

Utjecaj naknadne obrade 3D ispisanih proizvoda na rasteznu čvrstoću i površinsku hrapavost

Pavlović, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:235:733532>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Pavlović

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Godec

Student:

Luka Pavlović

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Damiru Godecu na pruženoj pomoći i savjetima tijekom pisanja ovog rada. Također zahvaljujem prof. dr. sc. Ani Pilipović i prof. dr. sc. Gorani Baršić na provedenim ispitivanjima. Zahvaljujem i gospodinu Matiji Galekoviću na mogućnosti korištenja njegovog osobnog 3D pisaača.

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji i djevojci koji su bili uz mene, pomagali mi i podržavali me na svakom koraku ovog puta. Bez vas ne bi bio ovdje gdje sam sada!

Naposljetku, želim zahvaliti Onome koji mi je podario snagu, hrabrost i talente s kojima sam uspio prebroditi sve prepreke i sretno doći do cilja.

Luka Pavlović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-04/21-6/1	
Ur. broj: 15-1703-21	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LUKA PAVLOVIĆ**

Mat. br.: 0035202501

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj naknadne obrade 3D ispisanih proizvoda na rasteznu čvrstoću i površinsku hrapavost**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of 3D printed part post-processing on tensile strength and surface roughness**

Opis zadatka:

Postupci 3D ispisa (eng. 3D printing) sve se više primjenjuju za izradu konačnih proizvoda, pa se stoga od 3D ispisanih dijelova zahtijevaju uporabna svojstva koja će udovoljiti zahtjevima primjene. Postupak nanošenja rastaljenog filameta u slojevima (eng. Fused Filament Fabrication - FFF) jedan je od najčešće primjenjivanih postupaka 3D ispisa zbog jednostavnosti opreme i široke palete raspoloživih materijala. Međutim, postupak rezultira proizvodima loše površinske hrapavosti zbog stepeničastog učinka, kao i nešto nižih mehaničkih svojstava u usporedbi s dijelovima načinjenim klasičnim tehnologijama (primjerice injekcijskim prešanjem). Jedan od postupaka naknadne obrade FFF dijelova nakon ispisa u cilju povišenja mehaničkih i površinskih svojstava je toplinska obrada u peći s primjenom soli kao medija. Postupak je relativno nov i nedovoljno istražen, posebice sa stajališta utjecaja pojedinih parametara tog procesa na postignute rezultate.

U radu je stoga potrebno obraditi sljedeće:


1. Dati literaturni pregled o ispitivanjima rastezne čvrstoće i hrapavosti FFF dijelova.
2. Dati literaturni pregled o postupcima toplinske obrade za povišenje mehaničkih svojstava.
3. Na ispitnim tijelima načinjenim FFF postupkom od materijala PLA i PET-G provesti analizu utjecaja temperature na postignutu rasteznu čvrstoću i hrapavost površine.
4. Rezultate dobivene u točki 3. usporediti s rezultatima dobivenim ispitivanjem ispitnih tijela koja nisu bila podvrgnuta naknadnoj obradi.
5. Izvući odgovarajuće zaključke i smjernice za daljnje istraživanje na tom području.


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

Zadatak zadan:
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:
2. prosinca 2021.

Predviđeni datum obrane:
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao: 
prof. dr. sc. Damir Godec

Predsjednica Povjerenstva: 
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. FFF (engl. Fused filament fabrication).....	2
3. ANALIZA RASTEZNE ČVRSTOĆE I HRAPAVOSTI FFF DIJELOVA.....	7
3.1. Materijali korišteni u izradi FFF tehnologijom.....	7
3.2. Analiza rastezne čvrstoće FFF dijelova	8
3.3. Analiza površinske hrapavosti FFF dijelova.....	16
4. POSTUPCI TOPLINSKE OBRADNE ZA POVIŠENJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA .	22
4.1. DSC test	23
4.2. Mehanička svojstva žarenih ispitnih tijela	25
4.3. Ostali primjeri postupaka toplinske obrade	27
5. EKSPERIMENTALNI DIO	33
5.1. Korištena oprema	33
5.2. Način provođenja eksperimenata	37
5.3. Analiza rezultata žarenja	41
5.3.1. Analiza deformacija epruveta	41
5.3.2. Analiza ispitivanja rastezne čvrstoće	51
5.3.3. Analiza ispitivanja hrapavosti	62
6. ZAKLJUČAK.....	68
LITERATURA.....	70

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Sustav ekstrudiranja filamena [2].....	3
Slika 2.2. Slike M.C. Eschera [4]	4
Slika 2.3. STL datoteke kocke i kugle [3]	4
Slika 2.4. Konstrukcija FFF pisaa [1]	5
Slika 2.5. Greške prilikom ispisa FFF tehnologijom [5]	6
Slika 3.1. Skupine parametara koji utječu na mehanička svojstva [6]	9
Slika 3.2. Razmak između rastera na jednom sloju izratka [6]	10
Slika 3.3. Poprečni presjek izratka s vidljivim rasterima [6].....	11
Slika 3.4. Shema konture i rastera [6]	11
Slika 3.5. Orijentacije ispisa epruveta [9].....	12
Slika 3.6. Dimenzije epruvete za rastezno ispitivanje čvrstoće [9]	13
Slika 3.7. Stroj za ispitivanje rastezne čvrstoće [9].....	14
Slika 3.8. Dijagram naprežanje – istežanje [9].....	15
Slika 3.9. Dijagrami rastezne čvrstoće i naprežanja [9]	15
Slika 3.10. Raspored naprežanja epruveta različite orijentacije [9]	16
Slika 3.11. Ispitno tijelo za ispitivanje površinske hrapavosti [10].....	18
Slika 3.12. Uređaj za mjerenje površinske hrapavosti [10].....	18
Slika 3.13. Načelo rada AFM mjernog uređaja [12]	19
Slika 3.14. Lennard Jones krivulja potencijala [12]	20
Slika 3.15. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti gornje površine ispitnog tijela [10].....	20
Slika 3.16. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti bočne površine ispitnog tijela [10].....	20
Slika 4.1. DSC toplinski tok kroz ispitno tijelo HTPLA [14]	23
Slika 4.2. DSC test nakon žarenja [14].....	24
Slika 4.3. Ispitna tijela prije (a) i nakon žarenja (b) [14].....	25
Slika 4.4. Modul elastičnosti ispitnih tijela [14].....	26
Slika 4.5. Rastezna čvrstoća ispitnih tijela [14].....	27
Slika 4.6. Površina ne žarenog (a) i žarenog ispitnog tijela (b) [14]	27
Slika 4.7. Različiti oblici infila [16]	28
Slika 4.8. Dimenzijske promjene u smjeru osi x [16]	29
Slika 4.9. Dimenzijske promjene u smjeru osi y [16]	29
Slika 4.10. Dimenzijske promjene u smjeru osi z [16].....	29
Slika 4.11. Deformacije ispitnog tijela od Al-ASA nakon žarenja [16].....	30

Slika 4.12. Dijagrami rastezne čvrstoće za ispitane materijale [16].....	30
Slika 4.13. Ne žarena (a) i žarena ispitna tijela PLA [16].....	31
Slika 4.14. Ne žarena (a) i žarena ispitna tijela ABS-a	31
Slika 4.15. Postupak žarenja u soli [17]	32
Slika 5.1. Creality Ender 3 PRO pislač.....	33
Slika 5.2. Epruvete za ispitivanje rastezne čvrstoće	34
Slika 5.3. Dimenzije korištenih epruveta za ispitivanje rastezne čvrstoće	34
Slika 5.4. Posuda za sol	35
Slika 5.5. Sol korištena u eksperimentima	35
Slika 5.6. Mlinac za kavu korišten za dodatno usitnjavanje soli.....	36
Slika 5.7. Termometar za kontrolu temperature epruveta u soli	36
Slika 5.8. Razbijanje grudica soli pomoću sita.....	37
Slika 5.9. Raspored epruveta u posudi za žarenje	38
Slika 5.10. Položaj posude u neugrijanoj pećnici	38
Slika 5.11. Postavljanje temperature žarenja.....	39
Slika 5.12. Postavljanje opcije grijanja s ventilatorom	39
Slika 5.13. Otapanje viška soli s površine epruveta	40
Slika 5.14. Epruvete žarene na 100°C	42
Slika 5.15. Mjehurići na površini epruvete od PETG.....	42
Slika 5.16. Epruvete žarene na 110°C	43
Slika 5.17. Epruvete žarene na 120°C	44
Slika 5.18. Epruvete žarene na 130°C	45
Slika 5.19. Epruvete žarene na 140°C	46
Slika 5.20. Epruvete žarene na 150°C	47
Slika 5.21. Epruvete žarene na 160°C	48
Slika 5.22. Epruvete žarene na 170°C	49
Slika 5.23. Epruvete od PLA (lijevo) i PETG (desno) na kidalici	51
Slika 5.24. Lom referentne epruvete od PLA	52
Slika 5.25. Lom referentnih epruveta od PETG	52
Slika 5.26. Lom epruveta od PLA žarenih pri 100°C (lijevo) i 110°C (desno).....	53
Slika 5.27. Lom epruveta od PLA žarenih pri 120°C (lijevo) i 130°C (desno).....	53
Slika 5.28. Lom epruveta od PLA žarenih pri 140°C (lijevo) i 150°C (desno).....	54
Slika 5.29. Lom epruveta od PLA žarenih pri 160°C (lijevo) i 170°C (desno).....	54
Slika 5.30. Lom epruveta od PETG žarenih pri 100°C (lijevo) i 110°C (desno).....	56

Slika 5.31. Lom epruveta od PETG pri 120°C (lijevo) i 130°C (desno)	56
Slika 5.32. Lom epruveta od PETG žarenih pri 140°C (lijevo) i 150°C (desno).....	57
Slika 5.33 Lom epruveta od PETG žarenih pri 160°C (lijevo) i 170°C (desno).....	57
Slika 5.34. Dijagram naprezanje – istežanje za PLA (srednje vrijednosti)	60
Slika 5.35. Dijagram naprezanje – istežanje za PETG (srednje vrijednosti).....	61
Slika 5.36. Perthometer S8P	62
Slika 5.37. Mjerenje hrapavosti epruveta od PLA (lijevo) i PETG (desno).....	63
Slika 5.38. Prikaz parametra hrapavosti R_a	63
Slika 5.39. Prikaz parametara hrapavosti R_z , R_p i R_v	63
Slika 5.40. Dijagrami hrapavosti za PETG.....	66
Slika 5.41. Dijagrami hrapavosti za PLA	66

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva materijala za FFF ispis [7]	8
Tablica 2. Utjecaj parametara izrade na mehaničke karakteristike izratka [8]	9
Tablica 3. Parametri izrade ispitnog tijela za ispitivanje hrapavosti [10]	17
Tablica 4. Izmjerene vrijednosti površinske hrapavosti [10]	21
Tablica 5. Parametri izrade i žarenja ispitnih tijela [16]	28
Tablica 6. Dimenzijske promjene žarenih epruveta za PLA	50
Tablica 7. Dimenzijske promjene žarenih epruveta za PETG.....	50
Tablica 8. Srednje vrijednosti istezanja za epruvete od PLA.....	55
Tablica 9. Srednje vrijednosti istezanja za epruvete od PETG	58
Tablica 10. Srednje vrijednosti naprezanja i sila za epruvete od PLA.....	59
Tablica 11. Srednje vrijednosti naprezanja i sila za epruvete od PETG	60
Tablica 12. Perthometer S8P mjeriteljske značajke	62
Tablica 13. Rezultati mjerenja hrapavosti za PLA.....	64
Tablica 14. Rezultati mjerenja hrapavosti za PETG	65

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
θ	°	kut između osi x i rastera
R	mm	radijus vrha skenirajuće sonde
α	°	kut vrha skenirajuće sonde
T_g	°C	temperatura staklišta
T_m	°C	temperatura tališta
R_a	µm	srednje aritmetičko odstupanje profila
R_z	µm	srednja visina neravnina
R_p	µm	maksimalna visina vrha profila
R_y	µm	maksimalna visina profila

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
3D	3 – dimenzionalno (trodimenzionalno)
3DP	<i>3D Printing</i> – 3D ispis (vrsta aditivnih tehnologija)
ABS	Akrilonitril/butadien/stiren
AFM	<i>Atomic force microscope</i> – mikroskop atomske sile
ASA	Akrilonitril/stiren/akrilat
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – računalom potpomognuto oblikovanje
DIC	<i>Digital Image Correlation</i> – korelacija digitalnih slika
DKD	<i>Deutscher Kalibrierdienst</i> – njemački servis za kalibraciju
DLP	<i>Digital Light Processing</i> – očvršćivanje digitalnim svjetlosnim signalom
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i> – taljenje snopom elektrona
EFM	<i>Electrical force microscope</i> – mikroskop elektrostatične sile
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> – taložno očvršćivanje
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
HIPS	Polistiren visoke žilavosti
HTPLA	<i>High Temperature poly(lactic acid)</i> – visoko-temperaturni polilaktid
ISO	<i>International organization for standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju
LFM	<i>Lateral force microscope</i> – mikroskop lateralne sile
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i> – proizvodnja laminiranih objekata
PC	Polikarbonat
PETG	Poli(etilen-tereftalat), modificiran glikolom
PLA	Polilaktid
PP	Polipropilen
PVA	Polivinilni alkohol
RH	Republika Hrvatska
SEM	<i>Scanning tunneling microscope</i> – skenirajući tunelirajući mikroskop
SLA	<i>Stereolithography</i> – stereolitografija
SLM	<i>Selective Laser Melting</i> – selektivno lasersko taljenje
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> – selektivno lasersko srašćivanje
SThM	<i>Scanning thermal microscope</i> – skenirajući termalni mikroskop
STL	<i>Standard Tessellation Language</i> – vrsta datoteke
UV	<i>Ultraviolet</i> – ultraljubičasto

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu analiziran je utjecaj toplinske obrade žarenjem u soli na deformacije, rasteznu čvrstoću i hrapavost 3D ispisanih ispitnih tijela od PLA i PETG. Rad započinje uvodom, nakon kojega je opisana FFF tehnologija koja je korištena za ispis ispitnih tijela. Zatim je dan literaturni pregled ispitivanja rastezne čvrstoće i hrapavosti dijelova ispisanih FFF tehnologijom u kojemu su opisana načela ispitivanja navedenih mehaničkih svojstava. U sljedećem poglavlju opisani su postupci toplinske obrade za poboljšanje mehaničkih svojstava te njihov utjecaj na 3D ispisane dijelove ovisno o korištenim materijalima. Eksperimentalni dio rada sastoji se od opisa opreme korištene u eksperimentima, kao i samog provođenja eksperimenata, nakon čega su analizirani rezultati žarenja na više različitih temperatura.

Ključne riječi: FFF, žarenje u soli, rastezna čvrstoća, hrapavost

SUMMARY

In this thesis the influence of thermal processing by the means of annealing in salt on deformations, tensile strength and roughness of 3D printed PLA and PETG parts is analyzed. The thesis begins with an introduction, after which FFF technology, which was used for printing test parts, is described. After that, a literature review of tensile strength and surface roughness testing of FFF printed parts is given. In the next chapter, various heat treatment processes for enhancing the mechanical properties are described, along with their influence on 3D printed parts depending on the material used. The experimental part of this thesis consists of the description of equipment used in experiments, along with the way said experiments were conducted, after which the results of annealing at various temperatures are analyzed.

Key words: FFF, annealing in salt, tensile strength, roughness

1. UVOD

Aditivne tehnologije relativno su nove tehnologije u odnosu na ostale koje su se koristile tijekom ljudske povijesti. Za razliku od suptraktivne proizvodnje pri kojoj se materijal odvaja od sirovca, aditivne tehnologije temelje se na dodavanju materijala sloj po sloj do izrade potpunog, funkcionalnog objekta. Njihova upotreba započinje 1987. godine razvojem SLA (Stereolitografija) tehnologije od strane tvrtke 3D Systems. SLA za izradu objekta koristi fotoosjetljivu smolu kao materijal koji se očvršćuje sloj po sloj pomoću UV svjetlosti. Nakon izuma SLA pojavili su se brojni drugi postupci aditivne tehnologije među kojima su: DLP, PolyJet, SLS, SLM, 3DP, EBM, LOM i FDM. Svaki od njih ima svoje prednosti i nedostatke te nalazi primjenu u izradi objekata različite namjene.

Od svih postupaka aditivne proizvodnje posebno se ističe FDM (engl. *Fused deposition modeling*) koji se temelji na taloženju rastopljenog materijala (najčešće polimera) kroz ugrišanu mlaznicu te slojevitim stvaranjem željenog objekta. Taj postupak, ili točnije FFF (engl. *Fused filament fabrication*) postupak korišten je u izradi epruveta za rastezno ispitivanje čvrstoće u ovom radu tako da će kao takav biti detaljnije objašnjen u sljedećem poglavlju.

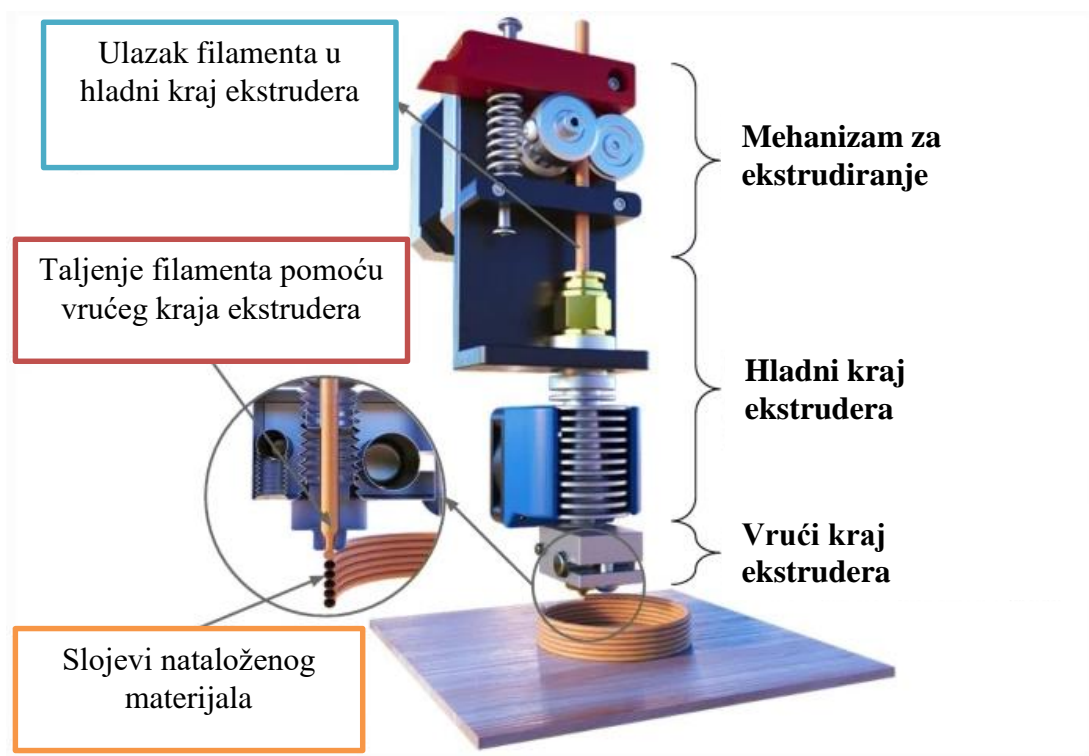
Usprkos brojnim prednostima FFF tehnologije pred ostalim tehnologijama (cijena, praktičnost, itd.), jedan od njenih glavnih nedostataka su lošija mehanička svojstva izradaka prouzročena taljenjem pri visokim temperaturama i relativno brzim hlađenjem. Zbog toga se sve više razvijaju novi načini poboljšavanja svojstava gotovih izradaka, točnije dodatna obrada u svrhu poboljšanja mehaničkih svojstava kao što su tvrdoća, čvrstoća, površinska hrapavost, itd. U tu svrhu se fokus sve više okreće prema postupcima žarenja kao učinkovitoj i lakoj za provođenje metodi poboljšavanja mehaničkih svojstava izradaka. U eksperimentalnom dijelu ovog rada biti će analizirana upravo jedna vrsta žarenja – žarenje u soli.

2. FFF (engl. Fused filament fabrication)

FDM i FFF tehnologije najčešće su korištene komercijalne aditivne tehnologije današnjice zbog omjera cijene i kvalitete izratka [1]. Relativno su jeftine te podržavaju mogućnost izrade objekata s pomoću većeg broja materijala od kojih su najčešći: PLA, ABS, ASA i PETG. Upravo zbog tih pozitivnih karakteristika FDM i FFF tehnologije sve se češće, uz industrijsku i eksperimentalnu primjenu, koriste i u kućanstvima gdje nalaze primjenu u izradi svakodnevnih predmeta (čaše, posudice, raznovrsni držači i slično) ili ukrasa isključivo estetske prirode.

FDM i FFF tehnologije u svojoj suštini funkcioniraju vrlo slično, odnosno za izradu objekata koriste slična načela. Štoviše, način rada im je identičan, a razlikuju se u tome što je FDM tehnologija patentirana od strane tvrtke Stratasys te, za razliku od FFF tehnologije, ima grijanu komoru za ispis. Prilikom kupovine FFF tehnologije često je potrebno (za ispis određenih materijala) zasebno kupiti i grijanu komoru koja ne dolazi uz pisac upravo zbog patenta od strane Stratasys-a [1].

Postupak izrade željenog objekta funkcionira tako, da se filament od materijala za izradu objekta tali te ekstrudira kroz zagrijanu mlaznicu na radnu površinu na kojoj se, sloj po sloj, stvara željeni objekt [1]. Filament se uvlači s pomoću zupčanika čija brzina regulira brzinu ekstrudiranja materijala kroz mlaznicu, koja može uvelike utjecati na kvalitetu izratka (obično vrijedi pravilo, veća brzina = niža kvaliteta i veća mogućnost nastajanja grešaka). Na sljedećoj slici [Slika 2.1.] zorno je prikazan sustav za ekstrudiranje filameta kod FFF tehnologije.



Slika 2.1. Sustav ekstrudiranja filameta [2]

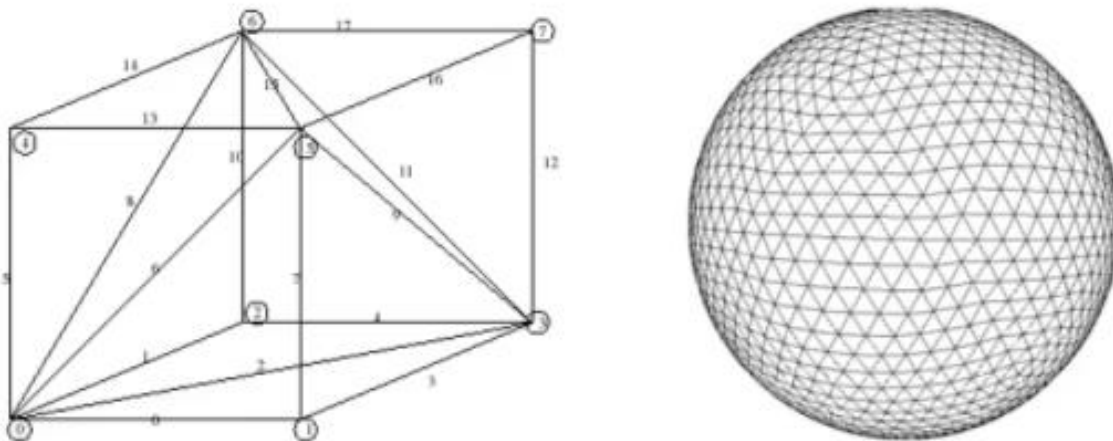
Kao što se može primijetiti na prikazanoj slici, sustav za ekstrudiranje sastoji se od ekstruzijskog mehanizma te hladnog i vrućeg dijela ekstrudera. Ekstruzijski mehanizam sastoji se od dva zupčanika koji provlače filament kroz ekstruder i koji moraju osigurati brzinu zadanu parametrima izrade te ne smiju ni na koji način oštetiti ili deformirati filament [2]. Hladni dio ekstrudera služi kao svojevrsna toplinska zaštita ostatka mehanizma od vrućeg dijela ekstrudera koji pak tali filament i tako omogućuje samu izradu objekta.

Prije izrade samog objekta prvo je potrebno u CAD programu izraditi 3D model tog objekta te ga spremi kao STL datoteku. STL (engl. *Standard Tessellation Language*) datoteka u svojoj suštini služi kao posrednik između CAD alata i samog 3D pisača. Naime, 3D pisač nema mogućnost interpretacije i u konačnici ispisivanja 3D modela u njihovom originalnom formatu (npr. .prt, .sldprt, .catpart, .ipt) već je modele potrebno preformatirati u STL datoteku (.stl) koju pisač može interpretirati. Sama riječ tessellation (grubi prijevod – teselacija) predstavlja proces opisivanja površine objekta s pomoću više jednostavnih ili kompleksnih oblika na način da nema preklapanja tih oblika niti bilo kakvih praznina između njih [3]. Dobar primjer teselacije vidljiv je u slikama slikara M.C. Eschera [Slika 2.2.], gdje je svaka slika zapravo površina prekrivena raznim oblicima koji variraju u veličini i kompleksnosti.



Slika 2.2. Slike M.C. Eschera [4]

Ono što se može primijetiti na slikama je to, da su oblici korišteni u pojedinoj slici međusobno slični. Tako se u STL datotekama 3D model opisuje s pomoću skupine trokuta. Točnije, površina modela se aproksimira s pomoću trokuta, tako da konačni 3D model u STL datoteci izgleda kao poligonalni objekt čija rezolucija ovisi o broju i rasporedu trokuta [3]. Na sljedećoj slici [Slika 2.3.] može se vidjeti primjer kako izgledaju jednostavni modeli kocke i kugle u STL datoteci.



Slika 2.3. STL datoteke kocke i kugle [3]

Može se primijetiti da za opisivanje jednostavnijih oblika kao što je kocka, treba manje trokuta nego za opisivanje kompleksnijih oblika. 3D pisac pri interpretiranju STL datoteke očitava lokacije vrhova svakog pojedinog trokuta i smjerove normala na njihovu površinu [3].

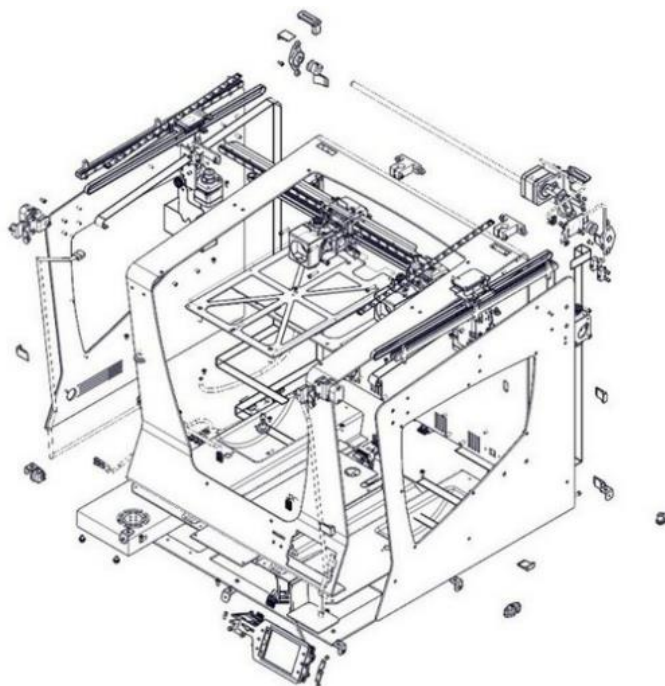
Nakon pretvorbe modela u STL datoteku, tu istu datoteku potrebno je ubaciti u tzv. „*Slicer*“ program. *Slicer* programi služe za postavljanje parametara izrade kao što su: temperatura mlaznice, temperatura podloge za ispis, rezolucija ispisa, dodavanje potporne strukture i *rafta*,

pozicija izratka na radnoj površini itd. *Slicer* također, nakon unosa željenih parametara, automatski „reže“ (engl. *Slice*) 3D model u slojeve kao pripremu za ispis i prikazuje stvaran broj slojeva (engl. *Layer*) potrebnih za izradu gotovog objekta.

Nakon što se datoteka spremi u formatu *slicera*, pisač može početi s izrađivanjem izratka. Sam proces izrade sastoji se od zagrijavanja mlaznice i radne površine na odgovarajuću temperaturu te ekstrudiranja rastaljenog filamenta kroz mlaznicu na radnu površinu. Mlaznica sa cijelim sustavom za ekstrudiranje kontrolirana je s pomoću motora koji joj omogućuju kretanju u smjerovima x i y osi, dok se radna površina kreće u smjeru osi z i regulira razmak između izratka i vrha mlaznice. Kada se prvi sloj ispiše na radnu površinu, ona se pomakne po osi z u smjeru od mlaznice za visinu sljedećeg sloja te se proces ponavlja do izrade gotovog objekta [1].

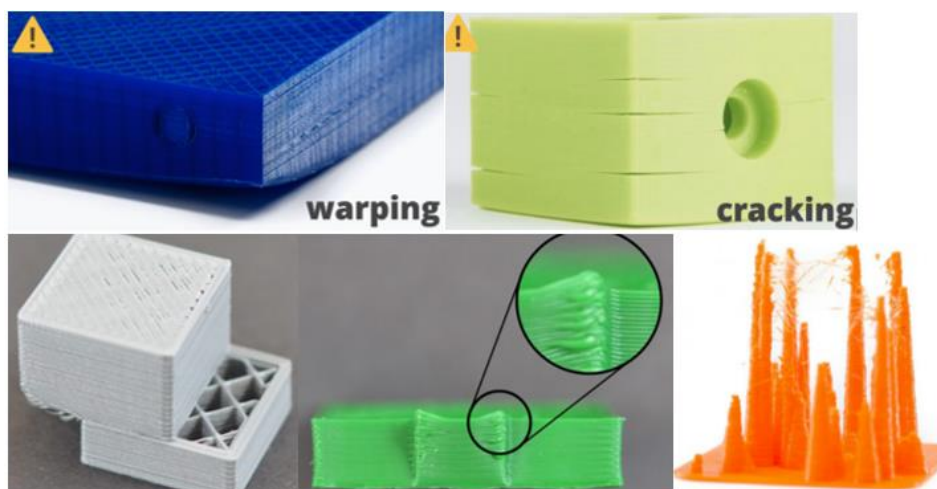
Konstrukcija FFF i FDM pisača [Slika 2.4.] može varirati zbog različitih modela pisača, no svi pisači uvijek sadrže sljedeće dijelove:

1. sustav koji kontrolira kretanje mehaničkih dijelova
2. ekstruder
3. radnu površinu
4. električne i elektroničke komponente
5. pomoćne elemente (okvir pisača, elemente za niveliranje radne površine, itd.) [1].



Slika 2.4. Konstrukcija FFF pisača [1]

FFF i FDM pisači imaju mnogo prednosti, kao što su cijena, veličina, raznovrsnost materijala, jednostavnost korištenja, omjer kvalitete i cijene, itd., no ne smiju se zanemariti njihovi nedostaci. S obzirom na relativno nisku cijenu, objekti izrađeni FFF tehnologijom mogu varirati u kvaliteti izrade. Ovisno o parametrima izrade i o svojstvima samog pisača mogu nastati neke od sljedećih grešaka [Slika 2.5.]: savijanje pri dnu izratka (engl. *Warping*), pucanje/odvajanje slojeva (engl. *Cracking/Delamination*), pomak slojeva (engl. *Layer shifting*), pregrijavanje mlaznice (engl. *Overheating*), mlaznica ostavlja niti po izratku zbog kapanja materijala (engl. *Stringing*), i ostale greške [5].



Slika 2.5. Greške prilikom ispisa FFF tehnologijom [5]

Međutim, uz navedene greške koje su većinom rezultat greške pri postavljanju parametara izrade ili konstrukcije samog pisača, najveći problem predstavljaju mehaničke karakteristike izradaka. Naime, uslijed taljenja kod samog procesa ispisivanja i hlađenja na radnoj površini, zbog malih zračnosti između pojedinih slojeva pogoršavaju se mehanička svojstva materijala. Materijal, odnosno izradak od određenog materijala nakon ispisa ima lošija svojstva (čvrstoću i površinsku hrapavost) od neobrađenog materijala u obliku filameta što stvara problem prilikom njihova svakodnevnog korištenja.

U ovom radu naglasak je stavljen na ispitivanjima rastezne čvrstoće i hrapavost dijelova izrađenih FFF tehnologijom, dok će ostala mehanička svojstva biti zanemarena.

3. ANALIZA RASTEZNE ČVRSTOĆE I HRAPAVOSTI FFF DIJELOVA

Kao što je naglašeno u prošlom poglavlju, jedan od glavnih nedostataka FFF tehnologije su upravo lošije mehaničke karakteristike ispisanih dijelova u odnosu na neobrađeni materijal (filament) od kojeg su izrađene. Točnije, pogoršavaju se rastezna čvrstoća (zbog slojevite prirode izratka i unutarnjih svojstava materijala) i površinska hrapavost (zbog stepeničastog učinka i kvalitete izrade) [6]. U ovom poglavlju biti će analizirana svojstva najčešće korištenih materijala za izradu dijelova FFF tehnologijom kao i utjecaji pojedinih parametara proizvodnje na ta svojstva s posebnim naglaskom na rasteznu čvrstoću i hrapavost.

3.1. Materijali korišteni u izradi FFF tehnologijom

Iako je moguće koristiti metalne materijale ili pak kompozite za izradu objekata FFF tehnologijom, većinski udio korištenih materijala za tu tehnologiju čine polimerni materijali ili točnije plastomeri. Neki od korištenih plastomera su:

1. ABS (akrilonitril/butadien/stiren)
2. PLA (polilaktid)
3. HIPS ili PS-HI (polistiren visoke žilavosti)
4. PETG (poli(etilen-tereftalat), modificiran glikolom)
5. Poliamid (Naylon)
6. ASA (akrilonitril/stiren/akrilat)
7. PC (polikarbonat)
8. PP (polipropilen)
9. PVA (polivinilni alkohol)[7].

Svaki materijal ima svoje prednosti i mane i niti jedan nije univerzalno primjenjiv. Zbog toga je potrebno analizirati problem i pažljivo odabrati materijal koji odgovara danoj problematici. Ne treba naglašavati da krivo odabrani materijal može imati niz negativnih posljedica, kako sa strane novčanih gubitaka tako i sa strane ugrožavanja sigurnosti čovjeka. Svaki materijal je također potrebno ispisivati na drugačiji način, odnosno svaki materijal ima svoje karakteristične parametre za ispis [6]. U sljedećoj tablici [Tablica 1.] prikazana su osnovna fizikalna svojstva gore navedenih materijala te preporuke vezane uz podešavanje parametara za njihov ispis.

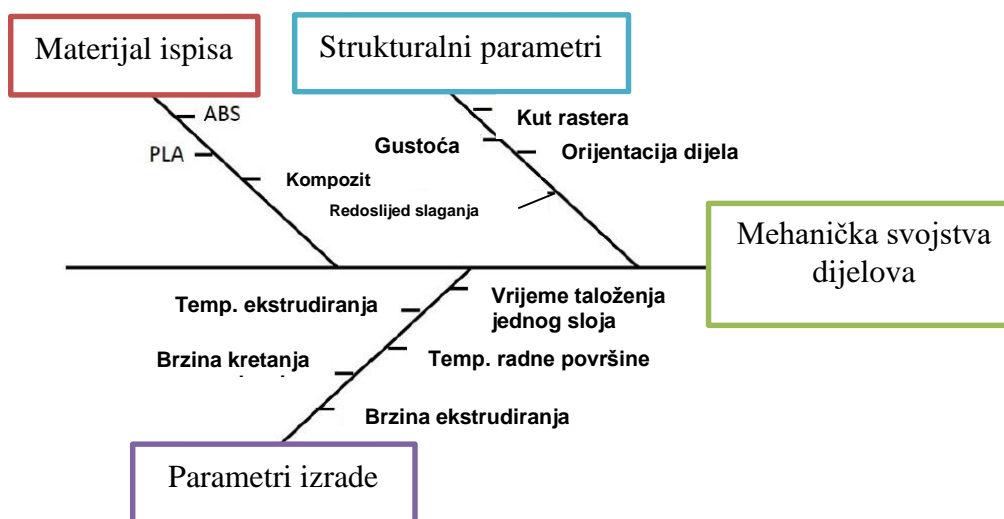
Tablica 1. Svojstva materijala za FFF ispis [7]

	ABS	PLA	HIPS	PETG	Poliamid	ASA	PC	PP	PVA
Maksimalna temperatura korištenja	98	52	100	73	80-95	95	121	100	75
Koeficijent linearnog toplinskog širenja [$\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$]	90	68	80	60	95	98	69	150	85
Gustoća [g/cm^3]	1,04	1,24	1,04	1,23	1,06-1,14	1,07	1,2	0,9	1,23
Cijena [\$]	10-40	10-40	24-32	20-60	25-65	38-40	40-75	60-120	40-110
Temperatura ekstrudera [$^\circ\text{C}$]	220-250	190-220	230-245	230-250	220-270	235-255	260-310	220-250	185-200
Temperatura radne površine [$^\circ\text{C}$]	95-110	45-60	100-115	75-90	70-90	90-110	80-120	85-100	45-60
Topivost u vodi	NE	NE	DA	NE	NE	NE	NE	NE	DA

Vrijednosti navedene u tablici samo su primjer materijala od jednog dobavljača i svojstva materijala mogu blago varirati ovisno o proizvođaču. Svojstva materijala također mogu blago varirati ovisno o boji filamenta (primjer će biti prikazan u eksperimentalnom dijelu ovog rada). Kao što se može primijetiti, u tablici nisu navedene rastezna čvrstoća i površinska hrapavost, dvije glavne karakteristike kojima se ovaj rad bavi. To je zbog toga što na te karakteristike utječe mnogo različitih parametara koji će biti istraženi u nastavku ovog poglavlja.

3.2. Analiza rastezne čvrstoće FFF dijelova

Na mehanička svojstva utječe mnogo parametara koji se mogu podijeliti u 3 glavne skupine: svojstva samog materijala koji se ispisuje, parametri izrade i strukturalni parametri koji se odnose na strukturu samog izratka [Slika 3.1.]. Svaki od njih, više ili manje, utječe na mehanička svojstva gotovog izratka [6].



Slika 3.1. Skupine parametara koji utječu na mehanička svojstva [6]

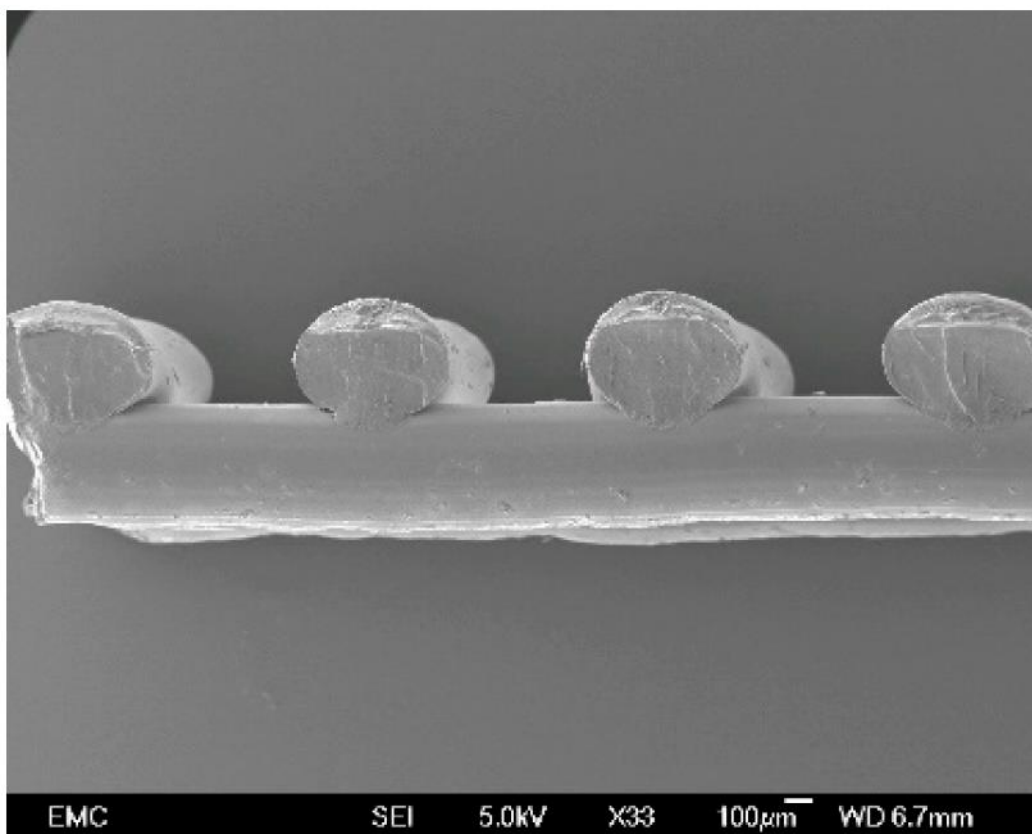
Neki od najznačajnijih parametara su temperatura ekstrudera, odnosno temperatura na kojoj se ispisuje materijal, orijentacija izratka na radnoj površini za ispis te visina slojeva pri ispisu [8]. U sljedećoj tablici [Tablica 2.] prikazan je utjecaj upravo tih parametara na iznos rastezne čvrstoće i modul elastičnosti.

Tablica 2. Utjecaj parametara izrade na mehaničke karakteristike izratka [8]

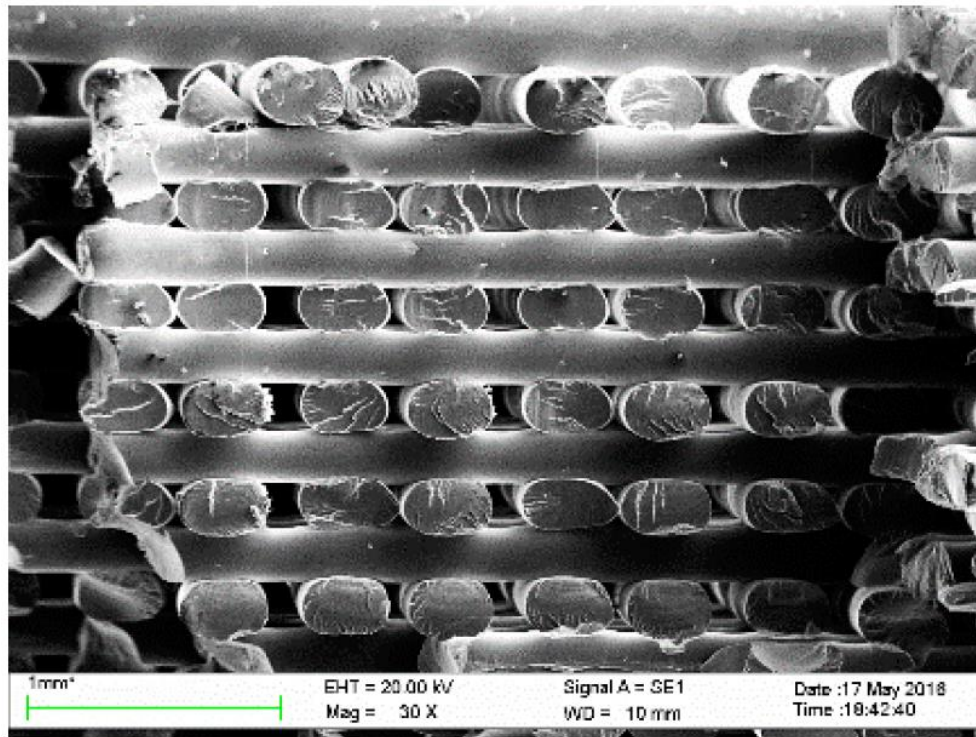
Materijal	Izmjerena svojstva
ABS	Rastezna čvrstoća: 15-38 MPa Modul elastičnosti: 1220-1430 MPa Orijehtacija od 0° do 90°
PC	Rastezna čvrstoća: 37 MPa Modul elastičnosti: 1000 MPa
PC (mješavina biomaterijala)	Rastezna čvrstoća: 35-65 MPa Modul elastičnosti: 2100 MPa Temperatura ekstrudiranja: 240-270 °C Orijehtacija od 0° do 90°
PC (mješavina fosilnih goriva)	Rastezna čvrstoća: 28-62 MPa Modul elastičnosti: 1300-1500 MPa Orijehtacija od 0° do 90°
PETG	Rastezna čvrstoća: 36-40 MPa Visina sloja: 0,05-0,14 mm Temperatura ekstrudera: 210-240 °C Modul elastičnosti: 4400 MPa
PLA	Rastezna čvrstoća: 28-56 MPa Modul elastičnosti: 2000 MPa Orijehtacija od 0° do 90°

Može se primijetiti (pogotovo u slučaju ABS-a) da ispis pri višim temperaturama uglavnom rezultira manjom rasteznom čvrstoćom izratka u odnosu na ispis pri nižim temperaturama. Također, orijentacija izratka na radnoj površini za ispis itekako ima utjecaj na rasteznu čvrstoću izratka jer različito orijentirani dijelovi imaju različito raspoređene slojeve koji svojim međusobnim položajem pozitivno ili negativno utječu na mehanička svojstva samog izratka. Na mehaničke karakteristike također utječe i način na koji je sam materijal proizveden. Primjerice, polikarbonat proizveden s pomoću fosilnih goriva ima nešto nižu rasteznu čvrstoću (62 MPa) i znatno niži modul elastičnosti (1500 MPa) od polikarbonata na bio-bazi kojem je maksimalna izmjerena rastezna čvrstoća 65 MPa, a modul elastičnosti 2100 MPa [8].

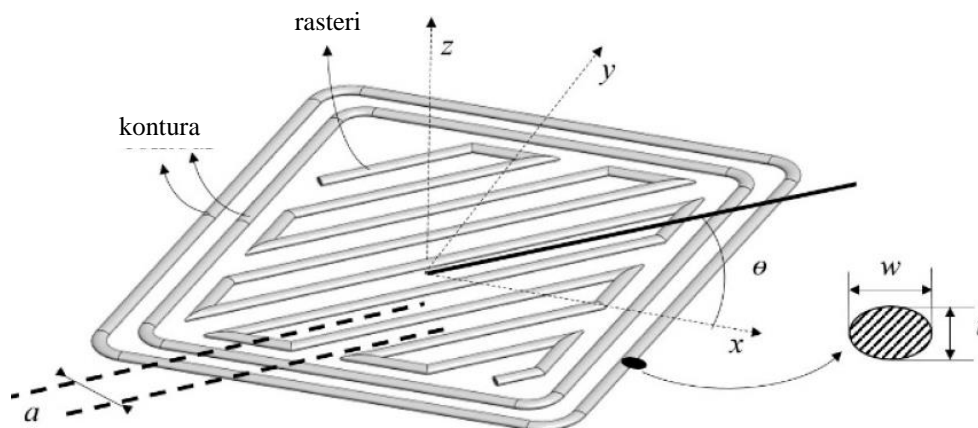
Još jedna od značajki koja itekako utječe na mehaničke karakteristike izratka je razmak između rastera [Slika 3.2. i Slika 3.3.], odnosno pojedinih linija koje ispunjavaju konturu [Slika 3.4.] profila koji se ispisuje (točnije, profila sloja koji se trenutno ispisuje) [6].



Slika 3.2. Razmak između rastera na jednom sloju izratka [6]



Slika 3.3. Poprečni presjek izratka s vidljivim rasterima [6]



Slika 3.4. Shema konture i rastera [6]

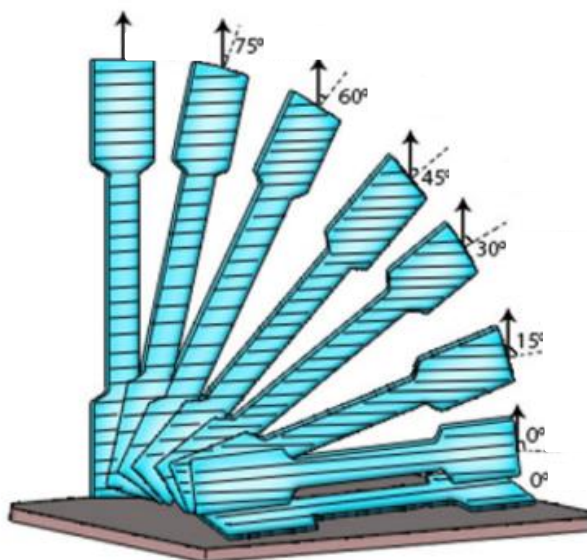
Na prethodnoj slici [Slika 3.4.] prikazana je razlika između konture i rastera te se također može vidjeti da oba imaju isti poprečni presjek. Orijentacija iz prethodne tablice [Tablica 2.] odnosi se upravo na orijentaciju rastera, odnosno na kut koji rasteri zatvaraju s pozitivnim dijelom osi x (na prethodnoj slici je taj kut označen sa grčkim slovom θ). Ako se pretpostavi da rastezna sila pri ispitivanju rastezne čvrstoće djeluje uzduž osi y , intuitivno je za zaključiti da će čvrstoća rasti i porastom kuta θ . Naime, kao što je vidljivo na slikama [Slika 3.2. i Slika 3.3.], iako se golim okom ne vidi, uvijek postoje mikrometarske zračnosti između rastera koje smanjuju čvrstoću svojim postojanjem. Zbog tih zračnosti je potrebno optimalno orijentirati model prilikom pripreme za ispis kako bi se što više umanjio negativan učinak zračnosti. Međutim,

usprkos svemu, dijelovi izrađeni FFF tehnologijom uvijek će imati anizotropna svojstva zbog same prirode ispisa i grešaka koje mogu nastati tijekom tog procesa [6].

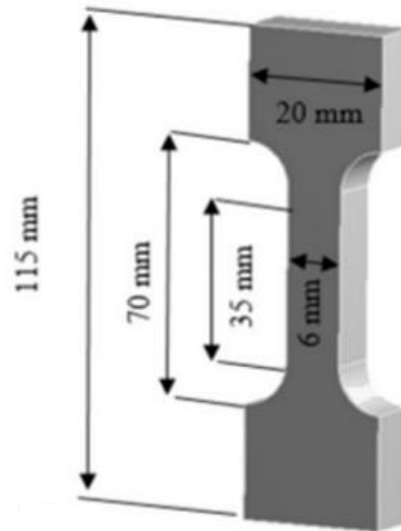
Treba uzeti u obzir da je prethodni primjer utjecaja sila na izradak obzirom na orijentaciju rastera bio dan na temelju analize jednog sloja. Gotov izradak sastoji se od mnogo slojeva i rasteri u dva susjedna sloja gotovo nikad nisu međusobno paralelni već se njihova međusobna pozicija određuje tijekom pripreme 3D modela za ispis u *slicer* programu s pomoću opcije uzorak *infil* (engl. *Infill pattern*). Također postoji opcija za određivanje postotka ispunjenosti geometrije gotovog dijela. Tu treba uzeti u obzir svrhu izrađenog objekta te tome prilagoditi ispunjenost objekta pa tako se za estetske objekte koristi što manja ispunjenost, dok se za dijelove izložene određenom opterećenju koristi ispunjenost koja će, uz što manju potrošnju materijala, imati odgovarajuću čvrstoću. Međutim, za izradu epruveta za ispitivanje rastezne čvrstoće isključivo se koristi 100% *infil*, kako bi se što više izbjegao utjecaj zračnosti na konačni rezultat i kako bi se što bolje simuliralo ispunjeno (engl. *Solid*) tijelo.

Primjer pripreme i ispitivanja epruveta na rasteznu čvrstoću od PLA biti će dan na ispitivanjima provedenim u znanstvenom članku u izvoru [9] u literaturi.

U navedenom članku izrađene su epruvete od PLA s postotkom ispunjenosti od 25%, 50%, 75% i 100%. Pri izradi su korištena četiri uzorka *infil*: kvadratni uzorak, trokutasti, koncentrični i giroidni. Epruvete su također izrađene pri različitim orijentacijama [Slika 3.5.], a njihove dimenzije prikazane su na slici [Slika 3.6.] [9].



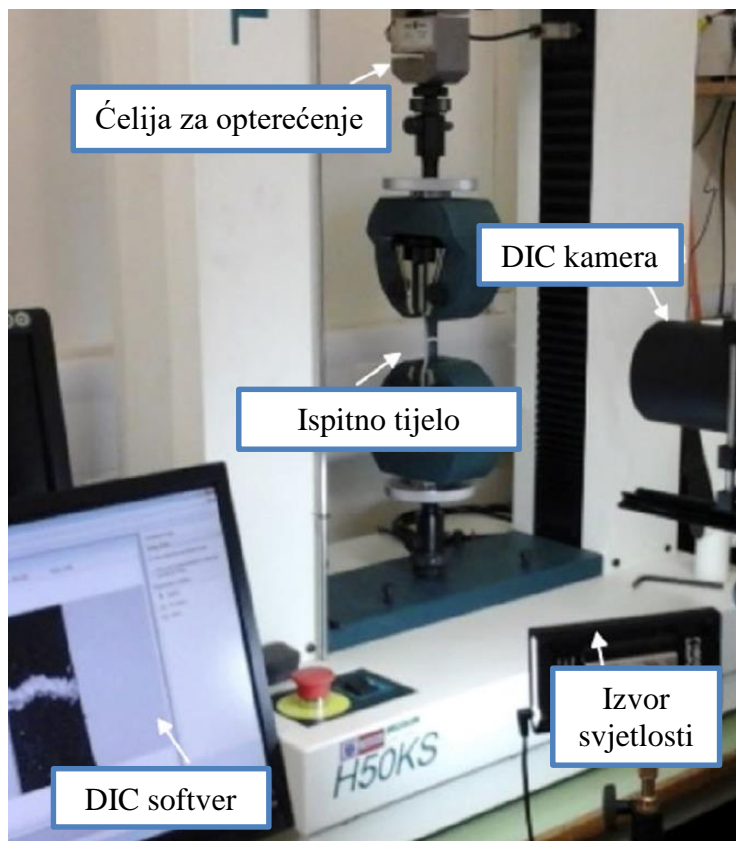
Slika 3.5. Orijentacije ispisa epruveta [9]



Slika 3.6. Dimenzije epruvete za rastezno ispitivanje čvrstoće [9]

Gustoća korištenog PLA filameta je $1,22 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, dok srednja gustoća izrađenih epruveta varira između 56% i 99% gustoće filameta (ovisno o ispunjenosti, odnosno o *infilu*). Što se tiče volumena same epruvete, oko 42% volumena čine stjenke epruvete, dok ostatak volumena odlazi na ispunu [9]. Prije ispitivanja epruveta, ispitana je i rastezna čvrstoća samog filameta koji je narezan na komade duljine 200 mm i poprečnog presjeka promjera 1,72 mm. Prije ispitivanja filameta ili epruveta, provedeno je sušenje istih na temperaturi od 50°C [9].

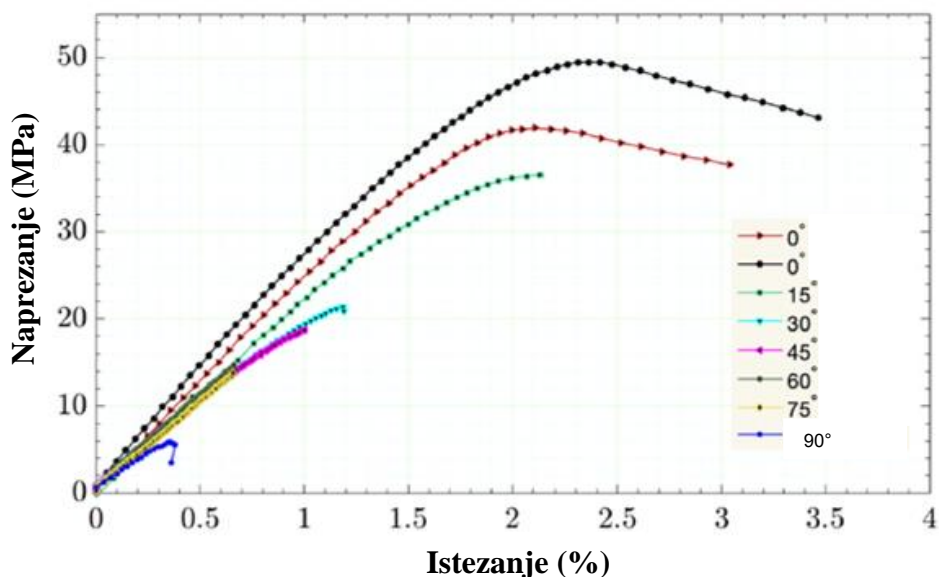
Za ispitivanje rastezne čvrstoće korišten je tzv. univerzalni ispitni stroj Tinius Olsen [Slika 3.7.], dok je za ispitivanje istežanja korištena DIC (engl. *Digital Image Correlation*) tehnologija [9].



Slika 3.7. Stroj za ispitivanje rastezne čvrstoće [9]

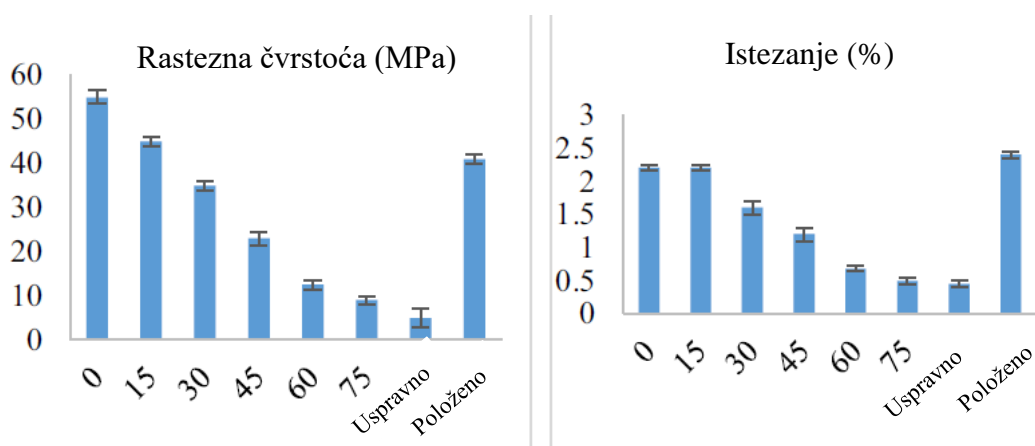
Na slici [Slika 3.7.] se vide svi elementi stroja za ispitivanje rastezne čvrstoće uključujući i dodatnu opremu kao što je DIC softver sa kamerom i osvjetljenjem. Sam proces ispitivanja rastezne čvrstoće sastoji se od postavljanja ispitnog tijela u čeljusti samog stroja, zvanog još i „kidalica“. Zatim se stroj uključi i počne koristiti postepeno rastuću vlačnu silu koja razvlači ispitno tijelo. Nakon što ispitno tijelo pukne, stroj staje i može se očitati sila pri kojoj je ono puklo.

S druge strane, DIC tehnika funkcionira tako da posebna kamera s rezolucijom od $5,5 \mu\text{m}/\text{pixel}$ snima dvije fotografije, jednu prije i jednu nakon deformacije epruvete tijekom ispitivanja, koje se onda uspoređuju. Kao pomoć pri preciznijem određivanju istezanja, dijelovi epruvete se oboje crnom i bijelom bojom tako da površina izgleda kao da je prekrivena malim mrljama (nalik na pixele). Također se koristi i izvor svjetla zbog jednoličnog osvjetljenja epruvete. Nakon što se epruveta deformira, slike se uspoređuju pomoću DIC softvera (djelomično vidljivog na prethodnoj slici [Slika 3.7.]) te se određuju istezanja [9]. Zatim softver pomoću interpolacije može iscrtati dijagram naprezanje – istezanje [Slika 3.8.] u kojem su vrijednosti za sve ispitane epruvete podijeljene po orijentaciji ispisivanja. Sve ispitane epruvete u ovom dijagramu ispisane su sa 100% ispunjenjem [9].



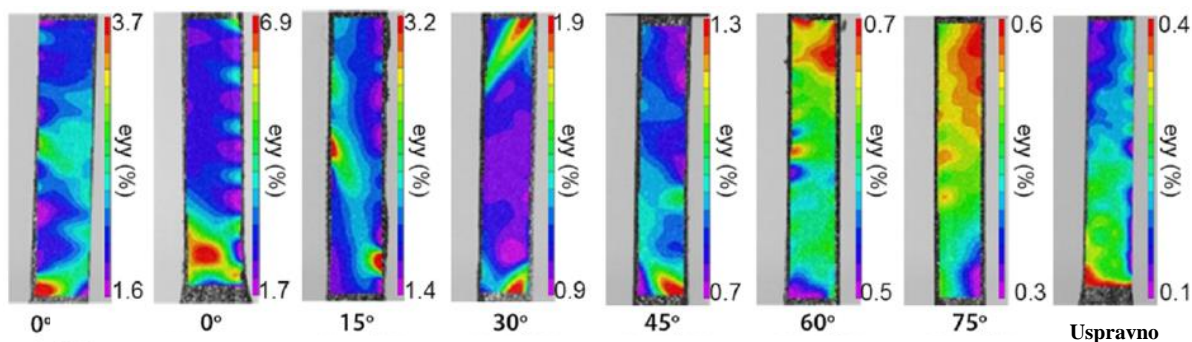
Slika 3.8. Dijagram naprezanje – istežanje [9]

Na dijagramu je vidljivo koliki utjecaj ima orijentacija epruvete prilikom ispisa na omjer naprežanja i istežanja, te je također vidljivo nakon kolikog produljenja je ispitno tijelo puklo. Može se primijetiti da je ispitno tijelo ispisano uspravno puklo pri minimalnom naprežanju i da se nije istegnulo ni približno koliko druga ispitna tijela. Razlog tome je položaj rastera koji je okomit na rasteznu silu (kut $\theta = 0$ na shemi konture i rastera [Slika 3.4.], ako sila djeluje uzduž osi y) što rezultira manjom rasteznom čvrstoćom [9]. Na sljedećim dijagramima [Slika 3.9.] prikazane su rastezna čvrstoća svih ispitanih tijela, kao i njihovo istežanje koji potvrđuju tvrdnju da ispis epruveta uspravno donosi najlošije rezultate.



Slika 3.9. Dijagrami rastezne čvrstoće i naprežanja [9]

Također, na narednim slikama vidljiva je distribucija naprežanja koja se dobije s pomoću, već objašnjenih, DIC kamere i softvera [Slika 3.10.]. Na slikama su prikazani rasporedi naprežanja za različite orijentacije ispisa epruveta [9].



Slika 3.10. Raspored naprezanja epruveta različite orijentacije [9]

3.3. Analiza površinske hrapavosti FFF dijelova

Prilikom rukovanja s dijelova izrađenim FFF ispisom može se već na dodir osjetiti hrapavost površine, za razliku od dijelova izrađenih na CNC stroju koji su vrlo glatki. Sama hrapavost FFF dijelova može se objasniti načinom njihove izrade. Naime, svi dijelovi izrađuju se slojevito, odnosno nanošenjem rastaljenog materijala sloj po sloj do izrade gotovog proizvoda [10]. Zbog toga se lako mogu osjetiti, pa čak i vidjeti golim okom, slojevi koji čine strukturu samog izratka.

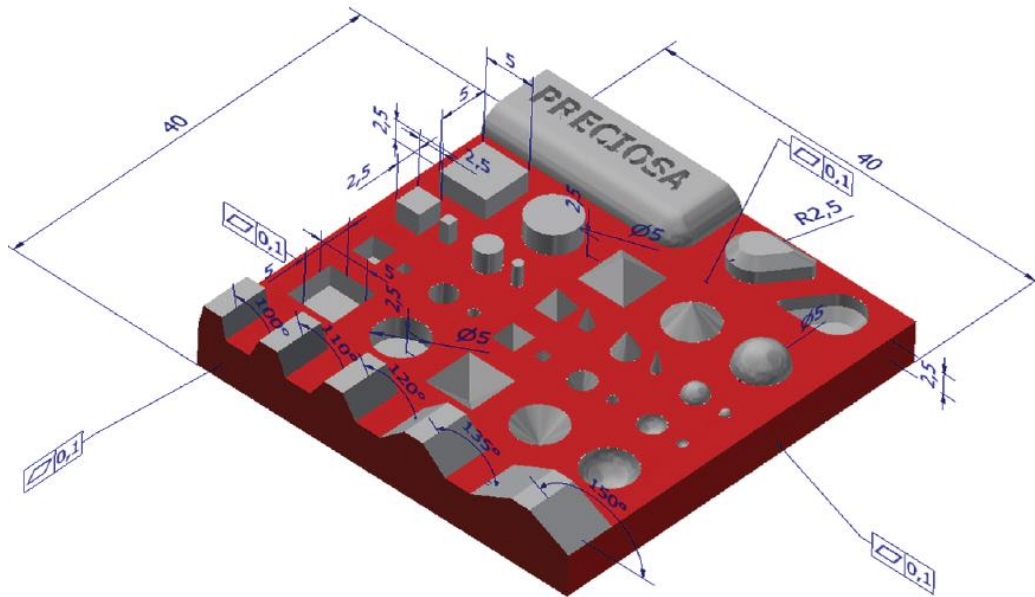
U nekim slučajevima je povećana hrapavost prednost (npr. medicinski implantati), dok je u drugima nedostatak koji može imati negativan utjecaj na trošenje, a s time na trajnost samog dijela [11]. Kod nekih materijala, kao što je ABS, hrapavost se može umanjiti, odnosno površina se može zagladiti s pomoću para acetona, no kod drugih materijala potrebna je naknadna obrada odvajanjem čestica ili u nekim slučajevima toplinska obrada. Međutim, na hrapavost se isto tako donekle može utjecati podešavanjem parametara proizvodnje dijela kao što su visina sloja, brzina ispisa, i drugih [10]. Potrebno je unaprijed odrediti funkciju koju će proizvedeni dio imati, kako bi se mogli podesiti parametri koji će rezultirati optimalnom hrapavošću ovisno o funkciji dijela.

Površinska hrapavost definira se kao kratkovalna nepravilnost površine koja je često posljedica proizvodnog procesa, a uzrokovana je metodom obrade [12]. U znanstvenom članku [10] izlistana je nekolicina znanstvenih radova koji su ispitivali površinska svojstva FFF dijelova i svi su došli do sličnog konačnog zaključka da su visina slojeva i orijentacija izratka na ploči za ispis, parametri koji najviše utječu na površinsku hrapavost [10]. Također su provedena površinska i dimenzijska ispitivanja na ispitnim tijelima s parametrima ispisa koji su bili podijeljeni u 3 stupnja prikazanim u sljedećoj tablici [Tablica 3.].

Tablica 3. Parametri izrade ispitnog tijela za ispitivanje hrapavosti [10]

Parametar	Stupanj 1	Stupanj 2	Stupanj 3	Mjerna jedinica
Debljina sloja	0,06	0,12	0,18	mm
Širina ekstrudirane linije	0,2	0,22	0,25	mm
Broj „zidova“ konture	3	4	6	-
Debljina gornjeg sloja	0,66	0,72	0,78	mm
Oblik gornjeg sloja	Linije	Koncentričan	Cik – cak	-
Postotak <i>infil</i> a	20	30	40	%
Oblik <i>infil</i> a	Trokutast	Rešetkast	Koncentričan	-
Brzina ispisa <i>infil</i> a	30	65	100	mm/s
Brzina ispisa konture	20	30	40	mm/s
Brzina ispisa gornjeg sloja	20	35	50	mm/s
Oblik potporne strukture	Koncentričan	Cik – cak	Linije	-
Orijentacija dijela	0	23	45	°

Ispisana su ispitna tijela od PLA, a parametri izrade odgovarali su jednom od tri stupnja prikazanih u prethodnoj tablici, dok su dimenzije ispitnog tijela prikazane na narednoj slici [Slika 3.11.].



Slika 3.11. Ispitno tijelo za ispitivanje površinske hrapavosti [10]

Ispitno tijelo namijenjeno je za ispitivanje površinske hrapavosti, koja se ispituje na površinama označenim crvenom bojom, i dimenzijskih promjena, koje se ispituju na osnovi promjene geometrije oblike označenih sivom bojom na tijelu. Za ispitivanje površinske hrapavosti korišten je mjerni uređaj sa skenirajućom sondom SV2000 čiji je vrh radijusa $R = 0,005$ mm i kuta $\alpha = 90^\circ$. Izvršeno je 5 mjerenja na gornjoj i 5 na bočnoj površini ispitnog tijela te je za prikaz rezultata mjerenja korišten softver *Surfpak*. Sam mjerni uređaj prikazan je na narednoj slici [Slika 3.12.] [10].

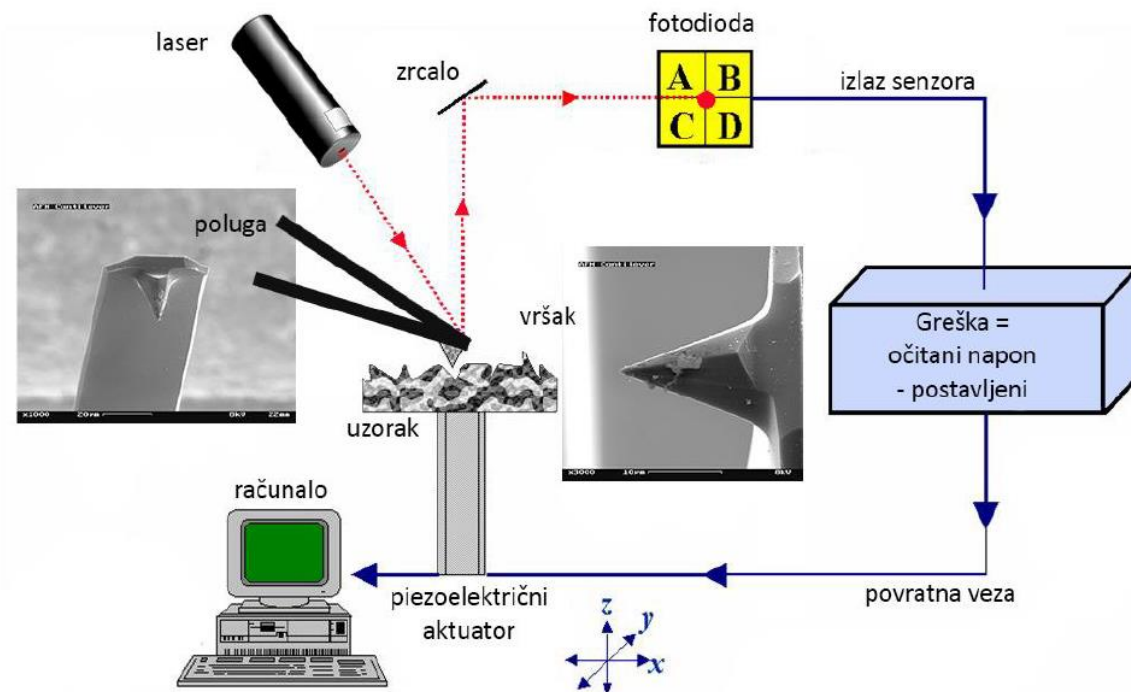


Slika 3.12. Uređaj za mjerenje površinske hrapavosti [10]

Uređaj za mjerenje SV2000 temelji se na AFM (engl. *Atomic force microscope*) tehnologiji mjerenja koja spada u skup mikroskopa sa skenirajućom sondom [12]. Skup mikroskopa sa skenirajućom sondom obuhvaća mjerne uređaje kao što su:

- SEM – skenirajući tunelirajući mikroskop (engl. *Scanning tunneling microscope*)
- AFM – mikroskop atomske sile (engl. *Atomic force microscope*)
- LFM – mikroskop lateralne sile (engl. *Lateral force microscope*)
- SThM – skenirajući termalni mikroskop (engl. *Scanning thermal microscope*)
- EFM – mikroskop elektrostatične sile (engl. *Electrical force microscope*) [12].

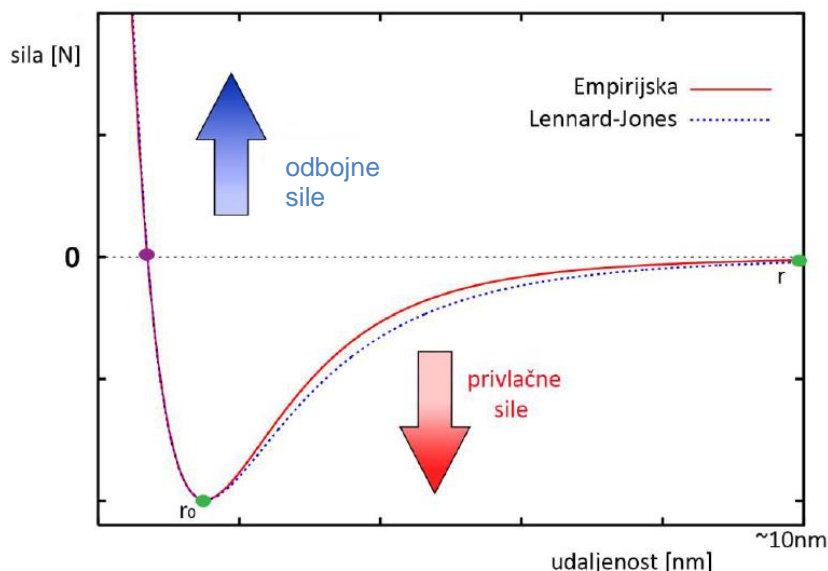
AFM mjerni uređaj, ili AFM mikroskop koristi se za mjerenje površinskih svojstava vodljivih i ne vodljivih površina što je pogodno za materijal ispitnog tijela koji je u ovom slučaju PLA. Uređaj mjeri silu koja djeluje između vrha sonde i ispitnog tijela, točnije jaku odbojnu silu koja se pojavljuje na malim udaljenostima kao rezultat preklopa elektronskih gustoća vrha sonde i ispitnog tijela i dugodosežnu Van der Waals-ovu silu. Uređaj se sastoji od fleksibilnog ticala s vrlo ostrim vrhom od silicija ili silicijevog-nitrita koje se nalazi na slobodnom kraju uređaja. Proces mjerenja prikazan je na narednoj slici [Slika 3.13.] [12].



Slika 3.13. Načelo rada AFM mjernog uređaja [12]

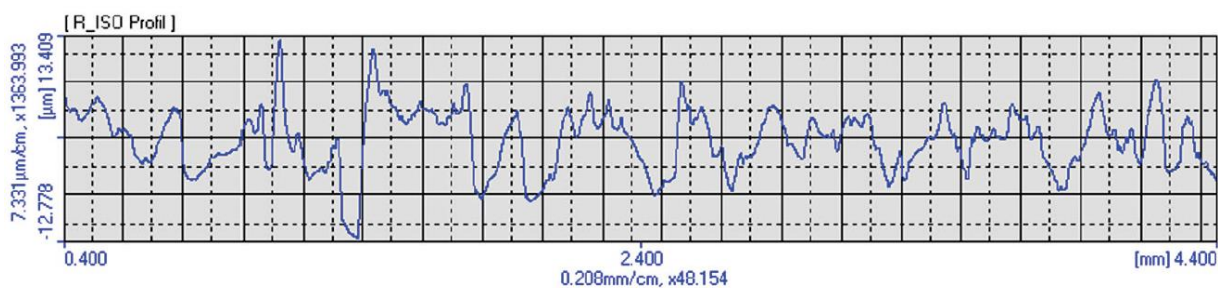
Krivulja po kojoj uređaj mjeri površinske karakteristike ispitnog tijela zove se Lennard Jones krivulja potencijala [Slika 3.14.], a prikazuje odnos udaljenosti sonde o silama koje djeluju

između nje i ispitne površine. Naime, što se sonda više približava kritičnoj točki koja je na krivulji označena s r_0 , na sondu djeluju sve jače i jače privlačne sile, no u trenutku kada prođe dotičnu točku, na nju počinju djelovati jake odbojne sile. Uređaj s pomoću tog odnosa može odrediti udaljenost sonde od površine te tako odrediti kolika je površinska hrapavost ispitnog tijela [12].

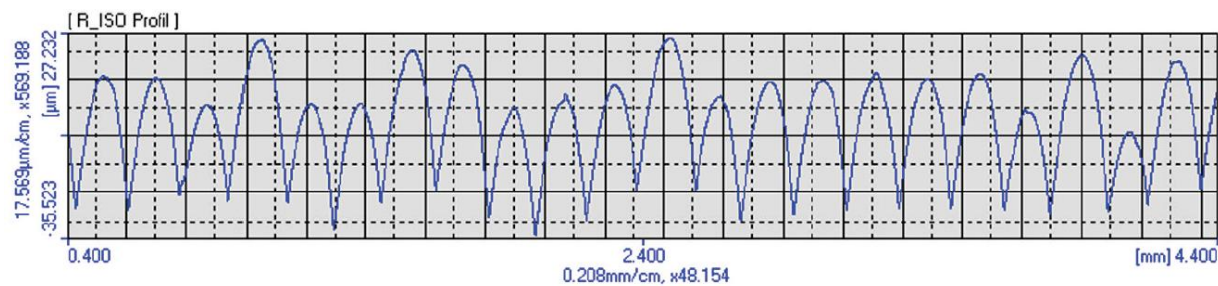


Slika 3.14. Lennard Jones krivulja potencijala [12]

Nakon što je uređaj izmjerio ispitnu površinu rezultati mjerenja prikazuju se s pomoću dijagrama [Slika 3.15. i Slika 3.16.].



Slika 3.15. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti gornje površine ispitnog tijela [10]



Slika 3.16. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti bočne površine ispitnog tijela [10]

Na slici koja prikazuje rezultate mjerenja gornje površine ispitnog tijela može se primijetiti da je površina nepravilnija u odnosu na sliku koja prikazuje rezultate mjerenja bočne površine. Razlog relativne pravilnosti krivulja bočne površine jest taj što one prikazuju slojeve koji su iste visine, dok je gornja površina nepravilna zbog grešaka u ispisivanju rastera zadnjeg (gornjeg) sloja [10].

Mijenjanjem parametara iz Tablica 3 i višestrukim mjerenjem površine ustanovljeni su sljedeći rezultati srednjeg aritmetičkog odstupanja R_a [Tablica 4.].

Tablica 4. Izmjerene vrijednosti površinske hrapavosti [10]

Izmjerene vrijednosti hrapavosti	Min.	Max.
Hrapavost gornjeg sloja $R_a/\mu\text{m}$	0,7	10,5
Hrapavost bočne površine $R_a/\mu\text{m}$	4,7	12,8

Kao što je već spomenuto, rezultati su dobiveni mijenjanjem različitih parametara obrade te je ustanovljeno da su parametri koji najviše utječu na površinsku hrapavost gornjeg sloja visina sloja, oblik gornjeg sloja i brzina ispisivanja gornjeg sloja, dok su parametri koji najviše utječu na površinsku hrapavost bočne površine visina sloja, brzina ispisivanja konture i orijentacija izratka na radnoj površini [10].

4. POSTUPCI TOPLINSKE OBRADJE ZA POVIŠENJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA

U prethodnom poglavlju ovog rada objašnjeni su najveći nedostaci dijelova izrađenih FFF tehnologijom (loša mehanička svojstva) te su bili predstavljeni neki od načina njihova poboljšavanja mijenjanjem parametara izrade. Veliku ulogu u poboljšanju mehaničkih svojstava imali su parametri kao što su visina sloja i orijentacija na radnoj površini koji se mogu podesiti u *Slicer* programu prije samog ispisa dijela. Međutim, mehanička svojstva također se mogu dodatno poboljšati naknadnom obradom, nakon samog ispisa, među kojima je najznačajniji proces žarenja.

Žarenje je proces toplinske obrade prilikom kojeg se obrađivanom dijelu mijenjaju mehanička, a ponekad i kemijska svojstva te mu se generalno povećava čvrstoća i smanjuje tvrdoća [13]. Proces žarenja sastoji se od 3 koraka:

1. Zagrijavanje na željenu temperaturu
2. Držanje na željenoj temperaturi
3. Sporo hlađenje do sobne temperature [13].

Prvi korak sastoji se od zagrijavanja peći na temperaturu žarenja, drugi se sastoji od održavanja obrađivanog dijela na temperaturi žarenja određeno razdoblje kako bi došlo do procesa rekristalizacije. dok se u trećem koraku ugasi peć i dio se polako hladi do sobne temperature. Sporo hlađenje vrlo je bitna stavka koja osigurava postojanost rekristalizirane strukture materijala od kojeg je dio izrađen [13].

Kod dijelova izrađenih FFF tehnologijom žarenje se predstavlja kao izuzetno korisna opcija za postizanje boljih mehaničkih svojstava, ili točnije čvrstoće. Naime, dijelovi ispisani FFF tehnologijom imaju lošija mehanička svojstva od dijelova izrađenih npr. injekcijskim prešanjem zbog postojanja pora, odnosno praznina između rastera zbog njihovog lošeg međusobnog povezivanja. Još jedan od razloga lošijih mehaničkih svojstava FFF dijelova je i činjenica da njihova struktura, nakon ispisa pri visokim temperaturama (viših od temperature tališta materijala koji se ispisuje), i nakon relativno brzog hlađenja, postaje amorfnu što loše utječe na čvrstoću izratka. Žarenjem se želi postići bolja povezanost između rastera izratka kao i rekristalizacija materijala od kojeg je napravljen [14].

Dijelovi koji se toplinski obrađuju žarenjem obavezno trebaju biti ispisani s infilom od 100% kako bi se izbjeglo urušavanje dijela samog u sebe prouzročeno toplinskim deformiranjem materijala. No prije samog žarenja potrebno je provjeriti dvije ključne temperature polimernog

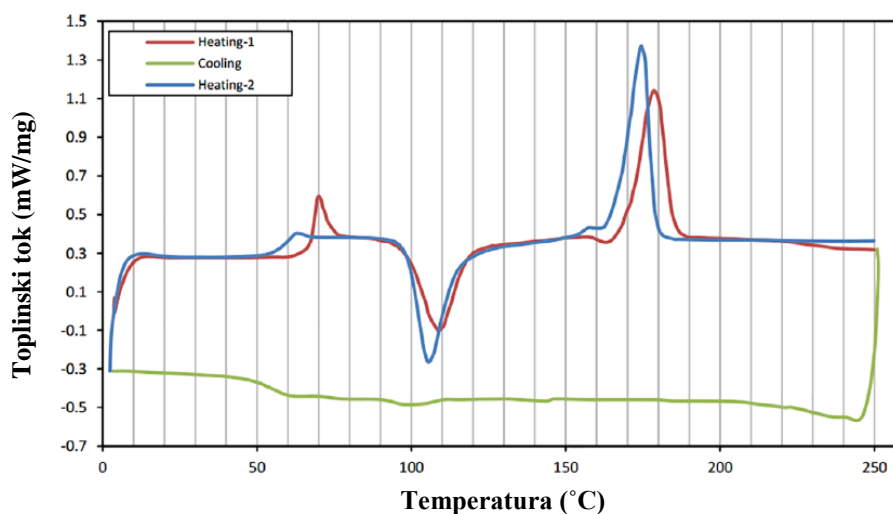
materijala kojeg se žari: T_g i T_m , gdje je T_g temperatura staklišta, a T_m temperatura tališta. Za najbolja moguća mehanička svojstva potrebno je dio koji se obrađuje postupkom žarenja, držati na temperaturi u intervalu između T_g i T_m . Naime, pri temperaturi iznad T_g započinje proces rekristalizacije koji se može odvijati sve do temperature T_m kada rekristalizacija više nije moguća [15].

Nakon 3D ispisa određenog polimernog materijala, kada se on nalazi na temperaturi ispod T_g , u njemu vlada amorfnost gdje su veze između polimera u neuređenom stanju. Iznad te temperature molekule se počinju pomicati (restrukturirati) u kristalasto stanje, gdje su veze između molekula u većem redu. Međutim, nakon T_m materijal se počinje taliti i materijal ponovno postaje amorfan [15].

Određivanje T_g i T_m provodi se s pomoću DSC testa, a u sljedećem primjeru prikazat će se provođenje DSC testa na HTPLA (engl. *High Temperature poly(lactic acid)*) filamentu provedenog u znanstvenom članku pod brojem [14] u literaturi.

4.1. DSC test

Kao što je navedeno, svrha DSC testa je određivanje temperature staklišta (T_g) i temperature tališta (T_m) određenog materijala (u ovom primjeru taj materijal je HTPLA) te eventualno određivanje najpogodnije temperature za rekristalizaciju prilikom žarenja. Najprije se ispitno tijelo zagrije od 0°C do 250°C te se pusti da se ohladi nazad na 0°C , a zatim se proces zagrijavanja ponovi još jednom, odnosno ispitno tijelo se ponovno zagrije od 0°C do 250°C . Tijekom cijelog procesa zagrijavanja, hlađenja i zatim ponovnog zagrijavanja mjeri se toplinski tok kroz ispitno tijelo te se crta dijagram odnosa toplinskog toka o temperaturi zagrijavanja [Slika 4.1.] [14].

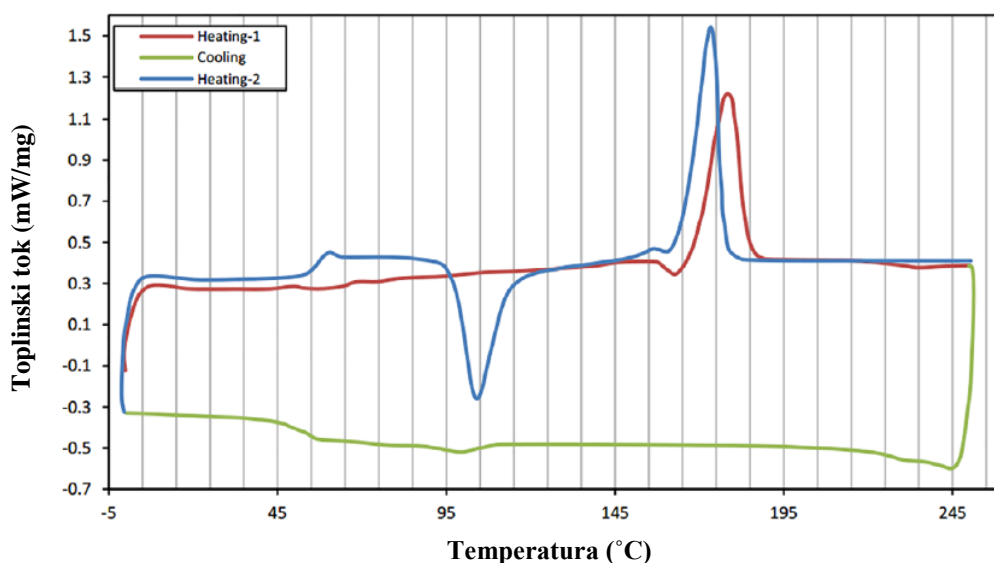


Slika 4.1. DSC toplinski tok kroz ispitno tijelo HTPLA [14]

Na dijagramu su uočljive po tri kritične točke za crvenu (prvo zagrijavanje) i plavu (drugo zagrijavanje) krivulju. Na crvenoj krivulji prvi uspon krivulje, tj. vrh prvog uspona predstavlja temperaturu staklišta HTPLA kojoj je očitana vrijednost od 67°C. Zatim se primjećuje ponor krivulje koji predstavlja područje rekristalizacije, a koje se zbiva u rasponu od 93°C do 126°C te se očitava kristalizacijska temperatura pri 107°C. Na kraju se primjećuje uspon krivulje u rasponu od 161°C do 192°C, a koji predstavlja približavanje i udaljšavanje od temperature tališta koja se očitava pri 178°C. Međutim, materijal je moguće ispisivati i pri temperaturama iznad temperature tališta i to čak do 250°C zbog toga što se degradacija HTPLA javlja tek iznad te temperature [14].

Ispitivanjima je ustanovljen postotak kristalizacije materijala od 14,28% na kraju prvog zagrijavanja. Na plavoj krivulji vidljivi su isti fenomeni uspona i ponora krivulje, ali s nešto drugačijim rezultatima. Ustanovljena je temperatura staklišta od 57°C dok je raspon rekristalizacije između 90°C i 122°C sa samom temperaturom kristalizacije od 103°C. Također, raspon uspona do i od temperature tališta promatra se između 161°C i 182°C dok je temperatura tališta određena kao 174°C. Također je ustanovljen postotak kristalizacije na kraju drugog zagrijavanja od 7,42%. Može se primijetiti da su sve temperature pomaknute nekoliko stupnjeva „unazad“ na krivulji, odnosno da je za postizanje svih karakterističnih temperatura (T_g i T_m) potrebno zagrijati materijal na nešto nižu temperaturu [14].

Iz dobivenih podataka prema temperaturama kristalizacije za prvo i drugo zagrijavanje određena je temperatura žarenja od 110°C te su ispitna tijela žarena pri toj temperaturi 1 sat, nakon čega su ponovno bila podvrgnuta DSC testu [Slika 4.2.] [14].



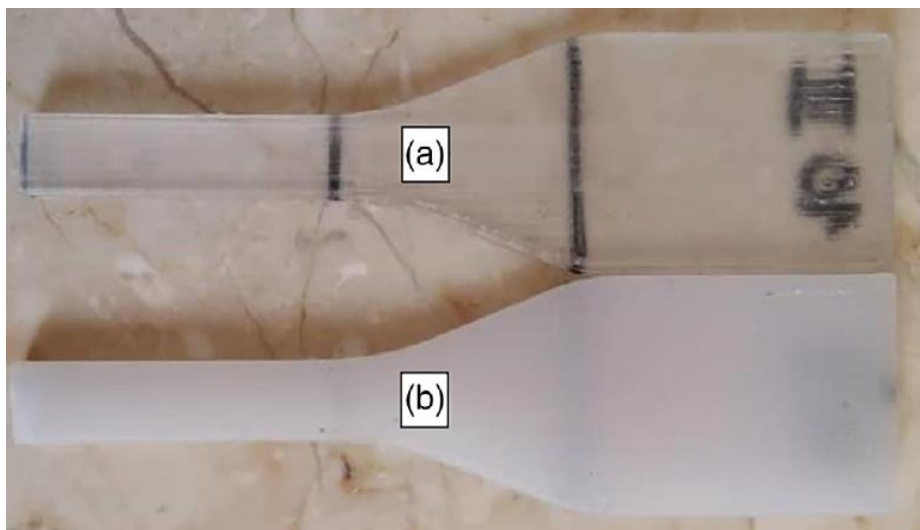
Slika 4.2. DSC test nakon žarenja [14]

Ponovno su izvršena dva zagrijavanja, predočena s pomoću crvene i plave krivulje u dijagramu, te hlađenje između njih (označeno zelenom linijom). Na crvenoj liniji se odmah može primijetiti jedna bitna razlika, a to je nedostatak izražene temperature kristalizacije, što se može atribuirati žarenju prije DSC testa. No temperature staklišta i tališta vidljive su te iznose $T_g = 67^\circ\text{C}$ i $T_m = 178^\circ\text{C}$ dok je interval uspona krivulje oko temperature tališta u rasponu od 162°C do 192°C što je, izuzev nedostatka temperature rekristalizacije, gotovo identično temperaturama nakon prvog zagrijavanja u slučaju ne žarenih ispitnih tijela. Nakon drugog zagrijavanja očitane su temperatura staklišta od 56°C , interval rekristalizacije između 90°C i 122°C s temperaturom kristalizacije od 104°C te temperatura tališta od 173°C na vrhu porasta krivulje koji počinje na temperaturi pri 161°C i završava pri 183°C [14].

Uobičajeno je da temperature staklišta i tališta već pišu u katalogu materijala tvrtke od koje se kupuje materijal, no DSC test predstavlja dobar način provjere toplinskih svojstava materijala kojega se želi ispisivati ili podvrgnuti toplinskoj obradi.

4.2. Mehanička svojstva žarenih ispitnih tijela

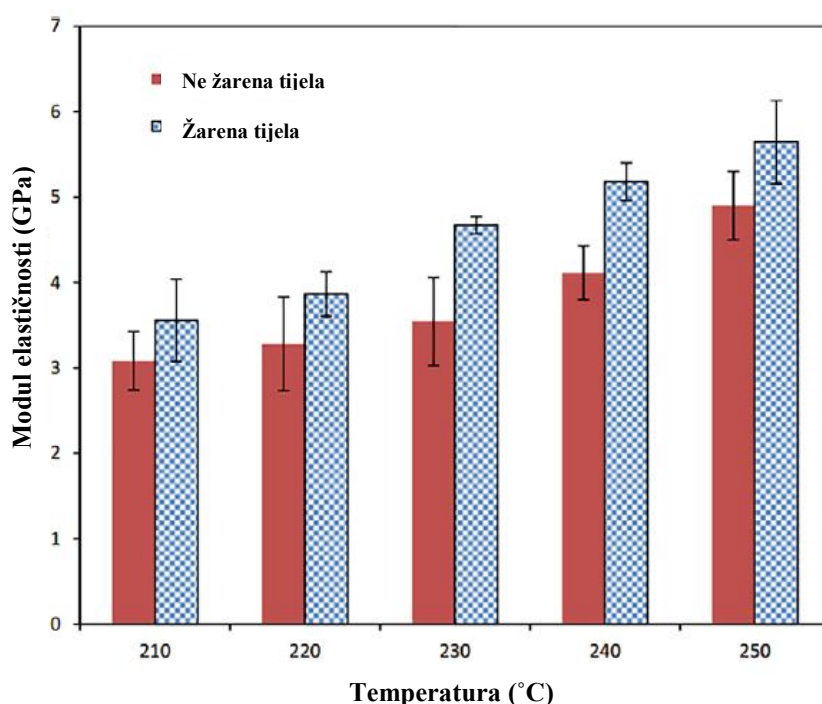
Nakon postupka žarenja koje je provedeno pri temperaturi od 110°C u razdoblju od 1h, neke promjene na ispitnim tijelima moguće je primijetiti već i golim okom, a to je promjena boje ispitnog tijela. Točnije, ispitna tijela, koja su nakon ispisivanja bila djelomično transparentna, poprimila su bijelu mat teksturu te im se s time izgubila transparentnost [Slika 4.3.] [14].



Slika 4.3. Ispitna tijela prije (a) i nakon žarenja (b) [14]

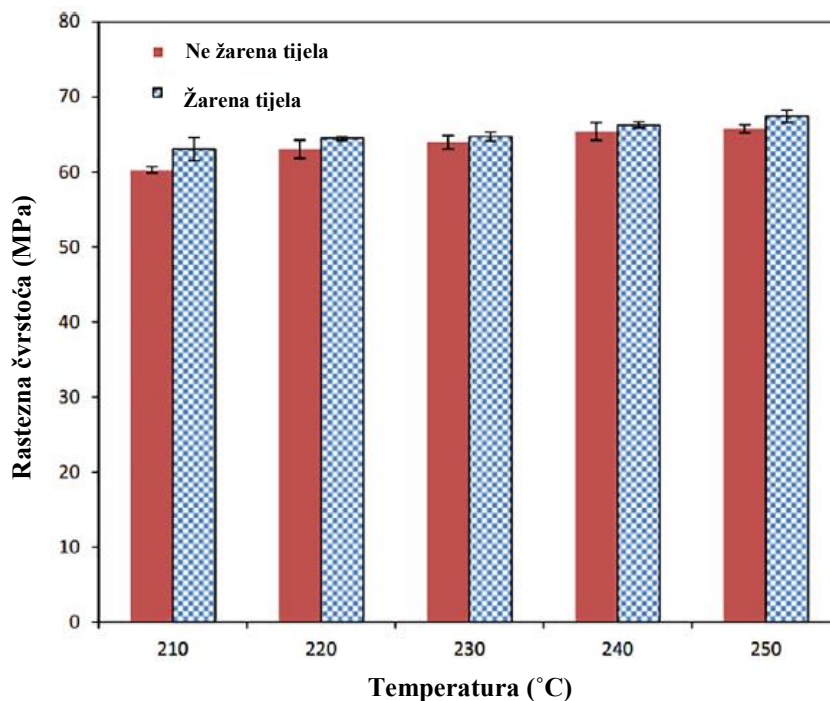
Nakon vizualnog pregleda ispitnim tijelima su na kidalici ispitani rastezna čvrstoća i modul elastičnosti dok su površinska svojstva ispitana SEM mikroskopom. Ispitna tijela su bila ispisana pri 5 različitih temperatura ispisa: 210°C , 220°C , 230°C , 240°C i 250°C . Ustanovljeno

je da, čak i prije toplinske obrade, najbolji modul elastičnosti i rasteznu čvrstoću imaju tijela ispisana pri 250°C, a njihova mehanička svojstva još su dodatno porasla nakon žarenja. Modul elastičnosti [Slika 4.4.] toplinski neobrađenog ispitnog tijela ispisanog pri 250°C iznosio je 4,9 GPa za razliku od žarenog čiji je modul elastičnosti iznosio 5,65 GPa. U tom slučaju porast modula elastičnosti žarenog u odnosu na ne žareno ispitno tijelo iznosio je 15,3%. Kod tijela ispisanih na ostalim temperaturama povećanja modula elastičnosti zbog žarenja iznosila su 15% za ispitna tijela ispisana pri 210°C, 17% za 220°C, 32% za 230°C i 26% za 240°C. Toliko povećanje modula elastičnosti ispitnih tijela može se pripisati procesu rekristalizacije tijekom žarenja.



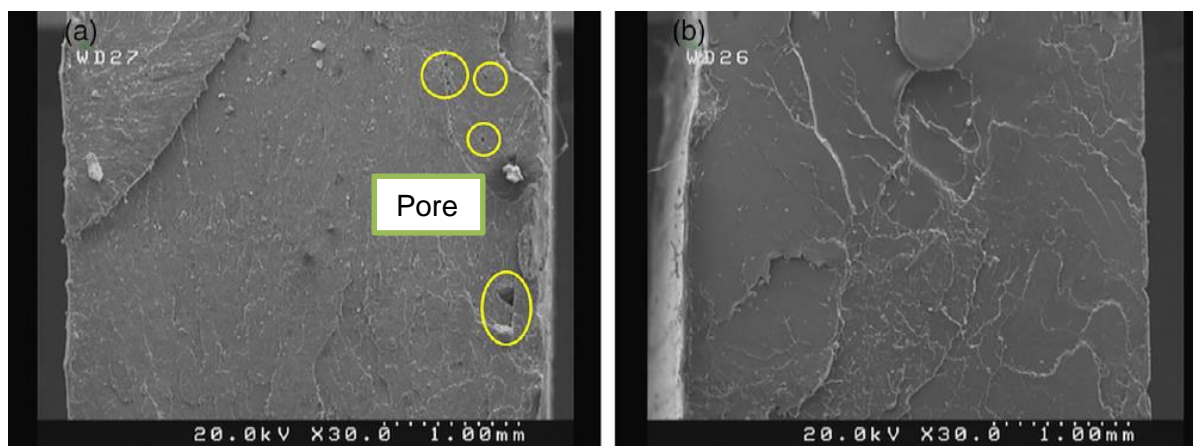
Slika 4.4. Modul elastičnosti ispitnih tijela [14]

Rastezna čvrstoća ispitnih tijela [Slika 4.5.] slijedila je sličan trend povišenja kod žarenih tijela u odnosu na ne žarene, odnosno toplinski neobrađena tijela. Također, kao i u slučaju modula elastičnosti, vidljivo je da ispitna tijela ispisana pri temperaturi od 250°C imaju najveću rasteznu čvrstoću neovisno o toplinskoj obradi. Međutim, iznos povećanja nije bio toliko značajan kao u slučaju modula elastičnosti pa je tako najveće izmjereno povećanje iznosa rastezne čvrstoće iznosilo 7% za temperaturu ispisa od 210°C dok je ukupno povećanje rastezne čvrstoće žarenog ispitnog tijela ispisanog pri 250°C u odnosu na 210°C bilo svega 9% što je vrlo malo povećanje [14].



Slika 4.5. Rastezna čvrstoća ispitnih tijela [14]

Na provedenom površinskom ispitivanju [Slika 4.6.] za ne žarena i žarena ispitna tijela vidljiva je dobra prionjivost slojeva u oba slučaja što je rezultat visoke temperature ispisa. Na toplinski ne obrađenom ispitnom tijelu vidljive su sitne pore koje nisu prisutne na površini žarenog tijela. Razlog tome je dodatno prijanjanje slojeva prilikom žarenja kao i toplinska dilatacija ispitnog tijela [14].



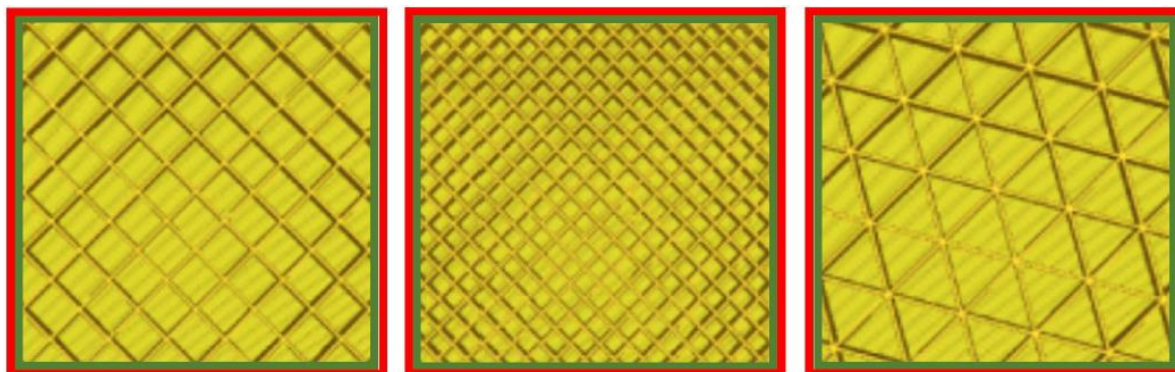
Slika 4.6. Površina ne žarenog (a) i žarenog ispitnog tijela (b) [14]

4.3. Ostali primjeri postupaka toplinske obrade

U ovom poglavlju biti će predstavljeni još neki postupci toplinske obrade te će biti objašnjen njihov utjecaj na materijal koji se obrađuje. Usprkos brojnim postupcima toplinske obrade kao i mogućnosti mijenjanja pojedinih parametara kako bi se postigli željeni rezultati, osnovna pravila toplinske obrade 3D ispisanih FFF dijelova od polimernog materijal uvijek vrijede, a to

su da je dio potrebno ispisati sa 100% *infilom* i da toplinska obrada jedino ima smisla ako se temperatura održava između temperature staklišta i tališta materijala od kojeg je toplinski obrađivani dio izrađen.

Toplinsku obradu je (kao što je opisano u članku [16]) moguće provoditi i na ispitnim tijelima kojima je ispuna (*infil*) ispisana različitim uzorcima. Dok je u prošlom primjeru *infil* bio orijentiran u smjeru djelovanja vlačne sile, na narednoj slici [Slika 4.7.] mogu se vidjeti tri različita oblika *infila* za dijelove na kojima će biti provedena toplinska obrada.



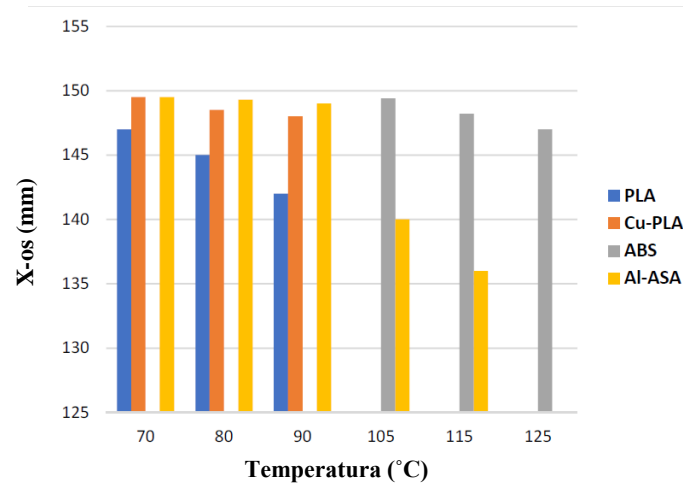
Slika 4.7. Različiti oblici infila [16]

Ispitna tijela su zatim ugrijana u laboratorijskoj peći na ciljanu temperaturu te su držana na toj temperaturi 1h. Korištena peć imala je opciju konvekcijskog grijanja koje omogućava strujanje zagrijanog zraka oko cijelog ispitnog tijela te mu ravnomjerno po svim površinama predaje toplinu. Nakon sat vremena peć je ugašena te su ispitna tijela puštena 2h da se ohlade u peći bez njenog otvaranja kako bi se izbjegao temperaturni šok od naglog hlađenja. U donjoj tablici [Tablica 5.] dani su parametri izrade i žarenja pojedinih materijala [16].

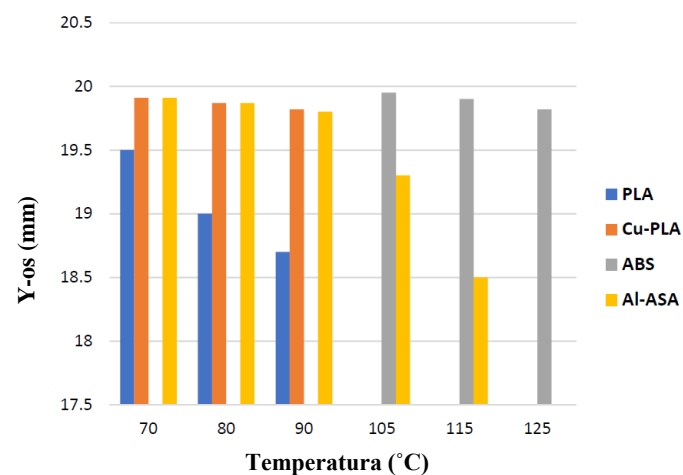
Tablica 5. Parametri izrade i žarenja ispitnih tijela [16]

Materijal	Temperatura mlaznice (°C)	Temperatura radne površine (°C)	Temperatura staklišta (°C)	Temperatura žarenja (°C)
3D Filaprint PLA	210	60	60-65	70, 80, 90
FilaPrint PLA ojačan bakrom	200	60	60-65	70, 80, 90
3D Filaprint ABS	240	95	105	105, 115, 125
ASA ojačan aluminijem	250	100	100	70, 80, 90, 105, 115

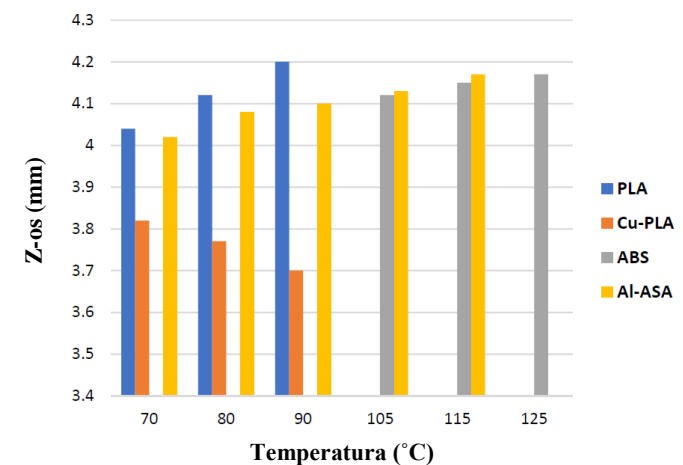
Prilikom dimenzijskih ispitivanja ustanovljeno je povećanje dimenzija u smjerovima osi x, y i z, što je vrlo očekivan rezultat kod toplinske obrade polimera kao i kod samog ispisa. Sami rezultati dimenzijskog ispitivanja predstavljeni su na narednim dijagramima [Slika 4.8., Slika 4.9. i Slika 4.10.] [16].



Slika 4.8. Dimenzijske promjene u smjeru osi x [16]



Slika 4.9. Dimenzijske promjene u smjeru osi y [16]



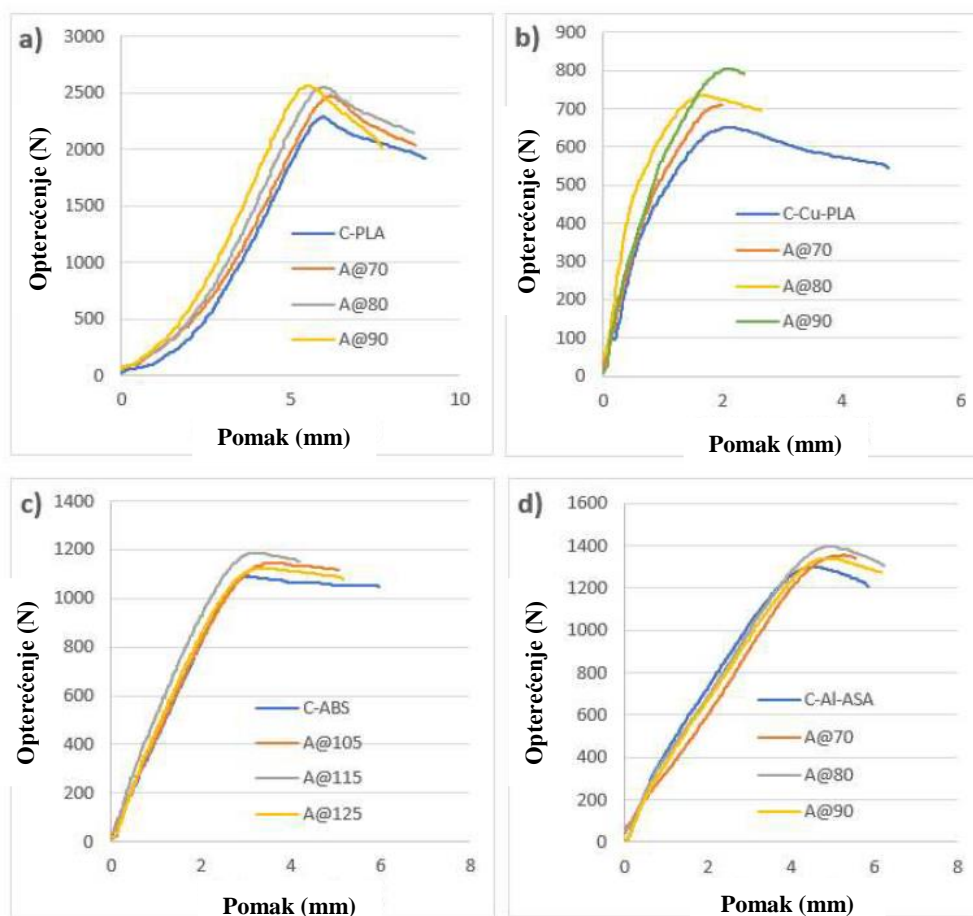
Slika 4.10. Dimenzijske promjene u smjeru osi z [16]

Rezultat dimenzijskih promjena je deformacija samog ispitnog tijela koja je najizraženije kod materijala Al-ASA [Slika 4.11.].



Slika 4.11. Deformacije ispitnog tijela od Al-ASA nakon žarenja [16]

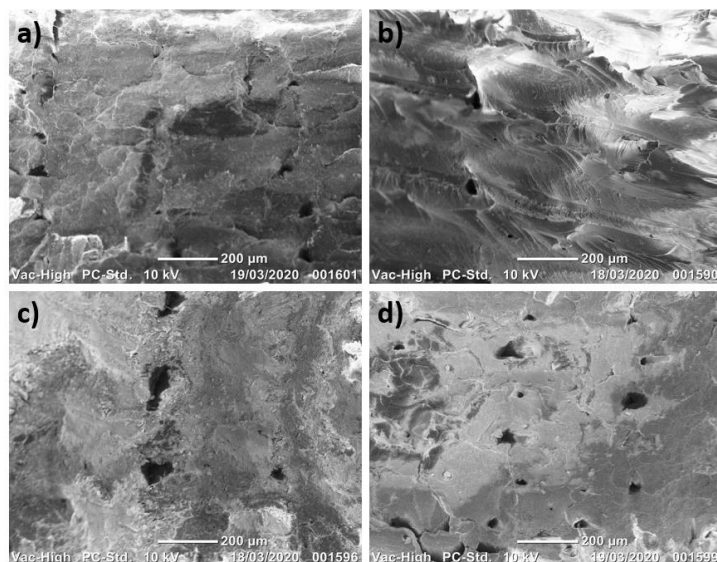
S druge strane, kao i u prošlom primjeru, rastezna čvrstoća je porasla nakon procesa žarenja što je vidljivo u narednim dijagramima [Slika 4.12.] [16].



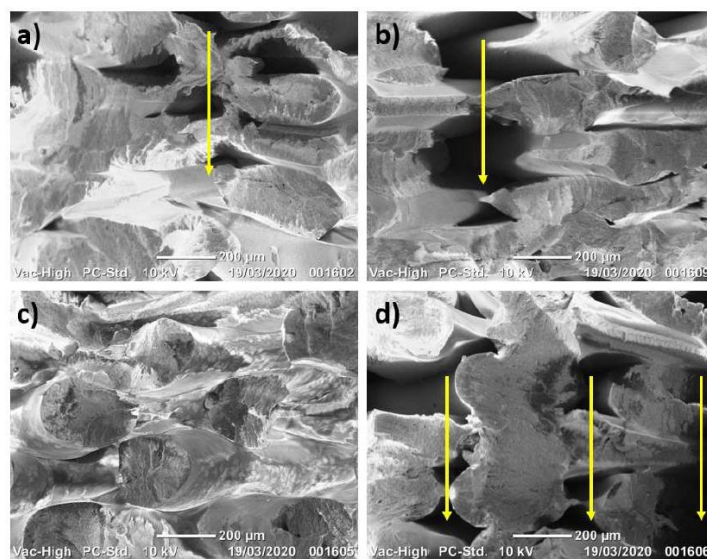
Slika 4.12. Dijagrami rastezne čvrstoće za ispitane materijale [16]

Na dijagramima oznake A@ prikazuju temperature žarenja ispitnih tijela. Može se primijetiti da za svaki materijal žarena ispitna tijela postižu veće vrijednosti rastezne čvrstoće od ne žarenih. Porast rastezne čvrstoće varira od 3,3% do 6,75% dok se najveće povećanje bilježi za PLA ojačan bakrom (Cu-PLA), a iznosi 21% [16].

Prilikom površinskih ispitivanja provedenih s pomoću SEM mikroskopa moguće je lako primijetiti pore koje su posljedica nedovoljnog prijanjanja slojeva tijekom ispisa, a koje se mogu ispraviti odnosno popuniti postupkom žarenja s učinkovitošću koja ovisi o materijalu ispitnog tijela. Na narednim slikama biti će prikazani rezultati površinskih ispitivanja za PLA i ABS [Slika 4.13. i Slika 4.14.] dok ostali ispitani materijali slijede sličan primjer. Na nekima su pore više vidljive (ABS) dok su na drugima one puno manje izražene (PLA) [16].



Slika 4.13. Ne žarena (a) i žarena ispitna tijela PLA [16]



Slika 4.14. Ne žarena (a) i žarena ispitna tijela ABS-a

Još jedna zanimljiva metoda toplinske obrade koja se posebno ističe je metoda žarenja 3D ispisanih dijelova u soli. Postupak se sastoji od „uranjanja“ 3D ispisanih dijelova u posudu punu soli te žarenja u peći pri željenoj temperaturi određeno razdoblje [Slika 4.15.]. Sol je potrebno prethodno dodatno samljjeti (osim ako se ne koristi već prethodno usitnjena sol) kako ne bi loše utjecala na hrapavost površine žarenog dijela [17].



Slika 4.15. Postupak žarenja u soli [17]

Temperatura žarenja varira ovisno o materijalu no za razliku od običnog procesa žarenja, gdje se toplina prenosi izravno iz zraka na žareno ispitno tijelo, ovdje se toplina prvo prenosi na sol pa tek zatim na tijela koja su uronjeni u sol. Posljedica toga je znatno dulje vrijeme zagrijavanja samog ispitnog tijela no u nekim ispitivanjima su ispitivači ubacili posudu sa soli i ispitnim tijelima u peć kada ona postigne ciljanu temperaturu te od tog trenutka mjerili vrijeme, dok su drugi mjerili vrijeme tek kada su ispitna tijela postigla ciljanu temperaturu [17].

Prednosti ove metode su mogućnost žarenja dijelova koji u sebi imaju šupljinu bez straha da će se, zbog izloženosti jakoj toplini, urušiti sami u sebe. To otvara mogućnost žarenja raznih spremnika tekućine koja im omogućava zatvaranje pora prisutnih od ispisivanja te ih tako čini sposobnima nositi tekućinu bez curenja. Isto tako, budući da sol može doprijeti u sve utore izratka, moguće je žariti dijelove kompleksnije geometrije također bez straha da se uruše zbog toga što sol služi kao potporna struktura koja upravo sprječava urušavanje, a lako ju je moguće odstraniti iz svih pora izratka s pomoću vode [17].

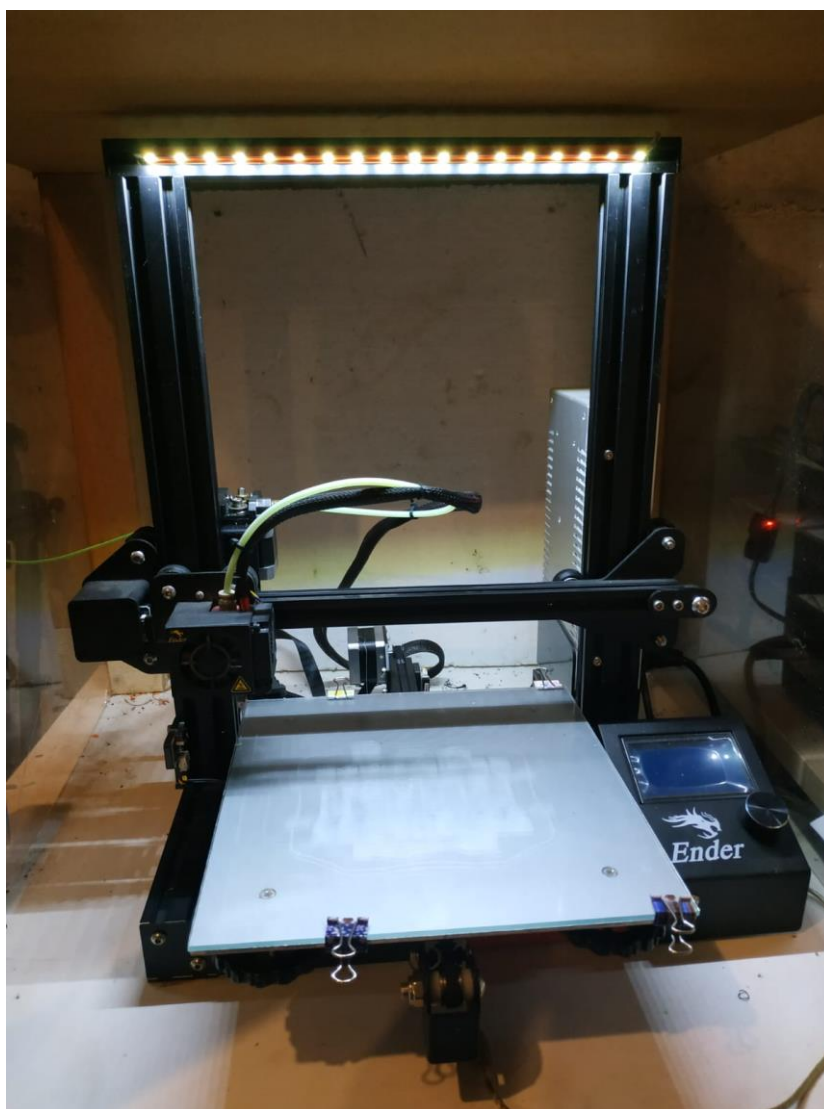
U ovom poglavlju ova metoda je ukratko predstavljena, no budući da je ista tema ovog rada, biti će detaljno objašnjena u sljedećem poglavlju koje opisuje eksperimentalni dio ovoga rada.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom poglavlju biti će opisan eksperimentalni dio ovog rada. Prvo će biti opisana korištena oprema, zatim sam postupak provođenja eksperimenata žarenja epruveta u soli i na kraju će biti izneseni i diskutirani rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće i površinske hrapavosti toplinski obrađenih epruveta.

5.1. Korištena oprema

Za ispisivanje epruveta za ispitivanje vlačne čvrstoće korišten je FFF pisac Creality Ender 3 PRO s platformom za ispisivanje dimenzija 220×220×250 mm [Slika 5.1.]. Za ispisivanje epruveta od PETG na pisac je stavljena posebno izrađena komora koja nije bila potrebna pri ispisivanju epruveta od PLA.



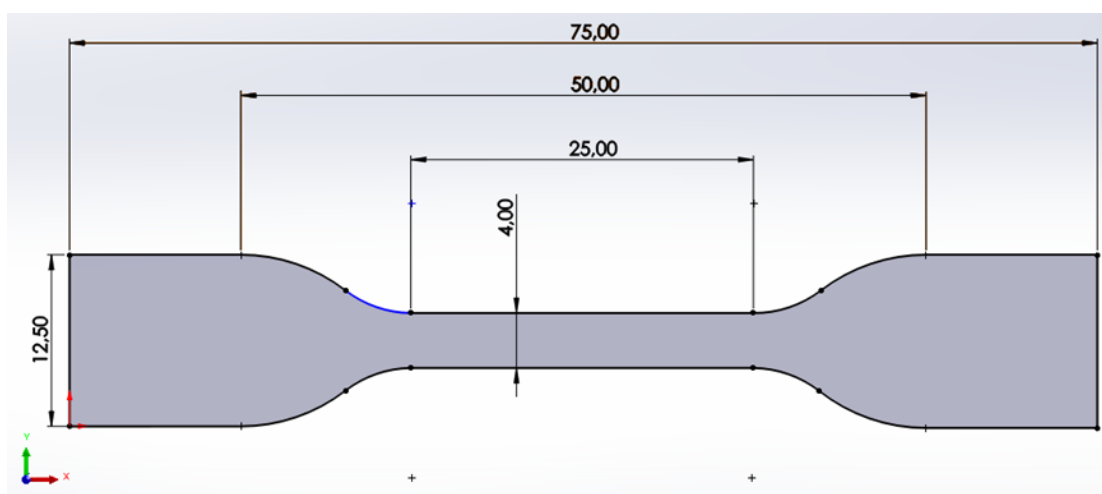
Slika 5.1. Creality Ender 3 PRO pisac

Epruvete za ispitivanja bile su, kao što je već spomenuto, izrađene od PLA (bijeli filament) i PETG (neon zeleni filament) polimera [Slika 5.2.]. Pri ispisu epruveta od PLA temperatura mlaznice bila je 200°C , a temperatura radne površine za ispisivanje 60°C , dok je za PETG temperatura mlaznice bila 235°C dok je temperatura radne površine bila 80°C . Sve epruvete bile su ispisane s *infilom* od 100% zbog potreba ispitivanja rastezne čvrstoće, a promjer samog filameta za oba materijala bio je 1,75 mm.



Slika 5.2. Epruvete za ispitivanje rastezne čvrstoće

Dimenzije i oblik epruveta definirani su normom HRN EN ISO 527, specijalni oblik 5A. Dimenzije su prikazane na narednoj slici [Slika 5.3.]. Dimenzija u smjeru osi z, odnosno debljina epruvete nije prikazane i iznosi 4 mm. Također, u donjem lijevom kutu vidljiv je koordinatni sustav po kojemu će se ravnati rezultati pri analizi dimenzijskih promjena.



Slika 5.3. Dimenzije korištenih epruveta za ispitivanje rastezne čvrstoće

Za provođenje eksperimenata toplinske obrade žarenjem u soli korištena je kuhinjska pećnica s temperaturnom točnošću od $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Kao spremnik u kojemu su bile sol i epruvete u soli korištena je keramička posuda dimenzija $220 \times 140 \times 50$ mm [Slika 5.4.].



Slika 5.4. Posuda za sol

Sol korištena u eksperimentima bila je obična sitna sol [Slika 5.5.] koja se može kupiti u većini dućana s prehrambenim namirnicama, no za potrebe eksperimenata bilo ju je potrebno dodatno usitniti pa je u tu svrhu poslužio mlinac za kavu sa oštricom nalik mikseru [Slika 5.6.].



Slika 5.5. Sol korištena u eksperimentima



Slika 5.6. Mlinac za kavu korišten za dodatno usitnjavanje soli

Konačno, zbog osiguranja dosljednosti eksperimenata i zbog mogućnosti boljeg praćenja temperature epruveta uronjenih u sol, korišten je digitalni termometar koji se inače koristi za mjerenje temperature unutar mesa [Slika 5.7.].



Slika 5.7. Termometar za kontrolu temperature epruveta u soli

5.2. Način provođenja eksperimenata

Prije samog provođenja eksperimenata ispisane su epruvete za ispitivanje rastezne čvrstoće. Točnije, za svaki eksperiment ispisano je po 6 epruveta od PLA i 6 od PETG od kojih je 5 bilo u svrhu ispitivanja rastezne čvrstoće, a 1 za ispitivanje površinske hrapavosti.

Sol u kojoj su bile uronjene epruvete bilo je potrebno dodatno usitniti s pomoću već spomenutog mlinca za kavu. Razlog dodatnog usitnjavanja je to što bi sol, kada bi ostala neusitnjena, svojom veličinom i oblikom nepovoljno utjecala na površinsku hrapavost epruvete nakon žarenja. Naime, tijekom procesa žarenja materijal se, zbog visoke temperature, omekša te površina epruvete uzme otisak soli koja ju okružuje. Zbog toga je bitno da su zrna soli što manja kako bi i površina ostala što glađa.

Sol je prvo usitnjena mljevenjem u mlincu oko 1 min, a zatim su potencijalne grudice razbijene pomoću sita [Slika 5.8.].



Slika 5.8. Razbijanje grudica soli pomoću sita

Zatim se usitnjenom soli obložilo dno posude na Slika 5.4 tako da je debljina sloja soli otprilike 20 mm. Sol je bilo potrebno utisnuti kako epruvete ne bi potonule i dotakle dno posude. Nakon utiskivanja soli epruvete su položene na taj sloj soli [Slika 5.9.] te su raspoređene tako da stane svih 12 epruveta (6 od PLA i 6 od PETG). Bitno je naglasiti da epruvete ne smiju dirati dno ili rub posude već trebaju u potpunosti biti okružene sa soli.



Slika 5.9. Raspored epruveta u posudi za žarenje

Epruvetama je također potrebno omogućiti dovoljan razmak zbog potencijalnog toplinskog rastezanja, odnosno povećanja dimenzija tijekom žarenja. Također je u sredini posude potrebno omogućiti dovoljno prostora za mjernu sondu termometra čiji je vrh potrebno postaviti točno u ravninu svih epruveta, kako bi termometar bolje izmjerio temperaturu unutar soli na kojoj su i same epruvete.

Kada se sonda ubaci u posudu te se njen vrh izravna s ostalim epruvetama potrebno je sve ponovno prosuti slojem soli koji je otprilike debljine 20 mm. Također je ponovno potrebno utisnuti sol kako bi bolje prionula uz epruvete te za svaku epruvetu stvorila svojevrsni kalup i time što više onemogućila deformacije i/ili povećanje dimenzija epruveta. Posuda s epruvetama u soli je zatim ubačena u neugrijanu pećnicu [Slika 5.10.].



Slika 5.10. Položaj posude u neugrijanoj pećnici

Zatim je postavljena željena temperatura žarenja te je odabrana opcija grijanja s ventilatorom kako bi se epruvete u soli brže i što ujednačenije zagrijale kao rezultat kruženja toplog zraka oko posude sa soli [Slika 5.11. i Slika 5.12.].



Slika 5.11. Postavljanje temperature žarenja



Slika 5.12. Postavljanje opcije grijanja s ventilatorom

Nakon postavljanja temperature žarenja i opcije grijanja pećnice s ventilatorom, također je bilo potrebno namjestiti tu istu temperaturu kao ciljane temperaturu na termometru kako bi se znalo kada unutrašnjost soli (na dubini gdje se nalaze epruvete) bude na temperaturi žarenja. Kada termometar pokaže da je unutrašnjost soli postigla temperaturu žarenja, pećnica ostaje uključena još 45 minuta nakon čega se gasi te se pušta nekoliko sati da se ohladi na sobnu temperaturu. Bitna napomena je da se pećnica ne smije otvarati tijekom procesa hlađenja kako se isti ne bi ubrzao i omeo tijekom eksperimenta i kako se ne bi unutar epruveta stvorila zaostala

naprezanja. Trajanje samog procesa hlađenja ovisi o visini temperature žarenja, a temperatura unutar soli lako se može kontrolirati s pomoću termometra.

Kada termometar pokaže sobnu temperaturu unutar soli pećnica se otvara i posuda se vadi te se epruvete pažljivo vade iz soli. Epruvete se lagano otresu kako bi se odstranile veće nakupine soli s njih te se zatim uranjaju u vodu kako bi se sol na njihovoj površini u potpunosti otopila [Slika 5.13.]. Epruvete se zatim osuše s pomoću papirnatoг ručnika nakon čega su spremne za analizu dimenzijskih promjena i za ispitivanja rastezne čvrstoće i površinske hrapavosti.



Slika 5.13. Otapanje viška soli s površine epruveta

Sveukupno je izvršeno 9 eksperimenata od kojih je 8 žareno pri temperaturama 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C, 150°C, 160°C i 170°C, a vrijeme držanja na temperaturi žarenja bilo je 45 min i držano je kao konstanta kroz sve eksperimente. Zadnji eksperiment proveden je pri temperaturi od 150°C, ali je vrijeme držanja produljeno za 15 min, odnosno epruvete su držane pri temperaturi žarenja 60 min, kako bi se vidio i utjecaj vremena žarenja na mehanička svojstva epruveta.

5.3. Analiza rezultata žarenja

Cilj eksperimenata žarenja bio je provjeriti toplinski utjecaj na mehanička svojstva epruveta od PLA i PETG te odrediti optimalnu temperaturu žarenja u temperaturnom intervalu od 100°C do 170°C. Budući da su eksperimenti žarenja provedeni na oba materijala odjednom za istu temperaturu, odabran je spomenuti temperaturni interval koji je pogodovao za oba materijala. Naime, temperatura od 100°C odabrana je kao početna jer se nalazi malo iznad temperature staklišta za PETG (koje se nalazi oko 85°C), a temperatura od 170°C odabrana je kao konačna temperatura žarenja zbog toga što je pri toj temperaturi primijećena degradacija materijala epruveta i epruvete su počele mijenjati oblik, što bi rezultiralo nemogućnošću provođenja ispitivanja rastezne čvrstoće na njima. Iako je tema ovog rada utjecaj žarenja na rasteznu čvrstoću i hrapavost, ne smije se zanemariti i utjecaj žarenja na deformacije epruveta. Stoga će u ovom poglavlju biti predstavljeni i analizirani rezultati ispitivanja deformacija, rastezne čvrstoće i hrapavosti žarenih epruveta od PLA i PETG.

5.3.1. Analiza deformacija epruveta

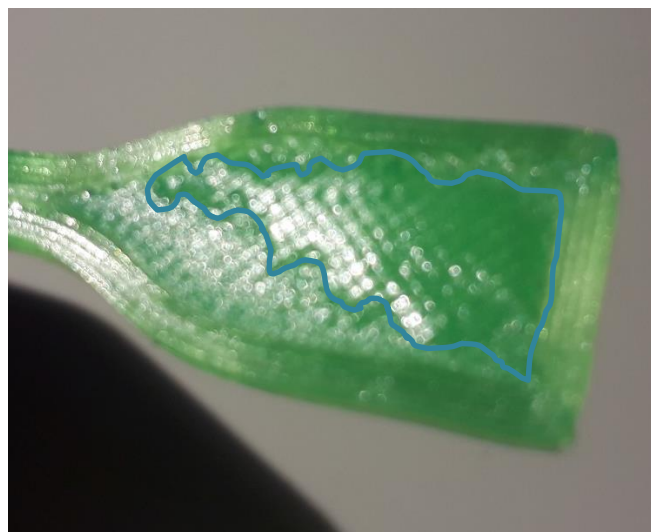
Nakon žarenja epruveta i nakon njihovog čišćenja od soli provedena su vizualna ispitivanja deformacija i promjena geometrije epruveta nakon čega je provedeno detaljnije ispitivanje promjene dimenzija pomoću pomičnog mjerila. Najprije će biti analizirane promjene na epruvetama vidljive golim okom (potkrijepljene slikama), a zatim dimenzijske promjene izmjerene pomičnim mjerilom čiji će rezultati biti predstavljeni u tablici. Na narednim slikama su, zbog bolje usporedbe, prikazane dvije epruvete za određeni materijal. Lijeva je uvijek referentna (toplinski neobrađena) epruveta dok je druga žarena na određenoj temperaturi.

Nakon žarenja na 100°C epruvete od PLA relativno dobro održavaju oblik s manjim deformacijama u obliku zakrivljenja površine na gornjoj i donjoj stranici prikazanoj na slici [Slika 5.14.]. Međutim, može se primijetiti smanjenje dimenzija koje izgleda kao da je epruveta umanjena u odnosu na referentnu. Promjene na površini nisu primjetljive golim okom.

S druge strane, epruvete od PETG nemaju vidljive promjene niti u geometriji, niti u dimenzijama u odnosu na referentne epruvete. Međutim, uočljive su promjene na površini u obliku „mjhurića“ na proširenim dijelovima epruvete [Slika 5.15.] koji su označeni plavom bojom na slici zbog bolje vidljivosti.



Slika 5.14. Epruvete žarene na 100°C



Slika 5.15. Mjehurići na površini epruvete od PETG

Nakon žarenja na 110°C epruvete od PLA imaju sličan rezultat kao i kod žarenja na 100°, odnosno na površini nema vidljivih promjena dok su deformacije minimalne. Jedino su ponovno vidljive promjene dimenzija. Kod epruveta od PETG dimenzijske promjene nisu izražene kao kod PLA, no može se primijetiti zaobljenje kutova epruvete. Također se ponovno pojavljuju „mjehuri“ na površini (označeni na slici) [Slika 5.16.].



Slika 5.16. Epruvete žarene na 110°C

Žarenje na 120°C nije utjecalo znatno drugačije na epruvete od PLA na kojima se ponovno vide dimenzijske promjene dok su deformacije i promjene na površini zanemarive. Epruvete od PETG ponovno pokazuju minimalne dimenzijske promjene, no kutovi epruveta još se više zakrivljuju. Površina postaje sve grublja, a ponegdje se pojavljuju manji „mjhurići“. Također se primjećuju manja udubljenja na donjem lijevom kutu epruvete (označeno na slici) [Slika 5.17.].



Slika 5.17. Epruvete žarene na 120°C

Žarenje na 130°C rezultiralo je veoma sličnim karakteristikama za epruvete od PLA. Površinske promjene su im zanemarive u odnosu na referentne epruvete s iznimkom malih rupica/pora koje su vjerojatno rezultat udubljena površine od strane zrnaca soli. Kao i u primjerima žarenja na nižim temperaturama, vidljiva je promjena dimenzija u obliku smanjenja u odnosu na referentne epruvete. Epruvete od PETG zadržavaju svoju dimenzijsku postojanost, no zaobljenja kutova epruvete ponovno se javljaju, no ovaj put se javljaju i udubljenja i puknuća nekih od kutova epruvete (puknuće je označeno na slici). Površina i dalje postaje sve grublja [Slika 5.18.].



Slika 5.18. Epruvete žarene na 130°C

Nakon žarenja na 140°C dimenzijske promjene su ponovno vidljive na epruvetama od PLA dok se ponovno javljaju male pore na površini. Epruvete od PETG počinju se sve više deformirati od kutova epruvete prema unutra, a površina je prekrivena „mjehurima“ [Slika 5.19.].



Slika 5.19. Epruvete žarene na 140°C

Žarenje na 150°C jednako utječe na PLA, što se tiče vizualnih promjena, no epruvete od PETG se i dalje nastavljaju deformirati oko kutova, a hrapavost i dalje raste kao i broj „mjhura“ na površini. Na rubovima epruvete javlja se sve više malih puknuća i udubina [Slika 5.20.].



Slika 5.20. Epruvete žarene na 150°C

Nakon žarenja na 160°C javljaju se drastične promjene s epruvetama od PLA. Dimenzijske promjene na oko su slične promjenama u prošlim primjerima, no površina postaje znatno hrapavija te se javljaju deformacije oko kutova epruvete. Epruvete od PETG zaobljenije su nego u prošlim primjerima, a „mjehuri“ se više ne javljaju na površini [Slika 5.21.].



Slika 5.21. Epruvete žarene na 160°C

Žarenje na 170° pokazuje se kao veoma destruktivan postupak koji loše utječe na deformacije i površinska svojstva epruveta. Epruvete od PLA hrapavije su nego kod žarenja na 160°C, a deformacije su izraženije te se javljaju pukotine uzduž cijele konture epruvete. Također se na dijelovima epruvete javljaju izbočine. Epruvete od PETG znatno se više deformiraju od žarenja na nižim temperaturama te se javljaju brojne pukotine na površini epruvete, a sama epruveta izgleda kao da je nagrizena [Slika 5.22.].



Slika 5.22. Epruvete žarene na 170°C

Same dimenzijske promjene izmjerene su pomičnim mjerilom i zbog neravnomjerne prirode deformacija tijekom žarenja, predstavljaju aproksimaciju povećanja ili smanjenja dimenzija u smjeru osi x, y ili z. Većina dimenzijskih promjena događala se u smjerovima osi x i y dok su promjene u smjeru osi z većinom bile zanemarive. Također, velika većina dimenzijskih promjena bila je smanjenje u smjeru neke od osi, dok se povećanje dimenzija primijetilo veoma rijetko.

U narednim tablicama prikazane su promjene dimenzija u smjerovima x, y i z osi za PLA [Tablica 6.] i PETG [Tablica 7.] za sva provedena žarenja. Znak minus (-) ispred broja označava skupljanje materijala, odnosno smanjenje dimenzija dok znak plus (+) predstavlja povećanje dimenzija materijala. Orijehtacija epruvete odgovara orijentaciji na slici koja prikazuje dimenzije korištenih epruveta [Slika 5.3], odnosno orijentaciji koordinatnog sustava na istoj slici.

Tablica 6. Dimenzijske promjene žarenih epruveta za PLA

Temperatura žarenja	x – os [mm]	y – os [mm]	z – os [mm]
100°C	-3	-1	0
110°C	-3,5	-1	0
120°C	-4,5	-1	0
130°C	-3	-1	0
140°C	-3	-1	0
150°C	-2,5	-1	0
160°C	-4	-2	+0,5
170°C	-3,5	-1,5	+0,7

Tablica 7. Dimenzijske promjene žarenih epruveta za PETG

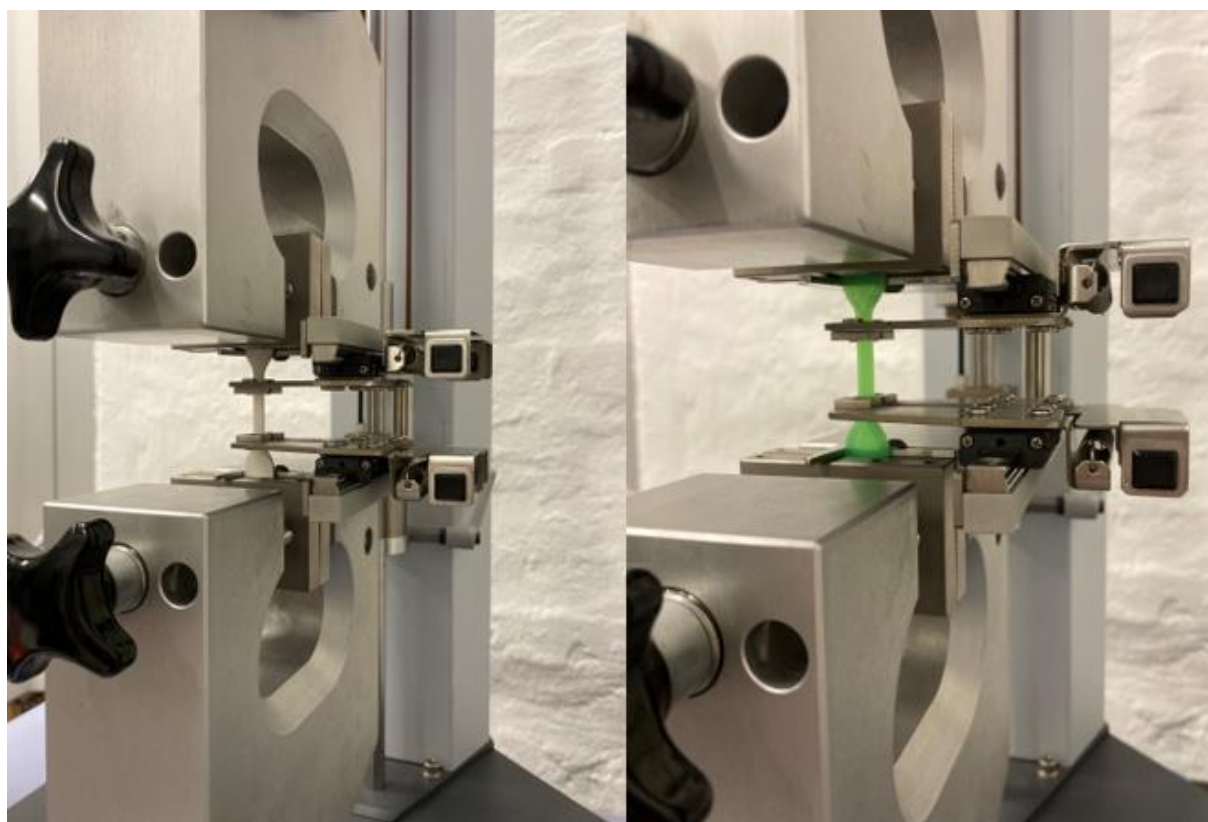
Temperatura žarenja	x – os [mm]	y – os [mm]	z – os [mm]
100°C	-1	-1	0
110°C	-1	-1	0
120°C	-1,5	-1	0
130°C	-1,2	-1	0
140°C	-0,5	-0,5	0
150°C	-0,5	-0,3	0
160°C	-1	-1	+0,5
170°C	-0,5	-1	+0,5

Kao što se može primijetiti, dimenzijske promjene većinom su skupljanja materijala. Najveća skupljanja pokazuje PLA u smjeru osi x, dok je skupljanje u smjeru osi y veoma slično kod oba materijala. Epruvete u smjeru osi z ostaju nepromjenjive nakon većine eksperimenata kod oba materijala, no pri žarenju na 160°C i 170°C šire se za mali iznos kod PLA i kod PETG. Mjerenje dimenzijskih promjena osi z bilo je otežano zbog neravne površine i pojave „mjehura“ kod PETG epruveta tako da je uzeta vrijednost profila koji je bio najpogodniji za mjerenje i koji otprilike odgovara srednjoj vrijednosti debljine profila epruvete.

5.3.2. Analiza ispitivanja rastezne čvrstoće

Ispitivanja rastezne čvrstoće žarenih ispitnih tijela provedena su na uređaju za mjerenje rastezних svojstava, odnosno na „kidalici“ Shimadzu AGS-X 10kN [Slika 5.23.]. Kako bi se osigurali pouzdaniji rezultati, ispitivanja su provedena na 5 epruveta za svaku temperaturu žarenja, kao i za referentne epruvete za oba materijala. Ispitivanje se sastoji od postavljanja ispitnog tijela, odnosno epruvete, u čeljusti kidalice koja zatim rasteznom silom djeluje na epruvete koje se, nakon izvjesne jačine sile koja djeluje na njih, produljuju za određeni postotak te pucaju.

Zatim se očitavaju vrijednosti maksimalne sile koja je djelovala na ispitno tijelo, maksimalno naprezanje ispitnog tijela pri toj sili, silu na tijelo kada je ono puklo te naprezanje pri pucanju. Također se mjeri i istežanje ispitnog tijela izraženo u postocima koji odražavaju povećanje dimenzija u smjeru djelovanja rastezne sile, u odnosu na ne ispitivano tijelo.

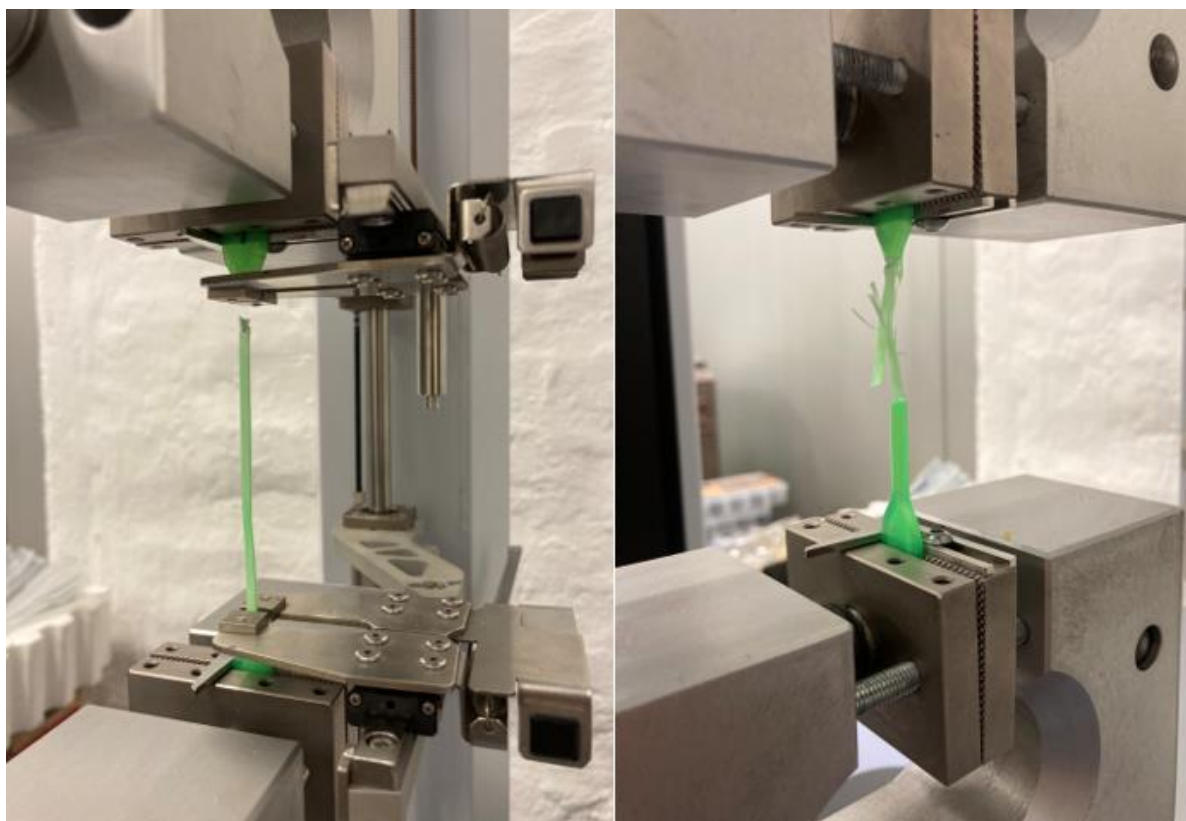


Slika 5.23. Epruvete od PLA (lijevo) i PETG (desno) na kidalici

Najprije su ispitivane referentne, odnosno ne žarene epruvete od PLA i PETG koje već u prvom ispitivanju pokazuju značajnu razliku u ponašanju pri rasteznom opterećenju. Naime, na narednim slikama vidljivo je kako se PLA [Slika 5.24.] lomi veoma pravilno, dok se PETG [Slika 5.25.] prije loma dosta istegne što se može pripisati njegovoj amorfnoj prirodi ili lošoj međusobnoj povezanosti rastera i slojeva.



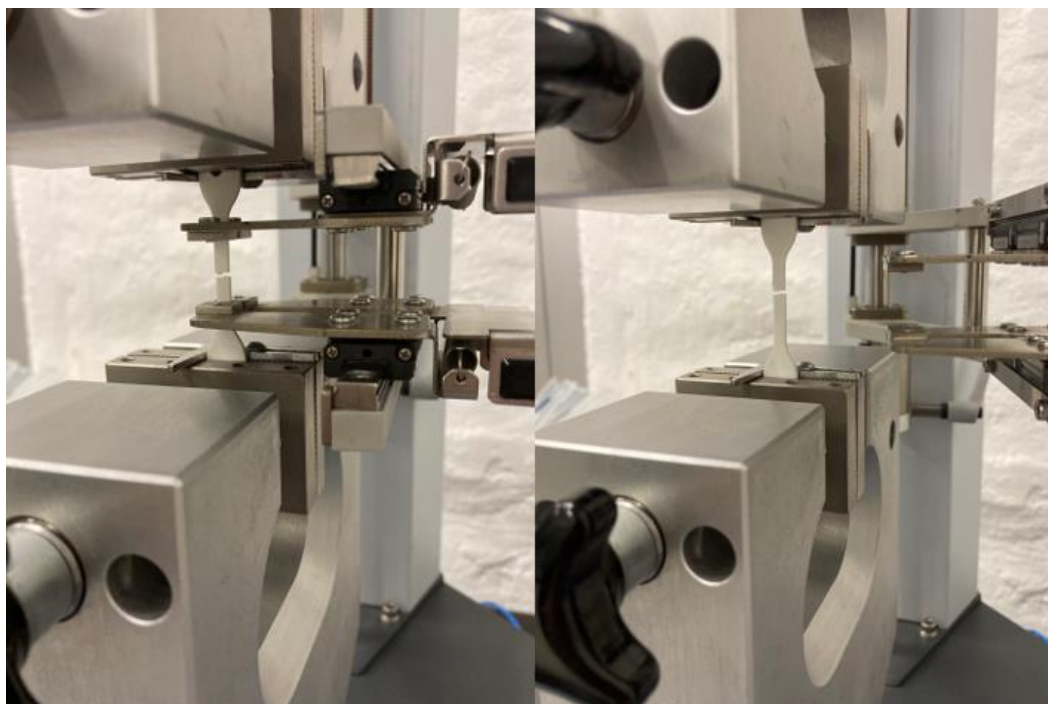
Slika 5.24. Lom referentne epruvete od PLA



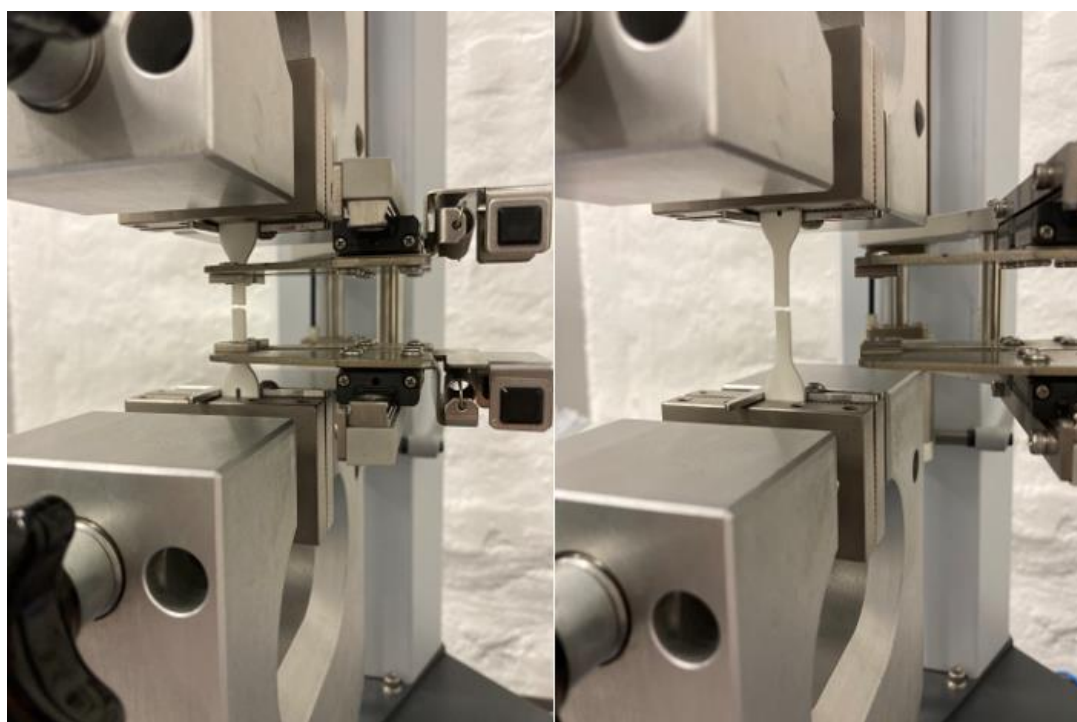
Slika 5.25. Lom referentnih epruveta od PETG

Zatim su ispitivane žarene epruvete pri svim, već spomenutim, temperaturama žarenja i vremenom žarenja od 45 min. Isto su tako ispitane i epruvete žarene 60 min pri 150°C kako bi se pokazao utjecaj vremena žarenja na rasteznu čvrstoću.

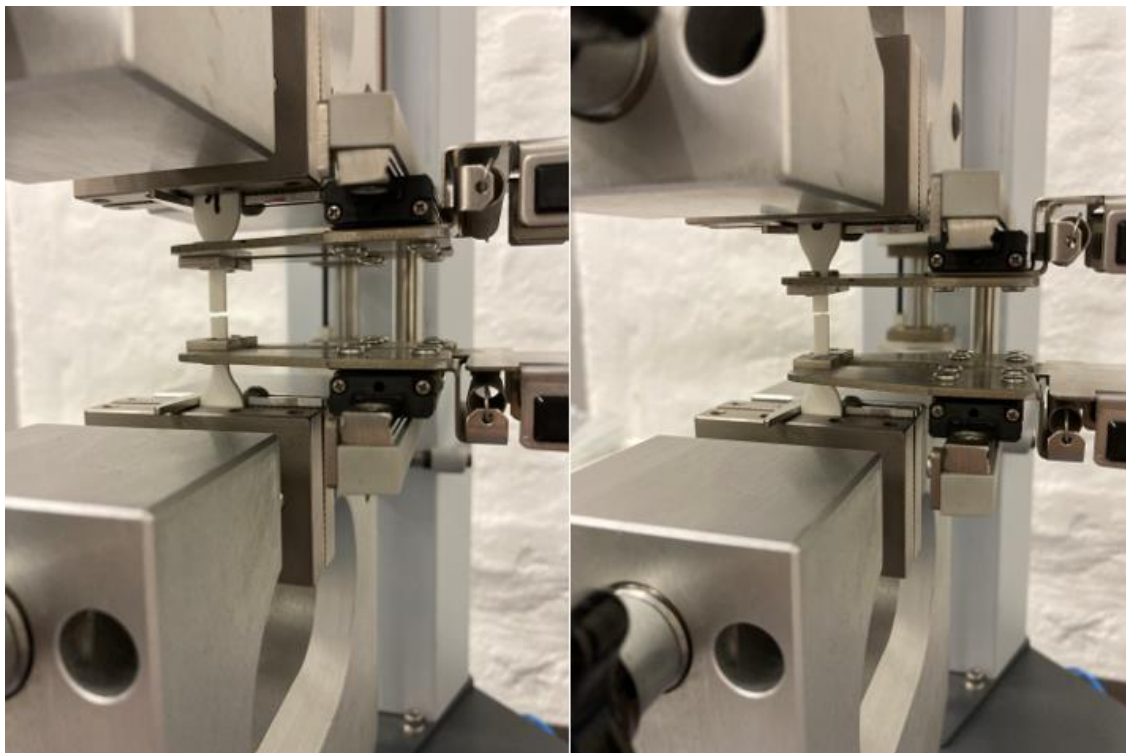
Epruvete od PLA nisu pokazivale značajna istezanja već su pucale relativno pravilno što je pokazano na narednim slikama [Slika 5.26., Slika 5.27., Slika 5.28. i Slika 5.29.].



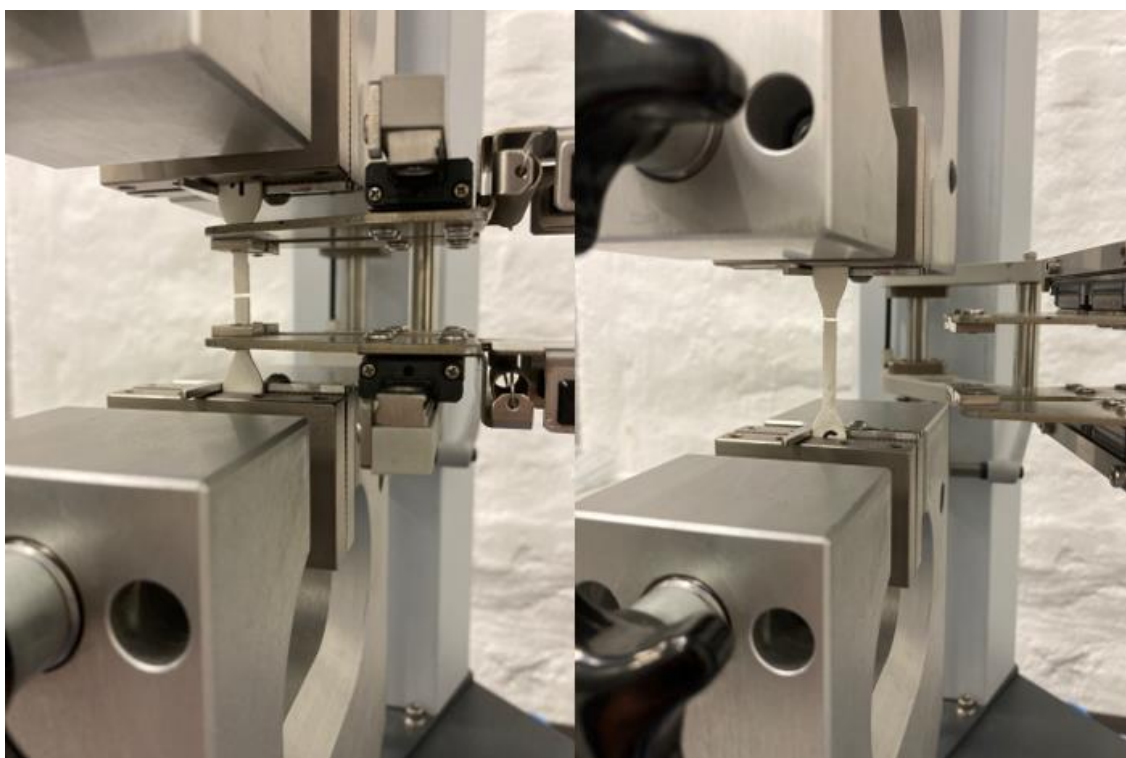
Slika 5.26. Lom epruveta od PLA žarenih pri 100°C (lijevo) i 110°C (desno)



Slika 5.27. Lom epruveta od PLA žarenih pri 120°C (lijevo) i 130°C (desno)



Slika 5.28. Lom epruveta od PLA žarenih pri 140°C (lijevo) i 150°C (desno)



Slika 5.29. Lom epruveta od PLA žarenih pri 160°C (lijevo) i 170°C (desno)

Epruvete žarene 60 min pri 150°C ponašale su se veoma slično onima žarenim pri istoj temperaturi 45 minuta, odnosno, istezanje je veoma slično.

U narednoj tablici [Tablica 8.] prikazane su srednje vrijednosti istezanja za epruvete od PLA.

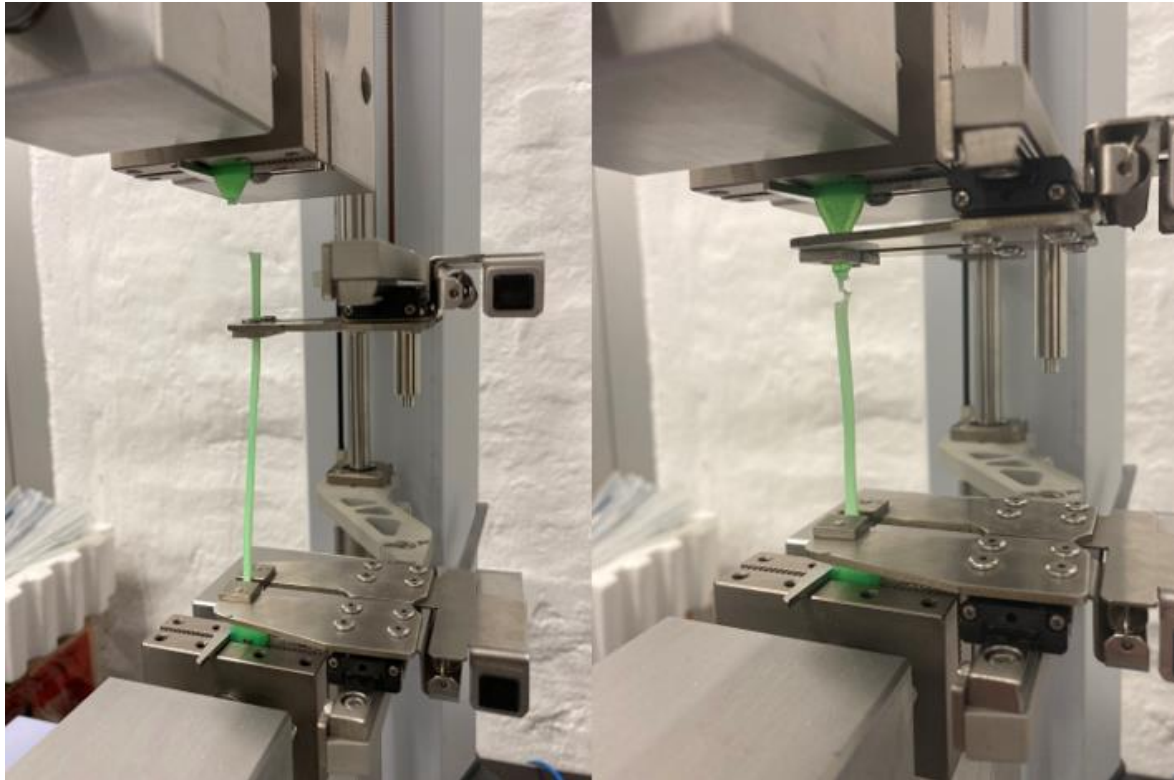
Tablica 8. Srednje vrijednosti istezanja za epruvete od PLA

	Srednja vrijednost istezanja [%]
PLA/Ref.	7,17
PLA/100°C	5,74
PLA/110°C	5,74
PLA/120°C	5,68
PLA/130°C	6,15
PLA/140°C	5,21
PLA/150°C	4,04
PLA/150°C – 60min	3,41
PLA/160°C	3,42
PLA/170°C	3,62

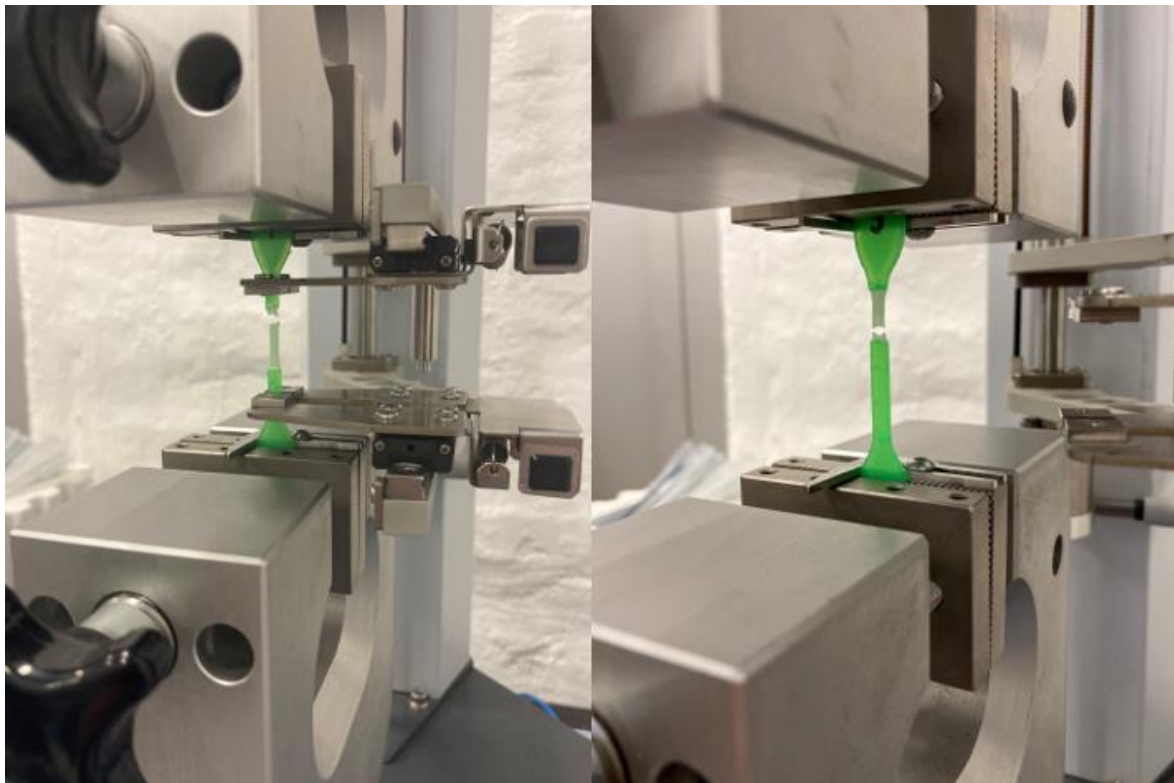
Vidljivo je da najveću vrijednost istezanja imaju referentne epruvete, dok najmanju vrijednost imaju epruvete žarene 60 minuta pri 150°C. Iz toga bi se moglo zaključiti kako se žarenjem pri višim temperaturama, između ostaloga, povećava i krutost. Isto tako se može zaključiti kako dulje vrijeme žarenja negativno utječe na vrijednost istezanja epruveta od PLA, budući da se njena vrijednost smanjila sa 4,04% na 3,41% zbog 15 minuta duljeg žarenja.

Također je vidljivo lagano opadanje vrijednosti istezanja s povećanjem temperature žarenja, s iznimkom za žarenje pri 130°C gdje se vidi porast vrijednosti istezanja u odnosu na ostale temperature žarenja.

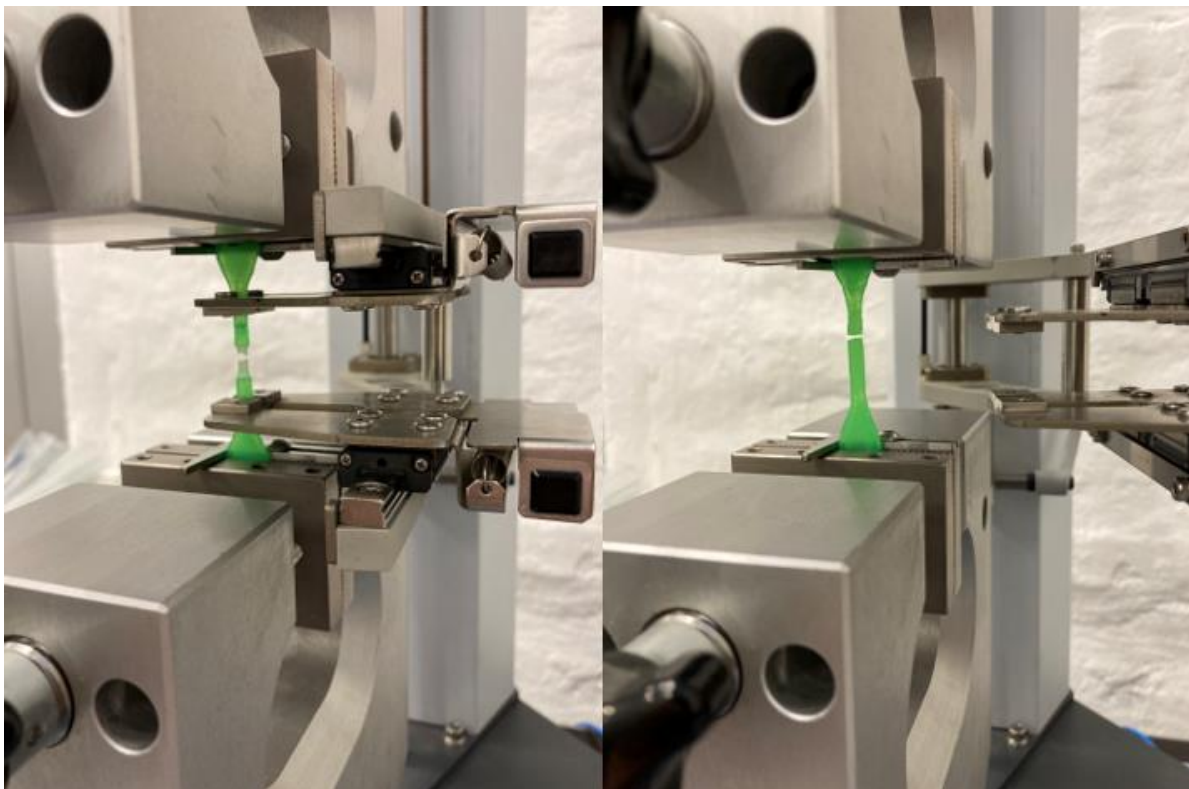
Za razliku od PLA, epruvete od PETG ponašaju se vrlo neravnomjerno što se tiče vrijednosti istezanja. Na narednim slikama [Slika 5.30., Slika 5.31., Slika 5.32. i Slika 5.33.] biti će prikazani lomovi epruveta pri svim temperaturama žarenja na kojima se vidi veoma jak utjecaj viših temperatura žarenja na vrijednost istezanja epruveta.



Slika 5.30. Lom epruveta od PETG žarenih pri 100°C (lijevo) i 110°C (desno)



Slika 5.31. Lom epruveta od PETG pri 120°C (lijevo) i 130°C (desno)



Slika 5.32. Lom epruveta od PETG žarenih pri 140°C (lijevo) i 150°C (desno)



Slika 5.33. Lom epruveta od PETG žarenih pri 160°C (lijevo) i 170°C (desno)

Vidljivo je kako, kao i kod epruveta od PLA, žarenje na povišenim temperaturama rezultira manje izraženim istežanjem, odnosno porastom krutosti. Također, kao i kod PLA, slika loma

epruveta žarenih 60 minuta pri 150°C nije prikazana iz razloga što je gotovo identična lomu epruveta žarenih 45 minuta na istoj temperaturi.

Na narednoj tablici [Tablica 9.] prikazane su srednje vrijednosti istezanja za epruvete od PETG.

Tablica 9. Srednje vrijednosti istezanja za epruvete od PETG

	Srednja vrijednost istezanja [%]
PETG/Ref.	6,44
PETG/100°C	79,41
PETG/110°C	62,85
PETG/120°C	6,90
PETG/130°C	6,66
PETG/140°C	14,10
PETG/150°C	2,87
PETG/150°C – 60min	13,47
PETG/160°C	5,93
PETG/170°C	4,37

U tablici je vidljivo kako, iako se u pravilu vrijednost istezanja snižava porastom temperature žarenja, rezultati jako variraju i vrlo su nasumične prirode. Ta činjenica se može najbolje primijetiti kod rezultata izvijanja za epruvete žarene pri 100°C i 110°C, gdje se većina epruveta prilikom ispitivanja istegnula za oko 6% dok su se tri epruvete istegnule za 163, 230 i 371% što je podignulo srednju vrijednost istezanja epruveta za te temperature žarenja. Isto se dogodilo i kod ispitivanja epruveta žarenih pri 140°C i pri 150°C na 60 minuta, no u manjoj mjeri.

Međutim, uz velike devijacije rezultata, neke od ispitivanih epruveta nisu pukle, već su se samo istegnule te s time njihove vrijednosti nisu mogle biti uvrštene prilikom računanja srednje vrijednosti istezanja. Taj problem javljao se sve više prilikom povišenja temperature žarenja epruveta tako da je vrlo nesigurno reći da se epruvetama od PETG povećava krutost, odnosno smanjuje vrijednost istezanja prilikom povećanja temperature žarenja.

Što se tiče maksimalnih naprezanja i maksimalnih sila na epruvete kao i naprezanja i sila pri kojima se javio lom epruveta, rezultati su slični rezultatima istezanja pri čemu se misli na nasumičnu prirodu ponašanja epruveta od PETG za razliku od relativno pravilnog ponašanja epruveta od PLA pri ispitivanjima.

U narednoj tablici [Tablica 10.] prikazane su srednje vrijednosti naprezanja i rasteznih sila na epruvete od PLA.

Tablica 10. Srednje vrijednosti naprezanja i sila za epruvete od PLA

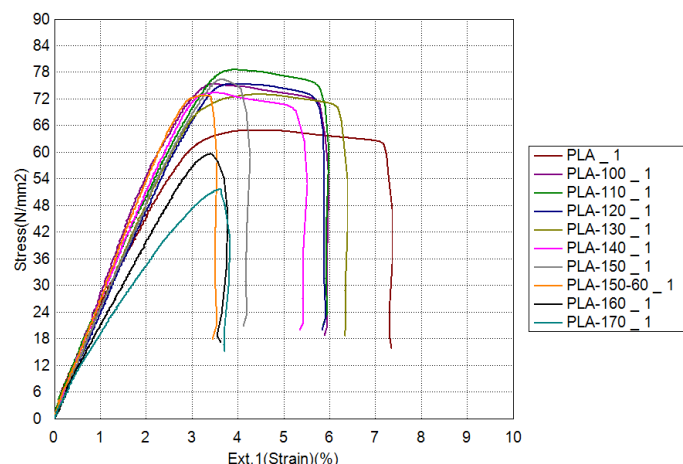
	Max. Sila [N]	Max. naprezanje [N/mm ²]	Sila loma [N]	Naprezanje pri lomu [N/mm ²]
PLA/Ref.	516,74	67,20	475,90	61,91
PLA/100°C	595,19	76,58	554,62	71,36
PLA/110°C	636,67	79,73	600,12	75,16
PLA/120°C	641,07	76,81	600,61	71,97
PLA/130°C	566,78	74,91	530,74	70,16
PLA/140°C	573,36	74,27	538,71	69,78
PLA/150°C	591,50	76,50	576,22	74,52
PLA/150°C – 60min	571,79	73,54	563,63	72,48
PLA/160°C	537,25	59,61	536,77	59,56
PLA/170°C	472,84	51,61	472,35	51,56

U gornjoj tablici je vidljivo kako maksimalno naprezanje odmah počinje rasti pri prvom žarenju u odnosu na referentne epruvete. Također se može primijetiti da epruvete žarene pri 110°C postižu najveće vrijednosti maksimalnog naprezanja i naprezanja pri lomu.

Rastom temperature žarenja od 110°C na više padaju sve vrijednosti sila i naprezanja s iznimkom epruveta žarenih pri 150°C kod kojih je vidljiv porast vrijednosti sila i naprezanja. Također se može primijetiti kako sile i naprezanja počinju naglo padati za temperature žarenja epruveta pri 160°C i 170°C zbog toga što je temperatura tališta PLA oko tih vrijednosti.

Isto tako, primjećuje se da dulje vrijeme žarenja (od 60 min) ima negativan utjecaj na vrijednosti sila i naprezanja, odnosno vrijednosti sila i naprezanja padaju u odnosu na žarenje od 45 minuta.

Na narednoj slici prikazan je dijagram naprezanje – istezanje za srednje vrijednosti svih temperatura žarenja epruveta od PLA [Slika 5.34.].



Slika 5.34. Dijagram naprezanje – istezanje za PLA (srednje vrijednosti)

Na dijagramu je također vidljivo da najveću rasteznu čvrstoću imaju epruvete žarene pri 110°C, ali poboljšanje rastezne čvrstoće u odnosu na referentne epruvete vidljivo je i kod žarenja pri ostalim temperaturama. Jedine temperature žarenja pri kojima nema smisla žariti epruvete od PLA su temperature od 160°C i 170°C pri kojima je rastezna čvrstoća lošija od referentnih epruveta. Na dijagramu se također može primijetiti da se žarenjem pri višim temperaturama krivulje „zaoštavaju“ što je produkt povećanja krutosti. S druge strane, epruvete od PETG ponašaju se drugačije što je vidljivo na narednoj tablici [Tablica 11.].

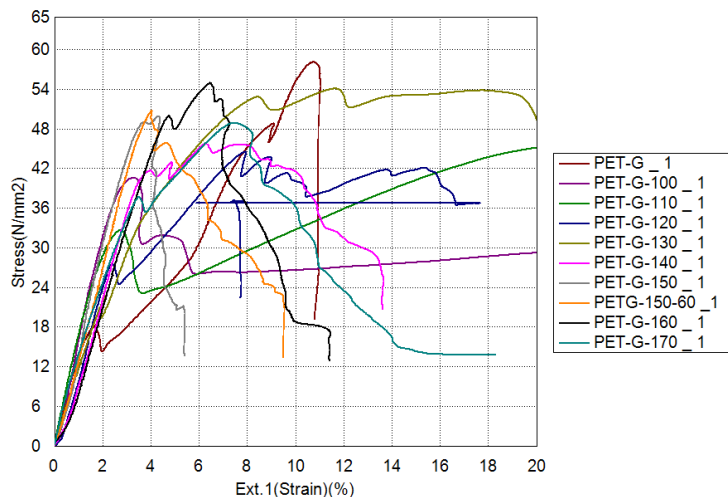
Tablica 11. Srednje vrijednosti naprezanja i sila za epruvete od PETG

	Max. Sila [N]	Max. naprezanje [N/mm ²]	Sila loma [N]	Naprezanje pri lomu [N/mm ²]
PLA/Ref.	543,01	67,79	503,36	62,87
PLA/100°C	555,15	70,40	500,20	63,42
PLA/110°C	577,20	70,17	393,60	47,76
PLA/120°C	573,45	71,14	540,89	67,00
PLA/130°C	542,84	70,12	503,53	64,37
PLA/140°C	517,60	65,38	289,68	37,30
PLA/150°C	491,43	58,12	322,30	39,36
PLA/150°C – 60min	511,48	61,76	307,56	37,42
PLA/160°C	517,51	60,35	414,48	49,04
PLA/170°C	487,30	53,17	403,23	46,66

Iz rezultata prikazanih u prethodnoj tablici može se primijetiti kako su srednje vrijednosti maksimalnog napreznja epruveta od PETG općenito manje od srednjih vrijednosti maksimalnog napreznja epruveta od PLA. Ta činjenica može se ponovno povezati s amorfnom strukturom samog materijala.

Također, može se primijetiti kako je razlika između maksimalnih napreznja i napreznja pri lomu epruveta puno veća nego kod PLA gdje su sve razlike bile oko 5 N/mm^2 . Kod PETG se primjećuju razlike od oko 5 pa sve do $24,34 \text{ N/mm}^2$. Isto tako, iako se isprva vidi porast maksimalne sile i maksimalnog napreznja prilikom žarenja epruveta, te nakon 120°C (koje predstavlja najveće srednje vrijednosti maksimalnog napreznja i napreznja pri lomu), njihov polagani pad s povećanjem temperature žarenja, napreznje pri lomu i sila loma ne slijede isti uzorak ponašanja. Naime, srednje vrijednosti sile loma i napreznja pri lomu epruveta znatno variraju s porastom temperature i ne ponašaju se linearno za razliku od PLA. S druge strane, više vrijednosti maksimalne sile i maksimalnog napreznja pri najvišim temperaturama u odnosu na PLA mogu se pripisati višoj temperaturi tališta za PETG.

Na sljedećem dijagramu [Slika 5.35.] prikazan je puni opseg nasumične prirode ponašanja mehaničkih svojstava epruveta od PETG nakon žarenja pri različitim temperaturama.



Slika 5.35. Dijagram napreznje – istezanje za PETG (srednje vrijednosti)

Ovaj dijagram rezultat je upravo tog nasumičnog ponašanja epruveta od PETG pri ispitivanju rastezne čvrstoće. Dijagram je nacrtan na ovakav način jer su, kako je već objašnjeno, pri ispitivanjima epruveta žarenih pri istoj temperaturi, postojale velike devijacije u ponašanjima pojedinih epruveta, dok neke čak ni nisu puknule. Ovi rezultati pokazuju veliku razliku u ponašanju žarenih epruveta od PETG za razliku od epruveta od PLA na koje je proces žarenja djelovao znatno ujednačenije.

5.3.3. Analiza ispitivanja hrapavosti

Ispitivanja hrapavosti provedena su na elektroničko – mehaničkom uređaju s ticalom Perthometer S8P [Slika 5.36.] čije su značajke prikazane u narednoj tablici [Tablica 12.]. Uređaj je umjeren sukladno DKD-R 4-2: *Calibration of Devices and Standards for Roughness Metrology, Calibration of Vertical Measuring System of Stylus Instruments*, 2011. Sljedivost rezultata mjerenja ostvarenih na Perthometer S8P osigurana je preko državnih etalona za hrapavost RH (u vlasništvu Nacionalnog laboratorija za duljinu RH).



Slika 5.36. Perthometer S8P

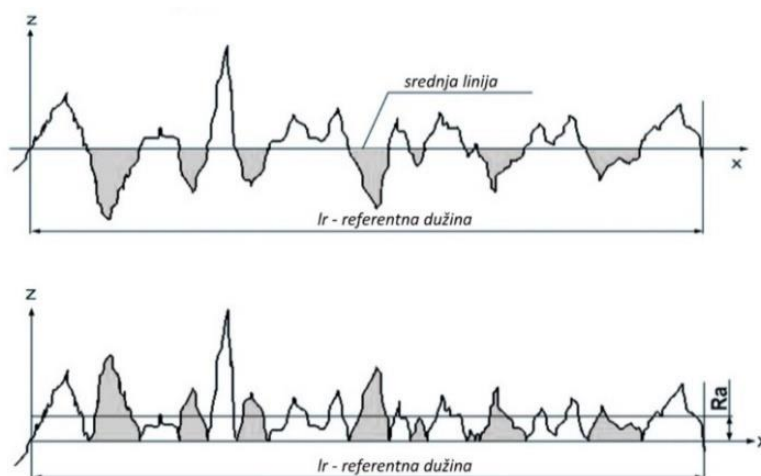
Tablica 12. Perthometer S8P mjeriteljske značajke

Proizvođač	Feinprüf Perthen GmbH, Njemačka
Tragovi	Od 4 do 128 (8064 točaka po tragu)
Duljina očitavanja, mm	0,56; 1,75; 5,6; 17,5; 56,0
Standardni mjerni putevi, mm	0,4; 1,25; 4,0; 12,5; 40
Granične valne duljine, mm	0,025; 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8,0
Mjerni opseg, μm	$\pm 12,5 \mu\text{m}$, $\pm 62,5 \mu\text{m}$, $\pm 125 \mu\text{m}$, $\pm 625 \mu\text{m}$, $\pm 2500 \mu\text{m}$
Profili	<i>D</i> – direktni <i>G</i> – ispravljeni <i>P</i> – ispravljen bez početnog i završnog dijela <i>W</i> – valovitost <i>R</i> - hrapavost
Tip filtera	Gaussov filter, RC filter, osni filteri (cut-off kod 75% i 50%)

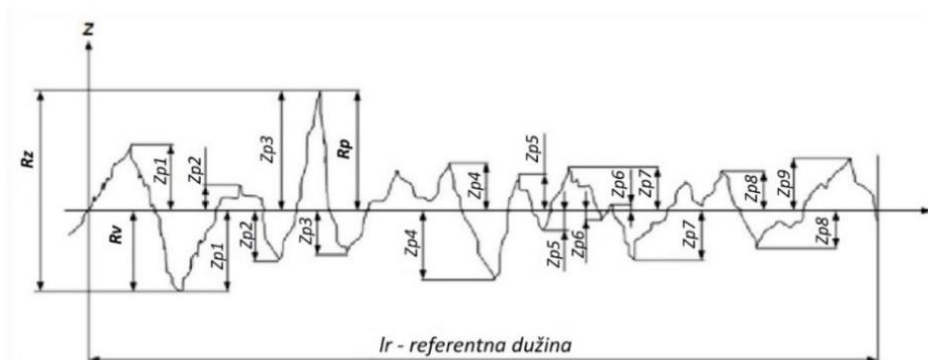
Mjerenja su provedena kontaktnom metodom [Slika 5.37.] korištenjem navedenog mjernog uređaja, u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Ispitivanje stanja hrapavosti uzoraka provedeno je mjerenjem na pet profila hrapavosti jednoliko distribuiranih po mjernoj površini. Rezultati mjerenja prikazani su pomoću parametara hrapavosti: R_a , R_z , R_p i R_v . Navedeni parametri hrapavosti shematski su prikazani na sljedećim slikama [Slika 5.38. i Slika 5.39.].



Slika 5.37. Mjerenje hrapavosti epruveta od PLA (lijevo) i PETG (desno)



Slika 5.38. Prikaz parametra hrapavosti R_a



Slika 5.39. Prikaz parametara hrapavosti R_z , R_p i R_v

Računanje parametra R_a prikazano je sljedećom jednačbom (1)

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

gdje su:

R_a μm srednje aritmetičko odstupanje profila

lr mm referentna dužina

Z μm visina mjerenog profila u bilo kojoj točki x

Mjerenja su provedena na referentnim (toplinski neobrađenim) epruvtama te na epruvtama žarenim pri 100°C, 130°C i 150°C. Rezultati mjerenja prikazani su u narednim tablicama za PLA [Tablica 13.] i PETG [Tablica 14.]. Bitna napomena je da su sve mjere u μm .

Tablica 13. Rezultati mjerenja hrapavosti za PLA

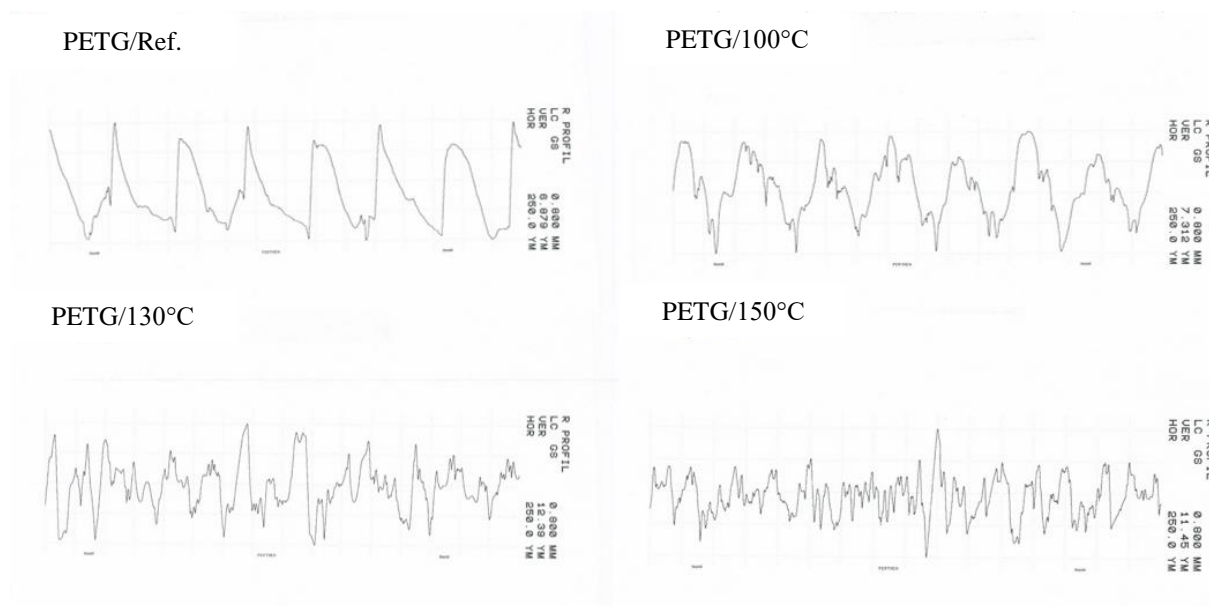
Mjerni trag		1.	2.	3.	4.	5.	Srednja vrijednost	Opseg
PLA/Ref.	R_a	4,13	4,29	5,26	6,00	5,21	4,98	1,87
	R_z	31,89	35,05	35,24	41,07	35,72	35,79	9,18
	R_p	10,97	11,27	9,47	11,70	11,89	11,06	2,42
	R_v	20,92	23,87	25,77	29,37	23,83	24,73	8,45
PLA/100°C	R_a	7,96	6,51	5,68	5,79	6,66	6,52	2,28
	R_z	43,59	41,92	39,18	38,59	42,65	41,19	5,00
	R_p	11,03	12,52	12,29	11,43	13,86	12,23	2,83
	R_v	32,56	29,4	26,89	27,16	28,79	28,96	5,67
PLA/130°C	R_a	5,89	5,62	6,21	5,90	5,05	5,73	1,16
	R_z	38,98	36,58	38,66	35,93	35,92	37,21	3,06
	R_p	14,18	11,51	12,37	13,48	11,61	12,63	2,67
	R_v	24,8	25,07	26,29	22,45	24,31	24,58	3,84
PLA/150°C	R_a	5,52	6,82	6,15	6,06	6,39	6,19	1,30
	R_z	36,22	40,51	40,10	38,20	38,87	38,78	4,29
	R_p	10,33	12,80	10,04	11,82	12,38	11,47	2,76
	R_v	25,89	27,71	30,06	26,38	26,49	27,31	4,17

Tablica 14. Rezultati mjerenja hrapavosti za PETG

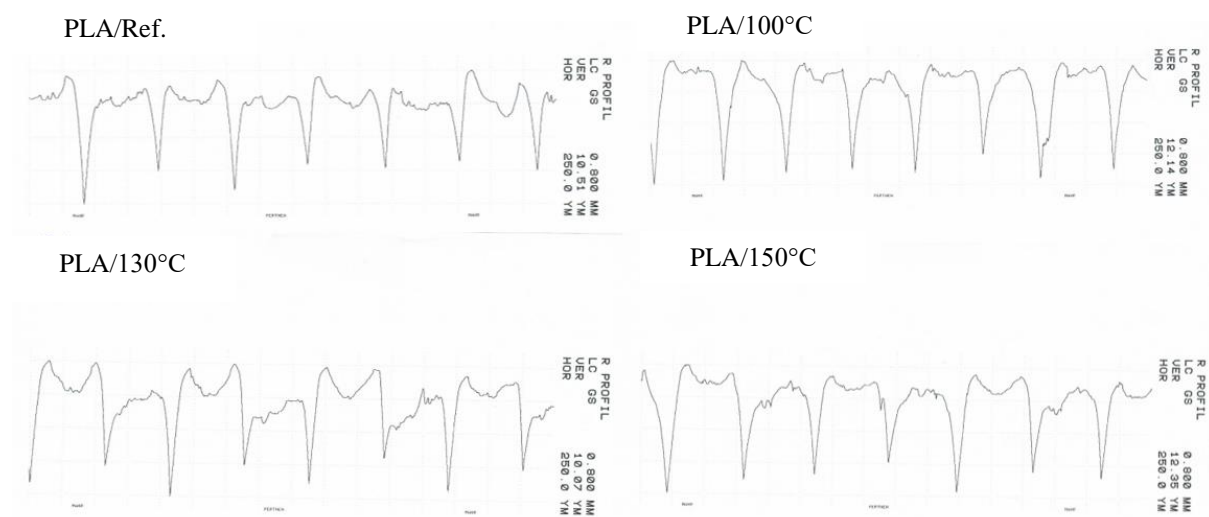
Mjerni trag		1.	2.	3.	4.	5.	Srednja vrijednost	Opseg
PLA/Ref.	R_a	6,12	6,76	5,66	5,35	7,05	6,19	1,70
	R_z	25,49	26,70	28,82	26,63	26,92	26,91	3,33
	R_p	16,62	17,54	17,99	16,95	19,00	17,62	2,38
	R_v	8,87	9,16	10,83	9,68	7,92	9,29	2,91
PLA/100°C	R_a	5,08	5,04	5,66	6,11	5,82	5,54	1,07
	R_z	23,05	21,54	26,79	24,32	24,89	24,12	5,25
	R_p	12,45	12,52	13,60	13,02	15,32	13,38	2,87
	R_v	10,60	9,02	13,19	11,30	9,57	10,74	4,17
PLA/130°C	R_a	8,58	7,50	8,93	8,51	6,95	8,09	1,98
	R_z	42,76	39,46	42,79	41,13	36,14	40,46	6,65
	R_p	25,47	25,66	22,39	23,84	19,05	23,28	6,61
	R_v	17,29	13,8	20,4	17,29	17,09	17,17	6,60
PLA/150°C	R_a	6,29	5,39	6,21	7,00	5,53	6,08	1,61
	R_z	30,85	30,28	34,93	35,50	30,48	32,41	5,22
	R_p	26,84	24,51	22,83	22,81	21,13	23,62	5,71
	R_v	4,01	5,77	12,1	12,69	9,35	8,78	8,68

Mjerenja su, zbog praktičnosti, provedena na epruvetama za ispitivanje rastezne čvrstoće tako da, zbog ograničenja površine epruveta, nije bilo moguće osigurati provedbu mjerenja (duljina ispitivanja i granična vrijednost filtra) u skladu sa zahtjevima norme ISO 4288:1996.

Na narednim slikama [Slika 5.40. i Slika 5.41.] mogu se jasno primijetiti pojedine brazde i brjegovi koji čine hrapavost površine epruveta. Može se primijetiti kako epruvete od PLA pokazuju puno pravilnije rezultate u odnosu na epruvete od PETG kod kojih se s povišenjem temperature povećava i broj brjegova i brazdi.



Slika 5.40. Dijagrami hrapavosti za PETG



Slika 5.41. Dijagrami hrapavosti za PLA

I u tablici je vidljiva nasumična priroda promjene hrapavosti kod PETG s povišenjem temperature žarenja. Naime, vidljivo je početno smanjenje hrapavosti epruveta kod žarenja pri temperaturi od 100°C u odnosu na referentne (ne žarene) epruvete, no ta hrapavost naglo raste žarenjem pri 130°C nakon čega se ponovno počinje smanjivati žarenjem pri 150°C. Taj porast hrapavosti također je opažen nakon vizualnog pregleda žarenih epruveta.

Također, na dijagramima hrapavosti za PETG može se vidjeti kako se pravilni razmaci između brjegova kod referentnih epruveta svakim dodatnim žarenjem sve više smanjuju i postaju sve nepravilniji.

Za razliku od PETG, epruvete od PLA zadržavaju svoju pravilnost u razmaku između brjegova i nakon žarenja pri 100°C, 130° i 150°, a hrapavost im je puno ujednačenija i nema tako naglih

skokova kao kod PETG. Također, za razliku od PETG, epruvetama od PLA hrapavost poraste nakon žarenja pri 100°C u odnosu na referentne epruvete, nakon čega se smanji kod žarenja pri 130°C te ponovno blago poraste kod žarenja pri 150°C.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu bilo je potrebno opisati utjecaj toplinske obrade žarenjem u soli na mehanička svojstva dijelova izrađenih FFF tehnologijom. U prvom dijelu opisana je sama FFF tehnologija, dok su u drugom i trećem dijelu bili opisani postupci ispitivanja rastezne čvrstoće i hrapavosti te postupci toplinske obrade koji se koriste u svrhu poboljšanja tih svojstava. U eksperimentalnom dijelu rada opisani su provedeni eksperimenti žarenja u soli ispitnih tijela ispisanih FFF tehnologijom te je opisan utjecaj žarenja na deformacije ispitnih tijela, kao i na njihovu rasteznu čvrstoću i hrapavost.

Za ispitivanja navedenih svojstava korišteni su: pomično mjerilo za dimenzijska ispitivanja, kidalica za ispitivanja rastezne čvrstoće te mjerni uređaj s ticalom za ispitivanja hrapavosti. Žarenja su provedena na 6 ispitnih tijela za svaki materijal (PLA i PETG) pri temperaturama: 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C, 150°C, 150°C/60min, 160°C i pri 170°C. Ispitivanjima deformacija ustanovljeno je da se kod PLA, povišenjem temperature žarenja, smanjuju dimenzije no geometrija ostaje gotovo nepromjenjiva sve do žarenja pri 160°C, kada se ona znatno počinje mijenjati i epruveta gubi svoje početne geometrijske karakteristike. S druge strane, usprkos višoj temperaturi tališta, epruvete od PETG počinju se deformirati (prvo na kutovima epruvete, a zatim i po rubovima) na nižim temperaturama žarenja od PLA. Međutim, za razliku od PLA, epruvete od PETG pokazuju bolju dimenzijsku postojanost, tj. smanjenje dimenzija puno je manje izraženo.

Pri ispitivanjima rastezne čvrstoće ustanovljeno je kako PLA sveukupno više pogoduje od žarenja od PETG. Za PLA je, kao najbolja temperatura žarenja, ustanovljena temperatura od 110°C, dok su temperature od 160°C i 170°C proglašene nepovoljnim temperaturama žarenja zbog negativnih posljedica na materijal. Epruvete od PETG pokazale su veoma varijabilne rezultate za koje je vrlo nesigurno reći je li žarenje dobra opcija za povišenje njihove rastezne čvrstoće.

Ispitivanje hrapavosti provedeno je na referentnim epruvetama te na epruvetama žarenim na 100°C, 130°C i 150°C za oba materijala. Ustanovljeno je kako PLA ima pravilniji raspored brjegova u dijagramu hrapavosti te da se hrapavost povećava inicijalnim žarenjem, no smanjuje se povišenjem temperature žarenja do određene mjere. Referentne epruvete od PETG pokazale su, kao i one on PLA, relativno pravilan raspored brjegova u dijagramu hrapavosti koji je postajao sve više nasumičan žarenjem pri višim temperaturama. Također je ustanovljeno da

hrapavost pada žarenjem u odnosu na referentne epruvete, no ponovno se povećava povećanjem temperature žarenja.

U konačnici se pokazalo kako su dijelovi ispisano od PLA znatno bolji kandidati za žarenje od dijelova ispisanih od PETG. PLA se pokazao kao materijal čija mehanička svojstva pogoduju od žarenja, doduše ne pri previsokim temperaturama zbog nižeg tališta PLA. Epruvete od PETG potrebno je ponovno ispitati žarenjem na drugačiji način, kako bi se vidjelo koji su najbolji parametri žarenja za te epruvete ili se žarenje ne smije uzimati u obzir kao naknadna obrada za dijelove od PETG. Također je potrebno usporediti metodu žarenja u soli sa žarenjem u ostalim medijima kao što je gips.

Utjecaj vremena na deformacije i rasteznu čvrstoću epruveta od PLA i PETG također je analiziran. Izvršen je eksperiment žarenja pri temperaturi od 150°C, no za razliku od ostalih eksperimenata kod kojih je vrijeme žarenja bilo 45 minuta, vrijeme žarenja ovog eksperimenta bilo je 60 minuta. Dodatno vrijeme žarenja (15 minuta) nije znatno utjecalo na deformacije epruveta. Međutim, pokazalo se da dodatno vrijeme žarenja nepovoljno utječe na vrijednosti istezanja, kao i na vrijednosti naprezanja, odnosno rastezne čvrstoće epruveta od PLA. Sva navedena svojstva pokazala su niže vrijednosti od žarenja na istoj temperaturi 45 minuta. Kod ispitivanja epruveta od PETG, rezultati su pokazali više vrijednosti naprezanja i istezanja za dulje vrijeme žarenja, no zbog već spomenutog nasumičnog ponašanja epruveta od PETG, ti rezultati ne mogu se protumačiti na način da dulje vrijeme žarenja povoljno utječe na vrijednosti naprezanja i istezanja. Međutim, eksperimenti i ispitivanja utjecaja vremena na mehanička svojstva epruveta provedeni su samo za jednu temperaturu žarenja. Zbog toga je u budućim aktivnostima potrebno detaljnije analizirati utjecaj vremena žarenja na mehanička svojstva epruveta.

LITERATURA

- [1] Usporedba FFF i FDM: <https://top3dshop.com/blog/fff-vs-fdm-difference-and-best-printers>, Pristupljeno: 27. listopada 2021.
- [2] Sustav za ekstrudiranje filameta: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-06918-6>, Pristupljeno: 30. listopada 2021.
- [3] Opis STL datoteke: <https://all3dp.com/1/stl-file-format-3d-printing/>, Pristupljeno: 2. studenog 2021.
- [4] Slike M.C. Eschera : <https://mcescher.com/gallery/symmetry/>, Pristupljeno 2. studenog 2021.
- [5] Greške kod 3D ispisa: <https://wikifactory.com/+bitfab/stories/fdm-3d-printing-common-problems-and-how-to-solve-them>, Pristupljeno 8. studenog 2021.
- [6] Cuan-Urquizo E, Barocito E, Tejada-Ortigoza V, Pipes R.B, Rodriguez C.A, Roman-Flores A. Characterization of the Mechanical Properties of FFF Structures and Materials: A Review on the Experimental, Computational and Theoretical Approaches. *Materials* 2019, 12, 895. Dostupno online: https://www.mdpi.com/1996-1944/12/6/895?type=check_update&version=1
- [7] Materijali korišteni u FFF tehnologiji: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/>, Pristupljeno 9.11.2021.
- [8] Arefin A.M.E, Khatri N.R, Kulkarni N, Egan P.F. Polymer 3D Printing Review: Materials, Process, and Design Strategies for Medical Applications. *Polymers* 2021, 13, 1499. Dostupno online: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/9/1499>
- [9] Gonabadi H, Yadav A, Bull S.J. The Effect of Processing Parameters on the Mechanical Characteristics of PLA Produced by a 3D FFF Printer. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020, 111, 695-709. Dostupno online: [The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer | SpringerLink](#)
- [10] Mendricky R, Fris D. Analysis of the Accuracy and the Surface Roughness of FDM/FFF Technology and Optimisation of Process Parameters. *Technical Gazette* 27, 4 (2020), 1166 – 1173. Dostupno online: <https://doi.org/10.17559/TV-20190320142210>
- [11] Buj – Corral L, Sánchez – Casas X, Luis – Pérez C.J. Analysis of AM Parameters on Surface Roughness Obtained in PLA Parts Printed with FFF Technology. *Polymers* 2021, 13, 2384. Dostupno online: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/14/2384>

- [12] Baršić G. Predavanja iz kolegija Nanomjeriteljstvo. Zagreb. Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2020.
- [13] Opis procesa žarenja: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-annealing>, Pristupljeno 13. studenog 2021.
- [14] Akhoundi B, Nabipour M, Hajami F, Shakoori D. An Experimental Study of Nozzle Temperature and Heat Treatment (Annealing) Effects on Mechanical Properties of High-Temperature Polylactic Acid in Fusec Deposition Modeling. *Polymer Engineering and Science*. 2020, 60, 979 – 987. Dostupno online: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.25353>
- [15] Temperature staklišta i tališta: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/glass-transition-temperature>, Pristupljeno 13. studenog 2021.
- [16] Butt J, Bhaskar R. Investigating the Effects of Annealing on the Mechanical Properties of FFF – Printed Thermoplastics. *J. Manuf. Mater. Process*. 2020, 4, 38. Dostupno online: <https://www.mdpi.com/2504-4494/4/2/38>
- [17] Žarenje FFF dijelova u soli: <https://3dwork.io/en/post-processing-of-parts/>, Pristupljeno 15. studenog 2021.