

Ispitivanje utjecaja parametara FDM aditivnog postupka na mehanička svojstva bio-razgradivog PLA polimera

Kolenko, Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:604901>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-03**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN



DIPLOMSKI RAD br. 071/STR/2022

ISPITIVANJE UTJECAJA PARAMETARA FDM
ADITIVNOG POSTUPKA NA MEHANIČKA
SVOJSTVA BIO-RAZGRADIVOG PLA
POLIMERA

Marija Kolenko

Varaždin, listopad 2022.

SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN

Studij Strojарstva



DIPLOMSKI RAD br. 071/STR/2022

**ISPITIVANJE UTJECAJA PARAMETARA FDM
ADITIVNOG POSTUPKA NA MEHANIČKA
SVOJSTVA BIO-RAZGRADIVOG PLA
POLIMERA**

Student:

Marija Kolenko 1379/336D

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić

Varaždin, listopad 2022.

SAŽETAK

U ovom radu ispitan je utjecaj parametara FDM postupka (temperatura komore, temperatura mlaznice i debljina sloja) na mehanička svojstva statičkog vlačnog ispitivanja 3D tiskanih PLA uzoraka koji su obrađeni i ispitani prema normama HRN EN ISO 527-1:2012 i HRN EN ISO 527-2:2012 za polimerne materijale. U teorijskom dijelu je opisano što je aditivna proizvodnja, koje tehnologije se koriste, prednosti i nedostaci aditivnih tehnologija te je detaljnije opisan FDM postupak i PLA materijal. U eksperimentalnom dijelu rada su izrađeni PLA uzorci FDM postupkom s različitim parametrima te je ispitan utjecaj parametara na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja.

Ključne riječi: aditivne tehnologije, PLA, FDM, statičko vlačno ispitivanje

ABSTRACT

This paper examines the influence of FDM parameters (chamber temperature, nozzle temperature and layer thickness) on mechanical properties of static tensile testing of 3D printed PLA samples processed and tested according to norms HRN EN ISO 527-1:2012 and HRN EN ISO 527-2:2012 for polymer materials. The theoretical part describes what additive manufacturing is, which technologies are used, advantages and disadvantages of additive technologies and it describes FDM process and PLA material in more detail. In the experimental part of the paper PLA samples were prepared with FDM procedure with different parameters and the influence of parameters on the results of the static tensile test were examined.

Keywords: additive technologies, PLA, FDM, static tensile test

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

| | | | |
|-----------------------------|--|---------|-----------------------------|
| ODJEL | Odjel za strojarstvo | | |
| STUDIJ | diplomski sveučilišni studij Strojstvo | | |
| PRISTUPNIK | Marija Kolenko | JMBAG | 1379/336D |
| DATUM | 13.9.2022. | KOLEGIJ | Novi inženjerski materijali |
| NASLOV RADA | Ispitivanje utjecaja parametara FDM aditivnog postupka na mehanička svojstva bio-razgradivog PLA polimera | | |
| NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU | Determination of the influence of the FDM additive process parameters on the mechanical properties of the biodegradable PLA polymer | | |
| MENTOR | dr.sc. Sanja Šolić | ZVANJE | izvanredna profesorica |
| ČLANOVI POVJERENSTVA | 1. doc.dr.sc. Matija Bušić, član, predsjednik 2. izv.prof.dr.sc. Sanja Šolić, mentor, član 3. doc.dr.sc. Tanja Tomić, član 4. doc.dr.sc. Jasna Leder Horina, zamjenski član 5. | | |

Zadatak diplomskog rada

| | |
|------|--|
| BROJ | 071/STR/2022 |
| OPIS | <p>U diplomskom radu potrebno je navesti i opisati postupke aditivne tehnologije proizvodnje, njihov sve veći značaj u modernoj industrijskoj primjeni te njihove specifičnosti, prednosti i nedostatke u odnosu na konvencionalne tehnologije. U teorijskom dijelu rada detaljnije je potrebno opisati glavne karakteristike aditivnog postupka taložnog sraščivanja ili FDM (Fused Deposition Modelling) postupka uz navođenje materijala koji se mogu obrađivati ovim postupkom, industrijskih grana gdje se takvi proizvodi najviše koriste. Također je potrebno definirati najvažnije parametre izrade proizvoda FDM postupkom uz objašnjenje utjecaja pojedinog parametra na svojstva izratka. Potrebno je također detaljnije opisati polilaktičnu kiselinu tj. biorazgradivi PLA polimer koji ima sve širu tehnološku primjenu kao tehnički materijal kako samostalno tako i u obliku kompozita. U eksperimentalnom dijelu rada na FDM uređaju potrebno je izraditi ispitne uzorke za statičko vlačno ispitivanje prema normama EN ISO 527-1:2012 i EN ISO 527-2:2012. Ispitne uzorke je potrebno napraviti prema centralno kompozitnom planu pokusa, a parametri koje je potrebno varirati su temperatura komore, temperatura polimera na izlazu iz mlaznice te debljina sloja. Dobivene rezultate potrebno je analizirati i donijeti zaključak.</p> |

ZADATAK URUČEN

POTPIS MENTORA

Sveučilište
Sjever

IZJAVU
AUTORSTVA



SVUČILIŠTE
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, MARIJA KOLENKO (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom ISPITIVANJE UTJECAJA PARAMETARA FDM ADITIVNOG POSTUPKA NA MEHANIČKA SVOJSTVA BIO-RAZGRADIVOG PLA POLIMERA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

Marija Kolenko
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišne knjižnice te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, MARIJA KOLENKO (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom ISPITIVANJE UTJECAJA PARAMETARA FDM ADITIVNOG POSTUPKA NA MEHANIČKA SVOJSTVA BIO-RAZGRADIVOG PLA POLIMERA (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

Marija Kolenko
(vlastoručni potpis)

ZAHVALA

Zahvaljujem mentorici, izv. prof. dr. sc. Sanji Šolić, na pomoći i savjetima tijekom izrade ovoga diplomskog rada i kolegi Marku Zajecu iz tvrtke Izit d.o.o. na izradi uzoraka za ispitivanje i pomoći te svima ostalima koji su doprinijeli izradi ovoga diplomskog rada.

POPIS OZNAKA

| <i>Oznaka</i> | <i>Opis</i> |
|---------------|----------------------------------|
| SAD | Sjedinjene Američke Države |
| MIT | Institut u Massachusetsu |
| ABS | Akrlonitril butadien stiren |
| PA | Poliamid |
| PC | Polikarbonat |
| PMMA | Poli(metilmetakrilat) |
| PVC | Poli(vinil-klorid) |
| PUR | Poliuretan |
| FDM | Postupak taložnog sraščivanja |
| PLA | Polilaktička kiselina |
| AM | Aditivna proizvodnja |
| SLS | Selektivno lasersko sinteriranje |
| UV | Ultraljubičasto zračenje |
| SLA | Stereolitografija |
| PMAA | Poli(metil-metakrilat) |
| PE-HD | Polietilen visoke gustoće |
| EP | Epoksidni polimer |
| EBM | Taljenje elektronskim snopom |
| SLM | Selektivno lasersko taljenje |
| PS | Polistiren |
| PP | Polipropilen |

| | |
|-----|-------------------------|
| PE | Polietilen |
| PHA | Polihidroksialkanoat |
| PET | Poli(etilen-tereftalat) |
| RSM | Metoda odzivne površine |

Sadržaj

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. ADITIVNA PROIZVODNJA..... | 2 |
| 3. ADITIVNE TEHNOLOGIJE..... | 6 |
| 3.1. Selektivno lasersko sinteriranje (SLS)..... | 6 |
| 3.2. Polyjet postupak..... | 8 |
| 3.3. Stereolitografija (SLA) | 10 |
| 3.4. Taljenje elektronskim snopom (EBM postupak) | 11 |
| 3.5. Selektivno lasersko taljenje (SLM) | 13 |
| 3.6. Postupak taložnog sraščivanja (FDM)..... | 15 |
| 4. PREDNOSTI I OGRANIČENJA ADITIVNE PROIZVODNJE | 20 |
| 5. PRIMJENA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA..... | 21 |
| 6. Polilaktička kiselina (PLA)..... | 23 |
| 6.1. Primjena PLA | 26 |
| 8. EKSPERIMENTALNI DIO..... | 30 |
| 8.1. Plan pokusa | 30 |
| 8.2. Izrada uzoraka | 33 |
| 8.3. Statičko vlačno ispitivanje | 45 |
| 8.4. Rezultati i diskusija..... | 49 |
| 9. ZAKLJUČAK..... | 58 |
| 10. LITERATURA | 59 |
| 11. POPIS SLIKA | 63 |
| 12. POPIS TABLICA | 65 |
| 13. PRILOZI | 66 |

1. UVOD

Aditivna proizvodnja je pojam koji se koristi za industrijsku proizvodnju te se odnosi na postupak izrade proizvoda dodavanjem sloj po sloj. Ovi proizvodi izrađuju se iz digitalne datoteke 3D ispisom uzastopnim nanošenjem materijala dok fizički proizvod nije dovršeni. Svaki nanese sloj je rezani presjek stvarnoga proizvoda.

Prvi 3D uređaj koji je koristio tehniku stereolitografije, kreirao je Charles W. Hull sredinom 1980-ih. On je izumitelj stereolitografije, prve komercijalne tehnologije brze izrade prototipa poznate kao 3D ispis. Pojam stereolitografije je razvijen u tvrtki 3D Systems u SAD-u. Hull je ujedno suosnivač tvrtke 3D System Corporation koja je danas jedna od najvećih organizacija koja se bavi 3D ispisom. [1] Postupak trodimenzionalnog ispisa razvijen je 1989. na sveučilištu MIT u Cambridge-u. Prve primjene ovih tehnologija bile su u istraživačkim i razvojnim laboratorijima te alatnicama no danas je primjena sve šira.

Materijali koji se upotrebljavaju kod aditivnih tehnologija mogu biti u krutom, tekućem ili praškastom stanju. Najčešće se upotrebljavaju polimerni materijali kao akrilonitril/butadien/stiren (ABS), poliamidi (PA), polikarbonat (PC), poli(metil-metakrilat) (PMMA), poli(vinil-klorid) (PVC), poliuretani (PUR), epoksidne smole, ali i kompozitni materijali, keramika, čelik, aluminij, titanij i druge legure lakih metala. [2] Međutim, kako tehnologija napreduje, tako se povećava raspon materijala. Aditivne tehnologije se koriste u svemirskoj industriji, arhitekturi, medicini, metalurgiji, automobilskoj industriji itd.

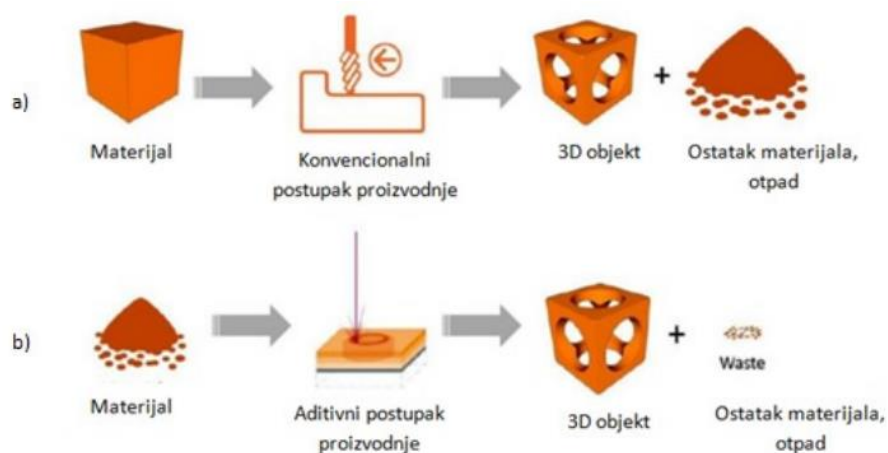
Postupak taložnog sraščivanja (eng. Fused Deposition Modeling, FDM) jedan je od najviše korištenih postupaka komercijalne tehnologije 3D ispisa danas. [3] Korištenjem biorazgradivog polimera kao što je polilaktična kiselina (PLA) može se odgovoriti na krajnju potrebu za zamjenom materijala koji nisu biorazgradivi ekološkim materijalima.

Cilj ovoga diplomskog rada je objasniti što je aditivna proizvodnja, koje aditivne tehnologije se koriste, koje su prednosti i nedostaci, detaljnije opisati FDM postupak i PLA materijal te u eksperimentalnom dijelu ispitati da li i u kojoj mjeri parametri FDM postupka utječu na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja PLA uzoraka.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja (eng. Additive Manufacturing, AM) obuhvaća skup tehnologija kojima se iz CAD modela izrađuju predmeti dodavanjem materijala sloj po sloj, nasuprot klasičnim tehnologijama proizvodnje gdje se koristi alat za rezanje za postizanje konačnog rezultata. [4] Na taj način se omogućuje proizvodnja geometrijski vrlo zahtjevnih proizvoda koji bi se vrlo teško ili gotovo nemoguće proizveli klasičnim postupcima po prihvatljivoj cijeni. Slika 1 prikazuje tijek konvencionalnih i aditivnih postupaka proizvodnje.

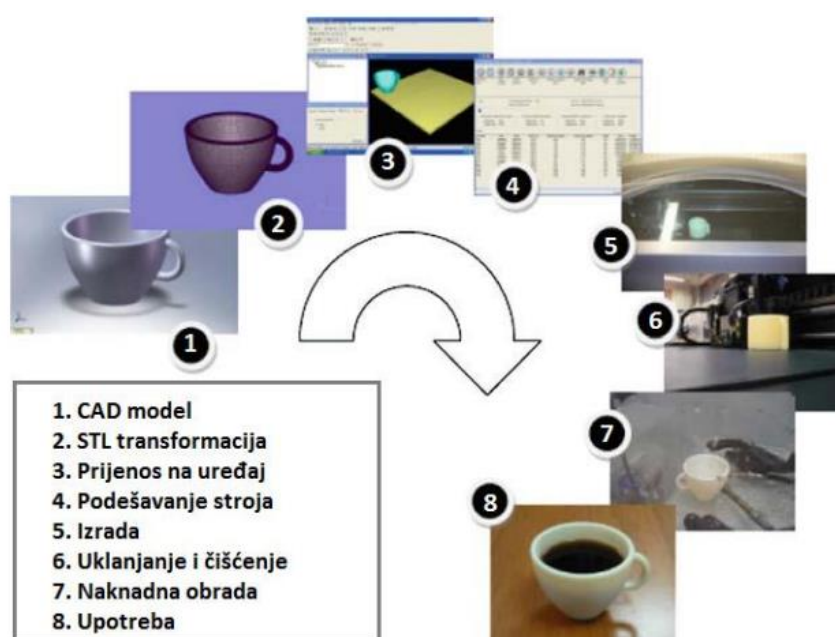
Postoje sve veći zahtjevi tržišta u pogledu cijene, svojstava materijala, kvalitete te brzine izrade dijelova koje aditivna proizvodnja sve lakše savladava. Mehanička svojstva konačnog proizvoda ovise o parametrima 3D ispisa kao što su brzina tiskanja, orijentacija, temperatura mlaznice, gustoća ispune, visina sloja itd.



Slika 1. Tijek konvencionalnih (a) i aditivnih (b) postupaka proizvodnje [5]

Slika 2 prikazuje faze izrade proizvoda aditivnom proizvodnjom. Načelo aditivne proizvodnje tvorevina uvijek je isto, neovisno kojim postupkom ga izvodili, a može se podijeliti u sljedeće faze izrade: [6]

1. izrada CAD modela
2. pretvaranje CAD modela u STL datoteku
3. prebacivanje STL datoteke na stroj za aditivnu proizvodnju
4. podešavanje parametara uređaja
5. izrada prototipa
6. vađenje prototipa
7. naknadna obrada, ako je potrebna
8. primjena.

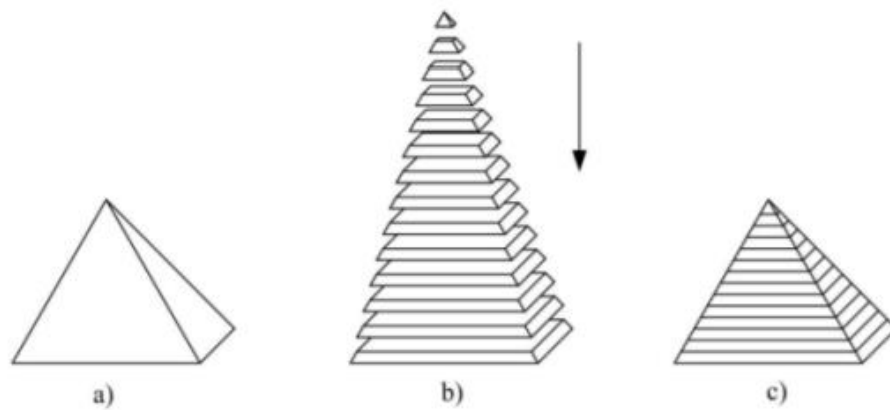


Slika 2. Faze izrade AM postupcima [7]

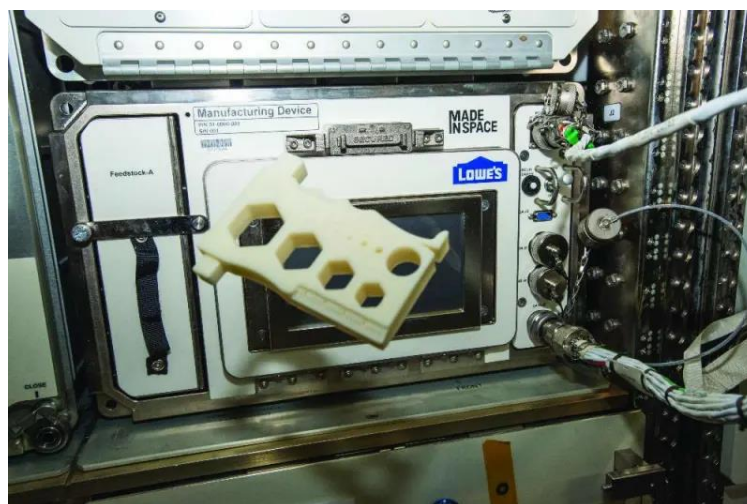
Aditivne tehnologije pri izradi 3D modela koriste STL (eng. Standard Triangulation Language) format datoteke koji je dobio ime na temelju postupka stereolitografije te prikazuje mrežu povezanih malih trokuta koji se koriste kako bi se što bolje opisala površina nekog objekta.

S obzirom na to da STL datoteka ne prikazuje npr. boju ni teksturu 3D modela, 2009. godine uvedena je AMF datoteka (eng. Additive Manufacturing File) koja uz STL postaje standard za AM postupke te čini temelj za rezanje modela u slojeve. Nakon što je dobivena STL datoteka, ubacuje se u „slicer“ program koji reže 3D model na slojeve koji će se koristiti za izradu 3D proizvoda.

Slika 3 prikazuje primjer postupka izrade proizvoda dodavanjem sloj po sloj. Jedna od prednosti ovakvoga načina izrade je izrada oblika koje bi klasičnim postupcima bilo nemoguće izraditi. Slika 4 prikazuje primjer 3D tiskanog proizvoda izrađenog na Međunarodnoj svemirskoj stanici.

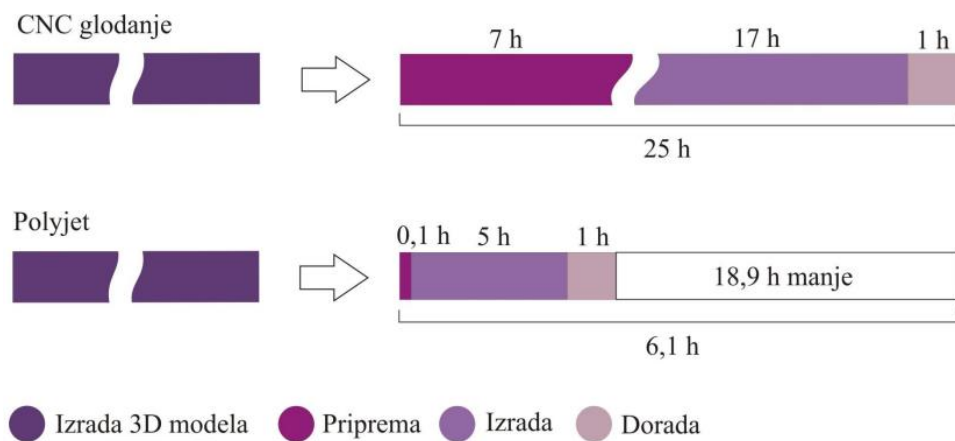


Slika 3. Slojevita izrada/proizvodnja [8]



Slika 4. 3D tiskani proizvod na Međunarodnoj svemirskoj stanici [9]

Slika 5 prikazuje usporedbu točnosti i troškova između konvencionalnih postupaka i aditivnih u ovisnosti o kompleksnosti izrade tvorevine.

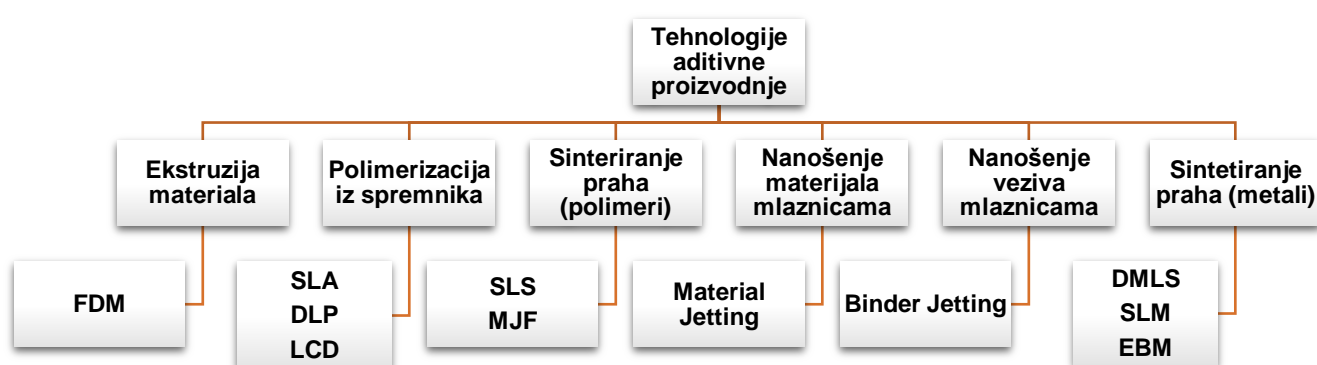


Slika 5. Usporedba vremena izrade tvorevine između CNC glodanja i Polyjet postupka [10]

3. ADITIVNE TEHNOLOGIJE

Postupke aditivne proizvodnje možemo podijeliti na one koji upotrebljavaju materijal u čvrstom stanju (npr. žica, folija ili papir), kapljevину i prah. U tablici 1 je prikazana podjela aditivnih tehnologija.

Tablica 1. Podjela aditivnih postupaka [11]

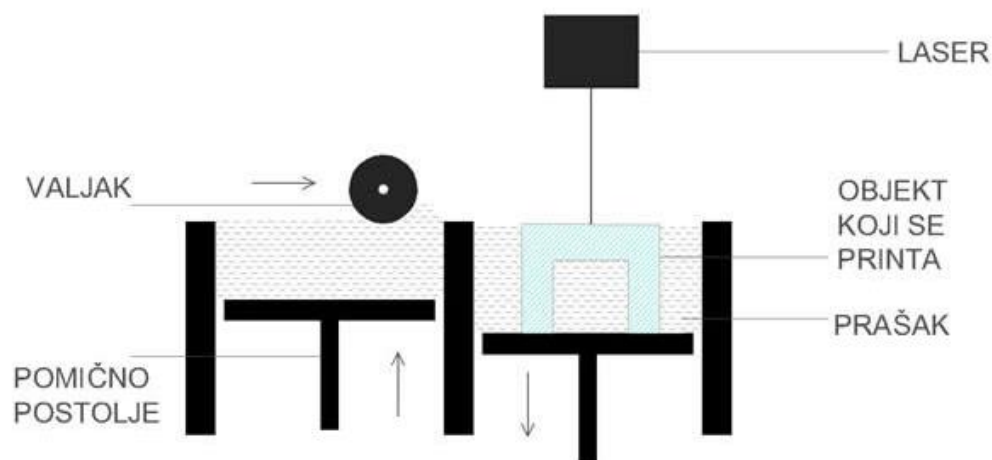


3.1. Selektivno lasersko sinteriranje (SLS)

Kod postupka selektivnog laserskog sinteriranja (eng. Selective Laser Sintering, SLS) izvor topline daje CO₂ laser kojim se čestice materijala ugrijavaju na temperaturu ispod temperature tališta pri čemu djelovanjem visoke temperature lasera dolazi do srašćivanja tj. sinteriranja zagrijanih čestica materijala te njihovim spajanjem dolazi do stvaranja proizvoda sloj po sloj. Višak materijala služi kao potporna struktura za iduće slojeve stoga nije potrebno graditi potpurnu strukturu.

Ovaj postupak započinje zagrijavanjem spremnika s praškastim materijalom te kada prah dosegne određenu temperaturu započinje nanošenje prvog sloja praha te započinje proces srašćivanja pomoću CO₂ lasera. Nakon generiranja početnog sloja

izratka, podloga s izratkom spušta se za debljinu idućeg sloja, a istodobno se podiže podloga u spremniku s praškastim materijalom. [8] Valjkom za izravnavanje nanosi se novi sloj materijala i proces se ponavlja do konačne izrade modela. Neki od glavnih dijelova SLS uređaja osim lasera su radna podloga na kojoj nastaje izradak, spremnik za praškasti materijal, zrcalo koje služi za usmjeravanje laserske zrake te valjak za izravnavanje. Slika 6 prikazuje dijelove SLS uređaja.



Slika 6. Dijelovi SLS uređaja [12]

Materijali koji se prerađuju ovim postupkom su keramike, metalni prahovi, polimerni materijali (PA, PVC, nylon) itd. Pri izradi metalnih predmeta se koriste metalni prahovi s polimernim i metalnim vezivima te jednokomponentni prahovi za koje se ne trebaju koristiti veziva. Kada se koriste materijali s vezivima, vezivo se odstranjuje kod naknadne obrade pri čemu se dobivaju porozni proizvodi pa se gustoća povećava dodatnom naknadom obradom.

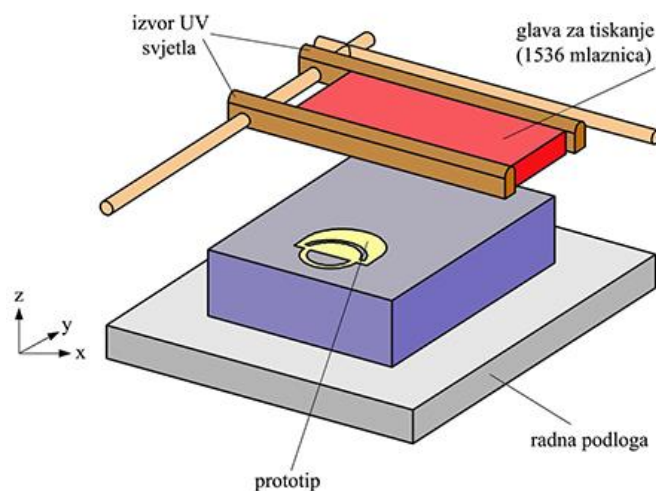
SLS tehnologija se upotrebljava u granama industrije gdje su potrebni vizualni prototipovi, funkcionalni dijelovi te kalupi za lijevanje. U tablici 2 su prikazane prednosti i nedostaci SLS postupka. SLS je održiva alternativa injekcijskom prešanju za male serije zbog svoje prilagodljivosti, ne zahtjeva izradu složenih kalupa čime značajno smanjuje cijenu polimernih proizvoda u malim serijama.

Tablica 2. Prednosti i nedostaci SLS postupka [8]

| PREDNOSTI | NEDOSTACI |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">• primjena većeg broja materijala• relativno brz postupak• višak praha podupire proizvod• neiskorišteni materijal se može koristiti za druge proizvode | <ul style="list-style-type: none">• loša kvaliteta površine proizvoda• u procesu očvršćivanja površine mogućnost očvršćivanja neiskorištenog praha• pri upotrebi određenih materijala potrebna je zaštitna atmosfera (otrovni plinovi kod npr. PVC-a) |

3.2. Polyjet postupak

Polyjet je postupak aditivne tehnologije koji funkcionira na način da se polimerni materijal nanosi na radnu podlogu kroz mrežu mlaznica. Svaki sloj fotoosjetljivog polimera očvršćuje pod djelovanjem UV svjetlosti odmah nakon nanošenja, tvoreći potpuno umreženu tvorevinu bez potrebe naknadnog umrežavanja. [13] Nakon završenog prvog sloja, radna podloga spušta se za debljinu sljedećeg sloja i glava za tiskanje započinje izradu sljedećeg sloja. [13] Nakon izrade proizvoda uklanja se potporna struktura (u obliku gela) vodom pri tlaku od 40 bara ili ručno. [13] Slika 7 prikazuje dijelove uređaja za ovaj postupak.



Slika 7. Polyjet postupak [14]

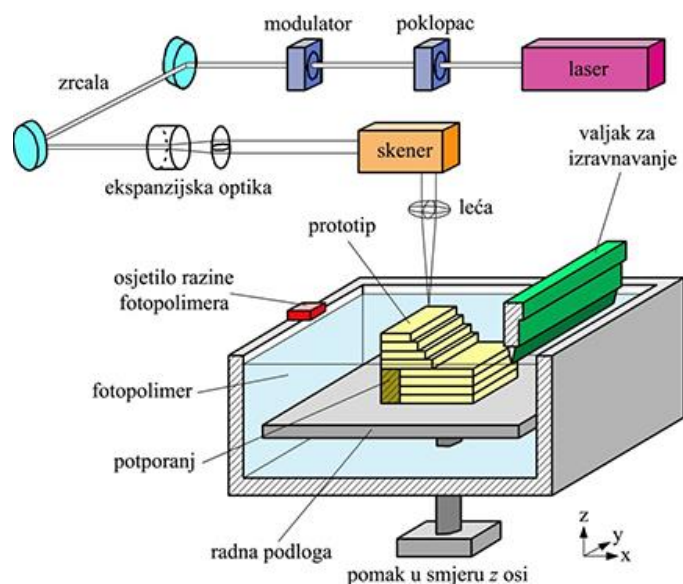
Najčešće se koriste FullCure fotopolimerni akrilni materijali. Ovaj postupak omogućava izradu preciznih detalja te složene geometrije te se primjenjuje u različitim granama industrije. Ima veliku važnost pri proizvodnji specijalizirane opreme, dekorativnih elemenata te medicinskih pomagala. U tablici 3 su prikazane prednosti i nedostaci ovoga postupka.

Tablica 3. Prednosti i nedostaci Polyjet postupka [8]

| PREDNOSTI | NEDOSTACI |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • dobra kvalitete površine proizvoda • postojanost dimenzija • modeli mogu biti od kombiniranih materijala | <ul style="list-style-type: none"> • potreba za potpornom konstrukcijom • potrebna peć za otapanje potporne konstrukcije |

3.3. Stereolitografija (SLA)

Postupak stereolitografije (eng. Stereolithography, SLA) se temelji na korištenju različitih vrsta fotopolimera u tekućem stanju osjetljivih na ultraljubičasto zračenje. Polimeri u tekućem stanju se skrućuju u slojeve pomoću izvora UV zračenja ili snopa elektrona, a na kraju sloja se praznine popune potpornim materijalom. Kada se završi sloj, platforma koja se nalazi u posudi s polimerom se pomiče prema dolje te uranja u tekući polimer. Kroz posudu s fotopolimerom prolazi oštrica koja poravnava prethodno završeni sloj te se postupak ponavlja do završetka procesa. Ovaj postupak se koristi za brzu izradu prototipa te izradu 3D dijelova složenih oblika i geometrije. Slika 8 prikazuje dijelove SLA uređaja.



Slika 8. Dijelovi SLA uređaja [14]

Osnovni dijelovi SLA uređaja su laser i njegova optička oprema, posuda s fotopolimerom, zrcalo koje je potrebno za usmjeravanje zraka te pokretna podloga koja se može kretati u smjeru okomite osi. U tablici 4 su prikazane prednosti i nedostaci SLA postupka.

Tablica 4. Prednosti i nedostaci SLA postupka [8]

| PREDNOSTI | NEDOSTACI |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • mogućnost rada 24 h dnevno • visoka razlučivost • izrada višebojnih proizvoda • nema geometrijskih ograničenja • potpuno automatiziran proces | <ul style="list-style-type: none"> • potreba za potpornom strukturom • potrebna naknadna obrada proizvoda • deformacije polimera pri očvršćivanju • razvijaju se otrovni plinovi • ograničenje materijala samo na fotopolimere • ograničena primjena proizvoda |

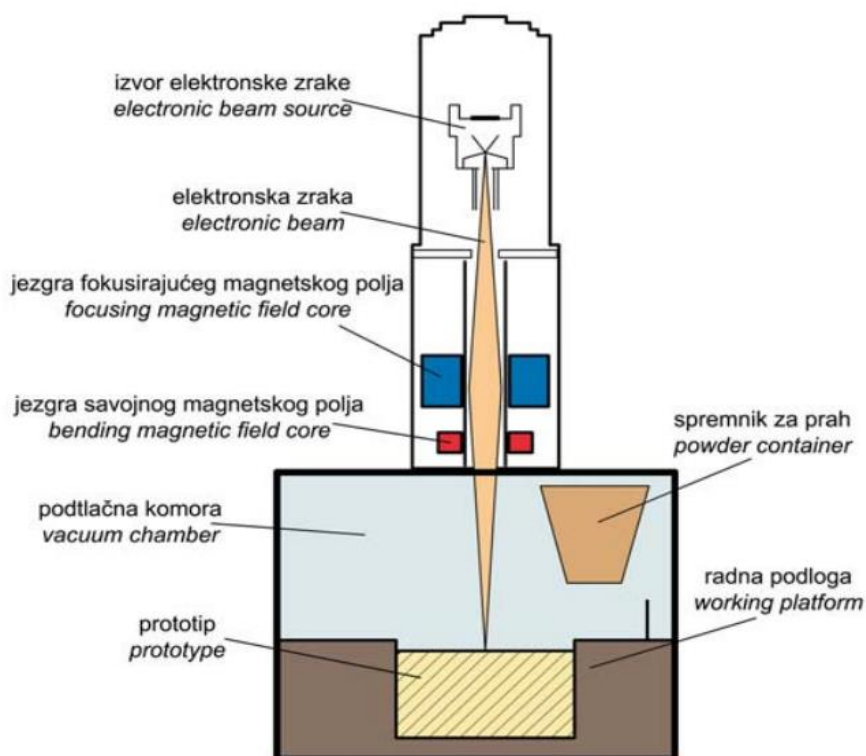
Materijali koji se koriste su uglavnom fotopolimeri kao npr. fotoosjetljiva polimerna smola, akrilne i epoksidne smole (PMMA, PE-HD, EP) te keramika. Primjenjuje se u industrijama gdje su potrebni modeli za testiranje oblika i pozicioniranje, za brzu izradu alata, izradu kalupa te ima važnu ulogu u medicini i dentalnoj industriji.

3.4. Taljenje elektronskim snopom (EBM postupak)

Taljenje elektronskim snopom (eng. Electron beam additive manufacturing/melting, EBM) je postupak koji kao izvor toplinske energije koristi elektronski snop. Zbog visoke temperature postupka proces se odvija u vakuumu gdje nema kemijskih reakcija materijala s kisikom. Pri visokoj temperaturi, materijal se tali i staljuje što omogućava teorijske gustoće materijala, a time i odlična mehanička svojstva izradaka. EBM postupkom se izradak gradi sloj po sloj taljenjem sloja metalnog praha s pomoću snopa elektrona. [14] Nema potrebe za naknadnom

obradom jer je snop elektrona vrlo precizan i moguće je izradak izraditi u konačnim dimenzijama.

EBM postupak zbiva se u podtlačnoj komori. Snop elektrona proizvodi se u katodnoj cijevi koja se učvršćuje u komori. Snopu elektrona omogućuje se savijanje kako bi došao do svakog dijela komore. Zatim se emitiraju elektroni koji u električnom polju ubrzavaju na polovicu brzine svjetlosti, a snopom elektrona se upravlja pomoću dva magnetska polja. Prvo polje djeluje kao magnetska leća pomoću kojega se snop elektrona fokusira te se time postiže željeni promjer snopa. Drugo polje služi za usmjeravanje snopa na željeno mjesto u komori. [14] Pri sudaru elektrona s metalnim prahom, kinetička se energija sudara pretvara u toplinsku koja lokalno tali metalni prah. [14] Metalni predmet izrađen EBM tehnologijom ima mnogo bolja svojstva od predmeta dobivenog lijevanim metalom. [14] Slika 9 prikazuje dijelove EBM uređaja.



Slika 9. Postupak EBM [14]

Moguće je koristiti metalne žice kao topivi materijal kao u FDM tehnologiji pri čemu se materijal i dalje otapa elektronskim snopom, a postupak se i dalje odvija u vakuumu. Pri odabiru materijala, važno je napomenuti da materijal mora imati

električna vodljiva svojstva jer inače elektronski snop ne može zagrijati i rastopiti materijal zbog nedostataka električnog naboja. Zbog toga se ne koriste keramika i polimeri. Najviše se koriste titanove legure, pogotovo u medicini te krom-kobalt legure. Cijene praha su visoke te je samim time skupa cijena proizvodnje ovom tehnologijom. U tablici 5 su prikazane prednosti i nedostaci ovoga postupka.

Tablica 5. Prednosti i nedostaci EBM postupka [8]

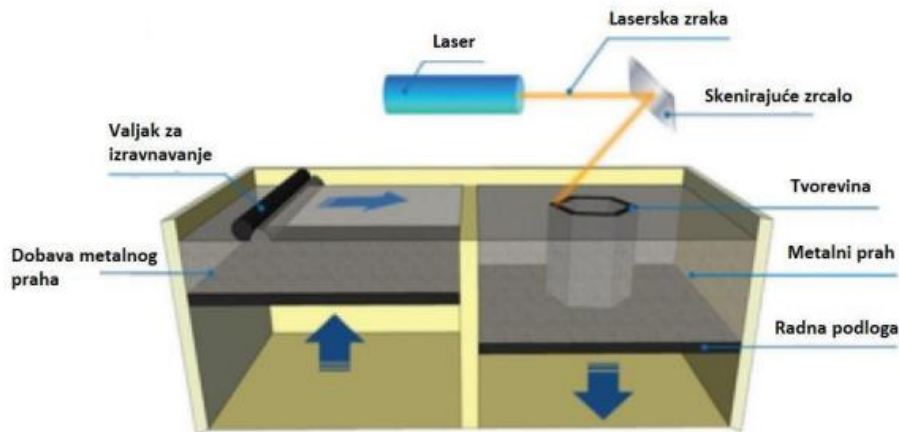
| PREDNOSTI | NEDOSTACI |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • u malom snopu visoka razina energije • izostajanje oksida i nitrida na površini proizvoda/izrada proizvoda u podtlaku • vrlo dobra mehanička svojstva • niski troškovi instaliranja i održavanja • visoka brzina izrade | <ul style="list-style-type: none"> • visoka podtlačna atmosfera + zahtjev prisustva dodanog uređaja • prisutno gama zračenja • korištenje samo materijala koji su vodiči električne energije |

EBM tehnologija se najviše primjenjuje u medicinskoj i dentalnoj industriji, kod izrade turbinskih propelera te u avionskoj i raketnoj industriji. Prednosti su brzina izrade, mogućnost izvođenja kompliciranih geometrija, jako dobra mehanička svojstva dok su nedostaci ograničenja u veličini, cijena uređaja i materijala te manja preciznost od SLM tehnologije.

3.5. Selektivno lasersko taljenje (SLM)

Selektivno lasersko taljenje (eng. Selective Laser Melting, SLM) je postupak aditivne proizvodnje gdje se koristi laser visokog intenziteta koji tali te spaja čestice metalnog praha sloj po sloj prema računalnom programu. Ovaj postupak služi za

produkciju prototipa, alata te funkcionalnih dijelova pri čemu je moguće proizvesti geometrijski vrlo zahtjevne dijelove čija su mehanička svojstva usporediva s konvencionalno proizvedenim postupcima. U ovom postupku se najčešće koriste metalni prahovi titanijskih i aluminijskih legura, niklovi superlegura, a mogu se koristiti i prahovi čelika. Slika 10 prikazuje dijelove SLM uređaja.



Slika 10. Prikaz SLM postupka proizvodnje [15]

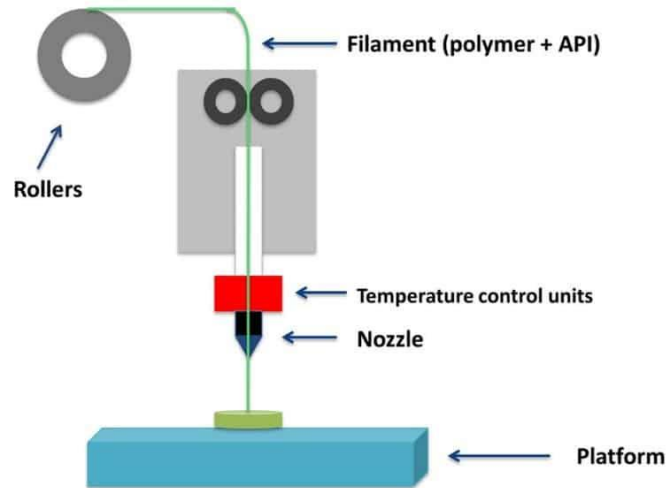
Ovaj postupak počinje pripremom na računalu, a zatim se radna komora ispuni inertnim plinom, većinom dušikom ili argonom kako bi se spriječila oksidacija taline. Zatim se u tankom sloju nanosi metalni prah, a preko toga sloja prelazi laserska zraka koja skenira i tali odabrane regije metalnog praha. Nakon što se talina skruti, spušta se radna podloga te se na nju nanosi novi sloj metalnog praha i tako se postupak ponavlja za sve sljedeće slojeve metalnog praha do kad se proizvod ne izgradi. Nakon završetka postupka proizvod se okružuje nerastaljenim metalnim prahom koji se uklanja nakon što temperatura u komori dosegne sobnu temperaturu. Gotov proizvod se, ukoliko je potrebno, dodatno toplinski obrađuje. U tablici 6 su prikazane prednosti i nedostaci SLM postupka.

Tablica 6. Prednosti i nedostaci SLM postupka proizvodnje [8]

| PREDNOSTI | NEDOSTACI |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">• brzina izrade• izrada dijelova kompleksnih površina• visoka točnost• široki raspon upotrebe | <ul style="list-style-type: none">• cijena uređaja i materijala• gruba površina• potrebna naknadna obrada• manja točnost izmjera proizvoda u usporedbi sa SLS postupcima |

3.6. Postupak taložnog srašćivanja (FDM)

Postupak taložnog srašćivanja je razvila tvrtka Stratasys, a temelji se na postupku izrade sloj po sloj pri čemu se najčešće koristi rastaljeni polimerni materijal. Ovi uređaji funkcioniraju na načelima troosnog obradnog centra. Pri izradi kompleksnije geometrije potrebno je koristiti potpurnu strukturu. Kvaliteta površine se uspoređuje sa SLS postupcima s time da su proizvodi više porozniji. Slika 11 prikazuje dijelove FDM uređaja.



Slika 11. Dijelovi FDM uređaja [16]

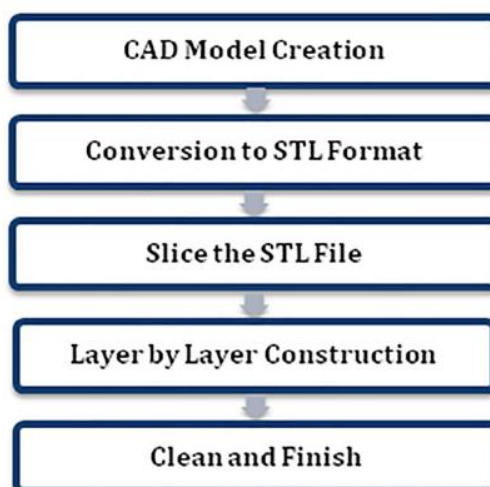
Ovaj postupak počinje tako da polimerni materijal u obliku žice prolazi kroz mlaznicu koja se grije kako bi dosegla temperaturu tališta materijala te se može kretati u horizontalnim i vertikalnim smjerovima. Putanju mlaznice kontrolira programski sustav za upravljanje. 3D uređaj putanju određuje u odnosu na prethodno učitani 3D model koji se želi izraditi. Proizvod se izrađuje postepenim ekstrudiranjem polimernog materijala sloj po sloj. Prilikom doticaja s podlogom ili prethodno izrađenim slojem, pri pomicanju mlaznice materijal se gotovo trenutačno skrućuje. [17] Talina ne može zadržati svoj oblik ako se materijal presporo skrućuje. [3] S druge strane, velika naprezanja mogu nastati ako se materijal prerano skrutne i značajno skupi prije nego što poprimi svoj oblik. [3] Prianjanje taline na skrućeni sloj također je preduvjet za FDM materijal. [3]

Materijali koji se najčešće upotrebljavaju kod ove tehnologije su akrilonitril/butadien/stiren (ABS), polistiren (PS), poliamid (PA), polikarbonati (PC), polipropilen (PP), polietilen (PE) itd. U tablici 7 su prikazani materijali koji se koriste kod FDM tehnologije.

Tablica 7. Materijali koji se upotrebljavaju kod FDM tehnologije [17]

| Redni broj | Materijal | Klasifikacija |
|------------|---|---------------|
| 1 | Akrilonitril/butadien/stiren | ABS plus |
| 2 | Akrilonitril/butadien/stiren | ABS - M30 |
| 3 | Akrilonitril/butadien/stiren | ABS - M30i |
| 4 | Akrilonitril/butadien/stiren | ABSi |
| 5 | Akrilonitril/butadien/stiren | ABS - ESD7 |
| 6 | Poliamid | PA6 |
| 7 | Poliamid | PA12 |
| 8 | Poliamid | PA12 (CF) |
| 9 | Polikarbonat akrilonitril/butadien/stiren | PC ABS |
| 10 | Polikarbonat | PC |
| 11 | Polikarbonat | PC - ISO |
| 12 | Polifenilsulfon | PPSF/PPSU |
| 13 | PEI | ULTEM 1010 |

U većini slučajeva, FDM tehnologija se bira zbog niže cijene i jednostavnosti korištenja. FDM je znatno jeftiniji od postupaka opisanih u prethodnim poglavljima. Široka paleta materijala, kraće vrijeme obrade nakon 3D tiskanja i pristupačnost su među prednostima ove tehnologije, uz niže troškove (pristupačne i po izboru proizvođača). Slika 12 prikazuje korake FDM postupka.



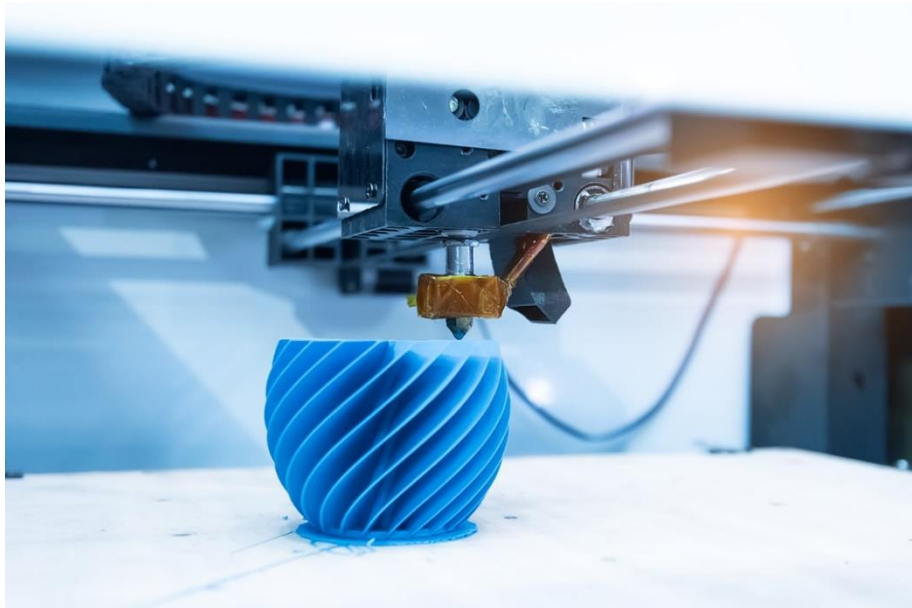
Slika 12. Koraci kod FDM postupka [18]

U tablici 8 su prikazane prednosti i nedostaci ovoga postupka.

Tablica 8. Prednosti i nedostaci FDM postupka [8]

| PREDNOSTI | NEDOSTACI |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• manja potrošnja energije• ne zahtijeva hlađenje• jednostavna uporaba• relativno mala investicija/niski troškovi održavanja• male izmjere uređaja | <ul style="list-style-type: none">• ograničen izbor materijala• nužnost izrade potporne strukture• vidljive linije između slojeva• mala čvrstoća proizvoda• potrebna naknadna obrada proizvoda |

FDM tehnologija ne koristi toksične materijale međutim često je potrebna potporna struktura, vidljive su linije između slojeva, niska je dimenzijska točnost te je nemoguće izraditi oštre rubove jer su mlaznice kružnog presjeka. Do loše kvalitete dolazi zbog veće visine sloja ili veće brzine ispisa. Visina sloja ima najveći utjecaj na hrapavost površine FDM dijelova. Neki od parametara na koje treba obratiti pažnju tijekom FDM 3D tiska su orijentacija građe, temperatura mlaznice, gustoća ispune, uzorak ispune, visina sloja, broj ljuski, brzina ispisa i temperatura toplinske obrade (parametar naknadne obrade). Svi ovi parametri utječu na kvalitetu 3D tiskanja, a važna je i vrsta materijala koja se koristi te očekivanja vezana uz krajnju primjenu gotovog proizvoda. Ako je cilj što brže dobiti proizvod onda se poveća brzina, ali ona smanjuje kvalitetu proizvoda. Kada je brzina ispisa i visina sloja manja tada je proizvod bolje kvalitete. Slika 13 prikazuje primjer 3D ispisa FDM tehnologijom.



Slika 13. 3D ispis FDM tehnologijom [19]

Najviše korišteni FDM filamenti su promjera 1,75 i 2,85 (3,0) mm. [20] U tablici 9 je prikazana usporedba najpopularnijih FDM filamenata.

Tablica 9. Najviše korišteni filamenti za FDM postupak [20]

| 1,75 mm | 2,85 mm |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • popularniji i lakše dobavljiv (veći izbor materijala) • bolja kvaliteta površine • moguće ispisivanje manjih detalja • potrebno manje energije za ekstrudiranje • moguće više brzine ekstrudiranja (brže taljenje filamena) | <ul style="list-style-type: none"> • krući, lakše ispisivanje savitljivih dijelova • kod širih mlaznica ekstrudera – deblji sloj i brže ispisivanje • jeftiniji (i 3 puta) od filamena promjera 1,75 mm |

FDM se koristi kod investicijskog lijevanja, elastičnih komponenti, koncept dizajna (vizualizacije), u automobilske industriji te se primjenjuje u medicini za kirurške rekonstrukcije. [6]

4. PREDNOSTI I OGRANIČENJA ADITIVNE PROIZVODNJE

Aditivna proizvodnja raste bržim tempom u proizvodnom sektoru zbog sljedećih ponuđenih prednosti: [18]

- dopušta proizvodnju malih količina prilagođenih dijelova
- manja kapitalna ulaganja i smanjeni troškovi prijevoza
- kao proizvodnja se može provoditi bliže potrošaču
- dopušta proizvodnja složenih geometrija i sklopova
- ne zahtijeva nikakve posebne alate

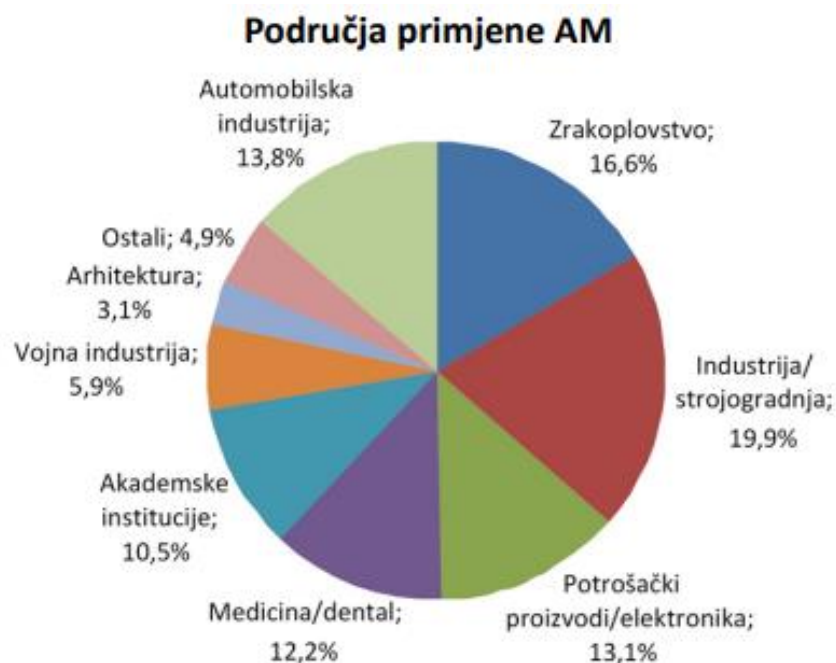
Nudi brzu izradu prototipova, proizvodi se mogu dimenzionirati prema vlastitim potrebama, proizvodnja je brza te je potrebno proizvoditi samo one proizvode koji se i prodaju i time se smanjuje skladištenje dodatnih zaliha.

Dok neki dijelovi, poput onih izrađenih od metala, imaju izvrsna mehanička svojstva, mnogi drugi 3D tiskani dijelovi su lošijih mehaničkih svojstava od onih izrađenih tradicionalnim tehnikama proizvodnje. To je zato što se dijelovi izgrađuju sloj po sloj, što smanjuje čvrstoću za između 10 i 50%. Neki od nedostataka su:

- ograničenja veličine
- ograničenja materijala
- proizvodi mogu imati manju čvrstoću nego kod proizvoda dobivenih klasičnih postupcima
- postoje zahtjevi za naknadom obradom

5. PRIMJENA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA

Iako aditivna proizvodnja postoji već desetljećima, posljednjih je godina narasla u popularnosti i upotrebi. Jedan od razloga nedavnog porasta upotrebe 3D ispisa je taj što je to jednostavna tehnologija koja se može koristiti za široku primjenu. U svojim počecima, 3D ispis je predstavljao visoke ulazne troškove. Modeli i materijali 3D tehnologija bili su skupi. Posljednjih godina, s poboljšanjima i varijacijama u tehnologijama i materijalima koji se koriste, troškovi su se smanjivali, čineći 3D tehnologije pristupačnijim i isplativijim, u svim industrijama i obrazovanju. Slika 14 prikazuje područja primjene aditivnih tehnologija.



Slika 14. Aditivna proizvodnja - područja primjene [21]

Nekoliko primjera:

- proizvodi široke potrošnje (naočale, obuća, dizajn, namještaj)
- industrijski proizvodi (alati za proizvodnju, prototipovi, funkcionalni dijelovi za krajnju upotrebu)
- dentalni proizvodi
- protetika
- arhitektonske makete i makete
- rekonstrukcija fosila
- repliciranje drevnih artefakata
- rekonstrukcija dokaza u forenzičkoj patologiji
- filmski rekviziti.

Titan, bakar, nehrđajući čelik i razne legure aluminija tiskane su za različite primjene. Npr. titan je korišten kao materijal kod 3D tiskanja implantata za pseće šape. Relativity, start-up tvrtka iz SAD-a, pokazala je veliki napredak u komercijalizaciji proizvodnje metalnih aditiva za primjenu u zrakoplovstvu 3D ispisom raketnih dijelova.

General Electric je 3D tiskao metalne mlaznice za gorivo koje će postati jedan od prvih tiskanih dijelova instaliranih na komercijalnom zrakoplovu. Ford je pokazao da se 3D ispis može koristiti za izradu dijelova motora visokih performansi 3D tiskanjem aluminijskog usisnog razvodnika. Slika 15 prikazuje 3D ispisani motor američke tvrtke SpaceX.

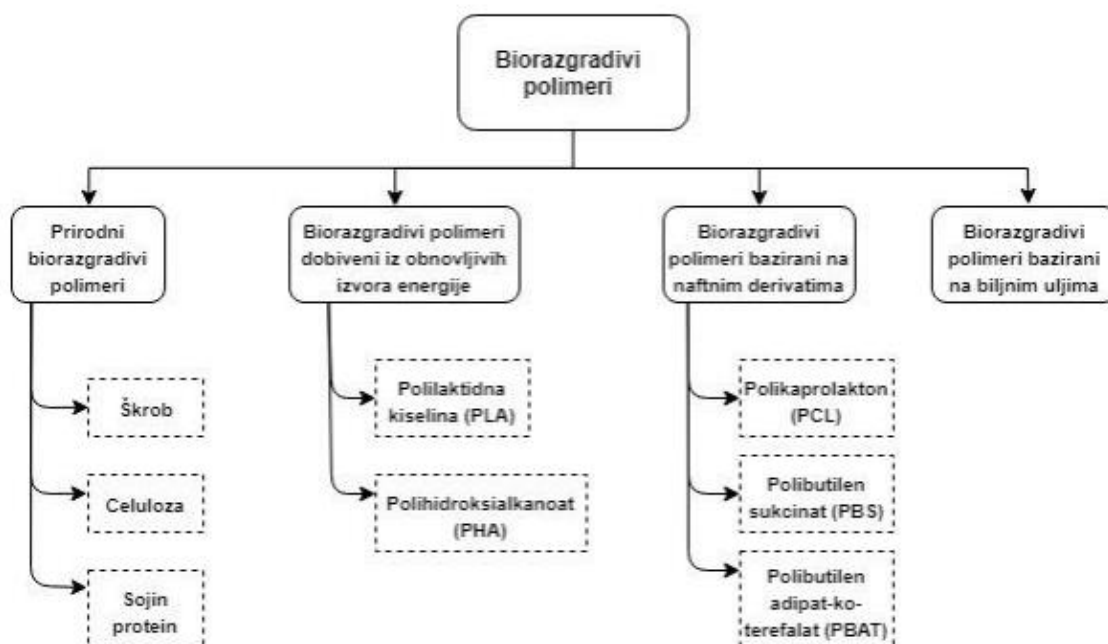


Slika 15. 3D tiskani "The SuperDraco" motor tvrtke SpaceX [22]

6. Polilaktička kiselina (PLA)

Polilaktička kiselina (eng. Polylactic acid, PLA) pripada skupini bio-razgradivih polimera. Bio-razgradivi polimeri se mogu podijeliti s obzirom na podrijetlo na polimere koje možemo naći u prirodi, polimere dobivenih iz obnovljivih izvora energije te sintetske polimere bazirane na nafti. Tablica 10 prikazuje podjelu bio-razgradivih polimera. PLA i PHA su dva najvažnija predstavnika biorazgradivih polimera koji su dobiveni iz obnovljivih izvora energije. Njihovo otkriće veliki je napredak u razvoju biorazgradivih polimera.

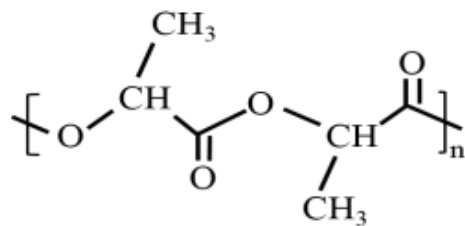
Tablica 10. Shematski prikaz podjele bio-razgradivih polimera s obzirom na podrijetlo [23]



Polilaktička kiselina je biorazgradivi polimer s monomerom mliječne kiseline koji se dobiva iz obnovljivih izvora (npr. šećerna trska, kukuruzni škrob, korijen tapioke itd.) S obzirom na to da se dobiva iz obnovljivih izvora energije, ekološki je najprihvatljiviji materijal za primjenu kod aditivnih tehnologija u usporedbi s ostalim polimernim

materijalima kao npr. ABS. Slika 16 prikazuje kemijsku strukturu PLA. Postoje 3 metode kojima je moguće sintetizirati visoku molekulsku masu PLA:

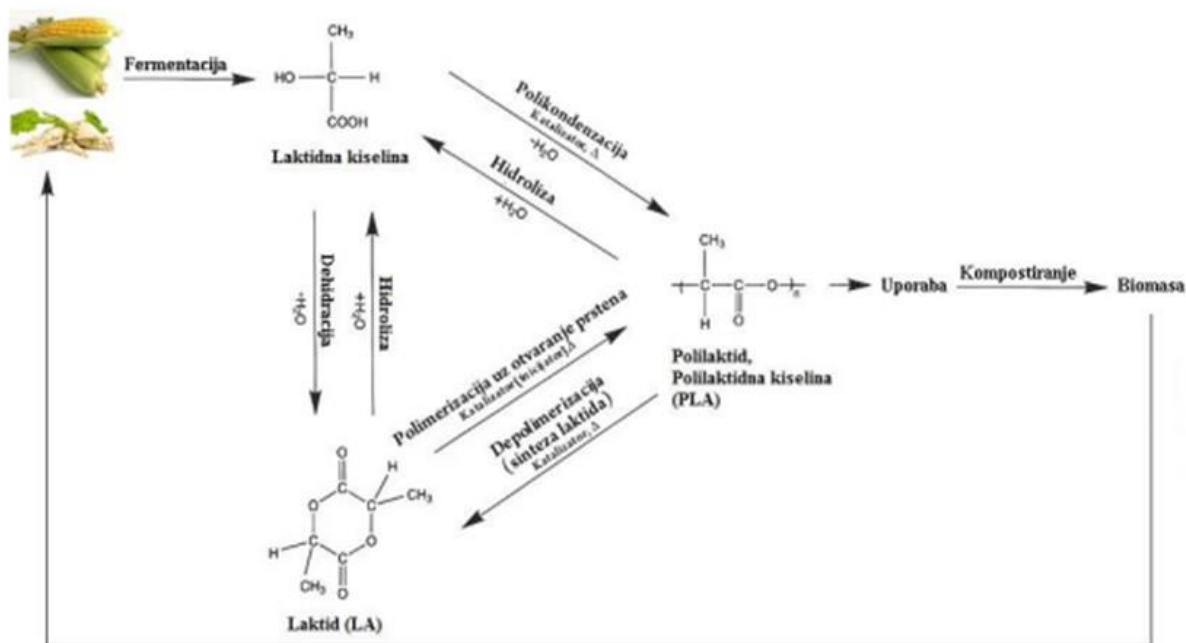
- direktnom kondenzacijskom polimerizacijom
- azeotropskom dehidracijskom kondenzacijom
- polimerizacijom otvorenog prstena laktida.



Slika 16. Kemijska struktura PLA [24]

Mliječna kiselina nastaje fermentacijom bakterija ugljikohidrata kao što su kukuruz, šećerna trska, krumpir itd. Kako bi je mogli koristiti za polimerizaciju potrebno ju je neutralizirati lužinom, filtrirati, zgusnuti i zakiseliti. Svojstva PLA ovise o izomerima mliječne kiseline, procesnoj temperaturi, vremenu žarenja i molekulskoj masi.

Može se dobiti različitim metodama poput ekstrudiranja, injekcijskog prešanja, oblikovanja puhanjem, toplinskim oblikovanjem, sintezom PLA i PLA polimerizacijom. Slika 17 prikazuje životni ciklus i postupke sinteze PLA.



Slika 17. Životni ciklus i postupci sinteze PLA [25]

Iako je PLA biorazgradiv, trenutačno nije obnovljiv budući da emitira ~1,3 kg CO₂ ekvivalenta/kg sintetizirane plastike. [3] Topi se između 180 - 200° C, ovisno o drugim materijalima koji su mu dodani za boju i teksturu. PLA je čvrst i otporan, ali nije toliko otporan na toplinu kao ABS. Počinje se deformirati na temperaturama višim od 60° C. Također nije otporan na vodu i kemikalije. Osjeti se lagani miris kada se zagrije, ali nema otrovnih mirisa ili para. Slika 18 prikazuje vijak i maticu od materijala PLA.



Slika 18. Vijak i matica od PLA [26]

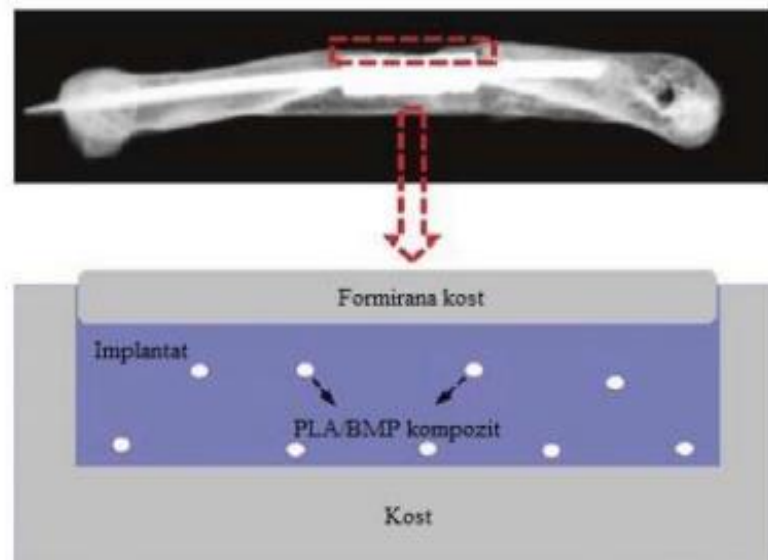
Kod 3D ispisa važan je odabir temperature mlaznice, brzina protoka polimera te lokalna temperatura zbog kontrole stanja PLA makromolekula te odgovarajućih svojstava konačnog proizvoda. U tablici 11 je pregled svojstava PLA.

Tablica 11. Pregled svojstava PLA [27]

| | Raspon vrijednosti | Prosječna vrijednost |
|---|---------------------------|-----------------------------|
| Temperatura taljenja, [°C] | 110 - 170 | 156 |
| Temperatura staklastog prijelaza, [°C] | 45 - 120 | 59,6 |
| Youngov modul elastičnosti, [GPa] | 0,230 - 13,8 | 3,76 |
| Vlačna čvrstoća, [MPa] | 16 - 114 | 50 |
| Savojna čvrstoća, [MPa] | 6 - 145 | 80,3 |
| Savojni modul elastičnosti, [GPa] | 0,215 - 13,8 | 4,08 |
| Žilavost, [kJ/m²] | 1 - 10000 | 7,54 |
| Tvrdoća po Shoreu D | 59 - 77 | 63,5 |

6.1. Primjena PLA

PLA se može koristiti za različite namjene zbog razgradivosti i netoksičnosti povezanih s dobrim mehaničkim svojstvima. Najčešće se koristi u područjima medicine, tekstilne industrije te ambalaže. U medicini se koristi za tkivno inženjerstvo, medicinske implantate, šavove itd. Primjer je upotreba pločice načinjene od PLA kao fiksator za frakturu gdje se naprezanja tijekom vremena prenose na oštećeno područje. Tijekom razgradnje pločica ima sve slabija mehanička svojstva te kost koja zarasta ima sve veća opterećenja. Nakon potpune razgradnje pločice, zacijeljena kost je spremna preuzeti potpuno opterećenje. Slika 19 prikazuje primjer ugrađene pločice od PLA/BMP kompozita.



Slika 19. Ugrađena pločica od PLA/BMP kompozita [28]

U slučajevima kada su potrebna svojstva koja ne možemo postići koristeći samo PLA koriste se kompozitni materijali u kojima se nalazi PLA. Npr. PLA koji je ojačan vlaknima poliglikolne kiselina se može koristiti kao materijal za izradu implantata u ortopediji dok kombinacija PLA s ugljičnim vlaknima, hidroksiapatitskom keramikom (HA) i keramikom aluminij-kalcij-fosforova oksida značajno poboljšavamo mehanička svojstva materijala. U tablici 12 je prikazana usporedba mehaničkih parametara PLA s PS i PET.

Tablica 12. Usporedba nekih mehaničkih svojstava parametara PLA s PS i PET [27]

| | PLA | PET | PS |
|-----------------------------|-------|---------|------|
| Modul/ Gpa | 3,8 | 2,8-4,1 | 3,2 |
| Gustoća/ kg m ⁻³ | 1,26 | 1,40 | 1,05 |
| Povećanje krutosti/ % | 38,78 | - | - |
| Prekidno istezanje/ % | 4-7 | 2,8-4,1 | 3 |
| Vlačna čvrstoća/% | 59 | 57 | 45 |

U odnosu na druge polimere kao što su polipropilen (PP), polistiren (PS), polietilen (PE) ili polietilen-tereftalat (PET) ima nižu istezljivost i žilavost. Vlačna čvrstoća se može usporediti s PET-om dok slaba žilavost ograničava upotrebu gdje su potrebne plastične deformacije pri višim stupnjevima opterećenja. Na žilavost te na savojnu i vlačnu čvrstoću ima utjecaj molekularna masa i temperatura. Vlačna čvrstoća PLA se kreće u rasponu od 44 – 66 MPa. Mijenjanjem omjera D i L laktida možemo mijenjati i mehanička svojstva.

Kako bi se poboljšala svojstva čistoga PLA mogu se dodati različiti dodaci. Pritom mehanička svojstva mogu varirati od mekog i elastičnog do krutog i čvrstog materijala. Neki od parametara koji utječu na mehanička svojstva su struktura kristala i molekularna masa. Pomoću dodataka mogu se poboljšati već postojeća svojstva ili se ostvariti nova čime se mogu poboljšati mehanička svojstva konačnog proizvoda. Prilikom odabira dodataka treba voditi brigu o tome da se poboljšavanjem određenog svojstva neko drugo svojstvo može pogoršati. Zato je potrebo odabrati dodatak koji ima dobru djelotvornost na sva svojstva polimera.

Dodaci se prema namjeni mogu podijeliti na nekoliko većih skupina i podskupina: [28]

1. modifikatori mehaničkih svojstava:

- a) plastifikatori ili omekšavala (maseni udio do 25%)
- b) dodaci za povećanje žilavosti
- c) punila (maseni udio do 50%)
- d) ojačala (maseni udio od 25 do 40%)

2. dodaci za povećanje postojanosti:

- a) svjetlosni stabilizatori (maseni udio od 0,1 do 1%)
- b) antioksidansi (maseni udio od 0,01 do 2%)
- c) biocidi

3. dodaci za poboljšanje prerade:

- a) toplinski stabilizatori (maseni udio od 0,1 do 2%)
- b) maziva
- c) umrežavala
- d) dodaci za poboljšanje viskoznosti i tiksotropnosti

4. modifikatori optičkih svojstava:

- a) pigmenti i bojila (maseni udio od 0,02 do 3%)
- b) strukturizatori

5. modifikatori površinskih svojstava:

- a) vanjska maziva
- b) antistatici (maseni udio od 0,1 do 1%)
- c) adhezivi
- d) dodaci za smanjenje gorivosti (maseni udio od 1 do 20%).

Neke od prednosti korištenja PLA su da je ekološki prihvatljiv, podliježe hrolizi i biorazgradnji, može pridonijeti medicini jer je pogodan za biomedicinsku upotrebu, a mehanička svojstva se mogu usporediti s PE, PP dok su nedostaci ograničena primjena kod velikih naprezanja zbog krtosti i žilavosti, nepovoljan je kod visokotemperaturnih procesa te niska trajnost u uvjetima visoke vlažnosti.

7. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada na FDM uređaju izrađeni su ispitni uzorci za statičko vlačno ispitivanje prema normama EN ISO 527-1:2012 i EN ISO 527-2:2012. Ispitni uzorci izrađeni su prema centralno kompozitnom planu pokusa, a parametri koji su se mijenjali po pojedinim stanjima plana pokusa su temperatura komore, temperatura polimera na izlazu iz mlaznice te debljina sloja. Dobiveni rezultati su analizirani i donesen je zaključak.

7.1. Plan pokusa

Plan pokusa bio je provesti ispitivanje mehaničkih svojstava 3D tiskanih PLA uzoraka s ciljem utvrđivanja utjecaja dominantnih faktora ispisa na pojedina mehanička svojstva. Faktori 3D ispisa koji su varirali su:

- temperatura komore
- temperatura polimera
- debljina sloja.

Svaki od navedenih faktora varirali su na tri razine koje su bile međusobno jednako udaljene. Npr. varirani je faktor temperature komore na tri razine: 40 °C (min), 50 °C (centralna točka) i 60 °C (max). Točke min i max su jednako udaljene od centralne točke (udaljenost je 10 °C). Točka min se označava oznakom -1, centralna točka oznakom 0, a točka max oznakom 1.

Na temelju toga zadatak je bio provesti statičko vlačno ispitivanje kako bi se istražio utjecaj pojedinih parametara 3D ispisa na mehanička svojstva. Mehaničko svojstvo koje se ispitalo je vlačna čvrstoća. Norme po kojima su se obavljala ispitivanja su HRN EN ISO 527-1 i HRN EN ISO 527-2. Ove norme određuju uvjete za ispitivanje rasteznih svojstava polimernih materijala. One definiraju oblik i mjere ispitnog uzorka odnosno epruveta, brzinu opterećenja, temperaturu prostora u kojem

se izvodi ispitivanje i način provođenja ispitivanja i izračunavanja rezultata. Dobiveni rezultati obrađeni su statistički ANOVA analizom.

Za potrebe ispitivanja varirala su 3 faktora: faktor A, faktor B i faktor C.

Faktor **A** je temperatura komore.

Faktor **B** je temperatura polimera.

Faktor **C** je debljina sloja.

Svaki faktor se mijenjao na tri razine -1, 0, 1. Te razine su definirane u tablici 13.

Tablica 13. Prikaz faktora koji su se mijenjali na tri razine

| Razina | A (temp.komore), °C | B (temp.polimera), °C | C (debljina sloja) |
|---------------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| -1 | | | |
| 0 | | | |
| 1 | | | |

Kombinacije faktora prema kojima su izrađeni uzorci prikazane su u tablici 14.

Tablica 14. Kombinacije faktora prema kojima su izrađeni uzorci

| Razine faktora | | | Broj uzoraka |
|----------------|----|----|-----------------|
| A | B | C | |
| 0 | 0 | 0 | 3 |
| 0 | 1 | -1 | 3 |
| 0 | 1 | 1 | 3 |
| 1 | 0 | -1 | 3 |
| -1 | 0 | 1 | 3 |
| 0 | -1 | 1 | 3 |
| 0 | 0 | 0 | 3 |
| 0 | -1 | -1 | 3 |
| 0 | 0 | 0 | 3 |
| 1 | 0 | 1 | 3 |
| -1 | -1 | 0 | 3 |
| 1 | 1 | 0 | 3 |
| -1 | 1 | 0 | 3 |
| -1 | 0 | -1 | 3 |
| 1 | -1 | 0 | 3 |

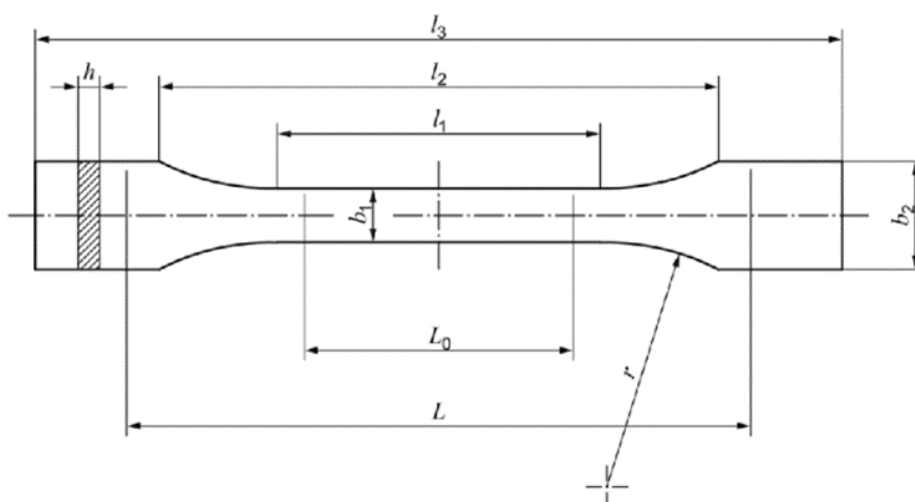
7.2. Izrada uzoraka

Uzorci su izrađeni FDM postupkom u tvrtki Izit d.o.o. u Svetoj Nedjelji na uređaju MarketBox Method X prikazanim na slici 20.



Slika 20. Uređaj Marketbot Method X [29]

Epruvete korištene za ispitivanje statičkog vlačnog pokusa su četvrtastog poprečnog presjeka, slika 21, prema normi HRN EN ISO 527-2. Na slici 22 prikazane su vrijednosti dimenzija epruvete definirane normom HRN EN ISO 527-2.



Slika 21. Oblik i dimenzije epruvete prema normi HRN EN ISO 527-2 [30]

Table 1 — Dimensions of type 1A and 1B test specimens

Dimensions in millimetres

| Specimen type | 1A | 1B |
|---|-------------|------------|
| l_3 Overall length ^a | 170 | ≥150 |
| l_1 Length of narrow parallel-sided portion | 80 ± 2 | 60,0 ± 0,5 |
| r Radius | 24 ± 1 | 60 ± 0,5 |
| l_2 Distance between broad parallel-sided portions ^b | 109,3 ± 3,2 | 108 ± 1,6 |
| b_2 Width at ends | 20,0 ± 0,2 | |
| b_1 Width at narrow portion | 10,0 ± 0,2 | |
| h Preferred thickness | 4,0 ± 0,2 | |
| L_0 Gauge length (preferred) | 75,0 ± 0,5 | 50,0 ± 0,5 |
| Gauge length (acceptable if required for quality control or when specified) | 50,0 ± 0,5 | |
| L Initial distance between grips | 115 ± 1 | 115 ± 1 |

^a The recommended overall length of 170 mm of the type 1A is consistent with ISO 294-1 and ISO 10724-1. For some materials, the length of the tabs may need to be extended (e.g. $l_3 = 200$ mm) to prevent breakage or slippage in the jaws of the testing machine.

^b $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$, resulting from l_1 , r , b_1 and b_2 , but within the indicated tolerances.

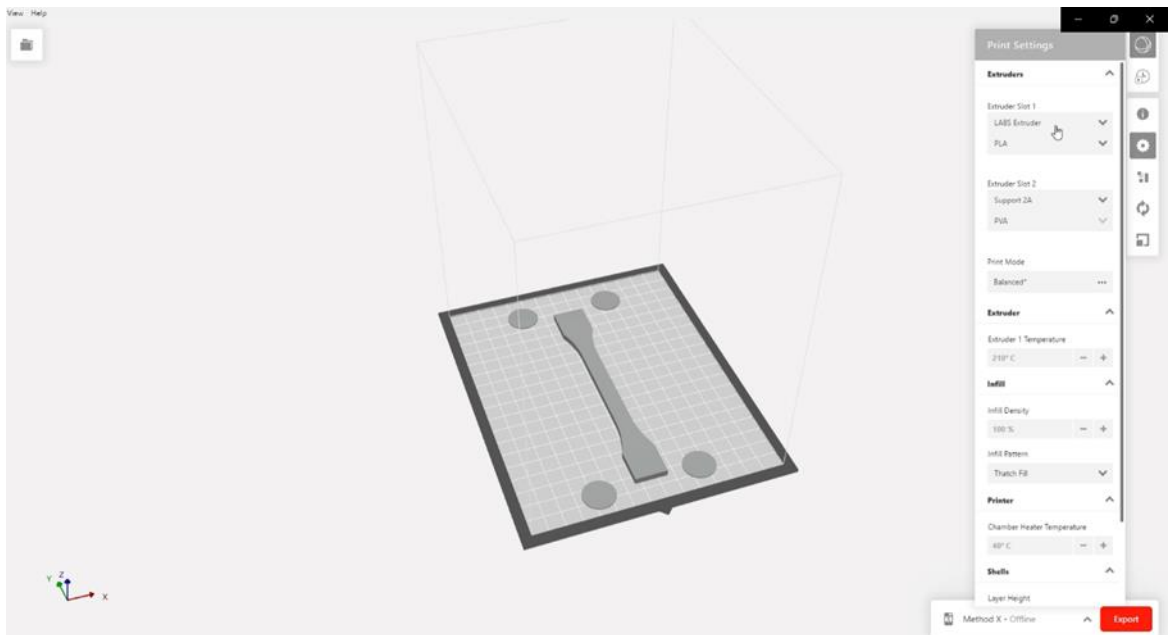
Slika 22. Dimenzije epruvete prema normi HRN EN ISO 527-2[30]

U tablici 15 su prikazani preduvjeti za 15 različitih kombinacija navedenih parametara i za svaku kombinaciju izrađeno je po 3 uzorka. Ukupno je 45 PLA uzoraka.

Tablica 15. Kombinacije parametara 3D tiskanja

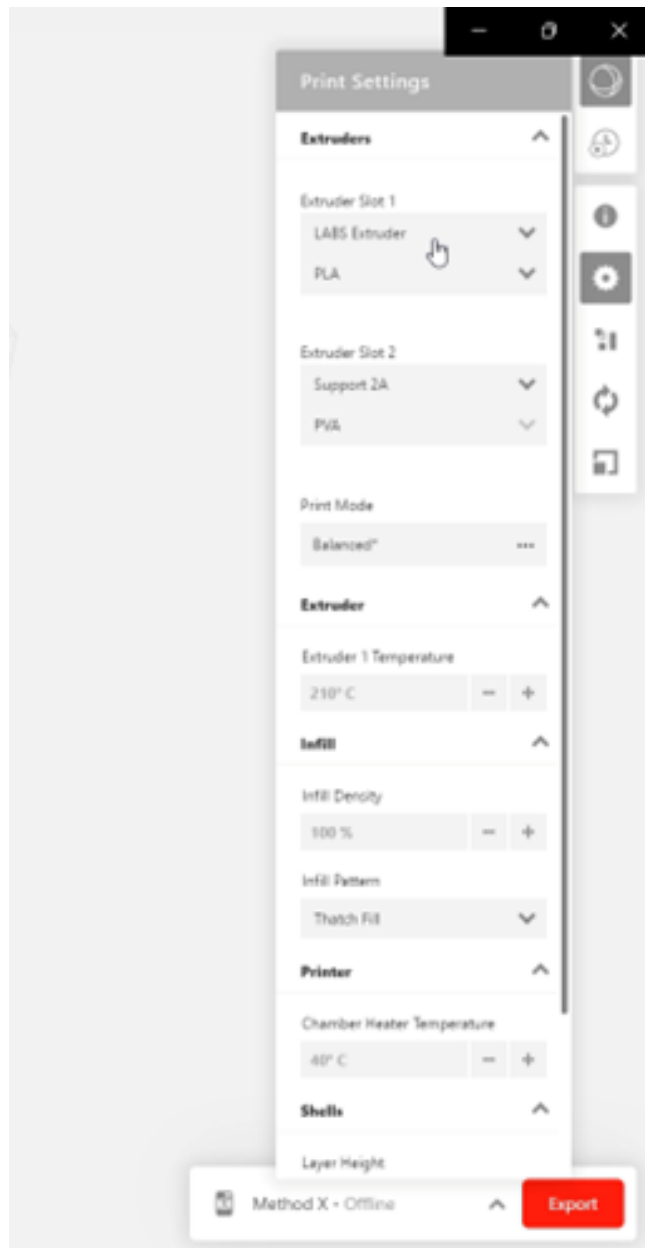
| Red.br. | Parametri printanja | | | Broj uzoraka |
|---------|---------------------|---------------------|------------------|--------------|
| | Temp.komore, °C | Temp.ekstrudera, °C | Visina sloja, mm | |
| 1 | 40 | 210 | 0,2 | 3 |
| 2 | 40 | 220 | 0,1 | 3 |
| 3 | 40 | 220 | 0,3 | 3 |
| 4 | 45-50 | 210 | 0,1 | 3 |
| 5 | 30-35 | 210 | 0,3 | 3 |
| 6 | 40 | 200 | 0,3 | 3 |
| 7 | 40 | 210 | 0,2 | 3 |
| 8 | 40 | 200 | 0,1 | 3 |
| 9 | 40 | 210 | 0,2 | 3 |
| 10 | 45-50 | 210 | 0,3 | 3 |
| 11 | 30-35 | 200 | 0,2 | 3 |
| 12 | 45-50 | 220 | 0,2 | 3 |
| 13 | 30-35 | 220 | 0,2 | 3 |
| 14 | 30-35 | 210 | 0,1 | 3 |
| 15 | 45-50 | 200 | 0,2 | 3 |

Prvi korak u postupku izrade uzoraka je bio iz 3D modela epruvete napraviti STL datoteku. Nakon što je STL datoteka generirana otvorena je pomoću „slicer“ programa za pripremu za 3D ispis. Na slici 23 prikazane su epruvete u „slicer“ programu kod pripreme za 3D ispis. Slicer program pretvara STL datoteku u „G kod“ odnosno programski jezik koji 3D uređaj prepoznaje.



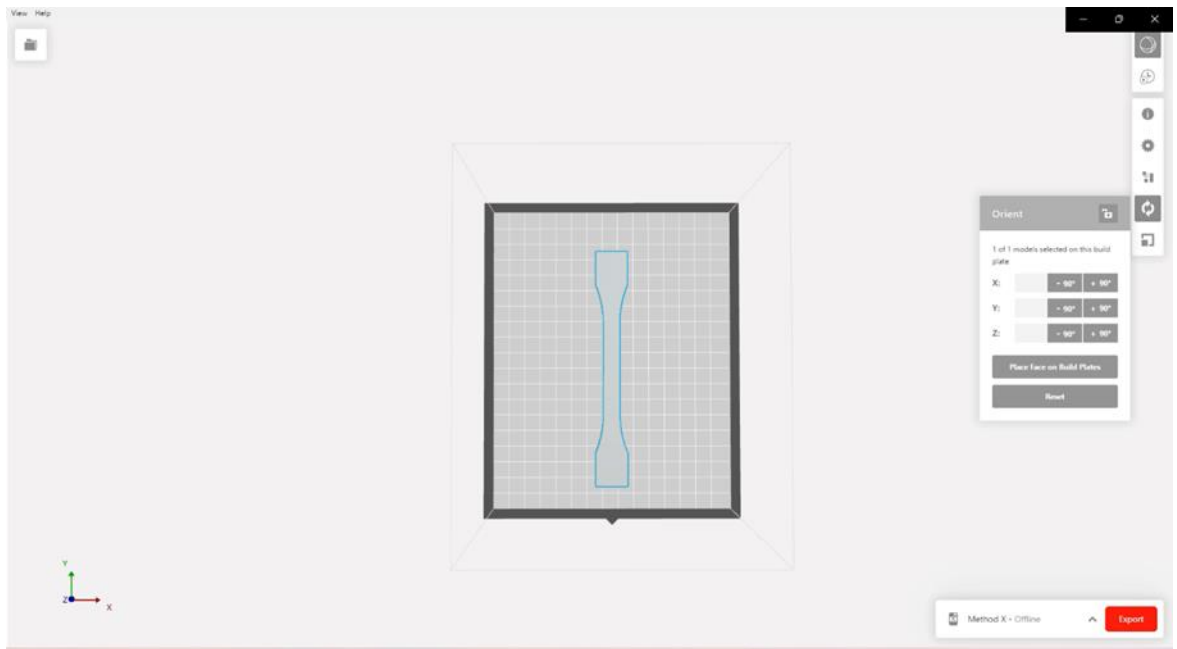
Slika 23. Prikaz epruvete i prilagođavanje parametara

Slika 24 prikazuje opcije koje je moguće podešavati. U ovoj fazi određujemo koliki broj uzoraka će se izrađivati, odabiremo materijal, temperaturu ekstrudera, visinu sloja, kakva će biti ispuna modela i pomoćni materijal ukoliko je potreban. Također odabiremo ako je potrebna potporna struktura „Breakaway Support“. Kod ovog 3D ispisa bila je potrebna potporna struktura.

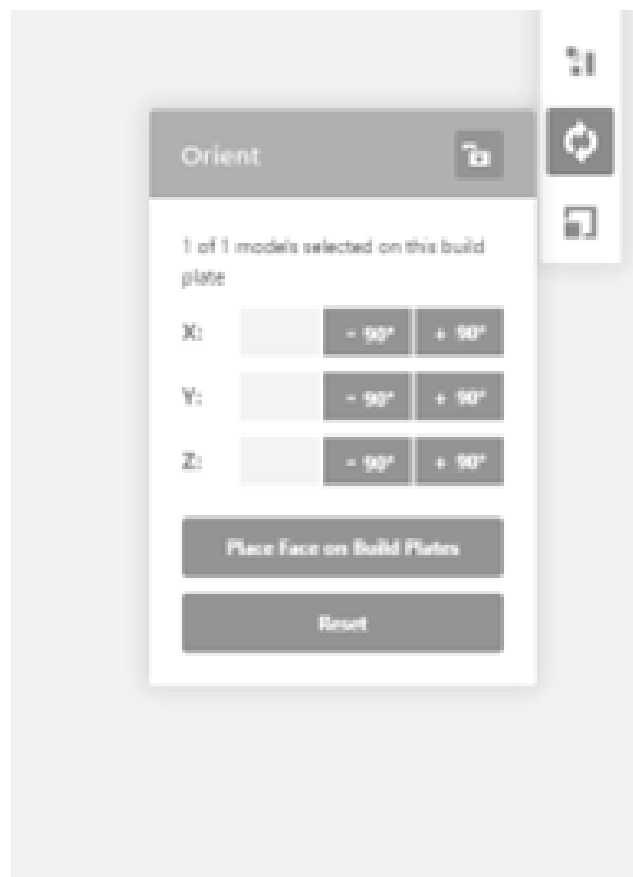


Slika 24. Podešavanje parametara 3D ispisa

Također je važna orijentacija epruvete tijekom 3D ispisa. Slika 25 prikazuje postavljanje orijentacije epruvete, a slika 26 izbliza.

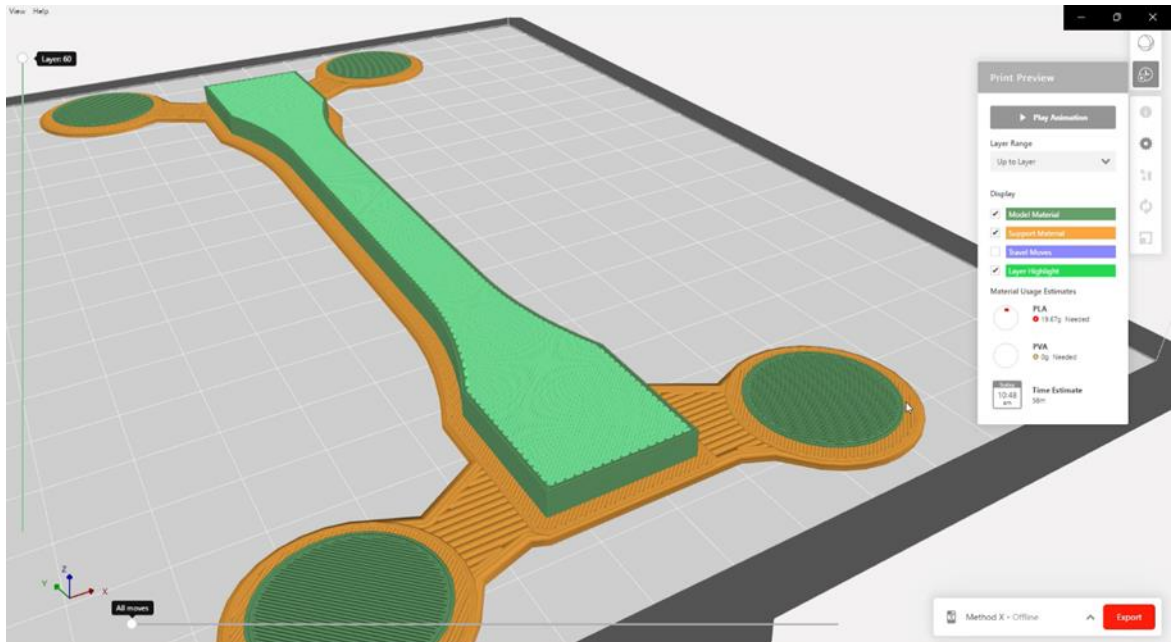


Slika 25. Prikaz epruvete u "slicer" programu



Slika 26. Orijentacija epruvete

Slojeve od kojih će se sastojati svaki izradak / epruveta moguće je vidjeti u opciji Print Preview programa. Na slici 27 je prikazani Print Preview i slojevi.



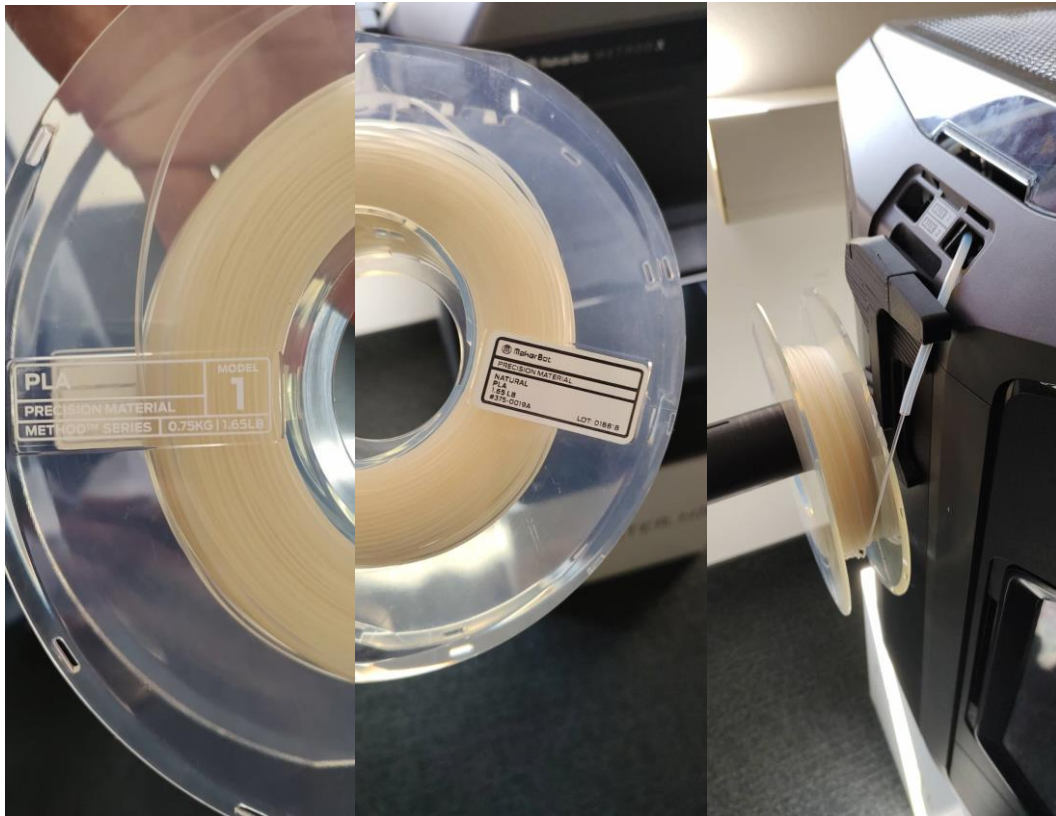
Slika 27. Prikaz slojeva od kojih će se sastojati izradak/epruveta

Na ekranu također možemo pratiti 3D ispis te se trenutno prate npr. temperature ekstrudera i komore. Nakon što se sve podesi iz ovoga programa se šalje datoteka FDM uređaju na 3D ispis. Slika 28 prikazuje korišteni FDM uređaj.



Slika 28. FDM uređaj korišteni za ispis PLA uzoraka

Korišteni 3D uređaj za izradu ispitnih uzoraka u ovom diplomskom radu radi na principu FDM tehnologije, a nakon što uređaj zaprimi datoteku, počinje priprema uređaja. FDM uređaj koristi polimerni materijal (žicu, filament) koji dolazi namotan na kolut. FDM uređaj pomoću posebne nazubljene osovine koja se nalazi u glavi 3D uređaja, povlači filament do grijača koji topi polimer. Omekšani polimer izlazi pomoću mlaznice. Materijal iz kojeg su izrađene epruvete u ovom radu je PLA. Slika 29 prikazuje PLA materijal namotani u obliku žice te je prikazani smješteni na FDM uređaju.



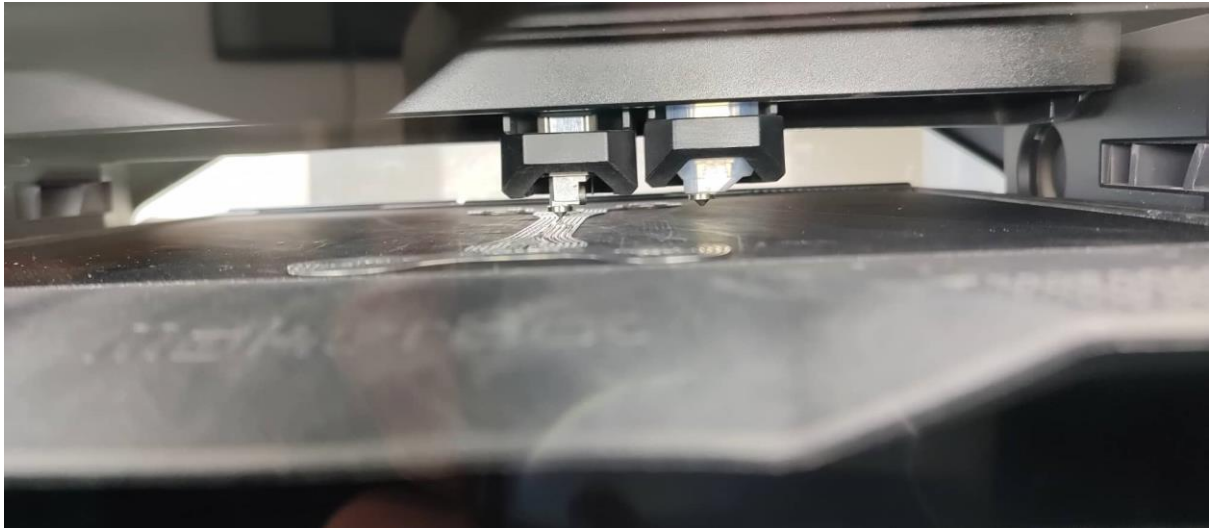
Slika 29. a) i b) PLA materijal korišteni za 3D ispis epruveta i b) prikaz namotane žice PLA smještene na FDM uređaj

Priprema samog uređaja se radi tako da uređaj kalibrira radnu podlogu, zatim se očisti glave ekstrudera te zagrijava glavni materijal. Nije korišteni pomoćni materijal. Potrebno je bilo podesiti i konfigurirati ekstrudere te provjeriti mlaznice ekstrudera. Zatim se dodaje „build plate“ odnosno radna podloga na kojoj će se odvijati sam 3D ispis. Slika 30 prikazuje ekstrudere, mlaznicu te radnu podlogu.



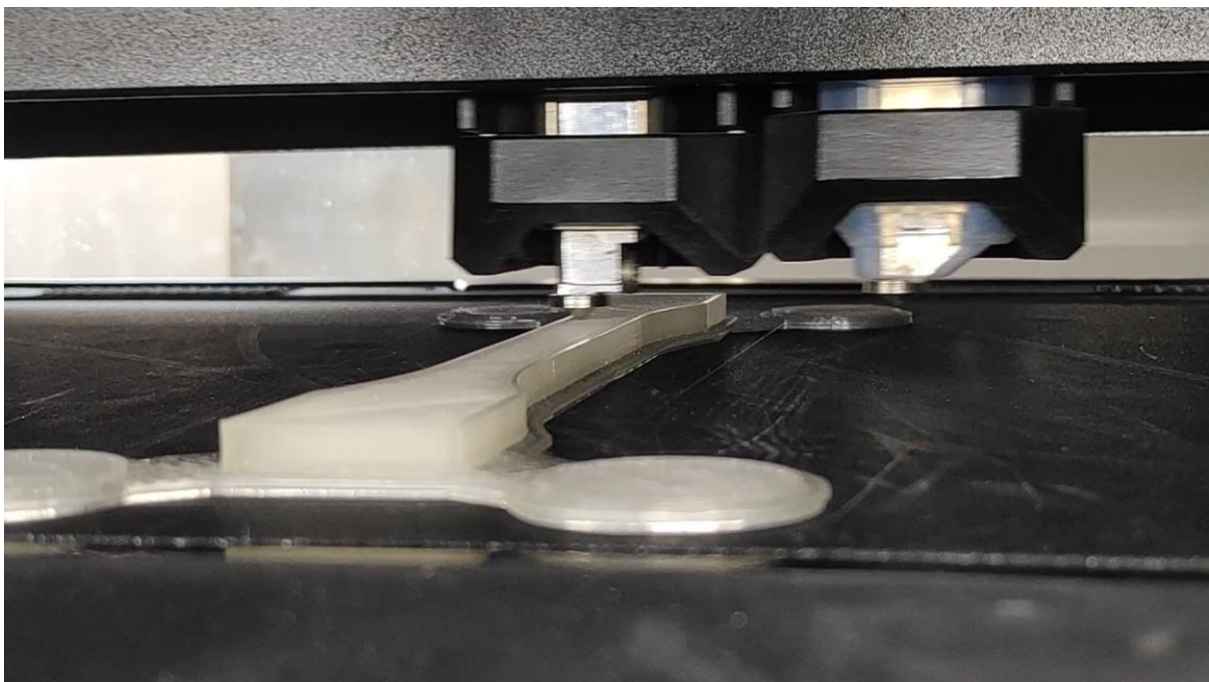
Slika 30. a) ekstruderi b) mlaznica c) radna podloga

Nakon što su se podesile sve postavke na samom FDM uređaju kao što su temperatura mlaznice i temperatura komore te napravi priprema radne površine može krenuti 3D ispis. Uređaj prvo nanosi potpornu strukturu na kojoj će se izrađivati proizvod, a nakon toga počinje izrada epruveta sloj po sloj. Nakon što se epruveta izradi potrebno je ukloniti potporni materijal, a u ovom radu potporni materijal uklanjao se ručno. Slika 31 prikazuje kako FDM uređaj počinje 3D ispis potporne strukture.



Slika 31. Prva faza 3D ispisa - izrada potporne strukture

Slika 32 prikazuje tijekom izrade epruvete sloj po sloj. Također se može vidjeti izrađena potporna struktura.



Slika 32. Druga faza - tijekom 3D ispisa

Slika 33 prikazuje gotovu izrađenu epruvetu. Proces 3D tiskanja jedne epruvete je trajao 30 – 40 min.



Slika 33. Završna faza - gotova epruveta

7.3. Statičko vlačno ispitivanje

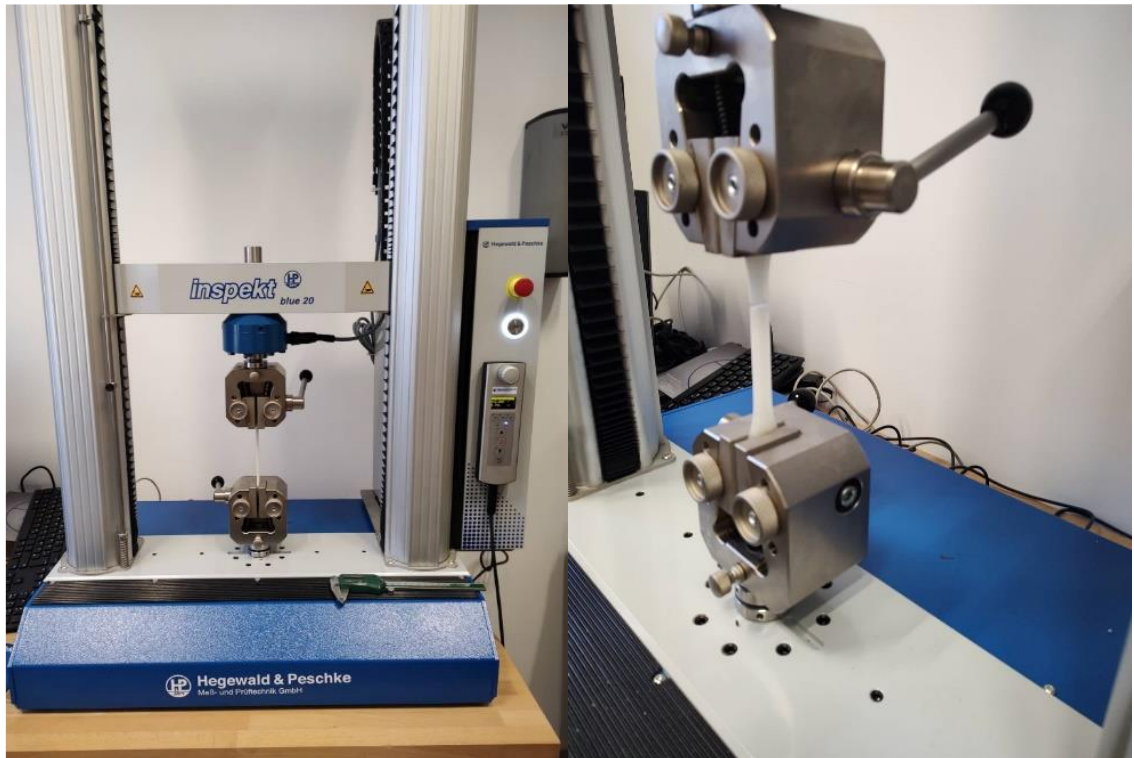
Za ispitivanje dobivenih PLA uzoraka statičkim vlačnim ispitivanjem primijenjene su norme HRN EN ISO 527-1:2012 - Plastika – Određivanje rasteznih svojstava – 1. dio: Opća načela i HRN EN ISO 527-2:2012 - Plastika – Određivanje rasteznih svojstava – 2. dio: Uvjeti ispitivanja za prešanu i ekstrudiranu plastiku. Statičko vlačno ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za materijale na Sveučilištu Sjever na 20 kN kidalici proizvođača Hegewald & Peschke. Slika 34 prikazuje kidalicu na kojoj se provodilo ispitivanje. Ispitivanje se provodilo na kidalici na kojoj su se epruvete kontinuirano vlačno opterećivale do loma. Pri ispitivanju se kontinuirano mjerila sila i produljenje epruvete. U trenutku loma epruvete, očitana je maksimalna sila. Ispitano je 45 PLA uzoraka.



Slika 34. Kidalica proizvođača Hegewald & Peschke [31]

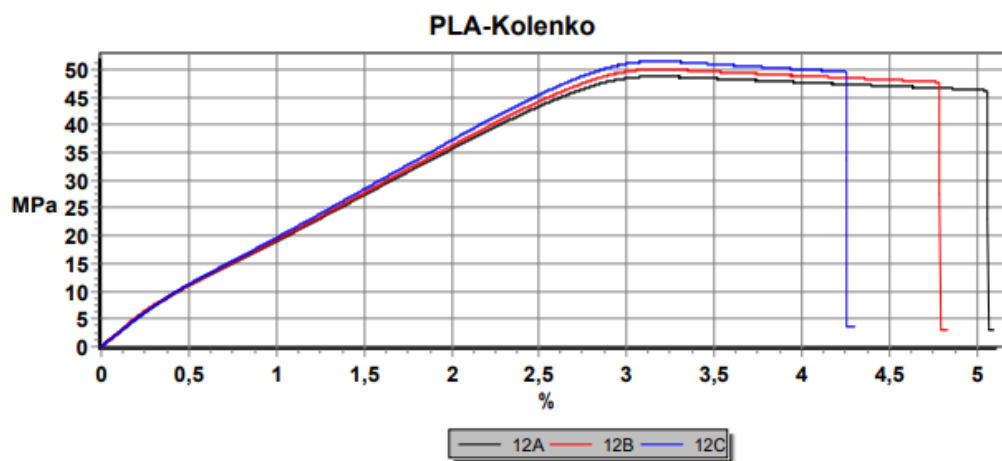
Prvi korak kod ispitivanja je bio označavanje epruveta (npr. 1A, 1B i 1C) i tako za svih 15 različitih stanja. Zatim je slijedilo mjerenje dimenzija svake epruvete pomoću pomoćnog mjerila prije ispitivanja na kidalici. Unaprijed pripremljena ispitna

epruveta je zatim postavljena između dva oslonca. Mjerio se pomak kidalice. Sila je povećavana do kad nije došlo do loma epruvete. Na slici 35 je prikazano ispitivanje epruveta na kidalici.



Slika 35. a) i b) ispitivanje epruveta na kidalici

Pomak uređaja pratio se i nakon loma epruvete. Tijekom ispitivanja na računalu se iscrtavao dijagram napreznja-istezanja. Na slici 36 je prikazani dijagram napreznja-istezanja za jedno stanje i 3 uzorka. Slika prikazuje dijagram napreznja-istezanja za uzorak 12 A, 12 B i 12C. Prikazane su postignute vrijednosti vlačne čvrstoće prema ISO 527. U tablici 16 su prikazane pripadne vrijednosti. U prilogu diplomskog rada dati su rezultati za sva ispitivanja.

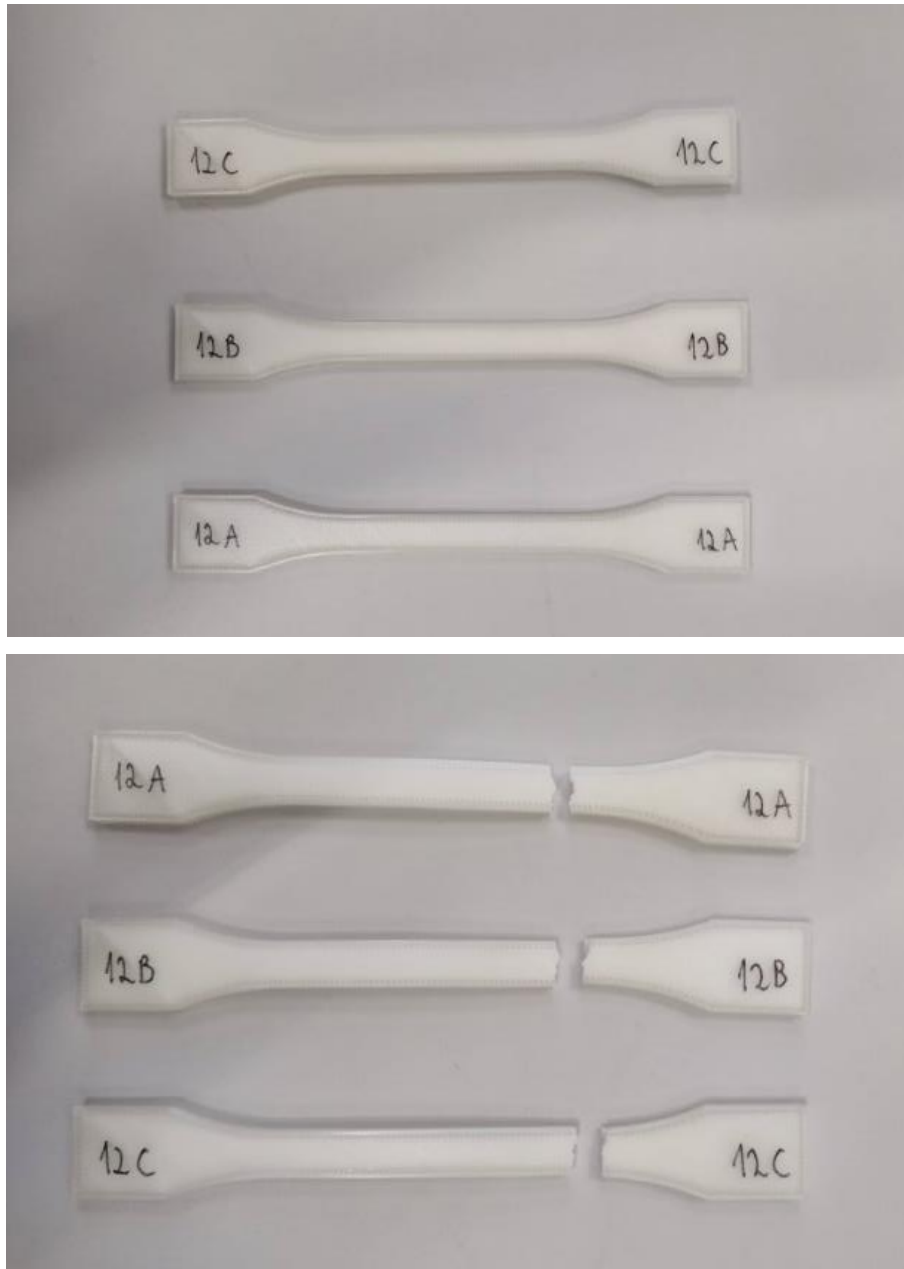


Slika 36. Dijagram naprezanja-istezanja za PLA uzorke 12-A, 12-B i 12-C

Tablica 16. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja za uzorke 12-A, 12-B i 12-C

| | S_0 , mm ² | E , GPa | F_{max} , N | σ_y , MPa | σ_M , MPa | σ_B , MPa | ε_{y1} , % | ε_{B1} , % | ε_{tB1} , % | ε_{M1} , % | ε_{tB1} , % |
|------------|----------------------------|--------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 12A | 42.51 | 2.47 | 2072.28 | 8.66 | 48.75 | 3.07 | 0.37 | 4.97 | 5.09 | 1.19 | 3.16 |
| 12B | 41.8 | 2.61 | 2090.88 | 8.15 | 50.03 | 3.12 | 0.33 | 4.7 | 4.83 | 1.25 | 3.17 |
| 12C | 41.6 | 2.51 | 2141.56 | 9.91 | 51.48 | 3.56 | 0.43 | 4.16 | 4.3 | 1.12 | 3.17 |

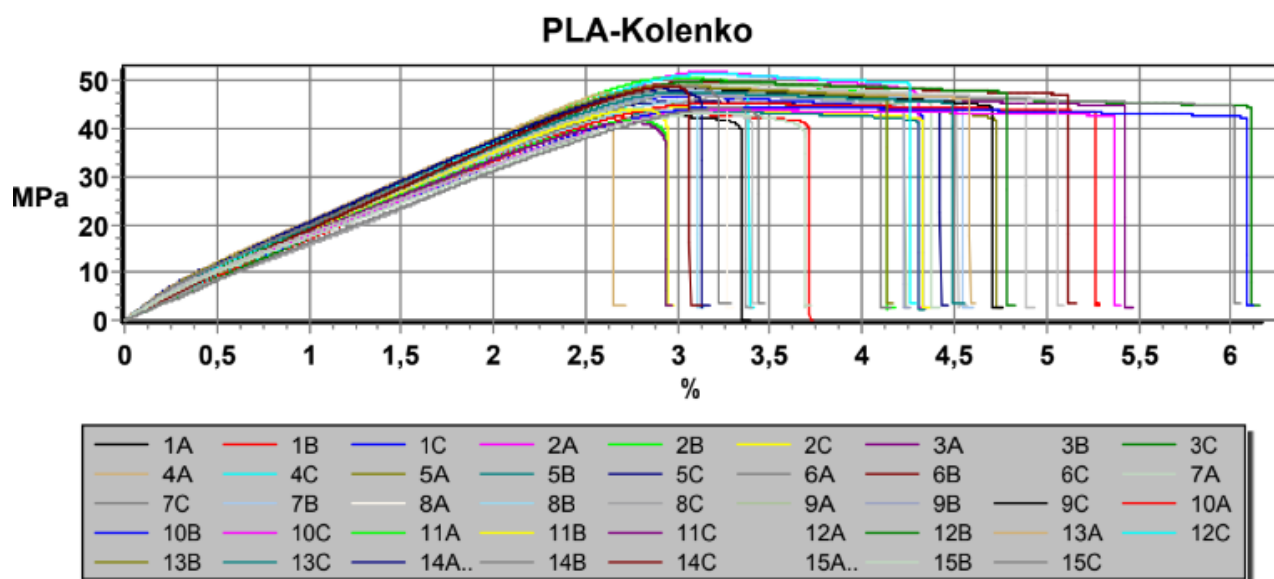
Sila kod koje dolazi do loma je sila kidanja. Slika 37 prikazuje a) epruvete (12-A, 12-B i 12-C) prije ispitivanja na kidalici, a slika b) nakon ispitivanja na kidalici. Do loma epruveta je došlo na približno istim mjestima.



Slika 37. a) epruvete prije ispitivanja i b) epruvete nakon ispitivanja na kidalici

7.4. Rezultati i diskusija

Nakon provedenog statičkog vlačnog ispitivanja dobiveni su rezultati prikazani na slici 38 koja prikazuje zbirni dijagram sa svim ucrtanim krivuljama naprezanje – istežanje. Prikazane su postignute vrijednosti vlačne čvrstoće za sve uzorke prema ISO 527 osim uzorka 4B koji je bio neuspješan zbog pogrešnog stezanja.



Slika 38. Zbirni dijagram naprezanja-istežanja

Tablica 17 prikazuje rezultate statičkog vlačnog ispitivanja.

Tablica 17. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

| | S_0 , mm ² | E , GPa | F_{max} , N | σ_y , MPa | σ_M , MPa | σ_B , MPa | ε_y , % | ε_B , % | ε_{tB} , % | ε_M , % | ε_{tB} , % |
|-----|----------------------------|--------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| 1A | 42.44 | 1.9 | 1817.04 | 4.06 | 42.82 | -0.01 | 0.21 | 3.39 | 3.39 | 0.62 | 2.87 |
| 1B | 41.98 | 2 | 1813.24 | 2.44 | 43.19 | -0.01 | 0.12 | 3.74 | 3.74 | 0.81 | 2.97 |
| 1C | 41.76 | 2.43 | 1953.14 | 5.56 | 46.77 | 2.66 | 0.23 | 4.24 | 4.35 | 1.08 | 3.01 |
| 2A | 40.94 | 2.47 | 2128.02 | 9.17 | 51.97 | 2.7 | 0.4 | 4.24 | 4.35 | 1.06 | 3.16 |
| 2B | 40.7 | 2.54 | 2066.06 | 10.08 | 50.76 | 2.63 | 0.43 | 4.08 | 4.18 | 0.97 | 2.97 |
| 2C | 40.64 | 2.41 | 1813.06 | 9.17 | 44.61 | 2.71 | 0.41 | 4.26 | 4.37 | 1.15 | 3 |
| 3A | 40.28 | 2.35 | 1904.2 | 3.22 | 47.27 | 2.67 | 0.14 | 5.35 | 5.47 | 1.07 | 3.08 |
| 3B | 39.87 | 2.33 | 1940.76 | 4.93 | 48.68 | 2.69 | 0.21 | 4.81 | 4.93 | 0.9 | 2.98 |
| 3C | 40.16 | 1.87 | 1925.6 | 5.09 | 47.94 | 3.02 | 0.29 | 5.98 | 6.16 | 0.6 | 3.16 |
| 4A | 40.64 | 2.61 | 1935.36 | 6.67 | 47.62 | 3.06 | 0.26 | 2.6 | 2.72 | 0.8 | 2.62 |
| 4B | | | | | | | | | | | |
| 4C | 42.7 | 2.03 | 2075.76 | 7.26 | 48.61 | 2.47 | 0.37 | 3.29 | 3.42 | 0.79 | 3.18 |
| 5A | 40.01 | 2.14 | 1824.58 | 5.64 | 45.61 | 2.64 | 0.27 | 4.64 | 4.76 | 0.98 | 3.1 |
| 5B | 40.55 | 2.31 | 1773.96 | 5.35 | 43.75 | 2.33 | 0.23 | 4.24 | 4.34 | 1.12 | 3.01 |
| 5C | 39.93 | 2.8 | 1826.04 | 10.4 | 45.73 | 3.03 | 0.41 | 4.36 | 4.46 | 1.41 | 3.04 |
| 6A | 40.08 | 2.7 | 1923.2 | 11.01 | 47.99 | 3.64 | 0.46 | 5.91 | 6.05 | 1.28 | 3.06 |
| 6B | 39.56 | 2.67 | 1971.06 | 7.57 | 49.82 | 3.69 | 0.29 | 5.03 | 5.17 | 1.26 | 3.13 |
| 6C | 39.94 | 2.54 | 1902.88 | 8.77 | 47.64 | 3.01 | 0.37 | 4.45 | 4.57 | 1.15 | 3.03 |
| 7A | 41.47 | 2.45 | 2053.22 | 3.71 | 49.51 | 2.8 | 0.15 | 4.3 | 4.42 | 1.22 | 3.24 |
| 7C | 41.88 | 2.53 | 2030.16 | 7.38 | 48.47 | 2.77 | 0.31 | 4.04 | 4.15 | 1.31 | 3.22 |
| 7B | 41.58 | 2.52 | 1997.52 | 8.32 | 48.05 | 2.79 | 0.36 | 4.49 | 4.6 | 1.27 | 3.18 |
| 8A | 40.88 | 2.43 | 1910.7 | 7.58 | 46.74 | 2.84 | 0.33 | 3.18 | 3.3 | 1.23 | 3.15 |
| 8B | 40.92 | 2.52 | 1869.04 | 7.36 | 45.68 | 2.84 | 0.3 | 3.03 | 3.14 | 1.19 | 3 |
| 8C | 40.9 | 1.86 | 1911.36 | 4.5 | 46.73 | 2.85 | 0.25 | 3.25 | 3.41 | 0.73 | 3.24 |
| 9A | 41.72 | 2.54 | 1981.42 | 9.26 | 47.5 | 2.79 | 0.41 | 4.15 | 4.26 | 1.22 | 3.09 |
| 9B | 41.92 | 2.53 | 1979.34 | 8.78 | 47.21 | 2.77 | 0.37 | 4.14 | 4.25 | 1.17 | 3.04 |
| 9C | 41.55 | 2.68 | 2014.92 | 12.32 | 48.49 | 2.8 | 0.55 | 4.65 | 4.76 | 1.21 | 3.02 |
| 10A | 39.68 | 2.43 | 1799 | 9.33 | 45.34 | 3.28 | 0.43 | 5.16 | 5.29 | 1.36 | 3.23 |
| 10B | 39.87 | 2.27 | 1780.62 | 6.56 | 44.66 | 3.27 | 0.3 | 5.97 | 6.12 | 1.36 | 3.32 |
| 10C | 39.81 | 2.4 | 1748.42 | 6.18 | 43.92 | 3.27 | 0.26 | 5.26 | 5.4 | 1.46 | 3.29 |
| 11A | 42.62 | 2.44 | 1781.7 | 8.93 | 41.8 | 3.06 | 0.39 | 2.83 | 2.96 | 1.04 | 2.76 |
| 11B | 42.27 | 2.38 | 1868.62 | 5.64 | 44.21 | 3.09 | 0.24 | 2.85 | 2.98 | 0.93 | 2.79 |
| 11C | 42.72 | 2.32 | 1768 | 6.83 | 41.39 | 3.05 | 0.3 | 2.84 | 2.97 | 0.97 | 2.75 |
| 12A | 42.51 | 2.47 | 2072.28 | 8.66 | 48.75 | 3.07 | 0.37 | 4.97 | 5.09 | 1.19 | 3.16 |
| 12B | 41.8 | 2.61 | 2090.88 | 8.15 | 50.03 | 3.12 | 0.33 | 4.7 | 4.83 | 1.25 | 3.17 |
| 13A | 41.6 | 2.78 | 2035.72 | 10.13 | 48.94 | 3.55 | 0.4 | 4.48 | 4.61 | 1.21 | 2.96 |

| | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|------|---------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| 12C | 41.6 | 2.51 | 2141.56 | 9.91 | 51.48 | 3.56 | 0.43 | 4.16 | 4.3 | 1.12 | 3.17 |
| 13B | 41.78 | 2.7 | 2046.04 | 8.26 | 48.98 | 3.55 | 0.32 | 4.04 | 4.17 | 1.17 | 2.98 |
| 13C | 42.21 | 2.5 | 2016.36 | 8.38 | 47.77 | 3.51 | 0.35 | 4.42 | 4.56 | 1.14 | 3.04 |
| 14A.. | 42.14 | 2.58 | 2034.36 | 10.05 | 48.28 | 2.91 | 0.42 | 3.06 | 3.18 | 1.04 | 2.92 |
| 14B | 41.88 | 2.69 | 2049.1 | 9.89 | 48.93 | 3.54 | 0.41 | 3.15 | 3.29 | 1.19 | 3.01 |
| 14C | 41.53 | 2.07 | 2038.5 | 4.08 | 49.08 | 3.19 | 0.2 | 2.97 | 3.13 | 0.58 | 2.96 |
| 15A.. | 41.49 | 2.45 | 1802.62 | 8.17 | 43.45 | 3.48 | 0.36 | 3.29 | 3.43 | 1.35 | 3.13 |
| 15B | 41.88 | 2.18 | 1813.74 | 5.94 | 43.31 | 2.93 | 0.28 | 3.59 | 3.73 | 1.19 | 3.18 |
| 15C | 41.68 | 1.67 | 1853.96 | 2.44 | 44.48 | 3.46 | 0.15 | 3.25 | 3.47 | 0.59 | 3.26 |

Oznake iz tablice:

S_0 – početna površina poprečnog presjeka epruvete, mm²

E – modul elastičnosti, GPa

F_{max} – maksimalna sila na početni poprečni presjek prema ISO 527, N

σ_y – naprezanje tečenja, MPa

σ_m – vlačna čvrstoća prema ISO 527, MPa

σ_b – naprezanje pri lomu, MPa

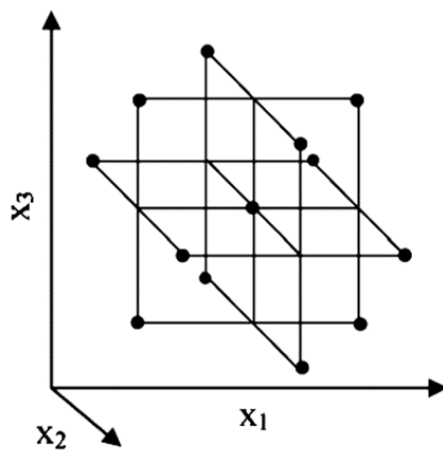
ε_y – istežanje tečenja, %

ε_B – istežanje pri lomu, %

ε_M – istežanje pri postignutoj vlačnoj čvrstoći prema ISO 527, %

Ove oznake su dobivene na uređaju, međutim naprezanje tečenja se označava s R_e ili $R_{p0,2}$, a vlačna čvrstoća s R_m .

Dobiveni rezultati statistički su obrađeni faktorskim planom pokusa pri čemu je korišteni Box-Behnken plan pokusa. Navedeni plan pokusa spada u metode odzivnih površina (eng. Response surface methodology, RSM) što znači da je dobiveni rezultat polinom višeg stupnja koji i grafički putem 3D površina prikazuje ovisnost pojedinog svojstva o ulaznim parametrima. Primjenom metodologije odzivne površine analizirani je utjecaj tri parametra (A- temperatura komore, B-temperatura mlaznice, C- debljina sloja) na mehanička svojstva 3D tiskanih PLA uzoraka. Značajnost modela je određena analizom varijance (ANOVA). Rezultati ANOVA analize su pokazani kao model i kao parametri koji opisuju primjenjivost predloženog matematičkog modela. Taj plan pokusa je izabran radi reduciranja broja ispitivanja jer bi kod punog faktorskog plana pokusa koji uključuje tri faktora koji se mijenjaju na tri razine trebali imati 3^3 pokusa tj. 27 pokusa. Box -Behnkenov plan pokusa ne sadrži kombinaciju pri kojoj su svi promatrani faktori istovremeno na najvišoj ili najnižoj vrijednosti (nema vrhova kocke) već je broj pokusa reduciran, slika 39 ispod.



Slika 39. Prikaz gdje nema vrhova kocke

Stoga je ovdje matematički izraz za broj točaka, tj. broj pokusa je :

$$N=2k(k-1) + ncp$$

Gdje je

k – broj faktora

n_{cp} – broj centralnih točaka (broj ponavljanja centralne točke)

Za broj faktora $k = 3$ i broj centralnih točaka $n_{cp} = 3$ slijedi broj pokusa $N = 15$.

Za vlačno ispitivanje napravljeno je 15 pokusa. Kako bi bili usklađeni s normama potrebno je minimalno 3 epruvete za svaki pokus. Tablica 18 prikazuje rezultate analize varijance.

Tablica 18. Rezultati analize varijance (ANOVA analiza)

| | Suma kvadrata odstupanja <i>Sum of Squares</i> | Stupnjevi slobode df <i>Degress of freedom</i> | Srednji kvadrat odstupanja <i>Mean Square</i> | Varijabla F <i>F Value</i> | p-vrijednost <i>p-value</i> | Značajnost |
|--|---|--|--|-------------------------------|--------------------------------|---------------|
| Model/ Model | 8,52 | 3 | 2,84 | 15,79 | 0,0003 | značajno |
| A– Temperatura komore | 0,3872 | 1 | 0,3872 | 2,15 | 0,1703 | |
| B– Temperatura mlaznice | 1,99 | 1 | 1,99 | 11,07 | 0,0068 | |
| C– Debljina sloja | 6,14 | 1 | 6,14 | 34,16 | 0,0001 | |
| Ostatak Residual | 1,98 | 11 | 0,1798 | | | |
| Odstupanje od modela Lack of Fit | 1,81 | 9 | 0,2008 | 2,36 | 0,3334 | Nije značajno |
| Pogreška Pure Error | 0,1705 | 2 | 0,0852 | | | |
| Ukupno Cor Total | 10,50 | 14 | | | | |

Ova tablica testira sveukupnu značajnost modela. Da bi model bio značajan, p-vrijednost modela mora iznositi manje od 0,05. F vrijednost modela 15.79 ukazuje na značajnost modela. F vrijednost veličine odstupanja od modela 2,36 znači da ova veličina nije značajna u odnosu na čistu pogrešku. F vrijednost je faktor koji pokazuje koliko je jedna varijanca veća od druge. S obzirom na to da odstupanje od modela nije značajno, nastavljena je analiza.

Tablica 19 prikazuje veličine koje opisuju kvalitetu izrađenog matematičkog modela.

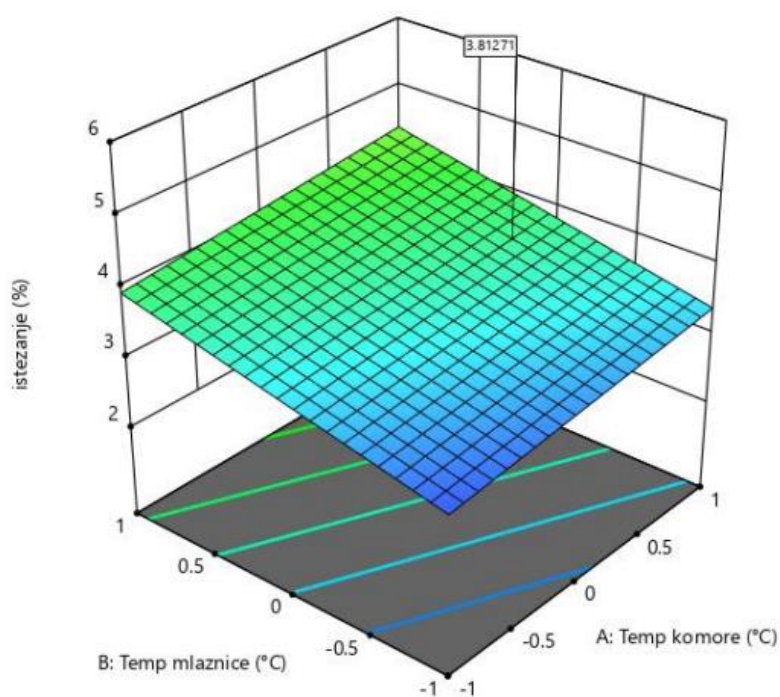
Tablica 19. Pregled statističkih podataka modela

| | | | |
|--|--------|---|---------|
| Standardno odstupanje <i>Standard Deviation</i> | 0.4241 | R ² | 0.8116 |
| Aritmetička sredina <i>Mean</i> | 4,08 | Prilagođeni R ² Adjusted R² | 0,7602 |
| Koeficijent determiniranosti <i>Coefficient of determination</i> <i>C.V. %</i> | 10,38 | Predviđeni R ² Predicted R² | 0,6131 |
| | | Adeq. Precision | 12.5582 |

Regresijski model sa stvarnim vrijednostima članova modela dan je sljedećim izrazom:

$$\text{Istezanje} = 4.0847 + 0.22 \text{ Temperatura komore} + 0.49875 \text{ Temperatura mlaznice} + 0.87625 \text{ Debljina sloja}$$

Sve vrijednosti koeficijenta determinacije su visoke, što je dobro. Slika 40 prikazuje 3D prikaz modela ovisnosti istezanja o parametrima 3D ispisa A: Temperatura komore i B: Temperatura mlaznice. Na temelju ovoga možemo zaključiti da na istezanje utječe temperatura mlaznice i visina spoja. Temperatura komore značajno ne utječe.



Slika 40. 3D prikaz modela ovisnosti istezanja o parametrima 3D ispisa (temperatura komore i temperatura mlaznice)

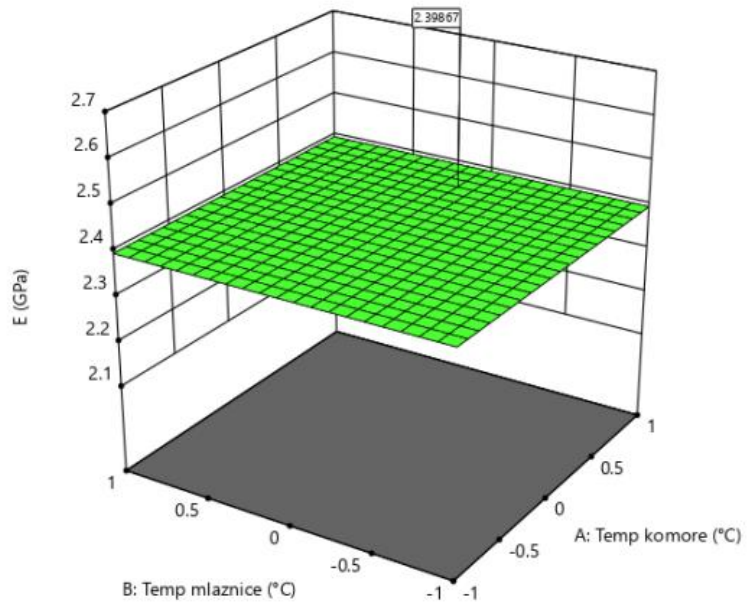
Ostali modeli nisu značajni, što znači da se ne može govoriti o tome da pojedini faktori značajno utječu na promatranu veličinu. To možemo vidjeti iz rezultata koji se odnose na modul elastičnosti u tablici 20. Istim bojama su označene slične

izmjerene vrijednosti modula za različite razine faktora. Vidi se da su npr. vrijednosti 2,37 MPa i 2,38 MPa izmjerene za potpuno različite razine faktora (50, 210, 0,3 i 30, 200, 0,2). Isto vrijedi i za druge boje. U tom slučaju ne može se govoriti o značajnom utjecaju pojedinih faktora što analiza i pokazuje. Drugim riječima slučajno rasipanje rezultata je veće nego rasipanje zbog promjene razine pojedinog faktora.

Tablica 20. Utjecaj parametara na modul elastičnosti

| Razine faktora | | | Modul elastičnosti, GPa | Razine faktora | | |
|----------------|----|----|-------------------------|----------------|-----|-----|
| A | B | C | | A | B | C |
| 0 | 0 | 0 | 2,11 | 40 | 210 | 0,2 |
| 0 | 1 | -1 | 2,47 | 40 | 220 | 0,1 |
| 0 | 1 | 1 | 2,18 | 40 | 220 | 0,3 |
| 1 | 0 | -1 | 2,32 | 50 | 210 | 0,2 |
| -1 | 0 | 1 | 2,42 | 30 | 210 | 0,2 |
| 0 | -1 | 1 | 2,64 | 40 | 200 | 0,3 |
| 0 | 0 | 0 | 2,50 | 40 | 210 | 0,2 |
| 0 | -1 | -1 | 2,27 | 40 | 200 | 0,1 |
| 0 | 0 | 0 | 2,58 | 40 | 210 | 0,2 |
| 1 | 0 | 1 | 2,37 | 50 | 210 | 0,3 |
| -1 | -1 | 0 | 2,38 | 30 | 200 | 0,2 |
| 1 | 1 | 0 | 2,53 | 50 | 220 | 0,2 |
| -1 | 1 | 0 | 2,66 | 30 | 220 | 0,2 |
| -1 | 0 | -1 | 2,45 | 30 | 210 | 0,1 |
| 1 | -1 | 0 | 2,10 | 50 | 200 | 0,2 |

Jednako je za granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću. Modeli nisu značajni. Slika 41. prikazuje 3D model ovisnosti modula elastičnosti o variranim parametrima.



Slika 41. 3D prikaz modela ovisnosti modula elastičnosti o temperaturi komore i temperaturi mlaznice

8. ZAKLJUČAK

Aditivne tehnologije sve su popularnije zbog brzog i jednostavnog postupka izrade prototipova, funkcionalnih dijelova i alata. Prednosti ovih tehnologija su izrada proizvoda kompleksnije geometrije, brza izrada prototipova i kalupa, manji gubitak materijala, mogućnost korištenja različitih materijala dok su nedostaci korištenje nekih materijala koji su štetni po zdravlje, nije moguće izraditi proizvode visoke točnosti i traženih tolerancija, naknadna obrada proizvoda, visoke cijene i ograničenje materijala itd. Neke od tehnologija koje se koriste su stereolitografija, FDM, selektivno lasersko sinteriranje, selektivno lasersko taljenje, EBM i Polyjet. FDM jedan je od najviše korištenih postupaka komercijalne tehnologije 3D ispisa danas, a korištenjem bio-razgradivog polimera kao što je PLA može se zamijeniti upotreba materijala koji nisu ekološki. Mehanička svojstva konačnog proizvoda ovise o parametrima 3D ispisa kao što su brzina tiskanja, orijentacija, temperatura mlaznice, gustoća ispune, debljina sloja itd.

U ovom radu ispitivao se utjecaj parametara 3D ispisa (temperatura komore, temperatura polimera na izlazu iz mlaznice te debljina sloja) na mehanička svojstva uzorka. Izrađeni su ispitni uzorci od PLA materijala FDM postupkom prema normama HRN EN ISO 527-1:2012 i HRN EN ISO 527-2:2012. Zatim je provedeno statičko vlačno ispitivanje na kidalici proizvođača Hegewald & Peschke. Provedena je ANOVA analiza i dobiveni rezultati su analizirani.

Na temelju dobivenih i analiziranih rezultata statičkog vlačnog ispitivanja pokazalo se da se pri variranju nabrojanih parametara ne može govoriti o tome da imaju znatan utjecaj na modul elastičnosti, granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću. Iz toga se vidi da se mogu mijenjati ovi parametri po potrebi bez znatnog utjecaja ova mehanička svojstva materijala.

9. LITERATURA

[1] *History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented?*

Link: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>

Datum pristupa: 12.10.2022.

[2] *Aditivna proizvodnja*

Link: <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=69979>

Datum pristupa: 08.10.2022

[3] Bhagia S., Bornani K., Agarwal R., Satlewal A., Jaroslav Durković J., Lagana R., Bhagia M., Geun Yoo C., Zhao X., Kunci V., Pua Y., Ozcani S., Ragauskas A.; *Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries*; 2021

[4] Corapia D., Morettina G., Pascoletta G., Zitelli Z.; *Characterization of a Polylactic acid (PLA) produced by Fused Deposition Modeling (FDM) technology*; 2019

[5] Manfredi D., *Additive Manufacturing, EPMA Powder Metallurgy Summer School*; 15-19; 2019

[6] Pilipović A.: *Aditivna proizvodnja, Polimeri*; 2012

[7] Krznar N., Šercer M., Pilipović A.; *Tehničke znanosti: Razvoj i izrada polimernog proizvoda pomoću taložnog očvršćivanja*

[8] Godec D.; Šercer M.; *Aditivna proizvodnja*; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015.

[9] *3D Printing and Space Exploration: How NASA Will Use Additive Manufacturing*

Link: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/stories/blog/35871>

Datum pristupa: 08.10.2022.

[10] Liou F.; *Rapid Prototyping and Engineering Applications: A Toolbox for Prototype Development*; 2008

[11] *Smjernice za odabir aditivne tehnologije za izradu polimernih dijelova*

Link: <https://www.linkedin.com/pulse/smjernice-za-odabir-aditivne-tehnologije-izradu-amir-secerkadic>

Datum pristupa: 12.10.2022.

[12] *3D printanje*

Link: <https://webgradnja.hr/clanci/3d-printanje/836>

Datum pristupa: 11.10.2022.

[13] Pilipović, A.: *Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernog prototipa*; 201

[14] Godec, Damir; Šercer Mladen; *Brza proizvodnja kalupa*; 2007

[15] Appuhamillage G.A.; *New 3D printable polymeric materials for Fused Filament Fabrication (FFF)*. Virginia Polytechnic Institute and State University; 2018.

[16] What Is FDM 3D Printing?

Link: <https://www.3dbeginners.com/what-is-fdm-3d-printing/>

Datum pristupa: 12.10.2022.

[17] Singh R., Davim P: *Additive Manufacturing Applications and Innovations*; 2018

[18] Patil P. , Singh D., Raykar S., Bhamu J.; *Multi-objective optimization of process parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) for printing Polylactic Acid (PLA) polymer components*; 2021

[19] Fused Deposition Modeling: Manufacturing technology with many advantages

Link: <https://www.jellypipe.com/en/blog-news/fdm-additive-manufacturing-technology-with-advantages/>

Datum pristupa: 12.10.2022.

[20] Oporaba plastičnih materijala i ekstrudiranje

Link: http://replast3d.com/files/materials/oporaba/Replast_3pred.pdf

Datum pristupa: 06.10.2022.

[21] Wohlers T.; *Wohlers Report 2016*, Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report, Wohlers Associates, 2016

[22] SpaceX Taking 3D Printing to the Final Frontier

Link: <https://www.space.com/26899-spacex-3d-printing-rocket-engines.html>

Datum pristupa: 20.10.2022.

[23] Ghanbarzadeh B., Almasi H.; Biodegradable Polymersu "Biodegradation - Life of Science"; ed. Chamy R., Rosenkranz F.; lipanj 2013.

[24] A. Steinbüchel, Y. Doi (ur.), Biopolymers: Polyesters III – Applications and Commercial Product, 4, Wiley–VCH, Weinheim (2002) str. 129-177.

[25] R. Auras, L. Lim, S. Selke, H. Tsuji (ur.), Poly(lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing anad Applications, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, (2010) str. 3-5, 11-16, 28-37, 64-65, 69-80.

[26] PLA – Poly Lactic Acid

Link: <https://3d-printing-expert.com/pla-poly-lactic-acid/>

Datum pristupa:12.10.2022.

[27] Overview of materials for Polylactic Acid (PLA) Biopolymer

Link:<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab96a4c0655c4018a8785ac4031b9278>

Datum pristupa:08.10.2022.

[28] Hamad, K., Kaseem, M., Yang, H., W., Deri, F., Ko, Y., G., Properties and medical applications of polylactic acid: a review, Vol 9. No 5., November 2015, str. 435-455.

[29] MAKERBOT METHOD X 3D PRINTER

Link: <https://store.makerbot.com/3d-printers/methods/method-x#:~:text=The%20MakerBot%20METHOD%20X%20is,strength%20unparalleled%20in%20its%20class>

Datum pristupa: 12.10.2022.

[30] Plastics - Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics (ISO 527-2:2012)

[31] Universal testing machine

Link: <https://www.directindustry.com/prod/hegewald-peschke-mess-und-prueftechnik-gmbh/product-25902-2201047.html>

Datum pristupa: 12.10.2022.

10. POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Tijek konvencionalnih (a) i aditivnih (b) postupaka proizvodnje [5]..... | 2 |
| Slika 2. Faze izrade AM postupcima [7] | 3 |
| Slika 3. Slojevita izrada/proizvodnja [8]..... | 4 |
| Slika 4. 3D tiskani proizvod na Međunarodnoj svemirskoj stanici [9] | 4 |
| Slika 5. Usporedba vremena izrade tvorevine između CNC glodanja i Polyjet postupka [10] | 5 |
| Slika 6. Dijelovi SLS uređaja [12] | 7 |
| Slika 7. Polyjet postupak [14] | 9 |
| Slika 8. Dijelovi SLA uređaja [14] | 10 |
| Slika 9. Postupak EBM [14] | 12 |
| Slika 10. Prikaz SLM postupka proizvodnje [15]..... | 14 |
| Slika 11. Dijelovi FDM uređaja [16] | 16 |
| Slika 12. Koraci kod FDM postupka [18] | 17 |
| Slika 13. 3D ispis FDM tehnologijom [19] | 19 |
| Slika 14. Aditivna proizvodnja - područja primjene [21] | 21 |
| Slika 15. 3D tiskani "The SuperDraco" motor tvrtke SpaceX [22] | 22 |
| Slika 16. Kemijska struktura PLA [24] | 24 |
| Slika 17. Životni ciklus i postupci sinteze PLA [25] | 25 |
| Slika 18. Vijak i matica od PLA [26]..... | 25 |
| Slika 19. Ugrađena pločica od PLA/BMP kompozita [28] | 27 |
| Slika 20. Uređaj Marketbot Method X [29] | 33 |
| Slika 21. Oblik i dimenzije epruvete prema normi HRN EN ISO 527-2 [30] | 34 |
| Slika 22. Dimenzije epruvete prema normi HRN EN ISO 527-2[30] | 34 |
| Slika 23. Prikaz epruvete i prilagođavanje parametara | 36 |
| Slika 24. Podešavanje parametara 3D ispisa..... | 37 |
| Slika 25. Prikaz epruvete u "slicer" programu..... | 38 |
| Slika 26. Orijehtacija epruvete | 38 |
| Slika 27. Prikaz slojeva od kojih će se sastojati izradak/epruveta | 39 |
| Slika 28. FDM uređaj korišteni za ispis PLA uzoraka..... | 40 |
| Slika 29. a) i b) PLA materijal korišteni za 3D ispis epruveta i b) prikaz namotane žice PLA smještene na FDM uređaj | 41 |
| Slika 30. a) ekstruderi b) mlaznica c) radna podloga..... | 42 |
| Slika 31. Prva faza 3D ispisa - izrada potporne strukture | 43 |

| | |
|--|----|
| Slika 32. Druga faza - tijekom 3D ispisa | 43 |
| Slika 33. Završna faza - gotova epruveta | 44 |
| Slika 34. Kidalica proizvođača Hegewald &Peschke [31] | 45 |
| Slika 35. a) i b) ispitivanje epruveta na kidalici | 46 |
| Slika 36. Dijagram napreznja-istezanja za PLA uzorke 12-A, 12-B i 12-C | 47 |
| Slika 37. a) epruvete prije ispitivanja i b) epruvete nakon ispitivanja na kidalici..... | 48 |
| Slika 38. Zbirni dijagram napreznja-istezanja..... | 49 |
| Slika 39. Prikaz gdje nema vrhova kocke | 52 |
| Slika 40. 3D prikaz modela ovisnosti istezanja o parametrima 3D ispisa (temperatura komore i temperatura mlaznice) | 55 |
| Slika 41. 3D prikaz modela ovisnosti modula elastičnosti o temperaturi komore i temperaturi mlaznice | 57 |

11. POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Podjela aditivnih postupaka [11] | 6 |
| Tablica 2. Prednosti i nedostaci SLS postupka [8] | 8 |
| Tablica 3. Prednosti i nedostaci Polyjet postupka [8] | 9 |
| Tablica 4. Prednosti i nedostaci SLA postupka [8] | 11 |
| Tablica 5. Prednosti i nedostaci EBM postupka [8] | 13 |
| Tablica 6. Prednosti i nedostaci SLM postupka proizvodnje [8] | 15 |
| Tablica 7. Materijali koji se upotrebljavaju kod FDM tehnologije [17] | 17 |
| Tablica 8. Prednosti i nedostaci FDM postupka [8] | 18 |
| Tablica 9. Najviše korišteni filamenti za FDM postupak [20] | 19 |
| Tablica 10. Shematski prikaz podjele bio-razgradivih polimera s obzirom na podrijetlo [23] | 23 |
| Tablica 11. Pregled svojstava PLA [27] | 26 |
| Tablica 12. Usporedba nekih mehaničkih svojstava parametara PLA s PS i PET [27] | 27 |
| Tablica 13. Prikaz faktora koji su se mijenjali na tri razine | 31 |
| Tablica 14. Kombinacije faktora prema kojima su izrađeni uzorci | 32 |
| Tablica 15. Kombinacije parametara 3D tiskanja | 35 |
| Tablica 16. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja za uzorke 12-A, 12-B i 12-C | 47 |
| Tablica 17. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja | 50 |
| Tablica 18. Rezultati analize varijance (ANOVA analize) | 53 |
| Tablica 19. Pregled statističkih podataka modela | 54 |
| Tablica 20. Utjecaj parametara na modul elastičnosti | 56 |

12. PRILOZI

test report

Primjer kako upisati novi opis

machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

shortname | **name**
So | calculated area
E | Modulus of elasticity
Fmax | Maximum force (global)
y | tensile stress at yield
M | tensile strength (ISO 527)
B | tensile stress at break (ISO 527)

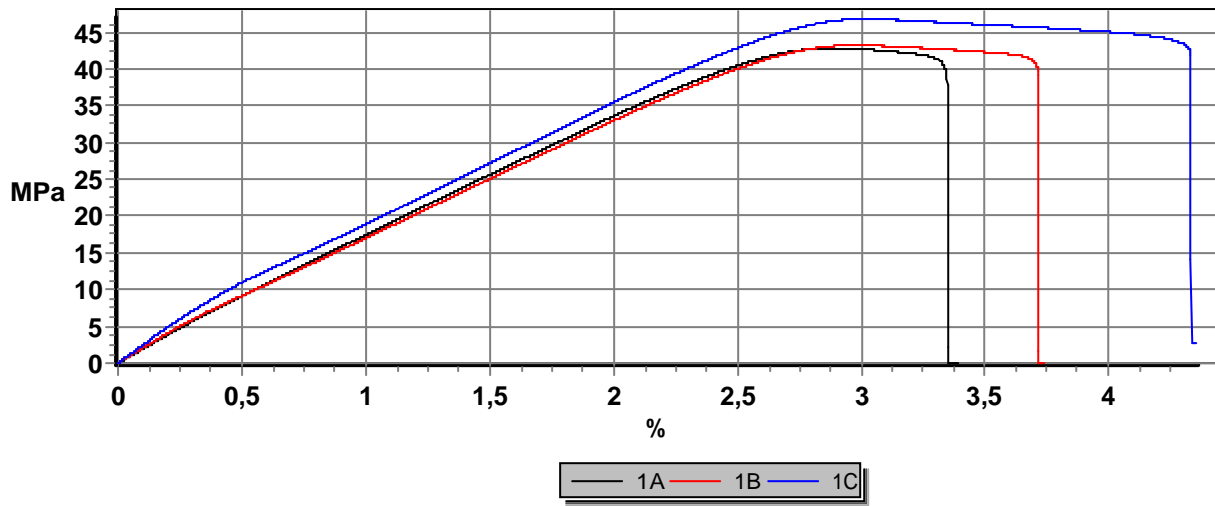
results PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1A | 42,44 | 1,90 | 1817,04 | 4,06 | 42,82 | -0,01 | 0,21 | 3,39 | 3,39 | 0,62 | 2,87 |
| 1B | 41,98 | 2,00 | 1813,24 | 2,44 | 43,19 | -0,01 | 0,12 | 3,74 | 3,74 | 0,81 | 2,97 |
| 1C | 41,76 | 2,43 | 1953,14 | 5,56 | 46,77 | 2,66 | 0,23 | 4,24 | 4,35 | 1,08 | 3,01 |

Statistics PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|

PLA-Kolenko



test report

Primjer kako upisati novi opis

machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

shortname | **name**
So | calculated area
E | Modulus of elasticity
Fmax | Maximum force (global)
y | tensile stress at yield
M | tensile strength (ISO 527)
B | tensile stress at break (ISO 527)

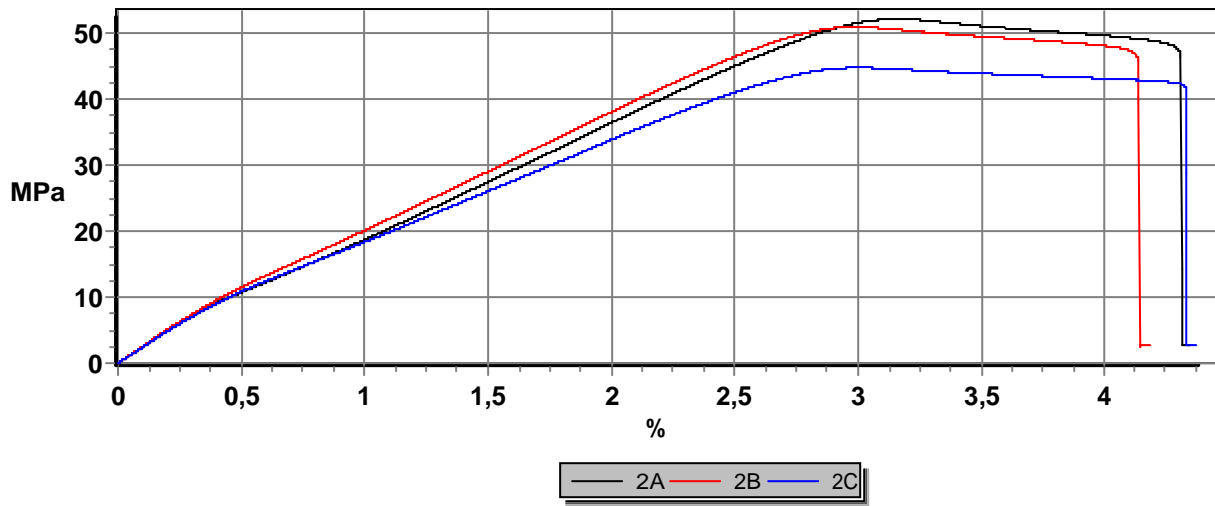
results PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 2A | 40,94 | 2,47 | 2128,02 | 9,17 | 51,97 | 2,70 | 0,40 | 4,24 | 4,35 | 1,06 | 3,16 |
| 2B | 40,70 | 2,54 | 2066,06 | 10,08 | 50,76 | 2,63 | 0,43 | 4,08 | 4,18 | 0,97 | 2,97 |
| 2C | 40,64 | 2,41 | 1813,06 | 9,17 | 44,61 | 2,71 | 0,41 | 4,26 | 4,37 | 1,15 | 3,00 |

Statistics PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|

PLA-Kolenko



test report

Primjer kako upisati novi opis

machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

shortname | **name**
So | calculated area
E | Modulus of elasticity
Fmax | Maximum force (global)
y | tensile stress at yield
M | tensile strength (ISO 527)
B | tensile stress at break (ISO 527)

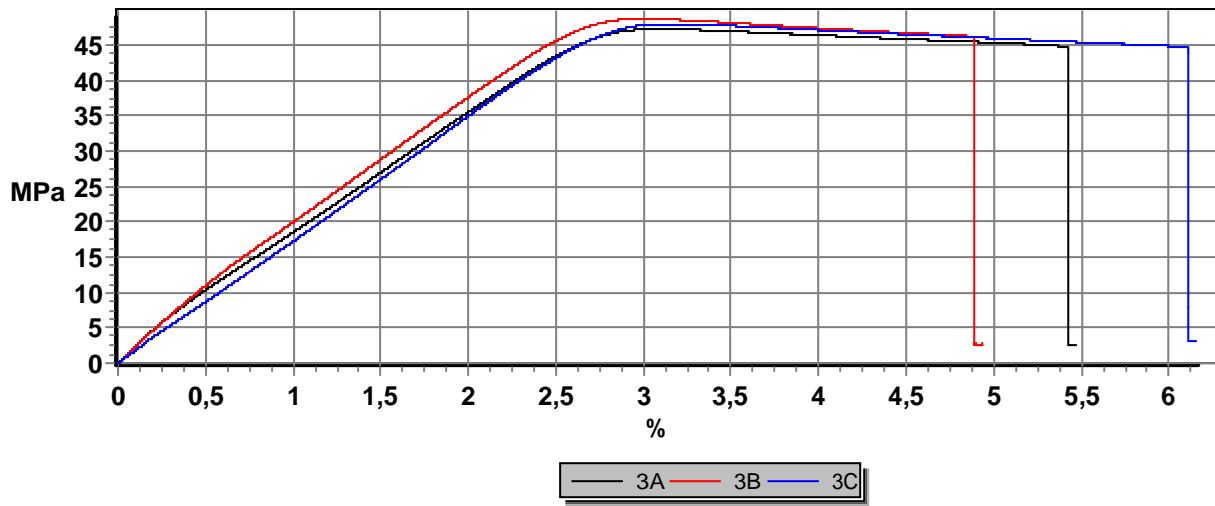
results PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 3A | 40,28 | 2,35 | 1904,20 | 3,22 | 47,27 | 2,67 | 0,14 | 5,35 | 5,47 | 1,07 | 3,08 |
| 3B | 39,87 | 2,33 | 1940,76 | 4,93 | 48,68 | 2,69 | 0,21 | 4,81 | 4,93 | 0,90 | 2,98 |
| 3C | 40,16 | 1,87 | 1925,60 | 5,09 | 47,94 | 3,02 | 0,29 | 5,98 | 6,16 | 0,60 | 3,16 |

Statistics PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|

PLA-Kolenko



test report

Primjer kako upisati novi opis

machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

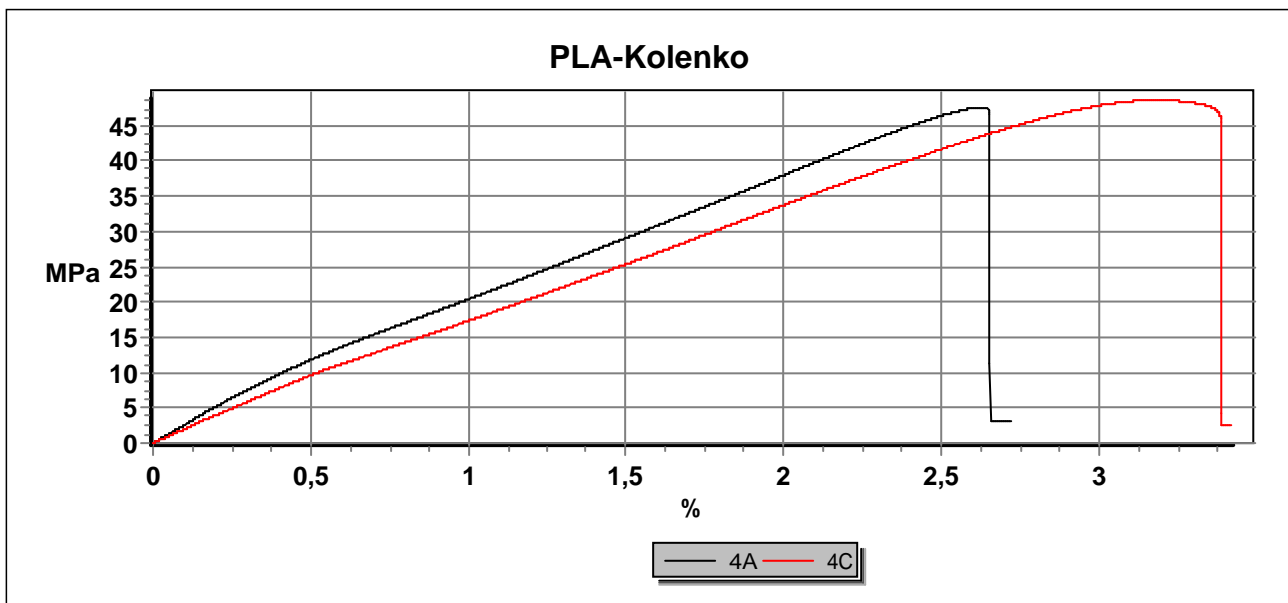
| shortname | name |
|-----------|-----------------------------------|
| So | calculated area |
| E | Modulus of elasticity |
| Fmax | Maximum force (global) |
| y | tensile stress at yield |
| M | tensile strength (ISO 527) |
| B | tensile stress at break (ISO 527) |

results PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|-----------------------|---------|----------|---------|---------|---------|-------|-------|--------|-------|--------|
| 4A | 40,64 | 2,61 | 1935,36 | 6,67 | 47,62 | 3,06 | 0,26 | 2,60 | 2,72 | 0,80 | 2,62 |
| 4C | 42,70 | 2,03 | 2075,76 | 7,26 | 48,61 | 2,47 | 0,37 | 3,29 | 3,42 | 0,79 | 3,18 |

Statistics PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|-----------------------|---------|----------|---------|---------|---------|-------|-------|--------|-------|--------|
|------|-----------------------|---------|----------|---------|---------|---------|-------|-------|--------|-------|--------|



test report

Primjer kako upisati novi opis

machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

shortname | **name**
So | calculated area
E | Modulus of elasticity
Fmax | Maximum force (global)
y | tensile stress at yield
M | tensile strength (ISO 527)
B | tensile stress at break (ISO 527)

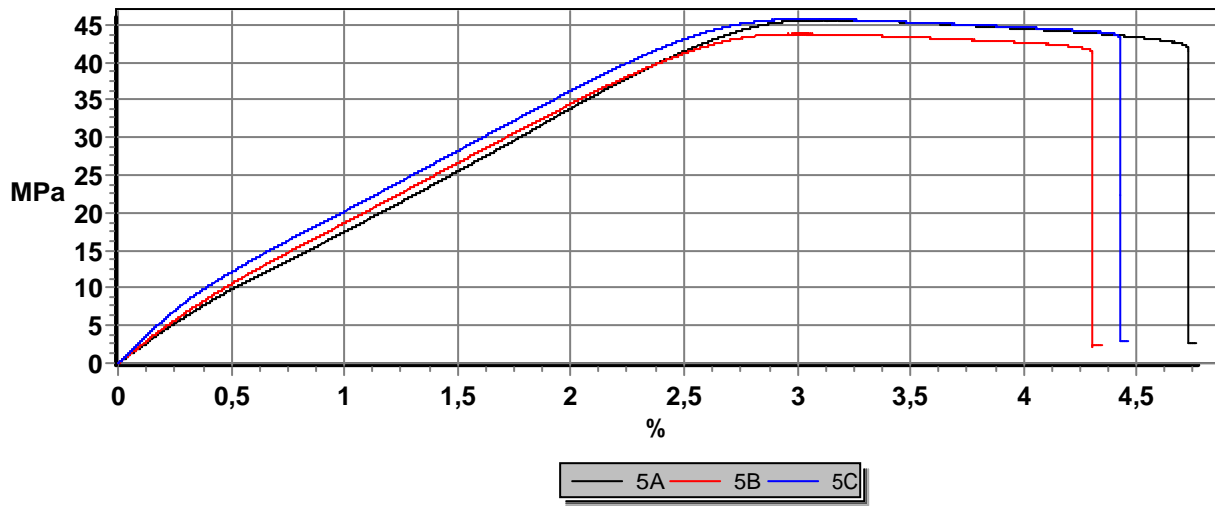
results PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 5A | 40,01 | 2,14 | 1824,58 | 5,64 | 45,61 | 2,64 | 0,27 | 4,64 | 4,76 | 0,98 | 3,10 |
| 5B | 40,55 | 2,31 | 1773,96 | 5,35 | 43,75 | 2,33 | 0,23 | 4,24 | 4,34 | 1,12 | 3,01 |
| 5C | 39,93 | 2,80 | 1826,04 | 10,40 | 45,73 | 3,03 | 0,41 | 4,36 | 4,46 | 1,41 | 3,04 |

Statistics PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|

PLA-Kolenko



test report

Primjer kako upisati novi opis

machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

shortname | **name**
So | calculated area
E | Modulus of elasticity
Fmax | Maximum force (global)
y | tensile stress at yield
M | tensile strength (ISO 527)
B | tensile stress at break (ISO 527)

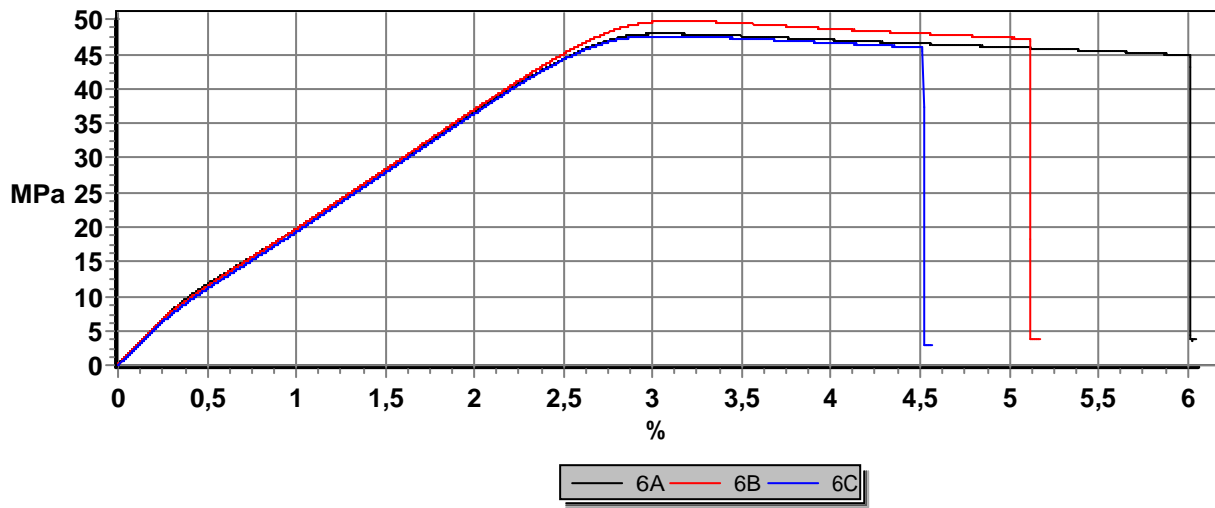
results PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 6A | 40,08 | 2,70 | 1923,20 | 11,01 | 47,99 | 3,64 | 0,46 | 5,91 | 6,05 | 1,28 | 3,06 |
| 6B | 39,56 | 2,67 | 1971,06 | 7,57 | 49,82 | 3,69 | 0,29 | 5,03 | 5,17 | 1,26 | 3,13 |
| 6C | 39,94 | 2,54 | 1902,88 | 8,77 | 47,64 | 3,01 | 0,37 | 4,45 | 4,57 | 1,15 | 3,03 |

Statistics PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|

PLA-Kolenko



test report

Primjer kako upisati novi opis

machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

shortname | **name**
So | calculated area
E | Modulus of elasticity
Fmax | Maximum force (global)
y | tensile stress at yield
M | tensile strength (ISO 527)
B | tensile stress at break (ISO 527)

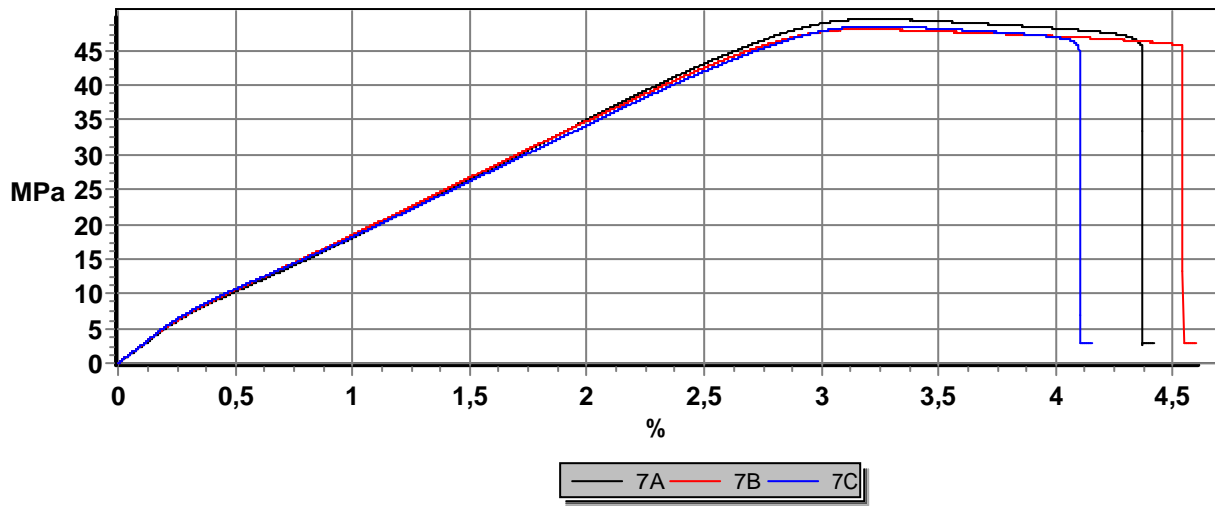
results PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 7A | 41,47 | 2,45 | 2053,22 | 3,71 | 49,51 | 2,80 | 0,15 | 4,30 | 4,42 | 1,22 | 3,24 |
| 7B | 41,58 | 2,52 | 1997,52 | 8,32 | 48,05 | 2,79 | 0,36 | 4,49 | 4,60 | 1,27 | 3,18 |
| 7C | 41,88 | 2,53 | 2030,16 | 7,38 | 48,47 | 2,77 | 0,31 | 4,04 | 4,15 | 1,31 | 3,22 |

Statistics PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|

PLA-Kolenko



test report

Primjer kako upisati novi opis

machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

shortname | **name**
So | calculated area
E | Modulus of elasticity
Fmax | Maximum force (global)
y | tensile stress at yield
M | tensile strength (ISO 527)
B | tensile stress at break (ISO 527)

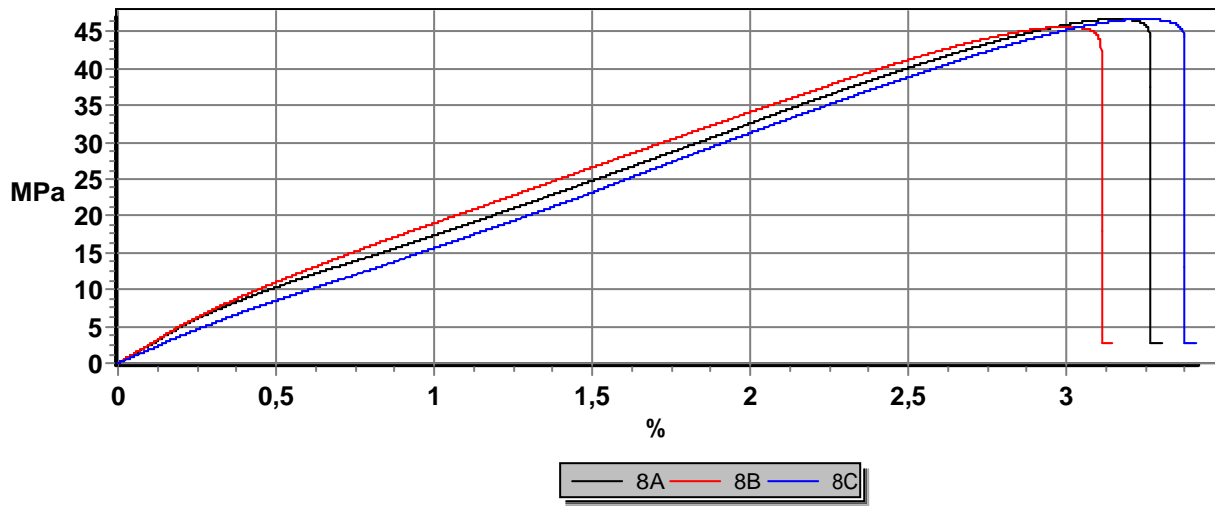
results PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 8A | 40,88 | 2,43 | 1910,70 | 7,58 | 46,74 | 2,84 | 0,33 | 3,18 | 3,30 | 1,23 | 3,15 |
| 8B | 40,92 | 2,52 | 1869,04 | 7,36 | 45,68 | 2,84 | 0,30 | 3,03 | 3,14 | 1,19 | 3,00 |
| 8C | 40,90 | 1,86 | 1911,36 | 4,50 | 46,73 | 2,85 | 0,25 | 3,25 | 3,41 | 0,73 | 3,24 |

Statistics PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|

PLA-Kolenko



test report

Primjer kako upisati novi opis

machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

shortname | **name**
So | calculated area
E | Modulus of elasticity
Fmax | Maximum force (global)
y | tensile stress at yield
M | tensile strength (ISO 527)
B | tensile stress at break (ISO 527)

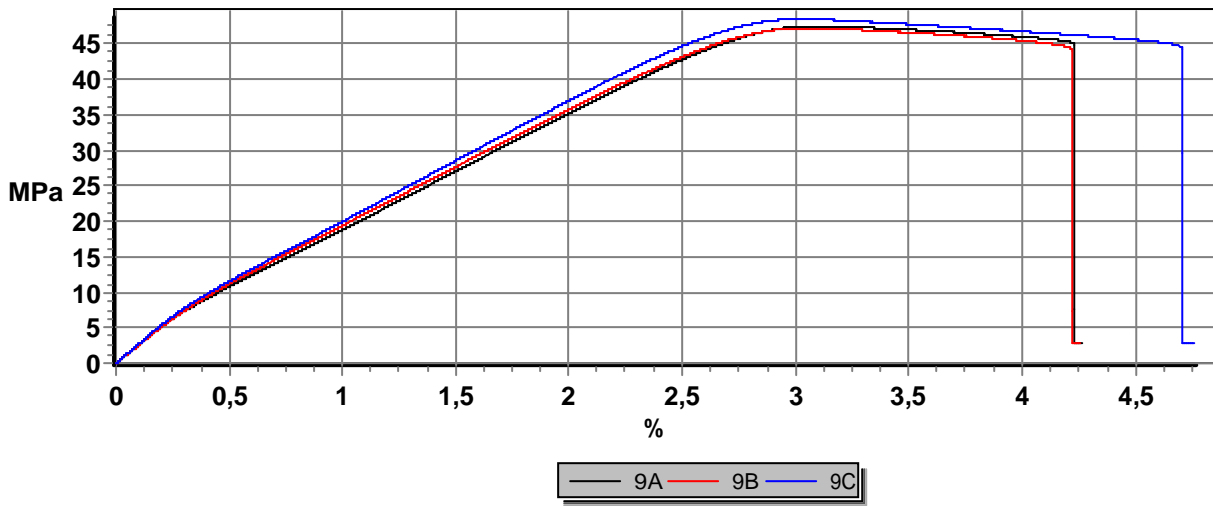
results PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 9A | 41,72 | 2,54 | 1981,42 | 9,26 | 47,50 | 2,79 | 0,41 | 4,15 | 4,26 | 1,22 | 3,09 |
| 9B | 41,92 | 2,53 | 1979,34 | 8,78 | 47,21 | 2,77 | 0,37 | 4,14 | 4,25 | 1,17 | 3,04 |
| 9C | 41,55 | 2,68 | 2014,92 | 12,32 | 48,49 | 2,80 | 0,55 | 4,65 | 4,76 | 1,21 | 3,02 |

Statistics PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|

PLA-Kolenko



test report

Primjer kako upisati novi opis

machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

shortname | **name**
So | calculated area
E | Modulus of elasticity
Fmax | Maximum force (global)
y | tensile stress at yield
M | tensile strength (ISO 527)
B | tensile stress at break (ISO 527)

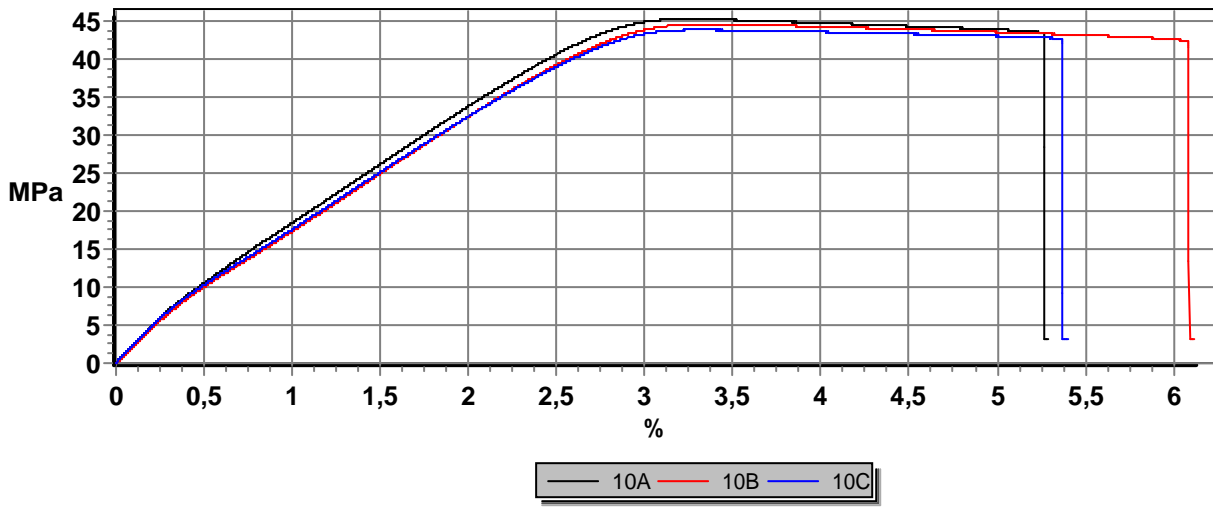
results PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 10A | 39,68 | 2,43 | 1799,00 | 9,33 | 45,34 | 3,28 | 0,43 | 5,16 | 5,29 | 1,36 | 3,23 |
| 10B | 39,87 | 2,27 | 1780,62 | 6,56 | 44,66 | 3,27 | 0,30 | 5,97 | 6,12 | 1,36 | 3,32 |
| 10C | 39,81 | 2,40 | 1748,42 | 6,18 | 43,92 | 3,27 | 0,26 | 5,26 | 5,40 | 1,46 | 3,29 |

Statistics PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|

PLA-Kolenko



test report

Primjer kako upisati novi opis

machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

shortname | **name**
So | calculated area
E | Modulus of elasticity
Fmax | Maximum force (global)
y | tensile stress at yield
M | tensile strength (ISO 527)
B | tensile stress at break (ISO 527)

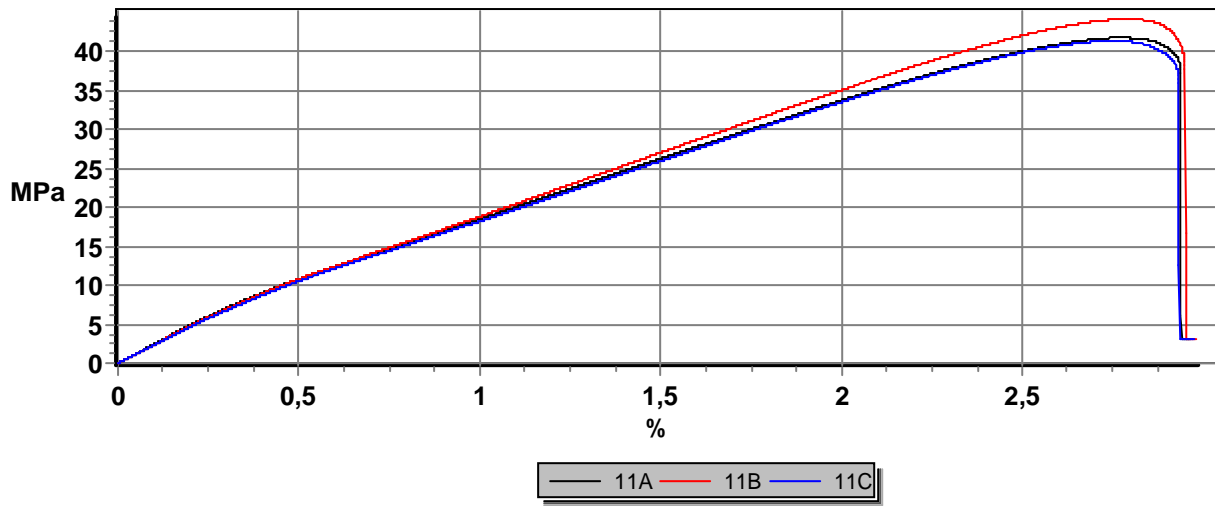
results PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 11A | 42,62 | 2,44 | 1781,70 | 8,93 | 41,80 | 3,06 | 0,39 | 2,83 | 2,96 | 1,04 | 2,76 |
| 11B | 42,27 | 2,38 | 1868,62 | 5,64 | 44,21 | 3,09 | 0,24 | 2,85 | 2,98 | 0,93 | 2,79 |
| 11C | 42,72 | 2,32 | 1768,00 | 6,83 | 41,39 | 3,05 | 0,30 | 2,84 | 2,97 | 0,97 | 2,75 |

Statistics PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|

PLA-Kolenko



test report

Primjer kako upisati novi opis

machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

shortname | **name**
So | calculated area
E | Modulus of elasticity
Fmax | Maximum force (global)
y | tensile stress at yield
M | tensile strength (ISO 527)
B | tensile stress at break (ISO 527)

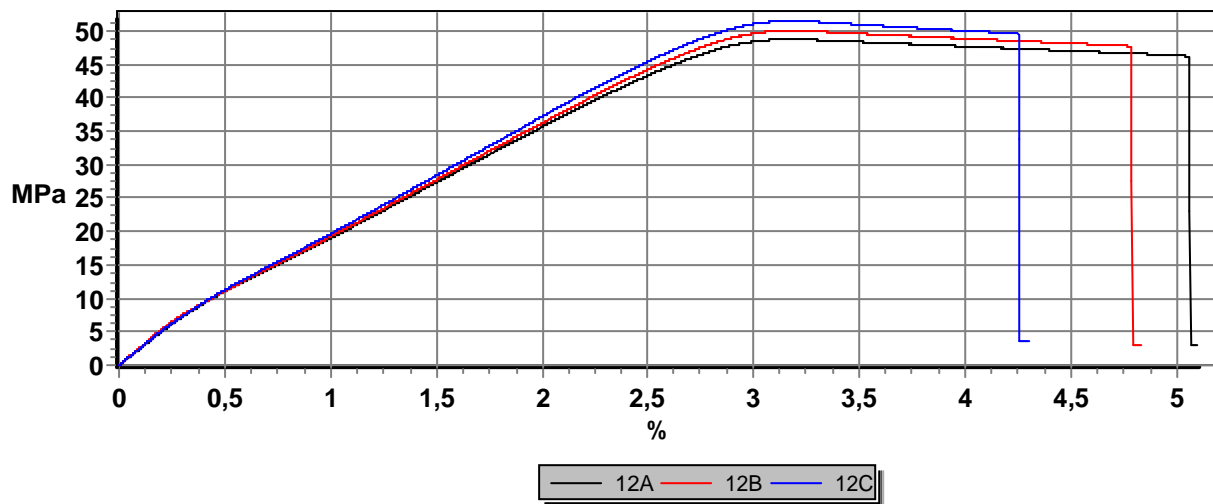
results PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 12A | 42,51 | 2,47 | 2072,28 | 8,66 | 48,75 | 3,07 | 0,37 | 4,97 | 5,09 | 1,19 | 3,16 |
| 12B | 41,80 | 2,61 | 2090,88 | 8,15 | 50,03 | 3,12 | 0,33 | 4,70 | 4,83 | 1,25 | 3,17 |
| 12C | 41,60 | 2,51 | 2141,56 | 9,91 | 51,48 | 3,56 | 0,43 | 4,16 | 4,30 | 1,12 | 3,17 |

Statistics PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|

PLA-Kolenko



test report

Primjer kako upisati novi opis

machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

shortname | **name**
So | calculated area
E | Modulus of elasticity
Fmax | Maximum force (global)
y | tensile stress at yield
M | tensile strength (ISO 527)
B | tensile stress at break (ISO 527)

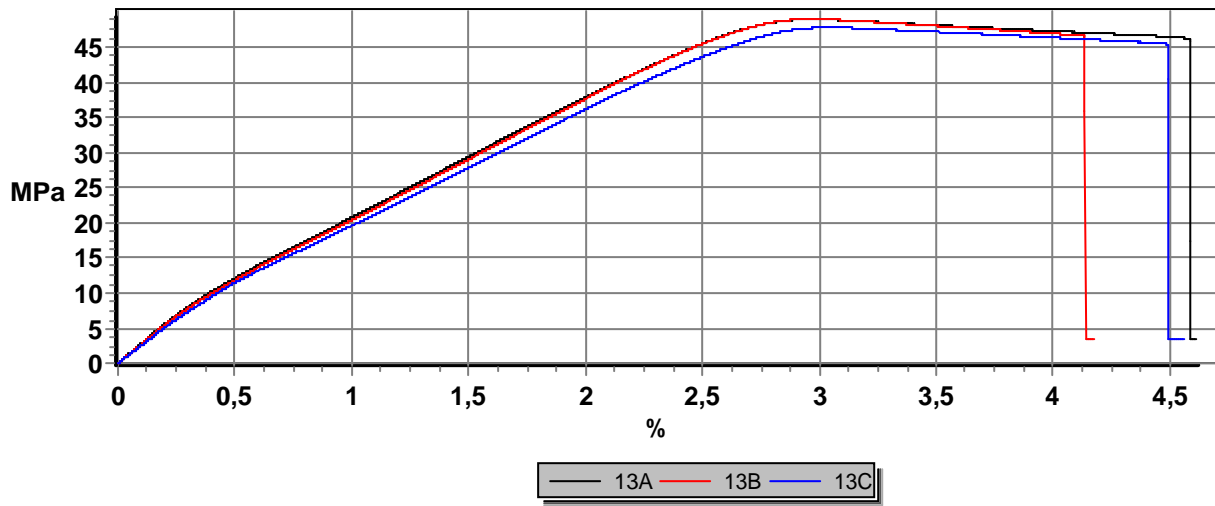
results PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 13A | 41,60 | 2,78 | 2035,72 | 10,13 | 48,94 | 3,55 | 0,40 | 4,48 | 4,61 | 1,21 | 2,96 |
| 13B | 41,78 | 2,70 | 2046,04 | 8,26 | 48,98 | 3,55 | 0,32 | 4,04 | 4,17 | 1,17 | 2,98 |
| 13C | 42,21 | 2,50 | 2016,36 | 8,38 | 47,77 | 3,51 | 0,35 | 4,42 | 4,56 | 1,14 | 3,04 |

Statistics PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|

PLA-Kolenko



test report

Primjer kako upisati novi opis

machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

shortname | **name**
So | calculated area
E | Modulus of elasticity
Fmax | Maximum force (global)
y | tensile stress at yield
M | tensile strength (ISO 527)
B | tensile stress at break (ISO 527)

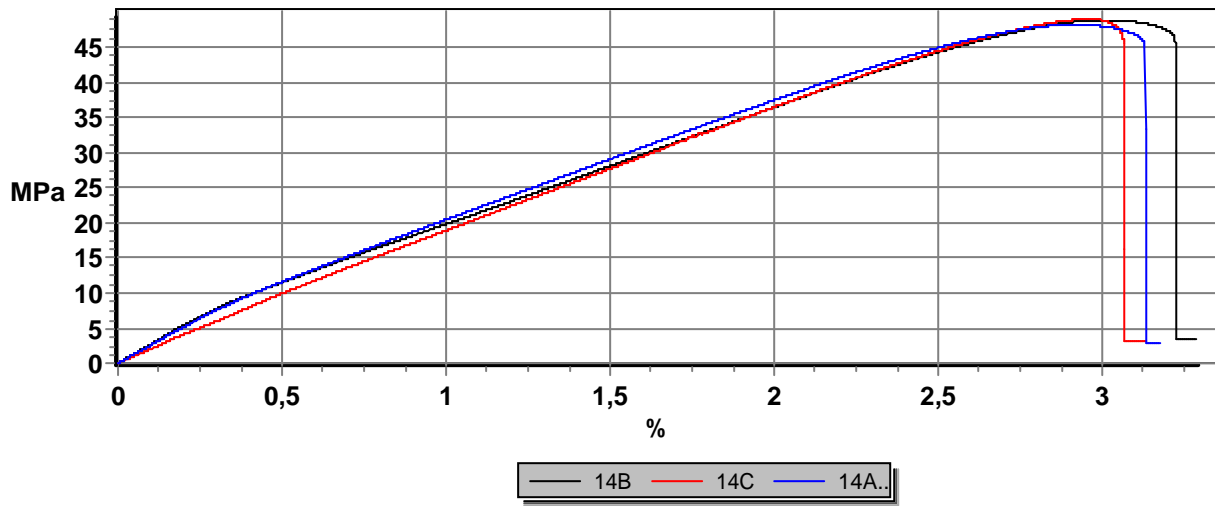
results PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|-------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 14B | 41,88 | 2,69 | 2049,10 | 9,89 | 48,93 | 3,54 | 0,41 | 3,15 | 3,29 | 1,19 | 3,01 |
| 14C | 41,53 | 2,07 | 2038,50 | 4,08 | 49,08 | 3,19 | 0,20 | 2,97 | 3,13 | 0,58 | 2,96 |
| 14A.. | 42,14 | 2,58 | 2034,36 | 10,05 | 48,28 | 2,91 | 0,42 | 3,06 | 3,18 | 1,04 | 2,92 |

Statistics PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|

PLA-Kolenko



test report

Primjer kako upisati novi opis

machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

| shortname | name |
|-----------|-----------------------------------|
| So | calculated area |
| E | Modulus of elasticity |
| Fmax | Maximum force (global) |
| y | tensile stress at yield |
| M | tensile strength (ISO 527) |
| B | tensile stress at break (ISO 527) |

results PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|-------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 15B | 41,88 | 2,18 | 1813,74 | 5,94 | 43,31 | 2,93 | 0,28 | 3,59 | 3,73 | 1,19 | 3,18 |
| 15C | 41,68 | 1,67 | 1853,96 | 2,44 | 44,48 | 3,46 | 0,15 | 3,25 | 3,47 | 0,59 | 3,26 |
| 15A.. | 41,49 | 2,45 | 1802,62 | 8,17 | 43,45 | 3,48 | 0,36 | 3,29 | 3,43 | 1,35 | 3,13 |

Statistics PLA-Kolenko:

| name | So [mm ²] | E [GPa] | Fmax [N] | y [MPa] | M [MPa] | B [MPa] | y [%] | B [%] | tB [%] | M [%] | tB [%] |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|------|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|

PLA-Kolenko

