

Razvoj edukacijskog seta za aditivnu proizvodnju temeljenog na FDM postupku

Kapetanović, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:235:170632>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ana Kapetanović

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Nenad Bojčetić, dipl. ing.

Student:

Ana Kapetanović

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Nenadu Bojčetiću i asistentu dr.sc. Filipu Valjku na savjetima i stručnoj pomoći tijekom izrade ovog rada.

Hvala obitelji, momku i prijateljima na pomoći i podršci tijekom dosadašnjeg studiranja.

Ana Kapetanović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ana Kapetanović** JMBAG: **0035215954**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Razvoj edukacijskog seta za aditivnu proizvodnju temeljenog na FDM postupku**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development of education set for additive manufacturing based on FDM process**

Opis zadatka:

Aditivna proizvodnja je proizvodna tehnologija temeljena na principu dodavanja materijala sloj po sloj kako bi se izradio konačni proizvod. Pošto je aditivna proizvodnja relativno nova proizvodna tehnologija, a njen princip rada i mogućnosti drugačije od proizvodnih postupaka temeljenih na oduzimanju i deformiranju materijala, mnogi potencijalni korisnici nemaju potpuno razumijevanje o ovim tehnologijama. Cilj ovog rada je razviti edukacijski set 3D modela temeljen na FDM (eng. *Fused Deposition Modelling*) tehnologiji aditivne proizvodnje koji će služiti za prijenos znanja i prikaz tehničkih mogućnosti i mogućnosti konstrukcijskog oblikovanja novim i postojećim korisnicima.

U radu je potrebno:

- proučiti i opisati postupak FDM postupak aditivne proizvodnje,
- identificirati ključne karakteristike koje su potrebne za razumijevanje principa rada aditivne proizvodnje i FDM postupka, te tehničkih mogućnosti i mogućnosti konstrukcijskog oblikovanja,
- pregledom literature definirati načine reprezentacije znanja,
- opisati ključne karakteristike aditivne proizvodnje i FDM postupka,
- izraditi 3D modele koji prikazuju ključne karakteristike aditivne proizvodnje i FDM postupka.

Opseg edukacijskog seta dogovoriti će se tijekom izrade rada.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

9. 5. 2022.

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

Prof.dr. sc. Nenad Bojčetić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KRATICA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA.....	3
2.1. Postupak aditivne proizvodnje	5
3. FUSED DEPOSITION MODELING – FDM.....	7
3.1. Princip rada FDM uređaja za aditivnu proizvodnju	8
3.2. Karakteristike FDM postupka	10
3.2.1. Potporna struktura	11
3.2.2. Uzorak ispune.....	11
3.2.3. Koncentracija naprežanja	12
3.2.4. Gustoća ispune	13
3.2.5. Smanjenje mase	13
3.2.6. Nadvišenje	14
3.2.7. Veličina oznaka	14
3.2.8. Izrada sklopova	15
3.2.9. Visina sloja	15
3.2.10. Anizotropija.....	16
3.2.11. Orijentacija printa.....	17
3.2.12. Premoštenje.....	17
3.2.13. Višebojnost	17
3.2.14. Rupe.....	18
3.2.15. Materijali.....	18
3.2.16. Multimaterial.....	18
3.2.17. Debljine utora i stijenki.....	19
3.2.18. Kosine.....	19
4. NAČINI REPREZENTACIJE ZNANJA.....	20
5. EDUKACIJSKI SET.....	21
5.1. Potporna struktura	23
5.2. Uzorak ispune.....	23
5.3. Koncentracija naprežanja	24
5.4. Gustoća ispune	24
5.5. Smanjenje mase.....	25
5.6. Nadvišenje.....	25
5.7. Veličina oznaka	26
5.8. Izrada sklopova	26
5.9. Visina sloja.....	27

5.10. Anizotropija.....	27
5.11. Orijentacija printa.....	28
5.12. Premoštenje	28
5.13. Višebojnost.....	29
5.14. Rupe	29
5.15. Materijali	30
5.16. Multimaterial	30
5.17. Debljine utora i stijenki	31
6. ZAKLJUČAK	32
LITERATURA.....	33
PRILOZI.....	34

POPIS SLIKA

Slika 1.	Koraci rada FDM uređaja	6
Slika 2.	<i>Prusa i3</i>	7
Slika 3.	Shematski prikaz rada FDM uređaja.....	10
Slika 4.	Potporna struktura materijala	11
Slika 5.	Uzorak ispune	12
Slika 6.	Prikaz mjesta koncentracije naprezanja	12
Slika 7.	Gustoća ispune	13
Slika 8.	Nadvišenje.....	14
Slika 9.	Prikaz veličine oznake 4mm	15
Slika 10.	Prikaz visine slojeva od 0.2 mm i 0.08 mm	16
Slika 11.	Smjer djelovanja naprezanja s obzirom na orijentaciju slojeva	16
Slika 12.	Orijentacije modela u x, y, z smjeru	17
Slika 13.	Primjer višebojnosti modela	18
Slika 14.	Prednja strana opisne kartice.....	22
Slika 15.	Stražnja strana opisne kartice.....	22
Slika 16.	Model potporne strukture.....	23
Slika 17.	Model uzoraka ispune	23
Slika 18.	Model koncentracije naprezanja	24
Slika 19.	Model gustoće ispune	24
Slika 20.	Model smanjenja mase.....	25
Slika 21.	Model nadvišenja	25
Slika 22.	Model veličina oznaka	26
Slika 23.	Model izrade sklopova	26
Slika 24.	Model visine sloja	27
Slika 25.	Model anizotropije	27
Slika 26.	Model orijentacije printa	28
Slika 27.	Model premoštenja.....	28
Slika 28.	Model višebojnosti.....	29
Slika 29.	Model rupa	29
Slika 30.	Model materijala	30
Slika 31.	Model uporabe više materijala.....	30
Slika 32.	Model utora i stijenki	31
Slika 33.	Edukacijski set	31

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristike aditivnih proizvodnih tehnologija [2] 4
Tablica 2. Ovisnost mase proizvoda o postotku ispune objekta 14

POPIS KRATICA

<i>ABS</i>	<i>Acrylonitrile butadiene styrene</i>
<i>AM</i>	<i>Additive Manufacturing</i>
<i>BJ</i>	<i>Binder Jetting</i>
<i>BJT</i>	<i>Binder Jetting</i>
<i>CLIP</i>	<i>Continuous Liquid Interface Production</i>
<i>DED</i>	<i>Direct Energy Deposition</i>
<i>DLP</i>	<i>Digital Light Processing</i>
<i>DLS</i>	<i>Direct Laser Melting</i>
<i>DOD</i>	<i>Drop on Demand</i>
<i>EBAM</i>	<i>Electron Beam Additive Manufacturing</i>
<i>EBM</i>	<i>Electron Beam Melting</i>
<i>FDM</i>	<i>Fused Deposition Modeling</i>
<i>LENS</i>	<i>Laser engineered net shaping</i>
<i>LOM</i>	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
<i>MEX</i>	<i>Material Extrusion</i>
<i>MJT</i>	<i>Material Jetting</i>
<i>NPJ</i>	<i>Nanoparticle Jetting</i>
<i>PBF</i>	<i>Powder Bed Fusion</i>
<i>PET</i>	<i>Polyethylene terephthalate</i>
<i>PLA</i>	<i>Polylactic acid</i>
<i>RM</i>	<i>Rapid Manufacturing</i>
<i>RP</i>	<i>Rapid Prototyping</i>
<i>RT</i>	<i>Rapid Tooling</i>
<i>SHL</i>	<i>Sheet Lamination</i>
<i>SLA</i>	<i>Stereolithography</i>
<i>SLM</i>	<i>Selective Laser Melting</i>
<i>SLS</i>	<i>Selective Laser Sintering</i>
<i>TPU</i>	<i>Thermoplastic polyurethane</i>
<i>VPP</i>	<i>Vat Photopolymerisation</i>

SAŽETAK

Tema ovog rada je razvoj edukacijskog seta za aditivnu proizvodnju temeljenog na FDM (eng. *Fused Deposition Modeling*) postupku. Aditivna proizvodnja relativno je nova proizvodna tehnologija koja ima jedinstvene proizvodne mogućnosti i mogućnosti konstrukcijskog oblikovanja. Zbog novosti tehnologije, ali i aditivnog načina izrade proizvoda, novi korisnici često ne razumiju njezine mogućnosti i karakteristike. Cilj edukacijskog seta je razvoj fizičkih 3D modela koji će prikazivati karakteristike AM-a (eng. *Additive Manufacturing*) te služiti u edukacijske svrhe novim i postojećim korisnicima za prikaz tehničkih mogućnosti i mogućnosti konstrukcijskog oblikovanja AM-a. U prvom dijelu rada pregledom literature objašnjena je aditivna proizvodnja i princip FDM postupka. Nakon upoznavanja aditivne proizvodnje i samog procesa izrade FDM postupkom, identificirane su i opisane ključne karakteristike za razumijevanje aditivne proizvodnje i mogućnosti i ograničenja konstrukcijskog oblikovanja. Prije definiranja objekata edukacijskog seta, pregledom literature identificirani su načini reprezentacije znanja korišteni za potrebe edukacijskog seta. Zatim je u zadnjoj fazi rada izrađen edukacijski set na temelju prethodno definiranih karakteristika aditivne proizvodnje koji se sastoji od fizičkih 3D modela i opisnih kartica za svaku od karakteristika.

Ključne riječi: edukacijski set, aditivna proizvodnja, FDM postupak, FDM karakteristike, prijenos znanja

SUMMARY

The topic of this thesis is development of educational set for additive manufacturing based on FDM (Fused Deposition Modelling) process. Additive manufacturing (AM) is a relatively new production technology with unique production and design possibilities. Due to the novelty of the technology, as well as the additive way of making the product, new users often do not understand its possibilities and characteristics. The aim of the educational set is the development of physical 3D models that will represent the characteristics of AM and serve for educational purposes to new and existing users to show the technical and design possibilities of AM. In the first chapter of this thesis additive manufacturing and the FDM process are explained through literature review. After getting acquainted with additive manufacturing technology, the key characteristics for understanding additive manufacturing and the possibilities and limitations in the design process were identified and described for the example of the FDM process. Before defining the size of educational set, the methods of knowledge representation used for educational set were given through review of literature. After that, educational set was made and described. Educational set consists of physical 3D models and descriptive cards.

Keywords: educational set, additive manufacturing, FDM process, FDM characteristics, knowledge transfer

1. UVOD

Aditivna proizvodnja (eng. *Additive Manufacturing - AM*) je naziv za niz tehnologija koje se temelje na principu dodavanja materijala sloj po sloj samo tamo gdje potrebno [1]. Za razliku od tradicionalnih postupaka proizvodnje poput obrade odvajanjem čestica kod kojih se izrada proizvoda temelji na oduzimanju materijala raznim alatima i postupcima, kod aditivne proizvodnje izrada započinje od "nule" nanošenjem materijala "sloj po sloj" do izrade konačnog proizvoda [1].

U samim počecima razvoja aditivne proizvodnje 80-ih godina 20.st. korištena je za izradu brzih prototipova (eng. *Rapid Prototyping - RP*) u svrhu prikaza proizvoda u konceptualnoj fazi. Daljnjim razvojem je kasnije korištena za izradu alata i kalupa (eng. *Rapid Tooling - RT*) od metala, keramike i polimera, a danas se koristi i za pojedinačnu ili maloserijsku proizvodnju (eng. *Rapid Manufacturing - RM*) [2].

Kako je aditivna proizvodnja relativno nova tehnologija, postoji nedostatak znanja i edukacije o mogućnostima koje aditivni postupci pružaju, ne samo u proizvodnji već i oblikovanju proizvoda. Konstantan tehnološki napredak u aditivnoj proizvodnji te razvoj niskobudžetnih 3D printera omogućio je u posljednje vrijeme sve veću integraciju formalnog i neformalnog obrazovanja o aditivnoj proizvodnji u kurikulum obrazovnih institucija [3].

Svrha ovog rada je razvoj edukacijskog seta koji opisuje i prikazuje ključne karakteristike aditivne proizvodnje s naglaskom na FDM postupku (eng. *Fused Deposition Modeling*) koji će služiti za prijenos znanja i prikaz mogućnosti aditivne proizvodnje novim i postojećim korisnicima. Cilj edukacijskog seta je olakšati razumijevanje aditivne proizvodnje i samog FDM postupka na temelju tehničkih mogućnosti i mogućnosti konstrukcijskog oblikovanja. Edukacijski set sastoji se od fizičkih modela i kartica koje prikazuju i opisuju određene karakteristike FDM postupka.

Razvoj edukacijskog seta sastojao se od sljedećih koraka:

1. Proučavanje aditivne proizvodnje

U prvom koraku je kroz literaturu definirano što je to AM, koje proizvodne aditivne tehnologije postoje i prema kojim kriterijima se dijele. Uz to, opisan je postupak aditivne proizvodnje u koracima.

2. Proučavanje procesa rada FDM uređaja

Nakon upoznavanja s aditivnom proizvodnjom, u ovom dijelu proučen je i objašnjen proces rada FDM uređaja.

3. Izvlačenje karakteristika aditivne proizvodnje

Pregledom literature definirane su karakteristike nužne za razumijevanje AM-a od kojih će se edukacijski set sastojati. Izvučene karakteristike opisane su tekstom i slikama.

4. Identifikacija načina reprezentacije znanja

Prije same izrade edukacijskog seta su identificirani načini reprezentacije znanja te odabrani koji će biti korišteni prilikom izrade edukacijskog seta.

5. Izrada edukacijskog seta

Na kraju, nakon upoznavanja AM-a i principa rada FDM-a te identifikacije načina reprezentacije znanja je izrada edukacijskog seta. Proces izrade edukacijskog seta sastojao se od izrade 3D modela karakteristika, proizvodnje modela FDM postupkom te na kraju izrade kartica koje opisuju fizičke 3D modele karakteristika.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja (AM) obuhvaća niz tehnologija čiji je temeljni princip rada izrada fizičkih objekata dodavanjem materijala sloj po sloj izravno iz 3D CAD (eng. *Computer Aided Design*) modela [4]. Aditivne postupke karakterizira izrada proizvoda u jednom proizvodnom koraku bez potrebe pomnog planiranja slijeda procesa.

Postoji više postupaka aditivne proizvode koji se najčešće dijele na temelju sljedeća četiri kriterija: vrsti materijala, primijenjenoj tehnologiji izrade, konačnom obliku proizvoda i izvoru energije potrebnom za povezivanje materijala. Navedenim kriterijima izravno se utječe na mehanička svojstva, dimenzijsku točnost, kvalitetu površine proizvoda, vrijeme izrade te ukupnu cijenu proizvodnje.

Prema primijenjenoj tehnologiji AM postupci [2] dijele se na:

- *Material Extrusion - MEX*,
- *Material Jetting - MJT*,
- *Binder Jetting - BJT*,
- *Sheet Lamination - SHL*,
- *Vat Photopolymerisation - VPP*,
- *Powder Bed Fusion - PBF*,
- *Direct Energy Deposition - DED*.

Ovisno o primijenjenoj tehnologiji, materijali za aditivnu proizvodnju dolaze u različitim oblicima poput filameta, kuglice, smole, granule ili praha [5]. Najčešće se koriste polimerni materijali: poliamidi (PA), akrilonitril/butadien/stiren (ABS), polikarbonat (PC), poliuretan (PUR), poli(metil-metakrilat) (PMMA), poli(vinil-klorid) (PVC), ali i materijali poput čelika, aluminijska i kompozita [4].

U Tablica 1 dan je pregled karakteristika aditivnih proizvodnih tehnologija.

Tablica 1. Karakteristike aditivnih proizvodnih tehnologija [2]

Tehnologija	Komercijalni naziv	Materijal	Oblik materijala	Izvor energije potreban za povezivanje materijala
MEX	<i>Fused Deposition Modeling - FDM</i>	Polimeri	Žica	Toplinska energija
		Kompoziti		
MJT	<i>Nanoparticle Jetting - NPJ</i>	Metali	Smola	UV zračenje topline
		Keramika		
	<i>Drop on Demand - DOD</i>	Vosak		
	<i>PolyJet by Objet</i>	Fotopolimeri		
BJT	<i>Binder Jetting - BJ</i>	Pijesak	Prah	Toplinska energija
		Metali	Smola	
SHL	<i>Laminated Object Manufacturing - LOM</i>	Papir	Listovi	Ultrazvuk, ljepljivo, laserski snop
		Metali		
VPP	<i>Stereolithography - SLA</i>	Plastika	Smola	Zračenje, UV svjetlo, vidljiva svjetlost, elektronska zraka
	<i>Digital Light Processing - DLP</i>			
	<i>Continuous Liquid Interface Production - CLIP</i>			
PBF	<i>Selective Laser Melting – SLM</i>	Metali	Atomizirani prah	Elektronska zraka, laserska zraka
	<i>Electron Beam Melting - EBM</i>			
	<i>Selective/Direct Laser Melting – SLS, DLS</i>			
DED	<i>Laser engineered net shaping - LENS</i>	Metali	Prah, žica	Elektronska zraka, laserska zraka
	<i>Electron Beam Additive Manufacturing - EBAM</i>			

2.1. Postupak aditivne proizvodnje

Postupak aditivne proizvodnje sastoji se od niza koraka od virtualnog CAD modela do konačnog fizičkog proizvoda. Većina aditivnih tehnologija do nekog stupnja uključuje sljedećih 6 koraka prikazanih na **Pogreška! Izvor reference nije pronađen.** [4, 6]:

1. Izrada 3D CAD modela

Prvi korak je izrada trodimenzionalnog geometrijskog modela u softveru za 3D modeliranje. U softverima za 3D modeliranje dobivaju se potpuni (solid) 3D modeli koji proizlaze iz kombinacije površina do zatvaranja potpunog volumena [7]. Oprema za reverzibilno inženjerstvo (optički i laserski skeneri) također može biti korištena u svrhu dobivanja prikaza 3D tijela ili površine.

2. Pretvorba 3D CAD modela u STL datoteku

3D CAD model se nakon izrade konvertira u STL (eng. *Standard Tessellation Language*) format datoteke koji se koristi u gotovo svim uređajima za aditivnu proizvodnju. STL format opisuje površinsku geometriju 3D modela kao mrežu povezanih trokuta, međutim ne posjeduje boje, materijale ili uobičajene značajke. Danas se također koriste 3MF (eng. *3D Manufacturing Format*) i AMF (eng. *Additive Manufacturing Format*) formati koji su nadograđeni te posjeduju mogućnost prikaza boje i materijala.

3. Podešavanje parametara proizvodnje

STL format datoteke učitamo u digitalni softver "*slicer*" u kojem se model orijentira u virtualnu radnu okolinu printera gdje se mogu namjestiti parametri poput temperature, visine sloja i potporne strukture. Kada se potrebni parametri podese, model se podijeli na konačan broj slojeva te se takav generira u G-kod koji se premješta na uređaj.

4. Priprema uređaja za rad

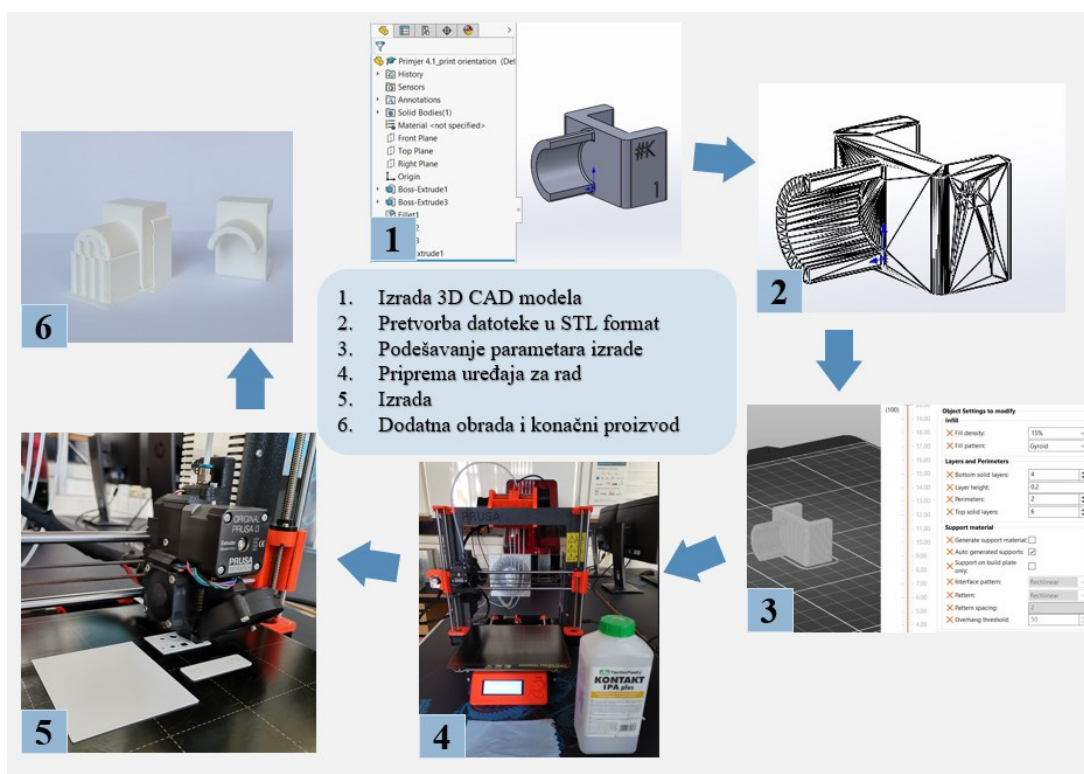
Kako bi mogli započeti izradu proizvoda potrebno je pripremiti uređaj za rad. Ovisno o proizvodnom procesu, potrebno je očistiti radnu komoru ili ploču, dodati materijal u uređaj, izvršiti kalibraciju, zagrijavati podložnu ploču, itd.

5. Izrada proizvoda

Sama izrada proizvoda je većinski automatizirana radnja te nije potreban konstantan nadzor. Povremenu provjeru procesa izrade dobro je provesti zbog mogućnosti pogrešaka poput nedostatka materijala ili kvarova u napajanju. Česta pogreška koja se događa tijekom izrade proizvoda je odljepljivanje proizvoda s radne ploče uslijed loše adhezije među slojevima. Taj problem moguće je riješiti podešavanjem parametara poput temperature tijekom rada uređaja bez potreba za prekidanjem proizvodnog procesa.

6. Dodatna obrada i konačni proizvod

Kada je rad uređaja završen, proizvod je spreman za uklanjanje s uređaja. Prije samog uklanjanja proizvoda potrebno je uvjeriti se da su proizvod i radna ploča dovoljno ohlađeni i da nema aktivno pokretnih dijelova. Nakon uklanjanja, proizvodi mogu zahtijevati dodatnu obradu poput čišćenja ili otklanjanja potporne strukture što zahtijeva vrijeme i pažnju. Prije same primjene proizvoda moguće je dodatna obrada poput bojanja ili spajanja u sklop ukoliko je proizvod komponenta nekog sklopa. Kada je proces izrade i dodatne obrade uspješno izvršen, proizvod je spreman za korištenje.

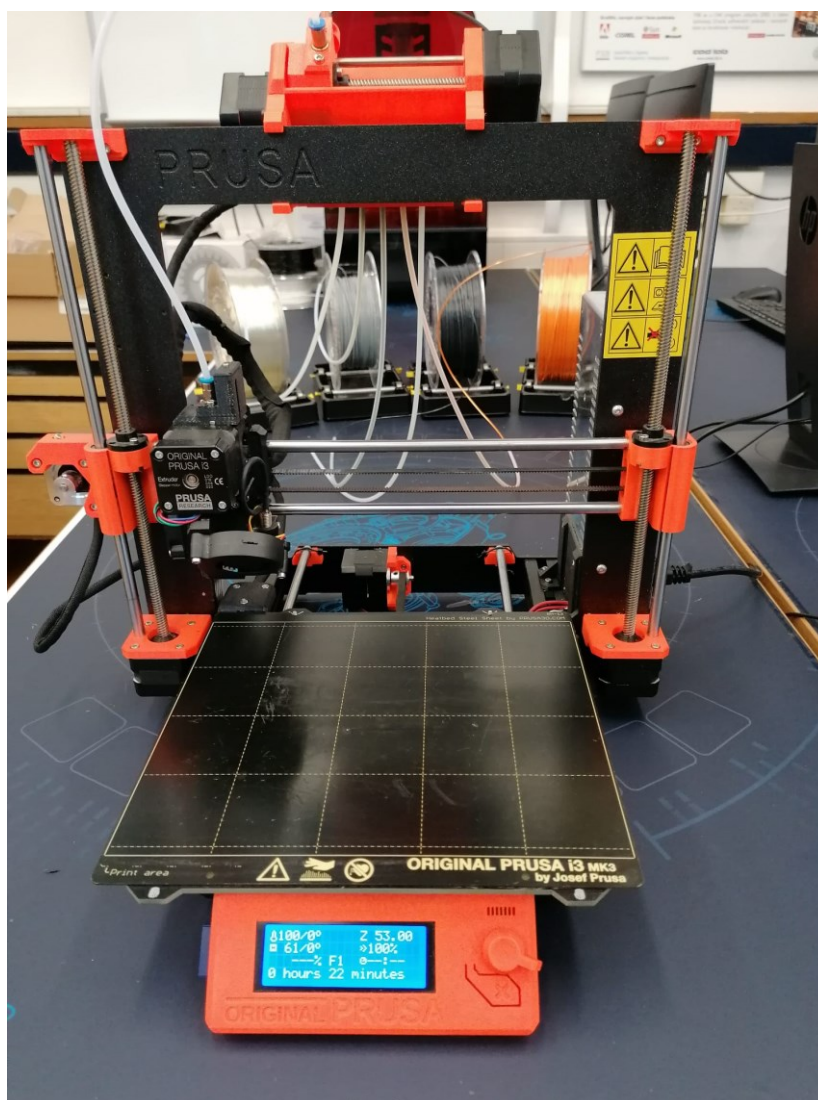


Slika 1. Koraci rada FDM uređaja

3. FUSED DEPOSITION MODELING – FDM

FDM postupak je među najpopularnijim i najraširenijim tehnologijama aditivne proizvodnje na tržištu. Osnovni princip izrade proizvoda ovom tehnologijom je da se otopljeni materijal istiskuje kroz mlaznicu sloj na sloj na ploči printera [1].

Prvi FDM printer razvio je *Scott Crump*, osnivač tvrtke *Stratasys* [4]. Nakon isteka prvih patenata ove tehnologije razvijen je velik broj jeftinih uređaja za FDM proizvodnju. Neki od najpopularnijih proizvođača FDM desktop uređaja su *Formlabs*, *Makerbot*, *Ultimaker*, *XYZ printing* i *Prusa* [8]. Laka dostupnost uređaja i jednostavnost korištenja dovela je do svakodnevne uporabe u rastućoj hobi zajednici. Na Slika 2 prikazan je FDM uređaj proizvođača *Prusa*.



Slika 2. *Prusa i3*

Što se tiče kompleksnosti geometrije proizvoda, FDM postupkom omogućena je izrada unutarnjih šupljina, provrta, nagiba, zakrivljenih površina i drugih značajki potrebnih za funkcionalnost modela. Zbog toga FDM postupak sve više pronalazi primjenu u biomedicini, automobilskoj, zrakoplovnoj i svemirskoj industriji.

Polimerni materijali koji se najčešće koriste su [9]:

- *PLA (Polylactic acid)* - biorazgradivi termoplastični poliestar
- *ABS (Acrylonitrile butadiene styrene)* - termoplastični polimer visoke čvrstoće otporan na promjene temperature
- *PET (Polyethylene terephthalate)* - proziran termoplastični polimer otporan na vlagu
- *TPU (Thermoplastic polyurethane)* – izdržljiv i elastičan polimer
- *NYLON (Polyamid)* – izdržljiv, otporan na abraziju, često se koristi kao zamjena za *ABS*

Jednostavnost korištenja, niske cijene i mogućnost izrade kompliciranih proizvoda čine FDM uređaje pogodnima za upoznavanje i učenje o mogućnostima aditivne proizvodnje te se polako implementira korištenje AM uređaja u obrazovnim institucijama u svrhu obrazovanja o AM.

3.1. Princip rada FDM uređaja za aditivnu proizvodnju

Na Slika 3 dan je shematski prikaz rada FDM uređaja koji se sastoji od sljedećih koraka [4]:

1. Povlačenje materijala

Materijal za FDM printer dolazi u obliku žice (filament) namotanog u kolut. Proces započinje povlačenjem filameta do grijača pomoću motora i posebno nazubljene osovine koja se nalazi u sklopu glave ekstrudera ili kao zaseban mehanizam kojim se osigurava konstantan dotok materijala. Razvojem FDM uređaja s dvije mlaznice omogućeno je istodobno korištenje više materijala različite vrste i boje.

2. Taljenje materijala

Dolaskom filameta do grijača započinje proces taljenja materijala uslijed dovoljno visokih temperatura. Potrebno je ostvariti temperaturu malo iznad očvršćenja kapljevito materijala kako bi nanošenje i povezivanje slojeva bilo izvedivo jer vrlo brzo očvršćuje na sobnoj temperaturi i degradira na previsokim.

3. Istiskivanje

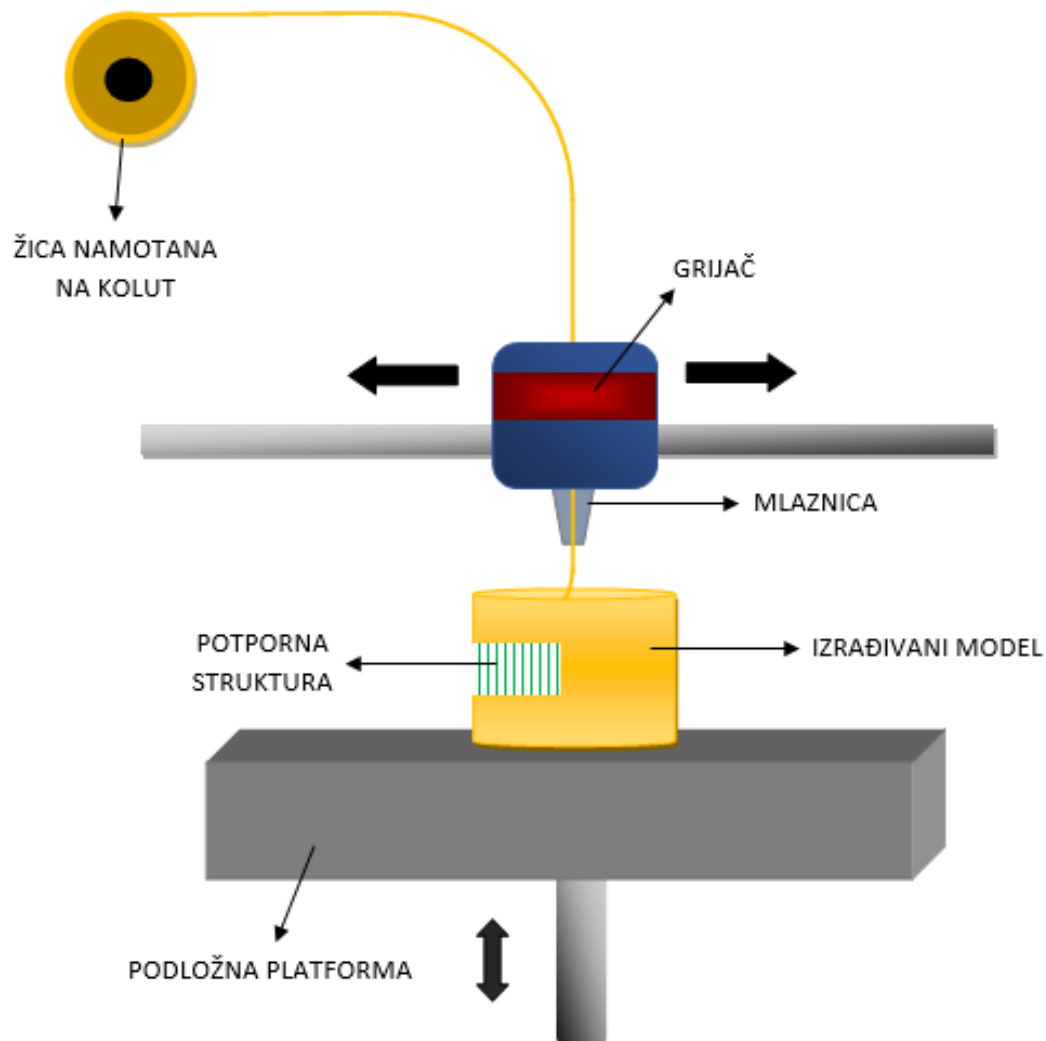
Mlaznica za istiskivanje materijala određuje oblik i veličinu istisnutog materijala. Ako je promjer mlaznice veći, istiskivanje materijala će biti brže, ali može dovesti do narušavanja kvalitete gotovog proizvoda. Mlaznica ekstrudera pogonjena je u dvije osi, dok treću os izvodi radni stol printera. Time je omogućena izrada trodimenzionalnih objekata. Protok materijala kontroliran je tlakom.

4. Povezivanje slojeva materijala

Prvi sloj istisnutog materijala mora se prihvatiti za podlogu, dok se svaki sljedeći sloj prihvaća na prethodni sloj. Glavni faktor koji utječe na sposobnost povezivanja slojeva materijala je temperatura na koju je materijal zagrijan. Prethodno istisnuti slojevi hlade se različito od novonastalih slojeva te dolazi do termičkih mikro stezanja i rastezanja što rezultira pojavom tzv. "*warpinga*", odnosno odljepljivanja slojeva s podložne ploče uređaja. To je moguće izbjeći na način da se grije podložna ploča printera ili upotrijebi ljepilo koje će omogućiti veću adheziju prvih nekoliko slojeva s podložnom pločom.

5. Potporne strukture

Potporne strukture služe kako bi održale na mjestu viseće i odvojene dijelove proizvoda. Time je omogućeno zadržavanje kvalitete i oblika samog proizvoda tijekom izrade. Dodatno, potporna struktura omogućava izradu proizvoda orijentiranih u različitim smjerovima i kutovima. Iako potporna struktura povećava količinu utrošenog materijala i vremena, neke modele jednostavno je nemoguće izraditi bez potporne strukture. Materijali potporne strukture mogu biti isti kao i sami proizvod ili proizvoljno odabrani (npr. topivi materijal).



Slika 3. Shematski prikaz rada FDM uređaja

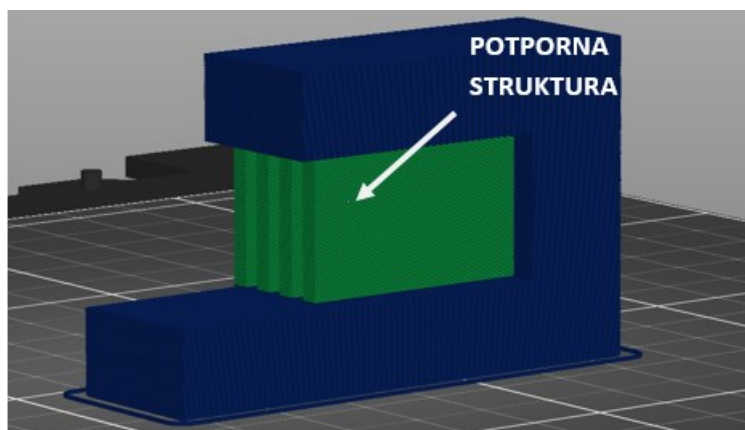
3.2. Karakteristike FDM postupka

Usprkos svestranosti i sve veće primjene FDM postupka za izradu kompleksnih i zadivljujućih proizvoda još uvijek postoji nedostatak informacija i znanja o AM i FDM kako bi korisnici mogli iskoristiti karakteristike, prednosti i ograničenja [10], [6].

Karakteristike FDM-a čine važnu ulogu za usmjerenje korisnika prilikom stvaranja ideja i u samom procesu dizajna proizvoda kako bi se smanjile pogreške i potrebne iteracije prilikom izrade [3]. Neke od najvažnijih karakteristika FDM-a nužne za razumijevanje AM-a opisane su u nastavku rada.

3.2.1. Potporna struktura

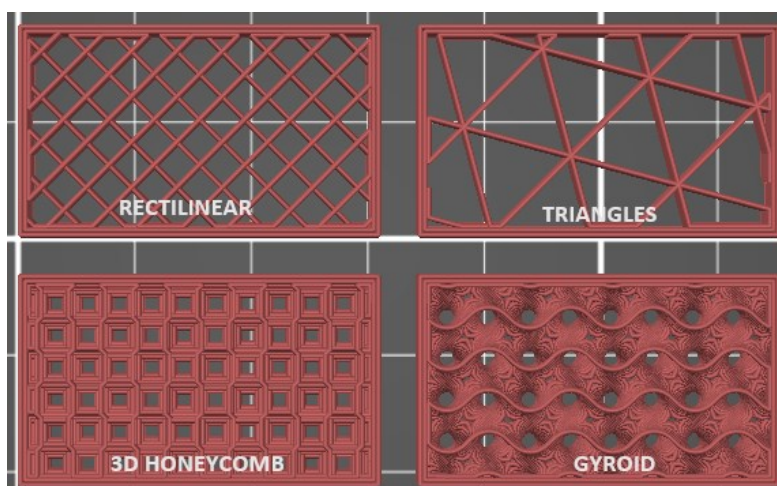
Potporne strukture nužne su kod izrade objekata koji sadrže dijelove pod kutom manjim od 45 stupnjeva poput mostova, vertikalnih rupa ili dužih izbočina. Obično su tanke zbog uštede i lakšeg uklanjanja potpornog materijala. Većina AM sustava ima mogućnost podešavanja kuta pod kojim će se koristiti potporni materijal. Ponekad je potrebno nekoliko pokušaja kako bi se ostvarila optimalna kvaliteta proizvoda i potrošenog materijala. Nakon završenog printanja, uklanjanje potporne strukture obično se izvodi ručno. Problem kod uklanjanja je mogućnost nastanka oštećenja površine proizvoda te se iz tog razloga vrlo često koristi potporni materijal topiv u tekućini kako bi se bolje očuvala kvaliteta površina. Na Slika 4 prikazana je potporna struktura na modelu.



Slika 4. Potporna struktura materijala

3.2.2. Uzorak ispune

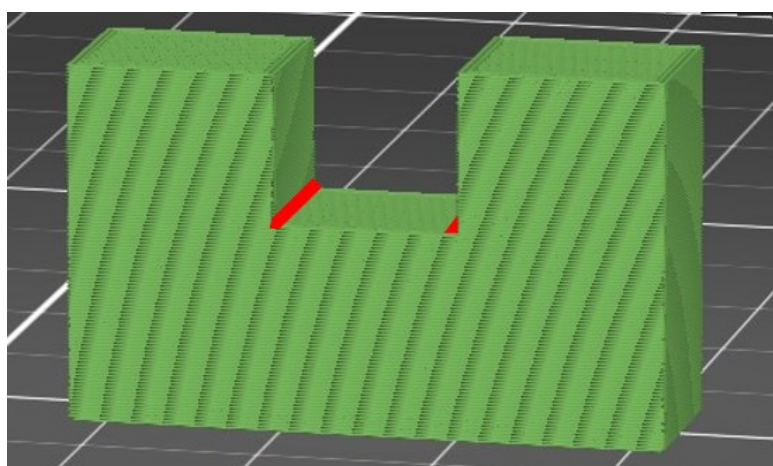
Uzorak ispune je struktura i oblik kojim je unutrašnjost proizvoda ispunjena. Softveri za FDM posjeduju mogućnost različitog odabira strukture ispune od jednostavnih linija do složenih geometrijskih oblika. Odabir uzorka ispune može utjecati na čvrstoću, vrijeme izrade, smanjenje mase i fleksibilnost samog proizvoda. Ukoliko se radi od jednostavnim i malim proizvoda može se koristiti jednostavan linijski uzorak dok je kod velikih i kompleksnih proizvoda bolje uzeti uzorak (npr. "3D Honeycomb") koji će dati veću čvrstoću. Na Slika 5 prikazane su neke od mogućih vrsta uzoraka ispune.



Slika 5. Uzorak ispune

3.2.3. Koncentracija naprezanja

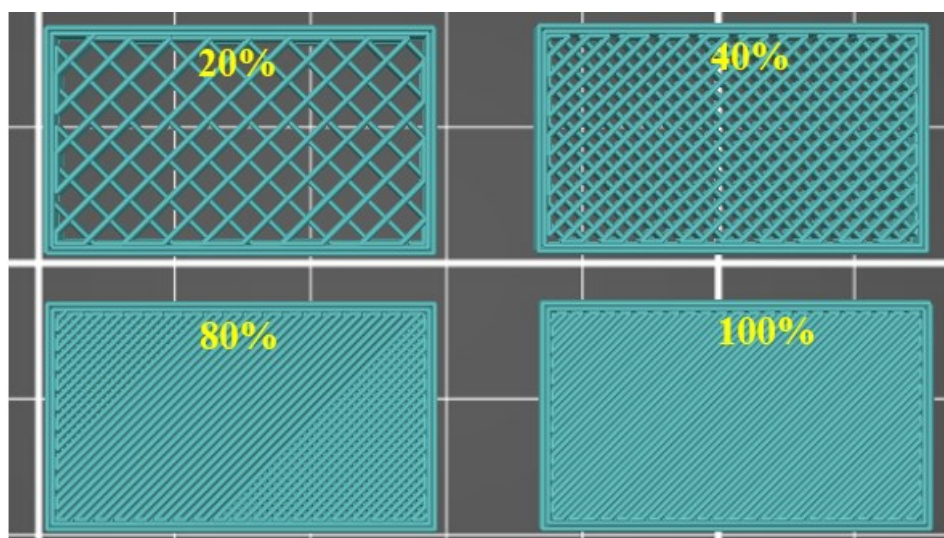
Koncentracija naprezanja pojavljuje se na oštrim rubovima i prijelazima i znatno utječe na čvrstoću proizvoda. Smanjenje naprezanja ostvaruje se skošenjem ili zaobljenjem rubova. Najčešće dolazi do pojave koncentracije naprezanja na unutarnjim kutovima i rubovima te ih je ukoliko je moguće gotovo uvijek poželjno zaobliti ili skositi. Na Slika 6 prikazano je mjesto koncentracije naprezanja na unutarnjem rubu modela. Skošnje ili zaobljenje vanjskih rubova osim smanjenja koncentracije naprezanja čini proizvod ergonomičnijim i udobnijim za korištenje.



Slika 6. Prikaz mjesta koncentracije naprezanja

3.2.4. Gustoća ispune

FDM postupak omogućuje određivanje postotka ispune objekata koji se izrađuju. Time je omogućena izrada proizvoda s potpunom ispunom i ispunom od 0%. Postotak ispune ovisi za što će se određeni proizvod koristiti te kakva su mehanička svojstva poželjna. Rijetko se izrađuju proizvodi s potpunom ispunjenošću ili u potpunosti šuplji. Manjim postotkom ispune dolazi do uštede materijala i vremena izrade, dok se s višim postocima dobivaju proizvodi veće čvrstoće.. Sukladno tome, potpuna ispunjenost ne donosi znatno bolja svojstva od djelomično ispunjenog proizvoda, ali se povećava vrijeme izrade, količina potrebnog materijala te masa samog proizvoda. S druge strane, potpuno šuplji proizvodi s 0% ispune su vrlo lako lomljivi i nema potpore gornjim površinama proizvoda. Na Slika 7 prikazane su gustoće ispune od 20%, 40%, 80% i 100%.



Slika 7. Gustoća ispune

3.2.5. Smanjenje mase

Kako je već spomenuto, postoji mogućnost podešavanja parametra ispune. Podešavanjem postotka ispune utječe se izravno na masu proizvoda uz zadržavanje ili poboljšanje svojstava proizvoda. Osim smanjenja mase doprinosi se manjoj potrošnji materijala i vremenu izrade. U Tablica 2 prikazano je kako postotak ispune utječe na masu proizvoda dimenzija 25x25x25mm izrađenog od *PLA* materijala.

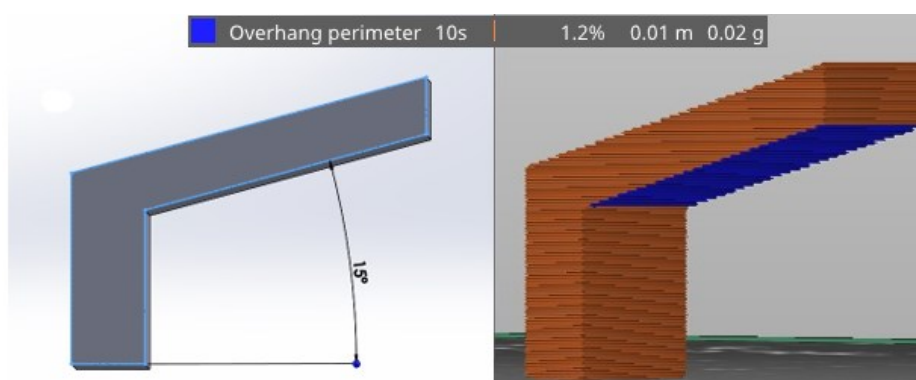
Tablica 2. Ovisnost mase proizvoda o postotku ispune objekta

Postotak ispune	Masa (g)
0%	4.17
25%	8.64
50%	12.34
100%	19.59

3.2.6. Nadvišenje

Kada se printa nadvišenje pod kutom manjim od 45 stupnjeva gledano od vertikale dolazi do pada istisnutog filameta uslijed gravitacije prije skrućivanja što rezultira visećim nitima materijala s objekta. Drugi mogući ishod je uvijanje nedovoljno ohlađenog istisnutog filameta iznad visine mlaznice. Uzrok tome je ostvarena premala kontaktna površina novog i prethodnog sloja materijala. Nakon gotovog ispisa često se dobiva proizvod neravne i hrapave površine savijenog oblika. Smanjenjem kuta dolazi do sve veće deformacije oblika i potrebno je koristiti potporne strukture ili promijeniti orijentaciju printa koje će onemogućiti deformacije oblika [1].

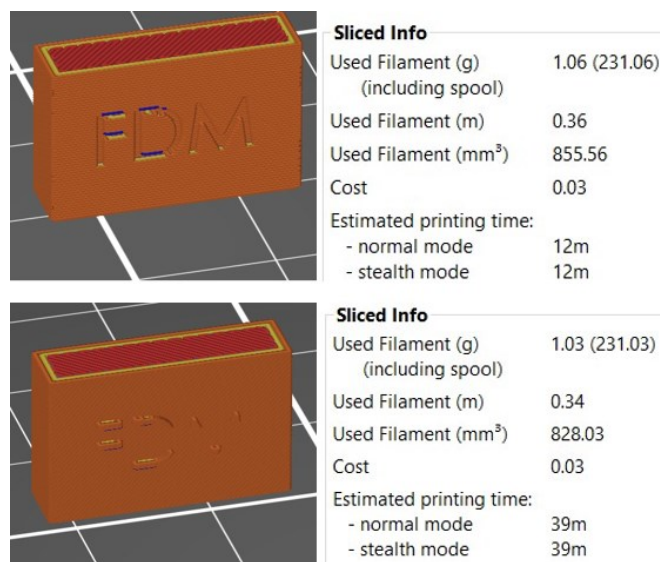
Većina FDM sustava posjeduje mogućnost podešavanja pod kojim kutom nagiba će se koristiti potporni materijal. Potrebno je nekoliko pokušaja za postizanje najbolje kvalitete uz smanjenje količine potpornog materijala [1]. Na Slika 8 prikazano je nadvišenje pod kutom od 15 stupnjeva.

**Slika 8. Nadvišenje**

3.2.7. Veličina oznaka

Najmanja čitljiva veličina oznake i font slova kod FDM postupka može se ostvariti na bočnim stranama proizvoda, dok će taj isti font na gornjim površinama izgledati lošije i manje čitljivo [1]. Oznake i slova mogu se udubiti u stijenke ili izraditi reljefno. Kod udublivanja koristi se manje materijala, smanjeno je vrijeme izrade i manja je mogućnost oštećenja tijekom naknadne

obrade. Reljefni oblik također je dobar za korištenje samo je potrebna veća pažnja prilikom naknadne obrade kako ne bi došlo do oštećenja. Font koji funkcionira u pravilu na svim površinama je 14pt, dok se na okomitim površinama može sniziti i na 8pt [1]. Na Slika 9 prikazano je kako bi ispali modeli s veličinom oznake 4mm, reljefno i udubljeno zajedno s podacima o potrebnoj masi materijala i vremenu izrade.



Slika 9. Prikaz veličine oznake 4mm

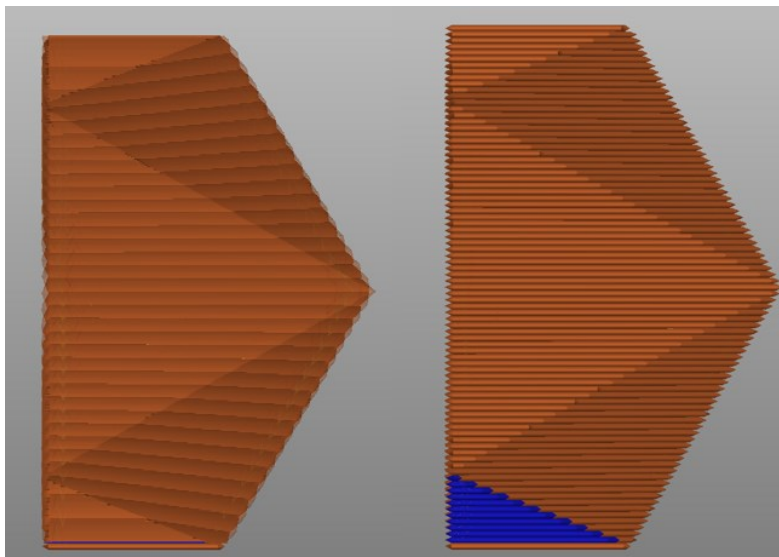
3.2.8. Izrada sklopova

FDM omogućuje izradu sklopova u jednom printu bez potrebe za naknadnim sklapanjem dijelova. Međutim, prilikom izrade modela sklopa potrebno je obratiti pažnju na zračnosti i u kojoj orijentaciji će izrada sklopa biti moguća bez spajanja slojeva dijelova. Ovisno o FDM uređaju se odabire minimalna zračnost, međutim smjernica u koju se može pouzdati je da se uzme minimalno razmak u veličini debljine sloja.

3.2.9. Visina sloja

Jedna od najvažnijih karakteristika prilikom izrade FDM postupkom je visina sloja kojom će se izrađivati proizvod. Odabirom što manje visine sloja dobiva se bolja kvaliteta površine, posebice na zaobljenim površinama te će efekt stepenica biti manje vidljiv [1]. Kod odabira visine sloja potrebno je uzeti u obzir kakve su površine modela. Ako se model sastoji većinom od ravnih okomitih površina preporuča se uzeti veće visine sloja jer neće doći do narušavanja kvalitete površine, ali će se znatno smanjiti vrijeme izrade i količina potrebnog materijala. S

druge strane, za modele s mnogo zakrivljenih površina bolje je odabrati manje visine sloja kako bi se dobile što glađe površine. Na Slika 10 prikazane su visine slojeva od 0.05mm (lijevo) i 0.2mm (desno).



Slika 10. Prikaz visine slojeva od 0.2 mm i 0.08 mm

3.2.10. Anizotropija

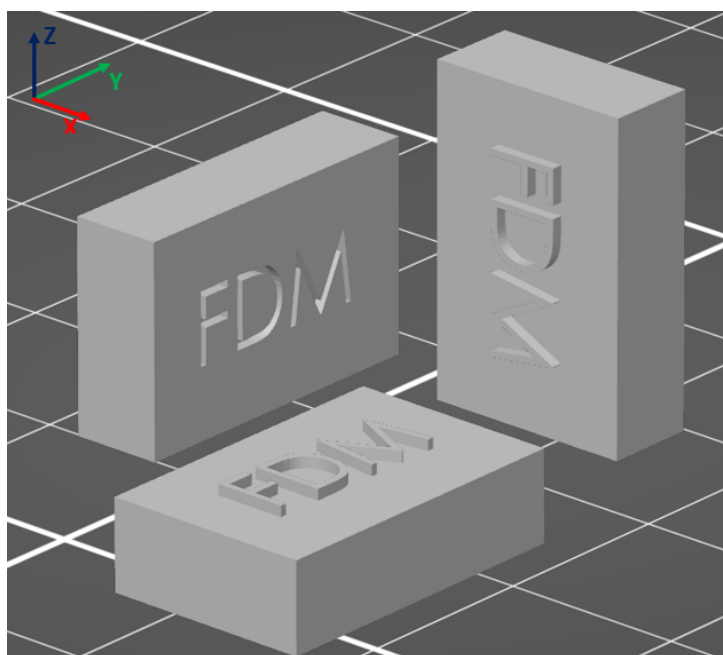
Anizotropija je osobitost nekog sredstva da poprimi različita vrijednosti svojstva u različitim smjerovima [11]. Proizvode izrađene FDM postupkom karakterizira visoki stupanj anizotropije koja se očituje u različitim mehaničkim svojstvima u samim slojevima i između slojeva. Do anizotropije dolazi zbog premale adhezije između slojeva. To znači da će proizvod biti najjači kada se primjeni sila u smjeru paralelnom sa slojevima, a slabiji ukoliko se primjeni sila u smjeru okomitom u odnosu na slojeve (Slika 11) [6]. Sukladno tome, problem anizotropije može se smanjiti promjenom orijentacije printa ili naknadnom obradom.



Slika 11. Smjer djelovanja naprezanja s obzirom na orijentaciju slojeva

3.2.11. Orijentacija printa

Orijentacija printa (Slika 12) ima značajnu ulogu kakve kvalitete će proizvod ispasti. Odabir orijentacije printa značajno utječe na točnost, vrijeme izrade, čvrstoću i kvalitetu površine [1]. Primjerice, postavljanjem modela cilindra vertikalno dobiti će se cilindar glatkih površina dok će se postavljanjem horizontalno dobiti cilindar grube površine te će površina na ploči printera biti ravna. Ako uzimamo u obzir čvrstoću, prije same orijentacije modela potrebno je znati smjer naprezanja kako bi se mogla odabrati optimalna orijentacija.



Slika 12. Orijentacije modela u x, y, z smjeru

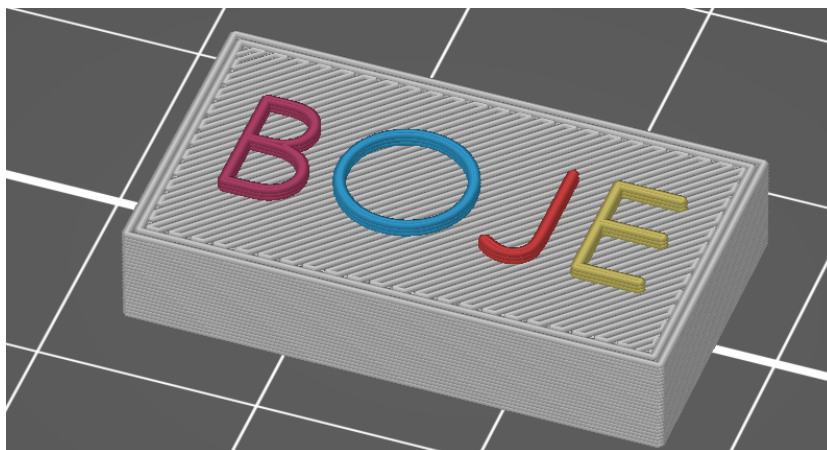
3.2.12. Premoštenje

Premoštenje se odnosi na mostove koji povezuju dvije daljnje izbočine dijela modela. Povećanjem duljine mostova dolazi do sve veće deformacije mosta uslijed gravitacije koja povlači slojeve materijala prije nego se slojevi materijala ohlade. To onemogućuje izradu ravnih mostova. Načini na koje se može riješiti premoštenje su povećanje hlađenja, smanjenje protoka, brzine izrade ili dodatkom potporne strukture na kritičnim mjestima [12].

3.2.13. Višebojnost

Prilikom izrade modela FDM postupkom moguće je izraditi višebojne proizvode. Kod FDM uređaja s dvije ili više mlaznica izmjena filameta različitih boja odvija se automatizirano, dok se višebojnost kod FDM uređaja s jednom mlaznicom i mogućnosti korištenja samo jednog

filamenta može ostvariti na način da se pauzira rad uređaja i izvrši izmjena filamenta. Izmjena filamenta je kod nekih FDM uređaja automatizirana, dok kod nekih zahtjeva ručnu izmjenu. Višebojnost se koristi često kako bi se dobili atraktivni i kohezivniji proizvodi bez potrebe za dodatnom doradom poput bojanja. Na Slika 13 prikazan je primjer višebojnosti modela.



Slika 13. Primjer višebojnosti modela

3.2.14. Rupe

Kod izrade rupa FDM-om najbolji rezultati se postižu dobro orijentacijom modela. Za ostvarenje dobre kružnosti rupe najbolje je orijentirati rupu da se izrađuje u vertikalnom smjeru. Horizontalna orijentacija izrade rupe može dovesti do značajne pojave efekta stepenice te deformacije oblika u elipsu uslijed gravitacije.

3.2.15. Materijali

Materijali koji se najčešće koriste kod FDM postupka navedeni su ranije u radu. Svaki materijal posjeduje različita svojstva te se odabire ovisno o primjeni proizvoda. Primjerice, ukoliko će proizvod biti izlagan naprezanjima odabrati će se čvršći materijal poput *ABS*-a, a ne mekani *TPU*.

3.2.16. Multimaterial

Mogućnost korištenja više materijala odjednom omogućuje jednostavnu izradu proizvoda od dva ili više materijala u jednom radnom koraku. Time je omogućeno izrađivati proizvode koji posjeduju svojstva dva ili više materijala. Kod uređaja s dvije mlaznice korištenje dva materijala ne izaziva nikakav problem. Dok s druge strane, kod FDM uređaja s jednom mlaznicom iziskuje strpljenje i nadzor rada zbog potrebe zaustavljanja rada uređaja i izmjene materijala. Važno je napomenuti kako različiti materijali zahtijevaju različite postavke poput radne temperature te

iz tog razloga može doći do lošeg povezivanja i poravnavanja slojeva. Prednost korištenja više materijala je kod izrade kompleksnih proizvoda te se može koristiti topivi materijal kao potporna struktura i time smanjiti mogućnost oštećenja prilikom čišćenja proizvoda.

3.2.17. Debljine utora i stijenki

Odabir optimalne debljine utora i stijenki važan je parametar prilikom izrade modela za FDM. Najmanja debljina utora i stijenki je zapravo najmanja moguća debljina da model zadrži svoju funkcionalnost. Ako je debljina prevelika dolazi do povećanja troškova i vremena izrade te potencijalno puknuća. S druge strane, odabir premale debljine može dovesti do gubitka funkcionalnosti, odljepljivanja slojeva i povećanja troškova zbog moguće potrebne ponovne izrade.

3.2.18. Kosine

Ranije u radu spomenut je efekt stepenica koji se pojavljuje prilikom dijeljenja kosina i zakrivljenih površina na slojeve. Efekt stepenica povećan je kod kosina s horizontalnim nagibom i većih debljina slojeva [13]. Time je značajno narušena kvaliteta površine te se teži odabiru manjih debljina slojeva i povoljnije orijentacije modela s obzirom na nagibe kosina.

4. NAČINI REPREZENTACIJE ZNANJA

Kada je riječ o načinima reprezentacije znanja, potrebno je odrediti elemente kojima će se to znanje prenijeti. Valjak F. i Bojčetić N. u svome radu [14] naveli su 5 elemenata za reprezentaciju znanja u aditivnoj proizvodnji: funkcionalna klasifikacija, opis (vizualni i tekstualni), 3D model (virtualni i fizički), podaci o proizvodnosti i primjeri. Pomoću ovih elemenata reprezentacije znanja omogućuje se učenje i proširivanje znanja te potiče kreativnost korisnika. Prilikom izrade edukacijskog seta karakteristika FDM-a, korišteni su sljedeći načini reprezentacije znanja: opis (tekstualni i vizualni), 3D model (virtualni i fizički), podaci o proizvodnosti i primjeri.

Tekstualni i vizualni opisi omogućuju prenošenje jednostavnih i apstraktnih informacija. Tekstualnim opisom dane su informacije poput definicija, ograničenja i mogućnosti određenih karakteristika. Kod apstraktnih tekstualnih informacija obično se prilaže i vizualni opis (slika) kako bi se olakšalo i pospješilo razumijevanje pročitanih novih informacija i obratno [15]. Opisima proširujemo teorijsko znanje koje može biti od koristi prilikom razvijanja ideja o modelima, npr. na što pripaziti tijekom razvijanja ideja i samog modeliranja modela namijenjenih za izradu FDM postupkom.

Drugi korišteni element reprezentacije znanja je 3D model (fizički i virtualni). Virtualni model nam prikazuje karakteristiku i njena svojstva u trodimenzionalnom obliku modela prije same izrade fizičkog modela. Na taj način se lakše vizualizira i poima određena karakteristika te time zajedno s opisom pospješuje razumijevanje iste. S druge strane, fizički model omogućuje stvarnu interakciju korisnika s karakteristikom. *"Korištenje fizičkih modela omogućuje korisnicima da osjete materijal, oblik, težinu, teksturu površine i dr. te time potaknu svoju kreativnost prilikom konstruiranja [14]."*

Treći korišteni element reprezentacije znanja su podaci o proizvodnosti. Ovdje se nalaze podaci o korištenim materijalima, potrošenoj količini materijala (masa proizvoda), potrebnom vremenu izrade i potrebnom broju pokušaja do optimalnog rezultata. Uspoređujući te podatke možemo dobiti dojam i potaknuti korisnike na razmišljanje na koji način smanjiti vrijeme izrade i utrošeni materijal uz održavanje ili poboljšanje svojstava poput čvrstoće.

Posljednji element reprezentacije su primjeri. Upravo primjeri čine ključan dio reprezentacije znanja jer omogućuju na jednostavan način vizualno i taktilno razumijevanje karakteristika FDM postupka te poticanje kreativnosti u konceptualnoj fazi izrade modela [16].

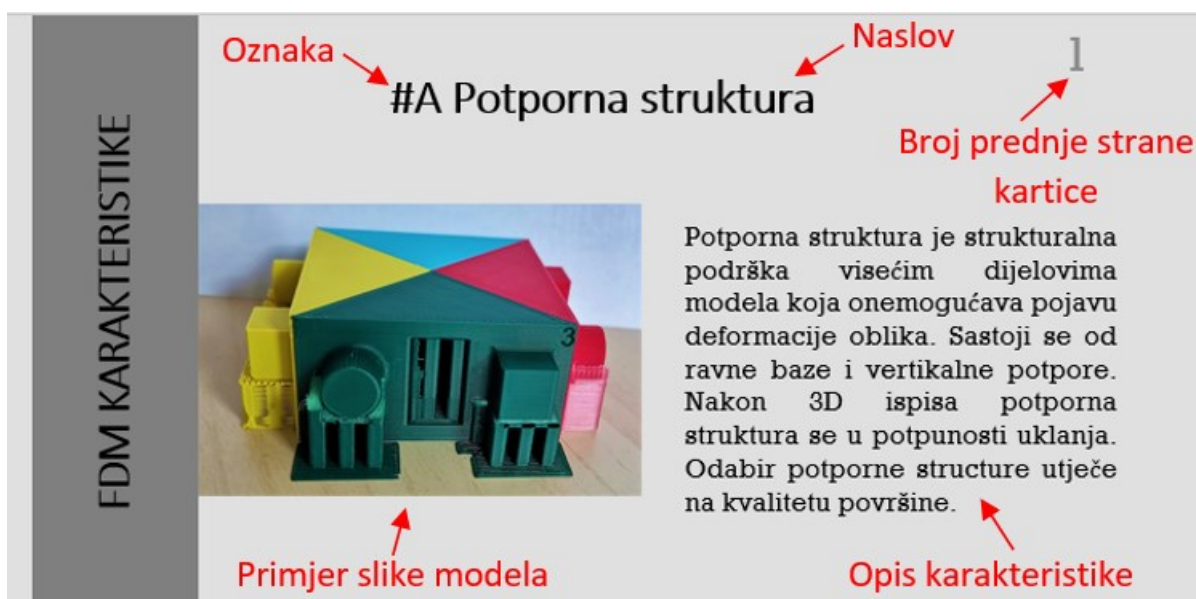
5. EDUKACIJSKI SET

Pregledom literature i upoznavanja o aditivnoj proizvodnji, FDM postupku i njegovim karakteristikama, odabrane su određene karakteristike od kojih će se sastojati edukacijski set. Karakteristike su ranije u radu objašnjene, međutim ne nalaze se sve u edukacijskom setu već je odabrano 17 karakteristika koje će omogućiti upoznavanje s aditivnom proizvodnjom i proširenje znanja novih korisnika na jednostavan i učinkovit način.

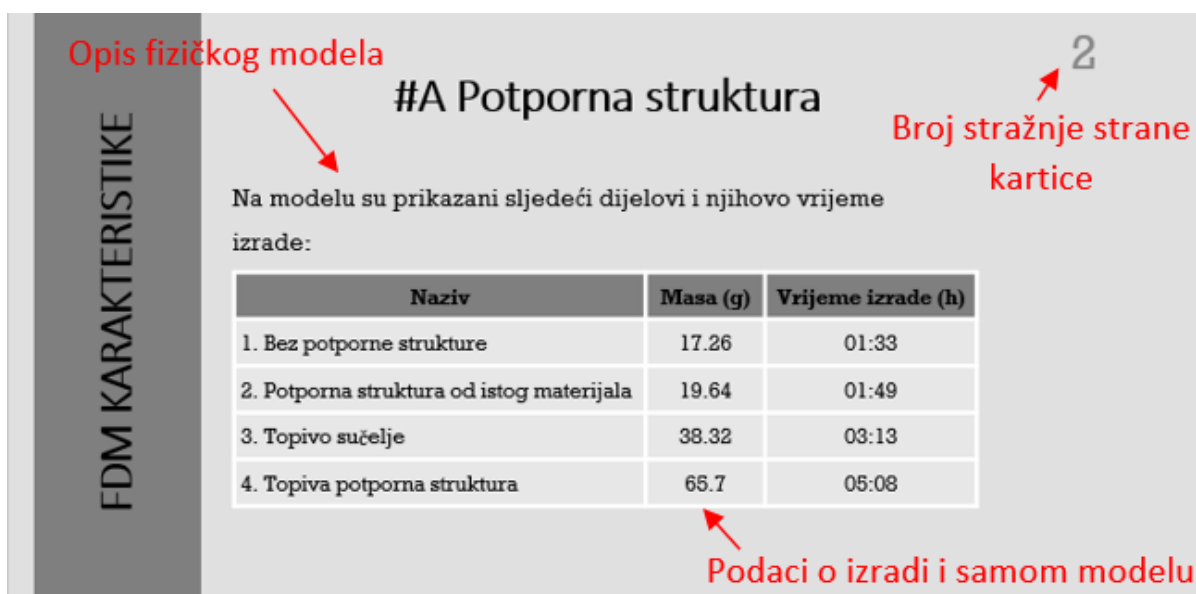
Kako je već rečeno ranije, aditivne tehnologije razlikuju se u načinu rada od tradicionalnih postupaka proizvodnje te je potrebno više obrazovanja korisnika kako bi proširili znanje o mogućnostima i ograničenjima aditivnih tehnologija. Upravo je cilj edukacijskog seta da korisnici tijekom obrazovanja o aditivnoj proizvodnji i FDM postupku uzmu u ruke fizičke modele te opipno i vizualno nauče na koji način utječe pojedina karakteristika na sam proizvod zajedno s opisnim karticama o karakteristikama i modelima te potaknu svoju kreativnost prilikom samog konstruiranja proizvoda za aditivne tehnologije.

Edukacijski set sastoji se od fizičkih 3D modela i opisnih kartica u skladu s odabranim brojem karakteristika. Prilikom modeliranja modela karakteristika uzeto je u obzir da će korisnici edukacijskog seta posjedovati malo ili ni malo znanja o aditivnoj proizvodnji i FDM postupku. Iz tog razloga modeli su jednostavnijih oblika kako bi na što lakši način omogućili razumijevanje karakteristika koju prikazuju. Neki modeli sastoje se od više elemenata tako da prikazuju problem karakteristike i njeno poboljšanje. Uz to, na samim modelima izrađene su oznake i brojevi koji će služiti kao referenca za kartice. Primjerice, oznaka #A nalazi se na samoj opisnoj kartici, ali i fizičkom modelu za lakše snalaženje. Kartice nadopunjuju fizičke modele edukacijskog seta na način da se na njima nalaze opisne informacije na koji način i što prikazuje određena karakteristika uz navedene potrebne podatke o samoj izradi modela.

Primjer opisne kartice prikazan je na Slika 14 i Slika 15 dok se ostatak nalazi u prilogu. S prednje strane nalazi se tekstualno objašnjenje pojedine karakteristike zajedno s primjerom slike modela, dok su s druge strane informacije o masi, količini materijala i potrebnom vremenu izrade i reference povezane s modelom.



Slika 14. Prednja strana opisne kartice

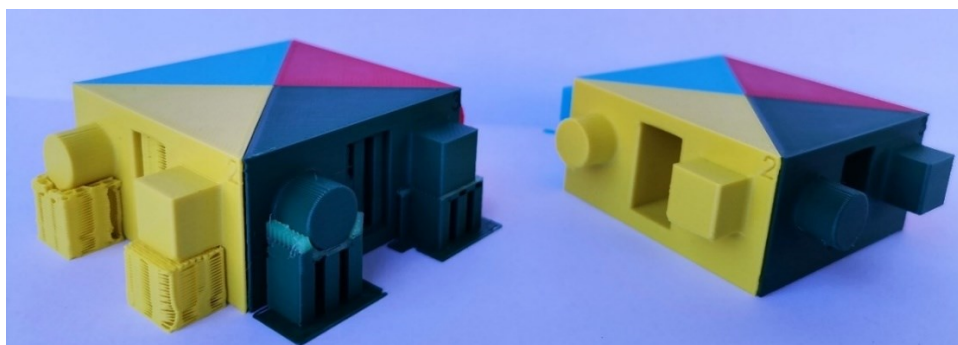


Slika 15. Stražnja strana opisne kartice

Modeli karakteristika modelirani su u softveru *SolidWorks* 2020, a izrađivani na FDM printeru proizvođača *Prusa*, model *Prusa i3* radnog volumena 250x210x210mm.

5.1. Potporna struktura

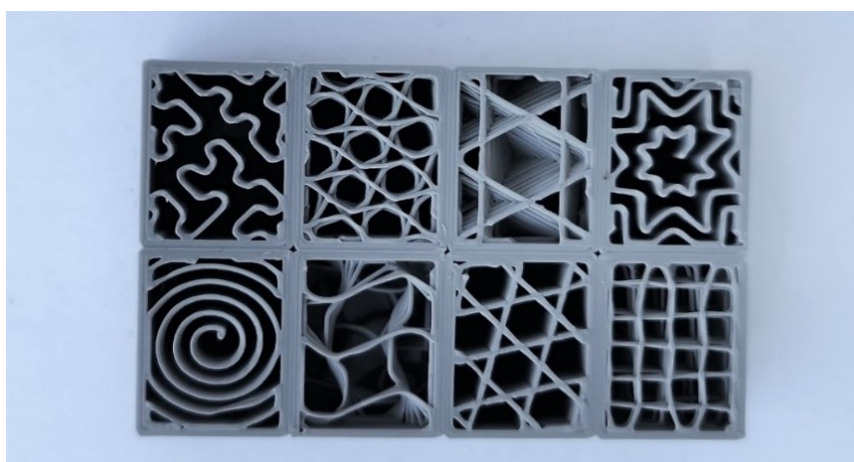
Model potporne strukture (Slika 16) prikazuje četiri vrste vanjske i unutarnje potporne strukture; bez potporne strukture, od istog materijala, topivog sučelja i topivog materijala. Vrste potporne strukture navedene su u opisnim karticama zajedno s referentnim brojevima koji se nalaze na samom modelu. Komponente su printane zasebno te naknadno spajanje ljepilom zbog manje potrebnog vremena izrade. Izrađena su dva jednaka modela te je na jednom uklonjena potporna struktura kako bi se prikazao izgled i kvaliteta površina na mjestima kontakta s potpornom strukturom.



Slika 16. Model potporne strukture

5.2. Uzorak ispune

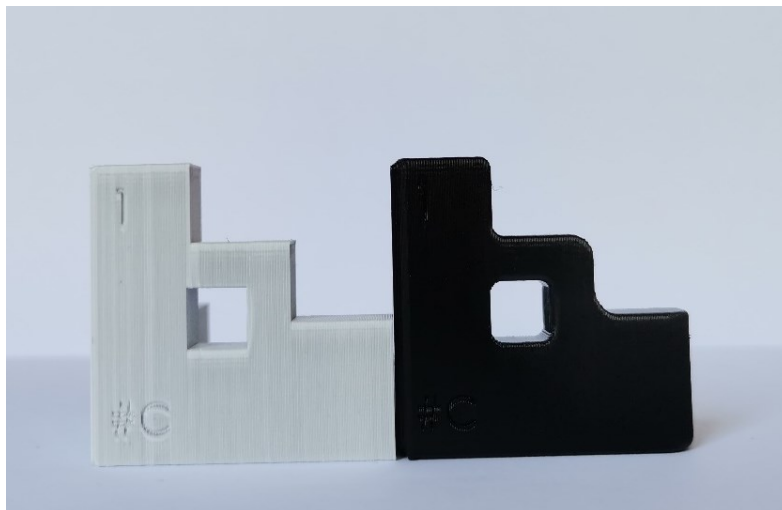
Za prikaz modela uzoraka ispune (Slika 17) odabrano je 8 od mogućih 12 uzoraka na način da su uzeti 2D i 3D uzorci. 3D uzorci najčešće se koriste kada je potrebno ostvariti veću čvrstoću proizvoda. Dakle, odabirom uzorka ispune utječe se na čvrstoću, fleksibilnost, vrijeme izrade i količinu materijala.



Slika 17. Model uzorka ispune

5.3. Koncentracija naprezanja

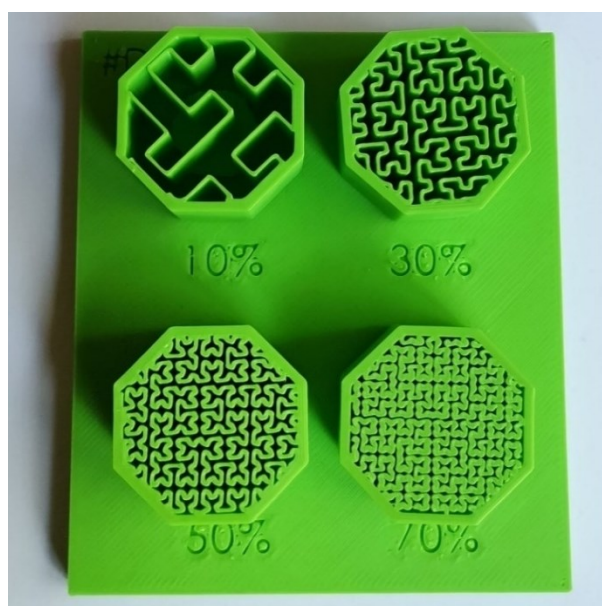
Koncentracija naprezanja pojavljuje se na oštrim rubovima i prijelazima, kako je ranije spomenuto. Za prikaz modela koncentracije naprezanja (Slika 18) izrađen je model od 2 elementa od kojih se jedan sastoji od mnogo unutrašnjih kutova i oštih rubova. Na drugom elementu prikazano je smanjenje koncentracije naprezanja zaobljenjem i skošenjem rubova.



Slika 18. Model koncentracije naprezanja

5.4. Gustoća ispune

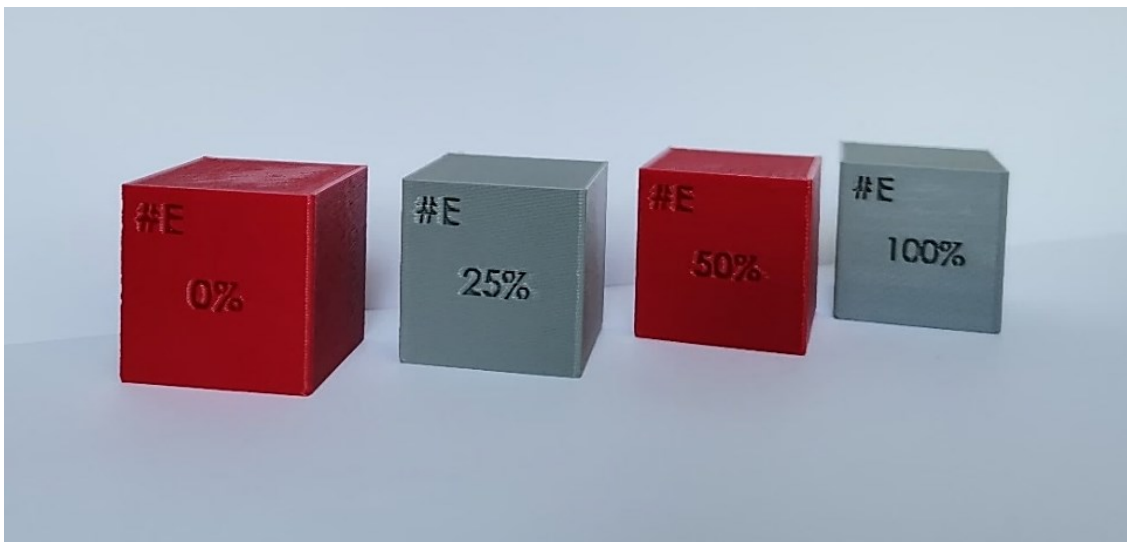
Model gustoće ispune (Slika 19) izrađen je tako da vizualno prikazuje 4 različita postotka ispune: 10%, 30%, 50% i 70%. Za prikaz gustoće ispune odabran je uzorak *Hilbert Curve*. Odabirom sve veće gustoće ispune raste vrijeme izrade i količina potrebnog materijala.



Slika 19. Model gustoće ispune

5.5. Smanjenje mase

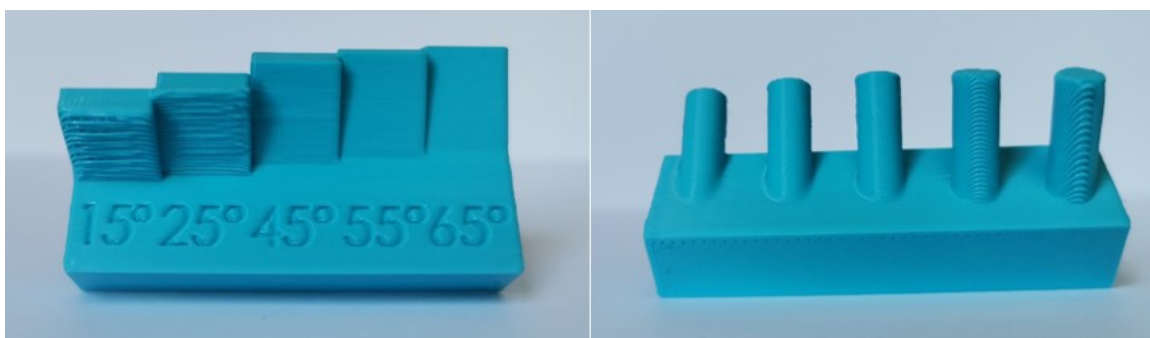
Za prikaz modela koji prikazuje smanjenje mase uzet je oblik kocke u 4 primjerka različitih ispuna (Slika 20) kako bi se stavljanjem u ruke različitih kombinacija kocka moglo osjetiti koliko postotak ispune izravno utječe na masu. Time se omogućava izrada lakih i čvrstih proizvoda.



Slika 20. Model smanjenja mase

5.6. Nadvišenje

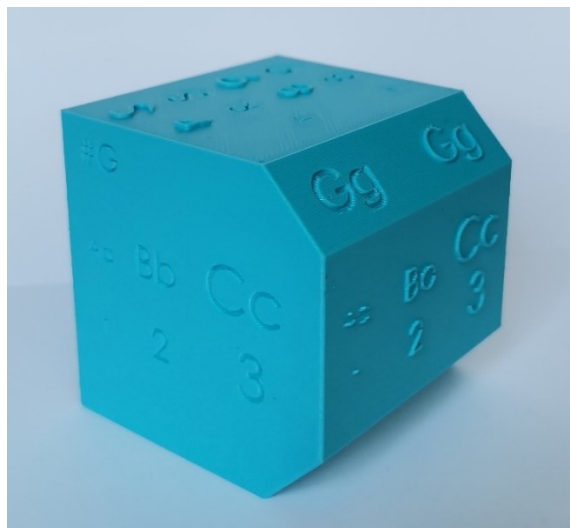
Za prikaz modela nadvišenja (Slika 21) izrađene su pravokutne i cilindrične izbočine pod kutovima od 15, 25, 45, 55 i 65 stupnjeva. Na modelu se vidi kako smanjenje kuta pod kojim je izbočina izrađena utječe na kvalitetu same površine izbočine. Također, vidimo prema kvaliteti površine kako cilindrični oblik izbočine bolje podnosi nadvišenja od pravokutnog.



Slika 21. Model nadvišenja

5.7. Veličina oznaka

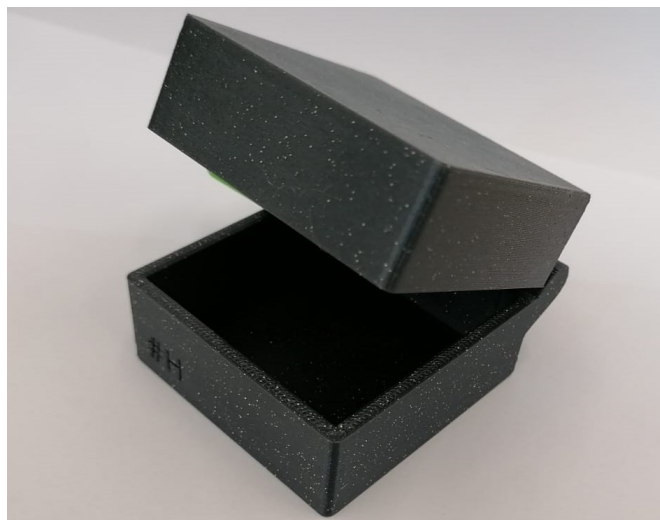
Za prikaz veličina oznaka (Slika 22) odabran je oblik kocke modela te su na horizontalnim, vertikalnim i skošenim strana stavljene različite veličine slova i brojeva (veličine naznačene na kartici) izrađene reljefno i udubljeno. Tako se na modelu može vidjeti koja je potrebna veličina oznaka optimalna za dobru vidljivost ovisno o poziciji oznaka.



Slika 22. Model veličina oznaka

5.8. Izrada sklopova

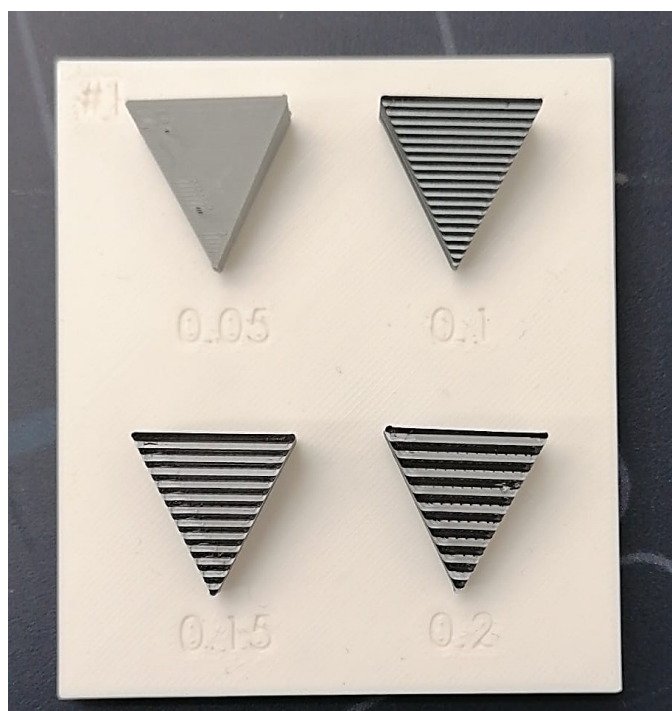
Mogućnost izrade sklopova u jednom printu nova je razina izrade proizvoda. Za prikaz izrade sklopa u jednom printu odabrana je kutijica (Slika 23) koja ujedno služi za spremnik modela smanjenje mase. Prilikom izrade sklopa FDM-om potrebno je obratiti pažnju na orijentaciju prilikom izrade, ali i zračnost između pokretnih dijelova.



Slika 23. Model izrade sklopova

5.9. Visina sloja

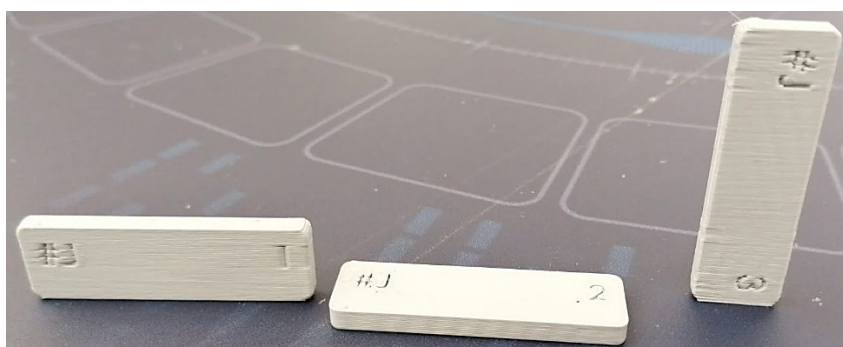
Kako bi se lijepo vidjela razlika u visinama slojeva, odabran je model s 4 elementa u obliku trokuta visine 8mm. Sva 4 elementa izrađena su u 4 različite visine sloja. Dodatno, izrađeni su na način da je svaki drugi sloj izrađen u jednoj od dvije boje kako bi se ljepše vidjela razlika visina. Model visine sloja prikazan je na Slika 24.



Slika 24. Model visine sloja

5.10. Anizotropija

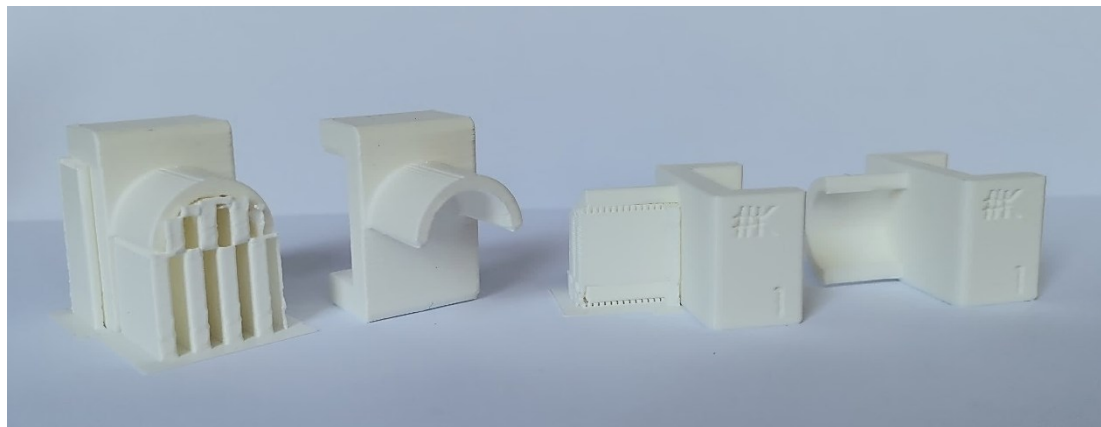
Anizotropija je prikazana modelom od 3 pločice (Slika 25) koje su printane u 3 različite orijentacije u 2 primjerka. Jedan od primjeraka modela služi kako bi se pokazalo, ono što je ranije u radu napisano vezano uz anizotropiju, da će prije puknuti pločica na koju se djeluje silom u smjeru okomitom u odnosu na slojeve.



Slika 25. Model anizotropije

5.11. Orijentacija printa

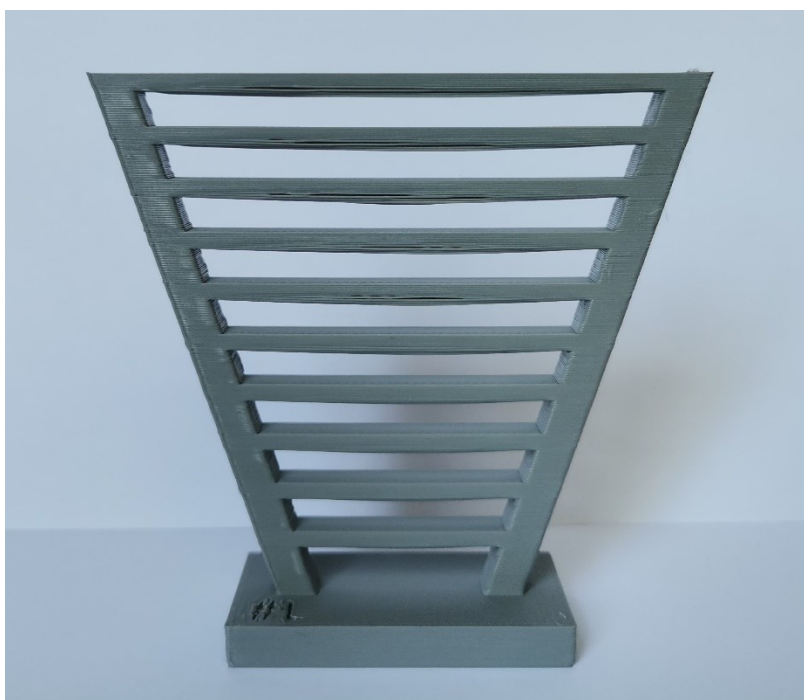
Orijentacija printa prikazana je modelom (Slika 26) koji je izrađen dva puta u dvije različite orijentacije printa. Konkretnim modelom prikazalo se kako je orijentacijom smanjena količina potporne strukture, povećana kvaliteta izrade oznaka i kvaliteta površine samo modela nakon uklanjanja potporne površine.



Slika 26. Model orijentacije printa

5.12. Premoštenje

Model premoštenja (Slika 27) prikazuje različite duljine mostova bez upotrebe potporne strukture te možemo vidjeti kako povećanjem duljine dolazi do sve veće deformacije slojeva.



Slika 27. Model premoštenja

5.13. Višebojnost

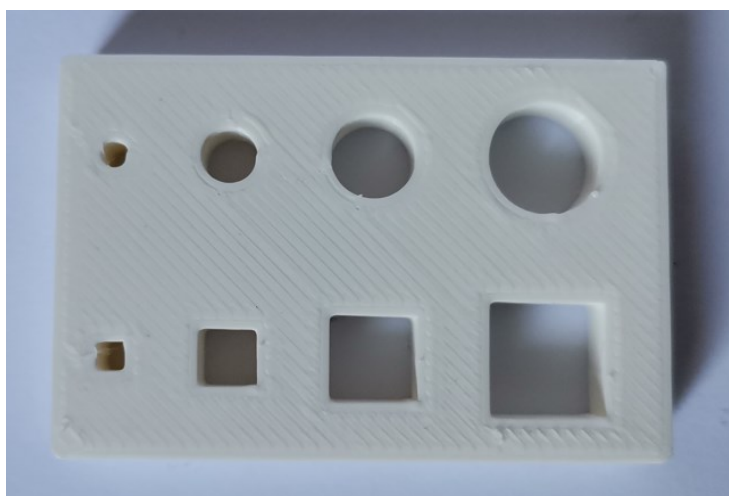
Mogućnošću izrade FDM-om u više boja odabran je model u obliku pločice s natpisom od istog materijala, ali u različitoj boji (Slika 28). Prilikom izrade modela bilo je potrebno model spremati kao dva različita tijela kako bi u *PrusaSlicer-u* imali mogućnost odabira različitih boja.



Slika 28. Model višebojnosti

5.14. Rupe

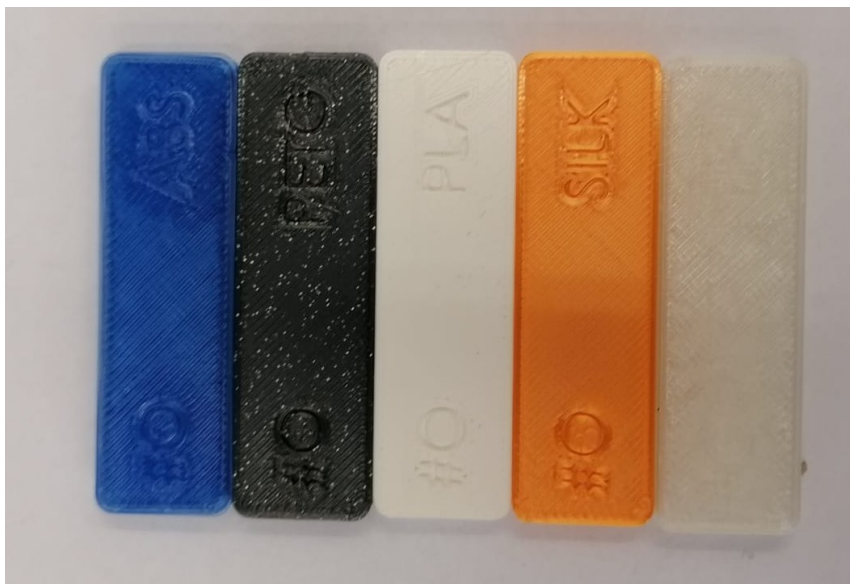
Odabirom ove karakteristike htjelo se prikazati kako veličina dimenzija rupe utječe na kvalitetu izrade i dimenzijsku točnost. Na prikazanom modelu (Slika 29) izrađene su rupe dimenzija 2, 4, 6 i 8mm. Možemo vidjeti kako su rupe dimenzija 2 i 4mm ispale deformiranog oblika i izgubile dimenzijsku točnost. Kalibracijom uređaja može se doći do boljih rezultata.



Slika 29. Model rupa

5.15. Materijali

Svaki materijal posjeduje različita svojstva te se ovisno primjeni proizvoda odabire. Model se sastoji od 5 pločica od različitog materijala (Slika 30) kako bi se opipno mogla osjetiti kvaliteta površina svakog od materijala. Na svakoj od pločica izrađena je i oznaka materijala.



Slika 30. Model materijala

5.16. Multimaterial

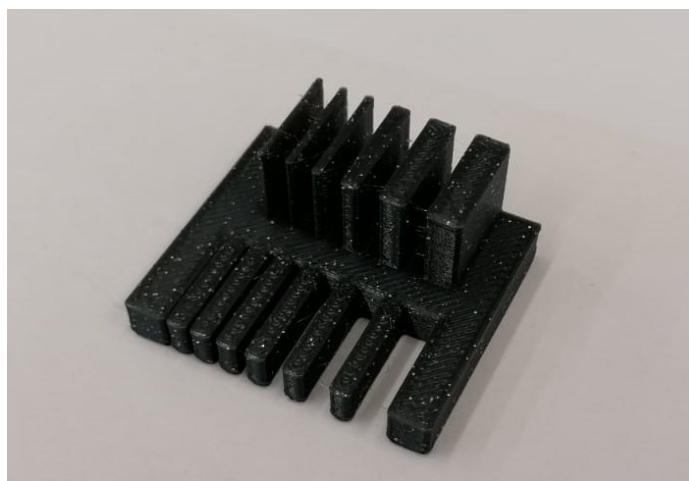
Za prikaz modela uporabe više materijala odabran je model pločice kod kojeg je svaka polovica izrađena od različitog materijala (Slika 31). Za lakše prepoznavanje, na polovicama je stavljena oznaka samog materijala.



Slika 31. Model uporabe više materijala

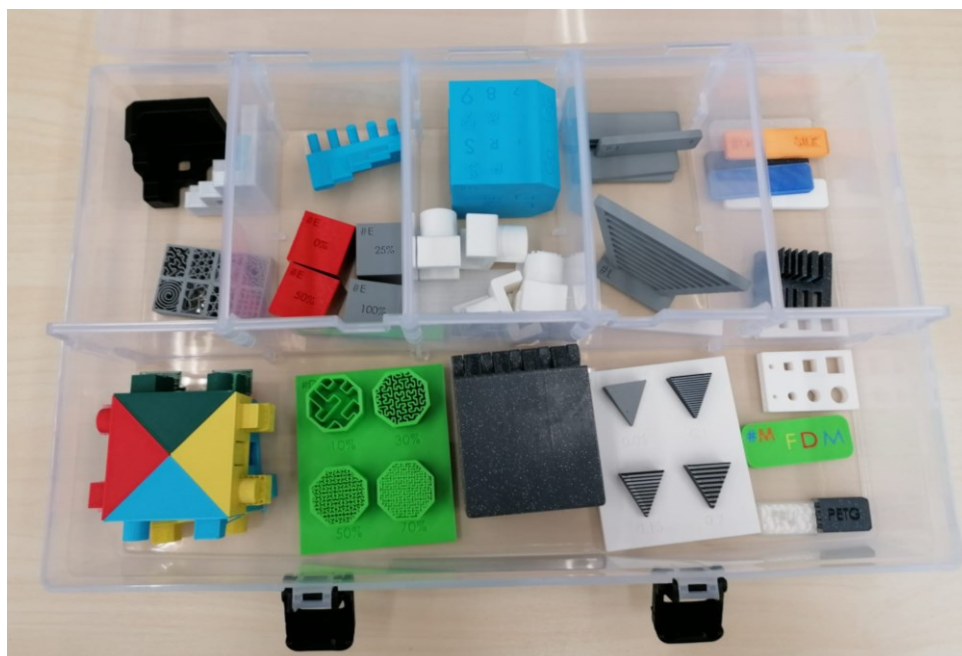
5.17. Debljine utora i stijenki

Model debljine utora i stijenki (Slika 32) prikazuje različite dimenzije utora i stijenki. Možemo vidjeti kako se smanjenjem debljine utora i stijenki dobiva deformirani oblik i gubi kvaliteta. Optimalna debljina utora i stijenki različita je za različite vrste FDM uređaja te je potrebno izvršiti kalibraciju FDM uređaja te ponoviti izradu nekoliko puta za ostvarenje najboljeg rezultata.



Slika 32. Model utora i stijenki

Na Slika 33 prikazan je edukacijski set sa svim izrađenim modelima.



Slika 33. Edukacijski set

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je razvoj edukacijskog seta za aditivnu proizvodnju koji će služiti za prijenos znanja o aditivnoj proizvodnji i njenim karakteristikama. Kako bi se mogao razviti edukacijski set, prvo je napravljen pregled literature o aditivnoj proizvodnji i FDM postupku kako bi se dobilo razumijevanje o procesu izrade proizvoda aditivnim postupcima. Nakon toga su izvučene ključne karakteristike aditivne proizvodnje potrebne za razumijevanje tehničkih mogućnosti i mogućnosti konstrukcijskog oblikovanja za aditivnu proizvodnju. Prije izrade modela, proučeni su i izneseni načini reprezentacije znanja koji su korišteni u edukacijskom setu. Nakon izvršenih prethodnih koraka napravljeni su i izrađeni 3D modeli karakteristika i kartice koje opisuju fizičke 3D modele karakteristika.

Svrha edukacijskog seta je da služi kao izvor znanja o aditivnoj proizvodnji i njenim karakteristikama novim korisnicima te kao vodilja postojećim korisnicima o potencijalnim ograničenjima i mogućnostima prilikom konstrukcijskog oblikovanja modela za aditivnu proizvodnju, odnosno FDM postupak. Pregledom literature pronađeno je 17 ključnih karakteristika potrebnih za razumijevanje AM-a. Karakteristike su u edukacijskom setu prikazane kroz fizičke 3D modele zajedno s opisnim karticama koje opisuju pojedinu karakteristiku da se olakša razumijevanje apstraktnih pojmova.

Ograničenje ovog rada je što izrađeni edukacijski set nije validiran za svrhu za koju je razvijen. U budućnosti bi bilo potrebno provesti evaluaciju seta i ispitati njegovu korisnost za svrhu prijenosa znanja o aditivnoj proizvodnji. Uz to, bilo bi korisno po potrebi konsolidirati i proširiti set te doraditi izrađene modele i kartice.

LITERATURA

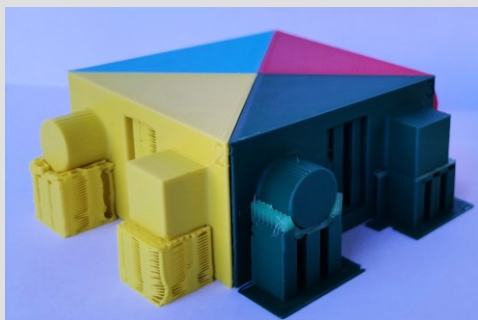
- [1] Diegel O, Nordin A, Motte D, A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing, Singapore: Springer, 2019..
- [2] »3D Experience,« Dassault Systèmes, [Mrežno]. Available: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/3D-printing>. [Pokušaj pristupa 05 Rujan 2022.].
- [3] Jemghili R, Aid Taleb A, Mansouri K, »Additive Manufacturing Taxonomy Regarding Product Attributes,« u *2nd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology*, Morocco, 2022..
- [4] Gibson I, Rosen D, Stucker B., Additive Manufacturing Technologies, New York: Springer New York, 2015..
- [5] Swetham T, Reddy K.M.M, Huggi A, Kumar M.N., »A Critical Review on of 3D Printing Materials and Details of Materials used in FDM,« *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology IJSRSET*, pp. 353-361, 2017.
- [6] Valjak F., »MAPPING OF PRODUCT FUNCTIONS AND DESIGN PRINCIPLES FOR ADDITIVE MANUFACTURING,« FSB, Zagreb, 2022.
- [7] Godec D, Šercer M, Aditivna proizvodnja, Zagreb, 2012.
- [8] Bandyopadhyay A, Bose S., Additive Manufacturing Second Edition, Boca Raton: CRC Press, 2020..
- [9] Dey A, Roan Eagle I.N, Yodo N., »A Review on Filament Materials for Fused Filament Fabrication,« *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2021..
- [10] Maidin S, Pei E, Campbell R.I., »A Taxonomy of Design for Additive Manufacture,« 2019..
- [11] [Mrežno]. Available: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=2834>. [Pokušaj pristupa 09 Rujan 2022].
- [12] Yang C, Liu J, Ao X, Xia H., »Experimental Study on the Dimension Error of Bridged Structures Printed by Fused Deposition Modeling,« u *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 772, No. 1, p. 012069)*, 2021..
- [13] Pereira S, Vaz A, Vicente L.N, »On the optimal object orientation in additive manufacturing,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1685-1694, 2018.
- [14] B. N. Valjak F, »CONCEPTION OF DESIGN PRINCIPLES FOR ADDITIVE MANUFACTURING,« u *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, ICEDI19*, Delft, 2019.
- [15] Goldschmidt G, Sever A.L, »Inspiring design ideas with texts,« u *Design studies, Vol. 32 No.2*, 2011, pp. 139-155.
- [16] Herring S.R, Chang C.C, Krantzler J, Bailey B.P, »Getting inspired! Understanding How and Why Examples are Used in Creative Design Practice,« u *Proceedings of the 27th International Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, USA, 2009.

PRILOZI

I. Kartice FDM karakteristika

#A Potporna struktura

1



Potporna struktura je strukturalna podrška visećim dijelovima modela koja onemogućava pojavu deformacije oblika. Sastoji se od ravne baze i vertikalne potpore. Nakon 3D ispisa potporna struktura se u potpunosti uklanja. Odabir potporne strukture utječe na kvalitetu površine.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#A Potporna struktura

2

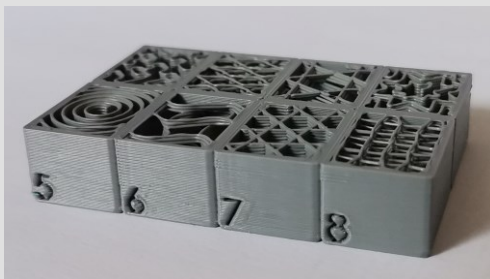
Na modelu su prikazani sljedeći dijelovi i njihovo vrijeme izrade:

Naziv	Masa (g)	Vrijeme izrade (h)
1. Bez potporne strukture	17.26	01:33
2. Potporna struktura od istog materijala	19.64	01:49
3. Topivo sučelje	38.32	03:13
4. Topiva potporna struktura	65.7	05:08

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#B Uzorak ispune

1



Uzorak ispune je struktura i oblik kojim je unutrašnjost proizvoda ispunjena. Postoje različiti oblici od jednostavnih linija do složenih geometrijskih oblika. Odabir uzorka ispune može utjecati na čvrstoću, vrijeme izrade, težinu i fleksibilnost samog proizvoda.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#B Uzorak ispune

2

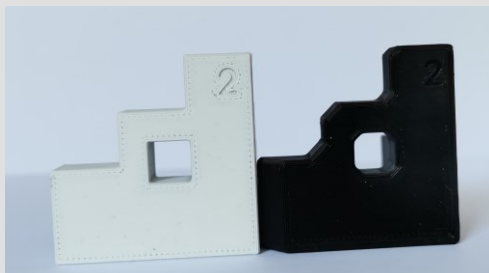
Na modelu su prikazani sljedeći uzorci:

Naziv	Masa (g)	Vrijeme izrade (h)
1. <i>Octogram Spiral</i>	1.58	00:11
2. <i>Adaptive Cubic</i>	1.36	00:10
3. <i>Honeycomb</i>	1.51	00:11
4. <i>Hilbert Curve</i>	1.50	00:11
5. <i>Archimedean Chords</i>	1.57	00:11
6. <i>Gyroid</i>	1.18	00:09
7. <i>Stars</i>	1.54	00:11
8. <i>3D Honeycomb</i>	1.17	00:10

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#C Koncentracija naprezanja

1



Model koncentracije naprezanja pokazuje kako se koncentracija naprezanja na oštrim rubovima može smanjiti skošenjem ili zaobljenjem.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#C Koncentracija naprezanja

2

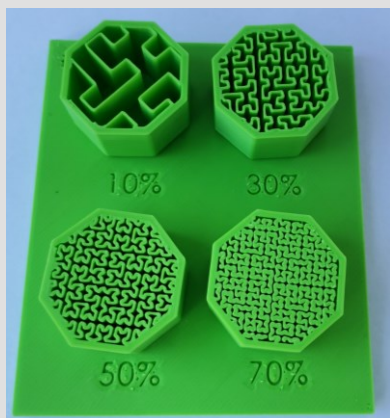
Na modelu su prikazani sljedeći dijelovi te možemo primijetiti kako skošenja i zaobljenja nemaju gotovo nikakav utjecaj na vrijeme i masu, međutim, dobra je praksa uvijek ukloniti oštre bridove:

Dijelovi modela	Masa (g)	Vrijeme izrade (h)
Model s oštrim rubovima - bijelo	21.96	02:01
Model sa zaobljenjima i skošenjima - crno	21.17	02:01

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#D Gustoća ispune

1



FDM omogućuje samostalno određivanje postotka ispune. Manjim postotkom ispune dolazi do uštede materijala i vremena izrade, dok se višim postocima dobivaju proizvodi veće čvrstoće.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#D Gustoća ispune

2

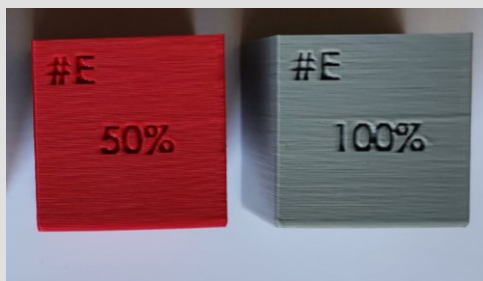
Na modelu su prikazani:

Referenca	Postotak ispune	Masa (g)	Vrijeme izrade (h)
1	10%	3.22	00:22
2	30%	4.82	00:30
3	50%	6.23	00:41
4	70%	7.53	01:03

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#E Smanjenje mase

1



Podešavanjem postotka ispune utječe se izravno na masu proizvoda uz zadržavanje ili poboljšanje svojstava proizvoda. FDM omogućuje izradu potpuno šupljih, vrlo laganih proizvoda.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#E Smanjenje mase

2

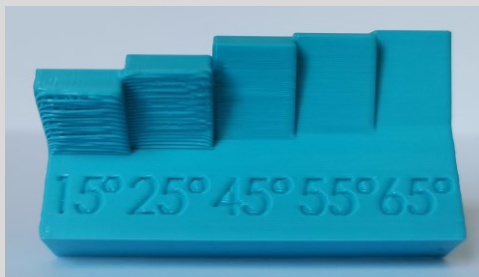
Modeli prikazuju reguliranje mase postocima ispune:

Postotak ispune	Masa (g)	Vrijeme izrade (h)
0%	4.17	00:35
25%	8.64	00:42
50%	12.34	00:49
100%	19.59	01:09

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#F Nadvišenja

1



Kod visećih dijelova pod kutom nagiba manjim od 45 stupnjeva dolazi do popuštanja materijala i kolapsa na prepustima. Smanjenjem kuta dolazi do sve veće deformacije oblika. Potrebno je koristiti potporne strukture ili promijeniti orijentaciju printa koje će onemogućiti deformacije oblika.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#F Nadvišenja

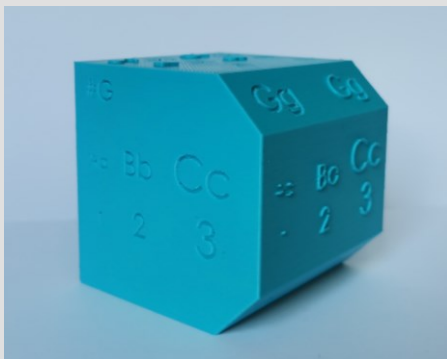
2

Na modelu je prikazano povećanje nadvišenja smanjenjem kuta nagiba izbočina. Prikazano je nadvišenje kod cilindričnih i pravokutnih izbočina. Kod nagiba pod kutom manjim od 45 stupnjeva primjećujemo lagano popuštanje materijala i pojavu efekta stepenica te pojačanje smanjenjem kuta nagiba, dok na nagibima pod kutom većim od 45 stupnjeva izgledaju uredno i pravilno.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#G Veličina oznaka

1



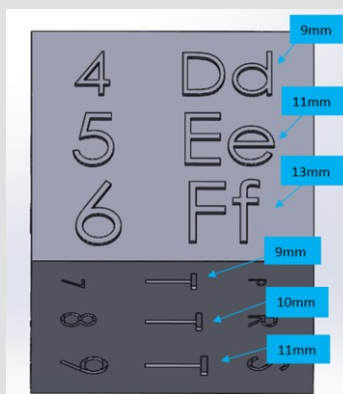
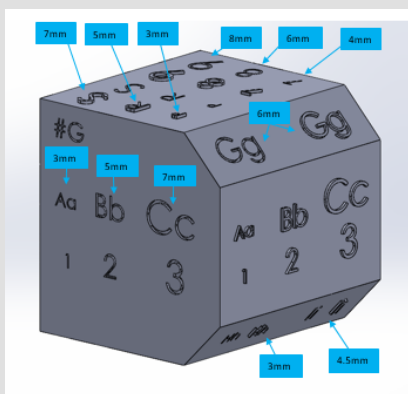
Relativno male veličine oznaka su čitljive na bočnim stranama modela, dok će kvaliteta malih veličina biti loša na gornjim stranama. Oznake mogu biti udubljene ili reljefne. Povoljniji odabir kod manjih veličina su udubljene oznake zbog uštede materijala i vremena, te očuvanje kvalitete oznaka tijekom naknadne obrade.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#G Veličina oznaka

2

Modeli prikazuju sljedeće veličine oznaka:



A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#H Izrada sklopova

1



Odabirom odgovarajuće zračnosti između dijelova sklopa omogućena je izrada sklopova u jednom printu bez potrebe za sastavljanjem dijelova. Minimalna potrebna zračnost potrebna je kako ne bi došlo do spajanja slojeva dijelova.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#H Izrada sklopova

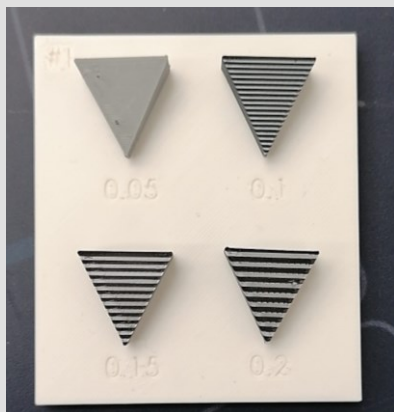
2

Model prikazuje sklop kutijice u jednom printu. Kako bi dijelovi kutijice bili pokretni odabrana je zračnost od 0.5mm i odgovarajuća orijentacija printa.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#1 Visina sloja

1



Odabir visine sloja utječe na kvalitetu površine proizvoda, vrijeme izrade i količinu potrebnog materijala. Što je visina sloja manja, kvaliteta površine je bolja, ali produženo vrijeme izrade i povećana količina potrebnog materijala.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#1 Visina sloja

2

Na modelu su prikazani sljedeći dijelovi i njihovo vrijeme izrade:

Visina sloja (mm)	Masa (g)	Vrijeme izrade (h)
0.05	0.97	00:33
0.1	0.96	00:17
0.15	0.97	00:11
0.2	1.02	00:09

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#J Anizotropija

1



Anizotropija je svojstvo nekog tijela da pokazuje različita svojstva u različitim smjerovima. Proizvode izrađene FDM postupkom karakterizira anizotropija zbog premale adhezije među slojevima što rezultira različitim svojstvima između slojeva i u samim slojevima.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#J Anizotropija

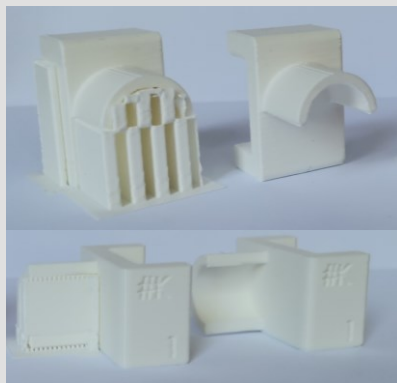
2

Na modelu su prikazane 3 pločice izrađene u 3 različite orijentacije. Odabirom orijentacije ovisno o smjeru djelovanja sila možemo smanjiti jačinu anizotropije. Prije će puknuti pločica na koju sile djeluju okomito na izrađene slojeve nego pločica na koju djeluju sile u smjeru slojeva.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#K Orijentacija printa

1



Orijentacija printa moguća je u x, y i z smjeru. Ovisno o obliku proizvoda, odabirom orijentacije možemo utjecati na kvalitetu površina, količinu potpornog materijala, a time i na vrijeme izrade.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#K Orijentacija printa

2

Na modelu su prikazani sljedeći dijelovi i njihovo vrijeme izrade:

Orijentacija	Masa (g)	Vrijeme izrade (h)
1	17.26	01:33
2	19.64	01:49

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#L Premoštenje

1



Na mostovima dolazi do deformacije oblika uslijed gravitacije koja povlači slojeve materijala prije nego se ohlade te je zbog toga teško postići ravne mostove.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#L Premoštenje

2

Na modelu su prikazane različite duljine mostova te se može vidjeti kako povećanjem duljine most sve jače deformira.

Duljine mostova odozdo prema gore (mm)	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#M Višebojnost

1



Višebojnost omogućuje izradu atraktivnih proizvoda. Kod FDM uređaja s jednom mlaznicom izmjena filamenta provodi se na način da se pauzira rad uređaja i izvrši izmjena, dok je kod FDM uređaja s više mlaznica izmjena automatizirana. Vrijeme izrade traje dulje zbog izmjena alata.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#M Višebojnost

2

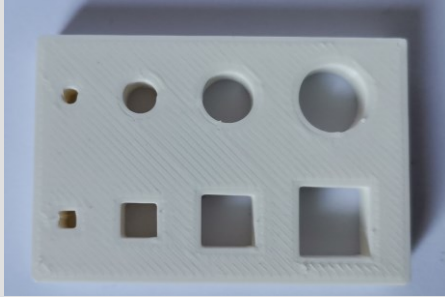
Na modelu je prikazana mogućnost višebojnosti printa. U tablici je naveden broj izmjene alata te vrijeme potrebno za izradu višebojnog modela.

Masa (g)	Vrijeme izrade (h)	Broj izmjena alata
15.50	01:09	27

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#N Rupe

1



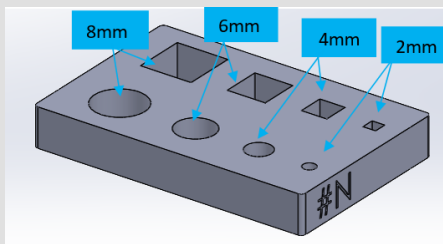
Odabirom veličine dimenzije rupa utječemo na dimenzijsku točnost i kvalitetu izrade. Rupe premalih dimenzija ispasti će deformirano i samim time izgubiti će svoju dimenzijsku točnost.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#N Rupe

2

Na modelu su prikazane kružne i kvadratne rupe veličine 2, 4, 6 i 8mm te njihove kvalitete izrade. Možemo vidjeti kako su rupe manjih veličina izobličene i nepravilne dok se povećanjem dimenzija rupa poboljšava njihova kvaliteta.



A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#0 Materijali

1



Za FDM postupak koriste se različiti polimerni materijali različitih svojstava poput čvrstoće, otpornosti na abraziju i vlagu. Među najzastupljenijima su *PLA*, *ABS*, *SILK*, *NYLON*, *TPU* i dr.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#0 Materijali

2

Modeli materijala izrađeni su od 5 različitih materijala. U tablici su dani podaci o vremenu izrade i količini materijala ovisno o vrsti materijala:

Materijali	Masa (g)	Vrijeme izrade (h)
<i>PLA</i>	2.76	00:14
<i>ABS</i>	2.43	00:14
<i>PETG</i>	2.85	00:14
<i>TPU</i>	3.08	00:21
<i>SILK</i>	3.05	00:27

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#P Multimaterial

1



FDM postupak omogućuje izradu proizvoda od dva ili više različitih materijala. Time se može odabrati materijal za jedan dio različiti od drugog, ovisno kakva svojstva treba postići.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#P Multimaterial

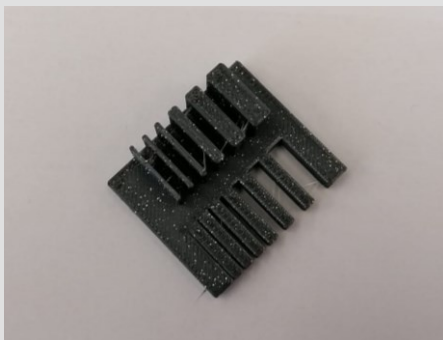
2

Model je izrađen od dvije vrste materijala odjednom: *PETG* i *TPU*. Opipom možemo osjetiti razliku kvalitete površine između ta dva materijala. Konkretno na ovom primjeru možemo osjetiti koliko je *TPU* fleksibilniji od *PETG*.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#R Debljine utora i stijenki

1



Prilikom izrade utora i stijenki FDM postupkom je potrebno obratiti pažnju na njihove debljine za optimalan rezultat. Ukoliko su dimenzije male, doći će do deformacije oblika.

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.

#R Debljine utora i stijenki

2

Model debljine utora i stijenki sastoji se od više utora i stijenki različitih debljina kako bi se prikazalo kako debljina utječe na kvalitetu. Na modelu su sljedeće debljine utora i stijenki:

Debljine utora i stijenki (mm)	0.25	0.50	0.75	1	2	3	4
--------------------------------	------	------	------	---	---	---	---

A.Kapetanović, Završni rad, 2022.