

Vpliv materiala in temperature na trdnost 3D-tiskanega izdelka

Tehnika
Raziskovalna naloga

David Smrkolj
9. razred

Mentorica: Milena Valentan

Somentor: Edvard Ilar

2021

OŠ Majde Vrhovnik

Kazalo

Kazalo	1
Kazalo tabel	2
Kazalo slik	3
Kazalo grafov	4
Povzetek	5
Izhodišče	5
Metode	5
Rezultati	5
Zaključki	5
Uvod.....	6
Zgodovina 3D-tiskanja.....	6
Oblikovanje modelov	7
Postopek 3D-tiskanja	7
Materiali	7
Polilaktična kislina ali polilaktid (PLA)	8
Mehanske lastnosti PLA	8
Polietilen tereftalat glikol (PETG)	8
Mehanske lastnosti PETG	8
Akrilonitril butadien stiren (ABS)	9
Mehanske lastnosti ABS	9
Akrilonitril stiren akrilat (ASA).....	9
Mehanske lastnosti ASA.....	9
Opis raziskovalnega problema	10
Delovna hipoteza	10
Uporabna vrednost naloge	10
Metode	11
Rezultati	15
Razprava	20
Zaključek.....	21
Zahvala.....	22
Literatura in viri	23

Kazalo tabel

Tabela 1. Meritve sile preloma pri materialu PETG.....	15
Tabela 2. Meritve sile preloma pri materialu PLA.....	16
Tabela 3. Meritve sile preloma pri materialu ABS.....	17
Tabela 4. Meritve sile preloma pri materialu ASA.....	18
Tabela 5. Primerjava optimalnih temperatur tiskanja in največje sile preloma pri različnih materialih.....	19

Kazalo slik

Slika 1. 3D-tiskalnik Creality Ender 5.....	11
Slika 2. Standardiziran predmet.....	12
Slika 3. Standardiziran predmet v primežu.....	13
Slika 4. Merjenje trdnosti standardiziranega predmeta s silomerom.....	13

Kazalo grafov

Graf 1. Odvisnost sile preloma od temperature tiskanja materiala PETG.....	15
Graf 2. Odvisnost sile preloma od temperature tiskanja materiala PLA.....	16
Graf 3. Odvisnost sile preloma od temperature ABS.....	17
Graf 4. Odvisnost sile preloma od temperature ASA.....	18
Graf 5. Odvisnost sil preloma od različnih materialov.....	19

Povzetek

Izhodišče

V zadnjem desetletju se je 3D-tisk hitro razvil in postal širše dostopen za industrijsko in domačo uporabo. Materiali, iz katerih se 3D-tiska predmete, imajo različne fizikalne in kemične lastnosti. Namen raziskovalne naloge je primerjati trdnost standardiziranega 3D-natisnjenelega predmeta iz različnih materialov pri različnih temperaturah tiskanja.

Metode

Z računalniškim programom sem oblikoval standardiziran predmet in ga natisnil s 3D-tiskalnikom iz štirih najpogosteje uporabljenih materialov pri devetih različnih temperaturah. Trdnost sem izmeril s silomerom in zabeležil največjo silo pred pretrganjem. Dobljene rezultate sem primerjal s statistično analizo.

Rezultati

Temperatura tiskanja pri materialih PETG, ABS in ASA statistično pomembno vpliva na izmerjeno silo preloma (PETG: $p = 0,027$; ABS: $p = 0,008$; ASA: $p = 0,000$), pri materialu PLA pa ne (PLA: $p = 0,118$). Največja sila preloma je bila izmerjena pri PLA pri temperaturi 210°C (mediana 10,60 N), sledi PETG pri temperaturi 235°C (mediana 8,65 N), nato ASA pri temperaturi 255°C (mediana 6,60 N). Najmanjšo silo preloma je imel material ABS pri temperaturi 245°C (mediana 5,85 N).

Zaključki

Temperatura tiskanja 3D-izdelka vpliva na trdnost pri materialih ABS, ASA in PETG, ne pa pri PLA. Najtrdnější je PLA, sledita mu PETG in ASA, ABS pa ima najmanjšo trdnost od preizkušenih materialov.

Uvod

3D-tisk je postopek izdelave predmeta oblikovanega s pomočjo računalniškega programa. Računalniški program posreduje informacije v 3D-tiskalnik, ta si jih zapomni in opravlja delo po informacijah. Napravo za 3D-tisk so poimenovali po treh dimenzijah (X, Y, Z).

3D-tiskalnik tiska izdelke počasi, saj nalaga plast za plastjo. Običajen 3D-tiskalnik je sestavljen iz matične plošče, zaslona, treh motorjev za osi, motorja za potiskanje materiala, šobe, hladilnih ventilatorjev in ogrevane plošče.

Velika prednost 3D-tiska je izdelava zapletenih oblik, ki jih ne bi mogel izdelati človek. S 3D-tiskalnikom so na primer izdelani votli deli z notranjimi nosilnimi podporami za zmanjšanje teže.

Zgodovina 3D-tiskanja

Načrt in postopek 3D-tiskanja je prvi predstavil Raymond F. Jones leta 1950 v zgodbi Tools of the Trade.

Leta 1971 je Johannes F. Gottwald prijavil prvi patent, ki opisuje 3D-tiskanje s hitrim prototipiranjem.

Oprema in materiali za zgodnjo proizvodnjo dodatkov so bili razviti v letu 1981. Hideo Kodama je prijavil patent risalnika XYZ, vendar je bila pridobitev patentnih pravic opuščena in je projekt "potonil".

Leta 1984 je Charles Hull izumil sistem izdelave stereolitografije, pri kateri se posamezne plasti ali lamele dodajajo s strjevanjem. Postopek je opredelil z ustvarjanjem vzorca preseka predmeta, ki ga je treba oblikovati. Njegov prispevek je bil format datoteke STL (stereolitografija) in digitalne strategije polnjenja in rezanja, ki jih uporabljamo še danes. Leta 1986 je Charles Hull dobil patent za sistem, ustanovil je podjetje 3D Systems Corporation, ki je leto pozneje izdelalo prvi komercialni 3D-tiskalnik: SLA-1.

Leta 1990 so začeli izumljati tiskalnike, ki so odstranjevali material (CNC). Na Stanfordini Univerzi Carnegie Mellon so razvili nove tehnike nanašanja materialov, nanašanje mikroskopsko tankih slojev in brizganje materialov. Tudi podporni materiali so se razširili, kar je pripomoglo k oblikam novih predmetov. V letu 1993 se je začelo izumljati brizgalne 3D-tiskalnike. V letu 1995 so razvili postopek laserskega taljenja.

Leta 2006 so izumili prvi 3D-tiskalnik s sposobnostjo tiskanja več materialov ali barv materialov hkrati (1).

Patenti za postopek tiskanja z vgrajenim nanašanjem (FDM) so potekli leta 2009.

Leta 2010 je bilo prvo desetletje, ko so začeli tiskali kovinske dele za končno uporabo. To so bile matice, vijaki, zobniki, nosilci.

2012 je podjetje Filabot razvilo sistem, ki omogoča tiskanje z več materiali plastike.

Leta 2014 sta Benjamin S. Coook in Manos M. Tentezeris predstavila platformo za izdelavo tiskane elektronike. Ta je omogočila 3D-tiskanje funkcionalne elektronike.

Od leta 2018 je najpogosteje uporabljena tehnika 3D-tiskanja ekstrudiranje materiala (FDM). To naj bi bila najcenejša oblika 3D-tiskanja (2).

Oblikovanje modelov

3D-natisljive modele se ustvarja z:

- računalniško odprtim oblikovanjem (CAD),
- 3D-skenerjem,
- digitalno kamero,
- programsko opremo za fotogrametrijo.

Napake v 3D-modelih se da odpraviti v programu. Poznamo oblike datotek, v katere shranjujemo 3D-modele. Najpogostejša je STL, ostale pa so OBJ, FBX, COLLADA, 3DS, IGES, STEP, VRML in X3D (3). Poznani programi za oblikovanje 3D-modelov so SketchUp, AutoCaD, SolidWorks (4) .

Postopek 3D-tiskanja

3D-datoteko pripravimo za tiskanje v programski opremi, ki se imenuje rezalnik (angl. Slicer). Ta generira tanke plasti željenega modela in ustvari datoteko G-kode. G-kode je datoteka, ki vsebuje informacije izvajanja 3D-tiska. Programska oprema za 3D-tiskanje posreduje G-kodo v 3D-tiskalnik, ta jo shrani in uporabi za navodila med postopkom 3D-tiskanja.

Na začetku je potrebno naravnati ogrevano ploščo, običajno z listom papirja. Prvi korak: šoba v glavi 3D-tiskalnika in ogrevana plošča se segrejeta. Drugi korak: natisne črto z želenim materialom, da se šoba očisti in da se materiali med seboj ne pomešajo. Tretji korak: prižge se ventilator za hladilni sistem, ki razdeljuje material v niti in taljen material v šobi. 3D-tiskalnik ima ob strani kolut, na katerem je navita nit materiala, zraven pa motor, ki potiska material po cevi do glave, kjer se tali. Material se tali v šobi, kjer ima natančno regulirano temperaturo. Da se predmeti pri tiskanju ne upogibajo, se pri tiskanju številnih materialov uporablja ogrevana plošča, na kateri se tiska (2).

Materiali

V večini se je zaradi enostavnosti proizvodnje in ravnanja s polimernimi materiali za 3D-tiskanje uporabljalo polimere. Hitro se je razvil tudi način tiska drugih materialov, ki ne vključujejo polimerov, na primer kovin in keramike (2). 3D-tiskanje z več materiali hkrati omogoča izdelavo zapletenih predmetov. Pri izbiri materiala za določen predmet so zelo

pomembne njegove fizikalne in kemične lastnosti. Materiale razvrščamo glede na njihove lastnosti. Lahko so plastični, gumijasti, toplotno prevodni, električno prevodni, odporni proti koroziji (5).

Polilaktična kislina ali polilaktid (PLA)

Polilaktična kislina je termoplastični poliester. Njegova kemijska formula je $C_3H_4O_2$. Pridobi se ga s kondenzacijo mlečne kisline z izgubo vode, lahko pa se ga pridobi tudi s polimerizacijo laktida. PLA je priljubljen material, saj je ekonomično proizveden iz obnovljivih virov. Izdelan je lahko iz rastlinskega škroba, koruze, kasave, sladkornega trsa ali celuloze sladkorne pese. PLA je topen v topilih kot so vroč benzen, tetrahidrofuran in dioksan. Mogoče ga je topiti z diklorometanom, z acetonom pa lahko samo zmečamo površino. Topen je tudi v številnih organskih topilih kot je etilacetat (6).

Mehanske lastnosti PLA

Običajen PLA ima temperaturo taljenja od 130 °C do 180 °C. Toplotno odporen je do 60 °C, potem se začne kriviti. Je tudi dober toplotni izolator. Pri sobni temperaturi ni električno prevoden (7). Ni odporen na UV svetlobo. Občutljiv je na vlago (8). PLA ima visoko površinsko napetost, zato se tiska enostavneje in pogosteje uporablja. Gostoto ima 1,24 g/cm³, njegova natezna trdnost je med 37 in 65 MPa (9, 10).

Polietilen tereftalat glikol (PETG)

PETG je v osnovi prozoren termoplastik. Spada med akril in polikarbonat. Uporablja se ga v mehanskih delih in robotiki (11). Zelo je razširjen zaradi njegovih lastnosti. 3D-tiska se ga preprosto, zato je primeren je za vse 3D-tiskalnike. Izdelava se ga preprosto. Mogoče ga je toplotno upogniti in termoformirati (toplotno oblikovati). Izpolnjuje tudi zahteve FDA (Food and Drug Administration) za stik z živili (12).

Mehanske lastnosti PETG

PETG je dobro odporen na udarce. Absorbira vlago iz zraka (13). Toplotno odporen je do 70 °C, pri višjih temperaturah pa se postopoma deformira. Je vodoodporen in dobro zatesni vodo. Odporen je tudi na različne kemične snovi, ni pa odporen na UV svetlobo, zato je manj primeren za uporabo na sončni svetlobi. Gostoto ima 1,23 g/cm³, natezna trdnost tega materiala pa je okoli 50 MPa (14).

Akrilonitril butadien stiren (ABS)

To je termoplastični polimer. Je nebiološko razgradljiva plastika na osnovi nafte. Narejen je s polimerizacijo stirena in akrilonitrila s prisotnostjo polibutadiena. Pri segrevanju odda strupeno kemikalijo stiren. Je ena najpogostejših plastik, ki se uporabljajo pri elektronskih ohišjih, avtomobilskih delih, potrošniških izdelkih, cevni armaturah, Lego igračah in drugih. ABS je mogoče večkrat topiti ali taliti in preoblikovati brez večje kemične razgradnje (reciklirati). Z ABS je dokaj varno ravnanje, ko se ohladi in strdi, zato je enostaven za obdelavo, barvanje, brušenje, lepljenje (15-18).

Mehanske lastnosti ABS

ABS zagotavlja ugodne mehanske lastnosti. Odporen je na udarce. Na toploto je odporen do 100 °C, nato se začne kriviti. Ni odporen na UV svetlobo in ni odporen proti kemikalijam. Voda ne vpliva na ABS, če je 3D-tiskan, pa bo morda voda puščala skozi sloje. Njegova gostota je 1,04 g/cm³, natezna trdnost pa 40 MPa (19).

Akrilonitril stiren akrilat (ASA)

ASA je amorfni termoplast. Razvit je kot varianta ABS z izboljšano vremensko odpornostjo. ASA ima visoko vremensko odpornost, ohranja barvo, sijaj in mehanske lastnosti. Pogosto se uporablja v avtomobilski industriji. Zaradi dobrih lastnosti se uporablja tudi za izdelavo prototipov pri 3D-tiskanju. Mogoče ga je obdelati z ekstrudiranjem, termooblikovanjem, brizganjem, ekstruzijskim brizganjem in strukturnim oblikovanjem pene. ASA se lahko pridobiva z reakcijami treh monomerov: stirena, akrilonitrila in akrilnega estra (20).

Mehanske lastnosti ASA

Material ASA je kemično odporen na alkohole in številna čistila. Obstojeen je na soncu. Toplotno je odporen do 95 °C. Odporen je na udarce, UV svetlobo, je vodoodporen. Njegova gostota je 1,07 g/cm³, natezna trdnost pa 55 MPa (21, 22).

Opis raziskovalnega problema

Namen moje raziskovalne naloge je primerjati trdnost standardiziranega predmeta natisnjene s 3D-tiskalnikom iz različnih materialov pri različnih temperaturah tiskanja.

Delovna hipoteza

Pri raziskovalni nalogi sem izhajal iz naslednjih **delovnih hipotez**:

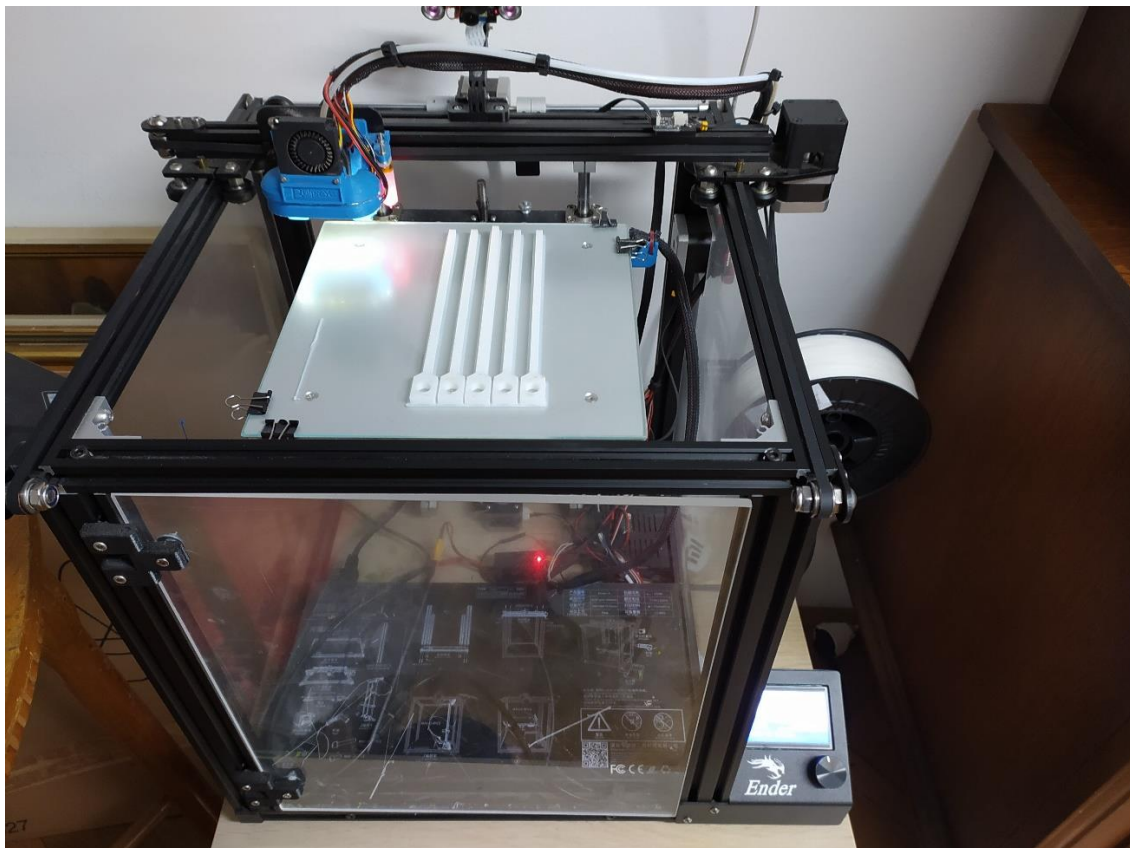
1. Temperatura tiskanja vpliva na trdnost standardiziranega predmeta natisnjene iz istega materiala.
2. Standardizirani predmet natisnjen iz različnih materialov ima različno trdnost pri svoji optimalni temperaturi.

Uporabna vrednost naloge

Iz ugotovljenih meritev trdnosti standardiziranega predmeta sem izdelal priporočila za 3D-tiskanje predmetov iz različnih materialov, tako da imajo izdelki največjo trdnost. Hkrati sem upošteval tudi gostoto materiala, saj je za določene namene (letalsko modelarstvo) pomembno, da so materiali trdni in lahki.

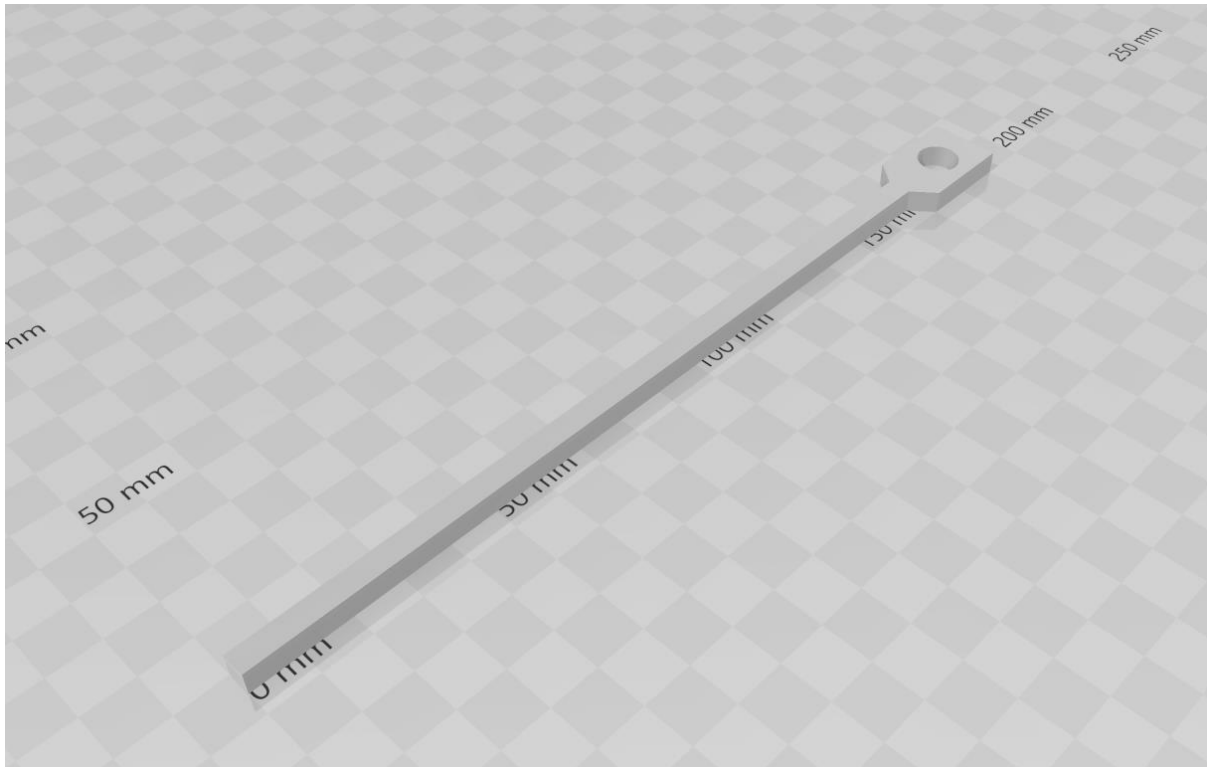
Metode

Pri 3D-tiskanju sem uporabil tiskalnik Creality Ender 5 (Shenzhen Creality 3D Technology Co., Ltd, Shenzhen, Kitajska - slika 1) s programsko opremo rezalnik Ultimaker Cura 4.8.0 (brezplačna različica dosegljiva na <https://ultimaker.com/software>).



Slika 1. 3D-tiskalnik Creality Ender 5.

Standardiziran predmet sem oblikoval v programu SketchUp (brezplačna različica dosegljiva na <https://www.sketchup.com/plans-and-pricing/sketchup-free>). Predmet ima obliko kvadra z merami 190 mm x 5 mm x 5 mm. Predmet je votel, bočni steni sta iz ene vzdolžne plasti debeline 0,4 mm, zgornja in spodnja pa vsaka iz 3 prečnih slojev. Na enem koncu ima predmet razširitev z luknjo, ki služi pritrditvi silomera (slika 2).



Slika 2. Standardiziran predmet.

Pri 3D-tisku sem uporabil naslednje materiale proizvajalca Plastika Trček (Cesta v Gorice 35, Ljubljana, Slovenija):

- polilaktična kislina (PLA),
- polietilen tereftalat glikol (PETG),
- akrilonitril butadien stiren (ABS),
- akrilonitril stiren akrilat (ASA).

Temperaturo 3D-tiskanja sem stopnjeval po korakih 5 °C v in izven temperaturnega območja, ki ga priporoča proizvajalec materiala.

Največjo trdnost sem izmeril s silomerom, ki se uporablja za ugotavljanje mase osebne prtljage in ki zabeleži največjo silo pred pretrganjem. Standardiziran predmet sem pritrdil na ravno podlago (mizo) v primež, tako da je 7,5 cm standardiziranega predmeta imelo stik s primežem (sliki 3 in 4).



Slika 3. Standardiziran predmet v primežu. Merilni trak prikazuje dolžino vpetja predmeta v primež.



Slika 4. Merjenje trdnosti standardiziranega predmeta s silomerom.

Največjo silo pred prelomom predmeta sem izmeril z analizo upočasnjenega videoposnetka, ki sem ga naredil s kamero mobilnega telefona Xiaomi Redmi Note 8T (Xiaomi, Peking, Kitajska). Videoposnetek sem zajemal s hitrostjo 240 slik na sekundo in ga pregledal z odprtokodnim računalniškim programom MPC-HC x64 1.9.7.

Statistično analizo sem naredil s programom SPSS v.27.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA). Najprej sem s Shapiro Wilk testom ugotovil, ali so sile pred prelomom v temperaturnih kategorijah normalno porazdeljene. Nato sem primerjal mediane vrednosti sile pred prelomom med vsemi temperaturnimi kategorijami posameznega materiala s testom Kruskal-Wallis. Na koncu sem s tem testom primerjal še najvišjo silo preloma med materiali. Za statistično pomemben rezultat sem štel vrednost $p < 0,05$ (5 %).

Rezultati

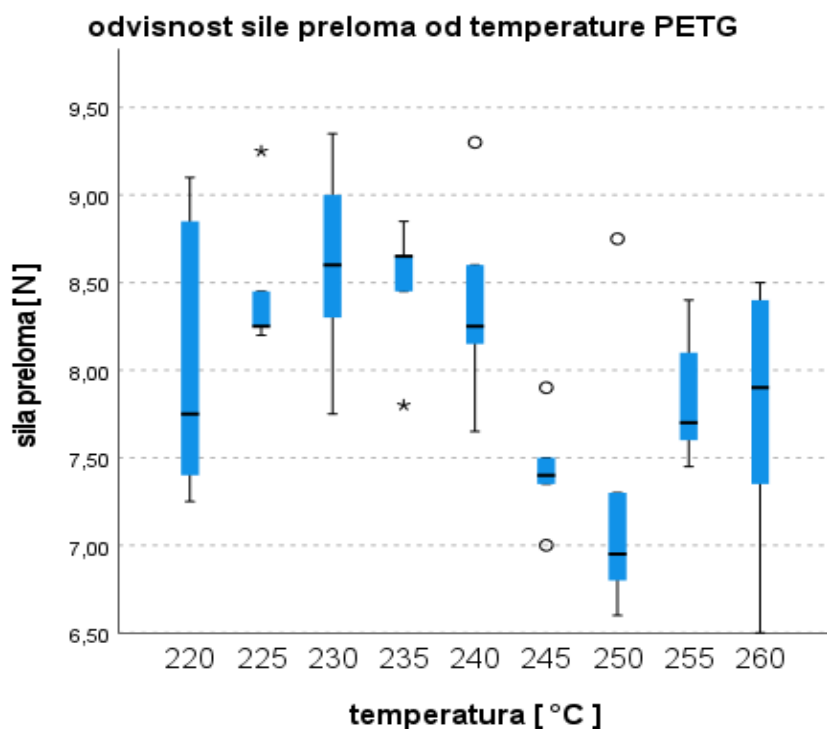
Iz materialov PLA, PETG, ABS in ASA sem natisnil po pet standardiziranih predmetov pri devetih različnih temperaturah, skupno 180 standardiziranih predmetov.

Temperatura tiskanja pri materialu PETG statistično pomembno vpliva na izmerjeno silo preloma (Kruskal-Wallis $H = 17,310$; $p = 0,027$) (tabela 1 in graf 1).

Tabela 1. Meritve sile preloma pri materialu PETG. Z rdečo barvo je označena temperatura, pri kateri je prelomna sila največja.

temperatura [°C]	meritev 1 [N]	meritev 2 [N]	meritev 3 [N]	meritev 4 [N]	meritev 5 [N]	mediana	interkvartilno območje
220	7,75	8,85	9,10	7,40	7,25	7,75	1,65
225	8,25	8,25	8,20	8,45	9,25	8,25	0,63
230	7,75	8,60	9,00	9,35	8,30	8,60	1,15
235	7,80	8,45	8,85	8,65	8,65	8,65	0,63
240	9,30	8,25	8,15	7,65	8,60	8,25	1,05
245	7,35	7,50	7,00	7,90	7,40	7,40	0,53
250	6,95	7,30	6,80	8,75	6,60	6,95	1,33
255	7,60	8,10	7,70	8,40	7,45	7,70	0,73
260	7,35	6,50	8,40	8,50	7,90	7,90	1,53

Graf 1. Odvisnost sile preloma od temperature tiskanja materiala PETG.

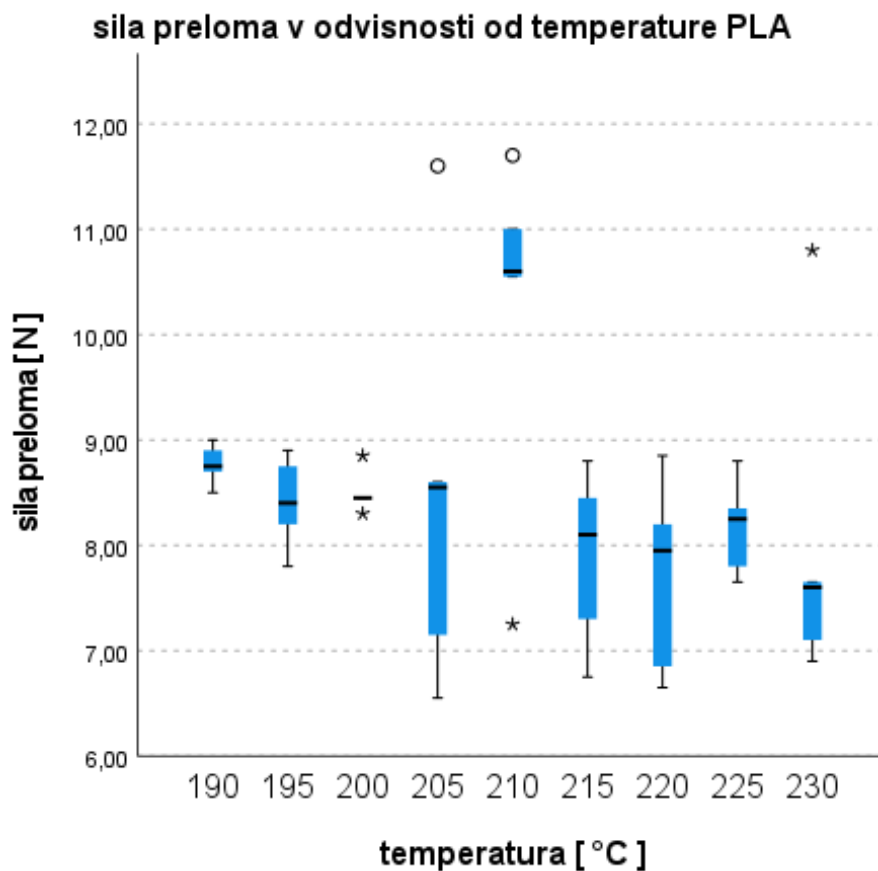


Pri materialu PLA nisem dokazal statistično pomembne razlike sile preloma pri različnih temperaturah tiskanja (Kruskal-Wallis $H = 12,837$; $p = 0,118$) (tabela 2 in graf 2).

Tabela 2. Meritve sile preloma pri materialu PLA. Z rdečo barvo je označena temperatura, pri kateri je prelomna sila največja.

temperatura [°C]	meritev 1 [N]	meritev 2 [N]	meritev 3 [N]	meritev 4 [N]	meritev 5 [N]	mediana	interkvartilno območje
190	8,75	8,50	9,00	8,70	8,90	8,75	0,35
195	7,80	8,40	8,75	8,20	8,90	8,40	0,83
200	8,30	8,45	8,85	8,45	8,45	8,45	0,28
205	7,15	6,55	8,55	8,60	11,60	8,55	3,25
210	10,60	11,00	11,70	7,25	10,55	10,60	2,45
215	8,80	6,75	8,45	8,10	7,30	8,10	1,60
220	8,20	6,65	6,85	7,95	8,85	7,95	1,78
225	8,25	7,65	8,80	7,80	8,35	8,25	8,50
230	7,10	10,80	7,65	7,60	6,90	7,60	2,23

Graf 2. Odvisnost sile preloma od temperature tiskanja materiala PLA

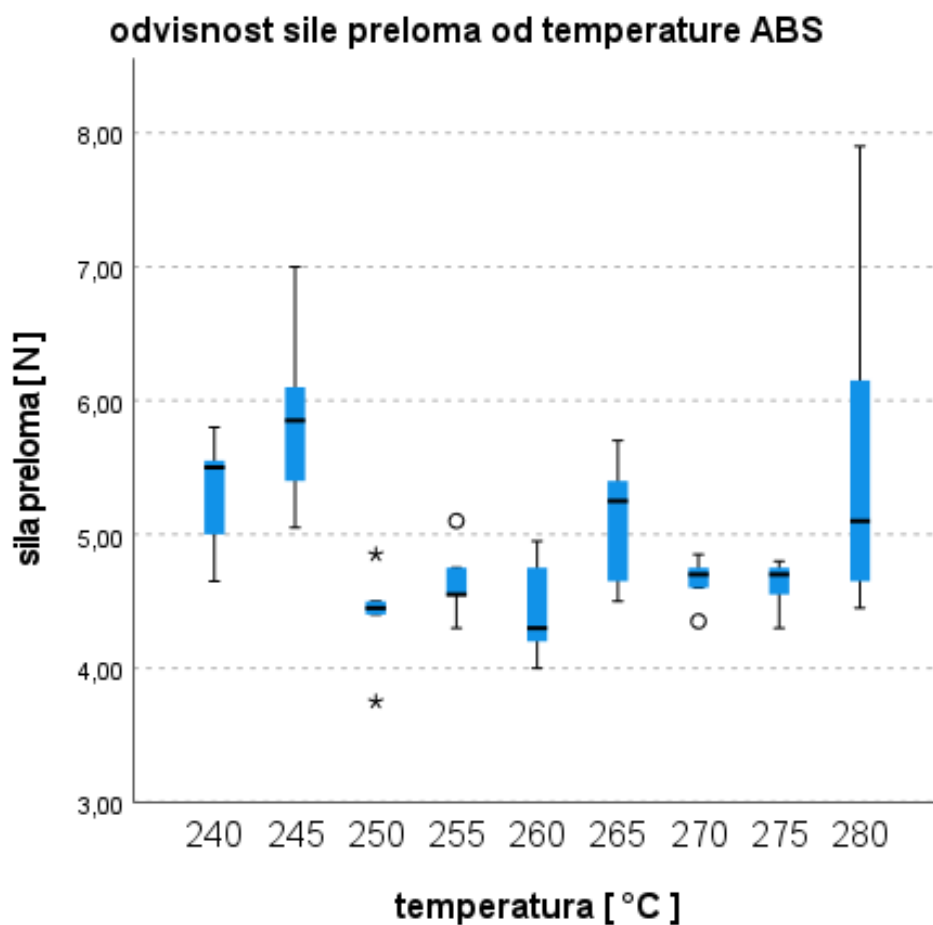


Temperatura tiskanja pri materialu ABS statistično pomembno vpliva na izmerjeno silo preloma (Kruskal-Wallis $H = 20,814$; $p = 0,008$) (tabela 3 in graf 3).

Tabela 3. Meritve sile preloma pri materialu ABS. Z rdečo barvo je označena temperatura, pri kateri je prelomna sila največja.

temperatura [°C]	meritev 1 [N]	meritev 2 [N]	meritev 3 [N]	meritev 4 [N]	meritev 5 [N]	mediana	interkvartilno območje
240	5,55	5,00	5,50	5,80	4,65	5,50	0,85
245	6,10	5,05	5,85	7,00	5,40	5,85	1,33
250	3,75	4,50	4,45	4,85	4,40	4,45	0,60
255	4,55	4,30	4,55	4,75	5,10	4,55	0,50
260	4,75	4,30	4,95	4,00	4,20	4,30	0,75
265	5,70	5,25	5,40	4,50	4,65	5,25	0,98
270	4,75	4,35	4,70	4,85	4,60	4,70	0,33
275	4,80	4,55	4,75	4,70	4,30	4,70	0,35
280	4,45	5,10	6,15	4,65	7,90	5,10	2,48

Graf 3. Odvisnost sile preloma od temperature ABS

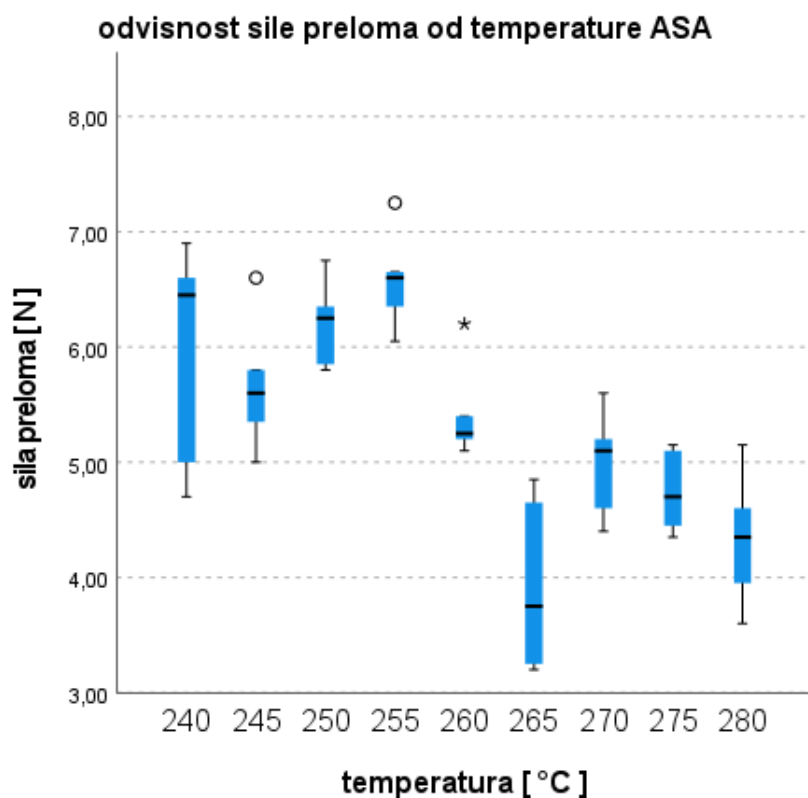


Temperatura tiskanja pri materialu ASA statistično pomembno vpliva na izmerjeno silo preloma (Kruskal-Wallis $H = 31,007$; $p = 0,000$) (tabela 4 in graf 4).

Tabela 4. Meritve sile preloma pri materialu ASA. Z rdečo barvo je označena temperatura, pri kateri je prelomna sila največja.

temperatura [°C]	meritev 1 [N]	meritev 2 [N]	meritev 3 [N]	meritev 4 [N]	meritev 5 [N]	mediana	interkvartilno območje
240	5,00	6,90	6,45	6,60	4,70	6,45	1,90
245	5,35	5,60	6,60	5,00	5,80	5,60	1,03
250	5,85	5,80	6,75	6,25	6,35	6,25	0,73
255	6,60	6,35	6,05	6,65	7,25	6,60	0,75
260	6,20	5,25	5,40	5,10	5,20	5,25	0,65
265	3,75	4,85	4,65	3,20	3,25	3,75	1,53
270	4,40	5,20	5,60	4,60	5,10	5,10	0,90
275	4,45	4,70	4,35	5,10	5,15	4,70	0,73
280	3,95	5,15	4,35	3,60	4,60	4,35	1,10

Graf 4. Odvisnost sile preloma od temperature ASA

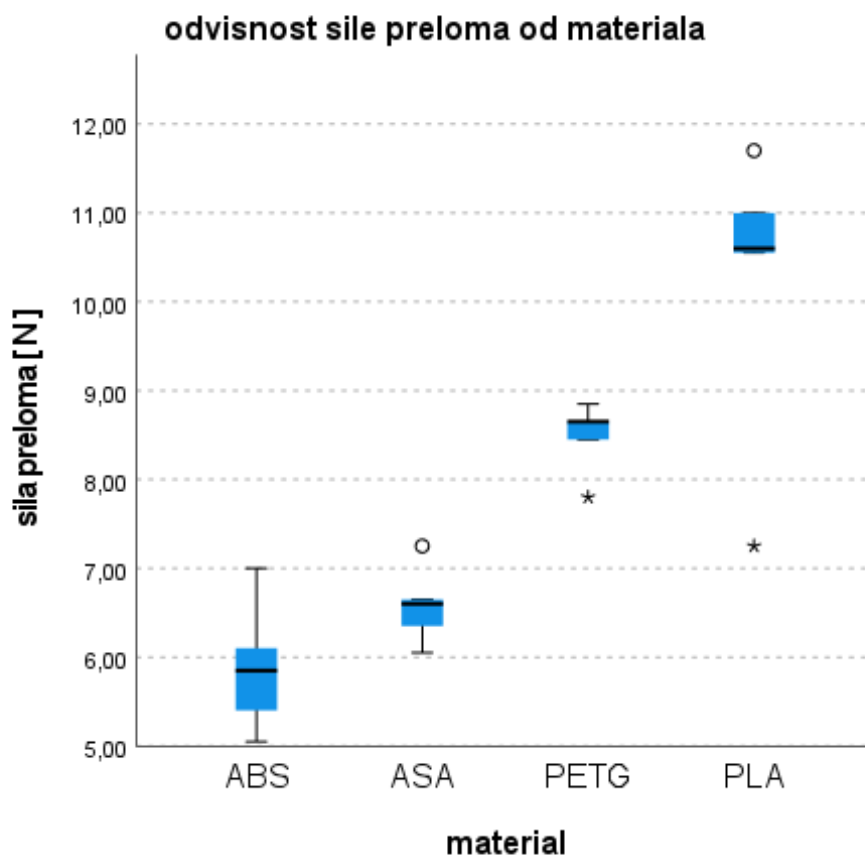


Primerjava največje prelomne sile med uporabljenimi materiali pokaže statistično pomembne razlike (Kruskal-Wallis $H = 15,312$; $p = 0,002$) (tabela 5 in graf 5).

Tabela 5. Primerjava optimalnih temperatur tiskanja in največje sile preloma pri različnih materialih.

material	temperatura [°C]	mediana sile preloma [N]
ABS	245	5,85
ASA	255	6,60
PETG	235	8,65
PLA	210	10,60

Graf 5. Odvisnost sil preloma od različnih materialov



Razprava

V raziskovalni nalogi sem preučeval trdnost standardiziranega predmeta natisnjenega iz različnih materialov pri različnih temperaturah. Ugotovil sem, da pri predmetih natisnjenih iz materialov PETG, ASA in ABS temperatura statistično pomembno vpliva na trdnost predmeta, ki jo izmerimo kot silo preloma. Pri materialu PLA pa te povezave nisem dokazal, tako da sem prvo delovno hipotezo (»Temperatura tiskanja vpliva na trdnost standardiziranega predmeta natisnjenega iz istega materiala«) delno potrdil. V nasprotju s pričakovanji pa trdnost ne narašča zvezno in tudi nima oblike zvona. Glede na postopek tiskanja sem namreč pričakoval, da bo višja temperatura tiskanja omogočila boljše sprijemanje plasti, kar bi se odražalo v večji sili preloma. Če pa bi graf odvisnosti sile preloma od temperature imel obliko zvona, bi pomenilo, da trdnost s temperaturo narašča zaradi boljšega sprijemanja plasti, v drugem delu pa trdnost upada, zaradi negativnega vpliva previsoke temperature na mehanske lastnosti materiala.

S primerjavo trdnosti predmetov natisnjenih iz različnih materialov pri različnih temperaturah sem drugo delovno hipotezo potrdil (»Standardizirani predmet natisnjen iz različnih materialov ima različno trdnost pri svoji optimalni temperaturi«). Največjo trdnost ima material PLA, najmanjšo pa ABS, kar ustreza tudi podatkom iz literature (10). Eden izmed razlogov za manjšo trdnost bi lahko bila manjša gostota materiala, saj ima ABS za približno 20 % manjšo gostoto. Pri izdelku iz ABS enake velikosti je zaradi tega 20 % več praznega prostora med molekulami. Drug možni vzrok za manjšo trdnost pa je krčenje pri ohlajanju predmeta iz ABS in ASA v primerjavi s PLA in PETG. Pri krčenju se sloji med seboj različno ohlajajo in zaradi tega pride do razdiranja molekulskih vezi med plastmi. Da bi se temu izognil, sem pri tiskanju uporabil ogrevano ploščo, predmet pa sem odstranil s plošče, ko se je ohladil na sobno temperaturo.

Iz izmerjene trdnosti različnih materialov in z upoštevanjem gostote lahko sklepamo o uporabi teh materialov v letalskem modelarstvu, kjer morajo biti materiali trdni in lahki. Najbolj trdna sta po ugotovitvah raziskovalne naloge PLA in PETG, ki pa imata večjo gostoto kot ABS in ASA. Zaradi tega priporočam uporabo ASA v jadralnih modelih letal, kjer je teža še posebej pomembna. Pri motornih modelih letal pa priporočam PLA, saj zaradi dodatne teže motorja in goriva prihaja do večjih sil med letom na krilih in trupu.

Raziskovalna naloga ima dve omejitvi, ki bi jih lahko v primeru razširitve naloge še izboljšal. Povečal bi število meritev pri posamezni temperaturi, s čimer bi izboljšal statistično natančnost. Pri izvajanju meritev bi namesto povečevanja sile silomera s človeško roko uporabil motorizirano napravo, ki bi silomer vlekla z bolj enakomerno in s točno določeno hitrostjo.

Zaključek

V raziskovalni nalogi sem potrdil, da temperatura tiskanja 3D-izdelka vpliva na trdnost pri materialih ABS, ASA in PETG, ne pa pri PLA.

Najtrdnjši je PLA, sledita mu PETG in ASA, ABS pa ima najmanjšo trdnost od preizkušenih materialov.

Trdnost in gostoto je še posebej potrebno upoštevati pri izbiri materiala za letalsko modelarstvo.

Zahvala

Iskreno se zahvaljujem svojim mentorjema, ki sta me vodila pri prvih korakih mojega raziskovalnega dela in mi posredovala svoje znanje in izkušnje.

Zahvaljujem se tudi svojemu očetu Tomažu Smrkolju za pomoč in nasvete pri meritvah in statistični analizi.

Literatura in viri

1. https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-material_3D_printing (12. 1. 2021)
2. https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing (12. 1. 2021)
3. <https://all3dp.com/3d-file-format-3d-files-3d-printer-3d-cad-vrml-stl-obj/> (12. 1. 2021)
4. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_3D_modeling_software (17. 1. 2021)
5. https://simple.wikipedia.org/wiki/Material_property (17. 1. 2021)
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid (17. 1. 2021)
7. <https://3dprinting.stackexchange.com/questions/3507/is-pla-filament-conductive/4821> (17. 1. 2021)
8. <https://blog.gotopac.com/2018/03/01/how-3d-printer-filament-storage-cabinets-instantly-improve-3d-print-part-quality/> (22. 1. 2021)
9. <https://www.bcn3d.com/pla-filament-stands-for-strength-temp/> (22. 1. 2021)
10. <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/> (17. 1. 2021)
11. <https://airwolf3d.com/2015/12/05/3d-printing-with-petg-tips-and-tricks/> (22. 1. 2021)
12. <https://www.polymershapes.com/product/petg/> (22. 1. 2021)
13. <https://www.matterhackers.com/news/how-to-succeed-when-printing-with-petg-filament> (23. 1. 2021)
14. <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/> (24. 1. 2021)
15. <https://all3dp.com/5-reasons-why-abs-needs-to-go-away/> (23. 1. 2021)
16. <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-plastic> (23. 1. 2021)
17. <https://www.retlawindustries.com/Info/ABSPlastic> (31. 1. 2021)
18. https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene (31. 1. 2021)
19. <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/> (31. 1. 2021)
20. https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_styrene_acrylate (27. 1. 2021)
21. <https://www.machinedesign.com/materials/plastics-and-composites/article/21812681/asa> (27. 1. 2021)
22. <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/> (23. 1. 2021)