

THE MECHANICAL PROPERTIES TESTING OF MATERIALS MANUFACTURED BY FUSED DEPOSITION MODELING

ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA MATERIJALA PROIZVEDENIH TALOŽNIM SRAŠĆIVANJEM

ŠANČIĆ, Tomislav & TOMAŠIĆ, Ana

Abstract: In this paper, the mechanical properties of materials produced by additive manufacturing, using the fused deposition modeling, were investigated. The production procedure of the workpiece is described and the key parameters that affect the production process and mechanical properties are presented. Typical materials used in the fused deposition modeling are presented, of which PLA and PET-G will be mechanically tested. The parameters of print orientation, print speed, number of edge layers and infill percentage are considered. Test specimens were manufactured for the considered investigation on an industrial tensile testing machine. The test results were processed and an analysis was made on the basis of which recommendations were given for the production of characteristic workpieces.

Key words: Additive manufacturing, fused deposition modeling, 3D printer, tensile test

Sažetak: U ovom radu istražena su mehanička svojstva materijala koji su proizvedeni aditivnom tehnologijom, postupkom taložnog srašćivanja. Opisana je procedura proizvodnje izradaka te su prikazani ključni parametri koji utječu na proces proizvodnje i mehanička svojstva. Predstavljeni su tipični materijali koji se koriste u proizvodnji taložnim srašćivanjem od kojih će se PLA i PET-G mehanički ispitati. Razmotreni su parametri orijentacije ispisa, brzine ispisa, broja rubnih slojeva te postotak ispune. Izrađeni su testni uzorci za razmotreno vlačno ispitivanje na industrijskoj kidalici. Rezultati ispitivanja su obrađeni te je napravljena analiza temeljem koje su dane preporuke za proizvodnju karakterističnih izradaka.

Ključne riječi: Aditivna proizvodnja, taložno srašćivanje, 3D printer, vlačni pokus



Authors' data: Tomislav, Šančić, Karlovac University of Applied Sciences, tsancic@vuka.hr; Ana, Tomašić, Karlovac University of Applied Sciences, ana.tomasic@vuka.hr

1. Uvod

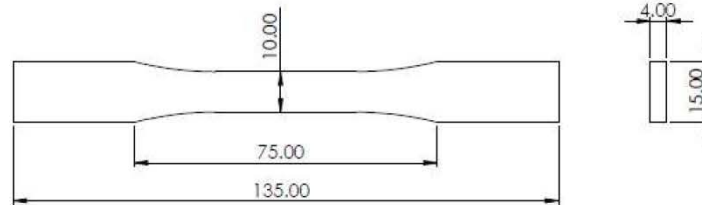
Aditivna proizvodnja poznatija pod nazivom 3D tisak u zadnja tri desetljeća doživjela je svoj nagli porast uslijed sve češćih zahtijeva za novim proizvodima i njihovim promjena dizajna. Ovakav pristup izradi dodavanjem materijala, suprotan prethodno korištenim tehnologijama proizvodnje temeljenim na oduzimanju materijala patentirao je Charles W. Hull 1984. godine [1]. Korištenjem aditivne tehnologije dobivaju se trodimenzionalni kruti modeli prema podacima iz CAD (engl. *computer-aided design*) modela. Trodimenzionalni objekti nastaju tehnologijom dodavanjem slojeva jedan na drugi. Postoje različite tehnologije aditivne proizvodnje poput stereolitografije SLA (engl. *stereolithography*), taložno srašćivanje FDM (engl. *fused deposition modeling*), lasersko srašćivanje SLS (engl. *selective laser sintering*), polyjet tehnologija, LOM (engl. *laminated object manufacturing*) tehnologija [2]. Ključnu ulogu u novoj četvrtoj industrijskoj revoluciji ima aditivna proizvodnja zbog dosadašnjih ograničenja proizvodnih sustava, zbog čega se više ne koristi samo za izradu prototipova nego i serijsku proizvodnju funkcionalnih konstrukcijskih dijelova. Zbog svoje fleksibilnosti, agilnosti i brzine plasiranja novih proizvoda na tržište aditivna proizvodnja unaprijeđuje se od brze izrade prototipa prema brznoj proizvodnji funkcionalnih konstrukcijskih dijelova koje nije moguće dobiti tradicionalnom proizvodnjom [3].

Razvitkom novih materijala i oblika izradaka koji u krajnosti dovode do povećanja kvalitete proizvoda, aditivna proizvodnja se koristi sve češće u različitim industrijama poput biomedicine, autoindustrije i svemirske industrije. Aditivna proizvodnja se sve više koristi i u istraživanju, posebice u mehatronici gdje se može koristiti za izradu prototipova [4], s obzirom da je za različite tehnologije procedura relativno jednostavna [5]. Tehnologija izrade koja omogućuje izradu konstrukcijskih dijelova zahtijevane točnosti i mehaničkih svojstva pri povećanoj brzini proizvodnje, dobra je osnova za zamjenu tradicionalne proizvodnje [6]. U usporedbi s drugim metodama FDM tehnologija ima svojih prednosti poput raznolikosti izrade te niskih troškova materijala zbog čega je i najčešće korištena metoda. Iako je prošlo tri desetljeća razvijanja te tehnologije, još uvijek postoje problemi vezani uz kvalitetu izradaka, konzistentnost i nedetektiranih defekata unutar strukture izradka [7]. Najčešće korišteni termoplastični materijali kod FDM postupka su acrylonitrile butadiene styrene (ABS) i polylactic acid (PLA). Materijal PETG kombinira prednosti PLA i ABS, pa se mogu proizvesti konstrukcijski dijelovi boljih mehaničkih svojstava [8]. Cilj ovog rada je povezati efekte 3D ispisa s mehaničkim svojstvima i usporediti promjene s obzirom na dva razmotrena materijala PLA i PETG.

2. Materijali i metode

Testni uzorci su izrađeni u CAD platformi zatim spremljeni u “.stl“ formatu pogodnom za 3D ispis. Podaci opisani 3D CAD modelom prema kojima se izrađuje testni uzorak prenose se na 3D pisač. Dva različita materijala PETG (crni, 1.75 mm promjer filameta) i PLA (crni, 1.75 mm promjer filameta) ispisani su na 3D pisaču Prusa i3 MK3S [9]. Koristile su se epruvete izrađene prema standardu ISO 527-2,

kvadratnog poprečnog presjeka namjenjene za provedbu jednoosnog vlačnog ispitivanja (Slika 1). Orijehtacija ispisa epruvete polegnuta na XY ravninu 3D pisača predstavlja X orijentaciju, dok tako postavljena epruvetu rotacijom za 90 stupnjeva oko svoje osi koja prolazi duljinom epruvete daje Y orijentaciju.



Slika 1. Standardni testni uzorak ISO 527-2 za provođenje jednoosnog kvazistatičko vlačnog ispitivanja

Nad testnim uzorcima provodilo se je kvazistatičko vlačno jednoosno ispitivanje na univerzalnoj industrijskoj kidalici Shimadzu AG-X plus (slika 2). Ispitivanje se provodilo s konstantnom brzinom od 30 mm/min, bez korištenja vanjskih uređaja za očitavanje naprezanja. Industrijska kidalica izrađuje dijagram naprezanje-deformacija iz kojeg se mogu analizirati mehanička svojstva materijala i kritične točke dijagrama naprezanje-deformacija.



a)

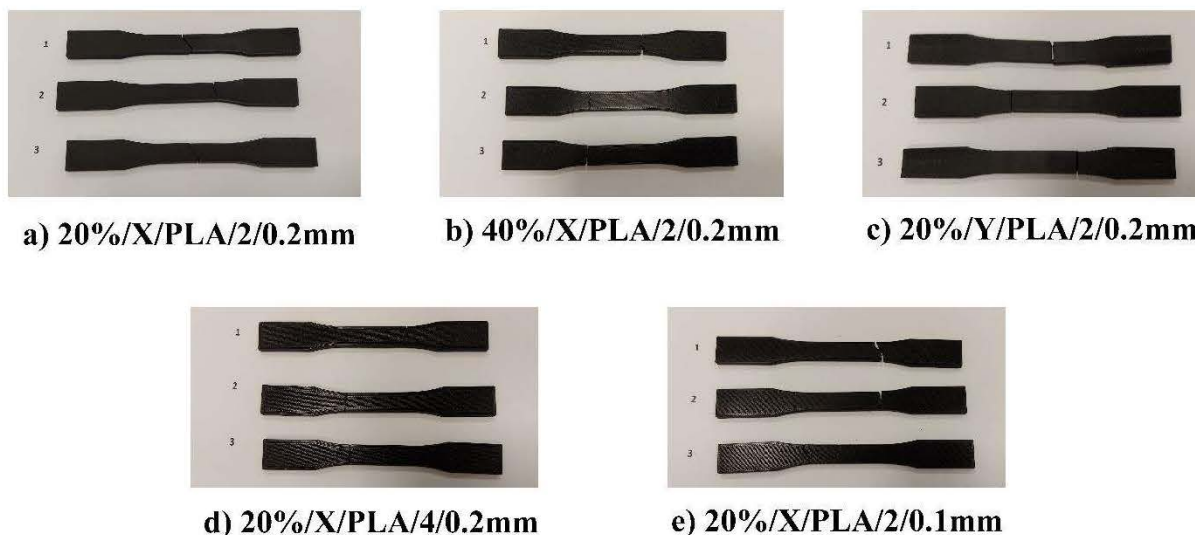


b)

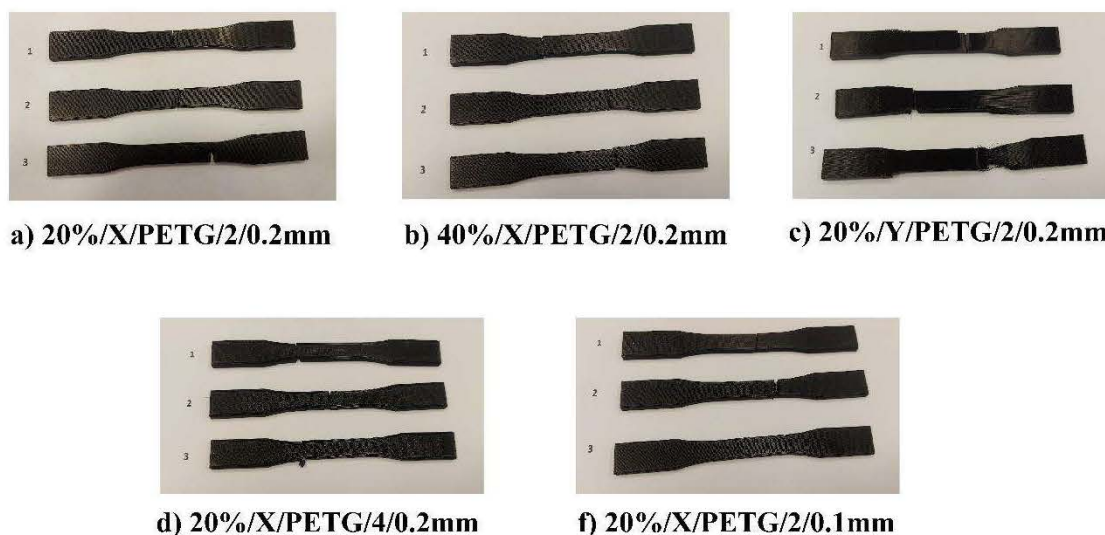
Slika 2. a) SHIMADZU AG-X plus kidalica; b) postupak provođenja kvazistatičko jednoosnog vlačnog naprezanja nad testnim uzorkom

Tijekom izrade sloj po sloj dolazi do anizotropnog svojstva materijala, što rezultira različitim mehaničkim svojstvima materijala. Zbog toga je potrebno provesti

ispitivanje na nekoliko uzoraka. Ispitivanje se provodi na svukupno 30 testnih uzoraka za oba materijala. Od materijala PETG izrađeno je 15 uzoraka isto tako od materijala PLA izrađeno je 15 uzoraka. Za svaki materijal izrađeno je 5 grupa s različitim parametrima (tablica 1) sastavljenih od 3 standardne epruvete nad kojima se je provela osnovna statistička obrada njihove srednje vrijednosti i standardne devijacije.



Slika 3. Ispitani testni uzorci izrađeni PLA materijalom: a) 20%/X/PLA/ 2/ 0.2mm, b) 40%/X/ PLA / 2/ 0.2mm, c) 20%/Y/ PLA / 2/ 0.2mm, d) 20%/X/ PLA / 4/ 0.2mm, e) 20%/X/ PLA / 2/ 0.1mm



Slika 4. Ispitani testni uzorci izrađeni PETG materijalom: a) 20%/X/PETG/ 2/ 0.2mm, b) 40%/X/PETG/ 2/ 0.2mm, c) 20%/Y/PETG/ 2/ 0.2mm, d) 20%/X/PETG/ 4/ 0.2mm, e) 20%/X/PETG/ 2/ 0.1mm

Varijable poput kvalitete površine, dimenzijske točnosti i mehaničkih svojstva materijala ovise o parametrima printanih izradaka. Postoji mnogo parametara koji utječu na ispis, a u ovom radu biti će promatrane ovisnosti mehaničkih svojstva o

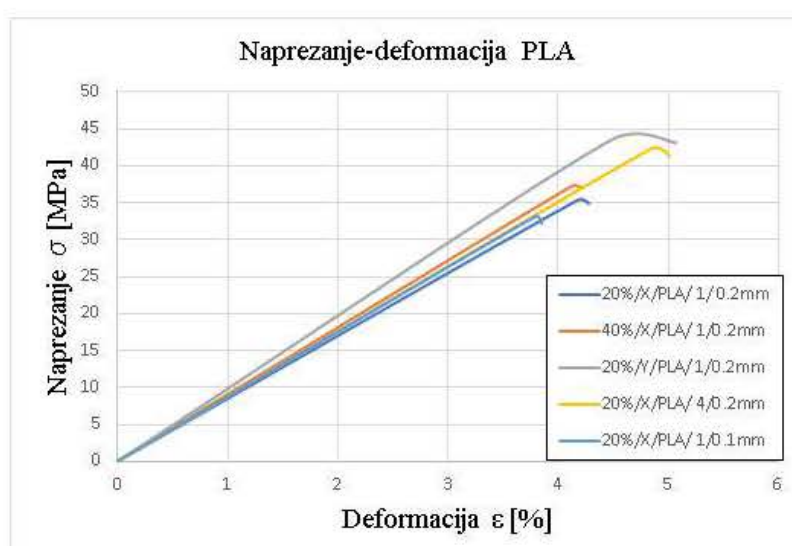
promjenama postotka ispune, orijentacije ispisa, broj rubnih slojeva te debljini sloja kod ispisa materijala PLA i PETG prikazanih tablično (tablica 1).

	Postotak ispune	Orijentacija	Broj rubnih slojeva	Debljina sloja [mm]	Masa [g]
20%/X/PETG/ 2/ 0.2mm	20%	X	2	0.2mm	5.93
40%/X/PETG/ 2/0.2mm	40%	X	2	0.2mm	6.77
20%/Y/PETG/ 2/0.2mm	20%	Y	2	0.2mm	6.69
20%/X/PETG/ 4/0.2mm	20%	X	4	0.2mm	6.45
20%/X/PETG/ 2/0.1mm	20%	X	2	0.1mm	5.97
20%/X/PLA/ 2/ 0.2mm	20%	X	2	0.2mm	5.79
40%/X/ PLA / 2/0.2mm	40%	X	2	0.2mm	6.61
20%/Y/ PLA / 2/0.2mm	20%	Y	2	0.2mm	6.53
20%/X/ PLA / 4/0.2mm	20%	X	4	0.2mm	6.3
20%/X/ PLA / 2/0.1mm	20%	X	2	0.1mm	5.83

Tablica 1. Sažetak korištenih parametara za 3D ispis pojedinih uzoraka

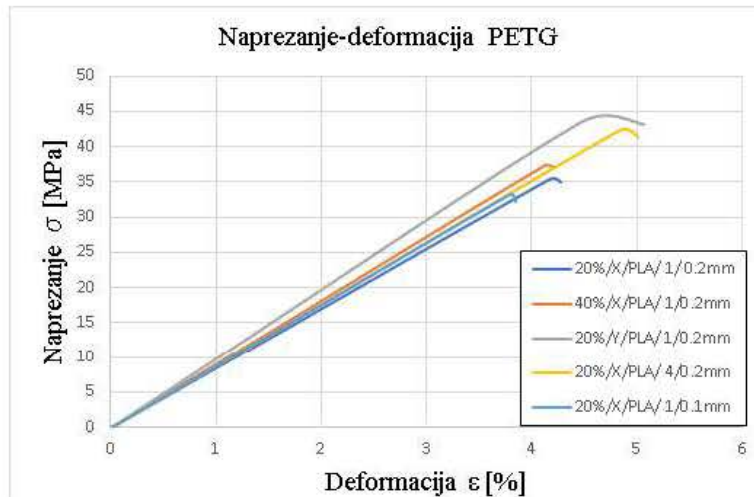
3. Rezultati i diskusija

Dobiveni rezultati za pojedini materijal opisani su dijagramima naprezanje-deformacija. Slika 5 prikazuje dijagram naprezanje-deformacija za materijal PLA gdje su prikazane srednje vrijednosti grupa materijala i njihova standardna devijacija unutar grupe od 3 uzorka izrađenih istim parametrima. Najveće odstupanje u maksimalnoj vlačnoj čvrstoći je između uzorka 20%/X/PLA/2/0.1mm maksimalne vlačne čvrstoće 33.203 MPa standardne devijacije 3.97 MPa i uzorka 20%/Y/PLA/2/0.2mm maksimalne vlačne čvrstoće 43.398 MPa standardne devijacije 0.37 MPa što iznosi 23.49%.



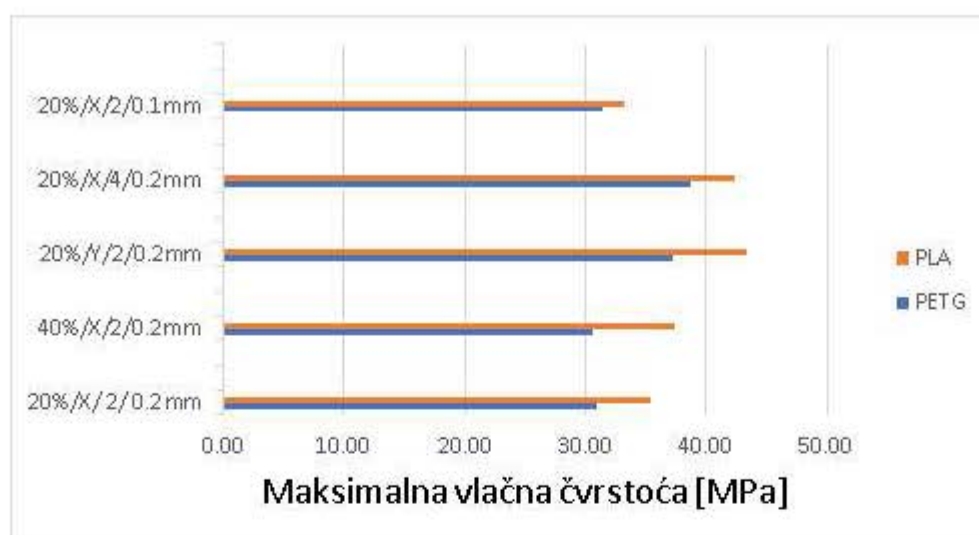
Slika 5. Dijagram naprezanje-deformacija srednjih vrijednosti 5 grupa PLA testnih uzoraka

Slika 6 prikazuje dijagram naprezanje-deformacija za materijal PETG. Najveće odstupanje u maksimalnoj vlačnoj čvrstoći je između uzorka 40%/X/PETG/2/0.2mm vlačne čvrstoće 30.62 MPa standardne devijacije 2.45 MPa i uzorka 20%/X/PETG/4/0.2mm vlačne čvrstoće 38.77 MPa standardne devijacije 1 MPa što iznosi 23.49%.



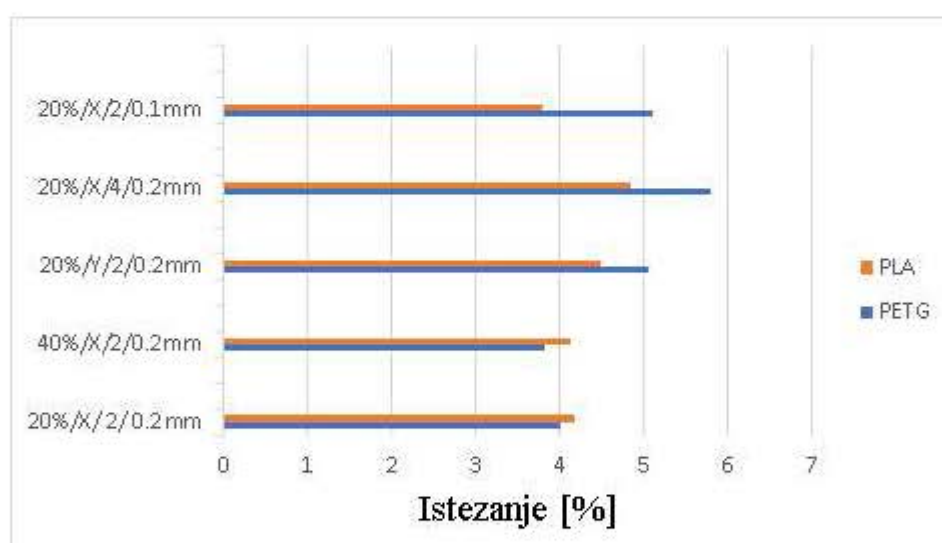
Slika 6. Dijagram naprezanje-deformacija srednjih vrijednosti 5 grupa PETG testnih uzoraka

Slika 7. predstavlja usporedbu maksimalne vlačne čvrstoće uzoraka materijala PLA i PETG s različitim parametrima ispisa. Uzorci izrađeni od PETG materijala u odnosu na uzorke izrađene od PLA imaju manju vlačnu čvrstoću za promatrani uzorak istih parametara. Razlika između najmanje vlačne čvrstoće u provedenom eksperimentu za uzorak 40%/X/PETG/2/0.2mm vlačne čvrstoće 30.62 MPa standardne devijacije 2.45 i 20%/Y/PLA/2/0.2mm vlačne čvrstoće 43.398 MPa standardne devijacije 0.37 MPa iznosi 29.44%. Od standardno zadanih postavki na 3D pisaču 20%/X/PETG/2/0.2mm vlačne čvrstoće 30.92MPa standardne devijacije 1.07 MPa promjenom postotka ispune za dvostruki iznos na vrijednost 40% opisano testnim uzorkom 40%/X/PETG/4/0.2mm smanjuje se maksimalna vlačna čvrstoća za 0.97%. Slično tome je i za materijal PLA gdje također tek kod promjene orijentacije i broja rubova ispisa dolazi do značajne promjene u maksimalnoj vlačnoj čvrstoći uzorka.



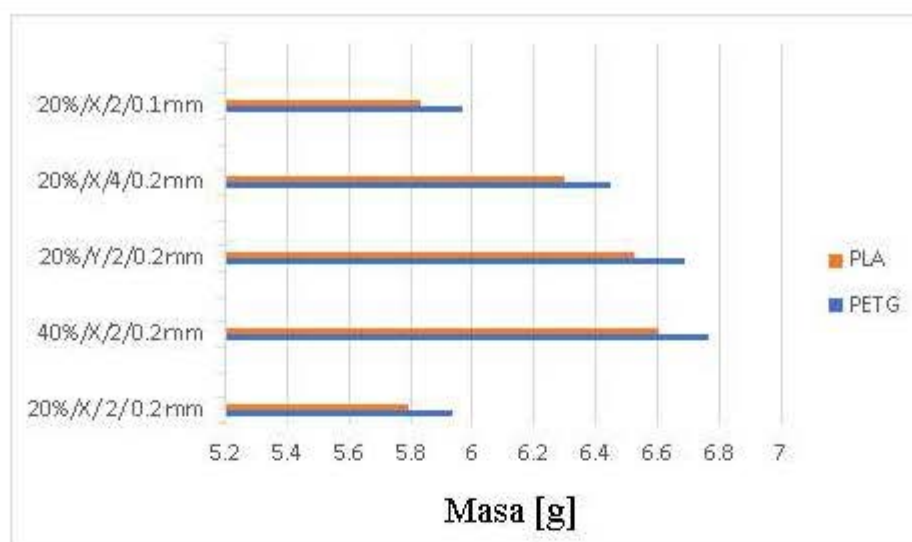
Slika 7. Usporedba srednje vrijednosti vlačne čvrstoće 10 grupa testnih uzoraka izrađenih od PLA i PETG materijala

Za razliku od maksimalne vlačne čvrstoće deformacije nisu kod pojedinog materijala veće za sve pojedine uzorke nego se izmjenjuju vrijednosti prikazano na slici 8. Najmanju deformaciju uzorka od 3.82% ima uzorak 40%/X/PETG/2/0.2mm, a najveću uzorak 20%/X/PETG/4/0.2mm u iznosu od 5.8%.



Slika 8. Usporedba srednje vrijednosti deformacije 10 grupa testnih uzoraka izrađenih od PLA i PETG materijala

Usporedba masa testnih uzoraka opisana na slici 9 prikazuje ovisnost mase o postotku ispune, te gustoći samog sirovog materijala odnosno filamenta. PLA zbog manje gustoće ima za iste testne uzorke manju masu u odnosu na PETG. Razlika odstupanja od uzorka najmanje mase 20%/X/PLA/2/0.2mm od 5.79g i uzorka najveće mase 40%/X/PETG/2/0.2mm od 6.77g iznosi 14.38%.



Slika 9. Usporedba srednje vrijednosti mase 10 grupa testnih uzoraka izrađenih od PLA i PETG materijala

4. Zaključak

U ovom istraživanju ispitana su mehanička svojstva PLA i PETG materijala za različite parametre ispisa. Prikazano je da za znatnu promjenu maksimalne vlačne čvrstoće potrebno je mijenjati broj rubnih slojeva ili orijentaciju ispisa. Promjena postotka ispune za dvostruko veću vrijednost znatno ne mijenja rezultate vlačne čvrstoće kao i smanjenje debljine sloja ispisa za dvostruko vrijednost. Veće vrijednosti maksimalne vlačne čvrstoće za testirane uzorke dobivaju se s materijalom PLA. Manju masu svih testiranih uzoraka ovisno o materijalu također imaju uzorci izrađeni od PLA. Usporedbom deformacije uzoraka odnosno postotka njihovog istežanja maksimalni rezultat daje 20%/X/PETG/4/0.2mm izrađen od materijala PETG. Ovisno o željenom konstrukcijskom rješenju i njegovim zahtjevima potrebno je odabrati određenu kombinaciju materijala parametara ispisa.

5. Literatura

- [1] C. W. Hull and C. Arcadia, "United States Patent (19) Hull (54) (75) (73) 21) 22 (51) 52) (58) (56) APPARATUS FOR PRODUCTION OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS BY STEREO THOGRAPHY."
- [2] N. Markiz, E. Horváth, and P. Ficzer, "Influence of printing direction on 3D printed ABS specimens," *Production Engineering Archives*, vol. 26, no. 3, pp. 127–130, Sep. 2020, doi: 10.30657/pea.2020.26.24.
- [3] A. Haleem and M. Javaid, "Additive Manufacturing Applications in Industry 4.0: A Review," *Journal of Industrial Integration and Management*, vol. 04, no. 04, p. 1930001, Dec. 2019, doi: 10.1142/s2424862219300011.
- [4] D. Kotarski, P. Piljek, M. Pranjić, C. G. Grlj, and J. Kasać, "A modular multicopter unmanned aerial vehicle design approach for development of an

- engineering education platform,” *Sensors*, vol. 21, no. 8, Apr. 2021, doi: 10.3390/s21082737.
- [5] P. Piljek, N. Krznar, M. Krznar, and D. Kotarski ““Framework for Design and Additive Manufacturing of Specialised Multirotor UAV Parts””, doi: 10.5772/intechopen.102781.
- [6] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, “The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0,” *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 545–554, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.148.
- [7] S. Wickramasinghe, T. Do, and P. Tran, “FDM-Based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments,” *Polymers*, vol. 12, no. 7. MDPI AG, pp. 1–42, Jul. 01, 2020. doi: 10.3390/polym12071529.
- [8] M. Kováčová *et al.*, “Novel hybrid PETG composites for 3D printing,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 9, May 2020, doi: 10.3390/app10093062.
- [9] “Prusa i3”, Accessed: Apr. 27, 2022. [Online]. Available: <https://3dprinting.stackexchange.com/questions/2593/how-does-the-home-position-work-on-a-prusa-i3-reprap-printer>