Ispitivanje mehaničkih svojstava epruveta proizvedenih aditivnom tehnologijom

Lončar, Goran

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:820245

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
Stručni studij Strojarstva

Goran Lončar

ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA EPRUVETA PROIZVEDENIH ADITIVNOM TEHNOLOGIJOM

Završni rad

Karlovac, 2017.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODIJEL
Stručni studij Strojarstva

Goran Lončar

ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA EPRUVETA PROIZVEDENIH ADITIVNOM TEHNOLOGIJOM

Završni rad

Josip Groš, mag.ing.mech

Karlovac, 2017.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ja – student Goran Lončar, OIB: 23440704641, matični broj: 0110611076, radio ovaj rad samostalno, koristeći se znanjem stečenim tijekom obrazovanja, te uz stručnu pomoć i vođenja mentora g. Josip Groš, mag.ing.mech. kojemu se ovim putem zahvaljujem.

_____

Goran Lončar

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Trg J.J.Strossmayera 9
HR-47000, Karlovac, Croatia
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510
Fax. +385 - (0)47 - 843 – 579

HRN EN ISO 9001:2009

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij: Strojarstva.

Usmjerenje: Proizvodno Strojarstvo

Karlovac, 28.02.2017

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Goran Lončar

Matični broj:. 0110611076

Naslov: **ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA EPRUVETA PROIZVEDENIH ADITIVNOM TEHNOLOGIJOM**

Opis zadatka:

Aditivna proizvodnja prototipova i gotovih proizvoda u današnjem svijetu poprima sve veću primjenu. Razvojem novih materijala za aditivne strojeve (3d printere) kontinuirano se širi primjena aditivne tehnologije.

Student treba u radu objasniti:

1. Dosadašnji razvoj aditivne tehnologije
2. Objasniti FDM (engl. fused deposition modeling) aditivni postupak
3. Izrada polimernih epruveta za različite materijale
4. Ispitivanje statičke vlačne čvrstoće

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
01.10.2016	14.02.2017	28.02.2017

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

SADRŽAJ

SADRŽAJ....I
POPIS TABLICA I SLIKA....II
SAŽETAK....IV
1. UVOD....1
2. TEORIJSKE ODREDNICE 3D PRINTANJA....2
2.1. Povijesni razvoj 3D printanja....2
2.2. Tehnologija 3D printanja....3
2.4. Materijali....5
2.5. Metode i tehnologije brze izrade prototipova....6
3. EKSPERIMENTALNI DIO – PRIMJENA 3D PRINTANJA....8
3.1. Korišten uređaj....8
3.2. Proces izrade 3D modela....11
3.3. Ispitivanje modela....19
3.4. Rezultati ispitivanja....24
4. ZAKLJUČAK....41
5. LITERATURA....42

POPIS TABLICA I SLIKA

Tablica 3.1. Specifikacija korištenog pisača....9
Tablica 3.2. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće polimernih epruveta....40

Slika 2.1. SLA-1, prvi 3D printer izumitelja Charlesa Hulla, 1983. godina....2
Slika 3.1. Osnovni dijelovi MendelMaxPRO 3D pisača....10
Slika 3.2. Program Slic3r....11
Slika 3.3. Postavke za printanje modela....12
Slika 3.4. Postavke za layer (sloj)....13
Slika 3.5. Postavke ispune printera....14
Slika 3.6. Domena pozicioniranja modela....15
Slika 3.7. Priprema i pozicioniranje modela za print pod 45°....15
Slika 3.8. Priprema i pozicioniranje modela za print pod 90°....16
Slika 3.9. Izometrijski pogled na domenu i pozicioniranje modela za print pod 180°....16
Slika 3.10. Izometrijski pogled na domenu i pozicioniranje modela za print pod 45°....17
Slika 3.11. Izometrijski pogled na domenu i pozicioniranje modela za print pod 90°....17
Slika 3.12. 3d printanje jedne od epruvete za ispitivanje mehaničkih svojstava....18
Slika 3.13. Render 3D modela epruvete za statičko/vlačno ispitivanje sa pripadajućim dimenzijama....19
Slika 3.14. Kidalica na kojoj je odrađeno ispitivanje materijala....20
Slika 3.15. Prikaz ispitivanja jedne epruvete....21
Slika 3.16. Prikaz zaslona stroja....22
Slika 3.17. Model epruvete izrađene od PLA polimera sa dodatkom bakra....23
Slika 3.18. Model epruvete izrađen od običnog PLA polimera....23
Slika 3.19. Model epruvete od PLA polimera sa dodatkom nehrđajučeg čelika....23
Slika 3.20. Model epruvete od PLA polimera sa dodatkom željeza sa magnetičnim svojstvima 24
Slika 3.21. Hookeov dijagram....24
Slika 3.22. Dijagram vlačne čvrstoće za Stainless steel PLA (K-180°,I-100%)....25
Slika 3.23. Rezultati - Stainless steel PLA (K-180°,I-50%)....26
Slika 3.24. Rezultati - Stainless steel PLA (K-45°,I-100%)....27
Slika 3.25. Rezultati - Stainless steel PLA (K-45°,I-50%)....28
Slika 3.26. Rezultati - Stainless steel PLA (K-90°,I-100%)....28
Slika 3.27. Rezultati - Magnetic iron PLA (K-180°,I-100%)....29
Slika 3.28. Rezultati - Magnetic iron PLA (K-180°,I-50%)....30
Slika 3.29. Rezultati - Magnetic iron PLA (K-45°,I-100%)....30
Slika 3.30. Rezultati - Magnetic iron PLA (K-45°,I-50%)....31
Slika 3.31. Rezultati - Magnetic iron PLA (K-90°,I-100%)....31
Slika 3.32. Rezultati - Magnetic iron PLA (K-90°,I-50%)....32
Slika 3.33. Rezultati - PLA (K-180°,I-100%)....33
Slika 3.34. Rezultati - PLA (K-180°,I-50%)....33
Slika 3.35. Rezultati - PLA (K-45°,I-100%)....34
Slika 3.36. Rezultati - PLA (K-45°,I-50%)....34
Slika 3.37. Rezultati - PLA (K-90°,I-100%)....35
Slika 3.38. Rezultati - PLA (K-90°,I-50%)....35
Slika 3.39. Rezultati - Copper PLA (K-180°,I-100%)....36
Slika 3.40. Rezultati - Copper PLA (K-180°,I-50%)....37
Slika 3.41. Rezultati - Copper PLA (K-45°,I-100%)....37
Slika 3.42. Rezultati - Copper PLA (K-45°,I-50%)....38

Slika 3.43. Rezultati - Copper PLA (K-90°,I-100%).....38
Slika 3.44. Rezultati - Copper PLA (K-90°,I-50%).....39

SAŽETAK

Tema završnog rada je ispitivanje mehaničkih svojstava polimernih materijala proizvedenih aditivnom tehnologijom. Prvi dio rada opisati će postupak aditivne tehnologije (u daljnjem tekstu 3D printanje). Eksperimentalan dio rada posvećen je primjeni u praksi na konkretnom modelu 3D printera. Na temelju istraživanja, analize i eksperimenta na primjeru, doneseni su zaključci o mogućnostima upotrebe tehnologije 3D printanja.

KLJUČNE RIJEČI: 3D ispis, 3D printeri, brza izrada prototipova, tehnologija

ABSTRACT

This paper deals with mechanical properties of polymers produced using additive manufacturing. The first part of the paper describes the procedure of additive manufacturing (hereinafter referred to as 3D printing). Experimental part of this paper describes the application on the particular model of 3D printer. Based on research, analysis and experiment conclusions are made about the possibilities of 3D printing technology.

KEYWORDS: 3D print, 3D prinetrs, rapid prototyping, technology

1. UVOD

Trodimenzionalni, odnosno 3D print, u najširem smislu definira se kao tehnologija koja kao svoj proizvod daje uporabni predmet. Tehnologija 3D printanja grana je koja bilježi sve brži rast i razvoj, no za njegovo je razumijevanje potreban detaljan uvid u mogućnosti te analiza metoda izrade prototipova.

1.1. Problem i predmet istraživanja

Tehnologija 3D printanja već sada nudi niz mogućnosti sa širokom primjenom, a u budućnosti se očekuje još brži napredak razvoja. Problem istraživanja kreće od pretpostavke slabog poznavanja 3D printanja, a samim time i potrebe približavanja ovog tehnološkog "čuda" široj javnosti i budućim potencijanim korisnicima. S obzirom na definirani problem straživanja, predmet istraživanja u ovom radu je 3D printanje te tehnologije odnosno metode beze izrade prototipova.

1.2. Cilj istraživanja

Cilj istraživanja u radu je, temeljem detaljne teorijske analize analize i eksperimentalnog dijela rada na konkretnom primjeru 3D printera, dati uvid u uporabne mogućnosti tehnologije 3D printanja.

1.3. Struktura rada

Rad je podijeljen u četiri tematski povezana poglavlja. Prvi dio rada čini **Uvod,** u kojem je predstavljen problem i predmet istraživanja te predstavljen cilj istraživanja u završnom radu. Drugo poglavlje daje uvid u **Teorijske odrednice 3D printanja** gdje će ukratko biti predstavljena povijest i tehnologije 3D printanja, te će biti predstavljene metode i tehnologije izrade prototipova. Treći dio rada čini **Eksperimentalni dio,** u kojem će se prezentirati primjena 3D printera na konkretnom primjeru iz prakse. Četvrti dio rada čini **Zaključak** koji daje osvrt na završni rad i u kojem se iznose zaključci istraživanja.

2. TEORIJSKE ODREDNICE 3D PRINTANJA

U nastavku rada biti će predstavljene teorijske odrednice 3D printanja. Dati će se kratak uvid u povijest 3D printanja, predstaviti će se tehnologija 3D prinranja, Rapid Prototyping, materijali i metode izrade.

3. Povijesni razvoj 3D printanja

Početkom razvoja tehnologije 3D printanja smatra se 1982. godina izumom stereolitografije od strane Charlesa Hulla. Stereolitografija je proces koji omogućava kreiranje 3D objekata iz digitalnih podataka. Namjena ove tehnologije bila je testiranje dizajna proizvoda prije ulaganja u veći proizvodni program.

Slika 2.1. SLA-1, prvi 3D printer izumitelja Charlesa Hulla, 1983. godina

Već 1984. godine kreiran je prvi funkcionalan 3D printer, također od strane Charlesa Hulla. Prvi 3D printeri radili su na sličnom principu kao i *ink-jet* printeri, a umjesto tinte, pisači su nanosili željeni materijal u slojevima. Charles Hull 1986. godine patentira stereolitografiju te s nekoliko poslovnih partnera osniva tvrtku *3-D Systems.* Godinu dana kasnije tvrtka po prvi puta predstavlja tehnologiju 3D printanja. Tvrtka je nedugo nakon predstavljanja prodala svoj prvi komercijalni proizvod. Navedenom se tehnologijom trodimenzionalni objekt kreirao sloj po sloj, koristeći pritom virtualne računalno generirane modele. Godine 1987., dr. Carl Deckard i Joe Beaman izumili su selektivno lasersko sintetiziranje *(Selective Laser Sintering - SLS).* Samo godinu dana kasnije izumljeno je modeliranje odlaganjem taline *(Fused Deposition Modeling – FDM),* izumitelja Scotta i Lise Crump. Navedeni je izum patentiran 1989. godine, kada je i osnovana tvrtka *Stratasys* koja se bavi proizvodnjom 3D printera, materijala, te svega što obuhvaća tehnologija 3D tiska. *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), 1993. godine, razvija i u konačnici patentira tehnologiju 3D tiska baziranu na principu ink-jet tehnologije. Korištenjem ove tehnologije, jedan materijal se mogao mlaznicama nanijeti na drugi materijal, a zatim su se spajali kako bi se omogućila što brža i što točnija izrada trodimenzionalnog objekta. S predstavljanjem ove tehnologije, pojavile su se brojne kompanije kao što su Stratasys i Z Corporation, koje su uvidjele sve prednosti razvoja ove tehnologije, koja se mogla implementirati u različita područja industrije. Već 1999. godine tehnologija je zauzela svoje mjesto u medicini, kada su u laboratorijima uzgojeni prvi organi koji su se ugrađivali u pacijente, što je otvorilo vrata i razvoju drugih strategija proizvodnje organa, uključujući i 3D printanje, a 2000. godine tehnologijom 3D izrađen je prvi funkcionalni bubreg. Znanstvenici su kreirali minijaturni ali funkcionalni bubreg, koji je mogao filtrirati krv i proizvesti urin kod životinje.[1]

4. Tehnologija 3D printanja

Polazna točka za proces 3D printanja svakako je digitalni model, koji može biti izrađen korištenjem raznih 3D softverskih programa. Na tržištu danas postoje različite vrste 3D printera, a svaki od njih koristi drugu tehnologiju koja obrađuje različite materijale na različite načine. Važno je naglasiti kako, u kontekstu materijala i primjera, ne postoji jedno rješenje koje odgovara svim 3D printerima. Među najčešćim tehnologijama 3D printanja, kada se govori o taljenju odnosno omekšavanju materijala za izradu slojeva, svakako su *Selektivno lasersko sinteriranje* (SLS) i *Modeliranje nanošenjem rastopljenog materijala* (FDM). Kada

se govori o tehnologiji u kojoj se koristi podloga sa tekućim fotopolimerom, najčešće se koristi *Stereolitografija* (SLA).[2]

Sanders Prototype uređaj od Wiltona koristi različite tintne tehnike u svojoj Model Maker liniji konceptnih modelatora. Jedan koristi slabo taljivu termoplastiku da bi se napravio model, dok drugi printa vosak da bi formirao potpore. Nakon svakog sloja, oruđe za rezanje valja gornju površinu na jednaku visinu. Ovo rezultira izrazito dobrom preciznošću, dopuštajući uređajima da se koriste u draguljarskoj industriji. Trodimenzionalna printerska tehnologija (3DP) koja je originalno razvijena na Massachusetts Institutu za Tehnologiju 1993. godine čini osnovu procesa izrade prototipa ZCorporation-a. 3DP tehnologija stvara trodimenzionalne fizičke prototipe tako da očvrsne slojeve položenog praha koristeći tekuće vezivo. Korištenjem 3DP tehnologije, ZCorporation je razvio 3D printere koji rade neusporedivo velikom brzinom, uz ekstremno niske troškove te djeluju unutar širokog područja primjene. Nadalje, 3D ink jet printer stvara model jedan sloj za drugim tako da širi sloj praha, te nanošenjem vezivnog sredstva (boje) na poprečnom presjeku objekta stvara jedan sloj. Sloj otvrdnjuje kemijskom reakcijom praha i veziva. Postupak se ponavlja dok god se svaki sloj ne isprinta, te dok god pojedini dio nije gotov i spreman za post-procesiranje. Prah se ukloni četkanjem ili pomoću lagano komprimiranog zraka u zatvorenoj komori. Nakon čišćenja objekt se mora infiltrirati, jer je nakon tiska dosta krhke građe. Premazuje se određenim premazima (infiltrantima) kako bi očvrsnuo. [3]

4.1. Brza izrada prototipova (Rapid Prototyping)

Sam termin rapid prototyping označava čitav niz tehnologija kojima je moguće iz digitalne dvodimenzionalne reprezentacije nekog objekta stvoriti fizičku reprezentaciju.

Brza izrada prototipa je izrada modela na temelju CAD (Computer Aided Design) podataka, 3D digitalizacije ili računalne tomografije. Rapid Prototyping (brza izrada prototipa) prvenstveno se koristi za brzo dobivanje konceptualnih modela u međufazama razvoja za procjenu oblika i dimenzija, izradu ergonomskih studija, testiranje, izrade uzoraka za kupce i sl.[4]

Razlozi korištenja brze izrade prototipova:[5]

- povećanje učinkovitosti veze između razvoja i proizvodnje,
- smanjenje vremena razvoja,
- smanjenje skupih pogrešaka,
- smanjenje potrebe održavanja, i
- produljenje vijeka trajanja proizvoda dodavanjem potrebnih značajki i uklanjanjem suvišnih značajki u ranoj fazi konstruiranja.

Rapid Prototyping smanjuje vrijeme razvoja proizvoda dopuštajući korekcije na proizvodu u ranoj fazi njegovog razvoja. Omogućuje inženjerski, proizvodni i marketinški pogled, kao i pogled kupca na proizvod u ranoj fazi njegovog razvoja, gdje se greške mogu ispravljati dok još nisu preskupe.[5]

Trendovi u proizvodnji pokazuju:[5]

- povećanje broja varijanti proizvoda,
- sve veća složenost proizvoda,
- smanjenje vremena trajanja proizvoda, i
- sve manje vrijeme isporuke proizvoda.

5. Materijali

Materijali koji se koriste u procesu selektivnog laserskog sinteriranja su:[6]

- SLSLaserForm ST-100, 200 koji je idealan za proizvodnju izdržljivih metalnih prototipova;
- DuraFormPA je poliamid koji se koristi za izradu dijelova s vrlo glatkom površinom i finim detaljima, a najčešće se koristi u medicini;
- DuraFormGF je poliamid punjem staklenim česticama;
- CastFormPS je polistiran koji se najčešće koristi za izradu alata za precizno ljevanje.

Nadalje, materijal koji se koristi u procesu direktnog laserskog sinteriranja metala (DMLS) je metalni prah koji se sastoji od mješavine nehrđajućek čelika i bronce.[6]

Materijali koji se koriste u procesu modeliranja nanošenjem rastopljenog materijala FDM:[6]

- ABS(P400) koji služi za izradu prototipova u svrhu funkcionalnih ispitivanja,
- ABSi(P500) je posebna vrsta ABS materijala koja je otporna na udarna opterećenja, otporan je na kemijske aktivne medije,
- E20 je elastomer na bazi poliestera,
- ICW06 je vosak za precizno lijevanje.

Materijali koji se koriste u procesu stereolitografije:[6]

- WaterShed je polimer na bazi epoksida koji oponaša mnoga svojstva plastomera,
- Somos9100 je epoksid na bazi fotopolimera koji oponaša mnoga svojstva polipropilena,
- Somos8100 je epoksid na bazi fotopolimera koji oponaša mnoga svojstva polipropilena,
- ACCURA SI40 je fotoplimer koji oponaša svojstva polamida 6.6.,
- ACCUDUR je fotopolimer koji je iznimno izdržljiv i fleksibilan.

6. Metode i tehnologije brze izrade prototipova

Postupci brze izrade prototipova mogu se općenito podijeliti na postupke koji upotrebljavaju materijal u čvrstom stanju (npr. žica, papir, folija, laminat), kapljevinu i prah. Neki od važnijih postupaka kod kojih se rabi čvrsti materijal su taložno očvršćivanje (e. Fused Deposition Modeling, FDM) i proizvodnja laminiranih objekata (e. Laminated Object Manufacturing, LOM), postupci koji upotrebljavaju kapljevite materijale su stereolitografija (e. Stereolithography, SLA), očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (e. Digital Light Processing, DLP) i PolyJet, dok su postupci koji rabe prah selektivno lasersko srašćivanje (e. Selective Laser Sintering, SLS) i 3D tiskanje (e. 3D Printing, 3DP).

Tehnoogije koje se danas najčešće koriste su:[7]

- Stereolitografija (SLA),

- Fused Deposition Modeling (FDM),
- Polyjet tehnologija,
- 3D Printing (3DP),
- Selective Laser Sintering (SLS), i
- Laminated Object Manufacturing (LOM).

Stereolitografija je bila prva komercijalno dostupna rapid prototyping tehnologija u svijetu. Kod stereolitografije se koriste različite vrste fotopolimera u tekućem stanju koji su osjetljivi na UV zračenje, te se osvijetljeni skrućuju. Do skrućivanja slojeva dolazi pod utjecajem laserskog snopa. Prednosti SLA tehnologije su vrlo tanki, okom nevidljivi, slojevi te glatka površina. No SLA tehnologija ima i svojih nedostataka kao što su visoka cijena pokretanja uređaja, postoji opasnost od loma, radna okolina je toksična a dijelovi su lomljivi.

Fused Deposition Modeling (FDM) je tehnologija ekstrudiranja termoplastičnog materijala s niskim talištem (ABS, metakrilati, polikarbonati). Kompletan sistem je zatvoren u komoru koja održava temperaturu neposredno ispod točke topljenja polimera, a potporni materijal omogućava izradu nemoguće geometrije. Prednosti FDM tehnologije su pristupačnost, brza izrada pojedinačnih uzoraka, tehnologija je office friendly. Od nedostataka FDM tehnologije valja izdvoji poroznost strukture, niska čvrstoća na naprezanju u smjeru z-os, relativno velika debljina slojeva 0.1-0.3 mm, i dugo vrijeme printa za veće serije.

Polyjet tehnologija je tehnologija printanja uredskog printera, a umjesto tinte koristi se fotoosjetljiva akrilna smola.

Kod 3D Printing (3DP) tehnologije software podijeli datoteku na tisuće tankih slojeva, inkjet pisaće glave nanesu vezivo na prah i tako stvaraju kompaktni sloj.

Selective Laser Sintering (SLS) je proces trodimenzionalnog printanja na bazi tehnologije sinteriranja. Laserska zraka usmjerava se na materijal (u obliku finog praška) koji se uslijed visoke temperature kojoj je izložen sinterira. SLS tehnologija ima vjerojatno najveći raspon dostupnih materijala, budući da se mnoštvo metala može sinterirati.

Kod Laminated Object Manufacturing (LOM) tehnologije nož izrezuje konturu sloja iz folije, a izrezani se sloj pomoću lijepi na prethodne slojeve. Ova tehnologija printanja je jednostavna i jeftina.

7. EKSPERIMENTALNI DIO – PRIMJENA 3D PRINTANJA

Eksperimentalni dio se rada odnosi se na crtanje 3D modela epruvete, 3D printanje i ispitivanje istih na kidalici. Model je nacrtan prema tablici sa standardima i definiranim dimenzijama. U obzir za 3D printanje uzete su 4 vrste materijala: običan PLA polimer, PLA polimer sa dodatkom bakra, PLA polimer sa dodatkom čestica nehrđajučeg čelika i PLA polimer sa dodatkom željeza sa magnetičnim svojstvima. Radi detaljnijih rezultata i što boljeg ispitivanja ne samo materijala korigirane su i postavke printa tj. ispisa. Postavke printanja su mijenjane u dva segmenta: pozicija odnosno rotacija modela i to 180°, 45° i 90°. Drugi čimbenik koji je bio korigiran u fazi pripreme modela za print je ispuna modela za printanje. Korišten je print sa 50% i 100% ispune. Ukupno su isprintane 24 epruvete koje su zatim ispitane u laboratoriju. Tip ispitivanja u laboratoriju je bio statično vlačno ispitivanje na Shimadzu AG-X plus kidalici.

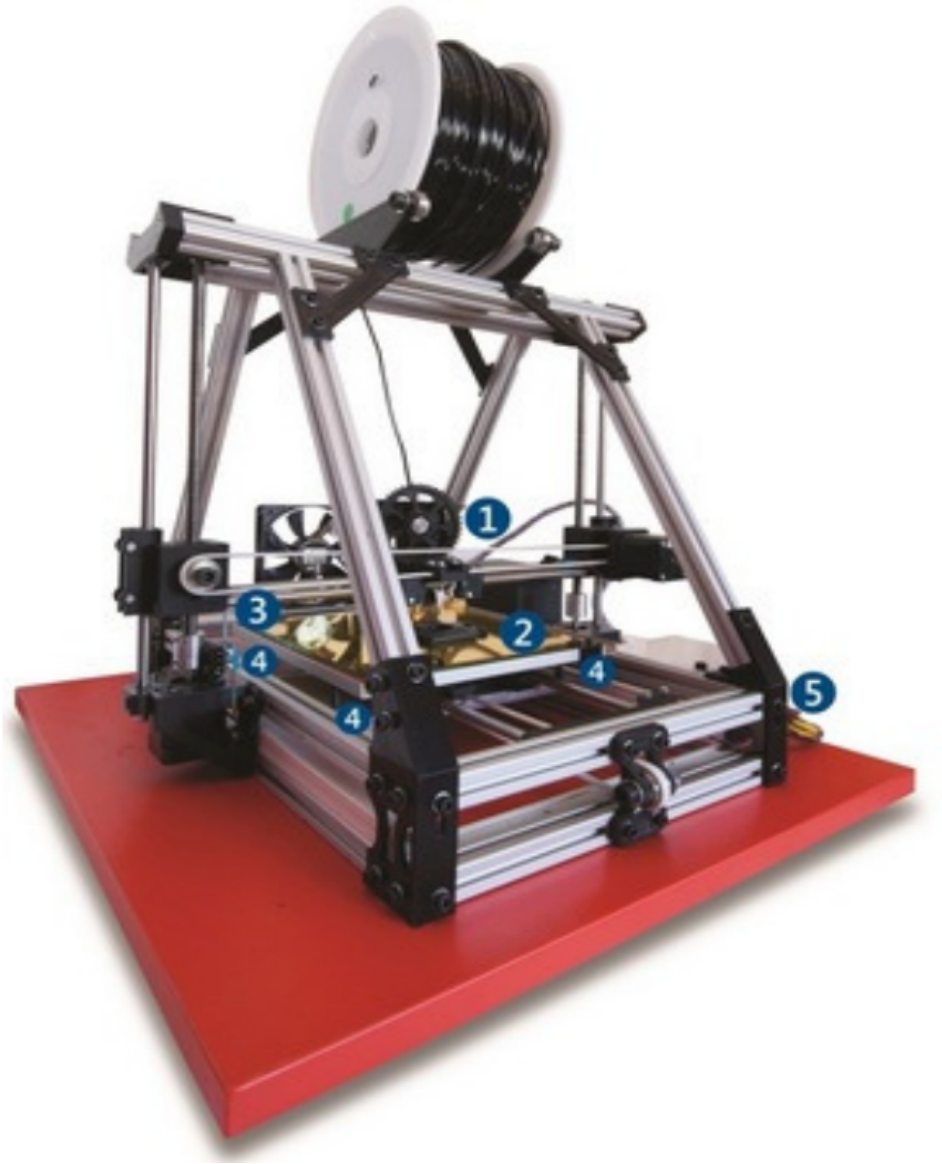
8. Korišten uređaj

Za 3D printanje korišten je 3D pisač MendelMaxPRO. Predmeti se izrađuju preciznim istiskivanjem rastaljenog materijala kroz diznu glave pisača. Materijal se nanosi u tankim slojevima, debljine 0,1 do 0,4 mm. Nakon nanošenja sloja glava pisača podiže se za visinu sloja, te se na upravo izrađeni sloj nanosi novi sloj materijala. Postupak se ponavlja do završetka izrade predmeta. Temperatura glave pisača precizno je regulirana kako bi se postigla optimalna temperatura, ovisno o korištenom materijalu. Radni stol je također grijan uz regulaciju temperature, a izrađen je od stakla presvučenog Kapton trakom kako bi se osiguralo dobro prijanjanje predmeta tokom izrade. Postupak izrade započinje dizajniranjem predmeta softverom za 3D modeliranje. Za manje do srednje zahtjevne projekte biti će dovoljan neki od niza besplatnih programa (npr. FreeCAD).

Tablica 3.1. Specifikacija korištenog pisača

IZRADA	
Tehnologija	Slojevito nanošenje rastaljene niti („
Radni volumen	20 x 20 x 16 cm
Vertikalna razlučivost	0,1 – 0,4 mm
Materijali	ABS, PLA, polistiren, najlon, drvo s polimernim vezivom, kreda s polimernim vezivom. Materijali raspoloživi u više boja
Promjer niti	3 mm
Promjer dizne	0,5 mm
Hlađenje sloja	Aktivno (120 mm ventilator s regulacijom brzine vrtnje)
UPRAVLJANJE	
Kontrola pisača	Pronterface
Priprema modela	Slic3r
Format modela	STL
Upravljački program	Marlin
Podržani OS 32/64bit	Windows (XP i noviji), Linux (Ubuntu, Fedora, Debian), MAC OS X 10.7 i noviji
Veza s računalom	USB
Računalo	Za dizajn i pripremu: PC računalo velikog ekrana 24“, višejezgreni procesor, min. 4GB RAM, min. 100GB HDD prostora za projekte. Za upravljanje pisačem: laptop sa ispravnom baterijom, USB, Wi-Fi
MEHANIKA	
Tijelo	Ekstrudirani Al profili
Radna ploha	Staklo presvučeno kapton trakom. Grijana s regulacijom temperature.
Preciznost pozicioniranja	XY: 12,5 mikrona, Z: 0,6 mikrona
Pogon osi	XY: koračni motor (1,8°, 16 mikrokoraka), zupčasti remen, Z: koračni motor (1,8°), trapezno navojno vreteno
Uležištenje osi	Linearni kuglični ležajevi
Brzina	XY: 500 mm/s pozicioniranje, 150 mm/s izrada, Z: 5 mm/s
NAPAJANJE	
Izvor napajanja	240 V AC, 400W
Potrošnja	Grijač radne plohe: 12V / 15A max, Grijač niti: 12V / 2A max
Pogon motora	2V / 6A max
Maksimalna snaga	276W
Prosječna snaga	80W (PLA), 120W (ABS)
UVJETI OKOLINE	
Temperatura	Rad: 0°C - +30°C Skladištenje: -20°C - +40°C
Vlažnost	Rad: 70% bez kondenzacije, Skladištenje:90% bez kondend.
FIZIČKE DIMENZIJE	
Dimenzije bez niti	57 x 51 x 48 cm
Dimenzije sa niti	57 x 51 x 65 cm
Dimenzije pakiranja	Sastavljeni uređaj: 63 x 57 x 54 cm, Kit: 63 x 57 x 16 cm
Masa	9,5 kg

Na sljedećoj slici prikazani su osnovni dijelovi korištenog pisača.

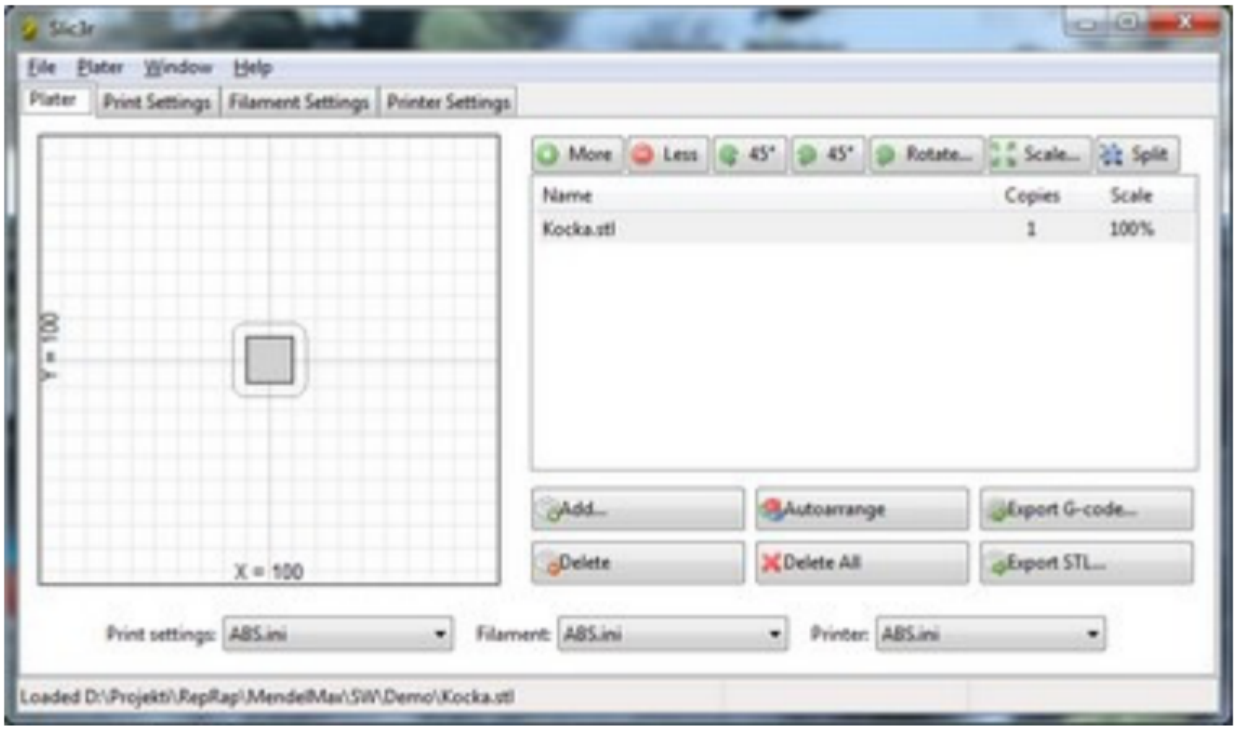


1. Ekstruder
2. Radni stol
3. Vijak za podešavanje visine glave ekstrudera
4. Vijci za nivelaciju stola
5. Upravljačka elektronika

Slika 3.2. Osnovni dijelovi MendelMaxPRO 3D pisača

9. Proces izrade 3D modela

U pripremi modela za ispis model se rastavlja na slojeve koji se redom ispisuju i generira se G-code datoteka koja sadrži naredbe pisaču za izradu predmeta prema zadanim parametrima. Tu funkciju obavlja program Slic3r.

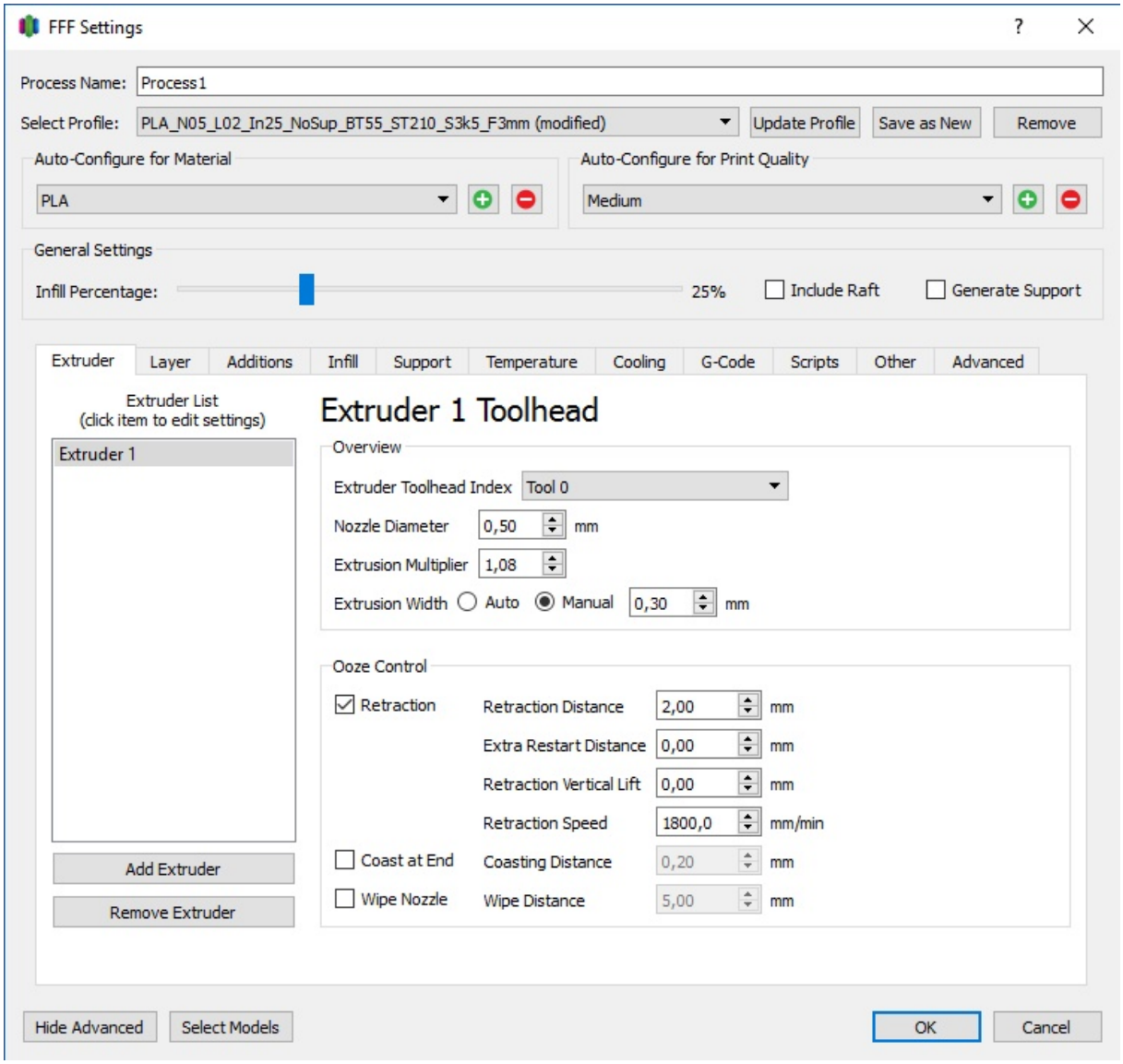


Slika 3.3. Program Slic3r

Korisničko sučelje organizirano je oko četiri lista. List 'Plater' omogućuje postavljanje jednog ili više predmeta na radni stol pisača. Naredbom 'Add' dodaju se novi predmeti, koji se po radnom stolu mogu pomicati mišem kako bi se dobio željeni raspored. Naredbom 'Export G-code' stvara se ispisna datoteka za odabrane predmete, prema zadanim parametrima. List 'Print Settings' sadrži postavke ispisa: visinu sloja (za diznu promjera 5 mm dozvoljena visina sloja je od 0,1 mm do 0,4 mm), parametre popunjavanja unutrašnjosti predmeta (infill), brzine ispisa, definiranje obruba (brim) za bolje prijanjanje predmeta na stol, potporni materijal i dr. List 'Filament Settings' definira parametre materijala: promjer niti, te temperaturu ispisne glave i radnog stola. Temperature za prvi sloj postavljene su na nulu, što znači da se određuju iz Pronterface-a. Također su definirani parametri hlađenja, koji određuju način rada ventilatora sa stražnje strane pisača.

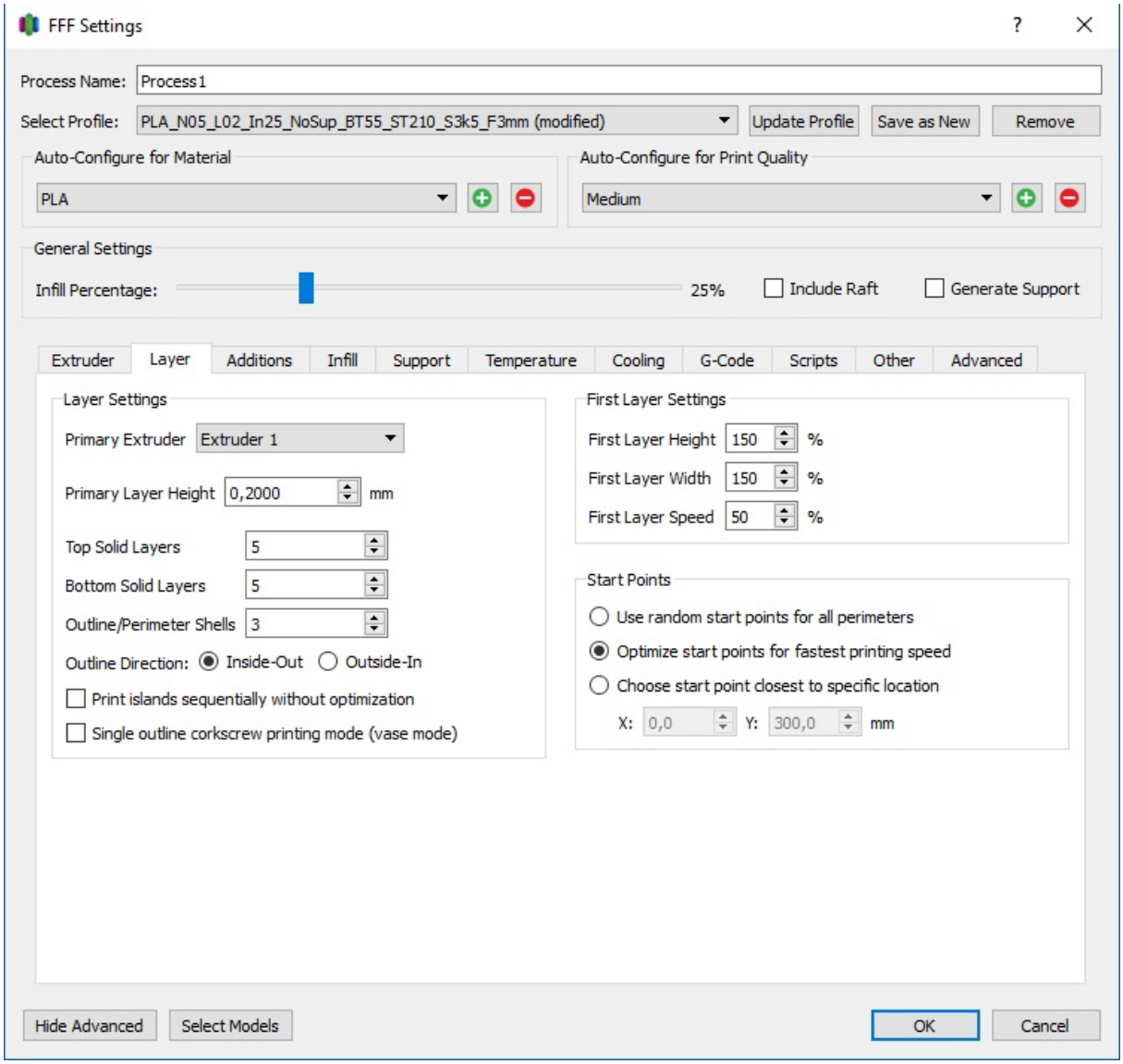
U nastavku su prikazane postavke za printanje modela u Simplify3D software-u.[8]

Kao što je vidljivo iz slike 3.3., na ovoj poziciji uređuju se postavke za Extruder odnosno glavu printanja sa pripadajućom diznom.



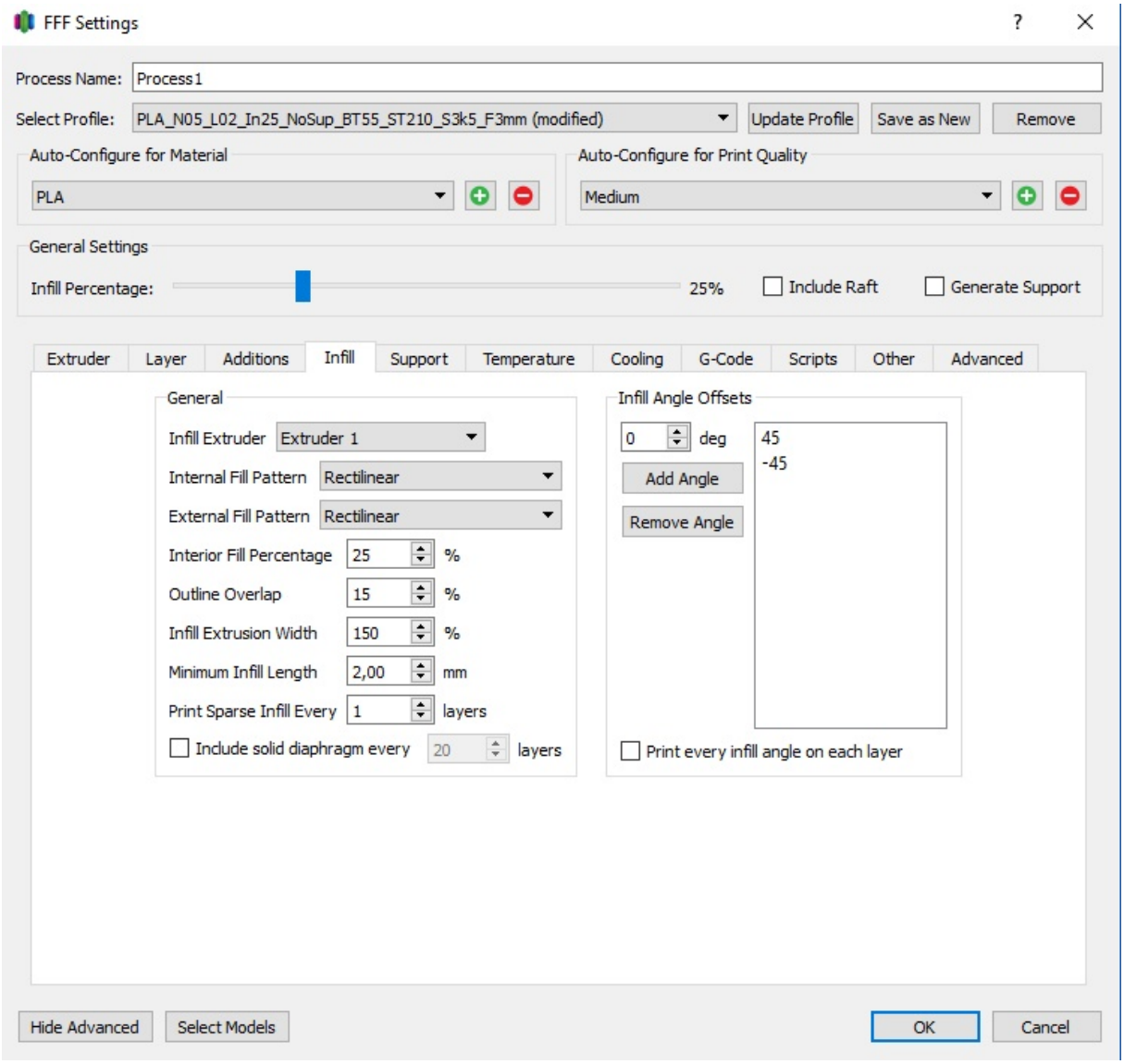
Slika 3.4. Postavke za printanje modela

Na poziciji iz slike 3.4. uređuju su visina sloja, postavke prvog sloja, postavke gornjih i donjih punih slojeva.



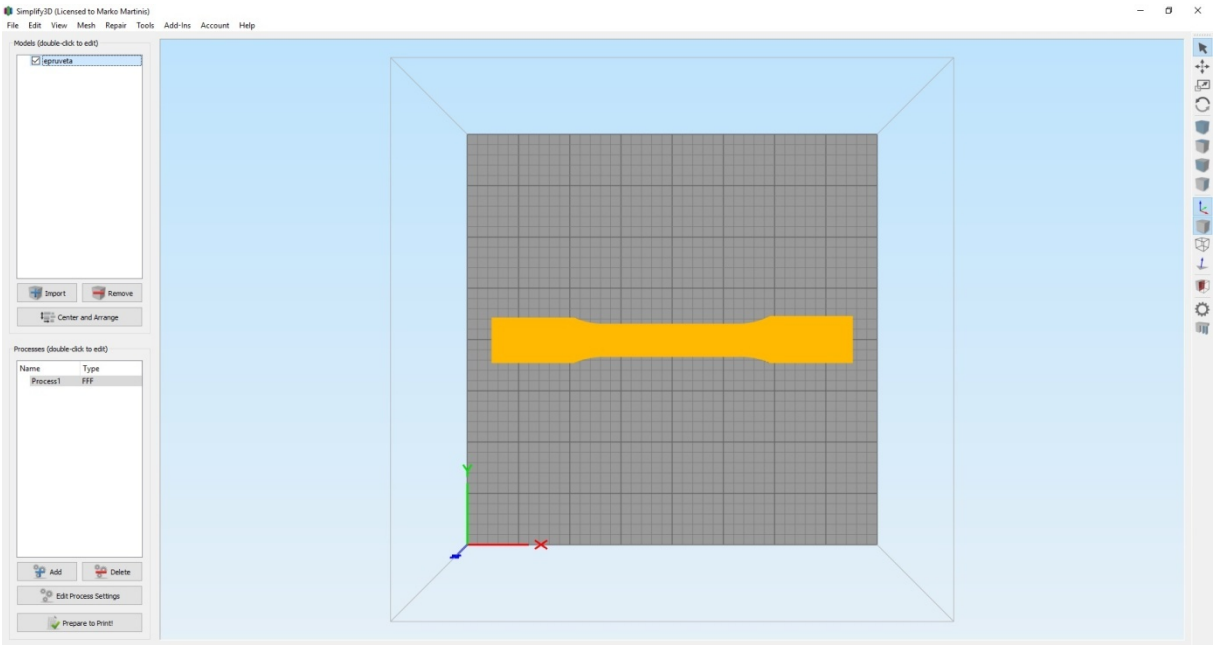
Slika 3.5. Postavke za layer (sloj)

Na poziciji iz slike 3.5. postavljaju se uzorci unutarnje i vanjske ispune odnosno ispisa te pripadajuće postotke za prostorno uređenje ispisa. Tu je jedna od promjena koje su bitne za ispitivanje modela. Za ovaj slučaj ispitivanja postavljena je ispuna 50 i 100%.



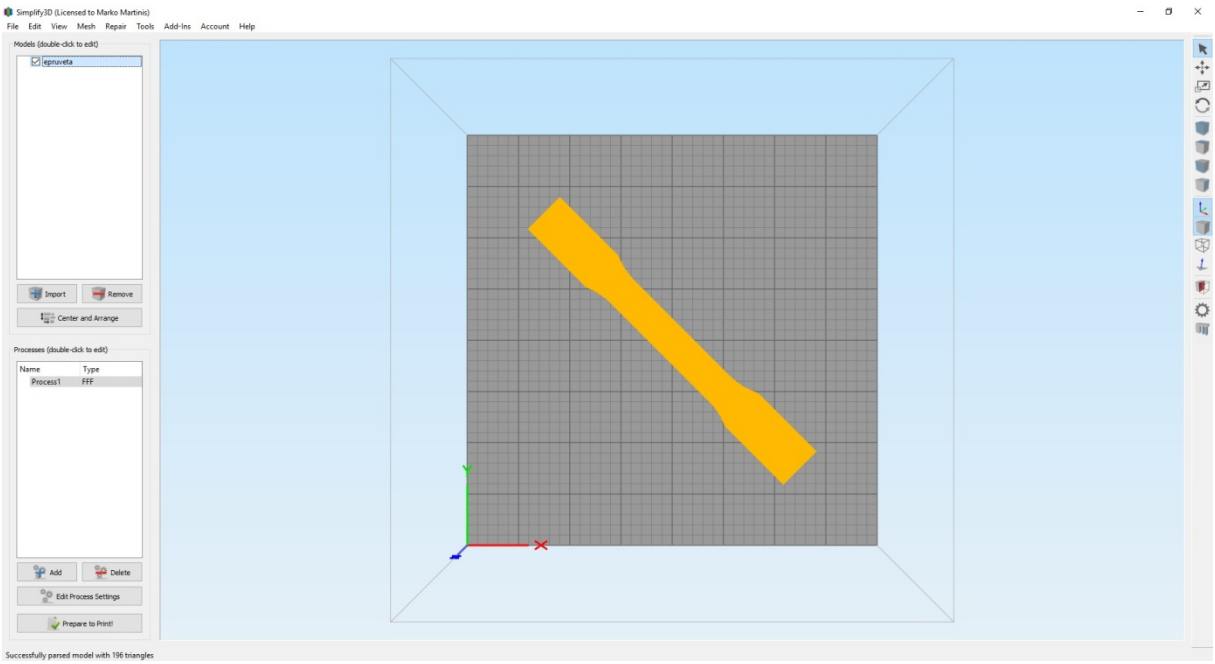
Slika 3.6. Postavke ispune printera

Slika 3.6. pokazuje domenu u kojoj se pozicionira modela za 3D printanje te poziciju modela za vertikalni print odnosno ispis. Na modelima je to dokumentirano kao print pod 180°.



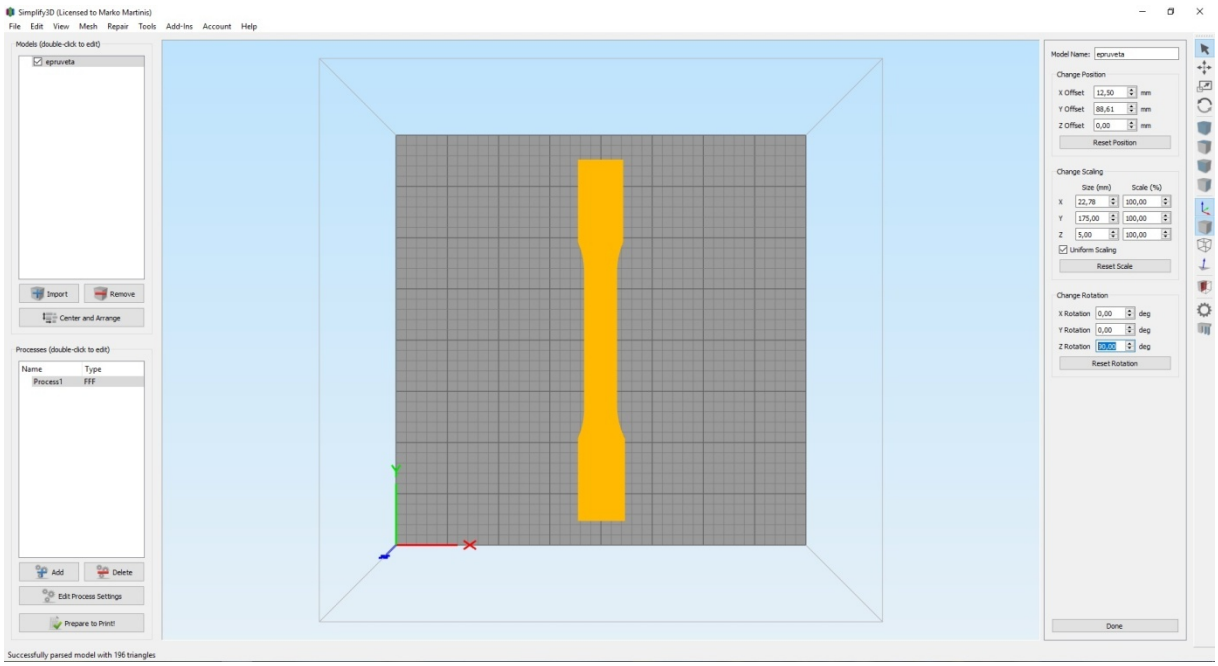
Slika 3.7. Domena pozicioniranja modela

Slika 3.7. prikazuje domenu i pripremu kroz pozicioniranje modela za 3D print pod 45°.



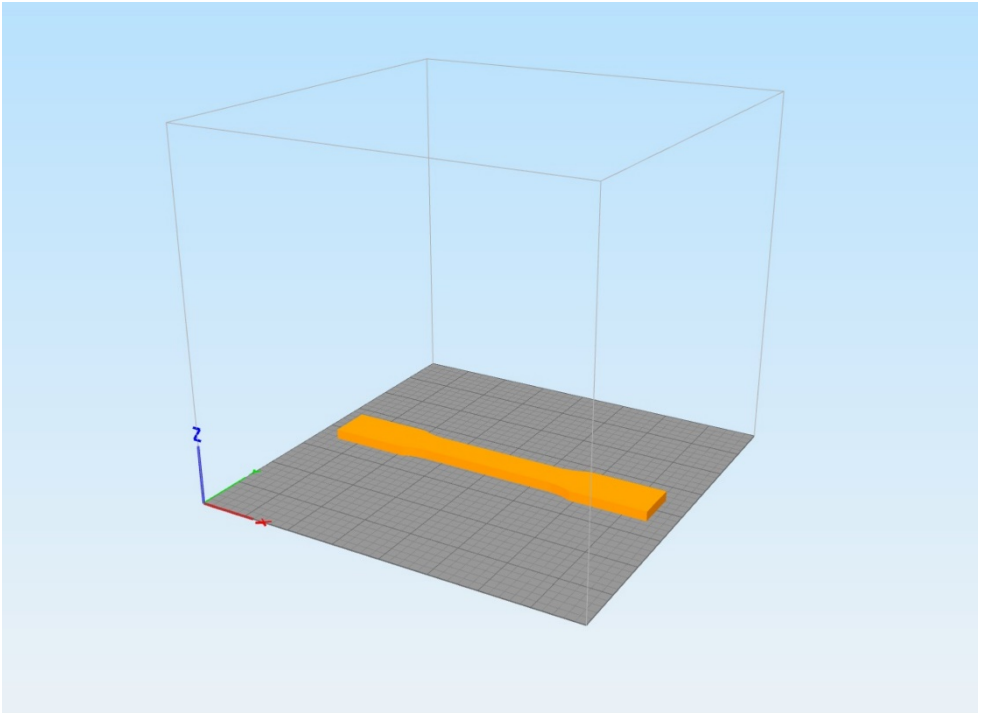
Slika 3.8. Priprema i pozicioniranje modela za print pod 45°

Slika 3.8. prikazuje istu domenu kao na prethodnim slikama sa pripremom i pozicioniranjem modela za 3D print pod 90°.



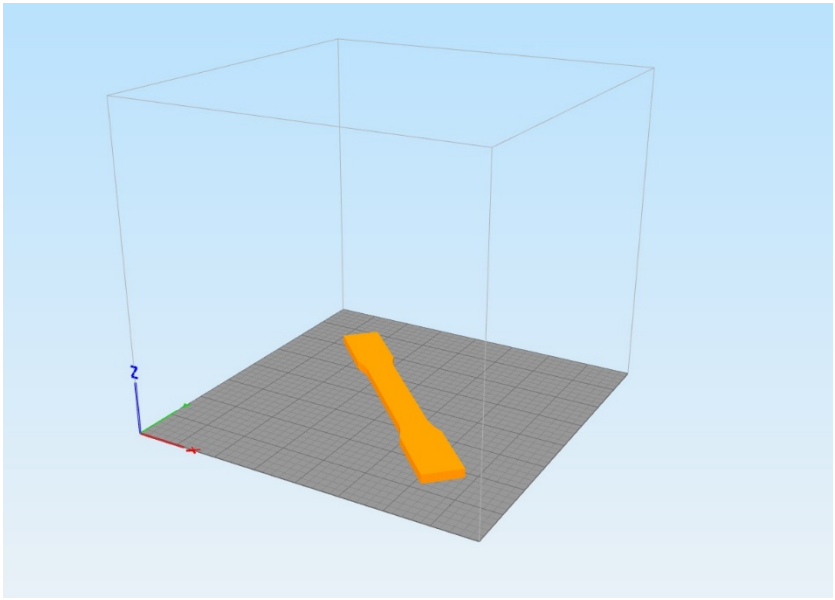
Slika 3.9. Priprema i pozicioniranje modela za print pod 90°

Slika 3.9. prikazuje izometrijski pogled na domenu i pozicioniranje modela kao na slici 3.6 odnosno položaj modela za 3D print pod 180°.



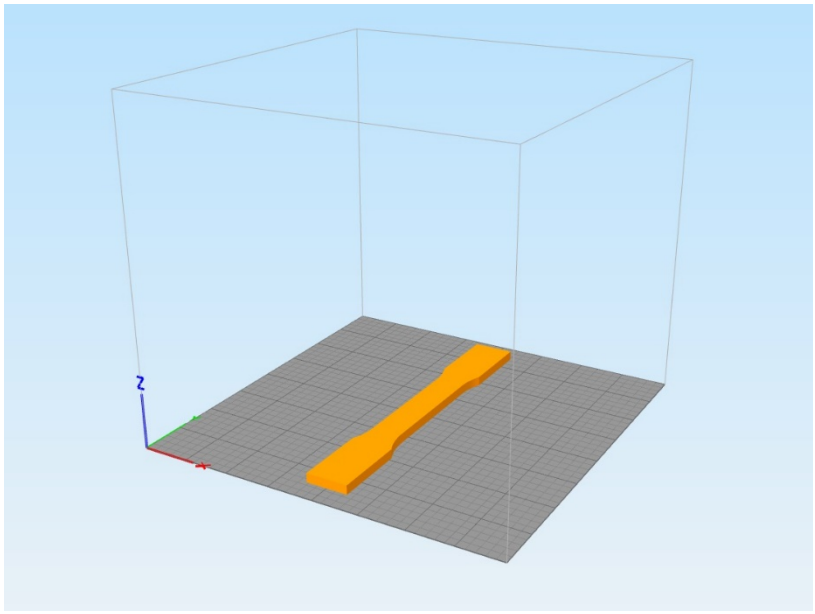
Slika 3.10. Izometrijski pogled na domenu i pozicioniranje modela za print pod 180°[9]

Slika 3.10. prikazuje izometrijski pogled na domenu i pozicioniranje modela kao na slici 3.7 odnosno položaj modela za 3D print pod 45°.



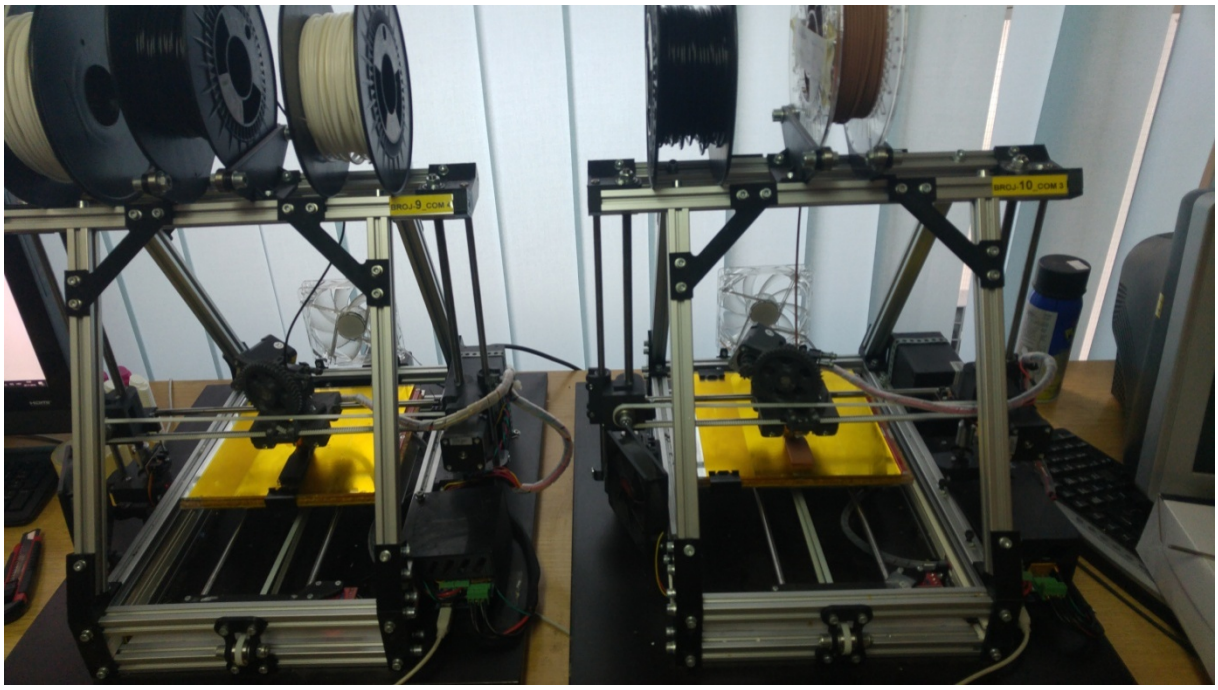
Slika 3.11. Izometrijski pogled na domenu i pozicioniranje modela za print pod 45°

Slika 3.11. prikazuje izometrijski pogled na domenu i pozicioniranje modela kao na slici 3.8 odnosno položaj modela za 3D print pod 90°.



Slika 3.12. Izometrijski pogled na domenu i pozicioniranje modela za print pod 90°

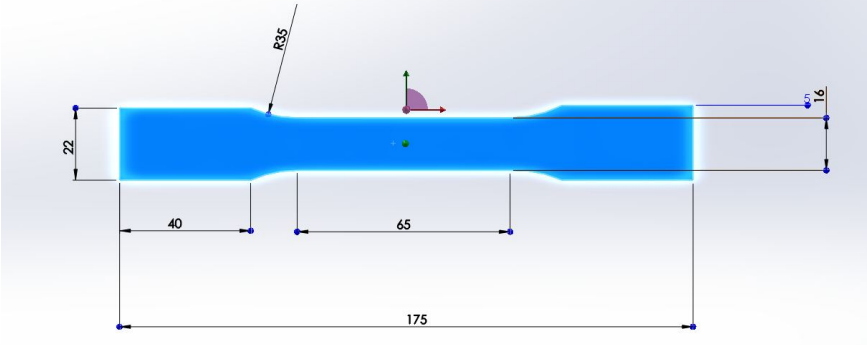
Slika 3.12. prikazuje izradu epruveta na printeru MendelMaxPRO. Na slici je vidljivo printanje na dva printera te položaj epruveta pod 90° prilikom printanja.



Slika 3.13. 3d printanje jedne od epruvete za ispitivanje mehaničkih svojstava

10. Ispitivanje modela

Slika 3.13. prikazuje render izrade modela epruvete u software-u Solidworks. Na slici su vidljive dimenzije modela.



Slika 3.14. Render 3D modela epruvete za statičko/vlačno ispitivanje sa pripadajućim dimenzijama

Ispitivanje modela odrađeno je na kidalici Shimadzu AG-X Plus (slika 3.14.) 100 kN. Računalom upravljana kidalica SHIMADZU AG – X omogućava provođenje ispitivanja i zapisivanja rezultata u elektronskom obliku kao i dobivanje Hookov-a dijagrama na temelju dobivenih rezultata ispitivanja materijala. Na kidalici je moguće vršiti ispitivanje materijala statički vlačnim pokusom, statički tlačnim pokusom te savijanjem.[10]

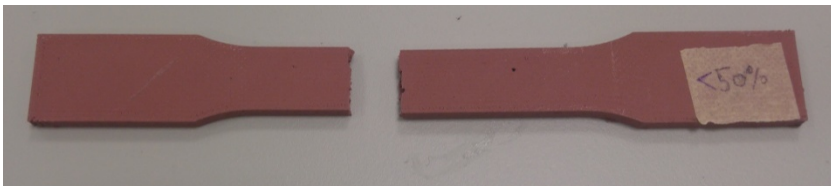
Slika 3.15. Kidalica na kojoj je odrađeno ispitivanje materijala

Slika 3.16. Prikaz ispitivanja jedne epruvete

Na slici 3.16. vidljiva su naprezanja tijekom ispitivanja.

Slika 3.17. Prikaz zaslona stroja

Na slici 3.17. je vidljiva epruveta nakon ispitivanja i mjesto puknuća. Ispuna printa na ovom je modelu 50 %.



Slika 3.18. Model epruvete izrađene od PLA polimera sa dodatkom bakra

Na slici 3.18. prikazana je epruveta koja je pokazala najbolje rezultate tijekom ispitivanja. Materijala ove epruvete je običan PLA polimer, a ispuna printa 100 %.

Slika 3.19. Model epruvete izrađen od običnog PLA polimera

Na slici 3.19. prikazana je epruveta od PLA polimera s dodatkom nehrđajučeg čelika i mjesto puknuća nakon ispitivanja. Postavke printa za ovaj model su ispuna 100% i pozicija 180°.

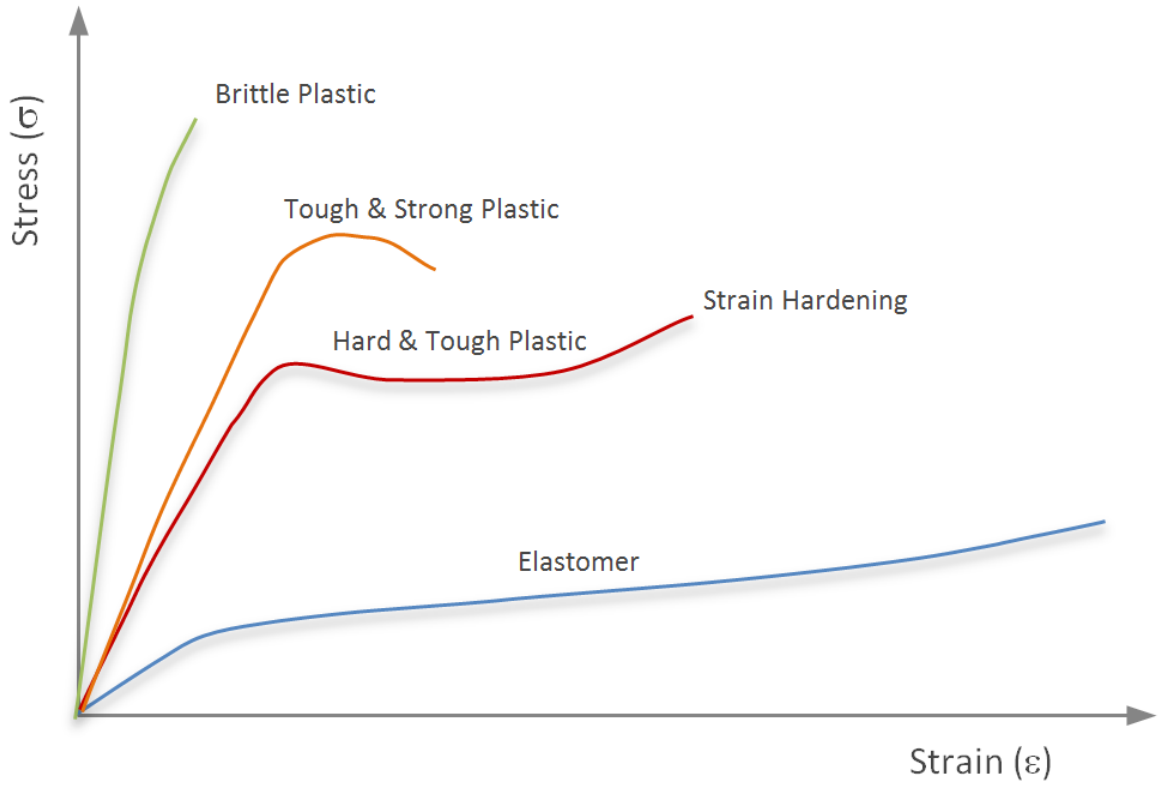
Slika 3.20. Model epruvete od PLA polimera sa dodatkom nehrđajučeg čelika

Na slici 3.20. vidljiv je primjer modela epruvete od PLA polimera sa dodatkom željeza sa magnetičnim svojstvima nakon ispitivanja i mjesto puknuća. Postavke printa modela na slici su 180% i ispuna 50%.

Slika 3.21. Model epruvete od PLA polimera sa dodatkom željeza sa magnetičnim svojstvima

11. Rezultati ispitivanja

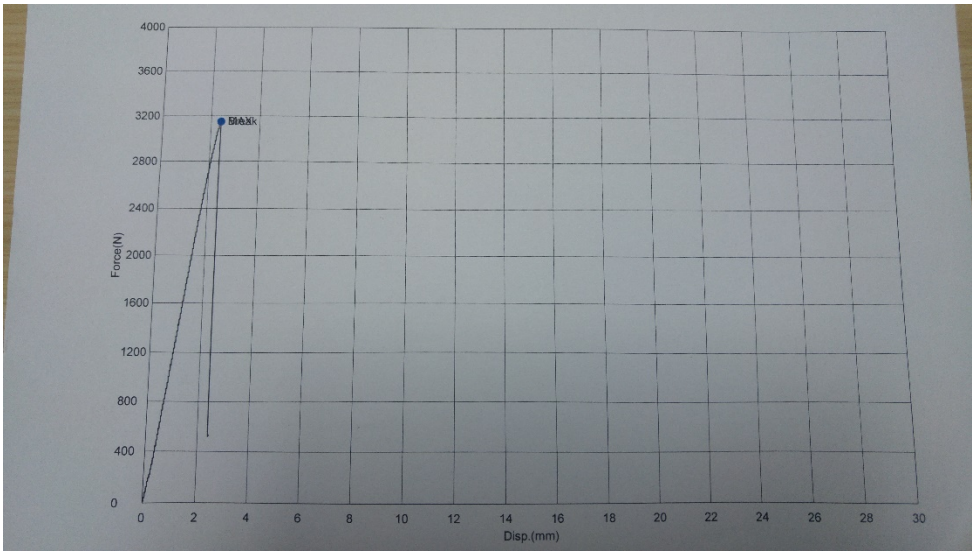
U nastavku rada dan je prikaz rezultata Hookeovim dijagramom. Dijagram σ – ε, odnosno Hookeov dijagram, prikazuje međusobnu ovisnost σ (vlačno naprezanje) i ε (relativno produljenje ili linijske vlačne deformacije).



Slika 3.22. Hookeov dijagram

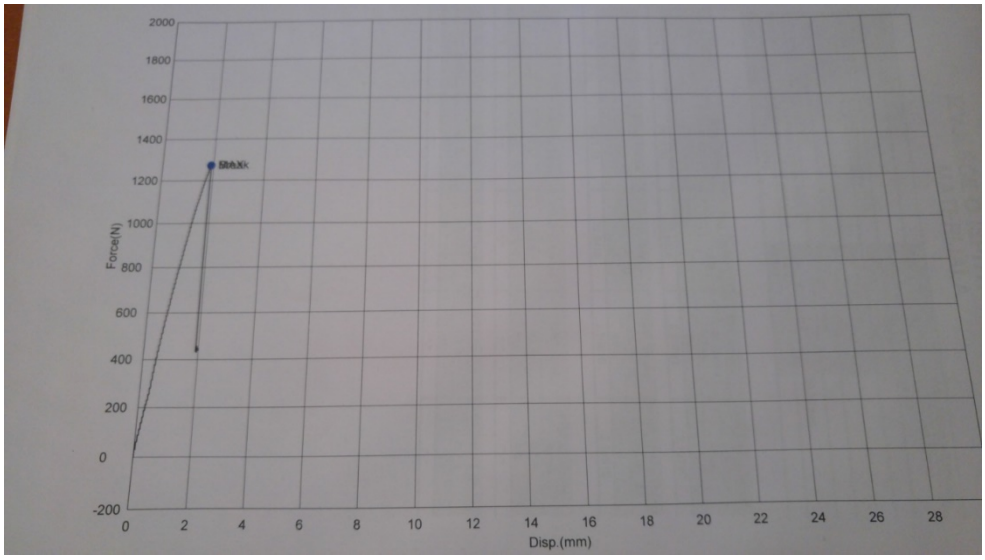
U materijalu koji je opterećen nekom silom F nastaju naprezanja σ koja uzrokuju njegovo rastezanje. Naprezanje σ je omjer sile F i ploštine A presjeka štapa ili šipke.[11] Epruveta se rasteže po Hookeovu zakonu ili zakonu proporcionalnosti. Hookeov zakon je zakonitost koja opisuje ovisnost promjene oblika čvrstoga tijela u obliku štapa o djelovanju vanjske sile, što ju je utvrdio Robert Hooke. Opterećenjem izazvano naprezanje σ razmjerno je deformaciji ε. [12]

Slika 3.22. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Stainless steel PLA (K-180°, I-100%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 3148,68 N. Prema slici i usporedbi dijagrama sa grafom 3.1. vidljivo je da ova epruveta spada pod *brittle plastic* tj krhku/lomljivu plastiku.



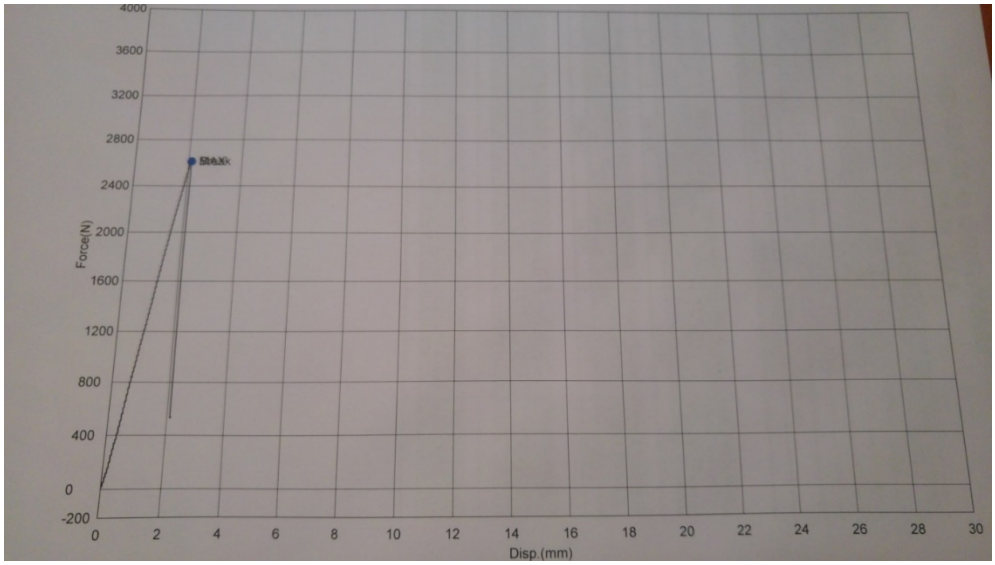
Slika 3.23. Dijagram vlačne čvrstoće za Stainless steel PLA (K-180°,I-100%)

Slika 3.23. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Stainless steel PLA (K-180°, I-50%). Vidljivo je skoro pa linearno naprezanje do granice loma. Rezultati govore kako je u ovom slučaju vidljivo da se radi o krhkom materijalu te da materijal ne prelazi u plastično područje već linearnim naprezanjem dolazi do maximum opterećenja i dolazi do loma. Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 1272,57 N.



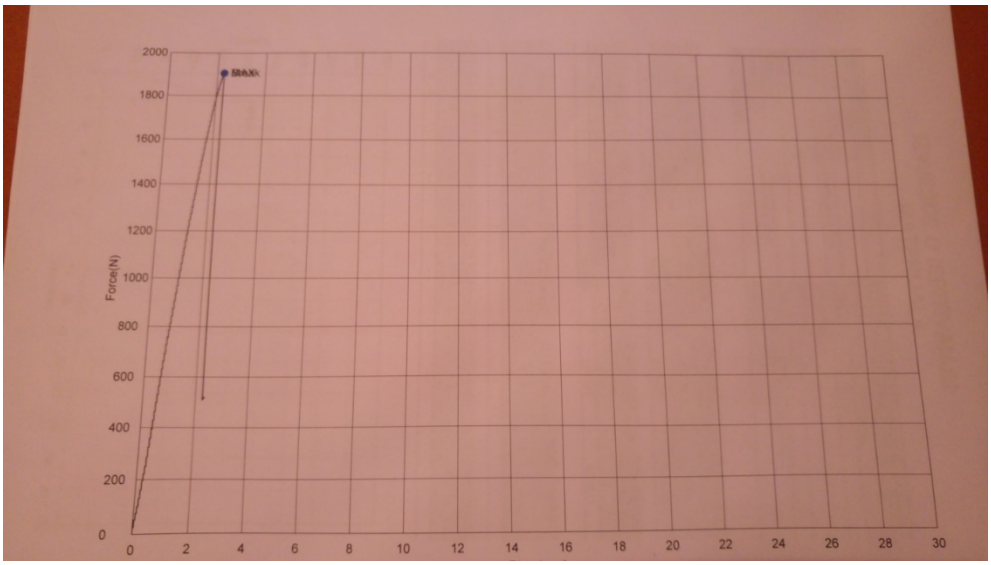
Slika 3.24. Rezultati - Stainless steel PLA (K-180°,I-50%)

Slika 3.24. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Stainless steel PLA (K-45°, I-100%). Na slici je vidljivo znatno lošije ponašanje ispitivane epruvete. Linearnost je ista u kao i u prethodnom slučaju samo je znatno manja odnosno prije dolazi do loma jer se radi o ispuni od 50% materijala i printanju epruvete polimera. Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 2613,00 N.



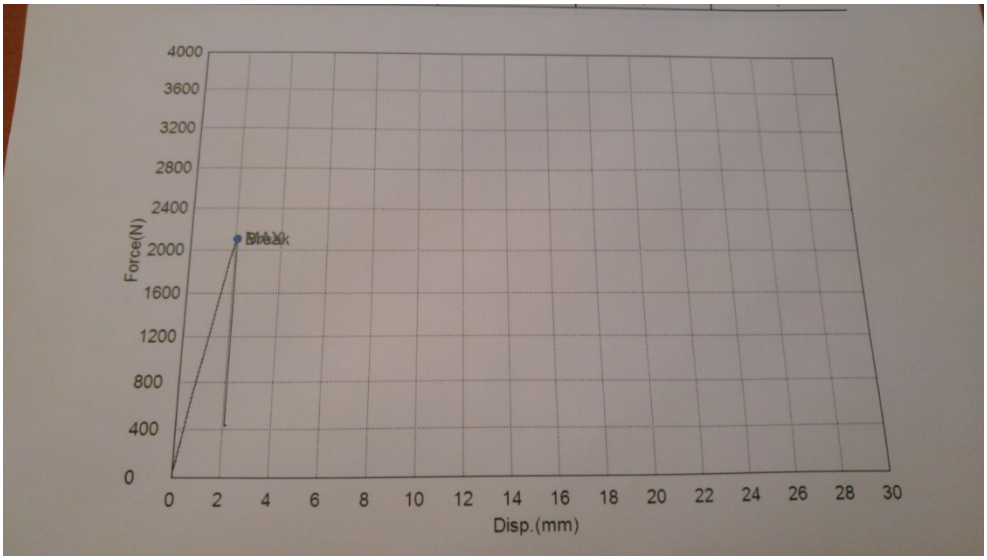
Slika 3.25. Rezultati - Stainless steel PLA (K-45°,I-100%)

Slika 3.25. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Stainless steel PLA (K-45°, I-50%). Na slici je također vidljiv linearni zapis u grafu dijagrama prilikom naprezanja. Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 1905,62 N.



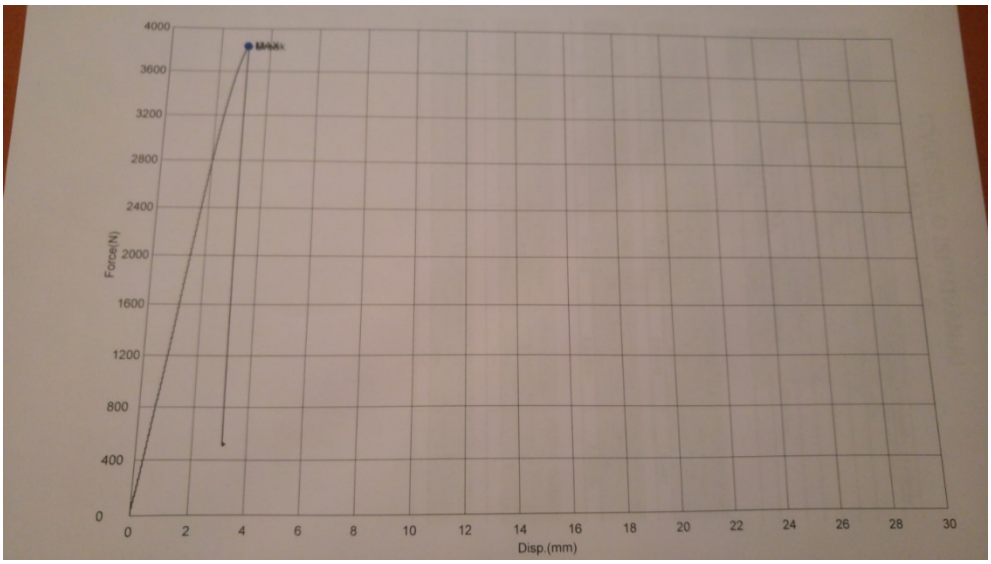
Slika 3.26. Rezultati - Stainless steel PLA (K-45°,I-50%)

Slika 3.26. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Stainless steel PLA (K-90°, I-100%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 2104,97 N.



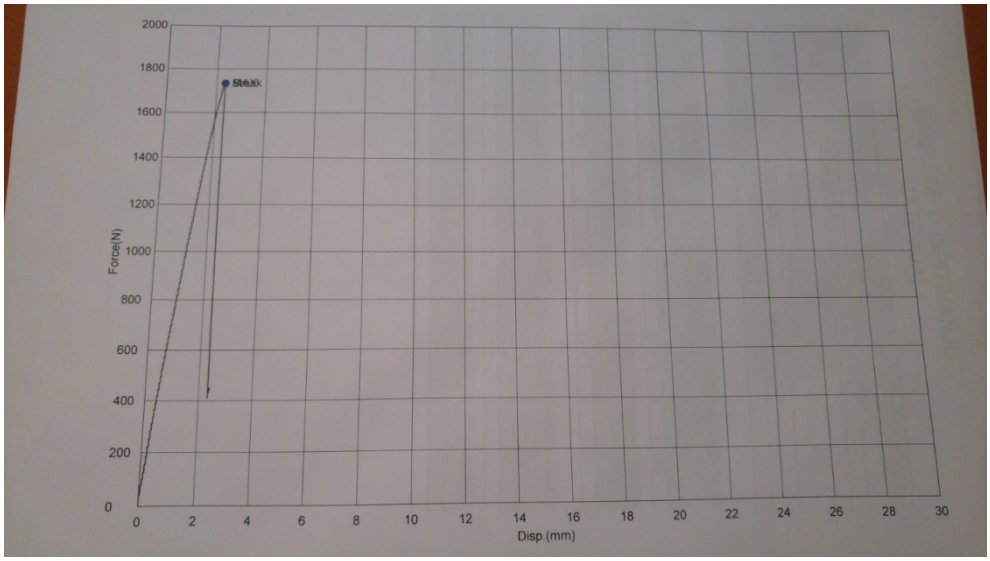
Slika 3.27. Rezultati - Stainless steel PLA (K-90°,I-100%)

Slika 3.27. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Magnetic iron PLA (K-180°, I-100%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 3835,38 N. Slike 3.25. i 3.26. pokazuju sličan rezultat naprezanja. Zaključak za polimer Stainless steel PLA je da u 3D printanoj verziji spada pod krhu plastiku. Vidljive su promjene u izdržljivosti materijala pod silom naprezanja te najbolji rezultat je vidljiv na slici 3.22., znači položaj i orijentacija printa je prema slici 3.6. te sa ispunom odnosno 100% prostornim uređenjem ispisa.



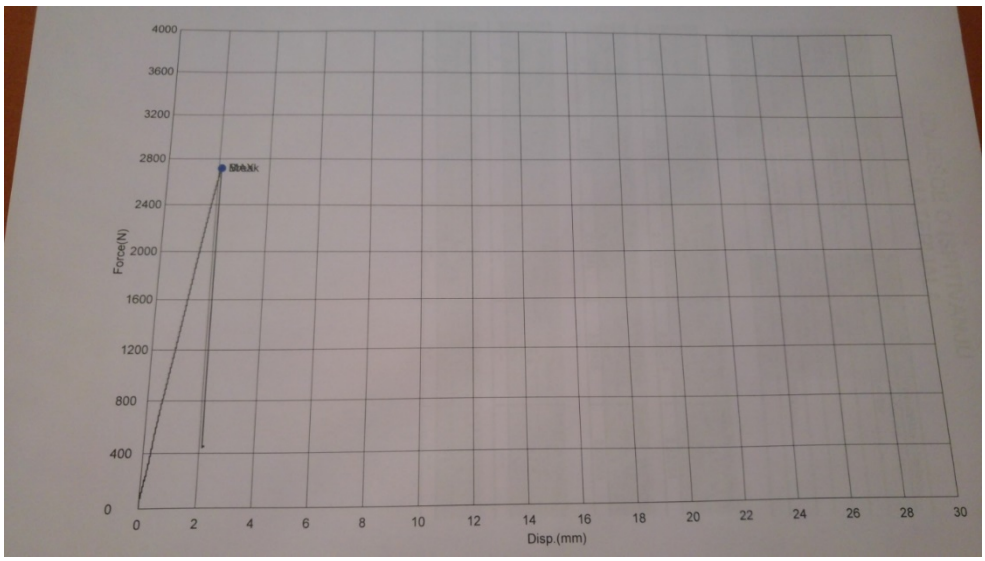
Slika 3.28. Rezultati - Magnetic iron PLA (K-180°,I-100%)

Slika 3.28. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Magnetic iron PLA (K-180°, I-50%). Rezultat u ovoj grupi ispitivanja za ovaj polimer je najbolji ne navedenoj slici odnosno u prikazanom dijagramu. Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 1732,89 N.



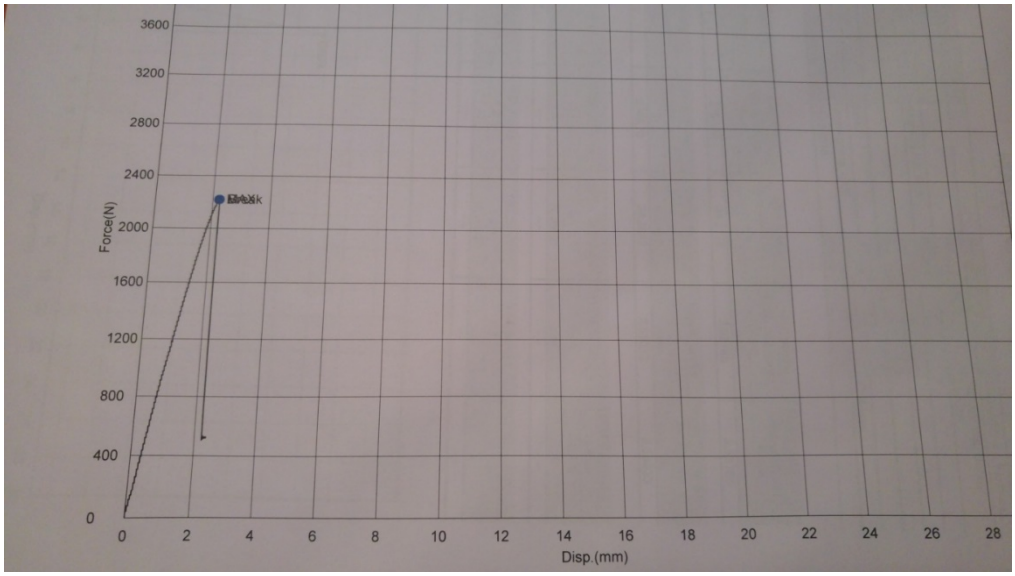
Slika 3.29. Rezultati - Magnetic iron PLA (K-180°,I-50%)

Slika 3.29. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Magnetic iron PLA (K-45°, I-100%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 2719,28 N.



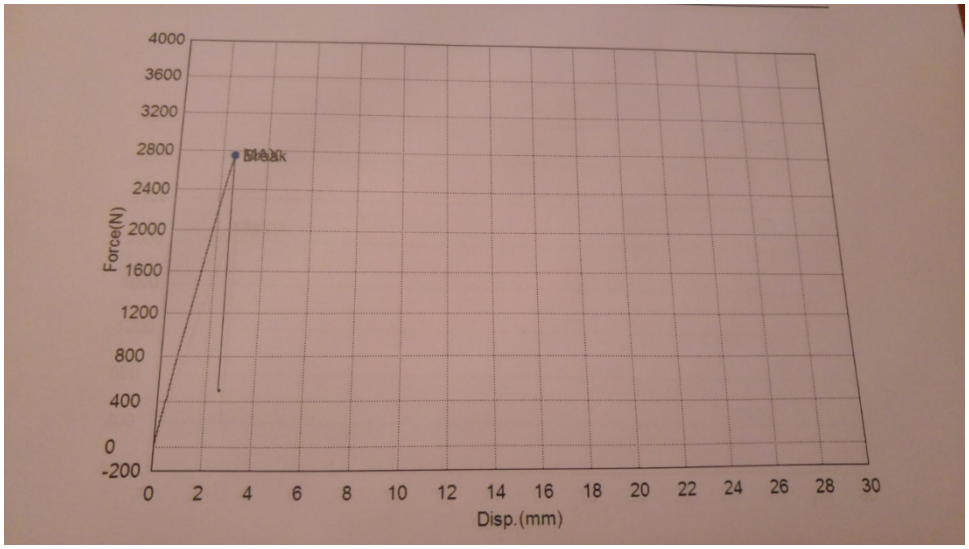
Slika 3.30. Rezultati - Magnetic iron PLA (K-45°,I-100%)

Slika 3.30. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Magnetic iron PLA (K-45°, I-50%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 2218,56 N.



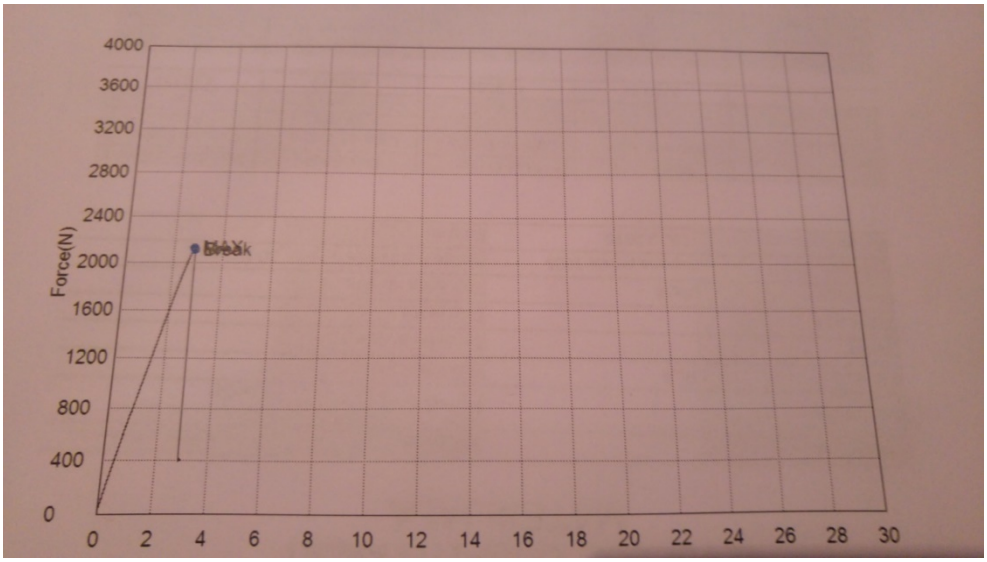
Slika 3.31. Rezultati - Magnetic iron PLA (K-45°,I-50%)

Slika 3.31. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Magnetic iron PLA (K-90°, I-100%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 2750,22 N.



Slika 3.32. Rezultati - Magnetic iron PLA (K-90°,I-100%)

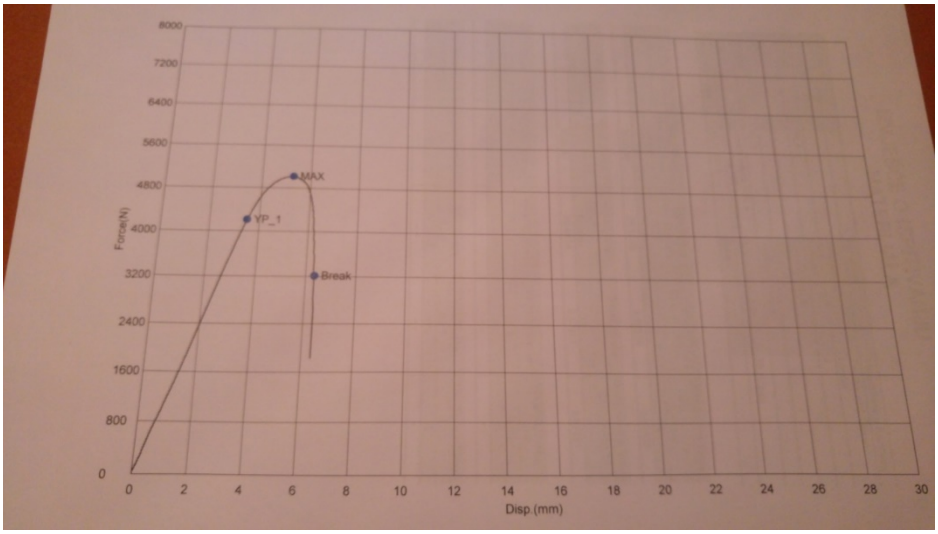
Slika 3.32. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Magnetic iron PLA (K-90°, I-50%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 2122,43 N.



Slika 3.33. Rezultati - Magnetic iron PLA (K-90°,I-50%)

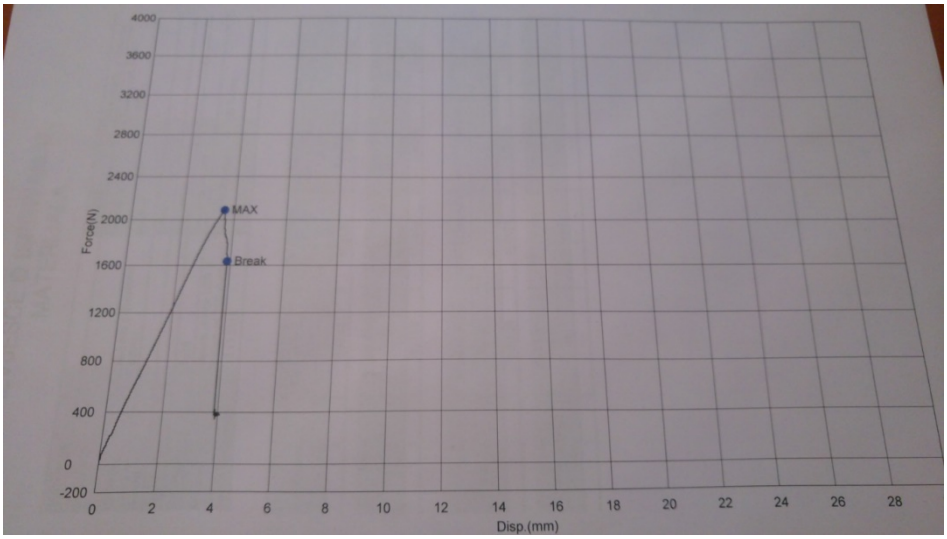
Polimer sa slika 3.27., 3.28., 3.29., 3.30., 3.31. i 3.32. se također smješta u grupaciju krhkih polimera. Taj zaključak može se donijeti na temelju rezultata iz tablice 3.2., sukladno dijagramima sa slika, gdje je vidljivo da se maksimalno istezanje polimera zadržava u prostoru do 4mm te samim time, prema grafu 3.1., za taj se prikaz može reći da spada u navedenu grupu polimera.

Slika 3.33. pokazuje dijagram naprezanja polimera koji je pokazao najbolja svojstva i rezultate prilikom ispitivanja. Na slici je vidljivio maksimalno naprezanje i maksimalno produljenje polimera do samog loma. Slika prikazuje PLA polimer sa orijentacijom printa vidljivim na slici 3.6 i 100% prostornim uređenjem ispisa. Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 5105,87 N.



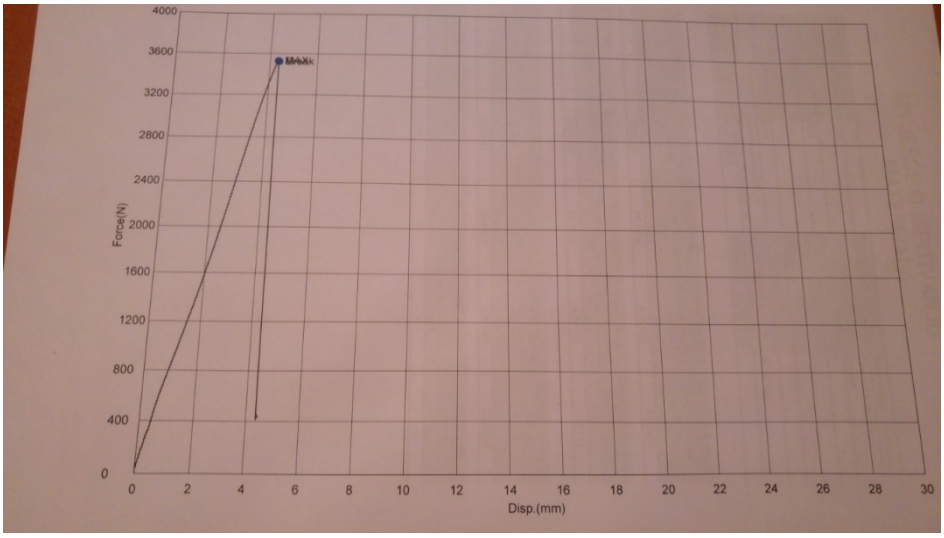
Slika 3.34. Rezultati - PLA (K-180°,I-100%)

Slika 3.34. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za PLA (K-180°, I-50%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 2090,39 N.



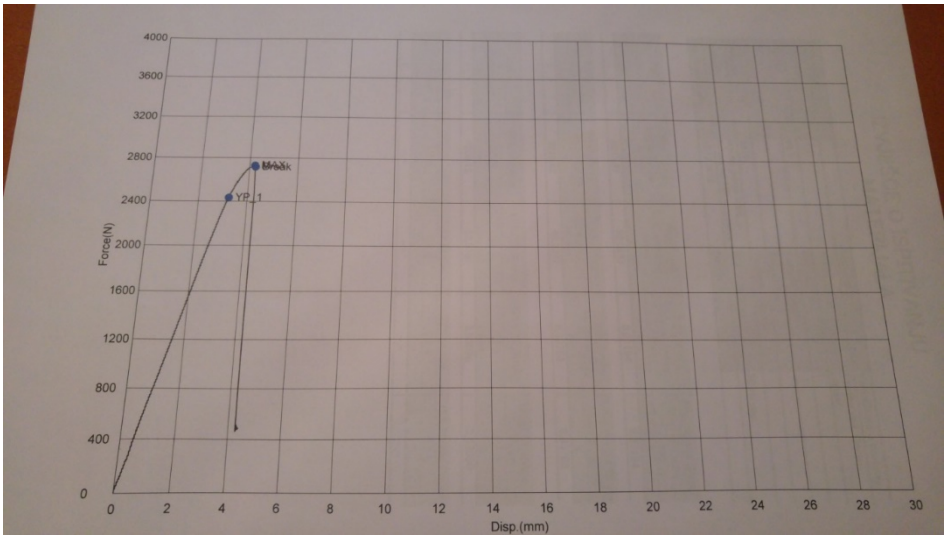
Slika 3.35. Rezultati - PLA (K-180°,I-50%)

Slika 3.35. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za PLA (K-45°, I-100%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 3530,60 N.



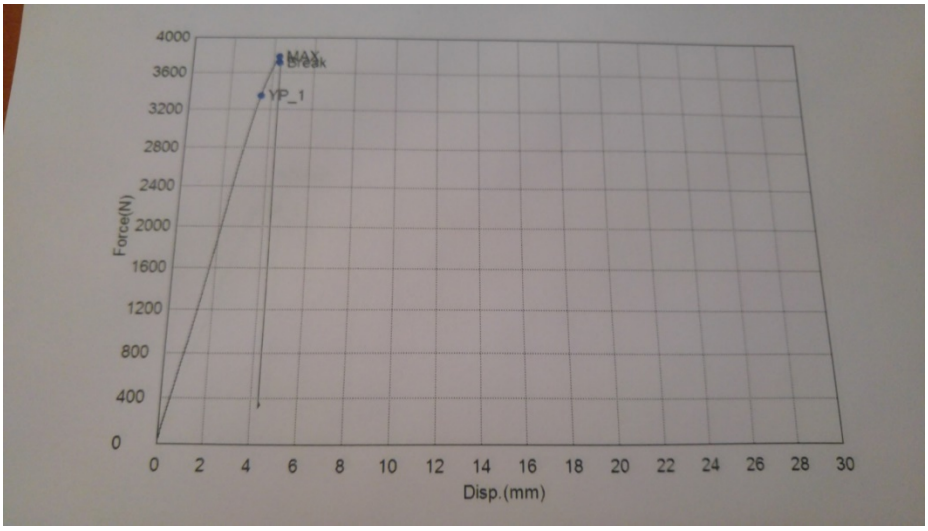
Slika 3.36. Rezultati - PLA (K-45°,I-100%)

Slika 3.36. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za PLA (K-45°, I-50%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 2732,80 N.



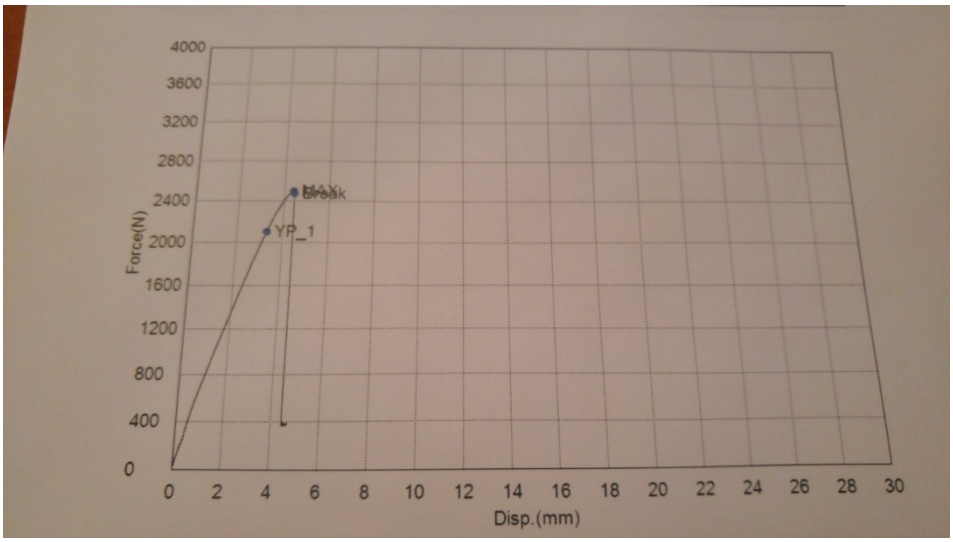
Slika 3.37. Rezultati - PLA (K-45°,I-50%)

Slika 3.37. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za PLA (K-90°, I-100%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 3780,72 N.



Slika 3.38. Rezultati - PLA (K-90°,I-100%)

Slika 3.38. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za PLA (K-90°, I-50%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 2497,88 N.

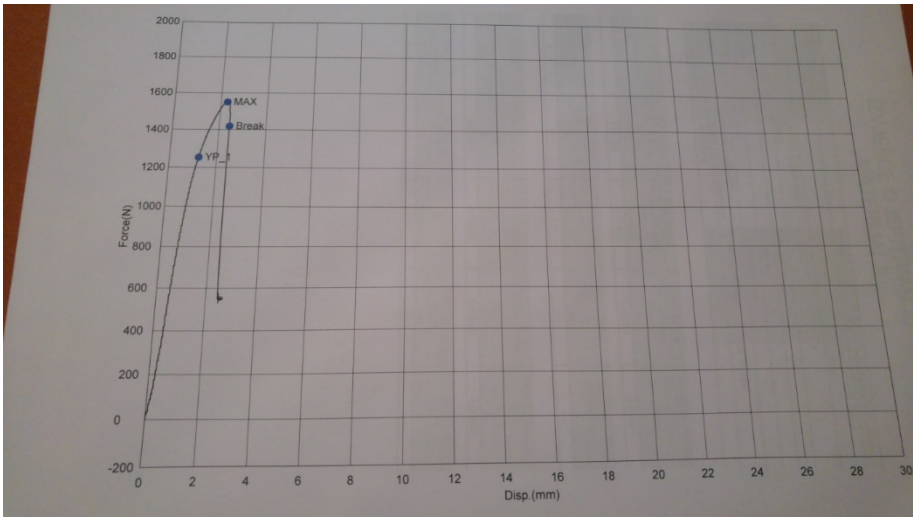


Slika 3.39. Rezultati - PLA (K-90°,I-50%)

Prema rezultatima u tablici 3.2. i dijagramima za grupu ispitivanja koja se odnosila na prethodno navedeni polimer, vidljivim na slikama 3.33., 3.34., 3.35., 3.36., 3.37. i 3.38., može se zaključiti da polimer spada u grupu *brittle plastic* odnosno krhke plastike, sa tendencijom i

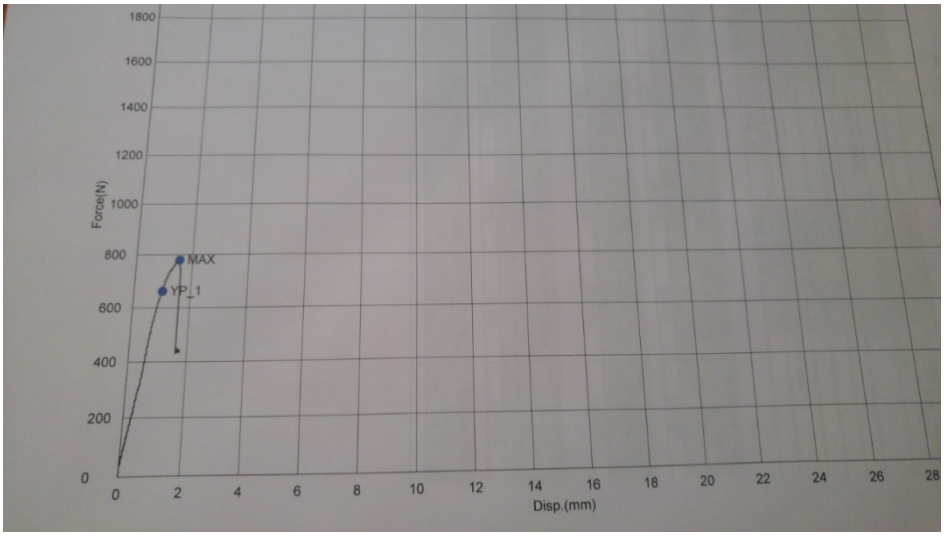
blagim svojstvima tvrde plastike. Na navedenim slikama jasno su vidljiva maksimalna istegnuća sa rasponom od min 4,2 mm do max 5,27 mm.

Slika 3.39. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Copper PLA (K-180°, I-100%). Slika pokazuje naprezanje polimera Copper PLA, orjentacije printa kao na slici 3.6. i 100% prostornim uređenjem ispisa.



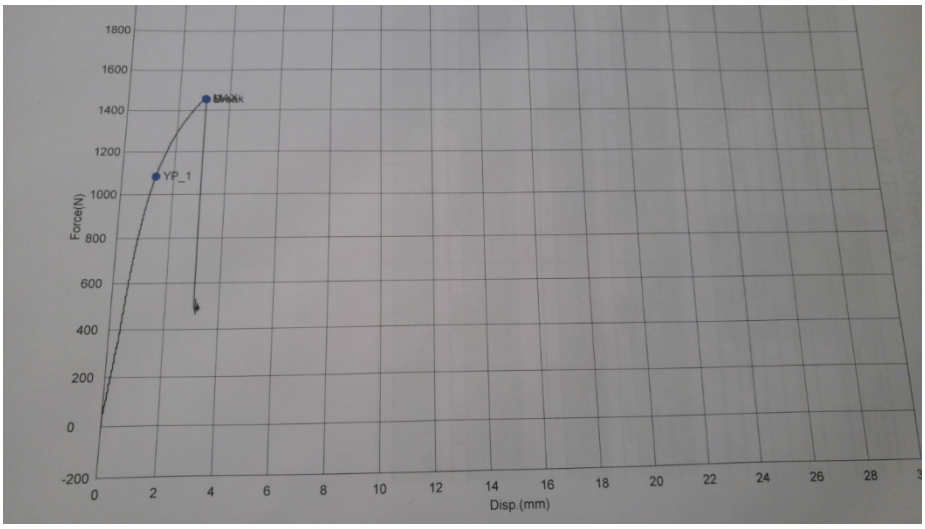
Slika 3.40. Rezultati - Copper PLA (K-180°,I-100%)

Slika 3.40. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Copper PLA (K-180°, I-50%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 779,565 N.



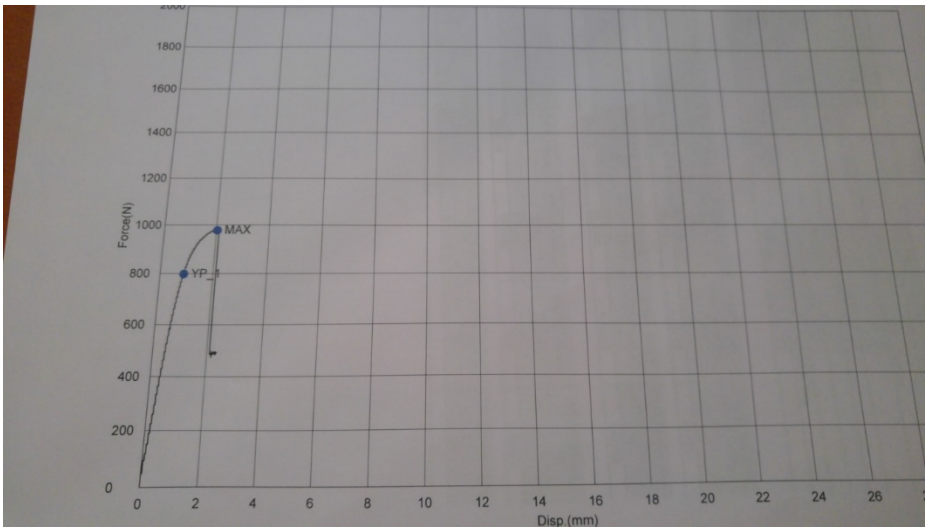
Slika 3.41. Rezultati - Copper PLA (K-180°,I-50%)

Slika 3.41. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Copper PLA (K-45°, I-100%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 1456,47 N.



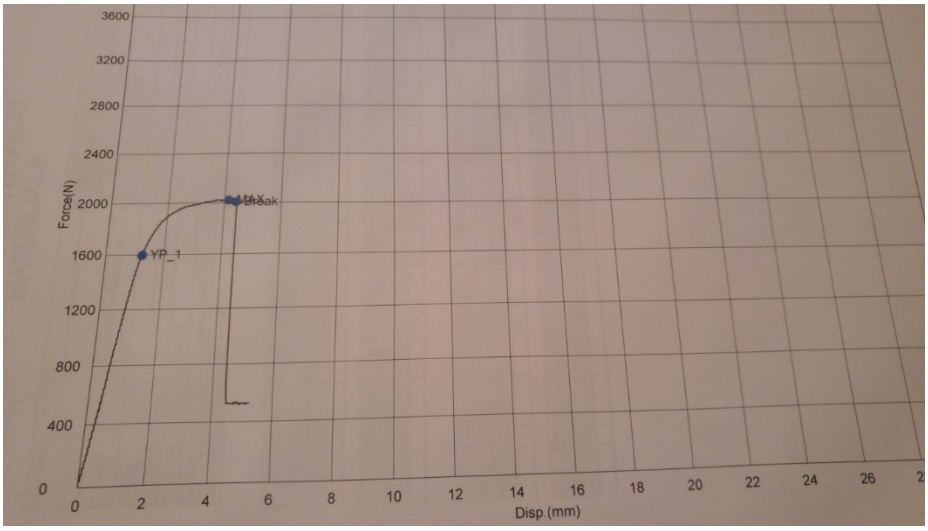
Slika 3.42. Rezultati - Copper PLA (K-45°,I-100%)

Slika 3.42. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Copper PLA (K-45°, I-50%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 980,727 N.



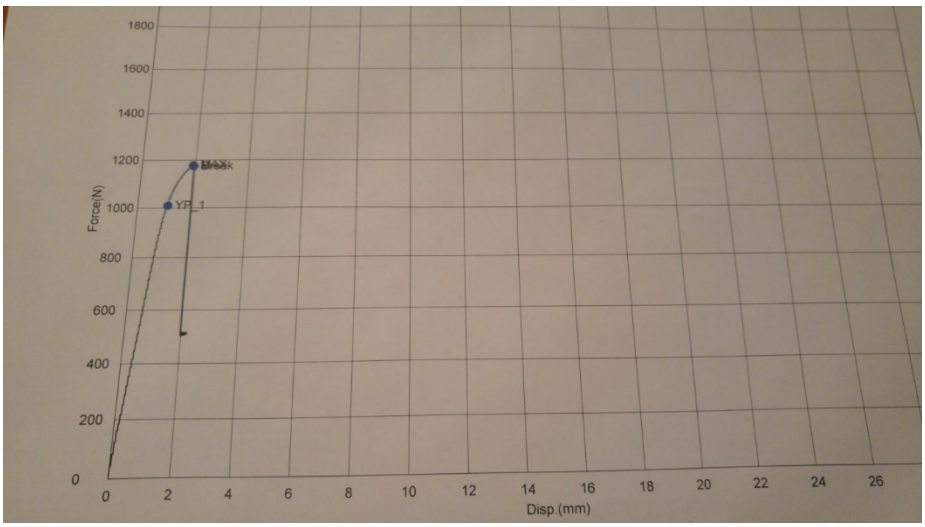
Slika 3.43. Rezultati - Copper PLA (K-45°,I-50%)

Slika 3.43. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Copper PLA (K-90°, I-100%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 2023,06 N.



Slika 3.44. Rezultati - Copper PLA (K-90°,I-100%)

Slika 3.44. prikazuje dijagram vlačne čvrstoće za Copper PLA (K-90°, I-50%). Na slici je vidljivo da je do loma došlo pri sili od 1176,53 N.



Slika 3.45. Rezultati - Copper PLA (K-90°,I-50%)

Za ovu grupu ispitivanja,vidljivo je prema slikama 3.39.-3.44., da Copper PLA polimer ima najlošije rezultate i time najlošija svojstva od prethodnih polimera. U ovoj grupi ispitivanja vidljiva je promjena max naprezanja. Naime, max naprezanje za ovu grupu polimera nije dobiveno ispitivanjem epruvete polimera sa orijentacijom prema slici 3.6. i 100% prostornim uređenjem ispisa, kao za sve prethodne polimere, već pri orijentaciji ispisa koja je vidljiva na slici 3.7. te 100% prostornim uređenjem ispisa.

Prema viđenim rezultatima sukladno usporedbama dijagrama naprezanja za raznorazne polimere, vidljivo je da svi materijali odnosno vrste polimera koji su ispitivani spadaju u lomljive odnosno krhke polimere, osim običnog PLA polimera odnosno materijala koji je pokazao najbolja svojstva. PLA polimer prema dijagramu ima tendenciju prema tvrdim polimerima odnosno rezultatima pokazuje da je na granici između krhkih i tvrdih polimera.

Tablica 3.2. prikazuje rezultate ispitivanja vlačne čvrstoće polimernih epruveta odnosno zbirno stavke sa izvješća o ispitivanju materijala koja su u prilogu rada.

Tablica 3.2. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće polimernih epruveta

Izmjerene stavke/ Tip polimera (materijal)	Max Sila (N)	Max vlačna sila (N/mm^2)	Max istezanje (mm)	Max istezanje (%)
Stainless steel PLA (K-180°,I-100%)	3148,68	39,3585	2,40277	2,40277
Stainless steel PLA (K-180°,I-50%)	1272,57	15,9071	1,92417	1,92417
Stainless steel PLA (K-45°,I-100%)	2613,00	32,6652	2,10790	2,10790
Stainless steel PLA (K-45°,I-50%)	1905,62	23,8202	2,27238	2,27238
Stainless steel PLA (K-90°,I-100%)	2104,97	26,3121	2,04483	2,04483
Stainless steel PLA (K-90°,I-50%)				
Magnetic iron PLA (K-180°,I-100%)	3835,38	47,9422	3,09640	3,09640
Magnetic iron PLA (K-180°,I-50%)	1732,89	21,6611	2,33442	2,33442
Magnetic iron PLA (K-45°,I-100%)	2719,28	33,9909	2,11592	2,11592
Magnetic iron PLA (K-45°,I-50%)	2218,56	27,7321	2,23254	2,23254
Magnetic iron PLA (K-90°,I-100%)	2750,22	34,3778	2,52785	2,52785
Magnetic iron PLA (K-90°,I-50%)	2122,43	26,5304	2,80990	2,80990
PLA (K-180°,I-100%)	**5015,87**	**62,6983**	**5,27194**	**5,27194**
PLA (K-180°,I-50%)	2090,39	26,1299	3,62638	3,62638
PLA (K-45°,I-100%)	3530,60	44,1325	4,35825	4,35825
PLA (K-45°,I-50%)	2732,80	34,1600	4,22454	4,22454
PLA (K-90°,I-100%)	3780,72	47,2589	4,26377	4,26377
PLA (K-90°,I-50%)	2497,88	31,2235	4,39329	4,39329
Copper PLA (K-180°,I-100%)	1547,46	19,3433	2,27302	2,27302
Copper PLA (K-180°,I-50%)	779,565	9,74457	1,53581	1,53581
Copper PLA (K-45°,I-100%)	1456,47	18,2058	3,04481	3,04481
Copper PLA (K-45°,I-50%)	980,727	12,2591	2,03350	2,03350
Copper PLA (K-90°,I-100%)	2023,06	25,2883	4,14265	4,14265
Copper PLA (K-90°,I-50%)	1176,53	14,7067	1,93156	1,93156

Najbolje ponašanje tijekom ispitivanja i najbolje karakteristike, vidljive u rezultatima, pokazala je obična PLA polimer sa ispunom printa 100% i printana pod kutem 180°. Razlog tome je što PLA polimer ima klasično ponašanje i veliku istezljivost kao i ostali polimeri, u odnosu na ostale materijale odnosno PLA polimere sa dodacima bakra, čelika, i željeza sa magnetičnim svojstvima. Ti materijali zbog tih sitnih postotaka dodataka imaju veću težinu, lošu koncentraciju čestica prilikom sabijanja i time su lako lomljivi. U pogledu same razlike između ispune printa u postocima i kuta printanja kod pogleda razlog tome što pod 180° je najbolji rezultat jer je to linijski zapis odnosno print polimera okomit na silu ispitivanja pa samim time niti koje su vezane na taj način imaju bolju povezanost i otpor sili ispitivanja.

12. ZAKLJUČAK

Od 1984. godine, kada je kreiran prvi funkcionalan 3D printer, do danas tehnologija 3D ispisa bilježi brz napredak. Na tržištu danas postoje različite vrste 3D printera, a svaki od njih koristi drugu tehnologiju koja obrađuje različite materijale na različite načine. Metode i tehnologije brze izrade prototipova koje se danas najčešće koriste su Stereolitografija, Fused Deposition Modeling, Polyjet tehnologija, 3D Printing, Selective Laser Sintering i Laminated Object Manufacturing. Svaka od navedenih tehnologija ima svoje prednosti i nedostatke.

U eksperimentalnom dijelu rada prikazan je postupak 3D ispisa, od crtanja modela, printanja i ispitivanja modela na kidalici. Model je nacrtan prema tablici sa standardima i definiranim dimenzijama. Za eksperiment su korištene 4 vrste materijala: običan PLA polimer, PLA polimer sa dodatkom bakra, PLA polimer sa dodatkom čestica nehrđajučeg čelika i PLA polimer sa dodatkom željeza sa magnetičnim svojstvima. Ukupno su isprintane 24 epruvete koje su zatim ispitane u laboratoriju. Za 3D printanje korišten je 3D pisač Mendel MaxPRO. Tip ispitivanja u laboratoriju je bio statično vlačno ispitivanje na Shimadzu AG-X plus kidalici.

Prema rezultatima ispitivanja može se zaključiti kako je najbolje ponašanje tijekom ispitivanja i najbolje karakteristike pokazao običan PLA polimer sa ispunom printa 100% i printana pod kutem 180°. Razlog tome je što PLA polimer ima klasično ponašanje i veliku istezljivost kao i ostali polimeri, u odnosu na ostale materijale odnosno PLA polimere sa dodacima bakra, čelika, i željeza sa magnetičnim svojstvima.

13. LITERATURA

1[] https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing

2[] https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/technology/

3[] http://materijali.grf.unizg.hr/media/TRODIMENZIONALNI%20TISAK.pdf

4[] Šimunić N., Benić Z., Brozović M.: Postupci brze izrade prototipova,
https://bib.irb.hr/datoteka/641146.POSTUPCI_BRZE_IZRADE_PROTOTIPOVA.pdf

5[] http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/intro.cfm

6[] http://www.stratasys.com/materials

7[] https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/IZIT_-
_Povratno_inzenjerstvo_i_izrada_prototipova.pdf

8[] www.simplify3d.com

9[] www.solidworks.com

10[] https://www.shimadzu.hr/ispitivanje-materijala

11[] https://hr.wikipedia.org/wiki/Dijagram_naprezanja
12[] https://hr.wikipedia.org/wiki/Hookeov_zakon