

MEHANIČKA SVOJSTVA TPU MATERIJALA IZRAĐENIH FDM TEHNOLOGIJOM

Magdić, Domagoj

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:088778>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

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



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
Stručni prijediplomski studij Strojtarstvo

Domagoj Magdić

**MEHANIČKA SVOJSTVA TPU
MATERIJALA IZRAĐENIH FDM
TEHNOLOGIJOM**

Završni rad

Karlovac, 2025.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
Stručni prijediplomski studij Strojtarstvo

Domagoj Magdić

**MEHANIČKA SVOJSTVA TPU
MATERIJALA IZRAĐENIH FDM
TEHNOLOGIJOM**

**Mechanical properties of TPU
materials made by FDM technology**

Završni rad

Mentor:
dr. sc. Nikola Šimunić, prof. struč. stud.

Karlovac, 2025.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, dr.sc. Nikoli Šimuniću, prof. struč. stud. za stručnu pomoć, vođenje kroz završni rad i pomoć u laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu, dr.sc. Tihani Kostadin, prof. struč. stud. za pomoć u laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu i obitelji za potporu tijekom studiranja.

Domagoj Magdić



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Klasa:
602-11/___-01/___

Ur.broj:
2133-61-04-___-01

Datum:

ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA

Ime i prezime	Domagoj Magdić		
OIB / JMBG			
Adresa			
Tel. / Mob./e-mail			
Matični broj studenta	0110616055		
JMBAG	0248060851		
Studij (staviti znak X ispred odgovarajućeg studija)	<input checked="" type="checkbox"/> preddiplomski	<input type="checkbox"/> specijalistički diplomski	
Naziv studija	Prijediplomski stručni studij Strojarsvo		
Godina upisa	2016.		
Datum podnošenja molbe	10.01.2025		
Vlastoručni potpis studenta/studentice			

Naslov teme na hrvatskom: Mehanička svojstva TPU materijala izrađenih FDM tehnologijom	
Naslov teme na engleskom: Mechanical properties of TPU materials made by FDM technology	
Opis zadatka: Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U uvodnom dijelu završnog rada obraditi kratko povijest i pregled aditivnih tehnologija sa posebnim osvrtom na FDM tehnologiju. Također opisati vrste materijala i njihovu primjenu. U praktičnom dijelu završnog rada potrebno je opisati mehanička svojstva tkiva usne šupljine kod čovjeka (iz dostupne literature). Zatim navesti i opisati fleksibilne materijale za primjenu FDM tehnologijom, i to: Filaflex 60A „PRO“, Flexible 85A TDS, Flexfill TPU 92A, Elegoo TPU 95A i Flexible 98A TDS. Izraditi probne uzorke i ispitati mehanička svojstva odabranih fleksibilnih materijala. Na kraju napisati analizu te usporediti mehanička svojstva fleksibilnih materijala sa mehaničkim svojstvima ljudskog tkiva usne šupljine. Rad urediti prema uputama za pisanje završnog rada na strojarskom odjelu, kako je objavljeno na web stranicama Veleučilišta u Karlovcu.	
Mentor:	Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.2. Povijest aditivne tehnologije.....	1
1.3. Aditivna tehnologija danas.....	2
2. ADITIVNA TEHNOLOGIJA	3
2.1. Postupak aditivne proizvodnje općenito	3
3. Opis pojedinih postupaka aditivne proizvodnje	5
3.1. Stereolitografija.....	5
3.2. Selektivno lasersko srašćivanje.....	6
3.3. 3D tiskanje	7
3.4. Postupci aditivne proizvodnje temeljeni na ekstrudiranju	8
3.4.1. Taložno očvršćivanje (FDM).....	8
3.4.2. Višefazno mlazno očvršćivanje	10
3.4.3. 3D tiskanje polimernih voštanih proizvoda	10
3.5. Slojevita izrada laminiranjem	10
3.6. Trodimenzijsko taloženje materijala u obliku aerosola	12
4. OPIS DOSTUPNIH MATERIJALA ZA ADITIVNU TEHNOLOGIJU	13
5. ODABRANI MATERIJALI I MEHANIČKA SVOJSTVA LJUDSKOG TKIVA.....	15
5.1. Odabrani materijali	15
5.2. Mehanička svojstva ljudskog tkiva	18
6. Ispis epruveta na FDM uređaju.....	22
7. Ispitivanje EPRUVETA.....	27
7.1. Izrazi za računanje	28
7.2. Rezultati ispitivanja - Filaflex 60A „PRO“.....	29
7.3. Rezultati ispitivanja Flexible 85A TDS	33
7.4. Ispitivanje Flexfill TPU 92A.....	37
7.5. Ispitivanje Elegoo TPU 95A	41
7.6. Ispitivanje Flexible 98A TDS	45
8. Analiza I USPOREDBA rezultata	48
9. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA.....	52

POPIS SLIKA

Slika 1. Postupak stereolitografije. [10]	5
Slika 2. Postupak selektivnog laserskog srašćivanja. [11]	7
Slika 3. Postupak 3D tiskanja. [12]	8
Slika 4. Postupak taložnog očvršćivanja. [14].....	9
Slika 5. Postupak izrade objekata laminiranjem. [15].....	11
Slika 6. Uzorci tkiva. [27]	19
Slika 7. Prikaz opterećenja uzorka tkiva. [27].....	19
Slika 8. Epruveta prema ISO 37 standardu [29].....	22
Slika 9. Postupak 3D ispisa Elegoo TPU 95A	23
Slika 10. Postupak 3D ispisa Filaflex 60A „PRO“ tip 2 prema standardu ISO 37	24
Slika 11. Završetak 3D ispisa, lijevo Elegoo TPU 95A, desno Flexible 85A TDS.....	25
Slika 12. Kidalica Shimadzu AG-X	27
Slika 13. Epruvete Filaflex 60A „PRO“	29
Slika 14. Epruvete Filaflex 60A „PRO“ nakon ispitivanja na kidalici.....	30
Slika 15. Dijagram sila / produljenje dobiven na kidalici za epruvetu TPU 60A 2	31
Slika 16. Dijagram sila / produljenje za TPU 60A.....	31
Slika 17. Epruvete Flexible 85A TDS.....	33
Slika 18. Epruvete Flexible 85A TDS nakon ispitivanja na kidalici.....	34
Slika 19. Dijagram sila / produljenje dobiven na kidalici za epruvetu TPU 85A 2	35
Slika 20. Dijagram sila / produljenje za TPU 85A.....	35
Slika 21. Epruvete Flexfill TPU 92A	37
Slika 22. Epruvete Flexfill TPU 92A nakon ispitivanja na kidalici	38
Slika 23. Dijagram sila / produljenje dobiven na kidalici za epruvetu TPU 92A 2	39
Slika 24. Dijagram sila / produljenje za TPU 92A.....	39
Slika 25. Epruvete Elegoo TPU 95A.....	41
Slika 26. Epruvete Elegoo TPU 95A nakon ispitivanja na kidalici.....	42
Slika 27. Dijagram sila / produljenje dobiven na kidalici za epruvetu TPU 95A 2	43
Slika 28. Dijagram sila / produljenje za TPU 95A.....	43
Slika 29. Epruvete Flexible 98A TDS nakon ispitivanja na kidalici.....	45
Slika 30. Dijagram sila / produljenje dobiven na kidalici za epruvetu TPU 98A 2	46
Slika 31. Dijagram sila / produljenje za TPU 98A.....	46

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedni prikaz svojstava odabranih materijala iz tehničkih listova [20, 22, 23, 24, 25]..	17
Tablica 2. Mehanička svojstva gingive [27].....	21
Tablica 3. Mehanička svojstva tvrdog nepca [27].....	21
Tablica 4. Mehanička svojstva bukalne mukoze [27]	21
Tablica 5. Dimenzije epruveta u milimetrima prema ISO 37 standardu [29]	22
Tablica 6. Parametri ispisa	26
Tablica 7. Mehanička svojstva Filaflex 60A „PRO“	32
Tablica 8. Mehanička svojstva Flexible 85A TDS.....	36
Tablica 9. Mehanička svojstva Flexfill TPU 92A	40
Tablica 10. Mehanička svojstva Elegoo TPU 95A	44
Tablica 11. Mehanička svojstva Flexible 98A TDS.....	47
Tablica 12. Vrijednosti vlačne čvrstoće i Youngovog modula elastičnosti materijala po epruvetama .	49
Tablica 13. Srednje vrijednosti vlačne čvrstoće i Youngovog modula elastičnosti za materijale.....	50
Tablica 14. Srednje vrijednosti vlačne čvrstoće i Youngovog modula elastičnosti za tkiva usne šupljine [27].....	50

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
AM	Additive Manufacturing - Aditivna tehnologija (proizvodnja)
3D	Trodimenzionalno
STL	Stereolithography - Stereolitografija
SLA	Stereolithography - Stereolitografija
SLS	Selective Laser Sintering - Selektivno lasersko srašćivanje
FDM	Fused Deposition Modeling - Taložno očvršćivanje
DMLS	Direct Metal Laser Solidification
CNC	Computer Numerical Control - Računalno numeričko upravljanje
CAD	Computer Aided Design - Proizvodnja pomoću računala
SL	Stereolithography - Stereolitografija
UV	Ultraviolet - Ultraljubičasto
3DP	3D Printing - 3D tiskanje
NC	Numerical Control - Numeričko upravljanje
MJS	Multiphase Jet Solidification - Višefazno mlazno očvršćivanje
LLM	Layer Laminat Manufacturing - Slojevita izrada laminiranjem
LOM	Laminated Object Manufacturing - Izrada objekata laminiranjem
SAHP	Selective Adhesive and Hot Press Process
LMP	Layer Milling Process
M ³ D	Maskless Mesoscale Materials Deposition
PMMA	Polimetilmetakrilat
EP	Epoksidna smola
PE-HD	Polietilen viskoe gustoće
PS	Polistiren
PC	Polikarbonat
PA	Poliamid
PVC	Polivinilklorid
ABS	Akronitril butadien stiren
PEI	Polieterimid
PLA	Poliaktid
TPU	Termoplastični poliuretan
PEEK	Polietilenketon
PETG	Polietilen teraftalat
EUR	Euro
SEM	Skenirajući elektronski mikroskop
ISO	International Organization for Standardization

POPIS FIZIKALNIH VELIČINA

Fizikalna veličina	Oznaka	Mjerna jedinica
Vlačna čvrstoća	R_m	N/mm^2
Maksimalna sila opterećenja	F_m	N
Površina početnog poprečnog presjeka epruvete	S_0	mm^2
Naprezanje pri prekidu	R_k	N/mm^2
Sila loma	F_k	N
Istezanje	ε	mm/mm
Produljenje epruvete	ΔL	mm
Početna duljina epruvete	L_0	mm
Modul elastičnosti	E	N/mm^2
Granica razvlačenje	R_e	N/mm^2
Konvencionalna granica razvlačenja	$R_{p0.2}$	N/mm^2

SAŽETAK

Aditivna tehnologija je dio proizvodnoga strojarstva koji se bavi izradom predmeta nanošenjem čestica u tankim slojevima. Razvoj aditivne tehnologije je započeo osamdesetih godina dvadesetog stoljeća te je brzo postao popularan zbog brzine, jednostavnosti i relativno niske cijene. Najpoznatiji postupak aditivne tehnologije je taložno očvršćivanje (FDM) koji je i korišten za eksperimentalni dio ovog rada.

Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu objašnjeni su razvoj i podjela aditivnih tehnologija, dostupni materijali za aditivnu tehnologiju, mehanička svojstva ljudskog tkiva i materijali odabrani za potrebe istraživanja. Eksperimentalni dio se sastoji od opisa ispisivanja epruveta na 3D pisaču, ispitivanja na kidalici te analize rezultata i usporedbe s mehaničkim svojstvima ljudskim tkivima sluznice usne šupljine.

Ključne riječi: Aditivna tehnologija (proizvodnja), taložno očvršćivanje, ljudska sluznica, termoplastični poliuretan, mehanička svojstva

SUMMARY

Additive technology is a part of production engineering that deals with the creation of objects by applying particles in thin layers. The development of additive technology began in the nineteen eighties and quickly became popular due to its speed, simplicity and relatively low cost. The most-known procedure of additive technology is fused deposition modeling (FDM), which was used for the experimental part of this thesis.

The thesis consists of a theoretical and an experimental part. The theoretical part explains the development and division of additive technologies, available materials for additive technology, mechanical properties of human tissue and materials selected for the research. The experimental part consists of a description of printing test tubes on a 3D printer, testing on a tear machine, analysis of the results and comparison with the mechanical properties of human mucosa in oral cavity.

Key words: Additive technology, fused deposition modeling, human mucosa, Thermoplastic polyurethane, mechanical properties

1. UVOD

1.1. Definicija aditivne tehnologije

Aditivna tehnologija (eng. Additive Manufacturing, AM) se kao naziv prvi put pojavila 80-ih godina prošlog stoljeća kao treća proizvodna tehnologija, uz formativnu tehnologiju i tehnologiju obrade odvajanjem čestica. [1]

„Aditivna proizvodnja (engleski Additive Manufacturing), dio je proizvodnoga strojarstva koji se bavi izradbom predmeta nanošenjem čestica u tankim slojevima.“ [2]

Glavne prednosti aditivne tehnologije su brzina izrade i mogućnost izrade složenih oblika. U početku se tehnologija koristila za izradu prototipa i modela, a s vremenom se počela koristiti i za visokoprecizne i složene dijelove za automobilsku i zrakoplovnu industriju. Aditivna tehnologija najčešće se koristi za printanje polimernih materijala te se taj dio često naziva 3D-printanje. Ostali materijali kao što su metali, legure i kompoziti se koriste gotovo isključivo u industriji te za njih nema poseban naziv. [1]

Ovaj završni rad vezan je za istraživanja kroz interni znanstveni projekt Veleučilišta u Karlovcu pod nazivom: Utjecaj anatomije i kliničara na pozicioniranje dentalnih vodilica – ADAM (ADAM – Advanced Dental Anatomy Modeling).

1.2. Povijest aditivne tehnologije

Povijest aditivnih tehnologija počinje 1980. godine u Japanu. Dr. Hideo Kodama, istraživač Nagoya Municipal Industrial Research Institute, predao je zahtjev za patentom za metodu fotopolimerizacije. U postupku se koristi tekući polimer (termoset), koji se stvrdne samo na dijelovima koji su izloženi ultraljubičastom svjetlu. Za patentom nije bilo interesa pa se odustalo od daljnjeg razvoja. [1]

1984. godine francuski izumitelji Alain Le Mehaute, Olivier de Witte i Jean Claude André predali su patent za uređaj vrlo sličan uređaju Hidea Kodame. Patent je odbačen zbog manjka potencijala. [1]

Iste godine Charles Hull je predao patent za stereolitografski (STL) uređaj. Uređaj najčešće koristi snop ultraljubičastih zraka. Hull je također uveo STL format koji se i danas koristi za 3D printanje i ostale aditivne tehnologije. Nakon što je 1986. godine dobio patent,

Hull je osnovao 3D Systems Corporation te je počeo proizvoditi prvi komercijalni 3D pisac SLA-1. Cijena mu je bila \$300,000, današnjih \$830,000. [1,3]

1987. godine Carl Deckard prvi je koristio Selective Laser Sintering (SLS) tehniku, povezivanje finog praška u kruti objekt. SLS se masovno počeo koristiti tek 2006. godine. [4]

Na Massachusetts Institute of Tehnology (MIT) 1989. godine patentiran je uređaj za 3D tiskanje. [5]

Također, Fused Deposition Modeling (FDM) je razvijen i patentiran 1989. godine. Ova tehnika je danas najpopularnija među običnim potrošačima i hobistima. Izumitelji Scott i Lisa Crump osnovali su kompaniju Stratasys te 1992. godine počeli prodavati prve FDM pisace. [1]

Tijekom 90-ih godina prošlog stoljeća aditivne tehnologije se počinju primjenjivati i za metale. 1994. godine njemačka kompanija EOS počinje prodavati prvi komercijalni Direct Metal Laser Solidification (DMLS) uređaj. [6]

1.3. Aditivna tehnologija danas

Početkom 21. stoljeća aditivna tehnologija, odnosno 3D pisaci postaju jeftiniji i pristupačniji. 2005. godine RepRap Project je započet s ciljem proizvodnje (replikacije) FDM 3D pisaca na FDM 3D pisacu. Iduće godine su prvi put u tome i uspjeli. [1]

2009. godine ključni patenti za FDM su prešli u javnu domenu što je omogućilo nižu cijenu FDM 3D printera. Prvi takav je bio Cupcake CNC od MakerBot-a. Cijena mu je bila \$649. [1,7]

Prvi „jeftin“ SLA 3D printer bio je Form 1 od Formlabs-a, predstavljen 2012. godine. Cijena mu je bila \$3300. Cijena jedne litre smole potrebne za postupak je bila \$150. [1,8]

2014. godine ključni patenti za SLS metodu prešli su u javnu domenu, pa su se počeli pojavljivati jeftiniji printeri. [1]

2. ADITIVNA TEHNOLOGIJA

2.1. Postupak aditivne proizvodnje općenito

Postupak aditivne proizvodnje obično počinje izradom modela proizvoda u CAD programu. To može biti konstruiranjem od početka ili laserskim skeniranjem već postojećeg predmeta.

Model u CAD programu potrebno je spremiti kao STL datoteku. STL format je s vremenom postao standard na većini uređaja za aditivnu proizvodnju. STL datoteka sadrži samo najpotrebnije informacije o modelu te izračune potrebne za stvaranje slojeva. Model je prikazan uz pomoć velikog broja malih trokuta čiju je veličinu, odnosno ukupan broj moguće namjestiti. Obično ih se namješta da budu manji od rezolucije uređaja, odnosno budu nevidljivi na gotovom proizvodu. Kod stvaranja STL datoteke na modelu može doći do greške na modelu. Postoje posebni programi koji te greške prepoznaju i ispravljaju.

STL datoteku je potrebno prebaciti s računala na uređaj za aditivnu proizvodnju. U ovoj fazi je potrebno provjeriti i namjestiti ispravnu veličinu i orijentaciju modela. Također, moguće je namjestiti poziciju modela na radnoj podlozi te programirati proizvodnju više modela istih ili različitih STL datoteka istovremeno.

Prije početka proizvodnje potrebno je podesiti uređaj za aditivnu proizvodnju. Primjer parametara koji se podešavaju su korištenje različitih materijala tijekom proizvodnje ili određivanje debljina slojeva. Podešavanjem debljih slojeva možemo skratiti vrijeme proizvodnje, ali dobiti proizvod u lošijoj rezoluciji.

Proizvodnja je automatizirani proces koji u većini slučajeva ne treba nadzor. Ipak, potrebno je povremeno provjeriti ima li uređaj dovoljno materijala i je li došlo do nekakve pogreške softvera ili u proizvodnji. Početak procesa je na nekim uređajima djelomično automatiziran pa je na njima potrebna osoba koja kontrolira i upravlja tijekom prvog sloja.

Nakon završetka proizvodnje proizvod se može izvaditi iz uređaja, ali često ne odmah. Potrebno je prvo provjeriti je li se proizvod dovoljno ohladio i je li uređaj zaustavljen. Izvađeni proizvod treba po potrebi očistiti i ukloniti potpore. S nekim proizvodima treba oprezno rukovati jer bez dodatne obrade nemaju željenu čvrstoću.

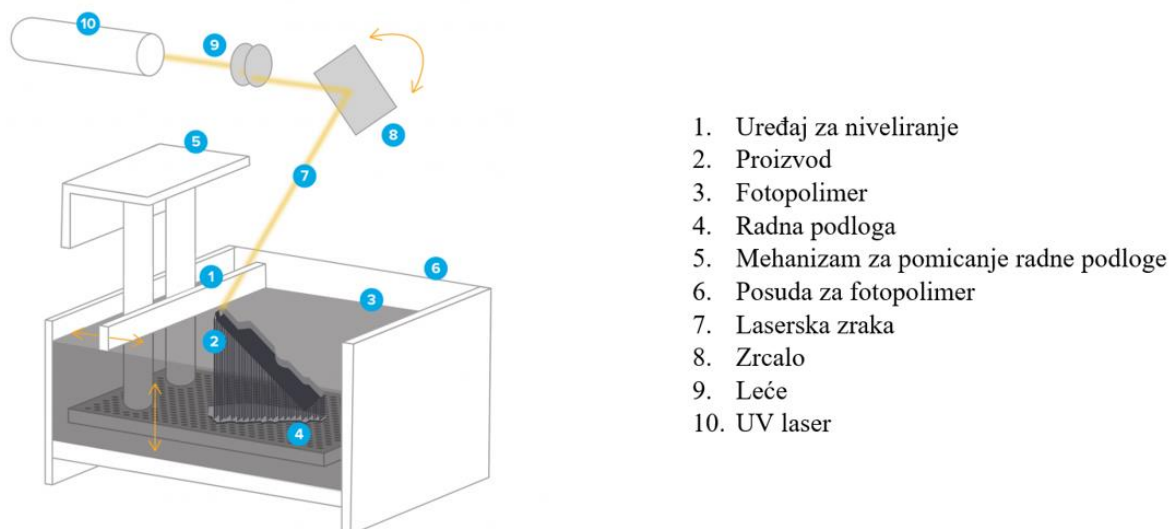
Ukoliko nije potrebna dodatna obrada, proizvod je gotov i spreman za korištenje. Moguće dodatne obrade su brušenje, poliranje, bojanje, lakiranje, sastavljanje s različitim mogućim mehaničkim ili elektroničkim komponentama ili kod određenih načina obrade infiltriranje da bi proizvod očvrstnuo.

Kod gotovih proizvoda treba uzeti u obzir da proizvodi aditivne proizvodnje od istog materijala u usporedbi s proizvodima neaditivnih postupaka obično imaju lošija svojstva. Razlog tome su rupe i mjehurići, propadanje materijala i loše povezivanje slojeva ili različitih materijala unutar sloja. Većina proizvoda aditivnih postupaka su anizotropni, posjeduju različita svojstva u različitim smjerovima. Zbog toga se kod proizvoda aditivne proizvodnje ne očekuju posebno dobra svojstva, ali se razvojem aditivnih tehnologija svojstva proizvoda stalno poboljšavaju pa se širi i primjena za proizvode aditivne tehnologije. [9]

3. OPIS POJEDINIH POSTUPAKA ADITIVNE PROIZVODNJE

3.1. Stereolitografija

Stereolitografija (SL, eng. Stereolithography) je postupak aditivne proizvodnje koji koristi konvencionalne stereolitografske metode s UV polimerizacijom, niskoviskozna polimerna kapljevina se polimerizira sloj po sloj. Materijali (kapljevine) koje se najčešće koriste su akrilne, vinilne i epoksidne smole. Uglavnom se očvršćivanje materijala ostvaruje laserom, ali koriste se i sustavi s propuštanjem UV svjetla kroz staklenu masku, posebni projektori UV svjetlosti, itd. Stereolitografski uređaji se sastoje od Helij-Kadmij ili Argonskog lasera s potrebnom opremom, zrcalom za usmjeravanje zrake, posude s kapljevitim fotopolimerom, podloge koja se može kretati gore-dolje (prema laseru i od lasera) u slojevima prema CAD modelu i uređaja za niveliranje koji sprječava pojavu mjehurića i povećala točnost. [5]



Slika 1. Postupak stereolitografije. [10]

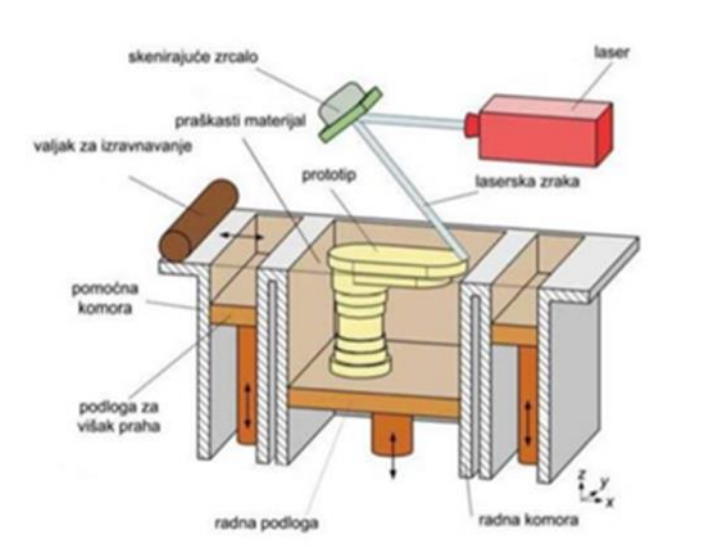
Postupak se sastoji od lasera koji generira UV svjetlost i preko zrcala je usmjerava na fotopolimer koji selektivno očvršćuje sloj po sloj, pritom se povezujući s prošlim slojem. Počinje se od najdonjeg sloja, sa radnom podlogom u najvišem položaju. Kod svakog sloja najčešće se prvo očvršćuju konture po granicama sloja, a zatim unutrašnji dio. U postupku stereolitografije dolazi do skupljanja proizvoda, kod akrilnih fotopolimera do 0.6%. Kod ostalih fotopolimera skupljanje je manje, ali je i cijena proizvoda veća. Završetkom posljednjeg sloja

proizvod se vadi iz posude s fotopolimerom te se ispire posebnim otapalom. U tom trenutku polimerizacija nije dovršena te se proizvod stavlja u uređaj za završno polimeriziranje. Uređaj za završno polimeriziranje proizvod izlaže intenzivnom UV zračenju koje traje najmanje sat vremena. Nakon toga proizvod je potpuno polimeriziran i prestaje biti otrovan. Proizvod se još po potrebi dodatno obrađuje radi postizanja željene kvalitete površine. [5]

Prednosti postupka: mogućnost rada uređaja 24 sata dnevno, visoka razlučivost, mogućnost više različitih boja na jednom proizvodu, nema geometrijskih ograničenja pri proizvodnji, potpuna automatizacija procesa. Nedostatci postupka: potreba za potporama proizvoda, potreba za naknadnom obradom (UV očvršćivanje), skupljanje polimera koje može uzrokovati naprezanja i deformacije, razvijanje otrovnih plinova, fotopolimeri su otrovni u kapljevitom stanju, ograničen broj upotrebljivih materijala, ograničena upotreba zbog svojstava fotopolimera. [5]

3.2. Selektivno lasersko srašćivanje

Selektivno lasersko srašćivanje (SLS, eng. Selective Laser Sintering) je postupak vrlo sličan stereolitografiji, laser preko zrcala selektivno srašćuje materijal u slojevima, razlika je u materijalu koji je praškasti, a ne kapljeviti. Postupak počinje stvaranjem najnižeg sloja s radnom podlogom u najvišem položaju. Svakim sljedećim slojem radna podloga se spušta za sloj, a podloga spremnika za prah se podiže i dodaje prah u radnu komoru. Uređaj za niveliranje služi za nanošenje praha prije započinjanja novog sloja. Nema potrebe za potporom proizvoda tijekom proizvodnje jer ga prašak dovoljno čvrsto pridržava. Da bi se izbjegla interakcija sa zrakom, koristi se inertni plin, najčešće dušik, koji se također i zagrijava na temperaturu blizu talištu praha kako bi se koristio manje intenzivan laser te tako ubrzao postupak i izbjegle deformacije na proizvodu. [5]



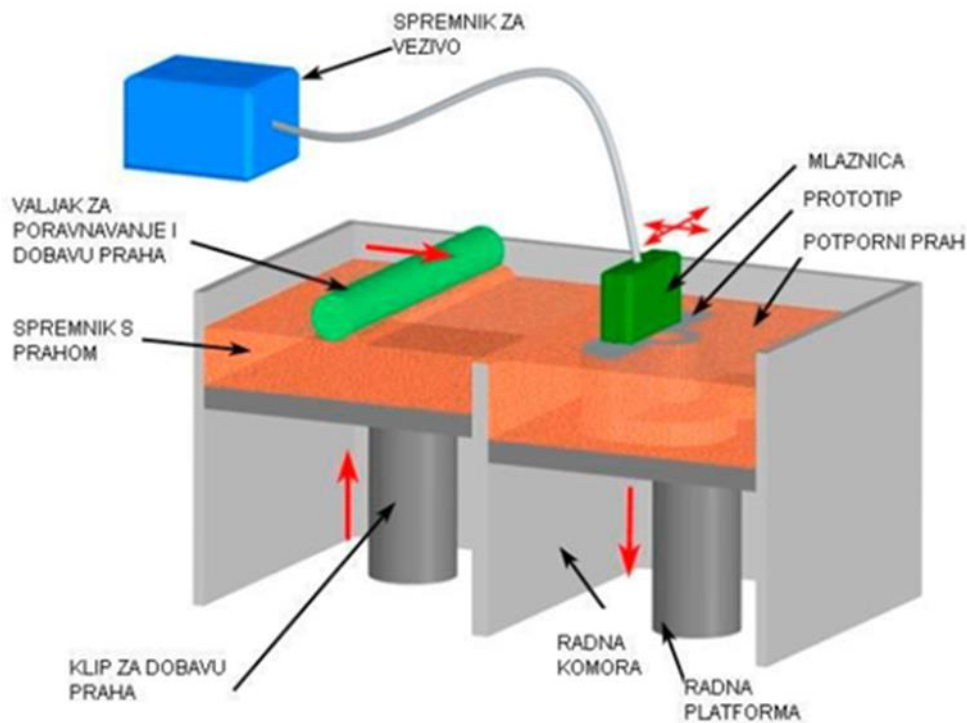
Slika 2. Postupak selektivnog laserskog srašćivanja. [11]

Veličina čestica praha je obično od 0,02 mm do 0,1 mm. Zbog toga proizvodi dobiveni SLS postupkom imaju hrapaviju površinu od proizvoda dobivenih SL postupkom. Hrapavost je posebno izražena kod korištenja polistirena ili polikarbonata jer se njihove čestice uspiju samo djelomično taliti. Nakon završetka postupka i završetka hlađenja proizvoda i uređaja, potrebno je očistiti višak praha sa površine proizvoda. Ukoliko se dio proizvoda razdvoji moguće ga je zalijepiti cijanoakrilatnim ljepilom ili epoksidnom smolom. [5]

Prednosti postupka: moguće korištenje velikog broja različitih materijala, brzina postupka, potpore proizvodu pri proizvodnji nisu potrebne, neiskorišteni prah se može ponovno koristiti. Nedostatci postupka: relativno loša kvaliteta površine proizvoda, moguće srašćivanje okolnog praška što dodatno pogrubljuje površinu proizvoda, pri upotrebi nekih materijala moguća pojava otrovnih plinova. [5]

3.3. 3D tiskanje

3D tiskanje (3DP, eng. 3D printing) je brz, pouzdan i jeftin postupak, te prvi postupak tijekom kojega se ne razvijaju štetni plinovi. Tijekom postupka čestice praha se povezuju vezivom koje se nanosi ink-jet mlaznicama. Uređaj se sastoji od radne komore s pokretnom radnom podlogom, spremnika za prah, valjka za niveliranje praha i ink-jet glave. Postupak počinje nanošenjem praha za najdonji sloj proizvoda i njegovo selektivno vezanje. Za svaki sljedeći sloj dodaje se prah, uklanja višak i dodaje vezivo. [5]



Slika 3. Postupak 3D tiskanja. [12]

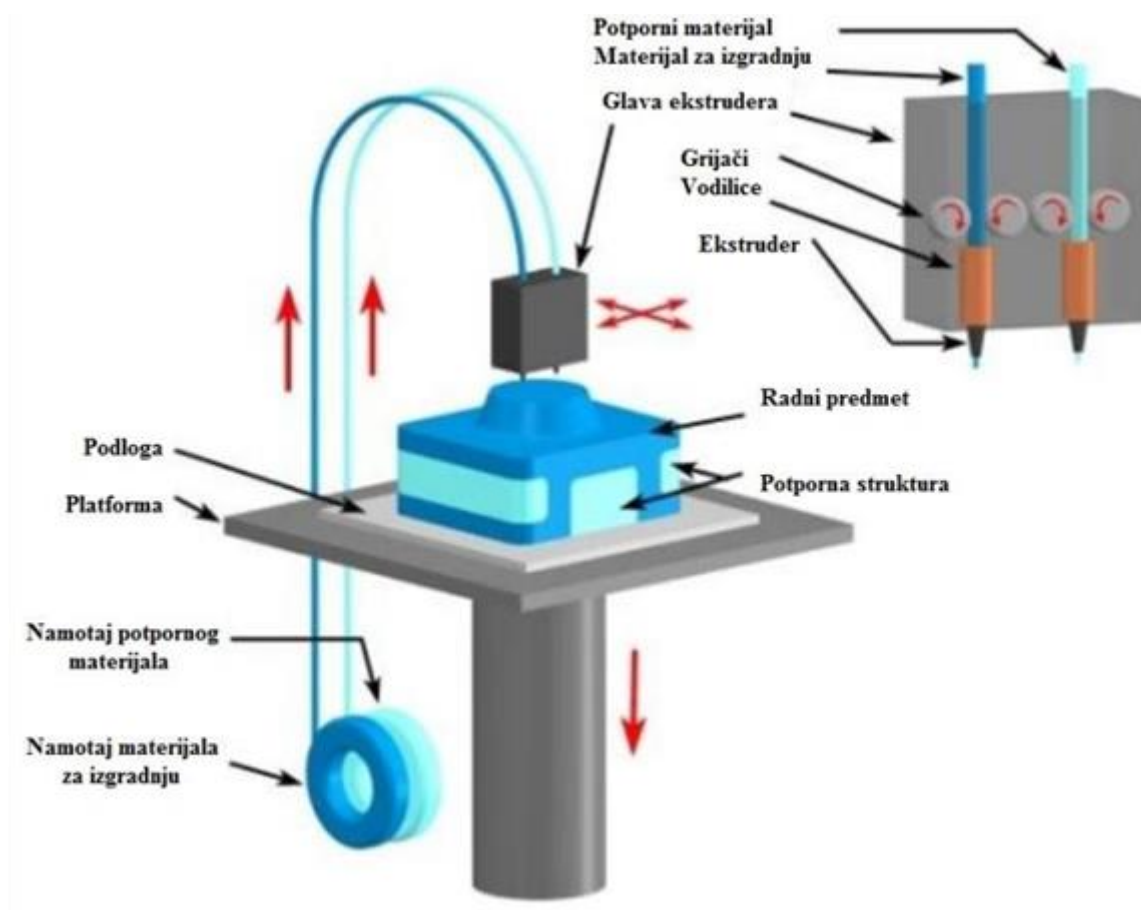
Prednosti postupka su niska cijena, brzina proizvodnje, mogućnost korištenja više različitih materijala na istom proizvodu i mogućnost bojanja materijala za proizvod. Nedostaci postupka su jako ograničeni izbor materijala i loša preciznost uređaja. [5]

3.4. Postupci aditivne proizvodnje temeljeni na ekstrudiranju

3.4.1. Taložno očvršćivanje (FDM)

Uređaji za taložno očvršćivanje (eng. Fused Deposition Modeling) rade po principu NC obradnog centra s tri osi. Dijelovi uređaja su mehanizam za dobavu materijala, mlaznica s grijačem i radna podloga. Kroz mlaznicu prolazi polimerni materijal u obliku žice koju grijač u mlaznici zagrijava malo iznad temperature taljenja. Materijal se nanosi u slojevima, od radne površine prema gore. Zbog toga su kod složenijih proizvoda potrebne potpore. Povezivanje novog sloja sa prošlim je bitno, pa zato mlaznica pritišće novi sloj na prošli i tako djelomice tali prošli sloj. Posljedica toga je da nanoseni materijal gubi kružni presjek i dobiva ovalan presjek. Ovalni presjek daje specifično valovitu površinu. Površina proizvoda je relativno

hrapava, slična proizvodima iz SLS postupka. Da bi se uštedio materijal i ubrzalo vrijeme proizvodnje, proizvodi iz FDM pisaača se rijetko potpuno ispunjavaju. Obično pisaač napravi konturu (shell), a unutrašnjost (infill) ispunjava mrežastom strukturom. Većina proizvoda se ispisiuje s konturom od jednog milimetra i ispunom od dvadeset posto. [5,13]



Slika 4. Postupak taložnog očvršćivanja. [14]

Prednosti FDM postupka su niska cijena uređaja, održavanja uređaja i korištenja uređaja, jednostavna upotreba, proizvodi se ne deformiraju i nema potrebe za hlađenjem i ventilacijom. Nedostatci FDM postupka su potreba za potporom kod složenijih oblika, često je potrebna dodatna obrada proizvoda, slojevi na proizvodu su vidljivi, snižena čvrstoća proizvoda u smjeru okomitom na smjer izrade i potreba za održavanjem iste temperature tijekom proizvodnje radi izbjegavanja mogućeg raslojavanja proizvoda. Postoje dvije vrste FDM printera, industrijski (profesionalni) i prototipni (desktop). Industrijski pisaači imaju nešto veću preciznost, ali obično imaju i veću mlaznicu, odnosno rade deblje slojeve. Radni prostor kod

prototipnih pisača je oko 200x200x200 milimetara, a kod industrijskih često 1000x1000x1000 milimetara. [5,13]

Industrijski pisači često imaju dodatnu mlaznicu za materijal od kojeg se rade potpore. Ti materijali su topivi u vodi ili ih je lako ukloniti da površina proizvoda bude što kvalitetnija. Prototipni pisači potpore rade od istog materijala kojeg je kasnije potrebno odrezati i po potrebi dodatno obraditi površinu proizvoda. Cijene prototipnih pisača su od nekoliko stotina do nekoliko tisuća dolara, a industrijski od nekoliko desetaka tisuća do nekoliko stotina tisuća dolara. [5,13]

3.4.2. Višefazno mlazno očvršćivanje

Višefazno mlazno očvršćivanje (MJS, eng. Multiphase Jet Solidification) je postupak vrlo sličan FDM postupku, razlika je u materijalu koji je mješavina metala ili keramike i polimera. Materijal se najčešće zagrijava do malo ispod temperature tališta u temperiranoj komori te se tali u temperiranoj glavi s mlaznicom. [5]

3.4.3. 3D tiskanje polimernih voštanih proizvoda

Ovaj postupak se temelji na 3D tiskanju, ali pripada ekstrudiranju jer preko ink-jet mlaznica ne uzlazi vezivo nego sam materijal. Glava za tiskanje ima dvije mlaznice, jednu za gradivni materijal i jednu za potporni materijal. Materijal očvršćuje hlađenjem. Postoji i verzija ovog postupka u kojem uređaj ima i mehanizam za planarno glodanje koji povećava preciznost po z osi. [5]

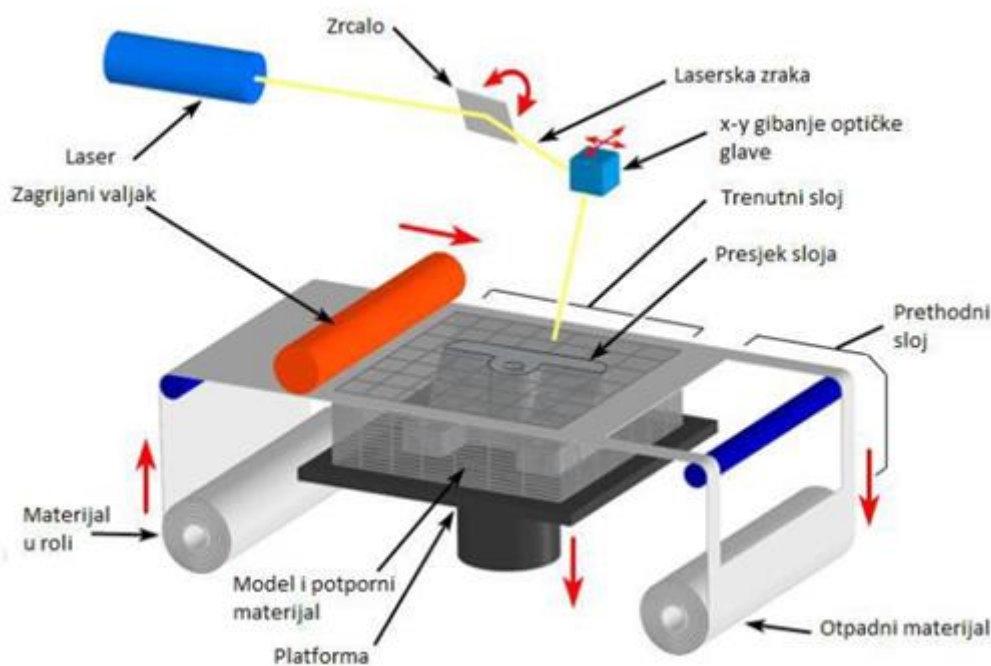
3.5. Slojevita izrada laminiranjem

Postupak slojevite izrade laminiranjem (LLM, eng. Layer Laminate Manufacturing) često se naziva i Izrada objekata laminiranjem (LOM, eng. Laminated Object Manufacturing), ali taj naziv se veže uz jednog proizvođača opreme, tvrtku Helsys. Dio uređaja na kojem se temelji postupak je laser, čija zraka izrezuje prethodno laminiran materijal koji u slojevima ostaje na radnoj podlozi i stvara neki objekt. To znači da je ovo zapravo kombinacija aditivnog postupka i postupka odvajanja čestica. [5]

Za razliku od ostalih postupaka s laserom, u ovom postupku laser mora proći samo po konturi proizvoda te je zbog toga postupak brži, jednostavniji, jeftiniji i moguća je izrada proizvoda većih dimenzija. Proizvodi su najčvršći u smjeru okomitom na slojeve. [5]

LOM postupak počinje pripremanjem uređaja za rad radi sprječavanja stvaranja nabora ili klizanja materijala. Valjci koji osiguravaju dobavu materijala i odnošenje viška materijala se zagrijavaju na temperaturu aktivacije adheziva. Do četiri sloja materijala se zalijepe prije nego laser počne izrezivati konturu proizvoda. Obrada više slojeva odjednom ubrzava proizvodnju, ali su rubovi proizvoda lošije kvalitete. Nakon završetka postupka, višak materijala se ručno odvaja te je potrebno dodatno obraditi površinu. Materijal je jeftin pa su troškovi otpada obično zanemarivi. [5]

Prednosti postupka su brzina postupka, mogućnost izrade proizvoda većih dimenzija, moguća izrada pramodela za 3D postupke brze izrade kalupa, moguća izrada više proizvoda odjednom, nema potrebe za potporama, nema zaostalih naprezanja pa nema ni deformiranja proizvoda, i jeftini materijali. Nedostatci postupka su oskudan izbor materijala, potreba za rashladnim sustavom i podtlačnim sustavom za uklanjanje viška materijala iz sredine proizvoda, anizotropnost i higroskopnost materijala, potreba za dodatnom obradom površine koja je ograničena zbog mogućeg raslojavanja i obično velika količina otpadnog materijala. [5]



Slika 5. Postupak izrade objekata laminiranjem. [15]

SAHP (Selective Adhesive and Hot Press Process) postupak funkcionira po načelu fotokopiranja. Na početku postupka slaže se deset temeljnih slojeva na kojima se gradi proizvod. Sam postupak se sastoji od tri koraka koja se ponavljaju do završetka proizvoda. Prvi korak je selektivno nanošenje tonera u prahu na površinu proizvoda u tom sloju. U drugom koraku se dodaju slojevi papira te se nakon svakog sloja na njega djeluje vrućim prešanjem. Vruće prešanje tali toner, međusobno povezuje i izravnavava slojeve. Treći korak je izrezivanje kontura proizvoda nožem. Višak materijala se odvaja nakon završetka obrade. U SAHP postupku materijal nije u rolama nego u listovima. [5]

LMP (Layer Milling Process) postupak je kombinacija laminiranja i obrade glodanjem. Proizvodi se dobivaju od ploča od bilo kojeg materijala koji se može lijepiti i glodati. Postupak počinje nanošenjem ljepila na ploču i njeno lijepljenje na početnu ploču. Obično treba pričekati barem nekoliko minuta nakon lijepljenja prije glodanja. Glodanje se na proizvod provodi odozdo prema gore. Moguće je glodanje svih slojeva odjednom. Velika prednost LMP uređaja je njegova obrnuta konstrukcija (radni stol i vreteno su obrnuto postavljeni u usporedbi s ostalim obradnim centrima) zbog koje višak materijala odlazi sa proizvoda gravitacijom. Zbog toga je daljnje lijepljenje ploča i obrađivanje jednostavnije. [5]

3.6. Trodimenzijsko taloženje materijala u obliku aerosola

Trodimenzijsko taloženje materijala u obliku aerosola (M³D, eng. Maskless Mesoscale Materials Deposition) je jedini postupak aditivne proizvodnje koji omogućava detalje na razini mikrometra. Postupak počinje u atomizatoru u koji se dobavlja materijal u kapljevitom stanju te se u njemu generira gust aerosol. Iz atomizatora aerosol u struji plina putuje do glave za tiskanje. Zatim se kapljice aerosola nanose na podlogu i tako stvaraju sloj koji može biti debljine samo 10 nanometara. Materijali koji se koriste mogu se nanositi na gotovo bilo koju vrstu podloge. [5]

4. OPIS DOSTUPNIH MATERIJALA ZA ADITIVNU TEHNOLOGIJU

- **Stereolitografija**

Za stereolitografiju se koriste fotoosjetljiva polimerna smola, akrilne i epoksidne smole kao što su PMMA, EP i PE-HD i keramika. [11]

- **Selektivno lasersko srašćivanje**

Materijali koji se najčešće koriste u ovom postupku su polistiren (PS), polikarbonat (PC), poliamid (PA), poliamid sa staklenim vlaknima, polivinilklorid (PVC), elastomeri te keramika, voskovi i metalni prahovi. [5]

- **3D tiskanje**

Materijali koji se koriste za prah mogu biti polimeri, metali i keramike, a vezivni materijal je najčešće polimer. Uz polimer kao vezivo može se dodavati i boja. [5]

- **Taložno očvršćivanje**

Najčešće korišteni materijali kod FDM pisaača su akrilonitril butadien stiren (ABS), polikarbonat (PC), polieterimid (PEI), poliaktid (PLA), termoplastični poliuretan (TPU), poliamid (PA), polietilenketon (PEEK) i polietilen tereftalat (PETG). [13]

- **Višefazno mlazno očvršćivanje**

Mogu se koristiti različiti polimeri, metali i keramika. [5]

- **3D tiskanje polimernih voštanih proizvoda**

U ovom procesu se koristi čvrsti vosak. [5]

- **Slojevita izrada laminiranjem**

Proizvodi se izrađuju od više slojeva papira, polimernih filmova i folija, kompozita s epoksidnom matricom i staklenim ojačalima ili od metalnih ploča. Slojevi se najčešće povezuju adhezivima, najčešće je materijal presvučen polietilenskim adhezivom ili se adheziv dodaje između slojeva tijekom samog procesa proizvodnje. [5]

- **SAHP**

U ovom procesu se koristi papir [5]

- **LMP**

Materijali koji se koriste su najčešće modelarski polimeri, aluminij (za kalupe i alate) ili grafit (za elektrode). [5]

- **Trodimenzijsko taloženje materijala u obliku aerosola**

Materijali koji se koriste su metali, keramika, polimeri, adhezivi i biološke tvari. [5]

5. ODABRANI MATERIJALI I MEHANIČKA SVOJSTVA LJUDSKOG TKIVA

5.1. Odabrani materijali

Za laboratorijsko ispitivanje odabrano je pet materijala:

1. Filaflex 60A „PRO“,
2. Flexible 85A TDS,
3. Flexfill TPU 92A,
4. Elegoo TPU 95A i
5. Flexible 98A TDS.

Svih pet navedenih materijala spadaju u termoplastični poliuretan (TPU). Termoplastični poliuretan je vrsta termoplastičnih elastomera koja se obrađuje taljenjem. Svojstva TPU-a su visoka izdržljivost, fleksibilnost i vlačna čvrstoća, otporan na ogrebotine, otporan na UV zračenje i fleksibilan u širokom temperaturnom rasponu. Mane TPU-a su relativno visoka cijena i složenija obrada. [16]

Filaflex 60A „PRO“

Filaflex 60A „PRO“ je termoplastični poliuretan s tvrdoćom od 63A prema Shoreu te se zbog toga može rastezati do 950%. Proizvođač je tvrtka Recreus, a u srpnju 2024. godine filament je plaćen 53 EUR za 500 grama žice s promjerom od 1.75 milimetara. Proizvođač ne preporuča printanje na All-metal hotendima i 3D printerima s Bowden sustavom ekstruzije te ne preporuča korištenje osobama s malo iskustva u 3D printanju. [17]

Flexible 85A TDS

Flexible 85A TDS je termoplastični poliuretan s tvrdoćom između 85A i 88A prema Shoreu. Istezljivost mu je do 660%. Materijal se prema proizvođaču minimalno savija i skuplja i da je srednje težak za korištenje. Mogući su problemi pri printanju na 3D printerima s Bowden sustavom ekstruzije. Proizvodi ga tvrtka Azurefilm, a plaćen je 26.90 EUR za 650 grama u žici promjera 1.75 milimetara u srpnju 2024. godine. [18]

Flexfill TPU 92A

Flexfill TPU 92A je termoplastični poliuretan s tvrdoćom od 91A prema Shoreu. Istezljivost mu je do 600%. Materijal je izdržljiv, savitljiv i otporan na udarce. Materijal se može koristiti

na većini 3D printera bez većih problema. Materijal proizvodi tvrtka Fillamentum, a plaćen je 38 EUR za 500 grama u žici promjera 1.75 milimetara u srpnju 2024. godine. [19]

Elegoo TPU 95A

Elegoo TPU 95A je termoplastični poliuretan s tvrdoćom od 95A prema Shoreu. Istezljivost mu je do 500%. Materijal ima dobru otpornost na trošenje, abraziju, UV svjetlo i ulja. Proizvođač materijala je tvrtka Elegoo, a cijena za 1 kilogram žice promjera 1.75 milimetara je 17.99 EUR u listopadu 2024. godine. [20]

Flexible 98A TDS

Flexible 98A TDS je termoplastični poliuretan s tvrdoćom od 98A prema Shoreu. Istezljivost ovog materijala je do 350%. Materijal je jako fleksibilan i izdržljiv te se minimalno skuplja i savija. Većina 3D printera se može koristiti za printanje ovog filameta. Materijal proizvodi tvrtka Azurefilm, a plaćen je 25.90 EUR za 650 grama u žici promjera 1.75 milimetara u srpnju 2024. godine. [21]

Tablica 1. Usporedni prikaz svojstava odabranih materijala iz tehničkih listova [20, 22, 23, 24, 25]

Svojstva materijala	Naziv materijala					
	Filaflex 60A "PRO"	Flexible 85A TDS	Flexfill TPU 92A	Elegoo TPU 95A	Flexible 98A TDS	
Gustoća materijala (g/cm ³)	1.07	1.11-1.13	1.2	-	1015-1.17	
Tvrdoća (Shore A)	63	85-88	91	95	98	
Vlačna čvrstoća (Mpa)	26	26	49	-	45	
Vlačno naprezanje pri istezanju 300% (Mpa)	-	-	16	-	15	
Sila potrebna za pucanje (N/mm)	40	-	85	-	120	
Istezanje pri pucanju (%)	950	660	600	500	350	
Otpornost površine na trošenje (mm ³)	45	-	30	-	30	

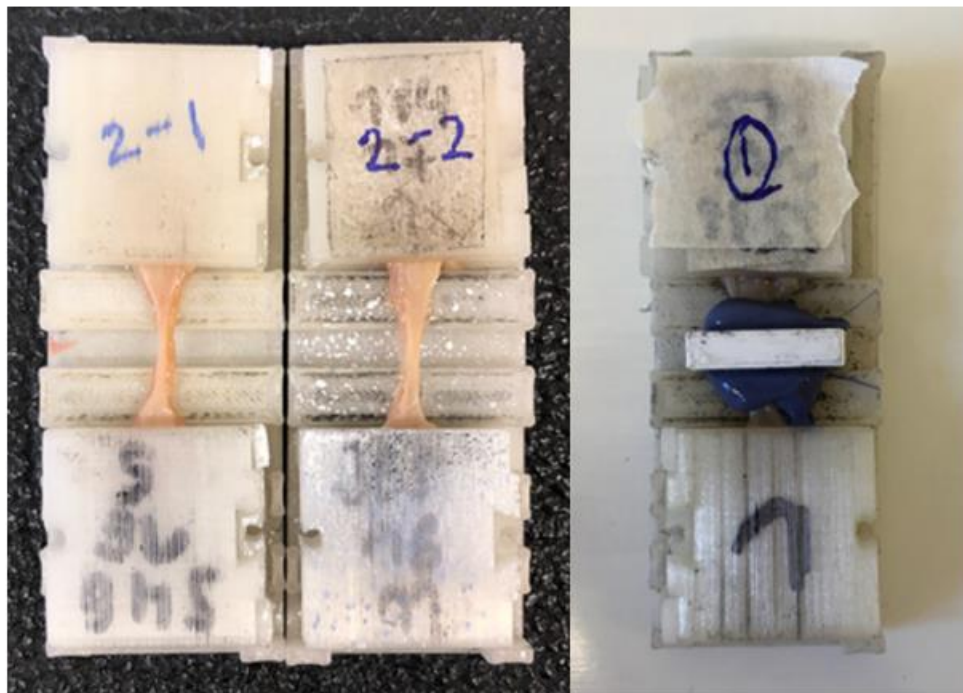
5.2. Mehanička svojstva ljudskog tkiva

Usna šupljina je obložena sluznicom. Sluznica (mukoza) je unutarnji glatki ili naborani sloj tkiva koji oblaže šuplje organe i neke tjelesne šupljine. Sastoji se od pokrovnog epitela i sloja rahloga vezivnoga tkiva u kojem se nalaze sitni ogranci krvnih i limfnih žila, glatke mišićne stanice te žlijezde koje stvaraju sluz. Sluznica svojim pokrovnim epitelom i zaštitnim slojem vlažne sluzi čuva od štetnih utjecaja organe dišnoga, probavnoga, mokraćnoga, spolnog i drugih sustava. U područjima tjelesnih otvora, sluznica se nastavlja izravno na kožu. [26]

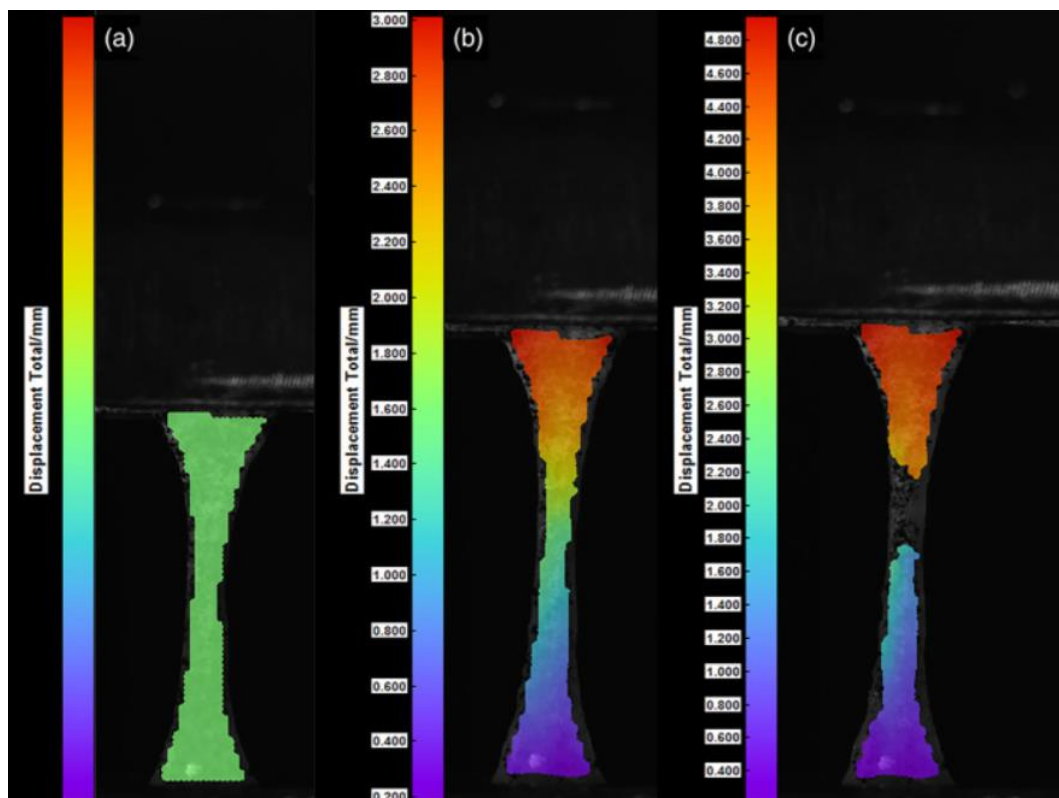
Na oralnu sluznicu (mukozu) tijekom žvakanja djeluje velik broj vanjskih sila. Izdržljivost mukoze uvjetovana je debljinom epitela i količinom kolagenih vlakana u submukozi (podsluznici) koja reguliraju mehanička svojstva. [27, 28]

U pacijenata koji imaju zube sile tijekom žvakanja se rasprše na cijelu čeljust. Kod bezubih pacijenata sile se prenose direktno na oralnu mukozu i uzrokuju promjenu vezivnog i epitelnog tkiva. Uz vezivno i epitelno tkivo propada i mreža kolagenih vlakana u regijama na koje sile najviše djeluju. Promjena u kolagenim vlaknima utječe na otpornost tkiva koje utječe na dinamička svojstva. Promjene u dinamičkim svojstvima mukoze čine ju skloniju promijenama i ozljedama i smanjuje se prag boli pri utjecaju sila. Temeljna mukoza ima svojstva „jastuka“ koji ublažava i podnosi trenutne ili opetovane pritiske i opterećenja. Oralna mukoza se pokazuje kao jako deformabilna, te modul elastičnosti varira u velikom rasponu. Mukoza je heterogeni materijal čija trenutačna čvrstoća ovisi o čvrstoj strukturi matriksa (epitelni sloj, fibrozna vlakna, krvne žile...) i tekuće komponente. [27, 28]

Provesti testiranja oralne sluznice (mukoze) je teško iz više razloga, te su zato starija istraživanja netočna. Ali današnji način balzamiranja kadavera, čuva plastičnost tkiva slično živom tkivu na makroskopskoj razini i zato je pogodno za istraživanje. Takvi načini balzamiranja nisu idealni jer se ne mogu savršeno očuvati kolagena vlakna. Zbog toga se ne mogu izmjeriti količinu plastične deformacije, ali se mogu izmjeriti modul elastičnosti i vlačna svojstva na različitim lokacijama oralne mukoze. [27, 28]



Slika 6. Uzorci tkiva. [27]



Slika 7. Prikaz opterećenja uzorka tkiva. [27]

Najviši prosječan modul elastičnosti od 37.4 +/-17.4 MPa je nađen u pričvršćenoj gingivi. Pričvršćena gingiva je dio gingive koji je čvrsto spojen za zub i kost, odnosno povezuje zub i tvrdo nepce, te izlazi na površinu, za razliku od slobodne gingive koja se nalazi između zubi. Zatim su bili uzorci tvrdog nepca kojima je modul elastičnosti 18.1 +/-4.5 MPa. Tvrdo nepce je tanka vodoravna koštana ploča ljudske lubanje koja je smještena u krovu usne šupline, te se proteže u obliku koji je formiran gornjim zubima. Zadnja je bukalna mukoza kojoj je modul elastičnosti 8.3 +/-5.8 MPa. Bukalna muloza je sluznica koja oblaže musculus buccinator koji čini obraz (lateralna omeđenja usne šupline). Vlačna čvrstoća između uzoraka tkiva je u rasponu od 1.5 +/-0.5 MPa do 3.8 +/-0.9MPa. SEM (Skenirajući elektronski mikroskop) je otkrio različitu preraspodjelu kolagenih vlakana u tkivima koji su uzeti sa tri različita intraoralna mjesta. Tkivo pričvršćene gingive je pretežno građeno od jednosmjernih mreža kolagenih vlakana i razgranatog elastina. Tvrdo nepce je građeno od gušće strukture vlakana i retikularnog tkiva koje je višesmjerno. Kod tvrdog nepca su kolagena vlakna su gušća, deblja i nasumičnog usmjerenja. Bukalna mukoza je građena od tanjih skupova vlakana usmjerenih u različitim smjerovima. Gingiva ima gusto posložena vlakna u smjeru okomitom na opterećenje. Također ima najveću količinu elastičnih vlakana i najniži postotak masnoće. Gingiva pokazuje najveće svojstvo anizotropnosti. Bukalna mukoza ima svojstvo izotropnosti. Tvrdo nepce je po svojim svojstvima i građi između gingive i bukalne mukoze. Tkiva u usnoj šupljini su izložena širokom rasponu mehaničkih sila, uključujući hidrodinamičke sile, pritisak, napetost, trenje i smicanje koji proizlaze iz gutanja sline, govora i mastikacije. U gingivi se nalaze krvne žile i poznato je da postojanje krvnih žila u kojima postoji hemodinamički tlak utječe na biomehanička svojstva. Opterećenje se prenosi preko valovitih vlakana tkiva na koti lubanje. Rezultati ispitivanja pokazuju da gingiva može podnijeti veće opterećenje u usporedbi sa tkivom tvrdog nepca i bukalne mukoze jer ta dva potonja imaju više nasumično raspoređena vlakna koja daju lošiju potporu tijekom mastikacijskog opterećenja. Bukalna mukoza ima smanjenu izloženost abrazivnim silama, labavo je vezana za kost i posjeduje neoroženi epitel (epitel koji se ne obnavlja), te zbog toga bukalna mukoza ima najlošija mehanička svojstva.

Ovakva istraživanja pomažu budućim istraživanjima u strojarstvu i medicini za pomoć ljudima s oštećenim tkivima usne šupline i ljudima s zubnim protezama. [27, 28]

Tablica 2. Mehanička svojstva gingive [27]

Vrijednost	Youngov modul elastičnosti (Mpa)	Vlačno naprezanje (Mpa)
Maksimalna vrijednost	54.72	4.75
Srednja vrijednost	37.36 (± 17.36)	3.81 (± 0.94)
Minimalna vrijednost	20	2.87

Tablica 3. Mehanička svojstva tvrdog nepca [27]

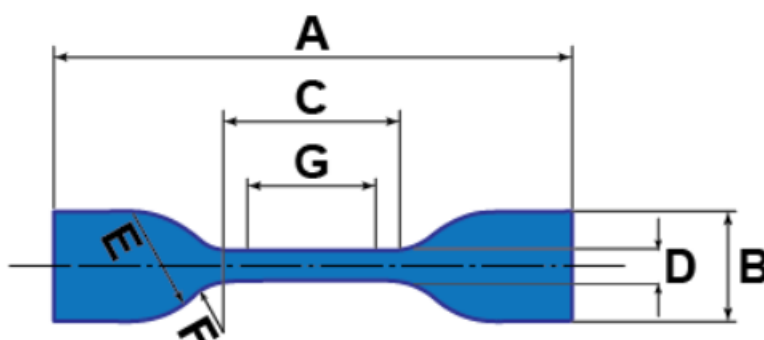
Vrijednost	Youngov modul elastičnosti (Mpa)	Vlačno naprezanje (Mpa)
Maksimalna vrijednost	22.64	2.57
Srednja vrijednost	18.13 (± 4.51)	1.7 (± 0.87)
Minimalna vrijednost	13.62	0.83

Tablica 4. Mehanička svojstva bukalne mukoze [27]

Vrijednost	Youngov modul elastičnosti (Mpa)	Vlačno naprezanje (Mpa)
Maksimalna vrijednost	14.11	2.06
Srednja vrijednost	8.33 (± 5.78)	1.54 (± 0.52)
Minimalna vrijednost	2.55	1.02

6. ISPIS EPRUVETA NA FDM UREĐAJU

Za potrebe ispitivanja vlačne čvrstoće na kidalici ispisano je pet epruveta po materijalu. Epruvete su ispisane u dimenzijama prema ISO 37 standardu za određivanje svojstava vlačnog naprezanja i deformacije za vulkaniziranu ili termoplastičnu gumu. Standardni oblik epruvete za ispitivanje vlačne čvrstoće je oblik pseće kosti. Zbog svojstava materijala i dimenzija uređaja za ispitivanje postoje različiti tipovi prema dimenzijama epruveta. Svi uzorci su ispisani u tipu 1A, s točnosti od +/- 0,3 milimetra. Ispitivanje je pokazalo da je za materijal Filaflex 60A „PRO“ tip 1A prevelik na kidalici koja je korištena, te je naknadno taj materijal ispisan u tipu 2. Brzina kidalice prema ISO 37 standardu za tipove 1A i 2 je 500 mm/min. [29]



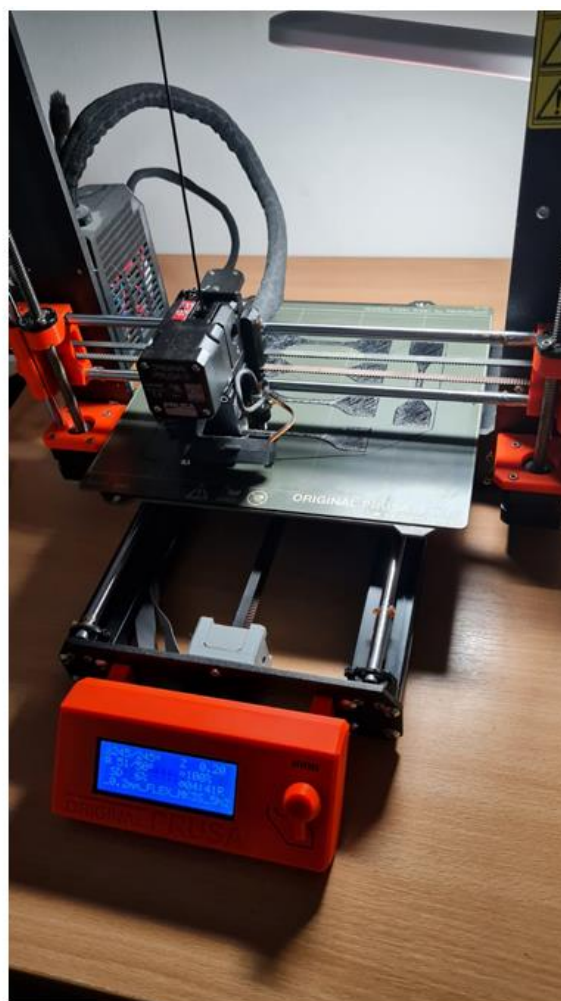
Slika 8. Epruveta prema ISO 37 standardu [29]

Mjere epruveta	Tipovi epruveta				
	Tip 1	Tip 1A	Tip 2	Tip 3	Tip 4
Ukupna duljina (A)	115	100	75	50	35
Širina (B)	25	25	12.5	8.5	6
Duljina uskog dijela (C)	33	21	25	16	12
Širina uskog dijela (D)	6.2	5	4	4	2
Prijelazni vanjski polumjer (E)	14	11	8	7.5	3
Prijelazni unutarnji polumjer (F)	25	25	12.5	10	3
Duljina ispitnog dijela (G)	25	20	20	10	10

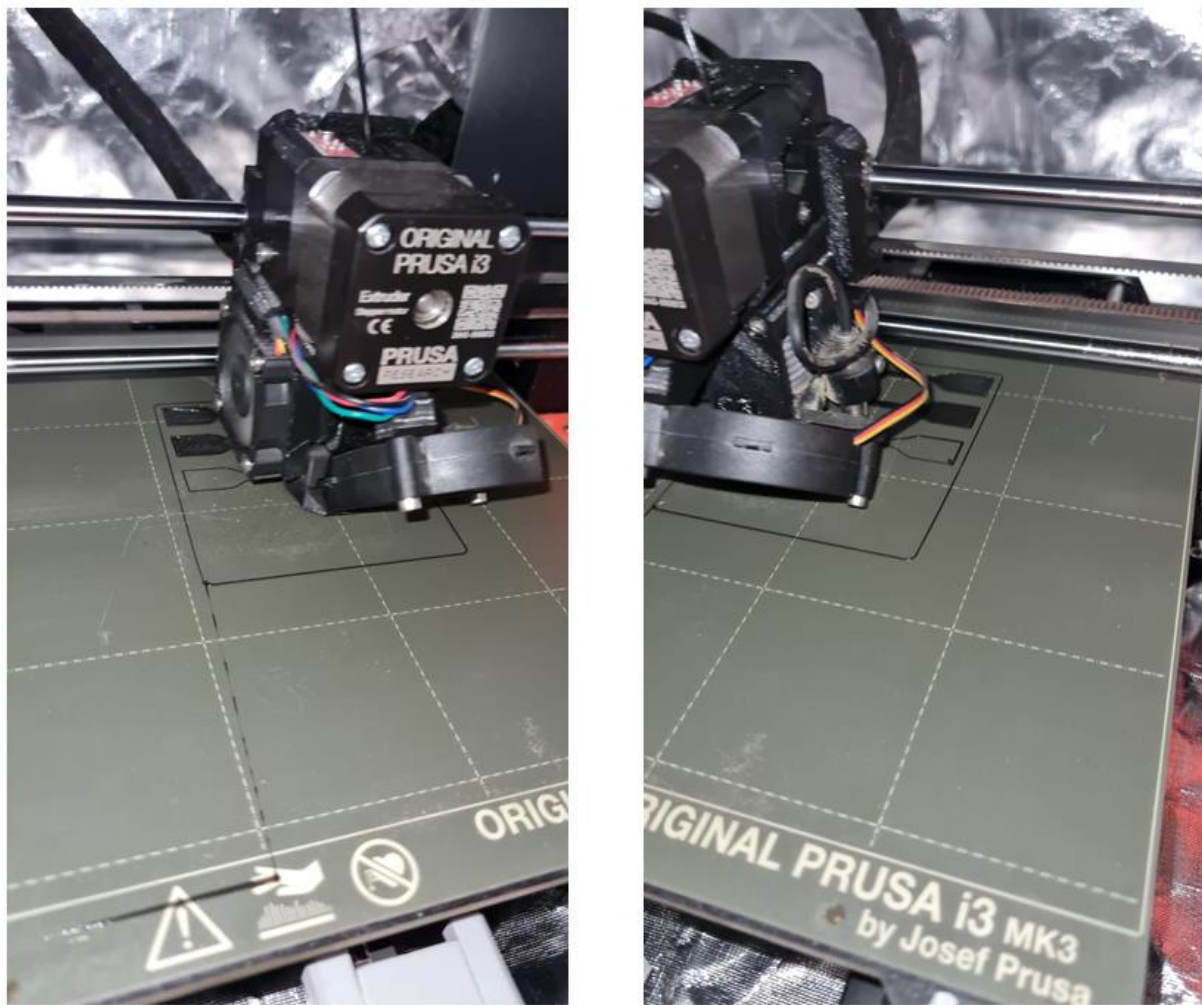
Tablica 5. Dimenzije epruveta u milimetrima prema ISO 37 standardu [29]

Za ispis epruveta korišten je 3D pisac Prusa i3 MK3S+. Prusa i3 MK3S+ je 3D pisac koji ima radni prostor dimenzija 250x210x210 milimetara, te zbog Bondtech ekstrudera može ispisivati i elastične materijale kao što je TPU. [30]

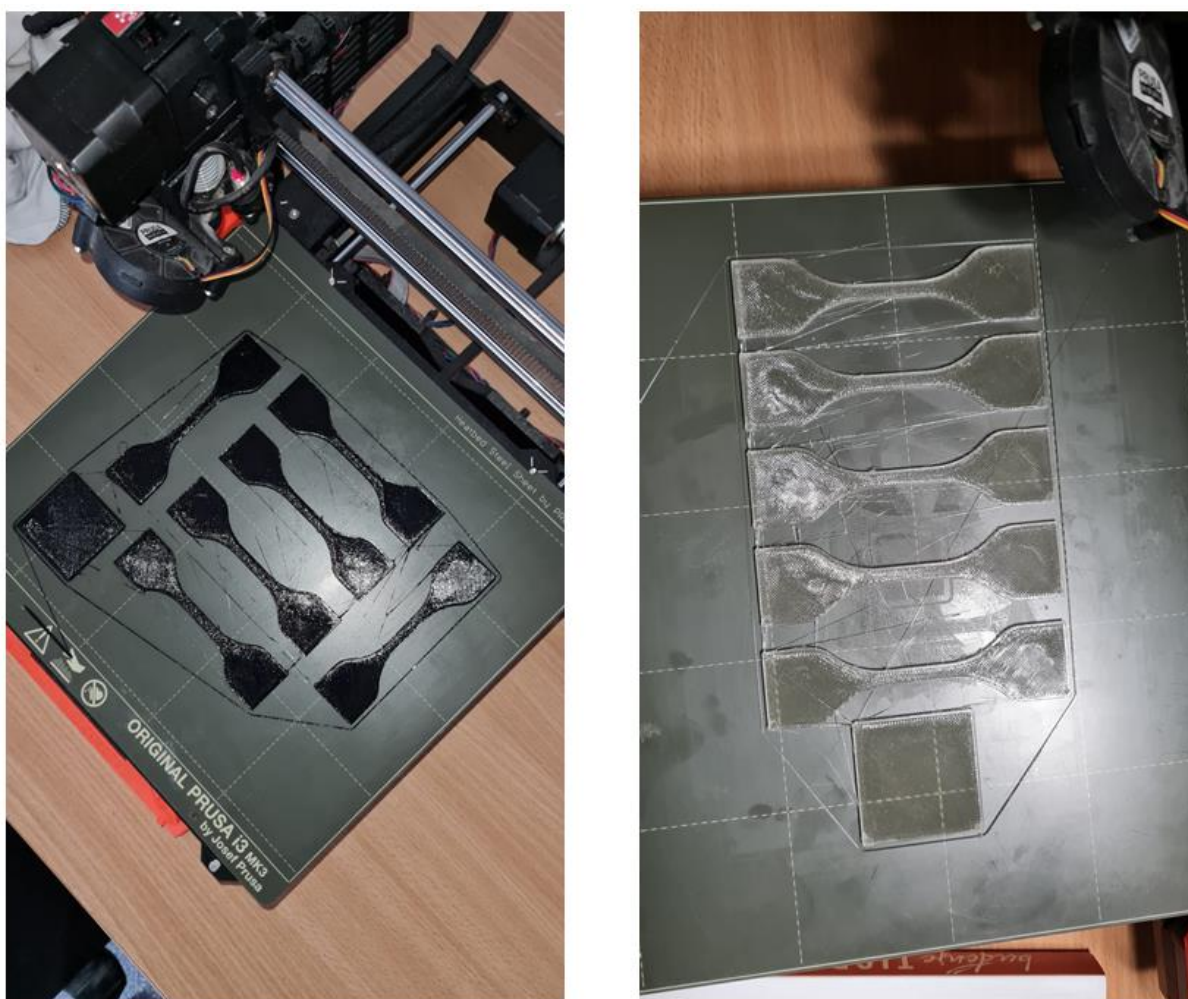
Za ispis TPU-a potreban je 3D pisac bez Bowdenove cijevi zbog mogućeg začepljenja. Prije samog ispisa potrebno je namjestiti parametre ispisa. Proizvođači uz svaki materijal daju preporučene postavke, ali njih se uzima u obzir samo okvirno jer je svaki model 3D pisaca različit. Prije ispisa uzoraka napravi se probni uzorak za potvrdu parametara. Zatim se ispisuje svih pet uzoraka i uzorak za ispitivanje tvrdoće. Postupak se ponavlja za svaki materijal. Uz ispis od oko 40mm/s, ispis uzoraka za svaki materijal traje oko 5 sati. Za parametre slojeva je korišten Prusa Slicer.



Slika 9. Postupak 3D ispisa Elegoo TPU 95A



Slika 10. Postupak 3D ispisa Filaflex 60A „PRO“ tip 2 prema standardu ISO 37



Slika 11. Završetak 3D ispisa, lijevo Elegoo TPU 95A, desno Flexible 85A TDS

Tablica 6. Parametri ispisa

PARAMETRI ISPISA					
MATERIJAL	TPU 98A	TPU 95A	TPU 92A	TPU 85A	TPU 60A
VISINA PRVOG SLOJA	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm
VISINA SLOJA	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm
ISPUNJENOST	100%	100%	100%	100%	100%
TIP ISPUNE	rectilinear	rectilinear	rectilinear	rectilinear	rectilinear
ŠIRINA BRIM-a	/	/	/	/	/
BRZINA ISPISA	30 mm/s	45 mm/s	45 mm/s	30 mm/s	40 mm/s
T.M.N.P.S	240°C [Ⓢ]	245°C [Ⓢ]	245°C [Ⓢ]	240°C [Ⓢ]	225°C [Ⓢ]
T.M.N.O.S	242°C [Ⓢ]	248°C	248°C [Ⓢ]	240°C [Ⓢ]	238°C [Ⓢ]
TEMPERATURA "BED-a"	50°C	50°C	50°C	50°C	50°C
RETRAKCIJA	2 mm	2 mm	2 mm	2 mm	2 mm
BRZINA RETRAKCIJE	40 mm/s	40 mm/s	40 mm/s	40 mm/s	40 mm/s

Tip ispune koji je korišten je rectilinear, jedini koji se može koristiti za 100% ispune koja je bila potrebna zbog laboratorijskog ispitivanja. Ovaj tip ispune se dobiva ispisom materijala unutar kontura u paralelnim linijama, sa svakim sljedećim slojem okomitim na prošli. Prednosti ovog tipa su brzina ispisa i nema nakupljanja materijala na križanjima materijala. Primjeri ostalih ispuna su kvadrati (eng. cubic), mreža (eng. grid), trokuti (eng. triangles), zvijezde (eng. stars), pčelinje saće (eng. honeycomb), itd. [31]

Brim nije korišten jer nije bilo potrebe. Brim je rub koji se ispisuje u početnom sloju izvan konture proizvoda radi sprječavanja odvajanja, skupljanja i deformiranja početnog sloja. [32]

T.M.N.P.S. je temperatura mlaznice na prvom sloju. T.M.N.O.S. je temperatura mlaznice na ostalim slojevima.

Retrakcija je mogućnost 3D pisaa da povuče filament unazad dok glava mijenja poziciju, a ne ispisuje. Retrakcijom se smanjuje mogućnost pojavljivanja niti koje je kasnije potrebno očistiti. Duljinu i brzinu retrakcije je potrebno namjestiti prema materijalu koji se ispisuje. Prevelika duljina retrakcije može izazvati začepljenje glave pisaa. Prevelika brzina retrakcije može izazvati pucanje filameta. Premala duljina i brzina nemaju nikakav učinak, kao da retrakcije ni nema. [33]

7. ISPITIVANJE EPRUVETA

Ispitivanje uzoraka je provedeno na kidalici Shimadzu AG-X koja se nalazi u laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu. Tijekom ispitivanja mjere se sile i produljenje epruveta. Kidalicom se upravlja programskim paketom Trapezium X koji provodi ispitivanje, te ispisuje rezultate i Hookeov dijagram. Prije ispitivanja potrebno je izmjeriti i izračunati površinu presjeka epruvete i izmjeriti početnu duljinu epruvete koja se mjeri unutar čeljusti kidalice. Pomoću tih rezultata, te rezultata dobivenih ispitivanjem na kidalici, za svaku epruvetu izračunati su vlačna čvrstoća (R_m), naprezanje pri prekidu (R_k), produljenje (ΔL), istežanje nakon loma epruvete (ϵ) i Youngov modul elastičnosti (E).



Slika 12. Kidalica Shimadzu AG-X

7.1. Izrazi za računanje

Vlačna čvrstoća:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (1)$$

R_m – Vlačna čvrstoća; N/mm²

F_m – Maksimalna sila opterećenja; N

S_0 – Površina početnog poprečnog presjeka epruvete; mm²

Naprezanje pri prekidu:

$$R_k = \frac{F_k}{S_0} \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (2)$$

R_k – Naprezanje pri prekidu; N/mm²

F_k – Sila loma; N

S_0 – Površina početnog poprečnog presjeka epruvete; mm²

Istezanje nakon loma:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \quad (3)$$

ε – Istezanje; mm/mm

ΔL – Produljenje epruveta; mm

L_0 – Početna duljina epruvete; mm

Youngov modul elastičnosti:

$$E = \frac{R_e}{\varepsilon} \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (4)$$

E – Modul elastičnosti; N/mm²

R_e – Granica razvlačenja; N/mm²

ε – Istezanje; mm/mm

Teorijsku granicu razvlačenja R_e je teško izračunati pa se umjesto nje koristi konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0.2}$. $R_{p0.2}$ je naprezanje koje uzrokuje trajnu deformaciju epruvete od 0.2%. $R_{p0.2}$ se određuje grafički. [34]

7.2. Rezultati ispitivanja - Filaflex 60A „PRO“

Ispitivanje Filaflex 60A „PRO“ je provedeno tek iz drugog pokušaja zbog velike istežljivosti materijala. Prva testirana epruveta je bila tip 1A prema ISO 37 standardu, te se pokazala predugačka za korištenu kidalicu. Kidalica je postigla svoju maksimalnu duljinu, a epruveta nije pokazivala znakove skorog pucanja. Drugi pokušaj ispitivanja je proveden s epruvetama tipa 2 prema ISO 37 standardu. Prva epruveta opet nije uspjela puknuti, ali ostale jesu, te su dale rezultate iz tablice broj 6. Slika 13. prikazuje epruvete Filaflex 60A „PRO“ prije ispitivanja, a slika 14. prikazuje epruvete nakon ispitivanja.

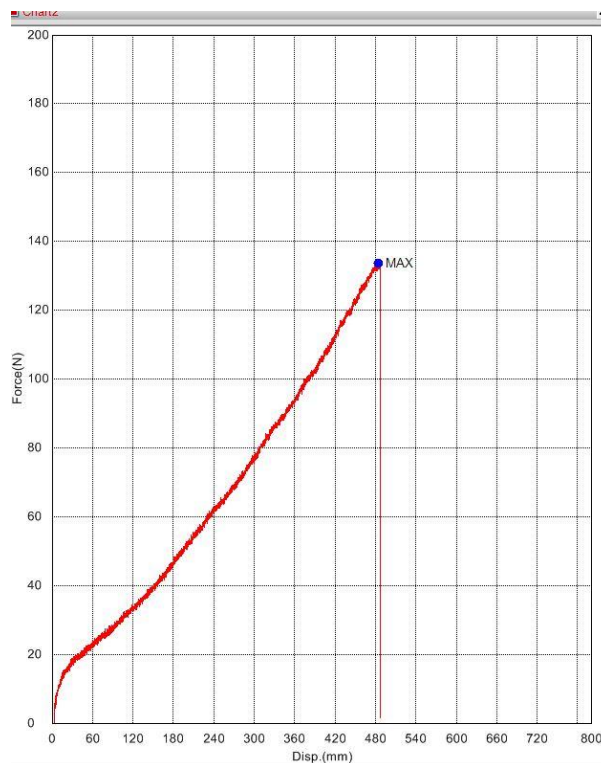


Slika 13. Epruvete Filaflex 60A „PRO“

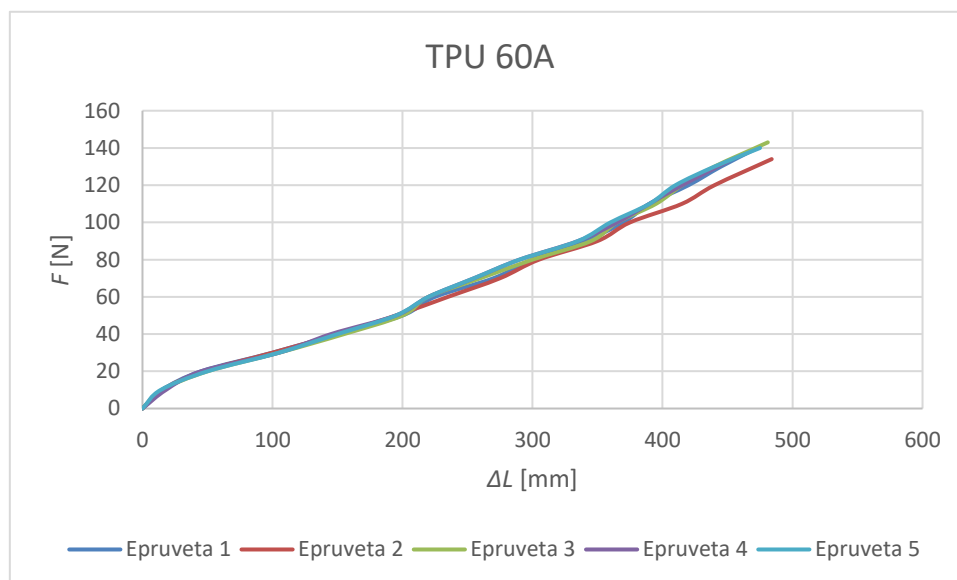


Slika 14. Epruvete Filaflex 60A „PRO“ nakon ispitivanja na kidalici

Na slici 15. prikazan je dijagram sila / produljenje dobiven pri ispitivanju epruvete TPU 60A 2 na kidalici, a na slici 16. su dijagrami sila / produljenje od svih epruveta TPU 60A. Tablica 6. prikazuje vrijednosti dobivene na kidalici i izračunate vrijednosti za Filaflex 60A „PRO“.



Slika 15. Dijagram sila / produljenje dobiven na kidalici za epruvetu TPU 60A 2



Slika 16. Dijagram sila / produljenje za TPU 60A

Tablica 7. Mehanička svojstva Filaflex 60A „PRO“

TPU 60A									
Epruveta	Maksimalna sila (F_m) N	Sila loma (F_k) N	Konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0,2}$) MPA	Vlačna čvrstoća (R_m) MPA	Naprezanje pri prekidu (R_k) MPA	Produženje (ΔL) mm	Istezanje (ϵ) mm/mm	Youngov modul elastičnosti (E) MPA	
1 *	140.397	140.397	2.78	18.1861399	18.1861399	472.877	13.70657971	1.9152	
2	133.753	133.753	2.91	17.40895484	17.40895484	483.961	14.4898503	1.7726	
3	143.115	143.115	2.96	18.91554322	18.91554322	481.294	12.34087179	1.9575	
4	133.085	133.085	2.89	17.32155873	17.32155873	451.378	12.23246612	1.1064	
5	139.761	139.761	2.95	18.09813011	18.09813011	474.711	12.07916031	1.9122	

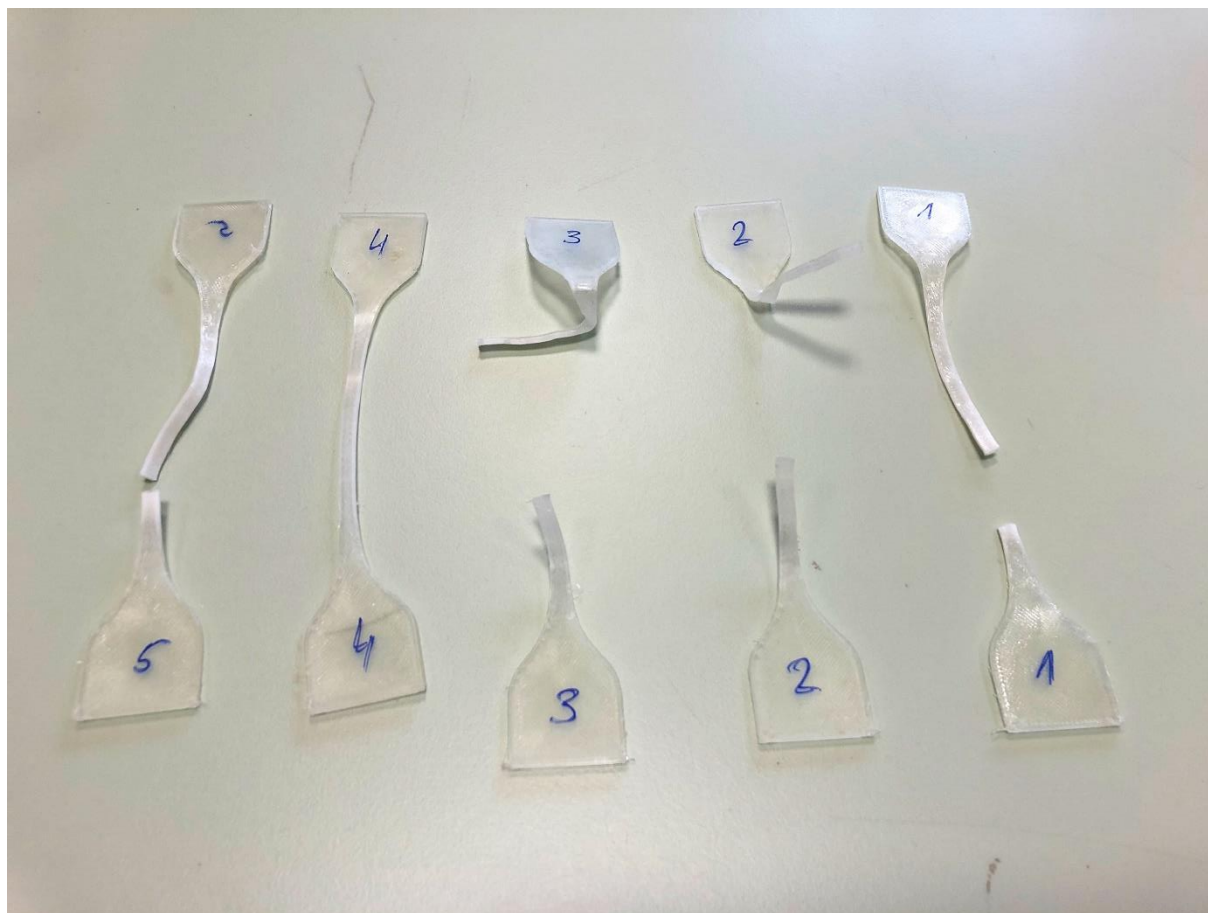
* Epruveta 1 nije puknula.

7.3. Rezultati ispitivanja Flexible 85A TDS

Tijekom ispitivanja epruveta broj četiri nije puknula, ispala je iz čeljusti kitalice. Slika 17. prikazuje epruvete Flexible 85A TDS prije ispitivanja, a slika 18. prikazuje epruvete nakon ispitivanja.

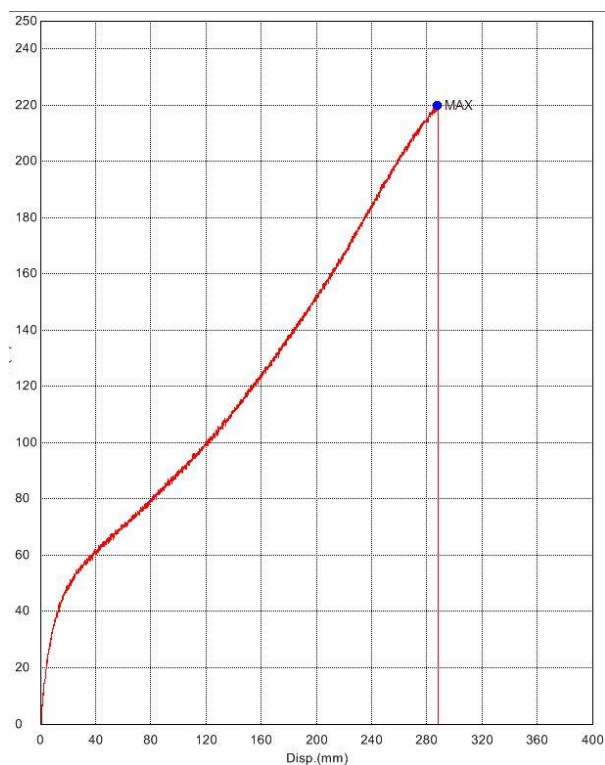


Slika 17. Epruvete Flexible 85A TDS

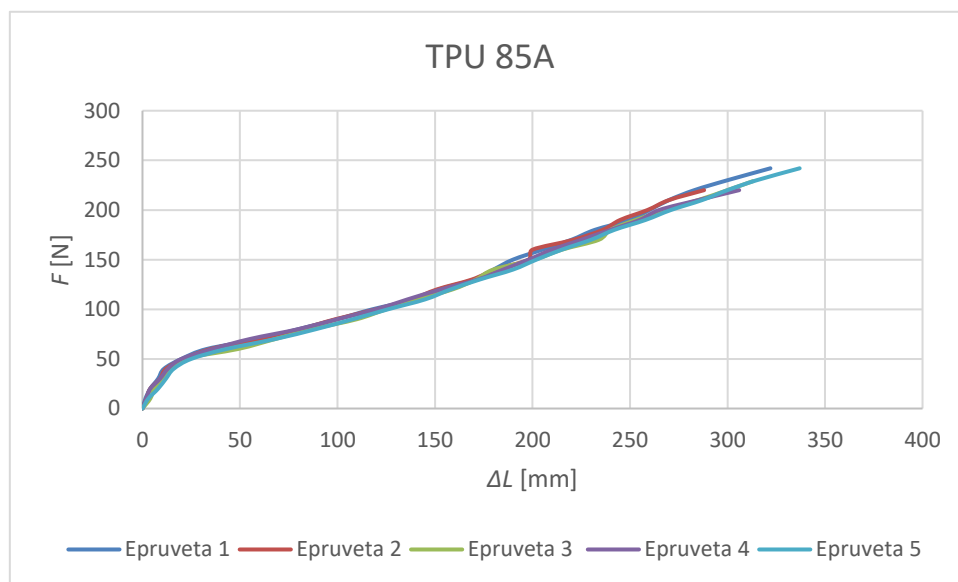


Slika 18. Epruvete Flexible 85A TDS nakon ispitivanja na kidalici

Na slici 19. prikazan je dijagram sila / produljenje dobiven pri ispitivanju epruvete TPU 85A 2 na kidalici, a na slici 20. su dijagrami sila / produljenje od svih epruveta TPU 85A. Tablica 7. prikazuje vrijednosti dobivene na kidalici i izračunate vrijednosti za Flexible 85A TDS. Rezultati vidljivi na slici 20. i tablici 7. za ispitivane materijale su slični, nema većih odstupanja.



Slika 19. Dijagram sila / produljenje dobiven na kidalici za epruvetu TPU 85A 2



Slika 20. Dijagram sila / produljenje za TPU 85A

Tablica 8. Mehanička svojstva Flexible 85A TDS

TPU 85A									
Epruveta	Maksimalna sila (F_m) N	Sila loma (F_b) N	Konvencionalna granica razvlačenja ($R_{P0,2}$) MPA	Vlačna čvrstoća (R_m) MPA	Naprezanje pri prekidu (R_k) MPA	Produženje (ΔL) mm	Istezanje (ϵ) mm/mm	Youngov modul elastičnosti (E) MPA	
1	241.677	241.677	3.9	21.71401617	21.71401617	322.128	6.077886792	16.312	
2	219.806	219.806	3.92	19.74896676	19.74896676	287.795	5.710218254	14.151	
3	228.93	228.93	4.31	20.56873315	20.56873315	313.045	6.414856557	10.541	
4 *	220.394	220.394	3.98	19.80179695	19.80179695	305.629	5.712691589	14.013	
5	242.202	242.202	3.91	21.76118598	21.76118598	336.712	6.353056604	11.566	

* Epruveta broj 4 nije puknula.

7.4. Ispitivanje Flexfill TPU 92A

Tijekom ispitivanja epruveta broj pet nije puknula, ispala je iz čeljusti kidalice. Prilikom ispitivanja TPU 92A zabilježene su najveće sile prije pucanja epruveta. Slika 21. prikazuje epruvete Flexfill TPU 92A prije ispitivanja, a slika 22. prikazuje epruvete nakon ispitivanja.

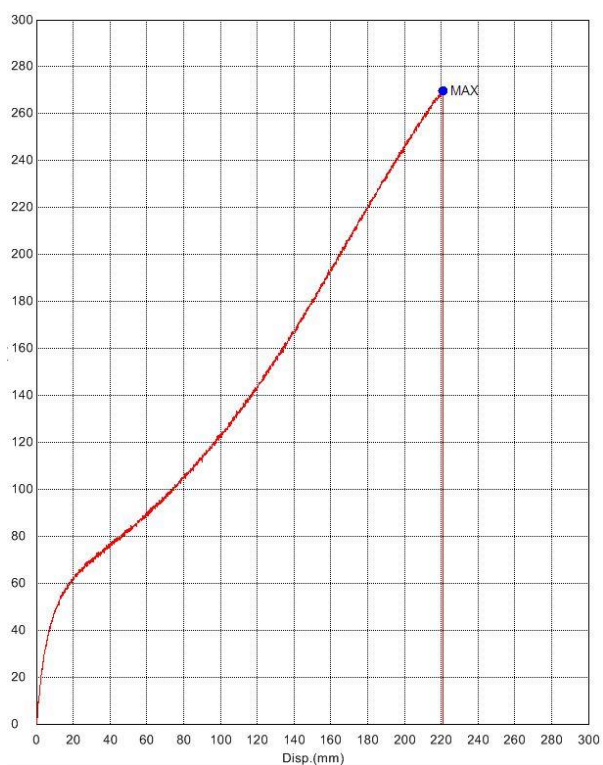


Slika 21. Epruvete Flexfill TPU 92A

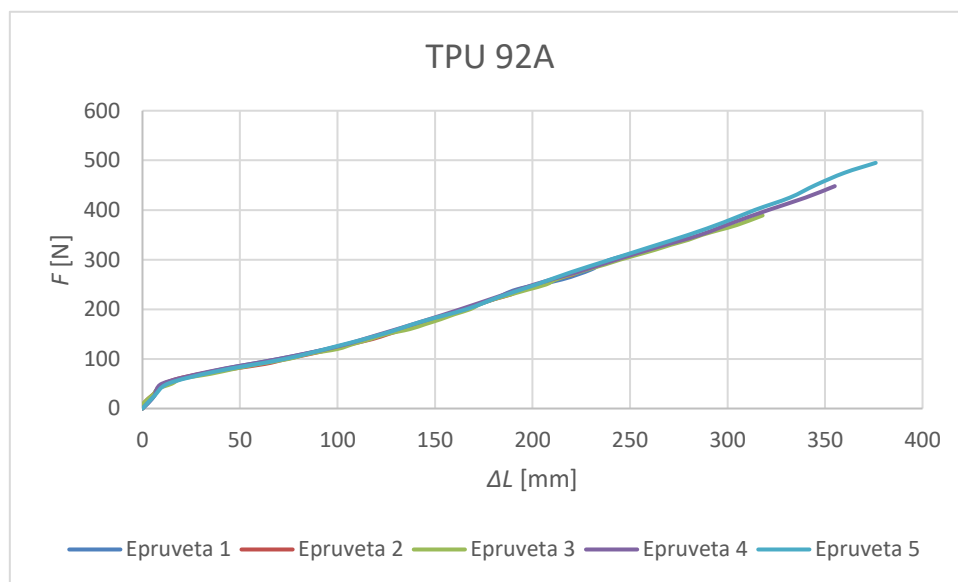


Slika 22. Epruvete Flexfill TPU 92A nakon ispitivanja na kidalici

Na slici 23. prikazan je dijagram sila / produljenje dobiven pri ispitivanju epruvete TPU 92A 2 na kidalici, a na slici 24. su dijagrami sila / produljenje od svih epruveta TPU 92A. Tablica 8. prikazuje vrijednosti dobivene na kidalici i izračunate vrijednosti za Flexfill TPU 92A.



Slika 23. Dijagram sila / produljenje dobiven na kidalici za epruvetu TPU 92A 2



Slika 24. Dijagram sila / produljenje za TPU 92A

Tablica 9. Mehanička svojstva Flexfill TPU 92A

TPU 92A									
Epruveta	Maksimalna sila (F_m) N	Sila loma (F_k) N	Konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0.2}$) MPa	Vlačna čvrstoća (R_m) MPa	Naprezanje pri prekidu (R_k) MPa	Produženje (ΔL) mm	Istezanje (ϵ) mm/mm	Youngov modul elastičnosti (E) MPa	
1	327.412	327.412	3.99	31.48192308	31.48192308	266.879	5.814357298	21.617	
2	269.604	269.604	5.11	26.43176471	26.43176471	220.796	4.287300971	21.641	
3	389.433	389.433	4.21	38.17970588	38.17970588	317.712	6.405483871	21.781	
4	448.275	448.275	3.62	43.94852941	43.94852941	354.712	6.795249042	25.252	
5*	494.703	494.703	4.98	48.50029412	48.50029412	375.712	6.93195572	20.397	

* Epruveta broj 5 nije puknula.

7.5. Ispitivanje Elegoo TPU 95A

Slika 25. prikazuje epruvete Elegoo TPU 95A prije ispitivanja, a slika 26. prikazuje epruvete nakon ispitivanja.

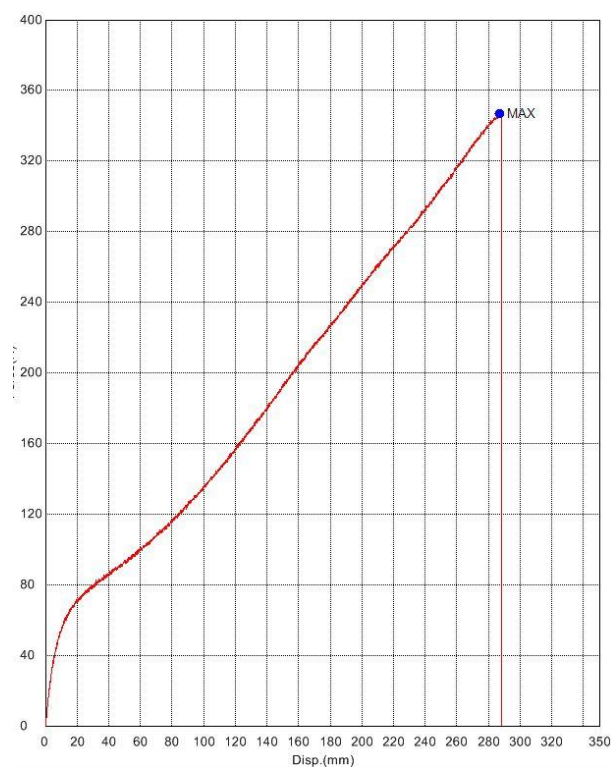


Slika 25. Epruvete Elegoo TPU 95A

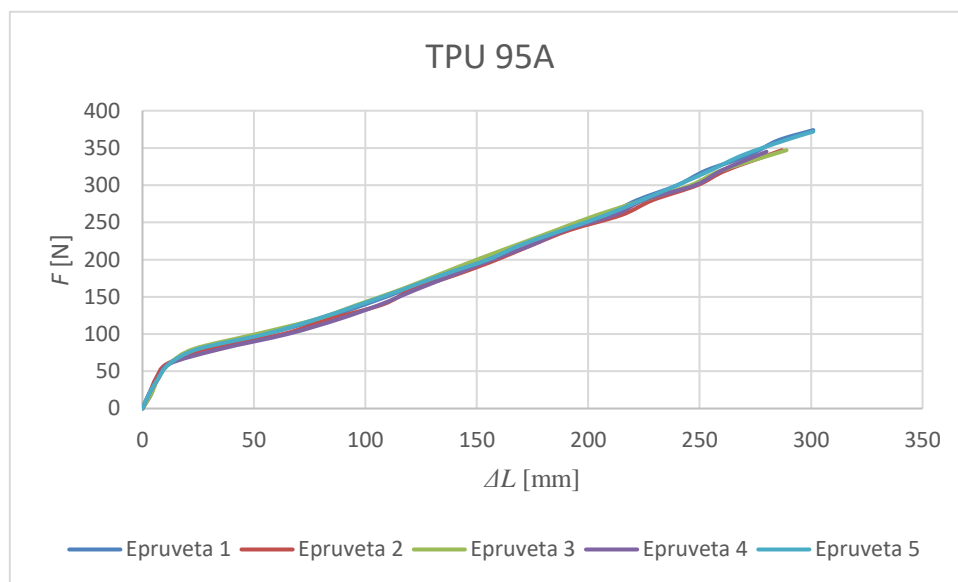


Slika 26. Epruvete Elegoo TPU 95A nakon ispitivanja na kidalici

Na slici 27. prikazan je dijagram sila / produljenje dobiven pri ispitivanju epruvete TPU 95A 2 na kidalici, a na slici 28. su dijagrami sila / produljenje od svih epruveta TPU 95A. Tablica 9. prikazuje vrijednosti dobivene na kidalici i izračunate vrijednosti za Elegoo TPU 95A.



Slika 27. Dijagram sila / produljenje dobiven na kidalici za epruvetu TPU 95A 2



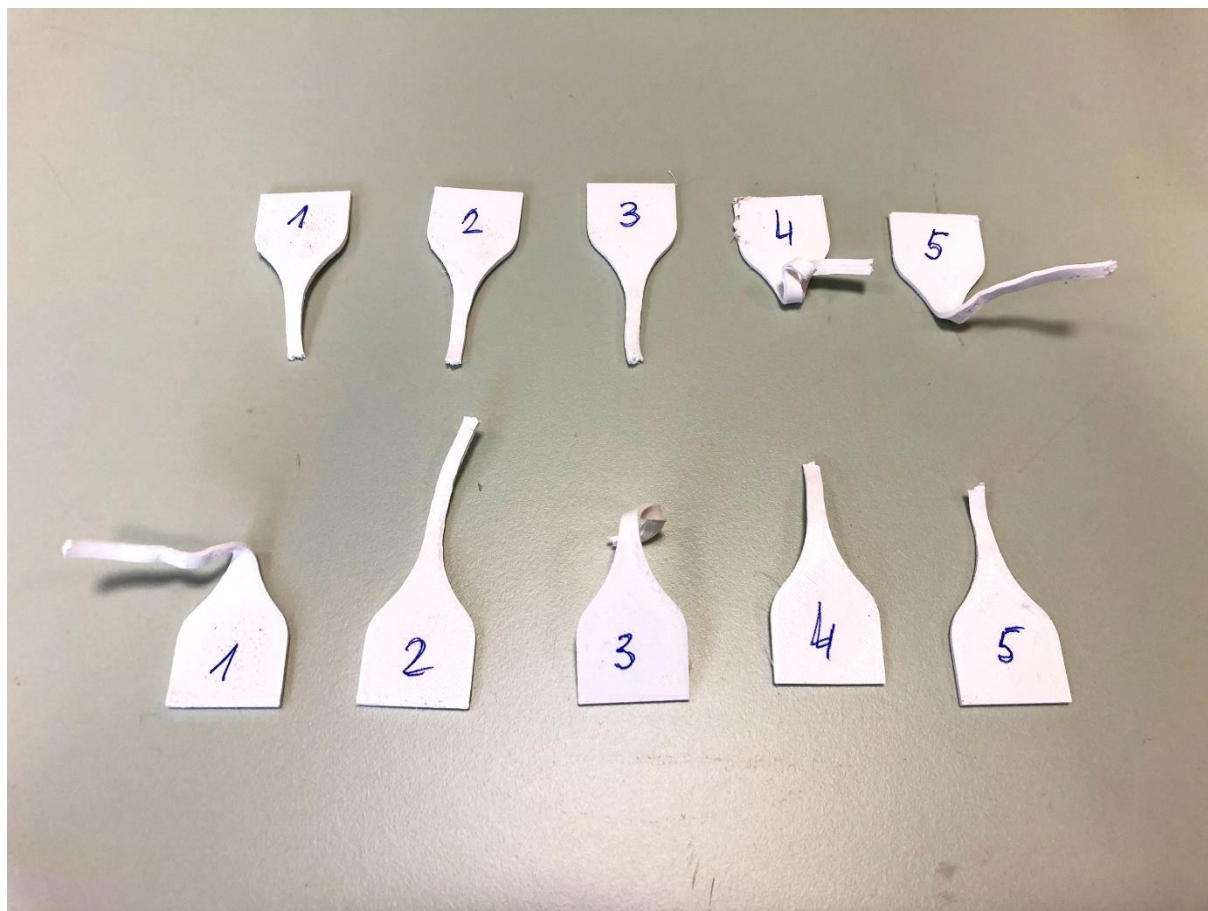
Slika 28. Dijagram sila / produljenje za TPU 95A

Tablica 10. Mehanička svojstva Elegoo TPU 95A

TPU 95A									
Epruveta	Maksimalna sila (F_m) N	Sila loma (F_k) N	Konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0.2}$) MPa	Vlačna čvrstoća (R_m) MPa	Naprezanje pri prekidu (R_k) MPa	Produljenje (ΔL) mm	Istezanje (ϵ) mm/mm	Youngov modul elastičnosti (E) MPa	
1	374.254	374.254	4.12	34.94435107	34.94435107	301.379	5.686396226	31.813	
2	346.692	346.692	5.82	32.37086835	32.37086835	287.129	5.028528897	29.081	
3	347.281	347.281	5.77	32.42586368	32.42586368	288.629	5.550557692	24.672	
4	344.928	344.928	5.81	32.20616246	32.20616246	279.712	4.669649416	27.619	
5	371.536	371.536	5.91	34.69056956	34.69056956	301.045	5.767145594	24.069	

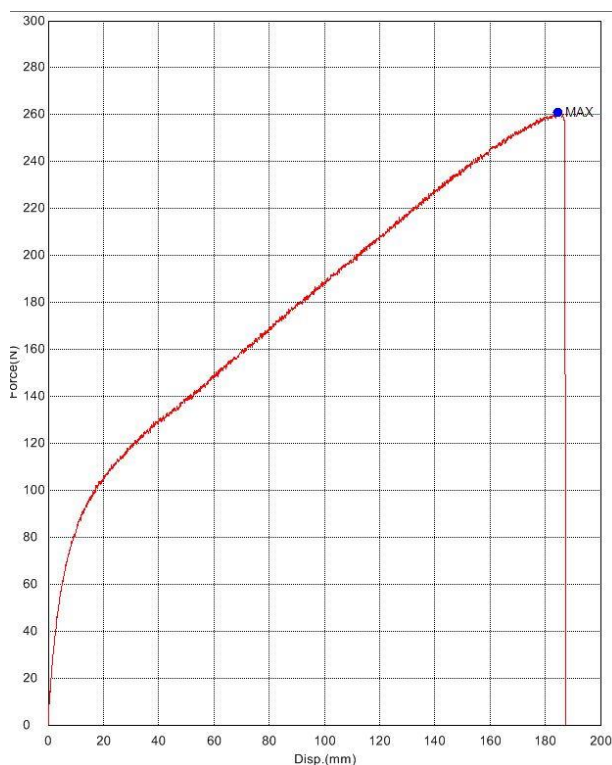
7.6. Ispitivanje Flexible 98A TDS

Slika 29. prikazuje epruvete Flexible 98A TDS nakon ispitivanja.

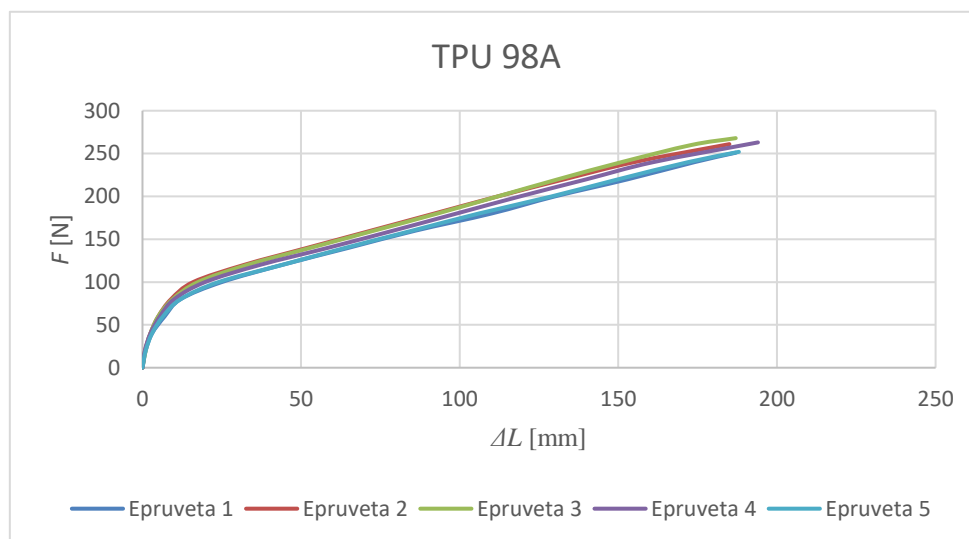


Slika 29. Epruvete Flexible 98A TDS nakon ispitivanja na kidalici

Na slici 30. prikazan je dijagram sila / produljenje dobiven pri ispitivanju epruvete TPU 98A 2 na kidalici, a na slici 31. su dijagrami sila / produljenje od svih epruveta TPU 98A. Tablica 10. prikazuje vrijednosti dobivene na kidalici i izračunate vrijednosti za Flexible 98A TDS.



Slika 30. Dijagram sila / produljenje dobiven na kidalici za epruvetu TPU 98A 2



Slika 31. Dijagram sila / produljenje za TPU 98A

Tablica 11. Mehanička svojstva Flexible 98A TDS

TPU 98A									
Epruveta	Maksimalna sila (F_m) N	Sila loma (F_k) N	Konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0.2}$) MPA	Vlačna čvrstoća (R_m) MPA	Naprezanje pri prekidu (R_k) MPA	Produženje (ΔL) mm	Istezanje (ϵ) mm/mm	Youngov modul elastičnosti (E) MPA	
1	251.214	251.214	3.68	21.95926573	21.95926573	187.462	3.841434426	54.845	
2	260.798	260.798	5.63	22.79702797	22.79702797	184.712	4.265866051	43.095	
3	267.728	267.728	5.71	23.4027972	23.4027972	186.796	3.544516129	53.575	
4	263.357	263.357	6.15	22.58636364	22.58636364	193.962	3.990987654	54.291	
5	251.865	251.865	5.99	22.01617133	22.01617133	188.129	3.271808696	46.431	

8. ANALIZA I USPOREDBA REZULTATA

Rezultati dobiveni ispitivanjem su u skladu s očekivanjima, s malim razlikama. Najveću maksimalnu silu F_m ima TPU 92A, gotovo jednake, ali nešto manje rezultate ima TPU 95A te redom slijede TPU 98A, TPU 85A i TPU 60A. Zbog karakteristika ispitanih materijala, maksimalna sila F_m i sila loma F_k su jednake. Također, vlačna čvrstoća R_m i naprezanje pri prekidu R_k su isto jednaki, te su njihove vrijednosti najveće kod TPU 92A, a zatim redom kod TPU 95A, TPU 98A, TPU 85A i najmanje kod TPU 60A. Najveću istežljivost ε ima najmekši materijal, TPU 60A, zatim TPU 85A, TPU 92A, TPU 95A, te TPU 98A. Youngov modul elastičnosti E je uvjerljivo najveći kod TPU 98A, zatim slijede TPU 95A, TPU 92A, TPU 85A i uvjerljivo najmanji TPU 60A.

Usporedbom vrijednosti Youngovog modula elastičnosti je vidljivo da najmekši TPU 60A ne odgovara ni jednoj od tri sluznice jer su iznosi premaleni. Vrijednosti Youngovog modula elastičnosti od TPU 85A odgovaraju vrijednostima bukalne mukoze, između srednje i maksimalne vrijednosti, dvije epruvete čak prelaze maksimalnu vrijednost. Vrijednosti tri TPU 85A epruvete prelaze i minimalnu vrijednost od tvrdog nepca. Vrijednosti od TPU 92A su jednake vrijednostima od tvrdog nepca, između srednje i maksimalne vrijednosti, te prelaze i minimalnu od gingive. Vrijednosti od TPU 95A su usporedive s vrijednostima od gingive, između minimalne i srednje vrijednosti. Vrijednosti od TPU 98A su također usporedive s gingivom, ali one se nalaze između srednje i maksimalne vrijednosti, a jedna epruveta neznatno prelazi maksimalnu vrijednost.

Tablica 12. Vrijednosti vlačne čvrstoće i Youngovog modula elastičnosti materijala po epruvetama

Materijal/Epruveta	Vlačna čvrstoća (R_m) MPA	Youngov modul elastičnosti (E) MPA
TPU 60A 1 *	18.1861399	1.9152
TPU 60A 2	17.40895484	1.7726
TPU 60A 3	18.91554322	1.9575
TPU 60A 4	17.32155873	1.1064
TPU 60A 5	18.09813011	1.9122
TPU 85A 1	21.71401617	16.312
TPU 85A 2	19.74896676	14.151
TPU 85A 3	20.56873315	10.541
TPU 85A 4 *	19.80179695	14.013
TPU 85A 5	21.76118598	11.566
TPU 92A 1	31.48192308	21.617
TPU 92A 2	26.43176471	21.641
TPU 92A 3	38.17970588	21.781
TPU 92A 4	43.94852941	25.252
TPU 92A 5 *	48.50029412	20.397
TPU 95A 1	34.94435107	31.813
TPU 95A 2	32.37086835	29.081
TPU 95A 3	32.42586368	24.672
TPU 95A 4	32.20616246	27.619
TPU 95A 5	34.69056956	24.069
TPU 98A 1	21.95926573	54.845
TPU 98A 2	22.79702797	43.095
TPU 98A 3	23.4027972	53.575
TPU 98A 4	22.58636364	54.291
TPU 98A 5	22.01617133	46.431

* Epruveta nije puknula.

Prema dobivenom modulu elastičnosti i modulu elastičnosti tkiva usne šupljine mogu se usporediti:

- Gingiva-TPU 92A, TPU 95A, TPU 98A
- Tvrdo nepce-TPU 85A, TPU 92A
- Bukalna mukoza-TPU 85A

Tablica 13. Srednje vrijednosti vlačne čvrstoće i Youngovog modula elastičnosti za materijale

Materijal	Vlačna čvrstoća (R_m) MPA	Youngov modul elastičnosti (E) MPA
TPU 60A	17.94 (± 0.98)	1.69 (± 0.58)
TPU 85A	20.95 (± 1.2)	13.14 (± 3.17)
TPU 92A	35.01 (± 8.94)	22.57 (± 2.68)
TPU 95A	33.33 (± 1.61)	27.45 (± 4.36)
TPU 98A	22.55 (± 0.85)	50.45 (± 7.36)

Tablica 14. Srednje vrijednosti vlačne čvrstoće i Youngovog modula elastičnosti za tkiva usne šupljine [27]

Materijal	Vlačna čvrstoća (R_m) MPA	Youngov modul elastičnosti (E) MPA
Gingiva	3.81 (± 0.94)	37.36 (± 17.36)
Tvrdo nepce	1.7 (± 0.87)	18.13 (± 4.51)
Bukalna mukoza	1.54 (± 0.52)	8.33 (± 5.78)

Vrijednosti vlačne čvrstoće ispitanih materijala nisu usporedive s vrijednostima sluznica usne šupljine, čak i najniže vrijednosti dobivene kod TPU 60A premašuju maksimalne vrijednosti sluznica.

Vrijednosti vlačne čvrstoće dobivene ispitivanjem su nešto manje od vrijednosti u tehničkim listovima korištenih materijala. Uzrok tome su vjerojatno vlaga u materijalu. Jedino veće odstupanje je vidljivo kod TPU 98A.

9. ZAKLJUČAK

Aditivna tehnologija je zahvaljujući svojim prednostima vrlo brzo postala nezamjenjiva u industriji te pristupačna i kućanstvima. Razvoj tehnologije omogućio je korištenje velikog broja različitih materijala, proizvode malih i velikih dimenzija, jedinstvene proizvode ili serije proizvoda i visoko kvalitetne i precizne proizvode. Razvoj medicine omogućio je primjenu aditivne tehnologije u svrhu liječenja i poboljšanja kvalitete života.

Jedna od tih primjena je modeliranje zamjenskih tkiva, prvenstveno za prezentacijske i edukativne svrhe. Fleksibilni materijali koje je moguće oblikovati taložnim očvršćivanjem kao što je termoplastični poliuretan bi mogli biti adekvatna zamjena za tkiva usne šupljine. Da bi to bilo moguće potrebno je koristiti 3D pisac sa dovoljnom preciznosti, pažljivo prilagoditi postavke 3D pisca, paziti na vlagu i temperaturu prostora u kojem se proizvod ispisuje te na starost i kvalitetu materijala. Iz analize rezultata vidljiva je podudarnost iznosa Youngovog modula elastičnosti odabranih materijala i tkiva usne šupljine, ali se kod iznosa vlačne čvrstoće javljaju odstupanja. Potrebna su daljnja ispitivanja mehaničkih svojstava postojećih materijala te stvaranje novih materijala kako bi dobili što savršeniji model tkiva usne šupljine.

LITERATURA

- [1] <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/> (20.08.2024.)
- [2] <https://www.enciklopedija.hr/clanak/aditivna-proizvodnja> (20.08.2024.)
- [3] <https://3dprintingindustry.com/news/evolution-3d-printing-past-present-future-90605/> (20.08.2024.)
- [4] <https://triditive.com/what-is-additive-manufacturing-history-and-benefits/> (21.08.2024.)
- [5] Godec D., Šercer M., Aditivna proizvodnja, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2015.
- [6] <https://www.eos.info/en-us/about-us/who-we-are/history> (21.08.2024.)
- [7] <https://www.theguardian.com/technology/2010/dec/19/3d-printer-kit-makerbot> (22.08.2024.)
- [8] <https://www.wired.com/2013/09/formlabs-form-1/> (22.08.2024.)
- [9] Gibson I., Rosen D.W., Stucker B., Additive Manufacturing Tehnologies, Springer, New York, 2010.
- [10] <https://blogs.ib-caddy.com/2018/07/04/stereolitografijsko-3d-tiskanje-od-1980-danas/> (03.09.2024.)
- [11] Netretić Dario, Aditivna proizvodnja, završni rad
- [12] <https://www.green-mechanic.com/2016/12/comparison-between-3d-printing-3dp.html> (23.08.2024)
- [13] <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/> (23.08.2024.)
- [14] Pavlic, Jurković, Subota, Aditivni postupci u procesu razvoja novih proizvoda s osvrtom na terminološka pitanja, stručni članak
- [15] <https://www.pinterest.com/pin/what-is-laminated-object-manufacturing-lom--325103666828830675/> (05.09.2024.)
- [16] <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/thermoplastic-polyurethanes-tpu> (06.09.2024.)
- [17] <https://www.3dprintaj.com/sirok-izbor-opreme-za-3d-print/recreus-filaflex-60a/> (24.07.2024.)

- [18] <https://azurefilm.com/hr/proizvod/flexible-filament-85a-white/> (24.07.2024.)
- [19] <https://www.3dprintaj.com/sirok-izbor-opreme-za-3d-print/filamentum-flexfill-tpu-92a/> (24.07.2024.)
- [20] <https://eu.elegoo.com/collections/tpu-filaments/products/tpu-filament-1-75mm-colored-1kg> (03.10.2024.)
- [21] <https://azurefilm.com/hr/proizvod/flexible-filament-98a-white/> (24.07.2024.)
- [22] <http://www.3dprintaj.com/wp-content/uploads/2023/06/FILAFLEX-60A- - TECHNICAL-DATA-SHEET- -TDS- -2022.pdf> (24.07.2024.)
- [23] https://azurefilm.com/wp-content/uploads/2023/10/Flexible_85A_TDS-1.pdf?_gl=1*thgx6r*_up*MQ..*_ga*MTQ2MDIwNTQxNS4xNzM2Njc1NzIy*_ga_P213FF6C6P*MTczNjY3NTcyMC4xLjEuMTczNjY3NTc3MS4wLjAuMA.. (24.07.2024.)
- [24] http://www.3dprintaj.com/wp-content/uploads/2022/01/TDS_Flexfill-TPU-92A.pdf (24.07.2024.)
- [25] https://azurefilm.com/wp-content/uploads/2023/10/Flexible_98A_TDS-1.pdf?_gl=1*1gj7kag*_up*MQ..*_ga*MTU5MTM5NDk1OC4xNzM2Njc2MTA4*_ga_P213FF6C6P*MTczNjY3NjEwNi4xLjEuMTczNjY3NjEzNy4wLjAuMA.. (24.07.2024.)
- [26] <https://www.enciklopedija.hr/clanak/sluznica> (22.10.2024.)
- [27] <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7745080/> (17.10.2024.)
- [28] Križan Z., Kompendij anatomije čovjeka, Drugi dio, Školska knjiga, Zagreb, 1998.
- [29] <https://www.mecmesin.com/standard/iso-37> (29.10.2024.)
- [30] <https://www.treatstock.com/machines/item/427-original-prusa-i3-mk3> (30.10.2024.)
- [31] https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns_177130 (31.10.2024.)
- [32] <https://all3dp.com/2/3d-printing-brim-when-should-you-use-it/> (31.10.2024.)
- [33] <https://all3dp.com/2/3d-printer-retraction-speed-what-does-it-mean/> (31.10.2024.)
- [34] Alfirević I., Nauka o čvrstoći 1, Tehnička knjiga Zagreb, 1989.