širok raspon materijala
- Relativno kratka brzina izrada (više lasera)
- Mogućnost ponovnog korištenja praha
- Sposobnost izrade kompliciranih dijelova
- Odlična mehanička svojstva.

Nedostaci SLM tehnologije: [11]

- Jako visoka cijena uređaja
- Dijelovi zahtijevaju dodatnu obradu (uklanjanje praha i potpora, te brušenje)
- Trenutno je maksimalna veličina ograničena na 1 metar
- Laseri koriste puno energije.

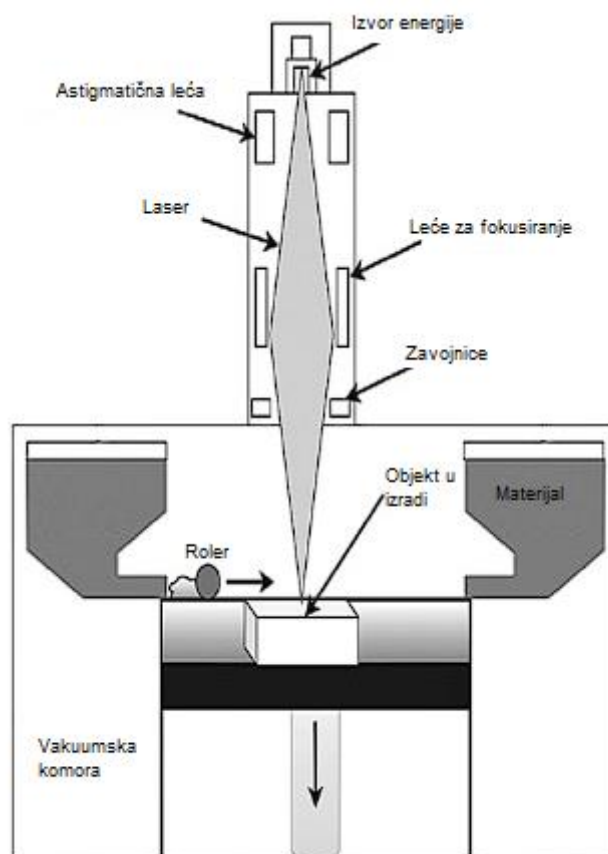
SLM tehnologija se koristi u gotovo svim industrijama gdje je potrebna brža i efikasnija izrada metalnih dijelova po nižoj cijeni izrade. Na slici 14 prikazan je primjer upotrebe SLM tehnologije u avioindustrije. Koristi se za izradu rezervnih dijelova i dijelova koji se ne mogu izraditi ostalim tehnologijama poput lijevanja, glodanja, tokarenja i sl. [3]



Slika 14 Stajni trap aviona izrađen SLM tehnologijom [11]

Taljenje elektronskim snopom (EBM) je tehnologija usporediva sa SLM tehnologijom, koristi se elektronski snop umjesto laserskog snopa za taljenje materijala. Kao i ostale tehnologije aditivne proizvodnje EBM stvara objekt sloj po sloj. Ova tehnologija koristi energetske snopove visoke gustoće kao izvor topline za taljenje praha, a odvija se u vakuumskoj komori koja se održava na visokoj temperaturi. [3]

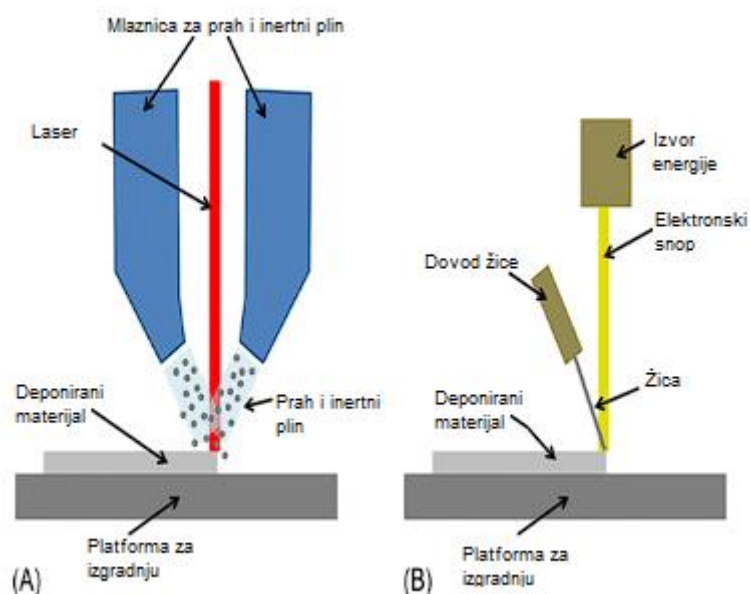
Proces se odvija tako da elektronski snop prolazi po površini praha te ga tali. Snop se pomiče sustavom leća, a nakon što je sloj završen četka nanosi novi sloj praha dok se radna površina pomiče prema dolje, te se proces ponavlja. Na slici 15 prikazan je proces EBM tehnologije. [3]



Slika 15 Proces EBM tehnologije [12]

2.2.6. DED – Taloženje usmjerenom energijom

Taloženje usmjerenom energijom je vrsta aditivne proizvodnje gdje se materijal i toplina dodaju zajedno. Izvor topline može biti laser, elektronski snop ili plazma, dok je materijal u obliku praha ili žice. Isto kao i kod PBF tehnologija ovdje je potrebna vakuumska atmosfera kod taljenja elektronskim snopom i inertna atmosfera kod plazme i lasera. [3]



Slika 16 Procesi DED tehnologije- (A) Taloženje materijala laserom i (B) Taloženje materijala elektronskim snopom [13]

Kao i kod ostalih metoda aditivne proizvodnje ovdje proces počinje kreiranjem 3D modela koji se onda u software za rezanje reže u slojeve potrebne stroju kako bi izradio objekt sloj po sloj. Proces započinje istovremenim nanošenjem materijala i njegovim taljenjem na radnoj površini gdje se materijal tali i stvrdnjava. Nakon što je sloj gotov radna površina se pomiče prema dolje i proces se ponavlja. DED strojevi koriste mlaznice koje su montirane na višeosne robotske ruke koje se mogu kretati u više smjerova, pružajući visoku točnost (preciznost). Na slici 16 prikazane su dvije DED tehnologije. [3]

Prednosti DED tehnologija: [3]

- Kontrola strukture zrna
- Visoka točnost (preciznost)
- Mogućnost proizvodnje velikih dijelova
- Mogućnost izrade materijala s različitim sastavima.

Nedostaci DED tehnologija: [3]

- Skupa oprema
- Potrebna dodatna obrada
- Uzak izbor materija.

Taloženje usmjerenom energijom koristi se za izradu dijelova, a korisno je i za popravak ili dodavanje materijala na postojeće komponente. [3]

2.2.7. BJT - Rapršivanje veziva

Rapršivanje veziva, poznato i kao Binder Jetting je postupak aditivne proizvodnje, jedna je od ekonomičnijih i brzih metoda koja omogućava izradu dijelova od praha. [3]

3D tiskanje je tehnologija koja spada u postupak raspršivanja veziva. U ovoj tehnologiji koristi se tekući vezivni agens za spajanje dijelova. Proces započinje tako da četka nanosi prah na radnu površinu, nakon toga iz spremnika s vezivom do mlaznice prolazi vezivo, gdje se raspršuje po radnoj površini prema uputama iz programa za rezanje. Kad se završi proces nanošenja veziva, odnosno kad je taj sloj gotov, radna površina pomiče se prema dolje, četka nanosi novi sloj materijala, te izbacuje višak praha i tako počinje rad na novom sloju sve dok se ne stvori cijeli objekt. Cijeli proces prikazan je na slici 17. [14]



Slika 17 Proces tehnologije 3D tiskanja [14]

Prednosti su: [14]

- Niža cijena izrade jer je energetski efikasniji od drugih postupaka
- Visoka točnost (preciznost)
- Mogućnost za masovnu proizvodnju
- Širok spektar materijala.

Nedostaci su: [14]

- Slaba čvrstoća
- Potrebna dodatna obrada
- Ovisnost o vezivu.

2.3. Materijali u FDM tehnologiji

U ovom poglavlju opisane su karakteristike i prednosti, te nedostaci materijala kod FDM tehnologije. Poznavanje materijala je ključno jer omogućuje donošenje optimalnih odluka prilikom konstruiranja i proizvodnje. To pomaže izabrati materijal koji najbolje odgovara potrebama, odrediti optimalne performanse proizvoda ili dijela, te osigurava sigurnost i usklađenost s propisima.

2.3.1. ABS

ABS je vrlo popularan materijal zahvaljujući svojoj niskoj cijeni i dobrim mehaničkim svojstvima. Poznat je po čvrstoći i otpornosti na udarce, što omogućava ispisivanje trajnih dijelova koji će izdržati dodatnu upotrebu i trošenje. ABS također ima višu temperaturu prijelaza iz staklene faze, što znači da materijal može izdržati mnogo više temperatura prije nego se počne deformirati. To čini ABS odličnim izborom za vanjske ili visoko temperaturne primjene. Prilikom ispisivanja s ABS-om, obavezno treba koristiti otvoren prostor s dobrim prozračivanjem, jer materijal obično ima blagi miris. ABS ima tendenciju znatnog skupljanja dok se hladi. [15]

2.3.2. ASA

ASA (Akrilni stiren akrilonitril) je materijal za 3D ispis svojstvima sličan ABS-u. Razvijen je kao alternativa za ABS koja bi bila otpornija na UV zrake, mijenjanjem vrste gume koja se koristi u formulaciji. ASA je poznat po visokoj otpornosti na udarce, većoj otpornosti na visoke temperature i kompliciranijem ispisivanju. Često se koristi u vanjskim primjenama umjesto ABS-a zbog njegove bolje otpornosti na UV zrake i nepovoljne vremenske uvjete. [15]

2.3.3. PLA

PLA (Poliaktička kiselina) je jedan od najčešće korištenih materijala koji se koriste u 3D ispisivanju. Idealan je za prototipe i dijelove koji neće biti izloženi teškim opterećenjima. PLA se ističe jer se može dobiti iz ekološki prihvatljivih izvora poput kukuruznog škroba ili šećerne trske. Ono što izdvaja PLA je iznimna jednostavnost upotrebe, koja ga čini odličnim izborom za prvi materijal za početnike u 3D ispisivanju.

Upotreba je jednostavna jer ne zahtijeva visoke temperature ispisivanja, nisu potrebne posebne komore, niti ispušta neugodne mirise.

Također je vrlo jeftin i stvara dijelove koji se mogu koristiti za različite primjene. Dok s druge strane ima i nedostataka, poput niže izdržljivosti u usporedbi s materijalima poput ABS-a, te osjetljivosti na visoke temperature. [15]

2.3.4. PETG

PETG je filament dobiven iz polietilentereftalata (PET), istog materijala koji se nalazi u plastičnim bočicama za vodu. Međutim, u PETG-u se dio etilen glikola zamjenjuje s CHDM-om (cikloheksandimetanolom), što označava "G" u njegovom nazivu, a što znači "modificiran glikolom". PETG služi kao prikladna alternativa za ABS, nudeći svojstva otpornosti na toplinu bez proizvodnje toksičnih plinova. Osim toga, PETG je također popularan zbog toga što je siguran za hranu. Osim toga, PETG se može naknadno obraditi brušenjem, slično kao PLA. Iako je većina FDM pisača kompatibilna s PLA-om također sposobna rukovati s PETG-om, možda će biti potrebno malo više kalibracije i truda za optimalne rezultate.

Prednosti PETG-a uključuju njegovu jednostavnost ispisivanja u usporedbi s ABS-om, mogućnost održavanja glatke završne obrade i povoljne karakteristike skladištenja. Međutim, dolazi s određenim nedostacima, poput potrebe za visokim temperaturama ispisivanja, što može potencijalno dovesti do trošenja dijelova pisača tijekom vremena. [15]

2.3.5. Najlon

Najlon (Poliamid) je popularan materijal u industriji plastike jer je robustan i čvrst, poznat po svojoj čvrstoći i fleksibilnosti. Najlon se često ojačava različitim vlaknima poput ugljika, stakla i Kevlara, ili se može ugraditi neprekidno vlakno od ugljika radi poboljšane armature. Njegova primjena je raširena u domenama visokokvalitetnog inženjeringa, obuhvaćajući izradu zupčanika i alata.

Iako nije jednostavan za ispisivanje kao materijali poput PLA-e ili PETG-a, najlon ostaje prihvatljiv izbor. Za učinkovit rad s najlonom možda će biti potrebna visoko temperaturna mlaznica, sposobna doseći do 300 °C. Pravilno skladištenje vrlo je važno, jer najlon lako upija vlagu kada je izložen otvorenom zraku, može dovesti do degradacije materijala, rezultirajući nezadovoljavajućom kvalitetom ispisa i smanjenom čvrstoćom. [15]

2.3.6. Polikarbonat

Polikarbonat (PC) u svojoj kemijskoj strukturi sadrži karbonatne veze, te zato ima izuzetno visoku vlačnu čvrstoću, otpornost na udarce i visoku otpornost na toplinu. Materijal je također fleksibilan i zato se često primjenjuje u situacijama većeg opterećenja na predmet. S druge strane, materijal je higroskopan, to znači da će apsorbirati vlagu iz zraka koja će utjecati na njegova mehanička svojstva. Zato se mora čuvati u hermetički zatvorenim, bezvlažnim spremnicima. Polikarbonat je najbolje ispisivati na uređaju koji ima zatvoren prostor za ispisivanje i na kojem je moguće ostvariti visoke temperature mlaznice kao i postolja. Ako se ispisuje na pre niskim temperatura doći će do razdvajanja slojeva, te do neuspješnog ispisivanja. [15]

2.3.7. Filamenti s metalnim punjenjem

Filamenti s metalnim punjenjem sadrže vrlo fini prah od metala, poput bakra, bronce, mjedi i nehrđajućeg čelika. Postotak metalnog praha unutar polimernog filamnta ovisi od proizvođača do proizvođača. Prisutnost metalnog praha čini filament puno težim od polimernog filemnta. Takav filament je također abrazivan, pa se preporuča korištenje mlaznice od legure titana koja je otporna na abrazivno trošenje. Tipična mlaznica od mjedi mogla bi se oštetiti kao i začepiti. [15]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu predstaviti će se uređaj za 3D ispis, materijali koji će se koristiti za ispitivanje, navesti će se parametri kroz koje će se provoditi ispitivanja. Predstaviti softvere kao i alate za pripremu 3D modela. Izraditi potrebne 3D modele, odnosno uzorke na kojima će se provesti ispitivanja.

Glavni cilj je istražiti kako različiti parametri tijekom 3D ispisa utječu na mehanička svojstva te dimenzijsku točnost. Sustavnom varijacijom tih parametara može se optimizirati postupak ispisa sa boljim performansama.

Ispitivanje se provodi u dva dijela. Prvi dio odnosi se na ispitivanje mehaničkih svojstava, odnosno ispitivanje vlačne čvrstoće, dok se drugi dio ispitivanja odnosi na dimenzijsku točnost koja se kontrolira vizualnom detekcijom.

3.1. 3D pisac i materijal

Za izradu modela koristi se 3D pisac Ender 3 V2 Neo (slika 18) koji koristi tehnologiju FDM-a. Jednostavan je za korištenje, dolazi polu-sastavljen, ima intuitivno sučelje za jednostavno rukovanje, kao i automatsku kalibraciju. Pouzdan i kvalitetan pisac, što ga čini idealnim izborom za početnike, ali i za iskusne korisnike. U tablici 2 prikazane su specifikacije pisca.



Slika 18 Uređaj Ender 3 v2 Neo [16]

Tablica 2 Specifikacije Ender 3 V2 Neo [16]

Model	Ender 3 v2 Neo
Broj ekstrudera	1
Volumen izgradnje	220 x 220 x 250 mm
Fizičke dimenzije	438 x 424 x 472 mm
Maksimalna brzina ispisa	120 mm/s
Rezolucija	0.1 mm
Temperatura podloge	Do 100°C
Temperatura mlaznice	Do 260°C
Promjer filameta	1,75 mm
Debljina sloja	0,1-0,35 mm

Materijal iz kojeg su izrađeni ispitni uzorci je ecoPLA proizvođača 3DJAKE (slika 19). Ovaj materijal je blago modificirana verzija PLA koji je netoksičan i biorazgradiv. Taj materijal je odabran zbog svoje jednostavnosti pri upotrebi i jeftine cijene.



Slika 19 ecoPLA filament [17]

3.2. Ispitivanje utjecaja parametara na mehanička svojstva

3.2.1. Plan pokusa

Cilj eksperimenta je istražiti kako različiti parametri ispisivanja utječu na mehanička svojstva 3D ispisanih uzoraka. Parametri koji su varirani :

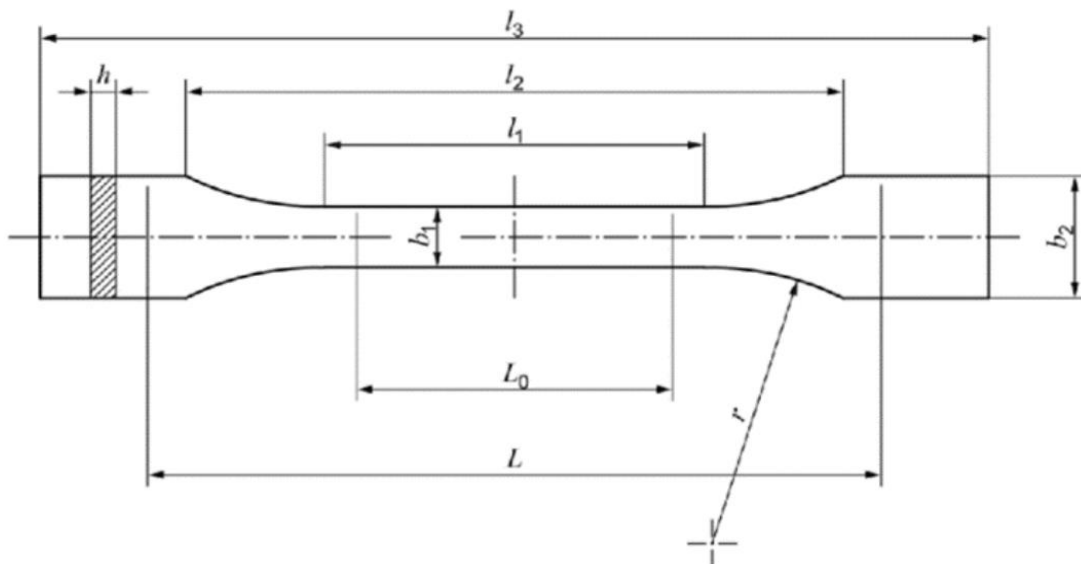
- Brzina ispisivanja (engl. Speed) [mm/s]
- Temperatura mlaznice (engl. Printing temperature) [°C]
- Postotak ispunjenosti (engl. Infil denstiy) [%]
- Visina sloja (engl. Layer Height) [mm]

Uzorci se ispisuju tako da su tri parametra fiksna, dok se četvrti parametar mijenja u svakom setu eksperimenta. Npr. mijenja se brzina ispisivanja sa 20 mm/s na 40 mm/s i 60 mm/s, dok su temperatura mlaznice, postotak ispunjenosti i visina sloja konstantni. Za svaki mijenjani parametar ispisuju se tri epruvete kako bi se osigurala točnost i pouzdanost rezultata. Ukupno će biti 36 probnih uzoraka (epruveta).

Zadatak je provesti ispitivanja vlačne čvrstoće na temelju izmjenjivanja tih parametara kako bi se istražio utjecaj pojedinih parametara 3D ispisa na mehanička svojstva. Postupci ispitivanja temelje se na standardima HRN EN ISO 527-1 i HRN EN ISO 527-2. Ti standardi specificiraju uvjete za testiranje rastezних svojstava polimernih materijala, uključujući oblik i dimenzije uzoraka, brzinu opterećenja, temperaturene uvjete, te metode izvođenja i procjene rezultata ispitivanja.

3.2.2. Izrada uzoraka

Za konstruiranje uzorka koristiti se norma HRN EN ISO 527-2, koja definira dimenzije epruvete četvrtastog poprečnog presjeka, slika 20.



Dimenzije u milimetrima

		1A	1B
l_3	Dužina	170	≥ 150
l_1	Dužina uskog dijela	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$
r	Radius	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2	Udaljenost između širih dijelova	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2	Širina	$20,0 \pm 0,2$	
b_1	Širina na uskom dijelu	$10,0 \pm 0,2$	
h	Debljina	$4,0 \pm 0,2$	
L_0	Duljina mjerne baze (preferirana)	$75,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
	Duljina mjerne baze (dopuštena)	$50,0 \pm 0,5$	
L	Početna udaljenost između hvatišta	115 ± 1	115 ± 1

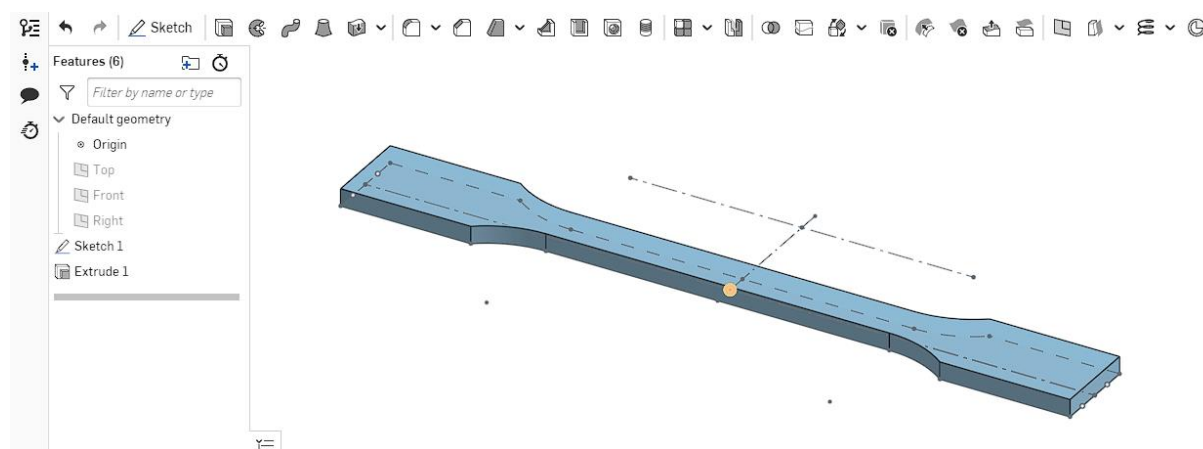
Slika 20 Dimenzije epruvete po normi HRN EN ISO 527-2

3.2.3. Konstruiranje epruvete

Za konstruiranje epruvete odabran je software OnShape, u kojem je izrađena epruvetu prema prethodno zadanim normama. OnShape je besplatni online program kojem se može pristupiti preko weba.

Proces izrade započinje u 2D crtežu gdje je skicirana epruveta pomoću naredbi unutar programa. Prilikom konstruiranja potrebno je definirati (kotirati) sve potrebne linije, na način da su sve linije crne boje. Definiranje svih linija bitno je ako će se kasnije izmjenjivati neke od dimenzija bez da skica promijeni oblik

Nakon skiciranja 2D modela potrebno ga je ekstrudirati u 3D, naredbom „extrude“, slika 21.



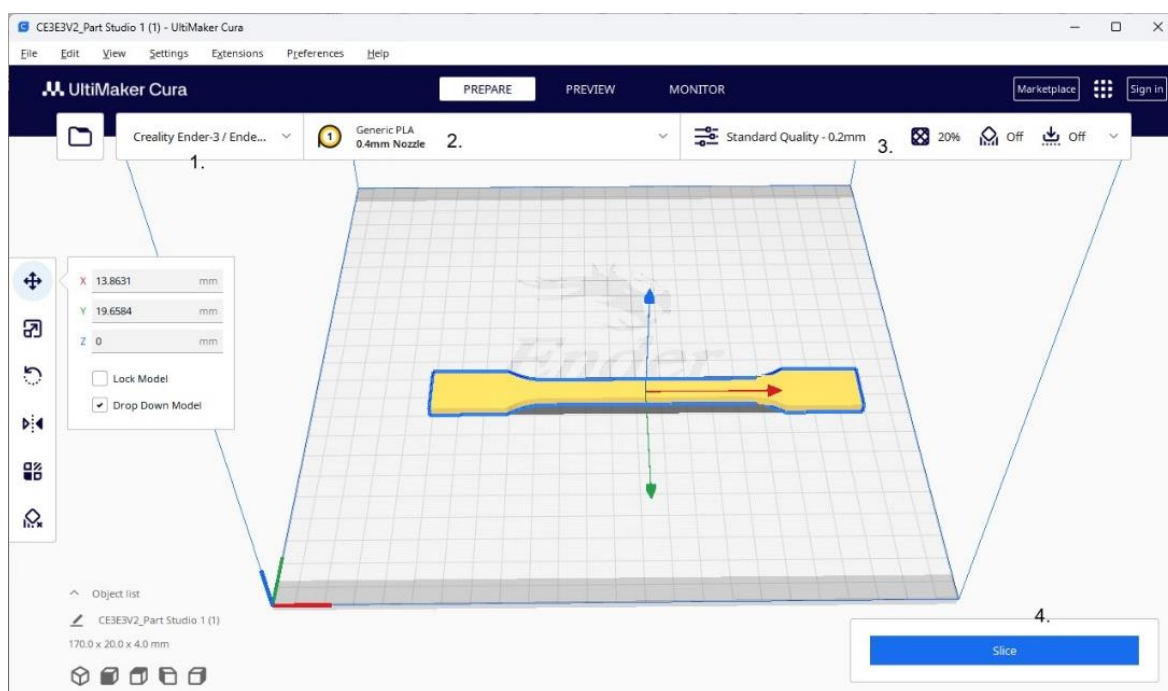
Slika 21 Primjer gotovog 3D modela epruvete za ispitivanje

Kada je 3D model, odnosno epruveta za testiranje gotova, potrebno ga je „exportirati“ u .stl datoteci koja se kasnije obrađuje u programu za rezanje.

3.2.4. Rezanje epruvete

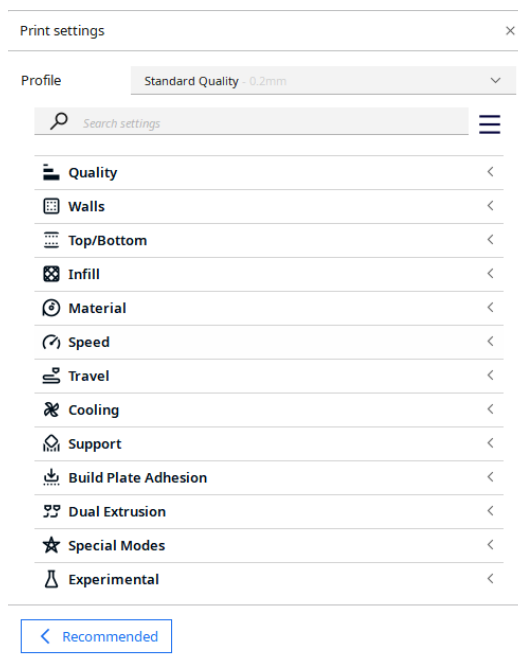
Datoteka „.stl“ otvara se pomoću software-a za rezanje UltiMaker Cura. Bitno je koristiti software koji je kompatibilan sa 3D pisačem, što se može provjeriti internetskim pretraživanjem.

Proces rezanja započinje tako da se unutar programa odabere pisač koji se koristi (slika 22 točka 1.). Nakon odabira uređaja slijedi odabir materijala kao i veličina mlaznice (slika 22 točka 2.). Na odabir materijala i mlaznice kao i na odabir uređaja potrebno je posebno obratiti pažnju. Odabir odgovarajućeg materijala, mlaznice kao i uređaja osigurava kompatibilnost i kvalitetu ispisivanja, sprečavajući oštećenja i osiguravajući optimalne rezultate. Točkom 3. podešavanja parametara ispisa prilagođava se proces ispisivanja potrebama i zahtjevima korisnika. Nakon podešavanja parametara 3D model potrebno je „rezati“ (slika 22 točka 4.). Program zajedno sa setom uputa pretvara .stl datoteku u G kod koji uređaj prati kako bi izradio opipljivi 3D model.



Slika 22 Program UltiMaker Cura - 1. Odabir uređaja; 2. Odabir materijala i mlaznice; 3. Podešavanje parametara; 4. Rezanje

U softveru UltiMaker Cura postoji niz parametara koji se mogu podešavati kako bi se proces ispisivanja prilagodio potrebama i zahtjevima korisnika.



Slika 23 Popis parametara koji se mogu varirati

Na slici 23. prikazani su parametri:

- Postavke Kvalitete (engl. „Quality“) : određuju debljinu svakog sloja koji se ispisuje
- Postavke Zidova (engl. „Walls“):određuju broj i debljinu vanjskih zidova
- Postavka Gornji/Donji(engl. „Top/Bottom“) : određuju broj i debljinu slojeva pri vrhu i dnu modela
- Postavke Ispune (engl. „Infil“): definiraju unutarnju strukturu modela
- Postavke Materijala (engl.„Material“) : definiraju temperaturu mlaznice i radne površine
- Postavke Brzine (engl. „Speed“): omogućavaju kontrolu nad brzinom kretanje glave pisača tokom ispisivanja
- Postavke Retrakcije (engl. „Travel“): određuju brzinu i količinu retrakcije filamenta
- Postavke Hlađenja (engl. „Cooling“): omogućavaju kontrolu nad ventilatorom za hlađenje tokom ispisivanja
- Postavke Potpora (engl. „Support“): omogućavaju dodavanje dodatnih struktura ispod prevjesa i izbočina kako bi se osiguralo stabilno ispisivanje
- Postavke Adhezije ispisa na podlogu (engl. „Build Plate Adhesion“): omogućavaju da model čvrsto ostane pričvršćen za radnu podlogu tokom procesa ispisivanja
- Postavke rada dva ekstrudera (engl. „Dual Extrusion“): te postavke nisu dostupne za ovaj pisač jer ima samo jedan ekstruder, dok za druge pisače koji imaju dva ili više omogućavaju korištenje obje glave
- Specijalne postavke (engl. „Special Modes“): omogućavaju prilagođavanje postavki ispisivanja za specifične potrebe i zahtjeve projekta
- Eksperimentalne postavke (engl. „Experimental“): omogućavaju pristup postavkama koje su u fazi testiranja ili razvoja.

Postavke, odnosno parametri kvalitete su neki od parametara koji se izmjenjuju tokom eksperimenta.

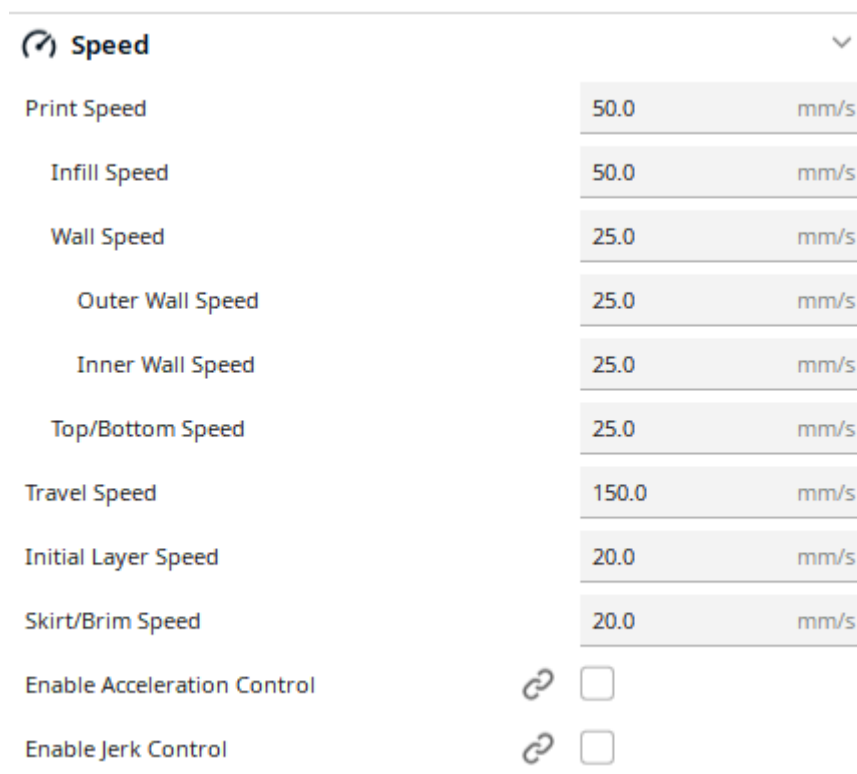


Quality		
Layer Height	0.2	mm
Initial Layer Height	0.2	mm
Line Width	0.4	mm
Wall Line Width	0.4	mm
Outer Wall Line Width	0.4	mm
Inner Wall(s) Line Width	0.4	mm
Top/Bottom Line Width	0.4	mm
Infill Line Width	0.4	mm
Initial Layer Line Width	100.0	%

Slika 24 Postavke kvalitete

U postavkama kvalitete (slika 24) može se mijenjati parametar visine sloja. Manja visina sloja povećava kvalitetu ispisa, ali znatno utječe na duže vrijeme ispisivanja i obrnuto. Debljina linije određena je promjerom mlaznice, tako da iznosi 0,4 mm.

Drugi parametar koji se varira u eksperimentu su postavke brzine (slika 26), što omogućava kontrolu nad brzinom kretanja glave pisača tokom ispisivanja.



Setting	Value	Unit
Print Speed	50.0	mm/s
Infill Speed	50.0	mm/s
Wall Speed	25.0	mm/s
Outer Wall Speed	25.0	mm/s
Inner Wall Speed	25.0	mm/s
Top/Bottom Speed	25.0	mm/s
Travel Speed	150.0	mm/s
Initial Layer Speed	20.0	mm/s
Skirt/Brim Speed	20.0	mm/s
Enable Acceleration Control	<input type="checkbox"/>	
Enable Jerk Control	<input type="checkbox"/>	

Slika 25 Postavke brzine

Brzina ispisivanja je ključni faktor koji utječe na vrijeme koje je potrebno da se ispiše 3D model. Na slici 25 prikazani su parametri koji se mogu izmjenjivati, a to su brzina ispisa i brzina ispune. Tu su još brzine ispisivanja zidova, te gornjih i donjih bridova koji su automatski zadani na 50% brzine. Brzina kretanja se također može mijenjati, ona može biti znatno veća jer to je brzina kretanja glave ekstrudera dok ne vrši ispisivanje.

Brzina koja se ne mijenja tokom eksperimenta je brzina ispisivanja prvog sloja. Ta brzina uvijek iznositi 20 mm/s jer znatno utječe na faktor da li će se prvi sloj uhvatiti za radnu površinu. Prevelike brzine mogu rezultirati nepovoljnom adhezijom, a to može dovesti do odljepljivanja bridova kao i cijelog modela.

Material		
Printing Temperature	200.0	°C
Printing Temperature Initial Layer	200.0	°C
Initial Printing Temperature	200.0	°C
Final Printing Temperature	200.0	°C
Build Plate Temperature	50	°C
Build Plate Temperature Initial Layer	50	°C

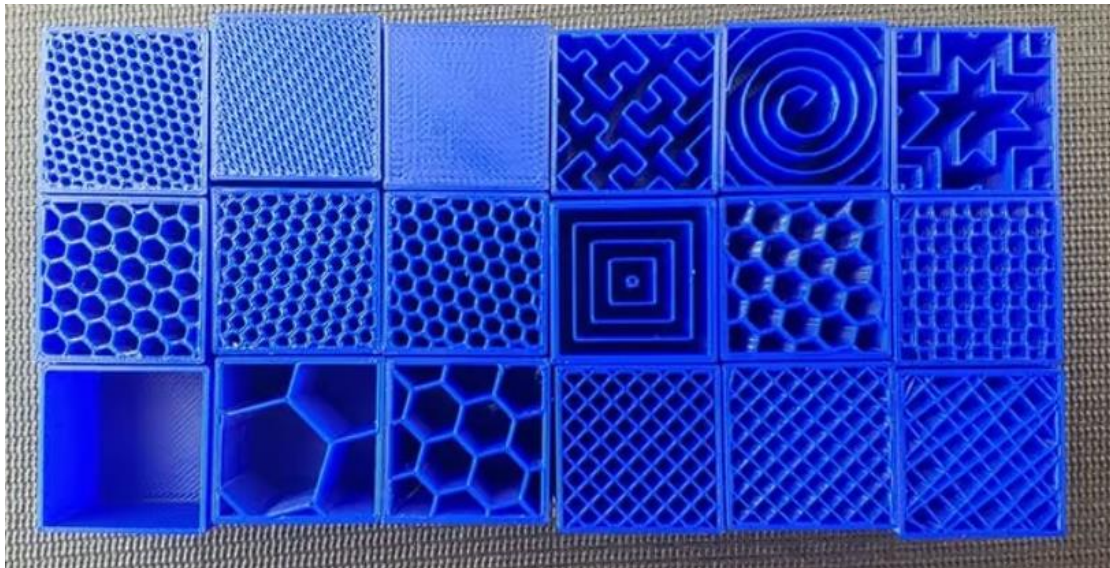
Slika 26 Postavke Materijala

Treći parametar koji se mijenja je temperatura mlaznice. Temperatura materijala definira se u postavkama materijala (slika 26.) Temperatura mlaznice utječe na viskoznost filameta, povećanje temperature povisuje viskoznost, što olakšava protok kroz mlaznicu. Niže temperature mogu poboljšati preciznost i detalje ispisa, jer omogućavaju preciznije ispunjavanje slojeva bez proširenja ili deformacija. Pravilno podešavanje temperature mlaznice ključno je za postizanje kvalitetnih i pouzdanih rezultata 3D ispisivanja.

Infill		
Infill Density	20.0	%
Infill Line Distance	6.0	mm
Infill Pattern	Cubic	▼
Infill Line Multiplier	1	
Infill Overlap Percentage	30.0	%
Infill Layer Thickness	0.2	mm
Gradual Infill Steps	0	

Slika 27 Postavke ispunje

Postotak ispunje je četvrti parametar koji se varirao u eksperimentu. U postavkama ispunje (slika 27) može se mijenjati gustoća ispunje definirana postotkom ili razmakom između linija unutar modela, kao i oblik koji će ispunje raditi. Na slici 28 prikazani su razni primjeri ispunje.



Slika 28 Primjeri ispune 3D modela [18]

3.2.4.1. Određivanje parametara epruvete za ispitivanje

Parametri se variraju na način koji je prethodno naveden u planu pokusa, a dodatno su objašnjeni u tablici 3.

Epruveta se reže na način da je jedan parametar variran, dok su ostala 3 konstantna. Konstantne vrijednosti iznose:

- Brzina 40 mm/s
- Temperatura mlaznice 200 °C
- Postotak ispunjenosti 20 %
- Visina sloja 0,2 mm.

Varirani parametri iznose:

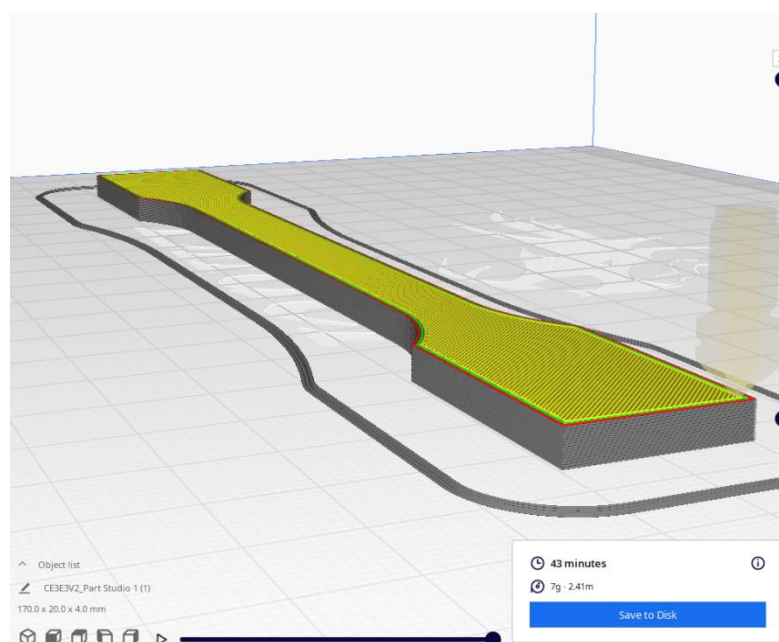
- Brzina 20,40,60 mm/s
- Temperatura mlaznice 190, 200 i 210 °C
- Postotak ispunjenosti 10, 20 i 30 %
- Visina sloja 0,1; 0,2 i 0,3 mm.

Tablica 3 Varijacije parametara ispisivanja

OZNAKA	KOLIČINA	BRZINA [mm/s]	TEMPERATURA MLAZNICE [°C]	POSTOTAK ISPUNJENOSTI [%]	VISINA SLOJA [mm]
TB1	3	20	200	20	0,2
TB2	3	40	200	20	0,2
TB3	3	60	200	20	0,2
TT1	3	40	190	20	0,2
TT2	3	40	200	20	0,2
TT3	3	40	210	20	0,2
TI1	3	40	200	10	0,2
TI2	3	40	200	20	0,2
TI3	3	40	200	30	0,2
TV1	3	40	200	20	0,1
TV2	3	40	200	20	0,2
TV3	3	40	200	20	0,3

3.2.4.2. Izrada G-koda u programu

Nakon određivanja parametara i postavki, odabire se gumb „Slice“ u programu UltiMaker Cura, koji pokreće proces rezanja i pretvaranja .stl datoteke u G-kod. Unutar programa moguć je prikaz pojedinih slojeva modela, kao i putanja kretanja glave ekstrudera (slika 29).



Slika 29 Prikaz pred pregleda 3D modela

Može se vidjeti procijenjeno vrijeme trajanja ispisivanja, kao i procjena koliko materijala će se potrošiti.

Nakon koraka rezanja, potrebno je G-kod prebaciti na 3D pisač preko SD kartice.

3.2.5. Priprema i ispisivanje epruveta

Prije nego počne proces ispisivanja 3D uređaja potrebno je uređaj i materijal pripremiti. Važno je osigurati da je radna površina čista i ravna. Čišćenje radne ploče pomoću 95% alkohola potrebno je kako bi se uklonile nečistoće i ostaci materijala s prethodnih ispisivanja.

Kalibracija radne površine ključna je kako bi se osiguralo da se predmet ispisuje na pravilnoj visini i da slojevi materijala budu ravnomjerno nanoseni. To obično uključuje podešavanje visine radne površine i provjeru ravnosti pomoću ugrađenih senzora ili ručnog podešavanja.

Priprema filameta uključuje umetanje filameta u odgovarajući ulaz na pisaču i provjeru jesu li vodilice filameta postavljene kako bi se spriječilo zapetljavanje. Također je važno osigurati da je filament suh i čist kako bi se izbjegli problemi tijekom ispisivanja.

Mlaznica 3D pisača može postati začepljena ostacima materijala ili prašine, što može ometati protok materijala tokom ispisivanja. Prije svakog ispisivanja važno je provjeriti mlaznicu i očistiti ju ako je potrebno. To se obično radi pomoću posebnih alata za čišćenje ili korištenjem visokih temperatura za uklanjanje ostataka.

Nakon što su sve pripreme obavljene, 3D pisač je spreman za početak ispisivanja željenog objekta.

Ispisane epruvete potrebno je označiti sukladno tablici 3. kako bi se moglo provesti daljnje ispitivanje. Uz oznaku varijacije parametara, epruveta se označava i rimskim brojevima od 1 do 3 (npr TB1 I, TB1 II, TB1 III). Ukupno je ispisano 36 epruveta.

3.3. Ispitivanje na kidalici

Osnovna mehanička svojstva ispitana su statičkim vlačnim pokusom. Ispitivanje je provedeno na kidalici proizvođača Shimadzu AG-X (slika 30) prema normi HRN 527. Epruvete su se kontinuirano vlačno opterećivale sve do loma. Tijekom ispitivanja mjerena je sila i produljenje epruvete, te je u trenutku loma očitana maksimalna sila. Ispitano je 36 epruveta.

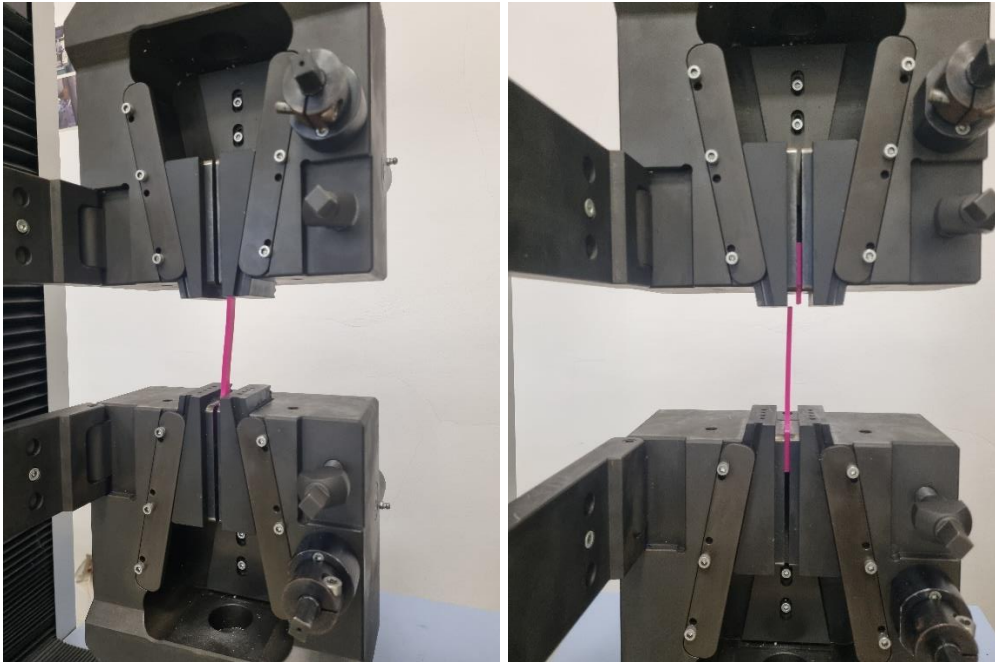


Slika 30 kidalica Shimadzu AG-X



Slika 31 Mjerenje epruvete

Prvi korak prije ispitivanja bilo je mjerenje epruvete pomoću pomičnog mjerila (slika 31). Nakon toga epruveta je postavljena između dva oslonca. Mjereno je produljenje na uređaju. Vlačna sila povećavala se dok nije došlo do loma epruvete. Na slici 32 prikazana je epruveta u kidalici prije te nakon vlačnog ispitivanja.



Slika 32 a) epruveta prije vlačnog ispitivanja, b) epruveta nakon ispitivanja

Tijekom vlačnog ispitivanja na računalom programu iscrtavan je dijagram sile i produljenja. Na slici 33 prikazan je dijagram sile - produljenja za jednu epruvetu. Uz dijagram, program je ispisao vrijednosti poput maksimalne sile, sile loma, vlačne čvrstoće, produljenja te istežanja. Ti podaci su bitni jer će se iz njih raditi analiza. U tablici 4 su prikazane pripadajuće vrijednosti za set epruveta.

Konačno naprežanje računa se prema izrazu:

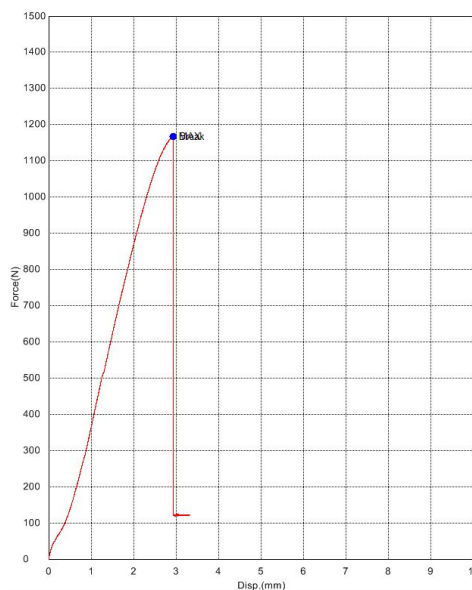
$$R_k = \frac{F_k}{S_0} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1)$$

Maksimalna vlačna čvrstoća:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2)$$

Vrijednost istežanja određuje se izrazom:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3)$$

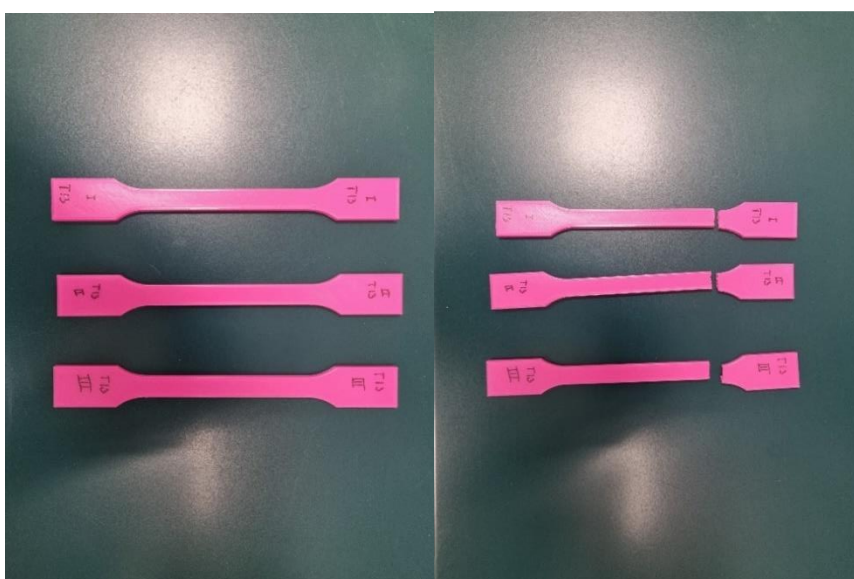


Slika 33 Slika dijagrama vlačnog ispitivanja epruvete T13-I

Tablica 4 Rezultati vlačnog ispitivanja za epruvete T13 I, T13 II i T13 III

VARIRANI PARAMETAR	TESTNA GRUPA	OZNAKA	MAX SILA [N]	MAX VLAČNA ČVRTOĆA [N/mm ²]	SILA LOMA [N]	KONAČNO NAPREZANJE [N/mm ²]	PRODULJENJE [mm]	ISTEZANJE [%]
POSOTAK	T13	T13 I	1167,79	29,81	1167,36	29,79	2,93	2,89
		T13 II	976,94	24,89	974,90	24,83	2,62	2,64
		T13 III	1048,04	26,98	1043,53	26,87	3,03	3,13

Na slici 34 prikazane su epruvete prije i nakon ispitivanja na kidalici. Na slici je vidljivo da je do loma došlo skoro na istom dijelu. U prilogu rada prikazani su rezultati za sva ostala ispitivanja.



Slika 34 Epruvete prije i nakon ispitivanja

3.4. Rezultati i analiza

Nakon završetka ispitivanja na kidalici dobiveni rezultati prikazani su u tablici 5. koja prikazuje rezultate svih ispitivanja. Prikazane vrijednosti su postignute tijekom ispitivanja vlačne čvrstoće za sve epruvete prema ISO 527, osim epruvete TB3 III, koja je bila neuspješna zbog pogrešnog stezanja u kidalici.

Tablica 5 Rezultati ispitivanja

VARIRANI PARAMETAR	TESTNA GRUPA	OZNAKA	MAX SILA [N]	MAX VLAČNA ČVRTOĆA [N/mm ²]	SILA LOMA [N]	KONAČNO NAPREZANJE [N/mm ²]	PRODULJENJE [mm]	ISTEZANJE [%]
BRZINA	TB1	TB1 I	459,44	12,65	459,44	12,65	1,23	1,13
		TB1 II	528,46	14,30	528,46	14,30	1,48	1,56
		TB1 III	656,61	17,75	656,80	17,75	2,26	2,15
	TB2	TB2 I	545,65	15,37	545,65	15,37	1,52	1,36
		TB2 II	415,39	11,31	415,89	11,30	1,05	0,95
		TB2 III	615,34	16,95	615,34	16,95	2,28	2,07
	TB3	TB3 I	543,42	15,46	542,61	15,43	1,68	1,48
		TB3 II	488,12	13,44	486,39	13,48	1,59	1,47
		TB3 III						
TEMPERATURA	TT1	TT1 I	513,04	13,62	512,41	13,62	2,04	2,08
		TT1 II	689,54	17,98	688,70	17,96	2,74	2,46
		TT1 III	670,23	17,94	670,23	17,94	2,71	2,47
	TT2	TT2 I	689,93	19,72	689,67	19,71	2,47	2,27
		TT2 II	683,20	17,57	683,20	17,57	2,36	2,16
		TT2 III	817,76	20,81	815,63	20,76	3,06	2,78
	TT3	TT3 I	721,42	20,96	720,72	20,95	2,61	2,47
		TT3 II	878,06	23,11	878,06	23,11	2,83	2,60
		TT3 III	933,82	23,25	933,82	23,45	2,68	2,82
VISINA	TV1	TV1 I	921,12	24,72	921,12	24,72	2,94	2,73
		TV1 II	849,60	22,95	847,12	22,89	2,85	2,61
		TV1 III	902,04	25,02	921,41	25,01	2,86	2,72
	TV2	TV2 I	1090,26	29,66	1090,26	29,66	3,01	2,84
		TV2 II	730,79	19,71	730,79	19,71	1,79	1,73
		TV2 III	1157,44	32,11	115,47	32,05	3,41	3,26
	TV3	TV3 I	1382,78	36,24	1381,65	36,25	2,87	2,81
		TV3 II	1220,90	32,03	1219,65	32,00	2,73	2,61
		TV3 III	1382,02	37,27	1381,75	37,26	3,22	3,10
POSOTAK	TI1	TI1 I	753,37	19,96	753,37	19,96	2,19	2,02
		TI1 II	629,95	17,32	629,33	17,31	1,75	1,62
		TI1 III	794,30	22,04	794,30	22,04	2,29	2,11
	TI2	TI2 I	1022,66	26,33	1022,34	26,32	3,16	3,14
		TI2 II	844,51	22,80	844,51	22,80	2,10	1,92
		TI2 III	851,66	24,09	850,46	24,06	2,20	1,99
	TI3	TI3 I	1167,79	29,81	1167,36	29,79	2,93	2,89
		TI3 II	976,94	24,89	974,90	24,83	2,62	2,64
		TI3 III	1048,04	26,98	1043,53	26,87	3,03	3,13

Epruvete koje su bile podvrgnute ispitivanjima imale su variranje 4 vrste parametara: brzinu ispisivanja, temperaturu mlaznice, visinu sloja i postotak ispune. Cilj istraživanja bio je ispitati kako variranje iznosa tih parametara utječe na mehanička svojstva poput vlačne čvrstoće. Svaka testa skupina ima i tri uzorka kako bi se povećala točnost i pouzdanost. U tablicama su proračunate i prikazane i srednje vrijednosti pojedinih testnih grupa radi prezentacije i analize rezultata. Izračunata je i standardna devijacija.

Izračun srednjih vrijednosti:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{n} \quad (4)$$

Izračun standardnih devijacija:

$$s = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

3.4.1 Rezultati i analiza varijacije parametra visine sloja

U tablici 6 prikazani su rezultati ispitivanja utjecaja varijacije parametra visine sloja na vlačnu čvrstoću. Iz tablice je vidljivo da kod ispitivanja utjecaja visine sloja na vlačnu čvrstoću dolazi do rasta vlačne čvrstoće kako je rasla i visina sloja. Parametar visine sloja od 0,3 mm pokazao je najbolje rezultate vlačne čvrstoće, te su te epruvete izdržale najveću prosječnu maksimalnu silu od 1328,57 N, uz produljenje od 2,94 mm.

Tablica 6 Rezultati ispitivanja - visina sloja

VARIRANI PARAMETAR	TESTNA GRUPA	OZNAKA	MAX SILA [N]	MAX VLAČNA ČVRTOĆA [N/mm ²]	STANDARDNA DEVIJACIJA [N/mm ²]	SILA LOMA [N]	KONAČNO NAPREZANJE [N/mm ²]	PRODULJENJE [mm]	ISTEZANJE [%]
VISINA	TV1	TV1 I	921,12	24,72		921,12	24,72	2,94	2,73
		TV1 II	849,60	22,95		847,12	22,89	2,85	2,61
		TV1 III	902,04	25,02		921,41	25,01	2,86	2,72
		TV1 SR.	890,92	24,23	1,12	896,55	24,21	2,88	2,69
	TV2	TV2 I	1090,26	29,66		1090,26	29,66	3,01	2,84
		TV2 II	730,79	19,71		730,79	19,71	1,79	1,73
		TV2 III	1157,44	32,11		115,47	32,05	3,41	3,26
		TV2 SR.	992,83	27,16	6,57	645,51	27,14	2,74	2,61
	TV3	TV3 I	1382,78	36,24		1381,65	36,25	2,87	2,81
		TV3 II	1220,90	32,03		1219,65	32,00	2,73	2,61
		TV3 III	1382,02	37,27		1381,75	37,26	3,22	3,10
		TV3 SR.	1328,57	35,18	2,78	1327,68	35,17	2,94	2,84

3.4.2 Rezultati i analiza varijacije parametra temperature mlaznice

U tablici 7 prikazani su rezultati ispitivanja utjecaja ispitivanja temperature mlaznice na vlačnu čvrstoću.

Tablica 7 Rezultati ispitivanja - temperatura mlaznice

VARIRANI PARAMETAR	TESTNA GRUPA	OZNAKA	MAX SILA [N]	MAX VLAČNA ČVRTOĆA [N/mm ²]	STANDARDNA DEVIJACIJA [N/mm ²]	SILA LOMA [N]	KONAČNO NAPREZANJE [N/mm ²]	PRODULJENJE [mm]	ISTEZANJE [%]
TEMPERATURA	TT1	TT1 I	513,04	13,62		512,41	13,62	2,04	2,08
		TT1 II	689,54	17,98		688,70	17,96	2,74	2,46
		TT1 III	670,23	17,94		670,23	17,94	2,71	2,47
		TT1 SR.	624,27	16,51	2,51	623,78	16,51	2,50	2,34
	TT2	TT2 I	689,93	19,72		689,67	19,71	2,47	2,27
		TT2 II	683,20	17,57		683,20	17,57	2,36	2,16
		TT2 III	817,76	20,81		815,63	20,76	3,06	2,78
		TT2 SR.	730,30	19,37	1,65	729,50	19,35	2,63	2,40
	TT3	TT3 I	721,42	20,96		720,72	20,95	2,61	2,47
		TT3 II	878,06	23,11		878,06	23,11	2,83	2,60
		TT3 III	933,82	23,25		933,82	23,45	2,68	2,82
		TT3 SR.	844,43	22,44	1,28	844,20	22,50	2,71	2,63

U skladu s očekivanjima, povećanje temperature mlaznice dovelo je do poboljšanja spajanja između slojeva i, sukladno tome, do porasta vlačne čvrstoće. Iz rezultata (tablica 7) je vidljivo kako smo povećavali iznos temperature mlaznice dolazi do rasta vrijednosti vlačne čvrstoće.

3.4.3 Rezultati i analiza varijacije parametra postotka ispunjenosti

U tablici 8 prikazani su rezultati ispitivanja utjecaja ispitivanja postotka ispunjenosti na vlačnu čvrstoću.

Tablica 8 Rezultati ispitivanja - postotak ispunjenosti

VARIRANI PARAMETAR	TESTNA GRUPA	OZNAKA	MAX SILA [N]	MAX VLAČNA ČVRTOĆA [N/mm ²]	STANDARDNA DEVIJACIJA [N/mm ²]	SILA LOMA [N]	KONAČNO NAPREZANJE [N/mm ²]	PRODULJENJE [mm]	ISTEZANJE [%]
POSOTAK ISPUNJENOSTI	TI1	TI1 I	753,37	19,96		753,37	19,96	2,19	2,02
		TI1 II	629,95	17,32		629,33	17,31	1,75	1,62
		TI1 III	794,30	22,04		794,30	22,04	2,29	2,11
		TI1 SR.	725,87	19,77	2,37	725,67	19,77	2,08	1,92
	TI2	TI2 I	1022,66	26,33		1022,34	26,32	3,16	3,14
		TI2 II	844,51	22,80		844,51	22,80	2,10	1,92
		TI2 III	851,66	24,09		850,46	24,06	2,20	1,99
		TI2 SR.	906,28	24,41	1,79	905,77	24,39	2,49	2,35
	TI3	TI3 I	1167,79	29,81		1167,36	29,79	2,93	2,89
		TI3 II	976,94	24,89		974,90	24,83	2,62	2,64
		TI3 III	1048,04	26,98		1043,53	26,87	3,03	3,13
		TI3 SR.	1064,26	27,23	2,47	1061,93	27,16	2,86	2,89

Također, kako se očekivalo, povećanjem postotka ispune povećala se količina materijala i kontaktna površina, što je otežalo širenje pukotina. Iz rezultata (tablica 8) je vidljivo da je povećanjem iznosa ispunjenosti došlo do rasta vrijednosti vlačne čvrstoće. Druge najbolje rezultate vlačne čvrstoće pokazao je upravo test ispune od 30%, te su te epruvete izdržala najveću prosječnu maksimalnu silu od 1064,26 N, uz produljenje od 2,86 mm.

3.4.4 Rezultati i analiza varijacije parametra brzine

U tablici 9 prikazani su rezultati ispitivanja utjecaja ispitivanja brzine ispisivanja na vlačnu čvrstoću.

Tablica 9 Rezultati ispitivanja - brzina ispisivanja

VARIRANI PARAMETAR	TESTNA GRUPA	OZNAKA	MAX SILA [N]	MAX VLAČNA ČVRTOĆA [N/mm ²]	STANDARDNA DEVIJACIJA [N/mm ²]	SILA LOMA [N]	KONAČNO NAPREZANJE [N/mm ²]	PRODULJENJE [mm]	ISTEZANJE [%]
BRZINA	TB1	TB1 I	459,44	12,65		459,44	12,65	1,23	1,13
		TB1 II	528,46	14,30		528,46	14,30	1,48	1,56
		TB1 III	656,61	17,75		656,80	17,75	2,26	2,15
		TB1 SR.	548,17	14,90	2,60	548,23	14,90	1,66	1,61
	TB2	TB2 I	545,65	15,37		545,65	15,37	1,52	1,36
		TB2 II	415,39	11,31		415,89	11,30	1,05	0,95
		TB2 III	615,34	16,95		615,34	16,95	2,28	2,07
		TB2 SR	525,46	14,54	2,91	525,63	14,54	1,62	1,46
	TB3	TB3 I	543,42	15,46		542,61	15,43	1,68	1,48
		TB3 II	488,12	13,44		486,39	13,48	1,59	1,47
		TB3 III							
		TB3 SR	515,77	14,45	1,43	514,50	14,46	1,64	1,48

Za razliku od prethodnih parametara, varijacija brzine ispisivanja nije imala značajan utjecaj na vlačnu čvrstoću. Uzorci TB3 pokazali su najlošije rezultate, s maksimalnom silom od 515,77 N i produljenjem od 1,64 mm, što ukazuje na to da ovaj parametar nije ključan za postizanje visoke vlačne čvrstoće u ovom eksperimentalnom postavku.

Zaključno, rezultati ispitivanja jasno pokazuju da visina sloja i postotak ispune imaju značajan utjecaj na vlačnu čvrstoću proizvedenih uzoraka. Povećanje temperature mlaznice također doprinosi povećanju čvrstoće, dok brzina ispisivanja, prema ovom istraživanju, nije pokazala značajan utjecaj. Također, iz rezultata je vidljivo da su sve epruvete krhke, što je odraz svojstava korištenog materijala.

3.5. Ispitivanje utjecaja parametara na dimenzijsku točnost

Cilj ovog ispitivanja je istražiti kako različiti parametri utječu na dimenzijsku točnost tijekom 3D ispisivanja. Izbor modela određuje se odabirom gotovih 3D modela online na kojima se procjenjuje dimenzijska točnost vizualnom detekcijom. Subjektivna procjena temeljena na vizualnoj usporedbi s referentnim uzorkom (ocjenjenim s 100% točnosti) omogućila je relativnu ocjenu ostalih uzoraka. Odstupanja od referentnog uzorka procijenjena su vizualnom detekcijom. Međutim, treba uzeti u obzir ograničenja vizualne procjene, te se za buduća istraživanja preporučuje uključivanje više kvantitativnih metoda analize, kao što su mjerenje hrapavosti površine ili profilometrija.

Fokus je na parametre poput temperature mlaznice, brzine ispisivanja i visine sloja. Primjerice, model figurice ispisan je na različitim temperaturama kako bi se utvrdilo kako one utječu na detalje, dok su ostali parametri fiksni. Provedeno je i ispisivanje variranjem brzine ispisa i visine sloja, kako bi se utvrdio način na koji oni imaju utjecaj na detalje modela.

3.5.1. Ispitivanje utjecaja brzine ispisivanja na dimenzijsku točnost

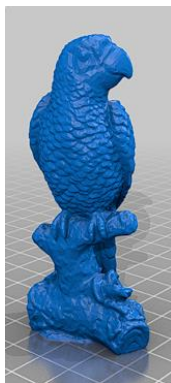
Za istraživanje utjecaja brzine ispisivanja na dimenzijsku točnost, proveden je eksperiment koji je obuhvatio kontrolirane varijacije parametra brzine ispisivanja uz iste uvijete ispisivanja ostalih parametara.

Brzine ispisivanja su: 25, 50, 75, 100, 120 mm/s.

Konstantni parametri:

- Temperatura mlaznice 200°C
- Visina sloja 0,1 mm
- Postotak ispune 15%.

Model (prikazan na slici 35) na kojem su se izvodila ispitivanja preuzet je s internetske stranice Thingiverse (www.thingiverse.com). Model je odabran jer sadrži kompleksnu geometriju, što ga čini dobrim odabirom za vizualnu detekciju pogrešaka i odstupanja.

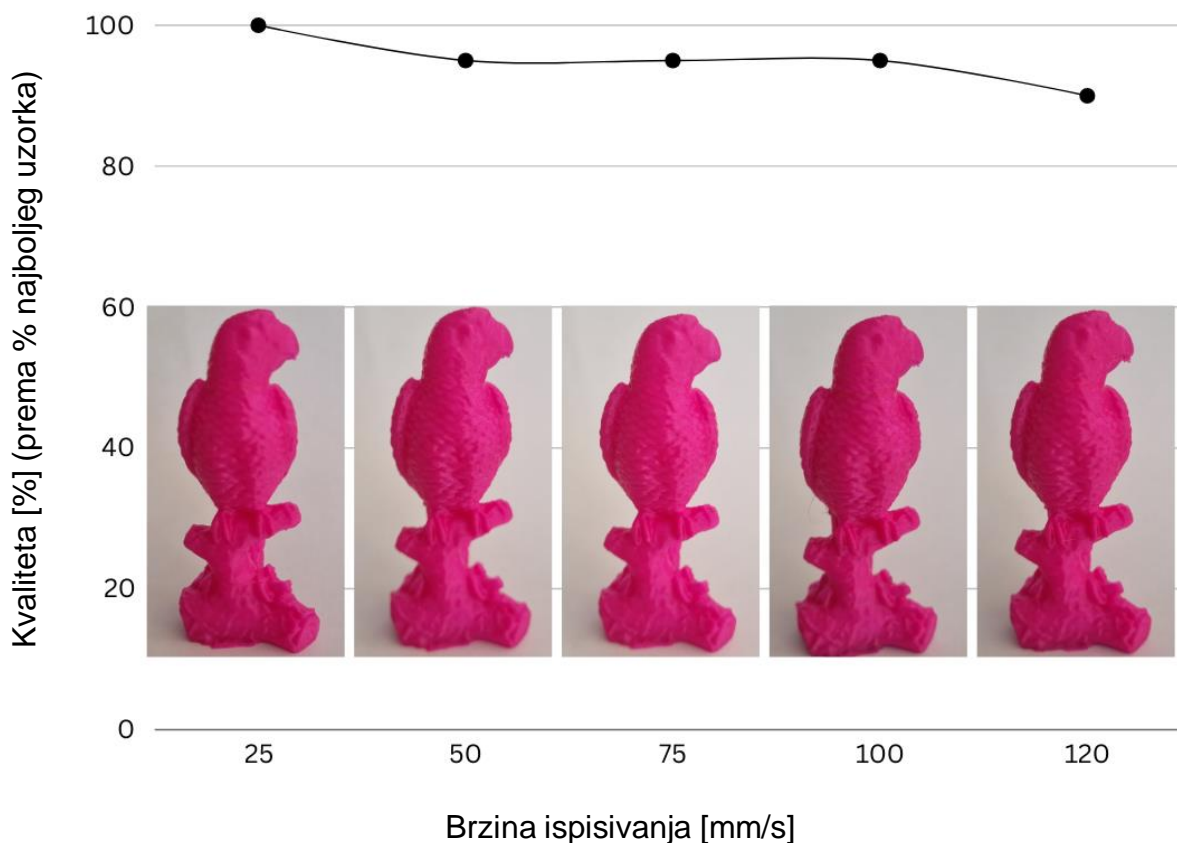


Slika 35 Prikaz 3D modela uzorka za ispitivanje [19]

3.5.1.1. Analiza rezultata utjecaja brzine ispisivanja na dimenzijsku točnost

U analizi utjecaja brzine ispisa na dimenzijsku točnost uočeno je da brzina u rasponu od 25 mm/s od 120 mm/s nije imala značajan utjecaj na dimenzijske karakteristike ispisanog modela.

Uzorku ispisanom najmanjom brzinom (25 mm/s) dodijeljen je rezultat od 100%, dok su svi ostali uzorci ocijenjeni s od 90-95%. Odnos kvalitete uzoraka i brzine ispisivanja prikazan je na slici 36.



Slika 36 Odnos kvalitete uzorka i brzine ispisivanja

Očekivalo bi se da veće brzine ispisa dovedu do određenih odstupanja u dimenzijama zbog manje precizne primjene materijala. Međutim, rezultati ovog istraživanja pokazuju da je za ispitani model i materijal utjecaj brzine ispisa na dimenzijsku točnost bio minimalan. Moderni 3D pisači često imaju sofisticiran softver koji može kompenzirati varijacije u brzini ispisa i osigurati konzistentnu kvalitetu. Uz to, viskoznost materijala i dizajn modela mogu utjecati na osjetljivost na promjene brzine ispisa.

3.5.2. Ispitivanje utjecaja temperature mlaznice na dimenzijsku točnost

Ispitivanje je provedeno na način da se 3D model ispisivao na različitim temperaturama, dok su ostali parametri bili konstantni, kako bi se utvrdio utjecaj temperature mlaznice na dimenzijsku točnost.

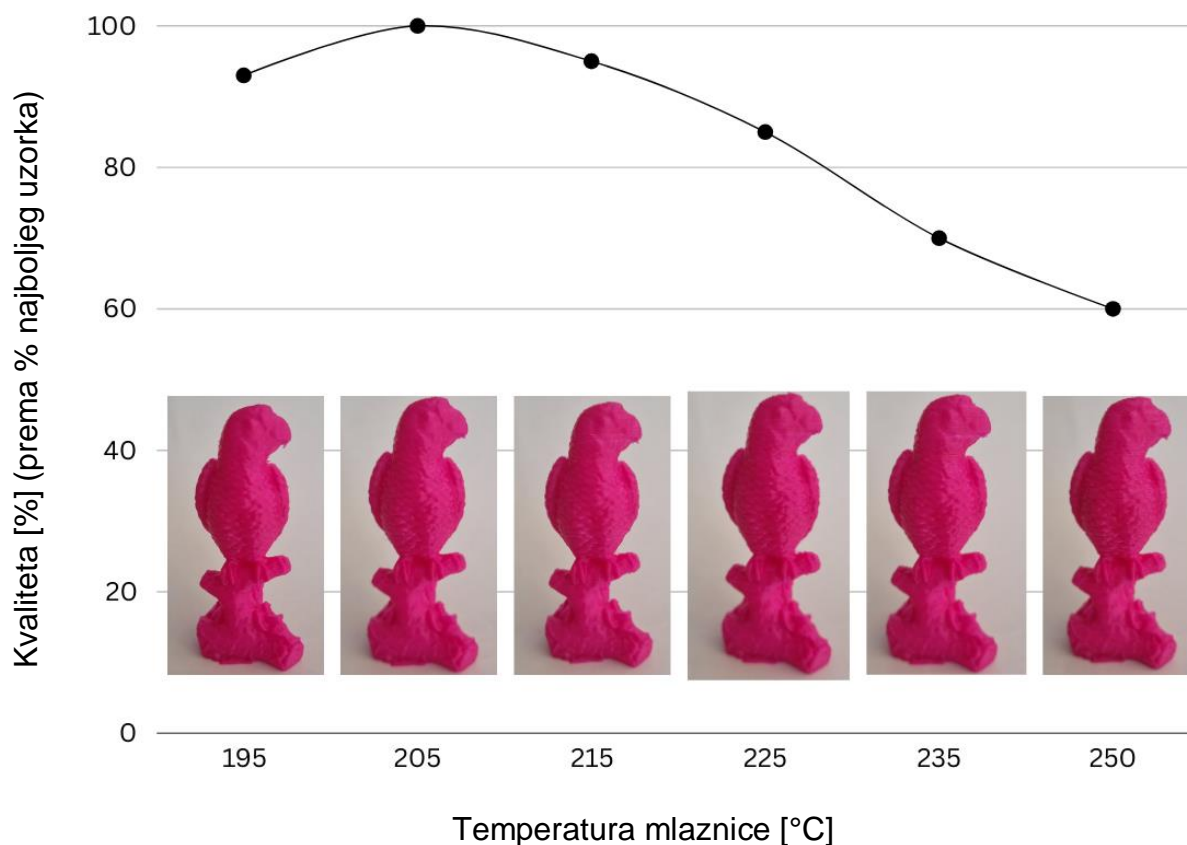
Temperature ispisivanja su: 195, 205, 215, 225, 235 i 250 °C

- Brzina 50 mm/s
- Visina sloja 0,1 mm
- Postotak ispune 15%.

3D model na kojem su se izvodila ispitivanja isti je kao i na prethodnom ispitivanju.

3.5.2.1. *Analiza rezultata temperature mlaznice na dimenzijsku točnost*

Rezultati ispitivanja pokazali su da temperatura mlaznice ima značajan utjecaj na dimenzijsku točnost. Najbolje rezultate pokazala je temperatura od 205°C, koja je ocijenjena sa 100%. Uzorak ispisan na toj temperaturi imao je najglatkiju površinu i dobro spajanje među slojevima. Odnos kvalitete uzoraka i temperature mlaznice prikazan je na slici 37.



Slika 37 Odnos kvalitete uzorka i temperature mlaznice

S udaljavanjem od optimalne temperature, kako prema nižim tako i prema višim vrijednostima, uočena je degradacija kvalitete ispisa. Kod temperature od 195 i 215°C, uočeno je najmanje deformacija i povećanja hrapavosti. Kod viših temperatura dolazi do prekomjernog skupljanja materijala, što je uzrokovalo deformacije i povećanu hrapavost. Najlošiji rezultati zabilježeni su pri temperaturi od 250°C, gdje je uočeno odvajanje slojeva i izrazita hrapavost površine (slika 38).



Slika 38 Prikaz razlike uzorka, a) uzorak ispisan na 205°C, b) uzorak ispisan na 250°C

Rezultati su u skladu s očekivanjima, da temperatura mlaznice ima značajan utjecaj na svojstva sinteriranog materijala. Međutim, treba napomenuti da optimalna temperatura može varirati ovisno o korištenom materijalu, dizajnu modela i drugim parametrima ispisa.

3.5.3. Ispitivanje utjecaja visine sloja na dimenzijsku točnost

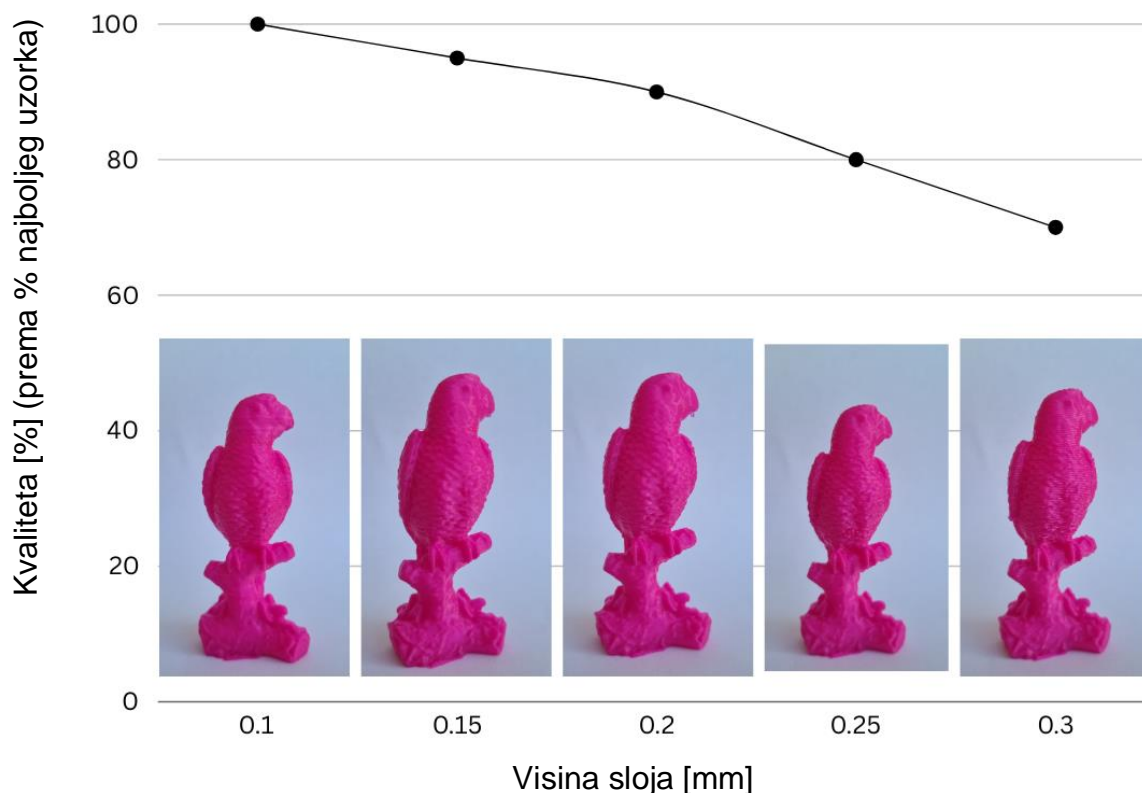
Ispitivanje je provedeno na način da se 3D model ispisivao na različitim visinama sloja, dok su ostali parametri bili konstantni, kako bi se utvrdio utjecaj visine sloja na dimenzijsku točnost.

Visine sloja su: 0,1; 0,15; 0,2; 0,25 i 0,3 mm

- Brzina 50 mm/s
- Temperatura mlaznice: 200°C
- Postotak ispune 15%.

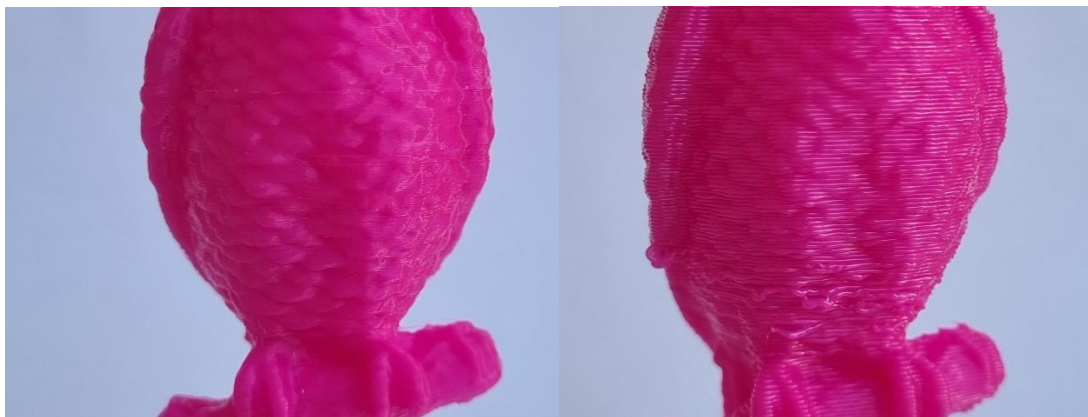
3D model na kojem su se izvodila ispitivanja isti je kao i na prethodnom ispitivanju.

3.5.3.1. Analiza rezultata utjecaja visine sloja na dimenzijsku točnost



Slika 39 Odnos kvalitete uzorka i visine sloja

Odnos kvalitete uzorka i visine sloja prikazan je na slici 39. Vizualnom analizom ispisanih uzoraka uočeno je da se s povećanjem visine sloja od 0,1 mm značajno smanjuje kvaliteta ispisa. Kvaliteta je ocijenjena na skali od 1 do 100, pri čemu je 100 dodijeljeno uzorku s najmanjom visinom sloja. S povećanjem visine sloja uočeno je povećanje hrapavosti površine, vidljivost slojeva materijala, te blage deformacije na nekim dijelovima modela. Na slici 40 prikazana je usporedba uzorka ispisanog na 0,1 mm, te na 0,3 mm, kako bi se bolje prikazala deformacija, kao i vidljivost među slojevima.



Slika 40 Prikaz razlike uzorka, a) uzorak ispisan na 0,1mm, b) uzorak ispisan na 0,3mm

Rezultati su u skladu s očekivanjima, manja visina sloja omogućuje razradu finih detalja i postizanje glatke površine

4. ZAKLJUČAK

Aditivne tehnologije, poput 3D ispisa, sve više pronalaze primjenu u različitim industrijama, zahvaljujući svojoj fleksibilnosti i sposobnosti izrade kompleksnih geometrija. Iako nude brojne prednosti, poput brze prototipizacije, smanjenja otpada i mogućnosti korištenja širokog spektra materijala. Jedan od najčešćih postupaka 3D ispisa, FDM, omogućuje korištenje biorazgradivih materijala poput PLA-a, čime se smanjuje štetni utjecaj na okoliš.

U ovom radu ispitivan je utjecaj parametara 3D ispisa na mehanička svojstva i dimenzijsku točnost. Za dio ispitivanja mehaničkih svojstva izrađene su epruvete za ispitivanje od PLA materijala FDM postupkom. Zaključak ispitivanja je da parametri visine sloja, temperature mlaznice i postotak ispune utječu na mehanička svojstva. Rastom tih vrijednosti dolazi do porasta vlačne čvrstoće, dok su rezultati utjecaja parametra brzine ispisivanja pokazali da je taj parametar nije značajan.

Na temelju rezultata ispitivanja dimenzijske točnosti, pokazano je da parametri visine sloja i temperature mlaznice imaju veliku ulogu na kvalitetu površine, dok je parametar brzine ispisivanja nije značajan. Detaljna analiza utjecaja temperature mlaznice na dimenzijsku točnost pokazala je da postoji optimalna temperatura koja minimizira odstupanja od nominalnih dimenzija. Odstupanja od optimalne temperature dovode do smanjenja kvalitete ispisa, što se manifestira kroz povećanu hrapavost površine i pojavu poroznosti. S povećanjem visine sloja smanjuje se dimenzijska točnost, zbog vidljivijih slojeva i smanjene glatkoće uzorka.

Ovi rezultati naglašavaju važnost preciznog podešavanja parametara ispisa kako bi se postigla željena kvaliteta proizvoda, odnosno željena kombinacija mehaničkih svojstava i dimenzijske točnosti.

LITERATURA

- [1] Torta S.; Torta J.: *3D Printing an Introduction* (<https://terrorgum.com/tfox/books/3dprinting.pdf>)
- [2] Hrvatska enciklopedija, dostupno na :<https://enciklopedija.hr/clanak/aditivna-proizvodnja> (pristupljeno 8.2.2024.)
- [3] Godec D.; Gonzalez-Gutierrez J.; Nordin A.; Acazar J. U.; Pei E., *A Guide to Additive Manufacturing*, 2022
- [4] Manufactur3D, dostupno na: <https://manufactur3dmag.com/stereolithography-sla-3d-printing-works>, pristupljeno 16.2.2024
- [5] Kim GB, Lee S, Kim H, Yang DH, Kim YH, Kyung YS, Kim CS, Choi SH, Kim BJ, Ha H, Kwon SU, Kim N. Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology. *Korean J Radiol.* 2016 Mar-Apr;17(2):182-97. doi: 10.3348/kjr.2016.17.2.182. Epub 2016 Mar 2. PMID: 26957903; PMCID: PMC4781757.
- [6] 3DPrintaj, dostupno na <https://www.3dprintaj.com/fdm-fff-tehnologija-3d-ispisivanja/>, pristupljeno 9.2.2024.
- [7] Simens, dostupno na :<https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/sheet-lamination/55512>, pristupljeno 9.2.2024
- [8] 3DPrinting.Lightning, dostupno:<https://www.3dprinting.lightning/3d-printing-technologies/sheet-lamination>, pristupljeno: 11.2.2024
- [9] 3DPrintaj, dostupno na :<https://www.3dprintaj.com/sls-tehnologija-3d-ispisivanja>, pristupljeno 12.2.2024.
- [10] Live Science, dostupno na : https://www.researchgate.net/figure/The-scheme-of-SLS-technology-adapted-from-11_fig1_326961466, pristupljeno 12.2.2024
- [11] All3DP, dostupno na : <https://all3dp.com/1/selective-laser-melting-guide/>, pristupljeno 12.2.2024
- [12] Kumar S., *Comperhensive Materials Processing*, 2014
- [13] Xometry, dostupno na: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/direct-energy-deposition-ded>, pristupljeno 13.2.2024.
- [14] ExOne, dostupno na: <https://www.exone.com/en-US/Resources/case-studies/what-is-binder-jetting>, pristupljeno 17.2.2024
- [15] Simplify3D, dostupno na: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide>, pristupljeno 19.2.2024
- [16] Creality, dostupno na: https://www.creality.com/products/ender-3-v2-neo-3d-pisac?spm=..product_ba4a7b45-6c4f-4615-8b4f-6c80157bcb69.nav_link_store_1.1, pristupljeno 23.2.2024

[17] 3DJAKE, dostupno na <https://www.3djake.com/3djake/ecopla-pink> pristupljeno 27.8.2024

[18] All3DP, dostupno na: <https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/> pristupljeno 23.2.2024

[19] Thingiverse, dostupno na: <https://www.thingiverse.com/thing:5860531>, pristupljeno 22.4.2024