

Utjecaj oblika ispune i orijentacije 3D ispisa na mehanička svojstva 3D ispisanih proizvoda

Dajak, Bruno

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:204057>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-19**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Bruno Dajak

Zagreb, 2024. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Dr. sc. Damir Godec, dipl. ing.

Student:

Bruno Dajak

Zagreb, 2024. godina.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Damiru Godecu na pruženoj pomoći, strpljenju i podršci prilikom izrade diplomskog rada. Također bih zahvalio prof. dr. sc. Ani Pilipović, laborantu Bruni Krajačiću i asistentu Mislavu Tujmeru koji su mi pomogli pri testiranju ispitnih tijela te obitelji i prijateljima i ostalima koji su na bilo koji način doprinijeli izradi ovog diplomskog rada

Bruno Dajak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Bruno Dajak**

JMBAG: 0035223825

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj oblika ispune i orijentacije 3D ispisa na mehanička svojstva 3D ispisanih proizvoda**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of infill shape and 3D printing orientation on mechanical properties of 3D printed products**

Opis zadatka:

Postupci 3D ispisa (aditivna tehnologija) nisu više ograničeni samo na izradu prototipova i modela, već se sve više primjenjuju za proizvodnju konačnih proizvoda. Stoga je važno poznavati utjecaje parametara 3D ispisa kao i izbora određenog materijala na konačna svojstva 3D ispisanih proizvoda. Neki od postupaka 3D ispisa, kao što je taložno očvršćivanje (engl. *Fused Deposition Modeling* – FDM / *Fused Filament Fabrication* – FFF) omogućuju i izradu proizvoda koji nisu kompaktnog presjeka već su ispunjeni raznim oblicima i gustoćama ispuna koje utječu na konačna svojstva 3D ispisanih proizvoda. FDM/FFF postupak također uzrokuje anizotropiju svojstava 3D ispisanih proizvoda, pa je i to parametar koji utječe na svojstva tih proizvoda, ali i na vrijeme ispisa.

U okviru rada potrebno je:

- opisati osnovna načela 3D ispisa (aditivne tehnologije) s glavnim grupama postupaka
- detaljnije opisati FDM/FFF proces
- opisati najčešće primjenjivane materijale za FDM/FFF postupak u obliku filameta
- opisati korake izrade FDM/FFF procesom, najvažnije podesive parametre te najčešće greške koje se javljaju kod primjene tog postupka 3D ispisa
- u praktičnom dijelu rada definirati ispitna tijela, oblike ispuna i orijentacije ispisa za ispitivanje mehaničkih svojstava
- 3D ispisati i ispitati ispitna tijela te načiniti analizu dobivenih rezultata
- primijeniti FMEA (engl. *Failure Mode and Effect Analysis*) kao alat za kontrolu kvalitete
- na temelju dobivenih rezultata donijeti odgovarajuće zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

26. rujna 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Godec

Datum predaje rada:

28. studeni 2024.

Predvideni datumi obrane:

5., 6. i 9. prosinca 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS GRAFOVA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
POPIS PRILOGA.....	IX
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
UVOD	1
1. ADITIVNA PROIZVODNJA	2
1.1. Povijest i razvoj aditivne tehnologije.....	3
1.2. Prednosti aditivne proizvodnje.....	5
1.3. Izazovi i ograničenja aditivne proizvodnje	6
2. POSTUPCI ADITIVNE PROIZVODNJE	7
2.1. Taložno očvršćivanje	8
2.1.1. Creality Ender 3 V2 Neo.....	10
2.2. Stereolitografija.....	11
2.3. Digitalna obrada svjetlom	12
2.4. Selektivno lasersko sinteriranje	13
2.5. Ispis nanošenjem materijala	15
2.6. Ispis pomoću vezivnog sredstva	16
3. MATERIJALI ZA ADITIVNU PROIZVODNJU	17
3.1. PLA	19
3.2. PETG.....	20
4. PROGRAMI ZA PRIPREMU 3D ISPISA.....	21
5. PARAMETRI 3D ISPISA	23
5.1. Temperatura mlaznice.....	23
5.2. Temperatura podloge	25
5.3. Brzina ispisa.....	26
5.4. Oblik i gustoća ispune.....	27
5.5. Visina sloja.....	28

5.6. Debljina vanjske konture	28
6. GREŠKE 3D ISPISA.....	29
6.1. Manjak ekstrudiranja na početku ispisa	29
6.2. Ne-prianjanje prvog sloja na radnu podlogu	30
6.3. Manjak ili višak ekstrudiranog materijala.....	31
6.4. Pomicanje slojeva	32
6.5. Šupljine između bridova	33
6.6. Oštećenje žice (filamenta).....	34
6.7. Razdvajanje slojeva.....	35
6.8. Nepravilna ispuna	36
6.9. Šupljine na gornjoj površini proizvoda	37
6.10. Ostale greške	38
7. ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJTAVA 3D ISPISANIH ISPITNIH TIJELA	39
7.1. Ispitivanje rastezних svojstava 3D ispisanih ispitnih tijela	39
7.2. Ispitivanje žilavosti 3D ispisanih ispitnih tijela	43
7.3. Rezultati ispitivanja rastezних svojstava	45
7.3.1. Rezultati ispitivanja PLA ispitnih tijela	45
7.3.2. Rezultati ispitivanja PETG ispitnih tijela.....	50
7.4. Rezultati ispitivanja žilavosti	56
7.4.1. Rezultati ispitivanja PLA ispitnih tijela	57
7.4.1. Rezultati ispitivanja PETG ispitnih tijela.....	58
7.5. Usporedba rezultata ispitivanja žilavosti ispitnih tijela	59
7.6. Usporedba rezultata ispitivanja rastezних svojstava.....	61
8. ZAKLJUČAK.....	65
LITERATURA.....	66
PRILOZI.....	68

POPIS SLIKA

Slika 1.	a) Prvi stolni 3D pisač RepRap [3], b) MarkerBot [4]	4
Slika 2.	Osnovni dijelovi FDM 3D pisača [5]	8
Slika 3.	Usporedba stolnih i profesionalnih 3D pisača [6]	9
Slika 4.	Specifikacije pisača Creality Ender 3 V2 Neo [7]	10
Slika 5.	Prikaz SLA pisača [9].....	11
Slika 6.	Uređaji za ispiranje i očvršćivanje [10].....	12
Slika 7.	Prikaz SLS postupka [12].....	13
Slika 8.	Prikaz proizvoda načinjenog SLS postupkom [12].....	14
Slika 9.	Proces nanošenja materijala [13].....	15
Slika 10.	Kolut s plastičnim filamentom [9].....	17
Slika 11.	Izgled STL datoteke [19].....	22
Slika 12.	Prikaz orijentacija ispisa ispitnih tijela u PrusaSlicer programu	22
Slika 13.	Različiti oblici i materijali mlaznica 3D-pisača [20].....	23
Slika 14.	Oblici ispune [21]	27
Slika 15.	Prikaz unutarnje ispune i vanjske konture.....	28
Slika 16.	Manjak ekstrudiranja na početku ispisa [22].....	29
Slika 17.	Ne-prianjanje prvog sloja na radnu podlogu [22]	30
Slika 18.	Greške pri ekstrudiranju materijala: a) manjak ekstrudiranja, b) višak ekstrudiranja [22]	31
Slika 19.	Primjer pomicanja slojeva [22]	32
Slika 20.	Prikaz šupljina između stijenki [22]	33
Slika 21.	Primjer oštećenja žice (filamenta) [22]	34
Slika 22.	Primjer odvajanja slojeva [22]	35
Slika 23.	Primjer nepravilne ispune [22]	36
Slika 24.	Primjer šupljine u gornjim slojevima [22]	37
Slika 25.	Primjer ostalih grešaka tijekom 3D ispisa: a) praznina između vanjske konture i unutarnje ispune, b) pojava zadebljanih slojeva na vanjskim konturama, c) pojava mjehurića i vlakana [22]	38
Slika 26.	Kidalica Shimadzu AGS-X (10 kN).....	39
Slika 27.	Prikaz puknuća ispitnog tijela nakon ispitivanja	40

Slika 28.	Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rastezних svojstava [23]	41
Slika 29.	Ispitna tijela nakon 3D ispisa	41
Slika 30.	Ispitna tijela (PLA) nakon ispitivanja	42
Slika 35.	Uređaj marke Frank za ispitivanje žilavosti	43
Slika 36.	Prikaz korištenog bata i položaj ispitnog tijela	43
Slika 37.	Ispitno tijelo za ispitivanje žilavosti [24]	44
Slika 38.	Dijagram rastezno naprezanje – istežanje za PLA (krivulje srednjih vrijednosti)	49
Slika 39.	Primjer neispravnog pucanja ispitnog tijela	53
Slika 40.	Primjer ispitnih epruveta kod kojih nije došlo do pucanja na odgovarajućem mjestu	53
Slika 41.	Dijagram rasteznog naprezanja – istežanja PETG (krivulje srednjih vrijednosti)	55
Slika 42.	Slika ispitnog tijela (PETG) prije provedenog ispitivanja žilavosti.....	56
Slika 43.	Parametri visine sloja i debljine vanjske konture	68
Slika 32.	Parametri ispisa ispune modela	68
Slika 33.	Parametri brzine ispisa	69
Slika 34.	Parametri temperature mlaznice i podloge 3D pisača	69

POPIS TABLICA

Tablica 1. Temperature 3D ispisa za različite materijale [5]	25
Tablica 2. Stvarne dimenzije ispitnih tijela	42
Tablica 3. Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje žilavosti [24]	44
Tablica 4. Rezultati ispitivanja PLA serije sa šesterokutnim oblikom ispune	45
Tablica 5. Rezultati ispitivanja PLA serije s trokutastim oblikom ispune	46
Tablica 6. Rezultati ispitivanja PLA serije s mrežastim oblikom ispune.....	47
Tablica 7. Rezultati ispitivanja PLA serije s kubičnim oblikom ispune	48
Tablica 8. Rezultati ispitivanja PETG serije sa šesterokutnim oblikom ispune.....	50
Tablica 9. Rezultati ispitivanja PETG serije s trokutastim oblikom ispune.....	51
Tablica 10. Rezultati ispitivanja PETG serije s mrežastim oblikom ispune	52
Tablica 11. Rezultati ispitivanja PETG serije s kubičnim oblikom ispune.....	54
Tablica 12. Rezultati ispitivanja PLA ispitnih tijela	57
Tablica 13. Rezultati ispitivanja PETG ispitnih tijela.....	58

POPIS GRAFOVA

Graf 1.	Primjena aditivne proizvodnje u industriji [1]	2
Graf 2.	Usporedba rezultata ispitivanja PLA serije sa šesterokutnim oblikom ispune	45
Graf 3.	Usporedba rezultata ispitivanja PLA serije s trokutastim oblikom ispune	46
Graf 4.	Usporedba rezultata ispitivanja PLA serije s mrežastim oblikom ispune	47
Graf 5.	Usporedba rezultata ispitivanja PLA serije s kubičnim oblikom ispune.....	48
Graf 6.	Usporedba rezultata ispitivanja PETG serije sa šesterokutnim oblikom ispune ...	50
Graf 7.	Usporedba rezultata ispitivanja PETG serije s trokutastim oblikom ispune	51
Graf 8.	Usporedba rezultata ispitivanja PETG serije s mrežastim oblikom ispune.....	52
Graf 9.	Usporedba rezultata ispitivanja PETG serije s kubičnim oblikom ispune	54
Graf 10.	Usporedba žilavosti horizontalno ispisanih serija ispitnih tijela	59
Graf 11.	Usporedba žilavosti vertikalno ispisanih serija ispitnih tijela	59
Graf 12.	Usporedba rastezne čvrstoće ispitnih uzoraka horizontalne orijentacije (PLA i PETG).....	61
Graf 13.	Usporedba rastezne čvrstoće ispitnih uzoraka vertikalne orijentacije (PLA i PETG).....	62
Graf 14.	Usporedba istežljivosti ispitnih tijela horizontalne orijentacije	63
Graf 15.	Usporedba istežljivosti ispitnih tijela vertikalne orijentacije	64

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
3D	-	trodimenzionalno
ISO	-	Međunarodna organizacija za normizaciju – eng. <i>International Organization for Standardization</i>
FDM	-	Taložno očvršćivanje – eng. <i>Fused Deposition Modeling</i>
FFF	-	Proizvodnja taljenjem filameta – eng. <i>Fused Filament Fabrication</i>
LOM	-	Proizvodnja laminiranih objekata – eng. <i>Laminated Object Manufacturing</i>
PLA	-	polilaktična kiselina – eng. <i>Polylactic Acid</i>
PETG	-	polietilen-tereftalat modificiran glikolom
ABS	-	akronitril-butadien stiren
SLA	-	Stereolitografija – eng. <i>Stereolithography</i>
DLP	-	Digitalna obrada svjetlom – eng. <i>Digital light processing</i>
LCD	-	zaslon temeljen na tehnologiji tekućih kristala – eng. <i>Liquid Crystal Display</i>
SLS	-	Selektivno lasersko srašćivanje – eng. <i>Selective laser sintering</i>
MJT	-	Mlazno nanošenje materijala – eng. <i>Material Jetting</i>
UV	-	ultraljubičasto svjetlo (zrake)
BJT	-	Ispis pomoću vezivnog sredstva – eng. <i>Binder jetting</i>
PEEK	-	polieter-eter keton – eng. <i>Polyether Ether Ketone</i>
PEKK	-	polieter-keton-keton – eng. <i>Polyetherketoneketone</i>
MMC	-	metal-matriks kompoziti – eng. <i>Metal Matrix Composites</i>
STL	-	stereolitografski format – eng. <i>Standard Tessellation Language</i>
PEI	-	polieterimid – eng. <i>Polyetherimide</i>
h	mm	širina
b	mm	dužina
S ₀	mm ²	početna površina presjeka
l	mm	duljina
R _k	N/mm ²	prekidna čvrstoća
R _m	N/mm ²	rastezna čvrstoća
A	%	istezanje
E _c	J	energija loma
a _{CN}	kJ/mm ²	udarna žilavost

F_m	N	maksimalna sila
F_k	N	sila loma
T	°C	temperatura

POPIS PRILOGA

Prilog 1. Parametri ispisa ispitnih tijela za rastezna svojstva.....	68
Prilog 2. Ispitivanje rasteznih svojstava za PLA materijal	70
Prilog 3. Ispitivanje rasteznih svojstava za PETG materijal	72

SAŽETAK

Ovim radom istražuje se direktan utjecaj orijentacije i vrste ispune na mehanička svojstva 3D ispisanog proizvoda. Odabir odgovarajuće orijentacije može biti ključan u ostvarivanju željene kvalitete proizvoda, a ima i značajan utjecaj na samo vrijeme izrade. Budući da je cilj svake proizvodnje, pa tako i aditivne minimizirati vrijeme potrebno za izradu, uz maksimiziranje kvalitete proizvoda, potrebno je poznavati namjenu budućeg proizvoda te postaviti optimalne parametre sukladno svrsi proizvoda.

Osim orijentacije, oblik ispune također ima direktan utjecaj na mehanička svojstva, kao i temperatura mlaznice i radne podloge, brzina ispisa, visina sloja te količina bridova. Neadekvatno postavljanje parametra izrade rezultirat će vidljivim greškama na modelu, a neke od njih će također biti navedene u radu.

Tehnologija 3D ispisa koja će se koristiti za izradu ispitnih tijela je najzastupljenija tehnologija ekstruzije materijala, poznatija pod skraćenicom FDM ispisa, a eksperimentalno testiranje se provodilo u sklopu Laboratorija za preradu polimera po uzoru na norme ISO 527-2 i ISO 179-1. Osim FDM tehnologije, pobliže će biti objašnjene i druge aditivne tehnologije.

Ključne riječi: 3D ispis, FDM tehnologija, aditivna proizvodnja, orijentacija, unutarnja ispuna

SUMMARY

This study investigates the direct impact of orientation and infill type on the mechanical properties of 3D-printed products. Choosing the appropriate orientation can be crucial for achieving the desired product quality and significantly affects production time. Since the goal of any manufacturing process, including additive manufacturing, is to minimize production time while maximizing product quality, it is essential to understand the intended purpose of the final product and set optimal parameters accordingly.

In addition to orientation, the infill pattern also has a direct influence on mechanical properties, along with nozzle and bed temperatures, printing speed, layer height, and the number of outer perimeters. Inadequate parameter settings during production will result in visible defects on the model, some of which will also be described in this paper.

The 3D printing technology that will be used for the production of test specimens is the most widely used material extrusion technology, better known by the abbreviation FDM printing, and experimental testing was conducted within the Polymer Processing Laboratory following the standards ISO 527-2 and ISO 179-1. In addition to FDM technology, other additive technologies will also be explained in more detail.

Key words: 3D printing, FDM technology, additive manufacturing, orientation, infill

UVOD

Aditivna proizvodnja predstavlja naprednu metodu proizvodnje koja omogućava stvaranje proizvoda slojevitim dodavanjem materijala prema ranije izrađenim digitalnim modelima. Usporedno s razvitkom aditivnih tehnologija, razvijaju se i tehnologije 3D skeniranja koje mogu znatno olakšati ili potpuno ukloniti potrebu za samostalnom izradom digitalnih modela.

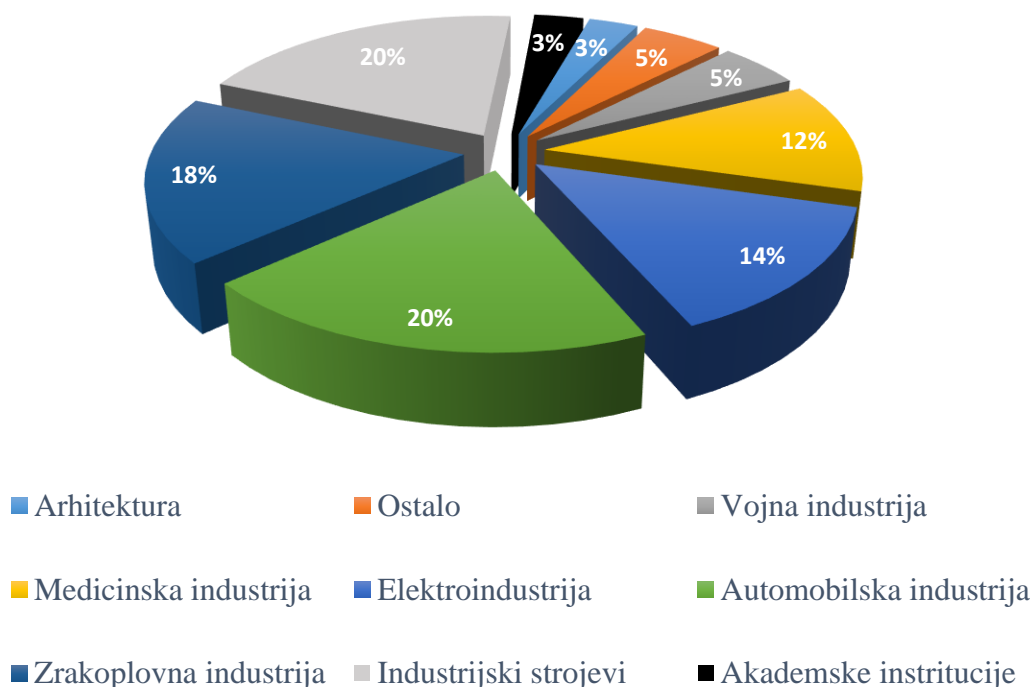
Ova vrsta proizvodnje obuhvaća niz različitih proizvodnih tehnologija koje omogućavaju izradu složenih i detaljnih geometrijskih oblika koji bi bili mnogo složeniji i skuplji korištenjem tradicionalnih metoda izrade. Procesi u najvećem postotku uključuju nanošenje materijala putem ekstruzije i laserskog ili elektronskog zračenja, a trajanje izrade može varirati od nekoliko sati do nekoliko dana, ovisno o složenosti samog modela.

Jedna od glavnih prednosti aditivne proizvodnje je njena fleksibilnost, koja omogućava prilagodbu proizvoda specifičnim zahtjevima. Također, omogućava stvaranje složenih struktura i šupljih dijelova bez potrebe za naknadnom obradom. Međutim, izazovi uključuju varijabilnost kvalitete, odnosno dimenzija, ograničenja veličine objekata, te u nekim slučajevima visoke početne troškove opreme i materijala. Ipak, smanjenje otpada i mogućnost brzog razvoja proizvoda čine aditivnu proizvodnju važnim dijelom moderne proizvodnje u odnosu na klasične proizvodne postupke.

1. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja je proces izrade nanošenjem niza tankih slojeva materijala jedan na drugi. Izradak se postupno stvara nanoseći sloj po sloj materijala, a svaki sloj se očvršćuje ili povezuje s prethodnim slojem i tako kreira gotovi proizvod po uzoru na digitalni model. Aditivna proizvodnja omogućava stvaranje složenih oblika i geometrijskih struktura koje bi bile teže ili skuplje, ili čak i nemoguće za izradu tradicionalnim metodama.

Aditivna proizvodnja najčešće koristi načelo ekstrudiranja materijala, ali može obuhvatiti i druge tehnologije nanoseći materijal putem laserskih ili elektronskih zraka. Sam proces izrade može trajati do nekoliko dana, ovisno o veličini i složenosti proizvoda, ali i samoj tehnologiji i parametrima izrade. Aditivna proizvodnja ima široku primjenu, od izrade prototipova i alata do proizvodnje funkcionalnih dijelova i proizvoda u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji, dentalnoj i klasičnoj medicini, elektronici i raznim drugim industrijama.



Graf 1. Primjena aditivne proizvodnje u industriji [1]

1.1. Povijest i razvoj aditivne tehnologije

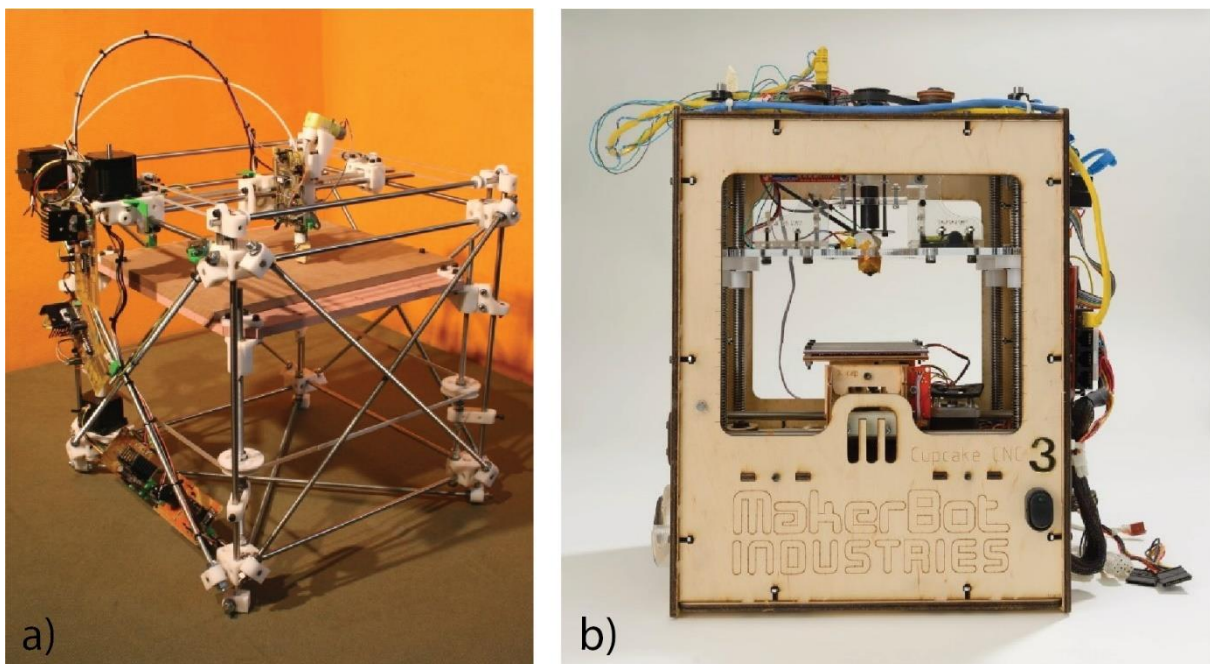
Temelji aditivne proizvodnje postavljeni su 1980. godine kada je Hideo Kodama, istraživač na Gradskom institutu za industrijska istraživanja u Nagoyi podnio je prvi patent. No zbog nedostatka financijskih sredstava nikada nije došlo do realizacije. Godine 1986., Chuck Hull, suosnivač tvrtke 3D Systems, izumio je stereolitografiju, koja se smatra prvim sustavom za brzu izradu prototipa. On je otkrio način kako očvrnuti tekući polimer koristeći UV laser, što je dovelo do stvaranja prvog 3D ispisanog proizvoda. Iste godine je Hull podnio patent za svoj izum i osnovao tvrtku 3D Systems kako bi komercijalizirao stereolitografiju. [2]

Carl Deckard sa Sveučilišta Texas u Austinu razvio je selektivno lasersko sinteriranje 1987. godine koje se koristi za spajanje malih čestica plastike, metala ili keramike, a 1989. godine je Scott Crump, osnivač tvrtke Stratasys, izumio tehnologiju taložnog očvršćivanja, danas najpoznatiju aditivnu tehnologiju.

Devedesete godine bile su razdoblje brzog rasta za tehnologiju aditivne proizvodnje. 1991. godine, tvrtka Cubital izumila je Solid Ground Curing. SGC je tehnologija koja koristi ultraljubičasto svjetlo za očvršćivanje tekućih fotopolimernih smola. Iste godine, tvrtka Helisys izumila je tehnologiju laminiranja. LOM (eng. *Laminated Object Manufacturing*) je tehnologija aditivne proizvodnje koja koristi slojeve papira, plastike ili metala koje se lijepe zajedno i izrezuju u oblike s pomoću lasera ili noža. Godine 1999., istraživači s Wake Forest Instituta za regenerativnu medicinu stvorili su prvo 3D ispisanu tkivo. Ovaj proboj u medicinskom polju otvorio je mogućnost korištenja 3D ispisa za stvaranje implantabilnih organa.

21. stoljeće bilo je razdoblje ogromnog rasta za tehnologiju aditivne proizvodnje. Više tvrtki ušlo je na tržište, a tehnologija je postala raširenija. Profesor Adrian Bowyer sa Sveučilišta Bath izumio je prvi stolni 3D pisac, nazvan RepRap, 2005. godine. RepRap je bio open-source pisac, što znači da je svatko mogao izraditi vlastiti uređaj, čime je 3D ispis postao dostupniji široj javnosti. Tvrtka Objet Geometries, proizvođač 3D pisaca, predstavila je prvi multi-materijalni 3D pisac 2007. godine, što je omogućilo korisnicima ispis objekata s više materijala, odnosno dijelova s različitim svojstvima materijala. [2]

Na prijelazu desetljeća predstavljen je MakerBot, prvi 3D pisač za potrošače. Tvrtku MakerBot su 2009. godine osnovali Bre Pettis, Adam Mayer i Zach Smith. Tvrtka je imala za cilj učiniti 3D ispis dostupnim prosječnom korisniku. Godine 2011. nastala je tvrtka Prusa Research. Ova tvrtka razvila je Prusa i3, 3D pisač temeljen na ranijem radu na RepRap-u, koji je postao jedan od najpopularnijih 3D pisača zbog svoje niske cijene i jednostavnog dizajna. Godine 2013., Markforged, proizvođač 3D pisača, revolucionirao je industriju 3D ispisa predstavljanjem Mark One pisača. Mark One je bio prvi 3D pisač koji je imao mogućnost ispisa kontinuiranih ugljičnih vlakana.



Slika 1. a) Prvi stolni 3D pisač RepRap [3], b) MarkerBot [4]

1.2. Prednosti aditivne proizvodnje

Jedna od istaknutih prednosti aditivne proizvodnje je visoka razina moguće prilagodbe proizvoda. Konstruktori i inženjeri mogu prilagoditi proizvode specifičnim zahtjevima bez ograničenja tradicionalnih proizvodnih metoda. To je osobito korisno u granama poput medicine, gdje se protetika i implantati mogu prilagoditi kako bi savršeno odgovarali anatomskim strukturama pojedinih pacijenata. Također, aditivna proizvodnja omogućuje stvaranje složenih geometrija što uključuje kompleksne unutarnje strukture i šuplje dijelove koji su ključni u određenim primjenama.

Proizvodnja aditivnim tehnologijama također omogućava stvaranje jednog proizvoda od različitih materijala i različitih debljina slojeva u jednoj proizvodnom procesu. Osim navedenoga, uz ispravan pristup razvoju proizvoda i izradi moguće je olakšati ili potpuno ukloniti potrebu za montažom više dijelova te učiniti to tijekom proizvodnog procesa.

Aditivna proizvodnja također rezultira značajnim smanjenjem otpada u usporedbi s tradicionalnim proizvodnim metodama. U aditivnoj proizvodnji, materijal se dodaje sloj po sloj, točno tamo gdje je potrebno, čime se smanjuje otpad, odnosno otpadni materijal čine samo neispravni komadi, potporni dijelovi i određena količina plastike koja se potroši tijekom same pripreme procesa ispisa. Ovim putem štede se sirovine i smanjuje potrošnja energije povezana s preradom materijala, što dovodi do manjeg utjecaja na okoliš. [1]

Nadalje, mogućnost proizvodnje dijelova na zahtjev smanjuje potrebu za velikim zalihama i velikim troškovima razvoja i same proizvodnje tog komada te dodatno smanjuje površinu potrebnu za logistiku i povezanu potrošnju energije skladištenja i transporta robe, što dovodi do pojeftinjenja izrade prototipa ili neke manje serije proizvoda. Maksimiziraju se omjeri ostvarene kvalitete proizvoda i njegovih mehaničkih svojstava uz minimalan utrošak materijala i energije uz ispravno odabrane parametre i logiku proizvodnje. Sve navedeno dodatno olakšava mogućnost brzog razvitka i poboljšanja proizvoda te izlazak na tržište uz konstantan razvoj i niz inovacija.

1.3. Izazovi i ograničenja aditivne proizvodnje

Aditivna proizvodnja suočava se s nekoliko tehničkih izazova koji mogu utjecati kvalitetu i funkcionalnost konačnog proizvoda. Jedan od glavnih problema je nedosljednost u kvaliteti dijelova, kao što su varijacije u mehaničkim svojstvima zbog razlika u orijentaciji ispisa i adheziji slojeva, razlike u temperaturi i brzina ispisa, neravnomjerno zagrijavanje ili istrošenost dijelova. To može dovesti do nesukladnosti, pa čak i do neispravnih proizvoda. Ovisno o namjeni proizvoda, može biti potrebna završna obrada površine, budući da može ostati gruba ili može doći do pojave anomalija zbog loše odabranih parametara, nepotpunog digitalnog modela i slično. Dodatna obrada poput brušenja ili kemijskog zaglađivanja povećava vrijeme i troškove proizvodnog procesa.

Još jedan tehnički izazov je ograničenje veličine dijelova koji se mogu ispisati, budući da većina pisaača ima fiksni volumen izrade koji ograničava maksimalnu veličinu komponenti. Početno ulaganje u neku od aditivnih tehnologija može biti vrlo značajno. Visokokvalitetni pisaači, posebno oni sposobni za obradu metala i naprednih materijala, imaju visoke početne troškove. Osim toga, materijali koji se koriste u aditivnoj proizvodnji, kao što su specijalizirani prašci i smole mogu biti iznimno skupi.

U industrijama poput zrakoplovne, automobilske i medicinske, gdje se dijelovi moraju pridržavati strogih standarda sigurnosti i kvalitete, varijabilnost u aditivnoj proizvodnji može predstavljati značajne prepreke. Nedostatak standardiziranih procesa ispitivanja i certificiranja za 3D ispisane komponente dodatno komplicira njihovo odobravanje za kritične primjene.

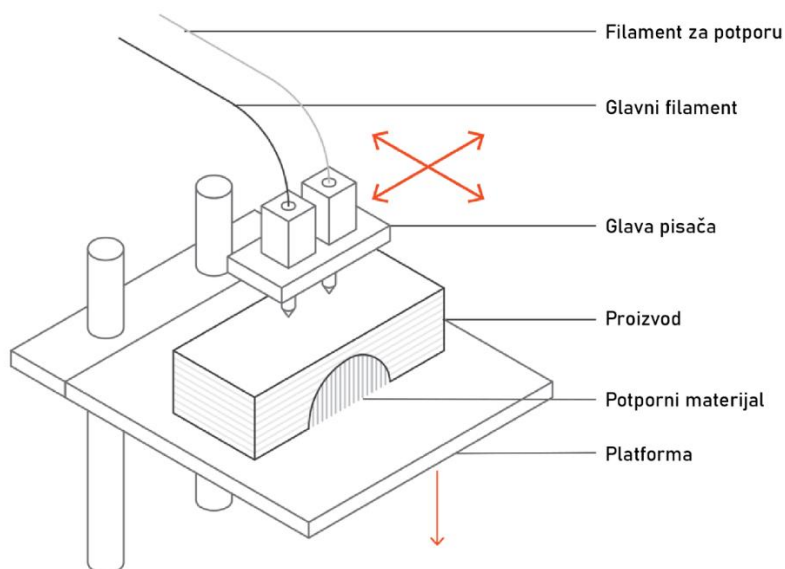
2. POSTUPCI ADITIVNE PROIZVODNJE

Aditivna proizvodnja obuhvaća niz postupaka, a dijele se nekoliko glavnih skupina ovisno o samoj vrsti procesa pri izradi komada. Najzastupljenija tehnologija aditivne proizvodnje je FDM (Taložno očvršćivanje – eng. *Fused Deposition Modeling*) tehnologija zbog svoje jednostavnosti, dostupnosti opreme te pristupačne cijene uređaja i spektra materijala kao i mogućnosti izrade prototipova i funkcionalnih dijelova. Osim navedene tehnologije, u nastavku će biti objašnjene tehnologije poput fotopolimerizacije materijala u komori, ispisa nanošenjem materijala i vezivnog sredstva, sinteriranja i drugih.

2.1. Taložno očvršćivanje

FDM koristi tehnologiju taložnog očvršćivanja i najrasprostranjenija je aditivna tehnologija. Često se koristi kratica FDM, ali pod autorskom zaštitom tvrtke Stratasys, a globalno se koristi službeno prihvaćena kratica FFF (eng. *Fused Filament Fabrication*) iako je sama proizvodna tehnologija ista.

Svi FDM 3D pisači koriste plastični materijal (žicu, filament) koji dolazi namotan na kolut. Postoji više vrsta filamenata koji 3D pisači koriste, a PLA, PETG, ABS i ASA samo su neki od danas najčešće korištenih vrsta filamenata. FDM/FFF 3D pisači putem specijalno nazubljene osovine, koja se nalaze u glavi 3D pisača, povlače filament do grijača koji tali plastiku. Omekšana plastika kroz glavu 3D pisača izlazi putem mlaznice koja se nalazi na definiranoj udaljenosti od radne podloge (debljina sloja) za vrijeme ispisa. Kako se glava pisača pomiče u smjeru X i Y osi, tako omekšana plastika međusobno prianja i sloj po sloj gradi budući proizvod. Nakon što bude gotov jedan čitavi sloj, radna podloga se pomjera prema dolje u smjeru Z osi i nastavlja se proces ispisa idućeg sloja, a postoje i neke verzije pisača gdje se glava pisača pomjera prema gore u smjeru Z osi, a radna podloga je konstantno tijekom ispisa na istoj visini.



Slika 2. Osnovni dijelovi FDM 3D pisača [5]

Osnovni dijelova FDM 3D pisača su sama konstrukcija pisača, jedna ili više glava pisača u kojoj se nalazi grijač i mlaznica te dodatni senzori i ventilatori, jedan ili više koluta s filamentima te radna podloga. Rad i kretanje svakog 3D pisača ovisi o unaprijed zadanim postavkama 3D ispisa i o samoj konfiguraciji pisača.

Pisači se dijele u dvije glavne kategorije, a to su industrijski (profesionalni) i stolni pisači. Obje vrste pisača imaju specifične primjene i prednosti, a glavna razlika je njihov razmjor proizvodnje. Industrijski FDM 3D pisači znatno su skuplji od stolnih koji su uglavnom namijenjeni za kućnu upotrebu. Budući da su industrijski pisači učinkovitiji i moćniji od stolnih pisača, češće se koriste za izradu alata, funkcionalnih prototipova i tehnički funkcionalnih dijelova. Također, industrijski pisači brži su od stolnih pisača i dizajnirani su za ponovljivost i pouzdanost kako bi mogli proizvoditi isti dio iznova s minimalnom ljudskom intervencijom. Stolni pisači nisu toliko robusni, a ukoliko se pisac često koristi potrebno je redovno obavljati održavanje i kalibraciju uređaja. [6]

Svojstva	Industrijski pisači	Stolni pisači
Točnost ispisa	$\pm 0,3\%$	$\pm 0,5\%$
Standardna visina sloja	0,18 – 0,5 mm	0,10 – 0,25 mm
Minimalna debljina vanjske konture	1 mm	0,8 – 1 mm
Maksimalni volumen ispisa	900 x 600 x 900 mm	200 x 200 x 200 mm
Najčešće korišteni materijali	ABS, PC, ULTEM	PLA, ABS, PETG
Produktivnost	Srednja/mala	Mala
Cijena pisača	50000\$ +	500 – 5000\$

Slika 3. Usporedba stolnih i profesionalnih 3D pisača [6]

2.1.1. Creality Ender 3 V2 Neo

Shenzhen Creality 3D Technology Co., Ltd., poznat kao Creality osnovan je 2014. godine i poznati je svjetski brend u proizvodnji 3D pisača. Primarna djelatnost im je proizvodnja 3D pisača, a zatim slijedi proizvodnja 3D skenera, laserskih gravera, filamenata i dodatnog pribora. Creality ima preko 500 patenata i posluje u više od 100 zemalja. Također su vlasnici brendova HALOT i Sermoon. [7]

Creality Ender 3 V2 Neo je 3D pisač radnog volumena 220x220x250 mm uz maksimalnu brzinu ispisa do 120 mm/s. Maksimalna visina sloja je 0,35 mm uz promjer filameta od 1,75 mm. Standardni promjer mlaznica je 0,4 mm uz moguću izmjenu na manje ili veće promjere i maksimalno zagrijavanje mlaznice do 260°C. Maksimalna temperatura radne podloge je 100°C. Navedeni pisač koristit će se za izradu ispitnih uzoraka.

Tehnologija ispisa: FDM	Brzina ispisa: 120 mm/s (maksimalna)
Volumen ispisa: 220 x 220 x 250 mm	Moguća visina sloja: 0,05 – 0,35 mm
Dimenzije pisača: 520 x 505 x 280 mm	Promjer filameta: 1,75 mm
Masa pisača: 7,8 kg	Količina mlaznica: 1
Masa paketa: 9,8 kg	Promjer mlaznice: 0,4 mm (standardno)
Maksimalna temperatura mlaznice: 260°C	Maksimalna temperatura podloge: 100°C

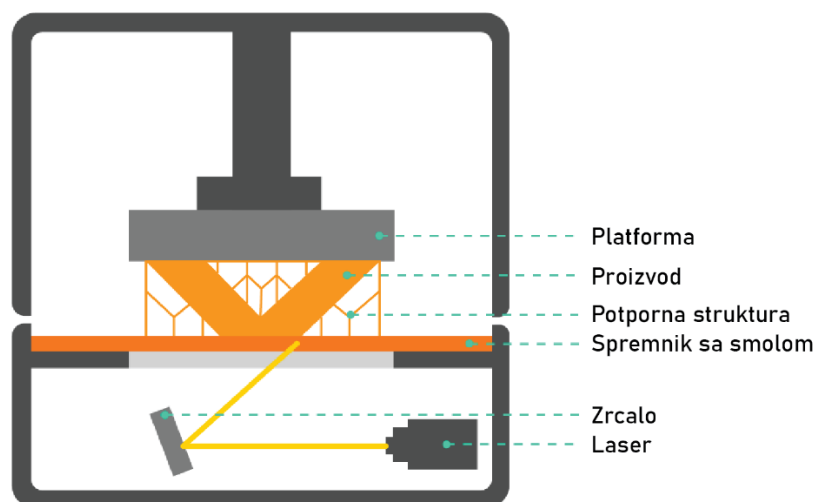
Slika 4. Specifikacije pisača Creality Ender 3 V2 Neo [7]

2.2. Stereolitografija

Stereolitografija (SLA – eng. *Stereolithography*) radi na načelu očvršćivanja slojeva fotopolimera (tekuće plastike osjetljive na svjetlost - smole) kako bi se stvorio objekt.

SLA pisari koriste precizno fokusiran laserski snop koji se kreće po prethodno generiranoj putanji i kreira proizvod sloj po sloj unutar spremnika smole. Laser je kontroliran pomoću računalno upravljanoj sustava kako bi formirao željeni oblik sloja, a kvaliteta ispisanog proizvoda ovisi o prethodno postavljenim parametrima. [8]

Kada laserski snop osvjetli određeni dio smole, fotoinicijatori u smoli počinju polimerizirati, odnosno očvršćavati i povezivati se, stvarajući čvrsti sloj. Nakon što je jedan sloj završen, platforma se podiže iz spremnika smole kako bi omogućila stvaranje sljedećeg sloja, a postupak se ponavlja dok željeni model ne bude gotov. To je jedna od verzija kretanja podloge, dok se u drugoj verziji platforma spušta, a ostatak postupka je isti. Podizna radna podloga, odnosno platforma je uronjena u spremnik smole za vrijeme procesa nastanka sloja. U ovom slučaju je platforma zakrenuta za 180 stupnjeva te ona vrši pomak po Z osi, a pomak u XY ravnini ne postoji.



Slika 5. Prikaz SLA pisara [9]

SLA pisari su poznati po svojoj iznimnoj preciznosti i sposobnosti stvaranja detaljnih proizvoda s glatkim površinama što ih čini idealnim za primjenu u medicinskoj i dentalnoj industriji, za izradu jezgri kalupa za lijevanje nakita i slično.

2.3. Digitalna obrada svjetlom

DLP (eng. *Digital Light Processing*) tehnologija gotovo je identična SLA tehnologiji ispisa, ali je bitna razlika u tom što za razliku od laserskog snopa, ova tehnologija koristi projektor s digitalnim svjetlom (često DLP projektor ili LCD zaslon), koji osvjetljava cijeli sloj smole odjednom te ispis čini bržim.

Ova tehnologija je također izrazito precizna, ali na samu kvalitetu i razinu detalja dodatno utječe razlučivosti projektora i veličini piksela, jer svaki piksel na ekranu predstavlja točku osvjetljenja.

Platformu je dodatno moguće zakrenuti za određeni kut kako bi se postigla povoljnija orijentacija ispisa koja zahtijeva manje potpornog materijala tijekom ispisa, ali je moguće da sam ispis u tom slučaju traje nešto duže. Gotovi komad potrebno je dodatno podvrgnuti naknadnoj obradi pranja i očvršćivanja.

Pranjem je potrebno ukloniti višak ili neočvrstnutu smolu s površine i šupljina ispisanog komada. Najčešće korištena sredstva za pranje i ispiranje ispisanih proizvoda su izopropilni alkohol (IPA), etilni alkohol (etanol), komercijalna sredstva za pranje ili voda ukoliko se koristi posebna vrsta smole.

Kako bi se postigla maksimalna stabilnost i čvrstoća modela, potrebno je ispisani proizvod izložiti UV svjetlu. Izravno izlaganje sunčevoj svjetlosti je isplativ način za očvršćivanje budući da prirodno sunčevo svjetlo emitira UV svjetlo. Međutim, ova metoda nudi manje kontrole nad vremenom izlaganja i intenzitetom. Osim izlaganja dnevnom svjetlu, moguće je izlaganje i UV lampama u posebnim uređajima kako bi ispisani proizvod jednoliko očvrstnuo. [10]

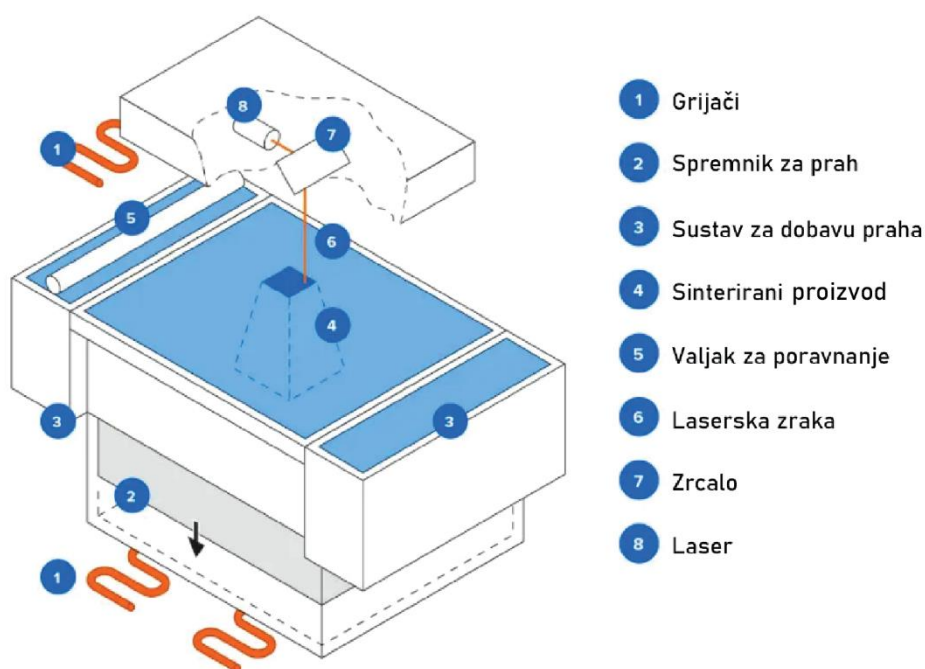


Slika 6. Uređaji za ispiranje i očvršćivanje [10]

2.4. Selektivno lasersko sinteriranje

Selektivno lasersko sinteriranje (SLS – eng. *Selective Laser Sintering*) je tehnologija 3D ispisa koja koristi proces fuzije u sloju praha te može proizvesti vrlo precizne i izdržljive dijelove koji se mogu koristiti izravno za krajnju upotrebu ili prototipove. [11]

U početnoj fazi procesa, potrebno je zagrijati spremnik u koji će biti nanesen polimerni prah na temperaturu blizu točke taljenja materijala. Na zagrijano područje se zatim dodaje prvi sloj praškastog materijala, čime se priprema prvi sloj koji je temelj za daljnji postupak sinteriranja. Zatim, se dodaje novi sloj praha koji se zatim poravnana, nakon čega laser skenira područje, pri tom podižući temperaturu do točke taljenja samo na točno određenim područjima koja treba sinterirati. Na taj način, laser selektivno povezuje prah, stvarajući čvrste veze između čestica i oblikujući željeni dio. Ovaj korak ponavlja se za svaki sloj, a spremnik s prahom, odnosno platforma se nakon svakog sloja pomiče prema dolje, omogućujući stvaranje novog sloja praškastog materijala, koji se zatim ponovno sinterira. Velika prednost ovog postupka je što nema potrebe za potpornim materijalom, već ostatak praha koji se ne sinterira služi dodatno kao prirodna potpora zbog čega je moguće ostvariti visoku preciznost pri izradi složenih geometrija koje bi bilo teško izraditi nekim drugim postupcima aditivne ili klasične proizvodnje.



Slika 7. Prikaz SLS postupka [12]

Nakon završetka postupka, kada je model izrađen, spremnik s prahom se hladi kako bi se osigurala stabilnost materijala te kako ne bi došlo do deformacija. Nakon hlađenja, gotovi dijelovi se uklanjaju iz uređaja, a potom ukoliko je potrebno mogu proći kroz naknadnu obradu poput čišćenja, brušenja ili dodatnog sinteriranja kako bi se postigla željena kvaliteta površine i preciznost, a ostatak praha se može reciklirati te ponovno upotrebljavati pri novom postupku sinteriranja.

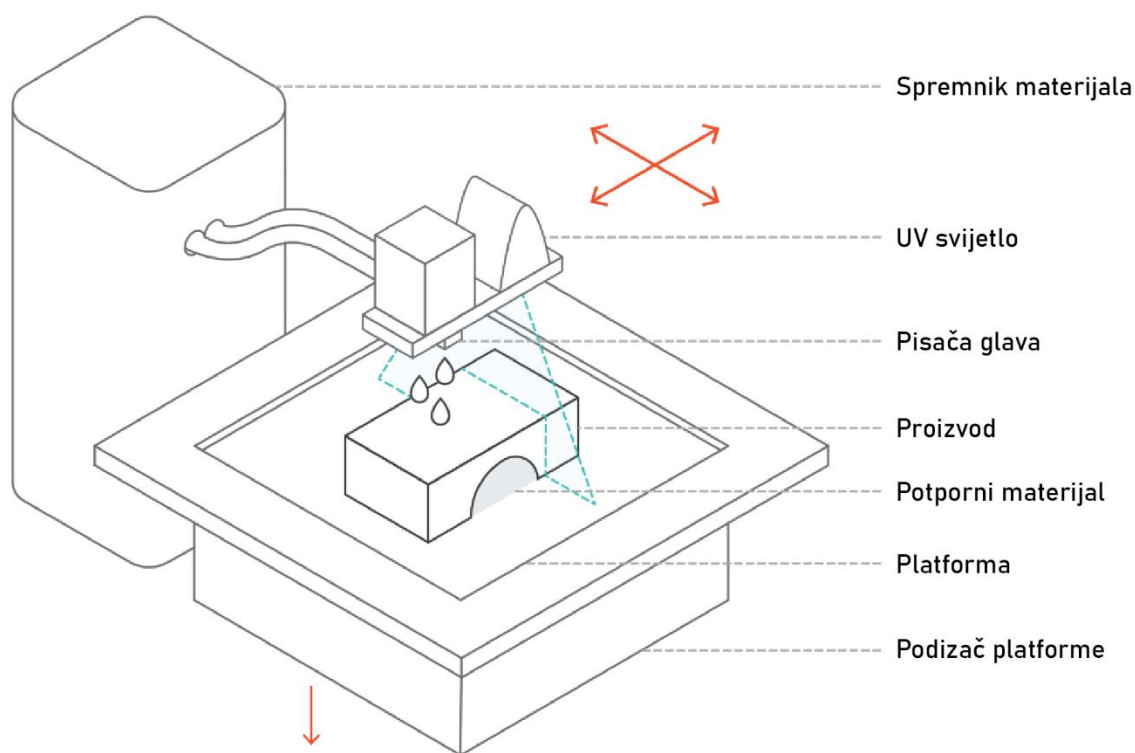
Još jedna velika prednost ovog postupka je maksimalna iskoristivost radnog prostora 3D-pisača, odnosno moguće je cijelom visinom spremnika provoditi sinteriranje uz vertikalni raspored, tj. naslagivanje proizvoda budući da ostatak praha služi kao potpora.



Slika 8. Prikaz proizvoda načinjenog SLS postupkom [12]

2.5. Ispis nanošenjem materijala

Mlazno nanošenje materijala (MJT - eng. *Material Jetting*) je postupak aditivne proizvodnje koji funkcionira na sličan način kao i klasičan 2D pisac. Kod ovog postupka, glava za ispis ispušta kapljice fotoosjetljivog materijala koji očvršćuje pod ultraljubičastim (UV) svjetlom, izgrađujući dio sloj po sloj. Prije samog postupka je potrebno zagrijati materijal koji će se nanositi kako bi se postigla optimalna viskoznost materijala. Materijali koji se najčešće koriste u ovoj tehnologiji su fotopolimeri (akrilati) koji dolaze u tekućem obliku. Također podržava ispis s više materijala i širok raspon materijala (poput materijala sličnih ABS-u, gume, smola, voska i potpuno prozirnih materijala). [13]



Slika 9. Proces nanošenja materijala [13]

Za razliku od većine drugih tehnologija 3D ispisa, ovaj postupak karakterističan je po linijskom nanošenju materijala. Više glava za ispis postavljeno je bočno jedna uz drugu na istom nosaču, omogućujući nanošenje materijala na cijelu površinu ispisa u jednom prolazu. To omogućuje različitim glavama nanošenje različitih materijala, ispis u različitim bojama i istovremeni ispis potpornih struktura. Nakon završetka jednog sloja, platforma za izradu spušta se za visinu jednog sloja, a postupak se ponavlja dok cijeli proizvod nije dovršen.

Ova tehnologija omogućava izradu dijelova visoke dimenzijske točnosti s vrlo glatkom površinom, ali su potporne strukture uvijek potrebne pri ispisu dijelova i moraju se ukloniti u fazi naknadne obrade.

Izvedenica ove tehnologije poznata pod skraćenicom DOD (eng. *Drop on demand*) dodatno koristi rotirajući alat koji zaglađuje površinu sloja nakon svakog nanosa materijala kako bi se osigurala savršeno ravna površina prije ispisa sljedećeg sloja. Ovaj postupak koristi se za izradu proizvoda sličnih nastalima postupkom lijevanja voska i za izradu kalupa. [13]

2.6. Ispis pomoću vezivnog sredstva

Ispis pomoću vezivnog sredstva (BJT – eng. *Binder jetting*) može koristiti razne materijale, uključujući metale, pijesak i keramiku. Postupak je izvrsno je rješenje za primjene gdje su važni estetika i oblik, poput arhitektonskih modela, ambalaže, igračaka i figurica, ali nije prikladan za funkcionalne primjene zbog lomljivosti izrađenih dijelova. Sam postupak je vrlo sličan postupku SLS-a budući da se za početak nanosi sloj praškastog materijala koji se zatim poravnava, a bitna razlika je u tome što se umjesto lasera koristi mlaznica sa vezivnim sredstvom koje se nanosi na željeno područje kako bi se stvorio kompaktni sloj.

Velika prednost ovog postupka je što se tijekom procesa izrade ne koristi toplina, što sprječava nastanak zaostalih naprezanja u dijelovima. Izrađeni proizvodi se podvrgavaju naknadnoj toplinskoj obradi kako bi se postigla bolja mehanička svojstva, a ovisno o vrsti materijala koriste se i različita vezivna sredstva. Furansko, silikatno i fenolno vezivo koriste se za pijesak, dok se za metalne materijale koriste veziva na bazi vode. Za polimere se koristi polivinil alkohol i celulozni derivati. . [14]

3. MATERIJALI ZA ADITIVNU PROIZVODNJU

U aditivnoj proizvodnji, svojstva materijala se postižu zajedno s geometrijom dijela. Sama sirovina ima utjecaj u pogledu kemijskog sastava, veličine i raspodjeli čestica, ali parametri procesa također igraju značajnu ulogu u svojstvima kao što su čvrstoća, žilavost, poroznost i završna obrada površine gotovog dijela. Kada su svojstva materijala određena zajedno s geometrijom, postaje moguće precizno i smisleno kontrolirati ta svojstva u specifičnim dijelovima proizvoda u pogledu poroznosti, krutosti i fleksibilnosti.

Prvi proces 3D ispisa koji je razvijen, stereolitografija, je oblik polimerizacije u posudi koji očvršćuje kapljevitu smolu kako bi se izradio polimerni dio. Polimeri su i danas široko korištena vrsta materijala za 3D ispis, no daleko su napredovali od prvih, krhkih materijala. Plastomeri poput PLA (eng. *Polylactic Acid*) i ABS (eng. *Acrylonitrile Butadiene Styrene*) su neki od najčešće korištenih materijala u tehnologijama temeljenim na filamentima, no visokoučinkoviti materijali poput PEEK (eng. *Polyether Ether Ketone*) i PEKK (eng. *Polyetherketoneketone*) također imaju sve širu uporabu. Poliamidi i TPU (eng. *Thermoplastic Polyurethane*) su pronašli primjenu u procesima fuzije praša. Polimerni materijali obično se isporučuju u obliku čvrstih filamenata, granula, tekuće smole ili praša. [15]



Slika 10. Kolut s plastičnim filamentom [9]

Kada je riječ o metalima, najčešće korišteni materijali za 3D ispis uključuju aluminij, titan, nehrđajući čelik i kobalt-krom. Bakar je povijesno bio težak za ispis pomoću sustava temeljenih na laserima, no inovacije poput plavih laserskih zraka to omogućuju. Reflektirajući metali mogu biti lakši za ispis korištenjem drugih metoda. Legura koja je prikladna za jednu metodu ispisa metala možda nije pogodna za neke druge tehnologije. Metali za 3D ispis se obično isporučuju u obliku praha, a također se mogu i miješati s drugim materijalima. Noviji sustavi primjenjuju filament od metalnog praha ugrađenog u polimer za izradu "zelenih" dijelova koji potom postižu svoje konačne dimenzije i svojstva metala toplinskom obradom u peći. Prah se također može suspendirati u smoli ili isporučiti u obliku paste za ovakve procese. [15]

Kompoziti koji kombiniraju različite vrste materijala također dobivaju na značaju u 3D ispisu. Kompozit se može stvoriti tijekom procesa ispisa, ili taj proces može i početi s materijalom koji već uključuje dodatak nekog materijala. Polimeri ojačani usitnjenim vlaknima od ugljika i staklenih vlakana koriste se za sve, od privremenih kalupa za injekcijsko prešanje do alata za slojevite kompozite i dijelove za konačnu upotrebu, nudeći opciju između čiste plastike i skupljih metala. Neki 3D pisari nude mogućnost kontinuiranog ispisa ojačanim vlaknima, kompoziti poput ovih mogu biti dovoljno čvrsti da budu alternativa metalima u nekim slučajevima, često sa značajnim uštedama na težini. Metal-matriks kompoziti (MMC – eng. *Metal Matrix Composites*) koji kombiniraju metalnu leguru s drugim materijalom poput keramike također su vrsta materijala koja pronalazi nove primjene kroz 3D ispis.

Pijesak se također može 3D ispisivati pomoću nanošenja veziva (BJT) kako bi se selektivno "lijepila" zrna pijeska. To je tehnika koja se brzo razvija za prototipne i proizvodne kalupe za ljevaonice, kao i za vakuumsko oblikovanje i druge vrste alata.

3.1. PLA

PLA (polilaktična kiselina) je najrašireniji materijal u industriji FDM 3D ispisa zbog svoje stabilnosti, niske i pristupačne cijene te utjecaja na okoliš, budući da se dobiva iz biorazgradivih elemenata kao što su kukuruzni škrob, šećerna trska, krumpirov škrob i slično. Topljiv je u otapalima uključujući dioksan i vrući benzen. Fizička i mehanička svojstva razlikuju se prema točnoj vrsti polimera, od amornog staklastog polimera do polimera s kristalastom ili visoko kristalnom strukturom. Postoje tri načina dobivanja PLA, a to su polikondenzacija, polimerizacija otvaranjem prstena i azeotropna dehidracijska kondenzacija. U industrijskoj proizvodnji najčešće se koriste polimerizacija otvaranjem prstena i izravna polikondenzacija.

PLA je plastomerni materijal koji ima dobra mehanička svojstva, posebno rasteznu čvrstoću, Young-ov modul i čvrstoću na savijanje u usporedbi s tradicionalnim sintetskim polimerima. Niska žilavost PLA ograničava njegovu uporabu jer nije primjeren za upotrebu koja iziskuje velike deformacije pri većim opterećenjima. Fleksibilnost PLA može se povećati dodatkom omekšavala dobivenog iz obnovljivih izvora. Tako se kao omekšavala mogu koristiti esteri limunske kiseline. Njihovim dodatkom smanjuje se staklište PLA što ukazuje na rast fleksibilnosti. [16]

PLA se također može zavarivati otapalom koristeći diklorometan, dok acetonska otopina omekšava površinu materijala, čineći ga ljepljivim bez otapanja, tako da se može spojiti s drugom PLA površinom. Etil acetat se može koristiti kao organsko otapalo, otapajući PLA i čineći ga dobrim rješenjem za uklanjanje PLA potporne strukture za ispis ili čišćenje glave za 3D ispis. Propilen karbonat i piridin također se mogu koristiti kao otapala, ali su manje primjereni od etil acetata i propilen karbonata. Iako je PLA dobiven iz biorazgradivih i obnovljivih izvora, sam po sebi nije biorazgradiv, te ga je potrebno odvojiti za kompostiranje, za razliku od ostalih plastika koje se mogu reciklirati. [17]

3.2. PETG

Kao kopolimer, PETG (polietilen-tereftalat modificiran glikolom) kombinira svojstva PET-a i glikola. Navedena kombinacija smanjuje probleme s pregrijavanjem koji su povezani s PET-om. Glavna svojstva polietilen-tereftalata glikola uključuju tvrdoću, otpornost na kemikalije i udarce, prozirnost i duktilnost. PETG je materijal koji se lako ekstrudira i ima dobru toplinsku stabilnost. Polietilen tereftalat glikol je vrlo pogodan za ispis, s temperaturom ekstrudiranja između 220 i 240°C, i brzinom ispisa od 40-60 mm/s. Filament od polietilen-tereftalata glikola lako se ispisa i pruža izvrsnu adheziju slojeva. Mali postoci skupljanja omogućuju dimenzijski veće ispise nego s PLA-om ili ABS-om, te je miris slabijeg intenziteta tijekom ispisa. [18]

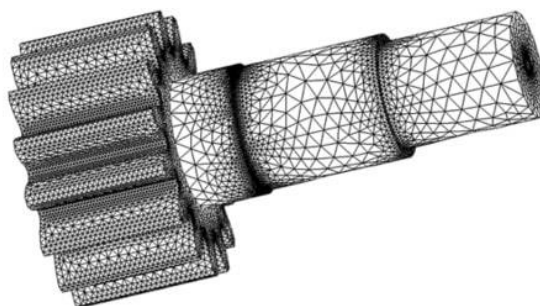
PETG zahtijeva upotrebu grijane radne podloge kako bi se izbjeglo savijanje i skloniji je ogrebotinama od PLA-a. Preporučuje se da temperatura radne podloge ne prelazi 80°C. PETG može brzo upiti vlagu i bolje se čuva u hladnom i suhom okruženju. Pogodan je za ispis dijelova izloženih naglim opterećenjima, kao što su mehanički dijelovi, dijelovi pisača i zaštitne komponente.

4. PROGRAMI ZA PRIPREMU 3D ISPISA

Programi koji se koriste za pripremu 3D modela za ispis nazivaju se "Sliceri". Njihova glavna funkcija je konvertiranje digitalnog 3D modela u slojeve koje pisač može interpretirati i ispisati. Ovisno o parametrima koji se zadaju, program razlaže model na slojeve, generira putanje mlaznice te definira vrijeme potrebno za ispis kao i potrebnu količinu materijala. Programi omogućuju korisnicima vizualizaciju svakog pojedinačnog sloja prije samog ispisa, što pomaže u predviđanju mogućih problema, nedostataka u strukturi, loše postavljenih potpora ili neadekvatne orijentacije modela i slično.

Kako bi se priprema obavila kvalitetno, bitno je poznavati ključne parametre i sam proces, zavisnost jednog parametra o drugom te samu mehaniku pisača. Većina programa, omogućava odabir razine iskustva korisnika (početnik, srednja razina ili stručnjak). Ovisno o odabranoj razini, prikazuje se odgovarajući broj parametara, čime se početnicima olakšava rad jer imaju pristup samo osnovnim postavkama, dok napredni korisnici mogu pristupiti svim opcijama za detaljnu prilagodbu. Ovaj sustav smanjuje mogućnost preopterećenja informacijama i omogućuje lakše učenje i prilagodbu. Također je u nekim programima detaljno opisan pojedini parametar te mogući utjecaj na kvalitetu ispisa. Priprema započinje kreiranjem 3D modela ili je moguće skenirati postojeće stvarne objekte kako bi dobili digitalnu datoteku kompatibilnu s programima za pripremu ispisa.

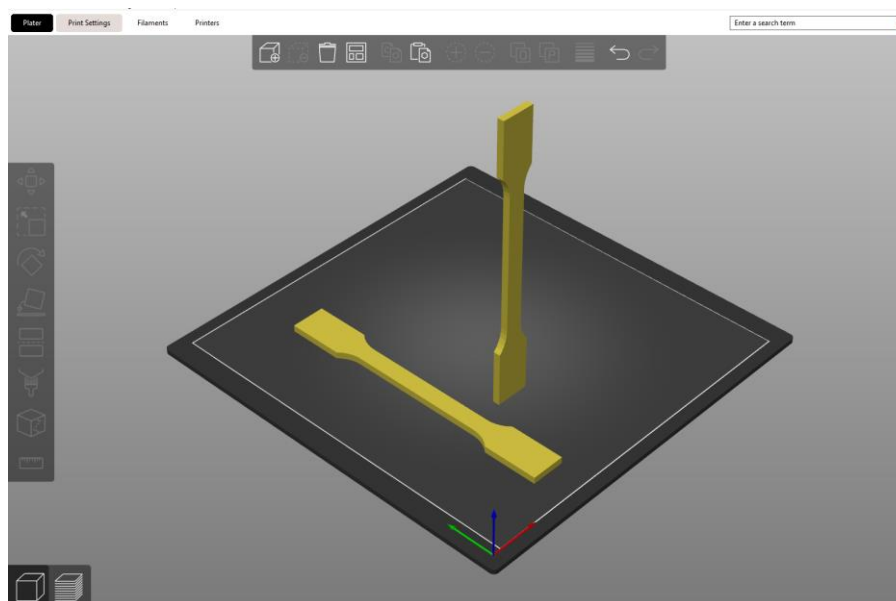
STL datoteka je najčešći format za pohranu 3D modela koji se koriste za pripremu 3D ispisa. STL (eng. *Standard Tessellation Language*) datoteke pohranjuju geometrijske informacije modela bez podataka o boji, teksturama ili materijalima i umjesto toga opisuju oblik površine 3D objekta pomoću mreže trokutastih poligona. Svaki trokut u STL datoteci definiran je koordinatama svojih triju vrhova i normalnim vektorom koji pokazuje smjer prema vanjskoj strani modela. Osim STL datoteke, moguće je koristiti OBJ, 3MF i druge formate za pohranu i pripremu ispisa. [19]



Slika 11. Izgled STL datoteke [19]

Nakon pripreme za ispis, kreira se datoteka s G kodom koji sadrži upute koje 3D-pisač koristi za svaki korak ispisa, uključujući kretanje mlaznice, kontrolu temperature, brzinu ispisa i druge. Moguće je izmijeniti G kod i dodati neku specifičnu liniju koda, pa se tako G kod često koristi za modificiranje zadnje putanje pisača na način da ukloni ispisane modele i započne novi postupak ispisa što rezultira znatno višom proizvodnošću, a što se u pravilu obavlja ručno. Uz navedenu izmjenu je potrebno i fizički modificirati pisač kako ne bi došlo do mehaničkih oštećenja te je preporučljivo imati i kameru za nadzor ispisa.

Najpopularniji programi su Ultimaker Cura, PrusaSlicer, Simplify3D, ideaMaker i Slic3r. Svaki od njih ima različite značajke, prilagođene za specifične proizvođače printera i vrste korisnika.



Slika 12. Prikaz orijentacija ispisa ispitnih tijela u PrusaSlicer programu

5. PARAMETRI 3D ISPISA

U ovom poglavlju bit će navedeni parametri koji imaju ključnu ulogu u postupku 3D ispisa. Postoji još niz parametara koji mogu utjecati na konačna svojstva proizvoda, ali za njihovo razumijevanje je prvobitno potrebno razumjeti ulogu glavnih parametara.

5.1. Temperatura mlaznice

Temperatura mlaznice jedan je od ključnih parametara u 3D ispisu jer direktno utječe na kvalitetu, čvrstoću, prijanjanje slojeva i završni izgled ispisanog predmeta. Odabir odgovarajuće temperature mlaznice ovisi prvenstveno o vrsti materijala koji se ispisa, ali i o materijalu i veličini mlaznice. Različiti materijali imaju optimalan raspon temperatura pri kojem ostvaruju najbolje rezultate, a samo mali odmak od tog raspona može značajno utjecati na konačnu kvalitetu ispisa. Većina proizvođača filamenata uz materijal isporučuje i preporučene temperature ispisa striktno za njihov materijal, ali je moguće i dodatno provesti određena ispitivanja na 3D-pisaču te na taj način dobiti onu optimalnu koja će se koristiti za daljnji ispis. Također, mlaznicu je potrebno zagrijati i prije početka ispisa kako bi se postiglo pravilno taljenje i prijanjanje slojeva te kako bi mlaznica bila jednoliko zagrijana. [5]

Osima pravilnog prijanjanja slojeva koje je ključno za sam postupak 3D ispisa, varijacije temperature ili neodgovarajuća temperatura rezultiraju fizičkim defektima na modelu. Ovisno o tome radi li se o previsokoj ili preniskoj temperaturi mlaznice, model će postati neuporabljiv ili će biti potrebna naknadna obrada površine. Samim time temperatura mlaznice ima direktan utjecaj na kvalitetu površine i izraženost detalja.



Slika 13. Različiti oblici i materijali mlaznica 3D-pisača [20]

Osim standardnog promjera mlaznice 0,4 mm, mogu se koristiti i nešto manji ili veći promjeri mlaznica koje su najčešće od mjedi, ali mogu biti i čelične. Promjer, oblik i materijal mlaznice ovise o materijalu koji se ispisuje, njegovoj abrazivnosti, ali i namjeni ispisa, čemu je potrebno prilagoditi temperaturu mlaznice kako bi se ostvario pravilan protok materijala. [5]

5.2. Temperatura podloge

Temperatura podloge je također bitan parametar u 3D ispisu jer direktno utječe na prianjanje prvog sloja i smanjenje deformacija, odnosno stabilnost cijelog modela tijekom ispisa. Optimalna temperatura podloge prvenstveno varira ovisno o vrsti materijala koji se ispisuje.

Zagrijana podloga smanjuje razlike u temperaturi između filameta i podloge, smanjujući mogućnost da se prvi sloj odvoji ili nepravilno oblikuje. Održavanjem dovoljno visoke temperature podloge smanjuje se naglo hlađenje modela i posljedično skupljanje donjih slojeva što je posebno izraženo kod nekih materijala poput ABS-a. Direktni utjecaj na sam postupak ispisa ima i okolna temperatura koja bi trebala biti konstantna kako ne bi dolazilo do dodatnog skupljanja modela. Izuzetno je bitno da je cijela podloga ujednačene temperature te da je na jednakoj udaljenosti od mlaznice u cijeloj ravnini kako ne bi došlo do nepravilnosti u visini slojeva i oscilacijama u prianjanju. [5]

Podloga također može biti od različitih materijala, staklena, PEI (podloga presvučena polietereimidom – eng. *Polyetherimide*), podloga s teksturom i druge, a svaka od njih ponaša se drugačije pri određenim temperaturama te ovisno o vrsti podloge se dobiva željena hrapavost površine. Glade površine je moguće postići pomoću staklene podloge dok se za hrapavije površine koriste PEI podloge.

Za poboljšano prianjanje može se koristiti i ljepilo, trake, sprejevi ili posebne adhezivne podloge koje pomažu kod materijala koji teško prianjaju.

Tablica 1. Temperature 3D ispisa za različite materijale [5]

Materijal	Temperatura mlaznice	Temperatura podloge
PLA	200 – 230°C	60°C
PETG	220 – 240°C	80 – 100°C
ASA	240 – 260°C	90 – 120°C
ABS	220 – 250°C	90 – 110°C

5.3. Brzina ispisa

Brzina ispisa predstavlja brzinu kojom se mlaznica kreće dok nanosi materijal na radnu podlogu te može varirati ovisno o dijelu modela koji se ispisuje, poput vanjskih bridova, unutarnjih bridova, ispune i prvog sloja.

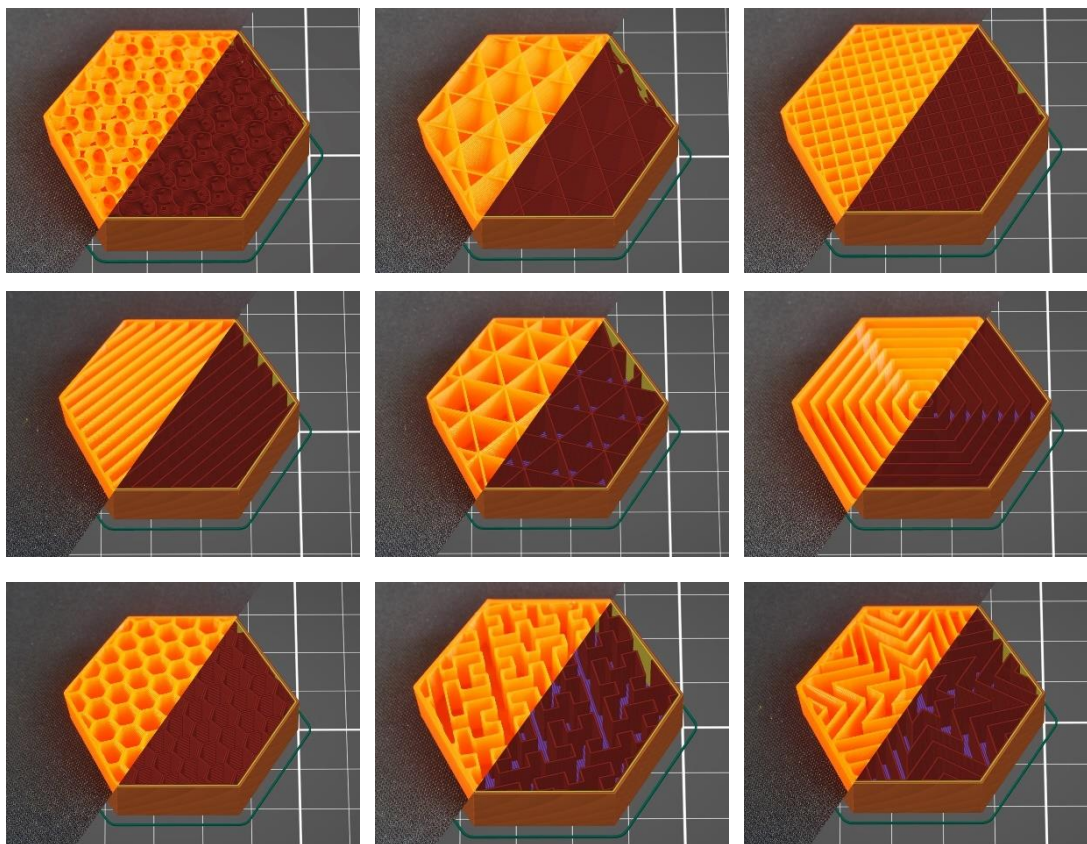
Kod optimalne brzine mlaznice se materijal nanosi precizno i ravnomjerno, što rezultira glatkom površinom i oštrim detaljima uz smanjenje vidljivosti spojeva slojeva te pospješuje prijanjanje, a sami time i čvrstoću modela. Na brzinu direktan utjecaj ima vrsta materijala koja se ispisuje kao i dio modela koji se ispisuje. Budući da je prvi sloj najbitniji, on se uvijek ispisuje nešto sporije kako bi se osiguralo dobro prijanjanje, dok se ispuna ispisuje nešto većom brzinom budući da nije vidljiva nakon ispisa modela, odnosno nalazi se između vanjskih bridova, ali je svejedno potrebno paziti na brzinu ispisa ispune budući da ispuna ima ključnu ulogu u čvrstoći modela. Unutarnje bridove moguće je također ispisivati nešto većim brzinama, dok je vanjske bridove potrebno ispisivati sporije kako bi površina bila kvalitetnija i detaljnija. Kod prevelike brzine ispisa česta je pojava vibracija i nastanak deformacija na površini modela kao i mogućnost pomjeranja slojeva. [5]

Brzina ispisa također ovisi i o namjeni modela, ukoliko je bitna estetika, brzine će biti nešto manje, a ukoliko dio ima tehničko funkcionalno ulogu, kod kojeg nije bitna estetika, mogu se primijeniti veće brzine. Vrijeme izrade modela je jedna od ključnih informacija i usko je vezana uz brzinu ispisa pa je samim time potrebno kompromisno odabrati parametre ispisa ovisno o namjeni samog modela. Na brzinu ispisa samog pisača također utječu i mehanički dijelovi, odnosno količina i vrsta vodilica, ležajeva, motora i prijenosnika kretanja te sama krutost i stabilnost okvira pisača.

5.4. Oblik i gustoća ispune

Ispunjenost modela direktno utječe na čvrstoću, težinu, fleksibilnost te vrijeme ispisa i izražava se u postotcima. Predstavlja unutarnju strukturu modela koja se ispunjava različitim oblicima poput mrežastih, šesterokutnih ili drugih oblika umjesto da bude potpuno puna ili prazna.

Veći postotak ispune povećava čvrstoću jer pruža potporu unutar samog modela, dok manji postotak smanjuje težinu proizvoda i vrijeme ispisa, što je praktično za izradu prototipa i modela koji ne trebaju nositi opterećenje. Oblici ispune poput šesterokutne i trokutaste strukture prikladniji su za dijelove koji trebaju podnijeti opterećenje dok s druge strane, jednostavniji oblici ispune, poput pravokutne ili mrežaste strukture troše manje materijala i brže se ispisuju, ali imaju nešto manju čvrstoću. Postotak ispune također utječe na stabilnost i fleksibilnost samog modela, ovisno o namjeni koju želimo postići s modelom. Dekorativnim i jednostavnim modelima obično je dovoljno 10-20% ispune, dok funkcionalni i opterećeni dijelovi često zahtijevaju ispunu gustoće veće od 50%. [5]



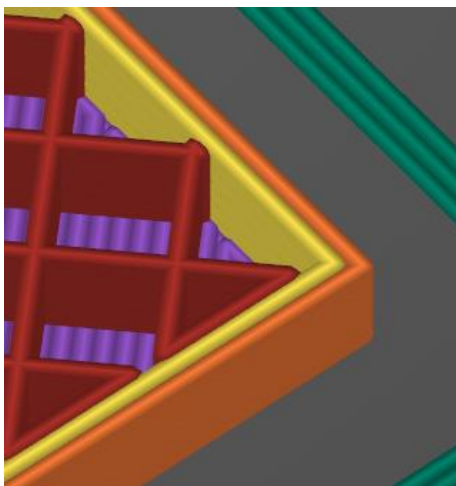
Slika 14. Oblici ispune [21]

5.5. Visina sloja

Visina sloja označava visinu svakog pojedinačnog sloja koji pisač nanosi, a ona se može i razlikovati ovisno o tome koji dio modela se ispisa. U samom programu za pripremu ispisa je moguće definirati različite visine slojeva na točno određenim područjima modela kako bi se smanjilo vrijeme ispisa ili suprotno, kako bi se povećala krutost. Manja visina sloja omogućuje veću preciznost i detaljnost modela, ali isto tako povećava vrijeme ispisa jer se za isti model mora nanijeti više slojeva. Veća visina sloja smanjuje vrijeme ispisa, ali može i smanjiti kvalitetu površine, stvarajući grublje teksture i manje detalja. Optimalna visina slojeva ovisi o namjeni modela, željenoj kvaliteti površine i jasnoći detalja. Ukoliko se radi o većim visinama slojeva, potrebno je korigirati i brzinu mlaznice kako bi se osigurao konstantan i ravnomjeran protok materijala. Pri tome je potrebno paziti i na promjer mlaznice koji koristimo budući da visina sloja ne može biti veća od promjera mlaznice. [5]

5.6. Debljina vanjske konture

Debljina vanjske konture odnosi se na debljinu vanjskih slojeva modela, a kao parametar se izražava u količini prolaza, odnosno ukupnom zbroju unutarnjih i jednog vanjskog prolaza. Deblje konture pružaju višu čvrstoću i stabilnost, osobito za modele koji će biti podvrgnuti mehaničkom opterećenju. Kako bi se postigla optimalna debljina konture, potrebno je da bude veća od visine sloja. Veća debljina konture također povećava vrijeme ispisa modela, ali i utrošak materijala pa je potrebno pronaći optimalno rješenje. [5]



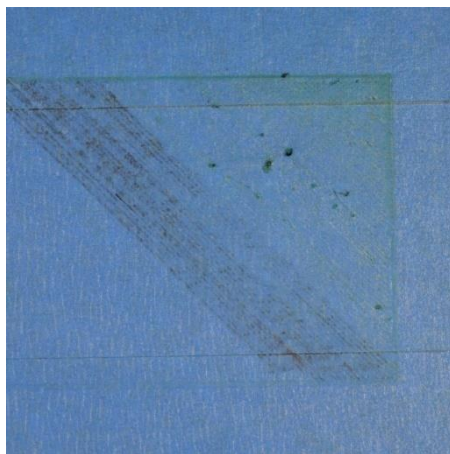
Slika 15. Prikaz unutarnje ispune i vanjske konture

6. GREŠKE 3D ISPISA

6.1. Manjak ekstrudiranja na početku ispisa

Ukoliko je mlaznica preblizu površini podloge za ispis, neće biti dovoljno prostora za izlazak plastike iz mlaznice te dolazi do greške. Otvor na vrhu mlaznice je praktički blokiran, pa plastika ne može izaći i kreirati prvi sloj. Jednostavan način prepoznavanja ovog problema je ako tijekom prvog ili drugog sloja ispisa ne dolazi do ekstrudiranja plastike, ali nakon nekoliko slojeva, kako se podloga nastavlja kretati duž Z-osi, dolazi do ekstrudiranja. U tom slučaju će mlaznica oštetiti podlogu pisača, a rješenje ovog problema može biti i ručno namještanje visine podloge.

Budući da većina 3D pisača koristi male zupčanike za pomicanje filamenata, drugi uzrok manjka ekstrudiranja na početku ispisa može biti potrošenost filameta, odnosno zupčanik se može zaglaviti ukoliko ima previše strugotina, a moguće je i da zupčanik otkida komad plastike pa u tom slučaju zupčanik više ne može pomicati filament, već ga je potrebno ručno sanirati i pomaknuti. Osim toga, moguće je i da filament zapne za neki dio pisača.

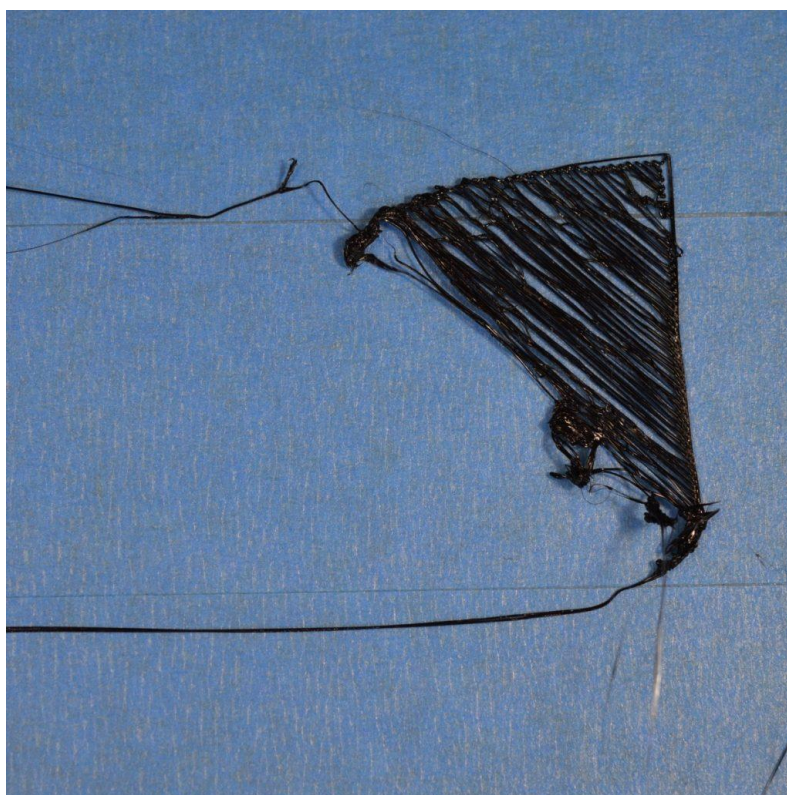


Slika 16. Manjak ekstrudiranja na početku ispisa [22]

Ukoliko nijedan od gore navedenih uzroka nije razlog greške, uzročnik može biti začepljena mlaznica. Začepljenje mlaznice može se dogoditi u slučaju da strani materijali ostanu unutar mlaznice ili ukoliko hlađenje mlaznice nije dovoljno te se plastika počne omekšavati izvan željene zone taljenja. Popravak začepljene mlaznice može zahtijevati rastavljanje ekstruzijske glave 3D pisača. [22]

6.2. Ne-prianjanje prvog sloja na radnu podlogu

Ukoliko ne dolazi do prianjanja prvog sloja materijala na radnu podlogu, postoji mogućnost da radna podloga nije u odgovarajućem položaju te da prvi sloj ispisa nastaje u zrakopraznom prostoru iznad podloge. Ako podloga nije ravna, jedna strana može biti preblizu mlaznici, dok je druga strana predaleko. Postizanje savršenog prvog sloja zahtijeva ravnu i pravilno poravnatu podlogu. Podlogu je moguće prilagoditi putem vijaka na starijim pisačima, dok noviji pisači imaju automatsko poravnanje podloge.



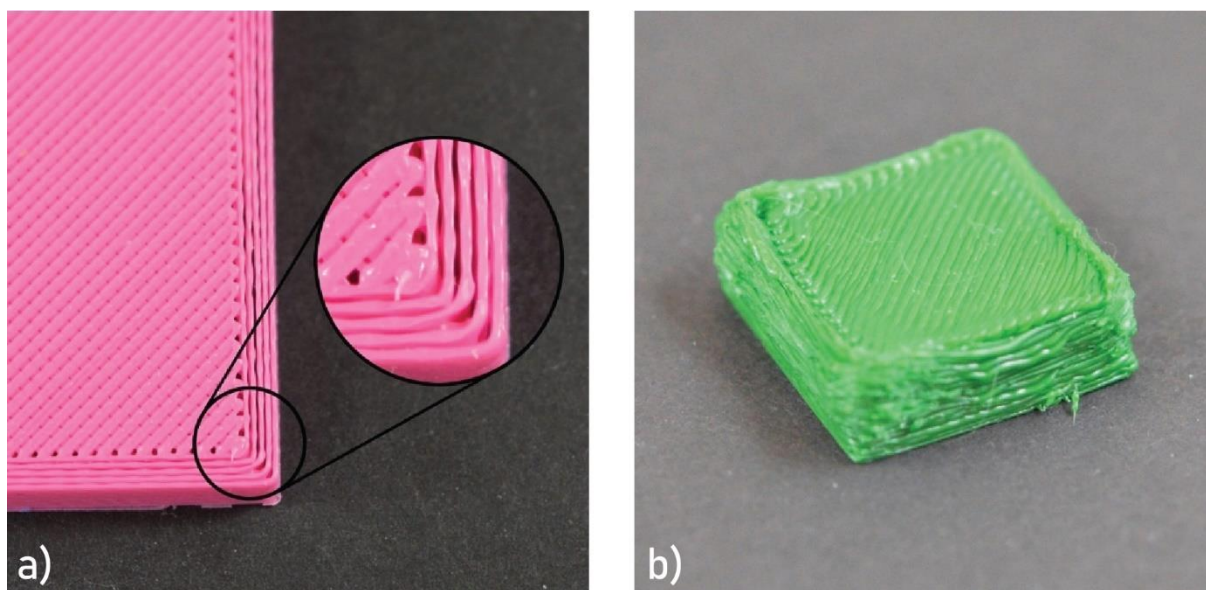
Slika 17. Ne-prianjanje prvog sloja na radnu podlogu [22]

Do navedene greške također može doći ukoliko su brzine ispisa prvog sloja prevelike te materijal ne stigne prionuti na podlogu. Osim brzine, greška se može pojaviti i zbog neodgovarajuće temperature podloge ili prebrzog hlađenja. Budući da su neki materijali osjetljivi na promjenu temperature i imaju povećano skupljanje, potrebno je prilagoditi brzinu, temperaturu mlaznice i podloge ili ugasiti ventilator za hlađenje ekstrudiranog materijala. [22]

6.3. Manjak ili višak ekstrudiranog materijala

Putem programa za pripremu ispisa definiše se količina materijala koja treba biti ekstrudirana u kojem trenutku, a precizna ekstruzija važan je čimbenik u postizanju dobre kvalitete ispisa. Međutim, većina 3D pisača nema način za praćenje koja se količina materijala stvarno ekstrudira te ukoliko postavke ekstrudiranja nisu pravilno konfigurirane u početku, pisač može ekstrudirati više ili manje materijala nego što je predviđeno i u tom slučaju nastaju greške ispisa. Parametri ekstrudiranja mogu biti i korektni, ali je moguće da se radi o začepljenju mlaznice i neadekvatnoj temperaturi mlaznice.

Osim navedenih, uzročnik može biti i pogrešno odabran promjer polaznog materijala ili promjer mlaznice. U praksi se najčešće koriste žice promjera 1,75 mm te mlaznica promjera 0,4 mm, ali ukoliko često dolazi do izmjene navedenih, potrebno je dodatno pripaziti na parametre. [22]

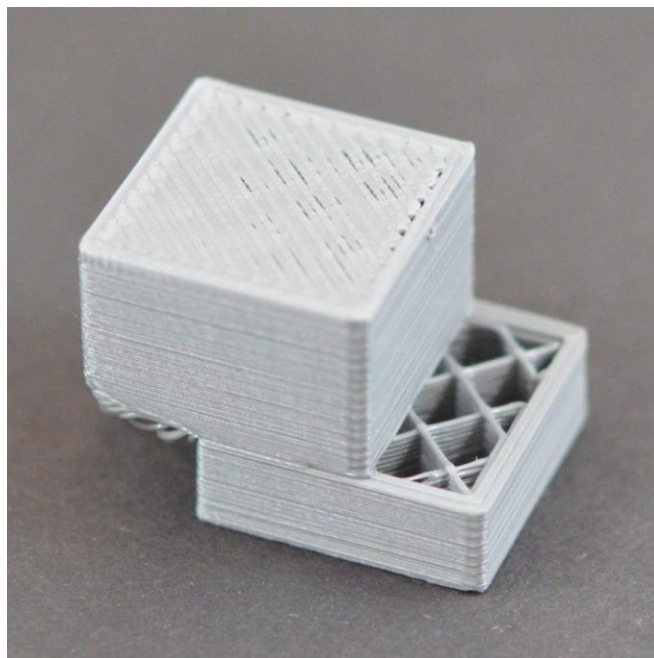


Slika 18. Greške pri ekstrudiranju materijala: a) manjak ekstrudiranja, b) višak ekstrudiranja [22]

6.4. Pomicanje slojeva

Budući da većina pisača koristi sustav upravljanja otvorene petlje, sam pisač nema povratnu informaciju o stvarnoj lokaciji glave pisača ili o nekim drugim parametrima. U tom slučaju, ukoliko je brzinu kretanja glave pisača neprimjerena, može doći do pomicanja cijelog sloja u horizontalnoj ravnini.

Osim neprimjerene brzine, uzrok može biti i udarac u neki predmet ili nešto slično tijekom samog ispisa, iako je to ipak nešto rjeđi slučaj. Jedno od rješenja je korekcija brzine ispisa i definiranje ubrzanja i usporavanja glave pisača. Ukoliko se pomicanje slojeva i dalje javlja nakon smanjenja brzine ispisa, uzrok mogu biti mehanički ili električni problemi s pisačem. [22]



Slika 19. Primjer pomicanja slojeva [22]

Većina 3D pisača koristi remenje koje omogućuje motorima kontrolu pozicije glave pisača i samo kretanje. S vremenom se remen može rastegnuti ili može biti postavljen prečvrsto, u oba slučaja dolazi do pojačanog trenja ili proklizavanja i ne dolazi do korektnog kretanja glave pisača. Osim remena, potrebno je provjeriti i same ležajeve i zatezne vijke. [22]

Jedan od problema može biti i pregrijavanje motora ili nedovoljna količina struje motora. U tom slučaju motori mogu na kratko prestati raditi dok se ne ohlade i na taj način ne ostvare željenu poziciju.

6.5. Šupljine između bridova

Budući da 3D pisači koriste mlaznicu definiranog promjera, može doći do problema prilikom ispisa tanjih stijenki koje su nešto malo veće debljine od promjera mlaznice pa je u tom slučaju potrebno napraviti određene prilagodbe kako ne bi nastala greška.

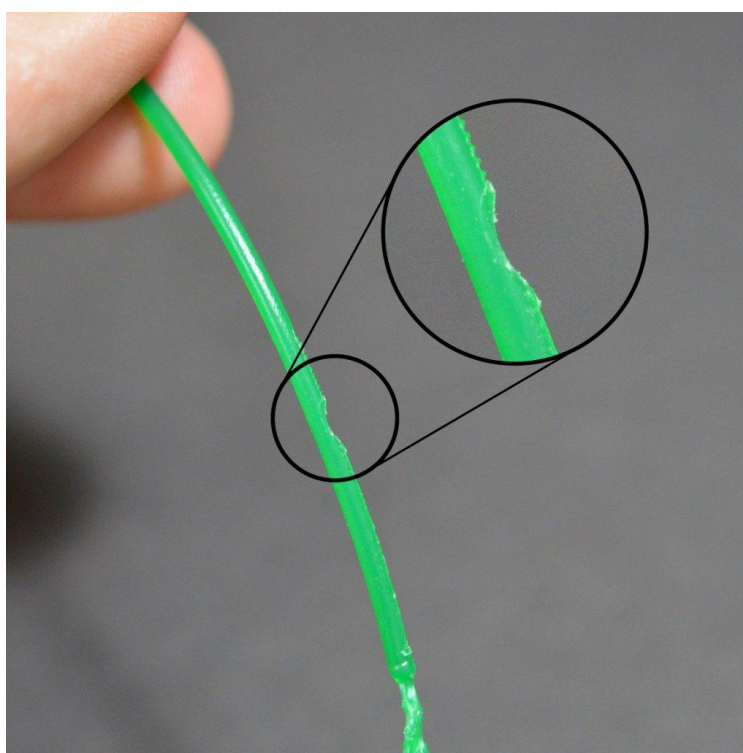
Postoji više opcija za korekciju navedene greške, a jedna od njih je aktiviranje opcije za popunjavanje šupljina između tankih stijenki. U tom slučaju, nakon što nastanu vanjske stijenke, pisac će napraviti dodatni korak i prilagođavajući količinu ekstrudiranog materijala dodatno popuniti tu šupljinu. Druga opcija je da pisac u jednom prolazu ispiše stijenku različite debljine u pojedinom segmentu. Osim navedenih, moguće je i samostalno izmijeniti parametre vezane uz količinu ekstrudiranog materijala, odnosno širinu materijala koju će mlaznica ispisati u jednom prolazu, ali ova opcija je nešto složenija. [22]



Slika 20. Prikaz šupljina između stijenki [22]

6.6. Oštećenje žice (filamenta)

Većina 3D pisača koristi mali pogonski zupčanik za pomicanje žice tijekom ispisa. On zahvaća žicu i lagano ju pritišće kako bi ju pomicao naprijed ili natrag, ovisno o smjeru vrtnje. Ukoliko se žica iz nekog razloga ne može pomicati, a pogonski zupčanik se i dalje okreće, on može otkrhnuti ili izlizati jedan dio žice u toj mjeri da zupci više ne mogu zahvatiti žicu i osigurati daljnje kretanje. Često navedeno nije moguće primijetiti odmah, pogotovo ukoliko pisač nije pod stalnim nadzorom.



Slika 21. Primjer oštećenja žice (filamenta) [22]

Najčešće rješenje za ovaj problem je korigiranje brzine ispisa, u ovom slučaju brzine povlačenja žice koje nastupa tijekom slobodnog hoda glave pisača ili promjene slojeva i slično. Ukoliko brzine kretanja glave pisača i povlačenja žice nisu usklađene, dolazi do naglih pokreta i oštećivanja žice na mjestu prihvata zupčanika.

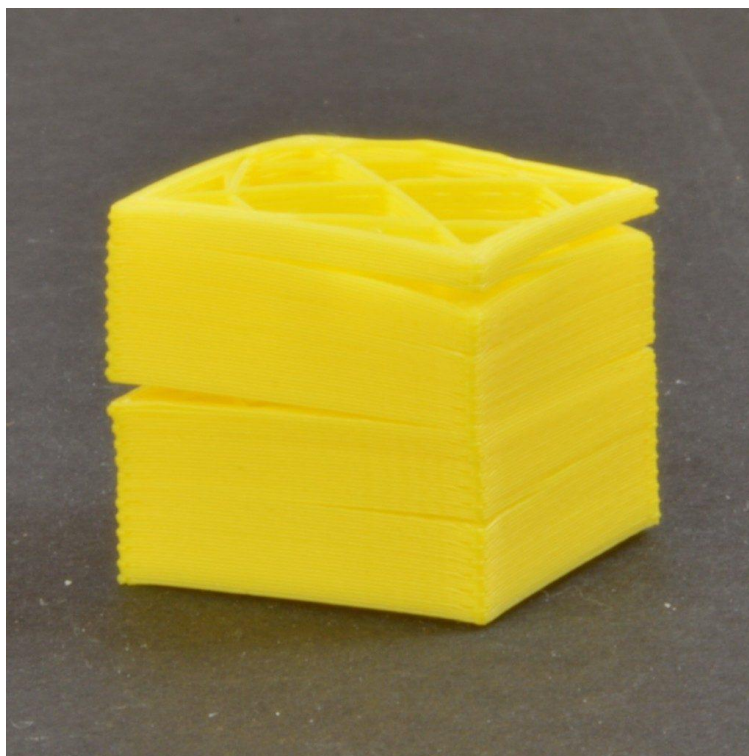
Jedno od rješenja također može biti povećanje temperature mlaznice kako bi žica bila mekša i lakše se kretala od samog prihvata zupčanika do mlaznice. Svakako je preporučljivo provjeriti i radi li se o djelomičnom začepljenju mlaznice koje također može biti uzrok. [22]

6.7. Razdvajanje slojeva

3D ispis se bazira na nastajanju slojeva, a kako bi sam model imao najbolje karakteristike, bitno je osigurati da se slojevi pravilno međusobno povežu s prethodnim i budućim slojem. Ukoliko ne dolazi do pravilnog povezivanja, dolazi do odvajanja i izvrtnja slojeva.

Najčešći uzrok ovog problema je prevelika visina sloja pri ispisu. Potrebno je pripaziti na veličinu mlaznice koja se koristi te se voditi pravilom da visina sloja ni u kojem slučaju ne može biti jednaka ili veća od promjera mlaznice. Upravo suprotno, visina slojeva bi trebala biti manja s nekoliko desetaka posto u odnosu na promjer mlaznice kako bi se uspjela ispisati dovoljna količina materijala. [22]

Drugi mogući uzrok je najčešće preniska temperatura mlaznice. U tom slučaju se ne tali dovoljna količina materijala iako je visina slojeva pravilno odabrana.



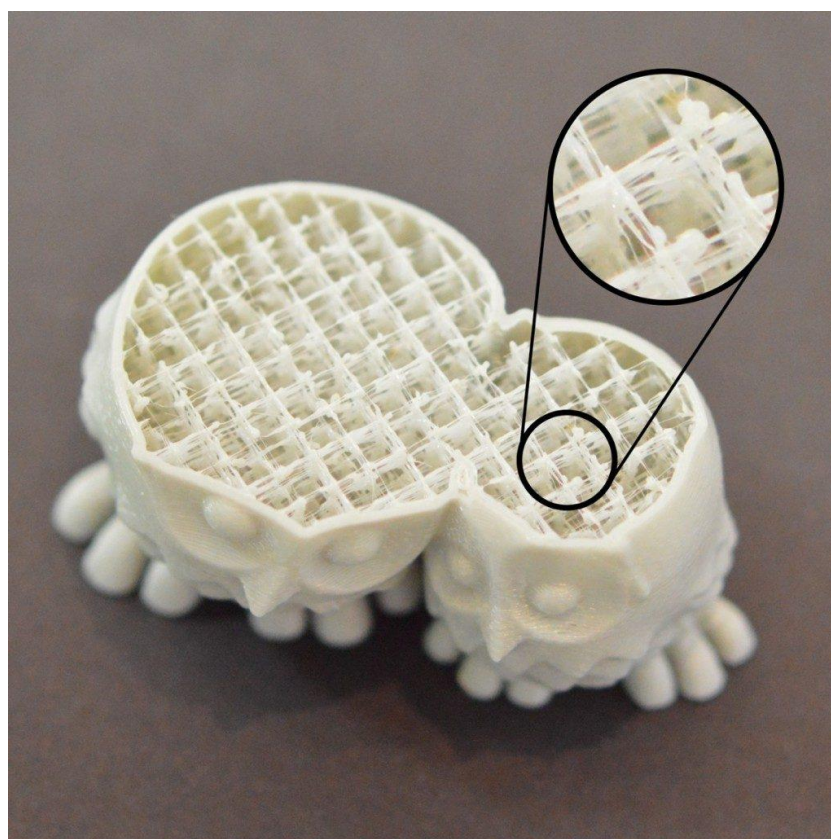
Slika 22. Primjer odvajanja slojeva [22]

6.8. Nepravilna ispuna

Unutarnja ispuna modela ima ključnu ulogu u čvrstoći ispisanog proizvoda, stoga je vrlo bitno da ona bude pravilno ispisana. Ona povezuje vanjske stijenke s unutarnjom strukturom i tako čini cjelinu. Ukoliko ispuna izgleda vlaknasto, odnosno slabo i kao da se nedovoljna količina materijala ispisuje, potrebno je korigirati parametre ispisa.

Uzrok može biti nekompatibilna geometrija modela i ispune, odnosno ukoliko je geometrija modela vrlo složena, moguće je da je potrebno prilagoditi i geometriju ispune kao i gustoću ispune koja direktno utječe na krutost modela.

Osim navedenoga, uzrok ponovno može biti neadekvatna brzina ispisa pa se ne stigne ekstrudirati dovoljna količina materijala. Jedna opcija za rješenje problema može biti i povećanje širine ispisa ispune, odnosno ispuna može biti ispisana u više prolaza kao i vanjske stijenke. [22]

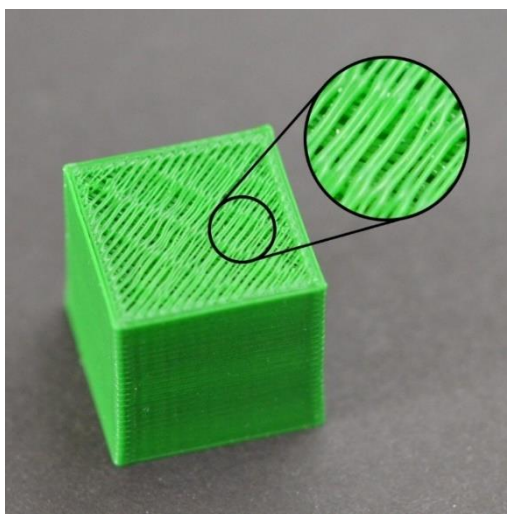


Slika 23. Primjer nepravilne ispune [22]

6.9. Šupljine na gornjoj površini proizvoda

Svrha 3D ispisa kao i svake druge proizvodnje je ostvariti maksimalno kvalitetan proizvod uz minimalni utrošak materijala. To je dodatno izraženo kod 3D ispisa, a ovisi i o samoj namjeni predmeta, ovisno o tome hoće li biti tehnički funkcionalan proizvod ili estetski proizvod. U pogledu uštede materijala često se iz tog razloga postavlja minimalni broj potpuno homogenih slojeva koji se najčešće koriste samo u nekoliko prvih i zadnjih slojeva. Moguća je pojavnost šupljina i u prvim slojevima, ali su uzroci nešto drugačiji, dok je pojava šupljina u gornjim slojevima učestalija i vidljivija. [22]

Prvi uzrok je najčešće nedovoljna količina punih homogenih slojeva na vrhu modela. Budući da završni slojevi nastaju na samoj ispuni, dolazi do deformacija prvih punih slojeva i ukoliko nije dovoljan broj punih slojeva, dolazi do nastanka šupljina i kroz model je praktički vidljiv donji sloj kao i sama ispuna.



Slika 24. Primjer šupljine u gornjim slojevima [22]

Drugi uzrok koji je usko povezan sa prvim je upravo postotak ispune. Ukoliko je postotak ispune mali, zrakoprazan prostor unutar samog modela je vrlo velik. Tijekom ispisa homogenih slojeva, vanjske stijenke su dugačke i često krajevi vanjskih stijenki imaju završetak u zrakopraznom prostoru, odnosno dolazi do nastanka slobodnih stijenki koji se savijaju, a stijenke između 2 oslonca ulegnu, nakon čega mogu nastati šupljine i nepravilnosti. [22]

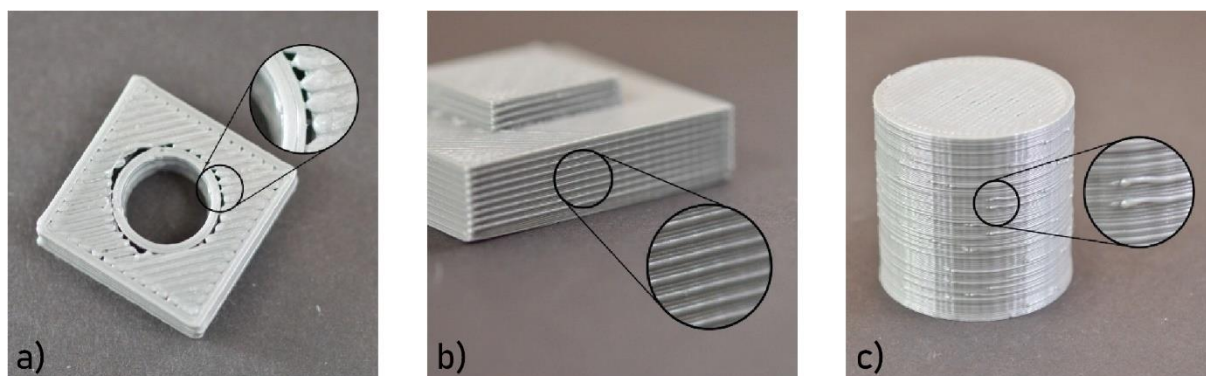
Jedan od uzroka također može biti i neadekvatna temperatura mlaznice koja uz to veže i nedovoljnu količinu ekstrudiranog materijala.

6.10. Ostale greške

Tijekom ispisa je moguća pojavnost niza grešaka, većina grešaka je opisana u sklopu prethodnih poglavlja, a osim njih, moguća je pojavnost zadebljanih slojeva na vanjskim stijenkama, pojava šupljina između vanjskih stijenki i unutarnje ispune, pojava kvržica i drugih grešaka. [22]

Većina grešaka je uzrokovana nepravilno odabranim parametrima 3D ispisa i rijetko se radi o mehaničkim problemima, iako ih ima, pogotovo kod starijih pisača. Upravo zato je bitno pravilno i postepeno razmotriti parametre 3D ispisa te testirati te parametre prije početka stvarne proizvodnje. Određene greške je moguće korigirati tijekom ispisa, ali ih je ponekad teško primijetiti iz razloga što vrijeme ispisa traje i po nekoliko sati, nekada i nekoliko dana, a pisač je tijekom većine tog vremena bez nadzora.

Najveći uzročnici pojave nepravilnosti su neadekvatna temperatura mlaznice i brzina ispisa. Svi ostali problemi su većinom proizašli iz ta dva glavna uzroka. Potrebno je iskustvo, ali i razumijevanje samog procesa u što većoj mjeri kako bi svaki idući ispis bio sve kvalitetniji.



Slika 25. Primjer ostalih grešaka tijekom 3D ispisa:
a) praznina između vanjske konture i unutarnje ispune,
b) pojava zadebljanih slojeva na vanjskim konturama,
c) pojava mjehurića i vlakana [22]

Pojava praznine između vanjske konture i unutarnje ispune najčešće je uzrokovana prevelikom brzinom ispisa, dok do zadebljana sloja na vanjskoj konturi najčešće dolazi zbog varijacija u temperaturi mlaznice ili nepravilnoj ekstruziji.

Pojava mjehurića i vlakana je najčešće uzrokovana za vrijeme kretanja glave pisača, odnosno dok se obavlja izmjena putanje ili promjena visine i slično.

7. ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA 3D ISPISANIH ISPITNIH TIJELA

U okviru eksperimentalnog rada provesti će se ispitivanje utjecaja orijentacije 3D ispisa te oblika i gustoće ispuna na rasteznu čvrstoću i žilavost ispisanih ispitnih tijela.

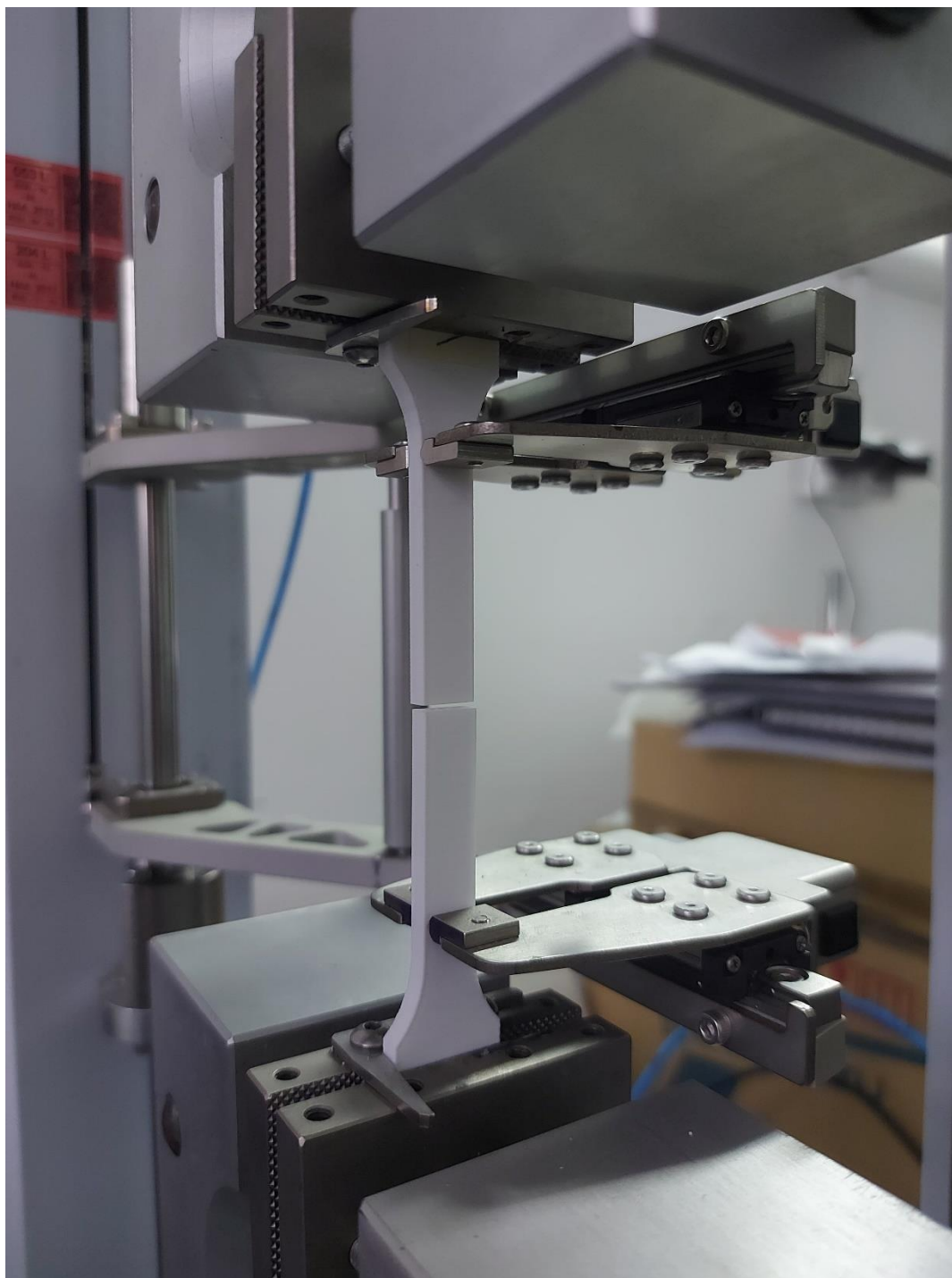
7.1. Ispitivanje rastezних svojstava 3D ispisanih ispitnih tijela

Rastezna ispitivanja provedena su na kidalici Shimadzu AGS-X maksimalne sile ispitivanja 10 kN, prema normi HRN EN ISO 527-2 kako bi se došlo do zaključka o utjecaju orijentacije ispisa, kao i oblika i gustoće ispune na rastezna svojstava ispitnih tijela.



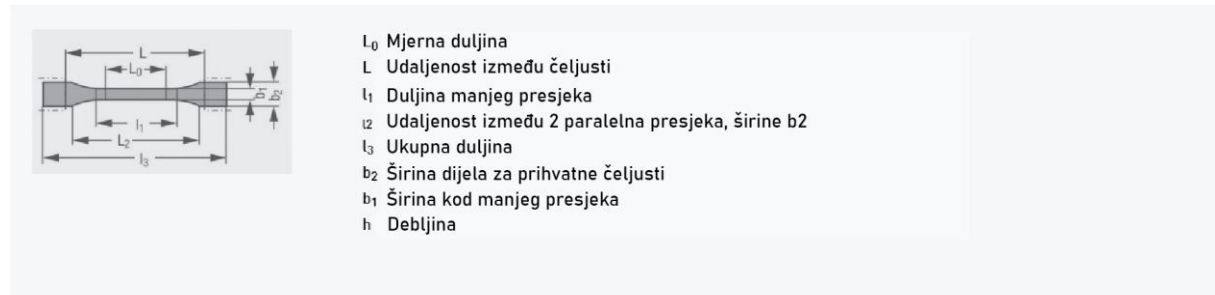
Slika 26. Kidalica Shimadzu AGS-X (10 kN)

Ispitna tijela na kojima se provodi ispitivanje načinjena su FDM tehnologijom ispisa i podijeljeni su u 4 serije. Od toga su 2 serije ispitnih tijela od PLA materijala te 2 serije od PETG materijala. Svaka serija razlikuje se u orijentaciji ispisa, vrsti i gustoći ispune. U procesu ispisa su korišteni šesterokutni, trokutasti, mrežasti i kubični oblici ispune.



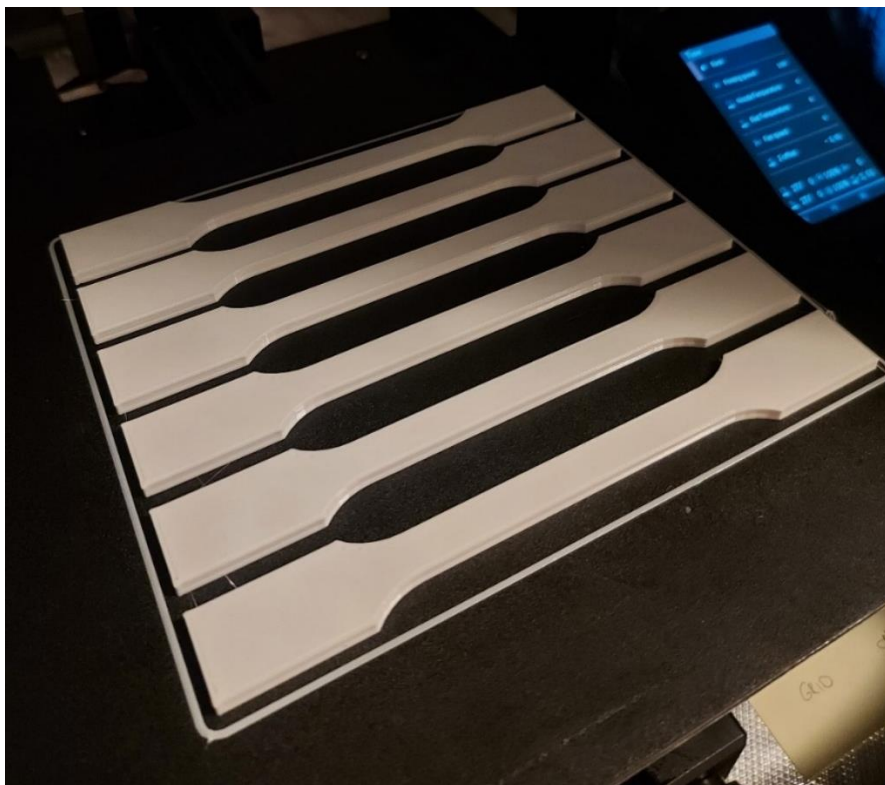
Slika 27. Prikaz puknuća ispitnog tijela nakon ispitivanja

Ispitna tijela ispisana su prema mjerama sa slike propisanim normom HRN EN ISO 527-2 , pri čemu poprečni presjek epruvete iznosi približno 40 mm².



l_3 [mm]	l_1 [mm]	b_2 [mm]	b_1 [mm]	h [mm]	L_0 [mm]	L [mm]
170	80 ± 2	$20 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$	$17 + 0,5$	115 ± 1

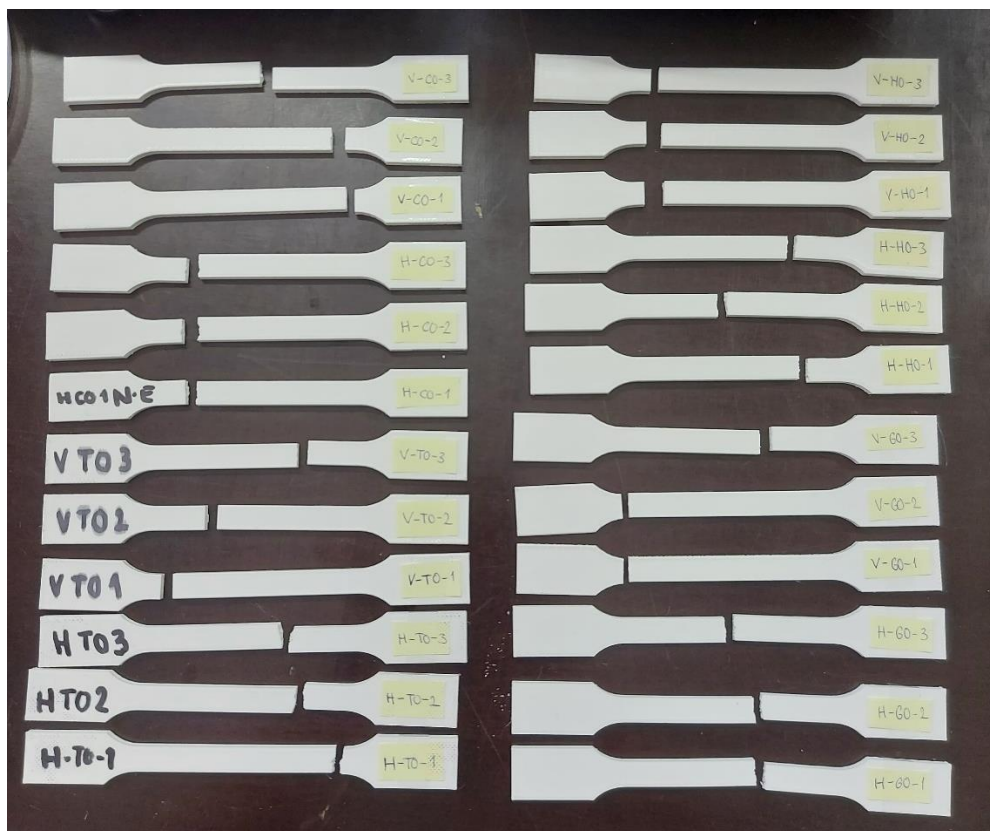
Slika 28. Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rasteznih svojstava [23]



Slika 29. Ispitna tijela nakon 3D ispisa

Tablica 2. Stvarne dimenzije ispitnih tijela

PLA						PETG					
Ispitno tijelo	h [mm]	b ₁ [mm]	S ₀ [mm ²]	$\bar{x}S_0$ [mm ²]	S ₅₀ [mm ²]	Ispitno tijelo	h [mm]	b ₁ [mm]	S ₀ [mm ²]	$\bar{x}S_0$ [mm ²]	S ₅₀ [mm ²]
H-T0-1	3,70	10,15	37,56	37,52	0,18	H-TE-1	3,54	10,19	36,07	35,97	0,27
H-T0-2	3,68	10,24	37,68			H-TE-2	3,55	10,19	36,17		
H-T0-3	3,66	10,20	37,33			H-TE-3	3,49	10,22	35,67		
V-T0-1	4,17	9,96	41,53	41,49	0,38	V-TE-1	4,18	9,97	41,67	41,20	0,94
V-T0-2	4,13	9,95	41,09			V-TE-2	4,16	10,05	41,81		
V-T0-3	4,18	10,01	41,84			V-TE-3	4,00	10,03	40,12		
H-C0-1	3,58	10,15	36,34	36,26	0,09	H-CE-1	3,52	10,17	35,80	35,87	0,15
H-C0-2	3,57	10,16	36,27			H-CE-2	3,52	10,16	35,76		
H-C0-3	3,57	10,13	36,16			H-CE-3	3,53	10,21	36,04		
V-C0-1	4,13	10,10	41,71	42,22	0,46	V-CE-1	3,94	10,14	39,95	40,52	1,12
V-C0-2	4,15	10,20	42,33			V-CE-2	4,12	10,15	41,82		
V-C0-3	4,19	10,17	42,61			V-CE-3	4,00	9,95	39,80		
H-G0-1	3,68	10,15	37,35	37,12	0,37	H-GE-1	3,54	10,16	35,97	36,05	0,14
H-G0-2	3,64	10,08	36,69			H-GE-2	3,53	10,19	35,97		
H-G0-3	3,67	10,17	37,32			H-GE-3	3,54	10,23	36,21		
V-G0-1	4,15	10,12	42,00	41,58	0,36	V-GE-1	3,97	9,94	39,46	39,58	0,30
V-G0-2	4,12	10,05	41,41			V-GE-2	3,96	10,08	39,92		
V-G0-3	4,13	10,01	41,34			V-GE-3	3,96	9,94	39,36		
H-H0-1	3,58	10,17	36,41	36,64	0,22	H-HE-1	3,54	10,25	36,29	36,22	0,10
H-H0-2	3,61	10,15	36,64			H-HE-2	3,55	10,22	36,28		
H-H0-3	3,61	10,21	36,86			H-HE-3	3,54	10,20	36,11		
V-H0-1	4,03	10,02	40,38	40,64	0,91	V-HE-1	4,20	10,01	42,04	41,76	0,26
V-H0-2	4,14	10,06	41,65			V-HE-2	4,19	9,96	41,73		
V-H0-3	4,00	9,97	39,88			V-HE-3	4,16	9,98	41,52		



Slika 30. Ispitna tijela (PLA) nakon ispitivanja

7.2. Ispitivanje žilavosti 3D ispisanih ispitnih tijela

Ispitivanja žilavosti provedena su na Charpy batu prema normi HRN EN ISO 197-1 kako bi se došlo do zaključka o utjecaju orijentacije ispisa, kao i oblika i gustoće ispune na savojnu žilavost. Za ispitivanje žilavosti korišten je bat oznake 20 kpcm i provedeno je ispitivanje na 80 ispitnih tijela.

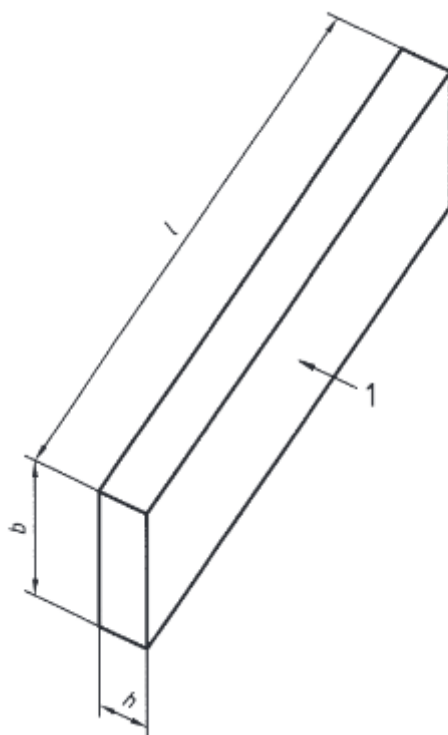


Slika 31. Uređaj marke Frank za ispitivanje žilavosti



Slika 32. Prikaz korištenog bata i položaj ispitnog tijela

Za ispitivanje žilavosti korištena su ispitna tijela bez zarezova prema normi HRN EN ISO 197-1.



Slika 33. Ispitno tijelo za ispitivanje žilavosti [24]

Tablica 3. Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje žilavosti [24]

Tip ispitnog tijela	Duljina [mm] l	Širina [mm] b	Debljina [mm] h
1	80 ± 2	$10,0 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$

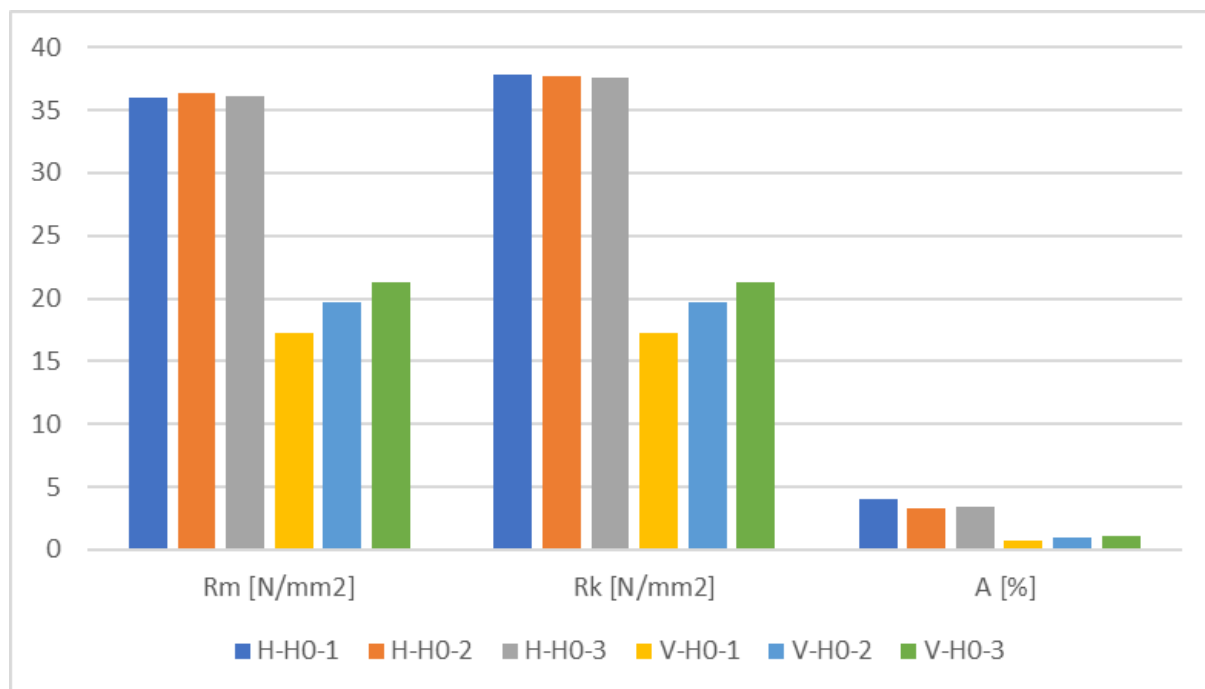
Korišteni su identični parametri ispisa ispitnih tijela za ispitivanje žilavosti kao i za ispitna tijela za ispitivanje rasteznih svojstava.

7.3. Rezultati ispitivanja rasteznih svojstava

7.3.1. Rezultati ispitivanja PLA ispitnih tijela

Tablica 4. Rezultati ispitivanja PLA serije sa šesterokutnim oblikom ispune

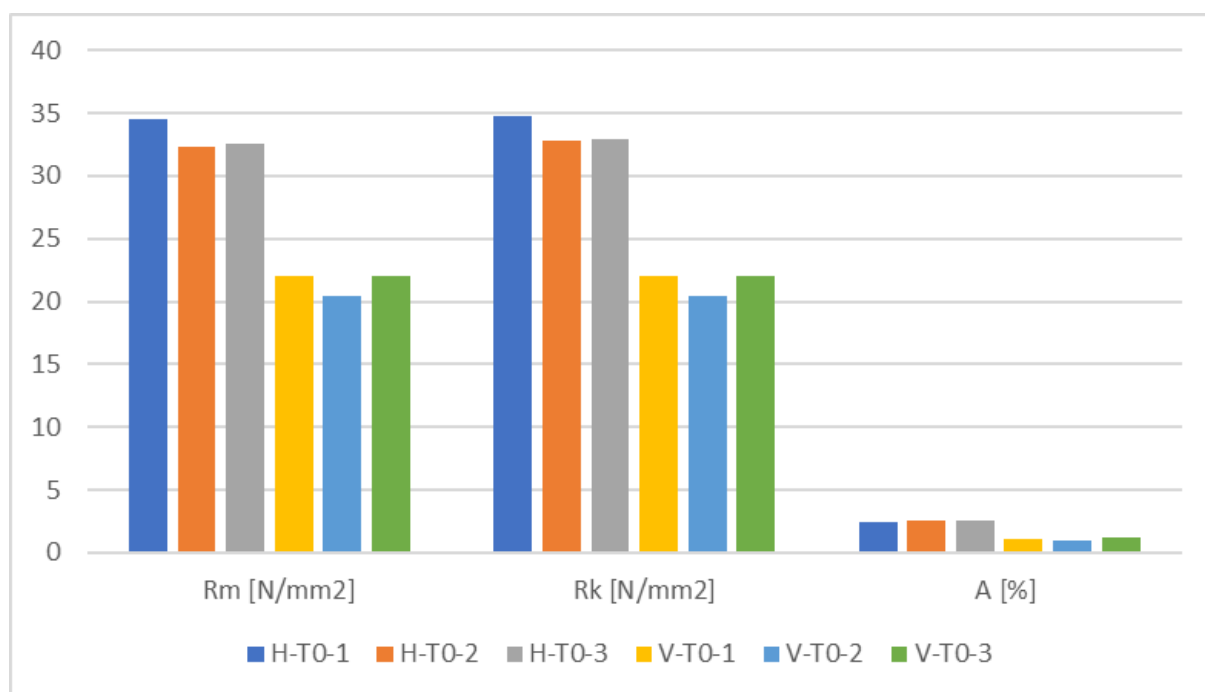
Oblik ispune - šesterokutni									
Orijentacija ispisa - horizontalna									
Ispitno tijelo	R_m [N/mm ²]	R_k [N/mm ²]	A [%]	Standardna devijacija			Aritmetička sredina		
				s_{R_m} [N/mm ²]	s_{R_k} [N/mm ²]	s_A [%]	$\bar{x}R_m$ [N/mm ²]	$\bar{x}R_k$ [N/mm ²]	$\bar{x}A$ [%]
H-H0-1	36,00	37,85	3,98	0,21	0,16	0,37	36,15	37,69	3,56
H-H0-2	36,40	37,68	3,29						
H-H0-3	36,06	37,53	3,41						
Orijentacija ispisa - vertikalna									
V-H0-1	17,20	17,20	0,76	2,04	2,04	0,13	19,39	19,39	0,91
V-H0-2	19,74	19,74	0,95						
V-H0-3	21,23	21,23	1,02						



Graf 2. Usporedba rezultata ispitivanja PLA serije sa šesterokutnim oblikom ispune

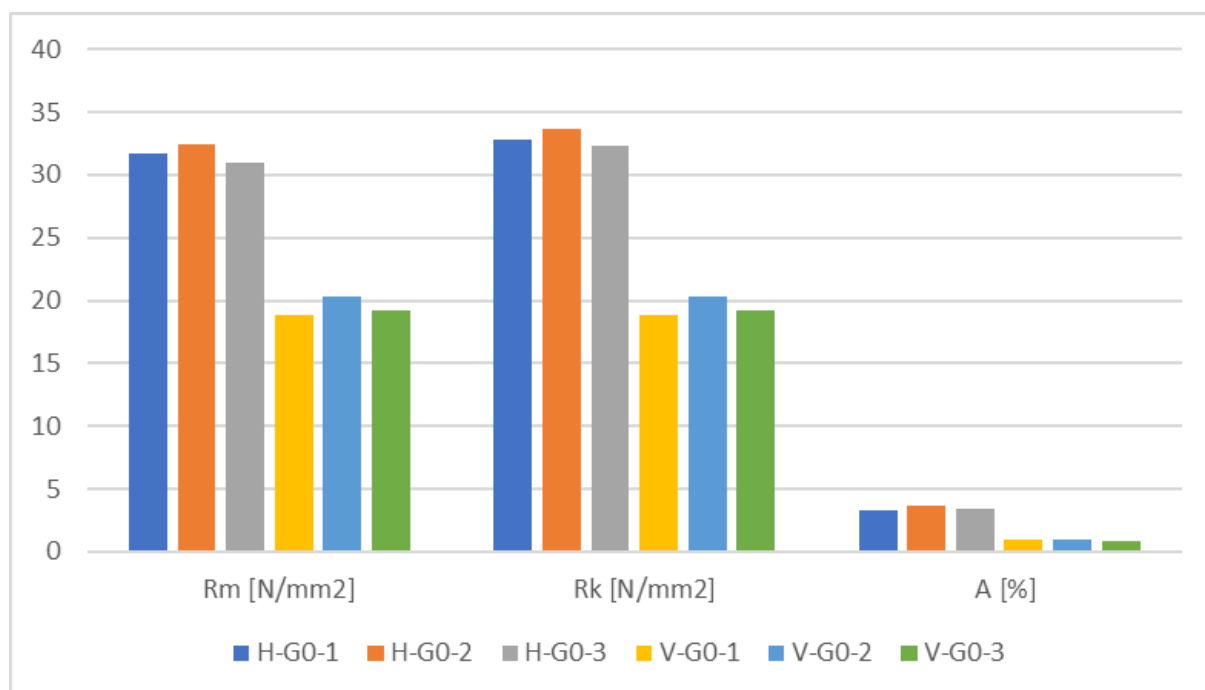
Tablica 5. Rezultati ispitivanja PLA serije s trokutastim oblikom ispune

Oblik ispune - trokutasti									
Orijentacija ispisa - horizontalna									
Ispitno tijelo	R_m [N/mm ²]	R_k [N/mm ²]	A [%]	Standardna devijacija			Aritmetička sredina		
				s_{Rm} [N/mm ²]	s_{Rk} [N/mm ²]	s_A [%]	$\bar{x}R_m$ [N/mm ²]	$\bar{x}R_k$ [N/mm ²]	$\bar{x}A$ [%]
H-T0-1	34,49	34,77	2,41	1,20	1,07	0,09	33,11	33,54	2,51
H-T0-2	32,31	32,86	2,57						
H-T0-3	32,53	32,98	2,56						
Orijentacija ispisa - vertikalna									
V-T0-1	21,97	21,97	1,08	0,89	0,89	0,07	21,50	21,50	1,08
V-T0-2	20,47	20,47	1,00						
V-T0-3	22,04	22,04	1,15						

**Graf 3.** Usporedba rezultata ispitivanja PLA serije s trokutastim oblikom ispune

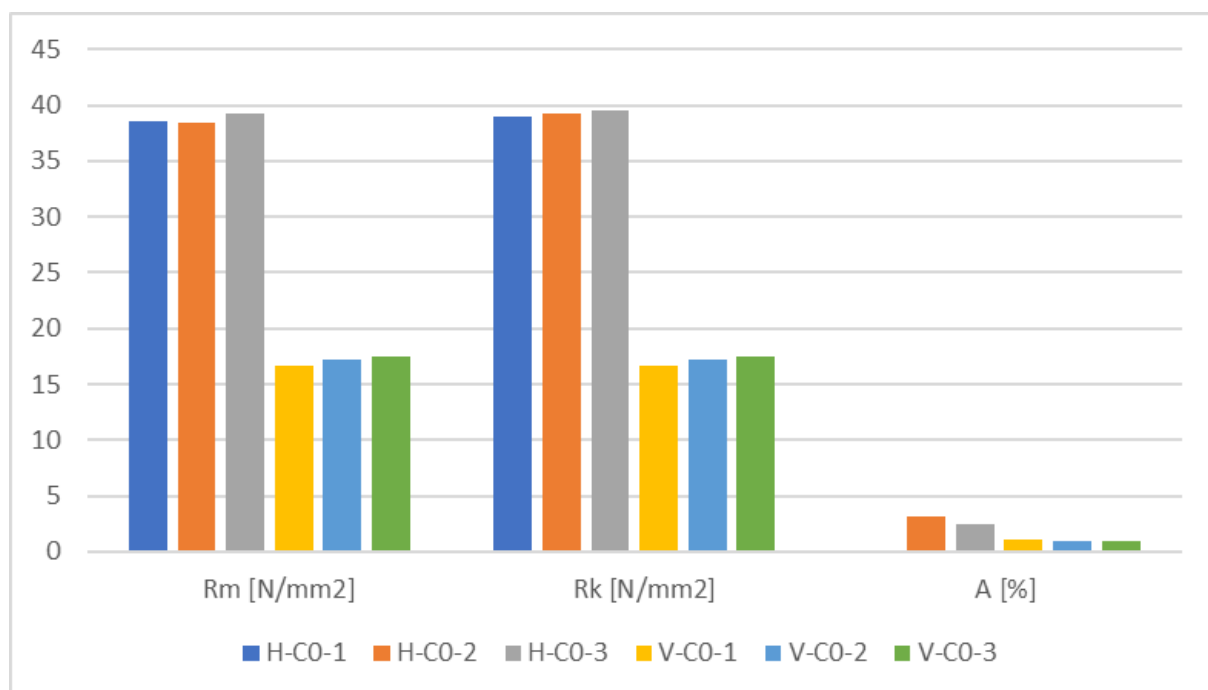
Tablica 6. Rezultati ispitivanja PLA serije s mrežastim oblikom ispune

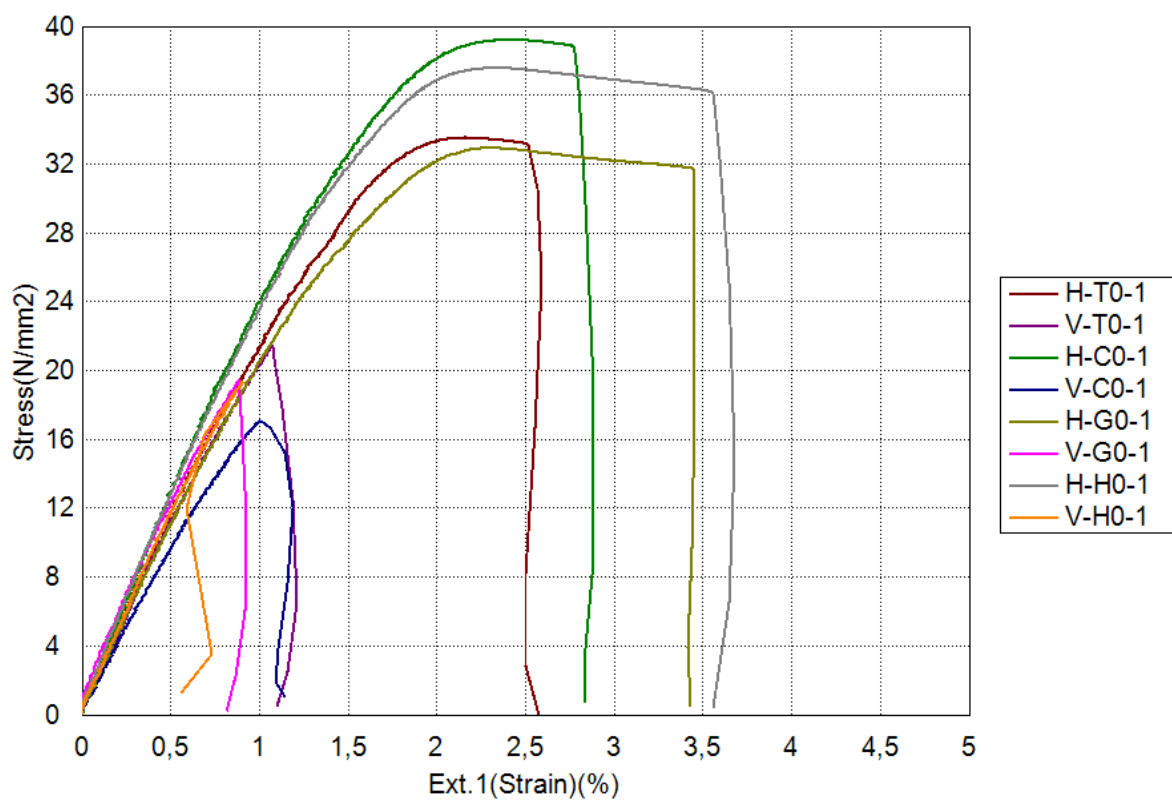
Oblik ispune - mrežasti									
Orijentacija ispisa - horizontalna									
Ispitno tijelo	R_m [N/mm ²]	R_k [N/mm ²]	A [%]	Standardna devijacija			Aritmetička sredina		
				s_{R_m} [N/mm ²]	s_{R_k} [N/mm ²]	s_A [%]	$\bar{x}R_m$ [N/mm ²]	$\bar{x}R_k$ [N/mm ²]	$\bar{x}A$ [%]
H-G0-1	31,66	32,78	3,32	0,70	0,74	0,15	31,70	32,92	3,45
H-G0-2	32,42	33,72	3,61						
H-G0-3	31,02	32,26	3,40						
Orijentacija ispisa - vertikalna									
V-G0-1	18,82	18,82	0,91	0,81	0,81	0,04	19,46	19,46	0,89
V-G0-2	20,37	20,37	0,92						
V-G0-3	19,20	19,20	0,84						

**Graf 4.** Usporedba rezultata ispitivanja PLA serije s mrežastim oblikom ispune

Tablica 7. Rezultati ispitivanja PLA serije s kubičnim oblikom ispune

Oblik ispune - kubični									
Orijentacija ispisa - horizontalna									
Ispitno tijelo	R_m [N/mm ²]	R_k [N/mm ²]	A [%]	Standardna devijacija			Aritmetička sredina		
				s_{R_m} [N/mm ²]	s_{R_k} [N/mm ²]	s_A [%]	$\bar{x}R_m$ [N/mm ²]	$\bar{x}R_k$ [N/mm ²]	$\bar{x}A$ [%]
H-C0-1	38,61	38,93	0,01	0,44	0,28	1,63	38,75	39,23	1,85
H-C0-2	38,40	39,29	3,11						
H-C0-3	39,24	39,47	2,44						
Orijentacija ispisa - vertikalna									
V-C0-1	16,59	16,59	1,03	0,43	0,43	0,02	17,08	17,08	1,01
V-C0-2	17,23	17,23	0,99						
V-C0-3	17,42	17,42	1,00						

**Graf 5.** Usporedba rezultata ispitivanja PLA serije s kubičnim oblikom ispune

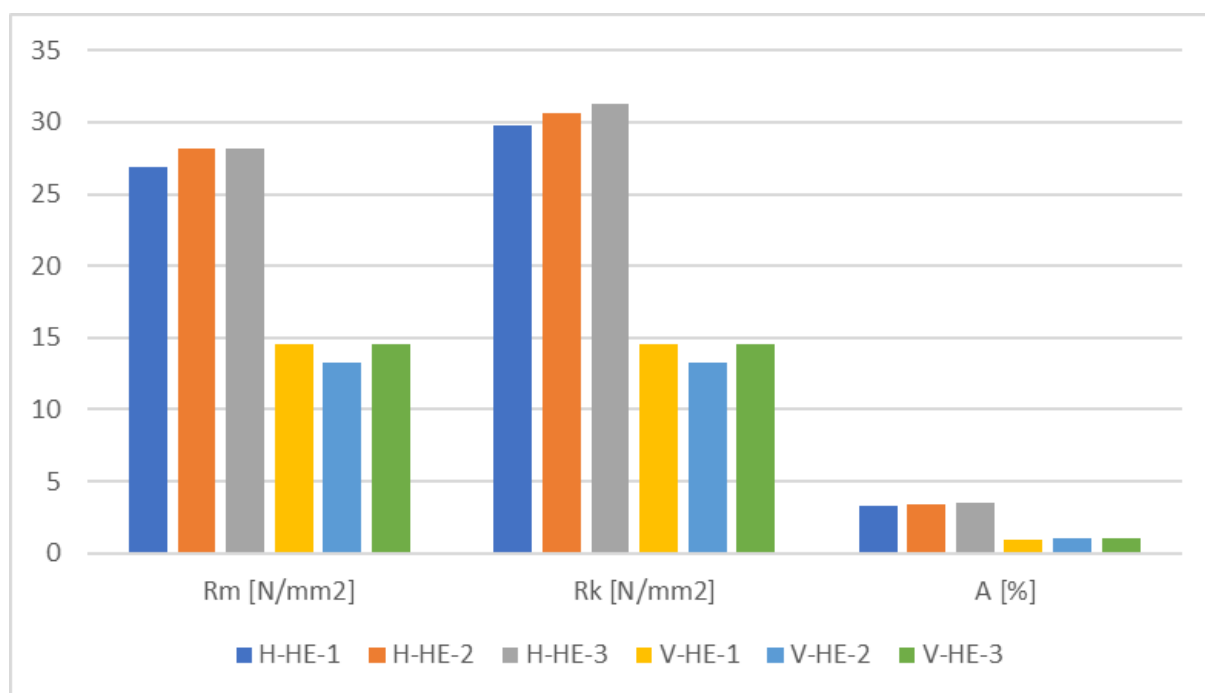


Slika 34. Dijagram rastezno naprezanje – istežanje za PLA (krivulje srednjih vrijednosti)

7.3.2. Rezultati ispitivanja PETG ispitnih tijela

Tablica 8. Rezultati ispitivanja PETG serije sa šesterokutnim oblikom ispune

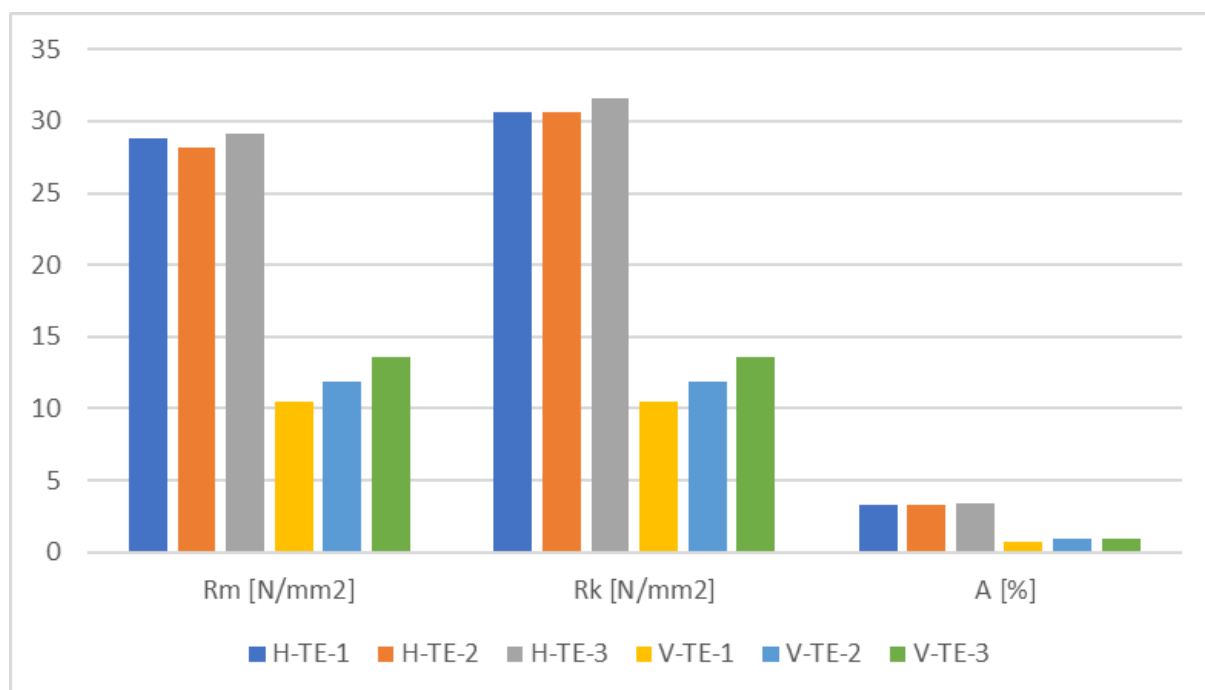
Oblik ispune - šesterokutni									
Orijentacija ispisa - horizontalna									
Ispitno tijelo	R_m [N/mm ²]	R_k [N/mm ²]	A [%]	Standardna devijacija			Aritmetička sredina		
				s_{R_m} [N/mm ²]	s_{R_k} [N/mm ²]	s_A [%]	$\bar{x}R_m$ [N/mm ²]	$\bar{x}R_k$ [N/mm ²]	$\bar{x}A$ [%]
H-HE-1	26,87	29,81	3,32	0,76	0,72	0,10	27,75	30,55	3,42
H-HE-2	28,19	30,60	3,43						
H-HE-3	28,19	31,24	3,52						
Orijentacija ispisa - vertikalna									
V-HE-1	14,53	14,53	0,98	0,73	0,73	0,05	14,13	14,13	1,02
V-HE-2	13,28	13,28	1,01						
V-HE-3	14,57	14,57	1,07						



Graf 6. Usporedba rezultata ispitivanja PETG serije sa šesterokutnim oblikom ispune

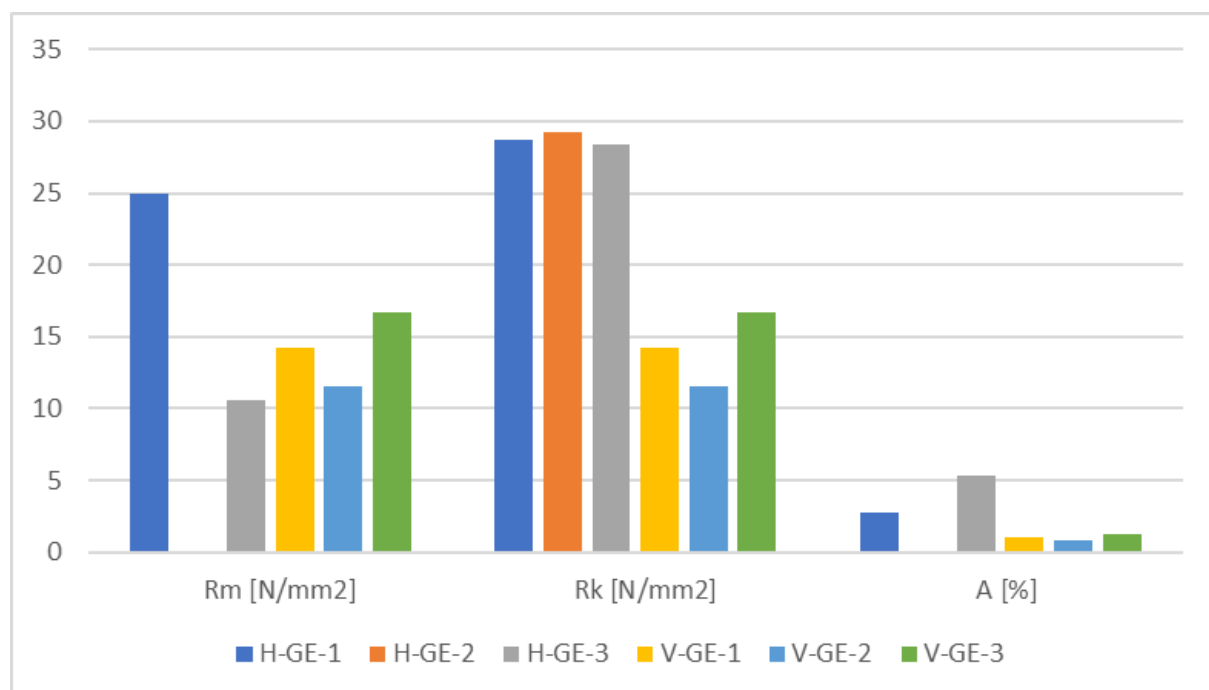
Tablica 9. Rezultati ispitivanja PETG serije s trokutastim oblikom ispune

Oblik ispune - trokutasti									
Orijentacija ispisa - horizontalna									
Ispitno tijelo	R_m [N/mm ²]	R_k [N/mm ²]	A [%]	Standardna devijacija			Aritmetička sredina		
				s_{R_m} [N/mm ²]	s_{R_k} [N/mm ²]	s_A [%]	\bar{x}_{R_m} [N/mm ²]	\bar{x}_{R_k} [N/mm ²]	\bar{x}_A [%]
H-TE-1	28,80	30,65	3,33	0,48	0,55	0,06	28,68	30,97	3,36
H-TE-2	28,14	30,65	3,32						
H-TE-3	29,09	31,61	3,43						
Orijentacija ispisa - vertikalna									
V-TE-1	10,50	10,50	0,75	1,54	1,54	0,11	11,99	11,99	0,88
V-TE-2	11,88	11,88	0,92						
V-TE-3	13,58	13,58	0,97						

**Graf 7.** Usporedba rezultata ispitivanja PETG serije s trokutastim oblikom ispune

Tablica 10. Rezultati ispitivanja PETG serije s mrežastim oblikom ispune

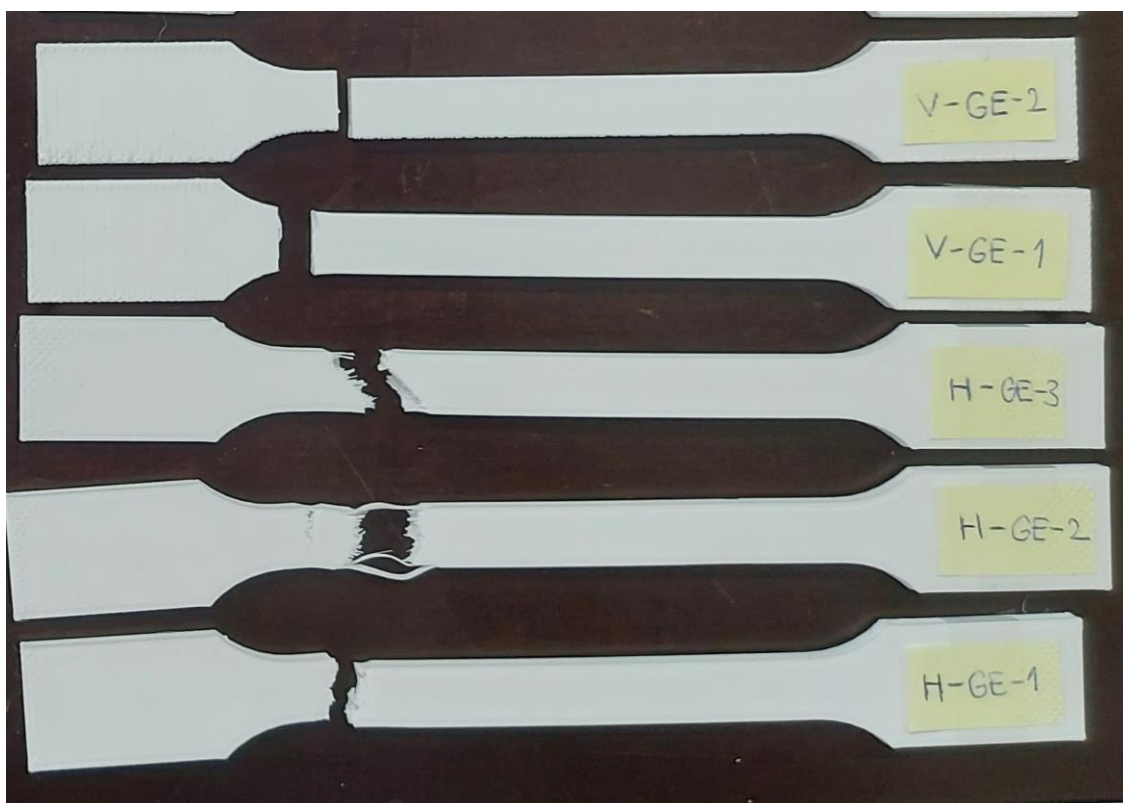
Oblik ispune - mrežasti									
Orijentacija ispisa - horizontalna									
Ispitno tijelo	R_m [N/mm ²]	R_k [N/mm ²]	A [%]	Standardna devijacija			Aritmetička sredina		
				s_{R_m} [N/mm ²]	s_{R_k} [N/mm ²]	s_A [%]	\bar{x}_{R_m} [N/mm ²]	\bar{x}_{R_k} [N/mm ²]	\bar{x}_A [%]
H-GE-1	24,93	28,73	2,79	10,16	0,44	1,79	17,75	28,77	4,06
H-GE-2	-	29,23	-						
H-GE-3	10,57	28,35	5,33						
Orijentacija ispisa - vertikalna									
V-GE-1	14,20	14,20	1,08	2,58	2,58	0,20	14,13	14,13	1,06
V-GE-2	11,52	11,52	0,85						
V-GE-3	16,68	16,68	1,25						

**Graf 8.** Usporedba rezultata ispitivanja PETG serije s mrežastim oblikom ispune

Tijekom ovog ispitivanja došlo je do greške, odnosno ispitno tijelo H-GE-2 nije puklo po presjeku te nije dobivena vrijednosti istežljivosti i prekidne čvrstoće, a kod ispitnog tijela H-GE-3 također nije odmah nastupilo pucanje po presjeku pa je istežljivost nešto veća. Bilo bi potrebno ponoviti ispitivanje sa još više ispitnih tijela kako bi se dobili reprezentativni rezultati.



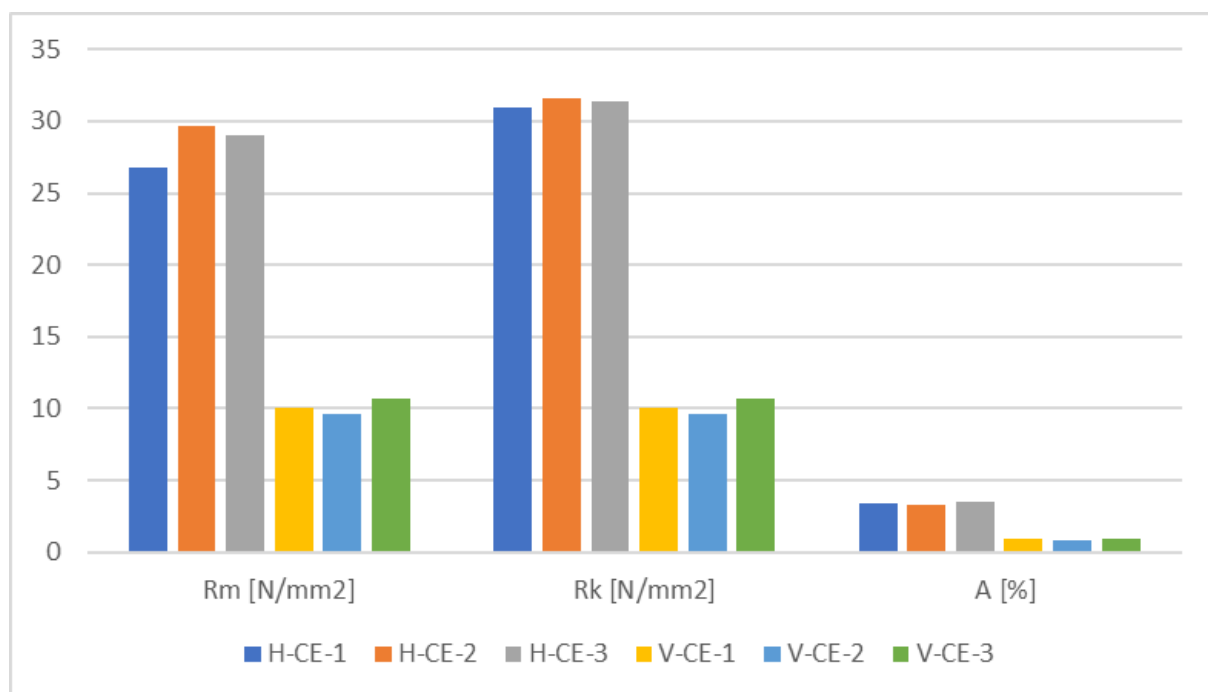
Slika 35. Primjer neispravnog pucanja ispitnog tijela

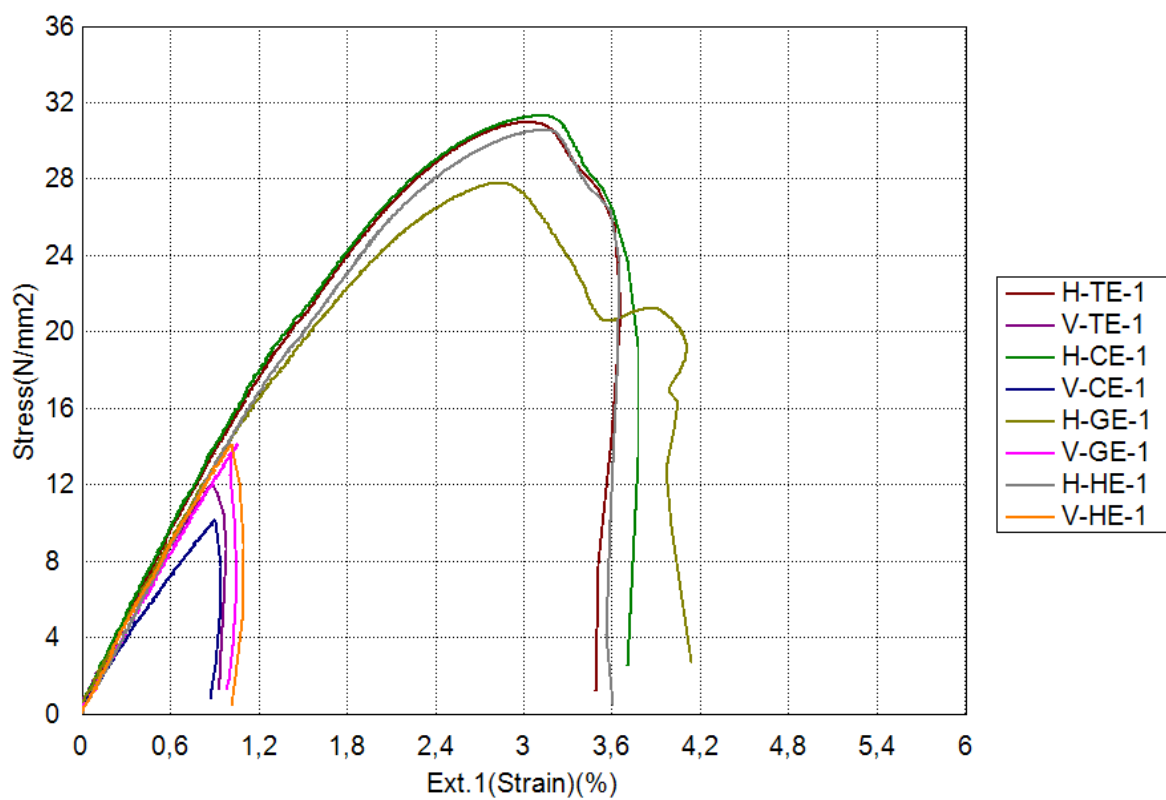


Slika 36. Primjer ispitnih epruveta kod kojih nije došlo do pucanja na odgovarajućem mjestu

Tablica 11. Rezultati ispitivanja PETG serije s kubičnim oblikom ispune

Oblik ispune - kubični									
Orijentacija ispisa - horizontalna									
Ispitno tijelo	R_m [N/mm ²]	R_k [N/mm ²]	A [%]	Standardna devijacija			Aritmetička sredina		
				s_{R_m} [N/mm ²]	s_{R_k} [N/mm ²]	s_A [%]	$\bar{x}R_m$ [N/mm ²]	$\bar{x}R_k$ [N/mm ²]	$\bar{x}A$ [%]
H-CE-1	26,81	30,97	3,41	1,48	0,33	0,11	28,49	31,31	3,43
H-CE-2	29,63	31,63	3,33						
H-CE-3	29,02	31,34	3,54						
Orijentacija ispisa - vertikalna									
V-CE-1	10,06	10,06	0,91	0,53	0,53	0,07	10,15	10,15	0,91
V-CE-2	9,67	9,67	0,84						
V-CE-3	10,72	10,72	0,99						

**Graf 9.** Usporedba rezultata ispitivanja PETG serije s kubičnim oblikom ispune



Slika 37. Dijagram rasteznog naprezanja – istezanja PETG (krivulje srednjih vrijednosti)

7.4. Rezultati ispitivanja žilavosti

Pri udaru bata, ispitno tijelo je rastezno napregnuto, a na uređaju se očitava energija loma (E_C) u mjernoj jedinici $kpcm$, koja se preračunava u J . Zatim se žilavost računa pomoću jednadžbe 1.2.

$$E_C(J) = kpcm / 10 \quad 1.1$$

$$a_{CN} = \frac{E_C(J)}{h \cdot b} \cdot 1000 \left(\frac{kJ}{mm^2} \right) \quad 1.2$$



Slika 38. Slika ispitnog tijela (PETG) prije provedenog ispitivanja žilavosti

7.4.1. Rezultati ispitivanja PLA ispitnih tijela

Tablica 12. Rezultati ispitivanja PLA ispitnih tijela

Dimenzije		Materijal	Ispitno tijelo	S_0 [mm ²]	kcpm	E_c [J]	a_{CN} [kJ/mm ²]	$\bar{x}S_0$ [mm ²]	S_{S0} [mm ²]	$\bar{x}a_{CN}$ [kJ/mm ²]	S_{aCN} [kJ/mm ²]
b	h										
10,12	3,78	PLA	H-C0-N1	38,25	0,00	0,00	0,00	38,12	0,31	11,82	1,13
10,05	3,75		H-C0-N2	37,69	6,20	0,62	16,45				
10,08	3,79		H-C0-N3	38,20	5,50	0,55	14,40				
10,10	3,76		H-C0-N4	37,98	5,30	0,53	13,96				
10,13	3,80		H-C0-N5	38,49	5,50	0,55	14,29				
10,07	4,20		V-C0-N1	42,29	1,40	0,14	3,31	41,95	0,82	3,35	0,92
10,13	4,16		V-C0-N2	42,14	1,10	0,11	2,61				
10,10	4,01		V-C0-N3	40,50	2,00	0,20	4,94				
10,09	4,21		V-C0-N4	42,48	1,30	0,13	3,06				
10,08	4,20		V-C0-N5	42,34	1,20	0,12	2,83				
10,14	3,59		H-G0-N1	36,40	3,90	0,39	10,71	36,71	0,41	12,69	1,48
10,10	3,65		H-G0-N2	36,87	4,60	0,46	12,48				
10,11	3,63		H-G0-N3	36,70	4,40	0,44	11,99				
10,14	3,68		H-G0-N4	37,32	5,40	0,54	14,47				
10,13	3,58		H-G0-N5	36,27	5,00	0,50	13,79				
10,05	4,08		V-G0-N1	41,00	1,70	0,17	4,15	41,38	0,53	4,44	0,97
10,05	4,06		V-G0-N2	40,80	1,70	0,17	4,17				
10,20	4,06		V-G0-N3	41,41	1,30	0,13	3,14				
10,24	4,12		V-G0-N4	42,19	2,40	0,24	5,69				
10,14	4,09		V-G0-N5	41,47	2,10	0,21	5,06				
10,23	3,66		H-H0-N1	37,44	4,20	0,42	11,22	37,64	0,13	10,94	1,09
10,19	3,70		H-H0-N2	37,70	4,00	0,40	10,61				
10,27	3,67		H-H0-N3	37,69	3,80	0,38	10,08				
10,13	3,71		H-H0-N4	37,58	3,80	0,38	10,11				
10,27	3,68		H-H0-N5	37,79	4,80	0,48	12,70				
10,06	4,15		V-H0-N1	41,75	1,20	0,12	2,87	41,65	0,53	3,42	1,52
10,04	4,06		V-H0-N2	40,76	2,50	0,25	6,13				
10,01	4,16		V-H0-N3	41,64	1,20	0,12	2,88				
10,03	4,18		V-H0-N4	41,93	1,10	0,11	2,62				
10,06	4,19		V-H0-N5	42,15	1,10	0,11	2,61				
10,11	3,63		H-T0-N1	36,70	5,10	0,51	13,90	37,05	0,24	12,37	1,15
10,14	3,66		H-T0-N2	37,11	4,60	0,46	12,39				
10,17	3,65		H-T0-N3	37,12	4,30	0,43	11,58				
10,18	3,67		H-T0-N4	37,36	4,10	0,41	10,97				
10,15	3,64		H-T0-N5	36,95	4,80	0,48	12,99				
10,18	4,22		V-T0-N1	42,96	2,10	0,21	4,89	42,22	0,53	4,27	1,32
10,04	4,24		V-T0-N2	42,57	1,30	0,13	3,05				
10,06	4,17		V-T0-N3	41,95	1,20	0,12	2,86				
10,13	4,11		V-T0-N4	41,63	2,50	0,25	6,00				
10,02	4,19		V-T0-N5	41,98	1,90	0,19	4,53				

Prilikom ispitivanja prvog uzorka, skala na Charpyevom batu nije bila korektno postavljena pa iz tog razloga nije zabilježen rezultata. Osim navedene greške, drugih grešaka tijekom ispitivanja PLA ispitnih tijela nije bilo. Nije bilo značajno većih rezultata tijekom ispitivanja PLA materijala pa su svi uzeti u obzir za izračun srednje vrijednosti i standardne devijacije.

7.4.1. Rezultati ispitivanja PETG ispitnih tijela

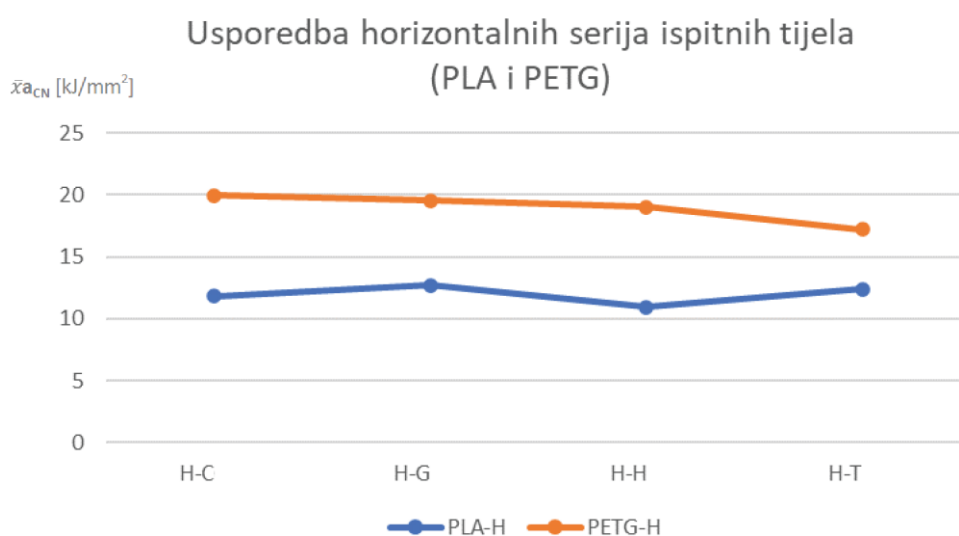
Tablica 13. Rezultati ispitivanja PETG ispitnih tijela

Dimenzije		Materijal	Ispitno tijelo	S_0 [mm ²]	kcpm	E_c [J]	a_{CN} [kJ/mm ²]	$\bar{x}S_0$ [mm ²]	S_{S0} [mm ²]	$\bar{x}a_{CN}$ [kJ/mm ²]	S_{aCN} [kJ/mm ²]
b	h										
10,27	3,65	PETG	H-CE-N1	37,49	7,60	0,76	20,27	37,77	0,29	19,97	1,63
10,28	3,70		H-CE-N2	38,04	6,80	0,68	17,88				
10,24	3,67		H-CE-N3	37,58	7,70	0,77	20,49				
10,25	3,72		H-CE-N4	38,13	6,60	0,66	17,31				
10,28	3,66		H-CE-N5	37,62	9,00	0,90	23,92				
10,13	4,00		V-CE-N1	40,52	0,30	0,03	0,74	41,55	1,18	1,73	0,59
10,12	4,15		V-CE-N2	42,00	0,80	0,08	1,90				
10,10	3,98		V-CE-N3	40,20	0,90	0,09	2,24				
10,09	4,16		V-CE-N4	41,97	0,70	0,07	1,67				
10,18	4,23		V-CE-N5	43,06	0,90	0,09	2,09				
10,27	3,55		H-GE-N1	36,46	5,60	0,56	15,36	36,50	0,25	19,56	1,17
10,28	3,59		H-GE-N2	36,91	7,70	0,77	20,86				
10,33	3,52		H-GE-N3	36,36	7,80	0,78	21,45				
10,26	3,56		H-GE-N4	36,53	6,90	0,69	18,89				
10,33	3,51		H-GE-N5	36,26	7,70	0,77	21,24				
10,04	4,08		V-GE-N1	40,96	1,70	0,17	4,15	41,19	0,36	3,01	0,83
10,18	4,00		V-GE-N2	40,72	1,00	0,10	2,46				
10,17	4,05		V-GE-N3	41,19	0,90	0,09	2,19				
10,22	4,06		V-GE-N4	41,49	1,50	0,15	3,62				
10,12	4,11		V-GE-N5	41,59	1,10	0,11	2,64				
10,28	3,60		H-HE-N1	37,01	7,80	0,78	21,08	37,27	0,22	19,00	1,13
10,34	3,59		H-HE-N2	37,12	7,40	0,74	19,94				
10,29	3,65		H-HE-N3	37,56	6,90	0,69	18,37				
10,32	3,61		H-HE-N4	37,26	7,20	0,72	19,33				
10,34	3,62		H-HE-N5	37,43	6,10	0,61	16,30				
10,02	4,07		V-HE-N1	40,78	0,70	0,07	1,72	41,16	0,70	1,84	0,41
10,03	4,14		V-HE-N2	41,52	0,90	0,09	2,17				
10,16	4,00		V-HE-N3	40,64	0,60	0,06	1,48				
10,10	4,18		V-HE-N4	42,22	1,00	0,10	2,37				
10,11	4,02		V-HE-N5	40,64	0,60	0,06	1,48				
10,29	3,58		H-TE-N1	36,84	3,60	0,36	9,77	36,83	0,26	17,21	1,02
10,27	3,57		H-TE-N2	36,66	6,60	0,66	18,00				
10,34	3,60		H-TE-N3	37,22	7,50	0,75	20,15				
10,21	3,58		H-TE-N4	36,55	7,20	0,72	19,70				
10,33	3,57		H-TE-N5	36,88	6,80	0,68	18,44				
10,04	4,19		V-TE-N1	42,07	0,60	0,06	1,43	41,91	0,23	2,86	1,03
10,10	4,18		V-TE-N2	42,22	1,60	0,16	3,79				
10,11	4,14		V-TE-N3	41,86	0,90	0,09	2,15				
10,16	4,10		V-TE-N4	41,66	1,50	0,15	3,60				
10,08	4,14		V-TE-N5	41,73	1,40	0,14	3,35				

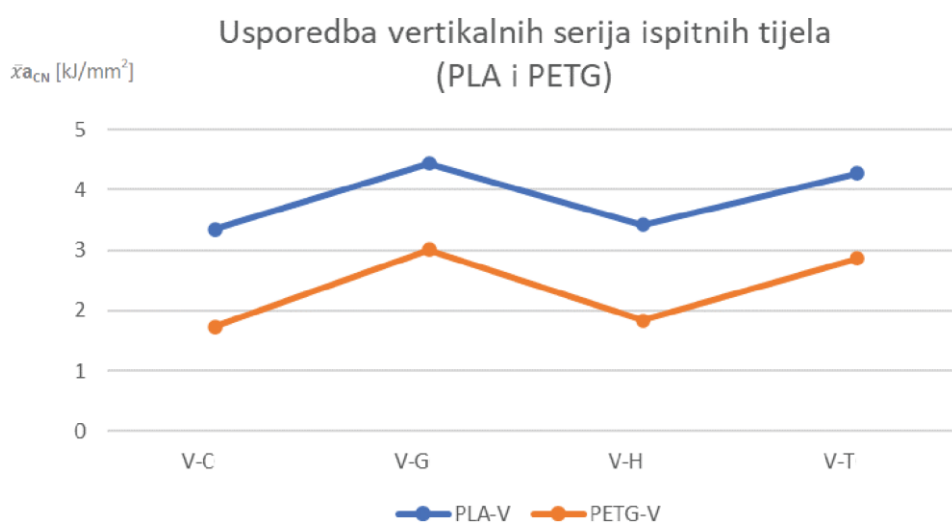
Prilikom ispitivanja, došlo je pojave određenih rezultata koji su značajno veći ili manje od ostalih, a budući da je ispitivanje provedeno na pet ispitnih tijela, ti rezultati su izuzeti iz srednje vrijednosti rezultata serije kao i standardne devijacije.

7.5. Usporedba rezultata ispitivanja žilavosti ispitnih tijela

Kao što je i očekivano, rezultati vertikalno ispisanih ispitnih tijela imaju značajno niže vrijednosti žilavosti od horizontalno ispisanih ispitnih tijela. Osim navedenoga, provedenim ispitivanjem došlo se do činjenice da ispitna tijela horizontalne orijentacije ispisa od PETG materijala ostvaruju značajno bolje rezultate od ispitnih tijela od PLA iste orijentacije, dok kod vertikalne orijentacije ispisa PLA ostvaruje bolje rezultate. U oba slučaja su rezultati gotovo dvostruko bolji.



Graf 10. Usporedba žilavosti horizontalno ispisanih serija ispitnih tijela

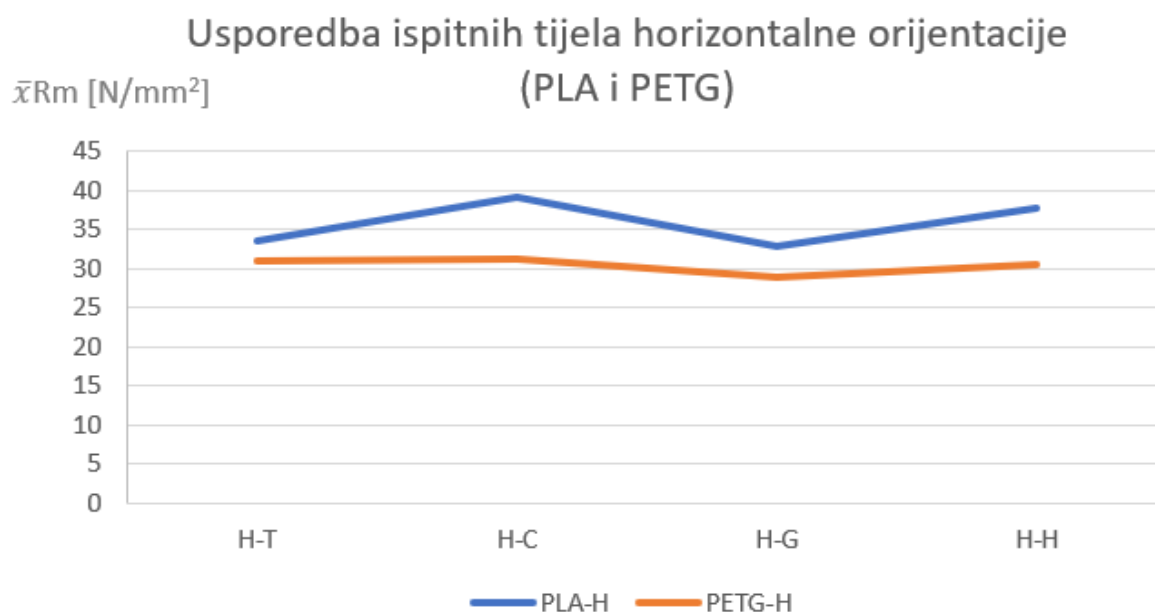


Graf 11. Usporedba žilavosti vertikalno ispisanih serija ispitnih tijela

Mrežaste i trokutaste unutarnje ispune su se pokazale kao najbolje u pogledu žilavosti kod vertikalno ispisanih ispitnih uzoraka dok su kubična i šesterokutna nešto lošije. Kod ispitivanja horizontalno ispisanih ispitnih tijela, svi su oblici ispune ostvarili podjednake rezultate.

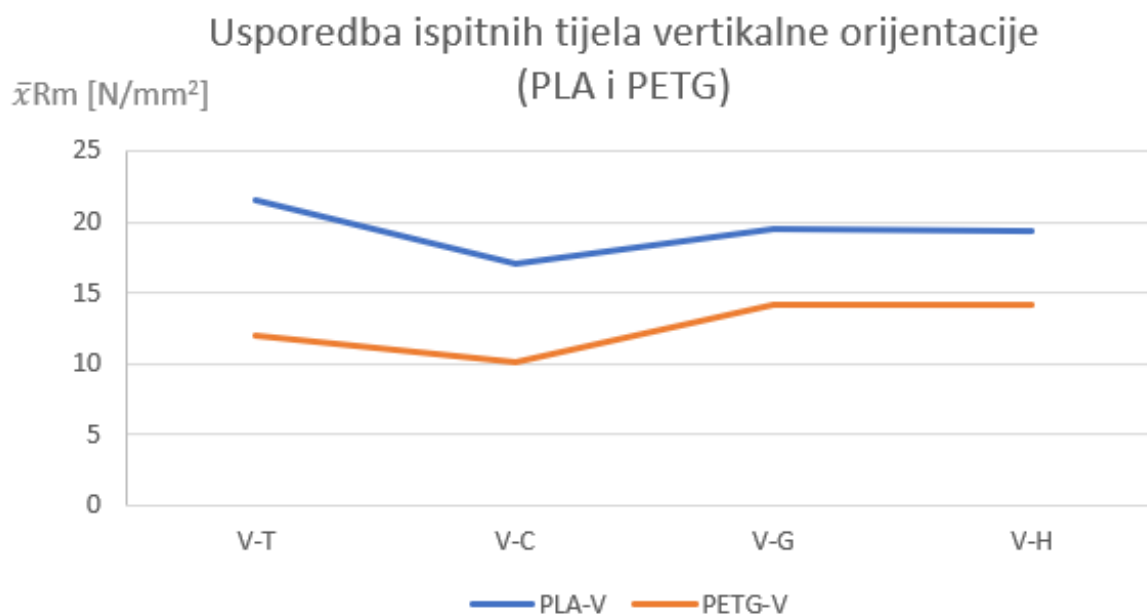
7.6. Usporedba rezultata ispitivanja rasteznih svojstava

Rastezna čvrstoća kod ispitivanja horizontalno ispisanih ispitnih tijela se razlikuje od prekidne čvrstoće, nešto je viša, ovisno o vrsti ispune i o materijalu, dok je kod vertikalno ispisanih ispitnih tijela rastezna čvrstoća jednaka prekidnoj čvrstoći. Može se zaključiti da vertikalna orijentacija ispisa nije pogodna za proizvode koji će biti pod rasteznim opterećenjem.



Graf 12. Usporedba rastezne čvrstoće ispitnih uzoraka horizontalne orijentacije (PLA i PETG)

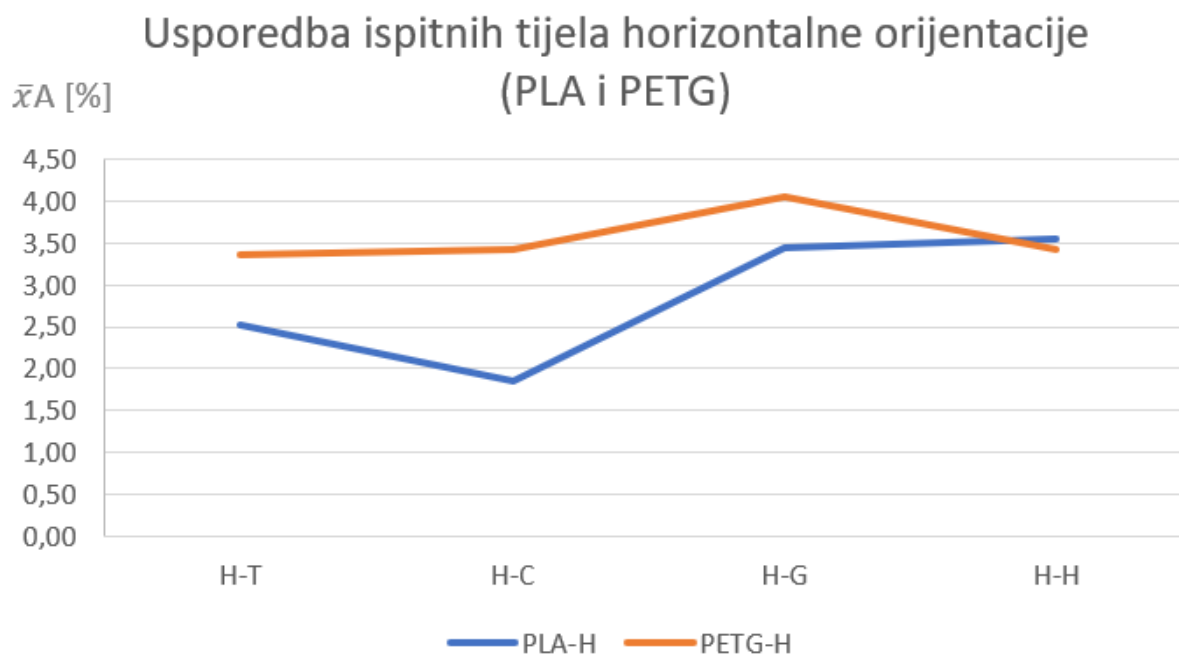
Kubični i šesterokutni oblik ispune ostvaruju nešto veće vrijednosti rastezne čvrstoće, pogotovo kod PLA ispitnih tijela, dok kod PETG ispitnih tijela nema toliko značajne razlike u ovisnosti o obliku ispune.



Graf 13. Usporedba rastezne čvrstoće ispitnih uzoraka vertikalne orijentacije (PLA i PETG)

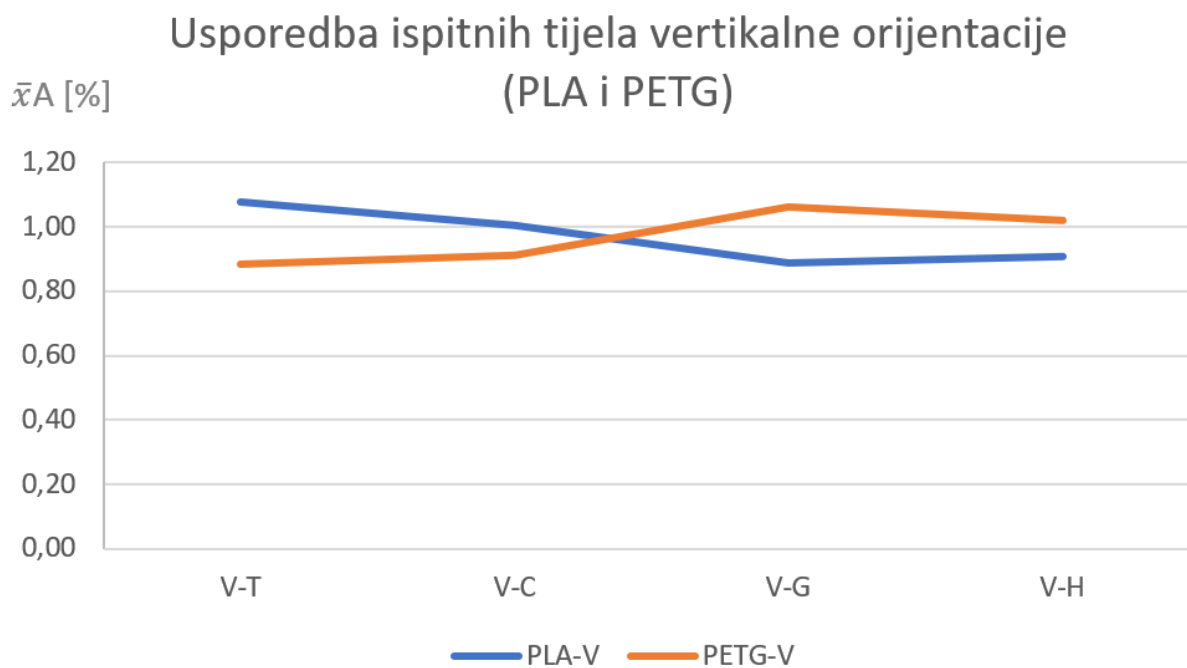
U slučaju ispitnih tijela vertikalno ispisanih, PLA materijal opet ostvaruje znatno bolje rezultate rastezne čvrstoće u odnosu na PETG materijal, a utjecaj oblika ispune kod oba materijala je gotovo identičan. Rastezna čvrstoća kod vertikalno ispisanih ispitnih tijela jednaka je prekidnoj čvrstoći.

Kod PLA ispitnih tijela se istaknuo trokutasti oblik ispune dok se kod PETG materijala ističu mrežasti i šesterokutni oblik ispune. Oni su ostvarili nešto bolje rezultate u odnosu na druge oblike ispuna.



Graf 14. Usporedba istezljivosti ispitnih tijela horizontalne orijentacije

Uvidom u grafove, vidljivo je da PETG materijal ostvaruje bolju istezljivost od PLA materijala kod ispitnih tijela horizontalne orijentacije ispisa. U ovom slučaju bi bilo potrebno dodatno provesti ispitivanje na još ispitnih tijela budući da je kod mrežaste ispune došlo do nepravilnog pucanja ispitnog tijela tijekom samog ispitivanja pa su vrijednosti nešto više od očekivanog. Vidljiva je značajna razlika u iznosu istezljivosti kod PLA materijala u ovisnosti o obliku ispune. Mrežasti i šesterokutni oblik ispune ostvaruju puno veću istezljivost u odnosu na trokutasti i kubični oblik ispune.



Graf 15. Usporedba istežljivosti ispitnih tijela vertikalne orijentacije

Kod ispitnih tijela vertikalne orijentacije ispisa, istežljivost je vrlo slična kod oba materijala. Postoji mala razlika u istežljivosti u ovisnosti o vrsti ispune i ima suprotan utjecaj kod oba materijala. Ostali rezultati ispitivanja dostupni su u prilogu 1. i 2. na kraju rada.

8. ZAKLJUČAK

Što se tiče rezultata ispitivanja, kao što je bilo i očekivano, horizontalna orijentacija ispisa je značajno pogodnija orijentacija za dijelove koji imaju tehnički funkcionalnu ulogu. Osim boljih rasteznih svojstava i bolje žilavosti, sam ispis u horizontalnoj orijentaciji je u velikoj većini slučajeva znatno brži.

Osim same orijentacije, PLA materijal se pokazao kao bolji materijal u pogledu rasteznih svojstava. Prema rezultatima i grafova iz prethodnih poglavlja, jasno je da podnosi veća opterećenja uz manje istezanje od PETG materijala. Što se tiče žilavosti, PETG materijal je pokazao znatno bolje ponašanje uz gotovo dvostruko veću otpornost prema udarnom opterećenju. Ispitivanja su bila eksperimentalna i trebalo bi se dodatno provesti šire istraživanje uz veći broj ispitnih tijela kako bi se dobili konkretniji podaci. Osim navedenoga, potrebno je uzeti u obzir i činjenicu da je unutarnja ispuna modela pri ispitivanju bila 50% te u analizi nije uzet u obzir utjecaj gustoće ispune na promatrana mehanička svojstva ispitnih tijela..

Oblici ispuna modela imaju različite utjecaje na rezultate. U sklopu ispitivanja žilavosti, mrežasti i trokutasti oblik ispune prednjače u najvećoj otpornosti na udarna opterećenja, dok kod ispitivanja rasteznih svojstva, u pogledu istezljivosti gotovo svi oblici ispune daju slične rezultate.

Aditivna proizvodnja će vjerojatno postati još prisutnija u svijetu proizvodnje jer nudi brojne prednosti u odnosu na tradicionalne metode proizvodnje budući da smanjuje potrebu za velikim količinama materijala, čime doprinosi uštedi resursa i energije. S razvojem novih materijala i naprednih tehnologija, aditivna proizvodnja je već sada prisutna u industrijama poput automobilske, zrakoplovne, medicine i elektronike, ali i drugim, a vjerujem da će postati još prisutnija u postojećim, ali i nekim novim industrijama.

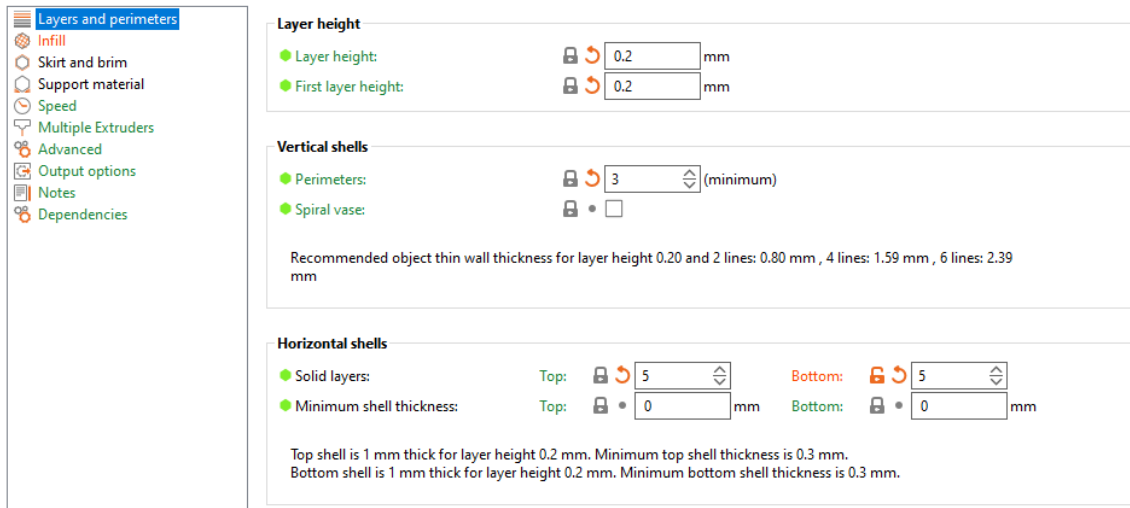
LITERATURA

- [1] <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/3/1213>, pristuljeno 12.09.
- [2] <https://prototaluk.com/blog/history-of-additive-manufacturing/>, pristuljeno 12.09.
- [3] <https://reprap.org/wiki/RepRap>, pristuljeno 12.09.
- [4] <https://www.makebot.com/stories/history-of-3d-printing/>, pristuljeno 12.09.
- [5] <https://www.3dprintaj.com/fdm-fff-tehnologija-3d-printanja/>, pristuljeno 12.09.
- [6] <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>, pristuljeno 14.09.
- [7] <https://www.creality.com/pages/about-us>, pristuljeno 14.09.
- [8] <https://protosfera.hr/stereolitografija-sla-precizna-tehnologija-3d-printanja/>, pristupljeno 07.10.
- [9] <https://www.forcyst.com/stereolithography?lang=hr>, pristuljeno 07.10.
- [10] <https://www.raise3d.com/blog/what-is-dlp-3d-printing/>, pristuljeno 08.10.
- [11] <https://www.jsadditive.com/hr/news/what-is-the-3d-printing-process-selective-laser-sintering-sls/>, pristuljeno 08.10.
- [12] <https://formlabs.com/eu/blog/what-is-selective-laser-sintering/>, pristuljeno 09.10.
- [13] <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>, pristupljeno 16.10.
- [14] <https://www.3ds.com/make/guide/process/binder-jetting>, pristuljeno 16.10.
- [15] <https://www.additivemanufacturing.media/kc/what-is-additive-manufacturing/am-materials>, pristuljeno 14.09.
- [16] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-pla#HowisitMade>, pristuljeno 16.09.
- [17] <https://repositorij.fkit.unizg.hr/islandora/object/fkit%3A1699/datastream/PDF/view>, pristuljeno 05.11.
- [18] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-petg#Properties>, pristuljeno 16.09.
- [19] <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/create-3d-file/what-is-an-stl-file/>, pristupljeno 09.11.
- [20] <https://blog.zaxe.com/picking-a-3d-printer-nozzle-things-to-consider/>, pristupljeno 17.11.
- [21] https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns_177130, pristupljeno 17.11.

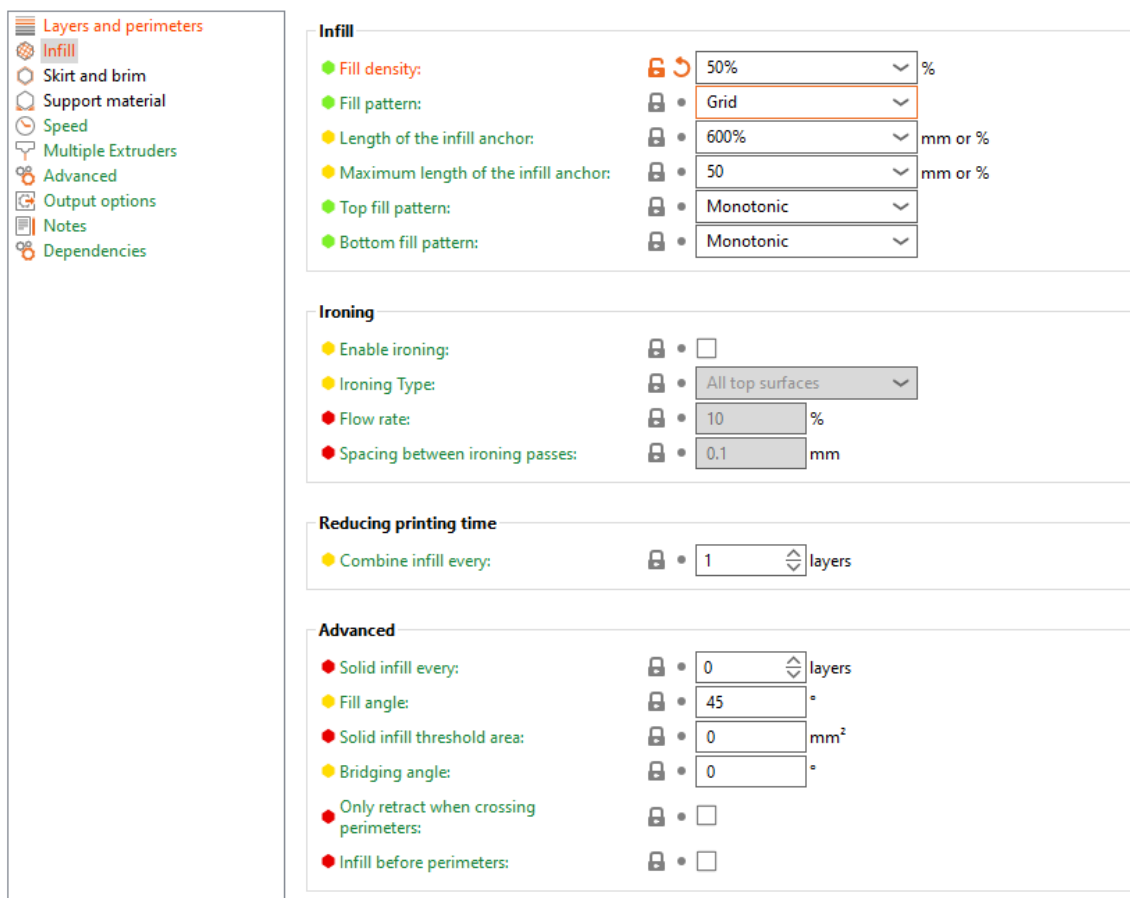
- [22] <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/>, pristupljeno 18.11.
- [23] <https://www.zwickroell.com/industries/plastics/thermoplastics-and-thermosetting-molding-materials/tensile-test-iso-527-1-2/>, pristupljeno 18.11.
- [24] <https://pdfcoffee.com/iso-179-1pdf-pdf-free.html>, pristupljeno 19.11.

PRILOZI

Prilog 1. Parametri ispisa ispitnih tijela za rastezna svojstva



Slika 39. Parametri visine sloja i debljine vanjske konture



Slika 40. Parametri ispisa ispune modela

Layers and perimeters

- Infill
- Skirt and brim
- Support material
- Speed**
- Multiple Extruders
- Advanced
- Output options
- Notes
- Dependencies

Speed for print moves

- Perimeters: 40 mm/s
- Small perimeters: 25 mm/s or %
- External perimeters: 25 mm/s or %
- Infill: 50 mm/s
- Solid infill: 40 mm/s or %
- Top solid infill: 30 mm/s or %
- Support material: 40 mm/s
- Support material interface: 100% mm/s or %
- Bridges: 25 mm/s
- Gap fill: 30 mm/s
- Ironing: 20 mm/s

Dynamic overhang speed

- Enable dynamic overhang speeds:
- speed for 0% overlap (bridge): 15 mm/s or %
- speed for 25% overlap: 15 mm/s or %
- speed for 50% overlap: 20 mm/s or %
- speed for 75% overlap: 25 mm/s or %

Speed for non-print moves

- Travel: 150 mm/s
- Z travel: 0 mm/s

Modifiers

- First layer speed: 20 mm/s or %
- Speed of object first layer over raft interface: 30 mm/s or %

Slika 41. Parametri brzine ispisa

Filament

- Color:
- Diameter: 1.75 mm
- Extrusion multiplier: 1
- Density: 1.24 g/cm³
- Cost: 20 money/kg
- Spool weight: 0 g

Temperature

- Idle temperature: 223 °C
- Nozzle:
 - First layer: 223 °C
 - Other layers: 223 °C
- Bed:
 - First layer: 60 °C
 - Other layers: 60 °C
- Chamber:
 - Nominal: 0 °C
 - Minimal: 0 °C

Slika 42. Parametri temperature mlaznice i podloge 3D pisača

Prilog 2. Ispitivanje rasteznih svojstava za PLA materijal

Dajak_rastezno_PLA- final.xtas		Method File Name		
Dajak_rastezno.xmas				
Report Date	26.11.2024.	Test Date	22.11.2024.	
Test Mode	Single	Test Type	Tensile	
Speed	5mm/min	Shape	Plate	
No of Batches:	8	Qty/Batch:	3	
Name	Max_Force Calc. at Entire	Max_Stress Calc. at Entire	Break_Ext.1(Strain)	Break_Force
Parameters	Areas	Areas	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	%	N
H-T0-1	1305,66	34,7666	2,41067	1295,12
H-T0-2	1238,25	32,8595	2,57200	1217,48
H-T0-3	1231,24	32,9807	2,55867	1214,57
Average	1258,38	33,5356	2,51378	1242,39
Standard Deviation	41,0926	1,06780	0,08954	45,6887
V-T0-1	912,550	21,9716	1,08267	912,550
V-T0-2	841,311	20,4731	1,00267	841,311
V-T0-3	922,337	22,0434	1,14933	922,337
Average	892,066	21,4960	1,07822	892,066
Standard Deviation	44,2267	0,88661	0,07343	44,2267
H-C0-2	1424,99	39,2871	3,11200	1392,73
H-C0-3	1427,46	39,4717	2,43600	1419,08
Average	1426,23	39,3794	2,77400	1405,91
Standard Deviation	1,74653	0,13053	0,47800	18,6323
V-C0-1	692,058	16,5909	1,02533	692,058
V-C0-2	729,237	17,2274	0,98800	729,237
V-C0-3	742,219	17,4180	1,00267	742,219
Average	721,171	17,0788	1,00533	721,171
Standard Deviation	26,0350	0,43312	0,01881	26,0350
H-G0-1	1224,58	32,7849	3,32400	1182,49
H-G0-2	1237,35	33,7232	3,61467	1189,68
H-G0-3	1204,22	32,2640	3,39733	1157,87
Average	1222,05	32,9240	3,44533	1176,68
Standard Deviation	16,7093	0,73948	0,15116	16,6819
V-G0-1	790,294	18,8174	0,90800	790,294
V-G0-2	843,272	20,3659	0,91733	843,272
V-G0-3	793,634	19,1971	0,84000	793,634
Average	809,067	19,4601	0,88844	809,067
Standard Deviation	29,6697	0,80706	0,04221	29,6697
H-H0-1	1378,16	37,8526	3,98000	1310,75
H-H0-2	1380,61	37,6790	3,28933	1333,70
H-H0-3	1383,17	37,5270	3,41067	1329,06
Average	1380,65	37,6862	3,56000	1324,50
Standard Deviation	2,50521	0,16292	0,36876	12,1346
V-H0-1	694,610	17,2016	0,75733	694,610
V-H0-2	822,172	19,7408	0,94800	822,172

V-H0-3	846,651	21,2300	1,01600	846,651
Average	787,811	19,3908	0,90711	787,811
Standard Deviation	81,6372	2,03688	0,13410	81,6372

Name	Break_Stress	Elastic
Parameters	Sensitivity: 10	Ext.1(Strain) 0,05 – 0,25 %
Unit	N/mm2	N/mm2
H-T0-1	34,4859	2468,60
H-T0-2	32,3083	2300,87
H-T0-3	32,5344	2241,46
Average	33,1095	2336,98
Standard Deviation	1,19732	117,796
V-T0-1	21,9716	2304,32
V-T0-2	20,4731	2317,10
V-T0-3	22,0434	1825,86
Average	21,4960	2149,09
Standard Deviation	0,88661	280,001
H-C0-2	38,3977	2235,88
H-C0-3	39,2399	2648,10
Average	38,8188	2441,99
Standard Deviation	0,59552	291,484
V-C0-1	16,5909	1987,09
V-C0-2	17,2274	1995,50
V-C0-3	17,4180	2093,66
Average	17,0788	2025,42
Standard Deviation	0,43312	59,2498
H-G0-1	31,6580	2183,38
H-G0-2	32,4240	2062,20
H-G0-3	31,0222	2283,77
Average	31,7014	2176,45
Standard Deviation	0,70191	110,948
V-G0-1	18,8174	2293,55
V-G0-2	20,3659	2326,63
V-G0-3	19,1971	2475,08
Average	19,4601	2365,09
Standard Deviation	0,80706	96,6824
H-H0-1	36,0012	2317,69
H-H0-2	36,3986	2541,09
H-H0-3	36,0589	2565,46
Average	36,1529	2474,75
Standard Deviation	0,21473	136,560
V-H0-1	17,2016	2333,67
V-H0-2	19,7408	2359,56
V-H0-3	21,2300	2366,58
Average	19,3908	2353,27
Standard Deviation	2,03688	17,3333

Prilog 3. Ispitivanje rasteznih svojstava za PETG materijal

Dajak_rastezno_PETG-				
Test File Name	final.xtas	Method File Name		
Dajak_rastezno.xmas				
Report Date	26.11.2024.	Test Date	22.11.2024.	
Test Mode	Single	Test Type	Tensile	
Speed	5mm/min	Shape	Plate	
No of Batches:	8	Qty/Batch:	3	
Name	Max_Force	Max_Stress	Break_Ext.1(Strain)	Break_Force
	Calc. at Entire	Calc. at Entire		
Parameters	Areas	Areas	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	%	N
H-TE-1	1105,66	30,6509	3,33333	1039,01
H-TE-2	1108,75	30,6500	3,31733	1018,12
H-TE-3	1127,47	31,6103	3,42533	1037,48
Average	1113,96	30,9704	3,35866	1031,54
Standard Deviation	11,8015	0,55417	0,05829	11,6443
V-TE-1	437,603	10,5005	0,75333	437,603
V-TE-2	496,842	11,8839	0,92000	496,842
V-TE-3	545,023	13,5848	0,97333	545,023
Average	493,156	11,9897	0,88222	493,156
Standard Deviation	53,8048	1,54487	0,11476	53,8048
H-CE-1	1108,51	30,9655	3,41067	959,926
H-CE-2	1131,04	31,6259	3,33067	1059,50
H-CE-3	1129,70	31,3446	3,54133	1045,79
Average	1123,08	31,3120	3,42756	1021,74
Standard Deviation	12,6386	0,33141	0,10634	53,9685
V-CE-1	401,945	10,0608	0,90667	401,945
V-CE-2	404,237	9,66658	0,83733	404,237
V-CE-3	426,548	10,7173	0,98667	426,548
Average	410,910	10,1482	0,91022	410,910
Standard Deviation	13,5913	0,53079	0,07473	13,5913
H-GE-1	1033,20	28,7268	2,79467	896,646
H-GE-2	1051,56	29,2339	--	--
H-GE-3	1026,64	28,3490	5,32800	382,651
Average	1037,13	28,7699	4,06134	639,649
Standard Deviation	12,9173	0,44402	1,79134	363,449
V-GE-1	560,328	14,1993	1,08400	560,328
V-GE-2	459,690	11,5162	0,85200	459,690
V-GE-3	656,484	16,6779	1,24533	656,484
Average	558,834	14,1311	1,06044	558,834
Standard Deviation	98,4055	2,58153	0,19772	98,4055
H-HE-1	1081,64	29,8094	3,31733	974,917
H-HE-2	1110,25	30,6015	3,43333	1022,82
H-HE-3	1128,09	31,2422	3,51733	1017,84
Average	1106,66	30,5510	3,42266	1005,19
Standard Deviation	23,4322	0,71773	0,10043	26,3372
V-HE-1	611,060	14,5345	0,97600	611,060

V-HE-2	554,266	13,2814	1,01467	554,266
V-HE-3	604,903	14,5701	1,06933	604,903
Average	590,076	14,1287	1,02000	590,076
Standard Deviation	31,1651	0,73397	0,04689	31,1651

Name	Break_Stress	Elastic
Parameters	Sensitivity: 10	Ext.1(Strain) 0,05 – 0,25 %
Unit	N/mm2	N/mm2
H-TE-1	28,8032	1513,89
H-TE-2	28,1447	1597,90
H-TE-3	29,0873	1469,17
Average	28,6784	1526,99
Standard Deviation	0,48353	65,3567
V-TE-1	10,5005	1342,17
V-TE-2	11,8839	1344,11
V-TE-3	13,5848	1488,46
Average	11,9897	1391,58
Standard Deviation	1,54487	83,9061
H-CE-1	26,8148	1586,43
H-CE-2	29,6254	1508,96
H-CE-3	29,0163	1684,22
Average	28,4855	1593,20
Standard Deviation	1,47857	87,8261
V-CE-1	10,0608	1208,58
V-CE-2	9,66658	1134,22
V-CE-3	10,7173	1254,40
Average	10,1482	1199,07
Standard Deviation	0,53079	60,6522
H-GE-1	24,9301	1458,00
H-GE-2	–	1532,56
H-GE-3	10,5663	1443,33
Average	17,7482	1477,96
Standard Deviation	10,1567	47,8477
V-GE-1	14,1993	1304,26
V-GE-2	11,5162	1375,79
V-GE-3	16,6779	1379,03
Average	14,1311	1353,03
Standard Deviation	2,58153	42,2642
H-HE-1	26,8683	1564,40
H-HE-2	28,1915	1311,11
H-HE-3	28,1887	1424,82
Average	27,7495	1433,44
Standard Deviation	0,76314	126,865
V-HE-1	14,5345	2020,39
V-HE-2	13,2814	1425,98
V-HE-3	14,5701	1548,18
Average	14,1287	1664,85
Standard Deviation	0,73397	313,910