

# Mehanička karakterizacija 3D ispisanog PLA polimera

---

Šklebar, Fran

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:032896>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-15**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Fran Šklebar**

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **Mehanička karakterizacija 3D ispisanog PLA polimera**

Mentori:

Dr. sc. Lana Virag, dipl. ing.

Student:

Fran Šklebar

Zagreb, 2025.

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

Zahvaljujem se mentorici dr. sc. Lani Virag, asistentu Luki Labaru i asistentu Ninu Pintariću na pomoći prilikom izrade ovog završnog rada.

Također zahvala studentu Ivanu Uremoviću zbog ustupljenja optimiziranih modela epruveta za lakše ispitivanje.

Posebna zahvala obitelji, djevojci i prijateljima koji su mi bili podrška tijekom trajanja studija.

Fran Šklebar



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 25 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 25 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Fran Šklebar** JMBAG: **0035240396**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mehanička karakterizacija 3D ispisanog PLA polimera**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Mechanical characterization of 3D printed PLA polymer**

Opis zadatka:

Pouzdanost određivanje parametara materijala jedan je od ključnih faktora za pouzdanost dimenzioniranje konstrukcija i osiguravanje točnosti numeričkih simulacija. Parametri materijala dobivaju se iz eksperimentalnih ispitivanja, a najosnovniji eksperiment je jednoosni vlačni test.

Za geometrije uzoraka koje definiraju norme, do loma epruveta ne dolazi u homogenom dijelu u kojem se mjeri deformacija, već na vratu epruvete. S obzirom na to da je PLA (polilaktična kiselina) elasto-plastični materijal, mjerenja na epruvetama izrađenim prema normi mogu unijeti znatnu grešku u pretpostavkama o ponašanju materijala.

U okviru rada je potrebno:

- Poučiti literaturu vezanu za mehaničko ispitivanje PLA materijala za uzorke dobivene 3D ispisom uz korištenje FDM (*Fused Deposition Modeling*) tehnologije.
- Odrediti potreban broj i dimenzije epruveta za jednoosno ispitivanje materijala koje u homogenom dijelu imaju maksimalna naprezanja te pripremiti odgovarajuće CAD modele za 3D ispis.
- Za nekoliko debljina uzoraka provesti jednoosne testove. Za jednu debljinu epruvete provesti eksperimente za barem dvije različite brzine ispitivanja.
- Usporediti rezultate dobivene na novim epruvetama s literaturom i komentirati poklapanje rezultata i ponovljivost eksperimenta.
- Odrediti pripadne module elastičnosti za sve debljine uzoraka i brzine ispitivanja.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.  
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.  
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.  
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.  
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Lana Virag

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO .....	2
2.1. PLA (Polilaktična kiselina) .....	2
2.2. Primjena PLA.....	2
2.3. Svojstva PLA kod 3D ispisa .....	3
2.4. FDM tehnologija .....	5
2.5. Rad FDM pisača.....	6
2.6. Parametri FDM printera i njihov utjecaj .....	7
2.6.1. Potporne strukture .....	8
2.6.2. Ispuna .....	9
2.6.3. Završna obrada.....	9
2.6.4. Utjecaj tipa 3D pisača .....	10
2.6.5. Utjecaj završne obrade, skladištenja i starenja materijala.....	10
2.6.6. Utjecaj debljine sloja.....	10
2.6.7. Utjecaj brzine ispisa .....	11
2.6.8. Utjecaj temperatura mlaznice i platforme za izgradnju .....	11
2.6.9. Utjecaj orijentacije uzoraka tijekom izrade .....	12
2.6.10. Utjecaj kuta ispune.....	13
2.7. Metoda ispitivanja materijala .....	15
2.8. Mehaničko ponašanje PLA u literaturi .....	16
2.9. Usporedba materijalnih svojstava danih od proizvođača i iz literature .....	24
3. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA.....	26
3.1. Priprema epruveta .....	26
3.1.1. Broj uzoraka.....	28
3.1.2. Procedura mehaničkog ispitivanja .....	29
3.2. Postupak materijalne karakterizacije .....	30
3.3. Određivanje modula elastičnosti .....	30
4. REZULTATI .....	32
4.1. Skupina 1.....	32
4.1.1. Uzorak 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine.....	32
4.1.2. Uzorak od 1 mm debljine, 5 mm/min ispitne brzine.....	33
4.1.3. Uzorak od 1,4 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine.....	34
4.1.4. Uzorak od 1,8 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine.....	35
4.2. Skupina 2.....	37
4.2.1. Uzorak od 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine.....	37

---

4.2.2.	Uzorak od 1 mm debljine, 5 mm/min ispitne brzine.....	39
4.2.3.	Uzorak od 1,4 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine.....	40
4.2.4.	Uzorak od 1,8 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine.....	41
4.3.	Skupina 3.....	43
4.3.1.	Uzorak od 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine.....	43
4.4.	Usporedba ovisno o brzini ispitivanja.....	45
4.5.	Usporedba ovisno o debljini epruvete.....	46
4.6.	Usporedba podataka iz literature i eksperimenta .....	49
4.6.1.	Usporedba uzorka od 1 mm debljine s literaturom .....	49
4.6.2.	Usporedba uzorka od 1,4 mm debljine s literaturom .....	50
4.6.3.	Usporedba uzorka od 1,8 mm debljine s literaturom .....	51
4.6.4.	Usporedba poprečnog uzorka od 1 mm debljine s literaturom .....	53
4.7.	Usporedba podataka od proizvođača i eksperimenta .....	54
5.	ZAKLJUČAK.....	56
	LITERATURA.....	58

**POPIS SLIKA**

Slika 1	Lom i lokalna plastična deformacija na epruvetama po normi izvan homogenog mjenenog područja (između bijelih točaka).....	1
Slika 2	Primjeri korištenja PLA [4].....	2
Slika 3	Prikaz PLA medicinskih implantata [5].....	3
Slika 4	Dijelovi FDM printera [8].....	5
Slika 5	Komercijalno dostupni FDM filamenti [11].....	6
Slika 6	Prikaz toplinskog izvijanja pri ispisu [12].....	8
Slika 7	Prikaz potporne strukture [13].....	8
Slika 8	Prikaz vrsta i količine ispune [14].....	9
Slika 9	Prikaz PLA prije (desno) i nakon brušenja (lijevo) [15].....	9
Slika 10	Debljina sloja ( $t$ ) za ISO 527-2 Tip 1A uzorke S1 i S2 [24].....	11
Slika 11	Prikaz različitih orijentacija modela [24].....	13
Slika 12	Prikaz linija ispune pod različitim kutevima [24].....	14
Slika 13	Prikaz površine loma usklađene s kutom ispune (a), detaljniji prikaz (b) [24].....	15
Slika 14	Oblik i dimenzije 1A epruvete prema ISO 527 normi [16].....	16
Slika 15	Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za uzorke debljine 1 mm izrađene od PLA materijala ispisanog u: (a) X orijentaciji, (b) Y orijentaciji, (c) Z orijentaciji. [19].....	17
Slika 16	Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za uzorke debljine 1,4 mm izrađene od PLA materijala ispisanog u: (a) X orijentaciji, (b) Y orijentaciji, (c) Z orijentaciji. [19].....	18
Slika 17	Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za uzorke debljine 1,8 mm izrađene od PLA materijala ispisanog u: (a) X orijentaciji, (b) Y orijentaciji, (c) Z orijentaciji. [19].....	19
Slika 18	Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za uzorke debljine 4 mm izrađene od PLA materijala ispisanog u: (a) X orijentaciji, (b) Y orijentaciji, (c) Z orijentaciji. [19].....	20
Slika 19	Bambulab P1S [17].....	27
Slika 20	Geometrije korištenih epruveta.....	28
Slika 21	Pripremljene epruvete spremne za ispitivanje.....	29
Slika 22	Prikaz koda za izračun modula elastičnosti.....	31
Slika 23	Prikaz koda funkcije <i>lsqcurvefit</i> .....	31
Slika 24	Dijagram uzoraka uzdužnog sloja, 0,2 mm, 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine.....	32
Slika 25	Prikaz ispitanih epruveta od 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine.....	32
Slika 26	Prikaz uzoraka od 1 mm, 0,2 mm visine sloja u programu pisača.....	33
Slika 27	Dijagram uzoraka uzdužnog sloja, 0,2 mm, 1 mm debljine, 5 mm/min ispitne brzine.....	33
Slika 28	Prikaz ispitanih epruveta od 1 mm debljine, 5 mm/min ispitne brzine.....	34
Slika 29	Dijagram uzoraka uzdužnog sloja, 0,2 mm, 1,4 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine.....	34
Slika 30	Prikaz ispitanih epruveta od 1,4 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine.....	35
Slika 31	Prikaz uzoraka od 1,4 mm, 0,2 mm visine sloja u programu pisača.....	35
Slika 32	Dijagram uzoraka uzdužnog sloja, 0,2 mm, 1,8 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine.....	36
Slika 33	Prikaz ispitanih epruveta od 1,8 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine.....	36
Slika 34	Prikaz uzoraka od 1,8 mm, 0,2 mm visine sloja u programu pisača.....	37



Slika 35	Dijagram uzoraka uzdužnog sloja, 0,08 mm, 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine .....	37
Slika 36	Prikaz ispitanih epruveta od 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine .....	38
Slika 37	Prikaz uzoraka od 1 mm, 0,08 mm visine sloja u programu pisaća .....	38
Slika 38	Dijagram uzoraka uzdužnog sloja, 0,08 mm, 1 mm debljine, 5 mm/min ispitne brzine .....	39
Slika 39	Prikaz ispitanih epruveta od 1 mm debljine, 5 mm/min ispitne brzine .....	39
Slika 40	Dijagram uzoraka uzdužnog sloja, 0,08 mm, 1,4 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine .....	40
Slika 41	Prikaz ispitanih epruveta od 1,4 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine .....	41
Slika 42	Prikaz uzoraka od 1,4 mm, 0,08 mm visine sloja u programu pisaća .....	41
Slika 43	Dijagram uzoraka uzdužnog sloja, 0,08 mm, 1,8 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine .....	42
Slika 44	Prikaz ispitanih epruveta od 1,8 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine .....	42
Slika 45	Prikaz uzoraka od 1,8 mm, 0,08 mm visine sloja u programu pisaća .....	43
Slika 46	Dijagram uzoraka poprečnog sloja, 0,2 mm, 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine .....	43
Slika 47	Prikaz ispitanih poprečnih epruveta od 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine .....	44
Slika 48	Prikaz poprečnih uzoraka od 1 mm, 0,2 mm visine sloja u programu pisaća .....	44
Slika 49	Prikaz usporedbe 0,2 mm visine sloja, 1 mm debljine epruvete pri različitim brzinama .....	45
Slika 50	Prikaz usporedbe 0,08 mm visine sloja, 1 mm debljine epruvete pri različitim brzinama .....	46
Slika 51	Prikaz usporedbe 0,2 mm visine sloja epruvete pri različitim debljinama .....	47
Slika 52	Prikaz usporedbe 0,08 mm visine sloja epruvete pri različitim debljinama .....	48
Slika 53	Usporedba dijagrama ispitivanja (lijevo) i dijagrama iz literature (desno) [18] – za debljinu 1 mm .....	49
Slika 54	Usporedba dijagrama ispitivanja (lijevo) i dijagrama iz literature (desno) [18] – za debljinu 1,4 mm .....	50
Slika 55	Usporedba dijagrama ispitivanja (lijevo) i dijagrama iz literature (desno) [18] – za debljinu 1,8 mm .....	51
Slika 56	Usporedba dijagrama ispitivanja (lijevo) i dijagrama iz literature (desno) [18] – za poprečnu ispunu epruvete debljine 1 mm .....	53

**POPIS TABLICA**

Tablica 1	Fizikalna svojstva PLA [7].....	4
Tablica 2	Mehanička svojstva PLA filameta, prema [7].....	5
Tablica 3	Vlačna čvrstoća i postotak deformacije za 1,0 mm PLA [19].....	20
Tablica 4	Vlačna čvrstoća i postotak deformacije za 1,4 mm PLA [19].....	21
Tablica 5	Vlačna čvrstoća i postotak deformacije za 1,8 mm PLA [19].....	22
Tablica 6	Vlačna čvrstoća i postotak deformacije za 4,0 mm PLA [19].....	23
Tablica 7	Referentne vrijednosti proizvođača [7] .....	24
Tablica 8	Usporedba podataka literature i proizvođača [19] .....	24
Tablica 9	Parametri uzoraka.....	27
Tablica 10	Broj uzoraka .....	28
Tablica 11	Prikaz rezultata 0,2 mm – 1 mm.....	32
Tablica 12	Prikaz rezultata 0,2 mm – 1 mm (veća brzina).....	33
Tablica 13	Prikaz rezultata 0,2 mm – 1,4 mm.....	34
Tablica 14	Prikaz rezultata 0,2 mm – 1,8 mm.....	36
Tablica 15	Prikaz rezultata 0,08 mm – 1 mm.....	38
Tablica 16	Prikaz rezultata 0,08 mm – 1 mm (veća brzina).....	39
Tablica 17	Prikaz rezultata 0,08 mm – 1,4 mm.....	40
Tablica 18	Prikaz rezultata 0,08 mm – 1,8 mm.....	42
Tablica 19	Prikaz rezultata poprečno 0,2 mm – 1 mm.....	44
Tablica 20	Prikaz numeričke usporedbe utjecaja brzina 5. ispitivanja – 0,2 mm .....	45
Tablica 21	Prikaz numeričke usporedbe utjecaja brzina 4. ispitivanja – 0,08 mm .....	46
Tablica 22	Prikaz numeričke usporedbe utjecaja debljina 5. ispitivanja – 0,2 mm .....	47
Tablica 23	Prikaz numeričke usporedbe utjecaja debljina 5. ispitivanja – 0,08 mm .....	48
Tablica 24	Usporedba numeričkih vrijednosti ispitivanja i literature – 1 mm.....	49
Tablica 25	Usporedba svih numeričkih vrijednosti ispitivanja i literature – 1 mm .....	50
Tablica 26	Usporedba numeričkih vrijednosti ispitivanja i literature – 1,4 mm.....	51
Tablica 27	Usporedba svih numeričkih vrijednosti ispitivanja i literature – 1,4 mm .....	51
Tablica 28	Usporedba numeričkih vrijednosti ispitivanja i literature – 1,8 mm.....	52
Tablica 29	Usporedba svih numeričkih vrijednosti ispitivanja i literature – 1,8 mm .....	52
Tablica 30	Usporedba numeričkih vrijednosti ispitivanja i literature – poprečno, 1 mm.....	53
Tablica 31	Usporedba svih numeričkih vrijednosti ispitivanja i literature – poprečno, 1 mm.....	54
Tablica 32	Usporedba rezultata s proizvođačem – 1 mm .....	55
Tablica 33	Usporedba rezultata s proizvođačem – 1,4 mm .....	55
Tablica 34	Usporedba rezultata s proizvođačem – 1,8 mm .....	55

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$\bar{a}$	mm	Prosječno izmjerena debljina uzorka
$\bar{b}$	mm	Prosječno izmjerena širina uzorka
$E$	MPa	Modul elastičnosti
$\varepsilon_m$	%	Maksimalni postotak deformacije
$\varepsilon_{gt}$	%	Postotak deformacije kod granice tečenja
$F_m$	N	Maksimalno opterećenje
$R_m$	MPa	Maksimalna vlačna čvrstoća
$\sigma_m$	MPa	Maksimalno naprezanje
$\bar{\sigma}_m$	MPa	Prosječno maksimalno naprezanje
$\lambda$	%	Produljenje epruvete
$l$	mm	Početna udaljenost točaka
$\Delta l$	mm	Razlika udaljenosti točaka
$A$	mm <sup>2</sup>	Površina epruvete

---

**SAŽETAK**

Sve lakšim pristupom i češćom upotrebom tehnologije 3D ispisa u procesu razvoja proizvoda, te izrade prototipa dolazi do smanjenja troškova, ubrzavanja razvoja i testiranja proizvoda. Kako bi se konstrukcije mogle pravilno dimenzionirati, potrebno je precizno i detaljno poznavanje svojstava materijala koji se koriste. Mehaničkom karakterizacijom materijala, koristeći jednoosni vlačni test, moći će se postaviti materijalni modeli koji će bolje opisivati svojstva i pri složenim slučajevima opterećenja.

Uzorci za vlačno ispitivanje polilaktida ispisani su FDM tipom pisača, široko dostupnog u industriji i kućnoj primjeni. Mogućnosti promjene raznih parametara ispisa, ispitivanja i geometrije mogu uvelike utjecati na svojstva koja će materijal nakon ispisa posjedovati. Iz tog se razloga ispituju uzorci pri dva smjera ispisa, uzdužnog i poprečnog sa različitim debljinama epruveta, različitim visinama sloja pri različitim brzinama ispitivanja. Koristi se optimizirani oblik epruvete naspram normiranog, zbog njenog problematičnog oblika koji FEM analizom i eksperimentalnim ispitivanjem puca izvan ispitnog, homogenog područja.

Nakon obavljenih vlačnih ispitivanja, izvršena je materijalna karakterizacija za svaku kombinaciju spomenutih parametara koristeći metodu najmanjih kvadrata. Podaci su uspoređeni s literaturom u kojoj su korištene epruvete po normi, kao i s podacima proizvođača. Dobivene materijalne konstante mogu se dalje koristiti za računanje naprezanja u različitim slučajevima opterećenja.

Ključne riječi: FDM, 3D ispis, jednoosni vlačni test, materijalna karakterizacija

---

**SUMMARY**

With easier access to and more frequent use of 3D printing technology in product development and prototype manufacturing, there is a reduction in costs and an acceleration of product development and testing. In order for constructions to be properly dimensioned, precise and detailed knowledge of the properties of the materials used is necessary. Through mechanical characterization of the materials, using a uniaxial tensile test, material models can be established that will better describe their properties even in complex loading scenarios.

Samples for tensile testing of polylactic acid were printed using an FDM-type printer, which is widely available in both industry and home use. The ability to change various printing parameters, testing conditions and geometry can significantly affect the properties that the material will have after printing. For this reason, the samples are tested in two printing directions, longitudinal and transverse, with different tube thicknesses, different layer heights and different testing speeds. An optimized tube shape is used instead of the standardized one, due to its problematic shape, which, through FEM analysis and experimental testing, breaks outside the test's homogeneous area.

After conducting tensile tests, material characterization was performed for each combination of the mentioned parameters using the least squares method. The data were compared with literature where standardized tubes were used, as well as with manufacturer data. The obtained material constants can be further used to calculate stresses in different loading scenarios.

Key words: FDM, 3D printing, uniaxial tensile test, mechanical characterization

## 1. UVOD

Cilj rada je mehanička karakterizacija polilaktične kiseline (polilaktid, PLA), koja je ključni faktor za pouzdano dimenzioniranje konstrukcija i osiguravanje točnosti numeričkih simulacija. Materijalni parametri se dobivaju eksperimentalnim ispitivanjem, a najosnovniji eksperiment je jednoosni vlačni test, koji je proveden u sklopu rada. Geometrija uzorka i protokol eksperimenta su definirani normom ISO 527 [1], no korištenjem geometrije definirane normom do lokalne plastične deformacije i loma epruvete ne dolazi u homogenom dijelu u kojem se mjeri deformacija, već na vratu epruvete, kao što je prikazano Slika 1. Stoga mjerenja na epruvetama izrađenim prema normi mogu unijeti znatnu grešku u pretpostavkama o ponašanju samog materijala.



**Slika 1 Lom i lokalna plastična deformacija na epruvetama po normi izvan homogenog mjenog područja (između bijelih točaka)**

U sklopu rada su provedena jednoosna vlačna ispitivanja na epruvetama koje u homogenom dijelu imaju maksimalna naprezanja, odnosno na kojima se ne bi trebala javiti lokalna plastična deformacija izvan mjenog područja. Rezultati takvih ispitivanja će biti uspoređivani s ispitivanjima iz literature na geometriji izrađenoj po normi i podacima od proizvođača. Osim krivulje naprezanja-deformacije će biti komentirana i ponovljivost eksperimenta.

Dodatno će se testirati nekoliko debljina uzoraka, a na jednoj debljini epruvete provesti će se ispitivanja za više brzina deformacije. Na kraju će biti određeni pripadni moduli elastičnosti za sve debljine uzoraka i brzine ispitivanja.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. PLA (Polilaktična kiselina)

Polilaktična kiselina, također poznata kao PLA, je termoplastični monomer dobiven iz obnovljivih, organskih izvora poput kukuruznog škroba, manioke ili šećerne trske. Korištenje biomase kao resursa čini proizvodnju PLA različitom od većine plastika, koje se proizvode korištenjem fosilnih goriva kroz destilaciju i polimerizaciju nafte. Unatoč različitim početnim sirovinama, PLA se proizvodi koristeći istu opremu kao i ostali polimeri, što čini proizvodnju relativno isplativom. Druga je najviše proizvedena bioplastika (nakon termoplastičnog škroba) i ima slične karakteristike kao polipropilen (PP), polietilen (PE) ili polistiren (PS), a ujedno je i biorazgrađiva. Dobiva se fermentiranjem biljnog škroba, tako se pretvara u mliječnu kiselinu, koja se zatim prerađuje u polilaktičnu kiselinu. [2][3]



Slika 2 Primjeri korištenja PLA [4]

### 2.2. Primjena PLA

Primjena PLA je vrlo široka, kao što je prikazano na Slika 2. PLA se koristi za:

- a) 3D ispis
  - izrada prototipa, maketa, igraćaka, ukrasnih predmeta i sl.
- b) Ambalaža i pakiranja
  - biorazgrađive vrećice, pakiranja za hranu, plastične boce

- c) Medicinska primjena
  - vijci, ploče, šipke, mreže, niti, nosači... (vijci prikazani na Slika 3)
  - razgradnja od 6 do 12 mjeseci
- d) Jednokratni proizvodi
  - vilice, žlice, tanjuri, čaše, pelene, ulošci
- e) Tekstil i vlakna
  - presvlake, jednokratna odjeća, uniforme
- f) Automobilaska industrija
  - dekorativni paneli, komponente bez potrebe za visokom otpornošću na toplinu
- g) Poljoprivreda
  - razgradive pokrovne folije, biokompostalne ambalaže
- h) Edukacija
  - radionice, DIY projekti
- i) Biomedicinska istraživanja
  - razvoj biorazgradivih polimera i materijala



Slika 3 Prikaz PLA medicinskih implantata [5]

### 2.3. Svojstva PLA kod 3D ispisa

PLA je osjetljiv na visoku vlažnost i temperaturu, te kako bi se smanjio rizik od degradacije, potrebno ga je osušiti prije uporabe. Kao sirovina za 3D ispis dolazi u obliku žice, može biti različitih debljina, a standardna debljina je 1,75 mm. Lako se topi pri nižim temperaturama (190 – 230 °C). Njegova visoka površinska energija omogućuje dobro prijanjanje slojeva i isključuje potrebu za ljepljivom na podlozi. Tijekom ispisa ne emitira neugodne mirise niti štetne pare. Ima nisku otpornost na toplinu (pri 60 °C). U usporedbi s industrijski korištenim ABS-om



(Akrilonitril butadien stiren), biorazgradiv je, krhki, ima nisko izduženje pri lomu, manju fleksibilnost, nižu temperaturu staklastog prijelaza, nižu temperaturu taljenja i topljiv je u organskim otapalima poput acetona i etilacetata. Također je manje sklon savijanju prilikom hlađenja, te lakši za ispis. Može se lako brusiti, bojati ili dodatno obrađivati.[2][3][6]

Sljedeća Tablica 1 prikazuje fizikalna svojstva PLA materijala.

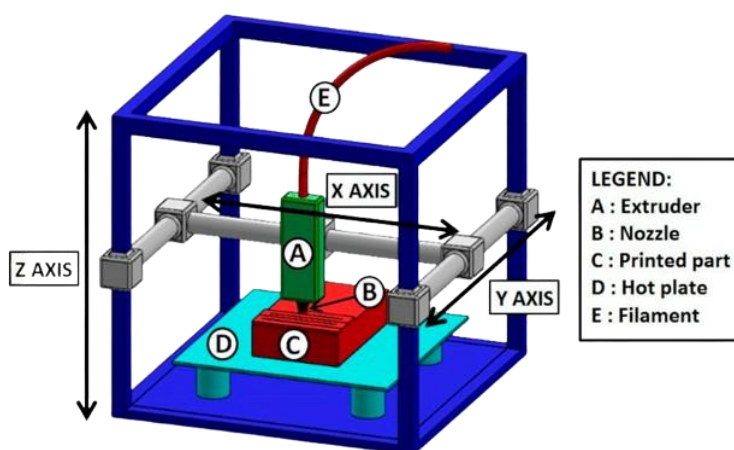
**Tablica 1 Fizikalna svojstva PLA [7]**

Parametar	Podaci
Gustoća	1,24 g/cm <sup>3</sup>
Indeks topljenja	42,4 ± 3,5 g/10 min
Temperatura taljenja	160 °C
Temperatura staklastog prijelaza	60 °C
Temperatura omekšavanja po Vicatu	57 °C
Temperatura savijanja pod toplinom	54 °C
Temperatura savijanja pod toplinom (veće naprezanje)	57 °C
Stopa apsorpcije vode	0,43%

Tablica 2 prikazuje okvirne podatke o mehaničkim svojstvima PLA filameta danih od proizvođača sa oznakama koordinatnog sustava vidljivog na Slika 4.

Tablica 2 Mehanička svojstva PLA filamenta, prema [7]

Parametar	Podaci
Youngov modul (X-Y)	2580 ± 220 MPa
Youngov modul (Z)	2060 ± 170 MPa
Vlačna čvrstoća (X-Y)	35 ± 4 MPa
Vlačna čvrstoća (Z)	31 ± 3 MPa
Stopa izduženja pri lomu (X-Y)	12,2 ± 1,8 %
Stopa izduženja pri lomu (Z)	7,5 ± 1,3 %
Savojni modul (X-Y)	2750 ± 160 MPa
Savojni modul (Z)	2370 ± 150 MPa
Savojna čvrstoća (X-Y)	76 ± 5 MPa
Savojna čvrstoća (Z)	59 ± 6 MPa
Udarni otpor (X-Y)	26,6 ± 2,8 kJ/m <sup>2</sup>
Udarni otpor (urezan) (Z)	7,9 ± 1,2 kJ/m <sup>2</sup>
Udarni otpor (neurezan) (Z)	13,8 ± 0,9 kJ/m <sup>2</sup>



Slika 4 Dijelovi FDM printera [8]

#### 2.4. FDM tehnologija

Sve je započeo FFF, kratica od “*Fused Filament Fabrication*” najraširenija i najjeftinija tehnologija 3D ispisa koja se prvi put pojavila 1992. godina kada je tvrtka Stratasys dobila

odobrenje patenta za nju. FFF tehnologiju 3D ispisa se često naziva FDM (“*Fused Deposition Modeling*”), a upravo to je naziv kojeg je popularizirala tvrtka Stratasys koja je ujedno i zaslužna za nastanak FDM/FFF tehnologije 3D ispisa. Materijal se naziva filament (plastična nit, prikazana na Slika 5), koja se u glavi printera zupčanicima uvlači do grijača koji ju tali. Rastaljena plastika zatim kroz glavu 3D printera izlazi pomoću mlaznice na podlogu. Kako se glava pomiče, tako se rastopljene niti polažu na podlogu, sloj po sloj. Svaki FDM 3D printer ima mogućnost pomicanja u X, Y i Z smjeru. U nekim izvedbama je glava pomična, a podloga fiksna, dok kod drugih se podloga pomiče, a glava ostaje fiksna. [9][10]



Slika 5 Komercijalno dostupni FDM filamenti [11]

## 2.5. Rad FDM pisača

Kako bi se 3D ispisao neki uzorak, potrebni su sljedeći koraci:

### a) Priprema modela:

- Prvo se konstruira 3D model pomoću CAD softvera.
- Model se zatim reže na tanke slojeve pomoću posebnog softvera za „*slicing*“ (poput BambuSlicera ili PrusaSlicera), koji generira G-kod, tj. skup uputa za pisač.

### b) Zagrijavanje filamenta:

- Filament (prikazan kao E na Slika 4), u obliku niti ulazi u ekstruder (dio 3D pisača prikazan slovom A na Slika 4).
- Ekstruder zagrijava filament do temperature tališta (najčešće između 180 °C i 250 °C, ovisno o vrsti polimera).

**c) Ekstruzija materijala:**

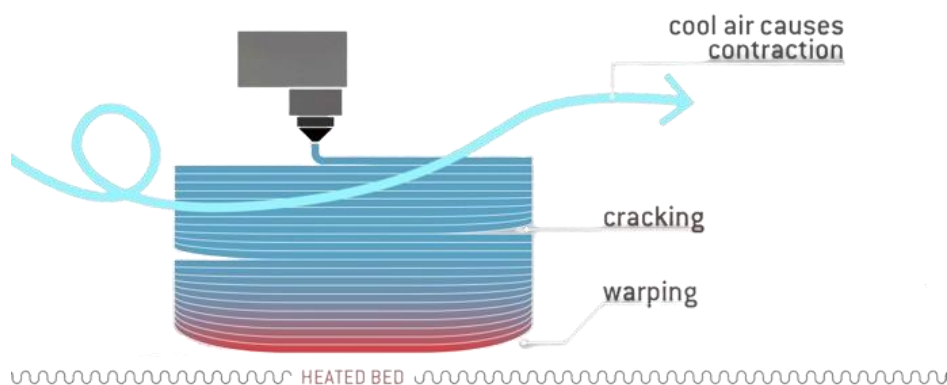
- Rastopljeni materijal izlazi kroz mlaznicu (prikazana na Slika 4, dio B) i nanosi se na radnu površinu printera (prikazano na Slika 4, dio D) ili na prethodni sloj materijala (prikazano na Slika 4, dio C)
- Mlaznica se pomiče u *X* i *Y* smjeru (odnosno u ravnini radne površine printera, kako je označeno na Slika 4), dok se radna platforma ili mlaznica pomiču u *Z* smjeru kako bi se formirali slojevi.

**d) Formiranje slojeva:**

- Svaki sloj materijala brzo se hladi i učvršćuje.
- Proces ekstruzije materijala i formiranja slojeva se ponavlja sve dok se cijeli model (C na Slika 4) ne ispiše.

**2.6. Parametri FDM printera i njihov utjecaj**

Glavni parametri FDM/FFF 3D pisača su **brzina ispisa, temperatura mlaznice, visina slojeva i brzina uzimanja filameta**. Gotovo svaki FDM/FFF 3D pisač korisnicima nudi podešavanje navedenih parametara uporabom softvera kojim se kontrolira 3D pisač, tj. „*slicerom*“. Ti parametri utječu na kvalitetu ispisa, a ovise o tipu materijala koji se koristi i očekivanjima korisnika što se tiče kvalitete ispisa. Ako je cilj što brže dobiti željeni objekt, brzinu ispisa se može postaviti visoko, ali se time smanjuje preciznost ispisa. Što je brzina ispisa i visina sloja manja, to je isprintani objekt precizniji (sličniji zadanom modelu). Glavna mana FDM/FFF 3D printera je toplinsko izvijanje tzv. „*warping*“ (prikazano na Slika 6). Pošto se već isprintani slojevi i njihovi dijelovi hlade različito od novonastalih slojeva, dolazi do termičkih mikro stezanja i rastezanja, što rezultira povlačenjem donjih slojeva s podloge za ispis. Može se ukloniti uporabom grijane podloge za ispis, koja zagrijava i održava prethodno ispisane slojeve na određenoj temperaturi, kako ne bi došlo do većih temperaturnih razlika između slojeva, pa tako i toplinskog izvijanja. [9][10]



Slika 6 Prikaz toplinskog izvijanja pri ispisu [12]

### 2.6.1. Potporne strukture

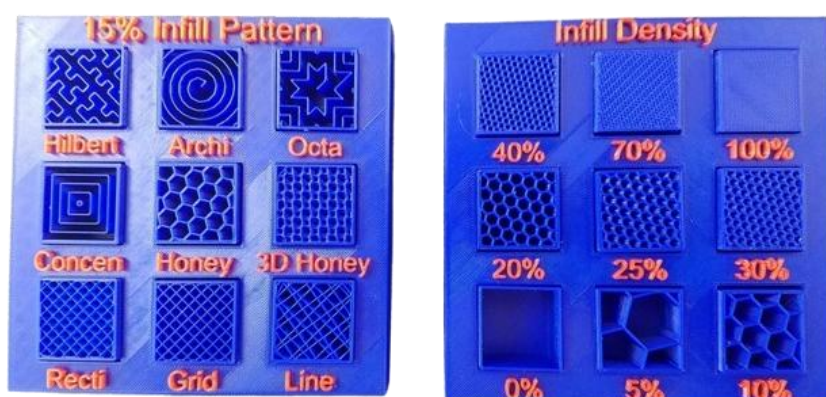
Za izradu modela koji sadrže dijelove koji su pod kutom manjim od 45 stupnjeva, potrebno je korištenje potpornih struktura. Kao što je vidljivo sa Slika 7, takve strukture su vrlo tanke kako bi se štedio materijal, ali i kako bi ih mogli kasnije lako odstraniti. Poželjno je u programu orijentirati model tako da je potrebna što manja količina potpornog materijala, to se može raditi ručno ili automatski u programu. Potporne strukture se mogu raditi od istog materijala kao i model, što ne zahtijeva promjenu materijala u ekstruderu, pa tako smanjuje potrošnju materijala. Mana je što je takvu vrstu potpore znatno teže odstraniti i često ostavlja oštećenja na samom modelu. Druga vrsta potpornih struktura je napravljena od posebnog „support“ materijala, koji je najčešće PVA (eng. *Polyvinyl alcohol*). Kod takvih vrsta materijala je posebnost da se model može uroniti u određenu tekućinu (ovisi o pojedinom materijalu) koja će razgraditi potpornu strukturu i ostaviti model neoštećen. [9][10]



Slika 7 Prikaz potporne strukture [13]

### 2.6.2. Ispuna

Kako bi se smanjila potrošnja materijala i težina 3D ispisanog prototipa, modeli se najčešće izrađuju s unutrašnjošću koja nije potpuno ispunjena. Uobičajeno je koristiti oko 20 % ispunjenosti, pri čemu se razina ispune podešava ovisno o potrebnoj čvrstoći modela. Također, dostupni su različiti oblici ispune, prikazani na Slika 8, a neki od najčešćih su spiralna ispuna (*Gyroid*), pravocrtna ispuna (*Rectilinear*), čvrsta ispuna (*Solid*), rešetkasta ispuna (*Grid*) i drugi.[9][10]



Slika 8 Prikaz vrsta i količine ispune [14]

### 2.6.3. Završna obrada

Prednost 3D ispisa je u tome što završna obrada u pravilu nije potrebna. Modeli se mogu koristiti za predviđenu namjenu odmah nakon ispisa i hlađenja. Po potrebi, modeli se mogu brusiti, bojati ili premazati smolom kako bi se popunile razlike između linija ispisa te se dobio model bez vidljivih tragova 3D ispisa, kao što se vidi na Slika 9. [9][10]



Slika 9 Prikaz PLA prije (desno) i nakon brušenja (lijevo) [15]

#### **2.6.4. Utjecaj tipa 3D pisača**

Uređaji za ispis mogu utjecati na dimenzijsku točnost i mehaničko ponašanje dijelova proizvedenih tehnologijom filamentnog ispisa. Vettori i suradnici [23] predstavljaju istraživanje izvedeno metodom „*round-robin*“ na PLA ispisanom na različitim FFF uređajima, koristeći iste procesne parametre. Rezultati pokazuju značajne razlike u vrijednostima krajnje vlačne čvrstoće (maks = 54,2 MPa, min = 13,2 MPa) ovisno o korištenom pisaču. Mogu se javiti temperaturne varijacije prilikom ispisa na uređajima s otvorenim radnim prostorom. Različita mehanička svojstva mogu se postići, u tim situacijama, za identične komponente smještene u različitim područjima radnog prostora. Korištenje opreme s kontroliranim protokom topline u zatvorenom prostoru može dovesti do optimizirane raspodjele temperatura [24]. U eksperimentalnom dijelu rada korištena je zatvorena vrsta printera.

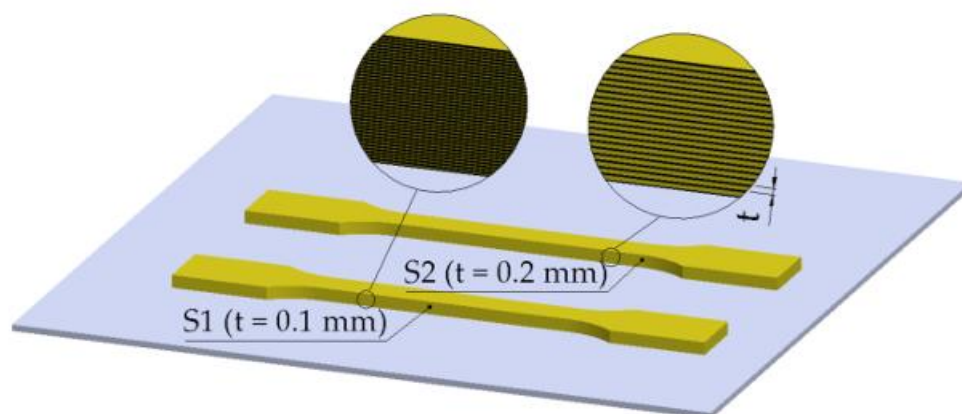
#### **2.6.5. Utjecaj završne obrade, skladištenja i starenja materijala**

Mehaničko ponašanje FFF 3D ispisanih komponenata može biti pod utjecajem poslije-ispisnih termičkih ili termo-kemijskih tretmana, kao i starenja materijala. Istraživanja su pokazala poboljšanje termomehaničkih svojstava PLA uzoraka podvrgnutih post-ispisnom žarenju. Međutim, također je pokazano da PLA uzorci dobiveni FFF tehnologijom i žareni na temperaturama od 60 - 120 °C tijekom 30 do 60 minuta pokazuju smanjenje modula elastičnosti i krajnje vlačne čvrstoće. Svojstva komponenata napravljenih od PLA mogu se mijenjati uvjetima i trajanjem skladištenja. Pri niskoj vlažnosti, PLA ima veću mehaničku čvrstoću, ali manju žilavost. Smanjenje sadržaja vlage s 10 % na 1 % rezultira smanjenjem vlačne čvrstoće za 24,4 %. Poboljšanje mehaničkih svojstava je uočeno s povećanjem trajanja starenja. Nasuprot tome, starenje od 240 sati u slanoj magli uzrokuje smanjenje vlačne čvrstoće za oko 20 % [24].

#### **2.6.6. Utjecaj debljine sloja**

Debljina sloja (ili visina sloja) predstavlja visinu svakog nanesenog sloja (Slika 10). Za gornji i donji sloj može se postaviti posebna debljina. Treba napomenuti da je debljina sloja povezana s promjerom mlaznice i širinom sloja.





**Slika 10** Debljina sloja ( $t$ ) za ISO 527-2 Tip 1A uzorke S1 i S2 [24]

Odabir većih vrijednosti za debljinu sloja dovodi do kraćeg trajanja proizvodnje, ali i do niže rezolucije dijelova. S druge strane, rad s manjim debljinama sloja određuje duže trajanje procesa ispisa i veću preciznost ispisa dijelova. Ukupan broj slojeva je omjer visine dijela po Z-osi i debljine sloja. Smanjenje debljine sloja za 50 % rezultira udvostručenjem trajanja ispisa. Povećanje broja slojeva naglašava učinak ponovnog zagrijavanja nanesenih slojeva, što dovodi do poboljšane difuzije i adhezije između slojeva. Treba napomenuti da varijacija mehaničkih svojstava s debljinom sloja također ovisi i o drugim parametrima. Zbog toga utjecaj promjera mlaznice pisača je veći od utjecaja debljine sloja kada se zahtijeva visoka čvrstoća proizvoda. Povećanje promjera mlaznice dovodi do povećanja gustoće i vlačne čvrstoće 3D ispisanih proizvoda. Pri istoj proporciji između debljine sloja i promjera mlaznice, adhezija između susjednih linija poboljšava se povećanjem promjera mlaznice.[24]

### **2.6.7. Utjecaj brzine ispisa**

Brzina ispisa (mm/s) je brzina glave pisača u XY ravnini tijekom nanošenja slojeva. Ovaj parametar je povezan s protokom (mm<sup>3</sup>/s). Povećanje brzine ispisa dovodi do smanjenja trajanja proizvodnje dijela, ali pogoršava dimenzijsku točnost. Visoke brzine ispisa smanjuju stupanj stvrdnjavanja donjih slojeva pri nanošenju novih slojeva. To može uzrokovati klizne procese između uzastopno nanesenih slojeva (uglavnom na rubovima dijela) i time značajna dimenzijska odstupanja.

### **2.6.8. Utjecaj temperatura mlaznice i platforme za izgradnju**

Temperatura glave za ispis jedan je od najviše proučavanih parametara procesa. U radu [24] autori su odabrali temperature glave za ispis u rasponu od 175°C do 275°C za proizvodnju uzoraka od PLA, ali najčešće analizirane temperature bile su između 190°C i 220°C. Ove vrijednosti koreliraju s točkom taljenja PLA (od 160°C do 180°C). Sklonost korištenju nižih temperatura povezana je s osjetljivošću PLA na toplinsku degradaciju pri visokim



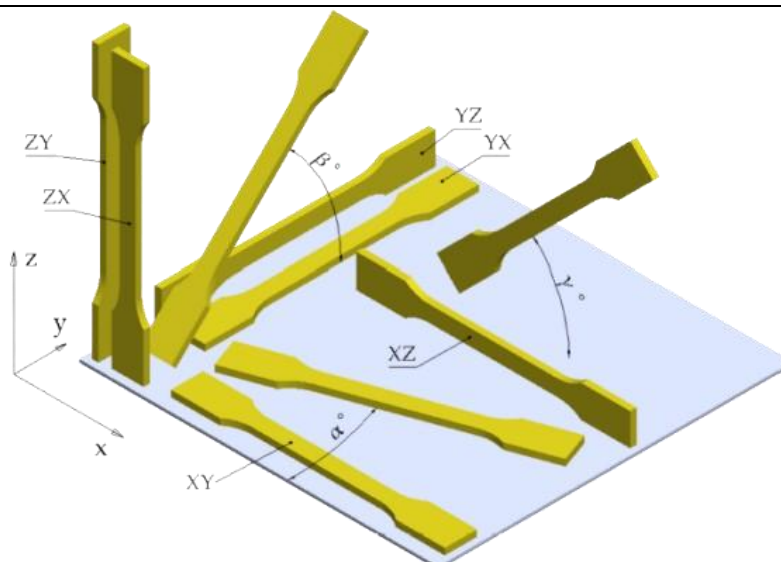
temperaturama i s ekonomskim čimbenicima (smanjena potrošnja energije). Istovremeno, pri niskim temperaturama ispisa (ispod 180°C, prema [34]), taljenje možda neće biti potpuno, a među-slojna difuzija možda neće nastupiti. Slaba difuzija između slojeva može uzrokovati delaminaciju (odvajanje slojeva). Također je prikazano da su pri niskim temperaturama ispisa zračni razmaci između linija uzorka ispune veći, što dovodi do smanjene vlačne čvrstoće.

Više temperature glave za ispis mogu omogućiti bolju međuslojnu difuziju i bolje mehaničke značajke, ali također mogu uzrokovati klizanje nanesenog materijala, što utječe na dimenzionalnu točnost komponenata. U spomenutom radu je također prikazano da korištenje temperatura ispisa iznad 240 °C uzrokuje nestabilan protok materijala iz mlaznice glave.

Temperatura platforme za izgradnju obično se postavlja u rasponu od 50 do 60 °C. Kod 3D pisača u otvorenom prostoru teško je postići ujednačenost temperature platforme za izgradnju zbog toplinskih tokova. Općenito, temperatura u središnjim dijelovima platforme viša je u usporedbi s rubnim dijelovima. Ovaj nedostatak ublažen je kod pisača sa zatvorenim radnim prostorom i kontroliranim toplinskim tokom. Također je prikazano da je utjecaj toplinskog toka na konačnu vlačnu čvrstoću nizak kada su uzorci ispisani horizontalno, a visok kada su uzorci ispisani vertikalno. Uzimanjem u obzir oba temperaturna parametra, temperature glave za ispis i temperature platforme za izgradnju, pokazano je da je utjecaj temperature glave za ispis na mehaničke značajke manji u usporedbi s utjecajem temperature platforme za izgradnju.[24]

### ***2.6.9. Utjecaj orijentacije uzoraka tijekom izrade***

Postavljanje 3D modela na platformu za izgradnju jedan je od glavnih čimbenika koji određuju anizotropno ponašanje FFF ispisanih dijelova iz PLA. Uz to, uočene su velike razlike između mehaničkog ponašanja duž osi  $x$  i  $y$  (osi koje se nalaze u ravnini platforme za izgradnju, Slika 11) i mehaničkog ponašanja duž vertikalne osi  $z$ . U analizu su također uključene varijacije mehaničkih svojstava dijelova koji su rotirani pod različitim kutovima u odnosu na referentni sustav.[24]



**Slika 11 Prikaz različitih orijentacija modela [24]**

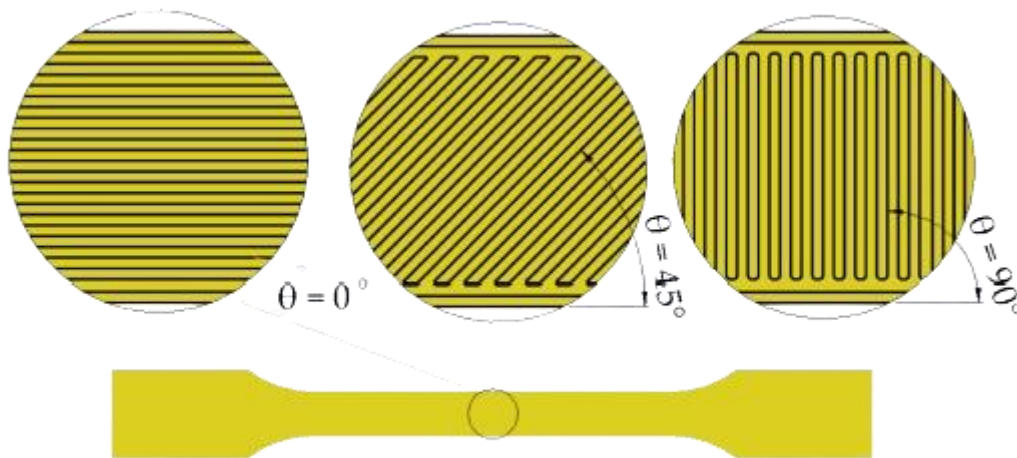
Po normi ISO 52921:2013, označavanje ortogonalne orijentacije (nezarotirane) prizmatičnog dijela u odnosu na referentni sustav pisača vrši se kombinacijom triju slova. Prvo slovo označava os koja je paralelna s najduljom karakterističnom dimenzijom dijela, drugo slovo označava os paralelnu s drugom po duljini karakterističnom dimenzijom, a treće slovo označava os paralelnu s trećom karakterističnom dimenzijom. Ako dio ima ravninu simetrije može se koristiti pojednostavljena oznaka koja se sastoji od prva dva slova. Slika 11 prikazuje različite orijentacije modela 1A. Prva karakteristična dimenzija je duljina uzorka, druga karakteristična dimenzija je širina uzorka. U nekoliko radova, XY i YX orijentacije izgradnje nazivaju se "ravnim orijentacijama izgradnje", XZ i YZ orijentacije nazivaju se "orijentacijama izgradnje na rubu", dok se ZX i ZY orijentacije nazivaju "uspravnim orijentacijama izgradnje". Korištenje termina "ravna orijentacija izgradnje", bez grafičkog detalja, ne omogućuje jasno razlikovanje između XY i YX orijentacije. Nejasnoća se dodatno povećava u slučajevima kada se koriste rotirani uzorci u odnosu na ortogonalnu orijentaciju. [24] U ovom radu epruvete su ispisane u YX orijentaciji.

Pokazalo se da orijentacije ispisa tipa ZX i ZY dovode do znatno nižih mehaničkih karakteristika u usporedbi s rasporedima XY, YX, XZ i YZ. Ovo mehaničko ponašanje uzrokovano je lomom među slojevima koji se javlja kod uzoraka ZX i ZY. Dok kod nagnutih uzoraka u odnosu na platformu smanjuju se mehaničke karakteristike s povećanjem kuta.

#### **2.6.10. Utjecaj kuta ispune**

Uzorak ispune 3D ispisanih dijelova predstavlja raspored uzastopnih linija unutar jednog sloja, vidljivo na Slika 12. Mehaničko ponašanje ovisi o nekoliko parametara ispune: kutu ispune,

načinu izmjene kuta ispune između dva uzastopna sloja, širini linije ispune, razmaku između dvije uzastopne linije ispune, broju linija zida i razmaku između ispune i linija zida.[24]

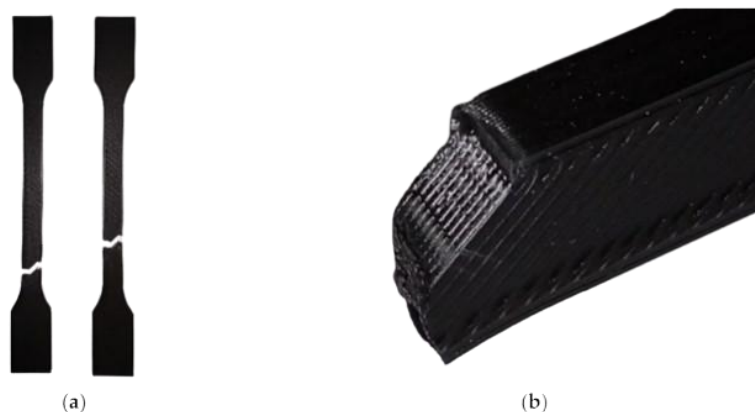


**Slika 12 Prikaz linija ispune pod različitim kutevima [24]**

Kut ispune utječe na anizotropno mehaničko ponašanje i lom 3D FFF ispisanih komponentata. Razlikuju se dva glavna tipa rasporeda: jednosmjerna ispuna (isti kut ispune zadržava se za sve uzastopne slojeve, Slika 12 lijevo) i izmjenična ispuna (kut ispune varira između uzastopnih slojeva, obično za  $90^\circ$ , Slika 12 sredina i desno).[24]

Lom zateznih uzoraka može biti pod utjecajem ispune i orijentacije izgradnje. Mogu se definirati tri načina loma:

- a) **Lom između slojeva**, kada dolazi do loma na spoju dva susjedna sloja (npr. lom uzoraka u ZY i ZX orijentacijama)
- b) **Lom između linija**, kada je površina loma usklađena s kutom ispune, prikazano na Slika 13
- c) **Lom unutar sloja**, kada površina loma i kut ispune nisu usklađeni



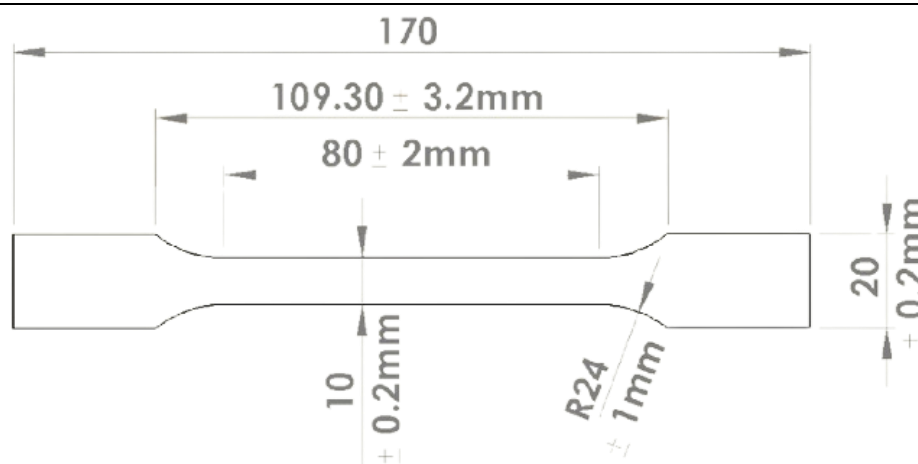
**Slika 13 Prikaz površine loma usklađene s kutom ispune (a), detaljniji prikaz (b) [24]**

Lom među linijama može se povezati sa smanjenom difuzijom između linija ispune. Pojava loma među linijama kod *XY* uzoraka s kutom ispune  $90^\circ$  uzrok je niže vlačne čvrstoće tih uzoraka u usporedbi s vlačnom čvrstoćom uzoraka s kutom ispune  $0^\circ$  ili  $45^\circ$ . [24]

## 2.7. Metoda ispitivanja materijala

Najčešće korištene metode ispitivanja za karakterizaciju mehaničkog ponašanja PLA dijelova proizvedenih fuzijom filamenta su ispitivanja na vlak i ispitivanja na savijanje s tri točke potpore. Trenutno ne postoje specifični ISO standardi koji definiraju oblik uzoraka proizvedenih FFF aditivnom proizvodnjom. Stoga, za vlačna ispitivanja koriste se uzorci definirani općim standardom za plastiku ISO 527-2:2019 [1]. Uzorci koji se koriste za ispitivanja savijanjem definirani su standardom ISO 178:2019. Korištenje uzoraka različitih oblika i dimenzija može rezultirati različitim mehaničkim karakteristikama. Pokazuje se da povećanje debljine uzorka smanjuje vrijednosti mehaničkih karakteristika  $\sigma_m$  i  $E$  određenih vlačnim ispitivanjima. Također u radu [24] zaključuju da vlačna čvrstoća PLA materijala snažno ovisi o brzini deformacije i brzini vlačnog ispitivanja. Povećanje brzine ispitivanja s 10 mm/min na 100 mm/min dovodi do povećanja vrijednosti vlačne čvrstoće za približno 11 %. [24]

Metoda ispitivanja bazira se na normi ISO 527 [1], koja zahtjeva minimalno 5 uzoraka oblika i dimenzija epruvete definiranih na Slika 14. Norma zahtjeva epruvetu tipa 1A koja služi za ispitivanje epruveta dobivenih brizganjem ili ekstrudiranjem plastike. Norma vrijedi za epruvete čiji je vrat najmanje 1 mm debljine. Problem epruvete određene normom je taj što u većini slučajeva prilikom ispitivanja na kidalici, epruveta ne puca u homogenom području nego u području prijelaza kao što je prikazano Slika 1. To područje nema garantiranu homogenost te može doći do većih odstupanja prilikom testiranja.



Slika 14 Oblik i dimenzije 1A epruvete prema ISO 527 normi [16]

## 2.8. Mehaničko ponašanje PLA u literaturi

U radu [19] Bochnia i dr. odredili su statičku vlačnu čvrstoću pri brzini kretanja čeljusti od 1 mm/min koristeći univerzalnu ispitnu kidalicu Inspekt mini 3kN proizvedenu od strane tvrtke Hegewald i Peschke MPT GmbH.

Maksimalna vlačna čvrstoća ( $R_m$ ) izračunata je pomoću ugrađenog softvera kidalice prema sljedećoj formuli:

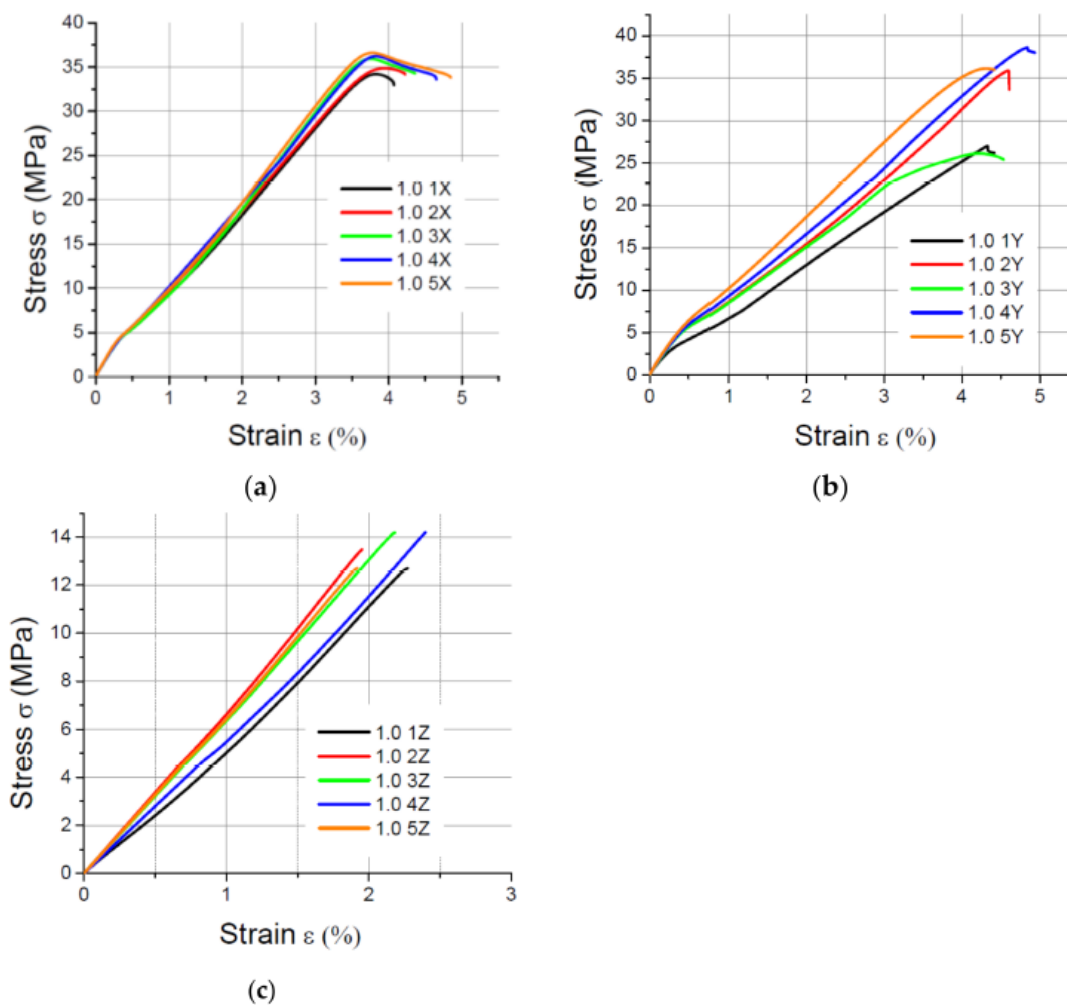
$$R_m = \frac{F_m}{\bar{a}\bar{b}}, \quad (1)$$

Prosječne vrijednosti širine ( $\bar{a}$ ) i visine ( $\bar{b}$ ) poprečnog presjeka uzoraka unesene su u bazu podataka LabMaster softvera za svaki uzorak pojedinačno kako bi se podaci mogli prikazati u obliku krivulje naprezanja i istežanja te kako bi se izračunao  $R_m$ . Takvi programi koriste nominalne vrijednosti dimenzija uzoraka, iste za cijelu seriju, a vrijednosti odstupanja dimenzija uzimaju se u obzir prilikom procjene pogrešaka mjerenja. U slučaju uzoraka s tankim stijenkama, ovaj pristup može dovesti do iskrivljenih rezultata za cijeli eksperiment.

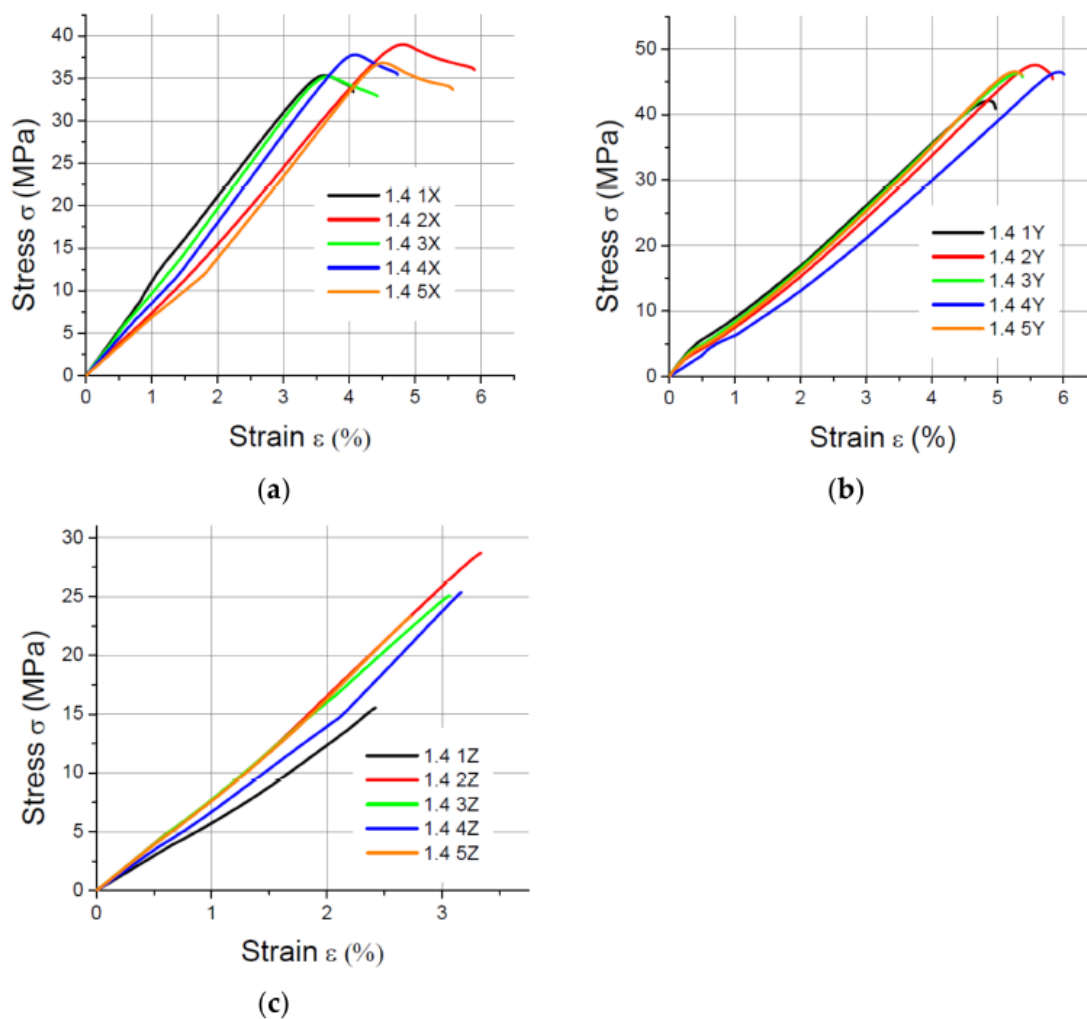
Vrijednosti modula elastičnosti ( $E$ ) izračunate su automatski pomoću LabMaster softvera primjenom metode regresije za ispis orijentiran u smjerovima  $X$  i  $Y$ , uz deformacije  $\varepsilon$  u rasponu od 0,2 % do 2 %, što osigurava jednako poravnatu mjerenu udaljenost za sve uzorke. Za uzorke izrađene u smjeru  $Z$ , modul elastičnosti određen je također metodom regresije, ali je pretpostavljeno da deformacije  $\varepsilon$  variraju između 0,2 % i 0,8 % zbog manje izduženosti uzoraka ispisanih vertikalno.

Provedeni testovi vlačne čvrstoće pokazali su da je, u slučaju ispisa u orijentaciji osi  $z$ , jedinično istežanje znatno manje (u nekim slučajevima lom uzorka dogodio se pri istežanju manjem od

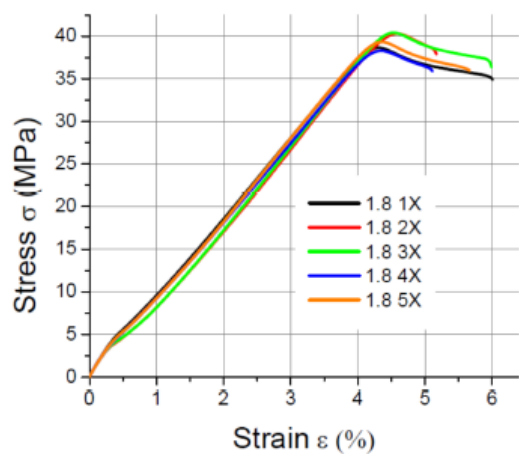
2 %) nego kod ispisa u orijentacijama osi  $x$  i  $y$ , zbog čega su primijenjena dva različita raspona jediničnih deformacija (istezanja). Rezultati ispitivanja statičke vlačne čvrstoće za PLA uzorke prikazani su na Slika 15, Slika 16, Slika 17, Slika 18 za debljine uzoraka od 1, 1,4, 1,8 te 4 mm. Sve ostale dimenzije su preuzete iz norme. [19]



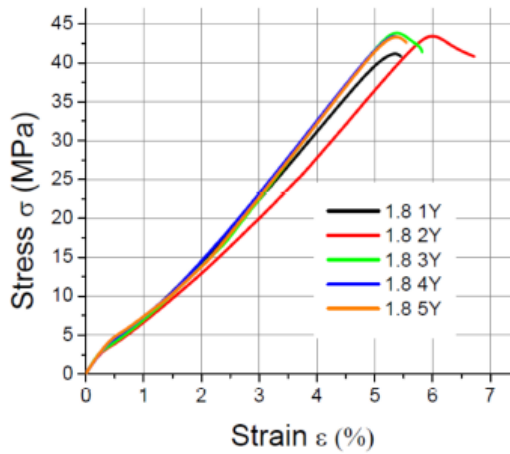
**Slika 15** Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za uzorke debljine 1 mm izrađene od PLA materijala ispisanog u: (a) X orijentaciji, (b) Y orijentaciji, (c) Z orijentaciji. [19]



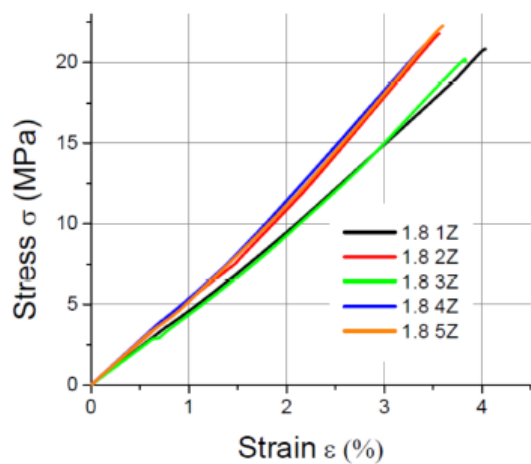
**Slika 16** Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za uzorke debljine 1,4 mm izrađene od PLA materijala ispisanog u: (a) X orijentaciji, (b) Y orijentaciji, (c) Z orijentaciji. [19]



(a)



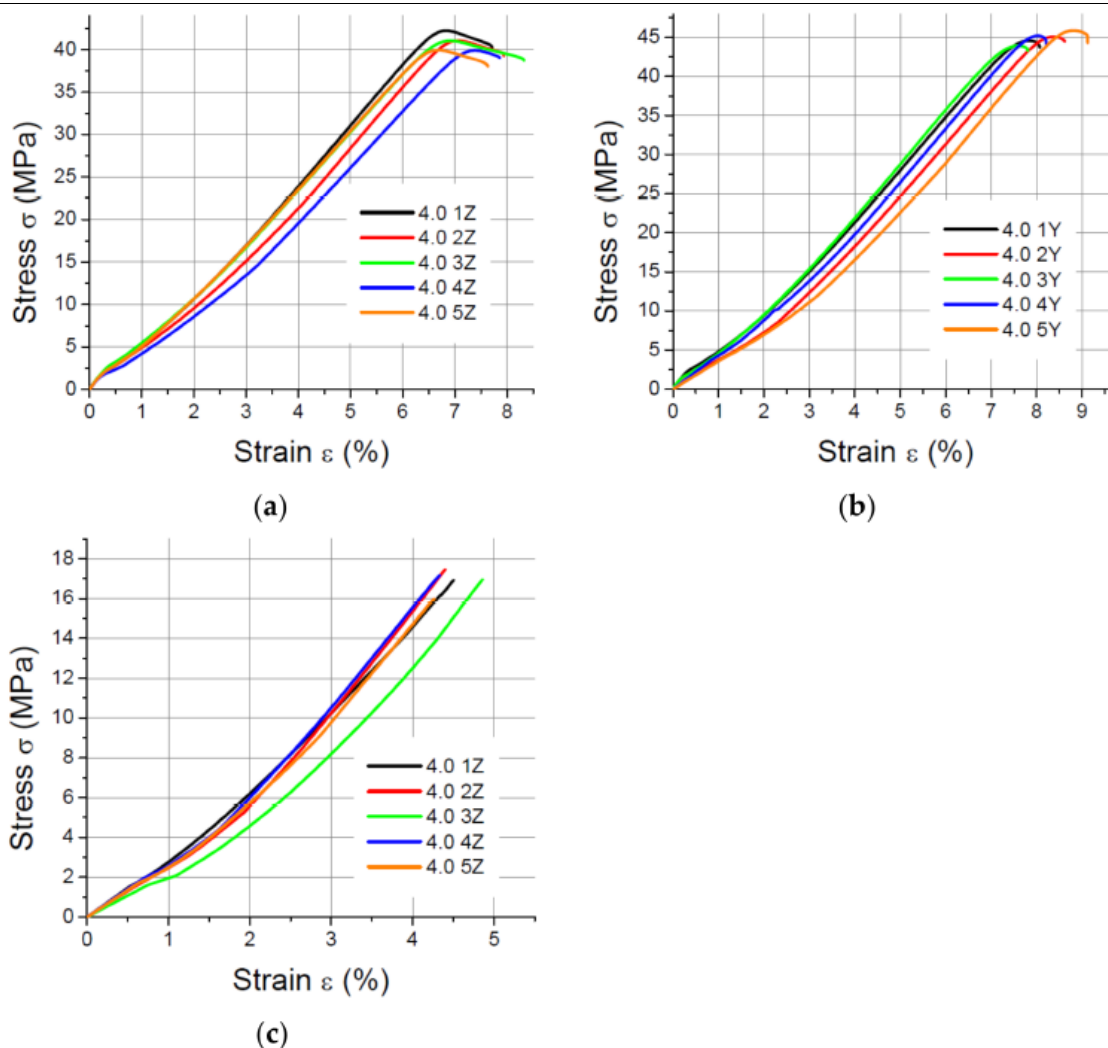
(b)



(c)

**Slika 17** Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za uzorke debljine 1,8 mm izrađene od PLA materijala ispisanog u: (a) X orijentaciji, (b) Y orijentaciji, (c) Z orijentaciji. [19]





**Slika 18** Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za uzorke debljine 4 mm izrađene od PLA materijala ispisanog u: (a) X orijentaciji, (b) Y orijentaciji, (c) Z orijentaciji. [19]

Sa gornjih slika je vidljivo da je rasipanje rezultata nezanemarivo.

Maksimalna vlačna čvrstoća  $R_m$  i maksimalni postotak deformacije  $\varepsilon_m$  uzoraka od PLA materijala, zabilježeni pri maksimalnoj vlačnoj sili, prikazani u Tablica 3, Tablica 4, Tablica 5, Tablica 6 za sve ispitane debljine uzoraka. Dani su podaci za svako pojedino ispitivanje, kao i prosječne vrijednosti za sva ispitivanja sa standardnim devijacijama.

**Tablica 3** Vlačna čvrstoća i postotak deformacije za 1,0 mm PLA [19]

Broj uzorka	Vlačna čvrstoća $R_m$ (MPa)	Postotak deformacije $\varepsilon_m$ (%)
1,0 mm 1X	34,2	3,8
1,0 mm 2X	34,87	3,9
1,0 mm 3X	35,93	3,8
1,0 mm 4X	36,23	3,8

1,0 mm 5X	36,62	3,8
$\bar{x}$	<b>35,57</b>	<b>3,8</b>
SD	<b>1,0</b>	<b>0,1</b>
1,0 mm 1Y	27,02	4,3
1,0 mm 2Y	35,89	4,6
1,0 mm 3Y	26,12	4,2
1,0 mm 4Y	38,63	4,8
1,0 mm 5Y	36,14	4,3
$\bar{x}$	<b>32,76</b>	<b>4,5</b>
SD	<b>5,76</b>	<b>0,3</b>
1,0 mm 1Z	12,7	2,4
1,0 mm 2Z	13,49	1,9
1,0 mm 3Z	14,19	2,1
1,0 mm 4Z	14,22	2,3
1,0 mm 5Z	12,72	1,8
$\bar{x}$	<b>13,46</b>	<b>2,1</b>
SD	<b>0,75</b>	<b>0,3</b>

**Tablica 4** Vlačna čvrstoća i postotak deformacije za 1,4 mm PLA [19]

Broj uzorka	Vlačna čvrstoća $R_m$ (MPa)	Postotak deformacije $\varepsilon_m$ (%)
1,4 mm 1X	35,33	3,6
1,4 mm 2X	38,98	4,8
1,4 mm 3X	35,2	3,7
1,4 mm 4X	37,76	4,1
1,4 mm 5X	36,82	4,5
$\bar{x}$	<b>36,82</b>	<b>4,1</b>
SD	<b>1,61</b>	<b>0,5</b>
1,4 mm 1Y	42,1	4,9

1,4 mm 2Y	47,54	5,6
1,4 mm 3Y	46,31	5,3
1,4 mm 4Y	46,5	5,9
1,4 mm 5Y	46,55	5,3
$\bar{x}$	<b>45,8</b>	<b>5,4</b>
SD	<b>2,12</b>	<b>0,4</b>
1,4 mm 1Z	15,55	2,4
1,4 mm 2Z	28,69	3,3
1,4 mm 3Z	25,05	3,1
1,4 mm 4Z	25,36	3,2
1,4 mm 5Z	23,29	2,7
$\bar{x}$	<b>23,59</b>	<b>2,9</b>
SD	<b>4,9</b>	<b>0,4</b>

**Tablica 5** Vlačna čvrstoća i postotak deformacije za 1,8 mm PLA [19]

Broj uzorka	Vlačna čvrstoća $R_m$ (MPa)	Postotak deformacije $\varepsilon_m$ (%)
1,8 mm 1X	38,66	4,3
1,8 mm 2X	40,31	4,6
1,8 mm 3X	40,43	4,5
1,8 mm 4X	38,3	4,3
1,8 mm 5X	39,34	4,4
$\bar{x}$	<b>39,41</b>	<b>4,4</b>
SD	<b>0,96</b>	<b>0,1</b>
1,8 mm 1Y	41,18	5,4
1,8 mm 2Y	43,45	6,0
1,8 mm 3Y	43,86	5,4
1,8 mm 4Y	43,44	5,3
1,8 mm 5Y	43,34	5,4

$\bar{x}$	<b>43,05</b>	<b>5,5</b>
SD	<b>1,07</b>	<b>0,3</b>
1,8 mm 1Z	20,85	4,0
1,8 mm 2Z	21,8	3,6
1,8 mm 3Z	20,22	3,8
1,8 mm 4Z	21,11	3,4
1,8 mm 5Z	22,27	3,6
$\bar{x}$	<b>21,25</b>	<b>3,7</b>
SD	<b>0,8</b>	<b>0,3</b>

**Tablica 6** Vlačna čvrstoća i postotak deformacije za 4,0 mm PLA [19]

Broj uzorka	Vlačna čvrstoća $R_m$ (MPa)	Postotak deformacije $\varepsilon_m$ (%)
4,0 mm 1X	42,23	6,8
4,0 mm 2X	41,04	7,1
4,0 mm 3X	41,04	6,9
4,0 mm 4X	39,9	7,4
4,0 mm 5X	39,92	6,7
$\bar{x}$	<b>40,83</b>	<b>7,0</b>
SD	<b>0,97</b>	<b>0,3</b>
4,0 mm 1Y	45,88	8,8
4,0 mm 2Y	44,58	7,8
4,0 mm 3Y	45,08	8,3
4,0 mm 4Y	43,93	7,5
4,0 mm 5Y	45,24	7,9
$\bar{x}$	<b>44,94</b>	<b>8,1</b>
SD	<b>0,73</b>	<b>0,5</b>
4,0 mm 1Z	16,92	4,5
4,0 mm 2Z	17,45	4,4

4,0 mm 3Z	16,95	4,9
4,0 mm 4Z	17,16	4,3
4,0 mm 5Z	15,98	4,3
$\bar{x}$	<b>16,89</b>	<b>4,5</b>
SD	<b>0,55</b>	<b>0,2</b>

I s dijagrama i iz tablica je vidljivo da se maksimalna istezanja pri lomu i vlačna čvrstoća povećavaju s povećanjem debljine uzorka. Vlačna čvrstoća je za neke debljine uzorka najveća za smjer ispisa po  $X$  osi, a za neke po  $Y$  osi. Epruvete ispisane po  $Z$  osi imaju potpuno drugačija svojstva od ostala dva smjera ispisa.

### 2.9. Usporedba materijalnih svojstava danih od proizvođača i iz literature

U ovom poglavlju radi se usporedba podataka iz literature [19] s rasponima proizvođača [7], za epruvete ispisane po  $X$  osi. Iako ispitivanje u literaturi nije odrađeno s materijalom ovog proizvođača, dati će nam dodatna znanja za usporedbe u eksperimentalnom dijelu rada. Podaci su prikazani u Tablica 7 i Tablica 8.

**Tablica 7 Referentne vrijednosti proizvođača [7]**

Proizvođač		
$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\epsilon_m$ , %	$E$ , MPa
$35 \pm 4$	$12,2 \pm 1,8$	$2580 \pm 220$

**Tablica 8 Usporedba podataka literature i proizvođača [19]**

	Literatura		
	$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\epsilon_m$ , %	$E$ , MPa
1 mm	35,57	3,8	875
1,4 mm	36,82	4,1	872,1
1,8 mm	39,41	4,4	829,8
4 mm	40,83	7,0	464,5

Usporedbom literature i proizvođača uočavamo dobro preklapanje prosječne maksimalne vlačne čvrstoće. Pošto su u literaturi epruvete ispisane poprečnom ispunom i zbog dobrog podudaranja podataka naprezanja, može se pretpostaviti da je i proizvođač koristio takvu

ispunu. Elongacije su znatno manje u literaturi te ne ulaze u raspon proizvođača. Moduli elastičnosti su također drastično različiti i mnogo manji u literaturi naprema vrijednostima raspona proizvođača.

### 3. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

#### 3.1. Priprema epruveta

U ovom radu pokusne epruvete izrađene su na printeru Bambulab P1S s 0,4 mm glavom, prikazanom na Slika 19, novije generacije FDM printera, vrlo dobrih mogućnosti i pouzdanosti. Volumen koji može ispisati je 256 x 256 x 256 mm. Maksimalna temperatura ekstrudera je 300 °C, a podloge 100 °C.

Ključne značajke printera:

a) **Zatvorena komora za ispis**

- omogućuje stabilnu temperaturu tijekom ispisa, što je posebno korisno za materijale osjetljive na temperaturu poput ABS-a i ASA-e.

b) **Napredni sustav hlađenja**

- uključuje pomoćni ventilator za hlađenje dijelova, ventilator za regulaciju temperature komore i ventilator za hlađenje upravljačke ploče, osiguravajući optimalne uvjete tijekom ispisa.

c) **Aktivni ugljeni filter**

- smanjuje neugodne mirise i potencijalno štetne plinove koji nastaju prilikom ispisa određenih materijala.

d) **Brzi ispis**

- S maksimalnom brzinom glave od 500 mm/s i ubrzanjem do 20 m/s<sup>2</sup>, omogućuje brz i učinkovit ispis bez kompromisa u kvaliteti.

e) **Automatsko niveliranje podloge**

- Senzor za automatsko niveliranje osigurava savršen prvi sloj pri svakom ispisu, povećavajući uspješnost ispisa.



**Slika 19 Bambulab P1S [17]**

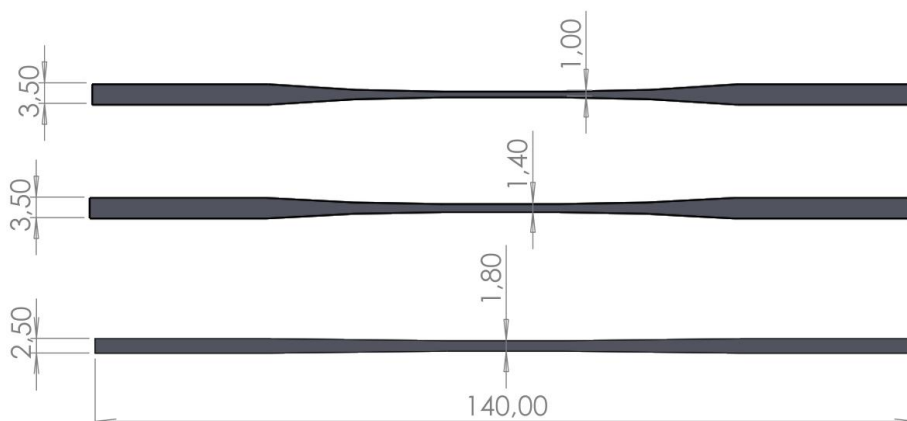
Epruvete potrebne za ispitivanje podijeljene su u 3 skupine. Sve tri skupine su rađene od istog crnog PLA materijala pri temperaturi glave od 230 °C i temperaturi radne platforme od 60 °C. Dimenzije uzoraka su 1 mm, 1,4 mm, 1,8 mm. Ispisane su po grupama od 5, 6 ili 12 epruveta u jednom ispisu kako bi imale potpuno identične uvjete ispisa. Parametri su zapisani u Tablica 9.

**Tablica 9 Parametri uzoraka**

	Skupina 1	Skupina 2	Skupina 3
Ispuna	Uzdužna (95 %)	Uzdužna (100 %)	Poprečna (100 %)
Visina sloja	0,2 mm	0,08 mm	0,2 mm
Broj zidova	2	2	0

Geometrije epruveta uzete su iz diplomskog rada I. Uremović [18] „Optimizacija geometrije epruvete za jednoosno i dvoosno vlačno ispitivanje“ za koje je i numerički i eksperimentalno pokazano da su maksimalna naprezanja u homogenom, mjenom području. Njihova geometrija je prikazana na Slika 20.





Slika 20 Geometrije korištenih epruveta

Parametri 3D ispisa prve skupine postavljeni su prema [19], kako bi rezultati bili usporedivi, dok su parametri druge skupine postavljeni kao optimalne postavke ispisa za najprecizniju geometriju. Treća skupina ima jednake parametre kao prva skupina osim razlike u ispuni koja je 100 % iz razloga jer bi program pisača u slučaju 95 %-tne ispune dodavao uzdužnu pomoćnu ispunu na poprečno ispunjene epruvete. U radu Bochnia i dr. [19] je PLA materijal ispitan vlačno na epruvetama napravljenim po normi ISO 527[1]. Ispitane debljine uzorka su 1 mm, 1,4 mm, 1,8 mm te 4 mm. Opis ispitivanja i rezultati prikazani su ranije u paragrafu 2.8 Mehaničko ponašanje PLA u literaturi.

### 3.1.1. Broj uzoraka

Prema normi potrebno je barem 5 uzoraka, druga skupina sadrži još jedan radi sigurnosti. Glavna brzina ispitivanja uzeta je iz [19] i iznosi 1 mm/min. Ispitivati će se i ponašanje uzdužnih epruveta od 1 mm pri brzini od 5 mm/min kako bi se vidjelo postoje li razlike i kolike su. Broj uzoraka prikazan je u Tablica 10.

Tablica 10 Broj uzoraka

Broj uzoraka	Skupina 1		Skupina 2		Skupina 3
	1 mm/min	5 mm/min	1 mm/min	5 mm/min	1 mm/min
1 mm	5	5	6	6	5
1,4 mm	5	/	6	/	/
1,8 mm	5	/	6	/	/

Na uzorke je prije ispitivanja potrebno nacrtati bijele točke kako bi kamera kidalice mogla pratiti deformaciju. Prema normi moraju biti na sredini vrata, udaljene za 20 mm. Kako je potrebo ručno crtanje, točke će imati određena odstupanja od te vrijednosti. Prikaz pripremljene epruvete vidi se na Slika 21.



**Slika 21** Pripremljene epruvete spremne za ispitivanje

### **3.1.2. Procedura mehaničkog ispitivanja**

Kidalica korištena za ispitivanje sastoji se od četiri osi i omogućuje dvoosna ispitivanja materijala. Sastoji se od osi kidalice i kamera za mjerenje udaljenosti između točaka na epruveti iz kojih se može izračunati deformacija. Upravljanje uređaja provodi se unutar Beckhoffovog TwinCat programa. Svaka os ima mogućnost zasebnog kretanja u aksijalnom smjeru, uz mogućnost automatskog unosa brzine kretanja. Prije početka ispitivanja potrebno je kalibrirati senzore sile smještene na čeljustima pomoću vanjskog uređaja za mjerenje sila. Kada rezultati oba mjerača postanu jednoznačni, moguće je započeti proceduru ispitivanja.

Nakon postavljanja uzorka u čeljust, ručno se zateže kako bi se osigurao dovoljan faktor trenja i spriječilo proklizavanje tijekom ispitivanja. Pri tome je potrebno paziti da zatezanje ne bude prekomjerno kako ne bi došlo do stvaranja kritičnog presjeka na nepravilnoj poziciji. Prije postavljanja uzorka na kidalicu, na uzorak je potrebno označiti dvije točke jednoliko razmaknute, sukladno normi. Ove točke označavaju ispitnu duljinu i prate se pomoću sustava

kamera na kidalici. Tijekom razvlačenja uzorka, kamera prati kretanje označenih točaka te bilježi njihove koordinate. Prije početka ispitivanja, točke moraju biti precizno definirane u sučelju, a kamera zaštićena od vanjskih utjecaja poput refleksije i dodatnih izvora svjetlosti. U tu svrhu koriste se industrijska svjetla postavljena uz kamere.

Nakon što je uzorak postavljen i točke označene, definira se brzina ispitivanja. Proces razvlačenja nastavlja se sve dok uzorak ne pukne. Nakon loma, mjerenje se zaustavlja, a čeljusti se vraćaju u početni položaj. Rezultati ispitivanja pohranjuju se u obliku tekstualnih zapisa koji uključuju očitane sile na svakoj čeljusti i udaljenosti između dviju označenih točaka. Na temelju tih podataka kasnije se izračunavaju naprezanja i deformacije. Trenutak smanjenja sile označava početak puzanja materijala i početak loma uzorka. Podaci dobiveni nakon tog trenutka se mogu zanemariti tijekom postupka karakterizacije materijala.

### 3.2. Postupak materijalne karakterizacije

Nakon provedenog vlačnog testa na svim epruvetama, dobiveni podaci uvedeni su u Octave program kako bi njihove vrijednosti mogli analizirati, dijagramima bolje pokazati i razumjeti. U sljedećim poglavljima uz prikaz dijagrama i tablica za pojedinu skupinu epruveta, biti će prikazane i slike skupina epruveta nakon provedenog vlačnog testa.

Za izračun stvarnih naprezanja koristimo izraz:

$$\sigma_x = \frac{\lambda \cdot F_m}{A}, \quad (2)$$

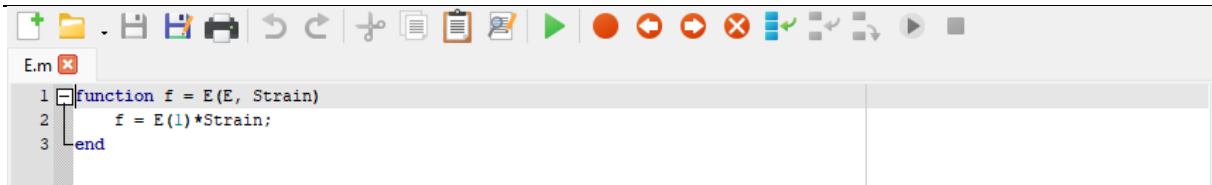
gdje je  $\lambda$  istežanje,  $F_m$  je maksimalna sila, a  $A$  početna površina poprečnog presjeka. Deformacija se računa kao:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (3)$$

pri čemu je  $\Delta l$  razlika trenutne i početne udaljenosti između točaka, a  $l_0$  početna udaljenost točaka.

### 3.3. Određivanje modula elastičnosti

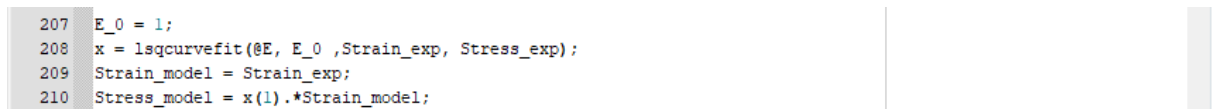
Modul elastičnosti moguće je odrediti koristeći metodu najmanjih kvadrata pomoću funkcija u programu Octave. Prvo je potrebno definirati funkciju modula elastičnosti  $E$ , njen kod mora biti definiran kao posebna datoteka kako bi se moglo na njega pozvati u glavnom kodu. Kod za  $E$  prikazuje Slika 22.



```
1 function f = E(E, Strain)
2     f = E(1)*Strain;
3 end
```

**Slika 22** Prikaz koda za izračun modula elastičnosti

Nakon definiranja funkcije za izračun modula elastičnosti, koristi se funkcija *lsqcurvefit*, koja je prikazana na Slika 23. U nju je potrebno iza izraza unijeti funkciju koju želimo karakterizirati, zatim početnu točku, podatke za  $x$  os, te podatke za  $y$  os. Njenom provedbom dobije se vrijednost modula elastičnosti kojeg smo određivali za svaku skupinu epruveta, a ne pojedinačno za svaku epruvetu.



```
207 E_0 = 1;
208 x = lsqcurvefit(@E, E_0, Strain_exp, Stress_exp);
209 Strain_model = Strain_exp;
210 Stress_model = x(1).*Strain_model;
```

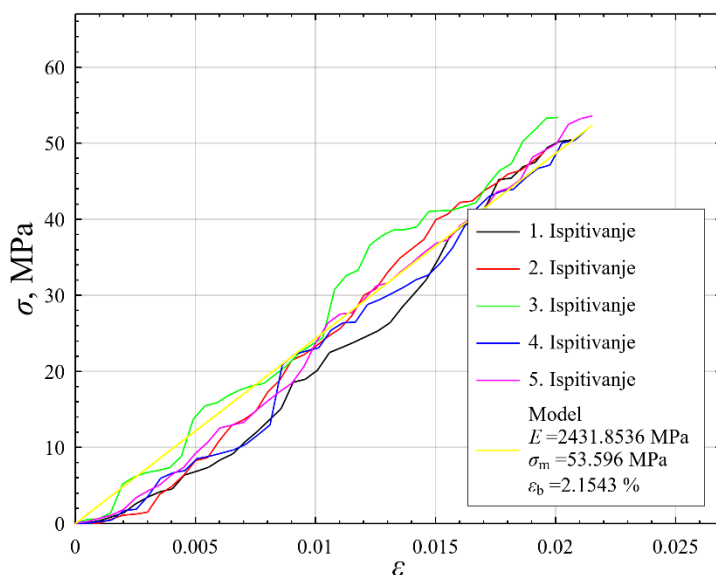
**Slika 23** Prikaz koda funkcije *lsqcurvefit*

## 4. REZULTATI

### 4.1. Skupina 1

#### 4.1.1. Uzorak 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine

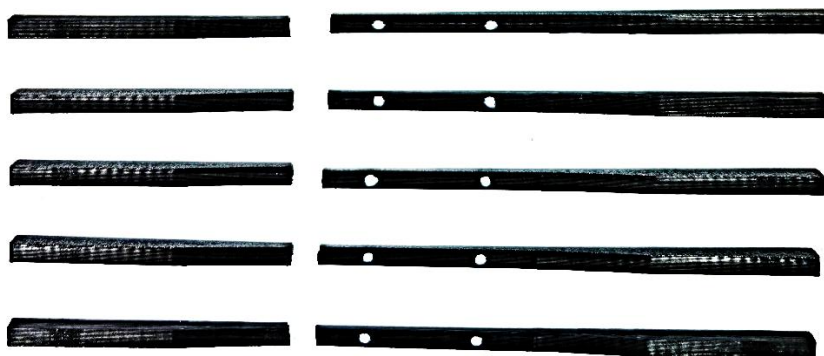
Rezultate ispitanih epruveta od 1 mm, prve skupine prikazuju Slika 24, Slika 25 i Tablica 11.



Slika 24 Dijagram uzoraka uzdužnog sloja, 0,2 mm, 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine

Tablica 11 Prikaz rezultata 0,2 mm – 1 mm

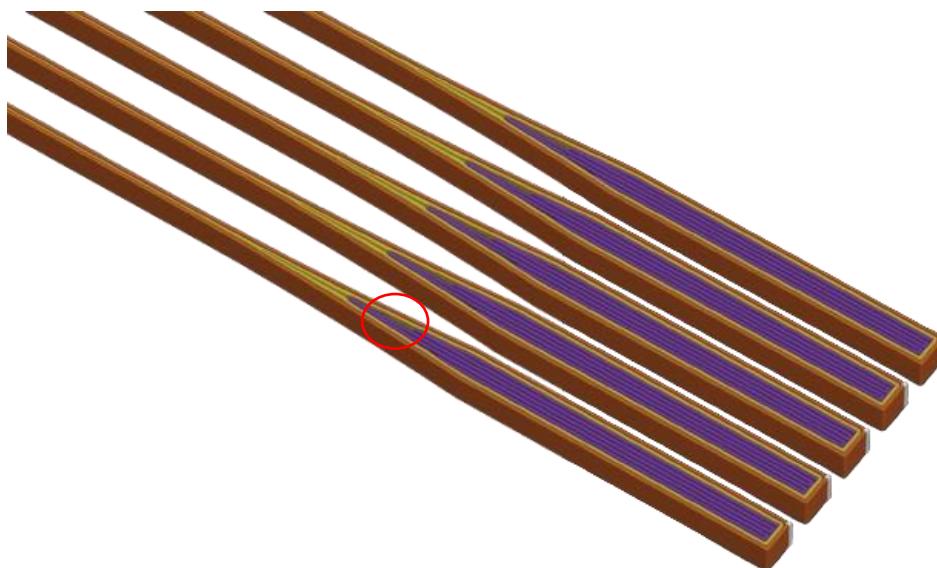
Grupni rezultati ispitivanja – 1 mm		
$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\epsilon_m$ , %	$E$ , MPa
51,587	1,953	2431,85



Slika 25 Prikaz ispitanih epruveta od 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine

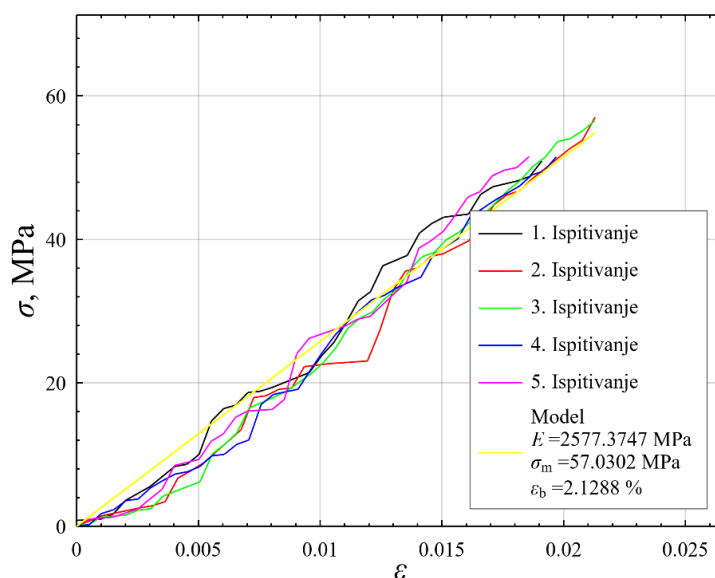
Kao što se da uočiti na Slika 25, epruvete su pukle na vrlo sličnim mjestima, izvan ispitnog područja. Razlog tomu je što na tom mjestu dolazi do spajanja 95 %-tne ispune, stvarajući

prazninu (označena crvenom kružnicom na Slika 26) u ispuni gdje zbog manjka materijala najprije dolazi do puknuća epruvete. Ispuna se može vidjeti na Slika 26.



**Slika 26** Prikaz uzoraka od 1 mm, 0,2 mm visine sloja u programu pisaa  
**4.1.2. Uzorak od 1 mm debljine, 5 mm/min ispitne brzine**

Rezultate ispitanih epruveta od 1 mm, 1. skupine prikazuju Slika 27, Slika 28 i Tablica 12.



**Slika 27** Dijagram uzoraka uzdužnog sloja, 0,2 mm, 1 mm debljine, 5 mm/min ispitne brzine

**Tablica 12** Prikaz rezultata 0,2 mm – 1 mm (veća brzina)

Grupni rezultati ispitivanja – 1 mm		
$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\varepsilon_m$ , %	$E$ , MPa
53,508	1,857	2577,37

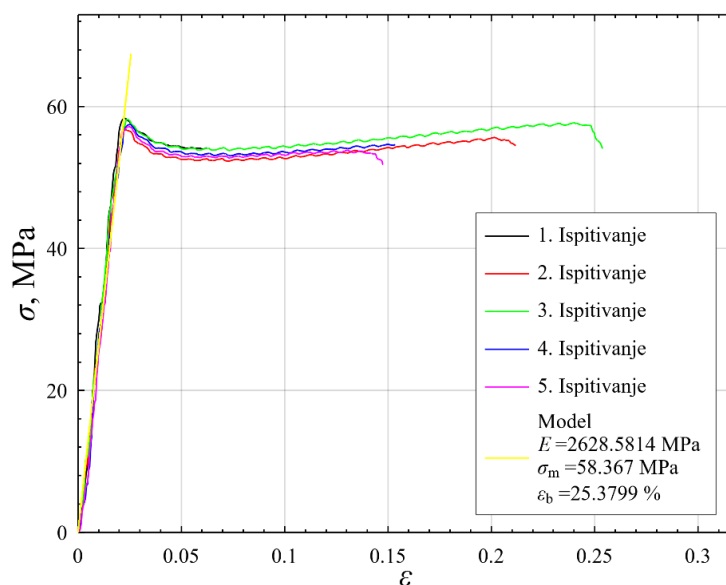


**Slika 28 Prikaz ispitanih epruveta od 1 mm debljine, 5 mm/min ispitne brzine**

Moguće je uočiti na Slika 28 da brzina ispitivanja u ovom slučaju ne utječe na mjesto pucanja epruvete jer ono ostaje jednako, zbog razloga opisanih ranije. Vidljivo je na dijagramu da rezultati ispitivanja nisu značajno različiti naprema sporijoj brzini ispitivanja.

#### 4.1.3. Uzorak od 1,4 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine

Rezultate ispitanih epruveta od 1,4 mm, 1. skupine prikazuju Slika 29, Slika 30 i Tablica 13.



**Slika 29 Dijagram uzoraka uzdužnog sloja, 0,2 mm, 1,4 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine**

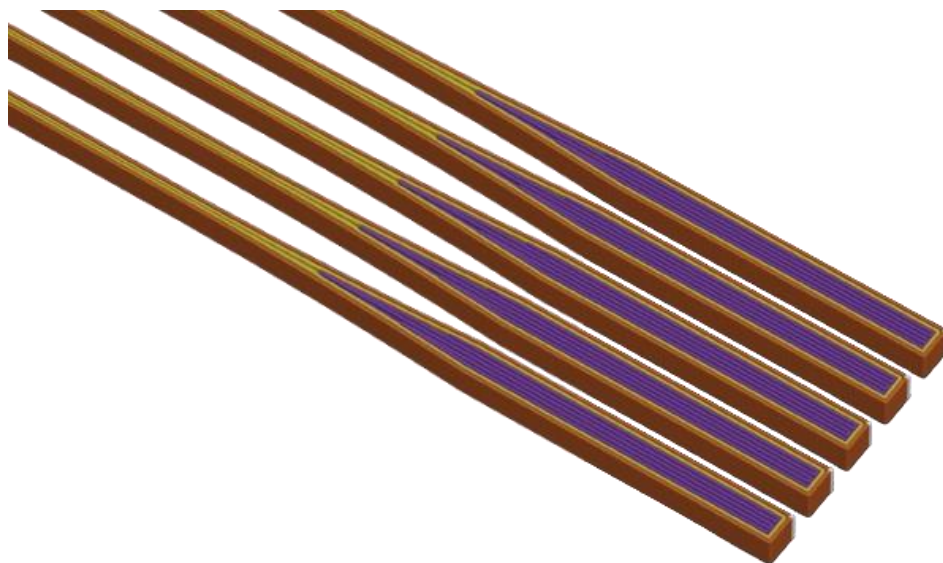
**Tablica 13 Prikaz rezultata 0,2 mm – 1,4 mm**

Grupni rezultati ispitivanja – 1,4 mm		
$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\varepsilon_m$ , %	$E$ , MPa
57,591	14,753	2628,58



**Slika 30** Prikaz ispitanih epruveta od 1,4 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine

Analizom Slika 30 prikazanih ispitanih epruveta može se uočiti kako prva epruveta nije pukla jer je došlo do slučajnog gašenja uređaja nakon što je sila počela padati, ali prije nego što je došlo do loma. To se i u dijagramu može vidjeti. Ostale epruvete su pucale unutar točaka ili po njima. Rezultati u dijagramu izgledaju vrlo slično, naprezanja su nešto viša nego kod epruveta od 1 mm debljine. Izgled dijagrama odgovara očekivanom izgledu za razliku od dijagrama u primjerima iznad. Popuna je dobra, što se može vidjeti iz Slika 31.

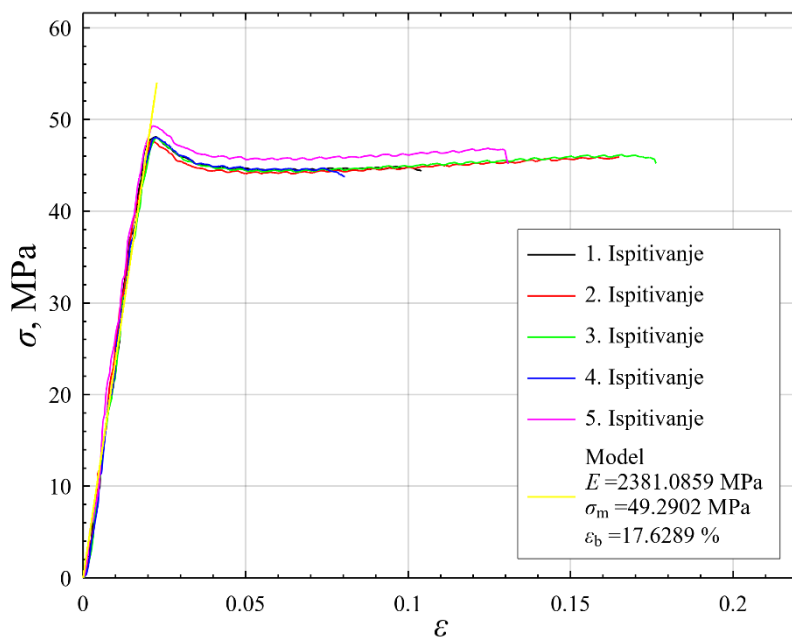


**Slika 31** Prikaz uzoraka od 1,4 mm, 0,2 mm visine sloja u programu pisača

#### **4.1.4. Uzorak od 1,8 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine**

Rezultate ispitanih epruveta od 1,8 mm, 1. skupine prikazuju Slika 32, Slika 33 i Tablica 14.





Slika 32 Dijagram uzoraka uzdužnog sloja, 0,2 mm, 1,8 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine

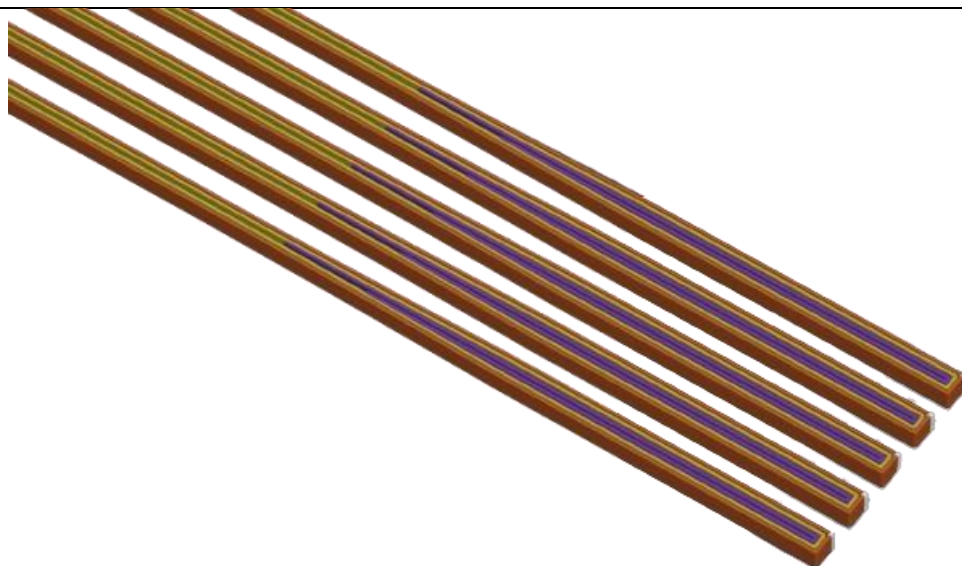
Tablica 14 Prikaz rezultata 0,2 mm – 1,8 mm

Grupni rezultati ispitivanja – 1,8 mm		
$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\epsilon_m$ , %	$E$ , MPa
48,214	8,055	2381,09



Slika 33 Prikaz ispitanih epruveta od 1,8 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine

Prilikom ispitivanja većina uzoraka pucala je unutar ispitnog područja kao što se vidi na Slika 33, samo jedna epruveta je pukla izvan područja. U dijagramu moguće je vidjeti podosta ujednačene rezultate, niže vrijednosti maksimalnih naprezanja i deformacija naspram epruveta od 1,4 mm debljine. Popunu epruveta prikazuje Slika 34.

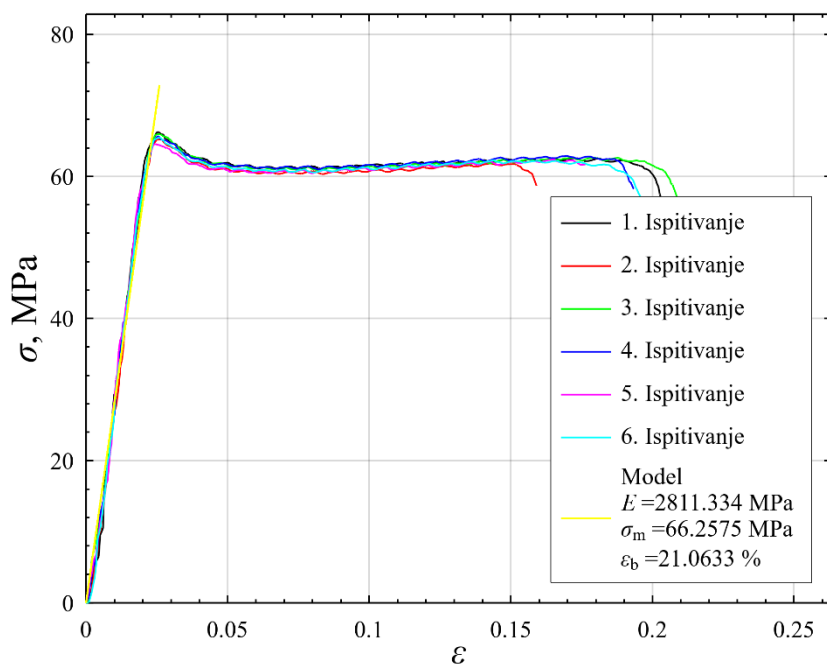


**Slika 34** Prikaz uzoraka od 1,8 mm, 0,2 mm visine sloja u programu pisača

#### 4.2. Skupina 2

##### 4.2.1. Uzorak od 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine

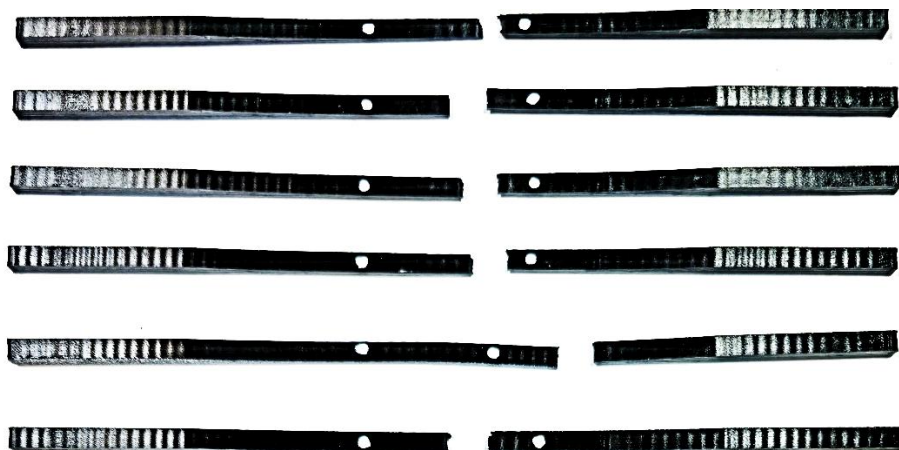
Rezultate ispitanih epruveta od 1 mm, 2. skupine prikazuju Slika 35, Slika 36 i Tablica 15.



**Slika 35** Dijagram uzoraka uzdužnog sloja, 0,08 mm, 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine

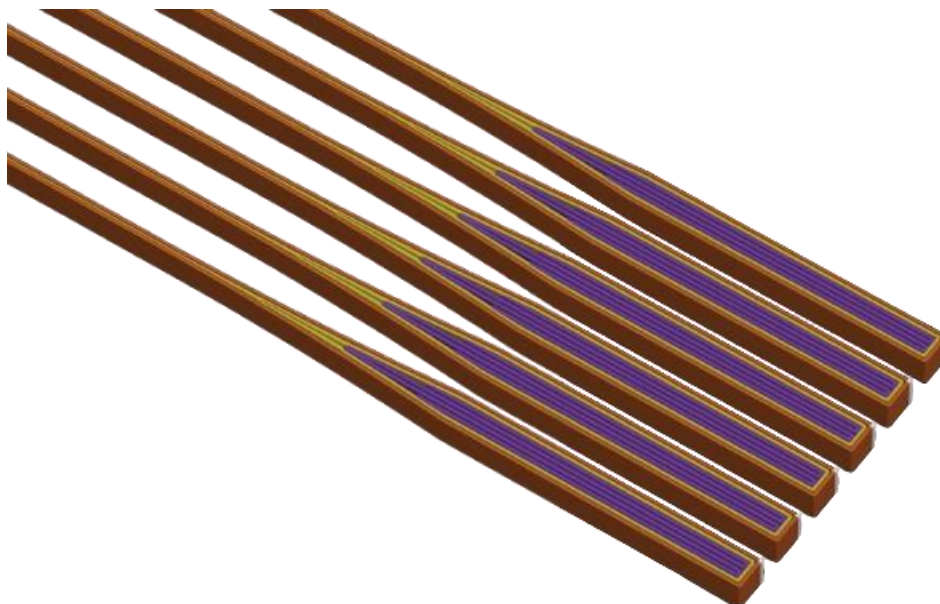
Tablica 15 Prikaz rezultata 0,08 mm – 1 mm

Grupni rezultati ispitivanja – 1 mm		
$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\varepsilon_m$ , %	$E$ , MPa
65,512	15,907	2811,33



Slika 36 Prikaz ispitanih epruveta od 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine

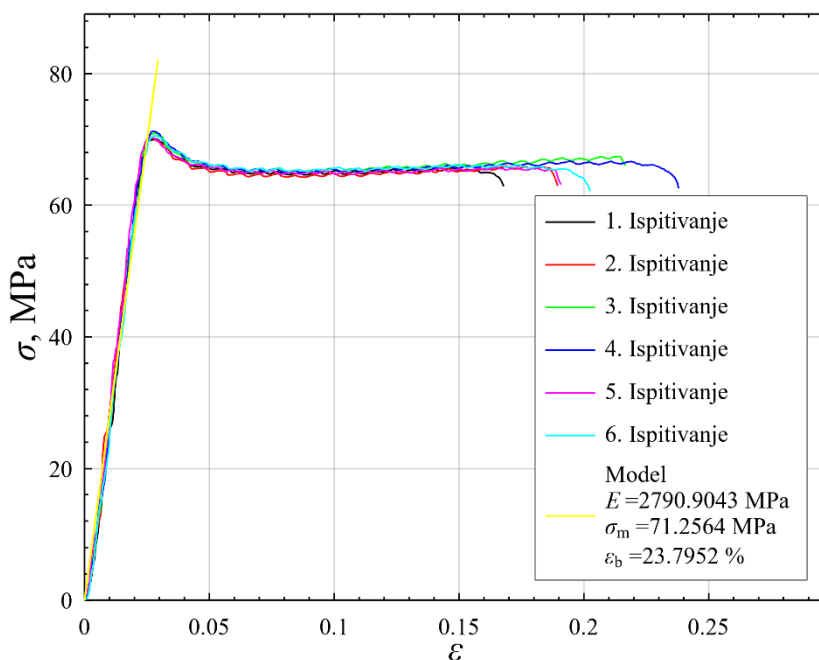
Iz Slika 36 vidljivo je kako su sve epruvete osim jedne pukle unutar ispitnog područja, na vrlo sličnom mjestu. Dijagram izgleda poprilično ujednačeno u svim ispitivanjima ove grupe uzoraka. Uzorci mogu podnijeti viša naprezanja od uzoraka skupine 1. Njihovu popunu prikazuje Slika 37.



Slika 37 Prikaz uzoraka od 1 mm, 0,08 mm visine sloja u programu pisaća

4.2.2. Uzorak od 1 mm debljine, 5 mm/min ispitne brzine

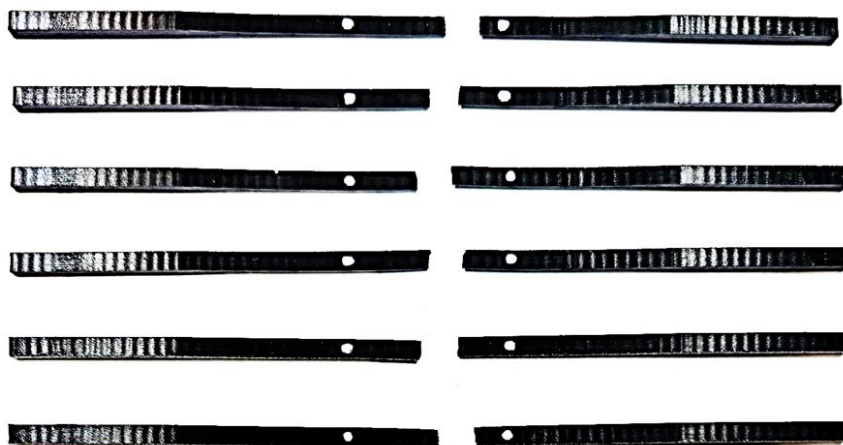
Rezultate ispitanih epruveta od 1 mm, 2. skupine prikazuju Slika 38, Slika 39 i Tablica 16.



Slika 38 Dijagram uzoraka uzdužnog sloja, 0,08 mm, 1 mm debljine, 5 mm/min ispitne brzine

Tablica 16 Prikaz rezultata 0,08 mm – 1 mm (veća brzina)

Grupni rezultati ispitivanja – 1 mm		
$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\epsilon_m$ , %	$E$ , MPa
70,553	16,794	2790,9

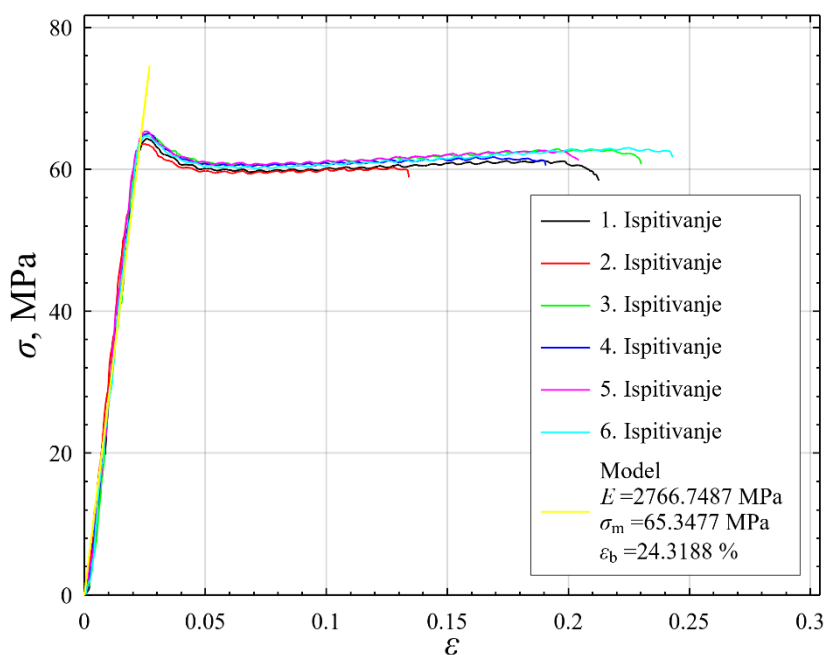


Slika 39 Prikaz ispitanih epruveta od 1 mm debljine, 5 mm/min ispitne brzine

Kao što je prikazano na Slika 39 sve epruvete unutar grupe, pukle su na vrlo sličnim mjestima i na dijagramu je vidljivo da većom brzinom ispitivanja, epruvete mogu podnijeti veća naprezanja uz veću deformaciju.

#### 4.2.3. Uzorak od 1,4 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine

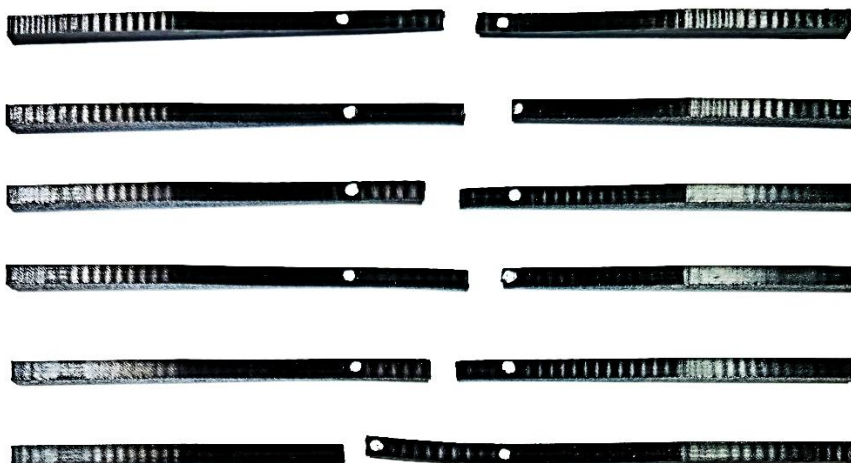
Rezultate ispitanih epruveta od 1,4 mm, 2. skupine prikazuju Slika 40, Slika 41 i Tablica 17.



**Slika 40** Dijagram uzoraka uzdužnog sloja, 0,08 mm, 1,4 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine

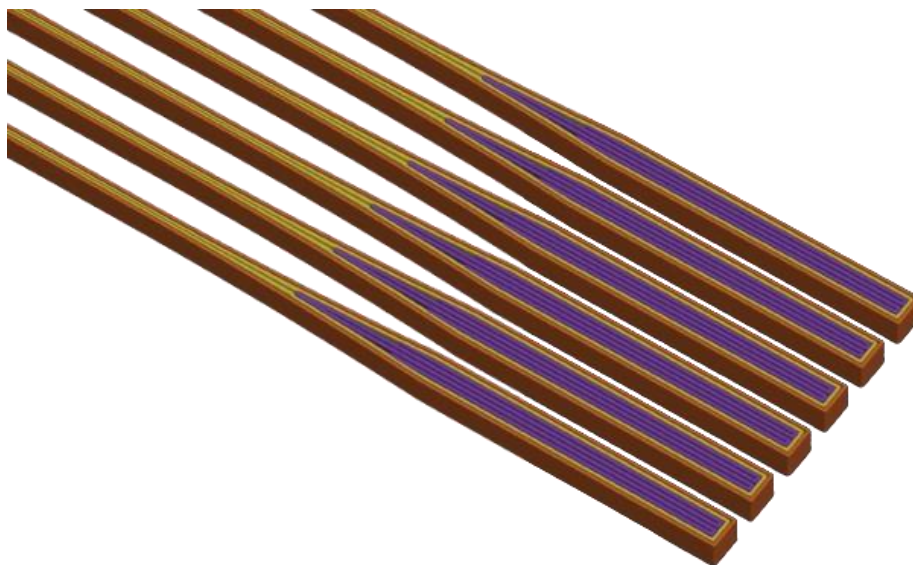
**Tablica 17** Prikaz rezultata 0,08 mm – 1,4 mm

Grupni rezultati ispitivanja – 1,4 mm		
$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\epsilon_m$ , %	$E$ , MPa
64,6598	13,416	2766,7



**Slika 41** Prikaz ispitanih epruveta od 1,4 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine

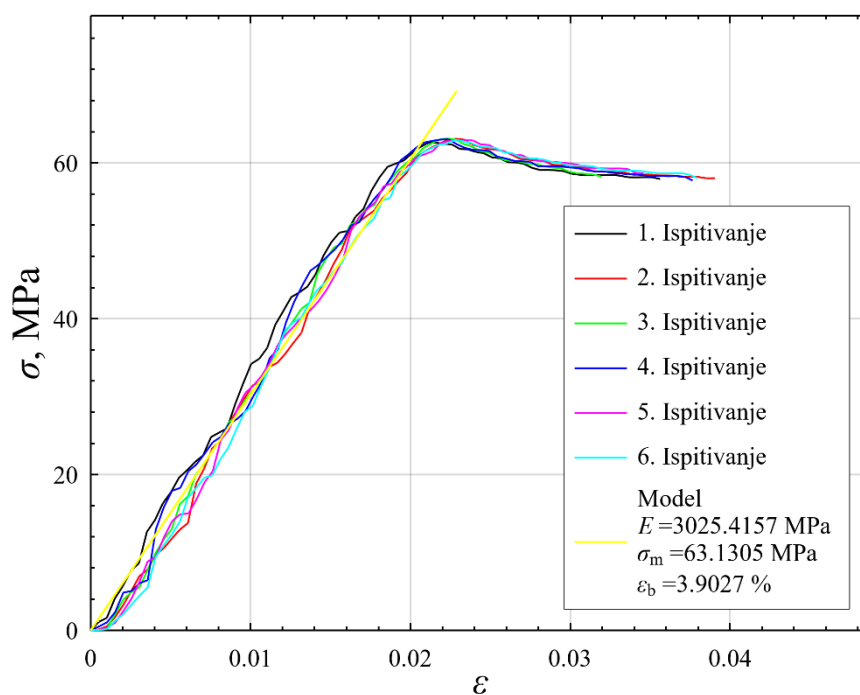
Gledajući Slika 41 moguće je vidjeti da je većina epruveta pukla unutar ispitnog područja, osim zadnje koja je pukla izvan područja. Maksimalna naprezanja su manja od naprezanja epruveta od 1 mm pri istoj brzini, deformacija epruveta je također manja. Popunjenost se može vidjeti na Slika 42.



**Slika 42** Prikaz uzoraka od 1,4 mm, 0,08 mm visine sloja u programu pisaća

#### **4.2.4. Uzorak od 1,8 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine**

Rezultate ispitanih epruveta od 1,8 mm, 2. skupine prikazuju Slika 43, Slika 44 i Tablica 18.



Slika 43 Dijagram uzoraka uzdužnog sloja, 0,08 mm, 1,8 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine

Tablica 18 Prikaz rezultata 0,08 mm – 1,8 mm

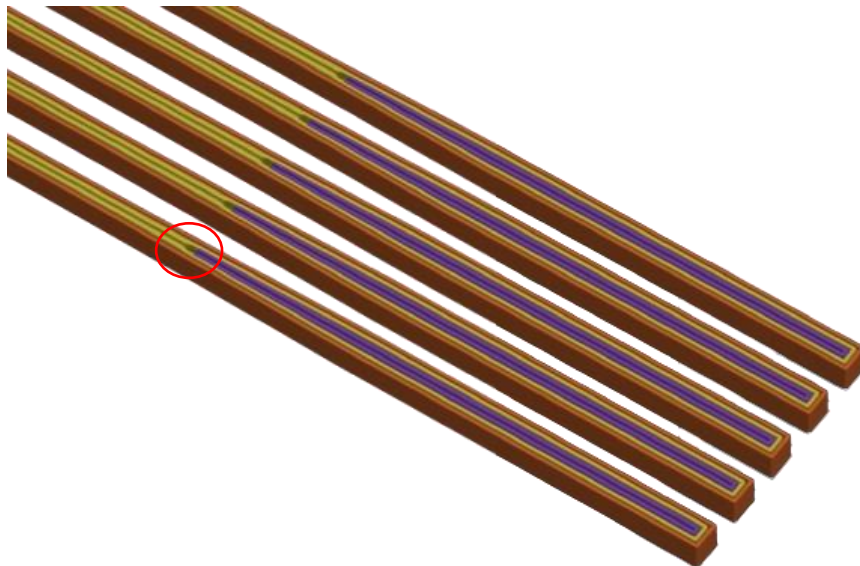
Grupni rezultati ispitivanja – 1,8 mm		
$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\epsilon_m$ , %	$E$ , MPa
62,957	3,193	3025,4



Slika 44 Prikaz ispitanih epruveta od 1,8 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine



Slika 44 pokazuje da su sve epruvete pukle izvan ispitnog područja, na jednakim mjestima. Razlog tomu je praznina u ispuni (označena crvenom kružnicom na Slika 45) koja je napravljena u programu pisača. Ispuna se može vidjeti na Slika 45. Naprezanja su nešto manja od epruveta manje debljine, ali je deformacija znatno manja od obje manje debljine.

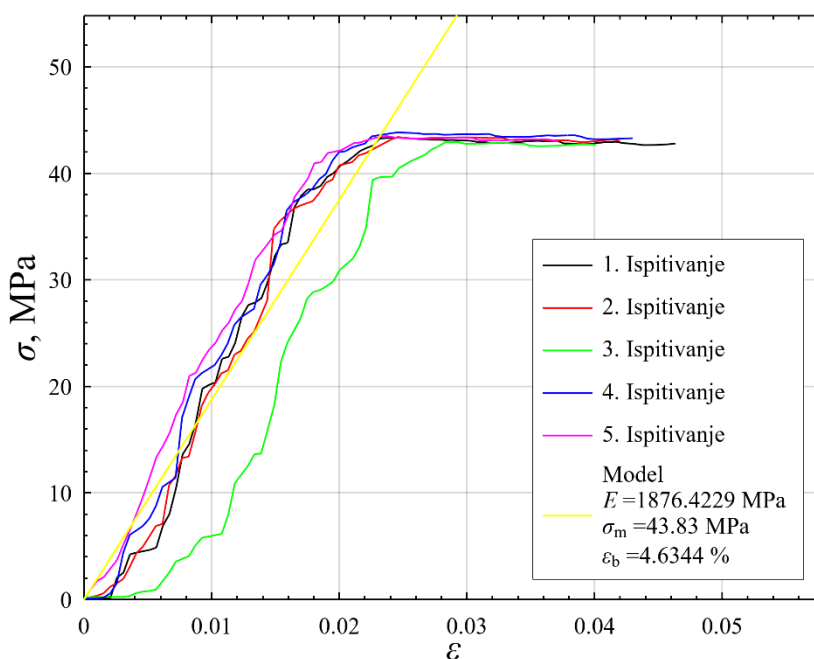


Slika 45 Prikaz uzoraka od 1,8 mm, 0,08 mm visine sloja u programu pisača

### 4.3. Skupina 3

#### 4.3.1. Uzorak od 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine

Rezultate ispitanih epruveta od 1 mm, 3. skupine prikazuju Slika 46, Slika 47 i Tablica 19.

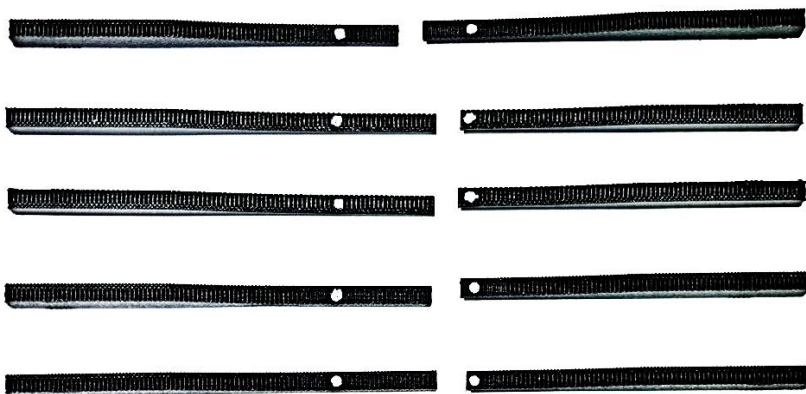


Slika 46 Dijagram uzoraka poprečnog sloja, 0,2 mm, 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine



Tablica 19 Prikaz rezultata poprečno 0,2 mm – 1 mm

Grupni rezultati ispitivanja – 1 mm		
$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\varepsilon_m$ , %	$E$ , MPa
43,392	3,713	1876,4



Slika 47 Prikaz ispitanih poprečnih epruveta od 1 mm debljine, 1 mm/min ispitne brzine

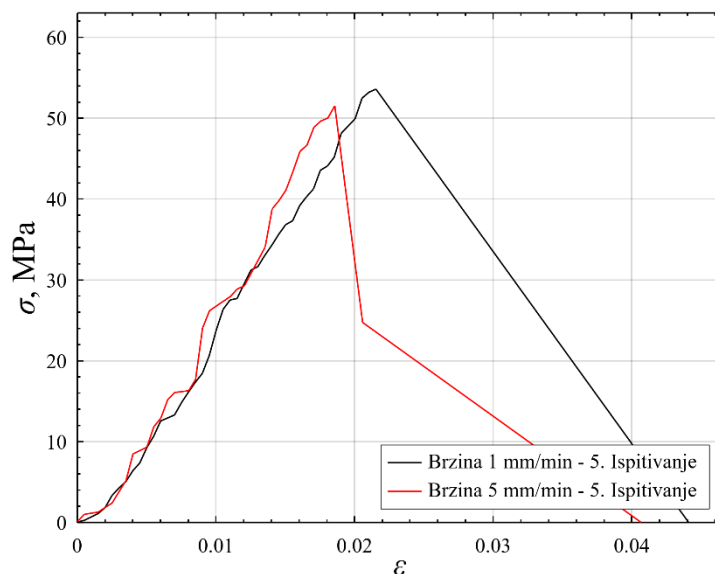
Slika 47 Prikazuje pucanje svih epruveta unutar ispitnog područja, na relativno sličnim mjestima. Rađene su bez zida jer zid bi bio uzdužno odrađen, a ispuna poprečna. Na dijagramu je vidljivo kako su sve krivulje osim krivulje ispitivanja 3 sličnih vrijednosti. Znatno manja maksimalna naprezanja od rezultata iznad, uz malu deformaciju. Ispuna je vidljiva na Slika 48.



Slika 48 Prikaz poprečnih uzoraka od 1 mm, 0,2 mm visine sloja u programu pisača

#### 4.4. Usporedba ovisno o brzini ispitivanja

Iz prve i druge skupine ispitivanja 1 mm debljine, uzet je po jedan primjer za usporedbu pri višoj i nižoj brzini ispitivanja.

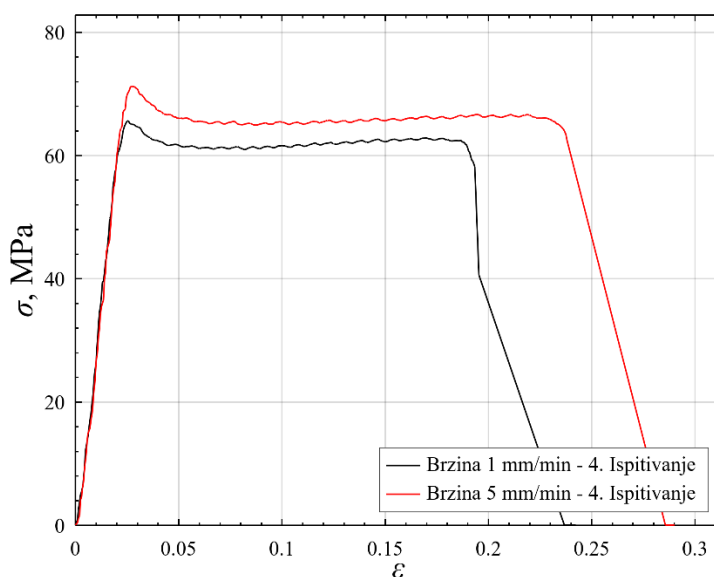


**Slika 49** Prikaz usporedbe 0,2 mm visine sloja, 1 mm debljine epruvete pri različitim brzinama

Analizom Slika 49 gdje su prikazani dijagrami petog ispitivanja za visinu sloja od 0,2 mm pri različitoj brzini ispitivanja, može se uočiti kako linije sadrže elastično područje, no odmah nakon prestanka elastičnog područja dolazi do loma. Iz prikazanog je vidljivo da linije nemaju dobro preklapanje u elastičnom području, imaju ga samo na nekim dijelovima. Tablica 20 prikazuje da pri većoj brzini postoji pad vlačne čvrstoće i pad deformacije, što dovodi do zaključka da u ovom slučaju veća brzina ispitivanja ima negativan učinak na rezultate.

**Tablica 20** Prikaz numeričke usporedbe utjecaja brzina 5. ispitivanja – 0,2 mm

	$\sigma_m$ , MPa	$\epsilon_m$ , %
Brzina 1 mm/min	53,596	4,4088
Brzina 5 mm/min	51,537	4,0663



**Slika 50 Prikaz usporedbe 0,08 mm visine sloja, 1 mm debljine epruvete pri različitim brzinama**

Analizom Slika 50 gdje su prikazani dijagrami četvrtog ispitivanja za visinu sloja od 0,08 mm pri različitoj brzini ispitivanja, može se uočiti kako se vrijednosti u elastičnom području dobro preklapaju. Plastično područje je sličnog izgleda uz niže vrijednosti kod sporijeg ispitivanja. Usporedbom podataka u Tablica 21 vidi se da je vlačna čvrstoća veća pri višim brzinama ispitivanja, također i deformacije pri kojima se postižu te vrijednosti. Moglo bi se zaključiti da pri povišenju brzine ispitivanja dobivamo veće vrijednosti vlačne čvrstoće i deformacije.

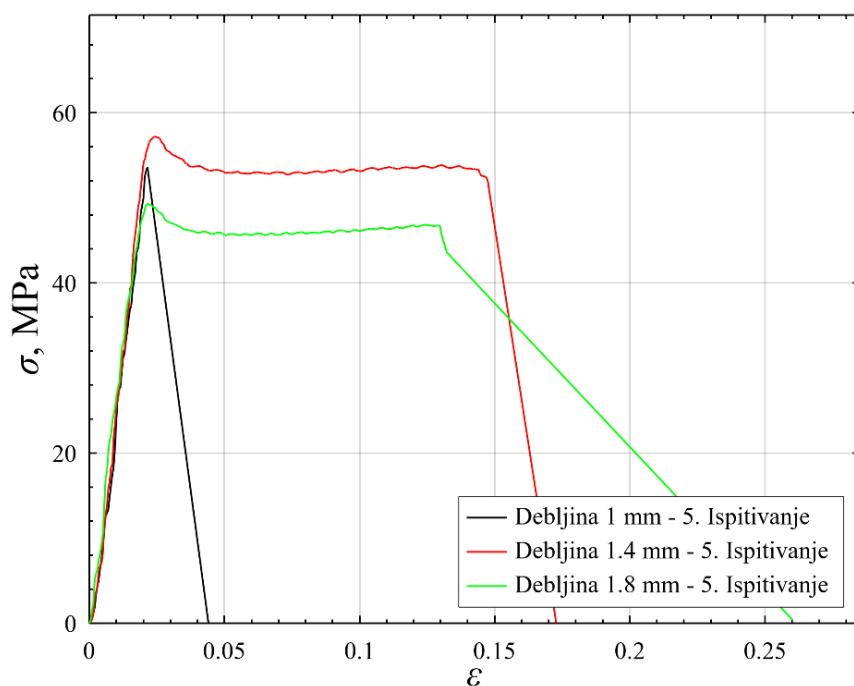
**Tablica 21 Prikaz numeričke usporedbe utjecaja brzina 4. ispitivanja – 0,08 mm**

	$\sigma_m$ , MPa	$\varepsilon_m$ , %
Brzina 1 mm/min	65,646	24,22
Brzina 5 mm/min	71,256	29,016

Rezultati obje usporedbe ovisno o brzini ispitivanja se ne poklapaju, kao vjerodostojnu usporedbu koristit će se usporedba s visinom sloja 0,08 mm zbog greške u ispuni epruveta s 0,2 mm visinom sloja.

#### 4.5. Usporedba ovisno o debljini epruvete

Prikaz usporedbe rezultata ovisno o debljini epruvete za ispitivanja skupine 1 (Slika 51) i skupine 2 (Slika 52).

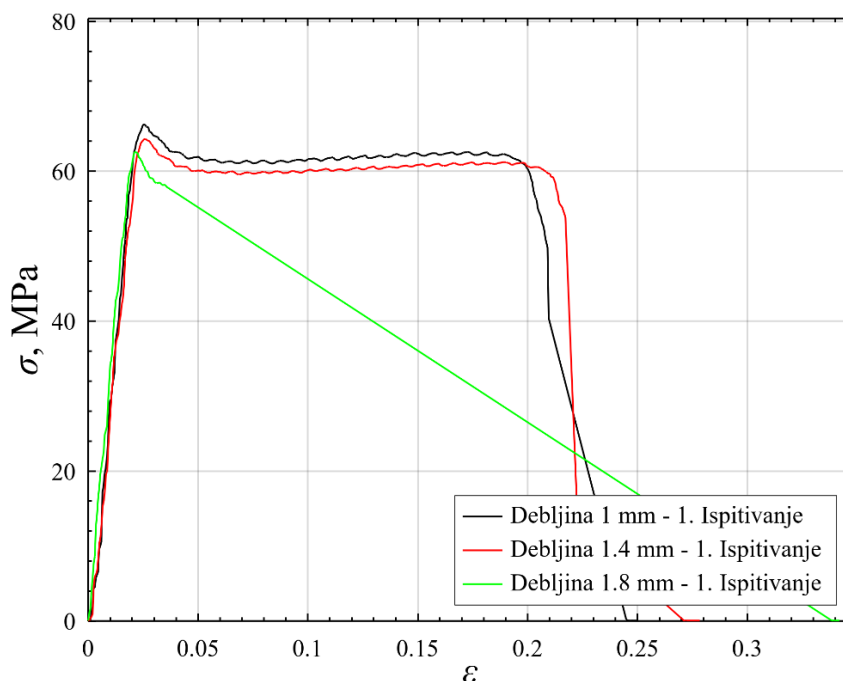


**Slika 51 Prikaz usporedbe 0,2 mm visine sloja epruvete pri različitim debljinama**

Analizom Slika 51 gdje su prikazani dijagrami petih ispitivanja za visinu sloja od 0,2 mm pri različitim debljinama, može se uočiti kako se u elastičnom području dobro preklapaju. Usporedbom podataka u Tablica 22 vrijednost vlačne čvrstoće je najviša kod epruvete od 1,4 mm, zatim slijedi epruveta od 1 mm, te epruveta od 1,8 mm. Deformacije rastu s povećanjem debljine.

**Tablica 22 Prikaz numeričke usporedbe utjecaja debljina 5. ispitivanja – 0,2 mm**

	$\sigma_m$ , MPa	$\varepsilon_m$ , %
Debljina 1 mm	53,596	4,4088
Debljina 1,4 mm	57,204	17,271
Debljina 1,8 mm	49,290	26,01



**Slika 52 Prikaz usporedbe 0,08 mm visine sloja epruvete pri različitim debljinama**

Analizom Slika 52 gdje su prikazani dijagrami prvih ispitivanja za visinu sloja od 0,08 mm pri različitim debljinama, može se uočiti kako se vrijednosti u elastičnom području dobro preklapaju, a kod epruvete od 1 mm i epruvete od 1,4 mm imamo i još dobra poklapanja plastičnog područja. Usporedbom podataka u Tablica 23 vidi se da je vrijednost vlačne čvrstoće najviša kod najtanje epruvete od 1 mm, te pada s povećanjem debljine. Pripadajuće deformacije se povećavaju s povećanjem debljine epruvete.

**Tablica 23 Prikaz numeričke usporedbe utjecaja debljina 5. ispitivanja – 0,08 mm**

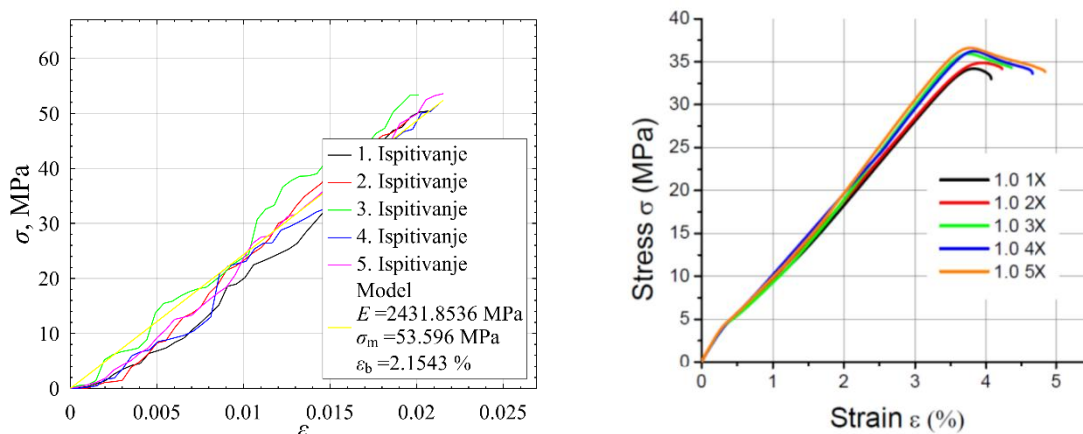
	$\sigma_m$ , Mpa	$\epsilon_m$ , %
Debljina 1 mm	66,257	25,037
Debljina 1,4 mm	64,307	27,823
Debljina 1,8 mm	62,600	34,17

Iz uspoređenih ispitivanja nije potpuno jasan utjecaj debljine, ali kada se uzme u obzir greška popune na epruveti od 1 mm debljine, 0,2 mm visine ispune, može se zaključiti da će povećanjem debljine padati vlačna čvrstoća, a rasti deformacija.

#### 4.6. Usporedba podataka iz literature i eksperimenta

U ovom poglavlju raditi će se usporedba podataka dobivenih eksperimentom s onima u literaturi pod brojem [19]. Koriste se primarno podaci ispitivanja skupine 1 i skupine 3.

##### 4.6.1. Usporedba uzorka od 1 mm debljine s literaturom



**Slika 53 Usporedba dijagrama ispitivanja (lijevo) i dijagrama iz literature (desno) [19] – za debljinu 1 mm**

Analizom Slika 53 moguće je uočiti kako dijagrami ne izgledaju nimalo slično. Jednako tako niti vrijednosti naprezanja i deformacija nisu usporedive. Razlog tomu je greška u ispuni samih epruveta. Do greške je došlo u programu pisaača zbog korištenja 95 %-tne ispune. Program je ostavio prazninu na prijelaznom dijelu vrata epruvete na čijem mjestu prilikom vlačnog ispitivanja dolazi do loma. Lom je daleko od ispitnog područja i ne predstavlja homogeno područje epruvete, što čini dobivene podatke neiskoristivim za donošenje pravog zaključka u vezi mehaničkih svojstava PLA materijala. Numerička usporedba vrijednosti može se vidjeti u Tablica 24 i Tablica 25, gdje se vidi velika razlika vlačnih čvrstoća, kao i vrijednosti deformacija kod granice tečenja. Vrijednosti vlačnih čvrstoća su znatno veće u ispitivanju, a deformacije kod granice tečenja manje nego u literaturi. Moduli elastičnosti su također vrlo različiti.

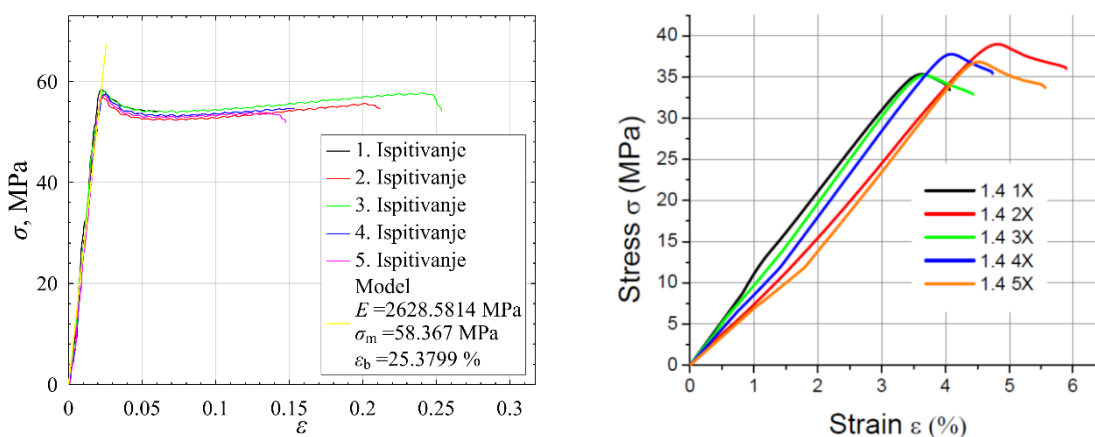
**Tablica 24 Usporedba numeričkih vrijednosti ispitivanja i literature – 1 mm**

	$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\epsilon_{gt}$ , %	$E$ , MPa
Rezultati ispitivanja	51,587	1,953	2431,9
Rezultati literature [19]	35,57	3,8	875

Tablica 25 Usporedba svih numeričkih vrijednosti ispitivanja i literature – 1 mm

	$\sigma_m$ , MPa	$\varepsilon_{gt}$ , %
Ispitivanje 1	50,422	2,0665
Ispitivanje 1 - literatura	34,2	3,8
Ispitivanje 2	48,814	1,9529
Ispitivanje 2 - literatura	34,87	3,9
Ispitivanje 3	53,361	2,0118
Ispitivanje 3 - literatura	35,93	3,8
Ispitivanje 4	51,744	2,1287
Ispitivanje 4 - literatura	36,23	3,8
Ispitivanje 5	53,596	2,1543
Ispitivanje 5 - literatura	36,62	3,8

#### 4.6.2. Usporedba uzorka od 1,4 mm debljine s literaturom



Slika 54 Usporedba dijagrama ispitivanja (lijevo) i dijagrama iz literature (desno) [19] – za debljinu 1,4 mm

Analizom Slika 54 moguće je uočiti sličnost dijagrama. Na lijevom dijagramu postoji znatno bolja podudarnost elastičnog i plastičnog dijela unutar grupe što ukazuje na izvrsnu ponovljivost svojstava epruveta. Ispitivanje je pokazalo da materijal u ovoj debljini epruvete može podržati veću vlačnu čvrstoću nego što je prikazano u usporednom grafu literature i pripadajućim tablicama. Deformacije pri granici tečenja su znatno niže od vrijednosti iz literature i moduli elastičnosti se također uvelike razlikuju. Numerička usporedba vrijednosti može se vidjeti u Tablica 26 i Tablica 27.

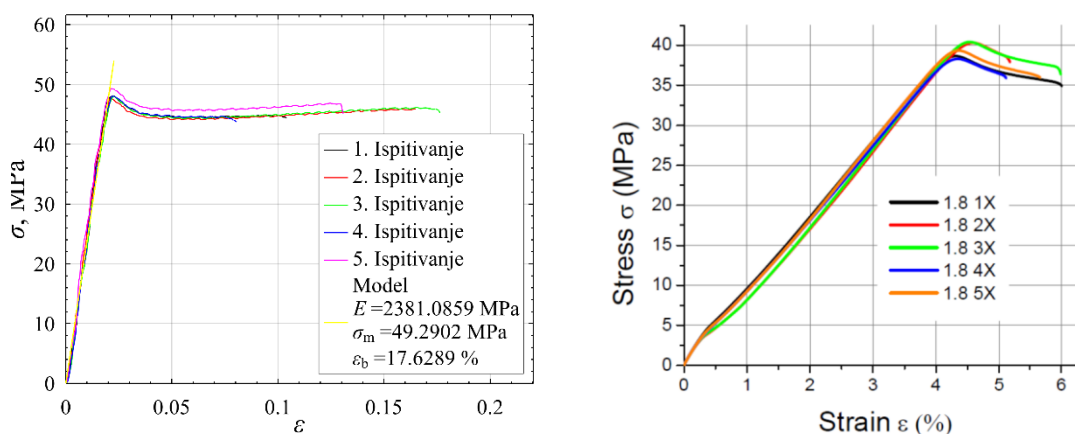
**Tablica 26 Usporedba numeričkih vrijednosti ispitivanja i literature – 1,4 mm**

	$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\varepsilon_{gt}$ , %	$E$ , MPa
Rezultati ispitivanja	57,591	2,2335	2628,6
Rezultati literature [19]	36,82	4,1	872,1

**Tablica 27 Usporedba svih numeričkih vrijednosti ispitivanja i literature – 1,4 mm**

	$\sigma_m$ , MPa	$\varepsilon_{gt}$ , %
Ispitivanje 1	58,367	2,2335
Ispitivanje 1 - literatura	35,33	3,6
Ispitivanje 2	56,716	2,3701
Ispitivanje 2 - literatura	38,98	4,8
Ispitivanje 3	58,202	2,3303
Ispitivanje 3 - literatura	35,2	3,7
Ispitivanje 4	57,466	2,5667
Ispitivanje 4 - literatura	37,76	4,1
Ispitivanje 5	57,204	2,4169
Ispitivanje 5 - literatura	36,82	4,5

**4.6.3. Usporedba uzorka od 1,8 mm debljine s literaturom**



**Slika 55 Usporedba dijagrama ispitivanja (lijevo) i dijagrama iz literature (desno) [19] – za debljinu 1,8 mm**



Analizom Slika 55 moguće je uočiti sličnost dijagrama. Oba dijagrama imaju relativno dobru podudaranost elastičnog i plastičnog područja unutar grupe što ukazuje na izvrsnu ponovljivost svojstava epruveta. Ispitivanje je pokazalo da materijal u ovoj debljini epruvete može podržati veća naprezanja nego što je prikazano u usporednom grafu literature, uz upola manju deformaciju kod granice tečenja, što bi ukazivalo na bolja mehanička svojstva PLA materijal i od onih opisanih u literaturi. Također modul elastičnosti je u rasponu polimernih materijala za razliku od modula u literaturi. Numerička usporedba vrijednosti može se vidjeti u Tablica 28 i Tablica 29.

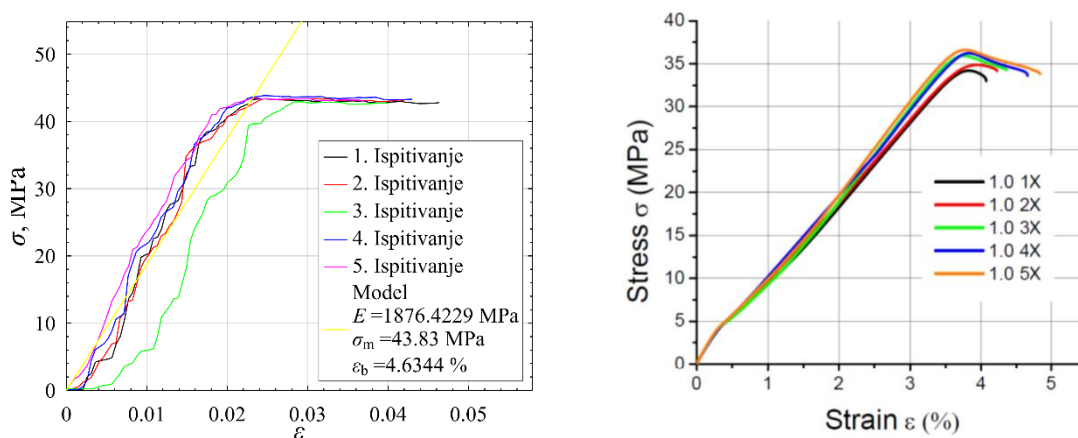
**Tablica 28 Usporedba numeričkih vrijednosti ispitivanja i literature – 1,8 mm**

	$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\varepsilon_{gt}$ , %	$E$ , MPa
Rezultati ispitivanja	48,214	2,0876	2381,1
Rezultati literature [19]	39,41	4,4	829,8

**Tablica 29 Usporedba svih numeričkih vrijednosti ispitivanja i literature – 1,8 mm**

	$\sigma_m$ , MPa	$\varepsilon_{gt}$ , %
Ispitivanje 1	48,082	2,204
Ispitivanje 1 - literatura	38,66	4,3
Ispitivanje 2	47,637	2,0876
Ispitivanje 2 - literatura	40,31	4,6
Ispitivanje 3	48,041	2,268
Ispitivanje 3 - literatura	40,43	4,5
Ispitivanje 4	48,021	2,2063
Ispitivanje 4 - literatura	38,3	4,3
Ispitivanje 5	49,290	2,1794
Ispitivanje 5 - literatura	39,34	4,4

#### 4.6.4. Usporedba poprečnog uzorka od 1 mm debljine s literaturom



**Slika 56 Usporedba dijagrama ispitivanja (lijevo) i dijagrama iz literature (desno) [19] – za poprečnu ispunu epruvete debljine 1 mm**

Analizom Slika 56 moguće je uočiti bolje podudaranje desnog dijagrama u elastičnom području od lijevog dijagrama. Lijevi dijagram ima dobru podudaranost plastičnog dijela. Također moguće je uočiti veću vlačnu čvrstoću i niže deformacije kod granice tečenja u rezultatima ispitivanja. Numerička usporedba vrijednosti može se vidjeti u Tablica 30 i Tablica 31. U njima se vidi kako su rezultati sličniji literaturi nego u prethodnim usporedbama (jer je literatura poprečnog ispisa). Modul elastičnosti ispitivanja je znatno viši od modula iz literature. Dobiveni rezultati ukazuju na bolja svojstva PLA materijala od svojstava zapisanih u literaturi.

**Tablica 30 Usporedba numeričkih vrijednosti ispitivanja i literature – poprečno, 1 mm**

	$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\varepsilon_{gt}$ , %	$E$ , MPa
Rezultati ispitivanja	43,392	2,3724	1876,4
Rezultati literature [19]	35,57	3,8	875

**Tablica 31 Usporedba svih numeričkih vrijednosti ispitivanja i literature – poprečno, 1 mm**

	$\sigma_m$ , MPa	$\epsilon_{gt}$ , %
Ispitivanje 1	43,332	2,4717
Ispitivanje 1 - literatura	34,2	3,8
Ispitivanje 2	43,403	2,459
Ispitivanje 2 - literatura	34,87	3,9
Ispitivanje 3	42,911	2,9291
Ispitivanje 3 - literatura	35,93	3,8
Ispitivanje 4	43,830	2,4578
Ispitivanje 4 - literatura	36,23	3,8
Ispitivanje 5	43,485	2,3724
Ispitivanje 5 - literatura	36,62	3,8

Proučavanjem usporedbi ispitivanja i literature moguće je doći do određenih zaključaka. Epruvete iz literature rađene su poprečnom ispunom, što potvrđuje i usporedba s poprečnim epruvetama ovdje ispitanim i bližim rezultatima. Iz podataka može se zaključiti da je uzdužna ispuna epruveta boljih mehaničkih svojstava.

#### **4.7. Usporedba podataka od proizvođača i eksperimenta**

U ovom poglavlju raditi će se usporedba podataka dobivenih eksperimentom s podacima proizvođača pod brojem [7]. Koriste se primarno podaci ispitivanja skupine 2, koji su namješteni na optimalne postavke za najkvalitetniji ispis. Proizvođač je vlastitim ispitivanjem odredio raspon vrijednosti vlačne čvrstoće, deformacije do loma i modula elastičnosti koji su prikazani u tablicama uz rezultate dobivene ispitivanjem. U dokumentu proizvođača nije navedeno jesu li epruvete ispisane uzdužno ili poprečno.

Analizom Tablica 32 moguće je uočiti kako je prosječno maksimalno vlačno naprežanje u ispitivanim epruvetama znatno više od raspona proizvođača, dok je deformacija samo malo iznad gornje granice raspona proizvođača, a modul elastičnosti je dobiven unutar raspona. Podaci ispitivanja ukazuju na bolja mehanička svojstva materijala.

**Tablica 32 Usporedba rezultata s proizvođačem – 1 mm**

	$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\varepsilon_m$ , %	$E$ , MPa
Grupni rezultati ispitivanja	65,512	15,907	2811,3
Proizvođač [7]	$35 \pm 4$	$12,2 \pm 1,8$	$2580 \pm 220$

Analizom podataka Tablica 33 moguće je uočiti malo bolje podudaranje podataka unutar raspona proizvođača. Prosječno maksimalno vlačno naprezanje je i dalje dosta veće od raspona proizvođača dok su deformacija i modul elastičnosti unutar raspona proizvođača.

**Tablica 33 Usporedba rezultata s proizvođačem – 1,4 mm**

	$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\varepsilon_m$ , %	$E$ , MPa
Grupni rezultati ispitivanja	64,6598	13,416	2766,7
Proizvođač [7]	$35 \pm 4$	$12,2 \pm 1,8$	$2580 \pm 220$

Analizom podataka Tablica 34 moguće je uočiti veća odstupanja u sve tri vrijednosti naspram raspona proizvođača. Prosječno maksimalno vlačno naprezanje je sličnih vrijednosti kao u ispitivanjima iznad, znatno više od raspona proizvođača. Deformacija je znatno niža od raspona proizvođača, ali to možemo opravdati greškom u ispuni. Modul elastičnosti više nije unutar raspona proizvođača, ali je relativno blizu gornje granice.

**Tablica 34 Usporedba rezultata s proizvođačem – 1,8 mm**

	$\bar{\sigma}_m$ , MPa	$\varepsilon_m$ , %	$E$ , MPa
Grupni rezultati ispitivanja	62,957	3,193	3025,4
Proizvođač [7]	$35 \pm 4$	$12,2 \pm 1,8$	$2580 \pm 220$

Usporedbom je moguće doći do određenih zaključaka. U svim uspoređenim grupama epruveta postoji znatno veće prosječno maksimalno vlačno naprezanje od raspona proizvođača. Uz rezultate cjelokupnog ispitivanja, taj podatak bi mogao ukazivati da je proizvođač koristio poprečno popunjene epruvete koje po svojoj konstrukciji mogu podnijeti manja naprezanja od uzdužnih. Rastom debljine epruvete može se uočiti kako naprezanja ostaju podjednake vrijednosti, dok deformacije s povećanjem debljine padaju. Usporedbu za 1,8 mm se ne može koristiti za dolaženje do zaključaka zbog njene greške ispune i loma van ispitnog područja.

## 5. ZAKLJUČAK

PLA (polilaktična kiselina) je vrlo obećavajuć materijal koji se koristi u mnogim granama industrije. Jedna od zanimljivijih primjena je njegova primjena u medicini, gdje se koristi zbog svojstva biorazgradivosti koja ga čini izvrsnim za primjenu u obliku implantata. Na taj način se isključuje potreba za sekundarnom operacijom, smanjuje vrijeme oporavka jer će se implantati razgraditi u tijelo kada više nisu potrebni. Također njegova velika prednost je mogućnost recikliranja, a svojstva recikliranog PLA se gotovo ne razlikuju od originalnog polimera. U svijetu 3D ispisa vrlo je lako nabavljiv, što ga čini relativno povoljnim. Može se koristiti i u najjednostavnijim izvedbama pisača za kućnu primjenu zbog mogućnosti ispisa bez grijane podloge, komore i drugih značajki koje čine pisače manje pristupačnim.

Unutar ovog rada su provedena jednoosna vlačna ispitivanja te su dobiveni rezultati uspoređeni s literaturom i proizvođačem. U literaturi je korištena 95 %-tna ispuna te je priprema uzoraka podijeljena u tri skupine: prvu ispisanu uzdužno s postavkama ispisa iz literaturu, drugu ispisanu uzdužno sa 100 % ispune i postavkama za najprecizniji print te treću ispisanu poprečno s postavkama iz literature s razlikom 100 % ispune zbog programa pisača.

Usporedbom mjerenja pri različitim brzinama ispitivanja može se uočiti kako, kod uzoraka koji su imali neoptimalnu ispunu ispisa (odnosno praznine na određenim mjestima) s povećanjem brzine imamo pad granice tečenja i pad deformacije pri lomu, dok kod skupine 2, pri višim brzinama, granica tečenja i deformacije pri lomu rastu. Usporedbom po debljini epruvete uočavamo da su u skupini 1 vrijednosti naprezanja najviše kod epruvete od 1,4 mm, zatim slijede epruvete od 1 mm, te epruvete od 1,8 mm. Deformacije rastu povećanjem debljine. Kod skupine 2 vrijednosti naprezanja su najviše kod najtanje epruvete od 1 mm, te padaju s povećanjem debljine. Pripadajuće deformacije se povećavaju s povećanjem debljine epruvete. Usporedbom smjera ispisa može se zaključiti kako uzdužno ispisane epruvete pokazuju bolja svojstva od onih ispisanih poprečno. Do tog zaključka došlo se vlastitim ispitivanjem i usporedbama s literaturom i proizvođačem, gdje je vidljivo da su dobivene vrijednosti vlačnog naprezanja bile uvijek više u ispitanom slučaju. Prilikom vlastitih ispitivanja uzdužno ispisana grupa epruveta imala je 19 % višu vlačnu čvrstoću od poprečnih, ali tu postoji razlika popunjenosti grupa epruveta pa taj postotak nije od velikog značaja. U usporedbi s literaturom ovisno o grupi, bile su 30 - 45 % više vrijednosti vlačne čvrstoće, a s proizvođačem ovisno o grupi čak 60 – 68 % više pod pretpostavkom da je proizvođač koristio poprečnu ispunu. Vrijednosti deformacije variraju ovisno o skupini usporedbe, skupina 1 u usporedbi sadrži znatno niže deformacije do granice tečenja u odnosu na literaturu, čak od 84 – 110 %, a za

skupinu 3 niže su za 60 % od literature. Skupina 2 se dobro poklapa s rasponom proizvođača, uz izuzimanje 1,8 mm grupe, koja ima pogrešku u ispuni. Moduli elastičnosti ispitivanja i proizvođača, ili se poklapaju, ili su malo većih vrijednosti (0,8 %), dok u usporedbi s literaturom su drastično različiti. Literatura ima jako male vrijednosti pa su razlike čak i 300 % u odnosu na ispitivanje.

Može se zaključiti da su mehaničke karakteristike PLA materijala bolje od opisanih u literaturi i bolje od raspona proizvođača zbog svog uzdužnog ispisa, što otvara vrata još većoj primjeni PLA materijala u svrhe koje zahtijevaju veća naprezanja. Također, novi oblik epruveta korišten u ispitivanju, daje znatno bolju ponovljivost rezultata od oblika epruvete po normi.

**LITERATURA**

- [1] <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+ISO+527-1%3A2019> (pristupio 18.1.2025)
- [2] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-pla>(pristupio 29.12.2024)
- [3] <https://printer3d.hr/edukacija-i-podrska/filamenti-i-smole/pla-filament/>(pristupio 29.12.2024)
- [4] <https://polymerinnovationblog.com/poly-lactic-acid-pla-is-gaining-traction-in-the-market/>(pristupio 18.1.2025)
- [5] <https://medical.evonik.com/en/materials-and-solutions/resomer-bioresorbable-polymers/standard-polymers>(pristupio 3.1.2025)
- [6] <https://juggerbot3d.com/pla-filament-review/>(pristupio 29.12.2024)
- [7] [https://cdn.shopify.com/s/files/1/0584/7236/6216/files/Bambu PLA Basic Technical Data Sheet\\_bf3411ce-be39-4db7-9669-1b4671d2196b.pdf?v=1734060943](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0584/7236/6216/files/Bambu_PLA_Basic_Technical_Data_Sheet_bf3411ce-be39-4db7-9669-1b4671d2196b.pdf?v=1734060943)(pristupio 29.12.2024)
- [8] <https://www.rnd-tech.com/news/a-look-from-the-outside-3d-printing-and-fdm-technology/>(pristupio 3.1.2025)
- [9] <https://www.3dgllobe.net/fdmfff>(pristupio 29.12.2024)
- [10] <https://www.3dprintaj.com/fdm-fff-tehnologija-3d-printanja/>(pristupio 29.12.2024)
- [11] <https://ultimate3dprintingstore.com/blogs/ultimate-3d-printing-guide/3d-printing-filament-guide>(pristupio 3.1.2025)
- [12] <https://www.box3d.eu/warping-cracking-closed-environment-3d-printers/>(pristupio 3.1.2025)
- [13] <https://www.geeetech.com/blog/3d-printing-application/3d-printing-design/troubleshooting-methods-when-support-struture-3d-print-fails/>(pristupio 3.1.2025)
- [14] <https://pinshape.com/items/25524-3d-printed-display-tray-for-infill-pattern-and-infill-density>(pristupio 3.1.2025)
- [15] <https://i.redd.it/92zxw2w9tki51.jpg>(pristupio 3.1.2025)
- [16] [https://www.researchgate.net/figure/Dimensions-for-specimen-1A-of-ISO-527-2-1996-standard-for-the-determination-of-tensile\\_fig3\\_335005103](https://www.researchgate.net/figure/Dimensions-for-specimen-1A-of-ISO-527-2-1996-standard-for-the-determination-of-tensile_fig3_335005103)
- [17] <https://eu.store.bambulab.com/en-hr/products/p1s?variant=49311572328796>(pristupio 3.1.2025)

- [18] I.Uremović: Optimizacija geometrije epruvete za jednoosno i dvoosno vlačno ispitivanje FSB, 2024.: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:149110>
- [19] J. Bochnia, M. Blasiak, and T. Kozior, “A comparative study of the mechanical properties of fdm 3d prints made of pla and carbon fiber-reinforced pla for thin-walled applications,” *Materials (Basel)*. 14 (2021).
- [20] Filić, B.: Mehanička karakterizacija 3D ispisanih polimernih materijala, Diplomski rad, FSB, 2024. (pristupio 29.12.2024)
- [21] <https://felfil.com/pla-filament-for-3d-printing-learning-about-plastic-materials/?v=058f38ac9331>(pristupio 3.1.2025)
- [22] Širanović, R.: Svojstva i primjena biorazgradivog polimera PLA, Završni rad, FSB, 2015. (pristupio 29.12.2024)
- [23] Vettori, M.; Bergonzi, L. A territorial round-robin experiment for the evaluation of mechanical properties of FDM PLA produced by distributed facilities. In *Proceedings of the 49th Italian-Association-for-Stress-Analysis Conference (AIAS)*, Genova, Italy, 2–5 September 2020; Volume 1038.
- [24] Cojocar, V.; Frunzaverde, D.; Miclosina, C.-O.; Marginean, G. The Influence of the Process Parameters on the Mechanical Properties of PLA Specimens Produced by Fused Filament Fabrication—A Review. *Polymers* 2022, 14, 886. <https://doi.org/10.3390/polym14050886>