

Eksperimentalna analiza parametara kod FDM 3D printanja s TPU filamentom

Vujina, Karmela

Undergraduate thesis / Završni rad (sveučilišni)

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Science / Sveučilište u Splitu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:166:024569>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2026-09-04**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository of Faculty of Science in Split / Digitalni repozitorij Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Splitu](#)



Dabar

SVEUČILIŠTE U SPLITU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

**EKSPERIMENTALNA ANALIZA
PARAMETARA KOD FDM 3D PRINTANJA S
TPU FILAMENTOM**

Karmela Vujina

Split, rujan 2025.

Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Odjel za politehniku
Studijski program: **Informatika i tehnika**

Eksperimentalna analiza parametara kod FDM 3D printanja s TPU filamentom

Karmela Vujina

Sažetak: U radu je istražen utjecaj odabranih parametara FDM 3D printanja na kvalitetu površine uzoraka izrađenih od fleksibilnog TPU filameta. Teorijski dio obuhvaća pregled aditivne proizvodnje s naglaskom na FDM tehnologiju, opis materijala koji se pritom koriste te posebnosti fleksibilnih filamenata, s naglaskom na svojstva TPU-a. Također su objašnjeni osnovni parametri površinske hrapavosti (R_a , R_z i R_q) i metode njihova mjerenja. Eksperimentalni dio proveden je na 3D pisaču Prusa i3 MK3 korištenjem filameta Fillamentum Flexfill 92A. Ispitani su uzorci izrađeni pri različitim rezolucijama sloja (0,05–0,30 mm), a površinska hrapavost mjerena je profilometrom Mitutoyo SurfTest SJ-310. Rezultati su pokazali da rezolucija sloja ima značajan utjecaj na kvalitetu površine: manja rezolucija osigurava glatkije površine uz produženo trajanje ispisa, dok veća rezolucija omogućuje bržu i ekonomičniju izradu uz kompromis u kvaliteti. Trošak i potrošnja materijala pokazali su se gotovo konstantnima, dok je hrapavost površine znatno varirala ovisno o postavljenim parametrima. Zaključeno je da se pravilnim odabirom parametara ispisa proces može prilagoditi prioritetima korisnika – kvaliteti, vremenu ili ekonomičnosti.

Ključne riječi: 3D printanje, FDM tehnologija, TPU filament, hrapavost površine

Rad sadrži: v, 53 stranice, 44 slike, 5 tablica i 52 literaturna navoda.

Mentor: **doc. dr. sc. Ivan Peko**, *Prirodoslovno-matematički fakultet u Splitu*

Povjerenstvo za ocjenu i obranu završnog rada:

1. **doc. dr. sc. Ivan Peko**, *Prirodoslovno-matematički fakultet u Splitu*

2. **Izv. prof. dr. sc. Tomislav Matić**, *Prirodoslovno-matematički fakultet u Splitu*

3. **dr. sc. Dražen Kustura**, *Prirodoslovno-matematički fakultet u Splitu*

Datum obrane: **25. rujna 2025.**

Rad je napisan na hrvatskom jeziku i pohranjen u repozitoriju Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Splitu koji je dio nacionalnog repozitorijskog sustava Dabar.

University of Split
Faculty of Science
Department of Polytechnics
Study programme: **Computer science and technics**

Experimental analysis of parameters in FDM 3D printing with TPU filament

Karmela Vujina

Abstract: This paper investigates the influence of selected FDM 3D printing parameters on the surface quality of samples made from flexible TPU filament. The theoretical part provides an overview of additive manufacturing with an emphasis on FDM technology, a description of the most commonly used materials, and the specific characteristics of flexible filaments, focusing on the properties of TPU. The basic surface roughness parameters (R_a , R_z , and R_q) and their measurement methods are also explained. The experimental part was conducted using a Prusa i3 MK3 3D printer and Fillamentum Flexfill 92A filament. Samples were produced with different layer resolutions (0.05–0.30 mm), and surface roughness was measured with a Mitutoyo Surftest SJ-310 profilometer. The results showed that layer resolution has a significant impact on surface quality: lower layer resolution ensures smoother surfaces but considerably increases printing time, while higher resolution values enable faster and more cost-effective production at the expense of quality. Material consumption and production costs were found to remain nearly constant, while surface roughness varied significantly depending on the chosen resolution. It was concluded that by properly selecting printing parameters, the process can be adjusted to user priorities—whether focused on quality, time, or cost efficiency.

Key words: 3D printing, FDM technology, TPU filament, surface roughness

Thesis consists of: v, 53 pages, 44 figures, 5 tables and 52 references.

Supervisor: **Ivan Peko PhD, Assistant Professor, Faculty of Science, Split**

Committee for the evaluation and defense of the bachelor thesis:

1. **Ivan Peko PhD, Assistant Professor, Faculty of Science, Split**
2. **Tomislav Matić PhD, Associate Professor, Faculty of Science, Split**
3. **Dražen Kustura PhD, Faculty of Science, Split**

Defense Date: **25th September 2025.**

The thesis is written in Croatian and stored in the repository of the Faculty of Science, University of Split, which is part of the national repository system Dabar.

IZJAVA

kojom izjavljujem s punom materijalnom i moralnom odgovornošću da sam završni rad s naslovom EKSPERIMENTALNA ANALIZA PARAMETARA KOD FDM 3D PRINTANJA S TPU FILAMENTOM izradila samostalno pod mentorstvom doc. dr. sc. Ivana Peke. U radu sam primijenila metodologiju znanstvenoistraživačkog rada i koristila literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući navela u završnom radu na uobičajen, standardan način citirala sam i povezala s fusnotama s korištenim bibliografskim jedinicama. Rad je pisan u duhu hrvatskog jezika.

Studentica

Karmela Vujina

Sadržaj

1. UVOD	1
2. 3D PRINTANJE (ADITIVNA PROIZVODNJA).....	2
2.1. Usporedba aditivne (3D printanja) i suptraktivne (tradicionalne) proizvodnje.....	4
2.2. Tehnologije 3D printanja.....	5
2.2.1. Stereolitografija (SLA).....	6
2.2.2. PolyJet	7
2.2.3. Selektivno lasersko sintetiranje (SLS)	8
2.2.4. Tehnologija laminiranih slojeva (LOM)	10
2.3. Prednosti i nedostaci 3D printanja.....	11
2.4. Primjena 3D printanja.....	12
3. FDM TEHNOLOGIJA 3D PRINTANJA.....	13
3.1. Prednosti i nedostaci FDM tehnologije	14
3.2. Primjena FDM tehnologije	15
4. MATERIJALI KOD FDM 3D PRINTANJA	16
4.1. Akrilonitril–butadien–stiren (ABS).....	16
4.2. Polilaktična kiselina (PLA)	17
4.3. Poliamid (PA).....	18
4.4. Polietilen-tereftalat modificiran glikolom (PETG).....	19
5. FLEKSIBILNI FILAMENTI.....	21
5.1. Vrste fleksibilnih filamenata	21
5.1.1. Termoplastični poliuretan (TPU)	21
5.1.2. Soft PLA.....	22
5.1.3. Termoplastični poliamidi (TPA)	23

5.1.4. Termoplastični kopolijester (TPC).....	24
5.2. Prednosti i nedostaci fleksibilnih filamenata.....	25
5.3. Primjena fleksibilnih filamenata u 3D printanju	25
6. HRAPAVOST POVRŠINE	26
6.1. Parametri hrapavosti	26
6.1.1. Ra – srednje aritmetičko odstupanje profila.....	26
6.1.2. Rz – maksimalna visina profila.....	27
6.1.3. Rq – srednje kvadratno odstupanje profila	28
6.2. Metode mjerenja površinske hrapavosti	28
6.2.1. Kontakne metode.....	28
6.2.2. Beskontakne metode	28
6.2.3. Usporedne metode.....	29
7. EKSPERIMENTALNI RAD	30
7.1. Oprema i materijali.....	30
7.2. Postupak izrade uzoraka	32
7.3. Mjerenje površinske hrapavosti.....	36
8. ANALIZA REZULTATA	38
9. ZAKLJUČAK	47
LITERATURA.....	48
Popis oznaka i kratica.....	53

1. UVOD

Aditivna proizvodnja, odnosno 3D printanje, suprotni je pojam od tradicionalne proizvodnje, primarno zbog načina izrade objekta. 3D printanje koristi tehnologije koje trodimenzionalne predmete izrađuju sloj po sloj. ISO standard dijeli te tehnologije u 7 osnovnih, ovisno o postupku izrade i materijalu koji koriste. Svi ti procesi značajno ubrzavaju postupak izrade objekata te se najčešće koriste kod brze izrade prototipova, u posljednje vrijeme sve više i u finalnoj proizvodnji. Unatoč poboljšanjima koje je 3D printanje donijelo industriji, u usporedbi s tradicionalnim načinima proizvodnje, ova tehnologija može se koristiti samo kod izrade malih serija te je ograničena po pitanju dostupnih materijala s kojima tehnologije mogu raditi.

Najpopularnija i danas najkorištenija tehnologija 3D printanja je taložno očvršćivanje materijala (engl. Fused Deposition Modeling – FDM), koje omogućuje brzu izradu prototipova, korištenje fleksibilnih materijala i pisače za kućnu primjenu. Veliku popularnost stekla je zbog cijene pisača i jednostavnosti korištenja.

Uz mnoštvo materijala koje ova tehnologija nudi, posebno se ističu fleksibilni filament. Oni kombiniraju svojstva plastike i gume te omogućuju izradu fleksibilnih objekata s odličnim vlačnim i tlačnim svojstvima. Najpoznatiji fleksibilni filament je termoplastični poliuretan (engl. Thermoplastic Polyurethane – TPU), koji se ističe svojim iznimno dobrim mehaničkim svojstvima.

Naposljetku, sve te tehnologije, procesi i materijali nude različite površine izrađenih objekata. Površina objekta ključna je iz estetskih razloga, ali i zbog trajnosti samog objekta. Zbog toga je potrebno provoditi mjerne metode površinske hrapavosti kako bi se uočila eventualna oštećenja.

Analiza rezultata eksperimentalnog dijela pokazat će utjecaj rezolucije sloja TPU filamenta na površinsku kvalitetu uzoraka izrađenih FDM tehnologijom te će naglasiti važnost pravilnog odabira parametara 3D ispisa.

2. 3D PRINTANJE (ADITIVNA PROIZVODNJA)

Tehnologija 3D printanja predstavlja proces aditivne proizvodnje kojim se trodimenzionalni objekti izrađuju na temelju digitalnog modela. Iako se često smatra novom, razvijena je još tijekom 1980-ih godina. Prvi koncept sustava za brzu izradu prototipova predstavio je dr. Hideo Kodama u Japanu, koristeći laser i fotoosjetljivu smolu, čime je postavio temelje današnje stereolitografije (engl. Stereolithography – SLA). Nakon neuspjelih pokušaja patentiranja u Japanu i Francuskoj, 1986. godine Charles Hull u SAD-u patentirao je SLA postupak te osnovao tvrtku 3D Systems, čime je započeo komercijalni razvoj 3D printanja (Slika 2.1) [1].

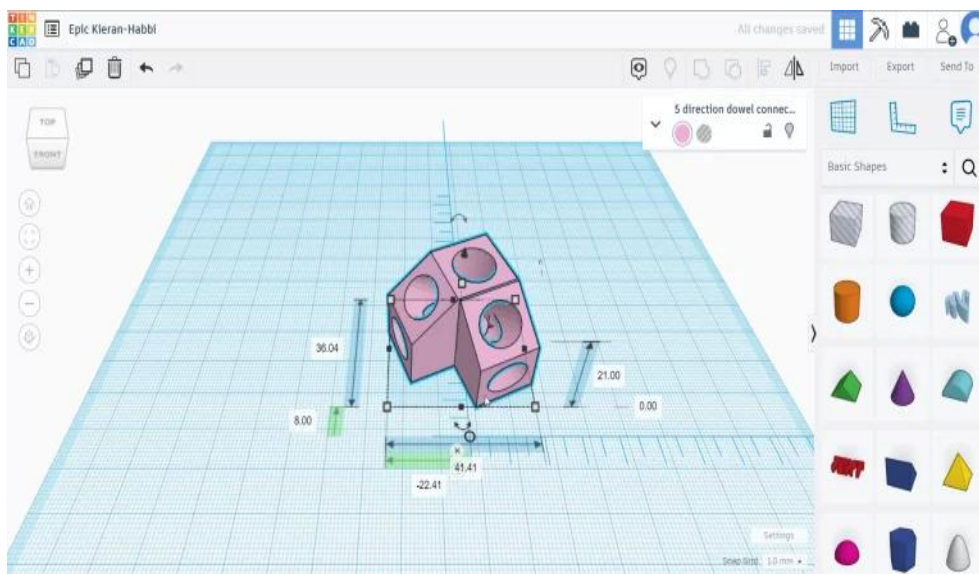


Slika 2.1 SLA-1 – prvi komercijalni SLA 3D pisač (1988.), tvrtka 3D Systems [2]

Komercijalizacija SLA označila je tek početak razvoja, jer su ubrzo nastale i druge tehnologije 3D printanja. Iste godine razvijeno je selektivno lasersko sinteriranje (engl. Selective Laser Sintering – SLS) s prvim eksperimentalnim printerom Betsy, a nedugo zatim i modeliranje taloženjem rastaljenog materijala (engl. Fused Deposition Modeling – FDM) s prvim komercijalnim uređajem Stratasys 3D Modeler. Od tada je razvijeno još sedam glavnih tehnologija aditivne proizvodnje koje se danas koriste u industriji [1].

Unatoč raznolikosti tehnologija 3D printanja, sve se temelje na istom principu – izradi objekta sloj po sloj prema digitalnom modelu [3]. Prije samog procesa potrebno je kreirati 3D model

(Slika 2.2), najčešće pomoću softvera za računalom potpomognuto projektiranje (engl. Computer Aided Design – CAD). Model mora biti zatvorena struktura bez nepravilnosti, a orijentacija objekta prilagođava se postupku ispisa [4].



Slika 2.2 Primjer digitalnog 3D modela izrađenog u TinkerCAD softveru [5]

Kada je digitalni model izrađen, potrebno ga je spremiti u format prikladan za 3D printanje, a najčešće korišteni su STL, OBJ i 3MF [4]. STL pohranjuje samo informacije o površinskoj geometriji, dok 3MF omogućuje spremanje dodatnih podataka poput boje, materijala i teksture [6]. Model se zatim prenosi u slicer, program koji ga dijeli na slojeve i generira G-kod prema kojem 3D printer gradi objekt [4].

Prije procesa izrade potrebno je pripremiti pisač. Provjerava se njegovo stanje, odabire odgovarajući materijal i podešava podloga jer pravilno poravnanje radne podloge predstavlja ključan preduvjet za uspješan ispis [4]. Komunikacija između računala i pisača ostvaruje se putem USB-a, SD kartice ili bežično kroz cloud aplikacije [7]. Kada su uređaj i materijal spremni, pisač izrađuje objekt (Slika 2.3) prema G-kodu, gradeći ga sloj po sloj. Potrebno je nadzirati rad tijekom ispisa, jer može doći do začepljenja mlaznice, deformacija zbog podizanja rubova, nepravilnosti u potpornim strukturama ili oscilacija u kvaliteti materijala [4].



Slika 2.3 Proces 3D printanja – izrada trodimenzionalnog objekta sloj po sloj [8]

Nakon završetka ispisa, ovisno o korištenoj tehnologiji i materijalu, često je potrebna završna obrada kojom se poboljšava izgled, povećava čvrstoća i osigurava potpuna funkcionalnost izrađenog dijela [4].

2.1. Usporedba aditivne (3D printanja) i suptraktivne (tradicionalne) proizvodnje

Način izrade predmeta predstavlja osnovnu razliku tradicionalne i aditivne proizvodnje. Tradicionalni postupci koriste metode poput tokarenja, glodanja, bušenja, brušenja itd., pri čemu se materijal uklanja s početnog komada, dok aditivna proizvodnja, odnosno 3D printanje, stvara objekte slaganjem slojeva. Postupak aditivne proizvodnje generira manje otpada i manju potrošnju materijala, jer se koristi samo onoliko koliko je potrebno, čime se ujedno smanjuju i troškovi proizvodnje. Tehnologije 3D printanja omogućuju brzu izradu objekata u svega nekoliko sati te izradu složenih geometrija koje tradicionalnim postupcima nije moguće ostvariti. Međutim, aditivna proizvodnja u velikim serijama i dalje je sporija od tradicionalne. Tradicionalna proizvodnja nudi širi izbor materijala, dok su tehnologije 3D printanja ograničene na određene materijale kao što su to plastike. U slučaju slabe adhezije slojeva može doći do nestabilnosti objekta ili pucanja. Kod većine tehnologija 3D printanja izrađeni objekti zahtijevaju naknadnu obradu materijala. Tradicionalna se proizvodnja još uvijek primjenjuje u izradi velikih serija, dok se 3D printanje koristi za brzu izradu prototipova i manjih serija.

2.2. Tehnologije 3D printanja

Prema međunarodnom standardu ISO/ASTM 52900:2021 [9], tehnologije 3D printanja svrstavaju se u sedam osnovnih kategorija, od kojih svaka obuhvaća različite procese izrade i materijale, kao što je prikazano u Tablici 2.1.

Tablica 2.1 Tehnologije 3D printanja, njihov princip rada i primjeri procesa

Tehnologija	Princip rada	Primjeri procesa
Material Extrusion	Taljenje i istiskivanje materijala kroz mlaznicu sloj po sloj	FDM (Fused Deposition Modeling), FFF
Vat Photopolymerization	Selektivno stvrdnjavanje smole pomoću svjetla ili lasera	SLA (Stereolithography), DLA, LCD
Material Jetting	Raspršivanje kapljica fotopolimera koje se odmah stvrdnjavaju UV svjetlom	PolyJet, MultiJet
Binder Jetting	Nanošenje veziva na sloj praha, kasnije sintetiranje ili infiltracija	3DP, Metal Binder Jetting
Powder Bed Fusion	Selektivno topljenje ili sintetiranje sloja praha lezerskim/elektronskim snopom	SLS (Selective Laser Sintering), SLM, DMLS, EBM
Directed Energy Deposition	Usmjereni snop energije tali dodani prah ili žicu na podlogu	LENS, LMD, WAAM
Sheet Lamination	Slaganje i spajanje tankih slojeva materijala	LOM (Laminated Object Manufacturing), UAM

U nastavku rada bit će detaljnije objašnjene odabrane tehnologije 3D printanja koje imaju najširu primjenu i značaj u industriji.

2.2.1. Stereolitografija (SLA)

Stereolitografija (engl. Stereolithography – SLA) najstarija je tehnologija 3D printanja i spada u skupinu postupaka fotopolimerizacije u kadi (engl. Vat Photopolymerization – VP), čiji se proces izrade temelji na selektivnom očvršćivanju tekuće fotopolimerne smole djelovanjem ultraljubičastog (UV) svjetla [10].

SLA pisači (Slika 2.4) dijele se u dvije osnovne skupine: „bottom-up“ i „top-down“. Osnovni dijelovi svakog sustava uključuju izvor svjetlosti (najčešće UV laser ili projektor), posudu sa smolom te pomičnu platformu na kojoj se postupno formira model. U praksi se najčešće koriste „bottom-up“ sustavi zbog jednostavnije konstrukcije i manjeg utroška smole.

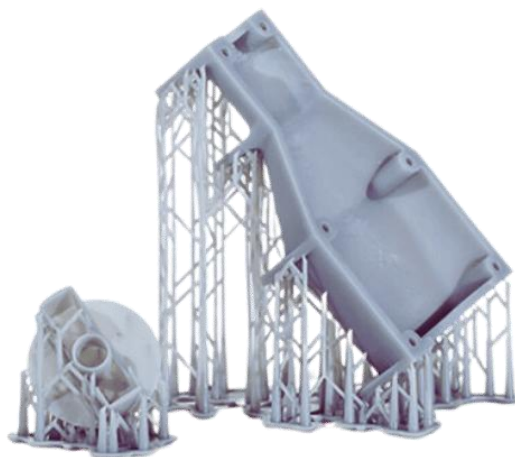


Slika 2.4 SLA pisac [11]

Kod SLA tehnologije izrada počinje CAD modelom i potpornim strukturama koje osiguravaju stabilnost. U „bottom-up“ pisacu laser kroz dno posude polimerizira sloj smole prema poprečnom presjeku modela, a platforma se postupno podiže dok predmet nije dovršen. Nakon ispisa predmet se uklanja, ispire i dodatno očvršćuje UV svjetlom radi boljih mehaničkih svojstava i trajnosti.

SLA tehnologija omogućuje izradu vrlo preciznih i detaljnih predmeta s glatkim površinama i gotovo nevidljivom slojevitošću. Dostupne smole prilagodljive su različitim mehaničkim, optičkim i toplinskim zahtjevima, a sve veća dostupnost pisaca omogućuje i manjim poduzećima brzu izradu prototipova, funkcionalnih dijelova i gotovih proizvoda visoke kvalitete.

Primjenjuje se u medicini i dentalnoj industriji za precizne modele i protetiku, u industriji nakita za složene i detaljne oblike te u proizvodnji za prototipove, rezervne dijelove i alate (Slika 2.5).



Slika 2.5 Predmet izrađeni SLA tehnologijom [12]

2.2.2. PolyJet

PolyJet tehnologija, razvijena 2000., a od 2011. u vlasništvu Stratasysa, pripada skupini mlaznog nanošenja materijala (engl. Material Jetting – MJ). Radi poput inkjet pisača, raspršuje kapljice fotopolimera koje odmah očvršćuju UV svjetlom. Omogućuje ispis u više materijala i boja, pa je posebno cijenjena u industriji nakita i potrošačkih proizvoda zbog visoke razine vizualnog realizma [13].

PolyJet pisač (Slika 2.6) sastoji se od nekoliko osnovnih dijelova: ispisnih glava, odnosno mlaznica, UV izvora svjetlosti, radne platforme, sustava za materijale, te računalnog sustava.



Slika 2.6 PolyJet pisač [14]

Kao i kod ostalih tehnologija 3D printanja, postupak započinje izradom CAD modela. Kod PolyJet tehnologije pisac raspršuje kapljice materijala koje se odmah polimeriziraju UV svjetlom, a slojevi se talože jedan po jedan dok se ne formira predmet. Uz osnovni materijal koristi se i potporni, koji se nakon ispisa uklanja vodom. Gotovi modeli po potrebi se poliraju ili premazuju zaštitnim slojem.

PolyJet omogućuje kombiniranje više materijala unutar istog objekta te ispis u punoj boji s preko pola milijuna nijansi. Izrada vrlo tankih slojeva daje glatke površine i oštre detalje, pa proizvodi obično ne zahtijevaju dodatnu obradu.

Primjenjuje se u medicini i dentalnoj industriji za anatomske modele i protetiku, u industrijskom dizajnu za realistične prototipove te u proizvodnji nakita i potrošačkih proizvoda za složene i vizualno atraktivne predmete (Slika 2.7).



Slika 2.7 Predmeti izrađeni PolyJet tehnologijom [15]

2.2.3. Selektivno lasersko sintetiranje (SLS)

Selektivno lasersko sintetiranje (engl. Selective Laser Sintering – SLS), razvijeno 1980-ih na Sveučilištu u Teksasu, pripada skupini fuzije u sloju praha (engl. Powder Bed Fusion – PBF). PBF se dijeli prema izvoru topline na laser (engl. Laser Beam Powder Bed Fusion) i elektronski snop (engl. Electron Beam Powder Bed Fusion). Princip rada temelji se na nanošenju sloja finog praha koji se potom selektivno tali ili sinterira prema digitalnom modelu [16].

SLS pisac (Slika 2.8) sastoji se od spremnika praha, valjka za ravnomjerno nanošenje slojeva, radne komore s podlogom, laserskog sustava kao izvora topline te optičkog sustava koji precizno usmjerava zraku na prah.



Slika 2.8 SLS pisac [17]

U SLS tehnologiji pisac pomoću valjka ravnomjerno nanosi sloj praha, koji se selektivno sinterira laserskom zrakom prema CAD modelu. Platforma se zatim spušta, a proces se nastavlja sve dok se ne izradi cijeli predmet. Nakon hlađenja model se čisti od viška praha pjeskarenjem ili zrakom, a po potrebi dodatno obrađuje brušenjem, poliranjem ili bojenjem.

SLS tehnologija ne zahtijeva potporne strukture jer nesinterirani prah služi kao oslonac. Omogućuje izradu čvrstih i temperaturno otpornih objekata od različitih materijala, uključujući metale. Zbog preciznosti i ponovljivosti pogodna je za funkcionalne modele te za proizvodnju manjih i srednjih serija.

Primjenjuje se u automobilske i zrakoplovne industrije za prototipove, rezervne i lagane dijelove složenih geometrija, u medicini za personalizirane proteze i ortopedski pomagala te u proizvodnji za kućišta, alate i funkcionalne proizvode. Primjeri proizvoda proizvedenih ovom tehnologijom prikazani su na slici 2.9.



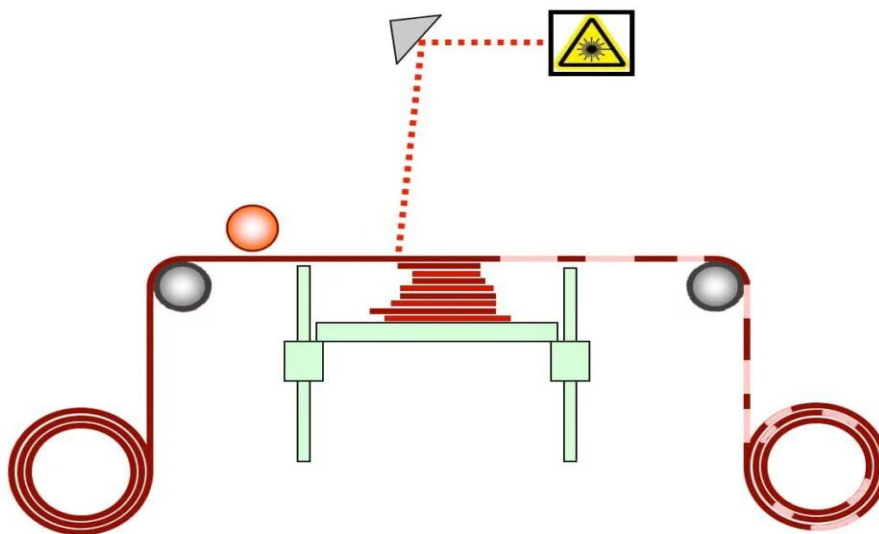
Slika 2.9 Predmeti izrađeni SLS tehnologijom [18]

2.2.4. Tehnologija laminiranih slojeva (LOM)

Tehnologija laminiranih slojeva (engl. Laminated Object Manufacturing – LOM), razvijena 1991. od tvrtke Helisys, jedna je od prvih metoda aditivne proizvodnje. Pripada skupini laminiranja listova (engl. Sheet Lamination – SL), gdje se tanki slojevi materijala spajaju lijepljenjem ili topljenjem, a kontura se zatim izrezuje laserom ili nožem [19].

LOM pisač sastoji se od role s listovima materijala, mehanizma za njihovo pozicioniranje, radne platforme, grijanog valjka za spajanje slojeva te sustava za rezanje (laser ili nož), koji oblikuje konture prema modelu..

U LOM tehnologiji list materijala s role polaže se na radnu plohu, lijepi grijanom valjkom i reže laserom ili nožem prema CAD modelu. Platforma se zatim spušta, polaže se novi sloj i proces se nastavlja dok se ne formira cijeli objekt. Višak materijala služi kao potpora, a nakon završetka uklanja se, dok se model po potrebi dodatno brusi, polira ili boja (Slika 2.10).



Slika 2.10 Proces izrade LOM tehnologije [20]

LOM tehnologija je jeftinija i dostupnija jer koristi papir ili plastične folije. Omogućuje brzu izradu većih modela bez potpornih struktura, a postupak je jednostavniji od tehnologija temeljenih na prahu ili smolama.

Primjena LOM tehnologije najčešća je u izradi arhitektonskih maketa, vizualnih i funkcionalnih prototipova te velikih modela gdje visoka preciznost nije presudna. Koristi se i u industrijskom dizajnu za brzu validaciju koncepata te u obrazovanju i istraživanjima zbog niske cijene materijala i jednostavnog postupka.

2.3. Prednosti i nedostaci 3D printanja

3D printanje omogućuje brzu izradu prototipova te mogućnost izrade složenih geometrija i detalja. Proces izrade smanjuje količinu potrebnog materijala, ali i otpadnog, čime se smanjuju troškovi proizvodnje. Također, ne zahtijeva kalupe ni skupe alate. 3D printanje ima širok izbor dostupnih tehnologija koje omogućuju izradu predmeta različitim postupcima i materijalima, uz jednostavnost izrade i korištenja. S druge strane, tehnologije 3D printanja imaju ograničen izbor materijala, a većina pisaa omogućuje izradu objekata manjih dimenzija te su prikladne samo za male serije. Industrijski pisaa skuplji su i zahtijevaju skuplje materijale, što povećava početne troškove. Neki materijali pri ispisu ispuštaju otrovne pare, što zahtijeva dodatne

sigurnosne mjere. Također, pojedini procesi izrade stvaraju vidljive slojeve i zahtijevaju naknadnu obradu materijala, što utječe kako na estetska, tako i na mehanička svojstva.

2.4. Primjena 3D printanja

3D printanje danas se koristi u širokom rasponu područja. U industriji omogućuje izradu prototipova, alata i funkcionalnih dijelova, dok u medicini služi za anatomske modele, proteze, ortoze, implantate i dentalne proizvode. Značajnu primjenu ima i u dizajnu, umjetnosti i nakitu, kao i u edukaciji i istraživanju kroz modele za nastavu i pokuse. Zahvaljujući dostupnosti kućnih pisača, koristi se i u hobi za rezervne dijelove i personalizirane predmete, a prisutno je i u proizvodnji ambalaže te potrošnih proizvoda poput posuda, folija i kućanskog pribora [21].

3. FDM TEHNOLOGIJA 3D PRINTANJA

Tehnologiju taložnog očvršćivanja materijala (engl. Fused Deposition Modeling – FDM) razvili su 1989. Scott i Lisa Crump, a kasnije ju je komercijalizirala tvrtka Stratasys. Nakon isteka patenta i razvoja novih materijala i pisača postala je široko dostupna i primjenjiva u raznim područjima [22].

FDM spada u tehnologije ekstruzije materijala, pri čemu se rastaljeni filament istiskuje kroz mlaznicu i taloži sloj po sloj. Svaki sloj hladi se i stvrdnjava, čime nastaje trodimenzionalni objekt. Najčešće se koriste plastični ili kompozitni filament.

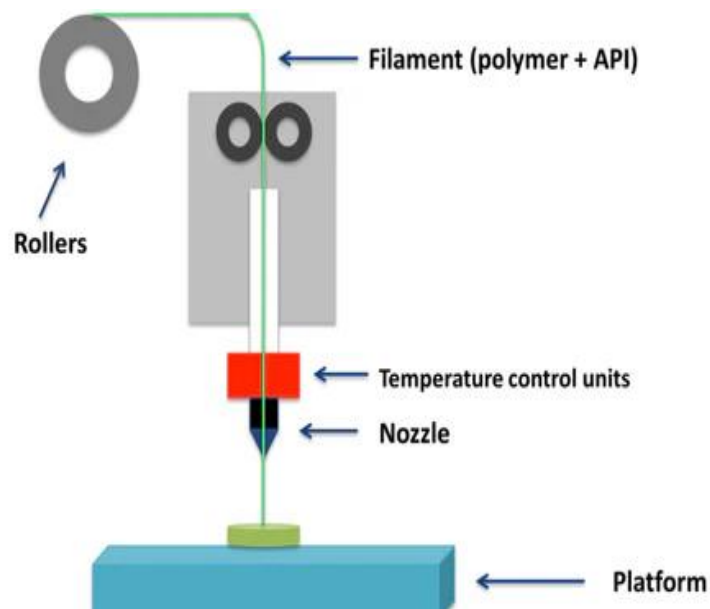
FDM pisač sastoji se od nekoliko ključnih komponenti [23]:

- Filament – Osnovna sirovina u obliku niti namotane na kolut..
- Ekstruder – Uvlači filament i tali ga u hotendu prije izlaska kroz mlaznicu.
- Radna podloga – Površina na koju se taloži materijal sloj po sloj, često grijana radi boljeg prianjanja.
- Upravljački sustav – Elektronika i softver koji kontroliraju kretanje, temperaturu i proces izrade prema G-kodu.

Kod FDM tehnologije postupak se sastoji od tri faze: izrade CAD modela, njegove pripreme i slanja pisaču te same izrade objekta, uz mogućnost naknadne obrade.

U ranijem dijelu rada objašnjena je izrada CAD modela i njegova priprema u slicer softveru, koji model dijeli na slojeve, definira parametre ispisa i generira G-kod s uputama za rad pisača. Prije početka ispisa filament se umeće u ekstruder, prolazi kroz hladni dio i ulazi u zagrijanu mlaznicu. Za kvalitetno prianjanje prvog sloja potrebno je pravilno poravnati podlogu i podesiti razmak između mlaznice i podloge. Nakon postizanja radne temperature ispisuje se tzv. linija za čišćenje mlaznice (engl. priming line), kojom se stabilizira protok materijala. Sam proces ispisa temelji se na kretanju ekstrudera po osima X i Y, dok se podloga ili mlaznica pomiču po osi Z. Materijal se taloži sloj po sloj, hladi i stvrdnjava, a proces se nastavlja sve dok se ne oblikuje konačni objekt (Slika 3.1). Tijekom izrade potrebno je nadzirati rad pisača kako bi se spriječile nepravilnosti poput stvaranja niti ili deformacija, a po završetku ispisa uklanja se

model zajedno s potpornim strukturama. Ovisno o zahtjevima, može se provesti dodatna obrada poput rezanja, brušenja ili termičkih postupaka [24].



Slika 3.1 Proces izrade FDM tehnologijom [25]

Budući da je postupak izrade ovim pisačima relativno jednostavan i pristupačan, FDM tehnologija našla je primjenu kako u industriji, tako i u kućnoj i hobi upotrebi.

3.1. Prednosti i nedostaci FDM tehnologije

FDM tehnologija nudi pristupačnost, niske cijene i jednostavnost upotrebe, što je čini idealnom tehnologijom za početnike. Također, ova tehnologija ima široki spektar materijala, od krutih do fleksibilnih, što omogućuje širu primjenu. Neki materijali su biorazgradivi, što ih čini ekološki prihvatljivima. Uz potporne strukture, pisači ove tehnologije omogućuju izradu složenih geometrija i kompleksnih oblika.

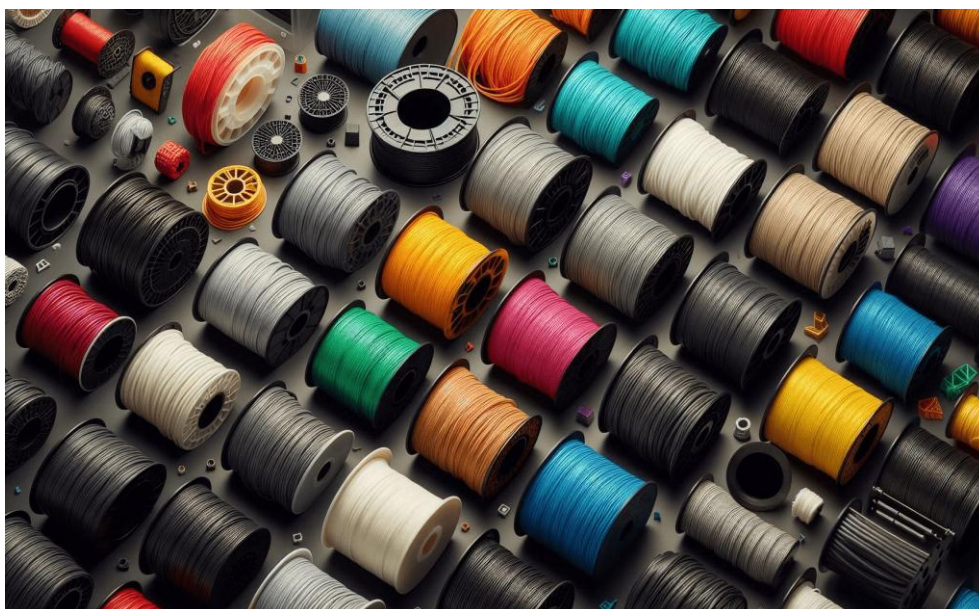
Unatoč prednostima, proces izrade kod ove tehnologije stvara vidljive slojeve, što dovodi do hrapavih površina i zahtijeva naknadnu obradu. U usporedbi s drugim tehnologijama, proces izrade kod FDM-a sporiji je i manje precizan te može doći do problema pri ispisu, poput začepjenja mlaznice ili podizanja rubova. Također, veličina objekata ovisi o dimenzijama komore pisača.

3.2. Primjena FDM tehnologije

FDM tehnologija nalazi primjenu u različitim područjima. U proizvodnji se koristi za funkcionalne dijelove i prototipove, dok u medicini omogućuje izradu modela organa, ortopedskih pomagala, dentalnih proteza i medicinskih uređaja. U edukaciji pomaže kroz fizičke modele koji olakšavaju razumijevanje složenih koncepata, a u automobilske industriji ubrzava razvoj i omogućuje izradu završnih dijelova, poput zvučnika, cijevi i komponenti branika [26].

4. MATERIJALI KOD FDM 3D PRINTANJA

Materijali koje koristi FDM tehnologija nazivaju se filamenti, odnosno niti namotane na kolut (Slika 4.1). Svaki filament ima svoja posebna mehanička, toplinska i kemijska svojstva, koja određuju kvalitetu i funkcionalnost ispisa. Na kvalitetu filameta utječu mehanička svojstva poput žilavosti i fleksibilnosti, toplinska svojstva poput otpornosti na povišene temperature te kemijska svojstva poput otpornosti na kemikalije. Najčešće korišteni materijali kod FDM tehnologije su ABS, PLA, poliamidi (PA) i PETG, a u nastavku su prikazane njihove glavne karakteristike.



Slika 4.1 FDM filamenti namotani na kolut [27]

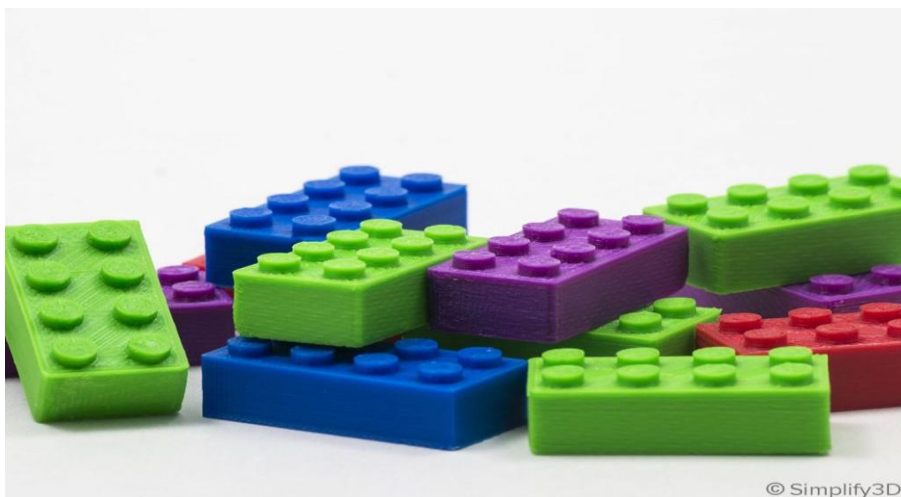
4.1. Akrilonitril–butadien–stiren (ABS)

Akrilonitril–butadien–stiren (ABS) spada u skupinu termoplastičnih kopolimera čije komponente osiguravaju čvrstoću, žilavost i dobru obradivost. Zbog tih svojstava standardni je materijal u FDM pisačima i često se koristi za funkcionalne dijelove.

ABS se odlikuje visokom žilavošću, trajnošću i otpornošću na povišene temperature. Lako se naknadno obrađuje (brušenje, bušenje, poliranje acetonom), široko je dostupan, cjenovno povoljan i nudi se u raznim bojama, što omogućuje estetski kvalitetne završne obrade.

Nedostaci ABS-a uključuju pojavu podizanja rubova (engl. warping) i skupljanja bez grijane podloge i zatvorene komore, ispuštanje štetnih para tijekom ispisa te slabu otpornost na UV zračenje koje uzrokuje žućenje i degradaciju. Bez stabilne kontrole temperature moguća su i dimenzijska odstupanja [28].

Koristi se za izradu kućišta, projektnih kutija, igračaka (npr. LEGO kockica), automobilske opreme i funkcionalnih prototipova. U industriji se primjenjuje za prototipe i alate, često u modificiranim varijantama zbog bolje otpornosti na toplinu [29]. Primjer LEGO kockica napravljenih od ABS filamenta prikazan je na slici 4.2.



Slika 4.2 Kockice izrađene od ABS filamenta [29]

4.2. Polilaktična kiselina (PLA)

Polilaktična kiselina (PLA) spada u biopolimere dobivene iz obnovljivih izvora poput kukuruza ili šećerne trske. Najčešće je korišten materijal u FDM tehnologiji jer se lako obrađuje pri nižim temperaturama i ne zahtijeva grijanu podlogu. Biorazgradiv je i ekološki prihvatljiv.

PLA je jednostavan za printanje jer ne zahtijeva zatvorenu komoru, ne skuplja se i ima dobru adheziju slojeva, što osigurava dimenzijsku preciznost i glatku završnu obradu. Cjenovno je pristupačan, dostupan u raznim varijantama i bojama, a njegova ključna prednost u odnosu na ABS jest biorazgradivost i ekološka prihvatljivost.

Nedostaci PLA-a uključuju slabu otpornost na toplinu i UV zračenje, manju žilavost u odnosu na ABS te sklonost deformacijama i lomovima pri opterećenju. Ako hlađenje nije pravilno

podešeno, može doći do pojave niti (engl. stringing). Iako je biorazgradiv, razgradnja je učinkovita samo u industrijskim kompostnim uvjetima.

Koristi se za brzu izradu prototipova, dekorativnih i edukacijskih modela, ambalaže i potrošnih proizvoda. U medicini služi za anatomske modele, resorptivne šavove i implantate, dok se poboljšane verzije (PLA+) primjenjuju u industriji za alate i pomoćne dijelove [30, 31]. Predmeti napravljeni od PLA filamenta prikazani su na slici 4.3.



Slika 4.3 Predmeti izrađeni od PLA filamenta [31]

4.3. Poliamid (PA)

Poliamid (PA) spada u inženjerske termoplaste s amidskom vezom koja mu daje karakteristična mehanička i kemijska svojstva. Najpoznatiji su PA6 i PA6.6 (naftnog podrijetla), PA11 (bio-baziran, iz ricinusova ulja) i PA12, koji je najčešći u 3D printanju zbog male apsorpcije vlage i dobre dimenzijske stabilnosti.

Poliamidi se odlikuju čvrstoćom, žilavošću i otpornošću na habanje, pa se koriste za dijelove pod mehaničkim opterećenjem. PA11 je fleksibilan, ekološki prihvatljiv i siguran za kontakt s hranom, dok se PA11 i PA12 u 3D printanju najčešće primjenjuju zbog stabilnosti, žilavosti i fleksibilnosti. Za zahtjevnije primjene mogu se ojačati vlaknima radi veće krutosti i otpornosti [32].

Nedostatak poliamida jest higroskopsnost, pa ih treba čuvati na suhome i sušiti prije printanja. U FDM tehnologiji skloni su podizanju rubova (engl. warping) i pucanju, zahtijevaju grijanu podlogu, visoku temperaturu ekstrudera i često zatvorenu komoru. Nisu pogodni za vanjsku upotrebu zbog UV osjetljivosti te su skuplji od PLA-a i ABS-a, pa se češće koriste u profesionalnom nego u amaterskom 3D printanju.

Najviše se koriste u automobilskoj industriji (kućišta, spojnice, spremnici goriva, cijevi), industrijskoj proizvodnji (zupčanici, ležajevi, podlošci) i tekstilnoj industriji (vlakna, tkanine, užad). U medicini služe za proteze i ortoze, a PA11 je bio-baziran i biokompatibilan, stoga je prikladan za izradu dijelova koji dolaze u dodir s ljudskim tijelom. Zbog kemijske otpornosti i fleksibilnosti primjenjuju se i u ambalaži, dok se u 3D printanju PA11 i PA12 koriste za prototipove, funkcionalne dijelove, alate i kućišta u elektronici. Predmeti izrađeni od PA6 filameta prikazani su na slici 4.4.



Slika 4.4 Predmeti izrađeni od PA6 filameta [33]

4.4. Polietilen-tereftalat modificiran glikolom (PETG)

Polietilen-tereftalat modificiran glikolom (PETG) spada u kopolistere koji su žilaviji i lakši za obradu od običnog PET-a. U FDM printanju kombinira jednostavnost PLA-a i izdržljivost ABS-a. Najčešće je poluproziran i pri ispisu ne ispušta neugodne pare.

PETG je jednostavan za printanje poput PLA-a, s dobrom adhezijom slojeva. Vodootporan je, žilav i kemijski otporan, a toplinskom postojanošću nalazi se između PLA-a i ABS-a. Ne ispušta štetne pare, daje glatku i sjajnu površinu te je reciklabilan.

Nedostaci PETG-a uključuju sklonost stvaranju niti i kapanju pri lošim postavkama ispisa te potrebu za potpornim strukturama kod složenijih modela. Zbog jake adhezije preporučuje se korištenje ljepljivih podlozi, a naknadna obrada zahtjevnija je jer ga je teško lijepiti i ne može se zaglađivati otapalima kao ABS [34,35].

PETG se koristi za funkcionalne prototipove i dijelove otporne na vlagu, kemikalije i toplinu, poput kućišta, poklopaca, nosača i zaštitnih obloga. U prozirnoj varijanti primjenjuje se za kućanske predmete, ambalažu i svjetlosne difuzore. Također se koristi u elektronici (kutije, nosači), medicini i edukaciji za izradu različitih modela. Kućanski predmeti izrađeni od PETG filamenta prikazani su na slici 4.5.



Slika 4.5 Predmeti izrađeni od PETG filamenta [35]

5. FLEKSIBILNI FILAMENTI

Posebna vrsta materijala korištenih u FDM tehnologiji nazivaju se fleksibilni filamenti. Kao što i sam naziv kaže, to su materijali s fleksibilnim svojstvima, odnosno kombiniraju svojstva plastike i gume. Odlikuju se odličnim mehaničkim svojstvima poput visoke elastičnosti, otpornosti na habanje, udarce i apsorpciju vibracija, ali i povoljnim kemijskim svojstvima. Takva mehanička svojstva čine ih prikladnima za primjenu u industriji i za izradu predmeta kod kojih je potrebna mogućnost savijanja i uvijanja bez pojave deformacija ili oštećenja [36].

5.1. Vrste fleksibilnih filamenata

Fleksibilni filamenti obuhvaćaju više različitih vrsta materijala koji se međusobno razlikuju po tvrdoći, elastičnosti i primjeni, pri čemu svaka vrsta nudi specifične prednosti u izradi prototipova i funkcionalnih dijelova.

5.1.1. Termoplastični poliuretan (TPU)

Termoplastični poliuretan (engl. Thermoplastic Polyurethane – TPU) spada u vrstu termoplastičnih elastomera (TPE) koji kombiniraju svojstva plastike i gume. Fleksibilan je, otporan na habanje i udarce, može se toplinski oblikovati i reciklirati te je jedan od najčešće korištenih fleksibilnih filamenata u FDM 3D printanju.

TPU odlikuju visoka rastezljivost, otpornost na udarce, abraziju i kemikalije (ulja, masti). Dostupan je u raznim tvrdoćama i bojama, no ne podnosi visoke temperature i higroskopan je, pa ga treba pažljivo skladištiti.

Prednosti TPU-a su fleksibilnost i elastičnost, pa se ne lomi pri opterećenju, a kemijska otpornost čini ga pogodnim za automobilsku i industrijsku primjenu. Dobro apsorbira vibracije i udarce te u FDM 3D printanju pokazuje stabilnost i dobro prianjanje bez većih deformacija. Nedostaci TPU-a uključuju sporije i zahtjevnije printanje pri nižim brzinama, nisku otpornost na temperaturu, sklonost upijanju vlage te otežanu naknadnu obradu.

TPU se koristi u automobilskoj industriji (brtve, obloge, fleksibilni dijelovi), sportskoj opremi (potplate, zaštitni elementi), medicini (proteze, ulošci, pomagala) te u industriji i elektronici za

maskice, crijeva, kotačiće i brtve [37] . Primjena TPU-a u sportskoj opremi prikazana je na slici 5.1.



Slika 5.1 Predmet izrađen od TPU filamenta – primjer primjene u potplati obuće [38]

5.1.2. Soft PLA

Fleksibilni PLA (engl. Soft PLA) spada u PLA s elastomernim aditivima koji mu daju gumastu fleksibilnost uz zadržane prednosti standardnog PLA-a, poput lakog printanja i slabog mirisa. Mekši je i savitljiviji od običnog PLA-a.

Fleksibilni PLA odlikuje se visokom čvrstoćom, rastezljivošću i boljom otpornošću na udarce u odnosu na obični PLA. U usporedbi s TPU-om slabije podnosi trošenje i kemikalije te ne podnosi visoke temperature, ali je manje osjetljiv na vlagu i tijekom printanja pokazuje male deformacije.

Fleksibilni PLA u odnosu na obični PLA pokazuje veću fleksibilnost, elastičnost i gumastu strukturu, lako se printa i manje deformira. Dostupan je u raznim bojama, daje estetski dobar završetak te je biobaziran i industrijski biorazgradiv. Nedostaci Soft PLA-a uključuju nisku otpornost na ulja, kemikalije i visoke temperature, sklonost oštećenju pri trenju te mogućnost stvaranja niti i začepjenja mlaznice. Naknadna obrada ograničena je zbog gumaste strukture [39].

Soft PLA se koristi u elektronici za maskice, u industriji za rukohvate, podloške i prototipove fleksibilnih dijelova, u modnoj industriji za potplate i remene te za izradu igračaka i edukativnih modela. Predmet izrađen od Soft PLA filamenta prikazan je na slici 5.2.



Slika 5.2 Predmet izrađen od Soft PLA filamenta [40]

5.1.3. Termoplastični poliamidi (TPA)

Termoplastični poliamidi (TPA) predstavljaju fleksibilnu verziju poliamida dobivenu miješanjem najlona i termoplastičnih elastomera, čime se kombiniraju elastičnost TPE-a s mehaničkom otpornošću i kemijskom stabilnošću najlona [41].

TPA je mekan i gumenast materijal s dobrom fleksibilnošću, elastičnošću i otpornošću na trošenje. Za razliku od PLA-a, otporan je na ulja, masti i kemikalije te zadržava fleksibilnost i pri niskim temperaturama. U 3D printanju pokazuje stabilnost i dobru adheziju slojeva.

Prednosti TPA-a su to što je lagan, fleksibilan i otporan materijal, pogodan za dijelove pod opterećenjem koji zahtijevaju savitljivost. Prikladan je za vanjsku upotrebu, omogućuje bojanje i može se kombinirati s drugim materijalima. Nedostaci TPA-a uključuju sklonost upijanju vlage, savijanje tijekom ispisa i potrebu za sporijim radom. Također, skuplji je od Soft PLA i TPU filamenta.

TPA se koristi u sportskoj opremi (čizme, tenisice, zaštitni dijelovi), medicini (kateteri, fleksibilni implantati), automobilskoj i industrijskoj proizvodnji (brtve, amortizeri, obloge,

kućišta, elektronički dodaci) te za specijalizirane proizvode poput loptica za golf, fleksibilnih cijevi i izolacija žica. Predmeti izrađeni od TPA filameta prikazani su na slici 5.3.



Slika 5.3 Predmeti izrađeni od TPA filameta [42]

5.1.4. Termoplastični kopoliester (TPC)

Termoplastični kopoliester (TPC) spada u fleksibilne filamente koji spajaju elastičnost gume s lakoćom oblikovanja i recikliranja termoplastike. Razvijen je za zahtjevne primjene koje traže fleksibilnost, otpornost i dugotrajnu stabilnost .

TPC se odlikuje visokom elastičnošću, otpornošću na udarce, dinamička opterećenja i trošenje. Podnosi širok raspon temperatura te je otporan na ulja, goriva, kemikalije, UV zračenje i vremenske uvjete.

Prednosti TPC-a su fleksibilnost, trajnost i čvrstoća, što ga čini pogodnim za industriju, laboratorije i pogone zbog otpornosti na kemikalije, goriva i ulja. Za razliku od drugih fleksibilnih filamenata dobro podnosi širok temperaturni raspon, UV zračenje i vremenske uvjete, pa je prikladan i za vanjsku te dugotrajnu upotrebu. Nedostaci TPC-a uključuju zahtjevnije printanje pri višim temperaturama i na grijanoj podlozi, sporiji ispis radi boljeg prijanjanja slojeva te višu cijenu. Kod slabijih pisaa mogu se javiti problemi s ekstrudiranjem.

TPC se koristi u automobilskoj industriji za fleksibilne spojeve, brtve, cijevi i kanale, u industriji i elektronici za maskice, kućišta i obloge te u medicini za fleksibilne cijevi, proteze i katetere. Također se primjenjuje u sportskoj opremi i obući, primjerice za potplate i zaštitne elemente [43, 44]. Predmet izrađen od TPC filameta prikazan je na slici 5.4.



Slika 5.4 Predmeti izrađeni od TPC filamenta [44]

5.2. Prednosti i nedostaci fleksibilnih filamenata

Fleksibilni filament ističu se iznimnim mehaničkim svojstvima poput elastičnosti i savitljivosti, a pritom ne dolazi do loma. Omogućuju otpornost na udarce i habanje te smanjuju vibracije, što ih čini pogodnima za dijelove s mehaničkim opterećenjima. Većina filamenata može se reciklirati, što ih čini ekološki prihvatljivima.

S druge strane, ovi materijali zahtjevniji su za printanje, mogu dovesti do začepljenja mlaznica te iziskuju sporiji ispis. Imaju manju otpornost na temperaturu, zbog čega nisu prikladni za vanjsku upotrebu. Gumasta struktura ograničava naknadnu obradu. Budući da su higroskopni, zahtijevaju pravilno skladištenje i sušenje prije korištenja, a u usporedbi s drugim materijalima i skuplji su [36].

5.3. Primjena fleksibilnih filamenata u 3D printanju

Fleksibilni filament imaju široku primjenu u izradi funkcionalnih prototipova i gotovih proizvoda, omogućujući njihovo praktično testiranje. U industriji se koriste za alate poput ručki i hvataljki te za finalne dijelove, dok u potrošačkoj proizvodnji služe na linijama za sprječavanje oštećenja proizvoda pri obradi i transportu. U automobilske industriji primjenjuju se za komponente koje smanjuju rizik od oštećenja tijekom montaže. Osim toga, nalaze primjenu i u svakodnevnim predmetima, primjerice u izradi ručki za bicikle ili dijelova strojeva [36].

6. HRAPAVOST POVRŠINE

Površinska hrapavost odnosi se na nepravilnosti koje nastaju na površini materijala uslijed odabranog postupka obrade, oštećenja, kemijskih reakcija, djelovanja mehaničkih sila (npr. udaraca), toplinskih utjecaja ili nepravilnosti u strukturi samog materijala. Stanje površinskog sloja pritom nije važno samo iz estetskih razloga, već i zato što uvelike određuje fizička, mehanička i funkcionalna svojstva proizvoda. Osim što utječe na trenje, brtvljenje, prijanjanje i optička svojstva, hrapavost ima ključnu ulogu i u otpornosti na koroziju: glatke površine smanjuju mogućnost neželjenih kemijskih reakcija i pojave lokaliziranih oštećenja, čime se produljuje vijek trajanja proizvoda [45].

6.1. Parametri hrapavosti

Određivanje površinske hrapavosti temelji se na analizi mikroizbočina i udubina u profilu dobivenom presijecanjem površine materijala. Kako bi se hrapavost mogla kvantitativno procijeniti, koriste se različiti parametri koji numerički opisuju njezine karakteristike [45].

6.1.1. R_a – srednje aritmetičko odstupanje profila

Parametar hrapavosti R_a (Slika 6.1) predstavlja prosječnu vrijednost apsolutnih odstupanja profila hrapavosti u odnosu na srednju liniju te je ujedno i najčešće korišten pokazatelj površinske hrapavosti. Njegova vrijednost izračunava se pomoću izraza [46,47]:

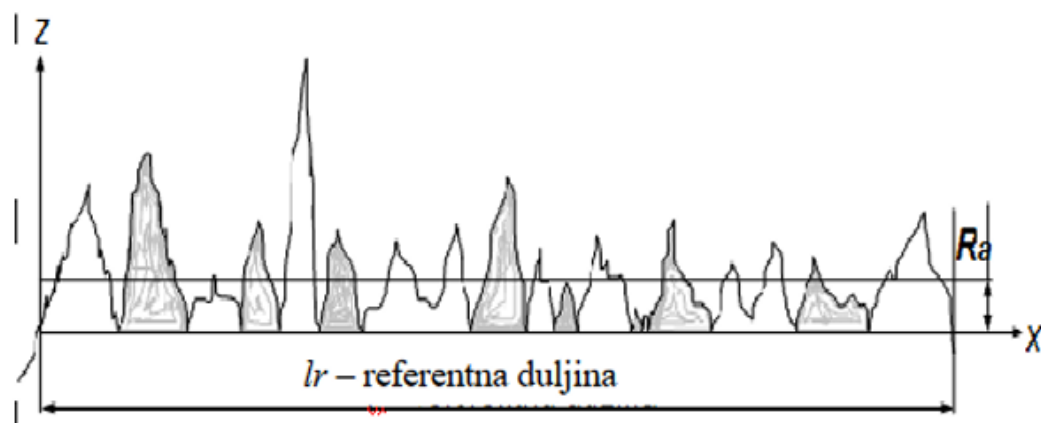
$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx$$

gdje je:

R_a – srednje aritmetičko odstupanje profila, [μm]

l_r – referentna duljina, [mm]

$Z(x)$ – visina profila hrapavosti obzirom na referentnu liniju [μm]



Slika 6.1 Parametar R_a – srednje aritmetičko odstupanje profila hrapavosti [46,47]

6.1.2. R_z – maksimalna visina profila

Parametar R_z (Slika 6.2) definira se kao maksimalna visina profila unutar referentne dužine te se računa kao suma najveće visine vrha (R_p) i najveće dubine dola (R_v) profila hrapavosti [46,47]. Njegova vrijednost određuje se prema izrazu [46]:

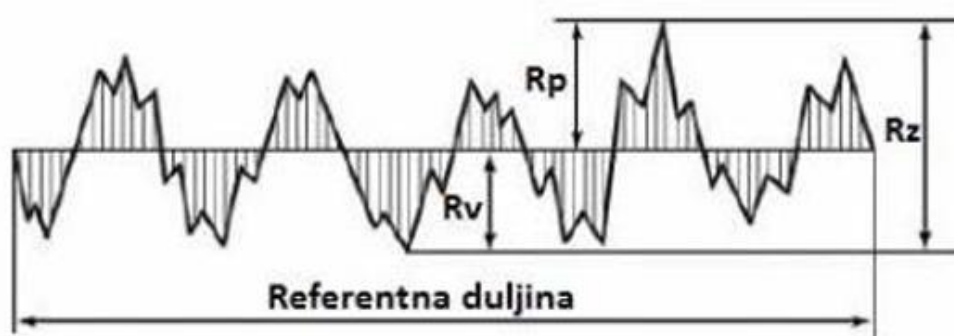
$$R_z = R_p + R_v$$

gdje je:

R_z – najveća visina profila unutar referentne dužine, [μm]

R_p – najveća visina vrha profila na referentnoj dužini, [μm]

R_v – najveća dubina dola profila na referentnoj dužini [μm]



Slika 6.2 Parametar R_z – najveća visina profila hrapavosti [47]

6.1.3. R_q – srednje kvadratno odstupanje profila

Parametar R_q predstavlja srednju kvadratnu vrijednost odstupanja profila od srednje linije. Njegova vrijednost izračunava se pomoću izraza:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} [Z(x)]^2 dx}$$

gdje je:

R_q – srednja kvadratna vrijednost odstupanja profila, [μm]

lr – referentna duljina, [mm]

$Z(x)$ – visina profila hrapavosti obzirom na referentnu liniju [μm]

6.2. Metode mjerenja površinske hrapavosti

Kako bi se procijenila kvaliteta površine, koriste se različite mjerne metode površinske hrapavosti. One omogućuju prepoznavanje nepravilnosti na površini te njihovo kvantitativno opisivanje pomoću specifičnih parametara. Na taj način dobiva se objektivna procjena stanja površine, što je ključno za kontrolu funkcionalnosti i trajnosti proizvoda.

6.2.1. Kontakne metode

Kod kontaktnih metoda najčešće se primjenjuje stilusna profilometrija (engl. Contact Stylus Profilometry), koja ujedno predstavlja i najstariji način mjerenja hrapavosti. Princip rada temelji se na pomicanju dijamantne igle preko površine materijala, pri čemu se bilježe njezini pomaci i oblikuje profil s vrhovima i udubinama. Metoda se odlikuje visokom točnošću i jednostavnom primjenom, zbog čega je široko rasprostranjena. Glavni nedostatak jest kontakt igle s materijalom, koji može uzrokovati oštećenja kod mekših uzoraka, kao i ograničenja u mjerenju vrlo sitnih elemenata te osjetljivost na plastične deformacije. Unatoč tome, stilusna metoda i dalje se široko koristi, primjerice u kontroli obrade tvrdih materijala, analizi tribofilma i procjeni učinkovitosti maziva [45].

6.2.2. Beskontakne metode

Među beskontaktnim metodama mjerenja hrapavosti ističe se optička profilometrija (engl. Optical Profilometry), koja se temelji na analizi interferencijskih uzoraka nastalih

osvjetljavanjem površine monokromatskim svjetlom. Reflektirani snop svjetlosti uspoređuje se s referentnim snopom, a razlika u njihovoj putanji stvara interferencijski uzorak iz kojeg se računalno rekonstruira topografija površine. Prednosti metode su visoka vertikalna rezolucija, neinvazivnost i brzina, no mogu se javiti pogreške kod reflektirajućih ili nehomogenih površina, a oprema je skupa i složena.

Druga važna metoda je konfokalna profilometrija (engl. Confocal Profilometry), kod koje "pinhole" otvor propušta samo fokusirano svjetlo, dok se svjetlost izvan fokalne ravnine odbacuje. Površina se skenira točku po točku, čime se formira digitalni 3D model visoke lateralne i vertikalne rezolucije. Metoda je pogodna za mjerenje strmih površina, no sporija je zbog postupnog skeniranja te može imati problema sa slabom svjetlosnom jakosti [45].

6.2.3. Usporedne metode

Kod usporednih metoda hrapavost se procjenjuje usporedbom s pločicom standardizirane hrapavosti (engl. Standard Roughness Comparison – SRC), koja sadrži više razina referentnih uzoraka. Usporedba se provodi okom ili dodirom, a metoda je pogodna za površine nastale tokarenjem, pjeskarenjem i poliranjem. Prednosti ove metode su brzina, niska cijena i jednostavnost primjene u proizvodnji, dok su glavni nedostaci ograničena točnost i velika ovisnost o iskustvu ispitivača [45].

7. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni dio rada usmjeren je na ispitivanje utjecaja parametara FDM 3D printanja na kvalitetu površine uzoraka izrađenih od TPU filameta. U nastavku će biti detaljno opisani korištena oprema i materijali, postavke ispisa, priprema uzoraka te metodologija mjerenja površinske hrapavosti.

7.1. Oprema i materijali

Za izradu uzoraka korišten je 3D pisač Prusa i3 MK3 (Slika 7.1) proizvođača Prusa Research, koji radi na principu FDM tehnologije. Volumen izrade iznosi $250 \times 210 \times 200$ mm, a pisač je opremljen grijanom podlogom s PEI premazom i mlaznicom koja može doseći temperaturu do $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Podržava filament promjera 1,75 mm i omogućuje pouzdano ispisivanje različitih materijala. Upravljanje je moguće putem SD kartice ili USB-a, dok je priprema modela obavljena u softveru PrusaSlicer [48].



Slika 7.1 Prusa i3 MK3 – FDM 3D pisač korišten u eksperimentalnom radu [49]

Za izradu uzoraka korišten je TPU filament Fillamentum Flexfill 92A (Slika 7.2), promjera 1,75 mm i tvrdoće 92 Shore A. Riječ je o fleksibilnom materijalu visoke elastičnosti, otpornosti na habanje i kemikalije, uz dobro prianjanje među slojevima. Pogodan je za izradu brtvi, kliznih dijelova i proizvoda izloženih mehaničkom opterećenju [50]. U tablici 7.1 prikazane su osnovne tehničke karakteristike TPU filameta Fillamentum Flexfill 92A koji je korišten u eksperimentalnom dijelu rada.

Tablica 7.1 Tehničke karakteristike Fillamentum Flexfill 92A [50]

Radna temperatura	220-240 °C
Grijana podloga	50-60 °C
Dostupni promjeri	1.75 mm i 2.85 mm
Tolerancija promjera	+/- 0.10 mm
Težina	500 g
Dužina filameta	175 m ili 70 m



Slika 7.2 TPU filament Fillamentum Flexfill 92A korišten u eksperimentalnom radu [50]

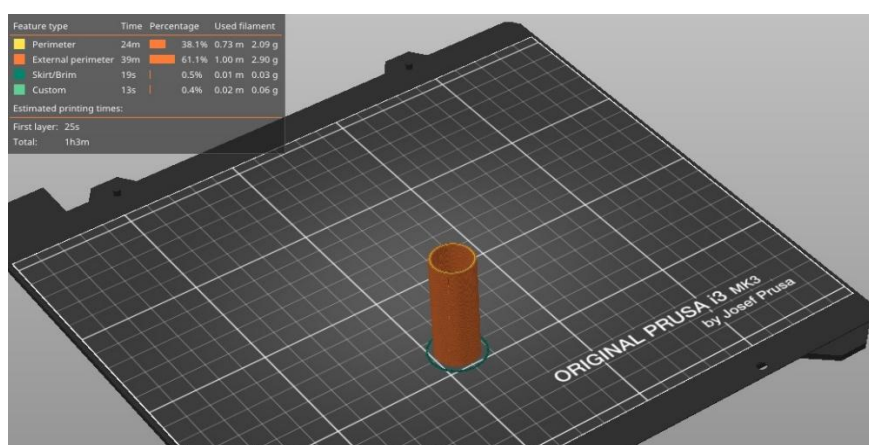
Za mjerenje hrapavosti površine korišten je Mitutoyo Surftest SJ-310 (Slika 7.3), prijenosni mjerni instrument visoke rezolucije ($0,002\text{ }\mu\text{m}$). Omogućuje mjerenje standardnih parametara hrapavosti (R_a , R_z , R_q i dr.), usklađen je s međunarodnim normama (JIS, ISO, VDA, ANSI) te pogodan za brzu analizu i usporedbu ispisanih uzoraka.



Slika 7.3 Mitutoyo Surftest SJ-310 – mjerni instrument za određivanje hrapavosti površine [51]

7.2. Postupak izrade uzoraka

Za potrebe eksperimenta izrađeni su uzorci cilindričnog oblika dimenzija $\varnothing 18 \times 50\text{ mm}$, debljine stijenke 1.5 mm, pri čemu su promjene parametara ispisa omogućile analizu utjecaja rezolucije sloja na kvalitetu površine i hrapavost. Digitalni model uzorka izrađen je u CAD softveru i spremljen u STL formatu. Priprema digitalnog modela provedena je u programu PrusaSlicer (Slika 7.4), u kojem su definirani parametri ispisa (Tablica 7.2).



Slika 7.4 Digitalni model uzorka u Prusa Sliceru

Tablica 7.2 Parametri 3D printanja korišteni u eksperimentalnom radu

Parametar	Vrijednost
Filament	
Promjer (Diameter)	1.75 mm
Ekstruzijski multiplikator	1.15
Gustoća (Density)	1.2 g/cm ³
Težina role (Spool weight)	230 g
Temperatura mlaznice (Nozzle)	240°C
Temperatura podloge (Bed)	50°C
Slojevi i stijenke	
Visina sloja (Layer height)	0.3 mm
Visina prvog sloja	0.2 mm
Broj perimitera (Perimeters)	2
Gornje pune stijenke (Top layers)	4 (0.7 mm)
Donje pune stijenke (Bottom layers)	3 (0.5 mm)
Ispuna (Infiill)	
Gustoća ispune (Fill densitiy)	20%
Uzorak ispune (Fill pattern)	Grid
Gornji uzorak ispune	Monotonic lines
Donji uzorak ispune	Monotonic

Prilikom pripreme modela u programu Prusa Slicer moguće je definirati poziciju, orijentaciju i dimenzije uzorka. Program istovremeno izračunava potrebne resurse za ispis: ukupnu potrošnju filameta (izraženu u gramima i metrima), volumen materijala, procijenjeni trošak te vrijeme trajanja ispisa. Na primjer, za jedan uzorak utrošeno je približno 5,08 g filameta, a ukupno vrijeme ispisa iznosilo je oko 1 sat i 3 minute (Slika 7.5). Sažetak glavnih parametara jednog od provedenih eksperimenata prikazan je na slici 7.6.

The screenshot displays the 'Object manipulation' and 'Sliced Info' panels of the PrusaSlicer software. The 'Object manipulation' panel includes a dropdown for 'World coordinates' and input fields for X, Y, and Z coordinates, as well as rotation and scale factors. The 'Sliced Info' panel provides a summary of the print job, including filament usage, volume, cost, and estimated printing time.

Object manipulation			
	X	Y	Z
Position:	109.62	64.63	25 mm
Rotate:	0	0	0 °
Scale factors:	100	100	100 %
Size:	17.84	17.84	50 mm

Sliced Info	
Used Filament (g) (including spool)	5.08 (235.08)
Used Filament (m)	1.76
Used Filament (mm ³)	4236.20
Cost	0.17
Estimated printing time:	
- normal mode	1h3m
- stealth mode	1h3m

Slika 7.5 Izračun utroška filameta, vremena i troška izrade u PrusaSlicer softveru

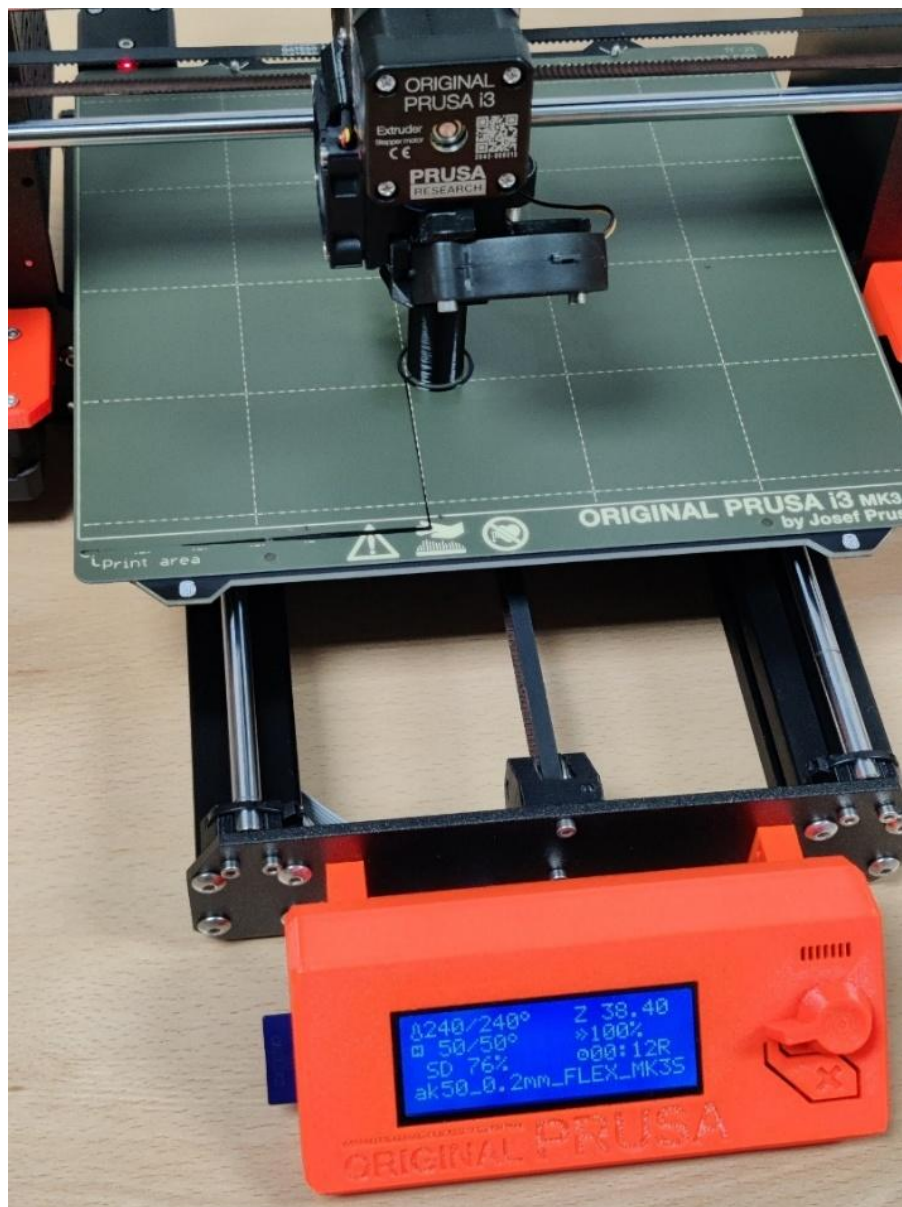
The screenshot shows the 'Print settings' panel of the PrusaSlicer software. It includes dropdown menus for 'Print settings', 'Filament', and 'Printer', as well as a 'Supports' dropdown and 'Infill' and 'Brim' checkboxes.

Print settings :	
0.10mm DETAIL	
Filament :	
Fillamentum Flexfill 92A (modified)	
Printer :	
Original Prusa i3 MK3S & MK3S+	
Supports:	None
Infill:	15%
Brim:	☐

Slika 7.6 Odabrane postavke ispisa (rezolucija sloja, filament, printer, potpora i ispuna) u PrusaSlicer softveru

U eksperimentalnom dijelu rada napravljeno je 6 uzoraka, s različitim rezolucijama sloja: 0,05 mm, 0,07 mm, 0,10 mm, 0,15 mm, 0,20 mm i 0,30 mm. Time je omogućena usporedba utjecaja rezolucije sloja na trajanje ispisa, trošak i hrapavost površine.

Sam proces ispisa odvijao se taloženjem rastaljenog TPU filamenta sloj po sloj na grijanoj podlozi (Slika 7.7).



Slika 7.7 Proces 3D printanja uzorka na pisaču Prusa i3 MK3

Po završetku ispisa, izrađeni uzorci uklonjeni su s podloge i označeni prema definiranoj rezoluciji sloja (Slika 7.8).



Slika 7.8 Uzorci izrađeni od TPU filamenta pri različitim rezolucijama sloja (0,05–0,30 mm)

Na dobivenim uzorcima provedeno je ispitivanje površinske hrapavosti.

7.3. Mjerenje površinske hrapavosti

Na izrađenim uzorcima provedena su mjerenja površinske hrapavosti prijenosnim mjernim instrumentom Mitutoyo Surftest SJ-310 (Slika 7.3). Cilj mjerenja bio je ispitati utjecaj promjenjivog parametra (rezolucije sloja) na kvalitetu površine uzoraka.

Mjerni instrument primjenjuje kontaktnu metodu stilusne profilometrije, pri kojoj se dijamantna igla pomiče po površini uzorka i registrira njezine mikroizbočine i udubine, čime se oblikuje profil površine (Slika 7.9). Iz dobivenog profila instrument računalno izračunava parametre hrapavosti. Za svaki uzorak mjerenja su ponovljena tri puta kako bi se smanjio utjecaj slučajnih nepravilnosti na površini i dobio pouzdan prosječan rezultat.



Slika 7.9 Mjerenje površine uzorka Mitutoyo Surftest SJ-310 profilometrom

Za procjenu površinske hrapavosti odabrani su najčešće korišteni parametri:

- R_a (srednje aritmetičko odstupanje profila) – pokazuje prosječnu hrapavost površine,
- R_z (najveća visina profila) – predstavlja zbroj najveće visine vrha i najveće dubine dola profila,
- R_q (srednja kvadratno odstupanje profila) – kvadratni prosjek odstupanja profila od srednje linije.

Svaki od ovih parametara pruža različit uvid u mikrostrukturu površine, a njihova kombinacija omogućuje potpuniju procjenu kvalitete ispisa.

U nastavku rada prikazani su rezultati provedenih mjerenja i njihova analiza.

8. ANALIZA REZULTATA

Rezultati provedenih eksperimenata prikazani su u dvjema tablicama, dok je njihova analiza prikazana grafički.

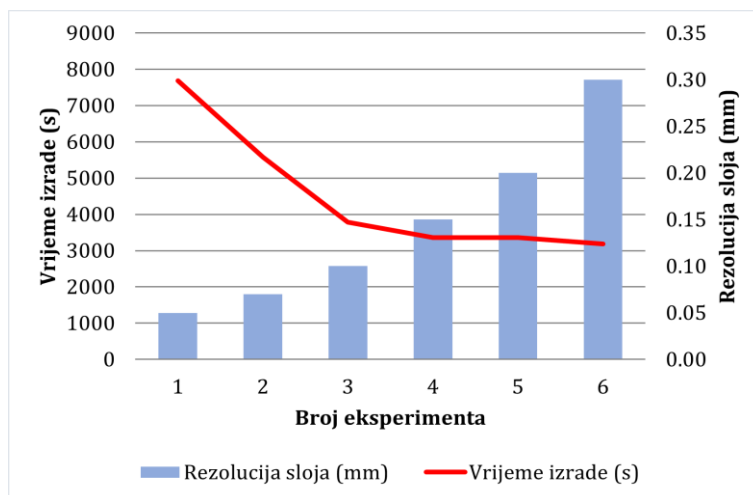
U tablici 8.1 prikazane su vrijednosti rezolucije sloja te odgovarajući utrošak materijala, vrijeme izrade i trošak izrade za svaki eksperiment. Trošak izrade izračunat je na temelju cijene korištenog materijala Fillamentum Flexfill 92A (500 g), koja iznosi 38,00 EUR, odnosno približno 0,076 EUR/g [52].

Tablica 8.1 Rezultati eksperimenata – utjecaj rezolucije sloja na utrošak materijala, vrijeme i trošak izrade

Broj eksperimenta	Rezolucija sloja (mm)	Utrošak materijala (g)	Vrijeme izrade (s)	Trošak izrade (EUR)
1	0.05	5.11	7680	0.3884
2	0.07	5.10	5580	0.3876
3	0.10	5.08	3780	0.3861
4	0.15	5.05	3360	0.3838
5	0.20	5.02	3360	0.3815
6	0.30	4.97	3180	0.3777

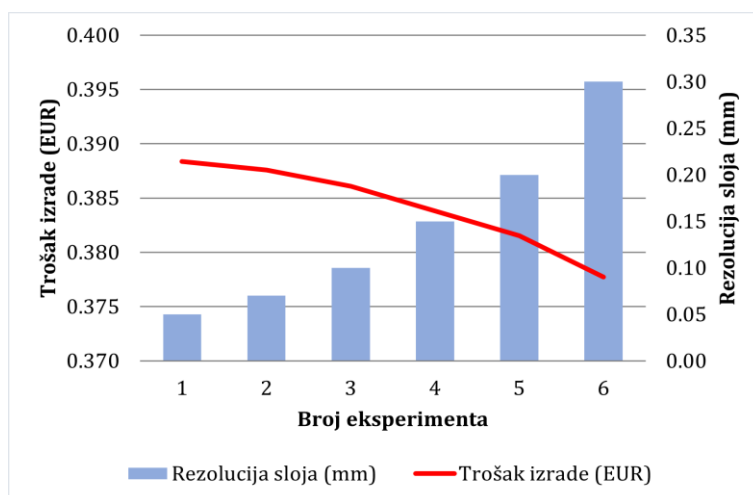
Iz prikazanih rezultata vidljivo je da povećanjem rezolucije sloja dolazi do smanjenja utroška materijala, vremena izrade i troška izrade.

Za detaljniju analizu podataka iz Tablice 8.1 izrađeni su grafički prikazi (Slike 8.1 – 8.4) koji pokazuju međusobne odnose između odabranih parametara.



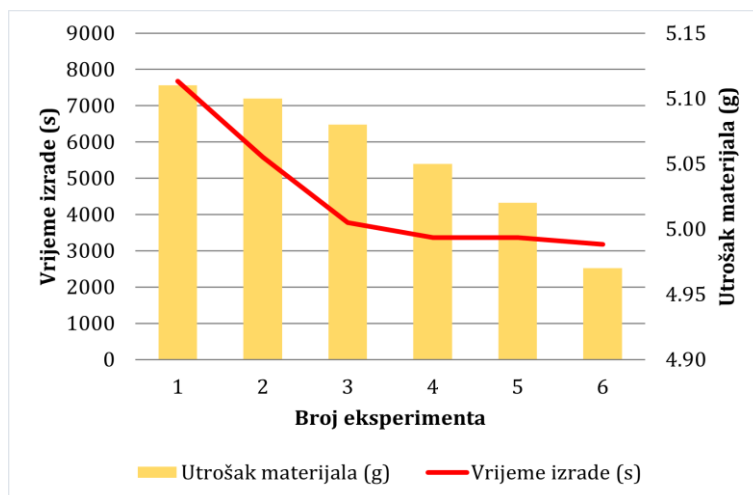
Slika 8.1 Utjecaj rezolucije sloja na vrijeme izrade

Na slici 8.1 prikazan je odnos između vremena izrade i rezolucije sloja. Uočava se da povećanjem rezolucije sloja dolazi do smanjenja vremena izrade modela. Manja rezolucija (tanji slojevi) zahtijeva veći broj prolaza mlaznice, što produljuje ukupno vrijeme printanja. Najmanje vrijeme izrade zabilježeno je kod eksperimenta s najvećom rezolucijom sloja.



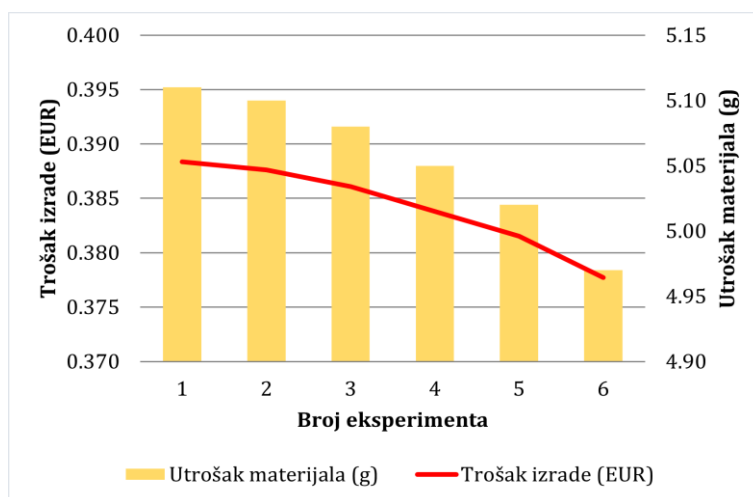
Slika 8.2 Utjecaj rezolucije sloja na trošak izrade

Na slici 8.2 prikazan je odnos između troška izrade i rezolucije sloja. Iako se trošak izrade smanjuje s povećanjem rezolucije sloja, razlike su vrlo male (u rasponu od nekoliko centi). Može se zaključiti da rezolucija sloja ima daleko veći utjecaj na vrijeme izrade nego na ukupan trošak.



Slika 8.3 Utjecaj utroška materijala na vrijeme izrade

Na slici 8.3 prikazan je odnos između utroška materijala i vremena izrade. Utrošak materijala smanjuje se vrlo blago, dok vrijeme izrade do trećeg eksperimenta pokazuje izražen pad, nakon čega se nastavlja se blago smanjivati. To potvrđuje da trajanje procesa ovisi prvenstveno o postavljenoj rezoluciji sloja, a u znatno manjoj mjeri o količini potrošenog filameta.



Slika 8.4 Utjecaj utroška materijala na trošak izrade

Slika 8.4 prikazuje povezanost između troška izrade i utroška materijala. Uočava se da se smanjenje troška izrade može povezati s nešto manjim utroškom materijala, no razlike su vrlo male i zanemarive u usporedbi s promjenama vremena izrade.

Iz prethodnih grafikona može se zaključiti da rezolucija sloja najviše utječe na vrijeme izrade, dok na trošak izrade djeluje minimalno. Povezanost vremena izrade i utroška materijala pokazuje da trajanje procesa značajno varira, dok se količina potrošenog filameta mijenja vrlo malo. Slično tome, trošak izrade prati trend smanjenja utroška materijala, ali razlike ostaju zanemarive. Time je potvrđeno da je rezolucija sloja ključni parametar za optimizaciju trajanja procesa, dok su materijalni i troškovni učinci gotovo konstantni.

Osim utjecaja na vrijeme i trošak izrade, ispitivan je i utjecaj rezolucije sloja na parametre hrapavosti površine.

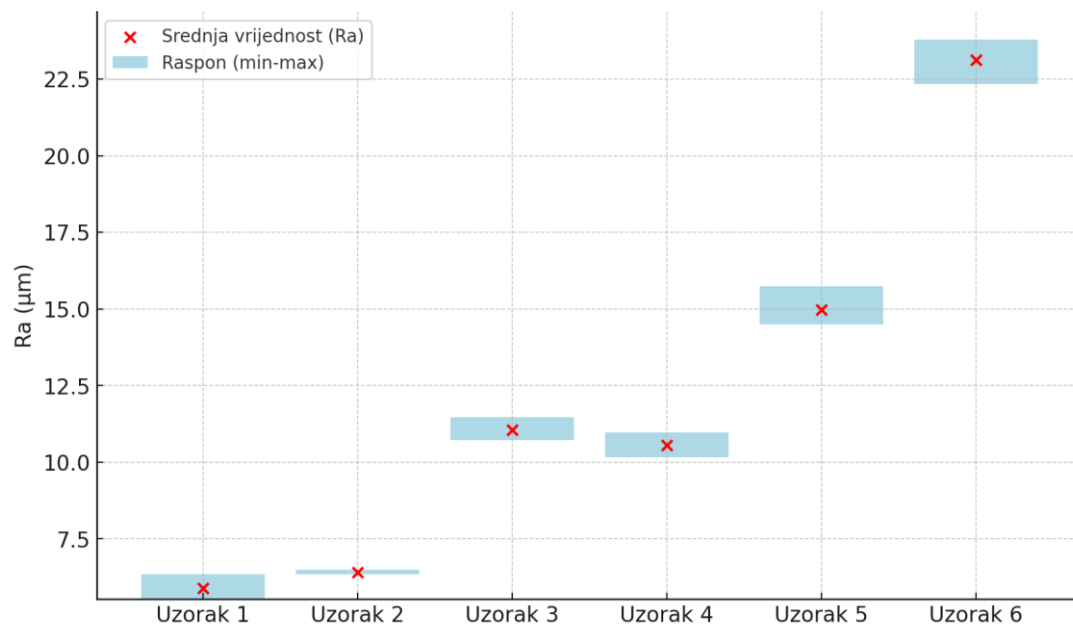
U tablici 8.2 prikazani su rezultati mjerenja parametara hrapavosti površine (R_a , R_z i R_q) za svaki eksperiment, uz pripadajući utrošak materijala i rezoluciju sloja. Svaki parametar mjeren je tri puta, a u tablici su dane srednje vrijednosti dobivenih mjerenja.

Tablica 8.2 Rezultati eksperimenta - parametri hrapavosti površine pri različitim rezolucijama sloja

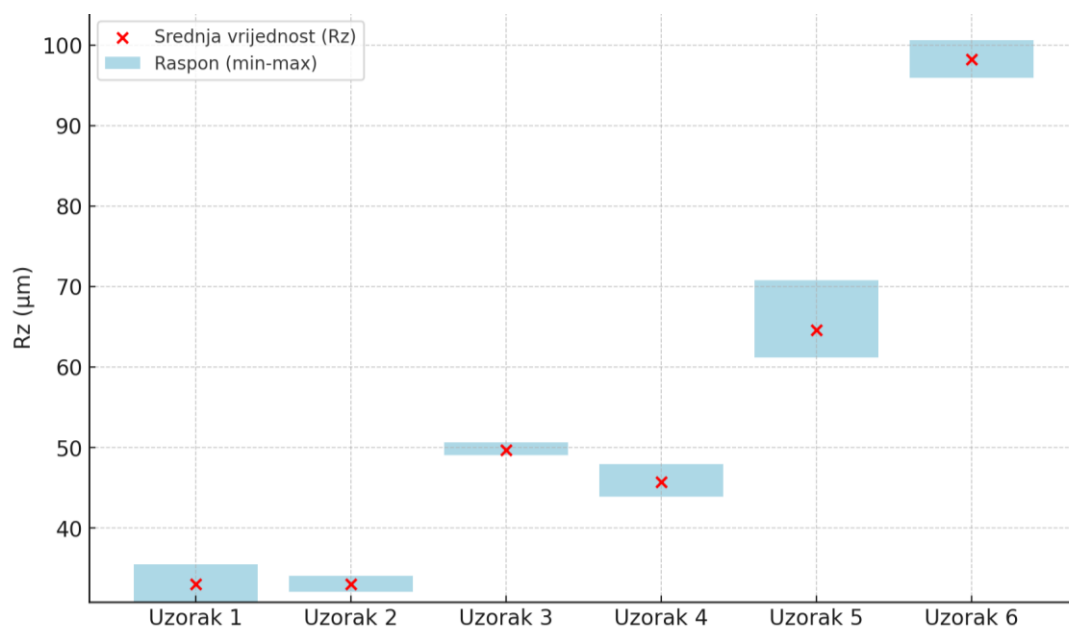
Broj eksperimenta	Rezolucija sloja (mm)	Utrošak materijala (g)	Parametri hrapavosti površine		
			R_a (μm)	R_z (μm)	R_q (μm)
1	0.05	5.11	5.880	33.066	7.230
2	0.07	5.10	6.405	33.035	7.686
3	0.10	5.08	11.044	49.720	13.094
4	0.15	5.05	10.548	45.745	12.481
5	0.20	5.02	14.974	64.592	17.790
6	0.30	4.97	23.122	98.216	27.506

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da povećanjem rezolucije sloja dolazi do velikog povećanja hrapavosti površine uzoraka.

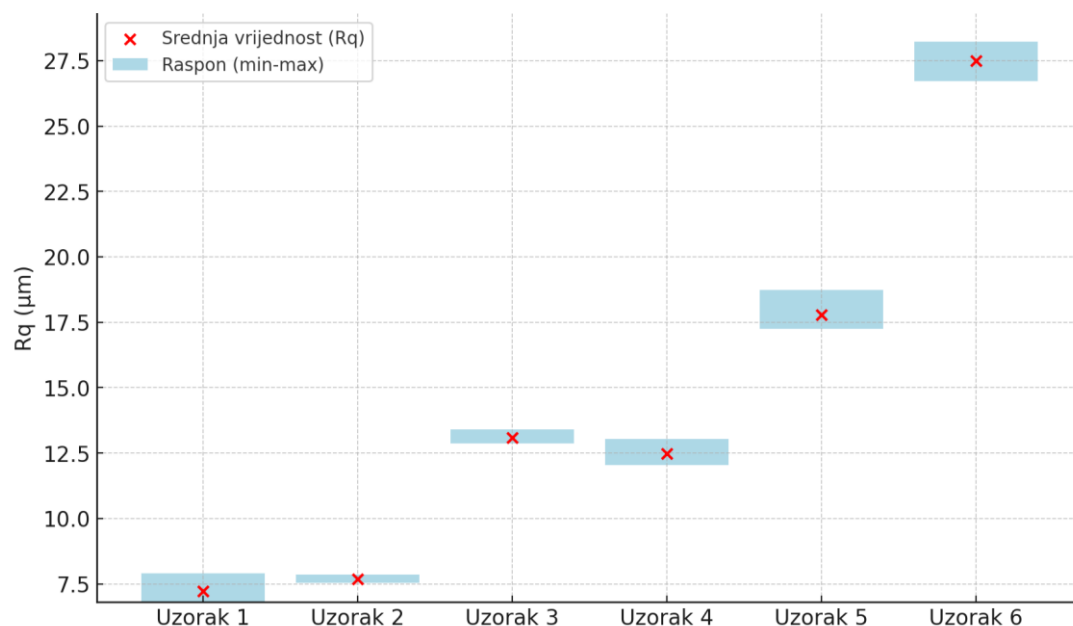
Radi jasnijeg razumijevanja rezultata iz Tablice 8.2, prikazani su rasponi izmjerenih vrijednosti parametara hrapavosti površine (R_a , R_z i R_q) za svaki uzorak (Slike 8.5-8.7).



Slika 8.5 Raspon hrapavosti površine (R_a) za 3 mjerenja po uzorku



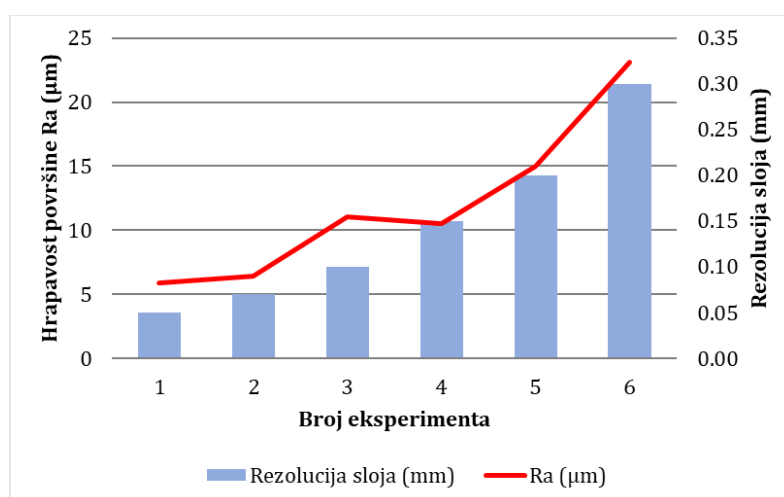
Slika 8.6 Raspon hrapavosti površine (R_z) za tri mjerenja po uzorku



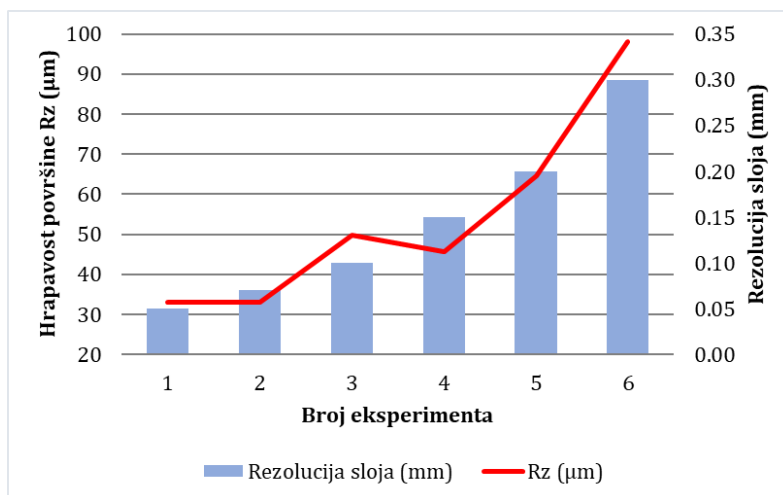
Slika 8.7 Raspon hrapavosti površine (R_q) za tri mjerenja po uzorku

Prikazani rezultati poslužit će kao temelj za daljnju analizu utjecaja rezolucije sloja na hrapavost površine.

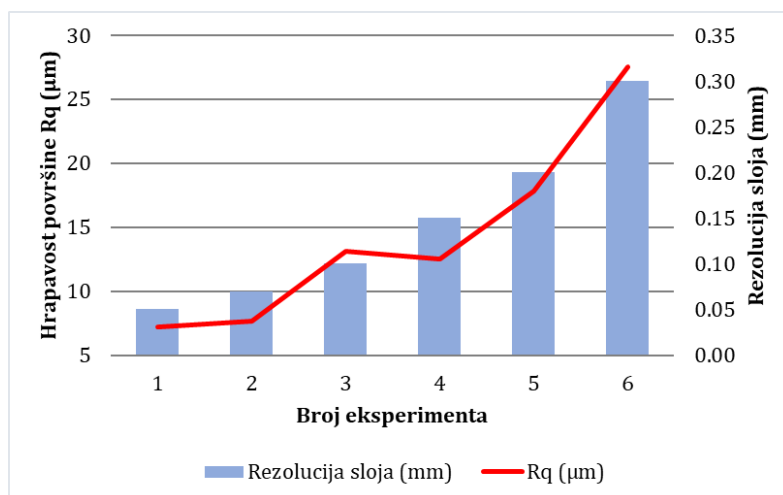
Za detaljniju analizu podataka iz Tablice 8.2 izrađeni su grafički prikazi (Slike 8.8 – 8.13) koji pokazuju međusobne odnose između odabranih parametara. U nastavku su prikazani grafovi (Slike 8.8 – 8.10) koji prikazuju utjecaj rezolucije sloja na parametre hrapavosti površine (R_a , R_z i R_q).



Slika 8.8 Utjecaj rezolucije sloja na hrapavost R_a



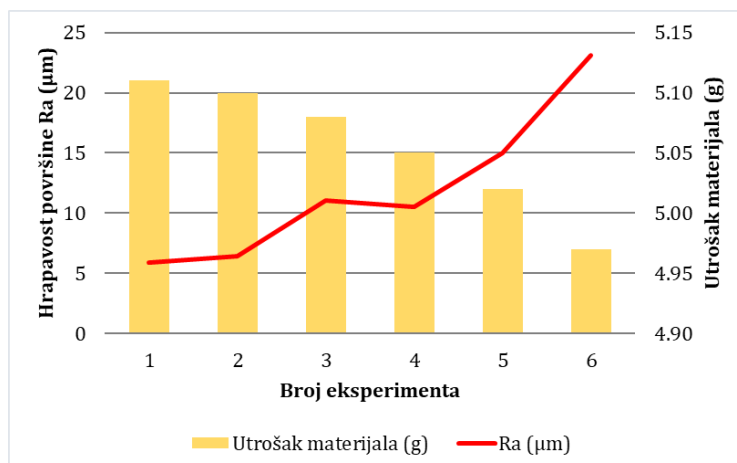
Slika 8.9 Utjecaj rezolucije sloja na hrapavost Rz



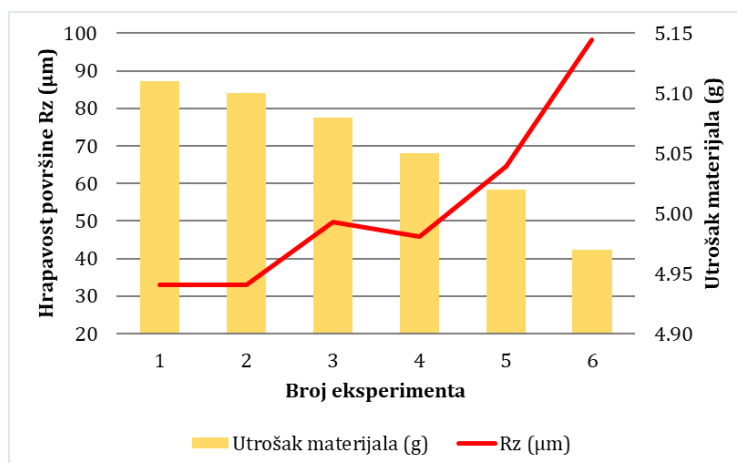
Slika 8.10 Utjecaj rezolucije sloja na hrapavost Rq

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da najmanja rezolucija sloja (0,05 mm) daje najniže vrijednosti hrapavosti površine, odnosno najgladju površinu, dok se s povećanjem rezolucije hrapavost znatno povećava. Sva tri parametra pokazuju istu ovisnost o rezoluciji sloja, što potvrđuje da kvaliteta površine prvenstveno ovisi o ovom parametru 3D ispisa.

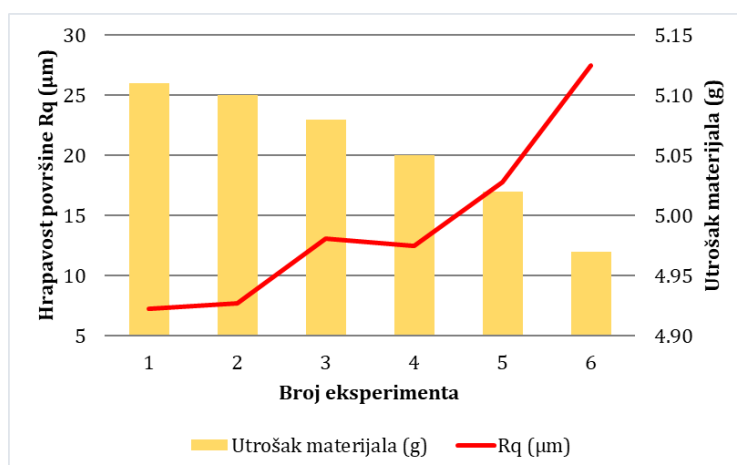
Sljedeći grafikoni (Slike 8.11–8.13) prikazuju odnos između parametara hrapavosti površine (R_a , R_z i R_q) i utroška materijala.



Slika 8.11 Utjecaj utroška materijala na parametar R_a



Slika 8.12 Utjecaj utroška materijala na parametar R_z



Slika 8.13 Utjecaj utroška materijala na parametar R_q

Vidljivo je da količina utrošenog materijala ostaje gotovo stalna kroz sve eksperimente, dok vrijednosti svih parametara hrapavosti (Ra , Rz i Rq) pokazuju porast. To potvrđuje da hrapavost površine ne ovisi o utrošku materijala, već pretežno o odabranoj rezoluciji sloja.

Na temelju svih šest grafikona može se zaključiti da rezolucija sloja ima ključan utjecaj na kvalitetu površine, dok utrošak materijala ostaje gotovo nepromijenjen. Manja debljina sloja osigurava glatku površinu, ali produžuje vrijeme izrade, dok veće vrijednosti rezolucije slojeva omogućuju bržu i isplativiju izradu uz slabiju kvalitetu površine.

Na temelju analize rezultata može se zaključiti da rezolucija slojeva predstavlja ključni parametar procesa FDM tehnologije 3D printanja s TPU filamentom. Smanjenjem rezolucije slojeva postiže se bolja kvaliteta površine, no vrijeme izrade se znatno povećava, dok se trošak i utrošak materijala mijenjaju tek blago. Rezultati su pokazali da na hrapavost površine (Ra , Rz i Rq) najveći utjecaj ima rezolucija slojeva, dok količina potrošenog filameta nema značajniji utjecaj. Rezultati ukazuju na važnost odabira parametara u skladu s prioritetima. Za postizanje bolje kvalitete površine primjenjuju se manje rezolucije slojeva (0,05–0,10 mm), dok veće vrijednosti (0,20–0,30 mm) omogućuju kraće vrijeme i veću isplativost, uz manju površinsku kvalitetu.

9. ZAKLJUČAK

U teorijskom dijelu rada prikazane su osnovne značajke aditivne proizvodnje s naglaskom na FDM tehnologiju, koja je danas jedna od najraširenijih zbog svoje jednostavnosti, pristupačne cijene i širokog spektra primjene. Uspoređena je s tradicionalnim oblicima obrade, poput glodanja i tokarenja, čime je naglašeno da 3D printanje ne zamjenjuje u potpunosti klasične postupke, već ih nadopunjuje u slučajevima kada su potrebni brza izrada prototipova, manji serijski proizvodi ili složeni oblici koje je teško postići klasičnim tehnologijama izrade. Poseban naglasak stavljen je na materijale koji se koriste kod FDM tehnologije, a izdvojena je skupina fleksibilnih filamenata, ponajviše TPU, koji se sve češće koristi zbog svojih specifičnih svojstava, poput elastičnosti i otpornosti na habanje. Dodatno je obrađena i tema površinske hrapavosti, kao jednog od ključnih pokazatelja kvalitete 3D printanih proizvoda, s objašnjenjem najvažnijih parametara (R_a , R_z i R_q) i metoda mjerenja.

Eksperimentalni dio rada obuhvatio je izradu uzoraka pomoću 3D pisaa Prusa i3 MK3 te korištenje TPU filamenta Fillamentum Flexfill 92A. Uzorci su izrađeni pri različitim rezolucijama sloja, a površinska hrapavost mjerena je profilometrom Mitutoyo SurfTest SJ-310. Dobiveni rezultati pokazali su jasno izražen utjecaj promjene rezolucije sloja na kvalitetu površine, vrijeme izrade i ukupnu ekonomičnost procesa. Utvrđeno je da smanjenje debljine sloja značajno poboljšava kvalitetu površine, ali produljuje vrijeme izrade, dok povećanje debljine sloja omogućuje bržu i jeftiniju izradu, uz kompromis u kvaliteti završne obrade. Potrošnja materijala i troškovi ostali su gotovo konstantni, što dodatno naglašava da je ključna odluka u procesu vezana uz kompromis između kvalitete i vremena izrade.

Analiza rezultata potvrdila je da rezolucija sloja predstavlja jedan od najvažnijih parametara kod FDM ispisa fleksibilnim filamentima. Odabirom odgovarajućih postavki korisnik može u potpunosti prilagoditi proces ispisa vlastitim potrebama i prioritetima: naglasak može biti na visokoj kvaliteti površine, skraćanju vremena izrade ili smanjenju troškova. Time je potvrđeno da pravilno podešavanje parametara ispisa ima presudan značaj za učinkovitost i isplativost aditivne proizvodnje.

LITERATURA

1. 3DGlobe. Povijest 3D printanja. Dostupno na: <https://www.3dglobe.net/povijest-3d-printanja> (pristupljeno 7. 9. 2025.)
2. All3DP. Stereolithography (SLA) 3D Printing – Simply Explained. Dostupno na: <https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
3. Croatian Makers (Paolo Zenzerović). Uvod u 3D printanje. Dostupno na: <https://izradi.croatianmakers.hr/lessons/uvod-u-3d-printanje/> (pristupljeno 5. 9. 2025.)
4. Sinterit. 3D printing process step by step. Dostupno na: <https://sinterit.com/3d-printing-guide/3d-printing-process/3d-printing-process-step-by-step/> (pristupljeno 3. 9. 2025.)
5. 3D Printing Geek. Tinkercad Overview. Dostupno na: <https://3dprintinggeek.com/tinkercad-overview/> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
6. Additive-X. 3D printing workflow – the 5 steps explained. Dostupno na: <https://www.additive-x.com/blog/3d-printing-workflow-the-5-steps-explained> (pristupljeno 1. 9. 2025.)
7. Instructables (vanceg). The 3D Printing Process. Dostupno na: <https://www.instructables.com/The-3D-Printing-Process> (pristupljeno 2. 9. 2025.)
8. Printer3D.hr. Povrat ulaganja u svijetu 3D printanja. Dostupno na: <https://printer3d.hr/novosti/povrat-ulaganja-u-svijetu-3d-printanja/> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
9. ISO/ASTM. ISO/ASTM 52900:2021 – Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2021.
10. Formlabs. Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing. Dostupno na: <https://formlabs.com/eu/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/> (pristupljeno 4. 9. 2025.)
11. Formlabs. Form 2 – Professional 3D Printer. Dostupno na: <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).

12. Kingsun Machining. What is SLA 3D Printing? Dostupno na: <https://kingsunmachining.com/hr/blog/what-is-sla-3d-printing/> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
13. All3DP. PolyJet 3D Printing – The Ultimate Guide. Dostupno na: <https://all3dp.com/2/polyjet-3d-printing-technologies-simply-explained/> (pristupljeno 6. 9. 2025.)
14. Stratasys. PolyJet Technology – Guide to 3D Printing. Dostupno na: <https://www.stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/polyjet-technology/> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
15. All3DP. Best PolyJet 3D Printing Services. Dostupno na: <https://all3dp.com/1/best-polyjet-3d-printing-services/> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
16. Formlabs. Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing. Dostupno na: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/> (pristupljeno 30. 8. 2025.)
17. CDG. 3D Systems SLS 300 Plus – 3D Printer. Dostupno na: <https://cdg.uk.com/product/3dsystems-sls-300-plus-3d-printer/> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
18. Insta3DP. SLS 3D Printing – The Ultimate Guide. Dostupno na: <http://hr.insta3dp.com/info/sls-3d-printing-the-ultimate-guide-facfox-79277625.html> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
19. Xometry. Laminated Object Manufacturing. Dostupno na: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/laminated-object-manufacturing/> (pristupljeno 1. 9. 2025.)
20. 3Way. Tehnologije 3D printanja. Dostupno na: <https://www.3way.hr/tehnologije-3d-printanja/> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
21. RapidDirect. Top 6 Industries Use 3D Printing. Dostupno na: <https://www.rapiddirect.com/blog/what-industries-use-3d-printing/> (pristupljeno 28. 8. 2025.)
22. Top3DShop. Fused Deposition Modeling – All You Need To Know About FDM 3D Printing Technology. Dostupno na: <https://top3dshop.com/blog/fused-deposition->

- [modeling-all-you-need-to-know-about-fdm-3d-printing-technology](#) (pristupljeno 5. 9. 2025.)
23. Azurefilm. FDM printanje – što je to FDM? Dostupno na: <https://azurefilm.com/hr/2023/10/28/fdm-printanje-sto-je-to-fdm/> (pristupljeno 6. 9. 2025.)
24. Prototalk UK. An Overview Of The Fused Deposition Modelling Process. Dostupno na: <https://prototalkuk.com/blog/fused-deposition-modelling-process/> (pristupljeno 2. 9. 2025.)
25. CoPrint3D. 3D Printing Technologies Comparison: FDM, SLA, SLS and DMLS. Dostupno na: <https://coprint3d.com/blogs/guides/3d-printing-technologies-comparison-fdm-sla-sls-and-dmls> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
26. Protosfera. Fused Deposition Modeling (FDM) – revolucionarna tehnologija 3D printa. Dostupno na: <https://protosfera.hr/fused-deposition-modeling-fdm-revolucionarna-tehnologija-3d-printa/> (pristupljeno 3. 9. 2025.)
27. 3DsPro. The Ultimate 3D Printing Filament Guide for Your FDM Project. Dostupno na: <https://3dspro.com/resources/blog/the-ultimate-3d-printing-filament-guide-for-your-fdm-project> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
28. Xometry: ABS 3D Printing Filament, s Interneta, <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/abs-3d-printing-filament/> (pristupljeno 24. 9. 2025.)
29. Simplify3D. ABS Material Guide. Dostupno na: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/abs/> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
30. Printer3D.hr: PLA Filament, s Interneta, <https://printer3d.hr/edukacija-i-podrska/filamenti-i-smole/pla-filament/> (pristupljeno 24. 9. 2025.)
31. 3Dnatives. PLA 3D Printing Guide. Dostupno na: <https://www.3dnatives.com/en/pla-3d-printing-guide-190820194/> pristupljeno: 16. 9. 2025.).
32. Sculpteo: Polyamide (PA) – Structure, Properties and 3D Printing Applications, s Interneta, <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/3d-printing-materials-guide/polyamide-pa-structure-properties-and-3d-printing-applications/> (pristupljeno 24. 9. 2025.)

33. AlmightyFila. Nylon PA6 Filament. Dostupno na: <https://almightyfila.com/product/nylon-pa6-filament/> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
34. NinjaTek: PETG – 3D Printing Material Guide, s Interneta, <https://ninjatek.com/learn/3d-printing-materials/petg/> (pristupljeno 24. 9. 2025.)
35. Obico. 3D Printing PETG Filament. Dostupno na: <https://www.obico.io/blog/3d-printing-petg-filament/> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
36. Ultimaker. What are flexible filaments and which one should you choose? Dostupno na: <https://ultimaker.com/learn/what-are-flexible-filaments-and-which-one-should-you-choose/> (pristupljeno 7. 9. 2025.)
37. Markforged: Your TPU 3D Printing Questions Answered, s Interneta, <https://markforged.com/resources/blog/your-tpu-3d-printing-questions-answered> (pristupljeno 24. 9. 2025.)
38. Recyclable TPU Shoes 3D Printed by Peak & Wanhua. Dostupno na: <https://3dprinting.com/news/recyclable-tpu-shoes-3d-printed-by-peak-wanhua/> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
39. All3DP: Soft PLA vs TPU – Flexible Filaments Compared, s Interneta, <https://all3dp.com/2/soft-pla-flexible-pla-vs-tpu/> (pristupljeno 24. 9. 2025.)
40. Airwolf3D. 3D Printing with Soft PLA – Tips and Tricks. Dostupno na: <https://airwolf3d.com/2015/12/19/3d-printing-with-soft-pla-tips-and-tricks/> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
41. TriMech: Ultimate Guide to Flexible 3D Printer Filament, s Interneta, <https://mfg.trimech.com/ultimate-guide-to-flexible-3d-printer-filament/> (pristupljeno 24. 9. 2025.)
42. Sybridge. HP 3D High Reusability TPA. Dostupno na: <https://sybridge.com/hp-3d-high-reusability-tpa/> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
43. JuggerBot3D: TPC Filament Review, s Interneta, <https://juggerbot3d.com/tpc-filament-review/> (pristupljeno 24. 9. 2025.)
44. Elastomer Partner. What is TPC – Thermoplastic Polyester Copolymers. Dostupno na: <https://elastomer-partner.com/collections/what-is-tpc-thermoplastic-polyester-copolymers> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).

45. Ruzova, T. A.; Haddadi, B.: „Surface roughness and its measurement methods – Analytical review“, Results in Surfaces and Interfaces, Elsevier, 2025.
46. Runje, B.: Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja. FSB – Katedra za mjerenje i kontrolu, Zagreb, 2014.
47. Nujić, A.: Diplomski rad. Fakultet strojarstva, računarstva i elektrotehnike, Mostar, 2022.
48. All3DP: Original Prusa i3 MK3S Review: Best 3D Printer Specs. Dostupno na: <https://all3dp.com/1/original-prusa-i3-mk3s-review-3d-printer-specs/> (pristupljeno: 15. 9. 2025.).
49. SimplyPrint. Prusa i3 MK3 Compatibility Guide. Dostupno na: <https://simplyprint.io/compatibility/prusa-i3-mk3> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
50. Fillamentum: Flexfill TPU 92A – Flexible Filament. Dostupno na: <https://fillamentum.com/collections/flexfill-tpu-flexible-filament/flexfill-tpu-92a> (pristupljeno: 15. 9. 2025.).
51. Mitutoyo. Surftest SJ-310 – Portable Surface Roughness Tester. Dostupno na: <https://www.mitutoyo.co.id/id-en/product/detail/surfest-sj-310-series> (pristupljeno: 16. 9. 2025.).
52. 3DPrintaj. Fillamentum Flexfill TPU 92A – fleksibilni filament. Dostupno na: <https://www.3dprintaj.com/sirok-izbor-opreme-za-3d-print/fillamentum-flexfill-tpu-92a/> (pristupljeno: 16. 9. 2025.)

Popis oznaka i kratica

3D	trodimenzionalno
ABS	akrilonitril–butadien–stiren
CAD	engl. Computer-Aided Design
FDM	engl. Fused Deposition Modeling
ISO	engl. International Organization for Standardization
LOM	engl. Laminated Object Manufacturing
PA	poliamid
PETG	polietilen-tereftalat modificiran glikolom
PLA	polilaktična kiselina
Ra	srednje aritmetičko odstupanje profila
Rq	srednje kvadratno odstupanje profila
Rz	maksimalna visina profila
SLA	engl. Stereolithography
SLS	engl. Selective Laser Sintering
TPA	termoplastični poliamidi
TPC	termoplastični kopoliester
TPU	termoplastični poliuretan
TPE	termoplastični elastomer
UV	ultraljubičasto zračenje