

Ispitivanje mehaničkih svojstava uzoraka dobivenih 3D ispisom

Babić, Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:175110>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-03**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište
Sjever**

Završni rad br. 034/MEH/2024

**Ispitivanje mehaničkih svojstava uzoraka dobivenih 3D
ispisom**

Ante Babić, 0336049114

Varaždin, rujan 2024. godine

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za mehatroniku		
STUDIJ	preddiplomski stručni studij Mehatronika		
PRISTUPNIK	Ante Babić	JMBAG	0336049114
DATUM	30.08.2024.	KOLEGIJ	Elementi mehatroničkih sustava
NASLOV RADA	Ispitivanje mehaničkih svojstava uzoraka dobivenih 3D ispisom		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Examination of the mechanical properties of samples obtained by 3D printing		
MENTOR	Zoran Busija, dipl. ing. stroj.	ZVANJE	predavač
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. Siniša Švoger, mag.ing.mech, predavač		
	2. prof. dr. sc. Ante Čikić		
	3. Zoran Busija, dipl.ing.stroj, predavač		
	4. Josip Srpak, dipl.ing.el, viši predavač		
	5.		

Zadatak završnog rada

BROJ 034/MEH/2024

OPIS

U završnom radu potrebno je:

- napraviti pregled osnovnih načine 3D ispisa i opisat 3D pisač Zortrax M200
- prikazati osnovne materijale za 3D ispis FFF/FDM postupkom
- opisati postupak za određivanje mehaničkih svojstava polimernih materijala prema ISO527 normi
- oblikovati epruvetu za kidalicu pomoću 3D CAD alata i izvesti je u *.STL format
- pomoću programa Z-Suite pripremiti ispis nekoliko epruveta (s različitim parametrima ispisa)
- za ispisane modele provesti statički vlačni pokus i analizirati rezultate

Ključne riječi: 3D ispis, statički vlačni pokus, STL format

ZADATAK DRUČEN

05.09.2024.



Busija Zoran



**Sveučilište
Sjever**

Odjel za Mehatroniku

Završni rad br. 034/MEH/2024

Ispitivanje mehaničkih svojstava uzoraka dobivenih 3D ispisom

Student

Ante Babić, 0336049114

Mentor

Zoran Busija, dipl.ing.stroj

Varaždin, rujan 2024. godine

Predgovor

Tijekom obavljanja prakse u tvrtki koja se bavi razvojem bespilotnih letjelica, osobito me zaintrigirala primjena 3D pisača u procesu proizvodnje. Ova tehnologija omogućava brzu i preciznu izradu dijelova, što predstavlja ključan element u napredovanju industrije bespilotnih sustava, što me potaknulo da o tome pišem u svom završnom radu. Zahvaljujem svom mentoru, Zoranu Busiji, dip. ing. stroj., na nesebičnoj podršci, strpljenju i stručnim savjetima tijekom izrade ovog završnog rada. Njegovo vodstvo i posvećenost bili su ključni za uspješan završetak ovog istraživanja. Također, želim zahvaliti svim profesorima na fakultetu koji su tijekom mog obrazovanja prenijeli svoje znanje i vještine, te me potaknuli na daljnje istraživanje i napredak u ovom području. Hvala vam na vašem trudu i uloženom vremenu.

Sažetak

U ovom završnom radu se provodi statičko vlačno ispitivanje na 3D ispisanim epruvetama koje su oblikovane prema standardu ISO 527-2. Epruvete su proizvedene korištenjem Zortrax M200 3D pisaa iz različitih materijala, uključujući ABS, Z-ULTRAT i Z-PETG. Filament je tanka nit materijala, najčešće plastike, koja se koristi kao sirovina u 3D ispisu. Cilj istraživanja je bio analizirati utjecaj različitih materijala i postavki ispisa na mehanička svojstva uzoraka, s posebnim naglaskom na vlačnu čvrstoću i modul elastičnosti. Statičko vlačno ispitivanje provedeno je korištenjem kidalice Inspekt Blue 20, koja omogućava precizno mjerenje sila potrebnih za rastezanje epruveta do njihovog loma. Rezultati ispitivanja pružili su usporedbu mehaničkih svojstava uzoraka izrađenih različitim materijalima, što omogućuje detaljan uvid u njihovu čvrstoću i otpornost na deformacije. Zaključak istraživanja naglašava značajan utjecaj vrste materijala i parametara 3D ispisa na mehaničke karakteristike ispitivanih epruveta, što je od posebne važnosti za industrijsku primjenu 3D ispisanih dijelova.

Ključne riječi: 3D ispis, STL format, statički vlačni pokus

Summary

In this thesis, static tensile testing is conducted on 3D printed specimens shaped according to the ISO 527-2 standard. The specimens were produced using a Zortrax M200 3D printer and filaments made from different materials, including ABS, Z-ULTRAT, and Z-PETG. Filament is a thin strand of material, most commonly plastic, used as a raw material in 3D printing. The aim of the research was to analyze the impact of different materials and printing settings on the mechanical properties of the samples, with a particular focus on tensile strength and elastic modulus. The static tensile test was performed using an Inspekt Blue 20 testing machine, which allows precise measurement of the forces required to stretch the specimens until their fracture. The test results provided a comparison of the mechanical properties of the samples made from various materials, offering detailed insight into their strength and resistance to deformation. The conclusion of the research highlights the significant influence of material type and 3D printing parameters on the mechanical characteristics of the tested specimens, which is of particular importance for the industrial application of 3D printed parts.

Keywords: 3D printing, STL format, static tensile test

Popis korištenih kratica

3D	3 dimensions
SLA	Stereolithography
FDM/FFF	Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication
EBM	Taljenje snopom elektrona
SLM	Selektivno Lasersko Taljenje
SLS	Selective laser Sintering
PLA	Polilaktična kiselina
ABS	Akronitril-Butadien-Stiren
UTM	Univerzalni stroj za ispitivanje
KN	Kilonjuti
ISO	International Organization for Standardization
SW	Solidworks
.stl	Standard Triangle Language file
CNC	Computer numerical control
mm	milimetar
CAD	Computer-aided design
USB	Univerzalna Serijska Sabirnica
SD	Secure Digital
UV	Ultraljubičasto Zračenje
m/s	metar/sekundi
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
GPU	Graphics Processing Unit
PLY	Polygon File Format
OBJ	Geometry definition file format

Popis oznaka i mjernih jedinica

σ	MPa	Naprezanje
F	N	Sila primijenjena na uzorak
S_0	mm ²	Površina poprečnog presjeka uzorka prije primjene sile
ε	mm/mm	Istezanje
L_0	mm	Početna duljina uzorka
E	MPa	Početna duljina uzorka
R_k	N/mm ²	Konačno naprezanje
F_k	N	Konačna sila
b	mm	Širina epruvete
h	mm	Visina epruvete
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
ΔL_u	mm	Produljenje nakon kidanja
L_u	mm	Konačna duljina nakon loma

Sadržaj

1.	Uvod	1
2.	Postupci 3D ispisa	2
2.1.	3D pisac Zortrax M200	4
3.	Vrste materijala	6
3.1.	ABS	6
3.2.	Zortrax Z-FLEX.....	8
3.3.	Zortrax Z-PETG.....	8
3.4.	Zortrax Z-ULTRAT	9
4.	Statički vlačni pokus.....	10
4.1.	ISO 527.....	13
5.	Kidalica.....	15
5.1.	Hidraulična kidalica	15
5.2.	Elektromehanička kidalica	16
5.3.	Korištena kidalica (Inspekt Blue 20).....	17
6.	Ispitni uzorci.....	19
6.1.	Pravilno pozicioniranje epruvete	20
7.	STL datoteka	22
8.	Z-SUITE	26
9.	Provođenje ispitivanja	31
9.1.	Izrada epruveti	31
9.2.	Rezultati pokusa.....	36
10.	Zaključak.....	43
11.	Literatura.....	45

1. Uvod

Tema ovog završnog rada je statičko vlačni pokus na predmetu napravljenom 3D ispisom. 3D ispis je jedna od ključnih tehnologija u suvremenoj proizvodnji, koja omogućava brzu izradu složenih oblika. Prvi patent za 3D ispis prijavljen je davne 1980. godine. Takva tehnologija je poznata kao SLA ispis. Koristi se laser i smola koja se skrućuje kada ju laser “dodirne”, te se tako izgrađuje 3D objekt, sloj po sloj. Preokret u 3D ispisu javlja se kada na pozornicu dolazi FDM/FFF tehnologija. Kreator te tehnologije je firma Startasys. Za takvu vrstu ispisa koristi se filament (materijal u obliku tanke niti). 3D pisači se sastoje od glave u kojoj se nalaze zupčanici koji uvlače filament do grijača koji topi plastiku. Rastopljena plastika izlazi kroz mlaznicu koja se nalazi nadomak podloge za ispis. Kako se glava pomiče tako se rastopljeni filament polaže na podlogu za ispis. Za ovaj završni rad korišten je 3D pisac imena Zortrax M200, te različite vrste materijala koje će se u nastavku detaljno opisati. Najpoznatiji materijali koji se koriste za 3D ispis su PLA, ABS, PETG. Ispitna epruveta je standardizirana prema ISO 527-2, koji određuje način ispitivanja plastičnih materijala. Ovim završnim radom će se napraviti vlastita analiza svojstava ispisanih materijala.

Ova tema je pomno odabrana zbog istraživanja aditivne tehnologije i samih svojstava korištenih materijala. Rezultat ovog pokusa može pomoći pri razumijevanju materijala i samog procesa 3D ispisa. Dobit će se dublji uvid u ponašanje 3D ispisanih materijala pod mehaničkim opterećenjem, te će rezultati tog pokusa poslužiti kao smjernica za optimizaciju 3D ispisanih dijelova koji se koriste u zahtjevnim aplikacijama gdje su mehanička svojstva ključna.

2. Postupci 3D ispisa

Postupak 3D ispisa napravio je veliki korak naprijed u svijetu. Tim postupcima svi proizvođači rezervnih dijelova mogu brže i jednostavnije proizvesti same dijelove. Postupak 3D ispisa se još naziva aditativna ili generativna proizvodnja. To je postupak stvaranja fizičkog objekta iz digitalne datoteke. Digitalne podatke stvaramo uz pomoć CAD alata, te naknadno uz pomoć softvera “Z -SUITE” pretvaramo taj digitalni podatak u strojni jezik pisača. Nakon što se pretvori u strojni jezik, 3D objekt se ispisuje sloj po sloj. Zbog toga što se stalno dodaju novi slojevi, ovakva se proizvodnja često naziva aditivna tehnologija. Glavni dijelovi 3D pisača uključuju grijanu radnu platformu, kontrolnu ploču, filament, te mlaznicu koja topi filament i slaže slojeve materijala kako bi oblikovala 3D objekt. Prema prethodno opisanim dijelovima, 3D pisač funkcionira na sljedeći način: prvo se zagrijavaju grijaća podloga i mlaznica, zatim se grijaća podloga pomiče do glave za ispis. Rastopljeni filament (posebna plastika ili drugi materijali) nanosi se na zagrijanu podlogu dok prvi sloj ne bude dovršen. Nakon dovršetka prvog sloja, grijaća podloga pomiče se prema dolje za visinu sloja koja se mjeri u mikrometrima. Drugi sloj filameta nanosi se na prethodni i spaja se s njim. Ako postoje područja s propustom, moguće je koristiti potporne konstrukcije od istog ili drugog materijala, međutim, alternativni materijal trebao bi se moći otopiti u vodi ili drugoj otopini. Ovaj postupak se ponavlja sve dok se 3D objekt ne završi. 3D ispis je koristan u mnogim industrijama – od proizvodnje medicinskih uređaja, dijelova za automobile, pa sve do arhitekture i modnog dizajna. Prednost ove tehnologije je u tome što omogućuje brzu izradu predmeta prema specifičnim zahtjevima, bez potrebe za složenim alatima ili strojevima.

Vrste postupaka za 3D ispis:

1. Fused Deposition Modeling (FDM)

FDM je jedan od najčešće korištenih postupaka u 3D ispisu. Ova tehnologija koristi termoplastične materijale u obliku filameta koji se kroz zagrijanu mlaznicu (ekstruder) nanose sloj po sloj kako bi se izgradio 3D objekt. Proces se odvija tako što se filament zagrijava do točke topljenja, nakon čega se materijal precizno polaže na radnu platformu prema unaprijed definiranoj putanji slojeva. Neki od proizvođača FDM pisača su Ultimaker s uređajem Ultimaker S5, te Prusa Research s uređajem Prusa i3 MK3S+.

Prednosti: Jeftina tehnologija, dostupni razni materijali (PLA, ABS, PETG i sl.), jednostavna upotreba.

Nedostaci: Površina objekta može biti grublja zbog vidljivih slojeva, mehanička svojstva su ograničena ovisno o smjeru ispisivanja.

Primjena: Kućni pisači, edukacija, manje zahtjevni proizvodi.

2. Selective Laser Sintering (SLS)

SLS koristi lasersku tehnologiju za sinteriranje (fuziju) čestica praha kako bi se stvorio 3D objekt. Materijal u obliku praha (npr. najlon, stakleni prah, keramika, metal) se rasprostire u tankom sloju preko radne platforme, te zatim laser selektivno zagrijava i spaja čestice na određenim mjestima prema 3D modelu. Tope se oni dijelovi praha koji će postati dio konačnog objekta, dok ostali prah ostaje netopljen i može se ukloniti ili ponovno koristiti. Nakon svakog sloja, platforma se spušta i nanosi se novi sloj praha. Neki od proizvođača SLS pisača su EOS s uređajem EOS Formiga P 110 i 3D Systems s uređajem ProX SLS 6100.

Prednosti: Visoka preciznost, nema potrebe za potpornim strukturama (praškasti materijal služi kao potpora), širok raspon materijala uključujući najlon, metal i staklo.

Nedostaci: Skuplji od FDM-a, zahtijeva sofisticiranu opremu i postprocesiranje kako bi se uklonio višak praha.

Primjena: Kompleksni oblici, izrada dijelova u malim serijama.

3. Selective Laser Melting (SLM)

SLM je naprednija verzija aditivne proizvodnje koja koristi laser za potpuno topljenje metalnog praha kako bi se izradio 3D objekt. Proces je sličan SLS-u, međutim, dok SLS samo sinterira prah, SLM potpuno topi metalne čestice, stvarajući čvrste i visoko precizne metalne dijelove. Poznati proizvođači su SLM Solutions s uređajem SLM 280, te Renishaw s uređajem RenAM 500Q.

Prednosti: Visoka čvrstoća i kvaliteta dijelova, omogućuje izradu kompleksnih metalnih struktura koje se ne mogu izvesti konvencionalnim metodama.

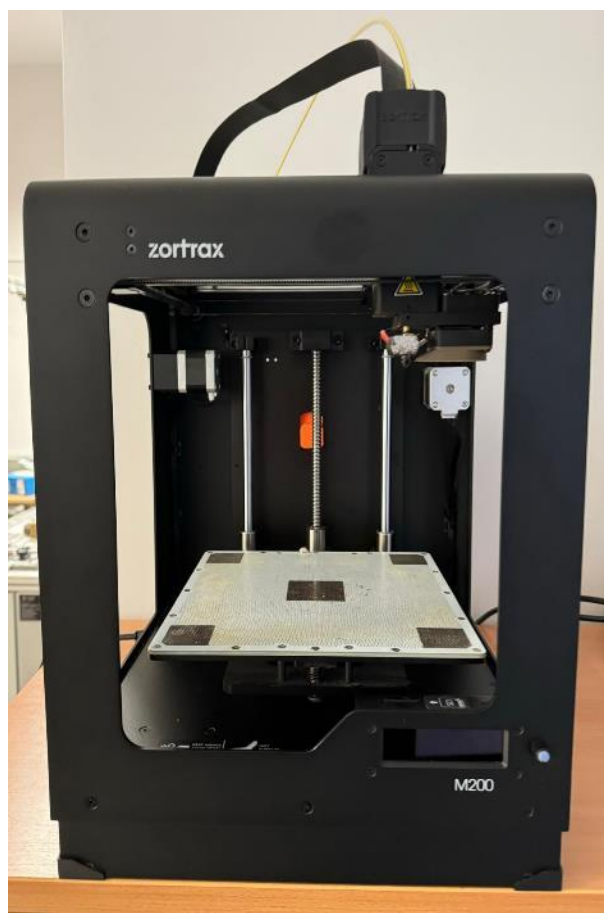
Nedostaci: Vrlo skupa tehnologija, zahtijeva specijalizirane materijale i strojeve, potrebno je dodatno postprocesiranje.

Primjena: Proizvodnja dijelova u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji.

2.1. 3D pisač Zortrax M200

Zortrax je Poljska marka 3D pisača za profesionalni 3D ispis. Za mnoge korisnike 3D pisača, Zortrax svrstavaju među najpoznatija imena u kategoriji profesionalnih 3D pisača. Zortrax M200 je profesionalni FDM 3D pisač, dizajniran za maksimalno pouzdan i kontinuiran rad.

Maksimalna veličina objekta koji se može ispisati iznosi 200 x 200 x 180 mm. Što se tiče debljine sloja, pisač može izraditi slojeve debljine od 90 do 400 mikrona, što omogućuje visoku razinu detalja. Zortrax M200 je dizajniran za stabilnost i preciznost tijekom ispisa. Metalna konstrukcija kućišta pomaže u održavanju točnosti.



Slika 2.1. Pisač Zortrax M200

Zortrax M200 je kompatibilan s različitim filamentima, uključujući Z-ABS, Z-ULTRAT, Z-HIPS, Z-GLASS, Z-PCABS i Z-PETG, kao i s filamentima drugih proizvođača. Standardna mlaznica ima promjer od 0,4 mm, a pisač također posjeduje grijanu podlogu koja pomaže u sprječavanju deformacija modela tijekom hlađenja. Pisač se može povezati putem USB-a ili SD kartice, što omogućuje jednostavno prenošenje datoteke s programom za ispis. Uz pisač se koristi Z-SUITE softver, koji omogućava jednostavnu pripremu modela za ispis, s različitim postavkama

za materijale i slojeve. Sve ove karakteristike čine Zortrax M200 izvrsnim izborom za korisnike koji trebaju pouzdan i precizan 3D pisač, bilo za profesionalne svrhe ili za osobne projekte.

Prednosti:

1. **Pouzdanost:** Zortrax M200 je poznat po svojoj pouzdanosti i dosljednim rezultatima, što ga čini pogodnim za profesionalnu upotrebu.
2. **Jednostavnost korištenja:** S integriranim softverom korisnici mogu lako postaviti i upravljati ispisom dijelova.
3. **Kvaliteta izrade:** Pisač omogućuje visoku kvalitetu izrade s dobrim detaljima i preciznošću.

Nedostaci:

1. **Veličina radnog volumena:** Ograničena veličina objekta koji se može ispisati može biti problematična za veće projekte.
2. **Cijena filamenata:** Originalni Zortrax filamenti su skuplji u usporedbi s nekim drugim brendovima.

Primjena:

1. **Obrazovanje:** Koristi se u obrazovnim ustanovama za demonstraciju tehnologije 3D ispisivanja, ali i za realne proizvodne procese.
2. **Kreativni projekti:** Pogodan za umjetničke i hobi projekte zbog svoje preciznosti i kvalitete.

3. Vrste materijala

Materijali koji se koriste u 3D ispisivanju variraju ovisno o tehnologiji ispisa i potrebama projekta. Svaka vrsta materijala ima svoje karakteristike, prednosti i mane. Izbor materijala ovisi o namjeni objekta, željenim svojstvima i zahtjevima projekta. Materijali za 3D ispis uključuju nekoliko ključnih vrsta, od kojih su najpopularniji PLA, ABS i PETG. PLA je biorazgradiv i jednostavan za ispis, što ga čini idealnim za početnike. ABS je izdržljiviji i otporniji na udarce, ali zahtijeva grijanu podlogu zbog sklonosti deformaciji. PETG nudi dobru kombinaciju snage i jednostavnosti ispisa, te je otporan na kemikalije. Osim ovih, koriste se i materijali poput najlona, koji je fleksibilan i otporan na habanje. Svaki materijal ima svoje specifične prednosti, ovisno o namjeni 3D ispisanog dijela. Za završni rad uglavnom će se koristiti filamenti marke Zortrax. Najpoznatiji i najkorišteniji materijal za 3D ispis je PLA (Polilaktična kiselina). Ima izuzetno pristupačnu cijenu te je dostupan u raznim bojama. Veliki plus mu je jednostavnost korištenja, niža temperatura mlaznice te mogućnost ispisa na podlozi koju nije prethodno potrebno zagrijati. Glavni nedostatak PLA materijala su njihova mehanička svojstva, neotpornost na temperature iznad 60 °C te loša otpornost na savijanje i uvijanje. Temperatura za ispis mlaznice treba biti između 200 i 230 °C a podloge 0-60 °C. Za ovaj rad neće se koristiti PLA materijali, nego materijal koji je drugi po popularnosti, a to je ABS (Akrilonitril-Butadien-Stiren) te filamenti tvrtke Zortrax.

3.1. ABS

ABS (Akrilonitril-Butadien-Stiren) je drugi najpopularniji i najšire korišteni filament za 3D ispis, odmah nakon PLA. Najčešće se koristi u FDM ispisu zbog mehaničke čvrstoće, te visoke toplinske i kemijske otpornosti. ABS je filament koji je fleksibilan, može poprimiti gotovo svaki oblik, te se ravnomjerno stvrdnjava. Čak se i pri visokim temperaturama može brzo ispisivati s ABS-om. ABS filamenti zbog svoje čvrstoće, izdržljivosti i fleksibilnosti, nalaze primjenu u raznim industrijama, uključujući automobilsku, elektroničku, medicinsku i zrakoplovnu. Moguće je izraditi zupčanike, ležajeve, kućišta i arhitektonske module.

Za razliku od PLA-a, koji zahtijeva niže temperature obrade, ABS zahtijeva visoku temperaturu obrade i grijanu podlogu (najbolja bi bila komora) za ispis. Prilikom ispisa, temperatura mlaznice treba biti između 220 °C i 250 °C. Temperatura mlaznice može varirati ovisno o marki filamenta, stoga je najbolje pročitati priručnik. Temperatura podloge treba varirati od 80 °C do 110 °C. Materijal korišten za ovaj rad naručen je od tvrtke Filament PM (slika 3.1.), a dostupan je u težini od 1 kg s promjerom filamenta od 1,75 mm i tolerancijom odstupanja od

$\pm 0,05$ mm. Temperatura mlaznice će se za ovaj filament podesiti na $275\text{ }^{\circ}\text{C}$, dok će temperatura podloge biti $80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pozitivna svojstva:

1. Dobra mehanička svojstva: ABS je otporan na ogrebotine, toplinu, električnu energiju i svakodnevne kemikalije. Također, ima blagu fleksibilnost, što ga čini manje krhkim u usporedbi s PLA-om.
2. Jednostavna naknadna obrada: Lako ga je obraditi, posebno u usporedbi s PLA-om. Može se dodatno obraditi parom acetona, što uklanja sve linije slojeva i daje glatku, čistu površinu.

Negativna svojstva:

1. Jaka i otrovna isparavanja: Tijekom ispisa oslobađaju se otrovne i neugodne kemikalije poput stirena. Istraživanja pokazuju da koncentracija čestica ABS-a može biti do 38 puta veća od onih koje nastaju prilikom ispisa iz PLA materijala. Ovaj problem može se ublažiti ispisom u dobro prozračenoj prostoriji ili u zatvorenom kućištu pisača s HEPA filterom.
2. Poteškoće u 3D ispisu: Potrebno je pažljivo upravljati temperaturom jer se ABS mora polako hladiti kako bi se izbjegle pukotine ili odvajanje slojeva. Također, zahtijeva potpuno grijanu podlogu za ispis.
3. UV osjetljivost: Iako je ABS otporniji na UV zračenje od PLA-a, dugotrajna izloženost sunčevoj svjetlosti može uzrokovati oštećenja.



Slika 3.1. Korišteni ABS filament

3.2.Zortrax Z-FLEX

Svi filamenti koje ćemo opisati u tekstu ispod dolaze od tvrtke Zortrax. U svijetu 3D ispisa, Zortrax Z-Flex predstavlja materijal koji donosi jedinstvenu kombinaciju fleksibilnosti i izdržljivosti. Ovaj filament je dizajniran za stvaranje objekata koji ne samo da se mogu savijati i rastezati, već se nakon toga vraćaju u svoj prvotni oblik, nalikujući gumi. Zortrax Z-Flex je idealan za izradu elastičnih dijelova kao što su gumena brtvila, fleksibilne kopče i slični elementi. Za optimalne rezultate preporučuje se ispisivanje manjom brzinom i korištenje više temperature mlaznice. Zortrax Z-Flex treba pravilno čuvati kako bi se osigurao njegov vijek trajanja i kvaliteta. Kao i kod drugih fleksibilnih filamenata, važno je održavati ga suhim kako bi se izbjeglo upijanje vlage, što može loše utjecati na rezultate ispisa. Ovaj filament predstavlja odličan izbor za one koji traže materijal koji spaja fleksibilnost i izdržljivost. S pravim postavkama pisaa i pažljivim rukovanjem, ovaj filament omogućuje stvaranje visokokvalitetnih fleksibilnih objekata, čineći ga idealnim za brojne primjene u 3D ispisu.

Filament ima promjer od 1,75 mm i dolazi u pakiranju od 800 g. Temperatura mlaznice za ovaj filament treba biti 230 °C, a temperatura podloge treba biti 50 °C.

3.3.Zortrax Z-PETG

Zortrax Z-PETG je filament za 3D ispis poznat po svojoj izdržljivosti i svestranosti. Ovaj materijal je izveden iz PETG-a, koji je vrsta polietilena koja se često koristi zbog svojih odličnih fizičkih svojstava. Zortrax Z-PETG je odličan izbor za projekte koji zahtijevaju robusne i dugotrajne objekte, kao i za primjene gdje su potrebna dodatna svojstva poput otpornosti na vlagu i kemikalije. Z-PETG je poznat po svojoj visokoj čvrstoći i otpornosti na udarce. Ovaj filament pruža izvrsnu otpornost na mehanička opterećenja, što ga čini idealnim za dijelove koji će biti izloženi stresu ili opterećenju. Otporan je na vlagu i mnoge kemikalije, uključujući alkohol i razna otapala. Ova otpornost ga čini pogodnim za izradu dijelova koji će biti u kontaktu s različitim tvarima ili u vlažnim okruženjima. Preporučuje se ispisivanje na srednjim brzinama kako bi se postigla visoka kvaliteta ispisa. Tipična brzina ispisa je između 40 mm/s i 60 mm/s. Z-PETG ima nisku sklonost savijanju tijekom ispisa, što pomaže u očuvanju dimenzionalne točnosti i kvalitete objekta. Lako se obrađuje i može se brusiti, bušiti ili bojati nakon ispisa, što ga čini svestranim za različite prigode. Zortrax Z-PETG je odličan za projekte koji zahtijevaju izdržljive i robusne dijelove. Može se koristiti za izradu tehničkih komponenti, prototipova koji će biti izloženi stresu, kao i za dijelove koji će biti u kontaktu s vlagom ili kemikalijama. Filament ima promjer od 1,75 mm i dolazi u pakiranju od 800 g

Temperatura mlaznice koja se koristi za ovaj filament treba biti 240 °C, dok se temperatura podloge postavlja na 30 °C.

3.4. Zortrax Z-ULTRAT

Zortrax Z-ULTRAT je filament za 3D ispis koji je posebno dizajniran za one dijelove koji zahtijevaju visoku izdržljivost i vrhunsku kvalitetu. Ovaj materijal je izveden iz ABS-a, s poboljšanjima koja ga čine još robusnijim i lakšim za obradu, što ga čini odličnim izborom za stvaranje jakih i dugotrajnih dijelova. Z-ULTRAT nudi izvrsnu čvrstoću i otpornost na udarce. Ovaj filament je idealan za izradu dijelova koji će biti izloženi velikim opterećenjima. Odlikuje se dobrom otpornošću na visoke temperature, što znači da će zadržati svoja svojstva čak i kada je izložen povišenim temperaturama. Ovo je korisno za dijelove koji će biti korišteni u toplijim okruženjima. Preporučuje se ispisivanje na srednjim brzinama kako bi se postigla visoka kvaliteta ispisa i smanjili problemi s deformacijama. Tipična brzina ispisa za Z-ULTRAT je između 40 mm/s i 60 mm/s. Dizajniran je tako da minimizira skupljanje i deformacije tijekom hlađenja, što doprinosi preciznosti i dimenzionalnoj točnosti gotovih dijelova. Zortrax Z-ULTRAT je odličan za komponente koje zahtijevaju visoku izdržljivost i robusnost. Može se koristiti za izradu tehničkih dijelova, funkcionalnih prototipova i komponenti koje će biti izložene velikim opterećenjima ili visokim temperaturama.

Temperatura mlaznice koja se koristi za ovaj filament je 260 °C, dok se temperatura podloge postavlja na 80 °C.

4. Statički vlačni pokus

Statičko vlačno ispitivanje (tensile test) je eksperimentalna metoda koja se koristi za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala pod utjecajem vlačne sile (sile koja rasteže uzorak). Ovim ispitivanjem određuju se osnovna mehanička svojstva materijala, kao što su granica razvlačenja (R_e), vlačna čvrstoća (R_m) i Youngov modul elastičnosti (E). Tijekom pokusa mjeri se produljenje epruvete i sila istezanja, iz kojih se može izračunati naprezanje dijeljenjem sile s poprečnim presjekom epruvete. Istezanje se određuje dijeljenjem produljenja epruvete s njenom početnom duljinom. Epruveta se isteže uzduž svoje osi konstantnom brzinom sve dok ne dođe do loma ili dok duljinska deformacija ne postigne zadanu vrijednost. Najvažniji parametri tijekom postupka kidanja su sila pri kojoj dolazi do tečenja materijala (F_e) i maksimalna postignuta sila (F_m). Nakon završetka kidanja mjeri se duljina uzorka (L_u) i produljenje (ΔL) u odnosu na početnu duljinu uzorka (L_0).

Postupak ispitivanja

1. Postavljanje uzorka: Uzorak se postavlja u stroj za vlačno ispitivanje (npr. kidalica), a zatim se na njega primjenjuje vlačna sila dok se ne rastegne do loma.
2. Mjerenje sile i istezanja: Tijekom ispitivanja mjeri se sila primijenjena na uzorak i promjena njegove duljine.
3. Analiza podataka: Na temelju dobivenih podataka izračunavaju se mehanička svojstva materijala.

Naprezanje (σ) se definira kao sila po jedinici površine koja djeluje na materijal. Računa se prema formuli:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

σ : naprezanje [N/mm^2]

F: sila primijenjena na uzorak [N]

S_0 : Površina poprečnog presjeka uzorka prije primjene sile [mm^2]

Relativna deformacija (ϵ): Relativna deformacija (istezanje) je omjer promjene duljine uzorka (ΔL) u odnosu na početnu duljinu (L_0):

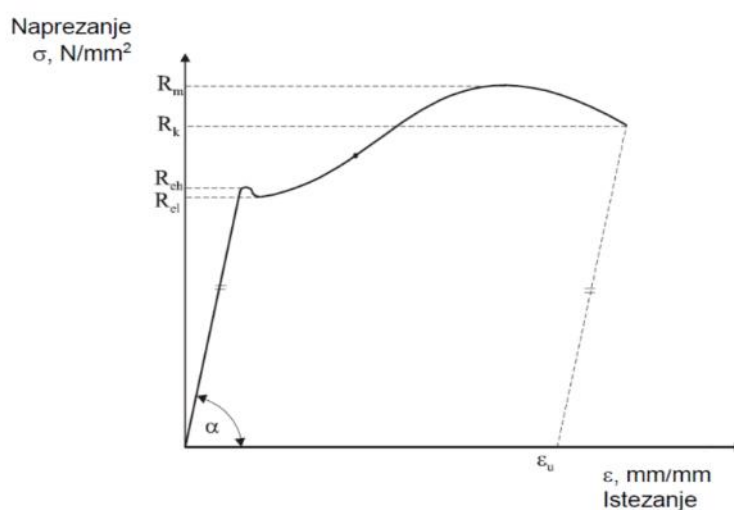
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

ε : Istezanje (mm/mm)

ΔL : Promjena duljine uzorka [mm]

L_0 : Početna duljina uzorka [mm]

Na taj način se dobiva “inženjerski” ili konvencionalni dijagram naprezanje σ – istezanje ε .



Slika 4.1. “Inženjerski” ili konvencionalni dijagram naprezanje σ – istezanje ε .

Konvencionalni dijagram naprezanja σ i istezanja ε pokazuje vezu između sile koja djeluje na materijal i njegovog istezanja. Dijagram počinje iz nulte točke, a prvi dio krivulje je ravan pravac koji pokazuje elastično ponašanje materijala. Ovo ponašanje opisuje Hookeov zakon:

$$\sigma = E * \varepsilon$$

Gdje su:

E : Modul elastičnosti [N/mm²]

σ : Naprezanje [N/mm²]

ε : Istezanje [mm/mm]

U elastičnom području, naprezanje i istežanje su proporcionalni. Modul elastičnosti E je mjera toga koliko je materijal krut. Što je E veći, materijal je teže rastegnuti.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Nagib pravca na početku dijagrama, koji ide iz ishodišta, pokazuje modul elastičnosti E. Što je pravac strmiji, to je modul elastičnosti veći. Modul elastičnosti pokazuje koliko je jaka veza između atoma u materijalu. Najveći modul elastičnosti ima dijamant, s vrijednošću od 1.200.000 N/mm².

Vlačna ili rastezna čvrstoća (R_m) označava koliko materijal može izdržati sile koje ga rastežu prije nego što pukne. Izračunava se tako da se maksimalna sila (F_m) podijeli s početnom površinom presjeka materijala (S_0). Formula je:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

R_m ne predstavlja najveće naprezanje koje materijal može podnijeti, već naprezanje koje nastaje kod maksimalne sile. Kada materijal dosegne maksimalnu silu (F_m), njegov presjek se počinje smanjivati, ali stvarno naprezanje može i dalje rasti, iako sila opada. Vlačna čvrstoća je jedno od glavnih svojstava prema kojem ocjenjujemo koliko je neki materijal otporan na istežanje i lom. Ovo svojstvo je važno jer nam pomaže razumjeti koliko je materijal pouzdan u raznim primjenama, primjerice u građevinarstvu ili strojarstvu.

Konačno naprezanje (R_k) označava naprezanje pri kojem dolazi do loma epruvete. Izračunava se tako da se konačna sila (F_k) podijeli s površinom početnog presjeka epruvete (S_0):

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, N/mm^2$$

Produljenje nakon kidanja ΔL_u pokazuje koliko se materijal fizički produljio tijekom ispitivanja naprezanja sve dok nije došlo do loma.

$$\Delta L_u = L_u - L_0$$

Gdje su:

ΔL_u : produljenje nakon kidanja [mm]

L_u : konačna duljina nakon loma [mm]

L_0 : početna mjerna duljina epruvete [mm]

Faze tijekom statičkog vlačnog ispitivanja:

1. Elastično područje: Kada se primjenjuje sila materijal se rasteže ali se može vratiti u prvobitni oblik kada se sila ukloni. Ovo je elastična deformacija. U ovom dijelu vrijedi Hookeov zakon: naprezanje je proporcionalno deformaciji.
2. Granica elastičnosti: Ovo je točka kada materijal prestaje biti elastičan i prelazi u plastično područje. Nakon ove točke, materijal se trajno deformira i neće se vratiti u svoj izvorni oblik kad se opterećenje ukloni.
3. Plastična deformacija: Materijal se počinje trajno rastezati. Iako i dalje podnosi veće sile, njegova unutarnja struktura se mijenja.
4. Vlačna čvrstoća: Ovo je točka najveće sile koju materijal može podnijeti prije nego što počne pucati.
5. Lom: Na kraju, materijal puca, što završava test.

Statičko vlačno ispitivanje je ključno za određivanje mehaničkih svojstava materijala. Ono daje uvid u sposobnost materijala da izdrži sile koje ga rastežu i omogućuje procjenu njegove čvrstoće, krutosti i sposobnosti deformacije. Ove informacije su od velikog značaja za inženjerske primjene, poput izbora materijala za konstrukcije, mehaničke dijelove i druge proizvode gdje su mehanička svojstva presudna.

4.1. ISO 527

ISO 527 je međunarodni standard koji opisuje metode za ispitivanje mehaničkih svojstava plastičnih materijala pod opterećenjem, konkretno u vlačnom ispitivanju. Ovaj standard omogućuje precizno određivanje svojstava kao što su vlačna čvrstoća, modul elastičnosti i istežanje uzoraka plastike do loma. Cilj ISO 527 standarda je osigurati dosljednost i usporedivost rezultata vlačnih ispitivanja za plastične materijale, bez obzira na izvor ili tip materijala. Metode propisane ovim standardom koriste se u istraživanju, razvoju i kontroli kvalitete, kao i u industrijskoj proizvodnji za izbor materijala temeljenih na njihovim mehaničkim svojstvima.

ISO 527 se sastoji od nekoliko dijelova koji pokrivaju različite tipove plastičnih materijala i oblika uzoraka:

- ISO 527-1: Opći principi i metode ispitivanja plastičnih materijala.
- ISO 527-2: Testiranje lijevanih i ekstrudiranih polimera.
- ISO 527-3: Testiranje plastičnih folija i filmova.

ISO 527-2 specifično se bavi statičkim vlačnim ispitivanjem čvrstih plastičnih materijala, kao što su ploče, profili i drugi kruti oblici. Ovaj dio standarda definira kako treba pripremiti uzorke, postaviti uvjete ispitivanja i provesti mjerenja kako bi se dobili precizni rezultati. Epruvete za ispitivanje oblikovane su prema strogo definiranim dimenzijama, najčešće u obliku epruveta s užim središnjim dijelom, kako bi se osigurao jednolik lom u kritičnoj točki. ISO 527-2 također propisuje različite brzine rastezanja ovisno o vrsti materijala i očekivanim svojstvima.

Ovaj standard posebno je važan za industrijsku primjenu jer omogućuje inženjerima da procijene hoće li određeni materijal biti prikladan za specifične uvjete upotrebe, poput opterećenja i deformacija. Rezultati ispitivanja prema ISO 527-2 daju detaljan uvid u mehanička svojstva čvrstih plastičnih dijelova i komponenti, što pomaže pri odabiru materijala za različite inženjerske aplikacije, uključujući 3D printane dijelove.

5. Kidalica

Univerzalni stroj za ispitivanje (UTM) je uređaj koji se koristi za mjerenje tlačne i vlačne čvrstoće materijala kojeg zovemo kidalica. Glavna funkcija ovog stroja za ispitivanje je primjena potrebne sile na ispitni uzorak i određivanje ponašanja materijala pod tim uvjetima. Epruveta se na ispitnom stroju kontinuirano razvlači uz blagi prirast opterećenja sve dok ne dođe do pucanja ili loma.

Tijekom istezanja epruvete, mjerni uređaji kontinuirano prate silu i produljenje, te se rezultati grafički prikazuju putem pisaača ili računala u obliku dijagrama "sila – produljenje". Ovisno o području primjene, ispitni strojevi mogu imati različite pogone.

Kidalice možemo podijeliti prema sljedećim kriterijima:

1. Položaju osi ispitnog uzorka
2. Namjeni
3. Sustavu opterećenja

S obzirom na položaj ispitnog uzorka, razlikujemo horizontalne i vertikalne kidalice. Kod horizontalnih kidalica epruveta se polaže vodoravno, dok se kod vertikalnih kidalica epruveta polaže okomito. Vertikalne kidalice su češće zastupljene zbog veće sile koju mogu postići, a koja može biti do 1000 kN.

Današnje kidalice moraju zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

1. Jednostavnost izvedbe, te manja masa i čvrstoća okvira uređaja kako bi se izbjegle deformacije i oštećenja tijekom ispitivanja.
2. Jednostavnost izvedbe steznih čeljusti kako bi se spriječilo isklizavanje uzorka tijekom ispitivanja.
3. Opterećenje se mora primjenjivati mirno, bez udaraca.

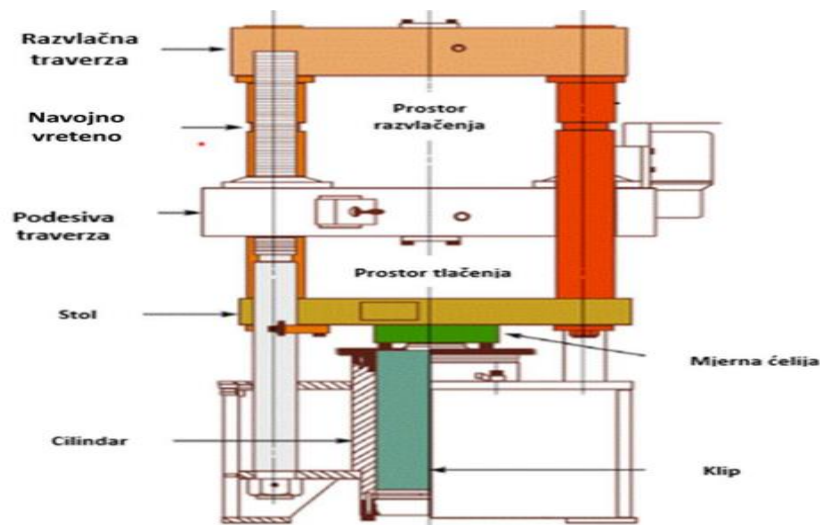
Strojevi za ispitivanje se razlikuju prema mehanizmu kojim primjenjuju opterećenje i dijele se na:

1. Hidraulične kidalice
2. Elektromehaničke kidalice

5.1. Hidraulična kidalica

Hidraulične kidalice ostvaruju opterećenje pomoću hidrauličnog cilindra s klipom i pripadajućim hidrauličkim napajanjem. Maksimalna sila koju zupčano pogonjen sustav može

generirati iznosi do 4500 kN. Mehanizam ovih kidalica temelji se na radu hidrauličkog klipa, koji može biti u izvedbi s jednim ili dvostrukim klipom i pomiče pokretnu traverzu gore ili dolje. Servo hidraulične kidalice koriste hidrauličku pumpu i servo hidraulične ventile koji pokreću klipni aktuator. Na slici 5.1 prikazani su dijelovi hidraulične kidalice

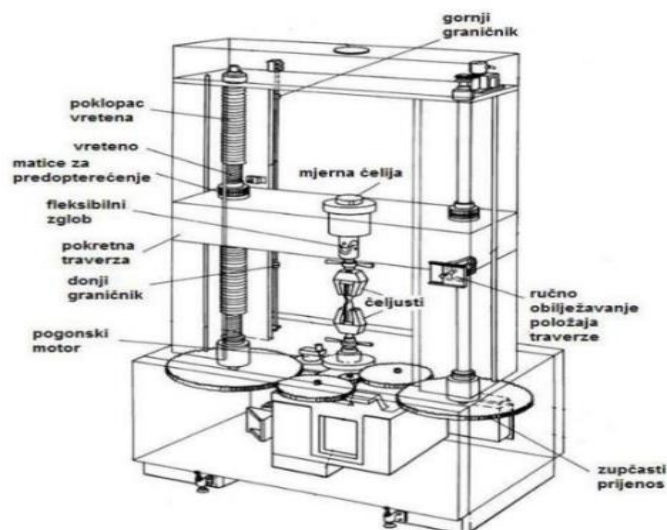


Slika 5.1. Komponente hidraulične kidalice

5.2. Elektromehanička kidalica

Elektromehaničke kidalice ostvaruju opterećenje putem navojnog vretena koje pokreće elektromotor preko sustava zupčanika ili reduktora, kako bi se osigurala odgovarajuća brzina. Maksimalna sila koju zupčano pogonjen sustav može postići iznosi do 600 kN. Ove kidalice koriste veliko navojno vreteno koje je provučeno kroz pokretnu traverzu. Izgled elektromehaničke kidalice s njezinim dijelovima prikazan je na slici 5.2.

Vijčano vreteno se okreće u oba smjera pomoću elektromotora i reduktorskog sustava, omogućujući kretanje traverze gore ili dolje. Elektromehaničke kidalice su konstruirane za postizanje brzine pokretne traverze od $1,8 \times 10^{-8}$ m/s do $8,5 \times 10^{-3}$ m/s. Brzina traverze može se kontrolirati promjenom brzine elektromotora i prijenosnog omjera, dok servo pogonski sustav osigurava da se traverza kreće konstantnom brzinom. Ležajevi i zupčnici moraju se posebno tretirati kako bi se izbjegla oštećenja tijekom primjene velikih sila.



Slika 5.2. Komponente elektromehaničke kidalice

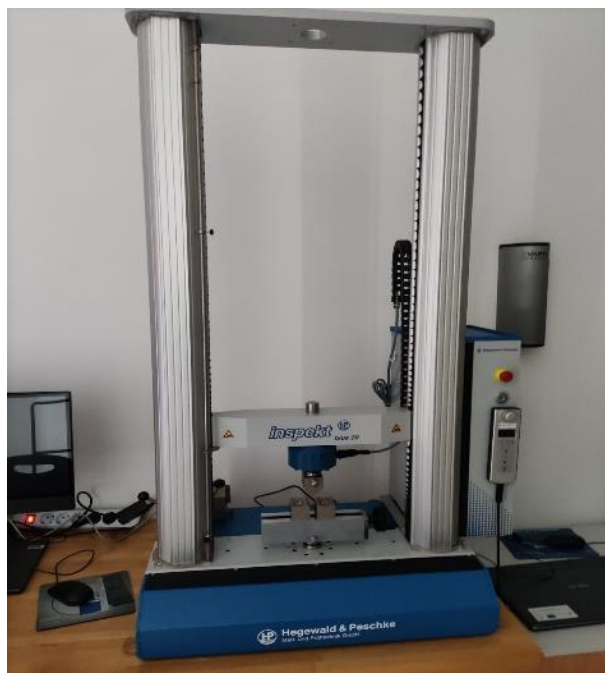
5.3. Korištena kidalica (Inspekt Blue 20)

Za ovaj završni rad korištena je univerzalna kidalica njemačkog proizvođača Hegewald & Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH. Inspekt blue uređaji odlični su za testove rastezanja i savijanja raznih materijala. Zbog dizajna i novog elektromotornog pogona bez četkica, zajamčena su brza i sigurna mjerenja. Snaga ove kidalice iznosi 20 KN.

Značajke korištene kidalice:

1. Tihi rad zbog male brzine motora
2. Precizna mjerenja sile zbog elektrootpornog senzora sile
3. Mogućnost odabira pomaka sile
4. Korištenje kidalice u sjedećem ili stojećem položaju (dodatno postolje)

Izgled korištene univerzalne kidalice je prikazan na slici 5.3., a njene dimenzije na slici 5.4.

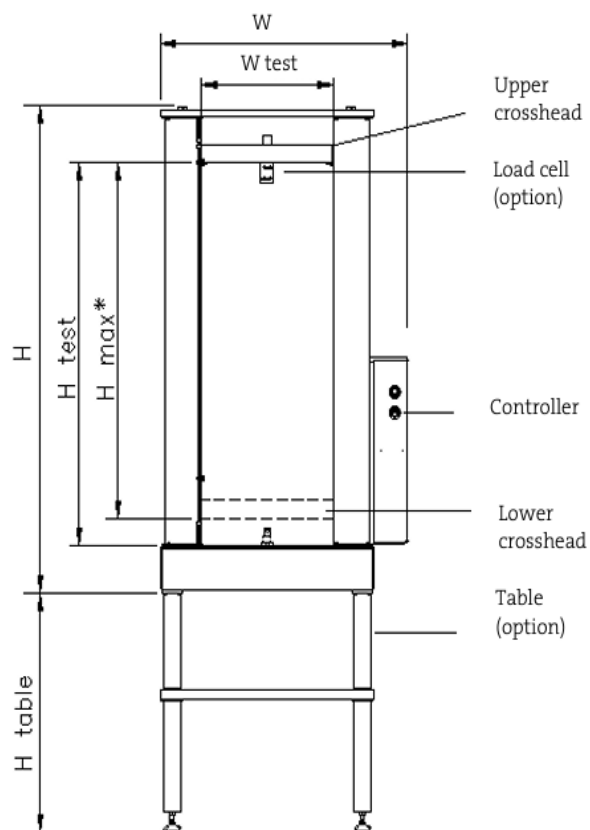


Slika 5.3. Izgled korištene kidalice (Inspekt blue 20)

Dimensions:

	mm
H (height)	1420
H test (test room height)	1100
H max * (max. test stroke)	1005
W (width)	790
W test (test room width)	420
D (depth)	450
H table (height table)	685

* Crosshead travel without grips, adapter and load cell

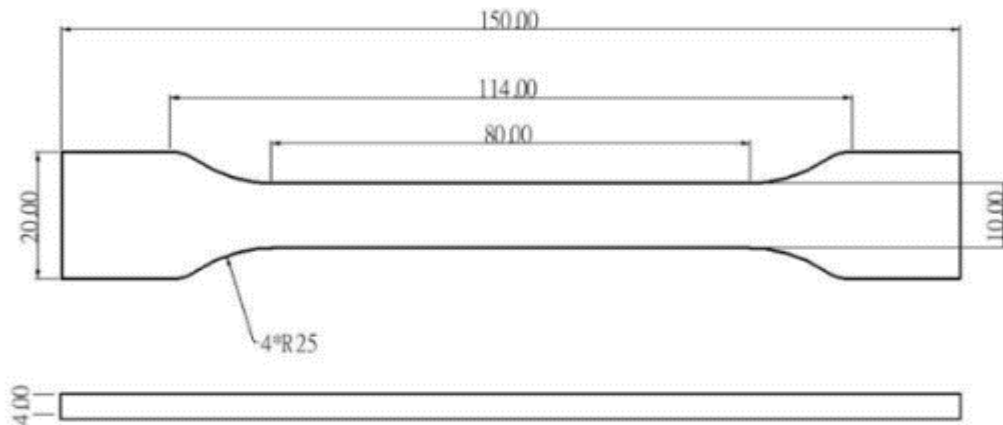


5.4. Dimenzije kidalice

6. Ispitni uzorci

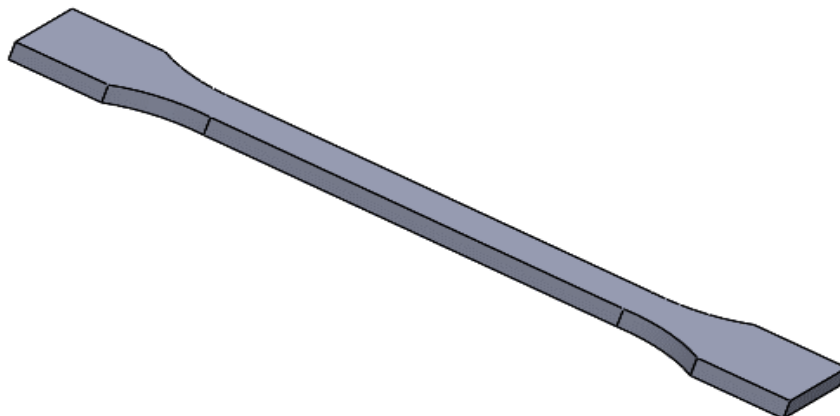
Epruvete su ispitni uzorci na kojima se provodi statički vlačni pokus kako bi se odredila mehanička svojstva materijala i utvrdilo je li prikladan za korištenje u određenim uvjetima. Najčešći oblici epruveta su okruglog ili pravokutnog poprečnog presjeka.

Epruvete koje će se koristiti u ovom završnom radu dimenzionirane su prema standardu ISO 527-2.



Slika 6.1. Dimenzije epruvete

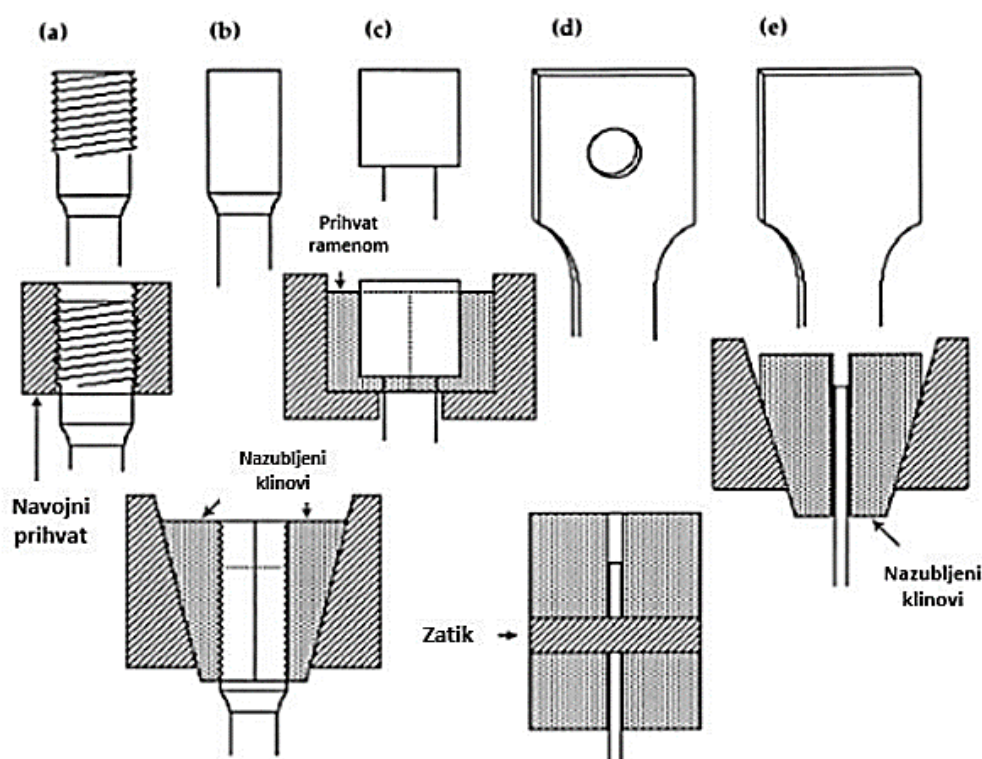
Dimenzije epruvete prikazane su na slici 6.1. Epruvete koje će biti korištene za ovaj završni rad oblikovane su pomoću CAD alata SolidWorks, te je na slici 6.2. prikazan model te epruvete u programu.



Slika 6.2. Epruveta u Solidworksu

6.1. Pravilno pozicioniranje epruvete

Prije samog testiranja mehaničkih svojstava epruvete, potrebno je pravilno centrirati epruvetu u čeljusti kidalice. Na slici 6.3. prikazane su različite izvedbe glave i prihvata epruvete. Prilikom pravilnog centriranja epruvete u čeljusti kidalice, potrebno je obratiti pažnju na dvije stvari: glava epruvete mora čvrsto prianjati uz čeljusti kidalice, a spoj između epruvete i kidalice mora izdržati ispitnu silu kako ne bi došlo do iskliznuća. Iako u idealnim uvjetima čeljust i glava epruvete trebaju imati identične dimenzije, u stvarnosti je to teško postići. Ako dođe do nepravilnog pozicioniranja epruvete, rezultati ispitivanja neće biti mjerodavni. Slika 6.4. prikazuje usporedbu pravilnog i nepravilnog pozicioniranja.

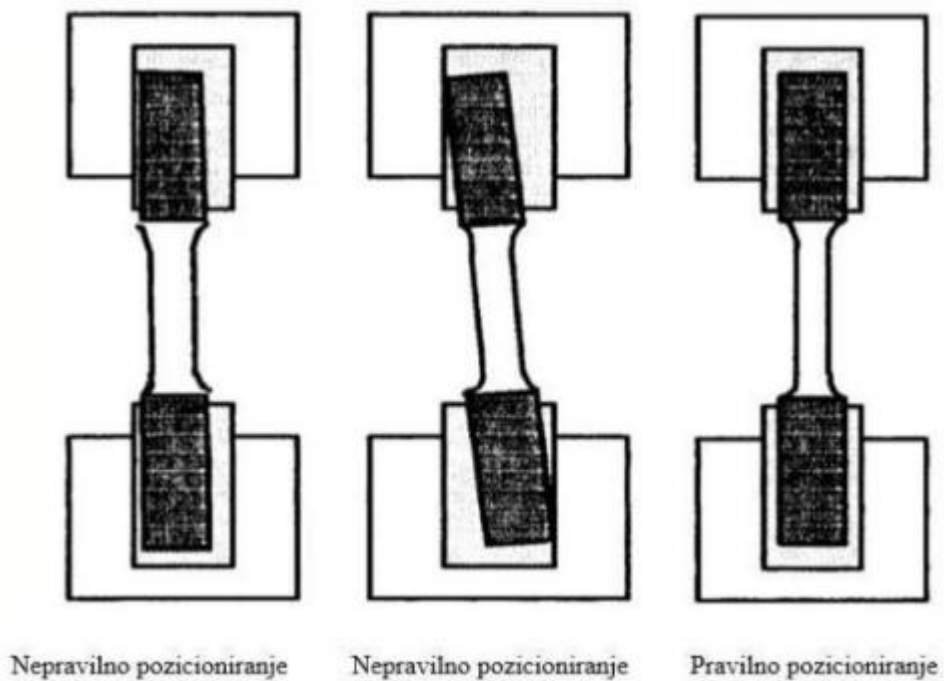


Slika 6.3. Izvedba glave epruvete: a) prihvat pomoću navoja, b) prihvat pomoću nazubljenih klinova, c) prihvat ramenom glavom, d) prihvat pomoću zatika i e) prihvat tankih epruveta pomoću nazubljenih klinova

U ovom ispitivanju korištene su čeljusti sa nazubljenim klinovima koje su na slici 6.3. prikazane (pod e).

Pravilno pozicioniranje epruvete u čeljusti kidalice ključan je korak u statičkom vlačnom ispitivanju, jer osigurava ravnomjernu raspodjelu sila duž uzorka. Epruveta mora biti centrirana i

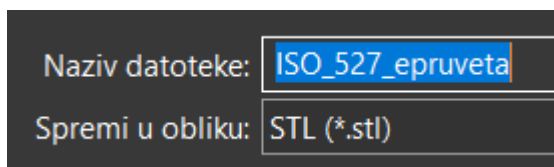
čvrsto stegnuta u čeljustima kako bi se spriječilo klizanje ili nepravilno savijanje, što može utjecati na točnost rezultata mjerenja mehaničkih svojstava.



Slika 6.4. Pravilno i nepravilno pozicioniranje epruvete

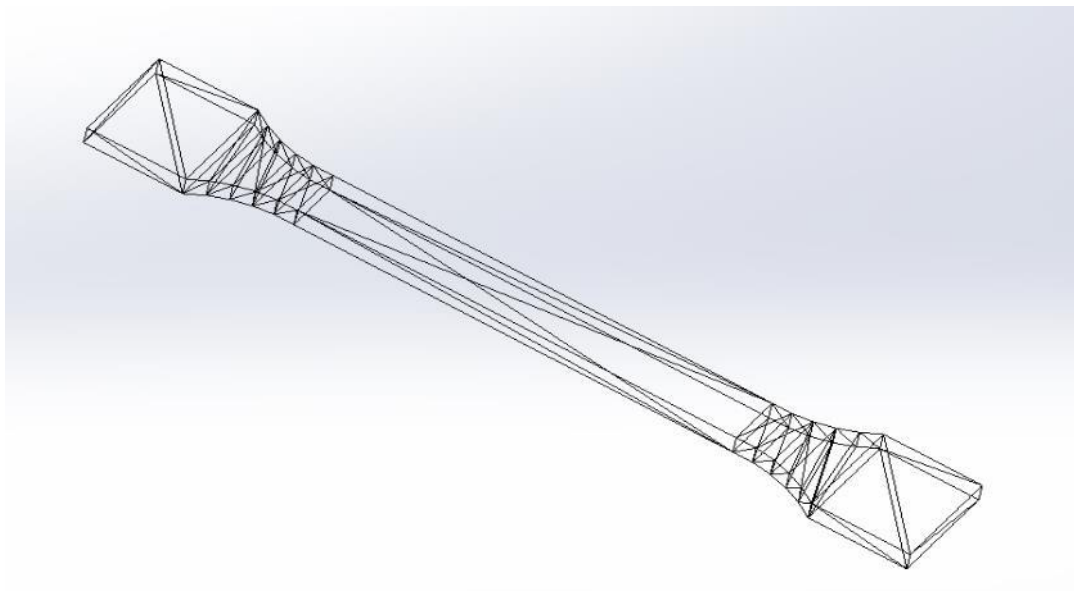
7. STL datoteka

Prije samog ispisivanja potrebno je razjasniti kako smo došli do 3D modela. Za ovaj završni rad korištena je aplikacija SolidWorks. SolidWorks je aplikacija koja služi za oblikovanje 3D predmeta te omogućava analizu i razne simulacije oblikovanog predmeta. Nakon što se napravi 3D model predmeta koji će se ispisati, potrebno ga je spremiti u STL datoteku, prikazano na slici 7.1. STL je kratica za „Sterolithography file“ ili „Standard Triangle Language file“.



Slika 7.1. STL datoteka

STL (Standard Tessellation Language ili Standard Triangle Language) jedan je od najstarijih i najčešće korištenih formata datoteka za 3D modeliranje i 3D ispis. Razvijen je krajem 1980-ih od strane tvrtke 3D Systems, jednog od pionira 3D ispisa, i postao je industrijski standard za razmjenu 3D podataka između softverskih alata i 3D pisača. STL datoteka koristi trokute (poligone) kako bi opisala površine objekta, kao što je prikazano na slici 7.2. Pomoću tog načina pojednostavljuje se model i pretvara se u format koji je spreman za 3D ispis. Nakon što se dobije stl zapis modela, ubacuje se u neki „slicer“ program koji taj 3D model „reže“ na određeni broj slojeva koji će biti korišteni za izgradnju ispisanog komada. „Slicer“ koji ćemo koristiti je Z-SUITE, tvrtke Zortrax. Svaki 3D objekt, bez obzira kojom tehnologijom ispisa je izrađen, sastoji se od velikog broja slojeva. Što je veći broj slojeva, rezolucija ispisa je veća, što ga čini vizualno privlačnijim. Kod 3D ispisa industrijskih komada bolje je da su ti slojevi deblji kako bi komadi bili otporniji na utjecaje okoline.



Slika 7.2. STL model epruvete

Teselacija se može ostvariti postavljanjem geometrijskih oblika tako da se ne preklapaju niti ostavljaju praznine, slično kao kod slaganja mozaika. Primjer toga je slaganje oblika pomoću trokuta, kao što se radi u GPU renderiranju. Fina mreža, sastavljena od mnogobrojnih trokuta, formira cijelu površinu 3D modela. Broj trokuta i koordinate njihovih vrhova definiraju točan izgled i strukturu modela. Postoje dva formata STL datoteke, binarni i ASCII format. U ASCII formatu, podaci o trokutima pohranjuju se kao čitljiv tekst. Svaki trokut definiran je redoslijedom vrhova i vektora normale na svaki trokut. Prednost ovog formata je u tome što ga je lako ručno čitati i uređivati, no nedostatak je što stvara velike datoteke. Za kompleksne modele, ASCII verzija može postati nepraktična zbog količine podataka. Na slici 7.3. prikazan je ASCII kod ovdje oblikovane epruvete.

```

solid ISO_527_epruveta_ascii
  facet normal -5.445648e-01 8.387187e-01 0.000000e+00
    outer loop
      vertex 1.320000e+02 2.000000e+01 4.000000e+00
      vertex 1.320000e+02 2.000000e+01 0.000000e+00
      vertex 1.289642e+02 1.802891e+01 4.000000e+00
    endloop
  endfacet
  facet normal -5.445648e-01 8.387187e-01 0.000000e+00
    outer loop
      vertex 1.289642e+02 1.802891e+01 4.000000e+00
      vertex 1.320000e+02 2.000000e+01 0.000000e+00
      vertex 1.289642e+02 1.802891e+01 0.000000e+00
    endloop
  endfacet
  facet normal -4.177436e-01 9.085649e-01 0.000000e+00
    outer loop
      vertex 1.289642e+02 1.802891e+01 4.000000e+00
      vertex 1.289642e+02 1.802891e+01 0.000000e+00
      vertex 1.256756e+02 1.651686e+01 4.000000e+00
    endloop
  endfacet
  facet normal -4.177436e-01 9.085649e-01 0.000000e+00
    outer loop
      vertex 1.256756e+02 1.651686e+01 4.000000e+00
      vertex 1.289642e+02 1.802891e+01 0.000000e+00
      vertex 1.256756e+02 1.651686e+01 0.000000e+00
    endloop
endsolid

```

Slika 7.3. ASCII format epruvete

Binarni format pohranjuje iste informacije, ali u kompaktnijem obliku, što rezultira manjim veličinama datoteka i bržim procesiranjem podataka. Ovo je daleko najčešće korištena verzija STL formata jer smanjuje veličinu datoteke i ubrzava prijenos podataka između softvera i 3D pisača. Binarne STL datoteke nisu čitljive u tekstualnom obliku, ali se lako mogu otvoriti i koristiti u različitim CAD softverima i alatima za 3D ispis.

Prednosti STL-a:

1. Kompatibilan format s gotovo svim 3D pisačima
2. Lako pronalaženje informacija na internetu
3. Omogućuje brzu obradu i pripremu modela za ispis

Nedostaci:

1. Ne može se koristiti za boje i teksture
2. Loša razlučivost pri radu s pisačima visoke razlučivosti
3. Preciznost modela, korištenjem premalo trokuta model će izgledati grubo i neprecizno, dok previše trokuta može značajno povećati veličinu datoteke

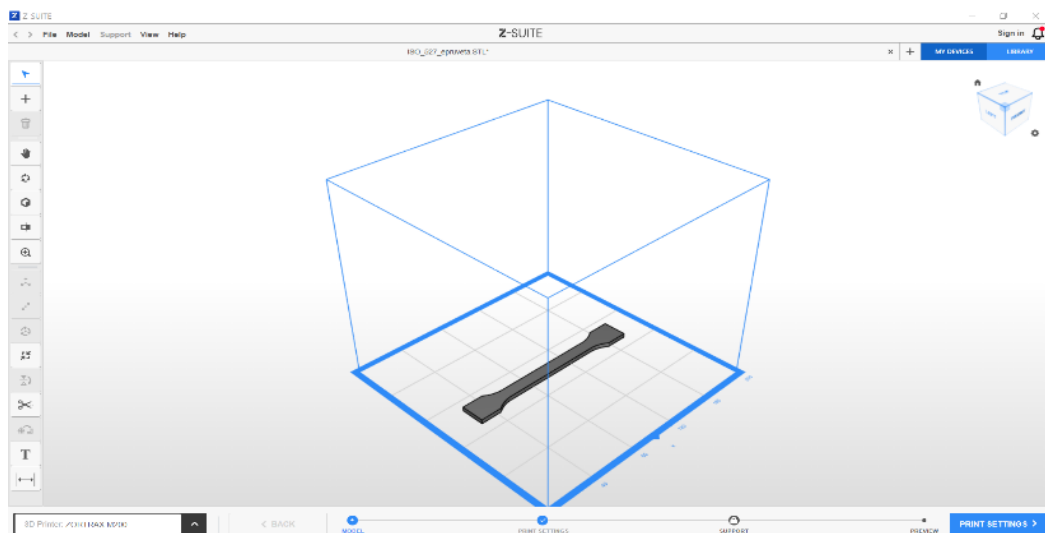
Razvojem 3D ispisa, razvijaju se i alternativni formati za 3D ispis. Drugi poznati formati su PLY i OBJ.

1. PLY-(format datoteke poligona): Datoteke s ekstenzijom .ply predstavljaju format za pohranu poligona ili trokuta. Ovaj format je osmišljen za spremanje trodimenzionalnih podataka dobivenih 3D skenerom. Omogućuje jednostavan geometrijski prikaz objekta uz mogućnost pohrane dodatnih svojstava kao što su boja, prozirnost, normalni vektori površine, koordinate, tekstura i slično. Kao i STL format, PLY dolazi u dvije verzije – ASCII i binarnoj.
2. OBJ-datoteke s ekstenzijom .obj također služe za pohranu geometrijskih definicija. Ovaj format je razvijen od strane tvrtke Wavefront Technologies za njihov softver pod nazivom Advanced Visualizer. Danas je otvorenog koda i široko prihvaćen u mnogim 3D grafičkim programima. Sadrži osnovne geometrijske podatke o objektu, poput pozicije svakog vrha, tekstura, vektora normale i slično. Deklaracijom vrhova u smjeru suprotnom od kazaljke na satu, izbjegava se potreba za eksplicitnim definiranjem normalnih ploha. Koordinate u OBJ formatu nemaju specifične jedinice, ali mogu uključivati podatke o mjerilu.

STL format je jednostavan ali iznimno učinkovit alat za pohranu i razmjenu geometrijskih podataka u 3D ispisu. Iako ima svoja ograničenja u smislu pohrane dodatnih svojstava modela, njegova jednostavnost i široka kompatibilnost čine ga neizostavnim dijelom 3D tehnologije. Njegova uloga u razvoju proizvoda medicinskim aplikacijama i industrijskim projektima potvrđuje njegovu važnost s obzirom na industrijski standard u svijetu aditivne proizvodnje.

8. Z-SUITE

Nakon što je STL datoteka načinjena, treba ju pripremiti za 3D ispis u „slicer“ programu. S obzirom da je pisac izradila tvrtka Zortrax, koristit će se njen „slicer“ pod imenom Z-SUITE. Svaki „slicer“, omogućava da se odrede parametri kao što su: visina sloja, mjesto gdje dolazi potporni materijal, orijentacija 3D modela u radnom prostoru pisaca i sl. Z-SUITE program pretvara STL datoteku u „G kod“ odnosno programski jezik koji 3D pisac prepoznaje. „G kod“ je programski jezik koji generiraju CAM programi kako bi upravljali strojevima kao što su CNC strojevi i 3D pisaci. Najpoznatiji „sliceri“ koji se danas koriste su Prusa Slicer i Cura, te ih je vrlo lako pronaći i besplatno koristiti. Na slici 8.1. je prikazana aplikacija Z-SUITE u kojoj se nalazi epruveta koja će se koristiti u statičkom vlačnom pokusu.



Slika 8.1. Izgled „Slicera“

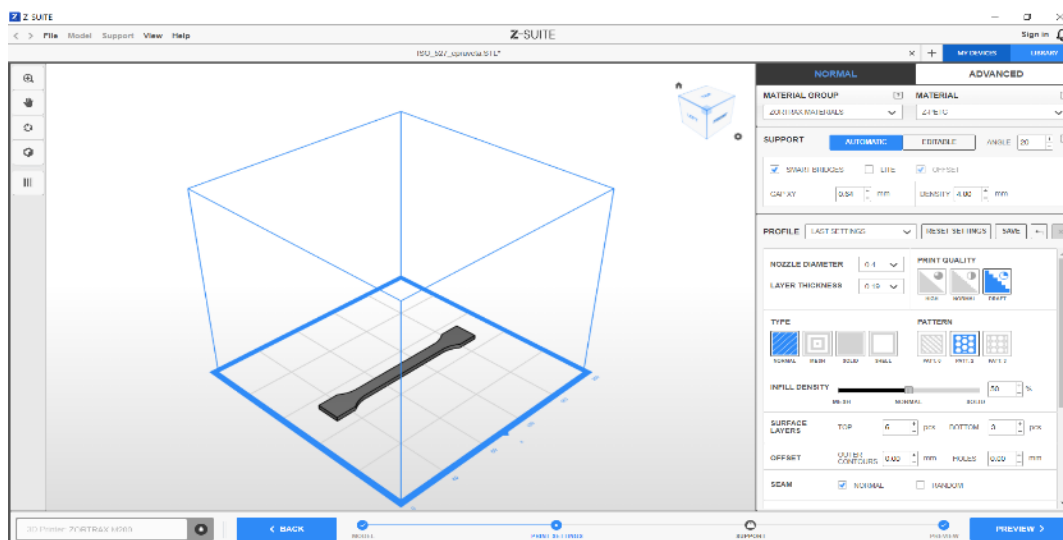
Proces pripreme 3D modela za ispis prolazi kroz nekoliko ključnih faza: *Model*, *Print Settings*, *Support* i *Preview*. Svaka od ovih faza ima specifičnu funkciju u optimizaciji i prilagodbi modela za 3D ispis.

U fazi *Model*, korisnik uvozi 3D model u Z-Suite softver. Ovdje se manipulira modelom prije samog ispisa:

1. Uvozi se datoteka i postavlja se na radnu platformu.
2. Veličina modela može se povećati ili smanjiti prema potrebama.
3. Korisnik može rotirati model kako bi osigurao optimalnu orijentaciju za ispis, što može utjecati na kvalitetu ispisa i potrebu za potpornim strukturama.

4. Kopiranje modela. Ukoliko se želi ispisati više kopija istog modela može ih se duplicirati i rasporediti po platformi.

Faza *Print Settings* omogućuje podešavanje ključnih parametara za 3D ispis. Ovo je najvažniji korak u pripremi modela jer utječe na kvalitetu ispisa, vrijeme ispisa, i potrošnju materijala. Na slici 8.2. prikazana je faza *Print settings* sa svojim opcijama.



Slika 8.2. Faza *Print Settings*

Detaljni pregled glavnih postavki koje su dostupne u ovoj fazi:

1. Vrsta materijala, Z-Suite omogućuje prilagodbu postavki prema vrsti filameta koji se koristi. Na primjer, za materijale poput Z-ULTRAT, ili Z-PETG, postavke kao što su temperatura, brzina ispisa i potpora bit će različite.
2. Debljina sloja, označava visinu svakog pojedinačnog sloja plastike koji pišać nanosi tijekom ispisa. Ovaj parametar izravno utječe na kvalitetu površine i preciznost detalja:
 - a) Tanji slojevi (npr. 0.09 mm do 0.19 mm): Koriste se za modele visoke preciznosti. Tanji slojevi omogućuju detaljnije i glađe površine, ali ispis traje dulje i troši više materijala jer je potrebno ispisati više slojeva.
 - b) Deblji slojevi (npr. 0.29 mm do 0.39 mm): Brži ispis s manje materijala. Koristi se za modele koji ne zahtijevaju visoku razinu detalja. Ispis je brži ali model može imati grublju površinu i manje detalja.
3. Kvaliteta ispisa, Postoji nekoliko različitih načina ispisa koje možete odabrati u Z-Suiteu, a svaki je prilagođen specifičnim potrebama:
 - a) Normal Mode: Standardni način ispisa s uravnoteženom kvalitetom i brzinom.

- b) High-Quality Mode: Omogućuje najvišu moguću kvalitetu ispisa, s vrlo tankim slojevima i velikom preciznošću, ali znatno povećava vrijeme ispisa.
 - c) Draft Mode: Koristi se za brze prototipove s debljim slojevima, čime se smanjuje vrijeme ispisa ali i kvaliteta površine.
4. Ispunjenost (Infill), određuje koliko će unutrašnjost modela biti ispunjena materijalom, što utječe na čvrstoću modela, potrošnju materijala i vrijeme ispisa:
- a) 0 % ispunjenost (engl. *Hollow*): Model je potpuno šupalj iznutra. Ovo smanjuje potrošnju materijala i vrijeme ispisa, ali model je slabiji i podložniji oštećenjima.
 - b) 20 %-50 % ispunjenost: Srednja razina ispunjenosti koja osigurava umjerenu čvrstoću i koristi se za većinu standardnih aplikacija. Ova postavka pruža ravnotežu između čvrstoće i uštede materijala.
 - c) 100 % ispunjenost (engl. *Solid*): Potpuno ispunjen model. Koristi se kada je potrebna maksimalna čvrstoća. Ova postavka značajno povećava vrijeme ispisa i potrošnju materijala.
5. Brzina ispisa, određuje koliko brzo se ekstruder pomiče dok nanosi materijal. Ovaj parametar utječe na kvalitetu ispisa i trajanje procesa:
- a) Niža brzina (Sporiji ispis): Povećava preciznost i smanjuje rizik od grešaka, posebno kod složenih modela. Sporiji ispis je prikladan za male, detaljne dijelove, ali značajno produljuje vrijeme ispisa.
 - b) Veća brzina (Brži ispis): Smanjuje vrijeme ispisa ali može uzrokovati manje preciznosti i grublju površinu. Pogodno za manje detaljne dijelove ili prototipove.
6. Temperatura ekstrudera i platforme, postavka temperature prilagođava temperaturu ekstrudera (glava koja nanosi materijal) i platforme (podloga na kojoj se model ispisuje). Svaki materijal zahtijeva specifične temperaturne postavke za optimalne rezultate. Kada je temperatura ekstrudera preniska, materijal se neće pravilno nanositi; ako je previsoka, može doći do problema s kvalitetom slojeva. Pravilno grijanje platforme pomaže u sprječavanju deformacija (engl. *warping*) i osigurava da model čvrsto prijanja za podlogu tijekom ispisa.
7. Platforma (engl. *Raft*), dodatni sloj materijala koji se ispisuje ispod modela kako bi poboljšao adheziju modela na platformu tijekom ispisa. Služi kao temelj za model, osobito kada se koriste materijali skloni savijanju (npr. ABS), ili kada je potrebno osigurati stabilnost prvog sloja. Raft se kasnije relativno lako uklanja, a može spriječiti probleme poput deformacija (engl. *warping*) i poboljšati uspjeh ispisa kod složenijih modela. Korištenje platforme povećava potrošnju materijala i vrijeme ispisa, ali često rezultira pouzdanijim ispisom.

Jedan od problema do kojih se dolazi tijekom postavljanja postavki je deformacija modela. Deformacija modela je problem koji se javlja tijekom 3D ispisa kada se rubovi ili donji dijelovi modela odvoje od platforme i počnu savijati prema gore. To se obično događa zbog nejednake ili prebrze promjene temperature tijekom hlađenja materijala, posebno kod plastika poput ABS-a. Kada se materijal prebrzo hladi, gornji slojevi se skupljaju brže od donjih, što stvara unutarnje naprezanje i uzrokuje savijanje. Deformacija modela može rezultirati neuspjelim ispisom ili lošom kvalitetom modela. Rješenja uključuju grijanje platforme, korištenje platforme ili ljepila za bolju adheziju, i kontrolu temperature okoline kako bi se smanjio rizik od savijanja.

Faza *Support* bavi se davanjem potpore za dijelove modela koji nisu samonosivi tijekom procesa ispisa. Z-Suite automatski generira potpornu strukturu, ali korisnik može ručno prilagoditi ili ukloniti potporu prema potrebi. Opcije uključuju:

1. Automatsko generiranje potpornja: Softver automatski dodaje potporu na potrebna mjesta, kao što su dijelovi modela koji vise ili nemaju oslonac.
2. Gustoća potpore: Može se podesiti gustoća potpornja kako bi se smanjila potrošnja materijala ili poboljšala stabilnost.

U fazi *Preview*, korisnik može pregledati model i analizirati kako će izgledati slojevi tijekom ispisa. Ova faza omogućava vizualizaciju svih postavki prije nego što započne stvarno ispisivanje:

1. Slojeviti prikaz: Pregled svih slojeva koje će pisač izraditi, što omogućuje korisniku da vidi moguće probleme ili nedostatke u dizajnu.
2. Procjena vremena ispisa: Softver prikazuje procijenjeno vrijeme potrebno za ispis modela.
3. Potrošnja materijala: Prikazuje se koliko će materijala biti potrebno za ispis, što može pomoći u optimizaciji postavki kako bi se smanjila potrošnja ili povećala čvrstoća.
4. Analiza potpornja: Korisnik može pregledati raspored i izgled potpornih struktura kako bi se osigurao od problema prilikom ispisa.

Svaka postavka u Z-Suiteu ima značajan utjecaj na konačno vrijeme izrade i količinu korištenog materijala. Tanji slojevi, visoka ispunjenost i gusti potpornji produžuju vrijeme i troše više materijala, dok deblji slojevi, niža ispunjenost i rijetki potpornji štede vrijeme i resurse, ali mogu smanjiti čvrstoću i preciznost modela. Pravilno podešavanje ovih parametara omogućuje balans između kvalitete ispisa, čvrstoće i vremena izrade.

Prednosti korištenja Z-Suite softvera:

1. Z-Suite je dizajniran tako da bude jednostavan za korištenje, čak i za početnike. Njegovo intuitivno sučelje omogućuje korisnicima da brzo učitaju model, optimiziraju ga i pošalju na ispis.
2. Budući da je specifično razvijen za Zortrax pisače, pruža savršenu sinkronizaciju između hardvera i softvera, omogućuje odabir materijala čime osigurava maksimalnu kvalitetu ispisa.
3. Iako je dovoljno jednostavan za hobiste, Z-Suite ima napredne opcije prilagodbe koje ga čine korisnim za profesionalce i inženjere.

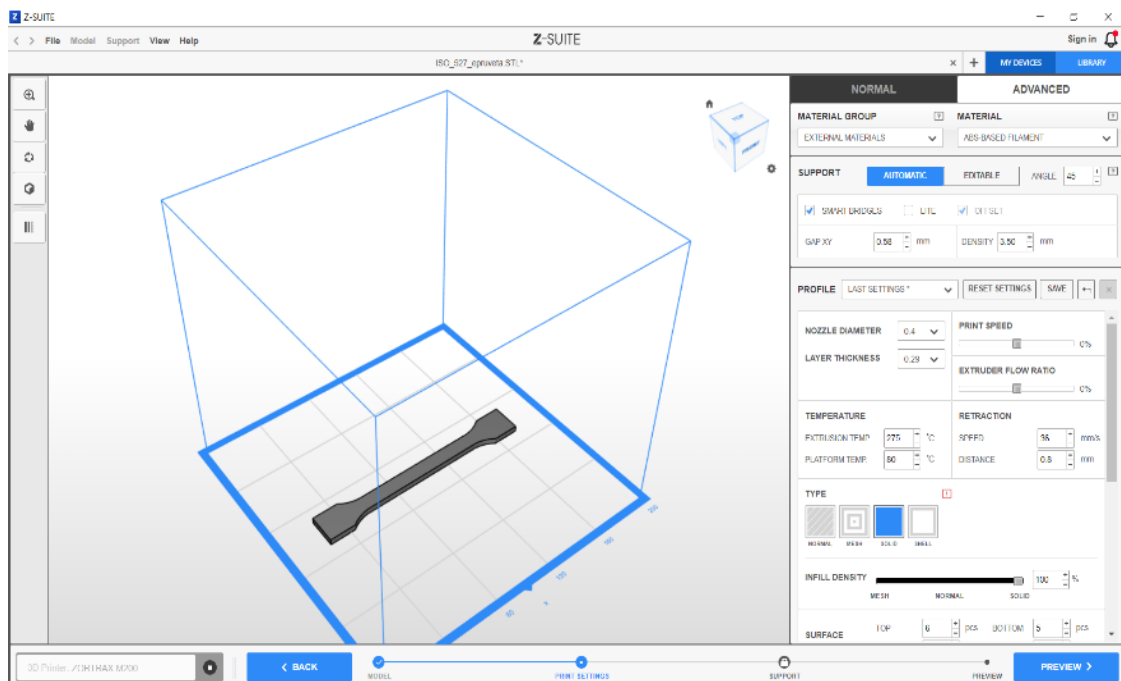
9. Provođenje ispitivanja

Za ovaj pokus korišteno je osam epruveta načinjenih iz različitih filamenata (ABS, Z-ULTRAT, Z-PETG). Parametri koji su postavljeni za određenu epruvetu bit će prikazani na slikama u sljedećem poglavlju. Od osam epruveta, četiri su napravljene od ABS-a, dvije od Z-ULTRAT-a, te dvije od Z-PETG-a.

9.1. Izrada epruveta

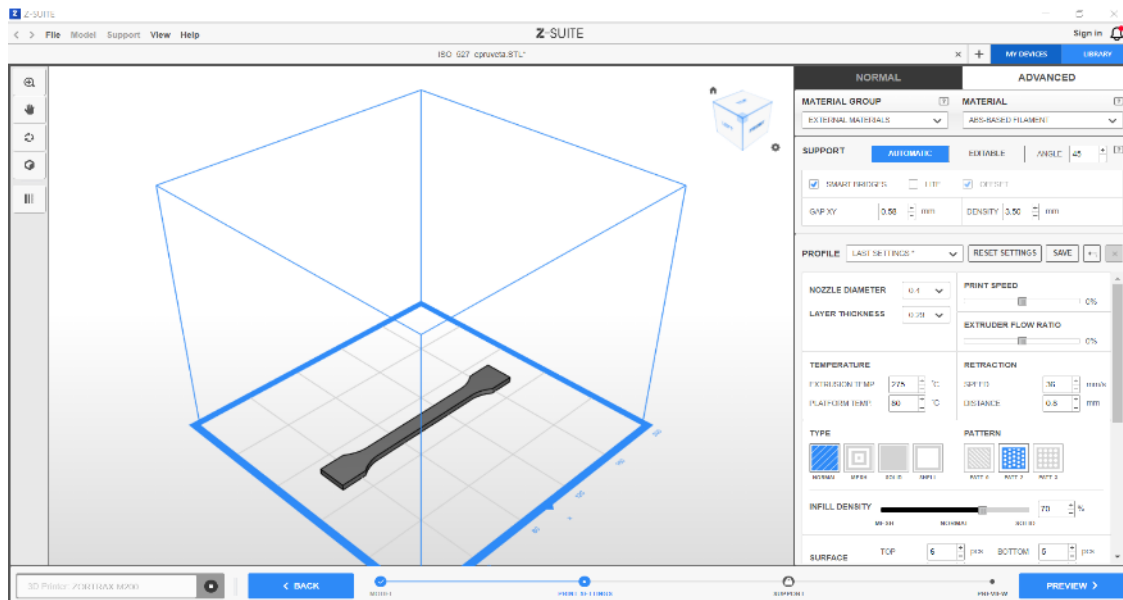
Prilikom izrade ispitnih epruveta mijenjat će se temperatura mlaznice, temperatura radne podloge, postotak ispunjenosti te visina sloja.

Na slici 9.1. prikazana je epruveta oznake ABS_100, materijala ABS, ispunjenosti 100 %, visina sloja 0,29 mm te temperatura mlaznice je 275 °C a radne podloge 80 °C. Prilikom ispisa ove epruvete treba paziti da ne dođe do warpinga (rubovi ili donji dijelovi modela odvoje se od platforme i počnu savijati prema gore). Vrijeme ispisa epruvete (0 h 54 m), težina (12 g) i potrošnja filameta (4.98 m).



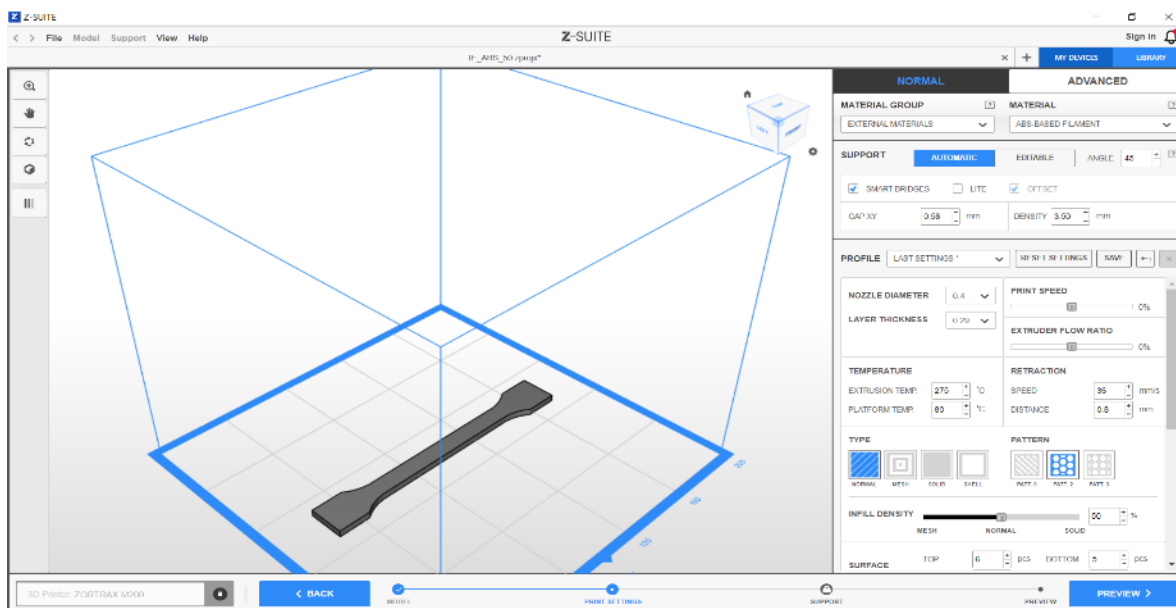
Slika 9.1. Parametri prve epruvete

Slika 9.2 također prikazuje epruvetu oznake ABS_70, napravljenu od ABS-a, postotak ispunjenosti 70 %, visina sloja 0.29 mm, temperature ostaju iste. Vrijeme ispisa epruvete (0 h 50 m), težina (13 g) i potrošnja filameta (5.30 m).



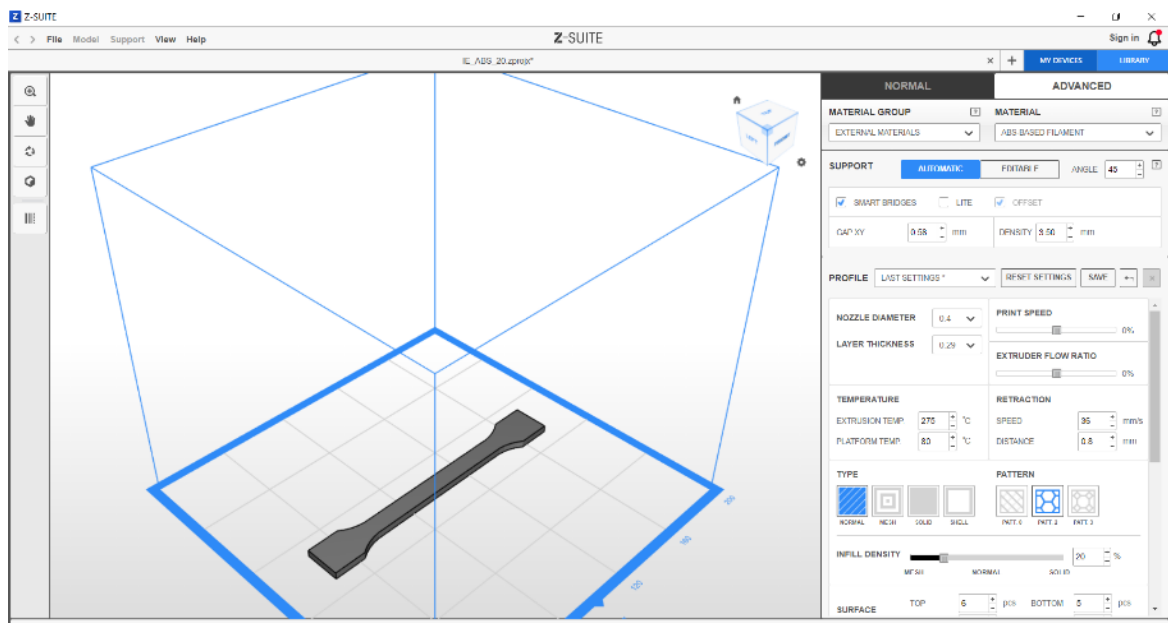
Slika 9.2. Parametri druge epruvete

Slika 9.3. prikazuje epruvetu oznake ABS_50, napravljenu od ABS-a, postotak ispunjenosti 50 %, visina sloja 0.29 mm, temperature ostaju iste. Vrijeme ispisa epruvete (0 h 45 m), težina (11 g) i potrošnja filameta (4.74 m).



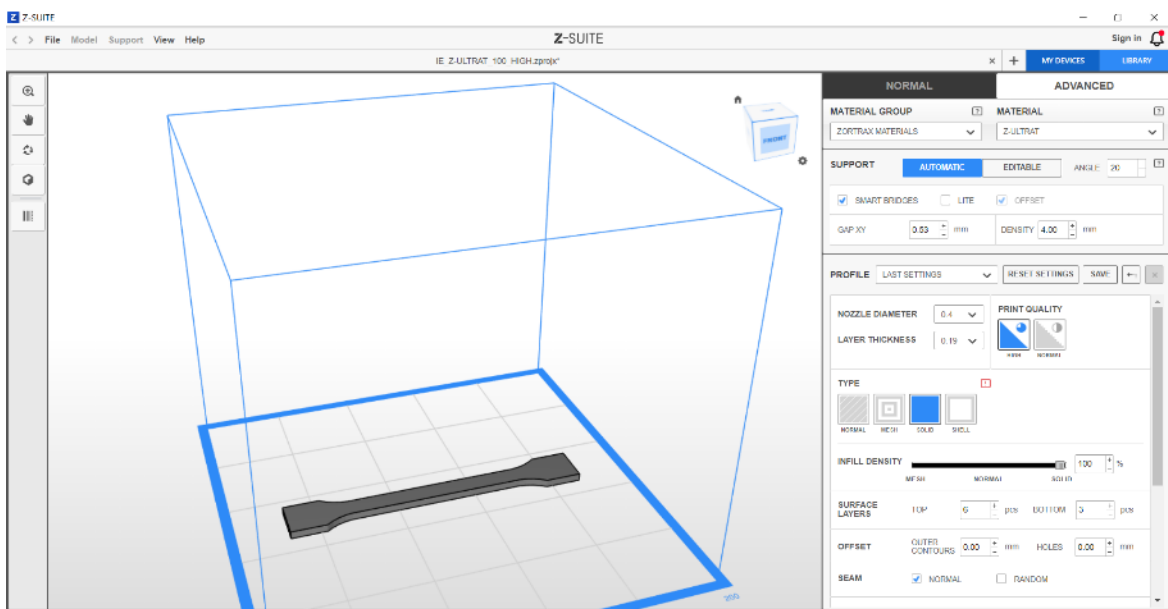
Slika 9.3. Parametri treće epruvete

Slika 9.4. prikazuje epruvetu oznake ABS_20, napravljenu od ABS-a, postotak ispunjenosti 20 % , visina sloja 0.29 mm, temperature ostaju iste. Vrijeme ispisa epruvete (0 h 44 m), težina (11 g) i potrošnja filameta (4.59 m).



Slika 9.4. Parametri četvrt epruvete

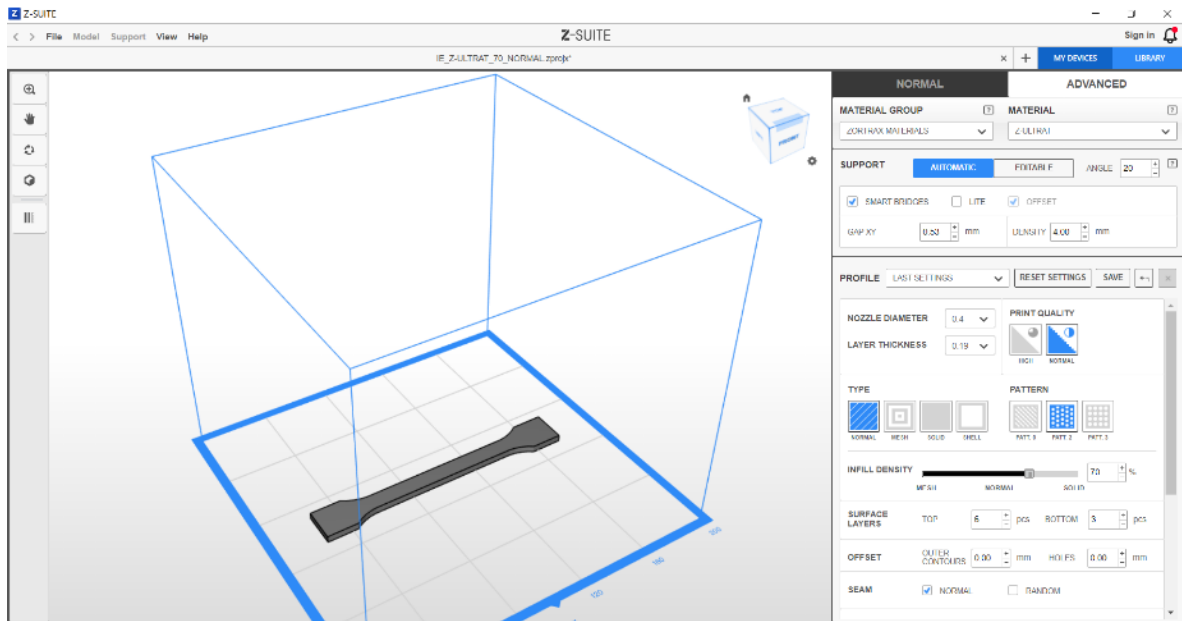
Slika 9.5. prikazuje epruvetu oznake Z-ULTRAT_100, napravljenu od Z-ULTRAT-a, postotak ispunjenosti 100 %, visina sloja 0.19 mm, temperatura mlaznice je 260 °C a radne podloge 80 °C, te kvaliteta ispisa je HIGH. Vrijeme ispisa epruvete (1 h 13 m), težina (12 g) i potrošnja filamenta (4.95 m). Treba paziti na warping.



Slika 9.5. Parametri pete epruvete

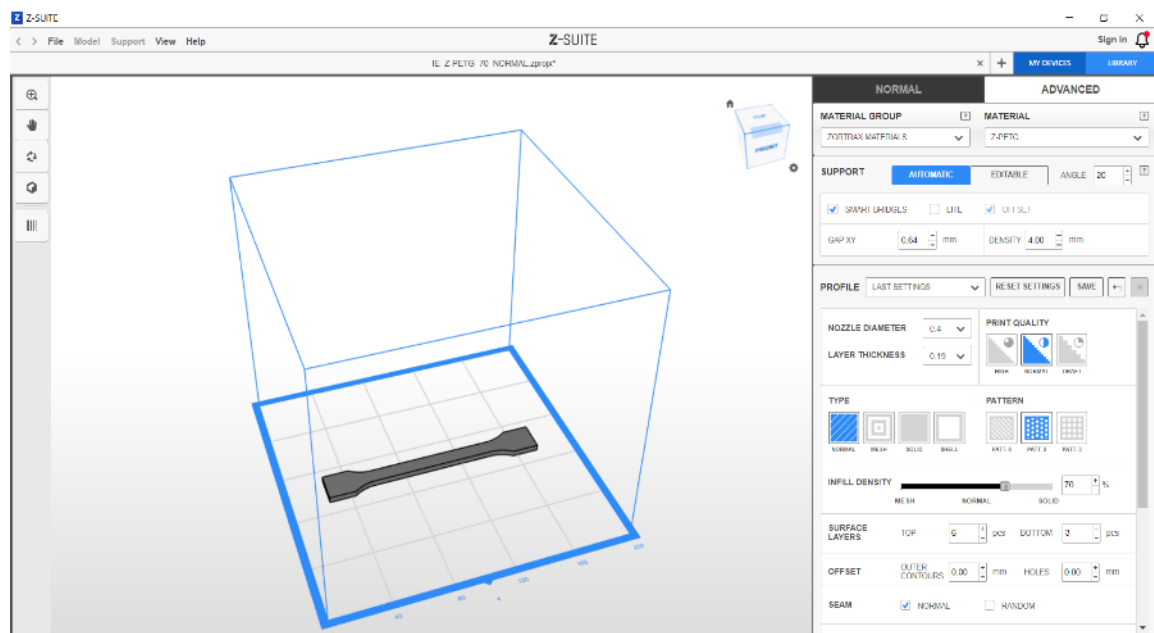
Slika 9.6. prikazuje epruvetu oznake Z-ULTRAT_70, napravljenu od Z-ULTRAT-a, postotak ispunjenosti 70 %, visina sloja 0.19 mm, temperatura mlaznice je 260 °C a radne podloge 80 °C,

te kvaliteta ispisa je NORMAL. Vrijeme ispisa epruvete (0 h 56 m), težina (10 g) i potrošnja filamenta (4.11 m).



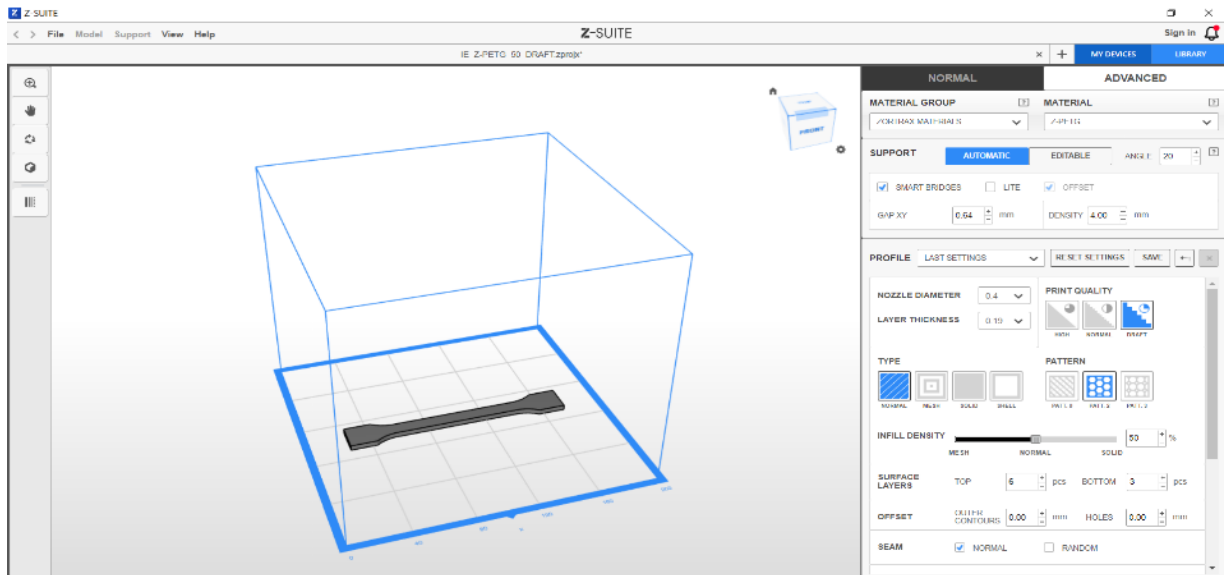
Slika 9.6. Parametri šeste epruvete

Slika 9.7. prikazuje epruvetu oznake Z-PETG_70, napravljenu od Z-PETG-a, postotak ispunjenosti 70 %, visina sloja 0.19 mm, temperatura mlaznice je 240 °C a radne podloge 30 °C, te kvaliteta ispisa je NORMAL. Vrijeme ispisa epruvete (0 h 58 m), težina (13 g) i potrošnja filamenta (4.27 m).



Slika 9.7. Parametri sedme epruvete

Slika 9.8. prikazuje epruvetu oznake Z-PETG_50, napravljenu od Z-PETG-a, postotak ispunjenosti 50 %, visina sloja 0.19 mm, temperatura mlaznice je 240 °C a radne podloge 30 °C, te kvaliteta ispisa je DRAFT. Vrijeme ispisa epruvete (0 h 47 m), težina (12 g) i potrošnja filameta (3.93 m).



Slika 9.8. Parametri osme epruvete

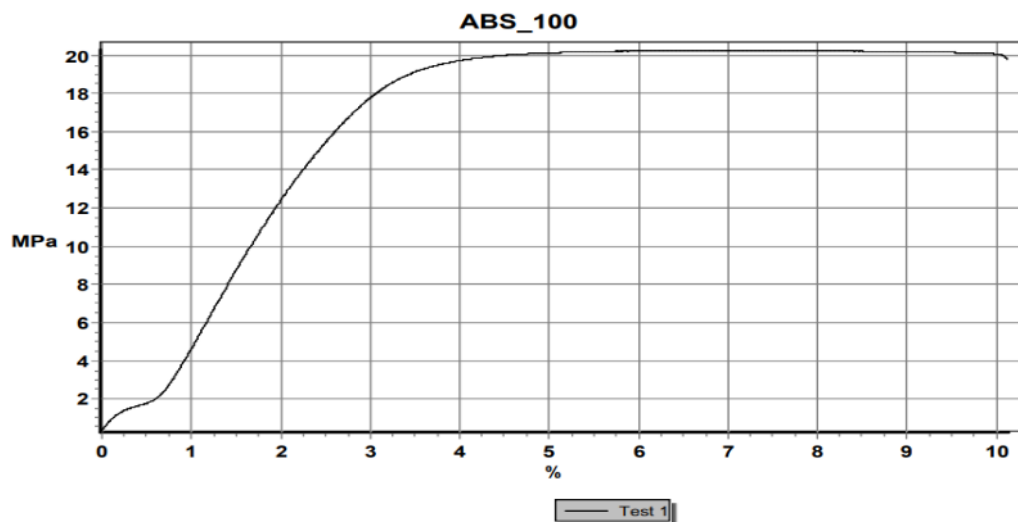
Na slici 9.9 su prikazane epruvete korištene za statičko vlačni pokus.



Slika 9.9. Ispitne epruvete za statičko vlačni pokus

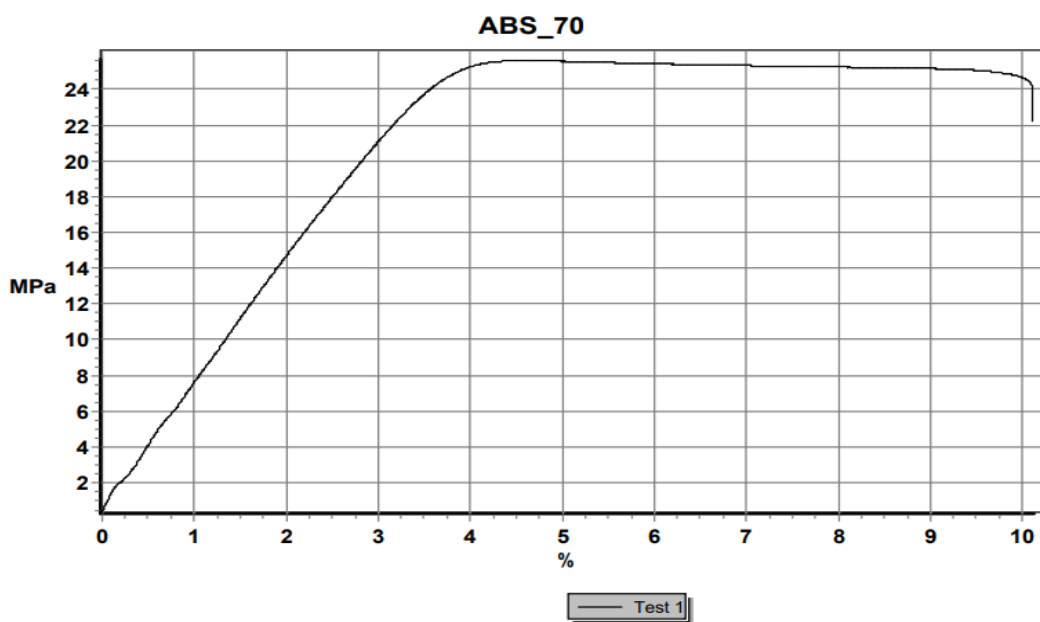
9.2. Rezultati pokusa

Slika 9.10. prikazuje rezultate ABS_100 epruvete u dijagramu naprežanja-istezanja. Modul elastičnosti iznosi 360 MPa, maksimalna sila iznosi 809.36 N.



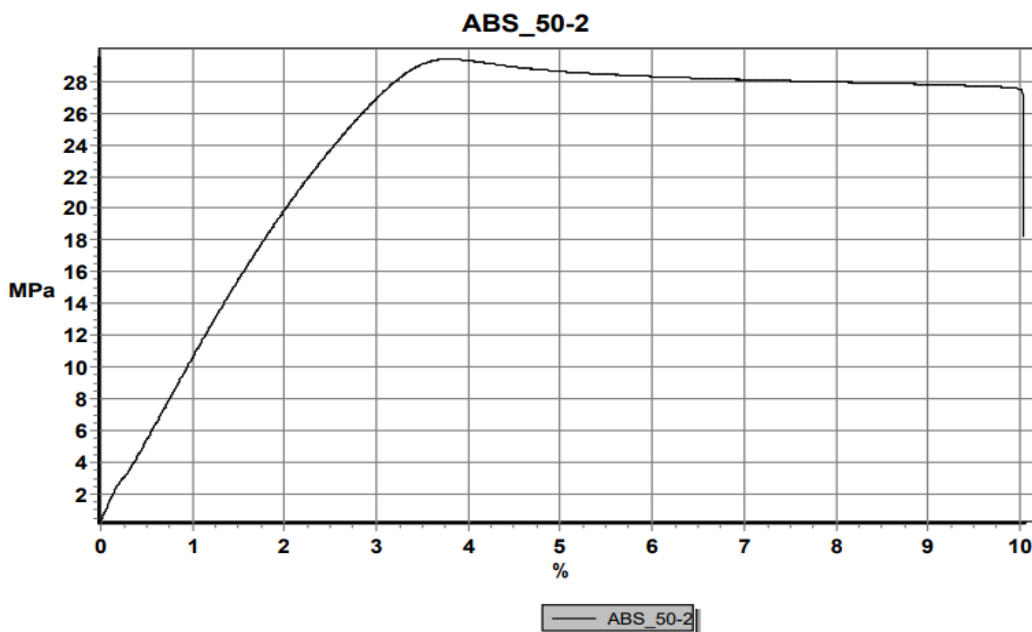
Slika 9.10. Dijagram naprežanja-istezanja za ABS_100 epruvetu

Slika 9.11. prikazuje rezultate ABS_70 epruvete u dijagramu naprežanja-istezanja. Modul elastičnosti iznosi 640 MPa, maksimalna sila iznosi 1024.56 N.



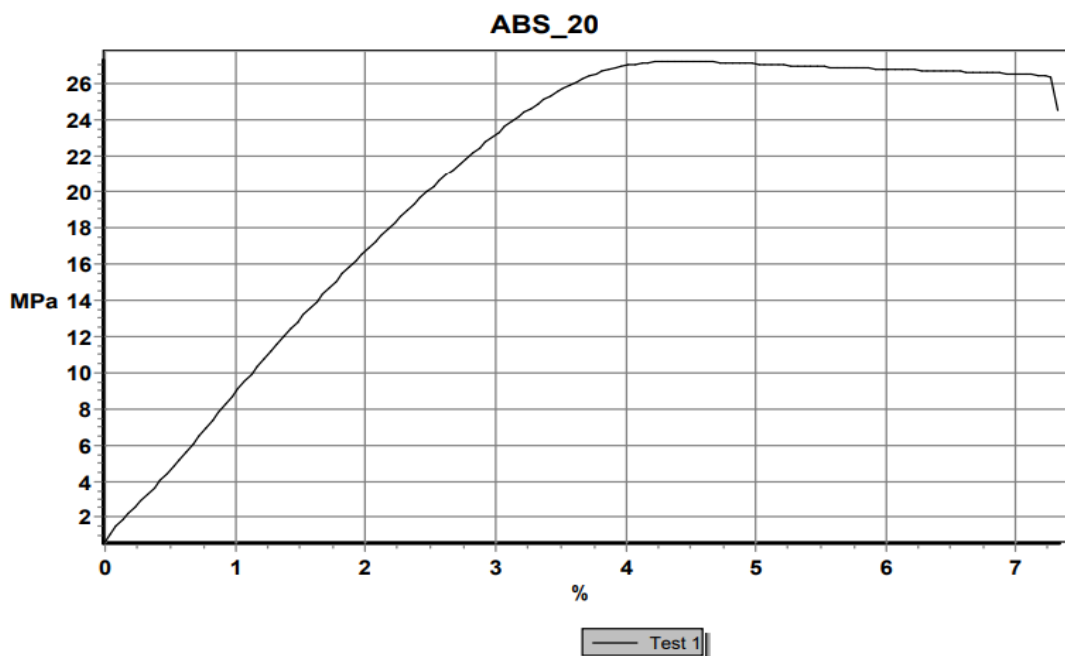
Slika 9.11. Dijagram naprežanja-istezanja za ABS_70 epruvetu

Slika 9.12. prikazuje rezultate ABS_50 epruvete u dijagramu naprezanja-istezanja. Modul elastičnosti iznosi 1010 MPa, maksimalna sila iznosi 1176.26 N.



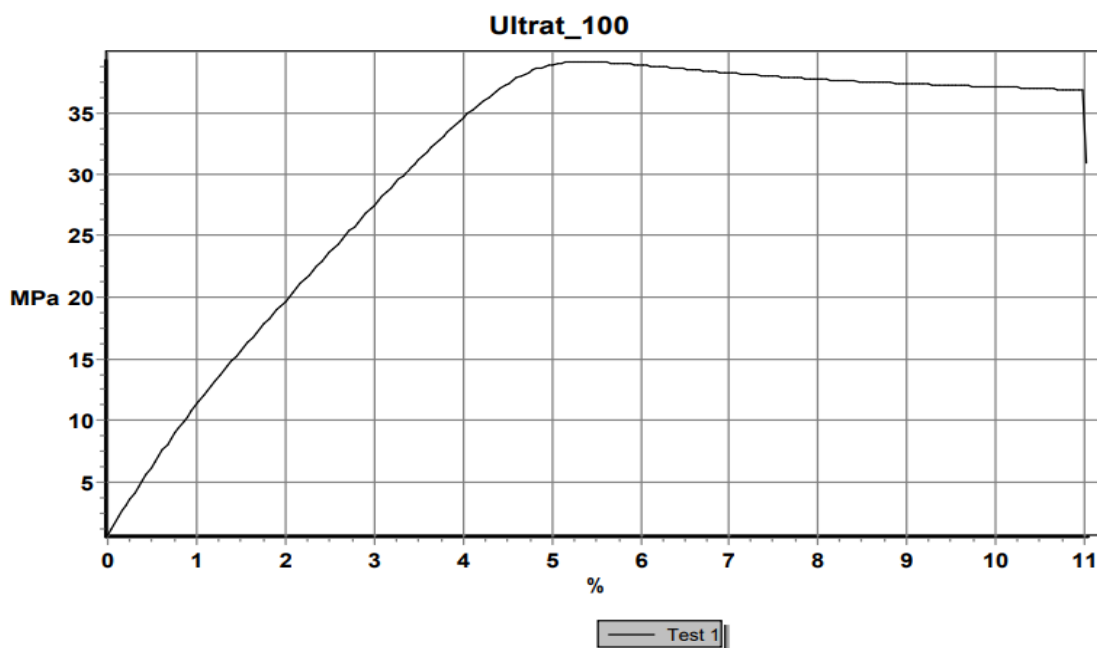
Slika 9.12. Dijagram naprezanja-istezanja za ABS_50 epruvetu

Slika 9.13. prikazuje rezultate ABS_20 epruvete u dijagramu naprezanja-istezanja. Modul elastičnosti iznosi 710 MPa, maksimalna sila iznosi 1090.42 N.



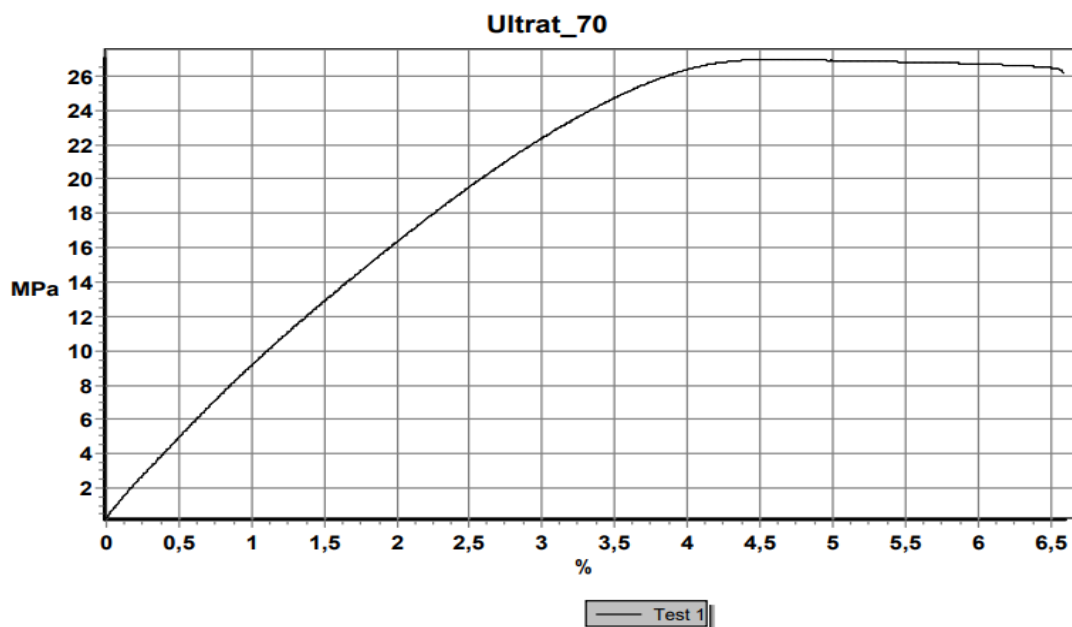
Slika 9.13. Dijagram naprezanja-istezanja za ABS_20 epruvetu

Slika 9.14. prikazuje rezultate Z-ULTRAT_100 epruvete u dijagramu naprezanja-istezanja. Modul elastičnosti iznosi 1090 MPa, maksimalna sila iznosi 1567.04 N.



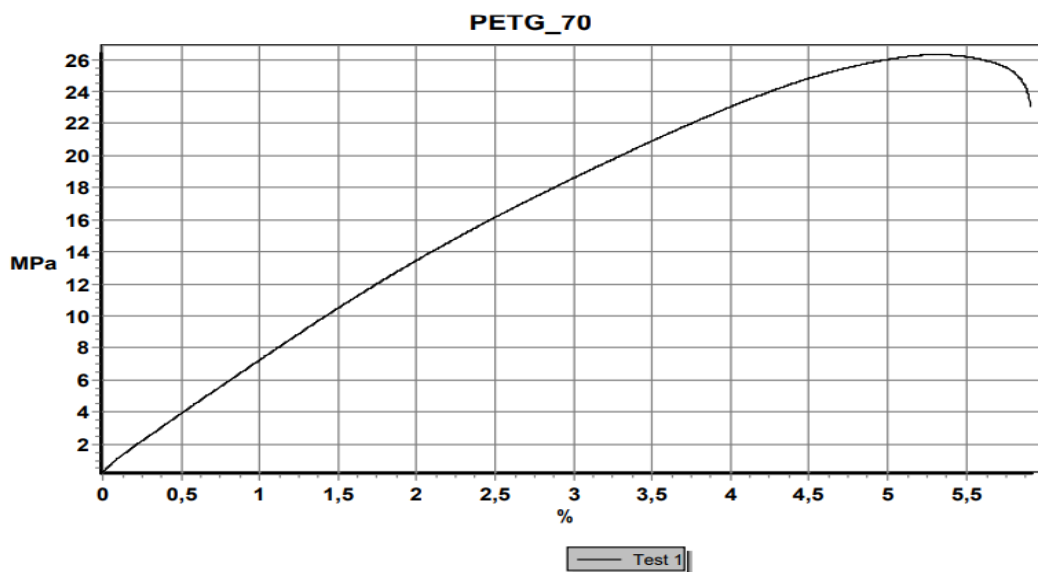
Slika 9.14. Dijagram naprezanja-istezanja za Z-ULTRAT_100 epruvetu

Slika 9.15. prikazuje rezultate Z-ULTRAT_70 epruvete u dijagramu naprezanja-istezanja. Modul elastičnosti iznosi 960 MPa, maksimalna sila iznosi 1078.38 N.



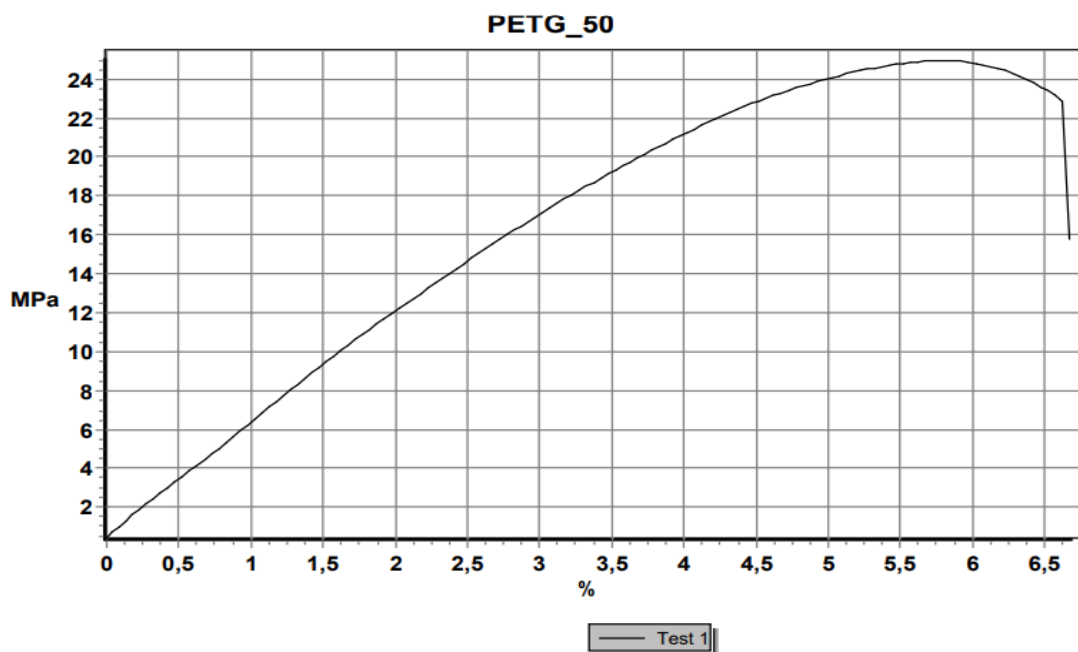
Slika 9.15. Dijagram naprezanja-istezanja za Z-ULTRAT_70 epruvetu

Slika 9.16. prikazuje rezultate Z-PETG_70 epruvete u dijagramu naprezanja-istezanja. Modul elastičnosti iznosi 750 MPa, maksimalna sila iznosi 1052.46 N.



Slika 9.16. Dijagram naprezanja-istezanja za Z-PETG_70 epruvetu

Slika 9.17. prikazuje rezultate Z-PETG_50 epruvete u dijagramu naprezanja-istezanja. Modul elastičnosti iznosi 610 MPa, maksimalna sila iznosi 997.82 N.



Slika 9.17. Dijagram naprezanja-istezanja za Z-PETG_50 epruvetu

Slika 9.18. prikazuje epruvete nakon provedenog statično vlačnog pokusa.



Slika 9.18. Epruvete nakon pokusa

Vlačna čvrstoća i površina računaju se prema sljedećim formulama:

$$A = b * h \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$R_m = \frac{F_m}{A} \text{ [MPa]}$$

A (poprečna površina epruvete)

b (Širina epruvete)

h (visina epruvete)

R_m (vlačna čvrstoća)

F_m (najveća sila pri pokusu)

Podatci epruvete ABS_100: $b = 10 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$, $F_m = 809.36 \text{ N}$, $L_o = 150 \text{ mm}$.

$$A = b * h \text{ [mm}^2\text{]} = 10 * 4 = 40 \text{ mm}^2$$

$$R_m = \frac{F_m}{A} \text{ [MPa]} = \frac{809.36}{40} = 20.234 \text{ MPa}$$

Podatci epruvete ABS_70: $b = 10 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$, $F_m = 1024.56 \text{ N}$, $L_o = 150 \text{ mm}$.

$$R_m = \frac{F_m}{A} \text{ [MPa]} = \frac{1024.56}{40} = 25.614 \text{ MPa}$$

Podatci epruvete ABS_50: $b = 10 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$, $F_m = 1176.26 \text{ N}$, $L_o = 150 \text{ mm}$.

$$R_m = \frac{F_m}{A} \text{ [MPa]} = \frac{1176.26}{40} = 29.4065 \text{ MPa}$$

Podatci epruvete ABS_20: $b = 10 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$, $F_m = 1090.42 \text{ N}$, $L_o = 150 \text{ mm}$.

$$R_m = \frac{F_m}{A} \text{ [MPa]} = \frac{1090.42}{40} = 27.2605 \text{ MPa}$$

Podatci epruvete Z-ULTRAT_100: $b = 10 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$, $F_m = 1567.04 \text{ N}$, $L_o = 150 \text{ mm}$.

$$R_m = \frac{F_m}{A} \text{ [MPa]} = \frac{1567.04}{40} = 39.176 \text{ MPa}$$

Podatci epruvete Z-ULTRAT_70: $b = 10 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$, $F_m = 1078.38 \text{ N}$, $L_o = 150 \text{ mm}$.

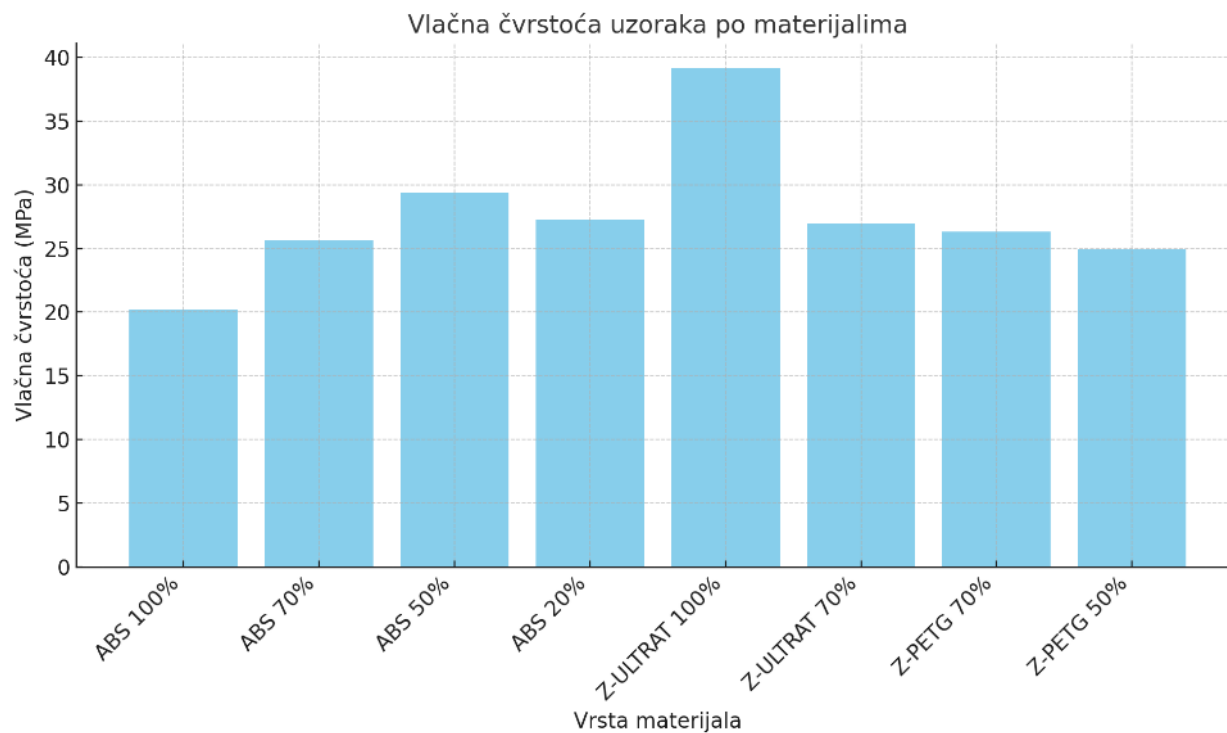
$$R_m = \frac{F_m}{A} \text{ [MPa]} = \frac{1078.38}{40} = 26.9595 \text{ MPa}$$

Podatci epruvete Z-PETG_70: $b = 10 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$, $F_m = 1052.46 \text{ N}$, $L_o = 150 \text{ mm}$.

$$R_m = \frac{F_m}{A} [MPa] = \frac{1052.46}{40} = 26.3115 MPa$$

Podatci epruvete Z-PETG_50: b = 10 mm, h = 4 mm, F_m = 997.82 N, L_o = 150 mm.

$$R_m = \frac{F_m}{A} [MPa] = \frac{997.82}{40} = 24.9455 MPa$$



Slika 9.19. Graf vlačne čvrstoće po materijalima

10. Zaključak

Zaključak ovog statičkog vlačnog pokusa na 3D ispisanim uzorcima pokazuje jasne razlike u vlačnoj čvrstoći ovisno o korištenom materijalu, postotku ispunjenosti, te kvaliteti ispisa. Ispitivanje je provedeno na osam uzoraka izrađenih pomoću Zortrax M200 3D pisača, koristeći filamente ABS, Z-ULTRAT i Z-PETG. Uzorci su ispitani pomoću kidalice Inspekt Blue 20, a ispitne epruvete su oblikovane prema ISO 527-2 standardu. Cilj pokusa bio je analizirati kako različite varijacije ispunjenosti i slojeva utječu na mehanička svojstva materijala, posebno na vlačnu čvrstoću.

Rezultati analize po materijalima:

1. ABS materijal:

1. Uzorci od ABS materijala s različitim postotkom ispunjenosti (100%, 70%, 50%, i 20%) pokazali su zanimljiv trend. Najveću vlačnu čvrstoću postigao je uzorak s 50% ispunjenosti (29,41 MPa), dok je čvrstoća kod uzoraka s većom (100%) i manjom (20%) ispunjenosti bila niža, s rezultatima od 20,23 MPa i 27,26 MPa. Ovaj rezultat pokazuje da apsolutna ispunjenost ne garantira najveću čvrstoću – umjesto toga, postoji optimalan omjer između ispunjenosti i raspodjele materijala.
2. Vjerojatno je došlo do pogreške prilikom printanja uzorka s 100% ispunjenosti, zbog čega njegova vlačna čvrstoća nije postigla očekivane vrijednosti. Također, uzorak ABS_70 puknuo je na pogrešnom mjestu, što može ukazivati na nepravilnosti u pozicioniranju u kidalici ili grešku u kvaliteti ispisa. Zbog toga bi za ove dvije epruvete (ABS 100% i ABS 70%) bilo potrebno ponoviti pokus kako bi se dobili točniji rezultati.
3. Zaključujemo da optimalna ispunjenost za ABS materijal nije nužno maksimalna, već se kod 50% ispunjenosti postiže najbolja ravnoteža između mase uzorka i njegove otpornosti na sile naprezanja.

2. Z-ULTRAT materijal:

1. Kod Z-ULTRAT materijala, najveću vlačnu čvrstoću postigao je uzorak s 100% ispunjenosti (39,18 MPa), što ga čini najotpornijim materijalom u usporedbi s ostalim testiranim uzorcima. Uzorak sa 70% ispunjenosti pokazao je manju vlačnu čvrstoću (26,96 MPa), što ukazuje da kod Z-ULTRAT materijala, ispunjenost direktno utječe na čvrstoću.

2. Z-ULTRAT je materijal koji pokazuje najbolje rezultate kod potpune ispunjenosti i visoke kvalitete ispisa, pa ga možemo smatrati najpouzdanijim u uvjetima gdje je potrebna maksimalna mehanička otpornost.
3. Z-PETG materijal:
 1. Z-PETG materijal, s uzorcima koji su ispunjeni 70% i 50%, pokazuje niže vrijednosti vlačne čvrstoće u odnosu na druge materijale. Uzorak sa 70% ispunjenosti postigao je vlačnu čvrstoću od 26,31 MPa, dok je uzorak s 50% ispunjenosti imao nešto nižu vrijednost, 24,95 MPa. Kod Z-PETG materijala vidljiv je jasan trend smanjenja čvrstoće s nižom ispunjenošću, što sugerira da ovaj materijal nije toliko otporan na naprezanje kao Z-ULTRAT ili čak ABS.
 2. Z-PETG bi mogao biti koristan za primjene gdje nisu potrebni ekstremni zahtjevi za mehaničku otpornost, ali je potrebna kemijska otpornost ili specifične termoplastične osobine.

Postotak ispunjenosti igra ključnu ulogu u određivanju vlačne čvrstoće 3D ispisanih uzoraka. Međutim, najveća ispunjenost ne znači uvijek najbolju mehaničku otpornost. Navedeno je i pokazano kod ABS uzoraka, gdje je optimalna čvrstoća postignuta kod 50% ispunjenosti. Z-ULTRAT materijal je pokazao najvišu vlačnu čvrstoću u svim ispitivanjima, što ga čini najprikladnijim za primjene gdje su potrebni materijali visoke mehaničke otpornosti. Kvaliteta ispisa (visina sloja i ispunjenost) također značajno utječe na konačnu čvrstoću materijala. Z-ULTRAT je pokazao bolju otpornost kada je korištena visoka kvaliteta ispisa, dok je kod Z-PETG-a smanjenje kvalitete ispisa (DRAFT način) također dovelo do smanjenja čvrstoće. Ovi rezultati pružaju važan uvid u to kako različiti faktori u procesu 3D ispisa utječu na mehanička svojstva materijala, što će pomoći u optimizaciji budućih projekata gdje su čvrstoća i otpornost ključni.

11. Literatura

- [1] <https://www.3dglobe.net/povijest-3d-printanja>
- [2] <https://print24.com/hr/journal/osnove-ispisa/3d-printanje>
- [3] <https://www.tonerpartner.hr/clanci/kako-funkcionira-stolni-3d-pisac-osnovne-tehnologije-3d-ispisa-25290hr39018/>
- [4] <https://formlabs.com/eu/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
- [5] <https://all3dp.com/1/selective-laser-melting-guide/>
- [6] <https://www.3dglobe.net/fdmfff>
- [7] https://zortrax.com/wpcontent/uploads/2018/08/Zortrax_M200_Product_Brochure_30.10_7-1.pdf
- [8] <https://www.adelaide.edu.au/thinlab/sites/default/files/docs/Zortrax.pdf>
- [9] https://de.treatstock.com/static/uploads/printers/manuel_zortrax_m200_en.pdf
- [10] <https://www.3dprintaj.com/upotreba-pla-filamenta-za-potrebe-3d-ispisa/>
- [11] <https://www.3dprintaj.com/filamenti-za-3d-ispis/>
- [12] <https://zortrax.com/filaments/z-flex/>
- [13] <https://zortrax.com/filaments/z-petg/>
- [14] <https://zortrax.com/filaments/z-ultrat/>
- [15] <https://proinstal.hr/postupak-ispitivanja-vlacne-cvrstoce-opsezan-vodic/>
- [16] <https://3d-deformacije.com/aramis-primjeri-mjerenja/staticki-vlacni-pokus/>
- [17] Marinci, I . (2019.), Modernizacija uređaja za ispitivanje vlačne čvrstoće materijala, Završni rad, <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb:4496>
- [18] <https://www.instron.com/en/testing-solutions/iso-standards/iso-527-2>
- [19] <https://www.instron.com/en/testing-solutions/iso-standards/iso-527-2>
- [20] <https://topomatika.hr/proizvodi/mehanicka-ispitivanja/hegewald-peschke-kidalice/>
- [21] Matić, M . (2022.), Utjecaj frekvencije uzorkovanja podataka na rezultate statičko vlačnog ispitivanja, završni rad,
- [22] International standard ISO 6892-1: Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature, 2009
- [23] Davis, J. R.: Tensile testing - second edition, Ohio: ASM International-The materials information society; 2004.
- [24] <https://www.hwlibre.com/hr/STL/>
- [25] <https://www.3dprintaj.com/3d-model-u-stl-formatu-je-preduvjet-3d-printanja/>
- [26] <https://hr.eyewated.com/stl-datoteke-sto-jesu-i-kako-ih-koristiti/>

- [27] L. D. Sturm, C. B. Williams, J. A. Camelio, J. White, R. Parker: CYBER-PHYSICAL VUNERABILITIES IN ADDITIVE MANUFACTURING SYSTEMS, Design, Research, and Education for Additive Manufacturing Systems Laboratory, 2017.
- [28] <https://all3dp.com/2/obj-file-format-simply-explained/>
- [29] <https://paulbourke.net/dataformats/ply/>
- [30] <https://support.zortrax.com/z-suite-2-print-preparation/>

Popis slika

Slika 2.1.: Pisač Zortrax M200.....	4
Slika 3.1.: Korišteni ABS filament.....	7
Slika 4.1.: „Inženjerski“ ili konvencijalni dijagram naprezanja-istezanja.....	11
Slika 5.1.: Komponente hidraulične kidalice	16
Slika 5.2.: Komponente elektomehaničke kidalice	17
Slika 5.3.: Izgled korištene kidalice (Inspekt Blue 20).....	18
Slika 5.4.: Dimenzije kidalice.....	18
Slika 6.1.: Dimenzija epruvete.....	19
Slika 6.2.: Epruveta u Solidworksu.....	19
Slika 6.3.: Izvedba glave epruvete.....	20
Slika 6.4.: Pravilno i nepravilno pozicioniranje epruvete.....	21
Slika 7.1.: STL datoteka.....	22
Slika 7.2.: STL model epruvete.....	23
Slika 7.3.: ASCII format epruvete.....	23
Slika 8.1.: Izgled „Slicera“.....	26
Slika 8.2.: Faza <i>Print Settings</i>	27
Slika 9.1.: Parametri prve epruvete.....	31
Slika 9.2.: Parametri druge epruvete.....	32
Slika 9.3.: Parametri treće epruvete.....	32
Slika 9.4.: Parametri četvrte epruvete.....	33
Slika 9.5.: Parametri pete epruvete.....	33
Slika 9.6.: Parametri šeste epruvete.....	34
Slika 9.7.: Parametri sedme epruvete.....	34
Slika 9.8.: Parametri osme epruvete.....	35
Slika 9.9.: Ispitne epruvete za statičko vlačni pokus	35
Slika 9.10.: Dijagram naprezanja-istezanja za ABS_100 epruvetu.....	36
Slika 9.11.: Dijagram naprezanja-istezanja za ABS_70 epruvetu.....	36
Slika 9.12.: Dijagram naprezanja-istezanja za ABS_50 epruvetu.....	37
Slika 9.13.: Dijagram naprezanja-istezanja za ABS_20 epruvetu.....	37
Slika 9.14.: Dijagram naprezanja-istezanja za Z-ULTRAT_100 epruvetu.....	38
Slika 9.15.: Dijagram naprezanja-istezanja za Z-ULTRAT_70 epruvetu.....	38

Slika 9.16.: Dijagram naprežanja-istezanja za Z-PETG_70 epruvetu.....	39
Slika 9.17.: Dijagram naprežanja-istezanja za Z-PETG_50 epruvetu.....	39
Slika 9.18.: Epruvete nakon pokusa.....	40
Slika 9.19.: Graf vlačne čvrstoće po materijalima.....	42



IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski/specijalistički 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, Ante Babić (*ime i prezime*) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog/specijalističkog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom Ispitivanje mehaničkih svojstava uzoraka dobivenih 3D ispisom (*upisati naslov*) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica: Ante Babić

(*upisati ime i prezime*)

Ante Babić

(vlastoručni potpis)

Sukladno članku 58., 59. i 61. Zakona o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti završne/diplomske/specijalističke radove sveučilišta su dužna objaviti u roku od 30 dana od dana obrane na nacionalnom repozitoriju odnosno repozitoriju visokog učilišta.

Sukladno članku 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.