

# UTJECAJ RAZLIČITIH PARAMETARA ISPISA NA MEHANIČKA SVOJSTVA PROBNIH UZORAKA IZRAĐENIH FDM TEHNOLOGIJOM

---

Canjar, Sanja

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:805129>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-11**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

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



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

# UTJECAJ RAZLIČITIH PARAMETARA ISPISA NA MEHANIČKA SVOJSTVA PROBNIH UZORAKA IZRAĐENIH FDM TEHNOLOGIJOM

---

Canjar, Sanja

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:805129>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2023-02-15**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

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



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
**STROJARSKI ODJEL**  
Proizvodno strojarstvo

SANJA CANJAR

**UTJECAJ RAZLIČITIH PARAMETARA ISPISA NA  
MEHANIČKA SVOJSTVA PROBNIH UZORAKA  
IZRAĐENIH FDM TEHNOLOGIJOM**

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2020.

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
**STROJARSKI ODJEL**  
Proizvodno strojarstvo

SANJA CANJAR

**UTJECAJ RAZLIČITIH PARAMETARA ISPISA NA  
MEHANIČKA SVOJSTVA PROBNIH UZORAKA  
IZRAĐENIH FDM TEHNOLOGIJOM**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:  
dr. sc. Tihana Kostadin

KARLOVAC, 2020.

## **IZJAVA:**

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

Zahvaljujem se obitelji i prijateljima na potpori tijekom studiranja, te mentorici dr.sc.Tihani Kostadin na stručnoj pomoći i savjetima koji su pomogli pri izradi ovog završnog rada.

Sanja Canjar

Karlovac, 24.05.2020.

## SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je utjecaj različitih parametara ispisa na mehanička svojstva probnih uzoraka izrađenih FDM tehnologijom. Korištena su 3 materijala za 3D ispis pomoću FDM tehnologije, te je tako izrađeno 27 epruveta. Promatrale su se epruvete koje su isprintane pomoću 3D printera Prusa i3 MK2 sa ispunama od 15%, 45% i 75% , te utjecaj postotka ispune epruvete na njezinu vlačnu čvrstoću.

Razlog odabira navedene teme je sve veći rast i napredak korištenja aditivnih tehnologija, s naglaskom na FDM tehnologiju budući se u praksi često možemo susresti sa 3D printerima namijenjenim upravo za taj postupak izrade modela. Takav printer zauzima vrlo malo mjesta, može koristiti razne vrste materijala, jednostavan je za korištenje, te se na tržištu može naći po prihvatljivoj cijeni. Kao i sve aditivne tehnologije zanimljiv je jer može izraditi prototip ili malu seriju modela sa izrazito kompliciranom geometrijom, odnosno ono što se nacrtalo u CAD programu vrlo brzo se može imati u opipljivom obliku čime se štedi vrijeme i novac.

U teorijskom dijelu ovog rada opisana je aditivna proizvodnja, povijest i tehnologije. Naglasak je na FDM tehnologiji koja se koristi u eksperimentalnom dijelu. Također, zbog sve češćeg korištenja aditivnih tehnologija, naglasak je stavljen i na utjecaj materijala na ekologiju.

U eksperimentalnom dijelu ispitana su 3 materijala koja se najčešće koriste za 3D ispis FDM tehnologijom. PLA, PETG, te materijal V. generacije FACILAN C8 – mješavina na bazi PLA. Pratio se utjecaj promjene parametara ispisa ispune epruvete na njenu vlačnu čvrstoću.

Na kraju rada analizirani su podaci dobiveni ispitivanjem, te je donesen zaključak.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja; FDM tehnologija, ekologija, vlačna čvrstoća.

# THE INFLUENCE OF VARIOUS PRINT PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF TEST SPECIMENS PRODUCED BY FDM TECHNOLOGY

## SUMMARY

The subject of this thesis is the influence of different print parameters on the mechanical properties of test samples made with FDM technology. 3 materials for 3D printing were used to produce 27 test specimens. These specimens were printed using 3D printer Prusa i3 MK2 with infill of 15%, 45%, and 75% and the influence of the infill percentage on its tensile strength was observed.

The reason for choosing this topic is the increasing growth and advancement of the use of additive technologies, with an emphasis on FDM technology, since in practice we can often encounter 3D printers designed specifically for this model making process. Such a printer takes up very little space, can use various types of materials, is easy to use, and can be found on the market at an affordable price. Like all additive technologies, it is interesting because it can produce a prototype or a small series of models with extremely complicated geometry. What is drawn in a CAD program very quickly can be in tangible form, saving time and money.

The theoretical part of this paper describes additive manufacturing, history and technologies. The emphasis is on FDM technology used in the experimental section. Also, due to the increased use of additive technology, emphasis is also placed on material impact on the ecology.

In the experimental part we tested three materials that are commonly used for 3D printing FDM technology. PLA, PETG, and V-generation FACILAN C8 - PLA based blend. The effect of changing the print parameters of the test samples filling on its tensile strength was monitored. At the end of the paper, the test data were analyzed and a conclusion was reached.

Keywords: additive manufacturing; FDM technology, ecology, tensile strength.

# SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	7
POPIS SLIKA .....	9
POPIS TABLICA.....	10
POPIS OZNAKA .....	11
<b>1. UVOD</b> .....	<b>12</b>
<b>2. TEORIJSKI DIO</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1. POVIJESNI PREGLED RAZVOJA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2. VLAČNA ČVRSTOĆA</b> .....	<b>19</b>
2.2.1. VLAČNO NAPREZANJE .....	19
2.2.2. LOMNA ČVRSTOĆA .....	20
2.2.3. ELASTIČNOST .....	21
2.2.4. HOOKEOV ZAKON .....	21
2.2.5. ISPITIVANJE VLAČNE ČVRSTOĆE .....	21
<b>2.3. ADITIVNE TEHNOLOGIJE</b> .....	<b>22</b>
2.3.1. LOM – proizvodnja laminiranih objekata .....	23
2.3.2. SLA – stereolitografija .....	24
2.3.3. DLP - očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom .....	25
2.3.4. 3D PJP - PolyJet .....	26
2.3.5. 3DP – 3D tisak .....	27
2.3.6. SLS – selektivno lasersko sinteriranje modela.....	28
2.3.7. FDM – taložno očvršćivanje .....	30
<b>2.4. MATERIJALI ZA ADITIVNE TEHNOLOGIJE</b> .....	<b>32</b>
<b>2.5. EKOLOGIJA I 3D PRINT</b> .....	<b>34</b>



<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO</b> .....	36
<b>3.1. EPRUVETE</b> .....	37
3.1.1. DIMENZIJE EPRUVETA I CRTANJE CAD MODELA.....	37
3.1.2. MATERIJALI ZA IZRADU EPRUVETA .....	40
<b>3.2. IZRADA EPRUVETA FDM TEHNOLOGIJOM</b> .....	42
3.2.1. PRIPREMA CAD MODELA ZA 3D PRINTANJE.....	42
3.2.1. UREĐAJ ZA 3D PRINTANJE .....	46
3.2.2. PRINTANJE EPRUVETA.....	48
<b>3.3. ISPITIVANJE</b> .....	50
3.3.1. OZNAČAVANJE EPRUVETA.....	50
3.3.2. UREĐAJ ZA ISPITIVANJE - KIDALICA .....	51
3.3.3. ISPITIVANJA I REZULTATI.....	52
<b>4. ANALIZA REZULTATA</b> .....	59
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	62
<b>LITERATURA</b> .....	63
<b>PRILOZI</b> .....	64

## POPIS SLIKA

Slika 1. Prvi 3D printer koji je izumio Charles Hull [2] .....	13
Slika 2. Original patent za FDM printer [1].....	14
Slika 3. RepRap Projekt – printer koji je mogao napraviti svoju repliku [1] .....	15
Slika 4. Makerbot-ov prvi model 3d printera – Cupcake CNC [1].....	16
Slika 5. Carbon 3D [1] .....	17
Slika 6. Kuća isprintana u 24 sata [3] .....	18
Slika 7. Vlačno naprezanje [6] .....	19
Slika 8. Dijagram sila - produljenje ( $F - \Delta L$ ) [6] .....	19
Slika 9. Graf ovisnosti deformacije o naprezanju [6] .....	20
Slika 10. Faze izrade modela . [8].....	22
Slika 11. LOM – proizvodnja laminiranih objekata [10].....	23
Slika 12. Stereolitografija SLA [12] .....	24
Slika 13. DLP tehnologija [13] .....	25
Slika 14. PolyJet tehnologija [14] .....	26
Slika 15. 3D tisak [15] .....	27
Slika 16. SLS tehnologija [16].....	28
Slika 17. FDM tehnologija [17] .....	30
Slika 18. Eco-friendly filament [23] .....	35
Slika 19. ProtoCycler jedini reciklira otpadni polimerni materijal u novi filament [24].....	35
Slika 20. Plosnata epruveta za vlačno ispitivanje .....	37
Slika 21. Plosnata epruveta sa dimenzijama za izradu .....	38
Slika 22. Crtanje epruvete u CAD programu .....	39
Slika 23. PLA filament.....	40
Slika 24. FACILAN C8 filament [25] .....	41
Slika 25. PETG filament [25] .....	41
Slika 26. Sučelja Slic3r-a za generiranje .gcode datoteke.....	42
Slika 27. Podešavanje parametara 15% ispune – 1. sloj .....	43
Slika 28. Podešavanje parametara 15% ispune – pregled modela .....	43
Slika 29. Podešavanje parametara 45% ispune – 1. sloj .....	44
Slika 30. Podešavanje parametara 45% ispune – pregled modela .....	44
Slika 31. Podešavanje parametara 75% ispune – 1. sloj .....	45
Slika 32. Podešavanje parametara 75% ispune – pregled modela .....	45

Slika 33. Dijelovi 3D printera .....	46
Slika 34. Prusa printer i prikaz ekstrudera .....	47
Slika 35. Grijana platforma .....	47
Slika 36. Printanje epruvete – početni sloj .....	48
Slika 37. Prikaz ispune epruvete .....	49
Slika 38. Printanje epruvete – završni sloj .....	49
Slika 39. Primjer označavanja epruveta .....	50
Slika 40. Kidalica Shimadzu AG-x plus .....	51
Slika 41. Stezna glava sa steznom čeljusti .....	51
Slika 42. Epruveta prije i nakon ispitivanja .....	52
Slika 43. 27 epruveta nakon ispitivanja.....	52
Slika 44. Graf $F - \Delta L$ za materijal PLA .....	56
Slika 45. Graf $F - \Delta L$ za materijal FACILAN C8.....	57
Slika 46. Graf $F - \Delta L$ za materijal PETG.....	58
Slika 47. Graf $F - \Delta L$ srednjih vrijednosti za sva 3 materijala.....	60

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjeri za dimenzije vlačne epruvete oblik E, prema standardu .....	38
Tablica 2. Označavanje epruveta.....	50
Tablica 3. Prikaz rezultata ispitivanja .....	53
Tablica 4. Oznake grafa za materijal PLA .....	56
Tablica 5. Oznake grafa za materijal FACILAN C8.....	57
Tablica 6. Oznake grafa za materijal PETG.....	58
Tablica 7. Prikaz srednjih vrijednosti rezultata ispitivanja i standardne devijacije .....	59

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
$F_{max}$	[N]	maksimalna sila
$\Delta L$	[mm]	produljenje
$R_m$	$\left[ \frac{N}{mm^2} \right], [MPa]$	vlačna čvrstoća, maksimalno naprezanje
$R_k$	$\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$	konačno naprezanje
$E$	$\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$	Youngov modul elastičnosti
$\varepsilon$	$\left[ \frac{mm}{mm} \right]$	istezanje epruvete
$A_0$	[mm <sup>2</sup> ]	poprečan presjek epruvete
$a$	[mm]	debljina epruvete
$b$	[mm]	širina epruvete
$B$	[mm]	širina glave epruvete
$h$	[mm]	visina glave epruvete
$L_0$	[mm]	početna mjerna duljina epruvete
$L_t$	[mm]	ukupna duljina epruvete
$L_c$	[mm]	duljina ispitnog epruvete

## **1. UVOD**

Tema završnog rada je ispitivanje utjecaja promjene parametara postotka ispune modela na njegovu vlačnu čvrstoću kod tri materijala koja se najčešće koriste kod FDM tehnologije ispisa.

Ispitivat će se vlačna čvrstoća kojom se opisuje otpor materijala prilikom vlačnog naprezanja.

Cilj je napraviti analizu koji materijal i pri kojem postotku ispune daje najbolje rezultate, te koju ispunu koristiti ukoliko je potrebno smanjiti trošak i količinu iskorištenog materijala u ovisnosti o svrsi za koju je model namijenjen.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. POVIJESNI PREGLED RAZVOJA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA

Prikazan je povijesni pregled aditivnih tehnologija čiji razvoj počinje prije 40 godina, iako i dan danas djeluju kao nešto potpuno novo.

1981. god. – dr. Hideo Kodama objavljuje izvješće o funkcionalnom sustavu brze izrade prototipova sistemom koji koristi fotopolimer – čvrsti model dobiven je printanjem u slojevima, no dr. Kodama nije ispunio prijavu patenta na vrijeme i zbog toga mu patent nije odobren.

1984. god. – smatra se godinom početka razvoja tehnologije 3D printanja izumom **stereolitografije, SLA metoda** (Charles Hull).

1986. god. – Charles Hull je patentirao stereolitografiju, te s partnerima osniva 3D Systems tvrtku koja nakon godinu dana prodaje svoj prvi proizvod za printanje,

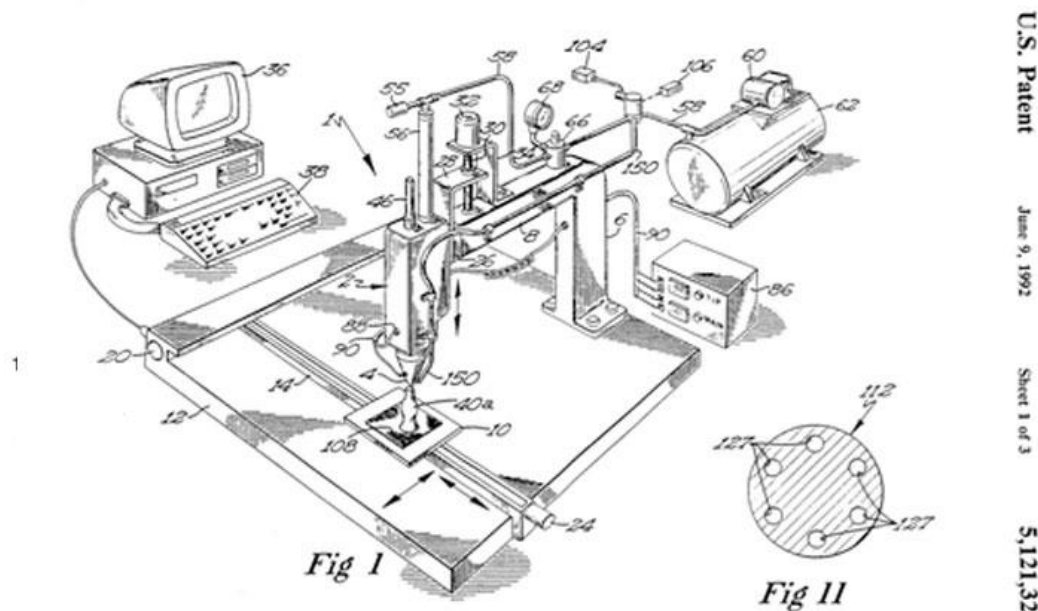
– objekt se kreira tankim slojevima kapljevito polimera očvršćenih UV laserom, koristeći računalno generirane modele. [1]

1987. god. – 3D Systems proizvodi prvi 3D printer SLA-1, to je uistinu važno bilo za izumitelje jer su napokon mogli testirati svoj prototip bez velikih ulaganja u proizvodnju samo jednog komada. [2]



*Slika 1. Prvi 3D printer koji je izumio Charles Hull [2]*

1988. god. – izumljena **SLS metoda, selektivno lasersko sinteriranje** (dr. Carl Deckard i Joe Beaman) gdje se umjesto UV svijetla koristio laser, [2]
- u isto vrijeme proizvedene su prve generacije akrilnih smola za stereolitografiju.
1989. god. – patentirana je najpoznatija tehnologija 3D printanja - **FDM metoda, taložno očvršćivanje** (Scott i Lisa Crump), a tada je i osnovana tvrtka Stratasys koja proizvodi 3D printere, materijale, te sve vezano uz 3D tisak.
1991. god. – tvrtka Stratasys proizvela je prvi FDM 3D printer. [1]



Slika 2. Original patent za FDM printer [1]

1992. god. – Charles Hull i 3D Systems stvaraju prvi stroj za SLA,
- startup DTM stvara prvi SLS stroj (s korištenjem praha umjesto tekućine),
  - takve tehnologije tada još nisu bile savršene jer su bile tek na početku.

Modeli napravljeni FDM tehnologijom imali su bolju čvrstoću i kemijsku otpornost, dok su pomoću SLA tehnologije modeli mogli biti puno brže i točnije izrađeni.

1993. god. – MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) razvija i patentira tehnologiju **3D tiska** baziranu na principu Ink-jet tehnologije. Ta tehnologija je omogućila da se jedan materijal pomoću mlaznica nanosi na drugi materijal, nakon čega su se spajali, da bi se omogućila što brža i točnija izrada modela, [1]
- ZCorp je također bila jedna od glavnih kompanija za 3D printanje. Njihov prvi printer za ispis modela koristio je materijale u prahu na bazi škroba i gipsa, te vezivo na vodenoj bazi. [1]

U samo 10 godina znanstvenici iz raznih institucija i startup-a napravili su funkcionalni bubreg, protetsku nogu, te bio-print prve krvne žile koristeći samo ljudske stanice.

1997. god. – osniva se tvrtka Arcam specijalizirana za metalne 3D printer uređaje, koja je ujedno jedini proizvođač 3D pisača koji koristi **EBM metodu** (*Electron Beam Melting*). Izrada po principu topljenja metalnog praha pomoću elektronskog snopa, sloj po sloj.

1998. god. – tvrtka Objet Geometries je 3D print startup (spojen sa Stratasys-om), a izradila je stroj koji je mogao printati model od više materijala što je omogućilo da se jedan dio izrađuje u više varijanti s različitim svojstvima materijala – **PolyJet metoda**.

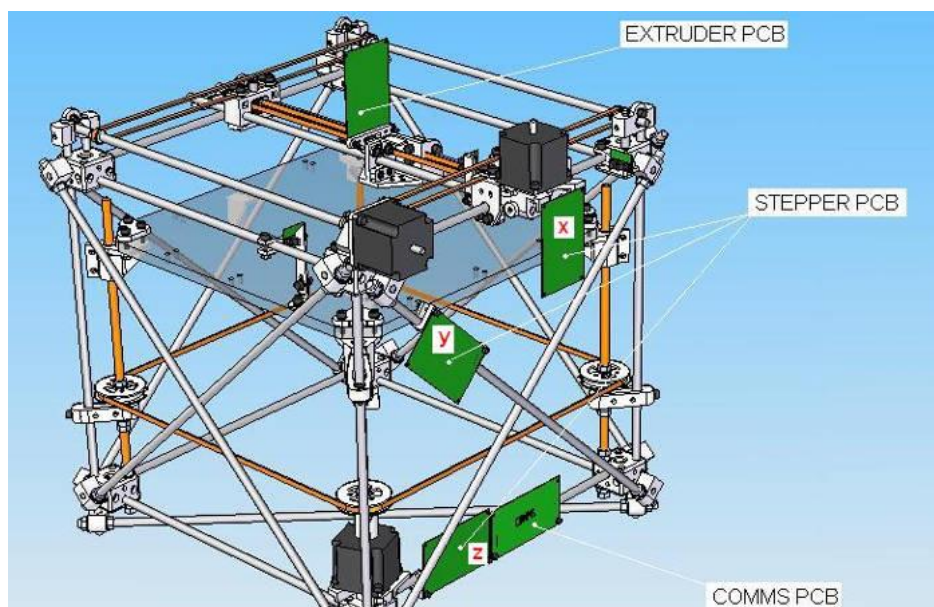
1999. god. – tehnologija se počinje koristiti u medicini za stvaranje umjetnih organa

– prvi organ isprintan 3D printerom ugrađen je u čovjeka – znanstvenici na Institutu Wake Forest isprintali su sintetički model mjehura i zatim ga obložili sa ljudskim stanicama pacijenta kako bi mogućnost za odbacivanjem bila vrlo mala. [1]

**Vodeće tvrtke** tada su Stratasys, 3D Systems, ZCorp i Objet Geometries. 3D Systems je 2001. preuzeo tvrtku DTM i tako postao lider na tržištu za SLA i SLS tehnologiju 3D ispisa.

2002. god. – osnovana je tvrtka EnvisionTEC koja je postala veliki proizvođač 3D printera za zubarsku industriju, izradu nakita i biotisak.

2005. god. – jedan od važnijih trenutaka za daljnji razvoj tehnologije - Dr. Adrian Bowyer **RepRap Projekt** (*Replicating Rapid Prototyper*) pokrenuo je inicijativu za otvoreni kod (open source) za stvaranje 3D printera koji bi mogao napraviti svoju repliku ili barem ispisati većinu svojih dijelova, čime bi postao još dostupniji. [1]



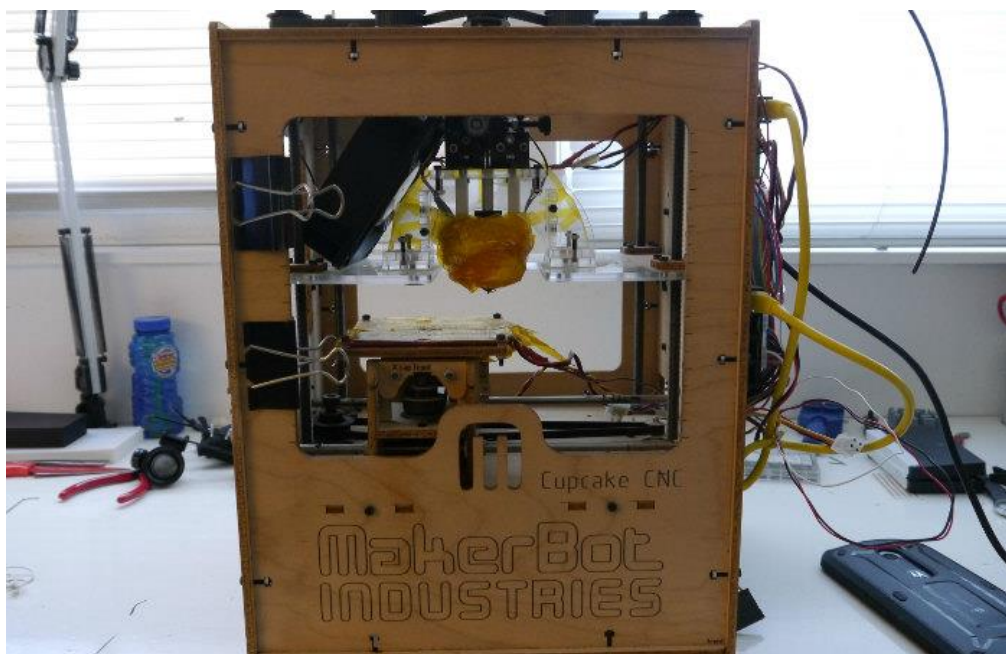
Slika 3. RepRap Projekt – printer koji je mogao napraviti svoju repliku [1]



2008. god. – firma RepRap uspjela je napraviti **printer Darwin** koji može napraviti sam sebe, odnosno onaj koji posjeduje jedan takav pisač može isprintati dijelove i od njih napraviti potpuno jednak pisač i tako nebrojeno puta,

– 3D printanje postaje dostupno, te će se uskoro moći koristiti kod kuće.

2009. god. – Makerbot je plasirao 3D printer Cupcake CNC koji se mogao replicirati. Dijelovi napravljeni u softveru pripremljeni za print mogu se preuzeti sa njihove web stranice Thingivers. [1]

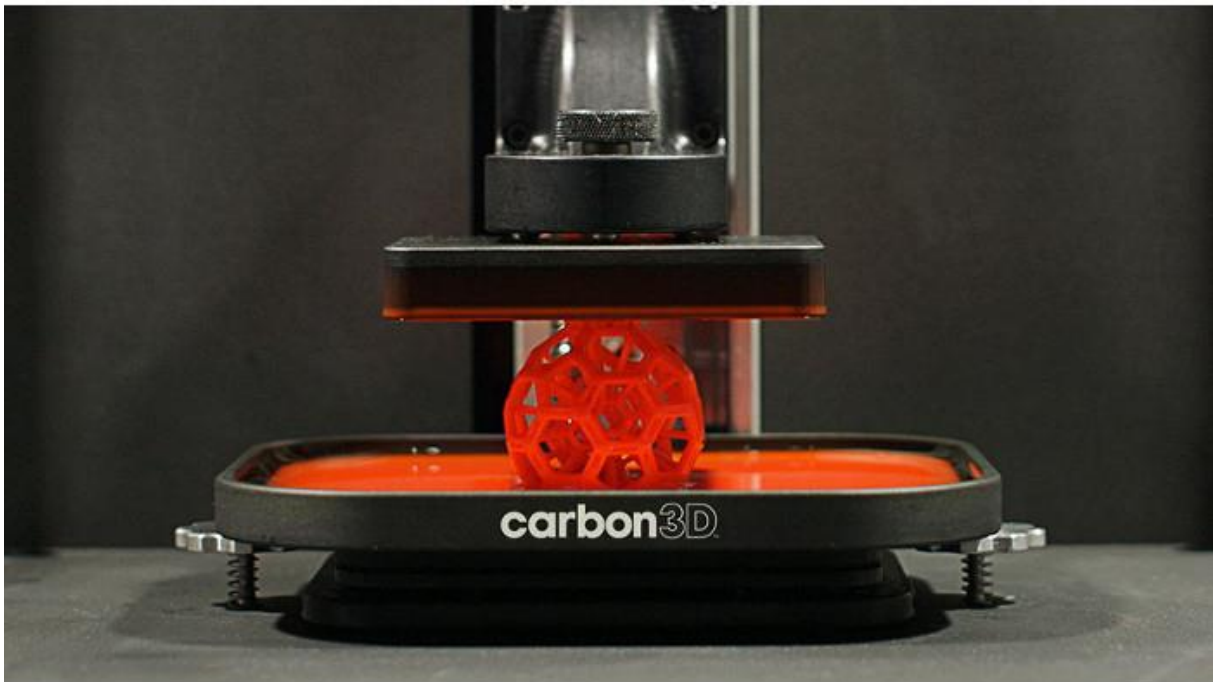


*Slika 4. Makerbot-ov prvi model 3d printera – Cupcake CNC [1]*

Cijena 3D printera je značajno pala i točnost printanja je sve bolja. Ne postoji ograničenje da se printaju samo polimerni materijali, već se mogu koristiti razni drugi materijali (npr. printanje prstena od srebra ili zlata).

Od 2014. god. pojavljuju se mnogi Startup-ovi koji privlače velike investicije:

- tvrtka Desktop Metal koristi **BMD tehnologiju** (*Bound Metal Deposition*) vrlo slično FDM tehnologiji samo što se koristi metal. [1]
- tvrtka Carbon 3D predstavila je **CLIP tehnologiju** (*Continuous Liquid Interface Production*) koja radi na baci određenih kemijskih svojstava. Koristi kombinaciju UV svjetla i kisika koji djeluju na projekciju modela, te u kontroliranim uvjetima model se izvlači iz posude u kojoj je u tekućem stanju materijal od kojeg se izrađuje. Model se ne printa sloj po sloj već se kontinuirano izvlači. Printanje je 100x brže od ostalih tehnologija, sa odličnim mehaničkim svojstvima neovisnim o orijentaciji printanja. [1]



Slika 5. Carbon 3D [1]

Velike tvrtke:

- tvrtka HP:
  - 2016. god. je najavila prodaju printera sa svojom MJF tehnologijom (*Multi Jet Fusion*),
  - 2018. god. najavila je full-color 3D printere - industrijske 3D printere po povoljnijim cijenama.
- tvrtka GE:
  - stvara novu tvrtku GE Additive kupnjom vodećih tvrtki Arcam i Concept Laser za metalni 3D ispis. [1]

Ostali primjeri:

**New Story Charity** je neprofitna organizacija koja je htjela ponuditi novo rješenje za rješavanje stambenog pitanja velikog broja ljudi u siromašnim dijelovima svijeta. Imali su zadatak napraviti 100 domova za 100 dana – izradili su 3D printer koji je mogao isprintati kuću. U 100 dana isprintali su 113 kuća. I dalje nastavljaju širiti tehnologiju te traže ulagače kojima će prenijeti znanje. [3]



*Slika 6. Kuća isprintana u 24 sata [3]*

**Isprintana hrana**, od proteina, ugljikohidrata i šećera u prahu stvorili su jestivu kocku iza koje stoji ideja o stvaranju održivijeg prehrambenog sustava. Učinkovit i ekonomičan način proizvodnje hrane. [4]

**Nano-printing**, printanje dijelova nevidljivih ljudskom oku. Nano scribe se bavi proizvodnjom 3D printera, te posebnih materijala za izradu nano modela nevjerojatnom preciznošću. [5]

**4D printing** čiji dio je 3D printing moći će stvarati dijelove koji se prilagođavaju okolini i mogu se transformirati nakon što su izrađeni ovisno o utjecaju okoliša, vlage, temperature, itd.

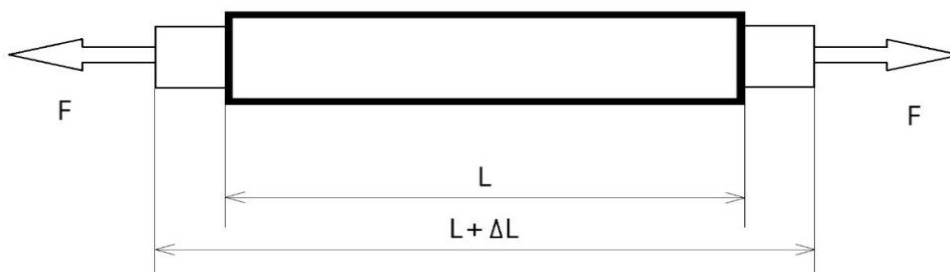
Danas se tehnologija brze izrade prototipova koristi za izradu modela, funkcionalnih dijelova ili manjih proizvodnih serija. Koristi se u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji, te u medicinske i stomatološke svrhe. Materijali koji se koriste također se razvijaju. Tehnologija se konstantno razvija tako da je nemoguće pratiti što je sve novo.

## 2.2. VLAČNA ČVRSTOĆA

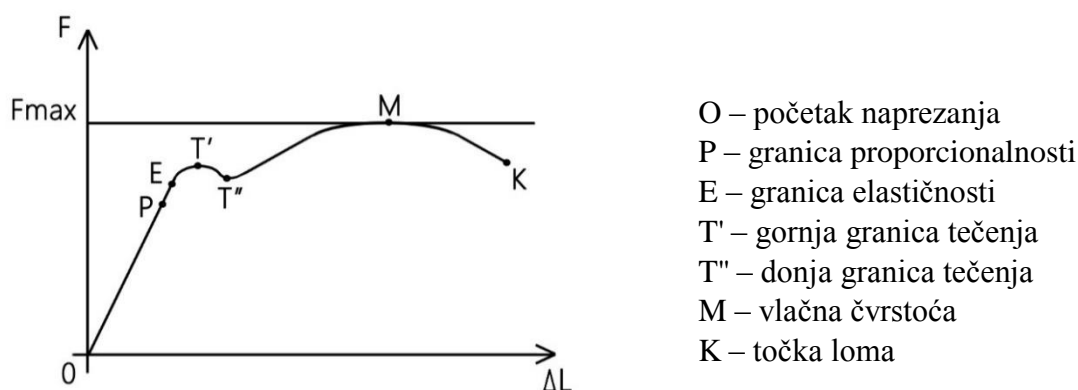
Vlačnom čvrstoćom materijala opisuje se otpor materijala prilikom istezanja.

### 2.2.1. VLAČNO NAPREZANJE

Vlačno naprezanje - kada na istom pravcu djeluju sile jednakog iznosa a suprotnog smjera i nastoje produžiti tijelo. [6]



Slika 7. Vlačno naprezanje [6]



Slika 8. Dijagram sila - produljenje ( $F - \Delta L$ ) [6]

P – do te točke se materijal rasteže proporcionalno opterećenju. Rasteže se po Hookeovu zakonu. To su elastične deformacije jer prestankom opterećenja vraća se u početno stanje.

E – prekoračenjem granice elastičnosti epruveta se ne vraća na početnu dužinu, te mijenja oblik.

T – zona tečenja između  $T'$  i  $T''$  je zona velikih opterećenja, produljenja više nisu proporcionalna sili. Na materijalu se mogu zamijetiti sitne kose pukotine (Ludersove crte).

M – od  $T''$  do M nastaje zona ojačanja materijala, ponovno je evidentiran porast sile, ali rastezanje raste brže nego do tada. U točki M sila dostiže svoju najveću vrijednost.

Vlačna čvrstoća materijala:

$$R_m = \frac{F_{max}}{A_0} \left[ \frac{N}{mm^2} \right], [MPa] \quad (1)$$

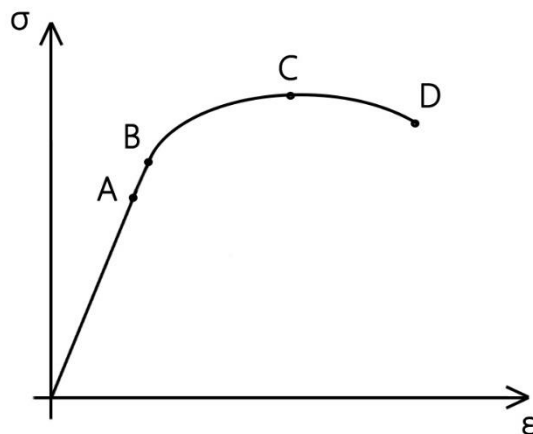
### 2.2.2. LOMNA ČVRSTOĆA

Lomna čvrstoća je naprezanje kod kojeg dolazi do loma materijala, a određuje se vlačnim ispitivanjem. Izduženja ispitivanog uzorka nakon dostizanja vlačne čvrstoće (područje klonulosti) događaju se samo u zoni suženja ispitivanog uzorka, gdje je površina presjeka najmanja sve dok ne pukne.

**Krti materijali** – nemaju pojavu suženja ispitivanog uzorka, a lom se događa pri vrlo malom produljenju.

**Plastični materijali** - za plastični lom karakteristična je značajna deformacija materijala prije samog loma.

**Dijagram naprezanja** prikazuje međusobnu ovisnost vlačnog naprezanja i relativnog produljenja (produljenja s obzirom na početnu duljinu). U materijalu koji je opterećen silom nastaju naprezanja koja uzrokuju njegovo rastezanje. [6]



Slika 9. Graf ovisnosti deformacije o naprezanju [6]

A-granica linearnosti

B-granica elastičnosti, dolazi područje plastičnosti

C-određuje maksimalno naprezanje koje materijal može izdržati

D-dolazi do kidanja materijala

- naprezanje je omjer sile i površine na koju sila djeluje:

$$\sigma = \frac{F}{S} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (2)$$

- deformacija čvrstog tijela je promjena dimenzija i volumena tijela (praćena promjenom oblika tijela) [6]:

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

### 2.2.3. ELASTIČNOST

Svojstvo materijala koje nakon prestanka djelovanja vanjske sile može se:

- vratiti u početni oblik (savršeno elastično tijelo),
- zadržati svoj deformirani oblik (savršeno plastično tijelo),
- nešto između prethodna dva (djelomično elastično tijelo). [6]

### 2.2.4. HOOKEOV ZAKON

Hookeov zakon vrijedi u području linearne deformacije čvrstih elastičnih tijela. [6]

$$\sigma = E \times \varepsilon \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (4)$$

$E \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$  – Youngov modul elastičnosti

$$guma = 10 \frac{N}{mm^2}; \text{ staklo} = 50000 \frac{N}{mm^2}; \text{ aluminij} = 70000 \frac{N}{mm^2}; \text{ čelik} = 210000 \frac{N}{mm^2}$$

### 2.2.5. ISPITIVANJE VLAČNE ČVRSTOĆE

Provodi se na kidalici, gdje se probna epruveta izlaže kontinuiranom porastu opterećenja što izaziva njeno izduženje. Ispitivanjem se utvrđuje osnovna mehanička svojstva materijala kao što su granica razvlačenja, maksimalna vlačna sila, sila loma i istežanje. [6]

## 2.3. ADITIVNE TEHNOLOGIJE

Aditivna proizvodnja je naziv za tehnologiju brze izrade prototipova i trenutno je jedna od najbrže rastućih tehnologija. Idealna za slučajeve kompleksne geometrije koju nije moguće postići klasičnim načinima obrade.

Princip brze izrade prototipa temelji se na načelu izrade modela sloj po sloj. Željeni 3D model prethodno konstruiran računalom, „izrezuje“ se na slojeve jednakih debljina, koji se slažu jedan na drugi, te se tako postiže trodimenzionalni oblik.

### FAZE ADITIVNE PROIZVODNJE:

#### 1. IZRADA CAD MODELA

- model određen za izradu potrebno je najprije modelirati pomoću CAD softvera, npr. Pro Engineer, AutoCad, SolidWorks, Catia ili digitaliziranjem prostornog oblika već postojećega objekta trodimenzionalnim skenerima.

#### 2. KONVERZIJA U STL. FORMAT

- CAD model potrebno je pretvoriti u .STL format koji je prihvaćen kao standard kod brze izrade prototipova.

#### 3. REZANJE STL. DATOTEKE

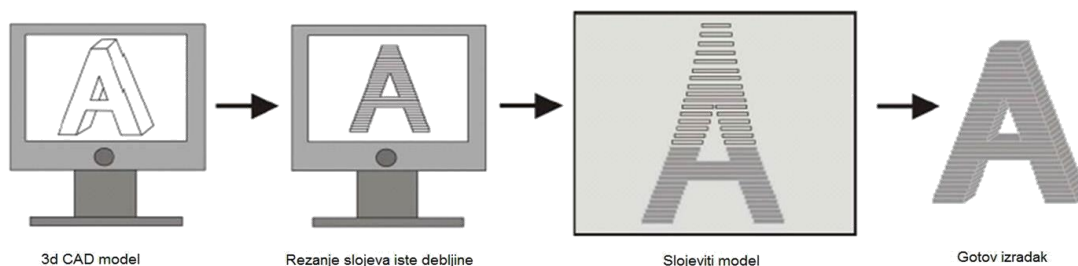
- dostupno je nekoliko programa kojima se STL. datoteka priprema tako da se korisniku omogućuje promjena veličine, položaja i orijentacije modela,
- softver pretvara model u niz horizontalnih poprečnih presjeka debljine 0,01 – 0,7 mm, te generira pomoćnu strukturu za podršku samog modela tijekom izrade,
- svaki proizvođač 3D printera isporučuje svoj softver za pripremu.

#### 4. IZRADA SLOJ PO SLOJ

- konstrukcija modela uporabom jedne od tehnika koja model gradi sloj po sloj.

#### 5. ZAVRŠNA OBRADA

- uključuje uklanjanje modela sa printera i odvajanje nosača,
- ponekad je potrebno čišćenje i tretiranje površina modela zbog poboljšanja izgleda i trajnosti. [7]



Slika 10. Faze izrade modela . [8]

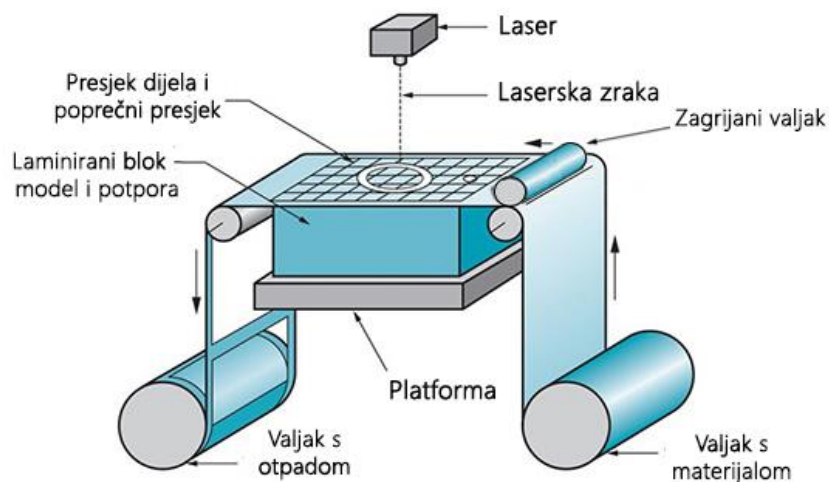


### 2.3.1. LOM – proizvodnja laminiranih objekata

LOM (*Laminated Object Manufacturing*) proizvodnja laminiranih objekata jednostavna je i jeftina tehnologija. U ovoj se tehnici slojevi listova prevučenog ljepilom vežu zajedno kako bi tvorili prototip. Izvorni materijal sastoji se od papira, kompozita ili polimerne folije laminiranog ljepilom aktiviranim toplinom i valjanog na kolute.

Materijal se dovodi na radnu površinu. Pomoću zagrijanog valjka premaz na donjoj strani papira se rastopi, te se tako veže na prethodni sloj. Presjek profila predmeta izrezuju se pomoću lasera. Reže se obris prvog sloja, a zatim prekriva višak područja u obliku mreže kako bi se kasnije potpora lakše mogla odvojiti od modela. Otpadni materijal namotava se na zaseban valjak.

Ova tehnologija upotrebljava se većinom kada je bitan prikaz modela, no koji ne zahtjeva veliku dimenzijsku točnost. Modeli izrađeni od papira imaju slične karakteristike kao i drvo, te se lako mogu obrađivati. [9]



Slika 11. LOM – proizvodnja laminiranih objekata [10]

#### PREDNOSTI:

- troškovi materijala su relativno niski,
- proces je mnogo brži od konkurentskih tehnika,
- proces gotovo da nema zaostala naprezanja i nepoželjne deformacije modela,
- najprikladnije za izgradnju velikih dijelova.

#### NEDOSTACI:

- stabilnost predmeta ograničena je čvrstoćom zalijepljenih slojeva,
- postupak nije dobar za izradu dijelova tankih stjenki,
- nije moguće napraviti šuplje dijelove poput boca. [11]

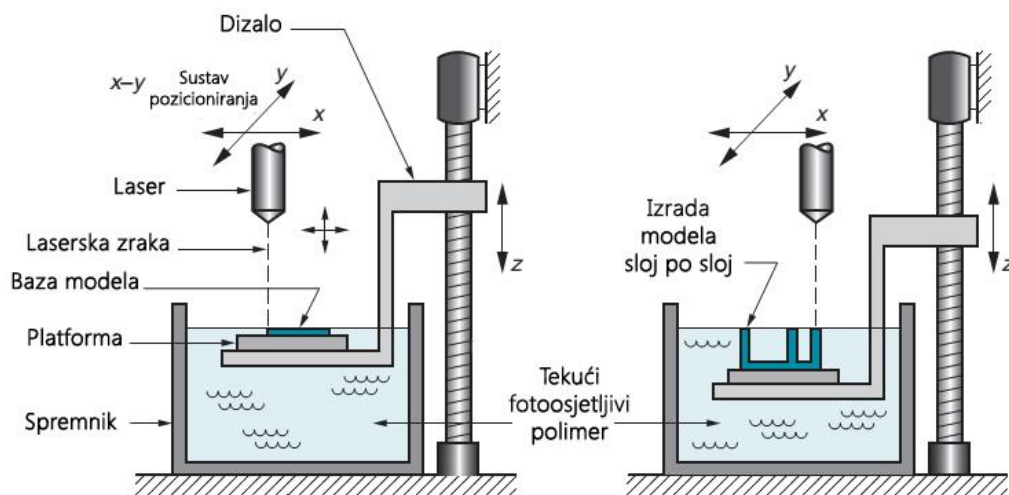


### 2.3.2. SLA – stereolitografija

SLA (*Stereolitografija*) stereolitografija je postala jedna od najpopularnijih metoda brze izrade prototipova zbog svoje točnosti i završne kvalitete modela. Pomoću ove tehnologije model se gradi koristeći fotoosjetljive polimere u tekućem stanju koji se skrućuju pod utjecajem UV svijetla. Najkorišteniji materijali su bazirani na akrilatu i epoksi smolama.

Do skrućivanja dolazi kada laser postepeno projicira presjek modela na površinu tekućeg polimera. Svaki izrađeni sloj se pomiče po z-osi prema dolje, a veličina pomaka definira debljinu sloja prema kojoj se može klasificirati preciznost stroja. Što je pomak manji, to je prijelaz između slojeva čišći i manja je potreba za naknadnom strojnom obradom.

Po završetku svih slojeva model se vadi iz sirovine koja se cijedi ili ručno odvaja. Potom se ispire u otapalu kako bi se uklonio višak, te se stavlja u UV peć radi završnog srašćivanja. [9]



Slika 12. Stereolitografija SLA [12]

#### PREDNOSTI:

- površina modela je glatka i tolerancijski točna,
- homogena struktura,
- moguća izrada kompleksnih dijelova malih dimenzija, uz mogućnost izrade oštih rubova.

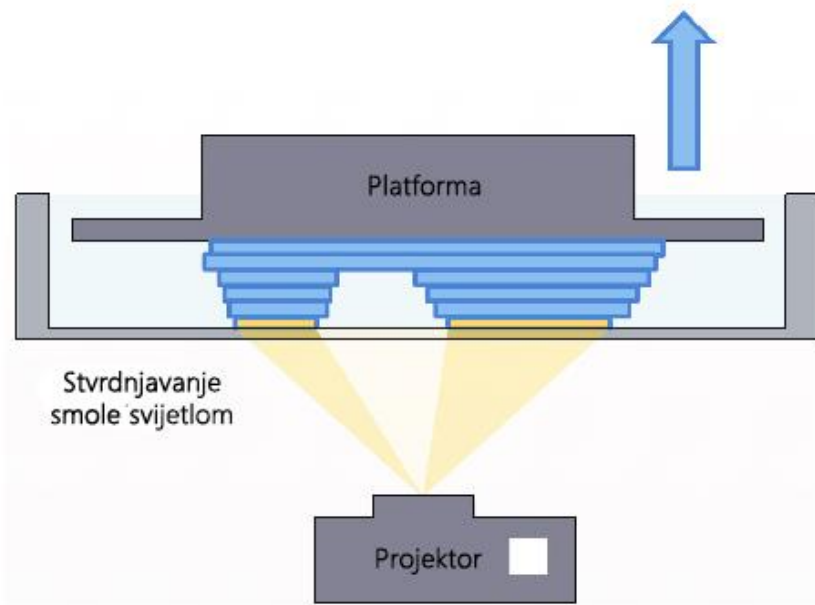
#### NEDOSTACI:

- korištenje potporne strukture,
- naknadna obrada – UV peć,
- uzak izbor materijala i njihova visoka cijena,
- kratko trajanje lasera. [11]

### 2.3.3. DLP - očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom

DLP (*Digital Light Processing*), očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom, je tehnologija koja koristi fotoosjetljivu akrilnu smolu na koju se pomoću projektor smještenog ispod radne platforme, projicira slika presjeka modela za taj sloj. Smola se nalazi u komori iznad projektor. Nakon što smola očvrstne pomoću svjetlosti projicirane iz projektor, platforma se podiže za debljinu novog sloja i postupak počinje ponovno.

Ovaj postupak tiskanja modela ima raznoliku upotrebu u praksi. Koristi se u medicini za izradu umjetnih pužnica i njihovih dijelova, stomatologiji, izradi nakita itd. [9]



Slika 13. DLP tehnologija [13]

#### PREDNOSTI:

- velika brzina ispisa,
- preciznost izrade modela,
- različita područja primjene,
- niska cijena pisaa.

#### NEDOSTACI:

- visoka cijena materijala,
- mala dimenzija platforme/komore,
- ograničenje veličine modela. [11]

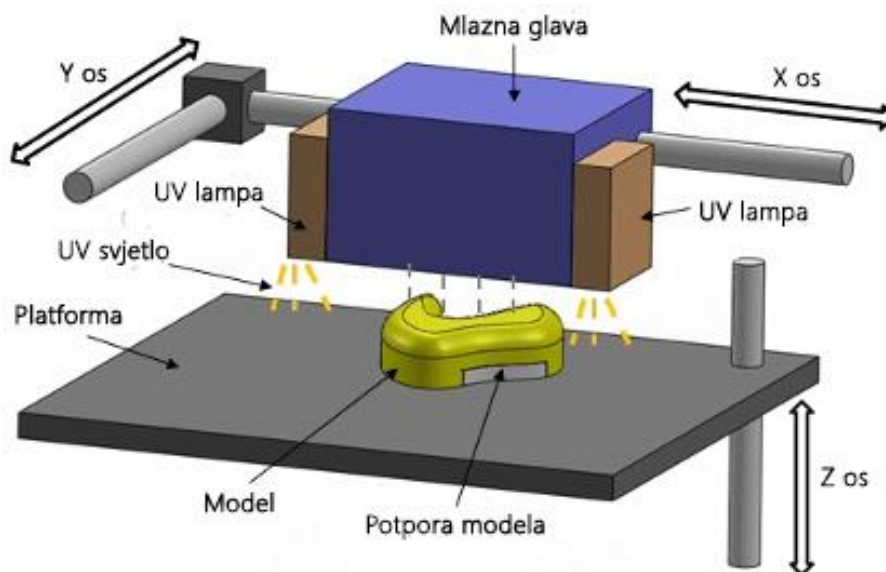
### 2.3.4. 3D PJP - PolyJet

PolyJet je tehnologija poznata i pod nazivom MJP (*MultiJet Printing*), objedinjuje dobre strane stereolitografije i 3D tiskanja.

Pri izradi modela na radnu podlogu se nanosi vrlo tanak sloj fotoosjetljivog polimernog materijala koji se potom očvršćuje pomoću UV svjetla. Radna platforma se zatim spušta za jednu debljinu sloja i postupak se ponavlja do završetka modela.

Potporna struktura se uklanja pomoću otapala ili mehaničkim postupcima kako bi model bio spreman za praktičnu upotrebu.

Koristi se u medicini za izradu implantata, za izradu kompleksnih dijelova raznih uređaja i strojeva, automobilske industriji i izradi nakita. [9]



Slika 14. PolyJet tehnologija [14]

#### PREDNOST:

- brza i precizna izrada kompleksnih modela,
- glatka površina modela,
- mogućnost ispisa više dijelova istovremeno bez gubitka brzine,
- može koristiti gotovo beskonačan broj nijansi boja.

#### NEDOSTACI:

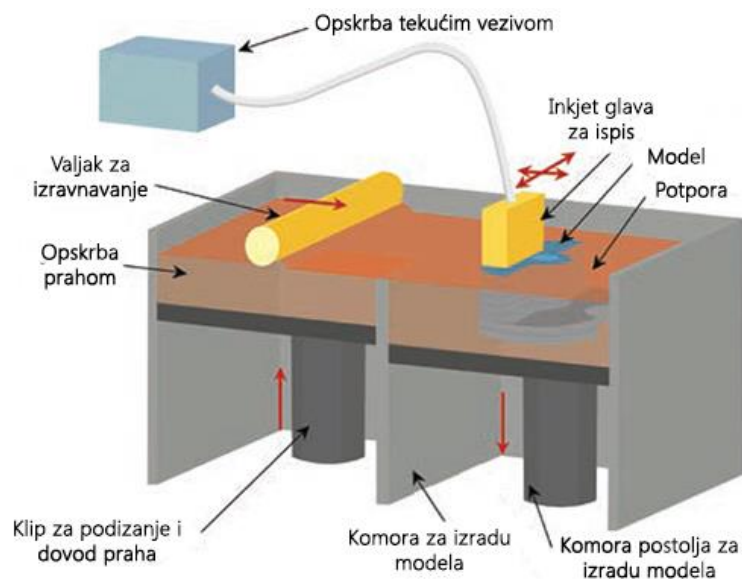
- loša mehanička svojstva, modeli su osjetljivi na toplinu i svjetlost,
- visoka cijena pisača i materijala[11]

### 2.3.5. 3DP – 3D tisak

3DP (*Three dimensional Printing*), 3D tisak je tehnologija koja se naziva i 3D inkjet tisak jer se temelji na principu rada tintnih pisača.

Model se ispisuje na sloju praškastog materijala po kojem se pomoću glave pisača (inkjet mlaznicama) nanosi vezivo. Nakon završetka izrade jednog sloja, platforma se pomiče, odnosno spušta za željenu debljinu sljedećeg sloja, nanosi se novi sloj praškastog materijala i postupak se ponavlja. Prah također služi i kao potpora modelu, te se zbog njega gotov model lakše vadi. Zaostali prah na modelu dovoljno je ispuhati.

Za izradu modela moguće je koristiti gotovo bilo koju kombinaciju praškastog materijala i veziva. Mehanička svojstva mogu se poboljšati naknadom obradom kemikalijama te ih se može i obojiti raznim bojilima. Najčešće korišteni materijali su polimeri, metali i keramika. [9]



Slika 15. 3D tisak [15]

#### PREDNOSTI:

- velika preciznost i brzina izrade,
- materijali nisu štetni za zdravlje,
- nema gubitaka materijala za izradu potporne strukture,
- modeli su vrlo kvalitetnog izgleda,
- mehanički izdržljivi modeli, ovisno o daljnjoj obradi.

#### NEDOSTACI:

- mali izbor materijala,
- dimenzijska točnost postaje lošija kod većih izrada,
- potreba za naknadnom obradom kako bi se osigurala upotrebljivost. [11]

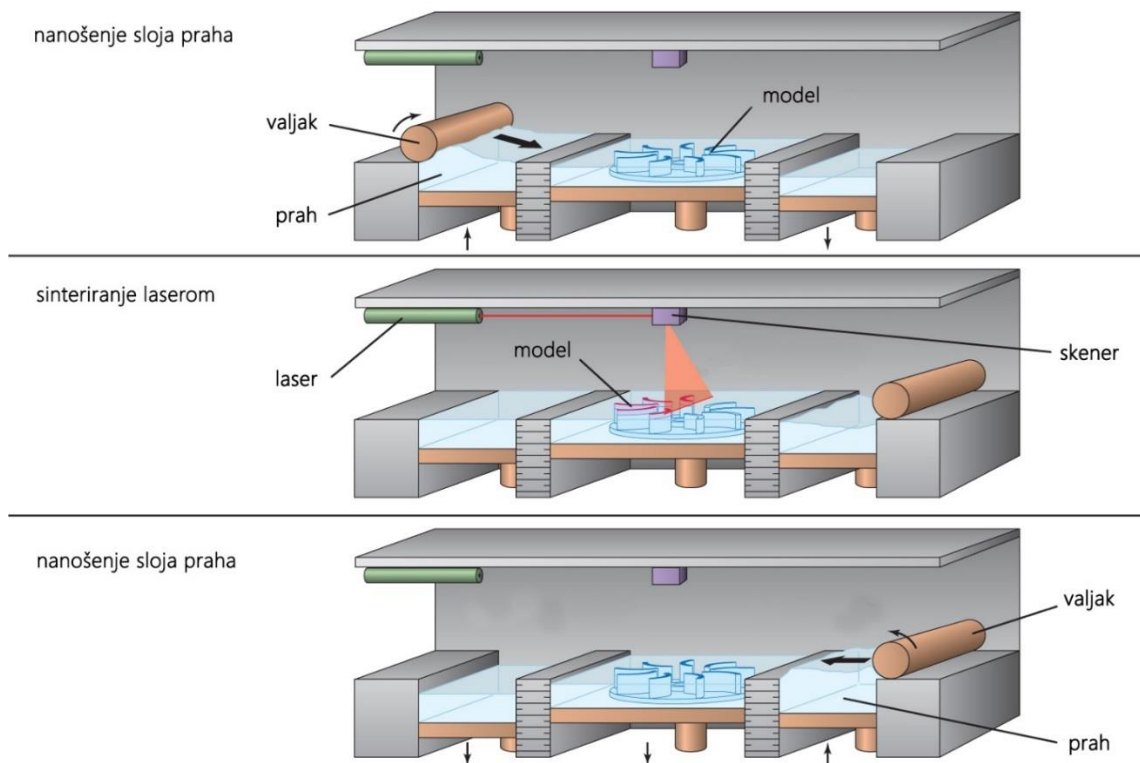
### 2.3.6. SLS – selektivno lasersko sinteriranje modela

SLS (*Selective Laser Sintering*) selektivno lasersko sinteriranje je tehnologija koja se temelji na sinteriranju praškastog materijala, odnosno postupku očvrnuća praškastog materijala pomoću temperature i tlaka bez taljenja materijala. Laserska zraka spaja čestice praha (najlona, voska, elastomera ili metala) i stvara čvrstu masu koja odgovara CAD dizajnu. Model nastaje sloj po sloj na platformi koja se nalazi neposredno ispod površine u spremniku s topljivim prahom koji se nanosi pomoću rotirajućih valjaka iz komore gdje se prethodno prah zagrijavao. Platforma se spušta za visinu sljedećeg sloja i prah se ponovno nanosi sve dok model nije gotov.

Prah u svakom sloju pomaže u potpori modela tako da model ima konstantnu potporu. Višak praha se usisava u pomoćne komore te se kasnije reciklira, a sav prah koji ostane na modelu kasnije se rješava ispuhivanjem. Većina modela izrađena ovom tehnologijom spremna je za uporabu odmah nakon čišćenja, ovisno o materijalu koji se koristi.

Najčešći materijal koji se koristi je polikarbonat i najlon.

Gotov model ima matiranu praškastu površinu, a po potrebi se može brusiti i bojati kako bi se postigla glatka površina. [9]



Slika 16. SLS tehnologija [16]

#### PREDNOSTI:

- izrada kompleksnijih dijelova u usporedbi sa drugim tehnologijama,
- korištenje raznih materijala polimeri, vosak, metal, keramika, itd.,
- nije potrebno naknadno sušenje dijelova,
- dodatna potpora modela nije potrebna budući se tijekom procesa model podupire viškom praha,
- dijelovi se mogu graditi jedan preko drugog.

#### NEDOSTACI:

- praškasti materijal mora se zagrijati do temperature ispod točke taljenja prije samog procesa što traje oko 2 sata, a nakon što je izrada modela gotova treba 5 do 10 sati da se ohladi,
- glatka površina može se dobiti samo naknadnom završnom obradom, jer ovisi o veličini čestica praha i laseru što rezultira time da je površina uvijek porozna,
- proces je skup pošto spremnik mora imati kontinuiranu opskrbu dušikom kako bi se osigurali dobri uvjeti za sinteriranje,
- stvaranje toksičnih plinova. [11]

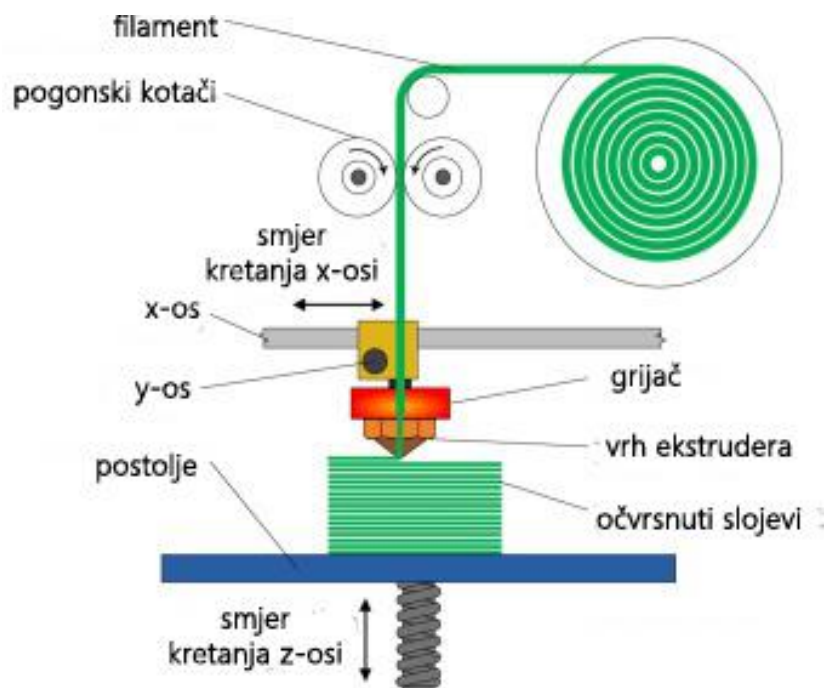
### 2.3.7. FDM – taložno očvršćivanje

FDM (*Fused Deposition Modeling*), taložno očvršćivanje je druga najčešće korištena tehnologija za brzu izradu prototipa, nakon stereolitografije. Ovom tehnologijom model se stvara u tankim slojevima termoplastičnog filameta. U kvaliteti izrade modela veliku ulogu ima kvaliteta stroja.

Termoplastična grijana vlakna u obliku žice što se naziva filament zagrijava se u ekstruderu, te se izvlači iz vrha koji se kreće u x-y ravnini. Kontrolirana glava za ekstrudiranje ostavlja vrlo tanku dozu filameta na platformi kako bi formirao prvi sloj. Platforma je grijana kako bi se ostvario dobar kontakt prvog sloja. Nakon što se platforma spusti, ekstruzijska glava nanosi drugi sloj na prvi, te tako sloj po sloj se stvara gotov model. Potpora se također nanosi uzduž modela, te se kasnije odstranjuje ručno.

U praksi se susrećemo sa nekoliko izvedbi ove vrste 3D pisača kod kojih se model ispisuje pomoću jedne vrste materijala, dok se potpora ispisuje pomoću druge vrste materijala, a dostupan je i potporni materijal topljiv u vodi koji se otklanja na jednostavan način uranjanjem u posudu s vodom nakon čega je model spreman za dodatnu mehanički obradu, a po potrebi i primjenu.

Ova tehnologija korištena je za izradu modela za eksperimentalni dio rada. [9]



Slika 17. FDM tehnologija [17]

Izgled i glatkoća površine ovisi o debljini sloja. Ukoliko se želi brza izrada modela, koristit će se deblji sloj, prema tome što je sloj tanji to je i duža izrada. Raspon debljine sloja je od 0,05 – 0,5 mm što ovisi i o promjeru mlaznice.

Često upotrebljavani materijali su akrilonitril/butadien/stiren (ABS), polilaktid (PLA), polikarbonat (PC), polistiren visoke žilavosti (HIPS), vosak i polietilen teraftalat glikol modificirani (PETG).

#### PREDNOSTI:

- brza i jeftina izrada modela sa niskim početnim ulaganjem,
- moguće su različite boje,
- minimalni otpad,
- izrađene modele moguće je naknadno obrađivati,
- nije potrebno hlađenje modela,
- nema izloženosti otrovnim kemikalijama, laserima ili kupelji od tekućeg polimera,
- sustav ne troši materijal za vrijeme ili nakon izrade modela, ne zahtijeva čišćenje,
- materijali se mogu brzo mijenjati.

#### NEDOSTACI:

- ograničena točnost zbog oblika korištenog materijala: žica promjera 1,27 mm,
- čvrstoća modela je slaba okomito na os izrade,
- moguće nepredvidivo skupljanje materijal,
- nužna je primjena potpornih struktura za složenije dijelove,
- nije moguće izraditi oštre rubove jer je mlaznica kružnog oblika,
- mehanička svojstva modela ovise o položaju izrade modela na radnoj podlozi (platformi). [11]



## 2.4. MATERIJALI ZA ADITIVNE TEHNOLOGIJE

- **ABS** (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) – akrilonitril butadien stiren

ABS ima višu točku tališta od ostalih filamenata i potrebna mu je grijana platforma kako bi se spriječilo savijanje. Nešto je jači od PLA. Njegova čvrstoća i izdržljivost produžuje vijek trajanja modela kod korištenja. Ima lošu otpornost na UV zračenje, što nije idealno ako se model koristiti na otvorenom. Također, ABS ispušta štetne pare tijekom ispisa, pa se preporuča zatvoreno kućište i ventilacija. [18]

- **PLA** (*Polylactic Acid*) – polilaktidna kiselina

PLA je napravljen od bio-materijala poput kukuruznog škroba, šećerne trske i korijena tapioke koji ga čini bio-razgradljivim, te je tako ekološki najprihvatljiviji materijal. Kada se zagrijava, daje slatku aromu koja miriše na sirup. Za razliku od ABS-a, on ne ispušta toksične pare, tako da zaštitno kućište nije potrebno. Općenito, PLA zahtijeva nižu temperaturu za ispis od ABS-a i ne treba grijanu platformu. Spoj između slojeva je vrlo čvrst, međutim, sam materijal je krhak i lako može puknut. [18]

- **PET** (*Polyethylene terephthalate*) – polietilentereftalat

PET je fleksibilan i čvrst, što ga čini izvrsnim materijalom za funkcionalne i kvalitetne proizvode. Kemijski je otporan i ne upija vodu. PET ima sličan cjenovni opseg kao PLA i ABS i mehanički je sličan ABS-u iako se može tiskati bez grijane platforme. Vezivanje slojeva je vrlo čvrsto što omogućuje uporabu u mehaničke svrhe. [18]

- **PETG** (*Polyethylene terephthalate glycol*) – polietilen teraftalat glikol modificirani

PET je najčešće korišten polimerni materijal na svijetu, a PETG je modificirana verzija. G označava glikol modificiran, koji se dodaje sastavu materijala tijekom polimerizacije. Kao rezultat imamo filament koji je čišći, manje lomljiv i lakši za uporabu od osnovnog PET-a. [19]

- **ASA** (*Acrylonitrile Styrene Acrylate*) - akrilonitril stiren akrilat

Materijal otporan na vlagu, temperaturu, kisik i UV zračenje. Odlična kemijska i temperaturna otpornost. Za printanje nije potrebna zatvorena radna komora. Koristan je za printanje modela za terensku uporabu. [19]

- **PC** (*Polycarbonate*) – polikarbonat

Zbog svojih svojstava ima široku primjenu. Koristi se u automobilskoj industriji, prehrambenoj industriji za izradu ambalaže, zrakoplovnoj, medicinskoj te mnogim drugim industrijama. Materijal kemijski postojan prema atmosferskim utjecajima. [19]

- **NAJLON** (*Polyamide*) – poliamid

Najlon je materijal koji se odlikuje vrlo velikom čvrstoćom i izdržljivošću. Materijal je fleksibilan, pogodan posebno za tanje modele. Neke se vrste najlona koriste u medicinskim proizvodima, igračkama i proizvodima posebno odobrenim od strane FDA (Američka agencija za hranu i lijekove). Za pravilno skladištenje treba ga čuvati u ne-vlažnom okruženju. [18]

- **HIPS** (*High Impact Polystyrene*) – polistiren

HIPS se primarno koristi kao pomoćni materijal za ABS i odličan je kada se koristi sa FDM pisačem s dvostrukim ekstruderom. HIPS je izvrstan materijal za podršku jer se lako otapa u Limonenu. Na taj način potpora se jednostavno uklanja nakon izrade modela koji ostaje čist. Ovo je idealan materijal za izradu modela koji imaju pregrade ili složene dijelove. Također se može koristiti samostalno kao osnovni materijal. [18]

- **SMOLA ZA 3D ISPIS**

Foto polimer. Smola je sjajna za izradu modela koji neće biti podvrgnut naprezanju uslijed funkcionalne upotrebe. Dolazi u raznim bojama, a površina modela nakon izrade je glatka. Budući da su SLA pisači sposobni proizvesti sitnije detalje u dijelovima, ovu smolu češće koriste inženjeri ili dizajneri koji prvenstveno daju prednost izgledu a ne funkciji. [18]

- **METALNI FILAMENT**

Filamenti napravljeni miješanjem PLA s metalnim prahom. Četiri najpopularnija metalna kompozita su bronca, bakar, čelik i željezo. Zbog metalnog praha do 4 puta je teži od standardnog PLA. Kako bi se postigao najbolji efekt metalnog izgleda potrebna je obrada nakon tiskanja. [18]

- **DRVENI FILAMENT**

Filamenti izrađeni od kombinacije polimernog materijala pomiješanog sa drvenim vlaknima i polimera koji mu omogućuje ekstrudiranje pomoću sličnih postavki kao i PLA. Model oponaša drvo izgledom i pod dodirrom. Kako se može mijenjati boja i temperatura, moguće je dobiti uzorak sličan drvu. [18]

- **PPSF/PPSU** (*P*) – poli (fenilen-sulfon)

Od svih materijala koji se koriste u FDM tehnologiji ovo je materijal s najvišom toplinskom otpornošću. Dobra mehanička svojstva, odlična kemijska postojanost, te otpornost na benzin i otapala. [19]

## 2.5. EKOLOGIJA I 3D PRINT

Prednosti 3D ispisa s gledišta zaštite okoliša tek se trebaju vidjeti, a njegova održivost također je misterija. Da li je 3D print Eco-friendly tehnologija?

### PREDNOSTI:

- 3D printanje na licu mjesta i na zahtjev u usporedbi sa svim ostalim proizvodnim procesima ipak ima daleko manji utjecaj na naše okruženje u usporedbi s tradicionalnom proizvodnjom. Pogotovo kada se uzme u obzir cijeli životni ciklus proizvoda, od vađenja sirovine do kraja vijeka trajanja proizvoda, pogotovo u pogledu ugljičnog dioksida, [20]
- u proizvodnji 3D pisači stvaraju manje otpada koristeći malo više količine materijala pri izradi, no potpuno uklanjajući potrebu za procesom bušenja, rezanja i glodanja,
- troškovi montaže, transporta, logistike, održavanja i skladištenja u potpunosti su ili gotovo eliminirani. [21]

### NEDOSTACI:

- ova tehnologija koristi velike količine energije, veće od one koju koriste npr. strojevi za glodanje ili bušenje. Istraživanje (Atkins Project) provedeno na Sveučilištu Loughborough u Velikoj Britaniji otkrilo je da za dobivanje istog predmeta iste težine neki postupci 3D ispisa trebaju 50 do 100 puta više električne energije od klasičnih strojeva, [20]
- oslanja se na korištenje polimernih materijala za tiskanje dok se polimerni materijal kao cjelina ne smatraju ekološki prihvatljivim materijalima,
- studije pokazuju da industrijski 3D pisači za sobom ostavljaju značajan nusprodukt koji u većini slučajeva nije prikladan za ponovnu upotrebu. [21]

Neprestana težnja ekološkoj proizvodnji pomoću 3D ispisa postiže se upotrebom biorazgradivog polimernog materijala na bazi kukuruza (PLA). Iako se mnogi 3D pisači oslanjaju na polimerne materijale, industrijski 3D pisači imaju neograničene mogućnosti korištenja raznih materijala kao što su metal, keramika, drvo, odnosno mogućnosti su beskrajne.

Krajnji je cilj uklanjanje toksičnih materijala i negativnog utjecaja na okoliš. [22]

Primjeri:

### 3D Printlife – Enviro Eco-Friendly filament

3D Printlife Enviro ABS ili PLA su specijalno izrađeni filament sa bio-aditivima koji im omogućuju da se razgrađuju pomoću bakterija u prilagođenom okruženju, bez promjene karakteristika osnovnog materijala. Filament je namotan na kolut od recikliranog kartona, te dolazi upakiran u kartonskoj kutiji. [23]



Slika 18. Eco-friendly filament [23]

### ProtoCycler tvrtke ReDeTec

ProtoCycler je prvi sustav za recikliranje otpadnog polimernog materijala u novi filament.

Moguće je prilagoditi boju i materijal novog filameta za 3D printer. Recikliranjem otpadnih filamenata i modela doprinosi se očuvanju prirode i štedi se novac.

ProtoCycler je jedini ekstruder na tržištu koji ima uključenu drobilicu koja priprema otpadni materijal za pretvorbu u novi filament. [24]



Slika 19. ProtoCycler jedini reciklira otpadni polimerni materijal u novi filament [24]

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Plan eksperimenta:

- crtanje 3D modela epruvete standardnih dimenzija u CAD programu,
- pohranjivanje modela u .STL formatu,
- učitavanje datoteke u program Slic3r,
- izrada tri nove datoteke za tri varijante ispisa modela sa različitim parametrima ispune
  - 15%, 45% i 75%,
- pohranjivanje u .GCODE formatu,
- priprema 3 vrste materijala – PLA, FACILAN C8 i PETG,
- izrada epruveta na 3D printeru FDM tehnologijom,
- izrada ukupno 27 epruveta za testiranje, 3 epruvete za svaki parametar ispune (3 varijante), odnosno po 9 epruveta od istog materijala,
- utvrđivanje načina označavanja, te označavanje svake epruvete prije ispitivanja,
- ispitivanje epruveta na vlak pomoću instrumenta kidalice u laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu,
- prikaz rezultata dobivenih na instrumentu, pomoću tablica i dijagrama,
- analiza rezultata,
- zaključak.

Korištena je FDM tehnologija.

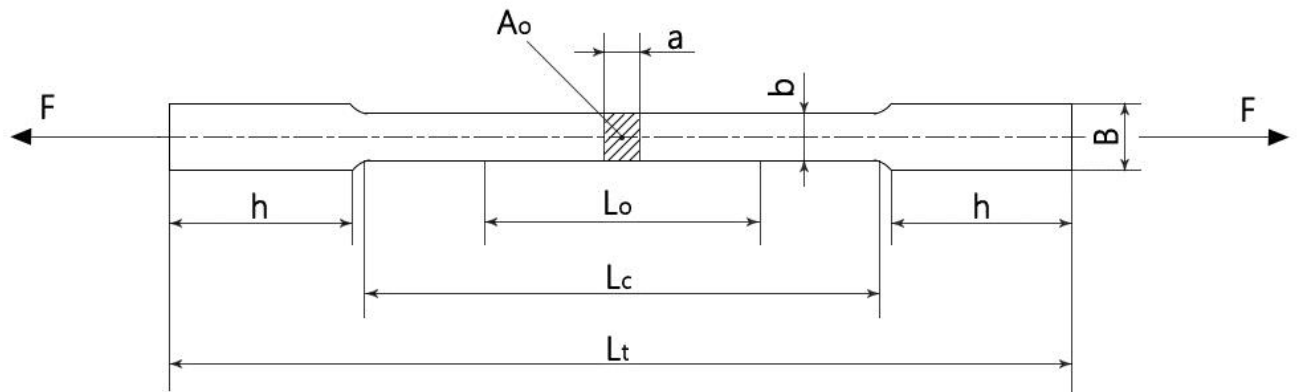
Materijal se nalazi na vanjskom dijelu printera, u obliku žice namotan na kolut. Pomoću pogonskih kotačića materijal se uvlači u ekstruder gdje se zagrijava do tekućeg stanja, te se kroz vrh ekstrudera nanosi na podlogu sloj po sloj. Pri izradi jednog sloja ekstruder se kreće u x i y ravnini, nakon što je sloj završen po z ravnini podiže se za željenu debljinu sloja, te nastavlja nanošenje slojeva dok model nije gotov.

Model koji je izrađen nije komplicirane geometrije tako da potporna struktura nije potrebna.

### 3.1. EPRUVETE

#### 3.1.1. DIMENZIJE EPRUVETA I CRTANJE CAD MODELA

Vlačno ispitivanje u svrhu određivanja ovisnosti naprezanja i deformacije provedeno je na plosnatim epruvetama.



Slika 20. Plosnata epruveta za vlačno ispitivanje

$a$  – debljina epruvete,  $mm$

$b$  – širina epruvete,  $mm$

$B$  – širina glave epruvete,  $mm$

$h$  – visina glave epruvete,  $mm$

$L_0$  – početna mjerna duljina epruvete,  $mm$

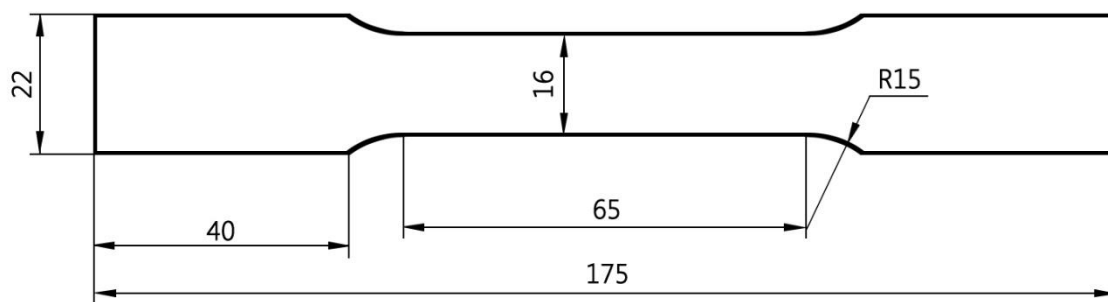
$L_t$  – ukupna duljina epruvete,  $mm$

$L_c$  – duljina ispitnog dijela epruvete,  $mm$

$A_0$  – poprečni presjek,  $mm^2$

Tablica 1. Standard za dimenzije vlačne epruvete oblik E

$a$	$b$	$L_0$	$B_{min}$	$h_{min}$	$L_{cmin}$	$L_{tmin}$
3	8	30	12	26	38	115
4	10	35	15	30	45	135
5	10	40	15	30	50	140
<b>5</b>	<b>16</b>	<b>50</b>	<b>22</b>	<b>40</b>	<b>65</b>	<b>175</b>
6	20	60	27	50	80	210
7	22	70	29	55	90	230
8	25	80	33	60	105	260
10	25	90	33	60	115	270
10	30	100	40	70	125	300
12	26	100	34	65	125	295
15	30	120	40	70	150	325
18	30	130	40	70	160	335



Slika 21. Plosnata epruveta sa dimenzijama za izradu

$$a = 5 \text{ mm}$$

$$b = 16 \text{ mm}$$

$$L_0 = 50 \text{ mm}$$

$$B = 22 \text{ mm}$$

$$h = 40 \text{ mm}$$

$$L_c = 65 \text{ mm}$$

$$L_t = 175 \text{ mm}$$

- kod uzoraka s pravokutnim poprečnim presjekom širina glave mora biti veća od širine ispitnog dijela uzorka ( $\approx 1,2 b + 3 \text{ mm}$ ),
- visina glave epruvete ( $\approx 2 b + 10 \text{ mm}$ ),
- ispitna duljina epruvete  $L_c \geq L_0 + 1,5 \sqrt{A_0} [\text{mm}]$ ,
- prelazni radijus između glave i ispitnog dijela mora iznositi minimalno 20 mm.

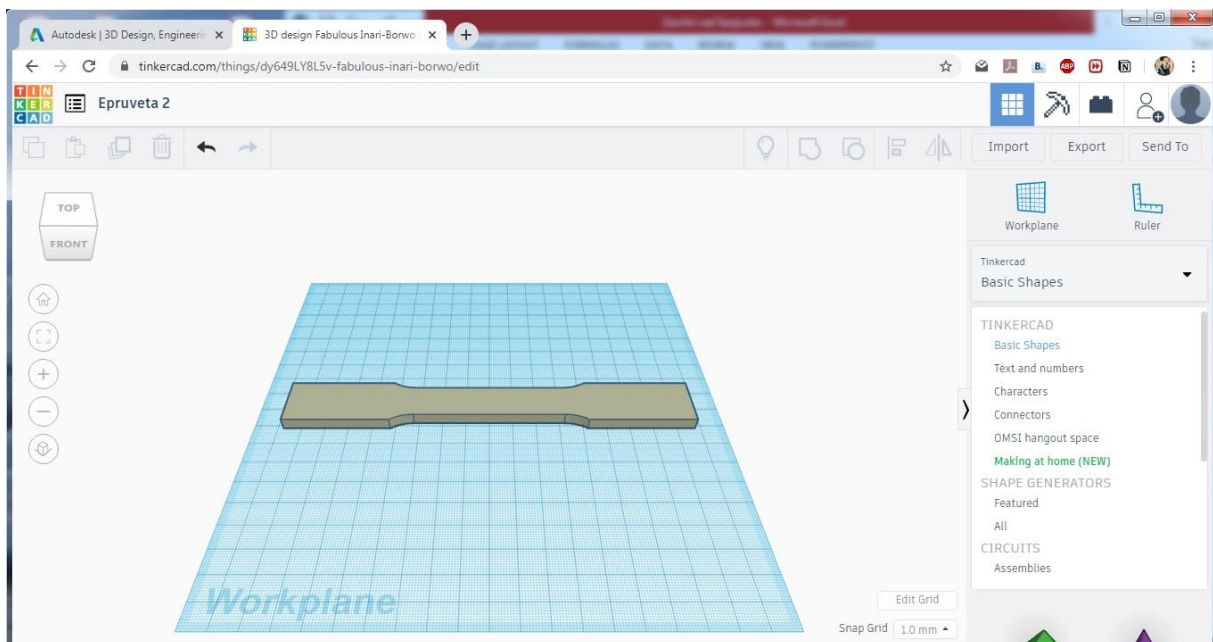
$$A_0 = a \times b = 5 \times 16 = 80 \text{ mm}^2 \quad (5)$$

$$L_0 = 5,65 \times \sqrt{A_0} = 5,65 \times \sqrt{80} = 50,53 \text{ mm} \quad (6)$$

$$L_c \geq L_0 + 1,5 \sqrt{A_0} \geq 50,53 + 1,5 \sqrt{80} \geq 63,95 \text{ mm} \quad (7)$$

Za crtanje i pohranjivanje u .STL format korišten je besplatan CAD online softver:

AUTODESK – TINKERCAD



Slika 22. Crtanje epruvete u CAD programu



### 3.1.2. MATERIJALI ZA IZRADU EPRUVETA

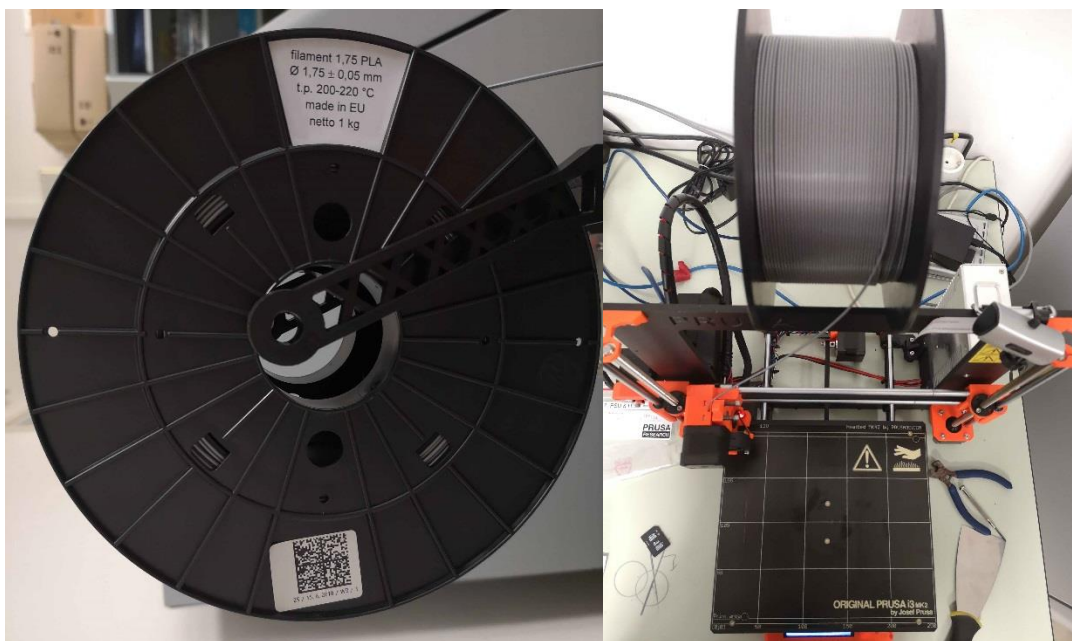
Korištena su 3 materijala: PLA, PETG I FACILAN C8.

Promjer filameta je 1,75 mm.

- **PLA**

EcoPLA proizvođač 3DJAKE.

- PLA je netoksičan, organski razgradiv materijal za 3D ispis,
- jeftin i visokokvalitetan,
- jedan od najomiljenijih materijala za 3D ispis zbog svojih svojstava i dobre ispisivosti,
- djelomično razgradiv u okolišnim uvjetima,
- može se i kompostirati,
- izrađen od obnovljivih izvora kukuruz i škrob. [25]



*Slika 23. PLA filament*

- **FACILAN C8**

- novi biorazgradivi materijal,
- visoka čvrstoća i žilavost,
- laka obradivost,
- ima najbolja svojstva adhezije sloja,
- površina modela je glatka,
- izrazita finoća detalja,
- vrlo široka namjena. [25]



*Slika 24. FACILAN C8 filament [25]*

- **PETG**

- PETG je bistra amorfna termoplastika s nižim talištem od PET-a,
- idealan za 3D printanje funkcionalnih predmeta za unutarnju i vanjsku namjenu,
- temperaturno stabilan na 80°C,
- iznimno izdržljiv,
- otporan na UV zračenje,
- odličan omjer cijene i kvalitete,
- izvrsna optička svojstva,
- širok raspon kemijske otpornosti,
- ekološki prihvatljiv materijal. [25]



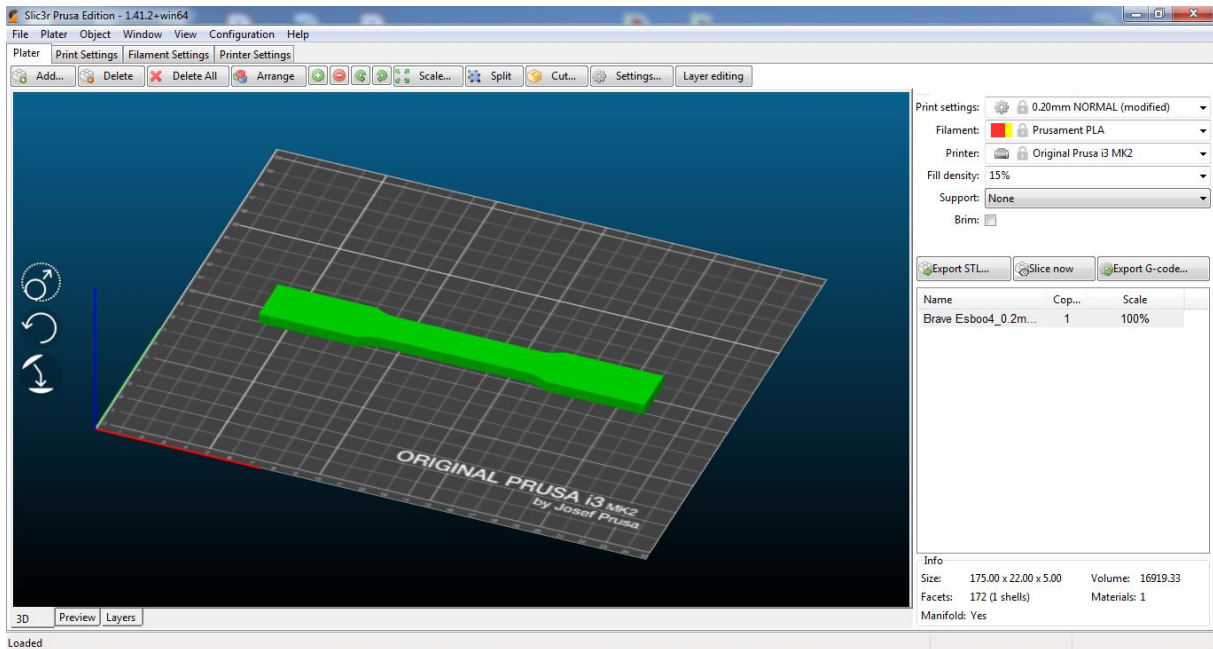
*Slika 25. PETG filament [25]*

## 3.2. IZRADA EPRUVETA FDM TEHNOLOGIJOM

### 3.2.1. PRIPREMA CAD MODELA ZA 3D PRINTANJE

Za pripremu modela za 3D printanje korišten je program Slic3r, besplatan softver otvorenog koda (open source) u koji se učitava prethodno pohranjena .STL datoteka iz CAD programa.

Pomoću njega se određuju parametri ispisa svakog sloja, te se u konačnici generira .GCODE datoteka koju printer prepoznaje i po njoj izrađuje željeni model sa svim traženim parametrima.



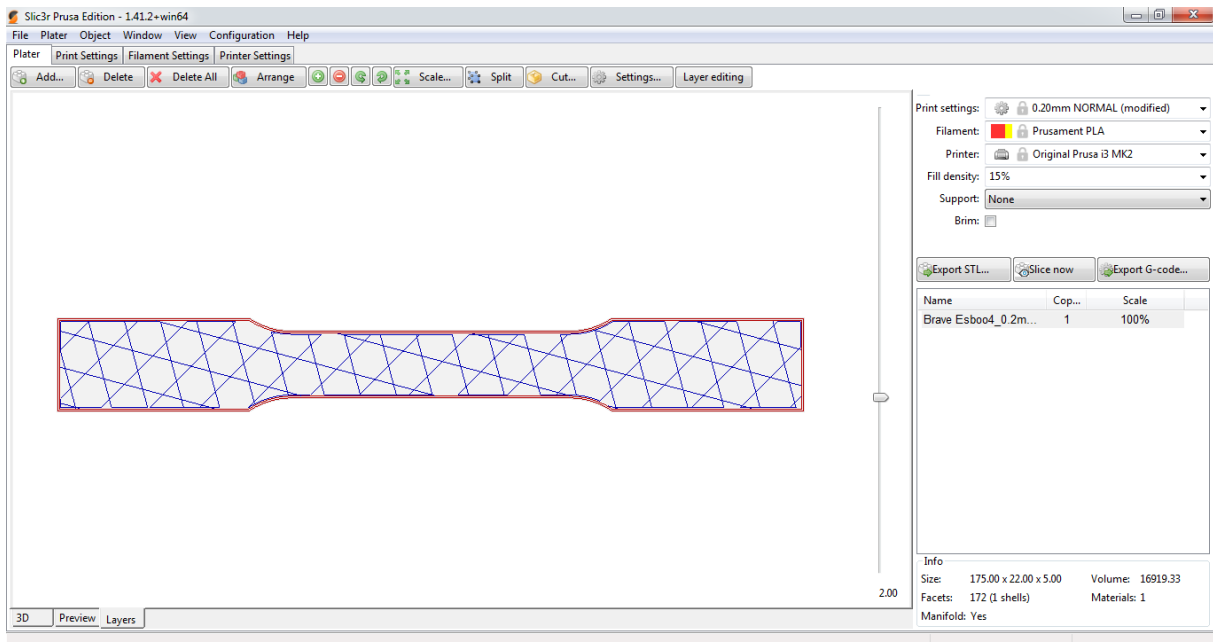
Slika 26. Sučelja Slic3r-a za generiranje .gcode datoteke

Važni faktori kod izrade epruvete:

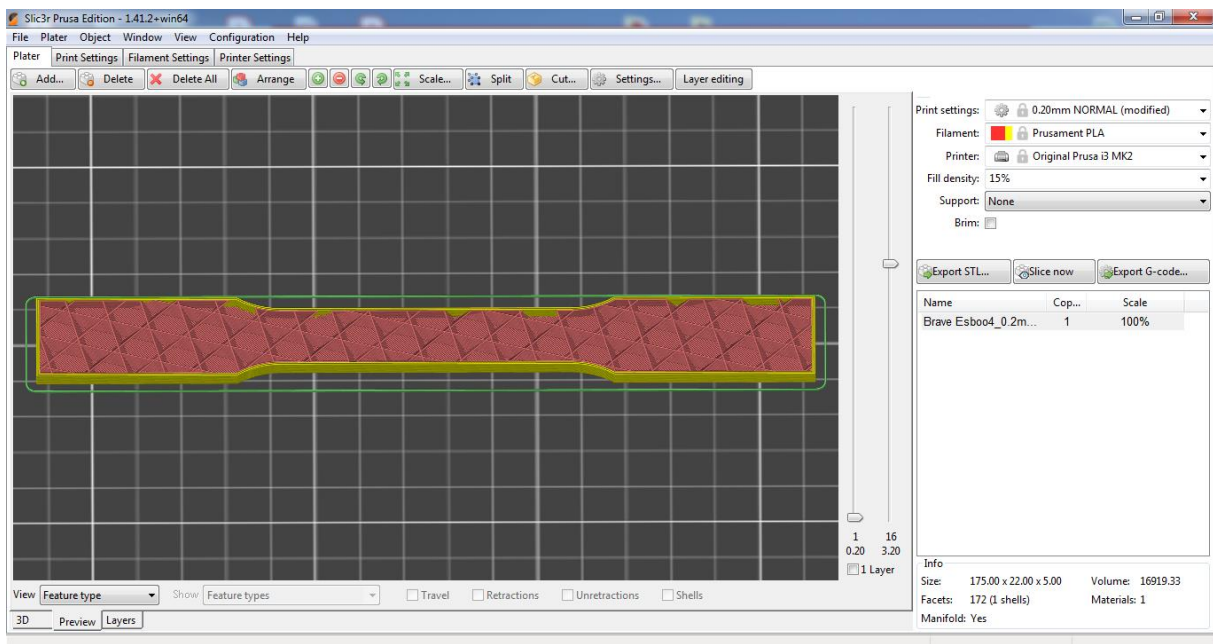
- orijentacija epruvete - odabrana je polegnuta orijentacija kao na slici jer tako se dobivaju najbolja mehanička svojstva epruvete,
- ispunjenost samog modela.

Pripremljene su 3 datoteke sa razlikom u parametru ispune od 15%, 45% i 75%.

15% ispuna:

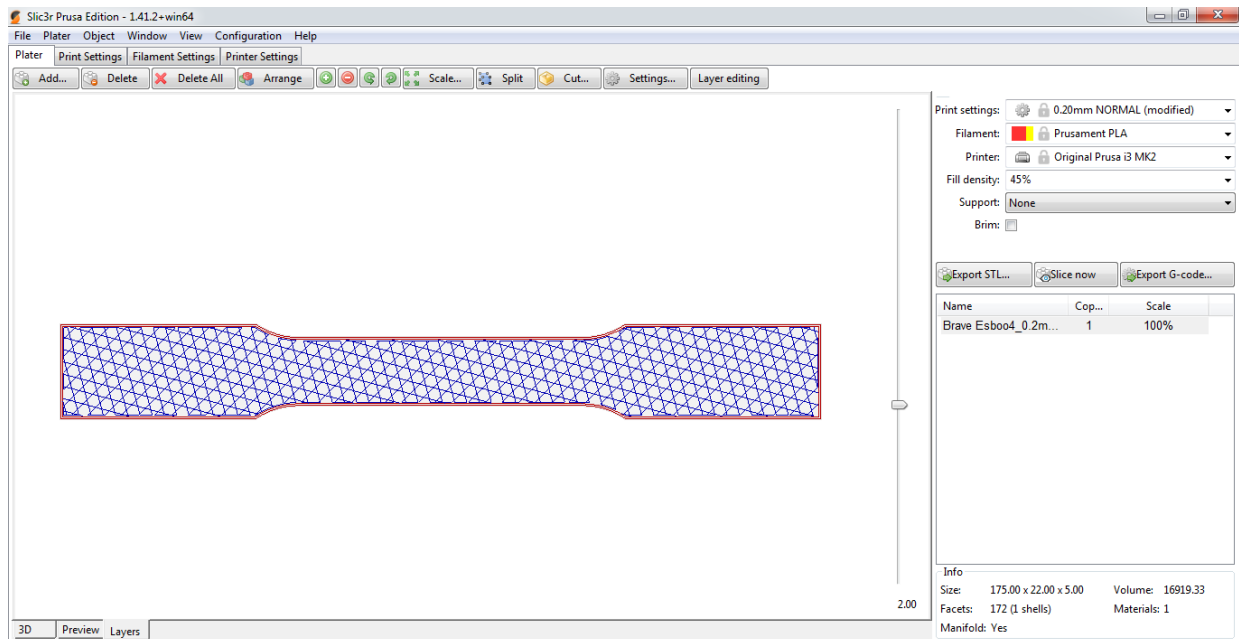


Slika 27. Podešavanje parametara 15% ispune – 1. sloj

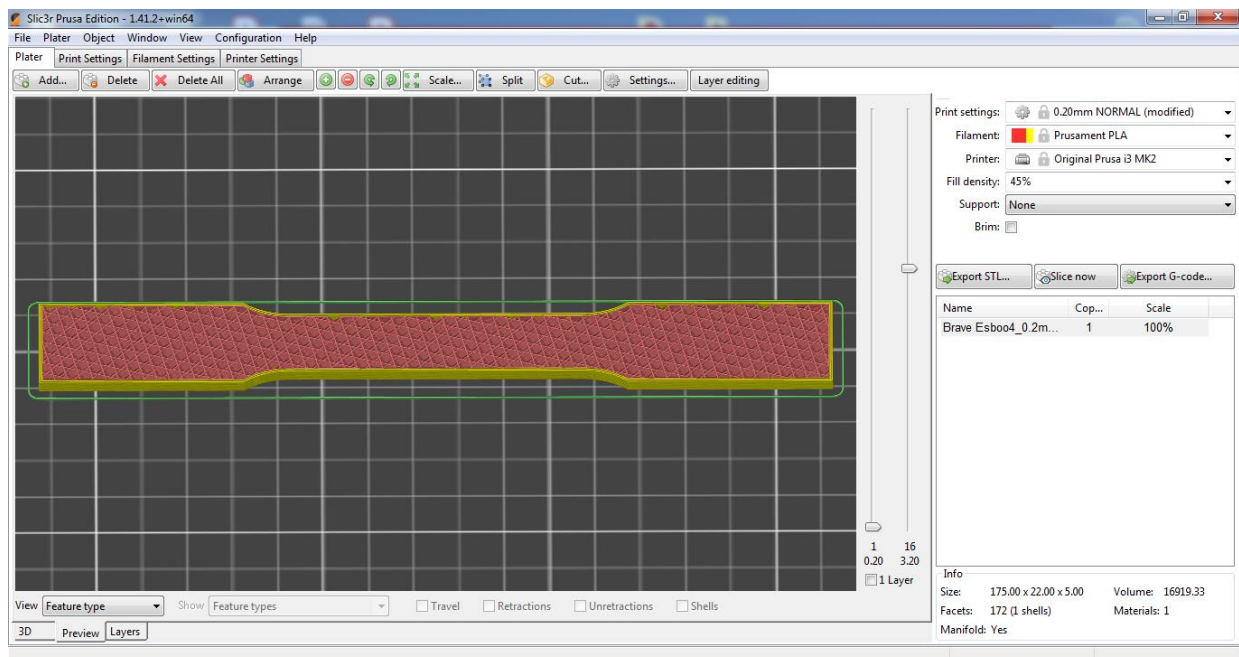


Slika 28. Podešavanje parametara 15% ispune – pregled modela

45% ispuna:

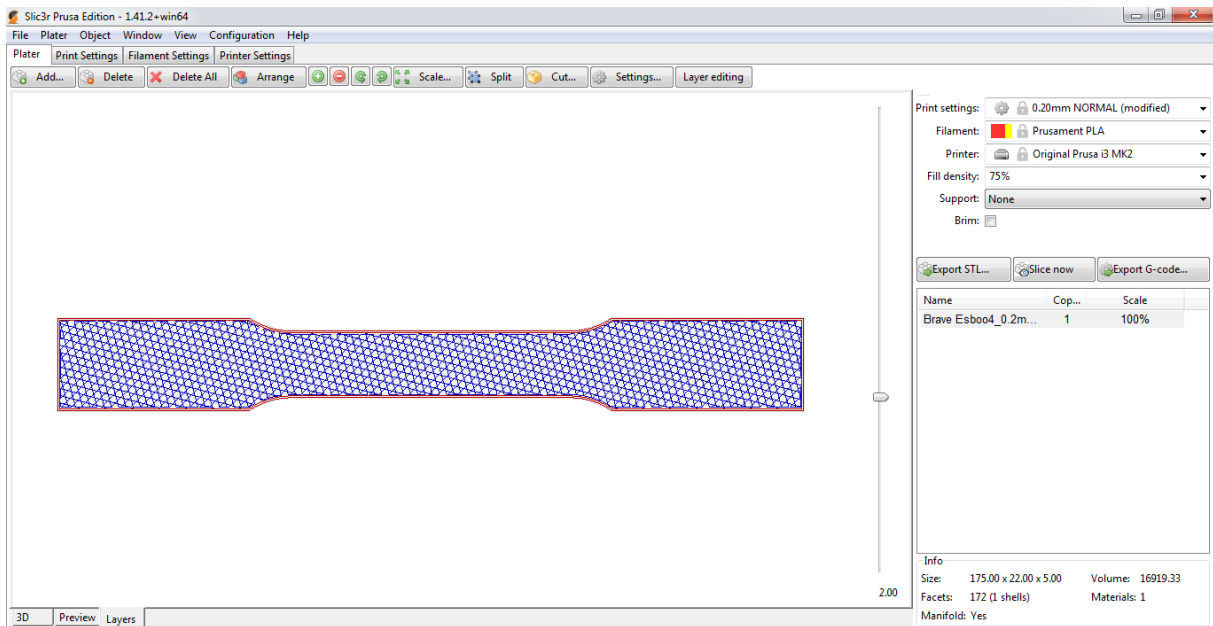


Slika 29. Podešavanje parametara 45% ispune – 1. sloj

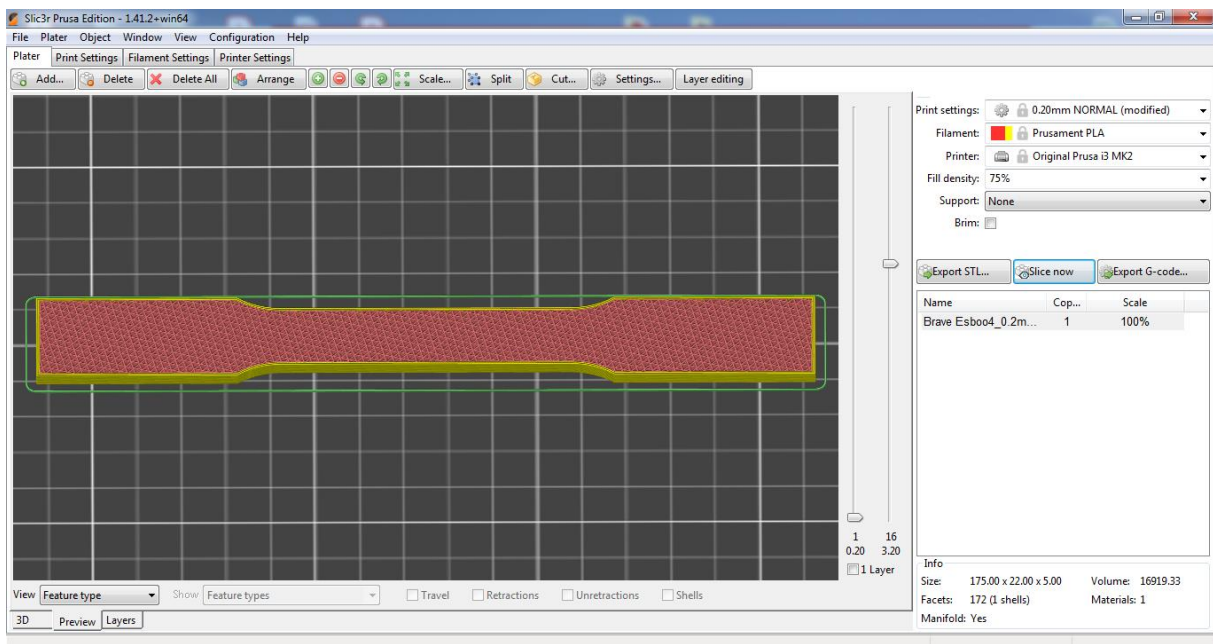


Slika 30. Podešavanje parametara 45% ispune – pregled modela

75% ispuna:



Slika 31. Podešavanje parametara 75% ispune – 1. sloj



Slika 32. Podešavanje parametara 75% ispune – pregled modela



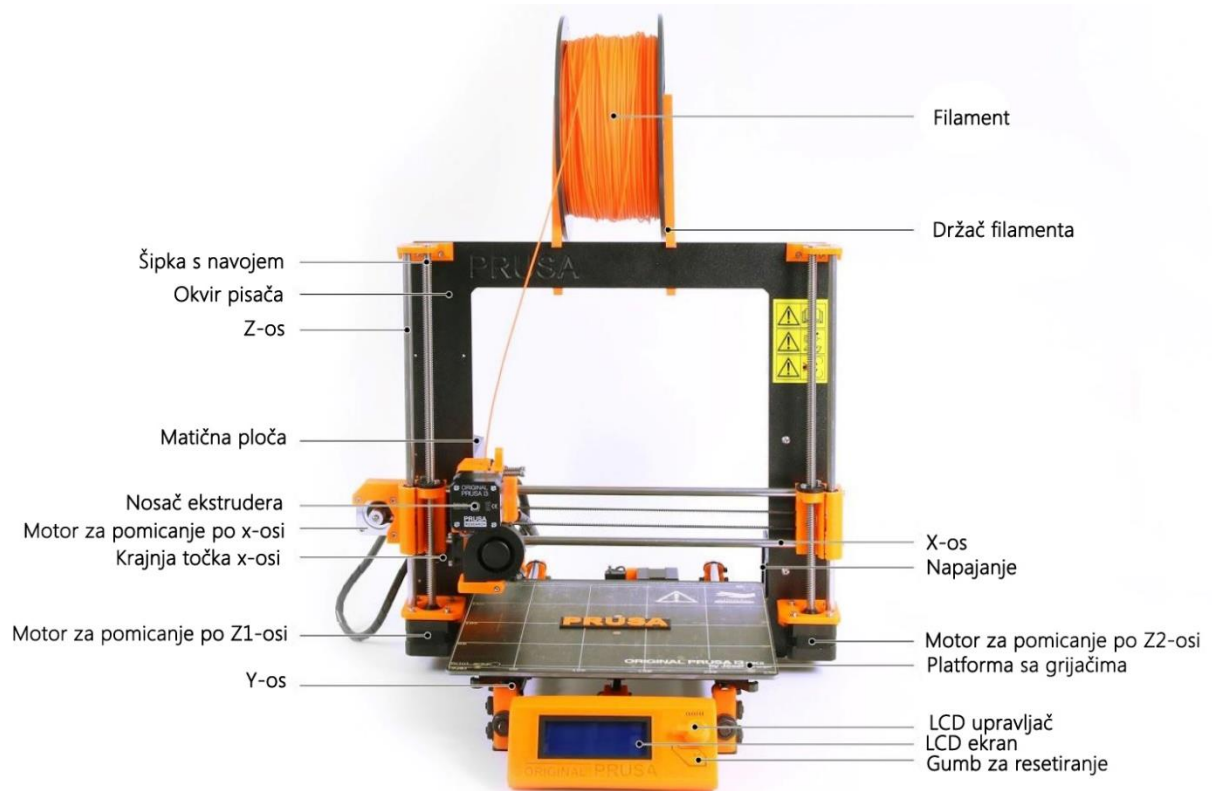
### 3.2.1. UREĐAJ ZA 3D PRINTANJE

Za izradu epruveta korišten je poznati 3D printer naziva Original Prusa i3 MK2.

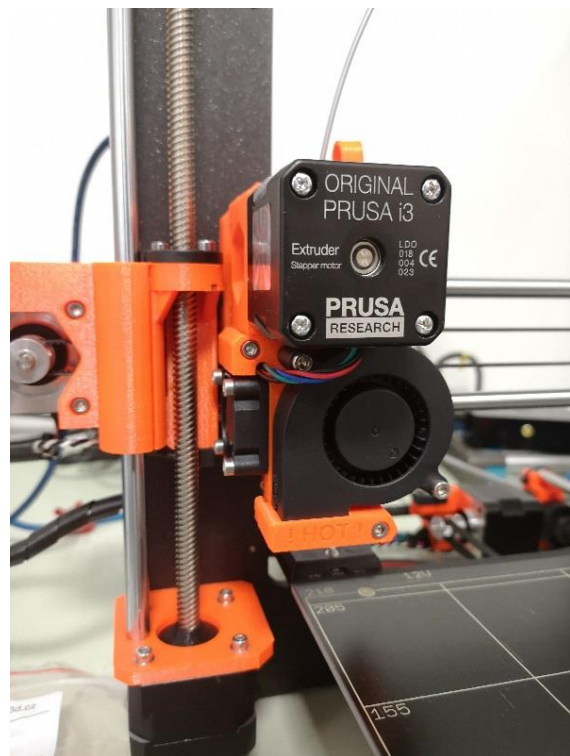
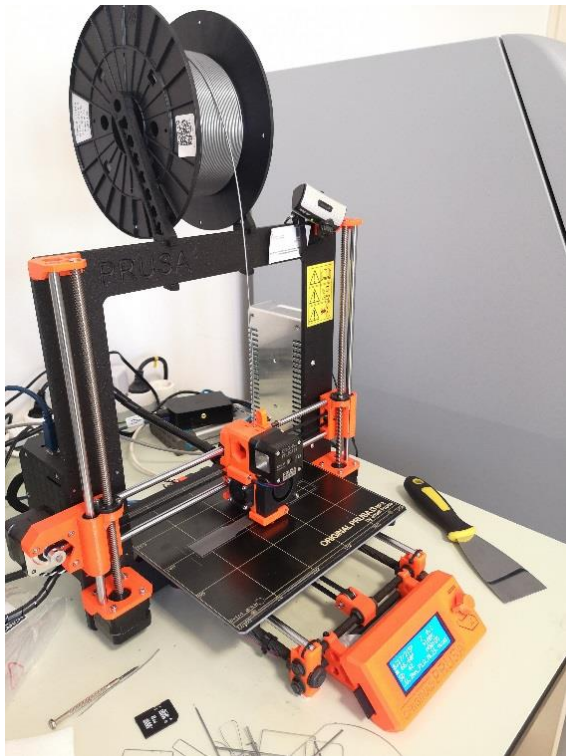
Printer je osmislio Josef Prusa, a ideja mu je bila da svako kućanstvo posjeduje printer s kojim će moći izraditi ono što mu treba.

Printer ima mogućnost replicirati sam sebe, tako da onaj koji posjeduje jedan printer, od proizvođača može kupiti komplet za sastavljanje drugog identičnog printera. Proizvođač šalje osnovne dijelove koje nije moguće replicirati (grijanu platformu, ekstruder i nosače), te upute za printanje svih ostalih dijelova i nacrtom za slaganje.

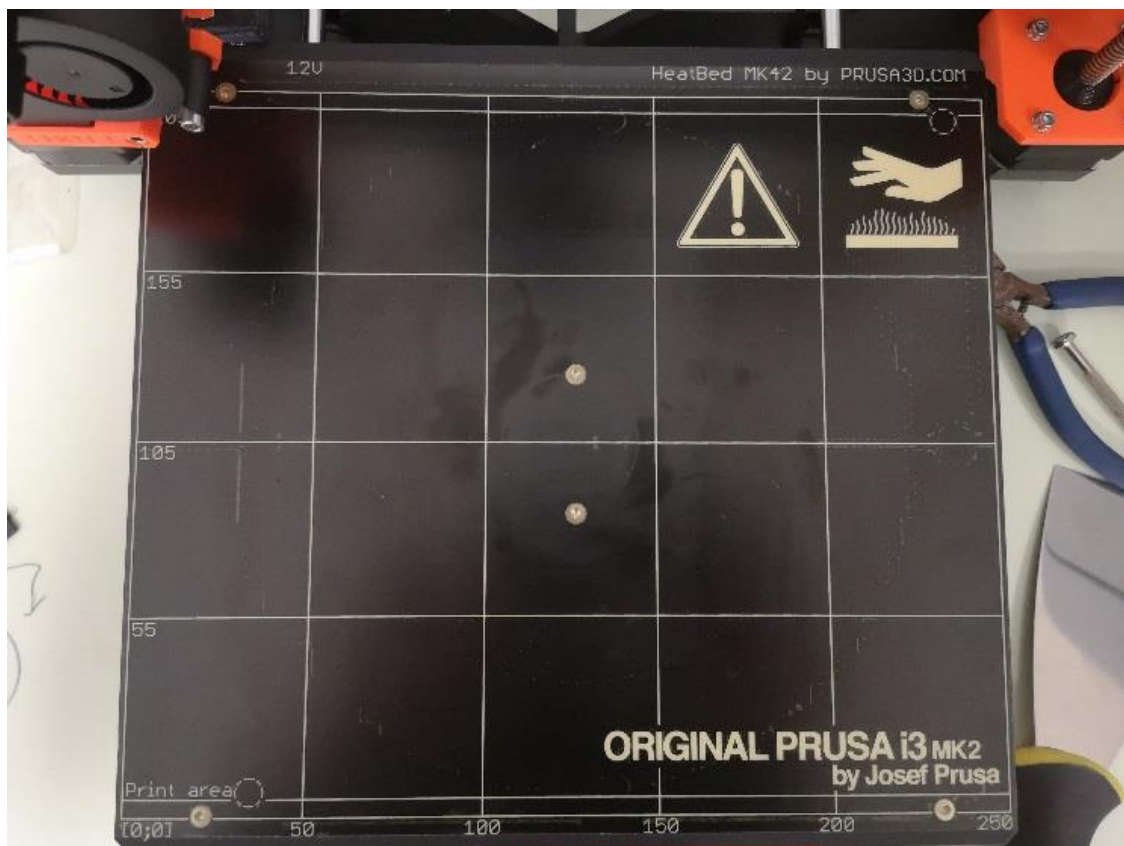
Iako printeri koriste dvije vrste debljine filameta, ovaj printer koristi samo filament promjera 1,75 mm koji se i češće koristi kod 3D printanja. [26]



Slika 33. Dijelovi 3D printera



*Slika 34. Prusa printer i prikaz ekstrudera*



*Slika 35. Grijana platforma*

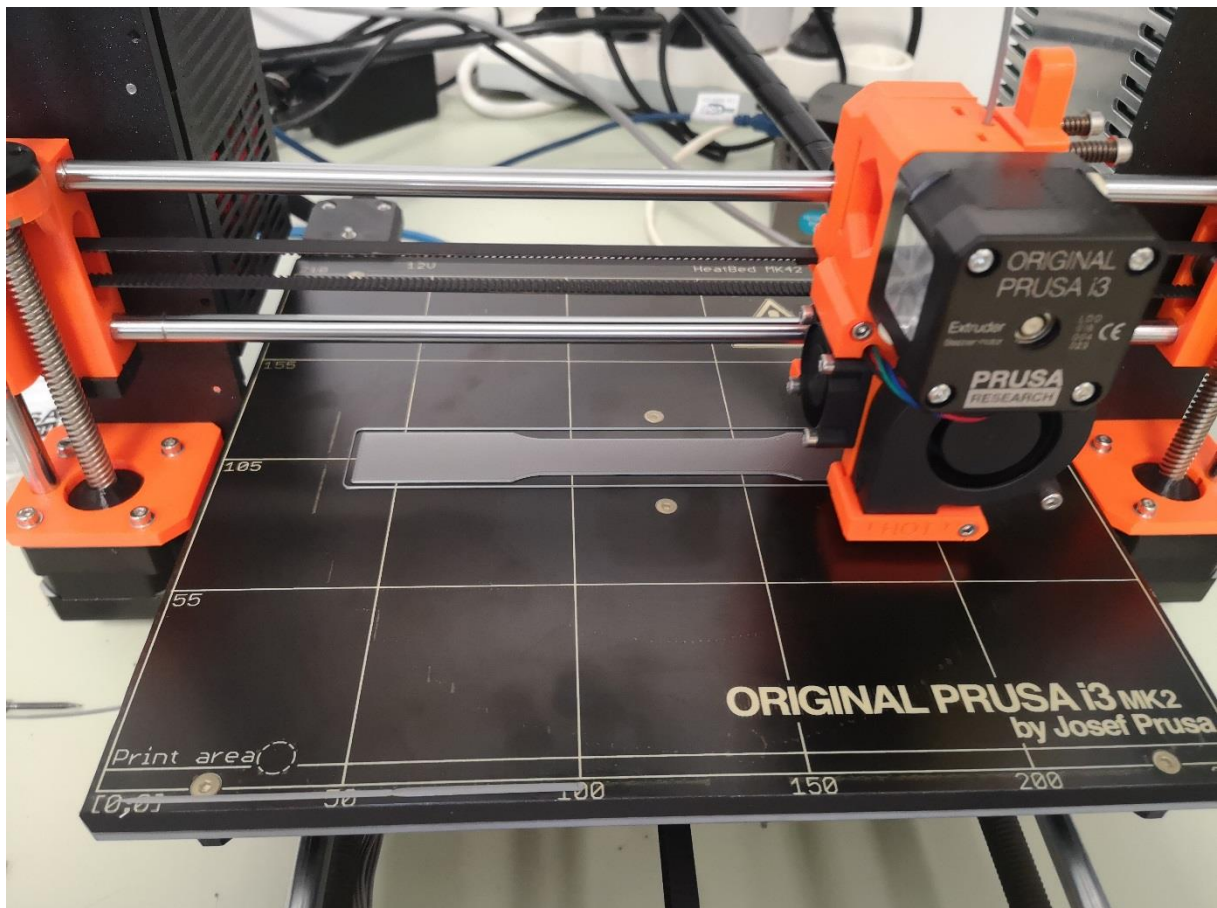


### 3.2.2. PRINTANJE EPRUVETA

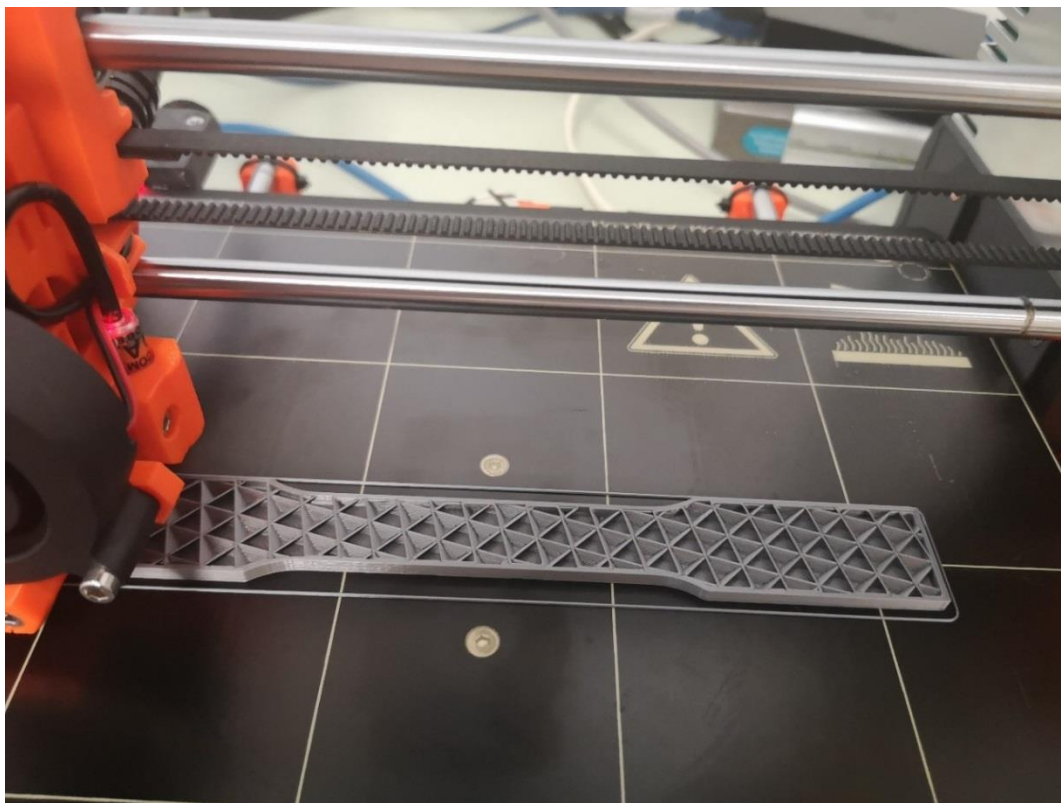
Parametri izrade epruveta:

- temperatura mlaznice: 215 °C,
- temperatura radne ploče: 60 °C,
- brzina ispisa: 40 mm/s,
- vanjske konture: 2 prolaza,
- ispunjenost: *kubičnog uzorka*,
- gornji dio: 5 slojeva,
- donji dio: 4 sloja,
- debljina sloja: 0,2 mm.

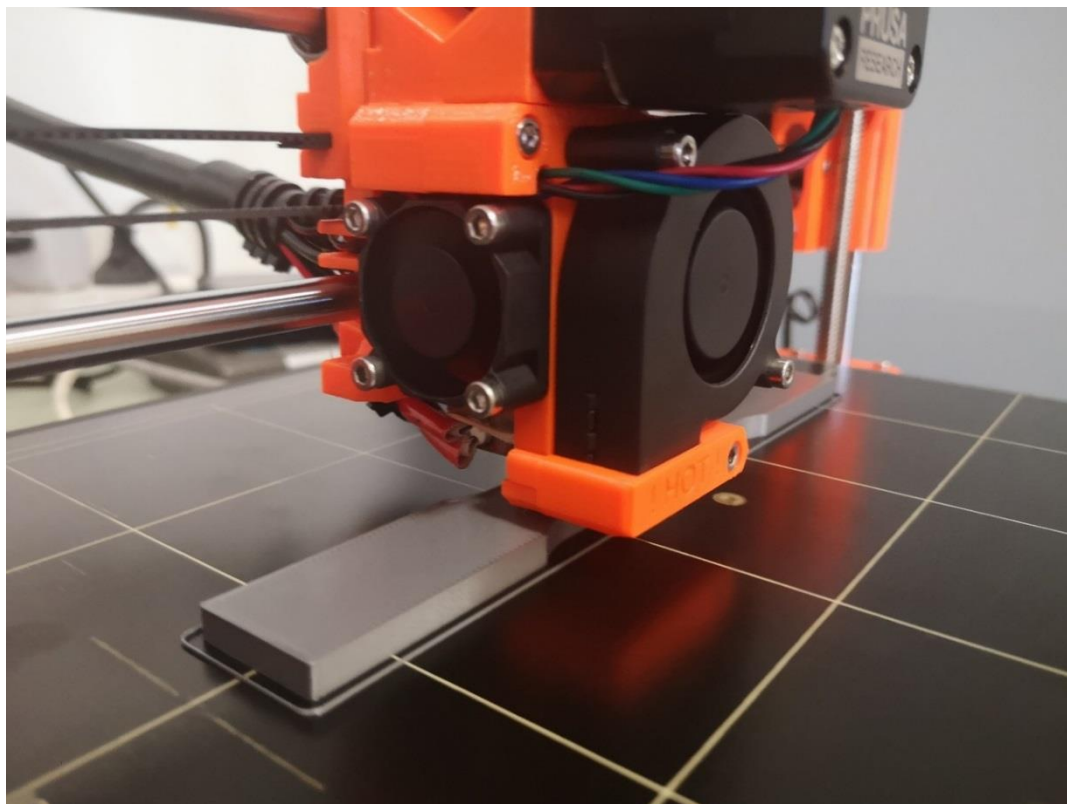
Izrađuju se po 3 epruvete za svaku vrijednost kako bi rezultati ispitivanja bili što točniji.



Slika 36. Printanje epruvete – početni sloj



*Slika 37. Prikaz ispune epruvete*



*Slika 38. Printanje epruvete – završni sloj*

### 3.3. ISPITIVANJE

#### 3.3.1. OZNAČAVANJE EPRUVETA

Tablica 2. Označavanje epruveta

**1.1.A**

Oznaka postotka ispune epruvete	Oznaka epruvete prema redoslijedu ispitivanja na vlak	Oznaka materijala epruvete
1 - 15 % ispuna	1 – prva epruveta	A – PLA
2 - 45% ispuna	2 – druga epruveta	B – FACILAN C8
3 - 75% ispuna	3 – treća epruveta	C - PETG

PRIMJER:

### 2.3.C

Epruveta sa 45% ispunom, 3. po redu ispitivana na vlak, izrađena od PETG materijala.



Slika 39. Primjer označavanja epruveta

### 3.3.2. UREĐAJ ZA ISPITIVANJE - KIDALICA

Ispitivanje vlačne čvrstoće izvršeno je na kidalici Shimadzu AG-X plus.

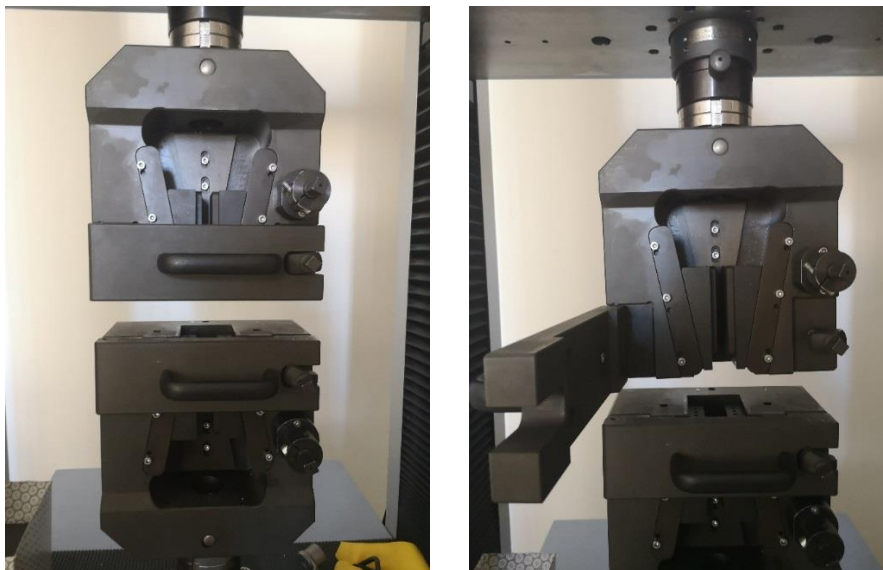
Uređaj je računalno upravljani, a rezultati se automatski zapisuju u elektronskom obliku u tablice, te se na temelju rezultata dobiva Hookeov dijagram za svako ispitivanje.

Mjerno područje kidalice je do 100 kN.



*Slika 40. Kidalica Shimadzu AG-x plus*

Kidalica sadrži postolje i dva stabilna stupa koji služe kao vodilice stezne glave. Unutar stezne glave nalaze se stezne čeljusti u koje se učvršćuje epruveta. [27]

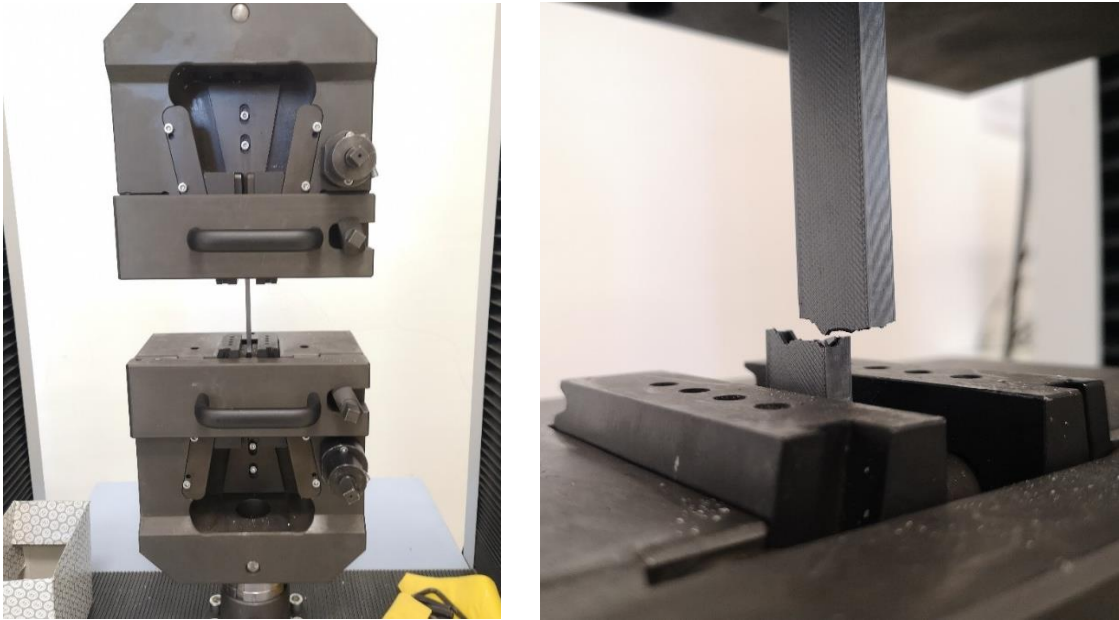


*Slika 41. Stezna glava sa steznom čeljusti*

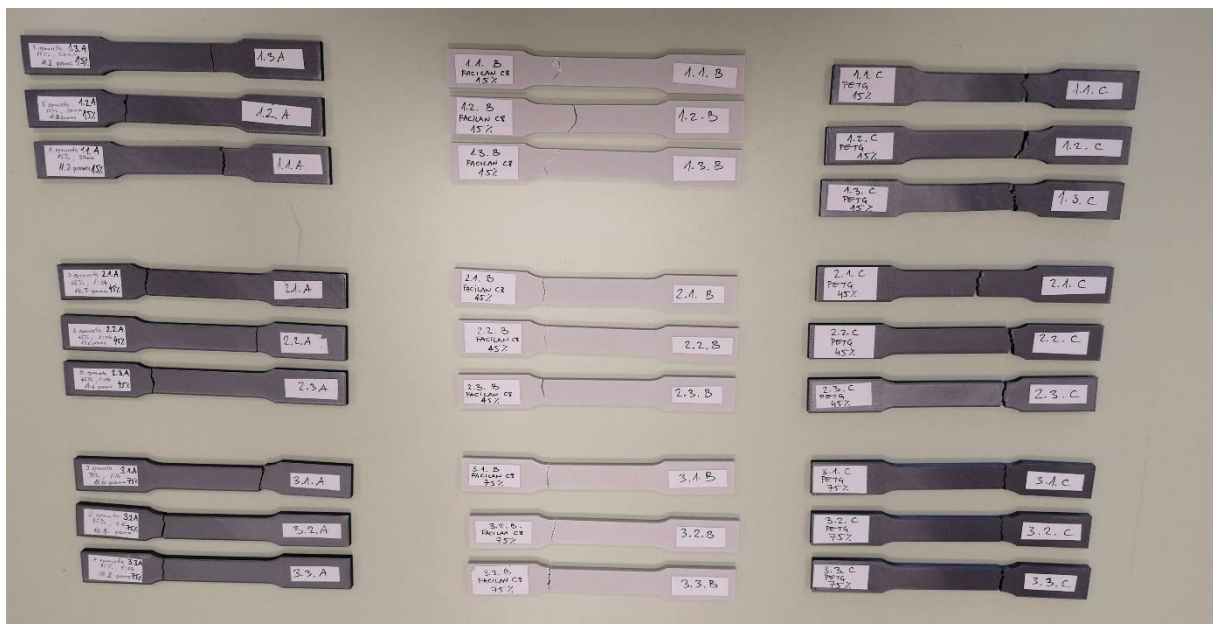


### 3.3.3. ISPITIVANJA I REZULTATI

Svih 27 epruveta ispitane su na jednak način, a rezultati ispitivanja prikazani su u tablici. Rezultati ispitivanja prikazani su za svaki materijal kako bi se vidjele razlike u naprezanju ovisno o parametru postotka ispune epruvete.



Slika 42. Epruveta prije i nakon ispitivanja



Slika 43. 27 epruveta nakon ispitivanja

Tablica 3. Prikaz rezultata ispitivanja

MATERIJAL EPRUVETE	PARAMETAR ISPUNE	OZNAKA EPRUVETE	MAX TOČKA NAPREZANJA		TOČKA LOMA			
			MAX SILA [N]	VLAČNA ČVRSTOĆA (MAX NAPREZANJE) [N/mm <sup>2</sup> ]	SILA KIDANJA [N]	NAPREZANJE KOD KIDANJA [N/mm <sup>2</sup> ]	PRODULJENJE [mm]	ISTEZANJE [%]
PLA	15%	1.1.A	2191,02	27,3877	2171,66	27,1457	3,386	3,89996
		1.2.A	1835,89	22,9486	1824,17	22,8022	3,187	3,67037
		1.3.A	2310,47	28,8808	2294,25	28,6782	3,364	3,87393
	45%	2.1.A	2718,05	33,9756	2712,77	33,9097	3,490	4,01966
		2.2.A	2708,56	33,8570	2707,82	33,8477	3,293	3,79268
		2.3.A	2780,52	34,7565	2774,41	34,6802	3,342	3,84931
	75%	3.1.A	3308,76	41,3595	3304,88	41,3110	3,246	3,73836
		3.2.A	3256,45	40,7056	3254,03	40,6754	3,263	3,75845
		3.3.A	2565,00	32,0625	2546,15	31,8269	2,998	3,45253
FACILAN C8	15%	1.1.B	1496,41	18,7051	1380,49	17,2561	2,690	3,09813
		1.2.B	1498,60	18,7326	1475,13	18,4391	2,789	3,21140
		1.3.B	1249,68	15,6210	1195,70	14,9463	2,431	2,79946
	45%	2.1.B	1468,64	18,3580	1404,79	17,5599	2,329	2,68264
		2.2.B	1437,33	17,9666	1373,08	17,1635	2,318	2,66987
		2.3.B	1274,57	15,9321	1218,65	15,2332	1,960	2,25676
	75%	3.1.B	1755,52	21,9441	1688,80	21,1100	2,264	2,60723
		3.2.B	1892,12	23,6515	1837,38	22,9673	2,461	2,83432
		3.3.B	1597,55	19,9693	1528,14	19,1017	2,403	2,76779
PETG	15%	1.1.C	1644,93	20,5616	1545,64	19,3205	4,345	5,00367
		1.2.C	1587,53	19,8442	1462,79	18,2849	4,355	5,01504
		1.3.C	1654,86	20,6858	1226,35	15,3293	4,568	5,26054
	45%	2.1.C	2209,33	27,6166	2004,75	25,0594	4,651	5,35678
		2.2.C	1940,98	24,2623	1748,55	21,8569	4,233	4,87449
		2.3.C	2190,16	27,3770	2107,24	26,3405	4,488	5,16872
	75%	3.1.C	2591,79	32,3973	2494,24	31,1780	4,408	5,07637
		3.2.C	2068,63	25,8579	1882,68	23,5335	4,045	4,65843
		3.3.C	2716,75	33,9594	2560,14	32,0017	4,370	5,03222

Primjeri izračuna vrijednosti prikazanih u tablici:

Vlačna čvrstoća 
$$R_m = \frac{F_{max}}{A_0} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (8)$$

Naprezanje kod kidanja 
$$R_k = \frac{F_k}{A_0} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (9)$$

Istezanje 
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \% \quad (10)$$

Početna duljina na kidalici korištenoj za ispitivanje  $L_0 = 86,83 \text{ mm}$ .

$$A_0 = a \times b = 5 \times 16 = 80 \text{ mm}^2 \quad (11)$$

PLA - 15% - 1.2.A

$$R_m = \frac{F_{max_{1.2.A}}}{A_0} = \frac{1835,89}{80} = 22,9486 \frac{N}{mm^2} \quad (12)$$

$$R_k = \frac{F_{k_{1.2.A}}}{A_0} = \frac{1824,17}{80} = 22,8021 \frac{N}{mm^2} \quad (13)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \% = \frac{3,187}{86,83} = 3,6704 \% \quad (14)$$

FACILAN C8 - 45% - 2.2.B

$$R_m = \frac{F_{max2.2.B}}{A_0} = \frac{1437,33}{80} = 17,9666 \frac{N}{mm^2} \quad (15)$$

$$R_k = \frac{F_{k2.2.B}}{A_0} = \frac{1373,08}{80} = 17,1635 \frac{N}{mm^2} \quad (16)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \% = \frac{2,318}{86,83} = 2,6696 \% \quad (17)$$

PETG - 75% - 3.2.C

$$R_m = \frac{F_{max3.2.C}}{A_0} = \frac{2068,63}{80} = 25,8579 \frac{N}{mm^2} \quad (18)$$

$$R_k = \frac{F_{k3.2.C}}{A_0} = \frac{1882,68}{80} = 23,5335 \frac{N}{mm^2} \quad (19)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \% = \frac{4,045}{86,83} = 4,6585 \% \quad (20)$$

Označavanje grafa po bojama ovisno o postotku ispune:

PLAVA - 15% ispunu

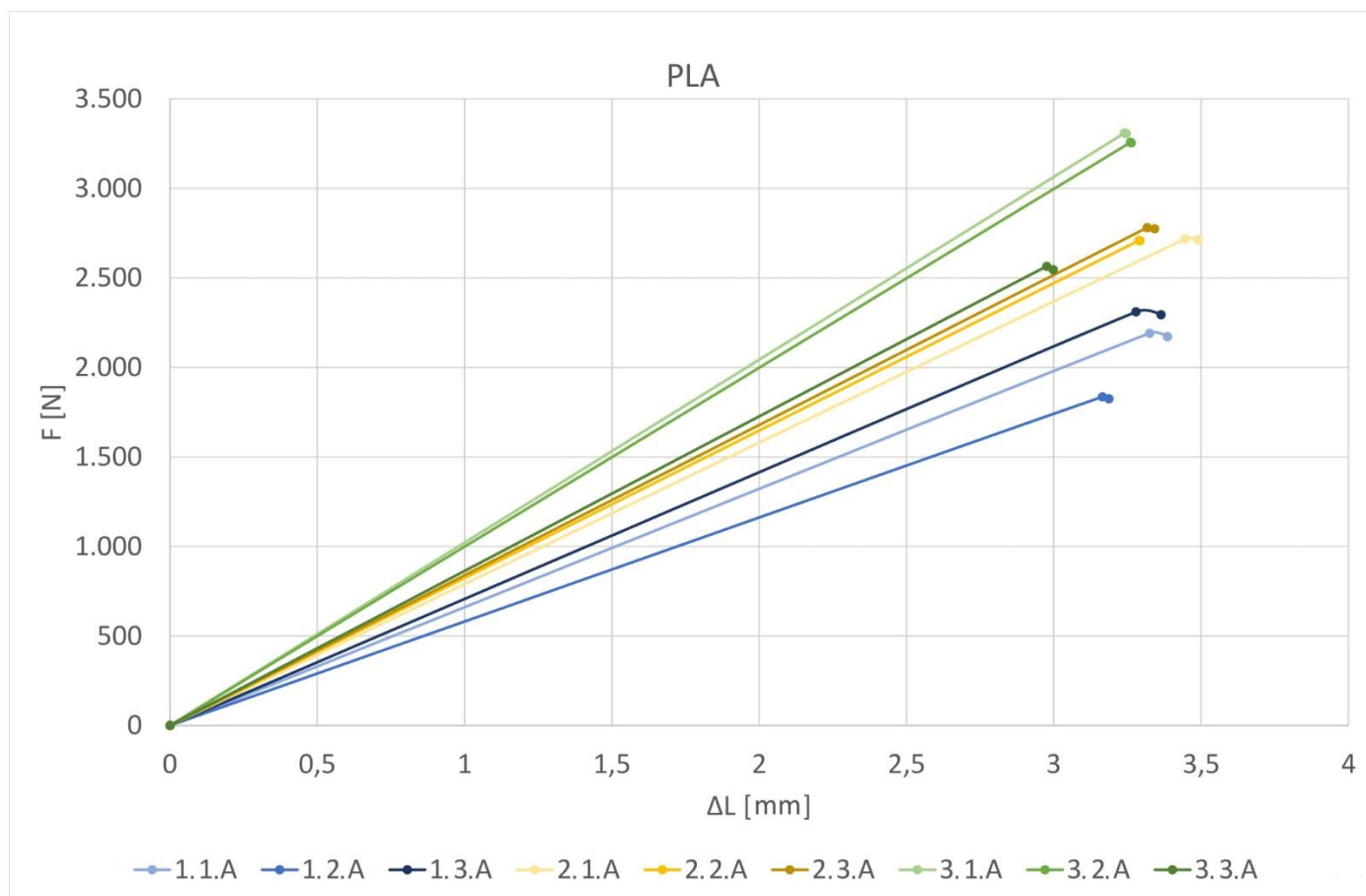
ŽUTA - 45% ispune

ZELENA - 75% ispune



Tablica 4. Oznake grafa za materijal PLA

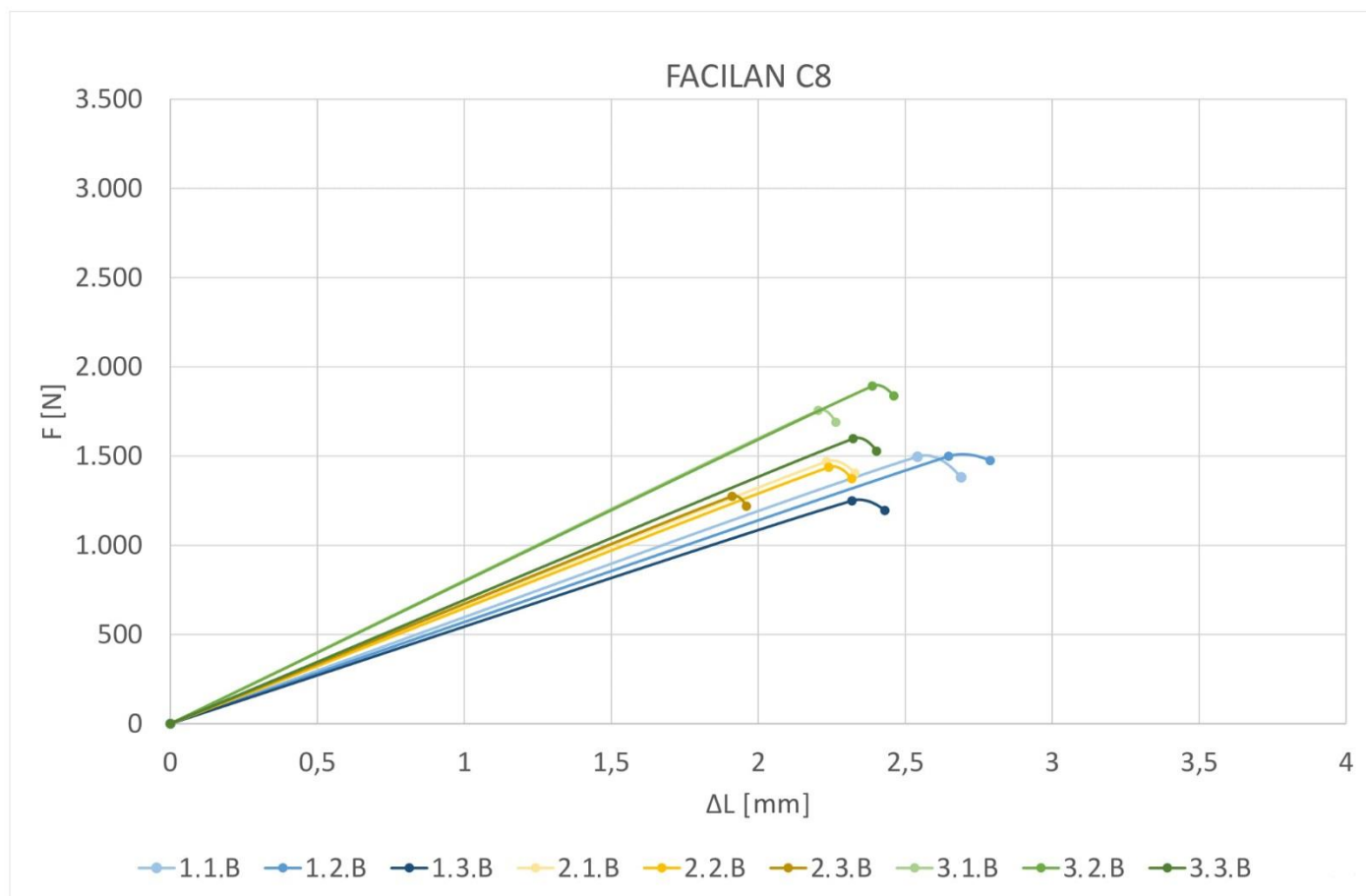
1.1.A	15% PLA	2.1.A	45% PLA	3.1.A	75% PLA
1.2.A		2.2.A		3.2.A	
1.3.A		2.3.A		3.3.A	



Slika 44. Graf  $F - \Delta L$  za materijal PLA

Tablica 5. Oznake grafa za materijal FACILAN C8

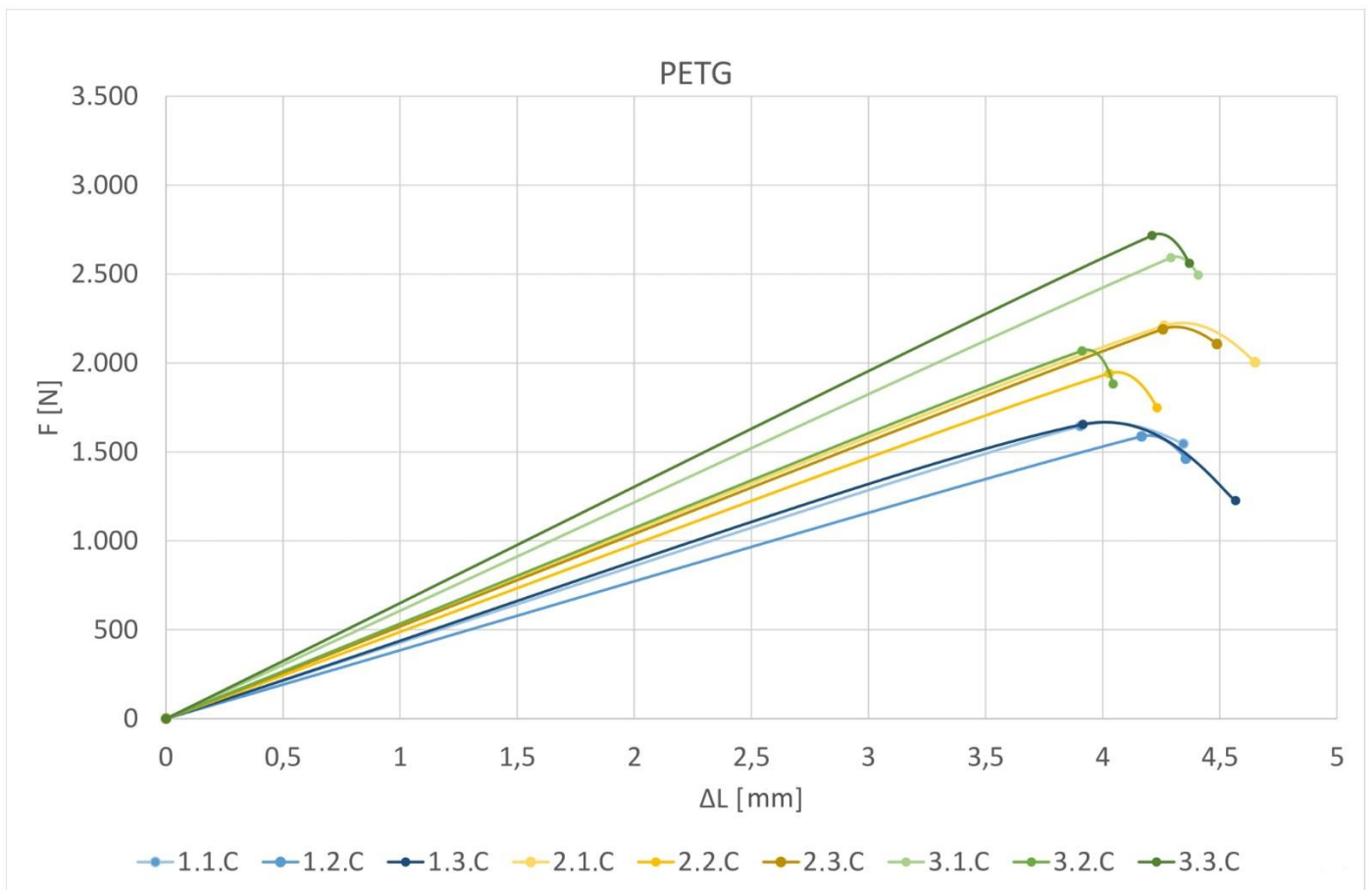
1.1.B	15% FACILEN C8	2.1.B	45% FACILAN C8	3.1.B	75% FACILAN C8
1.2.B		2.2.B		3.2.B	
1.3.B		2.3.B		3.3.B	



Slika 45. Graf  $F - \Delta L$  za materijal FACILAN C8

Tablica 6. Oznake grafa za materijal PETG

1.1.C	15% PETG	2.1.C	45% PETG	3.1.C	75% PETG
1.2.C		2.2.C		3.2.C	
1.3.C		2.3.C		3.3.C	



Slika 46. Graf  $F - \Delta L$  za materijal PETG

#### 4. ANALIZA REZULTATA

Kako bi se kvalitetno napravila usporedba za svaki parametar izrađene su 3 epruvete, odnosno 27 epruveta ukupno. Izračunate su srednje vrijednosti iskazane u tablici u svrhu prezentacije i analize rezultata. Tablica sadrži i standardnu devijaciju kojom je definirana veličina raspršenosti izmjerenih vrijednosti vlačne čvrstoće (za 3 jednake epruvete) od njihove srednje vrijednosti. Očekuju se manje vrijednosti standardne devijacije čime bi se pokazalo da su vrijednosti dobivene ispitivanjem grupirane oko srednje vrijednosti i da je odstupanje malo. U slučaju dobivenih velikih vrijednosti standardne devijacije pokazala bi se značajna raspršenost vrijednosti ispitivanja, te bi ispitivanje bilo potrebno provesti ponovno.

Izračun srednje vrijednosti:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (21)$$

Izračun standardne devijacije:

$$s = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2}{n}} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (22)$$

Tablica 7. Prikaz srednjih vrijednosti rezultata ispitivanja i standardne devijacije

OZNAKA	MAX SILA $\bar{F}_{max} [N]$	VLAČNA ČVRSTOĆA $\bar{R}_m \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$	STANDARD. DEVIJACIJA $s \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$	SILA KIDANJA $\bar{F}_k [N]$	NAPREZANJE KOD KIDANJA $\bar{R}_k \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$	PRODU- LJENJE $\bar{\Delta L} [mm]$	ISTEZA- NJE $\bar{\epsilon} [\%]$
1.A (PLA 15%)	2112,46	26,4058	2,5194	2096,69	26,2087	3,312	3,81475
2.A (PLA 45%)	2735,71	34,1964	0,399	2731,67	34,1458	3,375	3,88722
3.A (PLA 75%)	3043,40	38,0425	4,2369	3035,02	37,9378	3,169	3,64978
1.B (FC8 15%)	1414,90	17,6862	1,4604	1350,44	16,8805	2,637	3,03633
2.B (FC8 45%)	1393,51	17,4189	1,0634	1332,17	16,6522	2,202	2,53642
3.B (FC8 75%)	1748,40	21,8550	1,5045	1684,77	21,0597	2,376	2,73644
1.C (PETG 15%)	1629,11	20,3638	0,371	1411,59	17,6449	4,423	5,09308
2.C (PETG 45%)	2113,49	26,4186	1,5279	1953,51	24,4189	4,457	5,13333
3.C (PETG 75%)	2459,06	30,7382	3,5093	2312,35	28,9044	4,274	4,92234

Primjer izračuna srednje vrijednosti vlačne čvrstoće i standardne devijacije za:

PLA 45%, epruvete 2.1.A, 2.2.A i 2.3.A

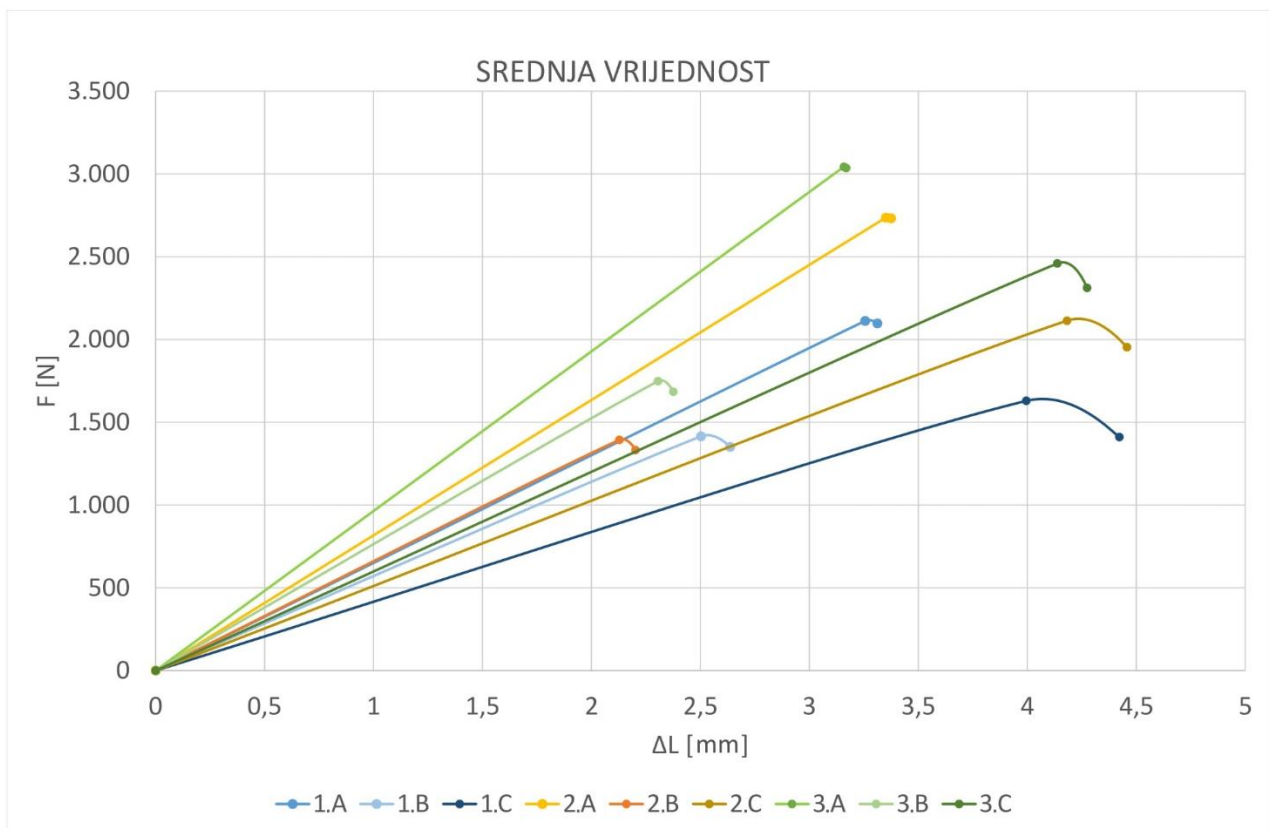
$$x_{2.1.A} = 33,9756 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]; x_{2.2.A} = 33,8570 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]; x_{2.3.A} = 34,7565 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\bar{x}_{2.A} = \frac{x_{2.1.A} + x_{2.2.A} + x_{2.3.A}}{n} = \frac{33,9756 + 33,8570 + 34,7565}{3} = 34,1964 \frac{N}{mm^2} \quad (23)$$

$$s = \sqrt{\frac{(x_{2.1.A} - \bar{x}_{2.A})^2 + (x_{2.2.A} - \bar{x}_{2.A})^2 + (x_{2.3.A} - \bar{x}_{2.A})^2}{n}}$$

$$= \sqrt{\frac{(33,9756 - 34,1964)^2 + (33,8570 - 34,1964)^2 + (34,7565 - 34,1964)^2}{3}}$$

$$= 0,399 \frac{N}{mm^2} \quad (24)$$



Slika 47. Graf  $F - \Delta L$  srednjih vrijednosti za sva 3 materijala

Usporedbom rezultata srednjih vrijednosti vidljivo je:

- epruveta izrađena od materijala FACILAN C8 sa ispunom 45% je najprije pukla, odnosno uz najmanju maksimalno izdržanu silu od 1393,51 N, pri najmanjoj sili loma od 1332,17 N i uz najmanje produljenje od 2,202 mm,
- epruveta izrađena od materijala PLA sa ispunom 75% je izdržala najveću maksimalnu silu od 3043,40 N, te je pukla pri sili loma od 3035,02 N, uz produljenje od 3,169 mm,
- sljedeća epruveta koja je izdržala najveću maksimalnu silu od 2735,71 N je od istog materijala PLA sa ispunom 45 %,
- epruveta izrađena od materijala PETG sa ispunom 75% daje 3. po redu izdržljivosti sa maksimalnom silom od 2459,06 N i produljenjem od 4,274 mm,
- epruvete istog materijala PETG sa ispunama od 15% i 45% imaju slične vrijednosti produljenja, no sa manjim postotkom ispune mogu dosegnuti manju maksimalnu silu od 1629,11 N za 15% ispune i 2113,49 N za 45% ispune.

Prema rezultatima je vidljivo kako su sva 3 korištena materijala krhka.

Najbolju vlačnu čvrstoću, prema srednjoj vrijednosti, pokazale su epruvete izrađene od materijala PLA sa parametrom ispune od 75%, a na drugom mjestu su epruvete istog materijala sa parametrom ispune od 45%.

Najlošiju vlačnu čvrstoću pokazale su, prema srednjoj vrijednosti, epruvete izrađene od materijala FACILAN C8 sa parametrom ispune od 45 % i 15 %.

Epruvete izrađene od materijala PETG pokazale su u usporedbi sa ostala 2 materijala, najveće produljenje prije loma.

## 5. ZAKLJUČAK

Cijela ideja koja stoji iza 3D printanja je proizvesti pristupačne proizvode na efikasan način tako da su izdržljivi, lakši i sa što manje otpada. Fokus je na visokoj kvaliteti, učinkovitosti i proizvodnji malog obima.

Zadatak završnog rada bio je prikazati utjecaj promjene parametra ispune na vlačnu čvrstoću epruveta izrađenih FDM tehnologijom od 3 različita materijala.

Zaključak ispitivanja je da gledajući rezultate zasebno za svaki materija, očekivano je da će s povećanjem postotka ispune i vlačna čvrstoća biti veća, što su rezultati ispitivanja i potvrdili. Usporedbom materijala vidljivo je da su epruvete izrađene od PLA materijala imaju najbolju vlačnu čvrstoću. Također kod istog materijala mala je razlika kod utjecaja promjene parametra ispune na vlačnu čvrstoću, što bi značilo da je u određenim slučajevima moguće koristiti manje ispune što opet dovodi do manje količine potrošenog materijala, te manjeg utjecaja na okoliš.

PLA materijal vrlo je popularan za 3D printanje, dobiva se polimerizacijom laktične kiseline dobivene fermentacijom biljnih šećera iz kukuruza – polimerni materijal proizveden iz obnovljivih izvora što ju čini ekološki prihvatljivijom.

Upotrebom PLA filameta smanjuje se emisija staklenih plinova do 75% u usporedbi sa uobičajenim polimernim materijalom.

Epruvete izrađene od novije generacije materijala FACILAN C8 koji je ujedno i najskuplji materijal od 3 korištena pokazuje najlošiju vlačnu čvrstoću. Rezultati su pokazali da epruvete s ispunom od 45% imaju lošiju vlačnu čvrstoću od epruveta sa 15% ispune. Pretpostavka je da materijal u nekim drugim svojstvima možda pokazuje bolje vrijednosti od PLA i PETG, te da je potrebno provjeriti sa proizvođačem za što se najbolje primjenjuje.

Kako razvoj 3D printera raste tako se razvijaju i razne vrste materijala sa svojstvima koja se mogu birati ovisno o namjeni modela koji se izrađuje.

Važno je staviti naglasak na ekologiju kako bi se osiguralo da razvojem tehnologije i materijala koji se koriste čim više smanje štetan utjecaj na okoliš. Budući da već postoje printeri koji omogućavaju reciklažu otpadnog filameta i modela koji se više ne koriste vidljivo je da se o tome vodi računa.

## LITERATURA

- [1] <https://3dsourced.com/guides/history-of-3d-printing/>
- [2] <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [3] <https://newstorycharity.org/innovation/>
- [4] <https://all3dp.com/1/3d-printed-food-3d-printing-food/>
- [5] <https://www.nanoscribe.com/en/>
- [6] Prof. dr. Ivo Alfirević: Nauka o čvrstoći I
- [7] Šimunić N., Benić Z., Brozović M.: Postupci brze izrade prototipova
- [8] [http://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2014/04/Additive\\_Manufacturing\\_process](http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2014/04/Additive_Manufacturing_process)
- [9] G.-V. Mnerie, E. F. Binchiciu: A review on current trends of additive manufacturing technologies; [http://www.bid-isim.ro/bid\\_arhiva/bid2019/bid3\\_2019\\_09-18.pdf](http://www.bid-isim.ro/bid_arhiva/bid2019/bid3_2019_09-18.pdf)
- [10] <https://www.starrapid.com/blog/top-7-methods-for-making-3d-rapid-prototypes/>
- [11] Dr. Miltiadis A. Boboulos: CAD-CAM & Rapid prototyping Application Evaluation,; str.130.-162.
- [12] <http://machine-drawing.blogspot.com/2015/11/arc-touching-two-circles-tangentially.html>
- [13] [https://www.researchgate.net/figure/Basic-principle-of-digital-light-processing-method\\_fig2\\_297605485](https://www.researchgate.net/figure/Basic-principle-of-digital-light-processing-method_fig2_297605485)
- [14] <https://learnmech.com/what-is-polyjet-3d-printing-technology-used-for-prototyping/>
- [15] <https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/materials-science/three-dimensional-printing.html>
- [16] <https://www.britannica.com/technology/selective-laser-sintering>
- [17] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013617302911>
- [18] <https://pinshape.com/guides/3d-printing-materials/>
- [19] <https://www.stratasysdirect.com/materials>
- [20] <https://www.3dprintingbusiness.directory/environmental-impact-3d-printing/>
- [21] <http://my3dconcepts.com/explore/eco-friendly/>
- [22] <https://3dprint.com/232789/10-eco-friendly-3d-printing-stories-2018/>
- [23] <https://project3dprinters.com/products/3d-printlife-enviro%E2%84%A2-eco-friendly-abs>
- [24] <https://redetec.com/>
- [25] <https://www.3d4makers.com/>
- [26] Prusa research by Josef Prusa: User manual for 3D printers-Original Prusa i3 MK2
- [27] <https://www.shimadzu.eu/specifications-ag-xplus-floor-type>



## **PRILOZI**

- I. CD-R disk
- II. Tehnička dokumentacija – rezultati ispitivanja sa kidalice