

Analiza utjecaja procesnih parametara na mehanička svojstva i ponašanje 3D tiskanih uzoraka

Štefanac, Mato

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:003293>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-16**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ANALIZA UTJECAJA PROCESNIH PARAMETARA NA
MEHANIČKA SVOJSTVA I PONAŠANJE
3D TISKANIH UZORAKA**

Rijeka, siječanj 2024.

Mato Štefanac

0035209224

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ANALIZA UTJECAJA PROCESNIH PARAMETARA NA
MEHANIČKA SVOJSTVA I PONAŠANJE
3D TISKANIH UZORAKA**

Mentor: Prof. dr. sc. Robert Basan

Komentor: Izv. prof. dr. sc. Tea Marohnić

Rijeka, siječanj 2024.

Mato Štefanac

0035209224

Rijeka, 15. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za konstruiranje u strojarstvu**
Predmet: **CAE u razvoju proizvoda**
Grana: **2.11.01 opće strojarstvo (konstrukcije)**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Mato Štefanac (0035209224)**
Studij: **Sveučilišni diplomski studij strojarstva**
Modul: **Konstruiranje i mehatronika**

Zadatak: **Analiza utjecaja procesnih parametara na mehanička svojstva i ponašanje 3D tiskanih uzoraka / Analysis of the influence of process parameters on the mechanical properties and behavior of 3D printed samples**

Opis zadatka:

Za odabrani 3D printer i materijal filamenta pripremiti i provesti izradu i sustavno ispitivanje mehaničkih svojstava i ponašanja odgovarajućeg broja ispitnih uzoraka s različitim postotkom ispune i/ili orijentacije tiskanja. Ispitivanja provesti sukladno normi ISO 527 koristeći odgovarajuće uzorke i statički ispitni stroj. Analizirati i validirati dobivene rezultate njihovom primjenom na ispitnom uzorku sličnom komponenti čije ponašanje treba numerički modelirati i provjeriti eksperimentom. Rad treba uključivati pregled stanja tehnike, opis korištene metode i alata te kritičku analizu rezultata i njihov utjecaj na primjenu 3D tiskanih materijala u konstruiranju i razvoju proizvoda.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Mato Štefanac

Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2023.

Mentor:

Robert Basan

Prof. dr. sc. Robert Basan

Tea Marohnić

Doc. dr. sc. Tea Marohnić (komentor)

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

Igor Bonefačić

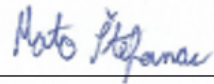
Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

IZJAVA

Ovime izjavljujem da sam diplomski rad pod naslovom “Analiza utjecaja procesnih parametara na mehanička svojstva i ponašanje 3D tiskanih uzoraka” izradio samostalno koristeći znanje stečeno na preddiplomskom i diplomskom studiju strojarstva, uz pomoć mentora prof. dr. sc. Roberta Basana i komentorice izv. prof. dr. sc. Tee Marohnić te dostupne literature.

Rijeka, siječanj 2024.

Student:



Mato Štefanac

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Robertu Basanu i komentorici izv. prof. dr. sc. Tei Marohnić na ukazanom povjerenju i pomoći pri izradi diplomskog rada.

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA.....	2
2.1. Uvod u aditivnu proizvodnju	2
2.2. 3D tisak	7
3. ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA I PONAŠANJA MATERIJALA	11
3.1. Statički vlačni pokus	12
3.2. Norma ISO 527	21
4. MATERIJAL	29
4.1. Polimeri.....	29
4.2. ABS.....	33
5. EKSPERIMENTALNA OPREMA.....	35
5.1. Oprema za izradu uzoraka	35
5.2. Oprema za vlačno ispitivanje.....	38
5.3. Oprema za određivanje modula elastičnosti	41
6. ISPITIVANJE.....	43
6.1. Opis ispitnih uzoraka	43
6.2. Vlačno ispitivanje (određivanje kvantitativnih dijagrama).....	48
6.3. Određivanje modula elastičnosti.....	52
6.4. Rezultati ispitivanja	54
7. PRIMJENA EKSPERIMENTALNO ODREĐENIH SVOJSTAVA MATERIJALA U NUMERIČKOJ ANALIZI.....	70
7.1. Opis modela i analitički proračun	71
7.2. Numerička analiza	74
7.3. Rezultati	79
8. ZAKLJUČAK.....	86
9. LITERATURA	88
10. POPIS OZNAKA.....	90
11. POPIS SLIKA.....	92
12. POPIS TABLICA	94
13. SAŽETAK	95
14. SUMMARY	96

1. UVOD

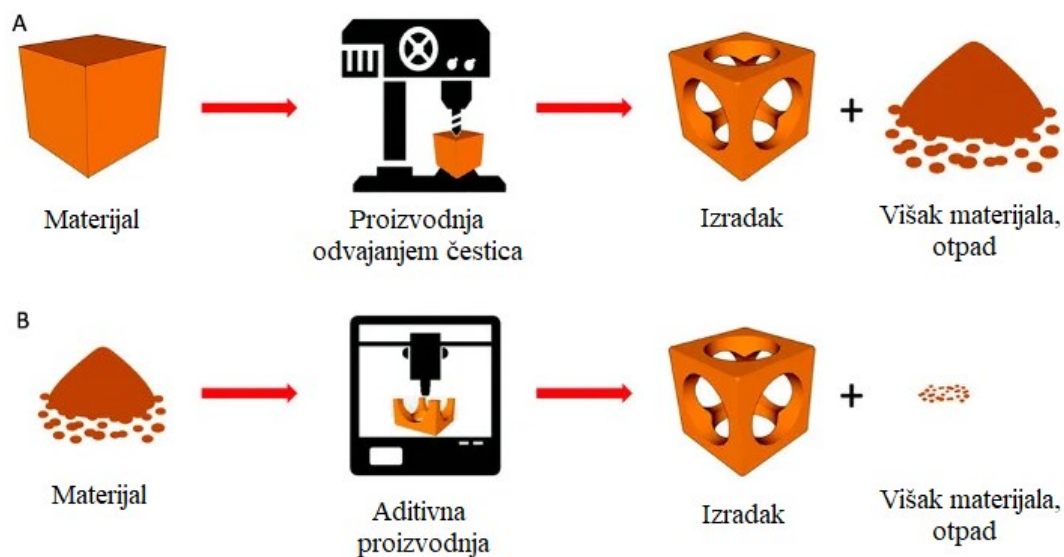
Mehanička svojstva nekog materijala su direktno povezana s njegovom strukturom, ali također uvelike ovise i o velikom broju parametara prilikom proizvodnje. Svaki realni materijal nikad nije idealan i uvijek sadrži određene strukturne nesavršenosti koje onda u većoj ili manjoj mjeri utječu na njegova svojstva. Pojava strukturnih nesavršenosti se uglavnom ne može kontrolirati pa će mehanička svojstva nekog materijala uvijek varirati unutar određenih granica. S druge strane, postoje procesni parametri koji su promjenjiva varijabla (mogu se kontrolirati) prilikom proizvodnje, čime se utječe na svojstva proizvedenog materijala. Pod procesne parametre se mogu ubrojiti uvjeti okoline prilikom proizvodnje, poput temperature i vlage zraka, ali se uglavnom pojam odnosi na parametre specifične za određeni proizvodni postupak. Konkretno, u ovom će radu biti riječi o tehnologiji 3D tiska, kod koje će se promatrati utjecaj parametra postotka ispune uzoraka na mehanička svojstva polimernih uzoraka. Osim toga, ostali parametri kod 3D tiska uključuju orijentaciju objekta te velik broj parametara koji se mogu programski podesiti prije samog ispisa (npr. visina sloja, vrsta uzorka ispune, debljina stijenke).

U sklopu ovog diplomskog rada dan je pregled suvremenih aditivnih tehnologija s naglaskom na 3D tisak, njegove specifičnosti, prednosti i nedostatke. Opisana je norma ISO 527 koja se koristi za standardizaciju vlačnih ispitivanja polimernih materijala. Također, spomenuta je važnost i specifičnosti polimernih materijala, s naglaskom na ABS (akrilonitril butadien stiren), od kojega su bile izrađene epruvete za vlačna ispitivanja. Provedena su vlačna ispitivanja i napravljena je analiza utjecaja postotka ispune na mehanička svojstva materijala, te su dobiveni rezultati sistemski prikazani. Na temelju dobivenih svojstava napravljena je numerička analiza u programu *Autodesk Inventor* s ciljem određivanja dopuštenih opterećenja odabranih uzoraka s različitim postocima ispune.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

2.1. Uvod u aditivnu proizvodnju

Aditivna proizvodnja (engl. *Additive manufacturing*) je postupak koji podrazumijeva proizvodnju nekog objekta postepenim dodavanjem slojeva materijala jednog na drugi, sve dok se ne dobije gotov proizvod. U širem smislu, to je proces koji obuhvaća i korake prije samog postupka proizvodnje (npr. priprema digitalnog modela komponente pomoću nekog CAD programa), te korake poslije proizvodnje (npr. postupci naknadne obrade i kontrole). Aditivna proizvodnja je fundamentalno različita od tradicionalnih (suptraktivnih) postupaka proizvodnje. Dok se tradicionalni postupci proizvodnje (poput tokarenja i glodanja, ali i ostalih konvencionalnih postupaka obrade odvajanjem čestica) temelje na oduzimanju materijala (npr. vratila manjeg promjera izrađuju se od čeličnih šipki okruglog poprečnog presjeka oduzimanjem materijala, tj. tokarenjem), aditivni postupci se temelje na njegovom postepenom dodavanju (adiciji, lat. *additio* – dodavanje, pribrajanje). Na slici 2.1 ilustrativno je prikazana usporedba aditivne proizvodnje i proizvodnje odvajanjem čestica.



Slika 2.1 Usporedba aditivne proizvodnje i proizvodnje odvajanjem čestica [1]

Prema slici 1, ulazni materijal u proces proizvodnje odvajanjem čestica je obično neki puni komad (poluproizvod). Njegovom obradom dobiva se gotovi izradak i u većini slučajeva velika količina otpadnog materijala (koji se u nekim slučajevima može reciklirati). S druge strane, u slučaju aditivne proizvodnje, polazni materijal je obično prah, tekućina ili krutina

(npr. polimerni filament). Daljnjom obradom polazni materijal naposljetku postaje gotovi izradak, a otpadnog materijala je manje, ili ga uopće nema.

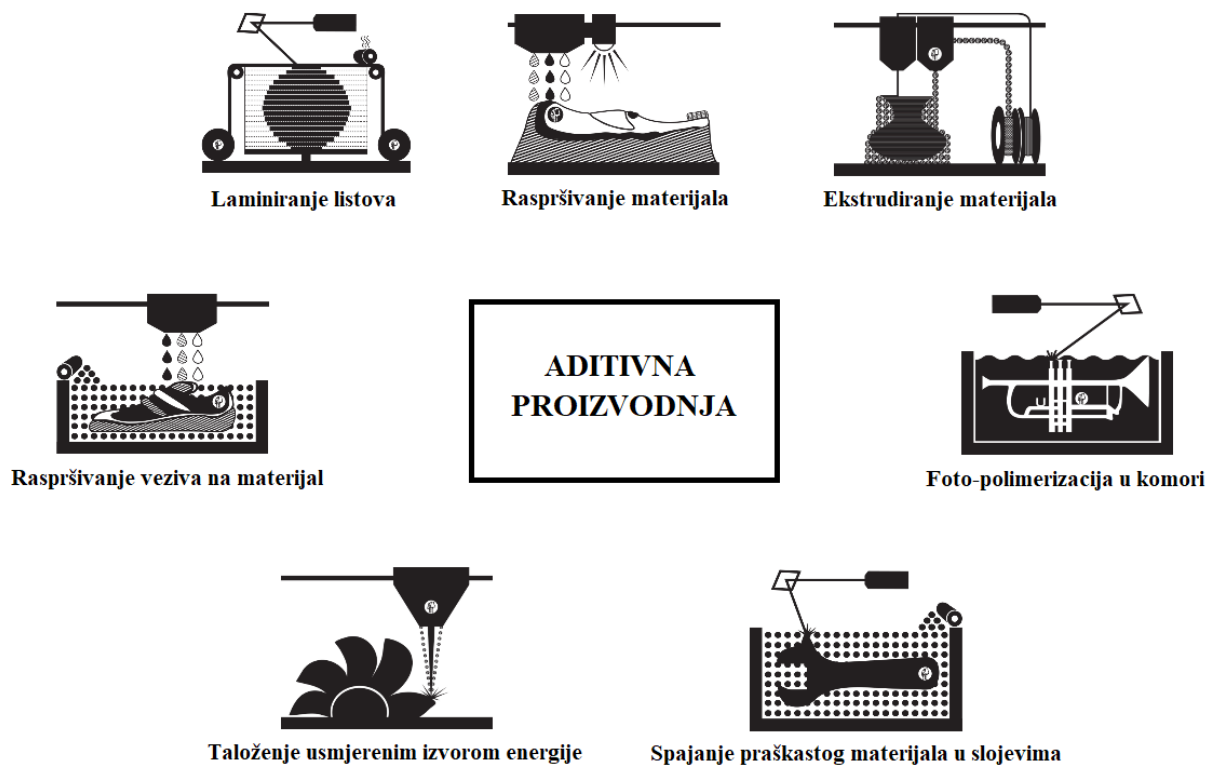
Jedna od glavnih prednosti aditivne proizvodnje je mogućnost izrade kompleksne geometrije. Kompleksna geometrija podrazumijeva različite geometrije sa složenim unutarnjim i vanjskim značajkama komponente, ali i mogućnost ispune komponente različitim vrstama uzoraka te mogućnost izrade rešetkastih konstrukcija. Komponente sa vrlo složenom geometrijom i specifičnim značajkama je vrlo teško (ili nemoguće) i skupo izraditi konvencionalnim metodama obrade odvajanjem čestica. Ovakvim tipom proizvodnje se u potpunosti eliminiraju veliki troškovi povezani s izradom pojedinačnih složenih dijelova. Druga velika prednost, kao što je već spomenuto, je mala količina otpadnog materijala. Otpadni materijal je onaj materijal koji će se naknadnom obradom komponente ukloniti (npr. oslonci). Ovdje se za izradu komponente koristi samo nužna količina materijala koja je potrebna za izraditi tu komponentu, dok se ostatak materijala koji sudjeluje u proizvodnom procesu reciklira [2]. Osim toga, ovisno o potrebi i funkcijama komponente, aditivnom proizvodnjom je moguće izraditi komponentu od više različitih materijala (npr. komponentu koja mora imati dobru sposobnost provođenja električne struje, ali također mora biti otporna i na trošenje, moguće je izraditi s metalnom jezgrom i keramičkom prevlakom). Još jedna od prednosti je isplativija proizvodnja malih serija proizvoda i skraćivanje vremena potrebnog da bi se došlo do komponente (moguće je vrlo brzo napraviti digitalni model komponente i izraditi ju nekom od aditivnih tehnologija – brzo prototipiranje, engl. *Rapid prototyping*) [3].

S druge strane, aditivna proizvodnja je relativno spor i skup proces, oprema koja se koristi je skupa, komponente izrađene aditivnim tehnologijama u većoj ili manjoj mjeri zahtijevaju naknadnu obradu, veličina komponente koja se izrađuje je dimenzijski dosta ograničena, te komponente često imaju lošu kvalitetu površine i loša mehanička svojstva prije dodatne obrade [4].

Aditivnom proizvodnjom se mogu proizvoditi komponente od gotovo svih vrsta materijala. Najčešće korišteni materijali su plastika (polimeri), metali, keramike i kompoziti. Nemetalne komponente je često moguće proizvesti u različitim bojama ili čak i u kombinaciji više različitih boja. Kao što je već spomenuto, nekim proizvodnim postupcima moguće je izraditi komponentu od više različitih materijala. U svakom slučaju, broj materijala koji se primjenjuju raste [5].

Aditivna proizvodnja primjenu pronalazi ponajviše u područjima gdje je funkcija proizvoda važnija od cijene i gdje je zbog visoke specifičnosti proizvoda isplativo proizvoditi male serije. Stoga je ovakav način proizvodnje karakterističan za zrakoplovnu industriju (mogućnost proizvodnje složenih komponenti male mase), automobilsku industriju (brzo prototipiranje), medicinsku industriju (mogućnost proizvodnje složenih komponenti prilagođenih pojedincu) i općenito za industriju prilikom razvoja proizvoda [6].

Ovisno o samom načinu proizvodnje i vrsti materijala koji se koristi postoje različite vrste aditivnih tehnologija. Aditivne tehnologije su podijeljene u sedam glavnih skupina i standardizirane su normom ISO/ASTM 52900:2021. Prema toj normi glavne skupine aditivnih tehnologija su: raspršivanje veziva na materijal (engl. *binder jetting*), taloženje usmjerenim izvorom energije (engl. *directed energy deposition*), ekstrudiranje materijala (engl. *material extrusion*), raspršivanje materijala (engl. *material jetting*), spajanje praškastog materijala u slojevima (engl. *powder bed fusion*), laminiranje listova (engl. *sheet lamination*) i foto-polimerizacija u komori (engl. *vat photopolymerization*) [7, 8]. Shematski prikaz vrsta aditivne proizvodnje prikazan je na slici 2.2.



Slika 2.2 Vrste aditivne proizvodnje [5]

Raspršivanje veziva na materijal je aditivna tehnologija kod koje se tekuće vezivo precizno selektivno raspršuje po tankim slojevima praškastog materijala, sloj po sloj, sve dok se ne dobije gotov proizvod. Ponekad se komponente izrađene na taj način mogu odmah koristiti, no kod većine metalnih i keramičkih dijelova nužna je dodatna (termička) obrada. Od materijala se primjenjuju plastika (polimeri), metali, keramike, staklo i pijesak, a glavne prednosti tehnologije su visoka produktivnost i mogućnost korištenja velikog broja materijala [5].

Kod taloženja usmjerenim izvorom energije, žica ili materijal u prahu se dovode na površinu izratka, gdje se tale i spajaju s ostatkom materijala korištenjem električnog luka, lasera ili snopa elektrona. Ova tehnologija se može smatrati vrstom automatskog navarivanja materijala. Kao materijali se koriste metalne žice i prah te keramika, a prednosti su što proces nije ograničen na određeni smjer ili po određenoj osi, postoji mogućnost kombiniranja više vrsta materijala na jednom komadu i tehnologija je vrlo efikasna za različite popravke i dodavanje materijala na neku komponentu [5].

Ekstrudiranje materijala je tehnologija kod koje se rastaljeni materijal ekstrudira kroz mlaznicu i dodaje u slojevima sve dok se ne izradi gotova komponenta. Od materijala se uglavnom koriste polimeri (moguće je i izrađivati komponente od metala, kompozita i hibridnih materijala), a prednosti procesa su što je jeftin u odnosu na druge, omogućuje izradu komponenti u različitim bojama i komponente imaju dobra strukturalna svojstva [5].

Kod tehnologije raspršivanja materijala, kapljice fotopolimera selektivno se raspršuju u slojeve koji se očvršćuju izlaganjem ultraljubičastom zračenju. Druga varijanta je selektivno raspršivanje rastaljenog materijala koji se skrućuje na sobnoj temperaturi. Od materijala se koriste fotopolimeri, polimeri i voskovi, a prednosti su visoka preciznost i mogućnost izrade komponente od više različitih materijala i boja [5].

Spajanje praškastog materijala u slojevima temelji se na selektivnom taljenju sloja praškastog materijala pomoću nekog izvora topline (laser ili snop elektrona). Proces se ponavlja sloj po sloj sve dok se ne izradi gotova komponenta, a nerastaljeni prah ujedno služi kao oslonac. Ovom tehnologijom mogu se izrađivati komponente od plastike (polimera), metala, keramike i pijeska, a prednosti su mogućnost izrade vrlo složenih komponenti, nije potrebno trošiti materijal na oslonce i tehnologija je primjenjiva na širok spektar materijala [5].

Laminiranje listova je tehnologija kod koje se listovi (folije) od nekog materijala međusobno spajaju i formiraju neki objekt. Ovisno o materijalu listova, koriste se različite metode spajanja; za listove od papira i plastike koriste se ljepila, listovi od plastike i metala spajaju se ultrazvučnim zavarivanjem, a listovi od metala lemljenjem. Prednost ove tehnologije je mogućnost izrade komponenti velikog volumena i relativno niska cijena nemetalnih komponenti [5].

Foto-polimerizacija u komori je proces u kojem se fotopolimerna smola selektivno izlaže ultraljubičastom zračenju, pri čemu se skrućuje i formira sloj. Kao materijal se koristi tekuća fotopolimerna smola, a prednosti tehnologije su visoka preciznost i moguća izrada velikih kompleksnih komponenti te dobra površinska svojstva izratka (glatkoća površine) [5].

2.2. 3D tisak

Pojam 3D tiska se može interpretirati na više načina. U širem smislu 3D tisak je sinonim za aditivnu proizvodnju, odnosno obuhvaća sve prethodno spomenute aditivne tehnologije, a u užem smislu, 3D tisak se može shvatiti kao jedan od koraka u aditivnoj proizvodnji; konkretni korak u kojemu se komponenta proizvodi. Osim toga, izraz 3D tisak se često kolokvijalno koristi za samu tehnologiju ekstrudiranja materijala. U ovom će potpoglavlju detaljnije biti opisana tehnologija ekstrudiranja materijala, kao najrasprostranjenija vrsta aditivne tehnologije.

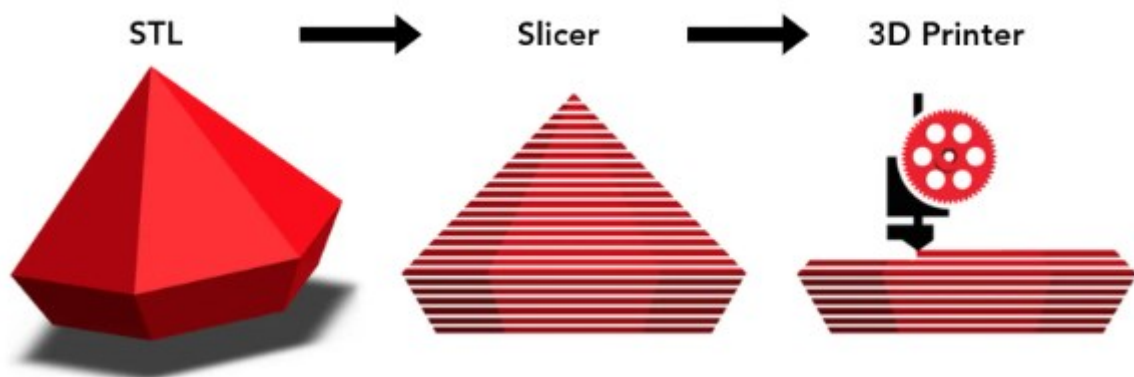
Tehnologija ekstrudiranja materijala još je poznata pod kraticama FDM (engl. *fused deposition modeling*) i FFF (engl. *fused filament fabrication*). Kao što je već spomenuto, radi se o tehnologiji kod koje se rastaljeni materijal ekstrudira kroz mlaznicu sloj po sloj, sve dok se ne dobije gotovi 3D izradak. Najčešće korišteni materijali su polimeri, ali ovom tehnologijom moguće je proizvesti i komponente od metala, kompozita i hibridnih materijala. Tipičan FDM 3D printer prikazan je na slici 2.3.



Slika 2.3 Tipičan izgled FDM 3D printera [9]

3D printer funkcioniše na način da mehanizam u gornjem dijelu glave ekstrudera (najčešće se radi o zupčanicima ili valjcima) povlači filament (polimerni materijal) u donji, zagrijani dio glave ekstrudera, koji onda tali materijal i istiskuje ga kroz mlaznicu. Rastaljeni materijal se postepeno polaže na podlogu za ispis. Ovisno o vrsti printera, iscrtavanje željene geometrije u horizontalnoj ravnini postiže se kombinacijom pomaka podloge i glave ekstrudera. Precizni pomaci podloge i glave ekstrudera obično su osigurani su korištenjem vodilica i koračnih motora (često uz prijenos zupčastim remenima). Nakon iscrtavanja jednog sloja, glava ekstrudera (ili stol, ovisno o vrsti printera) radi vertikalni pomak i printer počinje ispis drugog sloja u horizontalnoj ravnini. Slojevi se nanose postepeno jedan na drugi sve dok se ne dobije gotovi izradak. Podloga za ispis je najčešće grijana da se postigne bolje prianjanje i spriječi pretjerano deformiranje izratka.

Da bi se neki objekt uopće mogao 3D tiskati, najprije je potrebno izraditi njegovu geometriju pomoću nekog CAD programa. Geometriju objekta je potrebno spremi u STL formatu, koji se onda može učitati u program za pripremu modela za 3D tisak (eng. *slicer*). *Slicer* je program koji „reže“ model u slojeve koji će se onda izrađivati na 3D printeru. *Slicer* također simulira proces 3D tiska, i u obliku G koda daje upute za kretanje glave ekstrudera. Takvi programi omogućuju i definiranje velikog broja parametara vezanih za konkretni ispis i omogućuju postavljanje oslonaca na potrebnim mjestima. Dobiveni se G kod direktno ubacuje u 3D printer pomoću neke prijenosne memorije i printer započinje ispis objekta. Postupak pripreme virtualnog objekta za ispis ilustrativno je prikazan na slici 2.4.

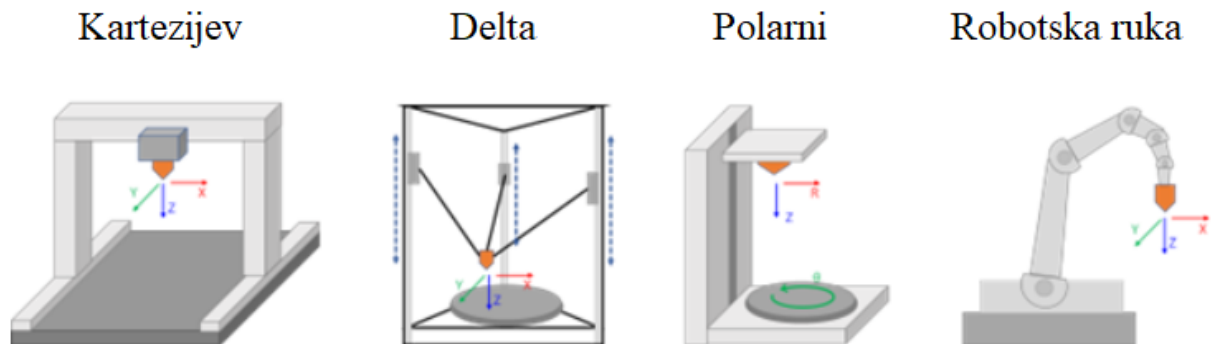


Slika 2.4 Postupak pripreme objekta za 3D tisak [10]

Za izradu komponenti tehnologijom 3D tiska pretežno se koriste polimerni materijali (plastomeri), a kod nekih specifičnih primjena moguće je izrađivati i komponente od kompozita te metalnih i hibridnih materijala. Od polimera se najčešće koriste ABS (akrilonitril butadien stiren), PLA (polilaktična kiselina), ASA (akrilonitril stiren akrilat), PET (polietilen tereftalat), PETG (polietilen tereftalat glikol), PC (polikarbonat), PP (polipropilen), PA (poliamid) i dr. [11]. Polimerni materijali za 3D tisak najčešće dolaze u obliku tanke plastične žice, odnosno polimernog filameta, ali ovisno o vrsti printera polazni materijal mogu biti i komadići plastike, tj. peleti (eng. *pellets*). Kod takve vrste 3D printera koristi se ekstruder s vijkom koji svojom rotacijom istiskuje zagrijani materijal kroz mlaznicu. Glavna prednost korištenja peleta u odnosu na filament je manja cijena i veći izbor materijala te veće brzine i volumeni ispisa (takvi printeri imaju veće mlaznice i veći protok materijala) [12]. S druge strane, metalni materijali mogu biti u obliku filameta, praha i šipke. Metalni filament se koristi na isti način kao i polimerni, za metalni prah se koristi vijčani ekstruder, a metalni materijali u obliku šipke koriste ekstruder s klipom (klip ostvaruje silu potiskivanja) [13]. Metalni materijal u obliku šipke se sastoji od metalnih čestica povezanih voskom i polimernim vezivom [14].

Prema načinu kretanja glave ekstrudera u prostoru, 3D printeri se mogu podijeliti na Kartezijeve printere, polarne printere, delta printere i printere s robotskom rukom. Kartezijevi printeri su najčešći i oni koriste Kartezijev koordinatni sustav (sustav određen s tri međusobno okomita pravca x , y i z koji se sijeku u ishodištu O). Glavna prednost Kartezijevih printera je što se glava ekstrudera može precizno kretati u ravnini u kojoj polaže sloj materijala, nakon čega mijenja ravninu po z osi (na taj način se osigurava kvalitetan ispis sloja). Osim toga, kinematika glave ekstrudera je relativno intuitivna i jednostavna. Polarni printeri koriste cilindrični koordinatni sustav (sustav određen radijusom ρ , kutom φ , i visinom z te ishodištem O). Polarni printeri funkcioniraju na način da se pokretna podloga rotira, a glava ekstrudera se pomiče u horizontalnoj ravnini po različitim vrijednostima radijusa. Nakon tiskanja jednog sloja, glava ekstrudera se pomiče po vertikalnoj z osi i započinje ispis idućeg sloja. Kod delta printera, glava ekstrudera je spojena na tri pomične ruke (međusobno jednako udaljene, u obliku trokuta). Svaka ruka se može rotirati oko osi vodilice i može se vertikalno kretati po vodilici. Time je omogućeno kretanje glave ekstrudera u svakoj točki volumena printera. Delta printeri su posebno pogodni za ispis visokih izradaka, jer je printer vrlo precizan u središnjem dijelu podloge za ispis, a preciznost pada prema rubovima (nulti položaj glave ekstrudera je na sredini podloge). 3D printeri s robotskom rukom imaju ekstruder na vrhu ruke i polažu rastaljeni materijal unutar ruci dostupnog prostora kretanja. Ova vrsta nije još toliko razvijena

i manje je precizna od Kartezijevih printera, ali velika prednost joj je prenosivost (nema vlastitu podlogu za ispis) [15, 16]. Vrste 3D printera prikazane su na slici 2.5.



Slika 2.5 Vrste 3D printera s obzirom na kretanje glave ekstrudera u prostoru [16]

Osim spomenutih vrsta 3D printera postoje i tzv. hibridni 3D printeri. Hibridni printeri su spoj aditivne i suptraktivne tehnologije. Takvi strojevi imaju mogućnost izrade nekog objekta tehnologijom ekstrudiranja materijala, nakon čega je moguće izmijeniti alat i odmah izradak obraditi metodom odvajanja čestica. Na taj se način ubrzava i pojednostavljuje postupak proizvodnje, ali su takvi printeri općenito skuplji [15].

Jedna od glavnih prednosti 3D printera je njihova dostupnost i niska cijena. Ukoliko se ne radi o skupim industrijskim printerima, danas si ih gotovo svatko može priuštiti. Druga prednost je vrlo širok raspon materijala koji se mogu primjenjivati. Najčešće se tu radi o polimernim materijalima koji se vrlo lako mogu kupiti u obliku filameta. Osim toga, cijeli postupak pripreme objekta i sami proces 3D tiska su relativno jednostavni za naučiti. Dovoljno je znati modelirati u nekom CAD programu i naučiti koristiti *slicer* (koji je intuitivan sam po sebi). Ostale prednosti su brzina proizvodnje komponenti (posebno ako se radi o tankim i malim dijelovima), relativno niska temperatura procesa, cijela oprema ne zauzima puno prostora i proces nije potrebno nadgledati. Glavni nedostaci ove tehnologije su toksičnost nekih vrsta materijala, izradci mogu imati lošu kvalitetu površine (vidljive linije od tiskanja slojeva), veći i kvalitetniji izradci zahtijevaju puno više vremena za izradu, problemi vezani uz deformaciju izradaka te odljepljivanje slojeva zbog razlika u temperaturi i izradci uglavnom imaju smanjenu čvrstoću u smjeru z osi [17].

3. ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA I PONAŠANJA MATERIJALA

Mehanička svojstva materijala su, uz fizikalna i kemijska svojstva, glavna obilježja koja karakteriziraju neki materijal. Mehanička svojstva materijala direktno su ovisna o strukturnom stanju nekog materijala, koje se dobiva obradom materijala određenog sastava određenim tehnološkim postupkom. Mehanička svojstva su objektivni pokazatelji ponašanja materijala prilikom djelovanja nekog vanjskog opterećenja. Dakle, ukoliko se radi o nekoj konkretnoj komponenti, na temelju mehaničkih svojstava moguće je predvidjeti kako će se komponenta ponašati tijekom eksploatacije. Osim toga, na temelju mehaničkih svojstava materijala moguće je izvršiti dimenzioniranje strojnih elemenata i struktura.

Realni materijali nikad nisu savršeni (kod idealnih materijala bi se mogla napraviti direktna veza između mikrostrukture i mehaničkih svojstava). Svi realni materijali u većoj ili manjoj mjeri sadrže (mikro)strukturne nepravilnosti. Obzirom da ne možemo biti u potpunosti sigurni koji materijal, gdje i u kojoj mjeri sadrži nepravilnosti, teorijskim proračunom se nikada ne može dobiti egzaktna vrijednost čvrstoće nekog materijala. Stoga se dimenzioniranje nekog elementa temelji na mehaničkim svojstvima materijala uz određeni faktor sigurnosti (faktor neznanja), koji garantira da će komponenta moći izdržati nametnuto opterećenje i u najkritičnijem slučaju (slučaj kada materijal ima najnepogodniju strukturu u vidu čvrstoće).

Obzirom da se mehanička svojstva stvarnih materijala ne mogu točno odrediti teorijski, ona se dobivaju eksperimentalno. Eksperimenti se provode na epruvetama, koje se opterećuju na način sličan onome na koji će se odgovarajući strojni dijelovi opterećivati tijekom eksploatacije. Epruvete su standardizirani uzorci na kojima se izvode ispitivanja, a mogu se naprezati vlačno, tlačno, savojno i uvojno. Ispitivanja mogu biti statička i dinamička. Kod statičkih ispitivanja, iznos opterećenja se tijekom ispitivanja polako mijenja, kako bi se naprezanje u određenom trenutku moglo pojednostavljeno promatrati kao statičko, dok se kod dinamičkog ispitivanja intenzitet opterećenja ciklički mijenja ili je opterećenje udarnog karaktera. Osim toga, pri ispitivanju mehaničkih svojstava materijala često se simuliraju neki vanjski uvjeti (poput povišene ili snižene temperature, utjecaja korozivnih medija). Osnovna vrsta eksperimenta za utvrđivanje mehaničkih svojstava materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja je statički vlačni pokus [18].

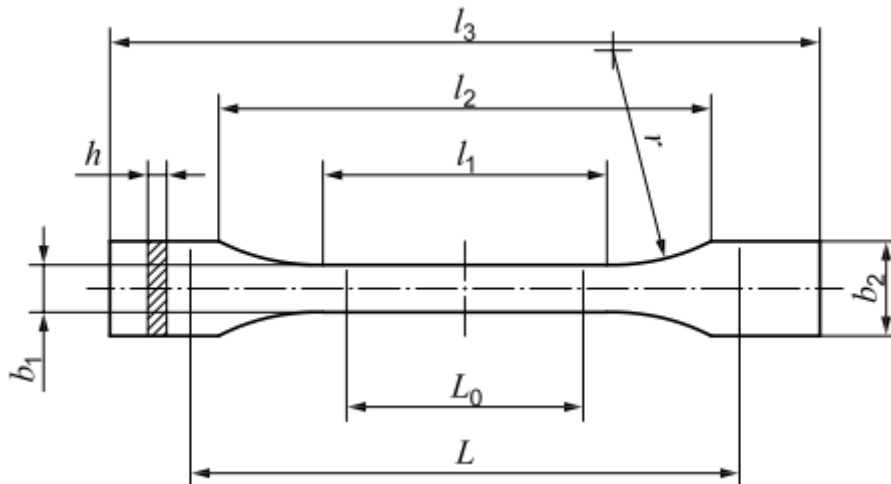
3.1. Statički vlačni pokus

Statički vlačni pokus je ispitivanje kojim se dobivaju informacije o elastičnom i plastičnom ponašanju materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog napreznja. Cilj ovakvih pokusa je dobiti podatke o osnovnim mehaničkim svojstvima materijala (npr. granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, modul elastičnosti). Ovaj tip ispitivanja se provodi na kidalicama – uređajima koji epruvete postepeno vlačno opterećuju do loma i pritom bilježe silu i produljenje. Uz vlačno opterećenje, kidalice uglavnom imaju i mogućnost tlačnog i savojnog opterećivanja uzoraka, a sila se može ostvarivati hidraulički ili mehanički. Prilikom ispitivanja kidalica mjeri i bilježi podatke o pomaku traverze, a ukoliko je potrebno preciznije izmjeriti produljenje određenog dijela epruvete, na epruvete se učvršćuju ekstenzometri. Ekstenzometri su uređaji koji precizno mjere produljenje središnjeg dijela epruvete, a mogu biti beskontaktni (npr. optički, laserski) i kontaktni (npr. mehanički) [18]. Primjer kidalice za statička vlačna ispitivanja prikazan je na slici 3.1.



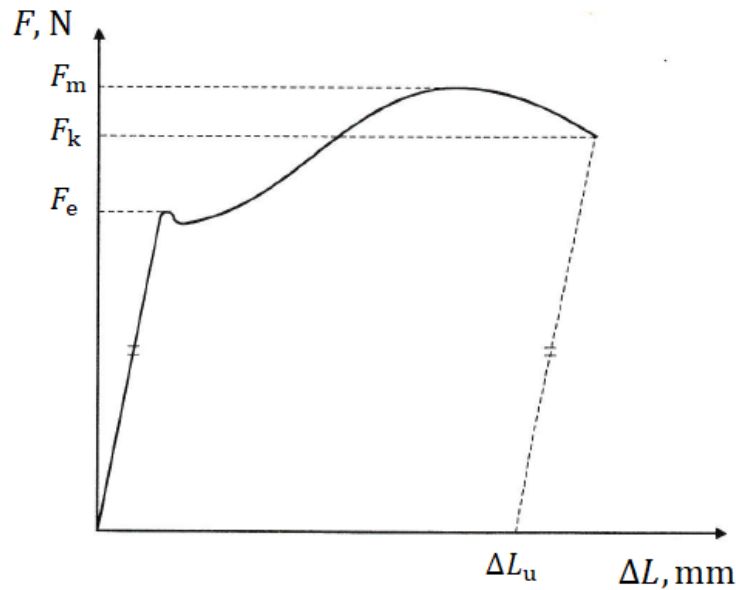
Slika 3.1 Izgled tipične kidalice [19]

Epruvete mogu biti okruglog ili pravokutnog poprečnog presjeka, ovisno o obliku poluproizvoda ili debljini stijenke materijala od kojeg su načinjene. Epruvete moraju biti standardnih dimenzija kako bi rezultati dobiveni eksperimentima mogli biti međusobno usporedivi. Primjer standardne epruvete pravokutnog poprečnog presjeka prikazan je na slici 3.2.



Slika 3.2 Primjer standardne epruvete (1BA i 1BB, ISO 527) [20]

Prilikom izvođenja pokusa, epruveta se na mjestima zadebljanja učvršćuje u čeljusti kidalice, koje se pokretanjem stroja počinju razmicati unaprijed definiranom brzinom. Ovisno o normi, brzina kidanja može biti izražena u mm/min ili može biti takva da je zadan prirast naprežanja u jedinici vremena. Epruveta se opterećuje, a kidalica bilježi potrebnu silu kidanja F i produljenje epruvete ΔL , te u dijagramu iscrtava njihovu međusobnu ovisnost, sve do konačnog kidanja epruvete. Primjer dijagrama sila – produljenje za tipični konstrukcijski čelik prikazan je na slici 3.3.



Slika 3.3 Dijagram sila F – produljenje ΔL za tipični konstrukcijski čelik [18]

U prvom dijelu dijagrama $F - \Delta L$ ovisnost sile i produljenja je linearna. Vrijednost sile linearno raste po pravcu sve do postizanja sile F_e – sila razvlačenja (tečenja). Nakon dostizanja vrijednosti F_e , epruveta se nastavlja produljivati čak i uz mali pad sile. Nakon toga sila i produljenje nastavljaju nelinearno rasti. Sila se povećava sve do postizanja vrijednosti F_m – maksimalna postignuta sila tijekom ispitivanja. U toj se točki površina poprečnog presjeka epruvete počinje značajno smanjivati (tzv. *necking*), pa do naknadnog produljenja epruvete dolazi i smanjivanjem iznosa sile. Sila pada sve do vrijednosti F_k – sila kod koje dolazi do loma epruvete. Nakon sastavljanja i mjerenja puknute epruvete, može se dobiti produljenje epruvete nakon kidanja:

$$\Delta L_u = L_u - L_0 \quad (1)$$

gdje je:

ΔL_u – ukupno produljenje mjerne duljine epruvete [mm],

L_u – konačna mjerna duljina epruvete [mm],

L_0 – početna mjerna duljina epruvete [mm].

Vrijednost konačne duljine epruvete označena je i na dijagramu na slici 3.3. Tu vrijednost je moguće odrediti i grafički – kroz konačnu točku (točku kidanja) potrebno je povući pravac koji je paralelan linearnom dijelu dijagrama. Sjecište toga pravca i osi apscise daje vrijednost konačne duljine.

Budući da sila sama po sebi nije dobar pokazatelj mehaničke otpornosti materijala, potrebno je iz dobivenih sila izračunati naprezanja, na način da se sila podijeli s početnom površinom presjeka epruvete:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

gdje je:

σ – (inženjersko) naprezanje [N/mm^2],

F – sila [N],

A_0 – početna površina poprečnog presjeka epruvete [mm^2].

Kada se produljenje epruvete ΔL podijeli s početnom duljinom epruvete L_0 dobiva se relativno produljenje ili istežanje:

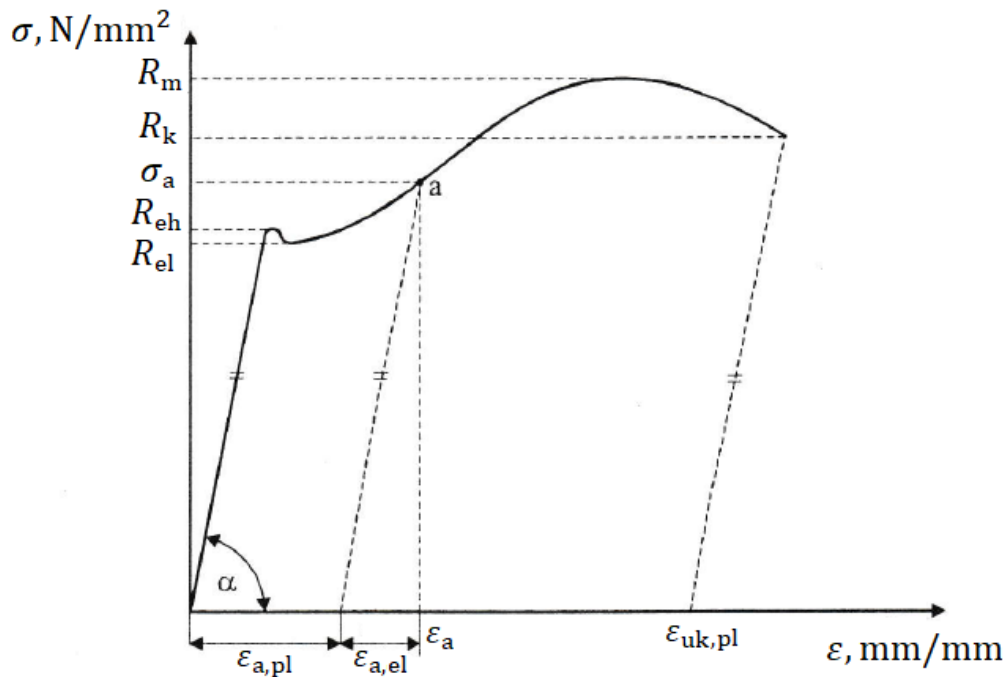
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

gdje je:

ε – istežanje (relativno produljenje epruvete) [mm/mm],

ΔL – produljenje mjerne duljine epruvete [mm].

Na taj se način iz dijagrama $F - \Delta L$ dobiva dijagram naprezanje σ – istežanje ε . Primjer takvog dijagrama za prethodno spomenuti konstrukcijski čelik prikazan je na slici 3.4.



Slika 3.4 Dijagram naprezanje σ – istezanje ε za konstrukcijski čelik [18]

Dijagram $\sigma - \varepsilon$ također započinje linearno. Taj se dio dijagrama naziva Hookeov pravac i za njega vrijedi Hookeov zakon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

gdje je:

E – modul elastičnosti (Youngov modul) [N/mm^2].

Modul elastičnosti je mjera krutosti materijala. Što je on veći, pravac će biti strmiji, a za postići istu vrijednost istezanja, bit će potrebno veće naprezanje. Sve deformacije u linearnom području su elastične, što znači da nakon rasterećivanja deformacija iščezava, a duljina epruvete ostaje nepromijenjena. Pojednostavljeno gledano, područje valjanosti Hookeovog zakona završava granicom razvlačenja R_e (dijeli se na gornju granicu razvlačenja R_{eh} i donju granicu razvlačenja R_{el}). Nakon granice razvlačenja dolazi do produljenja epruvete bez povećanja naprezanja. Po definiciji, granica razvlačenja je ono naprezanje kod kojeg se epruveta počinje produljivati uz privremeno smanjenje naprezanja.

Granica razvlačenja se računa kao:

$$R_e = \frac{F_e}{A_0} \quad (5)$$

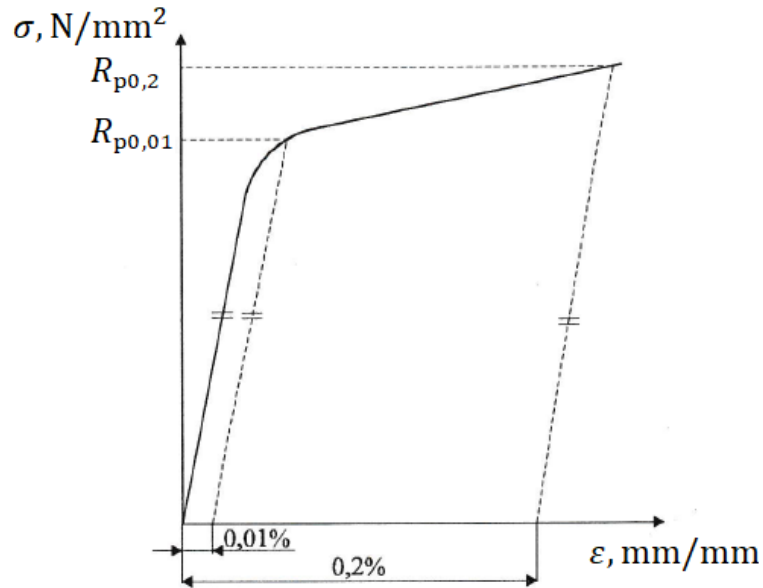
gdje je:

R_e – granica razvlačenja (tečenja) [N/mm²],

F_e – sila razvlačenja (tečenja) [N].

Prema granici razvlačenja se, uz određeni faktor sigurnosti, utvrđuje dopušteno naprezanje pri radu strojnih elemenata i konstrukcija. Naprezanja veća od granice razvlačenja osim elastične, izazivaju i plastičnu (trajnu) deformaciju epruvete. Prema dijagramu na slici 3.4, pri naprezanju σ_a ukupno istezanje iznosi ε_a . Rasterećivanjem epruvete elastična deformacija iščezava, a plastična (trajna) deformacija ostaje prisutna kod epruvete (pravac rasterećivanja paralelan je linearnom dijelu dijagrama).

Neki materijali nemaju izraženu granicu razvlačenja, nego imaju kontinuirani prijelaz iz područja elastičnih u područje plastičnih deformacija. Kod takvih materijala definira se tzv. konvencionalna granica razvlačenja. Konvencionalna granica razvlačenja predstavlja naprezanje koje u materijalu i nakon rasterećenja ostavlja određenu plastičnu (trajnu) deformaciju. Kod konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,01}$ (tehnička granica elastičnosti) nakon rasterećenja u materijalu ostaje plastična deformacija od 0,01%, a kod konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$, plastična deformacija nakon rasterećenja iznosi 0,2% [18]. Na slici 3.5 prikazan je dijagram $\sigma - \varepsilon$ s označenim konvencionalnim granicama razvlačenja.



Slika 3.5 Konvencionalne granice razvlačenja [18]

Naprezanje pri maksimalnoj sili naziva se vlačna ili rastezna čvrstoća R_m :

$$R_m = \frac{F_m}{A_0} \quad (6)$$

gdje je:

R_m – vlačna (rastezna) čvrstoća [N/mm^2],

F_m – maksimalna sila [N].

Vlačna čvrstoća nije maksimalno naprezanje tijekom vlačnog ispitivanja, nego je naprezanje pri maksimalnoj sili. Obzirom da se nakon postizanja maksimalne sile poprečni presjek epruvete počinje smanjivati (*necking*), stvarno naprezanje do kraja pokusa raste i dostiže maksimalnu vrijednost neposredno prije pucanja epruvete. Nakon dostignute vlačne čvrstoće, deformacija epruvete više nije jednolika po čitavoj epruveti, nego se lokalizira na jednom mjestu [18]. Naprezanje kod kojega dolazi do loma epruvete se zove naprezanje pri lomu R_k :

$$R_k = \frac{F_k}{A_0} \quad (7)$$

gdje je:

R_k – naprezanje pri lomu [N/mm^2],

F_k – sila kod koje dolazi do loma epruvete [N].

Statičkim vlačnim pokusom moguće je utvrditi istezljivost i kontrakciju materijala. Istezljivost predstavlja relativno produljenje materijala u aksijalnom smjeru u odnosu na početnu duljinu epruvete, a kontrakcija predstavlja relativno smanjenje površine poprečnog presjeka u odnosu na početnu površinu poprečnog presjeka. Ove dvije veličine definirane su izrazima:

$$A_{\text{ist}} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100, \% \quad (8)$$

$$Z = \frac{A_0 - A_u}{A_0} \cdot 100, \% \quad (9)$$

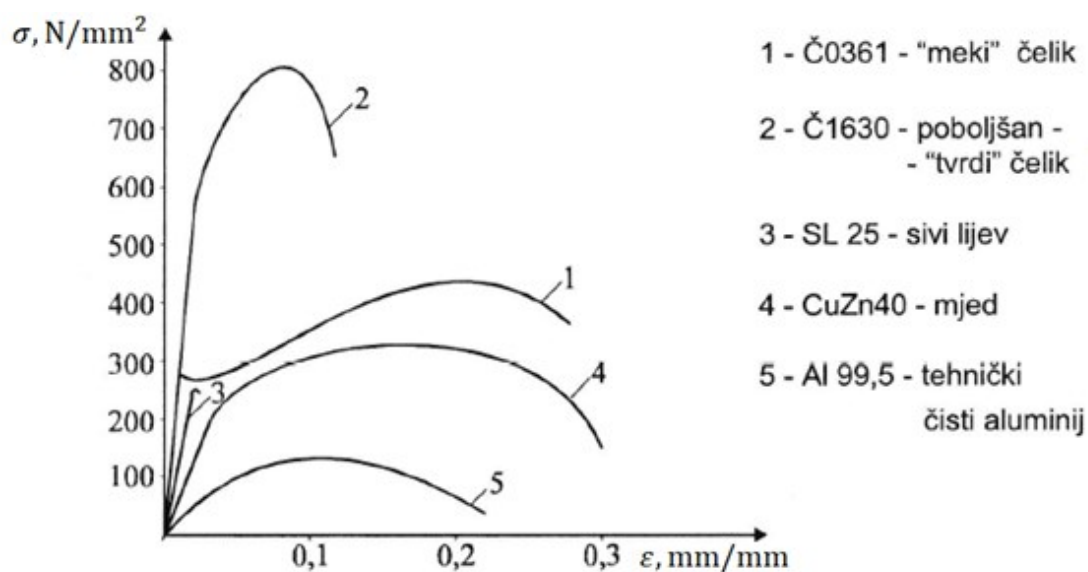
gdje je:

A_{ist} – istezljivost [%],

Z – kontrakcija [%],

A_u – površina poprečnog presjeka epruvete na mjestu prijeloma [mm²].

Primjer dijagrama naprezanje σ – istežanje ε za neke metalne materijale prikazan je na slici 3.6.



Slika 3.6 Dijagrami naprezanje σ – istežanje ε za metalne materijale [18]

Iz dijagrama na slici 3.6 se može zaključiti da se „meki“ čelici, mjed i tehnički čisti aluminij ponašaju duktilno (velika istezljivost, odnosno velika deformacija prije pojave loma), a sivi lijev i poboljšani „tvrdi“ čelik (u određenoj mjeri) ponašaju krhko (mala deformacija prije pojave loma).

Kod dosad spomenutih dijagrama $\sigma - \varepsilon$ sva naprezanja su izračunata pomoću početne površine poprečnog presjeka epruvete, a istežanja su dobivena izrazom (3). Tijek takvih dijagrama kvalitativno odgovara dijagramu $F - \Delta L$ i oni se nazivaju inženjerski ili konvencionalni dijagrami $\sigma - \varepsilon$. Obzirom da se površina poprečnog presjeka epruvete tijekom eksperimenta smanjuje, stvarno naprezanje je u području plastičnih deformacija veće od inženjerskog i raste do kraja eksperimenta. Stvarno naprezanje se računa pomoću stvarne površine poprečnog presjeka epruvete:

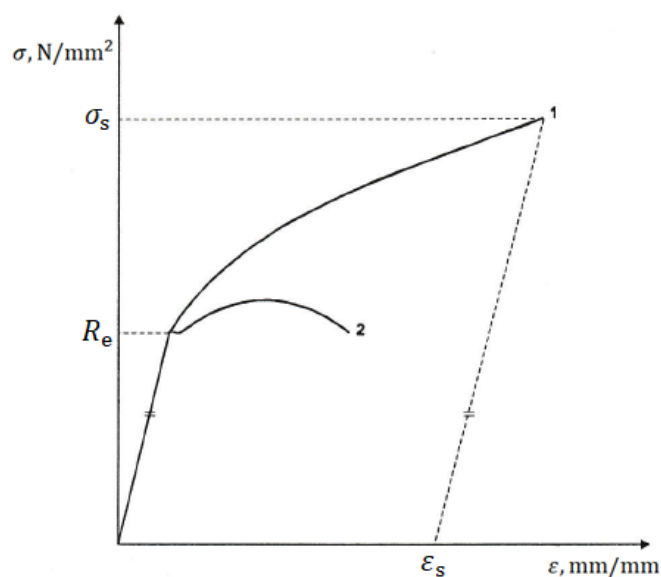
$$\sigma_s = \frac{F}{A_{stv}} \quad (10)$$

gdje je:

σ_s – stvarno naprezanje [N/mm^2],

A_{stv} – stvarna površina poprečnog presjeka [mm^2].

Usporedba inženjerskog i stvarnog dijagrama $\sigma - \varepsilon$ prikazana je na slici 3.7.



Slika 3.7 Stvarni (1) i inženjerski (2) dijagram naprezanje σ – istežanje ε [18]

Naposljetku, svaki od dijagrama ima svoju svrhu. Inženjerski dijagram $\sigma - \varepsilon$ daje dostatne podatke za konstrukcijske svrhe jer se elementi strojeva i konstrukcije u eksploataciji ne opterećuju izvan elastičnog područja (u tom području su oba dijagrama ista). Međutim, pri izučavanju ponašanja u neke druge svrhe (npr. obrada deformiranjem), dostatne podatke daje tek stvarni dijagram $\sigma - \varepsilon$ [18].

3.2. Norma ISO 527

ISO 527 je europska norma za određivanje rasteznih svojstava plastike. Puni naziv norme je „Plastika – Određivanje rasteznih svojstava“ (engl. *Plastics – Determination of tensile properties*). Norma se sastoji od ukupno pet dijelova; prvi dio norme se bavi osnovnim principima ispitivanja rasteznih svojstava plastike, drugi dio pokriva vlačno ispitivanje prešane i ekstrudirane plastike, u trećem dijelu se opisuje vlačno ispitivanje plastičnih folija, četvrti dio se bavi izotropnim i ortotropnim plastičnim kompozitima, a peti dio pokriva plastične kompozite s jednosmjerno orijentiranim ojačalima [20]. Obzirom da ne postoji zasebna norma kojom se ispituju vlačna svojstva 3D tiskanih materijala, oni se ispituju po ovoj normi (dio dva – prešana i ekstrudirana plastika).

Prvi dio norme opisuje osnovne principe određivanja rasteznih svojstava plastike i plastičnih kompozita za primjenu unutar zadanih uvjeta. Norma se koristi za određivanje vlačne čvrstoće, modula elastičnosti i drugih svojstava materijala na epruvetama definirane geometrije. Norma je primjenjiva na prešane i ekstrudirane plastomere, prešane duromere, vlaknima ojačane plastomere i duromere, te termotropne polimerne kapljevite kristale. Norma nije primjenjiva na materijale rešetkaste strukture i materijale sendvič strukture koji u sebi sadrže rešetkaste strukture [20].

Normom ISO 527 definiran je niz pojmova koji će se koristiti prilikom vlačnog ispitivanja (sva naprezanja su izražena u MPa, a istezanja bezdimenzijski ili postotno) [20]:

mjerna duljina, L_0 (engl. *gauge length*) – početna udaljenost između mjernih oznaka na središnjem dijelu epruvete (unutar norme se odnosi na najveću relevantnu duljinu), [mm],

debljina, h (engl. *thickness*) – manja početna dimenzija pravokutnog poprečnog presjeka na središnjem dijelu epruvete, [mm],

širina, b (engl. *width*) – veća početna dimenzija pravokutnog poprečnog presjeka na središnjem dijelu epruvete, [mm],

površina poprečnog presjeka, A (engl. *cross-section*) – umnožak širine i debljine epruvete ($A = bh$), [mm²],

brzina ispitivanja, v (engl. *test speed*) – brzina razdvajanja čeljusti kidalice, [mm/min],

naprezanje, σ (engl. *stress*) – normalna sila po jedinici površine početnog poprečnog presjeka, još se koristi naziv inženjersko naprezanje,

naprezanje pri tečenju, σ_y (engl. *stress at yield*) – naprezanje kod istezanja pri tečenju, moguće da je manje od najvećeg naprezanja pri ispitivanju,

(vlačna) čvrstoća, σ_m (engl. *strength*) – naprezanje kod prvog lokalnog maksimuma pri ispitivanju, moguće da pri njemu dođe do tečenja ili pucanja epruvete,

naprezanje pri istezanju od x %, σ_x (engl. *stress at x % strain*) – naprezanje kod kojega istezanje postiže određenu postotnu vrijednost, korisno je kada krivulja nema izraženu granicu razvlačenja,

naprezanje pri lomu, σ_b (engl. *stress at break*) – naprezanje kod kojeg dolazi do pucanja epruvete,

istezanje, ε (engl. *strain*) – povećanje mjerne duljine po jedinici početne mjerne duljine (relativno produljenje epruvete, odnosno mjerne duljine),

istezanje pri tečenju, ε_y (engl. *strain at yield*) – istezanje pri kojem prvi put dolazi do povećanja deformacije bez povećanja naprezanja,

istezanje pri lomu, ε_b (engl. *strain at break*) – istezanje kod posljednje zabilježene točke prije nego što se naprezanje spusti na ili ispod 10% vrijednosti vlačne čvrstoće, koristi se kod materijala koji pucaju prije pojave tečenja,

istezanje pri vlačnoj čvrstoći, ε_m (engl. *strain at strength*) – istezanje pri kojem se postiže vlačna čvrstoća,

nominalno istezanje, ε_t (engl. *nominal strain*) – istezanje izračunato iz podataka o početnoj udaljenosti i pomaku čeljusti kidalice,

nominalno istezanje pri lomu, ε_{tb} (engl. *nominal strain at break*) – nominalno istezanje kod posljednje zabilježene točke prije nego što se naprezanje spusti na ili ispod 10% vrijednosti vlačne čvrstoće, koristi se kod materijala koji pucaju nakon pojave tečenja,

nominalno istezanje pri vlačnoj čvrstoći, ε_{tm} (engl. *nominal strain at strength*) – nominalno istezanje pri kojem se postiže vlačna čvrstoća,

modul elastičnosti, E_t (engl. *tensile modulus*) – nagib krivulje naprezanje – istezanje između vrijednosti istezanja $\varepsilon_1 = 0,05 \%$ i $\varepsilon_2 = 0,25 \%$, [MPa],

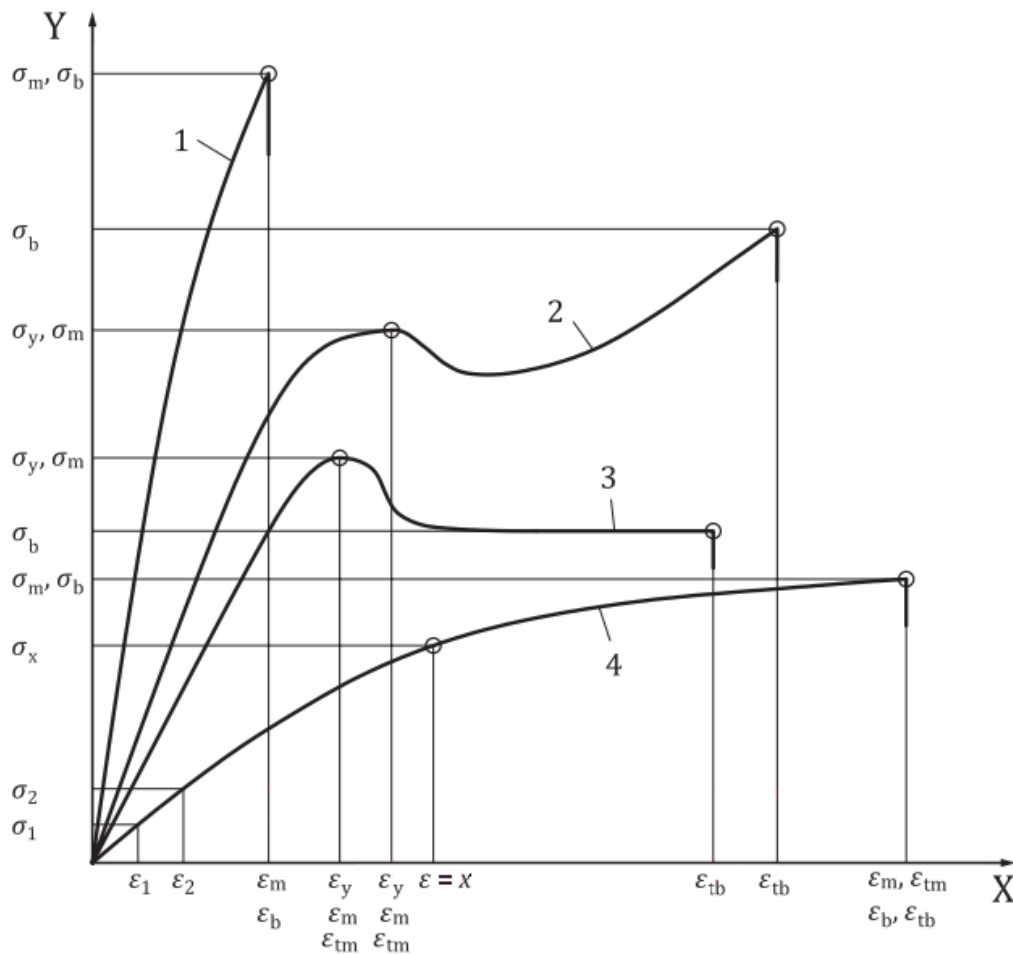
Poissonov koeficijent, μ (engl. *Poisson's ratio*) – negativan omjer promjene istežanja $\Delta\varepsilon_n$ u smjeru jedne od dvije osi okomite na smjer istežanja epruvete i promjene istežanja $\Delta\varepsilon_l$ u smjeru vlačnog opterećenja, bezdimenzijska veličina,

početna udaljenost čeljusti, L (engl. *gripping distance*) – početna duljina dijela epruvete između čeljusti kidalice, odnosno međusobna udaljenost gornje i donje čeljusti, [mm],

kruta plastika, (engl. *rigid plastics*) – plastika čiji je modul elastičnosti pri savijanju (ukoliko nije primjenjivo, onda pri vlaku) u zadanim uvjetima veći od 700 MPa,

polukruta plastika, (engl. *semi-rigid plastics*) – plastika čiji je modul elastičnosti pri savijanju (ukoliko nije primjenjivo, onda pri vlaku) u zadanim uvjetima između 70 MPa i 700 MPa.

Tipičan izgled krivulja naprezanje – istežanje za plastike prikazan je na slici 3.8, gdje X os predstavlja istežanje i/ili nominalno istežanje, a Y os predstavlja naprezanje.



Slika 3.8 Tipičan izgled dijagrama naprezanje σ – istežanje ε za plastike [20]

Na slici 3.8, krivulja 1 predstavlja krhki materijal, koji puca bez pojave tečenja pri malim istezanjima. Krivulja 4 predstavlja meki, duktilni materijal koji puca pri velikim istezanjima (>50 %). Krivulje 2 i 3 predstavljaju materijale koji imaju izraženu granicu tečenja, uz porast (2) ili bez porasta (3) napreznja nakon tečenja. Te dvije krivulje su do točke tečenja određene (običnim) istezanjem, a nakon točke tečenja nominalnim istezanjem. Krivulja 4 može biti definirana (običnim) istezanjem ili nominalnim istezanjem, ovisno o opremi kojom se izvodilo ispitivanje [20].

Prema normi, epruveta se razvlači na kidalici po uzdužnoj osi pri konstantnoj brzini pomaka traverze, sve dok ne dođe do pucanja epruvete, ili dok napreznje ili deformacija ne postignu neku unaprijed zadanu vrijednost. Pri tome se mjere sila i pomak. Epruvete mogu biti prešane ili strojno obrađene na željene dimenzije, a mogu biti i rezane ili štancane iz gotovih proizvoda ili poluproizvoda. U svakom slučaju, dimenzije epruveta i uvjeti u kojima se izvodi ispitivanje moraju biti standardizirani i strogo kontrolirani, kako bi podaci dobiveni ispitivanjima bili usporedivi [20].

Preporučene brzine ispitivanja kreću se od 0,125 mm/min do 10 mm/min, uz toleranciju od $\pm 20\%$ i od 20 mm/min do 500 mm/min, uz toleranciju od $\pm 10\%$. Preporučena brzina ispitivanja pri određivanju modula elastičnosti je što bliže iznosu od 1 % mjerne duljine po minuti. Ukoliko je potrebno, brzina ispitivanja se može prilagoditi prema fazi ispitivanja (npr. jedna brzina se može definirati za određivanje modula elastičnosti, odnosno do granice tečenja, a druga brzina se može definirati za ispitivanje nakon granice tečenja). Čeljusti za prihvat epruvete moraju biti spojene na kidalicu na način da se glavna (uzdužna) os epruvete poklapa s središnjom linijom sklopa čeljusti. Potrebno je osigurati da se epruveta ne pomiče u čeljustima prilikom ispitivanja te da ne dođe do preranog pucanja ili gnječenja epruvete zbog lošeg prihvata [20].

Deformacije se mogu odrediti indirektno (uz naknadni proračun), mjerenjem produljenja epruvete pomoću ekstenzometra (mehaničkog ili optičkog), ili direktno pomoću tenzometrijskih traka. Ukoliko se pri ispitivanju koristi ekstenzometar, on mora imati preciznost u granicama od 1 % relevantne vrijednosti duljine za sve mjerne duljine od 50 mm i više [20]. To znači da za mjernu duljinu od 50 mm, ekstenzometar mora biti u mogućnosti mjeriti s preciznošću $\pm 1\ \mu\text{m}$, a za mjernu duljinu od 75 mm, preciznost iznosi $\pm 1,5\ \mu\text{m}$.

Normom je također definirana i minimalna frekvencija zapisa podataka o sili i produljenju. Minimalna frekvencija zapisa podataka o produljenju (ili istežanju) računa se kao:

$$f_{\min} = \frac{v}{60} \cdot \frac{L_0}{L \cdot r} \quad (11)$$

gdje je:

f_{\min} – (minimalna) frekvencija zapisa podataka o produljenju [Hz],

r – minimalna rezolucija signala, tipično polovina vrijednosti preciznosti (ili bolje), [mm].

Minimalna frekvencija zapisa podataka o sili računa se kao:

$$f_{\text{force}} = \frac{\dot{F}}{r} = \frac{E_t \cdot A \cdot v}{E_t \cdot A \cdot \Delta\varepsilon \cdot 60 \cdot L \cdot 5 \cdot 10^{-3}} \quad (12)$$

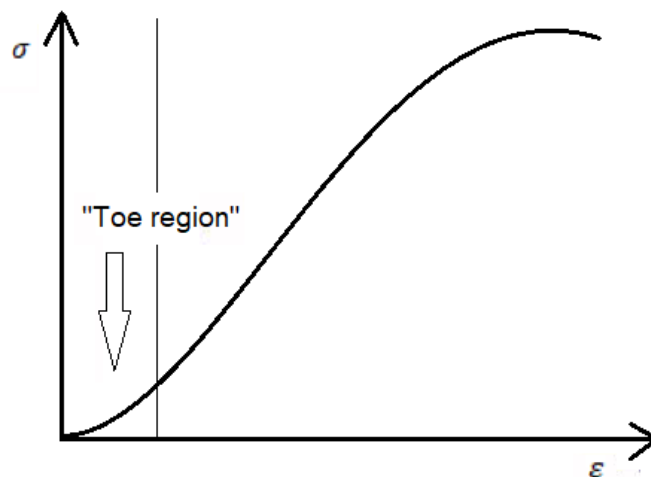
gdje je:

f_{force} – (minimalna) frekvencija zapisa podataka o sili [Hz],

\dot{F} – porast sile u vremenu [N/s],

$\Delta\varepsilon$ – promjena istežanja u rasponu u kojem se određuje modul elastičnosti.

Ukoliko je potrebno da ispitni uzorci imaju mjerne oznake, one ne smiju narušavati integritet strukture i na taj način utjecati na rezultate ispitivanja. Epruvete bi u idealnom slučaju trebale biti ravne (bez pojave savijanja i/ili uvijanja), s po dva okomita para paralelnih plohi, i bez oštećenja koja bi mogla utjecati na rezultate. Za provesti vlačno ispitivanje potrebno je minimalno pet epruveta. Veći broj ispitanih epruveta će dati preciznije rezultate. Preferirana temperatura okoline prilikom ispitivanja je 23 ± 2 °C, a preferirana relativna vlažnost iznosi 50 ± 10 % (kod materijala na čije ponašanje ne utječe relativna vlažnost zraka, ovaj parametar nije bitan). Prije provedbe ispitivanja potrebno je odrediti dimenzije epruveta (širina epruvete se zaokružuje na najbližu prvu decimalu u milimetrima, a debljina na drugu). Ukoliko se pri pričvršćivanju epruveta u čeljusti kidalice uvode neželjena naprezanja, prije samog ispitivanja je moguće uvesti prednaprezanje kako bi se izbjegla pojava loših i nerelevantnih mjerenja u početnom dijelu dijagrama (engl. *toe region*). Iznos prednaprezanja se može, ovisno radi li se o ispitivanju modula elastičnosti ili nekog relevantnog naprezanja, proračunati konkretnim izrazima za zadani slučaj [20]. Na slici 3.9 ilustrativno je prikazan primjer *toe region-a*.



Slika 3.9 *Toe region*

Sljedeći korak je postavljanje kalibriranog ekstenzometra na prednapregnutu epruvetu, nakon čega slijedi samo ispitivanje. Prilikom ispitivanja se prikupljaju podaci o sili i pomaku te se na temelju njih proračunavaju naprežanje i istežanje. Naprežanje se računa prema jednadžbi (13):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (13)$$

Ukoliko se istežanje mjerne duljine mjeri ekstenzometrom, istežanje je u elastičnom području (do granice tečenja) moguće izračunati prema jednadžbi (14):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (14)$$

Korištenjem ekstenzometra dolazi do uprosječivanja deformacija po mjernoj duljini epruvete. Istežanje je na ovaj način moguće izračunati samo u elastičnom području, kada su deformacije homogene. Nakon granice tečenja raspodjela deformacija po mjernoj duljini prestaje biti homogena, pa se za opis istežanja koristi nominalno istežanje [20].

Ukoliko se ispitivanje izvodi bez ekstenzometra, odnosno dostupni su samo podaci o početnoj udaljenosti i pomacima čeljusti kidalice, čitavo istežanje se izražava kao nominalno („metoda A“ prema ISO 527). Nominalno naprežanje se izračunava kao:

$$\varepsilon_t = \frac{L_t}{L} \quad (15)$$

gdje je:

L_t – povećanje udaljenosti čeljusti kidalice u odnosu na početnu [mm].

Kod prethodno spomenutog slučaja, gdje je istezanje do granice tečenja izračunato uz pomoć podataka dobivenih ekstenzometrom (jednadžba 14), istezanje nakon granice tečenja se izražava nominalnim naprežanjem („metoda B“ prema ISO 527):

$$\varepsilon_t = \varepsilon_y + \frac{\Delta L_t}{L} \quad (16)$$

gdje je:

ΔL_t – povećanje udaljenosti čeljusti kidalice od granice tečenja na dalje [mm].

Modul elastičnosti je moguće odrediti na dva načina – određivanjem nagiba sekante (engl. *chord slope*) i određivanjem nagiba pravca dobivenog linearnom regresijom (engl. *regression slope*). U slučaju nagiba sekante modul elastičnosti se računa kao:

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (17)$$

gdje je:

σ_1 – naprežanje pri vrijednosti istezanja $\varepsilon_1 = 0,0005$ [MPa],

σ_2 – naprežanje pri vrijednosti istezanja $\varepsilon_2 = 0,0025$ [MPa].

Drugi način za odrediti modul elastičnosti je linearnom regresijom na zadanom skupu eksperimentalno dobivenih točaka (vrijednosti). U tom slučaju modul elastičnosti je:

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (18)$$

gdje je:

$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ – nagib pravca dobivenog linearnom regresijom na zadanim točkama za vrijednosti istezanja između 0,0005 i 0,0025 [MPa].

Osim načina za određivanje modula elastičnosti, norma propisuje i postupak određivanja Poissonovog koeficijenta μ . Poissonov koeficijent iznosi:

$$\mu = -\frac{\Delta \varepsilon_n}{\Delta \varepsilon_l} = -\frac{L_0 \Delta n}{n_0 \Delta L} \quad (19)$$

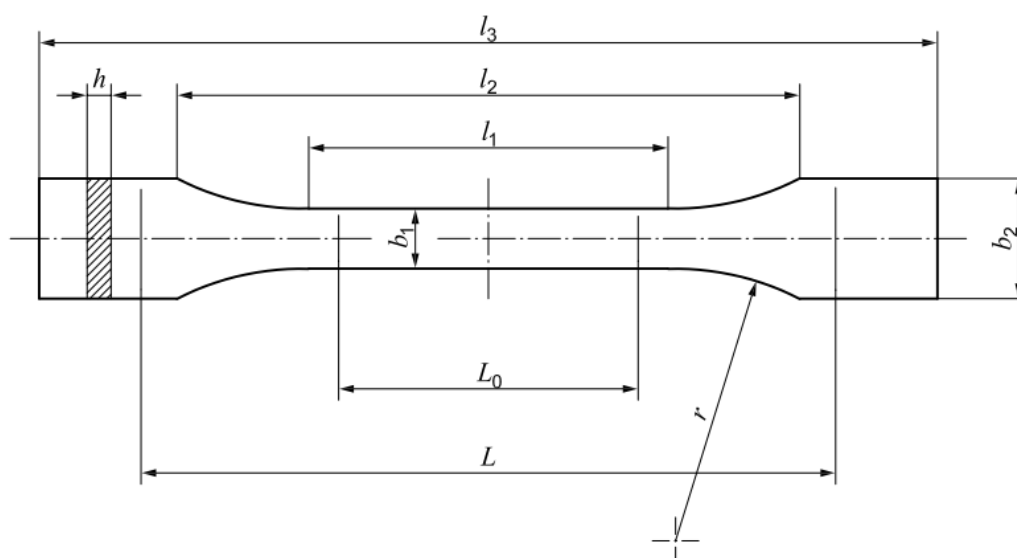
gdje je:

Δn – smanjenje duljine epruvete u poprečnom smjeru [mm],

n_0 – mjerna duljina u poprečnom smjeru [mm].

Rezultate ispitivanja treba izraziti aritmetičkom sredinom dobivenih vrijednosti, a gdje je potrebno, mogu se izraziti intervalima pouzdanosti. Vrijednosti naprezanja i modul elastičnosti se zaokružuju na 3 decimale, a vrijednosti istezanja i Poissonov koeficijent na dvije [20].

Drugi dio norme definira geometriju i dimenzije epruveta za ispitivanje. Postoje dvije glavne grupe – višenamjenski ispitni uzorci (1A i 1B) te mali ispitni uzorci (1BA, 1BB, 5A i 5B). Kad god je moguće, ispitivanja bi se trebala provoditi na višenamjenskim uzorcima, dok su mali ispitni uzorci pogodni za neke specijalne primjene. Epruveta 1A se uglavnom primjenjuje kod injekcijski prešanih materijala, a 1B kod strojno obrađenih [20]. Izgled geometrije epruveta 1A i 1B prikazan je na slici 3.10, a dimenzije epruveta su navedene u tablici 3.1.



Slika 3.10 Geometrija višenamjenskih epruveta 1A i 1B prema ISO 527 [20]

Tablica 3.1 Dimenzije višenamjenskih epruveta 1A i 1B prema ISO 527 (mm) [20]

	Vrsta ispitnog uzorka	1A	1B
l_3	Ukupna duljina	170	≥ 150
l_1	Duljina uskog dijela	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$
r	Radijus	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2	Duljina od početka do kraja suženja	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2	Širina na krajevima	$20,0 \pm 0,2$	$20,0 \pm 0,2$
b_1	Širina na uskom dijelu	$10,0 \pm 0,2$	$10,0 \pm 0,2$
h	Preferirana debljina	$4,0 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$
L_0	Mjerna duljina	$75,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
L	Početna udaljenost između čeljusti kidalice	115 ± 1	115 ± 1

4. MATERIJAL

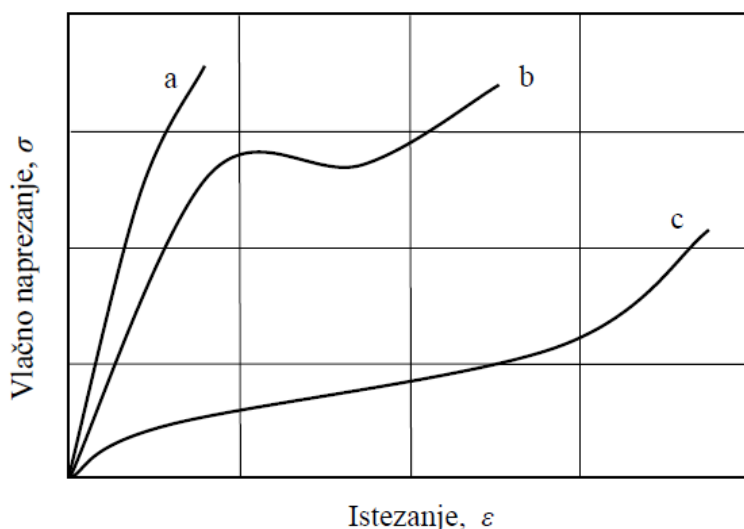
Općenito, vlačna se ispitivanja mogu provoditi za sve vrste materijala, ali ovaj rad se odnosi na ispitivanje polimera, konkretnije akrilonitril butadien stirena – ABS-a.

4.1. Polimeri

Polimeri su, uz metale, keramiku i kompozite, jedna od osnovnih skupina materijala. Polimeri mogu biti prirodni ili sintetički, organski ili anorganski, a zajedničko im je što su im osnovne strukturne jedinice makromolekule (također se nazivaju i makromolekulni spojevi). Pojam polimer (od grč. *poly* – mnoštvo, puno i grč. *meros* – dio) zapravo predstavlja makromolekulu koja se sastoji od velikog broja manjih strukturnih jedinica (tzv. mera) koji se ponavljaju. Polimeri nastaju tijekom kemijske reakcije polimerizacije od malih molekula (monomera). Skup makromolekula koji nastaje kao rezultat polimerizacije naziva se polimerizat i rijetko se koristi kao samostalan tehnički materijal. Kako bi se poboljšala svojstva polimerizata (naglasila poželjna svojstva i smanjio utjecaj nepoželjnih), dodaju mu se različiti dodaci poput ojačala, punila i omekšavala. Općenito, reakcije polimerizacije se dijele u dvije velike skupine: lančane i stupnjevite polimerizacije (stupnjevite se dodatno dijele na kondenzacijske i adicijske) [21].

Osnovne karakteristike polimera su niska gustoća, dobra električna i toplinska izolacijska svojstva, uz odgovarajuće dodatke i postojanost prema atmosferskim uvjetima, postojanost na djelovanje agresivnih medija i agenata, dobro podnošenje naglih temperaturnih promjena, lako oblikovanje, postojanost na trošenje i dobra klizna svojstva. Glavni nedostatak polimera je loša toplinska postojanost (značajno lošija mehanička svojstva pri povišenim temperaturama), a ostali nedostaci su loša mehanička svojstva (naglasak na krutosti, čvrstoći i tvrdoći) u odnosu na metalne materijale, osjetljivost na UV zračenje, sklonost nekih polimera upijanju tekućina i bubrenju te sklonost puzanju već pri malim opterećenjima i sobnim temperaturama kod nekih vrsta polimera. Glavna svojstva koja se obično modificiraju dodacima su: vlačna čvrstoća, udarna žilavost, toplinska postojanost, dielektrična svojstva, klizna svojstva i toplinska provodnost. Na svojstva polimernog proizvoda utječe i postupak proizvodnje – uporabne karakteristike gotovog proizvoda razlikuju se od karakteristika osnovnih svojstava polimerizata i dodataka [21].

Osnovna podjela polimera zasniva se na njihovom ponašanju pri povišenim temperaturama. Prema navedenom kriteriju, polimeri se dijele na: plastomere, duromere i elastomere. Osim toga, polimeri se mogu podijeliti i prema uređenosti molekulne strukture (raspored i međusobna povezanost polimernih molekula), budući da glavna svojstva proizlaze iz nje. Kada su polimerne molekule u prostoru djelomično pravilno raspoređene govori se o kristalastoj strukturi plastomera (u nemodificiranom obliku neprozirni), a kada su bez pravilnog rasporeda, govori se o amorfnoj strukturi plastomera (u nemodificiranom obliku prozirni). Polimerni lanci mogu biti i prostorno umreženi, što je pojava kod duromera i elastomera [21]. Kvalitativni $\sigma - \varepsilon$ dijagram za različite vrste polimera prikazan je na slici 4.1.



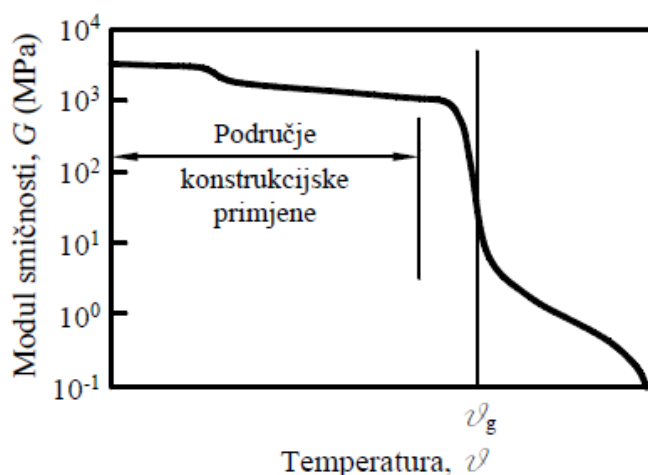
Slika 4.1 Kvalitativni dijagram naprezanje σ – istezanje ε za različite vrste polimera [21]

Krivulja „a“ na slici 4.1 prikazuje generalno ponašanje amorfni plastomera i duromera, krivuljom „b“ su označeni kristalasti plastomeri, dok su krivuljom „c“ prikazani elastomeri. Općenito se može zaključiti da amorfni plastomeri i duromeri pokazuju sklonost krhkom ponašanju, a kristalasti plastomeri i elastomeri duktilnom.

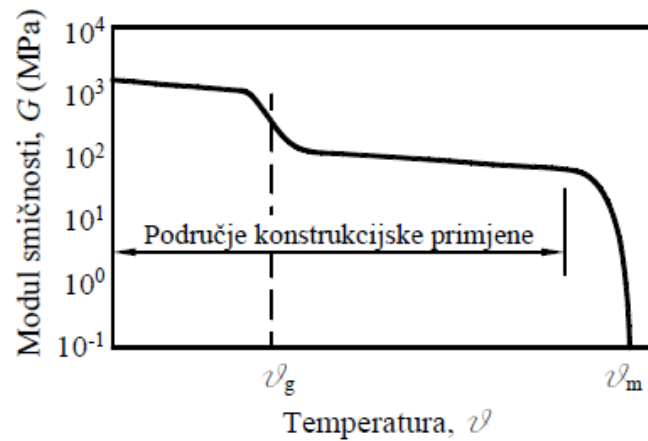
Plastomeri su danas najzastupljenija skupina polimera, čija je glavna karakteristika da prilikom zagrijavanja dolazi do njihovog omekšavanja. Daljnjim zagrijavanjem plastomeri se tale i u tom su stanju pogodni za praoblikovanje. Hlađenjem se ponovno skrućuju i zadržavaju svojstva koja su imali i prije zagrijavanja. Taj se proces može ponavljati i više puta, ali je bitno da temperatura uvijek bude ispod kritične vrijednosti za određeni materijal kako ne bi došlo do njegove toplinske razgradnje. Plastomeri amorfne strukture imaju zadovoljavajuću čvrstoću pri

lomu, a ovisno o sastavu mogu biti meki, podatljivi i kruti. Krutost i krhkost im raste s padom vrijednosti temperature kojoj su izloženi. S druge strane, plastomeri kristalaste strukture nisu postojani na utjecaj povišene temperature i podložni su starenju. Kod povišenih temperatura postaju mekani, a kod niskih krhki i osjetljivi na udarce [21].

Ponašanje plastomera s obzirom na temperaturu u velikoj mjeri je određeno dvjema karakterističnim temperaturama: kod amorfni plastomera temperaturom staklastog prijelaza ϑ_g , a kod kristalastih plastomera temperaturom staklastog prijelaza ϑ_g i temperaturom tališta kristalnog dijela strukture ϑ_m . Temperatura staklastog prijelaza ϑ_g predstavlja temperaturu kod koje dolazi do omekšavanja amorfni plastomera i značajnog gubitka mehaničkih svojstava. S konstrukcijskog gledišta, maksimalna radna temperatura plastomera s amorfnom strukturom mora biti niža od ϑ_g . S druge strane, ϑ_m predstavlja kritičnu temperaturu kod koje dolazi do taljenja kristalnog dijela strukture plastomernog materijala, što za posljedicu ima značajno omekšavanje čitave (kristalaste) strukture. Obzirom da su ispod temperature ϑ_m mehanička svojstva još uvijek zadovoljavajuća, ona predstavlja temperaturnu granicu konstrukcijske primjene za kristalaste plastomere [21]. Grafički prikaz ovisnosti modula smičnosti G o temperaturi (uz naznačeno područje konstrukcijske primjene) za amorfne plastomere prikazan je na slici 4.2, dok je za kristalaste prikazan na slici 4.3.



Slika 4.2 Ovisnost modula smičnosti G amorfni plastomera o temperaturi [21]

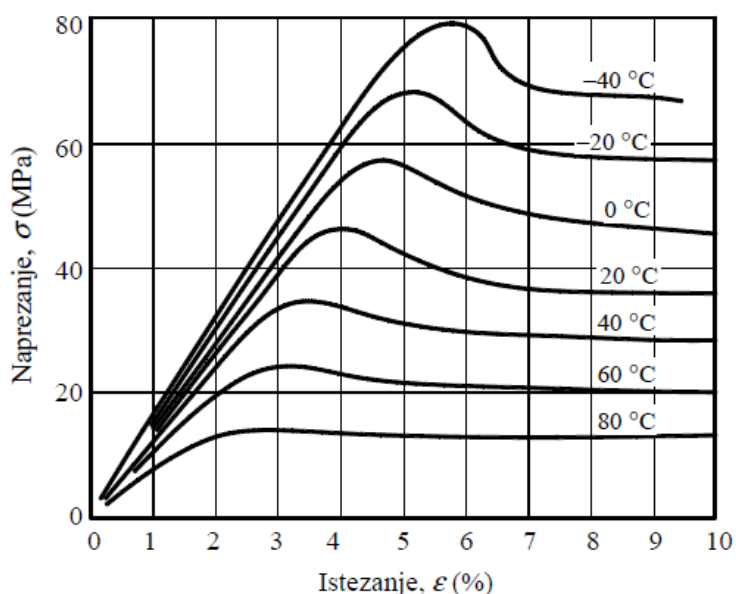


Slika 4.3 Ovisnost modula smičnosti G kristalastih plastomera o temperaturi [21]

Općenito, najčešće primjenjivani plastomeri su PE-LD i PE-HD (polietilen niske i visoke gustoće), PP (polipropilen), PVC (poli(vinil-klorid)), PS (polistiren), SAN (stiren/akrilonitril), PA (poliamid), POM (poli(oksi-metilen)), PBT (poli(butilen-tereftalat)), PTFE (poli(tetrafluoretilen)), PMMA (poli(metil-metakrilat)), PC (polikarbonat) i ABS (akrilonitril/butadien/stiren) [21].

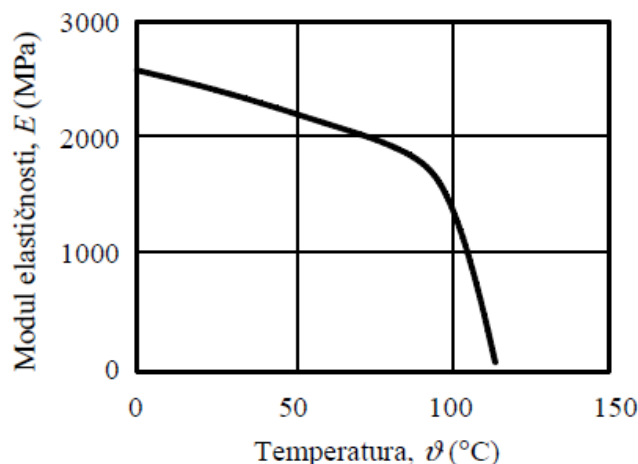
4.2. ABS

ABS (akrilonitril butadien stiren) je jedan od glavnih predstavnika plastomera. Struktura mu je amorfna (nepravilan raspored polimernih molekula), a temperatura staklastog prijelaza ϑ_g se kreće u rasponu od 105 °C do 125 °C. Dugotrajno se može primjenjivati na temperaturama do 85 °C, a kratkotrajno i do 95 °C. Karakterizira ga znatna čvrstoća, tvrdoća i krutost, uz nisku higroskopnost, dobru dimenzijsku stabilnost i dobru postojanost na abraziju. Osjetljiv je na djelovanje UV zračenja. Najčešće se primjenjuje za razna kućišta, automobilske dijelove, ručke, igračke i dijelove strojeva [21]. Ovisnost naprezanja o istezanju za ABS pri različitim vrijednostima temperature prikazana je na slici 4.4, a ovisnost modula elastičnosti o temperaturi za ABS prikazana je na slici 4.5.



Slika 4.4 Ovisnost naprezanja o istezanju za različite vrijednosti temperature (ABS) [21]

Iz dijagrama na slici 4.4 se može zaključiti da pri niskim temperaturama ABS ima veću čvrstoću (veća vrijednost granice tečenja/vlačne čvrstoće) i veću krutost, dok pri višim temperaturama materijal omekša te dolazi do pogoršanja mehaničkih svojstava i veće istezljivosti.



Slika 4.5 Ovisnost modula elastičnosti o temperaturi (ABS) [21]

Prema dijagramu na slici 4.5 se može vidjeti da vrijednost modula elastičnosti za ABS počinje naglo padati na temperaturi oko 90 °C, što se poklapa s prethodno spomenutom dugotrajnom primjenjivošću do 85 °C.

Prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava za ABS dana su u tablici 4.1.

Tablica 4.1 Prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava za ABS [22]

ABS	
Modul elastičnosti [GPa]	1,79 – 3,2
Granica tečenja/Vlačna čvrstoća [MPa]	29,6 - 48
Čvrstoća pri lomu [MPa]	29,8 - 43
Istezanje pri tečenju [%]	1,7 - 6
Istezanje pri lomu [%]	10 - 50
Tvrdoća (Shore D)	100

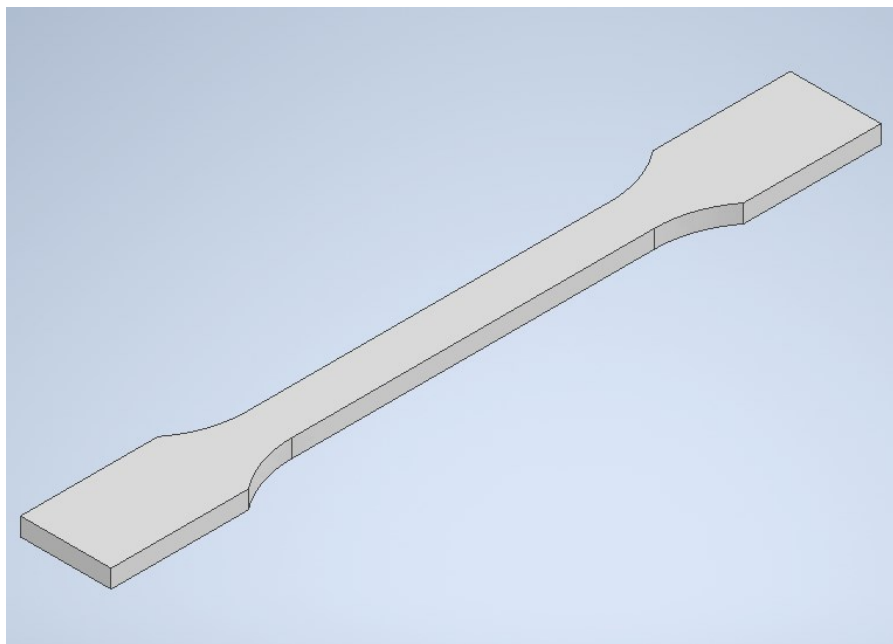
Prethodno navedene vrijednosti mehaničkih svojstava i općenito ponašanje ABS-a vrijedi samo za puni (homogeni) materijal. Tehnologija 3D tiska omogućuje variranje velikog broja parametara prilikom proizvodnje, poput postotka i uzorka ispune, visine sloja, debljine stijenke, orijentacije tiska i dr. Naime, važno je razlikovati svojstva materijala i svojstva proizvoda – iako je neki izradak napravljen od ABS-a, njegova će svojstva i ponašanje na globalnoj razini varirati ovisno njegovoj strukturi, odnosno o odabranim parametrima proizvodnje.

5. EKSPERIMENTALNA OPREMA

Za izradu epruveta i provedbu ispitivanja potreban je niz uređaja, programa i opreme. Opremu je grubo moguće podijeliti u tri skupine; oprema za izradu epruveta, oprema za provedbu vlačnog ispitivanja te oprema za određivanje modula elastičnosti. U prvu skupinu spadaju računalo, programi za izradu i pripremu modela za 3D tisak i 3D printer, u drugu skupinu spada oprema za mjerenje dimenzija uzoraka i kidalica uz prateću programsku opremu, a u treću skupinu, uz kidalicu i opremu za mjerenje, spada i ekstenzometar.

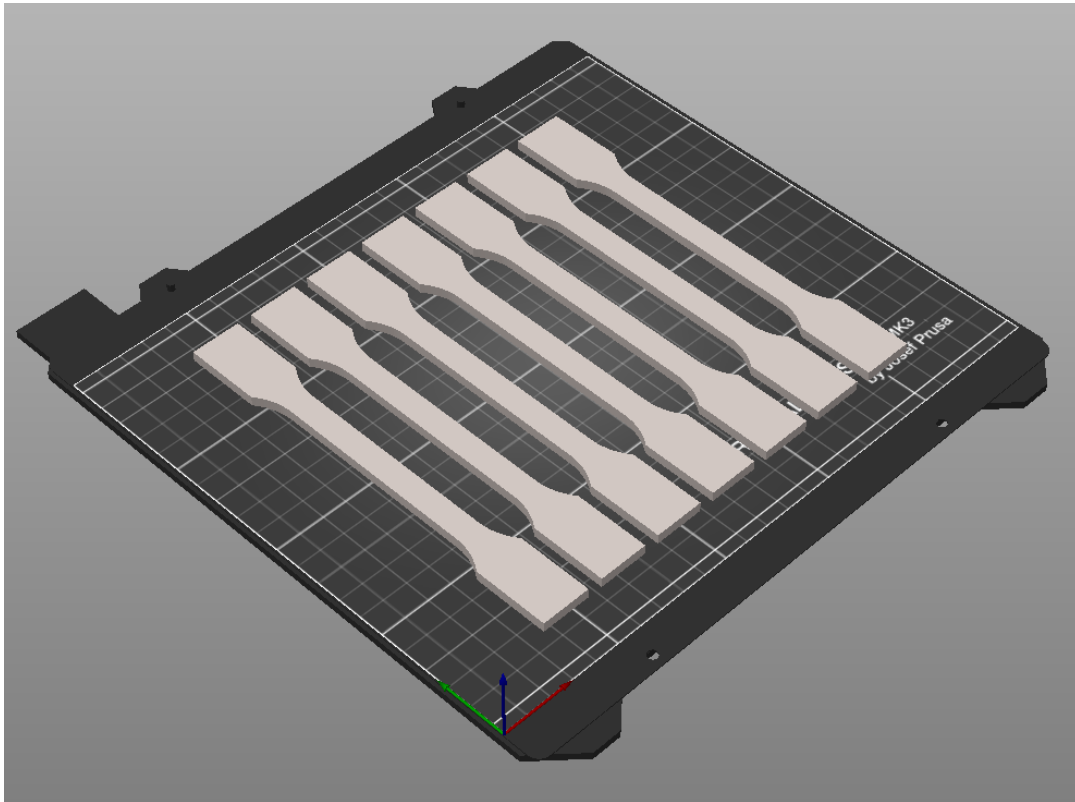
5.1. Oprema za izradu uzoraka

Prilikom izrade epruveta, najprije je pomoću računala bilo potrebno izraditi geometriju epruveta, što je odrađeno pomoću CAD programa *Autodesk Inventor*. Nakon toga se datoteka „ubacuje“ u *licer*, pomoću kojega se dobiva G kod za izradu epruveta na 3D printeru. Na slici 5.1 prikazan je 3D model epruvete.



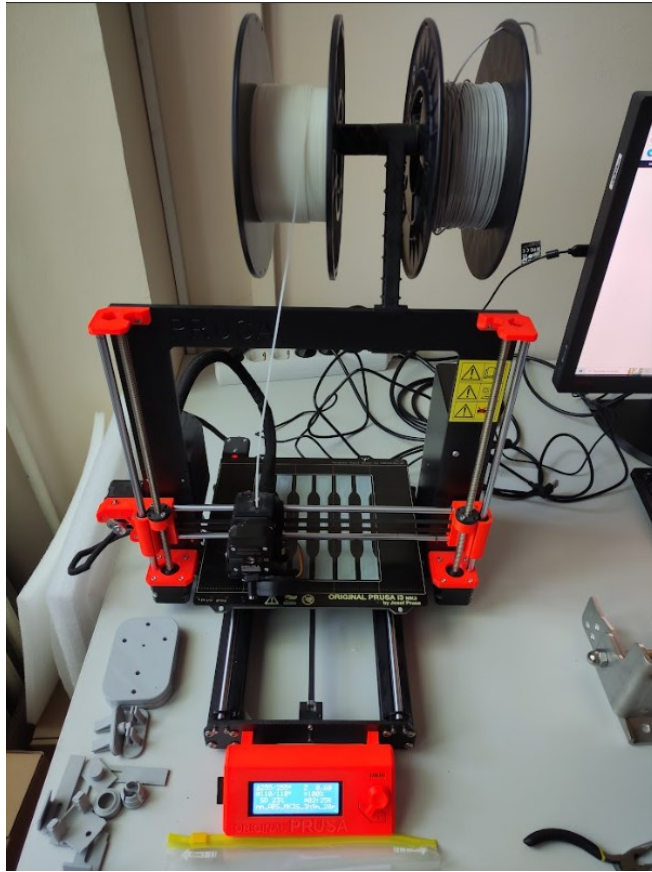
Slika 5.1 3D model epruvete (*Autodesk Inventor*)

Priprema modela za 3D tisak provedena je u programu *PrusaSlicer*. Unutar programa je moguće podesiti veliki broj parametara vezanih uz 3D tisak, a neke od osnovnih postavki koje se definiraju su model printera, veličina mlaznice, vrsta materijala, visina sloja, debljina stijenke, postotak i vrsta ispune. Na slici 5.2 prikazane su epruvete u programu *PrusaSlicer*.



Slika 5.2 Epruvete za 3D tisak u programu *PrusaSlicer*

Epruvete su nakon toga izrađene na 3D printeru *Original Prusa i3 MK3*. To je standardni FDM 3D printer s volumenom ispisa 250 x 210 x 210 mm, mogućnošću podešavanja visine sloja od 0,05 mm do 0,35 mm, različitim veličinama mlaznica, maksimalnom brzinom ekstrudera više od 200 mm/s, temperaturom mlaznice do 300 °C te temperaturom podloge do 120 °C. Uglavnom se koristi za izradu objekata od plastomera, a koristi se filament promjera 1,75 mm [23]. 3D printer *Original Prusa i3 MK3* prikazan je na slici 5.3.



Slika 5.3 *Original Prusa i3 MK3*

5.2. Oprema za vlačno ispitivanje

Prije ispitivanja bilo je potrebno odrediti dimenzije gotovih epruveta, za što su korišteni pomično mjerilo i mikrometar (slika 5.4).



Slika 5.4 Pomično mjerilo i mikrometar

Vlačno ispitivanje provedeno je na kidalici *Galdabini Quasar 50*. Kidalica ima mogućnost postizanja vlačne i tlačne sile od 50 kN. Kalibrirana je prema normi UNI EN ISO 7500-1 i postiže razlučivost mjerenja sile od 0,25 N (klasa 0,5). Pogon kidalice je mehanički, a hod traverze kod jednog okreta navojnog vretena je 0,043 μm [24]. Prilikom vlačnog ispitivanja mjeri se sila i produljenje. Podatak o vlačnoj sili se dobiva korištenjem mjernih ćelija (engl. *load cell*), koje vlastitom deformacijom daju podatak o sili koja djeluje na njih, a pomak se dobiva pomoću enkodera na pogonu kidalice. Kidalica *Galdabini Quasar 50* prikazana je na slici 5.5.

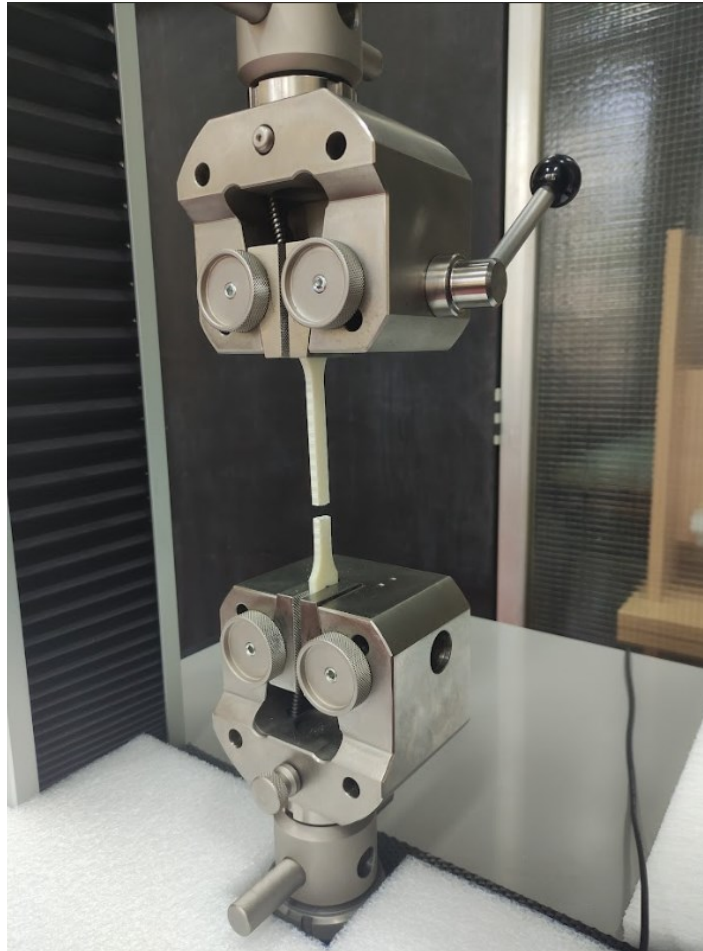


Slika 5.5 Kidalica *Galdabini Quasar 50*

Prema slici 5.5, kidalica se sastoji od postolja (kućišta) (1), dva nosiva stupa u kojima se nalaze pogonska vretena (2), poprečne pomične traverze (3), mjernih ćelija (4, 5), čeljusti kidalice (6) i upravljačke jedinice (7).

Traverza ima integriranu mjernu ćeliju (4), na koju se direktno može povezati gornja čeljust kidalice, ali se isto tako mogu i serijski vezati neke druge komponente. Tako je u konkretnom slučaju postavljena dodatna mjerna ćelija (5). Mjerne ćelije i čeljusti su međusobno povezane pomoću specijalnih mehanizama koji onemogućuju relativni pomak. Ovisno o vrsti epruveta i materijala od kojih su izrađene, postoji više vrsta čeljusti za prihvat

uzoraka. Za potrebe ovog eksperimenta korištene su čeljusti s klinastim steznim elementima. Epruveta se postavlja u otvorenu čeljust, koja se djelovanjem ručne sile na polugu zatvara. Prilikom djelovanja vlačne sile, klinovima se glava epruvete dodatno tlači, te se sprečava njeno ispadanje. Klinaste čeljusti kidalice prikazane su na slici 5.6.



Slika 5.6 Klinaste čeljusti kidalice

Stroj dolazi s pratećim računalnim programom za provođenje ispitivanja. U programu je potrebno definirati sve potrebne parametre za ispitivanje koje se provodi. Unutar programa se odabire materijal, dimenzije i oblik epruvete, brzina ispitivanja (uz moguće zadavanje posebnih uvjetovanih režima s različitim brzinama), uvjet zaustavljanja ispitivanja, način pozicioniranja epruvete u čeljustima, rezultati koji se žele prikazati, vrste grafičkih prikaza i dr. Ukoliko se svi parametri pravilno definiraju moguće je direktno dobivati točne podatke o naprezanju, istezanju i ostalim izvedenim veličinama. Neovisno o postavkama unutar programa, podaci o sili i produljenju će uvijek biti konzistentni, pa je moguće proračunom doći do željenih veličina.

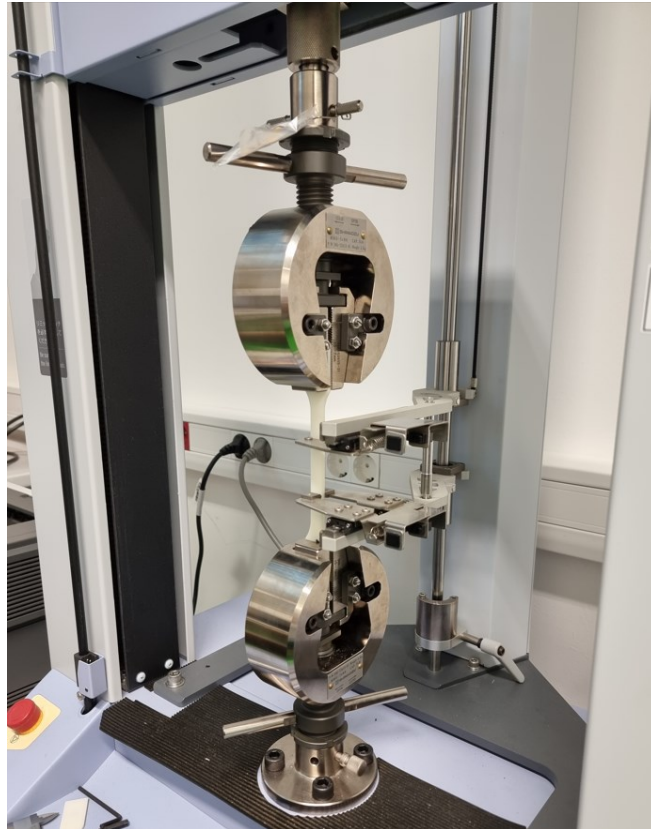
5.3. Oprema za određivanje modula elastičnosti

Za određivanje modula elastičnosti potrebno je precizno odrediti pomak (istezanje) središnjeg dijela epruvete pri čemu se koristi posebni mjerni uređaj – ekstenzometar. Za određivanje naprezanja i dalje se koriste mjerne ćelije kidalice.

Za provedbu vlačnog ispitivanja i precizno određivanje modula elastičnosti korištena je kidalica *Shimadzu Autograph AGS-X* s pripadajućim ekstenzometrom. Radi se o uređaju koji omogućuje precizno određivanje vrijednosti za dobivanje mehaničkih svojstava različitih materijala. Maksimalna vlačna sila koju kidalica može postići je 5 kN, a razlučivost iznosi 2 mN. Ekstenzometar ima mogućnost mjerenja pomaka s razlučivošću od 10 μm . Kidalica se općenito može koristiti za određivanje mehaničkih svojstava metala, keramika, polimera, gumenih materijala i kompozita [25]. Uz kidalicu opet dolazi prateći računalni program koji omogućuje podešavanje vrste ispitivanja, materijala, dimenzija epruvete, mjernih jedinica i svih ostalih postavki kako bi se mjerenje moglo uspješno provesti. Kidalica *Shimadzu Autograph AGS-X* prikazana je na slici 5.7, a epruveta u čeljustima prije ispitivanja s postavljenim ekstenzometrom prikazana je na slici 5.8.



Slika 5.7 Kidalica *Shimadzu Autograph AGS-X*



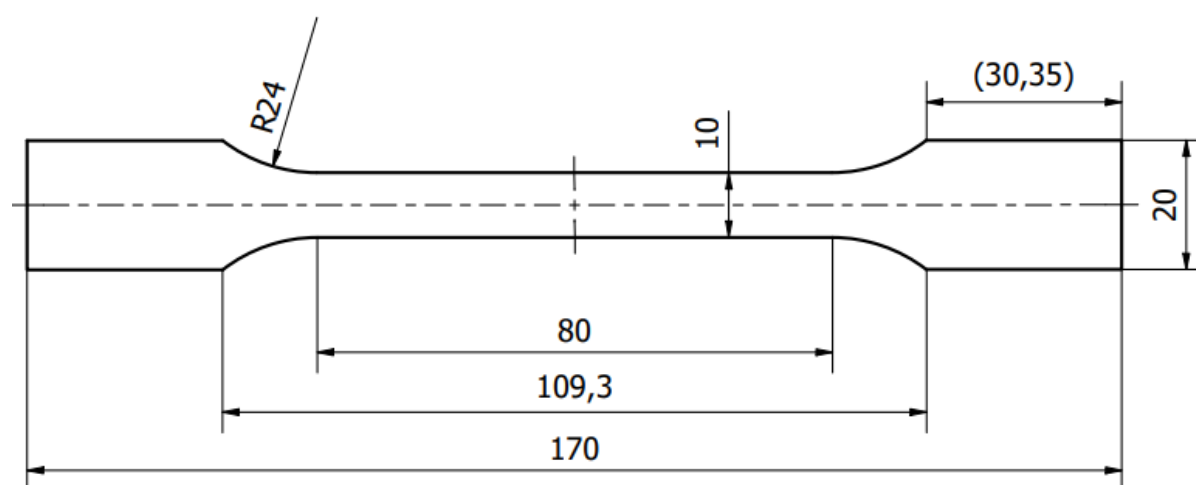
Slika 5.8 Epruveta s postavljenim ekstenzometrom

6. ISPITIVANJE

Cilj ovog rada je analiza i usporedba mehaničkih svojstava i ponašanja 3D tiskanih uzoraka različitih procesnih parametara. U ovom slučaju parametar čiji se utjecaj analizira je postotak ispunje epruveta prilikom 3D tiska. Ispitivanje mehaničkih svojstava 3D tiskanih epruveta provedeno je u dva koraka. U prvom koraku su pomoću kidalice *Galdabini Quasar 50* određeni kvantitativni dijagrami naprezanje – istežanje za pojedine vrste epruveta (uz određivanje okvirnog modula elastičnosti), dok se u drugom koraku pomoću kidalice *Shimadzu Autograph AGS-X* i ekstenzometra precizno odredio modul elastičnosti.

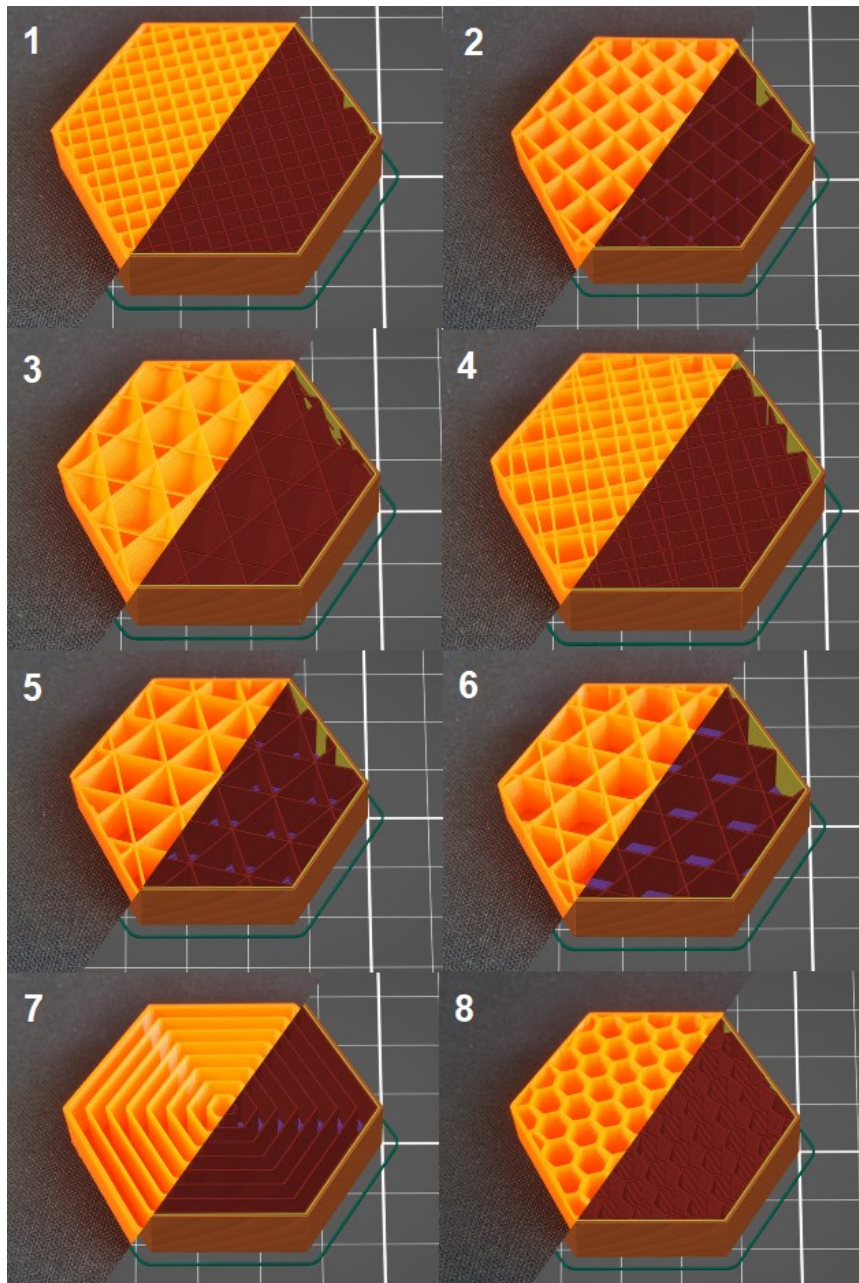
6.1. Opis ispitnih uzoraka

Ispitivanje je provedeno na epruvetama tipa 1A prema normi ISO 527 (višenamjenski ispitni uzorci). Dimenzije epruveta navedene su u tablici 3.1 (potpoglavlje 3.2.). Kotirana skica epruvete prema kojoj je izrađen model u programu *Autodesk Inventor* prikazana je na slici 6.1.



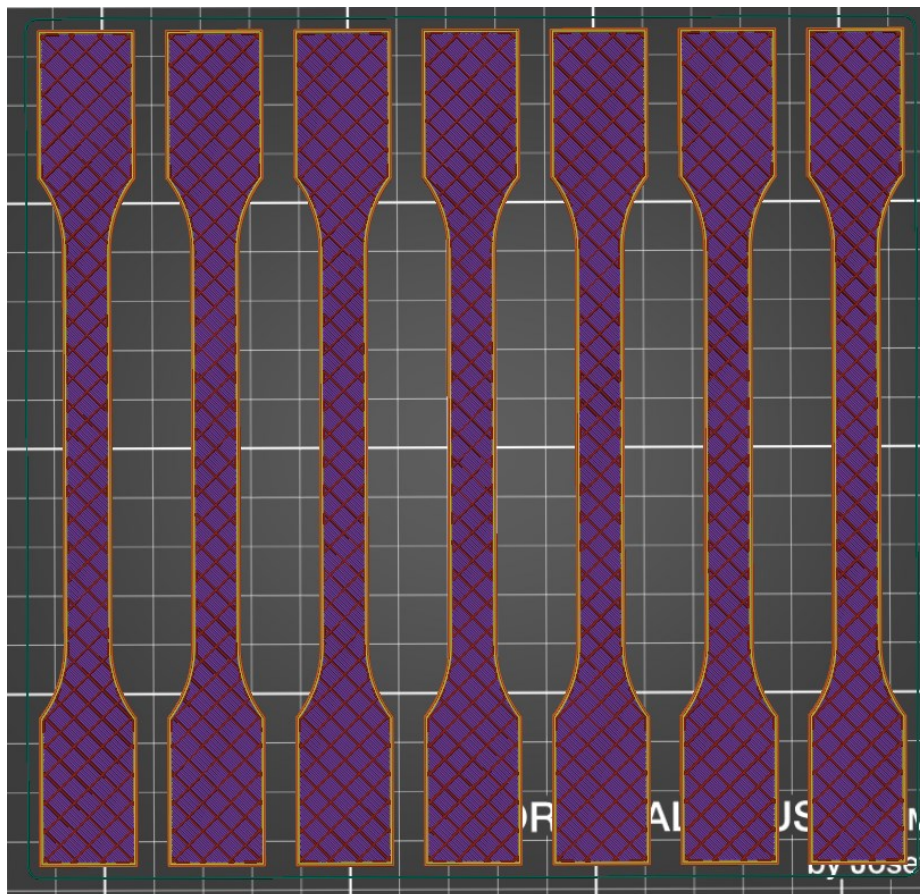
Slika 6.1 Kotirana skica epruvete 1A ISO 527

Ispitivanje je fokusirano na usporedbu mehaničkih svojstava epruveta s različitim postotkom ispunje prilikom 3D tiska. Općenito, ovisno o sliceru koji se koristi, moguće je odabrati različite tipove, odnosno vrste ispunja. Korišteni PrusaSlicer pruža mogućnost odabira 17 različitih vrsta ispunje. Neke od njih su pravocrtna (*rectilinear*), mrežasta (*grid*), trokutasta (*triangles*), u obliku zvijezde (*stars*), kubična (*cubic*), linijska (*line*), sačasta (*honeycomb*) i koncentrična (*concentric*). Različiti tipovi ispunja prikazani su na slici 6.2.



Slika 6.2 Različiti tipovi ispunje (1 – *rectilinear*, 2 – *grid*, 3 – *cubic*, 4 – *line*, 5 – *triangles*, 6 – *stars*, 7 – *concentric*, 8 – *honeycomb*) [26]

Svaka od ovih tipova ispune se tiska na drugi način i konačnom uzorku daje drugačija mehanička svojstva. Da bi rezultati ispitivanja bili međusobno usporedivi, potrebno je odabrati jedan tip ispune kod kojega će se varirati količina materijala unutar epruvete, odnosno postotak ispune. Odabran je mrežasti tip ispune (*grid*) pod kutom od 45° u odnosu na X, odnosno Y od 3D printera. Mrežasti tip ispune je karakterističan po tome što je jednostavan i nije mu potrebno puno vremena za ispis. Sličan je pravocrtnom tipu ispune, no slojevi se kod mrežastog tipa tiskaju u oba okomita smjera (jedan sloj je u obliku mreže, dok je kod pravocrtnog tipa ispis jednog sloja jednosmjernan). Posljedica takvog načina ispisa je da na dijelovima presijecanja okomitih linija može doći do nakupljanja materijala. To dovodi do toga da su uzorci tiskani tim tipom ispune čvršći i robusniji (zbog boljeg međusobnog prijanjanja slojeva), ali ponekad može doći do grešaka u tisku zbog nakupljanja materijala na spojevima [26]. Modeli epruveta s 20% mrežaste ispune unutar programa *PrusaSlicer* prikazani su na slici 6.3.



Slika 6.3 Modeli epruveta s 20% mrežaste ispune

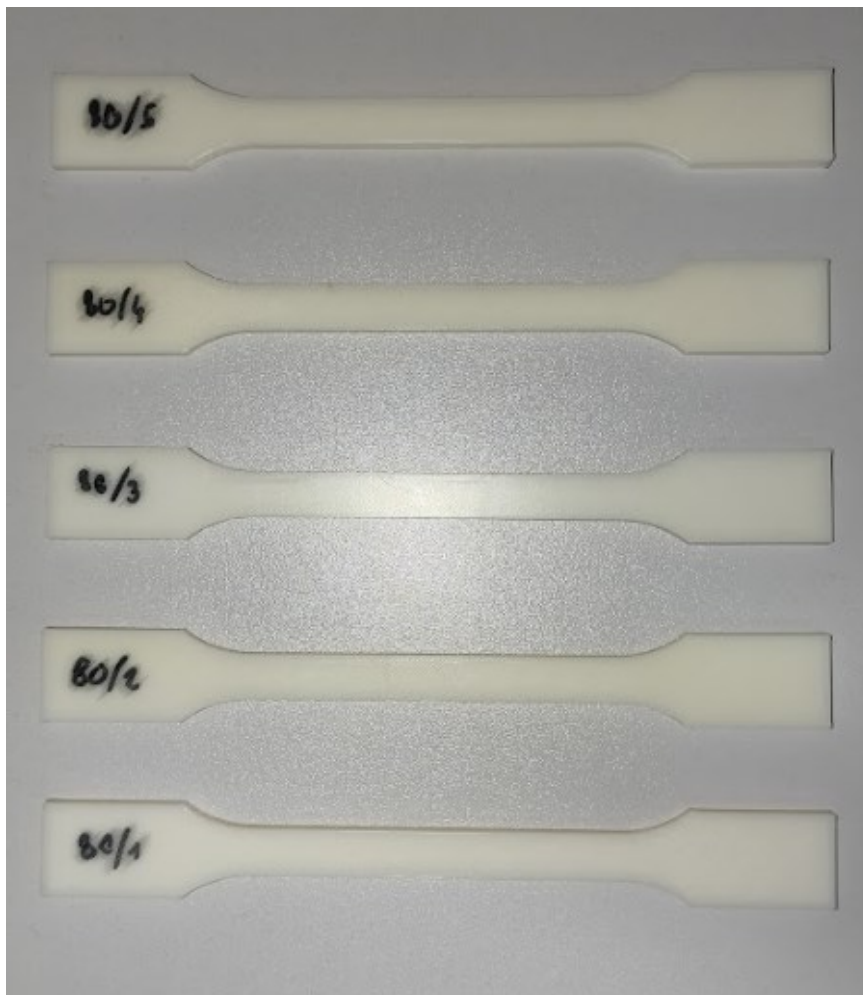
Vlačno ispitivanje je provedeno za 5 različitih postotaka ispune: 20%, 40%, 60%, 80% i 100%. Stvarne (izmjerene) dimenzije (širina i debljina, odnosno podaci potrebni za izračunavanje stvarne početne površine poprečnog presjeka) korištenih ispitnih uzoraka, njihovi postoci ispune i vrijeme potrebno za ispis jedne epruvete dani su u tablici 6.1.

Tablica 6.1 Podaci o ispitnim uzorcima

Postotak ispune	Broj (i oznaka) uzorka	Širina [mm]	Debljina [mm]	Vrijeme ispisa jedne epruvete [min]
100%	1 (100/1)	10,0	4,08	39
	2 (100/2)	10,0	4,09	
	3 (100/3)	10,0	4,18	
	4 (100/4)	10,0	4,12	
	5 (100/5)	10,0	4,13	
	6 (100/6)	10,0	4,17	
80%	1 (80/1)	10,0	4,15	39
	2 (80/2)	10,0	4,15	
	3 (80/3)	10,0	4,08	
	4 (80/4)	10,0	4,15	
	5 (80/5)	10,0	4,13	
	6 (80/6)	10,0	4,15	
60%	1 (60/1)	9,9	4,07	37
	2 (60/2)	9,9	4,07	
	3 (60/3)	9,9	4,07	
	4 (60/4)	9,9	4,08	
	5 (60/5)	9,9	4,07	
40%	1 (40/1)	9,9	4,07	34
	2 (40/2)	9,9	4,05	
	3 (40/3)	9,9	4,05	
	4 (40/4)	9,9	4,05	
	5 (40/5)	9,9	4,05	
20%	1 (20/1)	10,0	4,14	32
	2 (20/2)	10,0	4,07	
	3 (20/3)	10,0	4,08	
	4 (20/4)	10,0	4,09	
	5 (20/5)	10,0	4,09	

Pri vlačnom ispitivanju za dobivanje podataka s kojima se precizno može odrediti modul elastičnosti korištene su po dvije epruvete od svakog postotka ispune, dok je ostatak epruveta korišten pri standardnom vlačnom ispitivanju za određivanje kvantitativnih krivulja naprežanje – istežanje. Što se tiče dimenzija, izmjerena širina i debljina epruveta imaju manja odstupanja, no i dalje spadaju unutar dopuštenih granica (tablica 3.1). Vremena ispisa pojedinačnih epruveta nisu drastično različita – vrijeme potrebno za ispis s 80% i 100% ispunom veće je samo 7 minuta od 20% ispune. Sve epruvete su relativno malih dimenzija pa i nema neke velike razlike u duljini ispisa. Već kada se uspoređi vrijeme ispisa za set od 7 epruveta, dobiva se razlika u vremenu ispisa od 52 min (272 min za 100%, 220 min za 20%). Ta razlika u vremenu ispisa samo raste porastom složenosti i dimenzija izratka.

Set gotovih ispitnih uzoraka s 80% ispune prikazan je na slici 6.4.



Slika 6.4 Set gotovih ispitnih uzoraka s 80% ispune

6.2. Vlačno ispitivanje (određivanje kvantitativnih dijagrama)

Osnovni statički vlačni pokus proveden je na kidalici *Galdabini Quasar 50* uz prateću programsku opremu. Prije početka samog ispitivanja, stvarne početne dimenzije poprečnog presjeka (širina i debljina) ispitnih uzoraka su određene pomoću mikrometra. Ispitni su se uzorci nakon toga ispitivali (kidali) jedan po jedan, te se za svaki pokus posebno bilježio rezultat.

Program pomoću kojeg se provodi ispitivanje ima određen broj unaprijed definiranih tzv. „metoda“. Metoda je unaprijed definirani skup parametara u programu za određenu vrstu materijala ili ispitivanje po određenoj normi. Osim postojećih metoda, moguće je definirati prilagođeni skup parametara koji su potrebni za konkretno ispitivanje. Prilikom ovog ispitivanja definirana je posebna metoda s nizom definiranih postavki. Unutar metode se najprije definira materijal koji se ispituje i vrsta ispitivanja – u ovom slučaju se radi o plastičnom (polimernom) materijalu i vlačnom ispitivanju. Programsko sučelje za definiranje materijala i vrste ispitivanja prikazano je na slici 6.5.

Material, Type and Subtypes selection

In this step you can determine the material, the type and the subtype of the method under creation/modification

Choose Material type

- METAL
- PLASTIC**
- BUILDING
- PACKAGING
- TEXTILE
- BIOMEDICAL / FOOD
- FINISHED PRODUCTS
- GENERIC

Choose Method Type

- Tensile**
- Compression
- Flexion/Bend
- Passing Through Zero
- Tensile With Length Detection
- Compression With Length Detection

Slika 6.5 Odabir materijala i vrste ispitivanja (*Galdabini LABTEST*)

Nakon toga se definiraju mjerne jedinice za sve veličine koje će se koristiti prilikom ispitivanja. Također se i definira geometrija i dimenzije epruvete. Dimenzije poprečnog presjeka epruvete se unutar programa koriste za direktno izračunavanje naprežanja i iscrtavanja grafova. Kao neka okvirna vrijednost je postavljena idealna širina i debljina epruvete, no ukoliko je potrebno, kasnije se za svaku epruvetu mogu zadati točne dimenzije. Definiranje dimenzija epruvete prikazano je na slici 6.6.

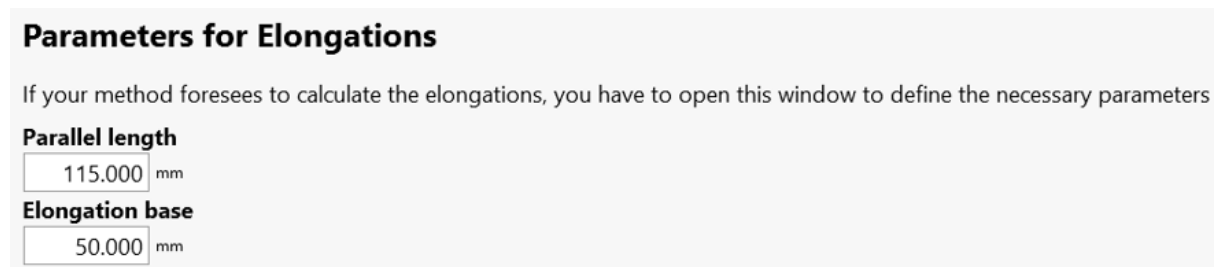


Slika 6.6 Definiranje dimenzija epruvete (*Galdabini LABTEST*)

Slijedi odabir mjerne ćelije i ekstenzometra (uz definiranje parametara ekstenzometra). Obzirom da je ovaj dio ispitivanja napravljen bez upotrebe ekstenzometra, korak vezan uz njega se preskače. Nakon toga je moguće postaviti sigurnosnu granicu opterećenja, kod koje će se stroj automatski zaustaviti.

Kako se naprežanje izračunava iz izmjerene sile i zadane površine poprečnog presjeka epruvete, tako se istežanje izračunava iz podataka o pomaku (produljenju) i početnoj mjernoj duljini. Da bi program mogao automatski izračunavati deformacije, definira se početna mjerna duljina. Obzirom da je ovaj dio ispitivanja izveden bez ekstenzometra, kao početna mjerna duljina definira se duljina epruvete između čeljusti kidalice. Za tu udaljenost je odabrana vrijednost 115 mm. Čeljusti kidalice se moraju prije početka svakog ispitivanja postaviti na

udaljenost od 115 mm. Tu početnu poziciju gornje čeljusti (traverze) je moguće zabilježiti pomoću programa, pa se vrlo lako osigurala ponovljivost. Da se koristio i ekstenzometar, početna mjerna duljina bi mu bila 50 mm. Definiranje početne mjerne duljine prikazano je na slici 6.7.



Parameters for Elongations

If your method foresees to calculate the elongations, you have to open this window to define the necessary parameters

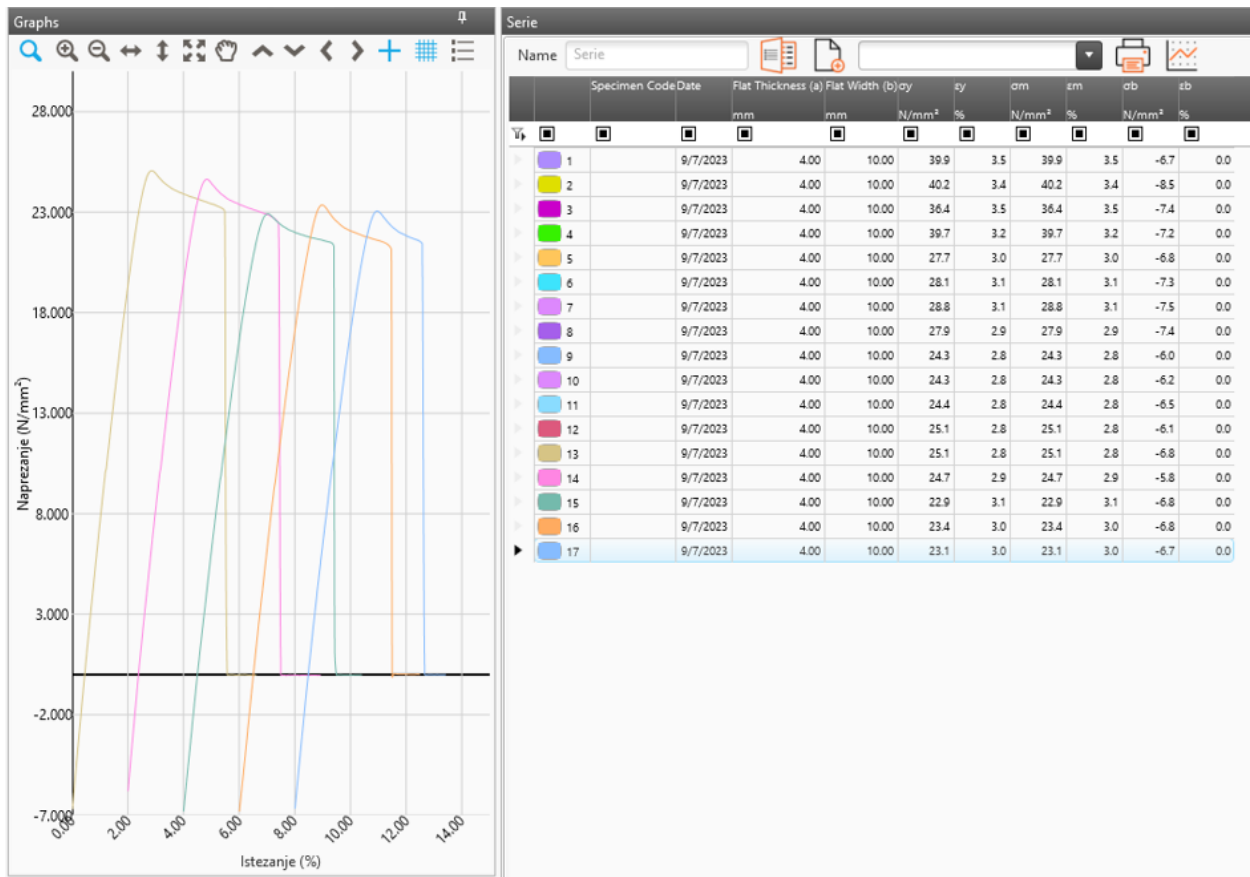
Parallel length
115.000 mm

Elongation base
50.000 mm

Slika 6.7 Definiranje početne mjerne duljine (*Galdabini LABTEST*)

Slijedi odabir i podešavanje grafičkog sučelja na kojem će se prikazivati izmjereni podaci. Ukoliko se na kidalici radi neka druga vrsta ispitivanja, moguće je zadati razne vrste ciklusa opterećenja. Također postoji i mogućnost definiranja faktora koji u proračun uzima i deformaciju dijelova samog stroja (traverze, mjernih ćelija, čeljusti). U sljedećem koraku se odabire i definira režim i brzina ispitivanja. Ovo ispitivanje je provedeno brzinom ispitivanja od 50 mm/min. Posljednji korak je odabir načina izračunavanja modula elastičnosti – odabran je sekantni modul (s pripadajućim granicama istezanja $\varepsilon_1 = 0,0005$ i $\varepsilon_2 = 0,0025$).

Nakon definiranja metode slijedi samo ispitivanje. Epruvete se kidaju jedna po jedna te se bilježe podaci. Rezultati o naprezanju, istezanju i drugim veličinama koje program izbacuje se računaju prema prethodno definiranim parametrima. Uz točno postavljanje svih parametara moguće je direktno iz programa dobiti točne rezultate i dijagrame naprezanje – istezanje. Za potrebe ovog rada iz programa su preuzeti samo „sirovi“ podaci o sili i pomaku iz kojih su se proračunom (pomoću programa *Microsoft Excel*) dobili željeni rezultati (podaci o naprezanju, istezanju i modulu elastičnosti). Konačan izgled sučelja s rezultatima ispitivanja prikazan je na slici 6.8.

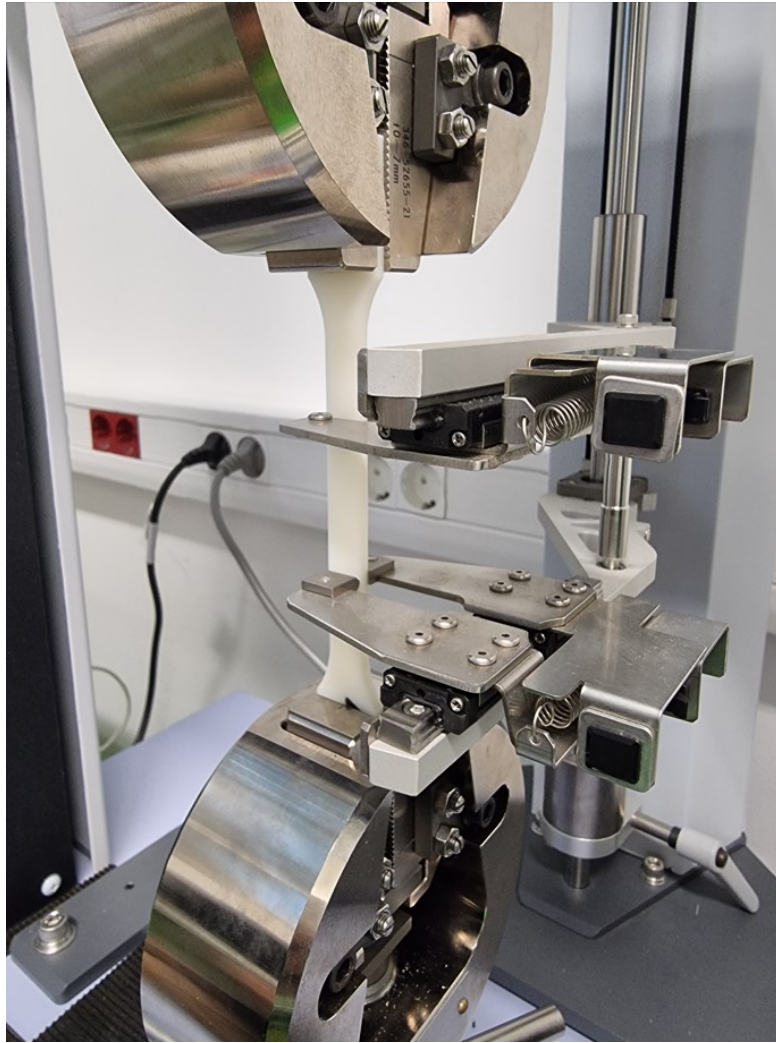


Slika 6.8 Rezultati ispitivanja (*Galdabini LABTEST*)

6.3. Određivanje modula elastičnosti

Podaci o pomaku dobiveni preko enkodera kidalice (pomak traverze, odnosno čeljusti) mogu se iskoristiti za određivanje kvantitativnih dijagrama naprezanje – istežanje jer dovoljno dobro opisuju globalno ponašanje epruvete pri vlačnom opterećenju. S druge strane, ti podaci nisu dovoljno precizni za određivanje modula elastičnosti. Za određivanje (sekantnog) modula elastičnosti potrebni su podaci o naprezanju i istežanju u vrlo uskom rasponu istežanja na početku vlačnog pokusa ($\varepsilon_1 = 0,0005$ i $\varepsilon_2 = 0,0025$). Općenito, istežanje se računa kao omjer ukupnog produljenja i početne mjerne duljine. Kod ispitivanja bez ekstenzometra, početna mjerna duljina u najboljem slučaju može biti definirana kao početna udaljenost čeljusti kidalice. U tom slučaju na rezultate ispitivanja utječe čitava geometrija epruvete koja se nalazi između čeljusti, što u principu dovodi do nepreciznih rezultata. Na taj način su određeni kvantitativni dijagrami za ovo ispitivanje. Za precizno određivanje modula elastičnosti koristi se ekstenzometar. Ekstenzometar precizno određuje produljenje na središnjem dijelu epruvete, te ima definiranu standardnu početnu mjernu duljinu. Na taj način se preciznije mogu dobiti podaci o istežanju u intervalu za određivanje sekantnog modula elastičnosti.

Ovaj dio ispitivanja odrađen je na kidalici *Shimadzu Autograph AGS-X*. Sam postupak definiranja parametara za ispitivanje vrlo je sličan postupku opisanom u prethodnom potpoglavlju. Unutar računalnog programa se odabire materijal i vrsta ispitivanja te mjerne jedinice za pojedine veličine. Dalje se odabire ekstenzometar koji će se koristiti za ispitivanje i definira mu se početna mjerna duljina. U konkretnom slučaju početna mjerna duljina ekstenzometra iznosi $GL(E) = 40$ mm. Udaljenost između čeljusti kidalice je u ovom slučaju $GL(G) = 110$ mm. Nadalje se definira brzina ispitivanja koja iznosi 1 mm/min. Na kraju je potrebno upisati točne dimenzije poprečnog presjeka, opet kako bi program mogao direktno izračunavati naprezanje. Nakon provedbe ispitivanja „sirovi“ podaci se spremaju u CSV datoteku i kasnije obrađuju u *Excelu*. Ispitivanje s ekstenzometrom prikazano je na slici 6.9.



Slika 6.9 Ispitivanje s ekstenzometrom (*Shimadzu Autograph AGS-X*)

6.4. Rezultati ispitivanja

Obradom podataka dobivenih statičkim vlačnim ispitivanjem dobivaju se podaci o mehaničkim svojstvima ispitivanog materijala. Iz izmjerenih sila i izračunate stvarne početne površine poprečnog presjeka pojedine epruvete izračunavaju se podaci o naprezanju (jednadžba 20):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (20)$$

Iz dobivenog pomaka (kod prvog ispitivanja pomaka traverze, odnosno čeljusti, a kod drugog produljenja ekstenzometra) i podataka o početnoj mjernoj duljini, moguće je izračunati podatak o istezanju (jednadžba 21):

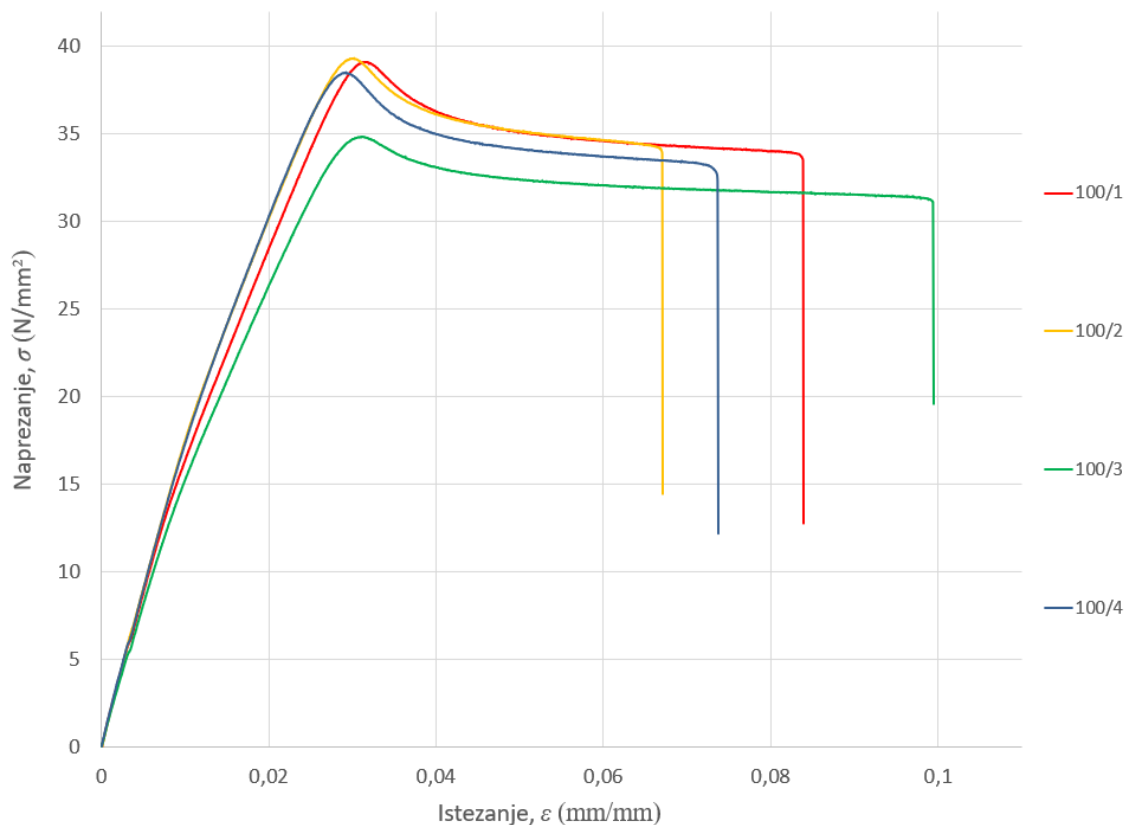
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (21)$$

Na temelju izračunatih podataka o naprezanju i istezanju moguće iscrtati dijagrame naprezanje – istezanje, odrediti granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću, naprezanje pri lomu (konačno naprezanje), istezanje kod postizanja granice razvlačenja, istezanje pri lomu, te odrediti (sekantni) modul elastičnosti za svaku ispitanu epruvetu. Podaci o sili i produljenju su kod oba ispitivanja bilježeni frekvencijom od 100 Hz (100 podataka po sekundi).

Na slici 6.10 prikazane su prve četiri pokidane epruvete sa 100% ispune, a na slici 6.11 je prikazan kvantitativni dijagram naprezanje – istezanje za navedene epruvete.



Slika 6.10 Pokidane epruvete sa 100% ispune



Slika 6.11 Dijagram naprezanje σ – istezanje ε za epruvete sa 100% ispune

Kvantitativni dijagram naprezanje – istezanje prikazuje međusobnu ovisnost naprezanja i istezanja prilikom vlačnog ispitivanja te daje opći uvid u način ponašanja materijala prilikom opterećivanja. U prvom dijelu dijagrama, naprezanje nelinearno raste porastom istezanja. Ukoliko se odnos naprezanja i istezanja želi precizno definirati (bez velikih grešaka), krivulju u prvom dijelu dijagrama je moguće aproksimirati (više ili manje) složenim jednadžbama (npr. polinomom višeg reda). S druge strane, ponašanje krivulje je moguće aproksimirati i jednostavnije – linearnom jednadžbom, pri čemu dolazi do unošenja određene greške. Linearna aproksimacija ponašanja krivulje je zapravo određivanje (sekantnog) modula elastičnosti. Nakon nelinearnog porasta naprezanja, dolazi se do točke u kojoj iznos sile prilikom vlačnog ispitivanja postiže maksimalnu vrijednost. To je točka gdje se postiže maksimalna vrijednost naprezanja u inženjerskom dijagramu naprezanje istezanje (stvarno naprezanje je najveće pri samom kraju ispitivanja, netom prije puknuća uzorka). Ta točka je ujedno i granica razvlačenja i vlačna čvrstoća za ovakav tip dijagrama. Nakon dostizanja maksimalne vrijednosti naprezanja (u inženjerskom dijagramu), daljnjim povećanjem istezanja, naprezanje postepeno pada i taj trend se nastavlja sve do točke naprezanja pri lomu u kojoj dolazi do potpunog otkaza ispitnog uzorka.

Iz slike 6.11 se vidi da su rezultati za epruvete sa 100% ispune konzistentni i da postoje minimalna odstupanja. Zelena krivulja (100/3) na dijagramu je treći uzorak, čiji rezultati najvjerojatnije odstupaju jer je ta epruveta izrađena u sklopu drugog seta (razlika u boji epruvete vidljiva je na slici 6.10). Obzirom da je nemoguće ponoviti identične uvjete prilikom 3D tiska, ta epruveta ima neke manje razlike u mehaničkim svojstvima u odnosu na ostatak, ali je i dalje uzeta u obzir pri karakterizaciji mehaničkih svojstava materijala. Na temelju izmjerenih vrijednosti u sklopu vlačnog ispitivanja napravljen je proračun, a podaci o mehaničkim svojstvima prikazani su u tablici 6.2.

Tablica 6.2 Karakteristična naprežanja i deformacije za epruvete sa 100% ispune

	100/1	100/2	100/3	100/4	Prosjek za 100%
R_e, R_m [N/mm ²]	39,15	39,35	34,87	38,5	37,97
ϵ_e, ϵ_m	0,03469	0,03379	0,03474	0,03248	0,03393
R_k [N/mm ²]	33,54	33,94	31,13	32,28	32,72
ϵ_k	0,08686	0,07083	0,103	0,07683	0,08438

Modul elastičnosti za prve četiri epruvete s 100% ispune određen je kao sekantni modul prema podacima koji su dobiveni iz prvog vlačnog ispitivanja (provedenog bez ekstenzometra). Proračunate vrijednosti modula za pojedine epruvete (uz podatke o naprežanju i istežanju iz kojih su dobivene), te prosječni modul prikazani su u tablici 6.3.

Tablica 6.3 Sekantni moduli elastičnosti za epruvete sa 100% ispune

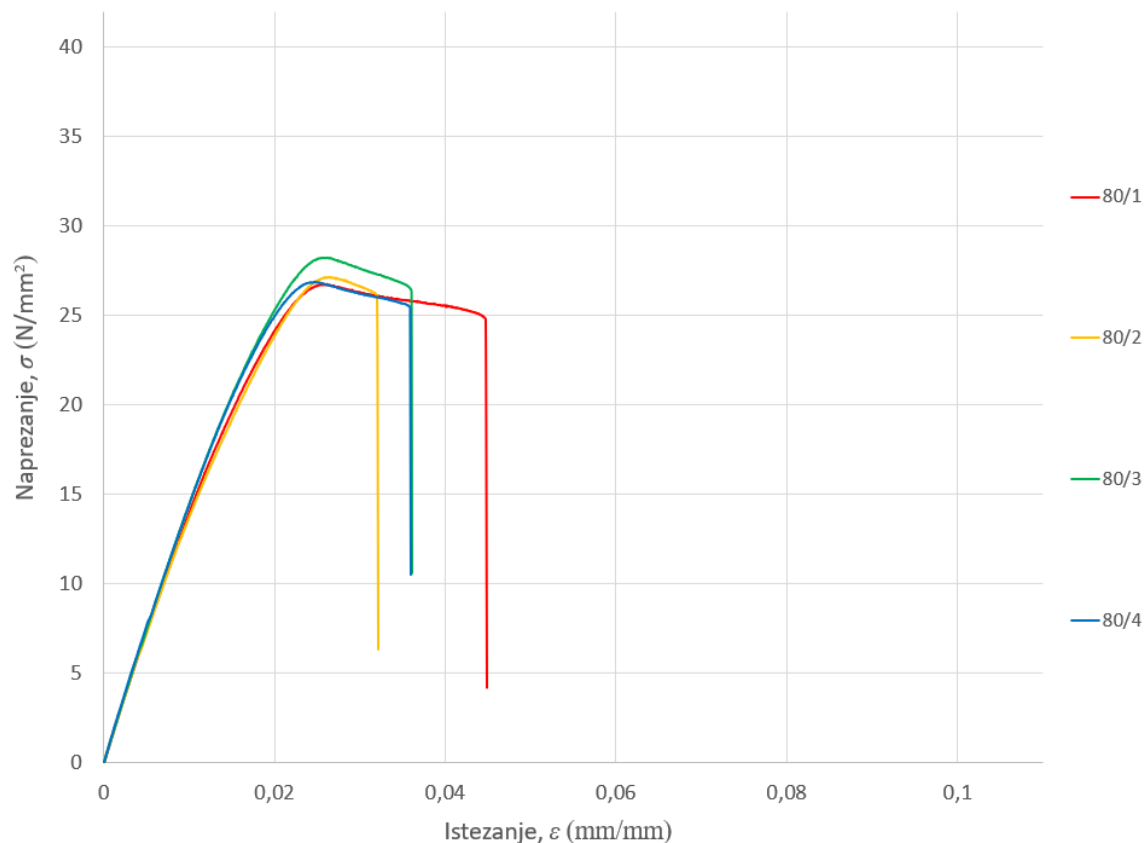
	σ_2 [N/mm ²]	σ_1 [N/mm ²]	ϵ_2	ϵ_1	E_t [N/mm ²]	\bar{E}_t [N/mm ²]
100/1	4,76	1,01	0,00252	0,00047	1826,76	1806,94
100/2	4,77	0,91	0,00253	0,00047	1878,15	
100/3	4,38	0,92	0,00254	0,00048	1684,29	
100/4	4,84	1,11	0,00252	0,00049	1838,55	

Prema tablici 6.2, prosječna vrijednost granice razvlačenja, odnosno vlačne čvrstoće za epruvete sa 100% ispune iznosi $37,97 \text{ N/mm}^2$ pri prosječnom istezanju od $0,03393$, dok naprezanje pri lomu iznosi $32,72 \text{ N/mm}^2$ pri istezanju od $0,08438$. Prema tablici 6.3 se vidi da je prosječna vrijednost sekantnog modula elastičnosti za te epruvete $1806,94 \text{ N/mm}^2$.

Na slici 6.12 prikazane su četiri pokidane epruvete sa 80% ispune, a na slici 6.13 je prikazan kvantitativni dijagram naprezanje – istezanje za navedene epruvete. Na slici 6.12 se može vidjeti da je prva epruveta (80/1) pukla na prijelazu uskog dijela epruvete na radijus. Obzirom da epruveta nije pukla na „ispravnom“ dijelu, ova epruveta nije uzeta u obzir pri proračunu. „Ispravnim“ dijelom epruvete se smatra središnji uski dio, gdje prilikom ispitivanja dolazi ekstenzometar (kada se ekstenzometar koristi, epruveta mora puknuti u točno određenom rasponu gdje je ekstenzometar postavljen). Odstupanje mehaničkih svojstava ove epruvete vidljivo je i na dijagramu na slici 6.13 (80/1, crvena krivulja).



Slika 6.12 Pokidane epruvete s 80% ispune



Slika 6.13 Dijagram naprezanje σ – istezanje ε za epruvete s 80% ispune

Iz slike 6.13 se vidi da su rezultati za epruvete sa 80% ispune konzistentni (izuzevši prethodno spomenuti prvi uzorak) i da postoje minimalna odstupanja. Na temelju izmjerenih vrijednosti u sklopu vlačnog ispitivanja napravljen je proračun, a podaci o mehaničkim svojstvima prikazani su u tablici 6.4.

Tablica 6.4 Karakteristična naprezanja i deformacije za epruvete s 80% ispune

	(80/1)	80/2	80/3	80/4	Prosjek za 80%
R_e, R_m [N/mm²]	(26,74)	27,11	28,20	26,86	27,39
$\varepsilon_e, \varepsilon_m$	(0,03034)	0,03077	0,03098	0,02909	0,03028
R_k [N/mm²]	(24,80)	26,08	26,34	25,42	25,95
ε_k	(0,04903)	0,03643	0,04092	0,04040	0,03925

Modul elastičnosti za epruvete s 80% ispune određen je kao sekantni modul prema podacima koji su dobiveni iz prvog vlačnog ispitivanja (provedenog bez ekstenzometra). Proračunate vrijednosti modula za pojedine epruvete (uz podatke o naprezanju i istežanju iz kojih su dobivene), te prosječni modul prikazani su u tablici 6.5.

Tablica 6.5 Sekantni moduli elastičnosti za epruvete s 80% ispune

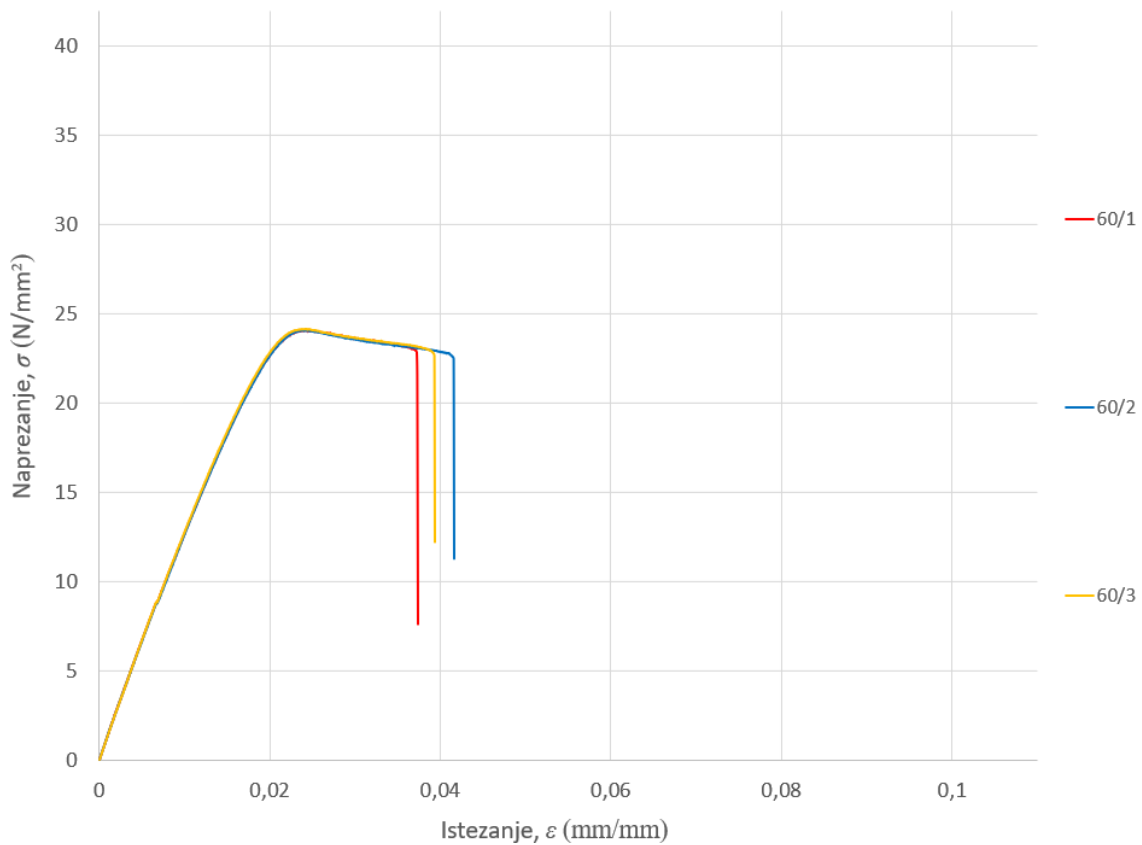
	σ_2 [N/mm ²]	σ_1 [N/mm ²]	ϵ_2	ϵ_1	E_t [N/mm ²]	\bar{E}_t [N/mm ²]
(80/1)	(3,78)	(0,79)	(0,00249)	(0,00051)	(1510,16)	1519,98
80/2	3,72	0,84	0,00248	0,00050	1458,52	
80/3	3,83	0,80	0,00247	0,00053	1552,98	
80/4	3,93	0,87	0,00248	0,00050	1548,45	

Prema tablici 6.4, prosječna vrijednost granice razvlačenja, odnosno vlačne čvrstoće za epruvete sa 80% ispune iznosi 27,39 N/mm² pri prosječnom istežanju od 0,03028, dok naprežanje pri lomu iznosi 25,95 N/mm² pri istežanju od 0,03925. Prema tablici 6.5 se vidi da je prosječna vrijednost sekantnog modula elastičnosti za te epruvete 1519,98 N/mm².

Sljedeći ispitani set epruveta bio je sa 60% ispune. Na slici 6.14 prikazane su tri pokidane epruvete sa 60% ispune, a na slici 6.15 je prikazan kvantitativni dijagram naprežanje – istežanje za navedene epruvete.



Slika 6.14 Pokidane epruvete s 60% ispune



Slika 6.15 Dijagram naprezanje σ – istezanje ε za epruvete s 60% ispune

Epruvete iz ovog seta su uspješno pokidane i dale su rezultate s vrlo malo odstupanja. Podaci o mehaničkim svojstvima za epruvete s 60% ispune prikazani su u tablici 6.6.

Tablica 6.6 Karakteristična naprezanja i deformacije za epruvete s 60% ispune

	60/1	60/2	60/3	Prosjeak za 60%
R_e, R_m [N/mm ²]	24,10	24,12	24,20	23,14
$\varepsilon_e, \varepsilon_m$	0,02822	0,02817	0,02846	0,02828
R_k [N/mm ²]	22,87	22,51	22,71	22,70
ε_k	0,04127	0,04570	0,04353	0,04350

Modul elastičnosti za epruvete s 60% ispune određen je kao sekantni modul prema podacima koji su dobiveni iz prvog vlačnog ispitivanja (provedenog bez ekstenzometra). Proračunate vrijednosti modula za pojedine epruvete (uz podatke o naprezanju i istezanju iz kojih su dobivene), te prosječni modul prikazani su u tablici 6.7.

Tablica 6.7 Sekantni moduli elastičnosti za epruvete s 60% ispune

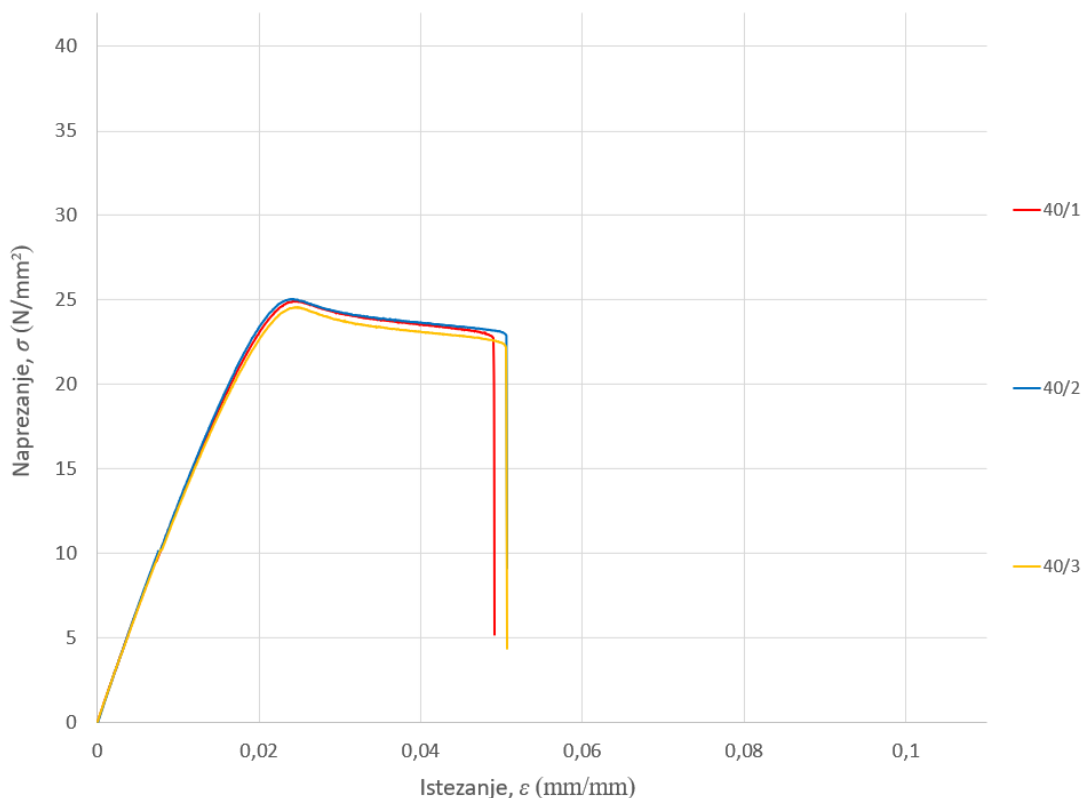
	σ_2 [N/mm ²]	σ_1 [N/mm ²]	ϵ_2	ϵ_1	E_t [N/mm ²]	\bar{E}_t [N/mm ²]
60/1	3,43	0,78	0,00250	0,00054	1359,16	1370,48
60/2	3,44	0,76	0,00249	0,00054	1371,51	
60/3	3,46	0,76	0,00249	0,00054	1380,79	

Prema tablici 6.6, prosječna vrijednost granice razvlačenja, odnosno vlačne čvrstoće za epruvete sa 60% ispune iznosi 23,14 N/mm² pri prosječnom istezanju od 0,02828, dok naprezanje pri lomu iznosi 22,70 N/mm² pri istezanju od 0,04350. Prema tablici 6.7 se vidi da je prosječna vrijednost sekantnog modula elastičnosti za te epruvete 1370,48 N/mm².

Nakon toga, ispitane su epruvete s 40% ispune. Na slici 6.16 prikazane su tri pokidane epruvete sa 40% ispune, a na slici 6.17 je prikazan kvantitativni dijagram naprezanje – istezanje za navedene epruvete.



Slika 6.16 Pokidane epruvete s 40% ispune



Slika 6.17 Dijagram naprezanje σ – istezanje ε za epruvete s 40% ispune

Epruvete iz ovog seta su također bile uspješno pokidane i dale su rezultate s minimalnim odstupanjima. Podaci o mehaničkim svojstvima za epruvete s 40% ispune prikazani su u tablici 6.8.

Tablica 6.8 Karakteristična naprezanja i deformacije za epruvete s 40% ispune

	40/1	40/2	40/3	Prosjek za 40%
R_e, R_m [N/mm ²]	24,93	25,02	24,60	24,85
$\varepsilon_e, \varepsilon_m$	0,02828	0,02845	0,02857	0,02843
R_k [N/mm ²]	22,73	22,85	22,23	22,60
ε_k	0,05306	0,05503	0,05431	0,05413

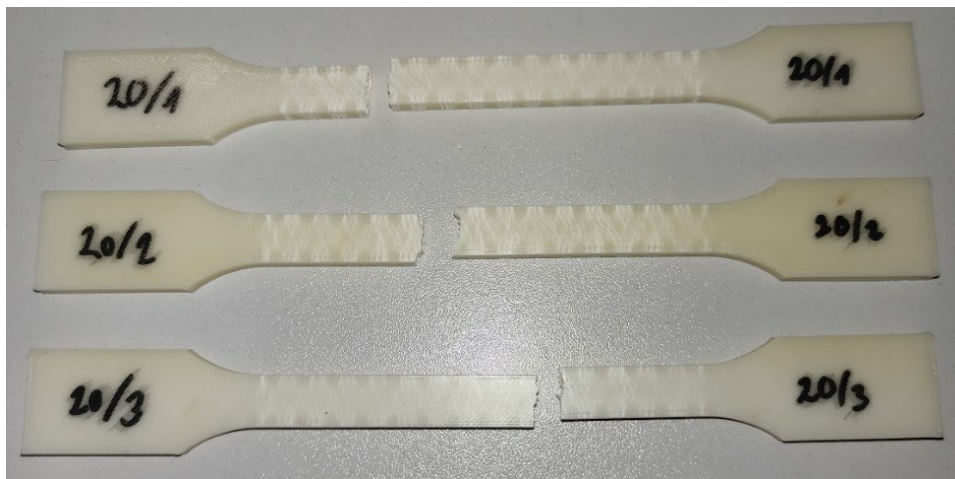
Modul elastičnosti za epruvete s 40% ispune određen je kao sekantni modul prema podacima koji su dobiveni iz prvog vlačnog ispitivanja (provedenog bez ekstenzometra). Proračunate vrijednosti modula za pojedine epruvete (uz podatke o naprezanju i istezanju iz kojih su dobivene), te prosječni modul prikazani su u tablici 6.9.

Tablica 6.9 Sekantni moduli elastičnosti za epruvete s 40% ispune

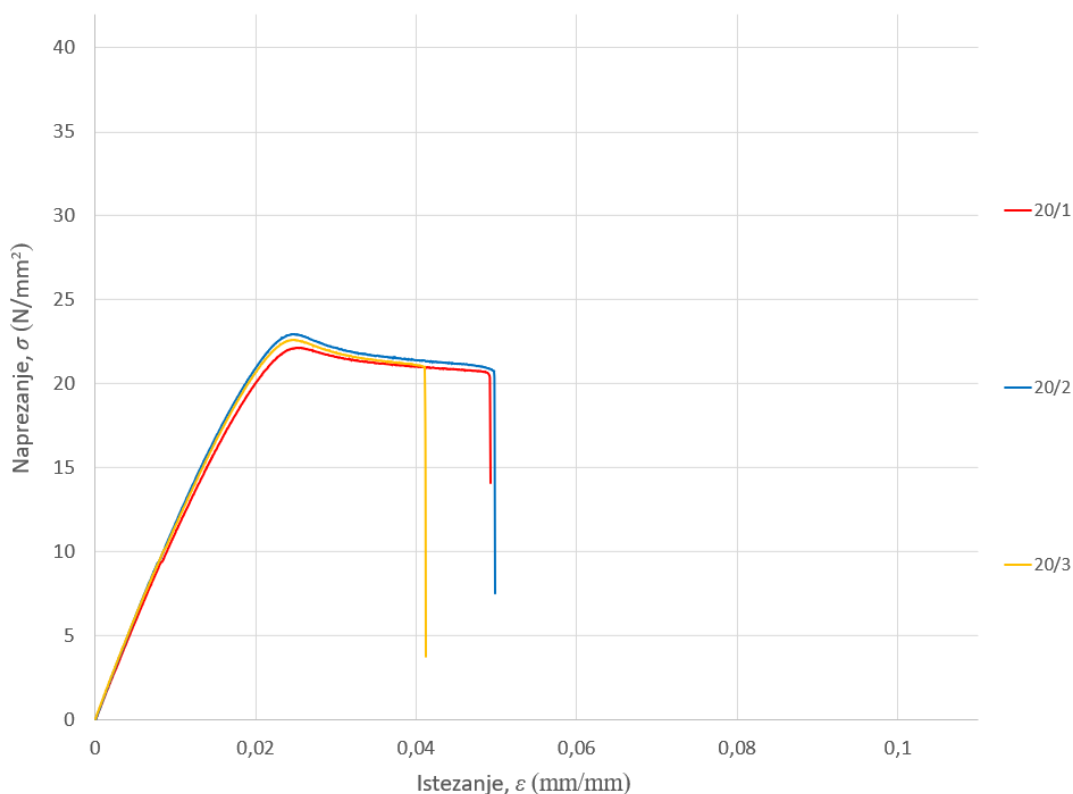
	σ_2 [N/mm ²]	σ_1 [N/mm ²]	ϵ_2	ϵ_1	E_t [N/mm ²]	\overline{E}_t [N/mm ²]
40/1	3,49	0,81	0,00250	0,00054	1369,21	1371,96
40/2	3,46	0,73	0,00248	0,00053	1401,39	
40/3	3,46	0,78	0,00252	0,00053	1345,28	

Prema tablici 6.8, prosječna vrijednost granice razvlačenja, odnosno vlačne čvrstoće za epruvete sa 40% ispune iznosi 24,85 N/mm² pri prosječnom istezanju od 0,02843, dok naprezanje pri lomu iznosi 22,60 N/mm² pri istezanju od 0,05413. Prema tablici 6.9 se vidi da je prosječna vrijednost sekantnog modula elastičnosti za te epruvete 1371,96 N/mm².

Na kraju su ispitane epruvete s 20% ispune. Na slici 6.18 prikazane su tri pokidane epruvete sa 20% ispune, a na slici 6.19 je prikazan kvantitativni dijagram naprezanje – istezanje za navedene epruvete.



Slika 6.18 Pokidane epruvete s 20% ispune



Slika 6.19 Dijagram naprezanje σ – istezanje ε za epruvete s 20% ispune

Epruvete iz ovog seta su također bile uspješno pokidane i dale su rezultate s manjim odstupanjima (treći uzorak ima nešto manje ukupno istezanje). Podaci o mehaničkim svojstvima za epruvete s 20% ispune prikazani su u tablici 6.10.

Tablica 6.10 Karakteristična naprezanja i deformacije za epruvete s 20% ispune

	20/1	20/2	20/3	Prosjek za 20%
R_e, R_m [N/mm ²]	22,15	22,98	22,63	22,59
$\varepsilon_e, \varepsilon_m$	0,03020	0,02976	0,02962	0,02986
R_k [N/mm ²]	20,36	20,33	20,99	20,56
ε_k	0,05417	0,05475	0,04591	0,05161

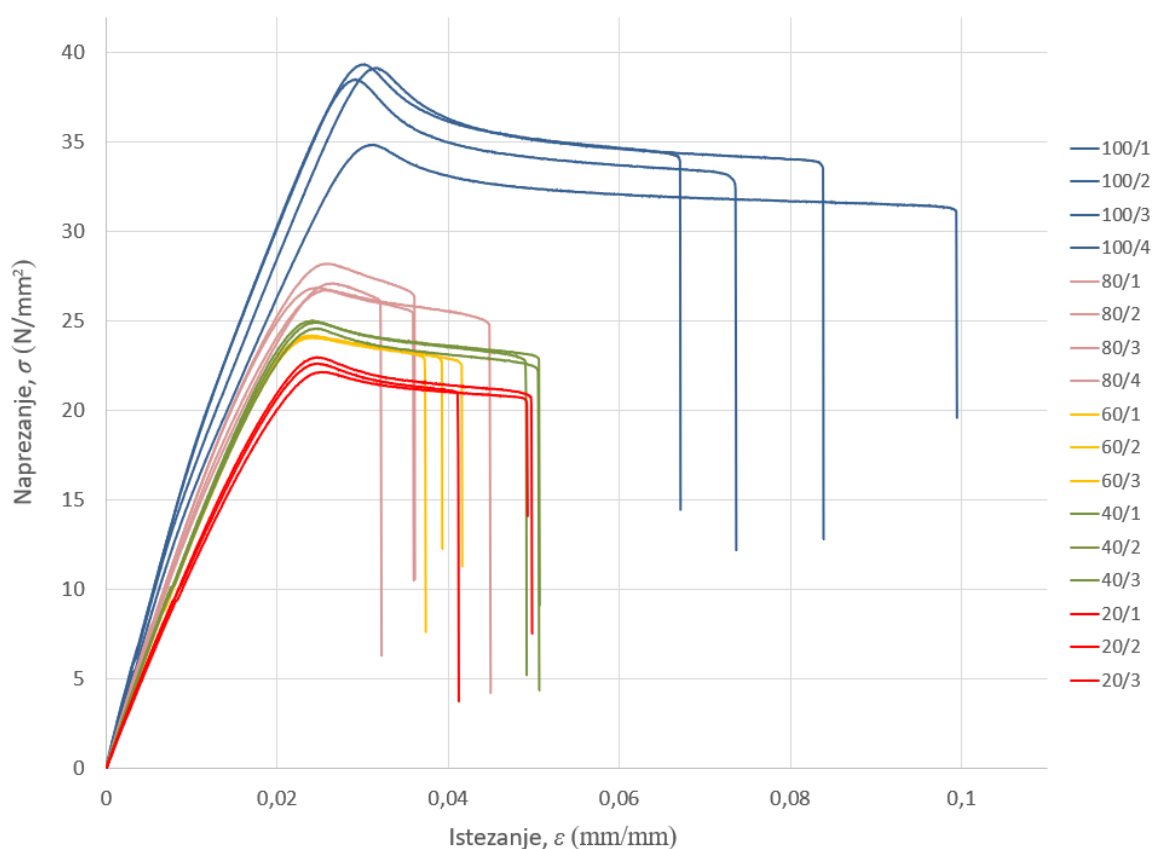
Modul elastičnosti za epruvete s 20% ispune određen je kao sekantni modul prema podacima koji su dobiveni iz prvog vlačnog ispitivanja (provedenog bez ekstenzometra). Proračunate vrijednosti modula za pojedine epruvete (uz podatke o naprezanju i istezanju iz kojih su dobivene), te prosječni modul prikazani su u tablici 6.11.

Tablica 6.11 Sekantni moduli elastičnosti za epruvete s 20% ispune

	σ_2 [N/mm ²]	σ_1 [N/mm ²]	ϵ_2	ϵ_1	E_t [N/mm ²]	\bar{E}_t [N/mm ²]
20/1	2,94	0,60	0,00247	0,00049	1182,98	1235,43
20/2	3,11	0,62	0,00247	0,00052	1283,23	
20/3	3,13	0,68	0,00247	0,00050	1240,07	

Prema tablici 6.10, prosječna vrijednost granice razvlačenja, odnosno vlačne čvrstoće za epruvete sa 20% ispune iznosi 22,59 N/mm² pri prosječnom istezanju od 0,02986, dok naprezanje pri lomu iznosi 20,56 N/mm² pri istezanju od 0,05161. Prema tablici 6.11 se vidi da je prosječna vrijednost sekantnog modula elastičnosti za te epruvete 1235,43 N/mm².

Na slici 6.20 prikazan je usporedni dijagram koji sadrži krivulje naprezanje – istezanje za sve ispitane epruvete, a u tablici 6.12 prikazane su dobivene prosječne vrijednosti podataka o mehaničkim svojstvima materijala za različite postotke ispune.



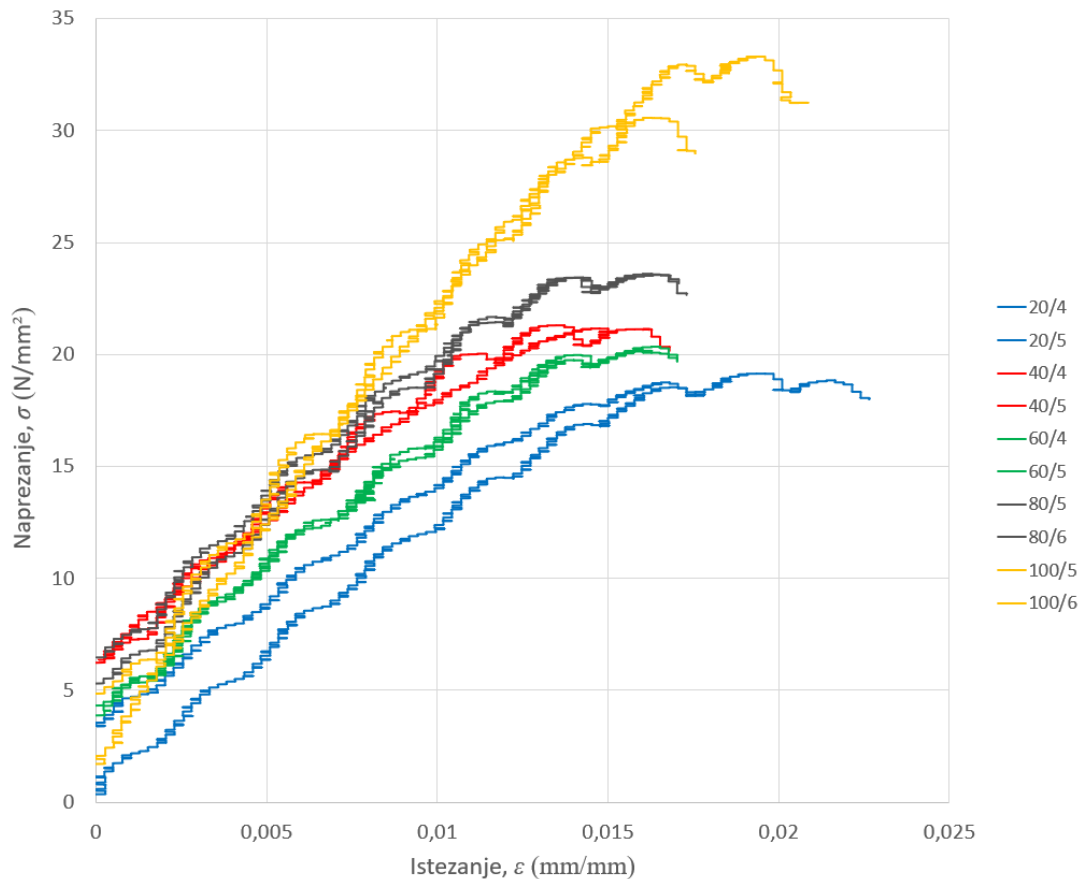
Slika 6.20 Dijagram naprezanje σ – istezanje ϵ za sve ispitane epruvete

Tablica 6.12 Dobivena mehanička svojstva za sve ispitane epruvete

	R_e, R_m [N/mm ²]	ϵ_e, ϵ_m	R_k [N/mm ²]	ϵ_k	$E_{t1,S}$ [N/mm ²]
100%	37,97	0,03393	32,72	0,08438	1806,94
80%	27,39	0,03028	25,95	0,03925	1519,98
60%	23,14	0,02828	22,70	0,04350	1370,48
40%	24,85	0,02843	22,60	0,05413	1371,96
20%	22,59	0,02986	20,56	0,05161	1235,43

Uvidom u dijagram na slici 6.20 i tablicu 6.12 se može vidjeti da uzorci s 100% ispune, kao što je i očekivano, imaju najbolja mehanička svojstva (prosječna granica razvlačenja, odnosno vlačna čvrstoća od 37,97 N/mm² i modul elastičnosti od 1806,94 N/mm²). Smanjenjem postotka ispune uzorka, mehanička svojstva postaju lošija. Najlošija mehanička svojstva imaju uzorci s 20% ispune (prosječna granica razvlačenja, odnosno vlačna čvrstoća od 22,59 N/mm² i modul elastičnosti od 1235,43 N/mm²). Zanimljivo je za primijetiti da uzorci s 40% ispune imaju ekvivalentna mehanička svojstva uzorcima s 60% ispune (razlike su minimalne, uzorci s 40% ispune čak imaju i nešto veću granicu razvlačenja, odnosno vlačnu čvrstoću). Male razlike u mehaničkim svojstvima uzoraka s 20% do 60% ispune ukazuju na činjenicu da kod ovako malih i tankih uzoraka većinu opterećenja preuzima stijenka uzorka (nominalna debljina epruvete je 4 mm, a debljina svake stijenke iznosi 0,86 mm). Drugim riječima, stijenka epruvete postaje dominantna pri nošenju opterećenja, a ispunna preuzima manji dio i nema veliki utjecaj na mehanička svojstva pri manjim postocima ispune. Maksimalno istezanje uzorka s 20% do 80% ispune je otprilike 4% do 5,5%, pri čemu uzorci s 80% ispune imaju najmanju vrijednost maksimalnog istezanja, a uzorci s 40% najveću. Uzorci sa 100% ispune imaju najveću vrijednost istezanja pri lomu, otprilike 8,5%.

Drugo vlačno ispitivanje provedeno je uz korištenje ekstenzometra, gdje je glavna svrha bila odrediti modul elastičnosti. Ispitivanja su provedena brzinom od 1 mm/min i trajala su sve do postizanja granice tečenja, odnosno do pojave bitnog pada naprežanja. Proračunom na temelju izmjerenih podataka dobivene su krivulje u dijagramu naprežanje – istezanje za različite postotke ispune. Za svaki postotak ispune ispitane su dvije epruvete. Dijagram naprežanje – istezanje za drugo vlačno ispitivanje prikazan je na slici 6.21.



Slika 6.21 Dijagram naprezanje σ – istezanje ε za drugo vlačno ispitivanje

Iz dijagrama na slici 6.21 je vidljivo kako krivulje nisu glatke, nego stepenjevite. Razlog zbog kojeg je došlo do takvog izgleda krivulja jest prevelika rezolucija ekstenzometra. Mjerenje je provedeno s rezolucijom od 10 μm , a daljnjim smanjivanjem rezolucije bi se dobile zaglađenije krivulje. Osim toga, problematično je to što krivulje ne kreću iz ishodišta koordinatnog sustava, nego kreću iz neke točke s osi naprezanja. Kod izvođenja vlačnog ispitivanja s ekstenzometrom, pomak koji se registrira na ekstenzometru uvijek kasni u odnosu na pomak traverze. Obzirom da ispitivanje ne može biti savršeno, u početnoj se fazi ispitivanja postepenim uvođenjem opterećenja najprije poništava eventualno tlačno naprezanje koje postoji u epruveti zbog načina pričvršćivanja na kidalicu, a nakon toga uzorak još dodatno napravi eventualne male pomake unutar čeljusti dok ne „sjedne“ na mjesto. Sve to skupa rezultira time da ekstenzometar tek kasnije krene registrirati pomake. U slučaju epruveta s 40% i 80% ispune, početno naprezanje (naprezanje kod kojega je istezanje ekstenzometra još uvijek 0) iznosi oko 7 N/mm^2 . To može značiti ili da je došlo do pomicanja (klizanja) ekstenzometra po epruvetama u početku ispitivanja ili da se središnji dio epruvete (gdje je ekstenzometar bio postavljen) krenuo istezati tek nakon pojave određenog inicijalnog opterećenja. Iz samog

dijagrama je očito da su krivulje za epruvete sa 100% ispune strmije od ostalih krivulja, što zapravo znači da imaju najveći modul elastičnosti. Usporedbu preostalih uzoraka nije moguće napraviti sa sigurnošću samo na temelju dijagrama. Za detaljniju analizu modula elastičnosti bilo je potrebno napraviti proračun i usporediti dobivene vrijednosti.

Modul elastičnosti je za drugo ispitivanje najprije određen kao sekantni, prema definiciji, odnosno u granicama istezanja $\varepsilon_1 = 0,0005$ i $\varepsilon_2 = 0,0025$. Ti podaci o naprezanju, istezanju i sekantnom modulu elastičnosti su prikazani u tablici 6.13.

Tablica 6.13 Karakteristična naprezanja, deformacije i sekantni moduli elastičnosti za sve epruvete iz drugog ispitivanja

	σ_2 [N/mm ²]	σ_1 [N/mm ²]	ε_2	ε_1	E_t [N/mm ²]	$E_{t2,S}$ [N/mm ²]
100/5	6,90	3,21	0,00250	0,00053	1868,04	1753,71
100/6	8,40	5,16	0,00248	0,00050	1639,37	
80/5	8,06	5,54	0,00253	0,00050	1247,58	1339,48
80/6	9,57	6,74	0,00250	0,00053	1431,37	
60/4	6,52	4,50	0,00250	0,00050	1012,13	1069,28
60/5	6,80	4,55	0,00250	0,00050	1126,42	
40/4	9,39	6,43	0,00255	0,00053	1461,40	1405,77
40/5	9,28	6,58	0,00250	0,00050	1350,15	
20/4	3,43	1,56	0,00253	0,00050	925,18	1022,74
20/5	6,02	3,72	0,00255	0,00050	1120,30	

Obzirom da su podaci poprilično nekonzistentni i dosta odskaču od prethodnog ispitivanja (što je pogotovo vidljivo kod srednjeg modula elastičnosti za epruvete s 40% ispune), modul je određen i linearnom regresijom na istom intervalu, te na intervalu $\varepsilon_1 = 0,001$ i $\varepsilon_2 = 0,01$. Tablica 6.14 prikazuje usporedbu sekantnog modula elastičnosti iz drugog ispitivanja, dvaju modula određenih linearnom regresijom na različitim intervalima (također iz drugog ispitivanja) te sekantnog modula elastičnosti iz prvog vlačnog ispitivanja.

Tablica 6.14 Usporedba modula elastičnosti za epruvete s različitim postocima ispune

	$E_{t2,S}$ [N/mm ²]	$E_{t2,reg1}$ [N/mm ²]	$E_{t2,reg2}$ [N/mm ²]	$E_{t1,S}$ [N/mm ²]
100%	1753,71	1824,07	1806,58	1806,94
80%	1339,48	1151,16	1443,86	1519,98
60%	1069,28	1005,25	1261,51	1370,48
40%	1405,77	1383,17	1236,09	1371,96
20%	1022,74	1008,33	1147,48	1235,43

U tablici 6.14, veličina $E_{t2,S}$ predstavlja sekantni modul elastičnosti iz drugog ispitivanja, $E_{t2,reg1}$ je modul elastičnosti iz drugog ispitivanja određen linearnom regresijom na manjem intervalu ($\varepsilon_1 = 0,0005$, $\varepsilon_2 = 0,0025$), $E_{t2,reg2}$ je modul elastičnosti iz drugog ispitivanja određen linearnom regresijom na većem intervalu ($\varepsilon_1 = 0,001$, $\varepsilon_2 = 0,01$), dok je $E_{t1,S}$ sekantni modul elastičnosti iz prvog ispitivanja. Prema tablici 6.14, modul elastičnosti za ispitne uzorke sa 100% ispune je kod oba ispitivanja oko 1800 N/mm². Referentna vrijednost modula elastičnosti za ABS, prema normi ISO 527 iznosi 1799 N/mm². Prema tome, može se zaključiti da su provedena ispitivanja relevantna, samo je pitanje na koji će se način modul elastičnosti proračunati i tumačiti. Zbog grube rezolucije mjerenja kod drugog ispitivanja, određivanje modula (sekantnog $E_{t2,S}$ i linearnom regresijom $E_{t2,reg1}$) unutar granica $\varepsilon_1 = 0,0005$ i $\varepsilon_2 = 0,0025$ jako ovisi o odabiru točaka koje će se uzeti kao relevantne za proračun. Npr. pri $\varepsilon_1 = 0,0005$ odgovarajuće naprezanje može biti definirano kao $\sigma = 1,38$ N/mm², ali također i $\sigma = 1,74$ N/mm², što kao posljedicu ima odstupanja modula i do 200 N/mm². Linearna regresija provedena na većem setu točaka ($\varepsilon_1 = 0,001$ i $\varepsilon_2 = 0,01$) daje nešto konzistentnije rezultate koji prate trend prvog ispitivanja. Stoga se može zaključiti da su granice od $\varepsilon_1 = 0,0005$ i $\varepsilon_2 = 0,0025$ „prefine“ za rezoluciju od 10 μ m. Prema tome, okvirne vrijednosti modula elastičnosti za ABS su: 100% ispune 1800 N/mm², 80% ispune od 1450 N/mm² do 1520 N/mm², 60% ispune 1260 N/mm² do 1370 N/mm², 40% ispune 1240 N/mm² do 1370 N/mm² i 20% ispune 1150 N/mm² do 1230 N/mm².

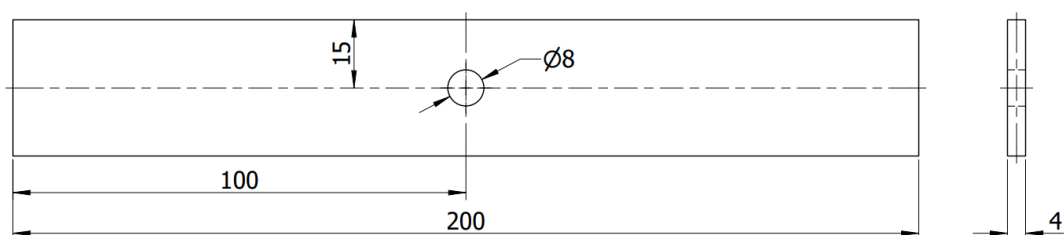
7. PRIMJENA EKSPERIMENTALNO ODREĐENIH SVOJSTAVA MATERIJALA U NUMERIČKOJ ANALIZI

Općenito gledajući, problemi u inženjerstvu se mogu rješavati na nekoliko načina – analitički, numerički i eksperimentalno. Analitičkim pristupom se pri rješavanju problema postavljaju više ili manje složeni matematički modeli kojima se konkretan problem može egzaktno opisati matematičkim izrazima i jednačbama. Analitički pristup se uglavnom koristi za jednostavnije probleme i geometrije, a dobivena rješenja su egzaktna i definirana za sve točke domene. Numerički pristup se koristi za složenije geometrije i daje približno točna rješenja, koja ovise o načinu postavljanja modela. Kod numeričkog pristupa, problem se definira pomoću skupa diferencijalnih jednačbi, koji se onda rješava uz postavljanje dodatnih rubnih uvjeta. Jedna od najčešće korištenih i najbitnijih numeričkih metoda jest metoda konačnih elemenata, koja je sastavni dio velikog broja komercijalnih programskih paketa u području inženjerske analize. Metodom konačnih elemenata se dobivaju približno točna rješenja samo u zadanim čvorovima domene (koji su definirani numeričkom mrežom). Treća metoda je eksperimentalno rješavanje nekog problema, gdje se provode mjerenja na nekom modelu koji se postavlja u realne uvjete.

U okviru ovog poglavlja napravljena je numerička analiza uzoraka s različitim postocima ispune, čiji je cilj odrediti nosivost tih modela. Numerički model je verificiran usporedbom s analitičkim rješenjem. Numerička analiza provedena je za odabrani model (koji ima sličnu geometriju prethodno ispitivanim uzorcima), na temelju podataka o mehaničkim svojstvima dobivenih statičkim vlačnim ispitivanjem.

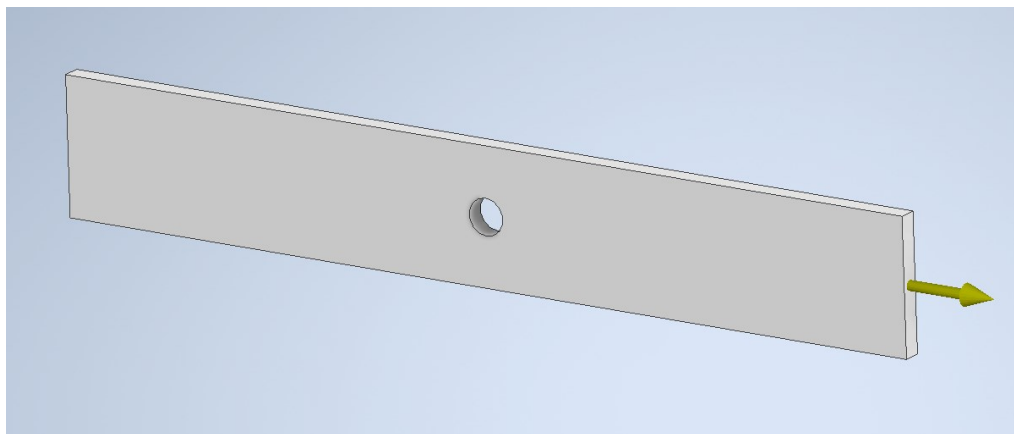
7.1. Opis modela i analitički proračun

Na odabir modela za koji će biti provedena analiza utječe više faktora. Obzirom da je utvrđeno da je stijenka epruvete dominantna pri nošenju vanjskog opterećenja (što je izraženije pri manjim postocima ispune), model koji se promatra također mora biti tanak (idealno iste debljine kao ispitane epruvete, kako bi omjer debljine stijenke i količine ispune po debljini uzorka bio isti). Druga stvar koju treba uzeti u obzir je da je numeričku analizu provedenu pomoću nekog programa potrebno na neki način verificirati i potvrditi da je uistinu relevantna i da prikazuje točne rezultate. To je praktično napraviti usporedbom s poznatim analitičkim rješenjem za neku relativno jednostavnu geometriju. Obzirom da su analitička rješenja za uzorke s koncentradorima napreznja poznata, kao model za analizu je odabran tanki pločasti uzorak s provrtom u sredini kao koncentradorom napreznja. Na slici 7.1 prikazane su dimenzije promatranog uzorka.



Slika 7.1 Dimenzije uzorka s provrtom

Uzorak je s lijeve strane konzolno ukliješten (pomaci bočne plohe su potpuno spriječeni), a s desne strane je vlačno opterećen određenom silom. Geometrija uzorka i opterećenja koja djeluju na njega prikazana su na slici 7.2.



Slika 7.2 Geometrija uzorka s provrtom (*Autodesk Inventor*)

U svrhu verifikacije numeričke analize, analitički proračun će biti proveden s opterećenjem $F = 1000 \text{ N}$ i uzorkom sa 100% ispune. Dimenzije uzorka su: duljina $l_7 = 200 \text{ mm}$, visina $h_7 = 30 \text{ mm}$, debljina $b_7 = 4 \text{ mm}$, promjer provrta $d_7 = 8 \text{ mm}$. Provrt se nalazi na sredini uzorka.

Na nekoj većoj udaljenosti od provrta, gdje je raspodjela naprezanja homogena, odnosno gdje koncentrator naprezanja više nema utjecaj na raspodjelu naprezanja, naprezanje iznosi:

$$\sigma = \frac{F}{A_7} = \frac{F}{h_7 \cdot b_7} = \frac{1000 \text{ N}}{30 \text{ mm} \cdot 4 \text{ mm}} = 8,33 \text{ N/mm}^2 \quad (22)$$

Budući da se ovdje radi o uzorku sa 100% ispune, modul elastičnosti iznosi $E_{t1,S} = 1806,94 \text{ MPa}$. Prema tome, deformacija će na većoj udaljenosti od provrta iznositi:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_{t1,S}} = \frac{8,33 \text{ N/mm}^2}{1806,94 \text{ N/mm}^2} = 0,004612 \quad (23)$$

Maksimalno naprezanje koje se javlja na provrtu zbog pojave koncentracije naprezanje može se odrediti kao [27]:

$$\sigma_{\max} = K_{\text{tg}} \cdot \sigma \quad (24)$$

gdje je:

σ_{\max} – maksimalno naprezanje na provrtu [N/mm^2],

K_{tg} – faktor koncentracije naprezanja [N/mm^2],

σ – naprezanje na presjeku bez utjecaja koncentracije naprezanja [N/mm^2].

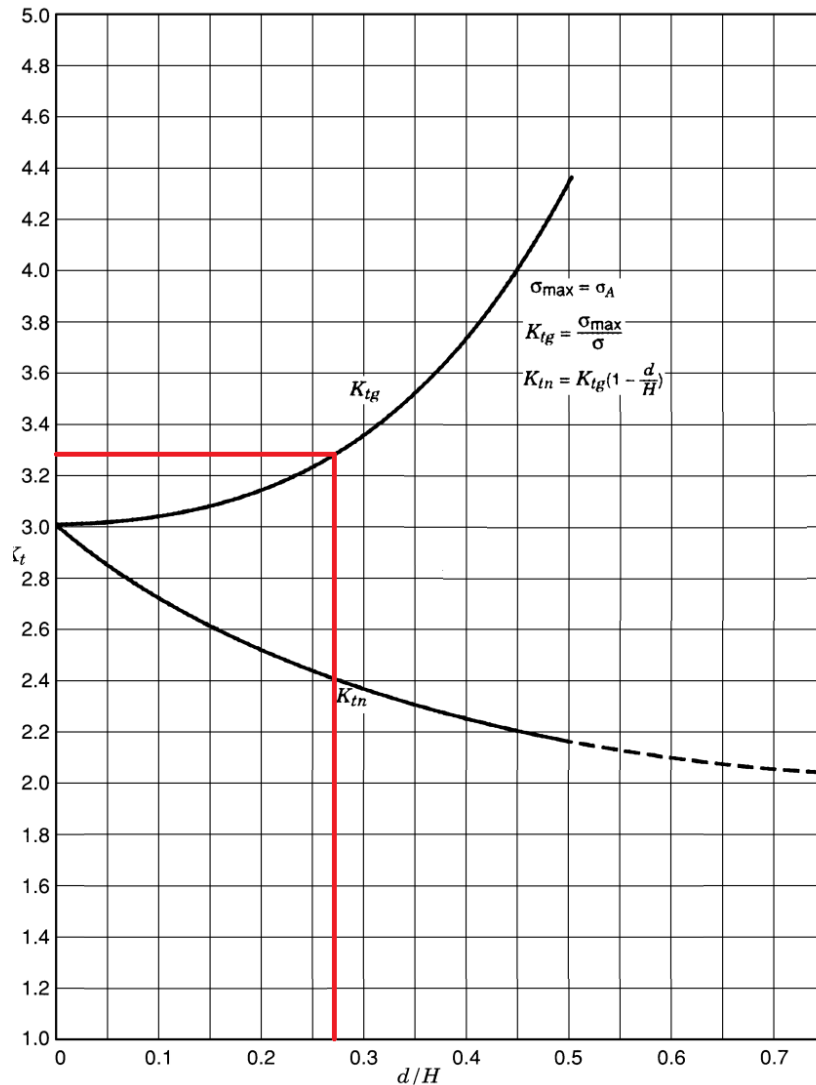
Faktor koncentracije naprezanja za ovaj slučaj (tanka pločica konačne širine s provrtom) se može odrediti prema jednadžbi [27]:

$$K_{\text{tg}} = 0,284 + \frac{2}{1 - \frac{d_7}{h_7}} - 0,600 \left(1 - \frac{d_7}{h_7}\right) + 1,32 \left(1 - \frac{d_7}{h_7}\right)^2 \quad (25)$$

$$K_{\text{tg}} = 0,284 + \frac{2}{1 - \frac{8}{30}} - 0,600 \left(1 - \frac{8}{30}\right) + 1,32 \left(1 - \frac{8}{30}\right)^2$$

$$K_{\text{tg}} = 3,281$$

Faktor koncentracije naprezanja se može odrediti i grafički. Na slici 7.3 prikazan je grafički postupak određivanja faktora koncentracije naprezanja. Na osi X označen je omjer promjera provrta i visine uzorka, a na osi Y se očitava K_{tg} (za $\frac{d_7}{h_7} = 0,267$, očitava se $K_{tg} \approx 3,28$).



Slika 7.3 Grafičko određivanje faktora koncentracije naprezanja [27]

Prema tome, maksimalno naprezanje na provrtu iznosi:

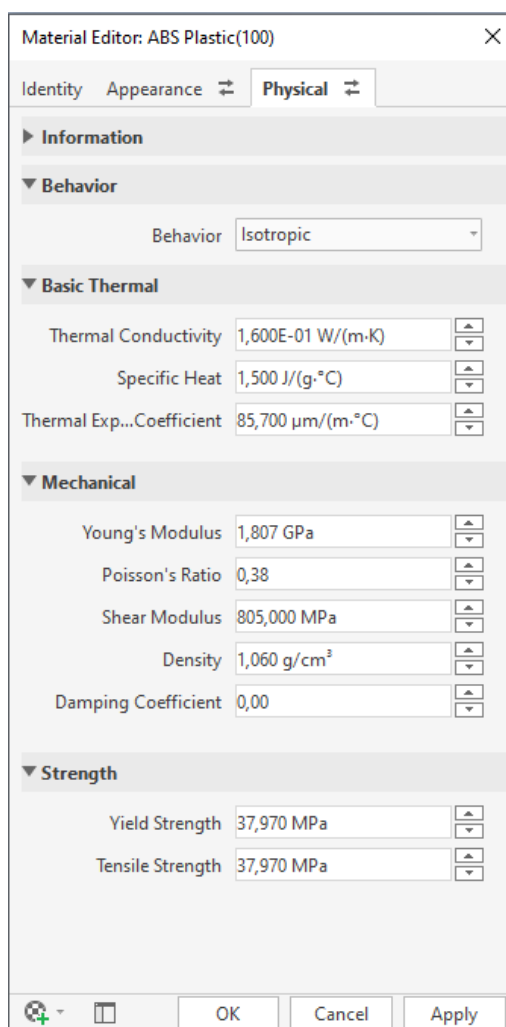
$$\sigma_{\max} = K_{tg} \cdot \sigma = 3,281 \cdot 8,33 = 27,33 \text{ N/mm}^2 \quad (26)$$

Odgovarajuća deformacija na tom mjestu je:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{\max}}{E_{t1,S}} = \frac{27,33 \text{ N/mm}^2}{1806,94 \text{ N/mm}^2} = 0,015125 \quad (27)$$

7.2. Numerička analiza

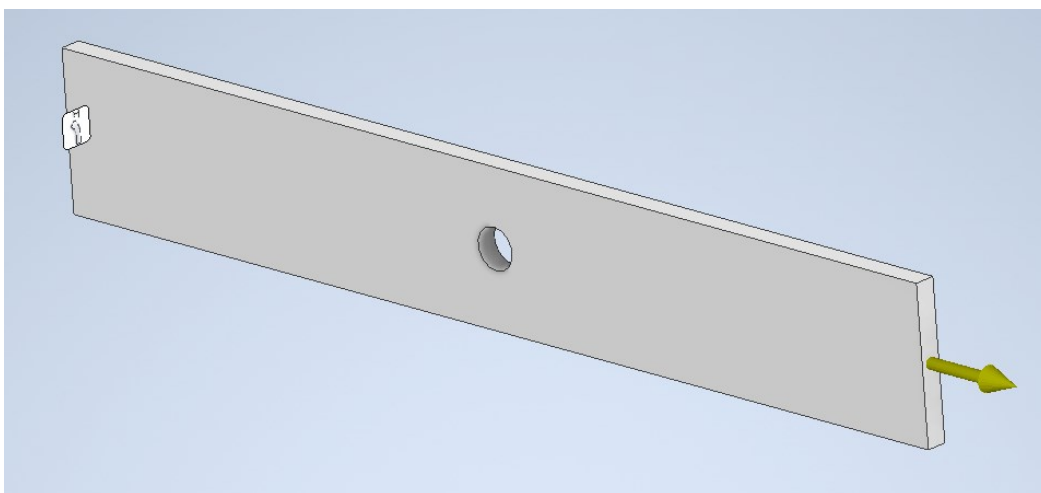
Numerička analiza u sklopu ovog rada provedena je u programu *Autodesk Inventor 2024*. Općenito, numerička analiza se provodi u nekoliko glavnih koraka. Prvi korak je definiranje materijala modela. Materijal se unutar programa odabire u izborniku *Assign Materials*. Materijal se može odabrati iz gotovih baza podataka u programu (ti materijali imaju već definirana fizikalna i mehanička svojstva) ili se svojstva materijala mogu definirati i mijenjati po potrebi. Za potrebe ove analize definirano je pet prilagođenih materijala temeljenih na unaprijed definiranim svojstvima ABS-a (iz baze podataka *Autodesk Inventor*), na način da su, ovisno o postotku ispune, promijenjene vrijednosti modula elastičnosti, granice razvlačenja i vlačne čvrstoće na ispitivanjem izmjerene vrijednosti prema tablici 6.12. Sučelje za definiranje svojstava materijala prikazano je na slici 7.4.



Slika 7.4 Definiranje svojstava materijala (*Autodesk Inventor*)

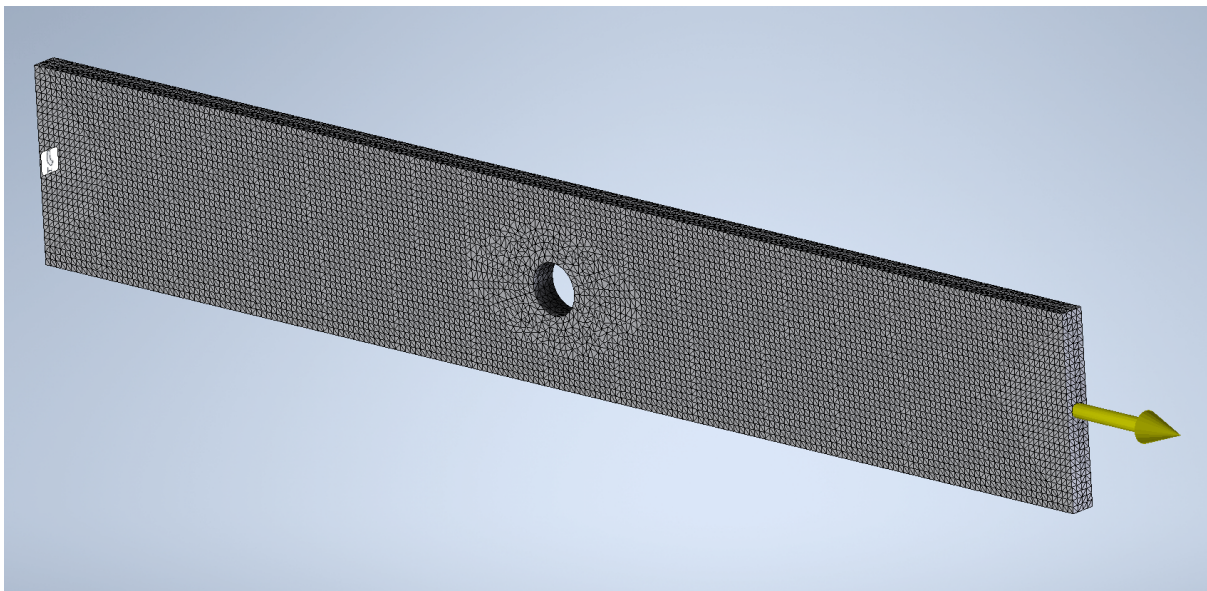
Na slici 7.4 prikazana su definirana svojstva za ABS sa 100% ispune. Ponašanje materijala definirano je kao izotropno, što znači da su svojstva materijala u svim smjerovima jednaka. Iako realni 3D tiskani modeli nikad nisu u potpunosti izotropni (zbog načina na koji se proizvode), ovdje će se modeli promatrati kao potpuno izotropni i homogeni. To znači da modeli s određenim postotkom ispune neće biti promatrani kao šuplji, nego potpuno ispunjeni, ali s prilagođenim mehaničkim svojstvima. Prosječna granica razvlačenja, odnosno vlačna čvrstoća za ABS sa 100% ispune iznosi $37,97 \text{ N/mm}^2$, dok je modul elastičnosti $1806,94 \text{ N/mm}^2$. Osim toga, vrijednosti ostalih svojstava (koeficijent toplinske vodljivosti, specifična toplina, koeficijent toplinskog razvlačenja, Poissonov koeficijent, modul smicanja i gustoća) su definirane prema postojećem predlošku za ABS.

Idući korak numeričke analize je postavljanje rubnih uvjeta – oslonaca i opterećenja. Model je definiran na način da je ploča s lijeve strane konzolno uležištena, odnosno ukliještena. Takva vrsta oslonca se u *Inventoru* definira pomoću naredbe *Fixed Constraint* (nakon odabira naredbe, odabire se ploha koju se želi ograničiti). Što se tiče opterećenja, ploča je s desne strane vlačno opterećena silom određenog iznosa, koja se definira pomoću naredbe *Force* (nakon odabira naredbe, definira se iznos i smjer djelovanja sile te ploha ili element na koji sila djeluje). Verifikacijski model je opterećen silom $F = 1000 \text{ N}$. Model s definiranim rubnim uvjetima prikazan je na slici 7.5.



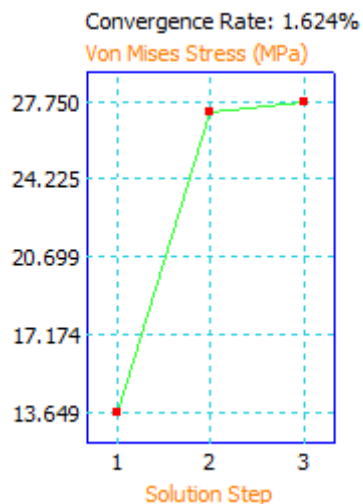
Slika 7.5 Definiranje rubnih uvjeta (*Autodesk Inventor*)

Sljedeći korak u izradi numeričke analize je omrežavanje (*meshing*). Da bi se numerička analiza mogla provesti, model je potrebno omrežiti, odnosno potrebno ga je prikazati kao skup određenog broja čvorova (*nodes*) i elemenata (veze između čvorova, u ovom slučaju su to 3D konačni elementi). Omrežavanje modela se postiže naredbom *Mesh View*. Mreža dobivena na ovaj način (automatski od programa, bez dodatnih postavki) može biti dovoljna za neke jednostavnije numeričke analize, ali često se parametri trebaju dodatno podešavati. Za potrebe ove analize, numerička mreža je prilagođena na način da je prosječna veličina elementa 0,005, a minimalna veličina elementa 0,01, dok postavke konvergencije (npr. maksimalni broj h poboljšanja, kriterij zaustavljanja) nisu mijenjane. Na mjestima gdje je potrebno detaljno analizirati gradijente pojedinih veličina, moguće je napraviti lokalno ugušćenje mreže (naredba *Local Mesh Control*). Na slici 7.6 prikazana je numerička mreža modela.



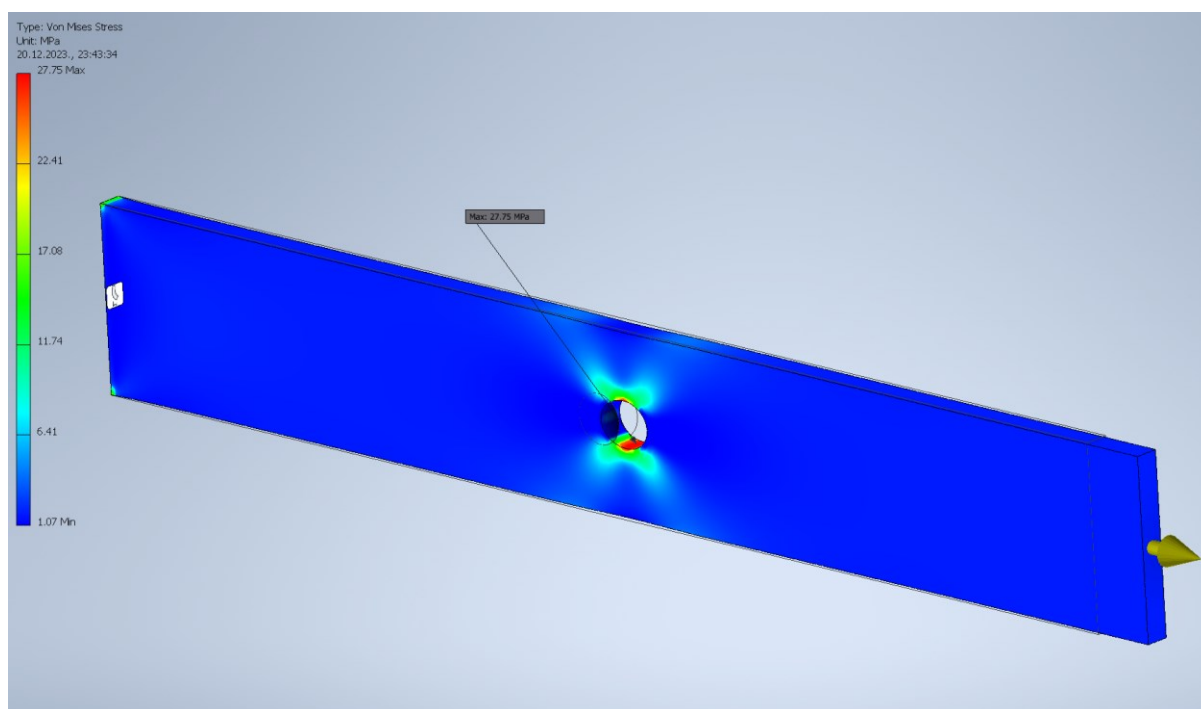
Slika 7.6 Numerička mreža (*Autodesk Inventor*)

Nakon odabira materijala, definiranja rubnih uvjeta i omrežavanja modela, numerička analiza se pokreće naredbom *Simulate*. Nakon što računalo provede analizu, dobivaju se rezultati simulacije (naprezanja, deformacije, pomaci, faktori sigurnosti). Jedan od pokazatelja uspješnosti numeričke analize je konvergencija. Ukoliko rezultati analize konvergiraju, odnosno postignu malu promjenu između dva koraka (iteracije) analize, ona se može smatrati uspješnom (kriterij zaustavljanja, odnosno postotak koji je potrebno zadovoljiti moguće je definirati u postavkama konvergencije). Graf konvergencije za verifikaciju modela prikazan je na slici 7.7.



Slika 7.7 Graf konvergencije kod verifikacije modela (*Autodesk Inventor*)

Rješenje je konvergiralo i može se pristupiti rezultatima analize. Model se verificira na temelju prethodno analitički proračunatog maksimalnog naprežanja u provrtu koje iznosi $\sigma_{\max} = 27,33 \text{ N/mm}^2$. Na slici 7.8 prikazani su rezultati ekvivalentnog naprežanja prema Von Mises-u za definirani model.



Slika 7.8 Ekvivalentna naprežanja prema Von Mises-u za verifikacijski model

Na slici 7.8 se očitava iznos maksimalnog ekvivalentnog naprezanja prema Von Mises-u u provrtu od $\sigma_{\max, \text{num}} = 27,75 \text{ N/mm}^2$. Uz Von Mises-ovo naprezanje, numeričkom analizom su dobiveni i podaci o maksimalnom prvom glavnom naprezanju koje iznosi $28,4 \text{ N/mm}^2$ i maksimalnom normalnom naprezanju u smjeru uzdužne osi koje također iznosi $28,4 \text{ N/mm}^2$. Obzirom da su rezultati analitičkog i numeričkog rješenja vrlo slični, može se zaključiti da je numerički model relevantan i nastaviti s daljnjom analizom.

Cilj ove numeričke analize je odrediti nosivost zadanih modela s različitim postocima ispunje, odnosno odrediti najveća dopuštena vanjska opterećenja koja model može podnijeti bez otkazivanja i gubljenja funkcije. Okvirne vrijednosti sila, prema kojima su se odredile dopuštene sile unutar analize, dobivene su proračunom naprezanja uz definirani faktor sigurnosti $S = 2$. Podaci o dopuštenim naprezanjima i silama za različite postotke ispunje prikazani su u tablici 7.1.

$$\sigma_{\text{dop}} = \frac{R_e}{S} \quad (28)$$

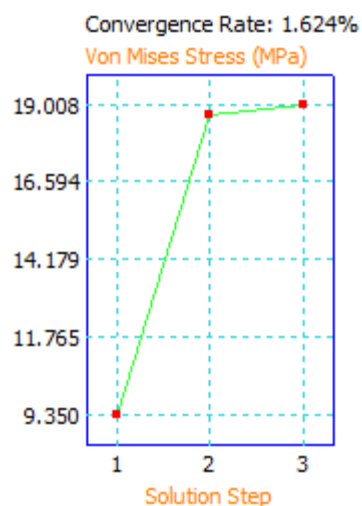
$$F_{\text{dop}} = \frac{\sigma_{\text{dop}}}{K_{\text{tg}}} \cdot A = 36,57 \cdot \sigma_{\text{dop}} \quad (29)$$

Tablica 7.1 Dopuštena naprezanja i opterećenja za uzorke s različitim postocima ispunje

	R_e [N/mm ²]	σ_{dop} [N/mm ²]	F_{dop} [N]
100%	37,97	18,99	694,46
80%	27,39	13,70	501,01
60%	23,14	11,57	423,11
40%	24,85	12,43	454,57
20%	22,59	11,30	413,24

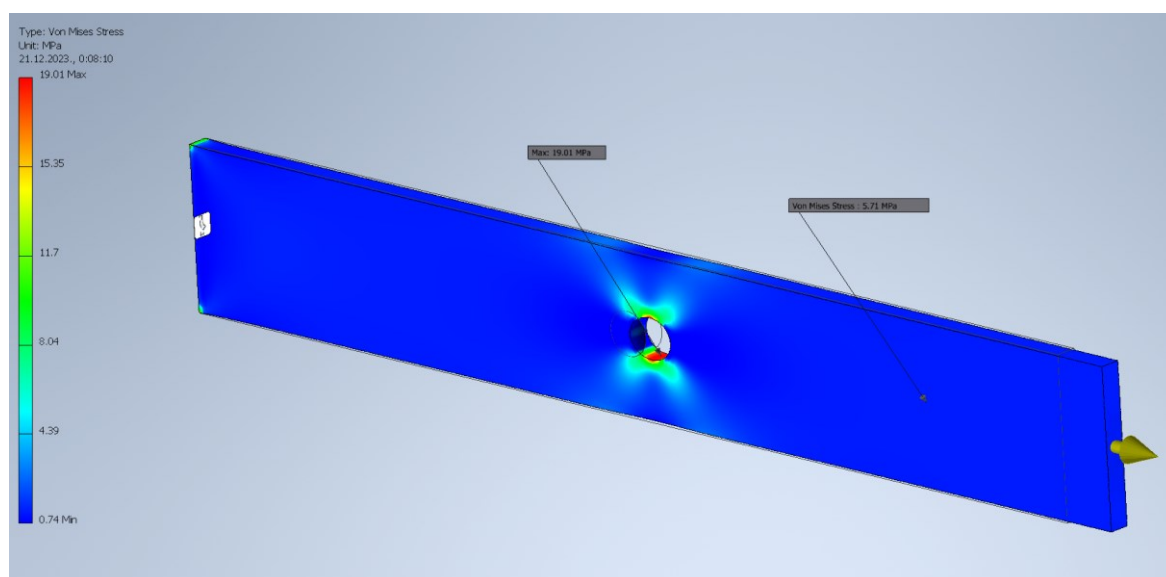
7.3. Rezultati

Za modele s različitim postocima ispune provedene su numeričke analize i dobiveni su rezultati. Svih pet analiza (za različite postotke ispune) je uspješno konvergiralo, a njihov graf konvergencije je prikazan na slici 7.9. Graf konvergencije je za sve analize jednak jer su parametri mreže i rubni uvjeti jednaki. Za ovako relativno jednostavan model rješenje je konvergiralo u 3 koraka te provođenje daljnjih iteracija nije bilo potrebno.



Slika 7.9 Graf konvergencije za provedene numeričke analize (*Autodesk Inventor*)

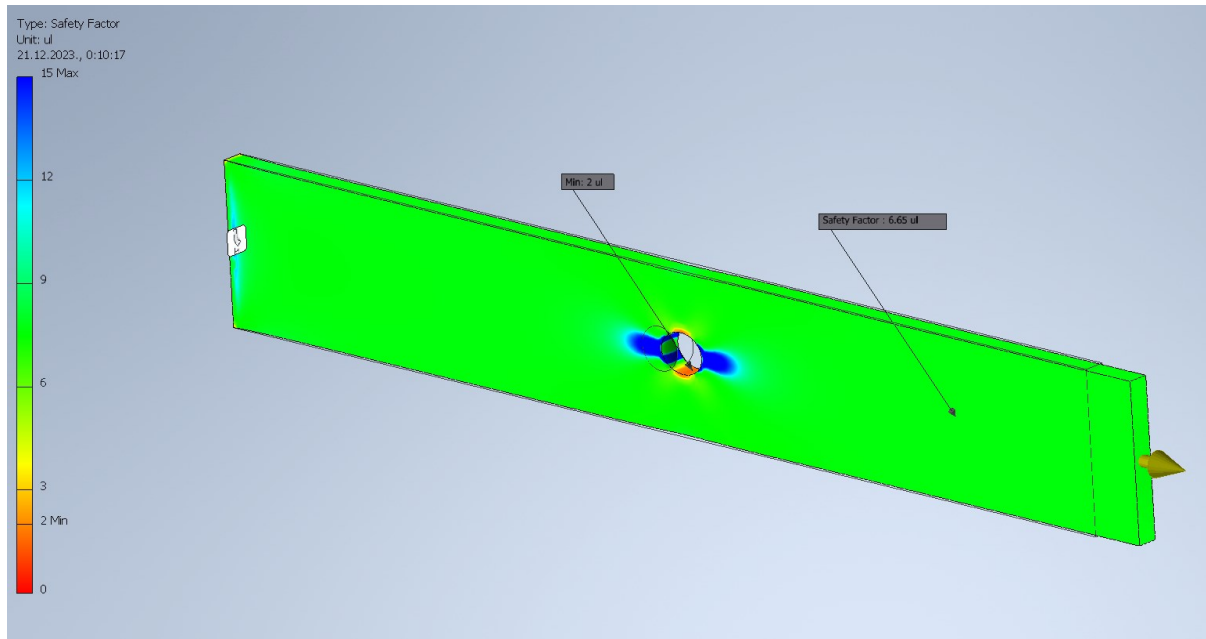
Uzorak sa 100% ispune bio je opterećen silom $F_{dop,100} = 685$ N. Raspodjela ekvivalentnog naprezanja prema Von Mises-u za prvi model prikazana je na slici 7.10.



Slika 7.10 Ekvivalentna naprezanja prema Von Mises-u za model sa 100% ispune

Prema slici 7.10, maksimalno ekvivalentno naprezanje prema Von Mises-u iznosi $19,01 \text{ N/mm}^2$, a nalazi se pri dnu i vrhu površine provrta. Provrt kao koncentrator naprezanja utječe na raspodjelu naprezanja u bliskom području, dok se na većoj udaljenosti naprezanja izjednačuju. Na većoj udaljenosti od provrta naprezanje iznosi $5,71 \text{ N/mm}^2$.

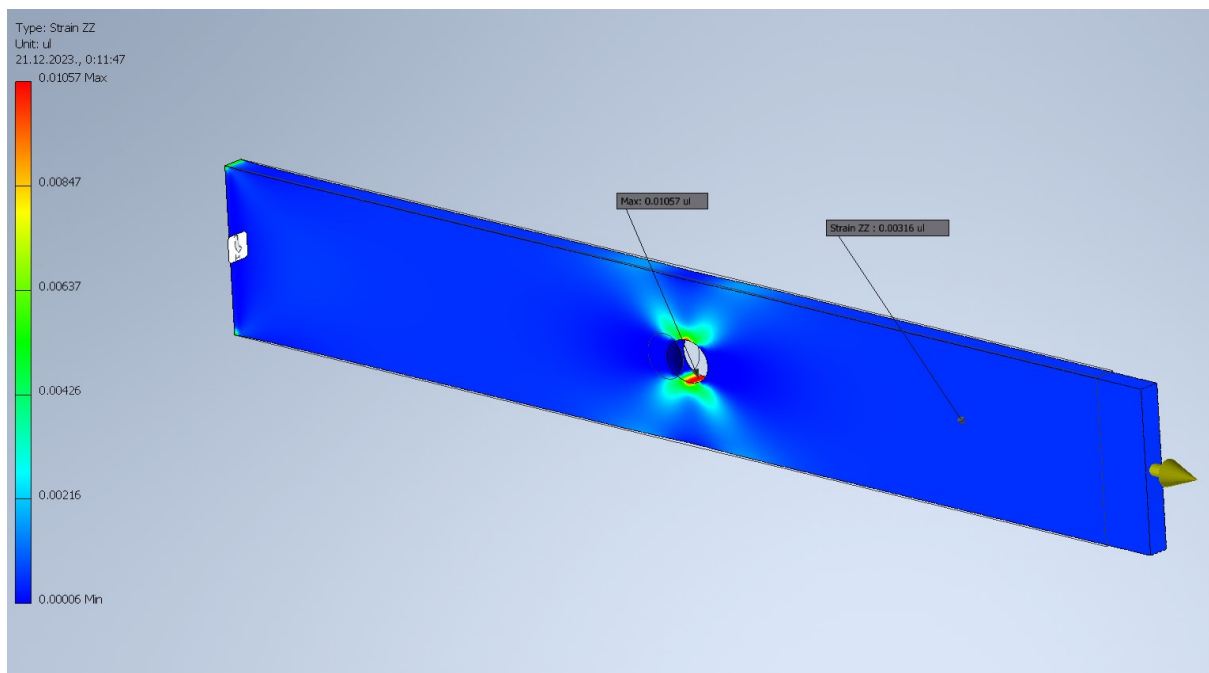
Na slici 7.11 prikazani su faktori sigurnosti za prvi model.



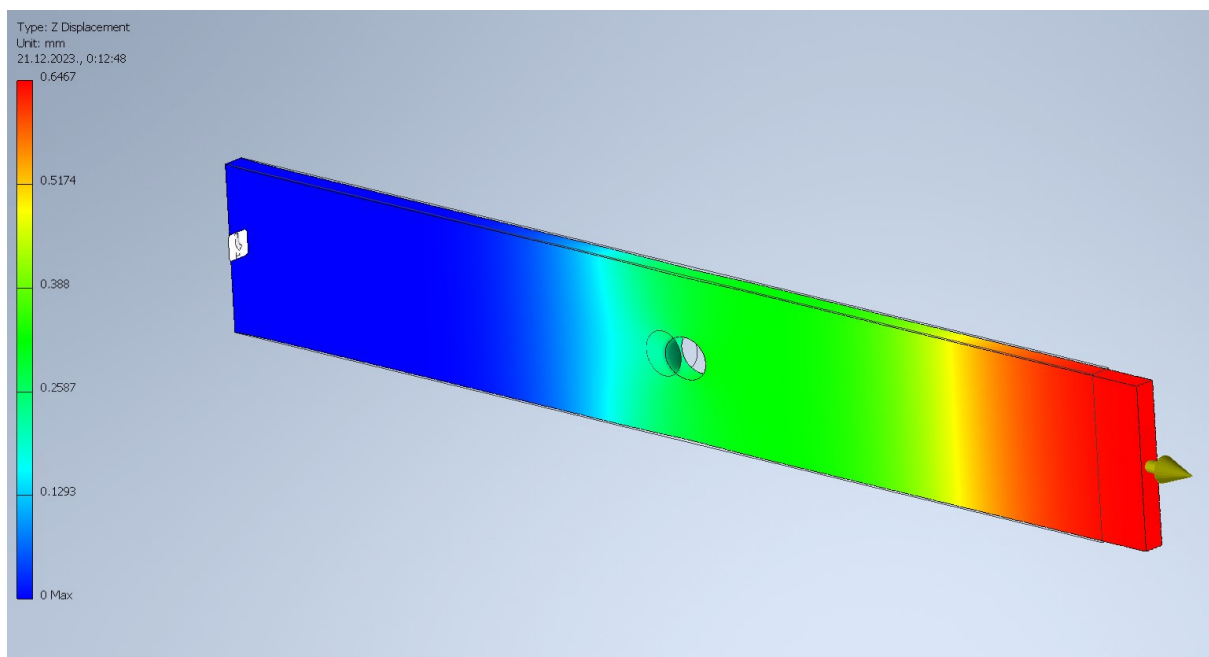
Slika 7.11 Faktori sigurnosti za model sa 100% ispune

Na slici se može vidjeti da je faktor sigurnosti na mjestu najvećeg naprezanja $S_{100,\min} = 2$, dok je na većoj udaljenosti od provrta $S_{100} = 6,66$.

Na slici 7.12 prikazane su deformacije, a na slici 7.13 pomaci u smjeru uzdužne osi.



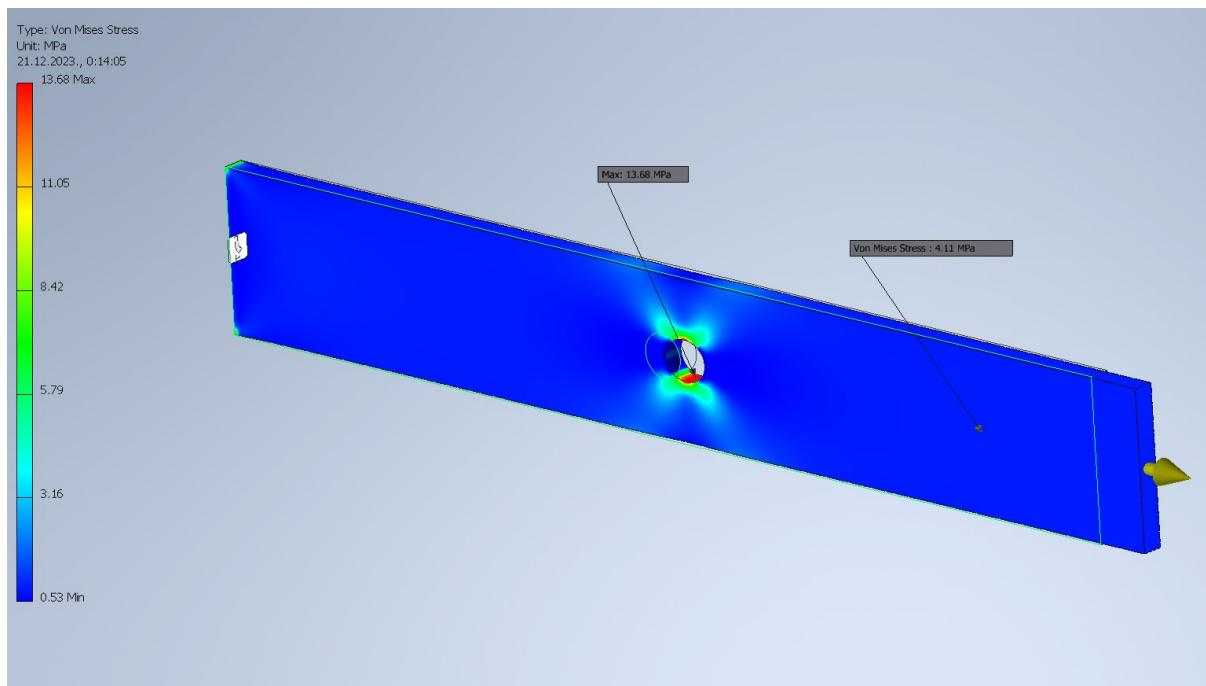
Slika 7.12 Deformacije u smjeru uzdužne osi za model sa 100% ispune



Slika 7.13 Pomaci u smjeru uzdužne osi za model sa 100% ispune

Na slici 7.12 se može vidjeti da deformacije u smjeru uzdužne osi iznose 0,01057 na dnu, te 0,00316 na većoj udaljenosti od provrta, dok prema slici 7.13 ukupni pomak u smjeru uzdužne osi iznosi $\Delta L_{100} = 0,6467$ mm.

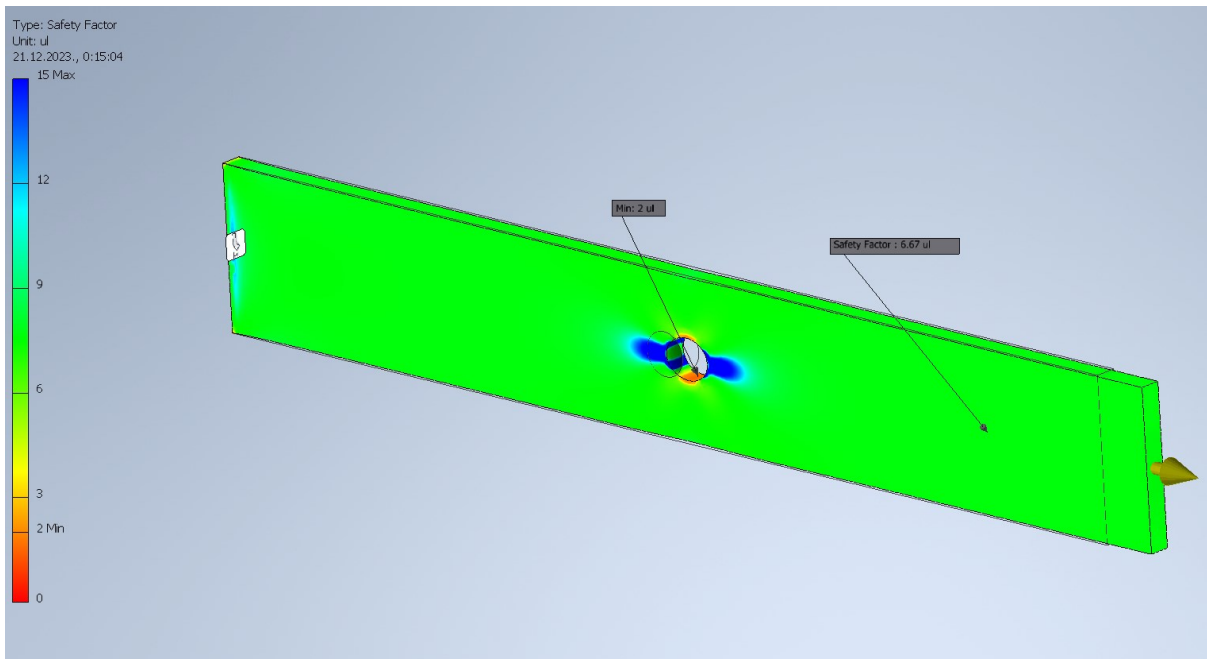
Uzorak sa 80% ispune bio je opterećen silom $F_{dop,80} = 493$ N. Raspodjela ekvivalentnog naprezanja prema Von Mises-u za drugi model prikazana je na slici 7.14.



Slika 7.14 Ekvivalentna naprezanja prema Von Mises-u za model s 80% ispune

Prema slici 7.14, maksimalno ekvivalentno naprezanje prema Von Mises-u iznosi 13,68 N/mm². Na većoj udaljenosti od provrta naprezanje iznosi 4,11 N/mm².

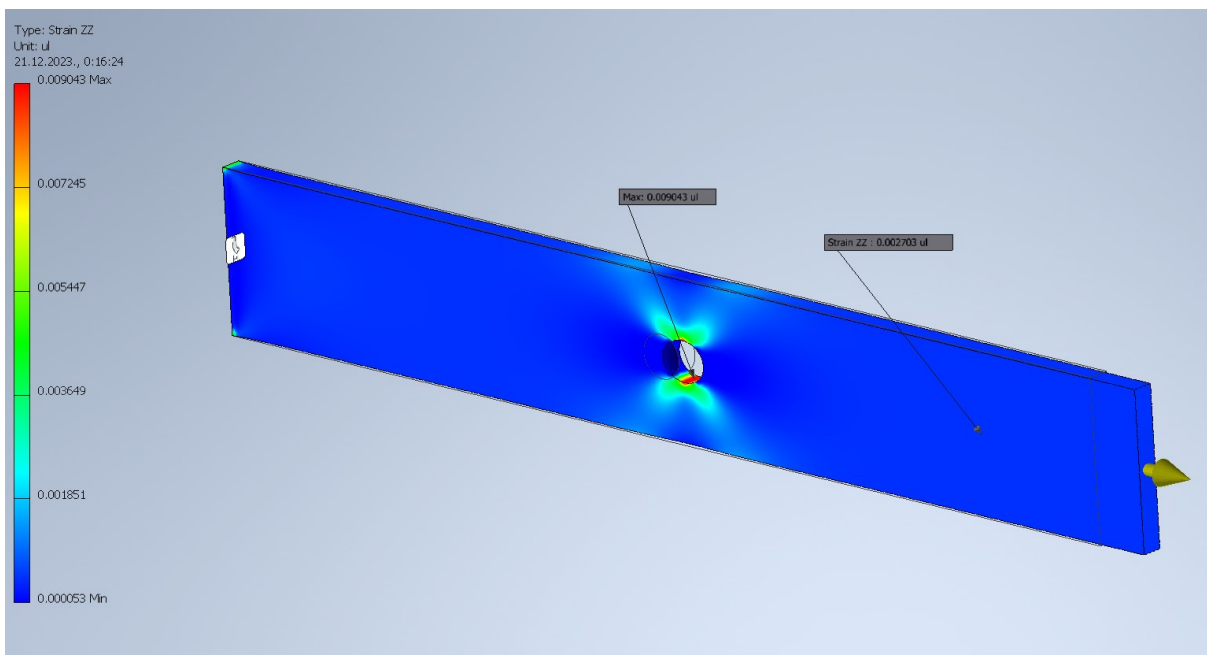
Na slici 7.15 prikazani su faktori sigurnosti za drugi model.



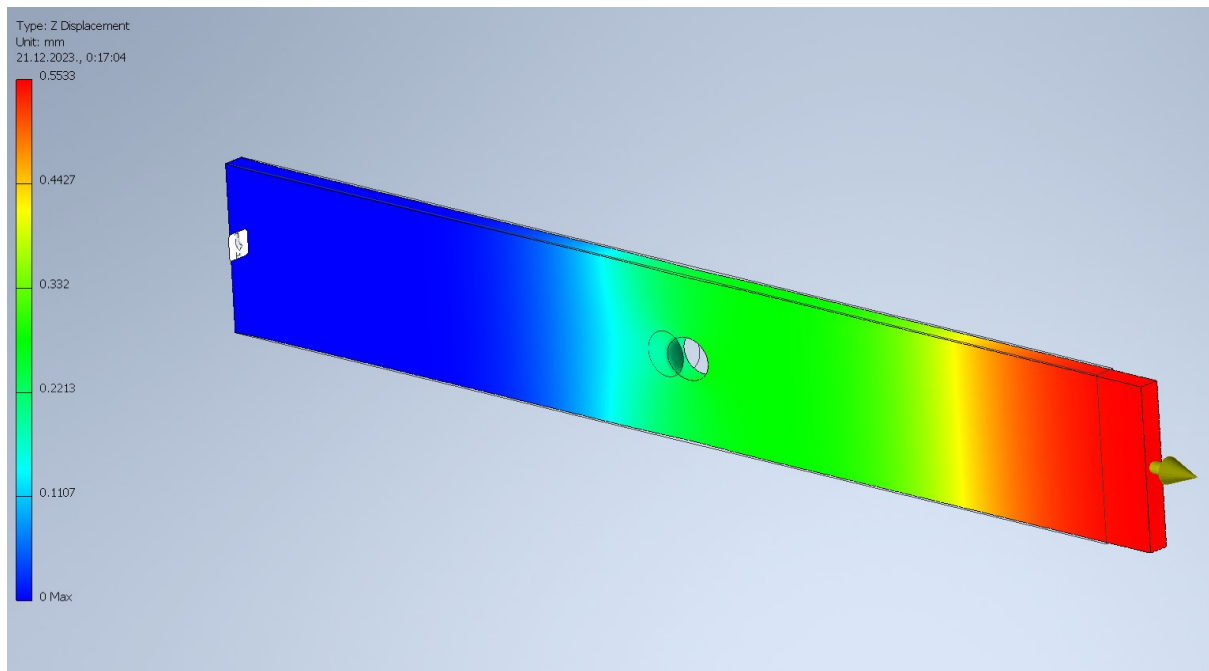
Slika 7.15 Faktori sigurnosti za model s 80% ispune

Na slici se može vidjeti da je faktor sigurnosti na mjestu najvećeg naprezanja $S_{80,\min} = 2$, dok je na većoj udaljenosti od provrta $S_{80} = 6,66$

Na slici 7.16 prikazane su deformacije, a na slici 7.17 pomaci u smjeru uzdužne osi.



Slika 7.16 Deformacije u smjeru uzdužne osi za model s 80% ispune



Slika 7.17 Pomaci u smjeru uzdužne osi za model s 80% ispune

Na slici 7.16 se može vidjeti da deformacije u smjeru uzdužne osi iznose 0,009043 na dnu, te 0,00270 na većoj udaljenosti od provrta, dok prema slici 7.17 ukupni pomak u smjeru uzdužne osi iznosi $\Delta L_{80} = 0,5533$ mm.

Numeričke analize za modele s 60%, 40% i 20% ispune su u potpunosti ekvivalentne analizama za 80% i 100% ispune. Vrijednosti sila te rezultati svih numeričkih analiza navedeni su u tablici 7.2.

Tablica 7.2 Rezultati numeričkih analiza za modele s različitim postocima ispune

	F [N]	$\sigma_{\text{ekv,max}}$ [N/mm ²]	σ_{ekv} [N/mm ²]	S_{min}	S	ϵ_{max}	ϵ	ΔL [mm]
100%	685	19,01	5,71	2	6,66	0,01057	0,00316	0,6467
80%	493	13,68	4,11	2	6,66	0,009043	0,00270	0,5533
60%	416	11,54	3,47	2	6,66	0,008466	0,00253	0,5180
40%	448	12,43	3,73	2	6,66	0,009104	0,00272	0,5571
20%	407	11,29	3,39	2	6,66	0,009188	0,00275	0,5622

Uzorak sa 60% ispune bio je opterećen silom $F_{dop,60} = 416$ N. Maksimalno ekvivalentno naprežanje tog uzorka prema Von Mises-u iznosi $11,54$ N/mm². dok na većoj udaljenosti od provrta naprežanje iznosi $3,47$ N/mm². Faktor sigurnosti na mjestu najvećeg naprežanja je $S_{60,min} = 2$, dok je na većoj udaljenosti od provrta $S_{60} = 6,66$. Deformacije u smjeru uzdužne osi iznose $0,008466$ na dnu, te $0,00253$ na većoj udaljenosti od provrta, dok ukupni pomak u smjeru uzdužne osi iznosi $\Delta L_{60} = 0,5180$ mm.

Uzorak sa 40% ispune bio je opterećen silom $F_{dop,40} = 448$ N. Maksimalno ekvivalentno naprežanje tog uzorka prema Von Mises-u iznosi $12,43$ N/mm². dok na većoj udaljenosti od provrta naprežanje iznosi $3,73$ N/mm². Faktor sigurnosti na mjestu najvećeg naprežanja je $S_{40,min} = 2$, dok je na većoj udaljenosti od provrta $S_{40} = 6,66$. Deformacije u smjeru uzdužne osi iznose $0,009104$ na dnu, te $0,00272$ na većoj udaljenosti od provrta, dok ukupni pomak u smjeru uzdužne osi iznosi $\Delta L_{40} = 0,5571$ mm.

Uzorak sa 20% ispune bio je opterećen silom $F_{dop,20} = 407$ N. Maksimalno ekvivalentno naprežanje tog uzorka prema Von Mises-u iznosi $11,29$ N/mm². dok na većoj udaljenosti od provrta naprežanje iznosi $3,39$ N/mm². Faktor sigurnosti na mjestu najvećeg naprežanja je $S_{20,min} = 2$, dok je na većoj udaljenosti od provrta $S_{20} = 6,66$. Deformacije u smjeru uzdužne osi iznose $0,009188$ na dnu, te $0,00275$ na većoj udaljenosti od provrta, dok ukupni pomak u smjeru uzdužne osi iznosi $\Delta L_{20} = 0,5622$ mm.

Rezultati su konzistentni i očekivani obzirom na poznata svojstva materijala. Dobivene sile predstavljaju najveći iznos sile koji model može podnijeti bez otkazivanja i gubljenja funkcije. Maksimalna naprežanja su direktno ovisna o sili pojedinog modela pa njihove vrijednosti prate promjene sile. Omjer najvećeg naprežanja i naprežanja dalje od koncentratora naprežanja otprilike iznosi $K_{tg} = 3,281$. Faktori sigurnosti su za sve analize jednaki. Što se tiče deformacija i produljenja, zanimljivo je primijetiti da oni padaju od 100% do 60%, a nakon toga, od 60% do 20% rastu. Ti su rezultati dobiveni na temelju izmjerenih podataka za modul elastičnosti, granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću, koji su u program uneseni kao parametri za zadani materijal. Na temelju njih se ne može donijeti zaključak o općenitom ponašanju materijala jer uvelike ovise o preciznosti i relevantnosti provedenog vlačnog ispitivanja.

8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je analizirati utjecaj procesnih parametara na mehanička svojstva materijala. Promatran je utjecaj postotka ispune na ispitnim uzorcima od ABS-a. Provedena su vlačna ispitivanja na dvije različite kidalice prema normi ISO 527. Dan je teorijski pregled suvremenih aditivnih tehnologija s naglaskom na 3D tisak, polimera s naglaskom na ABS i norme ISO 527. Nakon provođenja ispitivanja napravljena je analiza utjecaja postotka ispune na mehanička svojstva materijala, te su sistematično prikazani dobiveni rezultati. Na temelju dobivenih svojstava napravljena je numerička analiza u programu *Autodesk Inventor*, pri čemu su određena dopuštena opterećenja odabranih uzoraka s različitim postocima ispune.

Epruvete su na prvom vlačnom ispitivanju bile uspješno pokidane i rezultati su bili konzistentni i s manjim odstupanjima. Mehanička svojstva trećeg uzorka sa 100% ispune su bile nešto lošija od ostatka iz razloga što je taj uzorak bio tiskan u drugom setu, a identične uvjete 3D tiska nije moguće ponoviti. Ta je epruveta i dalje uzeta kao relevantna, za razliku od prvog uzorka s 80% ispune koji je pukao izvan središnjeg dijela, na mjestu gdje se inače postavlja ekstenzometar, pa su njegovi rezultati zanemareni.

Svrha drugog vlačnog ispitivanja bila je precizno određivanje modula elastičnosti pomoću ekstenzometra. Rezolucija ekstenzometra je bila 10 μm , što je dovelo do dosta grubih rezultata za potrebe određivanja modula elastičnosti. Sekantni modul elastičnosti se prema normi ISO 527 proračunava unutar granica $\varepsilon_1 = 0,0005$ i $\varepsilon_2 = 0,0025$. Te granice su u ovom slučaju bile „prefine“, pa je prilikom određivanja sekantnog modula jako ovisilo koje se naprezanje odabire za proračun (npr. pri $\varepsilon_1 = 0,0005$ odgovarajuće naprezanje može biti definirano kao $\sigma = 1,38 \text{ N/mm}^2$, ali također i $\sigma = 1,74 \text{ N/mm}^2$). Iz tog razloga dobiveni moduli elastičnosti nisu bili konzistentni, pa su moduli elastičnosti dodatno određeni linearnom regresijom, najprije na prethodno spomenutom intervalu istezanja, a onda i na širem ($\varepsilon_1 = 0,001$ i $\varepsilon_2 = 0,01$). Modul elastičnosti na prvom intervalu je isto dao nekonzistentne rezultate, dok se najbolje pokazala linearna regresija na širem intervalu. Modul elastičnosti određen na taj način, iako nije normiran, se pokazao kao najrelevantnija opcija za ovaj set podataka i dao je najsličnije rezultate prvom ispitivanju.

Za različite postotke ispune (100%, 80%, 60%, 40% i 20%) određene su prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava – granice razvlačenja i vlačne čvrstoće te pripadajućeg istežanja, naprezanja pri lomu i pripadajućeg istežanja, te sekantnog modula elastičnosti. Dobivene okvirne vrijednosti modula elastičnosti za ABS su: 100% ispune 1800 N/mm², 80% ispune od 1450 N/mm² do 1520 N/mm², 60% ispune 1260 N/mm² do 1370 N/mm², 40% ispune 1240 N/mm² do 1370 N/mm² i 20% ispune 1150 N/mm² do 1230 N/mm². Prema normi ISO 527, modul elastičnosti za ABS iznosi 1799 N/mm², stoga se može smatrati da su dobiveni rezultati relevantni. Vlačna čvrstoća, odnosno granica razvlačenja iznosi 37,97 N/mm² pri istežanju 0,03393 za 100% ispune, 27,39 N/mm² pri istežanju 0,03028 za 80% ispune, 23,14 N/mm² pri istežanju 0,02828 za 60% ispune, 24,85 N/mm² pri istežanju 0,02843 za 40% ispune i 22,59 N/mm² pri istežanju 0,02986 za 20% ispune. Uzorak sa 100% ispune, kao što je i očekivano, ima najbolja mehanička svojstva. Zanimljivo je da uzorci s 60% do 20% ispune imaju vrlo slična mehanička svojstva, gdje uzorci s 40% ispune čak imaju i najviše vrijednosti granice razvlačenja (vlačne čvrstoće) i modula elastičnosti. Do ovakvog ponašanja materijala je najvjerojatnije došlo zbog geometrije samih epruveta. Kod ovako malih i tankih uzoraka većinu opterećenja preuzima stijenka uzorka (nominalna debljina epruvete je 4 mm, a debljina svake stijenke iznosi 0,86 mm). Drugim riječima, stijenka epruvete postaje dominantna pri nošenju opterećenja, a ispuna preuzima manji dio i nema veliki utjecaj na mehanička svojstva pri manjim postocima ispune. Vremena ispisa pojedinačnih epruveta nisu drastično različita – vrijeme potrebno za ispis s 80% i 100% ispunom (39 min) veće je samo 7 minuta od 20% ispune (32 min), 5 minuta od 40% ispune (34 min) i 2 minute od 20% ispune (37 min). Opet, ovdje razlike nisu velike jer se radi o malim i tankim uzorcima pa se veliki dio vremena ispisa odnosi na vrijeme ispisa stijenke epruvete koji je kod svih jednak. Ako se govori o optimalnom postotku ispune za ABS kod ovako tankih uzoraka, to je vjerojatno za većinu slučajeva 40% ispune, jer su mehanička svojstva ekvivalentna uzorcima s 60% ispune (i nisu puno lošija od 80%) i dodatno postoji relativno mala ušteda na vremenu i materijalu. Za neke specifične primjene kod kojih je potrebna maksimalna čvrstoća moguće je primijeniti i ABS s 100% ispune.

9. LITERATURA

- [1] Bitfab: “What is additive manufacturing?”, s Interneta, <https://bitfab.io/blog/additive-manufacturing/>, 15.07.2023.
- [2] Animalventures: “Additive manufacturing vs traditional manufacturing”, s Interneta, <https://blog.animalventures.com/blog/additive-manufacturing-vs-traditional-manufacturing/>, 15.07.2023.
- [3] Linke R.: “Additive manufacturing, explained”, s Interneta, <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/additive-manufacturing-explained>, 15.07.2023.
- [4] Engineering product design: “Additive manufacturing”, s Interneta, <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/additive-manufacturing-processes/>, 15.07.2023.
- [5] Jones J. B.: “AM basics”, s Interneta, <https://additivemanufacturing.com/basics/>, 15.07.2023.
- [6] GE additive: “Additive manufacturing”, s Interneta, <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>, 15.07.2023.
- [7] Norma ISO/ASTM 52900:2021(en), s Interneta <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>, 15.07.2023.
- [8] Halicioglu F. H., Korafay S.: “Analiza primjenjivosti metoda aditivne proizvodnje u građevinskim projektima”, s Interneta, <https://hrcak.srce.hr/file/346030>, 15.07.2023.
- [9] Prusa: “Original Prusa MK4 3D Printer kit“, s Interneta, <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-mk4-kit-2/>, 10.09.2023.
- [10] 3Dmaker engineering: “How 3D printing works”, s Interneta, <https://www.3dmakerengineering.com/blogs/3d-printing/how-3d-printing-works>, 10.09.2023.
- [11] 3Dnatives, Alexandra P.: „A Closer Look at 3D Printing Materials: Plastics“, s Interneta, <https://www.3dnatives.com/en/plastics-used-3d-printing110420174/#!>, 10.09.2023.
- [12] Fabweaver: „3D printing types“, s Interneta, <https://blog.fabweaver.com/3d-printing-type-fff-printing-variant-pallet-3d-printing-0>, 10.09.2023.
- [13] Suwanpreecha C., Manonukul A.: „A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding“, s Interneta, <https://encyclopedia.pub/entry/23676>, 10.09.2023.

- [14] Desktop metal: „Deep Dive: Bound Metal Deposition (BMD)“, s Interneta, <https://www.desktopmetal.com/resources/deep-dive-bmd>, 10.09.2023.
- [15] 3Dnatives, Alex M: „The Types Of FDM 3D Printer“, s Interneta, <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/#!>, 10.09.2023.
- [16] Fabweaver: „FFF 3D printer“, s Interneta, https://blog.fabweaver.com/3d-printing-method-fff-most-popular-3d-printer-0_, 10.09.2023.
- [17] TWI: “What is material extrusion?”, s Interneta, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-material-extrusion>, 10.09.2023.
- [18] Mladen Franz: “Mehanička svojstva materijala”, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.
- [19] Ispitivanje: “Univerzalna kidalica inspekt blue za standardna ispitivanja”, s Interneta, <https://www.ispitivanje.com/univerzalna-kidalica-inspekt-blue-za-standardna-ispitivanja/>, 10.09.2023.
- [20] Norma ISO 527
- [21] Šercer M., Križan B., Basan R.: “Konstruiranje polimernih proizvoda”, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [22] Omnexus: “Comprehensive Guide on Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)”, s Interneta, <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-plastic>, 26.11.2023.
- [23] Prusa: “Original Prusa i3 MK3S+ 3D printer“, s Interneta, <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-i3-mk3s-3d-printer-3/#specs>, 26.11.2023.
- [24] Cesare Galdabini SpA: “Quasar – Instructions for use and maintenance”
- [25] Shimadzu: “AGS – x series”, s interneta, https://www.shimadzu.hr/ags-x-series-0_, 26.11.2023
- [26] Koči J.: “Everything you need to know about infills”, s Interneta, https://blog.prusa3d.com/everything-you-need-to-know-about-infills_43579/, 26.11.2023.
- [27] Peterson R. E.: „Stress concentration factors”, John Wiley & Sons, New York, 1974.

10. POPIS OZNAKA

A – površina poprečnog presjeka epruvete [mm^2]

A_{ist} – istežljivost [%]

A_{stv} – stvarna površina poprečnog presjeka [mm^2]

A_u – površina poprečnog presjeka epruvete na mjestu prijeloma [mm^2]

A_0 – početna površina poprečnog presjeka epruvete [mm^2]

b – širina epruvete [mm]

E, E_t – modul elastičnosti (Youngov modul) [N/mm^2]

\bar{E}_t – srednji modul elastičnosti [N/mm^2]

$E_{t1,S}$ – sekantni modul elastičnosti iz drugog vlačnog ispitivanja [N/mm^2]

$E_{t2,S}$ – sekantni modul elastičnosti iz prvog vlačnog ispitivanja [N/mm^2]

$E_{t2,\text{reg1}}$ - modul elastičnosti iz drugog ispitivanja određen linearnom regresijom na manjem intervalu [N/mm^2]

$E_{t2,\text{reg2}}$ - modul elastičnosti iz drugog ispitivanja određen linearnom regresijom na većem intervalu [N/mm^2]

ε – istežanje (relativno produljenje epruvete) [mm/mm]

$\varepsilon_e, \varepsilon_y$ – istežanje pri tečenju [mm/mm]

$\varepsilon_k, \varepsilon_b$ – istežanje pri lomu [mm/mm]

ε_m – istežanje pri vlačnoj čvrstoći [mm/mm]

ε_t – nominalno istežanje [mm/mm]

ε_{tb} – nominalno istežanje pri lomu [mm/mm]

ε_{tm} – nominalno istežanje pri vlačnoj čvrstoći [mm/mm]

$\Delta\varepsilon$ – promjena istežanja u rasponu u kojem se određuje modul elastičnosti

F – sila [N]

\dot{F} – porast sile u vremenu [N/s]

F_{dop} – dopušteno opterećenje (sila) [N]

F_e – sila razvlačenja (tečenja) [N]

F_k – sila kod koje dolazi do loma epruvete [N]

F_m – maksimalna sila [N]
 f_{force} – (minimalna) frekvencija zapisa podataka o sili [Hz]
 f_{min} – (minimalna) frekvencija zapisa podataka o produljenju [Hz]
 $GL(E)$ – početna mjerna duljina ekstenzometra [mm]
 $GL(G)$ – udaljenost između čeljusti kidalice [mm]
 h – debljina epruvete [mm]
 K_{tg} – faktor koncentracije naprezanja [N/mm^2]
 L – početna udaljenost čeljusti kidalice [mm]
 ΔL – produljenje mjerne duljine epruvete [mm]
 L_0 – početna mjerna duljina epruvete [mm]
 L_t – povećanje udaljenosti čeljusti kidalice u odnosu na početnu [mm]
 ΔL_t – povećanje udaljenosti čeljusti kidalice od granice tečenja na dalje [mm]
 L_u – konačna mjerna duljina epruvete [mm]
 ΔL_u – ukupno produljenje mjerne duljine epruvete [mm]
 μ – Poissonov koeficijent
 n_0 – mjerna duljina u poprečnom smjeru [mm]
 Δn – smanjenje duljine epruvete u poprečnom smjeru [mm]
 r – minimalna rezolucija signala
 S, S_{min} – (minimalni) faktor sigurnosti
 σ – (inženjersko) naprezanje [N/mm^2]
 σ_{dop} – dopušteno naprezanje [N/mm^2]
 σ_s – stvarno naprezanje [N/mm^2]
 σ_1 – naprezanje pri vrijednosti istezanja $\varepsilon_1 = 0,0005$ [MPa]
 σ_2 – naprezanje pri vrijednosti istezanja $\varepsilon_2 = 0,0025$ [MPa]
 R_e, σ_y – granica razvlačenja (tečenja) [N/mm^2]
 R_m, σ_m – vlačna (rastezna) čvrstoća [N/mm^2]
 R_k, σ_b – naprezanje pri lomu [N/mm^2]
 v – brzina ispitivanja [mm/min]
 Z – kontrakcija [%]

11. POPIS SLIKA

Slika 2.1 Usporedba aditivne proizvodnje i proizvodnje odvajanjem čestica [1].....	2
Slika 2.2 Vrste aditivne proizvodnje [5].....	4
Slika 2.3 Tipičan izgled FDM 3D printera [9].....	7
Slika 2.4 Postupak pripreme objekta za 3D tisak [10].....	8
Slika 2.5 Vrste 3D printera s obzirom na kretanje glave ekstrudera u prostoru [16]	10
Slika 3.1 Izgled tipične kidalice [19]	12
Slika 3.2 Primjer standardne epruvete (1BA i 1BB, ISO 527) [20]	13
Slika 3.3 Dijagram sila F – produljenje ΔL za tipični konstrukcijski čelik [18]	14
Slika 3.4 Dijagram naprezanje σ – istežanje ε za konstrukcijski čelik [18].....	16
Slika 3.5 Konvencionalne granice razvlačenja [18]	18
Slika 3.6 Dijagrami naprezanje σ – istežanje ε za metalne materijale [18]	19
Slika 3.7 Stvarni (1) i inženjerski (2) dijagram naprezanje σ – istežanje ε [18]	20
Slika 3.8 Tipičan izgled dijagrama naprezanje σ – istežanje ε za plastike [20].....	23
Slika 3.9 <i>Toe region</i>	26
Slika 3.10 Geometrija višenamjenskih epruveta 1A i 1B prema ISO 527 [20].....	28
Slika 4.1 Kvalitativni dijagram naprezanje σ – istežanje ε za različite vrste polimera [21] ...	30
Slika 4.2 Ovisnost modula smičnosti G amorfni plastomera o temperaturi [21].....	31
Slika 4.3 Ovisnost modula smičnosti G kristalastih plastomera o temperaturi [21].....	32
Slika 4.4 Ovisnost naprežanja o istežanju za različite vrijednosti temperature (ABS) [21]....	33
Slika 4.5 Ovisnost modula elastičnosti o temperaturi (ABS) [21].....	34
Slika 5.1 3D model epruvete (<i>Autodesk Inventor</i>).....	35
Slika 5.2 Epruvete za 3D tisak u programu <i>PrusaSlicer</i>	36
Slika 5.3 <i>Original Prusa i3 MK3</i>	37
Slika 5.4 Pomično mjerilo i mikrometar.....	38
Slika 5.5 Kidalice <i>Galdabini Quasar 50</i>	39
Slika 5.6 Klinaste čeljusti kidalice.....	40
Slika 5.7 Kidalice <i>Shimadzu Autograph AGS-X</i>	41
Slika 5.8 Epruveta s postavljenim ekstenzometrom	42
Slika 6.1 Kotirana skica epruvete 1A ISO 527	43
Slika 6.2 Različiti tipovi ispune [26]	44
Slika 6.3 Modeli epruveta s 20% mrežaste ispune	45
Slika 6.4 Set gotovih ispitnih uzoraka s 80% ispune	47

Slika 6.5 Odabir materijala i vrste ispitivanja (<i>Galdabini LABTEST</i>).....	48
Slika 6.6 Definiranje dimenzija epruvete (<i>Galdabini LABTEST</i>).....	49
Slika 6.7 Definiranje početne mjerne duljine (<i>Galdabini LABTEST</i>).....	50
Slika 6.8 Rezultati ispitivanja (<i>Galdabini LABTEST</i>)	51
Slika 6.9 Ispitivanje s ekstenzometrom (<i>Shimadzu Autograph AGS-X</i>)	53
Slika 6.10 Pokidane epruvete sa 100% ispune.....	54
Slika 6.11 Dijagram naprezanje σ – istezanje ε za epruvete sa 100% ispune	55
Slika 6.12 Pokidane epruvete s 80% ispune	57
Slika 6.13 Dijagram naprezanje σ – istezanje ε za epruvete s 80% ispune.....	58
Slika 6.14 Pokidane epruvete s 60% ispune	59
Slika 6.15 Dijagram naprezanje σ – istezanje ε za epruvete s 60% ispune.....	60
Slika 6.16 Pokidane epruvete s 40% ispune	61
Slika 6.17 Dijagram naprezanje σ – istezanje ε za epruvete s 40% ispune.....	62
Slika 6.18 Pokidane epruvete s 20% ispune	63
Slika 6.19 Dijagram naprezanje σ – istezanje ε za epruvete s 20% ispune.....	64
Slika 6.20 Dijagram naprezanje σ – istezanje ε za sve ispitane epruvete	65
Slika 6.21 Dijagram naprezanje σ – istezanje ε za drugo vlačno ispitivanje	67
Slika 7.1 Dimenzije uzorka s provrtom	71
Slika 7.2 Geometrija uzorka s provrtom (<i>Autodesk Inventor</i>)	71
Slika 7.3 Grafičko određivanje faktora koncentracije naprezanja [27]	73
Slika 7.4 Definiranje svojstava materijala (<i>Autodesk Inventor</i>)	74
Slika 7.5 Definiranje rubnih uvjeta (<i>Autodesk Inventor</i>).....	75
Slika 7.6 Numerička mreža (<i>Autodesk Inventor</i>).....	76
Slika 7.7 Graf konvergenije kod verifikacije modela (<i>Autodesk Inventor</i>)	77
Slika 7.8 Ekvivalentna naprezanja prema Von Mises-u za verifikacijski model	77
Slika 7.9 Graf konvergenije za provedene numeričke analize (<i>Autodesk Inventor</i>).....	79
Slika 7.10 Ekvivalentna naprezanja prema Von Mises-u za model sa 100% ispune	79
Slika 7.11 Faktori sigurnosti za model sa 100% ispune	80
Slika 7.12 Deformacije u smjeru uzdužne osi za model sa 100% ispune.....	81
Slika 7.13 Pomaci u smjeru uzdužne osi za model sa 100% ispune.....	81
Slika 7.14 Ekvivalentna naprezanja prema Von Mises-u za model s 80% ispune	82
Slika 7.15 Faktori sigurnosti za model s 80% ispune	83
Slika 7.16 Deformacije u smjeru uzdužne osi za model s 80% ispune.....	83
Slika 7.17 Pomaci u smjeru uzdužne osi za model s 80% ispune.....	84

12. POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Dimenzije višenamjenskih epruveta 1A i 1B prema ISO 527 (mm) [20].....	28
Tablica 4.1 Prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava za ABS [22]	34
Tablica 6.1 Podaci o ispitnim uzorcima.....	46
Tablica 6.2 Karakteristična naprezanja i deformacije za epruvete sa 100% ispune	56
Tablica 6.3 Sekantni moduli elastičnosti za epruvete sa 100% ispune.....	56
Tablica 6.4 Karakteristična naprezanja i deformacije za epruvete s 80% ispune	58
Tablica 6.5 Sekantni moduli elastičnosti za epruvete s 80% ispune.....	59
Tablica 6.6 Karakteristična naprezanja i deformacije za epruvete s 60% ispune	60
Tablica 6.7 Sekantni moduli elastičnosti za epruvete s 60% ispune.....	61
Tablica 6.8 Karakteristična naprezanja i deformacije za epruvete s 40% ispune	62
Tablica 6.9 Sekantni moduli elastičnosti za epruvete s 40% ispune.....	63
Tablica 6.10 Karakteristična naprezanja i deformacije za epruvete s 20% ispune	64
Tablica 6.11 Sekantni moduli elastičnosti za epruvete s 20% ispune.....	65
Tablica 6.12 Dobivena mehanička svojstva za sve ispitane epruvete	66
Tablica 6.13 Karakteristična naprezanja, deformacije i sekantni moduli elastičnosti za sve epruvete iz drugog ispitivanja.....	68
Tablica 6.14 Usporedba modula elastičnosti za epruvete s različitim postocima ispune	69
Tablica 7.1 Dopuštena naprezanja i opterećenja za uzorke s različitim postocima ispune	78
Tablica 7.2 Rezultati numeričkih analiza za modele s različitim postocima ispune	84

13. SAŽETAK

U ovom radu analiziran je utjecaj postotka ispune kao procesnog parametra na mehanička svojstva i ponašanje 3D tiskanih uzoraka. Za analizu je odabran ispitni uzorak prema normi ISO 527, s pet različitih postotaka ispune (100%, 80%, 60%, 40% i 20%). Analizirani materijal je ABS. Provedena su vlačna ispitivanja na dvije različite kidalice, proračunate su karakteristične vrijednosti naprezanja, istezanja i modula elastičnosti, te je napravljena međusobna usporedba rezultata.

U sklopu rada dan je pregled suvremenih aditivnih tehnologija s naglaskom na 3D tisak. Opisane su karakteristike, način funkcioniranja, prednosti i nedostaci tehnologije 3D tiska. Dan je pregled norme ISO 527, čija je svrha standardizacija vlačnog ispitivanja za plastike. Opisana je eksperimentalna oprema i postupak provođenja vlačnog ispitivanja. Na temelju izmjerenih veličina, provedena je analiza i proračun, te su sistematično prikazani dobiveni rezultati. Na temelju dobivenih svojstava, napravljena je numerička analiza, s ciljem određivanja dopuštenih opterećenja za odabrane uzorke s različitim postocima ispune.

Ključne riječi: 3D tisak, ISO 527, ABS, vlačno ispitivanje, postotak ispune

14. SUMMARY

This work investigates the impact of infill percentage on mechanical properties and behaviour of 3D printed specimens. Analysed specimens are chosen in accordance with norm ISO 527 and are produced with five different infill percentages (100%, 80%, 60%, 40% i 20%). Analysed material is ABS. Tensile tests were performed on two different tensile testing machines. Specific stress, strain and tensile modulus values were calculated and compared.

This work contains an overview of the modern additive technologies, with a focus on 3D printing. 3D printing characteristics, way of functioning, advantages and disadvantages were described. There is an overview of norm ISO 527, which is used for tensile testing standardization of plastics. Testing procedure and equipment is described. Results were calculated based on measured data. Numerical analysis for determining permissible loads for chosen specimens is conducted based on the calculated mechanical properties.

Key words: 3D printing, ISO 527, ABS, tensile testing, infill percentage