

Utjecaj tipa stolnih 3D pisača na mehanička svojstva ispisanog proizvoda

Raič, Andro

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:206209>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Andro Raič

Zagreb, 2022. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Damir Godec, dipl. ing.

Student:

Andro Raič

Zagreb, 2022. godina

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem svojem mentoru, prof. dr. sc. Damiru Godecu na ideji, izdvojenom vremenu i uloženoj trudu pri pisanju ovog diplomskog rada. Također bih se zahvalio izv. prof. dr. sc. Ani Pilipović i asistentu Bruni Krajačiću na velikoj pomoći u provedbi ispitivanja za eksperimentalni dio rada.

Veliko hvala mojoj obitelji na omogućenom bezbrižnom studiranju, djevojci Timei na pruženoj podršci i potpori tijekom studiranja, ali hvala i svima onima koji su na bilo koji način sudjelovali u mom studentskom putovanju.

Andro Raič



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

| | |
|--|---------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum: | Prilog: |
| Klasa: 602-14/22-6/1 | |
| Ur. broj: 15-1703-22- | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ANDRO RAIČ** Mat. br.: 0035209149

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj tipa stolnih 3D pisača na mehanička svojstva ispisanog proizvoda**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of the desktop 3D printer type on mechanical properties of printed part**

Opis zadatka:

Istekom patentnih zaštita nekih od postupaka aditivne proizvodnje pokrenut je val razvoja i proizvodnje velikog broja niskobudžetnih, stolnih 3D pisača, pri čemu se većina temelji na tehnologiji koja primjenjuje materijal u obliku filameta (eng. Fused Filament Fabrication - FFF). Iako su se takvi 3D pisači u početku njihove primjene koristili uglavnom za hobi i izradu prototipova, danas se sve više koriste za izradu konačnih proizvoda, pa su svojstva 3D ispisanih proizvoda tih pisača postala važan čimbenik pri izboru pisača. S druge strane, velik broj proizvođača takvih 3D pisača i tipova pisača otežava potencijalnom investitoru njihov izbor.

U okviru rada potrebno je:

- 1) Detaljno opisati FFF postupak aditivne tehnologije s prednostima i nedostacima u usporedbi s ostalim glavnim grupama aditivnih postupaka.
- 2) Načiniti sistematizaciju 3D pisača za FFF postupke (prema načelima rada, izvedbi, korištenim koordinatnim sustavima, tipovima filamenata itd.).
- 3) Detaljno opisati glavne dijelove 3D pisača za FFF postupak aditivne tehnologije te najutjecajnije podesive parametre ispisa.
- 4) U praktičnom dijelu rada izabrati barem dva različita niskobudžetna FFF pisača za usporedbu, te odgovarajući materijal filameta primjenjiv na svim vrednovanim 3D pisačima.
- 5) Na temelju normi za određivanje rastezne čvrstoće i žilavosti polimernih materijala, definirati ispitna tijela te ih načiniti na izabranim 3D pisačima pri referentnim parametrima 3D ispisa i orijentacijama ispisa na radnim površinama.
- 6) Provesti ispitivanja mehaničkih svojstava 3D ispisanih ispitnih tijela.
- 7) Analizirati dobivene rezultate i donijeti odgovarajuće zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:
1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Damir Godec

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA..... | IV |
| POPIS OZNAKA | VI |
| POPIS KRATICA | VII |
| SAŽETAK..... | VIII |
| SUMMARY | IX |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. ADITIVNA PROIZVODNJA | 3 |
| 2.1. Podjela i primjena AM postupaka [3,7–9] | 8 |
| 2.2. Povijesni pregled AM postupaka [1, 10] | 12 |
| 3. POSTUPAK NANOŠENJA RASTALJENOG FILAMENTA (eng. <i>FUSED FILAMENT FABRICATION</i>)..... | 15 |
| 3.1. Opis postupka i glavnih dijelova 3D pisača za FFF postupak | 17 |
| 3.2. Utjecajni parametri FFF postupka..... | 22 |
| 3.3. Materijali korišteni u FFF aditivnoj tehnologiji..... | 25 |
| 3.4. Prednosti i nedostaci FFF postupka [1,4,7,22]..... | 28 |
| 3.5. Sistematizacija uređaja za FFF postupak | 30 |
| 4. EKSPERIMENTALNI DIO | 38 |
| 4.1. Opis ispitivanja | 38 |
| 4.1.1. Softver SuperSlicer | 38 |
| 4.1.2. 3D pisac RatRig V-Minion | 39 |
| 4.1.3. 3D pisac Voron 2.4 | 40 |
| 4.1.4. Materijal za ispitivanje..... | 41 |
| 4.2. Ispitivanje žilavosti | 43 |
| 4.3. Ispitivanje rasteznih svojstava | 46 |
| 4.4. Rezultati ispitivanja..... | 50 |
| 4.4.1. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma..... | 50 |
| 4.4.2. Ispitivanje rasteznih svojstava | 53 |
| 4.5. Analiza rezultata | 54 |
| 4.5.1. Analiza rezultata ispitivanja udarnog rada loma..... | 54 |
| 4.5.2. Analiza rezultata rasteznog ispitivanja | 58 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 64 |
| 6. LITERATURA | 65 |
| 7. PRILOZI..... | 67 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1.1 Smanjenje vremena proizvodnje i životnog vijeka proizvoda (lijevo), | 1 |
| Slika 2.1 Potencijalni gubitci zbog kašnjenja proizvoda na tržište [1] | 4 |
| Slika 2.2 Razlike u trajanju pripreme proizvodnje [3] | 5 |
| Slika 2.3 STL prikaz kvadra i kugle [5] | 6 |
| Slika 2.4 Primjeri potpornih strukturi [6] | 7 |
| Slika 2.5 Kategorizacija aditivne proizvodnje prema vrsti materijala [3]..... | 12 |
| Slika 2.6 Povijesni razvoj aditivnih tehnologija na lenti vremena [10] | 14 |
| Slika 3.1 Različiti oblici mlaznica [3] | 15 |
| Slika 3.2 Prvi uređaj za taložno očvršćivanje tvrtke <i>Stratasys</i> [11]..... | 16 |
| Slika 3.3 Shematski prikaz uređaja za FFF postupak [7] | 18 |
| Slika 3.4 Teoretski i stvarni profil filameta pri izlasku iz mlaznice [17]..... | 19 |
| Slika 3.5 Dijelovi i karakteristike ekstruzijskog mehanizma [16] | 20 |
| Slika 3.6 Dva osnovna oblika potporne strukture [6]..... | 22 |
| Slika 3.7 Sučelje slicer programa <i>Cura</i> [19] | 23 |
| Slika 3.8 Različiti oblici i gustoće ispune [20]..... | 24 |
| Slika 3.9 Definirani procesni parametri [20]..... | 25 |
| Slika 3.10 Osnovni lanac i bočne skupine PLA [21] | 26 |
| Slika 3.11 Sistematizacija FFF uređaja s obzirom na koordinatne sustave [28]..... | 30 |
| Slika 3.12 Primjer XZ-head pisača (<i>Ender 3 V2</i>) [30] | 31 |
| Slika 3.13 Primjer XY-head pisača (<i>Creality Ender 5</i>) [30]..... | 32 |
| Slika 3.14 3D pisac <i>UltiMaker S5</i> [30] | 33 |
| Slika 3.15 Shematski prikaz CoreXY pisača (lijevo), CoreXY pisac <i>Voron 2.4</i> (desno) [31,32] | 34 |
| Slika 3.16 Konstrukcija H-Bot 3D pisača [30] | 34 |
| Slika 3.17 Putanja mlaznice kod ostalih FFF uređaja i kod Belt 3D pisača (lijevo), primjer Belt 3D pisača (desno) [29]..... | 35 |
| Slika 3.18 Primjer delta 3D pisača [31]..... | 36 |
| Slika 3.19 Primjer SCARA uređaja [28] | 37 |
| Slika 3.20 Primjer 3D pisača s polarnim koordinatnim sustavom [30] | 37 |
| Slika 4.1 Modeli ispitnih tijela u <i>SuperSlicer</i> -u | 39 |
| Slika 4.2 Shematski prikaz maksimalnog radnog volumena pisača <i>RatRig V-Minion</i> -a [33] . | 39 |
| Slika 4.3 Standardna i CHT mlaznica korištena na pisacu <i>RatRig V-Minion</i> -u [34,35] | 40 |
| Slika 4.4 Ekstruzijski mehanizam <i>Phatesu Rapido</i> [34]..... | 41 |
| Slika 4.5 Raspored ispitnih tijela na radnoj podlozi i njima pridružene pozicije..... | 42 |
| Slika 4.6 Serija ispitnih tijela za ispitivanje udarnog rada loma (lijevo), serija ispitnih tijela za rastezno ispitivanje (desno) | 42 |
| Slika 4.7 Normirana epruveta za ispitivanje udarnog rada loma [36]..... | 43 |
| Slika 4.8 Digitalni mikrometar za mjerenje debljine (lijevo), digitalno pomično mjerilo (desno)..... | 44 |
| Slika 4.9 Shematski prikaz ispitivanja udarnog rada loma po Charpyju [8] | 44 |
| Slika 4.10 Uređaj marke Frank za određivanje udarnog rada loma (lijevo), položaj ispitnog tijela na osloncima uređaja prilikom udara bata (desno)..... | 45 |
| Slika 4.11 Graf rastezno naprezanje – istezanje za karakteristične slučajeve [37] | 47 |
| Slika 4.12 Normirano ispitno tijelo za vlačno ispitivanje [37] | 48 |
| Slika 4.13 Kidalica Shimadzu AGS-X (lijevo), ispitna tijela u čeljustima kidalice tijekom vlačnog ispitivanja (desno)..... | 49 |
| Slika 4.14 Serija ispitnih tijela nakon provedenog rasteznog ispitivanja..... | 50 |

| | |
|--|----|
| Slika 4.15 Vrijednost prosječne savojne žilavosti po pozicijama za ispitna tijela ispisana <i>RatRig V-Minion CHT</i> mlaznicom | 55 |
| Slika 4.16 Vrijednost prosječne savojne žilavosti po pozicijama za ispitna tijela ispisana <i>RatRig V-Minion</i> standardnom mlaznicom | 55 |
| Slika 4.17 Vrijednost prosječne savojne žilavosti po pozicijama za ispitna tijela ispisana <i>Voron 2.4 CHT</i> mlaznicom | 56 |
| Slika 4.18 Prosječne vrijednosti savojnih žilavosti po pozicijama i 3D pisačima | 57 |
| Slika 4.19 Graf $\sigma - \epsilon$ za ispitna tijela ispisana <i>RatRig V-Minion CHT</i> mlaznicom..... | 58 |
| Slika 4.20 Graf $\sigma - \epsilon$ za ispitna tijela ispisana <i>RatRig V-Minion</i> običnom mlaznicom..... | 59 |
| Slika 4.21 Graf $\sigma - \epsilon$ za ispitna tijela ispisana <i>Voron 2.4 CHT</i> mlaznicom | 60 |
| Slika 4.22 Prosječne vrijednosti rastezne čvrstoće ispitnih tijela 3D pisača svih pozicija | 61 |
| Slika 4.23 Prosječne vrijednosti prekidnog istežanja ispitnih tijela 3D pisača svih pozicija... | 61 |
| Slika 4.24 Prosječne vrijednosti modula elastičnosti ispitnih tijela 3D pisača svih pozicija... | 62 |
| Slika 4.25 Prosječne vrijednosti prekidne čvrstoće ispitnih tijela 3D pisača svih pozicija | 62 |
| Slika 7.1 Oznake ispitnih tijela u tablicama priloga..... | 73 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 2.1 Prednosti i nedostaci ekstrudiranja materijala [7] | 8 |
| Tablica 2.2 Prednosti i nedostaci fotopolimerizacije u komori [7] | 9 |
| Tablica 2.3 Prednosti i nedostaci ispisivanja mlazom fotopolimera [7] | 9 |
| Tablica 2.4 Prednosti i nedostaci laminiranja [7] | 10 |
| Tablica 2.5 Prednosti i nedostaci spajanja praškastog materijala u slojevima [7] | 10 |
| Tablica 2.6 Prednosti i nedostaci taloženja materijala pod djelovanjem energije [7] | 11 |
| Tablica 2.7 Prednosti i nedostaci tiskanja veziva na materijale [7] | 11 |
| Tablica 3.2 Prednosti i nedostaci PLA [7,22] | 26 |
| Tablica 3.3 Prednosti i nedostaci ABS [7,23] | 27 |
| Tablica 3.4 Prednosti i nedostaci PETG [26] | 28 |
| Tablica 3.5 Ostali primjenjivi materijali i njihova svojstva [27] | 28 |
| Tablica 4.1 Rezultati ispitivanja udarnog rada loma za ispitna tijela ispisana <i>RatRig CHT</i> mlaznicom | 51 |
| Tablica 4.2 Rezultati ispitivanja udarnog rada loma za ispitna tijela ispisana <i>RatRig</i> standardnom mlaznicom | 52 |
| Tablica 4.3 Rezultati ispitivanja udarnog rada loma za ispitna tijela ispisana <i>Voron 2.4 CHT</i> mlaznicom | 52 |
| Tablica 4.4 Rezultati rasteznog ispitivanja za ispitna tijela ispisana <i>RatRig V-Minion CHT</i> mlaznicom | 53 |
| Tablica 4.5 Rezultati rasteznog ispitivanja za ispitna tijela ispisana <i>RatRig V-Minion</i> standardnom mlaznicom | 54 |
| Tablica 4.6 Rezultati rasteznog ispitivanja za ispitna tijela ispisana <i>Voron 2.4 CHT</i> mlaznicom | 54 |
| Tablica 7.1 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rastezних svojstava ispisani <i>RatRig CHT</i> mlaznicom | 69 |
| Tablica 7.2 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rastezних svojstava ispisani <i>RatRig</i> standardnom mlaznicom | 69 |
| Tablica 7.3 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rastezних svojstava ispisani <i>Voron 2.4 CHT</i> mlaznicom | 70 |
| Tablica 7.4 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje udarnog rada loma ispisanih <i>RatRig CHT</i> mlaznicom i pripadajuće vrijednosti energije loma | 71 |
| Tablica 7.5 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje udarnog rada loma ispisanih <i>RatRig</i> standardnom mlaznicom i pripadajuće vrijednosti energije loma | 71 |
| Tablica 7.6 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje udarnog rada loma ispisanih <i>Voron 2.4 CHT</i> mlaznicom i pripadajuće vrijednosti energije loma | 72 |
| Tablica 7.7 Vrijednosti rastezних svojstava ispitnih tijela na poziciji 1 radne podloge ispisanih <i>RatRig CHT</i> mlaznicom | 73 |
| Tablica 7.8 Vrijednosti rastezних svojstava ispitnih tijela na poziciji 2 radne podloge ispisanih <i>RatRig CHT</i> mlaznicom | 74 |
| Tablica 7.9 Vrijednosti rastezних svojstava ispitnih tijela na poziciji 3 radne podloge ispisanih <i>RatRig CHT</i> mlaznicom | 74 |
| Tablica 7.10 Vrijednosti rastezних svojstava ispitnih tijela na poziciji 4 radne podloge ispisanih <i>RatRig CHT</i> mlaznicom | 75 |
| Tablica 7.11 Vrijednosti rastezних svojstava ispitnih tijela na poziciji 5 radne podloge ispisanih <i>RatRig CHT</i> mlaznicom | 75 |
| Tablica 7.12 Vrijednosti rastezних svojstava ispitnih tijela na poziciji 1 radne podloge ispisanih <i>RatRig</i> standardnom mlaznicom | 76 |

| | |
|---|----|
| Tablica 7.13 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 2 radne podloge ispisanih <i>RatRig</i> standardnom mlaznicom | 76 |
| Tablica 7.14 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 3 radne podloge ispisanih <i>RatRig</i> standardnom mlaznicom | 77 |
| Tablica 7.15 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 4 radne podloge ispisanih <i>RatRig</i> standardnom mlaznicom | 77 |
| Tablica 7.16 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 5 radne podloge ispisanih <i>RatRig</i> standardnom mlaznicom | 78 |
| Tablica 7.17 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 1 radne podloge ispisanih <i>Voron 2.4 CHT</i> mlaznicom | 78 |
| Tablica 7.18 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 2 radne podloge ispisanih <i>Voron 2.4 CHT</i> mlaznicom | 79 |
| Tablica 7.19 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 3 radne podloge ispisanih <i>Voron 2.4 CHT</i> mlaznicom | 79 |
| Tablica 7.20 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 4 radne podloge ispisanih <i>Voron 2.4 CHT</i> mlaznicom | 80 |
| Tablica 7.21 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 5 radne podloge ispisanih <i>Voron 2.4 CHT</i> mlaznicom | 80 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Mjerna jedinica | Opis oznake |
|-----------------|-------------------|---|
| v | mm/min | brzina ispitivanja |
| h | mm | debljina ispitnog tijela |
| l | mm | duljina ispitnog tijela |
| l_1 | mm | duljina uskog paralelnog dijela ispitnog tijela |
| K_{pcm} | J | energija očitana na uređaju |
| E_C | J | energija očitana na Charpyju |
| R_r | N/mm ² | granica razvlačenja |
| ε_k | % | konačno istezanje |
| R_x | N/mm ² | konvencionalna granica razvlačenja |
| α | ° | kut zareza |
| F | N | maksimalna sila |
| L_0 | mm | mjerna duljina |
| E | N/mm ² | modul elastičnosti |
| L | mm | početna udaljenost između čeljusti kidalica |
| r | mm | polumjer zakrivljenosti ispitnog tijela |
| A_0 | mm ² | površina početnog presjeka ispitnog tijela |
| R_p | N/mm ² | prekidna čvrstoća |
| ε_p | N/mm ² | prekidna istezljivost |
| Δl | mm | produljenje |
| R_m | N/mm ² | rastezna čvrstoća |
| R | N/mm ² | rastezno naprezanje |
| L_s | mm | razmak između oslonaca |
| b | mm | širina ispitnog tijela |
| b_2 | mm | širina ispitnog tijela koji se steže u čeljusti |
| b_1 | mm | širina uskog dijela ispitnog tijela |
| l_2 | mm | udaljenost između proširenog dijela ispitnog tijela |
| $l/2$ | mm | udaljenost ravnine simetrije zareza i uzdužne osi ispitnog tijela |
| l_3 | mm | ukupna duljina ispitnog tijela |
| b_N | mm | visina ispod zareza |
| a_{CN} | J/mm ² | savojna žilavost po Charpyju |
| T_g | °C | temperatura staklišta |
| T_m | °C | temperatura taljenja |
| \bar{x} | - | aritmetička sredina |
| s | - | standardna devijacija |

POPIS KRATICA

| Kratika | Opis |
|----------------|---|
| AM | <i>Additive Manufacturing</i> – aditivna proizvodnja |
| CAD | <i>Computer Aided Design</i> – računalom potpomognuto oblikovanje |
| ISO | <i>International organization for standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju |
| SL | <i>Stereolithography</i> - stereolitografija |
| SLS | <i>Selective Laser Sintering</i> – selektivno lasersko srašćivanje |
| UV | <i>Ultraviolet</i> - ultraljubičasto |
| RPD | <i>Rapid Product Development</i> – brzi razvoj proizvoda |
| PETG | polietilen tereftalat glikol |
| PLA | polilaktična kiselina |
| ABS | akrilonitril/butadien/stiren |
| ASA | akrilonitril/stiren/akrilat |
| MEX | <i>Material Extrusion</i> – ekstrudiranje materijala |
| FDM | <i>Fused Deposition Modeling</i> – taložno očvršćivanje |
| MJS | <i>Multiphase Jet Solidification</i> – višefazno mlazno očvršćivanje |
| PC | polikarbonat |
| VATP | <i>VAT Photopolymerisation</i> – fotopolimerizacija materijala u komori |
| DLP | <i>Digital Light Processing</i> – očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom |
| MJT | <i>Material Jetting</i> – ispisivanje mlazom fotopolimera |
| SHL | <i>Sheet Lamination</i> – laminiranje |
| LOM | <i>Laminated Object Manufacturing</i> – proizvodnja laminiranih objekata |
| PBF | <i>Powder Bed Fusion</i> – spajanje praškastog materijala u slojevima |
| EBM | <i>Electron Beam Melting</i> – taljenje s pomoću snopa elektrona |
| BJT | <i>Binder Jetting</i> – tiskanje veziva na materijal |
| FFF | <i>Fused Filament Fabrication</i> – nanošenje rastaljenog polimernog materijala |
| PVA | polivinil alkohol |
| HIPS | <i>High Impact Polystyrene</i> – polistiren visoke žilavosti |
| CPE | kopoliester |
| PC | polikarbonat |
| TPU | termoplastični poliuretan |
| PP | polipropilen |
| SCARA | <i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i> |

SAŽETAK

Razvojem računalne tehnologije postavili su se novi zahtjevi u obliku ubrzanja proizvodnje te povećanje kvalitete i raznovrsnosti proizvoda na tržištu. Kao odgovor na nove trendove pojavio se koncept brzog razvoja proizvoda (eng. *Rapid Product Development*), čije su mnogobrojne inačice prije desetak godina obuhvaćene izrazom - aditivna proizvodnja (eng. *Additive Manufacturing*). Aditivna proizvodnja podrazumijeva, na temelju računalnog modela, dodavanje materijala sloj po sloj tvoreći na taj način trodimenzionalni proizvod. U modernoj industriji, aditivna tehnologija svoju primjenu pronalazi prije svega kod maloserijske proizvodnje složenih geometrija, gdje je zahtijevana preciznost izrade. Jedna od aditivnih tehnika jest nanošenje rastaljenog polimernog materijala (eng. *Fused Filament Fabrication - FFF*), razvijena 2005. godine. Naime, uporabom 3D pisača, polimerni materijal u obliku filameta se tali te se kao i kod ostalih aditivnih procesa, nanosi u slojevima prateći konture računalno modelirane konstrukcije. U začetcima, 3D pisači koristili su se za izradu prototipova, međutim danas se njima izrađuju konačni proizvodi. Ekspanzijom proizvođača, a samim time i modela, potencijalnim investitorima se značajno otežao izbor 3D pisača jer vrsta i model samih uređaja izravno utječu na svojstva proizvoda.

Ključne riječi: brzi razvoj proizvoda, aditivna proizvodnja, proizvodnja nanošenjem rastaljenog materijala, 3D pisači

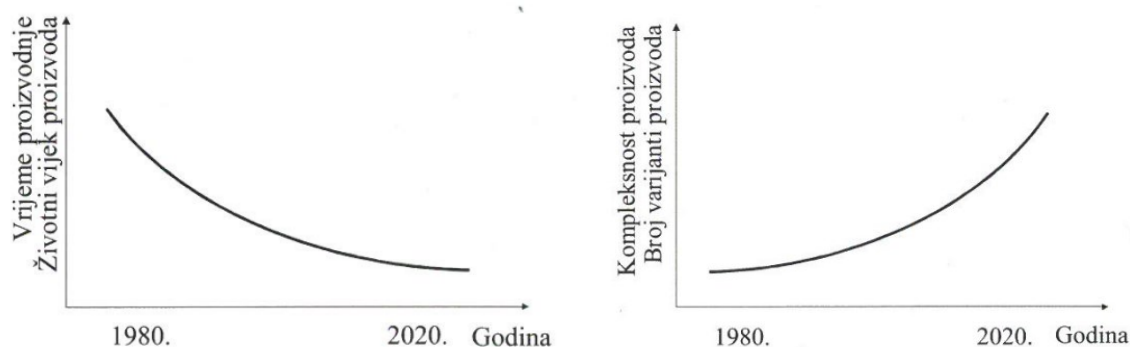
SUMMARY

The development of computer technology has imposed new requirements for products offered in the market in terms of variety, quality, and production acceleration. The concept of Rapid Product Development and its numerous versions, which have been grouped under the term Additive Manufacturing, emerged in response to these recent trends. Additive Manufacturing encompasses the creation of a three-dimensional object by layering materials, with a computational model of the product as the basis. This type of construction is nowadays most commonly applied in small-scale manufacturing of complex geometries, a field that requires high precision to detail. An example of a technique used in Additive Manufacturing is Fused Filament Fabrication (FFF), developed in 2005: filament-shaped polymer material is melted using a 3D printer and applied in layers in accordance with the contours of the computer-modeled construction, which is a procedure followed in all Additive Manufacturing processes. While 3D printers were used for prototyping when they were first developed, today they are used to create final products. With the expansion of manufacturers, and subsequently printer models, potential investors might have a hard time choosing the perfect 3D printer, as the device type and model directly affect product quality.

Key words: Rapid Product Development, Additive Manufacturing, Fused Filament Fabrication, 3D printers

1. UVOD

Razvojem računalne tehnologije, prvenstveno pojavom CAD (eng. *Computer Aided Design*) softvera čime je znatno olakšano modeliranja proizvoda, pokrenuti su novi industrijski trendovi. U prošlosti, na tržištu se pojavljivali gotovo identični proizvodi namijenjeni velikoserijskoj proizvodnji koja se, s gledišta proizvođača, tada činila najprofitabilnija. Iako je bilo riječ o masovnoj proizvodnji na pokretnim traka i proizvodima s poprilično malo komponenata, vrijeme proizvodnje ipak je bilo znatno duže nego u današnjoj modernoj industriji. Grafovi na slici 1.1 upravo to i sugeriraju. [1]



Slika 1.1 Smanjenje vremena proizvodnje i životnog vijeka proizvoda (lijevo), povećanje kompleksnosti i varijantnosti proizvoda (desno) [1]

Međutim, koncepcija modernih tvrtki se okrenula ka zadovoljavanju korisničkih zahtjeva i želja, što je rezultiralo personalizacijom proizvodnje pri čemu proizvodi postaju kompleksniji i raznovrsniji. Također, konkurentnost na tržištu se očituje u skraćanju vremena i sniženju troškova proizvodnje uz povišenje kvalitete proizvoda. Kao odgovor na tako strogo definirane potrebe razvoja proizvoda, pojavili su se postupci koji se obuhvaćaju jednim pojmom – brzi razvoj proizvoda (eng. *Rapid Product Development* – RPD). Izraz je to koji podrazumijeva proizvodnju kompliciranih geometrija izravno iz računalnih podataka čime se uvelike skraćuje proteklo vrijeme od ideje do plasiranja proizvoda na tržište. Dodatnom industrijalizacijom i gomilanjem raznorodnih RPD pristupa oblikovao se krovni pojam – aditivna proizvodnja (eng. *Additive Manufacturing* – AM). Definirana je kao izrada proizvoda na temelju 3D računalnog modela. Jedna od prednosti aditivne proizvodnje zasigurno je izostanak planiranja proizvodnog procesa, ne zahtijeva se niti izrada kalupa niti postoji transport materijala između radnih pozicija. Prema normi ISO/ASTM 52900:215(E) dijeli se na sedam podskupina, a svima

im je zajedničko da se u procesu proizvodnje materijal nanosi sloj po sloj oblikujući tako krajnji proizvod. Jedna od sedam grupa tehnologija je ekstrudiranje materijala (eng. *Material Extrusion* – MEX) kojoj pripada i proces nanošenja rastaljenog filameta (eng. *Filament Fused Fabrication* – FFF), postupak o kojem će biti riječ u ovome radu. FFF tehnologija, povijesno i tehnološki gledano temelje dijeli s taložnim očvršćivanjem (eng. *Fused Deposition Modeling* – FDM). Istekom patentnih zaštita, prije svega FDM tehnologije, uslijedio je streloviti razvoj niskobudžetnih 3D pisaa, uređaja koji uglavnom rade na osnovi FFF procesa i koriste materijale u obliku filameta. Iako su se takvi uređaji prvenstveno koristili za izradu prototipova, proširenjem spektra primjenjivih materijala, sve se više koriste i za proizvodnju gotovih proizvoda. Sukladno tome, tržište je pogodila ekspanzija raznovrsnih 3D pisaa, čija načela rada i karakteristike značajno utječu na svojstva proizvoda te na taj način otežavaju izbor potencijalnom investitoru. [1]

Zadatak diplomskog rada bio je utvrditi u kojoj mjeri izbor sličnih pisaa, od kojih su svi temeljeni na FFF postupku, utječe na mehanička svojstva 3D ispisanih proizvoda.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja, komponenta proizvodnog strojarstva, jest postupak proizvodnje temeljen na nanošenju materijala po slojevima tako tvoreći gotovi proizvod. Upravo temeljna ideja, koja podrazumijeva jedino dodavanje materijala, bez njegovog odvajanja kao što se događa kod glodanja ili tokarenja, je ono što ovaj postupak razlikuje od konvencionalnih. Moderno tržište i industrija zahtijevaju ubrzavanje svih područja proizvodnih procesa, a kao odgovor na to pojavila se aditivna proizvodnja drugom polovicom 1980-tih. Pored unaprjeđenja kvalitete i povišenja fleksibilnosti proizvodnje, novonastali pristup konstruiranju prouzročio je prijelaz s masovne i velikoserijske k individualnoj, odnosno personaliziranoj proizvodnji. Slojeviti pristup izradi proizvoda, omogućuje povećanje geometrijske kompleksnosti, a njezina direktna povezanost s CAD modelima ponekad u potpunosti eliminiraju potrebu za dodatnim alatima ili strojevima. [2,3]

Aditivna proizvodnja je prošla kroz različite inačice tijekom svog razvoja u sklopu koncepta tzv. brzog razvoja proizvoda (eng. *Rapid Product Development – RPD*), sve s ciljem zadovoljavanja tržišnih trendova, odnosno što je više moguće skratiti vrijeme koje prođe od početka ideje do izlaska proizvoda na tržište. RPD prije svega podrazumijeva konstruiranje i izradu s pomoću računalnih CAD/CAM programa, koje u konačnici karakteriziraju aditivnu proizvodnju. [2,3]

Tri su osnovne izvedbe aditivne proizvodnje:

- RP (eng. *Rapid Prototyping*) – brza proizvodnja prototipova
- RT (eng. *Rapid Tooling*) – brza proizvodnja alata i kalupa
- RM (eng. *Rapid Manufacturing*) – brza (izravna) proizvodnja. [1]

Sva tri procesa koriste slojevit (aditivnu) tehniku slaganja materijala, ostvarujući na taj način kompleksne geometrijske oblike izravno iz računalnih podataka u vrlo kratkom vremenu. Važno je napomenuti da riječ „brzo“ nije u potpunosti definiran pojam jer trajanje pojedinog postupka varira od nekoliko minuta pa sve do nekoliko dana. Pod RP skupinom proizvoda podrazumijevaju se prototipovi ili modeli koji simuliraju kasnije gotove proizvode, njihove oblike ili prosječne gabarite. Nadalje, postupcima brze izrade prototipova i kalupa (RT) izrađuju se alati i kalupi te njihovi kompliciraniji dijelovi koji će se koristiti u prototipnim serijama.

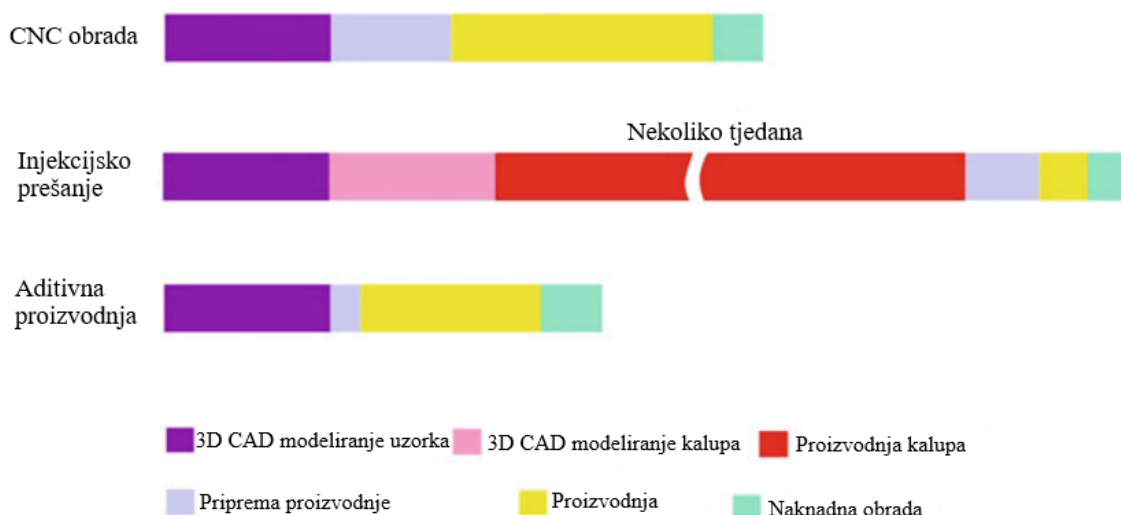
Često se kombinira postupak brze izrade s onom klasičnom što u konačnici dovodi do bolje kvalitete proizvoda. Na posljetku, brza proizvodnja (RM) predstavlja postupke izrade gotovih proizvoda, kasnije korištenih i u velikoserijskoj proizvodnji. Međutim, nedostatak RM postupaka se očituje u malom broju pogodnih materijala čiji je razvitak u zadnjem desetljeću u znatnom porastu. U začetcima, svaki od prethodno navedenih pojmova koristio se kao zaseban izraz, ali naglom ekspanzijom i napretkom posljednjih godina, aditivna proizvodnja jest pojam koji od 2009. godine objedinjuje sve tri grane brze proizvodnje. [1,3,4]

Analizom vrijednosti proizvoda ispostavlja se kako je vrijeme koje je potrebno za pozicioniranje proizvoda na tržište jedan od ključnih faktora prilikom ocjene njegove uspješnosti. Na slici 2.1 u nastavku jasno je vidljivo da kašnjenje produkta proizvodnje na tržištu, s predviđenim životnim vijekom u trajanju od 5 godina, smanjuje potencijalni dobitak do 33 %. [1]



Slika 2.1 Potencijalni gubitci zbog kašnjenja proizvoda na tržište [1]

S druge strane, upravo vrijeme od ideje do realizacije proizvoda, jest primarna prednost aditivne proizvodnje u usporedbi s ostalim uobičajenim procesima obrade. Kako je prikazano na slici 2.2, trajanje pripreme proizvodnje prilikom uporabe aditivne tehnike je nešto kraće u odnosu na CNC obradu, a u usporedbi s injekcijskim prešanjem je znatno kraće jer taj postupak zahtijeva i CAD modeliranje kalupa, što uvelike akumulira trajanje pripreme proizvodnje. [1]

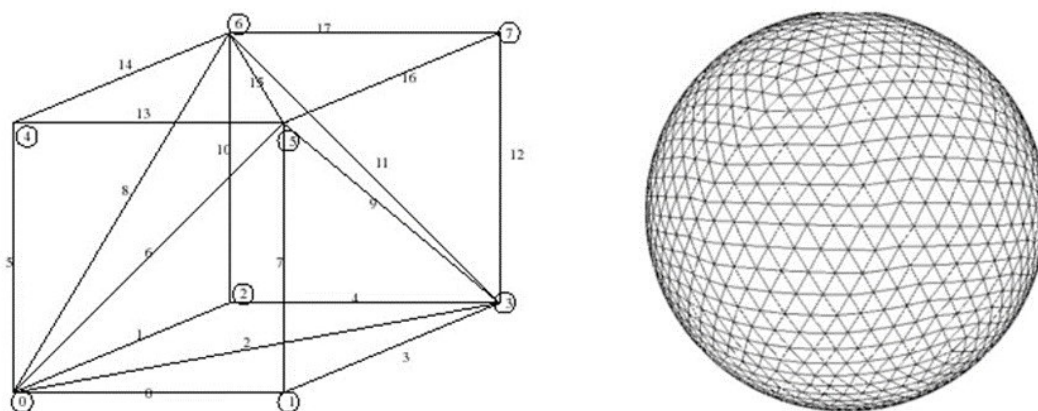


Slika 2.2 Razlike u trajanju pripreme proizvodnje [3]

Bez obzira koja se vrsta aditivnih tehnologija primjenjuje, zajedničko im je da je polazišna točka CAD modeliranje koje rezultira definiranjem oblika i geometrije proizvoda. U ovisnosti o složenosti konstrukcije, aditivni postupci će biti više ili manje uključeni u proces proizvodnje. Ako je riječ o jednostavnijoj geometriji, aditivna proizvodnja iskoristiti će se samo za vizualizaciju, dok će se za složenije proizvode zahtjevnijih konstrukcija, aditivne tehnologije uključivati u brojnim fazama i na različitim razinama. Dakle, većina procesa aditivne proizvodnje uključuje, do nekog stupnja, sljedećih osam koraka: [4–6]

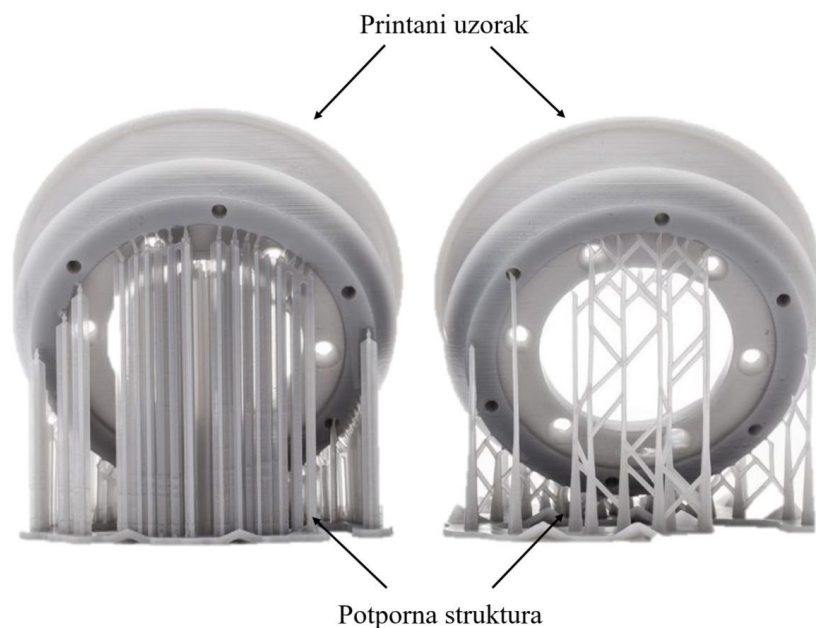
- **CAD** – vanjska geometrija svakog dijela koji je zamišljen da bude izrađen aditivnom proizvodnjom mora biti opisana s pomoću CAD softvera (*Solidworks, SketchUp, AutoCAD, Fusion360* i dr.)
- **Konverzija u STL** – kako bi uređaj za aditivnu proizvodnju „razumio“ CAD model isti se mora prevesti u uređaju razumljiv format, a to je STL (eng. *Standard Tessellation Language*) oblik dokumenta kojeg danas gotovo svaki CAD softver može isporučiti. STL datoteka pohranjuje podatke o trodimenzionalnom modelu tako što sadrži samo informacije o površini i konturama modela, a ne pohranjuje teksture, boje ili ostale važne značajke. Temelji se na mozaičnosti, odnosno površina proizvoda se opisuje s pomoću velikog broja jednostavnih ili složenih, međusobno povezanih, geometrijskih oblika kao što je vidljivo na slici 2.3 u nastavku. Na taj način se olakšava raslojavanje CAD modela i njegova priprema za 3D ispis.

- **Prebacivanje STL datoteke u uređaj za aditivnu proizvodnju** – tijekom prebacivanja datoteke može se provesti određena dorada i manipulacija modela, što podrazumijeva korekciju veličine, pozicije i orijentacije modela (npr. ponekad se zna dogoditi da se orijentacija modela STL datoteke ne poklapa s orijentacijom u CAD programu pa je iz tog razloga potrebna modifikacija modela).



Slika 2.3 STL prikaz kvadra i kugle [5]

- **Izbor postavki 3D pisača** – potrebno je prilagoditi utjecajne parametre 3D pisača zahtjevima geometrija proizvoda i njezinoj kompleksnosti. Neki od parametara su: izvor energije, debljina slojeva, vrijeme trajanja i slično.
- **Izrada (3D ispis)** – gotovo automatizirani proces koji se može odvijati bez nadzora uređaja, ali je poželjna povremena kontrola kako ne bi došlo do nedostatka materijala, neočekivanih pogrešaka uređaja ili drugih nepoželjnih aktivnosti.
- **Uklanjanje izratka** – nakon što je završen proces 3D ispisa, izradak se mora ukloniti što iziskuje određeni stupanj interakcije s uređajem pa se preporučuje rukovanje istim tek kada temperatura u radnom prostoru 3D pisača padne do razumne granice ili kada nema niti jednog dijela uređaja koji je u pokretu.
- **Naknadan obrada** – u određenim slučajevima, izradci u ovoj fazi mogu zahtijevati čišćenje, naknadnu obradu površine ili toplinsku obradu prije nego budu spremni za uporabu. Također, neki dijelovi iziskuju uklanjanje potporne strukture koja je bila nužna kako bi se postigao željeni oblik ili dimenzije. Jedan od primjera potporne strukture prikazan je na slici 2.4 u nastavku.



Slika 2.4 Primjeri potpornih strukturi [6]

- **Primjena** – završni je korak aditivne proizvodnje u kojoj je izradak spreman za eksploataciju i možebitno sklapanje s drugim dijelovima u konačni proizvod.

Važno je naglasiti, da gotovi svi uređaji za aditivnu proizvodnju zahtijevaju pažljivo održavanje te zbog niza preciznih tehnologija rukovanje u prikladnim uvjetima. Iako su većinski faze proizvodnje automatizirani procesi, nužne su redovite provjere i umjeravanja uređaja, kako bi se potvrdilo da oni rade unutar prihvatljivih granica i zadovoljavajućih tolerancija. Nadalje, određeni materijali koji se koriste u nekim od postupaka aditivne proizvodnje imaju ograničeni rok trajanja, stoga je potrebno osigurati skladištenje u kontroliranim uvjetima kako bi se umanjila mogućnost kemijskih reakcija s tvarima iz okoline te potencijalna degradacija svojstava. Neke od važnih karakteristika aditivnih materijala, poput reciklabilnosti, moguće je pospješiti izbjegavanjem prostora s povećanim postotkom vlage ili prekomjernim izlaganjem svjetlosti. [3, 7]

2.1. Podjela i primjena AM postupaka [3,7–9]

Nekoliko je kriterija prema kojima se mogu razvrstati tehnike aditivne proizvodnje. Prema normi ISO/ASTM 52900:215(E) generirano je sedam glavnih skupina nabrojanih u nastavku:

- **Ekstrudiranje materijala – MEX** (eng. *Material Extrusion*) – proces aditivne proizvodnje u kojem se materijal selektivno protiskuje kroz grijanu mlaznicu. Najzastupljeniji postupci ove skupine su taložno očvršćivanje (eng. *Fused Deposition Modeling - FDM*) i višefazno mlazno očvršćivanje (eng. *Multiphase Jet Solidification – MJS*). Materijali prikladni za ove postupke su: ABS (akrilonitril/butadien/stiren), polikarbonat (PC), poli(fenilen-sulfon)) te elastomeri na osnovi poliestera. Neke od značajki postupka nabrojani su u tablici 2.1.

Tablica 2.1 Prednosti i nedostaci ekstrudiranja materijala [7]

| Prednosti | Nedostaci |
|--|--|
| Brz i siguran rad uređaja bez uporabe opasnih kemikalija | Potrebna naknadna obrada |
| Proizvodi ispisani bez potpore strukture ne zahtijevaju čišćenje | Nepredvidivo skupljanje materijala |
| Mogućnost bušenja, bojanja, galvaniziranja izratka | Često potrebna potporna struktura kod kompleksnijih geometrija |
| Široki spektar materijala | Čvrstoća ovisi o orijentaciji strukture |

- **Fotopolimerizacija materijala u komori – VATP** (eng. *VAT Photopolymerisation*) – kondenzacijska polimerizacija čiji su produkt umrežene smole nastale svjetlosno aktiviranom polimerizacijom kapljevitih monomera/oligomera. Predstavnicima ove skupine su stereolitografija (eng. *Stereolithography – SL*) i očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (eng. *Digital Light Processing – DLP*). Materijali primjenjivi prilikom procesa fotopolimerizacije su: akrilni poli(metil-metakrilat), epoksidne smole (EP), polietilen visoke gustoće (PE-HD), polipropilen. Prednosti i nedostaci ovoga postupka prikazani su u tablici 2.2 u nastavku.

Tablica 2.2 Prednosti i nedostaci fotopolimerizacije u komori [7]

| Prednosti | Nedostaci |
|--|--|
| Kombinacija brzine i preciznosti | Vrlo visoka cijena materijala |
| Visoka kvaliteta završne površine | Iziskuje naknadno umrežavanje fotopolimera |
| Proizvodnja vrlo tankih slojeva (visoka razlučivost) | Često zahtijevana potporna struktura |
| Velika proizvodnosti | Ograničen broj prikladnih materijala |

- **Ispisivanje mlazom fotopolimera – MJT** (eng. *Material Jetting*) – aditivni proizvodni postupak u kojem se selektivno talože kapljice materijala koji može biti kombinacija voska i fotopolimera. *PolyJet* se ubraja u ovu skupinu, a često korišteni materijali su: prozirni akrilni fotopolimeri za krute materijale, vero materijali za fine detalje i proizvode u boji te tango materijali. Glavne prednosti i nedostaci postupka su nabrojani u tablici 2.3.

Tablica 2.3 Prednosti i nedostaci ispisivanja mlazom fotopolimera [7]

| Prednosti | Nedostaci |
|---|--|
| Omogućuje proizvodnju izradaka izrazito malih dimenzija | Proizvode gube svojstva tijekom vremena |
| Ispis izradaka u bojama | Skuplji postupak od FDM-a |
| Visoka kvaliteta, mala debljina slojeva te tanke stijenke | Često zahtijevana potporna struktura |
| Nema naknadnog umrežavanja | Proizvodi osjetljivi na svjetlost i toplinski nestabilni |

- **Laminiranje – SHL** (eng. *Sheet Lamination*) – proces aditivne proizvodnje koji podrazumijeva spajanje listova materijala u željeni oblik proizvoda. Najznačajniji predstavnik jest proizvodnja laminiranih objekata (eng. *Laminated Object Manufacturing – LOM*), pri čemu se upotrebljava široki spektar materijala uključujući polimere, kompozite, metale, papirnate listove i mnoge druge. Glavne značajke laminiranja kategorizirani su u tablici 2.4 kao prednosti i nedostaci ovog postupka.

Tablica 2.4 Prednosti i nedostaci laminiranja [7]

| Prednosti | Nedostaci |
|--|---|
| Potencijalno najbrži postupak za izradu proizvoda velikog volumena | Apsorpcija vlage uzrokuje bubrenje što dovodi do neujednačene strukture |
| Niske cijene uređaja i materijala | Nehomogena svojstva zbog uporabe ljepila |
| Malo zaostalo naprezanje | Moguće oštećenje izratka tijekom uklanjanja dodatnog materijala |
| Visoka preciznost | Šupljine nije moguće izraditi ovim postupkom |

- **Spajanje praškastog materijala u slojevima – PBF** (eng. *Powder Bed Fusion*) – aditivna tehnologija u kojoj se toplinska energija koristi kako bi selektivno povezali slojevi praha. Selektivno lasersko srašćivanje (eng. *Selective Laser Sintering – SLS*), selektivno lasersko teljenje (eng. *Selective Laser Melting – SLM*) i taljenje s pomoću snopa elektrona (eng. *Electron Beam Melting – EBM*) ubrajaju se u ovu skupinu. Karakteristični materijali jesu: poliamid, poliamid sa staklenim vlaknima, polistiren, polipropilen. Osnovne karakteristike ove aditivne tehnologije vidljive su u tablici 2.5.

Tablica 2.5 Prednosti i nedostaci spajanja praškastog materijala u slojevima [7]

| Prednosti | Nedostaci |
|--|--|
| Mogućnost reciklabilnosti neupotrebljenog materijala | Nedosljednost poroznosti i gustoće kroz presjek izradaka |
| Izrada tvorevina manjih dimenzija | duže vrijeme hlađenja (do 72 sata) |
| Prikladno za veliki broj različitih materijala | Kod nekih materijala potrebna primjena zaštitne atmosfere |
| Nema nužnosti stvaranja potporne strukture | Uporabi novog materijala prethodi dodatna priprema uređaja |

- **Taloženje materijala pod djelovanjem izvora energije – DED** (eng. *Direct Energy Deposition*) – aditivni proizvodni proces koji korištenjem izvora toplinske energije u obliku elektronskog snopa ili laserske zrake rastaljuje deponirani materijal omogućujući njegovo povezivanje. Predstavnik ove skupine jest tehnika izravnog taloženja metala (eng. *Laser Engineering Net Shaping*), a često korišteni materijali su nehrđajući i visokolegirani čelici, superlegure, legure titana i slično. Određene prednosti i nedostaci navedeni su u tablici 2.6.

Tablica 2.6 Prednosti i nedostaci taloženja materijala pod djelovanjem energije [7]

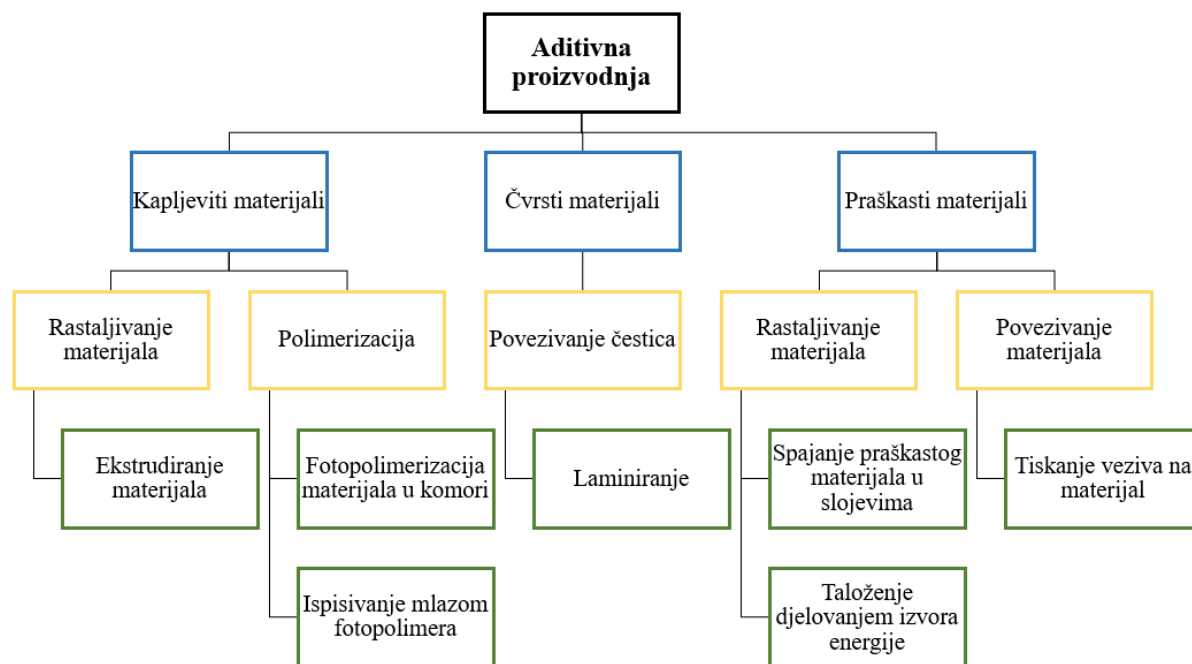
| Prednosti | Nedostaci |
|--|---|
| Veliki gradijent umrežavanja i zgušnjavanja | Neravnomjerno hlađenje slojeva bližih podlozi za razliku od viših slojeva |
| Proizvodnja kalupa od različitih materijala u jednom ciklusu | Zaostala naprezanja koja dovode do raslojavanja izratka |
| Ostvarivanje komplicirane porozne strukture | Dugotrajno usklađivanje parametara za postizanje željenih geometrija |
| Uporaba materijala s visokim temperaturama taljenja | Naknadna obrada često dugotrajna što značajno produljuje vrijeme procesa |

- **Tiskanje veziva na materijale – BJT** (eng. *Binder Jetting*) – brzi proizvodni postupak temeljen na povezivanju čestica praha preko veziva, nanošenog sloj po sloj uz pomoć *ink-jet* mlaznice. Slojevi praha i veziva se izmjenjuju dok se ne dobije gotova konstrukcija. Klasični primjer ove tehnike je 3D tiskanje (eng. *3D Printing*). Materijali primjenjivi u ovom postupku su: kompoziti s metalnom matricom, nikal, poliuretan visoke čvrstoće. Glavne značajke postupka iznesene su u tablici 2.7 u nastavku.

Tablica 2.7 Prednosti i nedostaci tiskanja veziva na materijale [7]

| Prednosti | Nedostaci |
|---|--|
| Mogućnost korištenja uređaja u zatvorenom prostoru (neotrovni materijali) | Ograničenost u pogledu broja materijala |
| Dimenzijske tolerancije | Čišćenje i naknadna obrada prototipova |
| Mogućnost tiskanja izradaka u bojama | Kod većih gabarita lošije tečenje u usporedbi s drugim aditivnim proizvodnim tehnikama |
| Reciklabilnost materijala | Ponekad visoka hrapavost površine |
| Ostvarivanje vrlo tankih slojeva | |

Svi gore navedeni postupci aditivne proizvodnje mogu se također razvrstati u ovisnosti o vrsti materijala koji se primjenjuju. Takva karakterizacija prikazana je na slici 2.5.

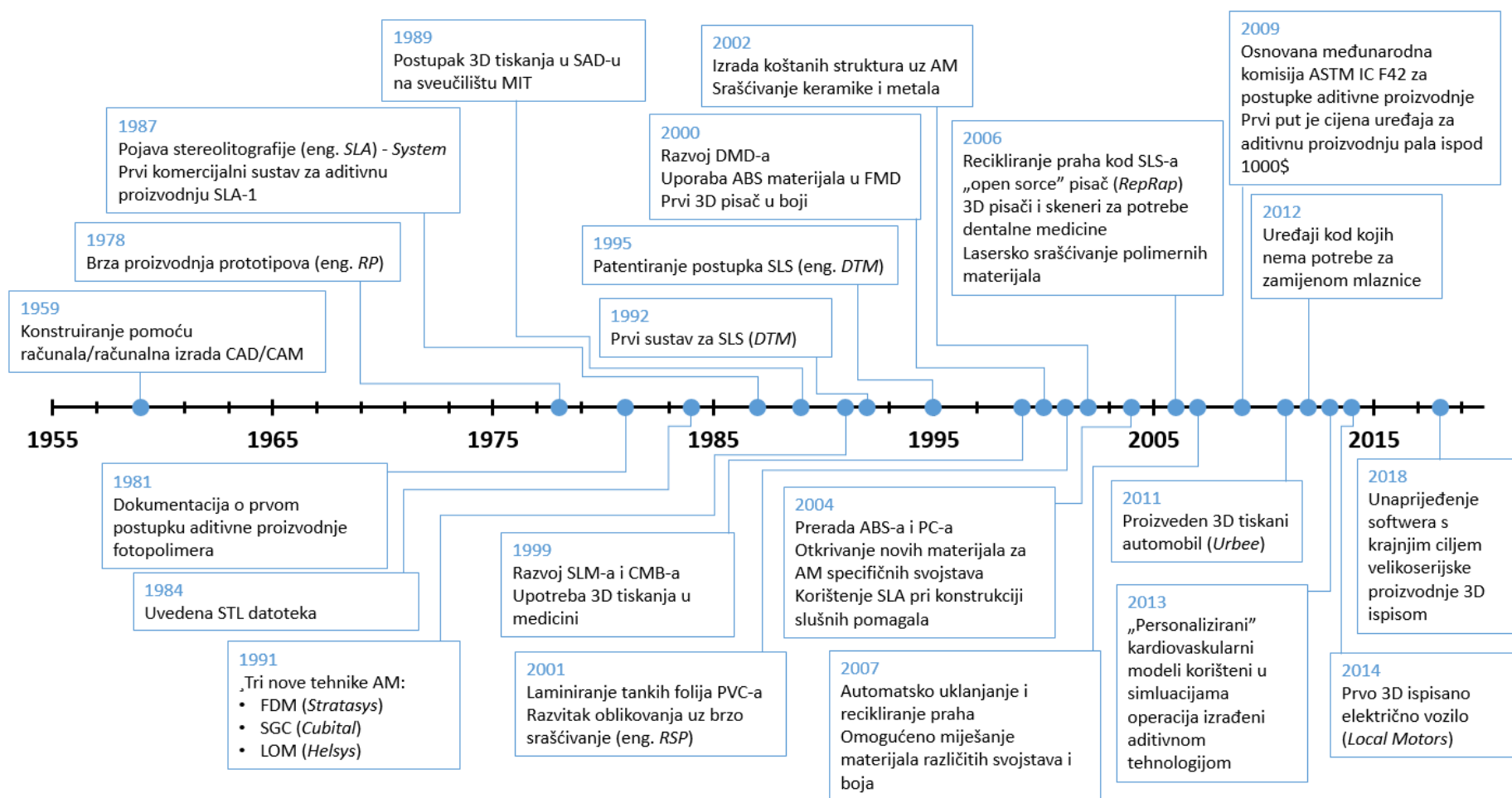


Slika 2.5 Kategorizacija aditivne proizvodnje prema vrsti materijala [3]

2.2. Povijesni pregled AM postupaka [1, 10]

Prvi značajniji koraci u pogledu aditivne proizvodnje sežu u osamdesete godine prošlog stoljeća, točnije 1987. godinu kada je američka tvrtka *3D System* razvila postupak stereolitografije. Prva komercijalizacija postupka, kojim se kapljeviti fotopolimer očvršćuje s pomoću ultraljubičastog zračenja, ostvarena je uređajem *SLA-1*. Već sljedeće godine, novootkriveni akrilni fotopolimeri dodatno proširuju uporabu stereolitografije. Godine 1991. predstavljena su tri inovativna postupka aditivne proizvodnje. Osnova prvog od njih, očvršćivanja taljenjem (*Stratasys*), su ekstrudirani polimerni slojevi koji se slažu jedan na drugi stvarajući proizvod. Zatim, tonografski postupak generiran od strane tvrtke *Cubital*, kod kojeg čitavi UV osjetljivi kapljeviti polimerni proizvod očvršćuje od jednom djelovanjem elektrostatičkog tonera. Laminiranje tvrtke *Helsys*, odnosno povezivanje/rezanja materijala u obliku folija ili tanjih ploča zadnji je postupak aditivne proizvodnje razvijen 1991. godine. Godinu poslije, otkriveni su sustavi laserskog zračenja korišteni za taljenje praškastog materijala, a postupak je nazvan selektivno lasersko srašćivanje. Devet godina nakon pojave stereolitografije, konkretno 1996. godine, tvrtka *3D System* proizvela je svoj inicijalni 3D pisac *Actua 2100* temeljen na *ink-jet* mehanizmu. Novi trend u industriji popratila je još jedna tvrtka, *Z Corporation*, koja je iste godine plasirala svoj pisac za MIT postupak, nazvan *Z402 3D*.

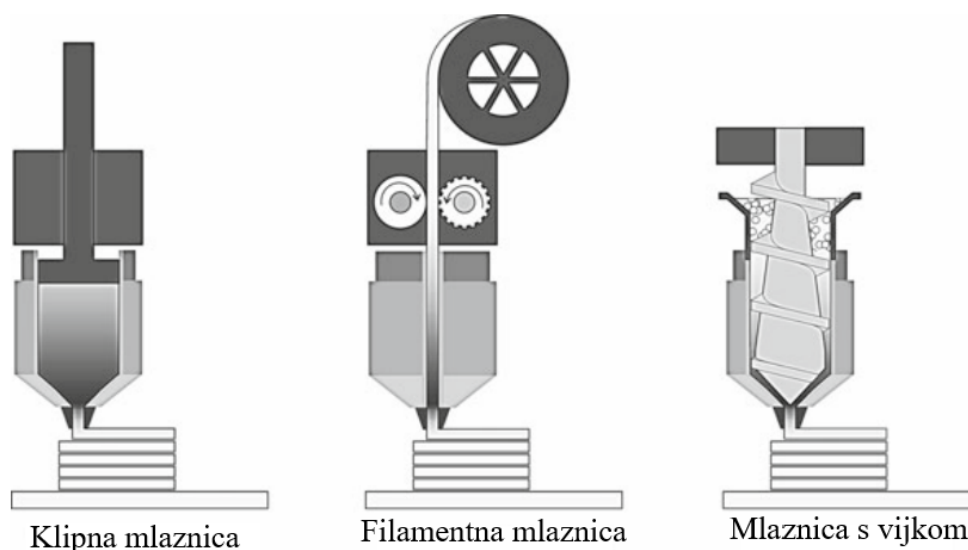
Tijekom godina, različitom dinamikom otkrivali su se novi i unaprjeđivali već postojeći postupci, a prioritet suvremene industrije jest velikoserijska aditivna proizvodnja. Na slici 2.6 u nastavku su kronološki prikazani najvažniji događaji u razvoju aditivnih tehnologija.



Slika 2.6 Povijesni razvoj aditivnih tehnologija na lenti vremena [10]

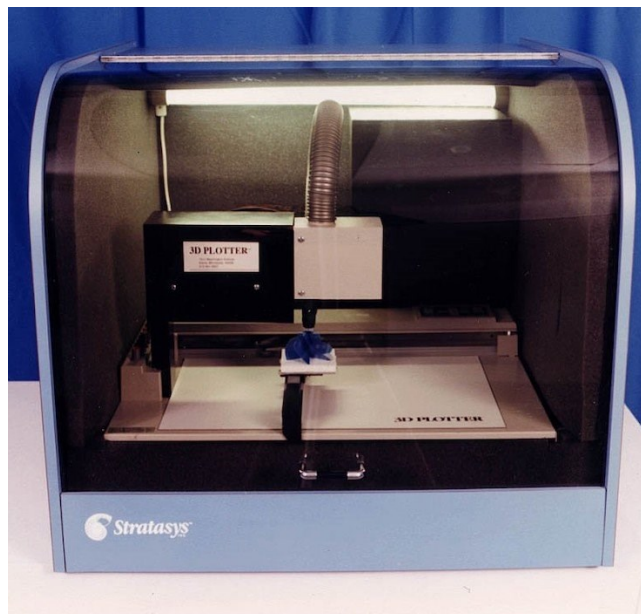
3. POSTUPAK NANOŠENJA RASTALJENOG FILAMENTA (eng. *FUSED FILAMENT FABRICATION*)

Ekstrudiranje materijala (eng. *Material Extrusion – MEX*) aditivna je tehnika sastavljena od konstantnog protoka rastaljenog materijala kroz mlaznicu te njegovog slaganja u slojeve kako bi se postigla trodimenzionalna struktura. Osim plastomera i njihovih kompozita, ekstrudirati se mogu kompoziti čiji su konstituenti polimeri i materijali poput metala ili keramike. Pri takvom izboru filameta, tali se samo polimer, koji se u naknadnim koracima uklanja, kako bi se omogućilo sinteriranje metala te postizanje pune gustoće, konačnih dimenzija i svojstava proizvoda. Ovisno o izvedbi ekstrudera, ovaj aditivni proces se može kategorizirati u tri skupine koje su shematski prikazane na slici 3.1. Klipna mlaznica koristi se kada je u pitanju rastaljeni materijal veće fluidnosti, a pokretačka energija jest stlačeni zrak. Prilikom korištenja vijčanog ekstruder primarni je zadatak priprema smjese ili kapsula određenih reoloških i mehaničkih karakteristika, prikladnih za uređaje ove aditivne tehnologije. Tako pripremljena mješavina materijala mora biti prije svega zadovoljavajuće viskoznosti kako bi mogla protjecati kroz mlaznicu. Posljednja izvedba, i u ovom radu će biti detaljnije opisana, jest mlaznica koja se koristi kada je polimerni materijal u obliku filameta. [3]



Slika 3.1 Različiti oblici mlaznica [3]

Ekstrudiranje materijala u obliku filameta, patentirano je i komercijalizirano još 1988. godine kada je tvrtka *Stratasys* osmislila postupak taložnog očvršćivanja (eng. *Fused Deposition Modeling* - FDM). Na slici 3.2 prikazan je prvi uređaj za taložno očvršćivanje. [1]



Slika 3.2 Prvi uređaj za taložno očvršćivanje tvrtke *Stratasys* [11]

FDM postupak je tijekom godina znatno proširio svoje značenje pa se kroz dio svoje povijest praktički koristio kao sinonim za aditivnu tehniku ekstrudiranja materijala. Međutim, kako je istek patenta tvrtke *Stratasys* bio je predviđen za 2009. godinu, članovi *RepRap* zajednice su 2005. godine morali implementirati novi naziv za vrlo sličnu tehnologiju, kako bi svojim korisnicima omogućili uporabu iste bez kršenja autorskih prava. Odlučeno je da će je nazvati *Fused Filament Fabrication* – FFF. Osnovna ideja tehnologije nanošenja rastaljenog materijala (FFF) jest brza izrada vrlo kompliciranih geometrija bez uporabe skupih industrijskih alata. Može se reći da je FFF postupak ekstruzijski proces izrade proizvoda slojevitim slaganjem rastaljenog filameta. U današnjoj modernoj industriji FDM i FFF postupci su zapravo ekvivalentni i sinonimi, te je teško razlučiti jasnu granicu između ta dva procesa. S druge strane, pored različite povijesne pozadine, postoje određene razlike u opremi i svojstvima koja se mogu postići ovim dvama aditivnim tehnologijama. Kada se koriste industrijski FDM uređaji, tijekom 3D ispisa se zagrijava cijela komora, pri otprilike 90 °C, te se tako osigurava proizvodnja izradaka boljih karakteristika. U usporedbi s tim, FFF uređaji su inicijalno konstruirani bez mogućnosti ostvarivanja zatvorene atmosfere, odnosno bez komore. Posljedično, oni jesu cjenovno prihvatljiviji, ali je materijal nakon izlaska iz mlaznice i doticaja sa zagrijanom

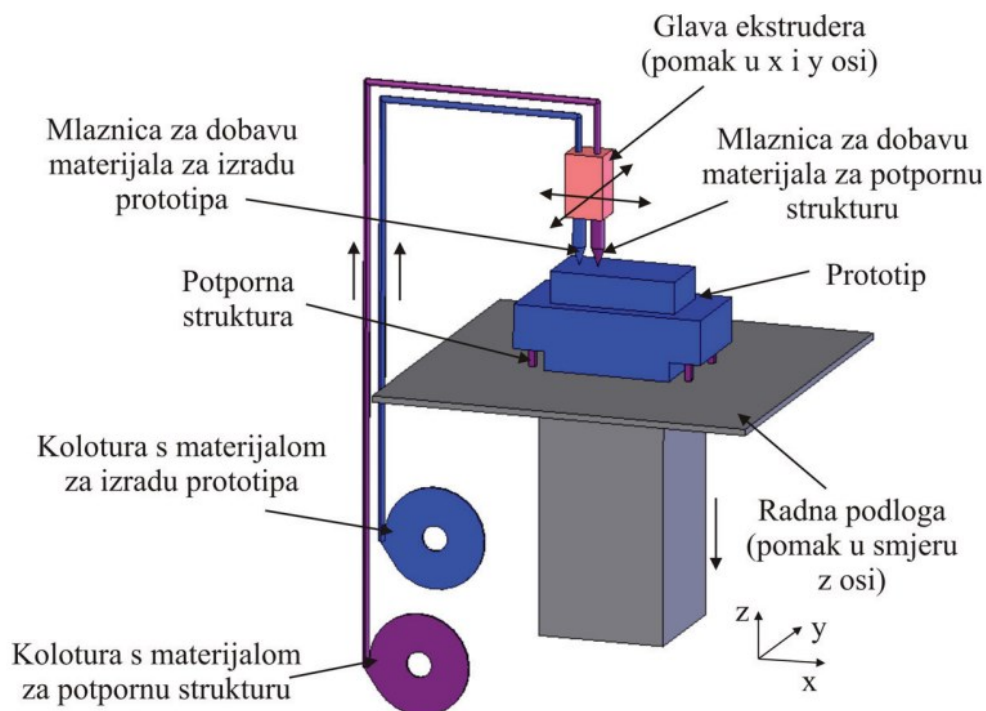
radnom površinom izložen temperaturnim fluktuacijama. Takve temperaturne razlike uzrokuju zaostala naprezanja unutar proizvoda pa se zato radije izabire FDM postupak kada se žele postići ciljane ili strogo zahtijevane karakteristike. Stoga, pojam taložnog očvršćivanja FDM se referira na industrijske i profesionalne primjene ove aditivne tehnike. Iako malobrojne, prednosti FFF postupka u odnosu na taložno očvršćivanje su:

- FFF uređaji su cjenovno pristupačniji i prikladniji za hobi ili kućnu upotrebu
- FFF sustavi su manjih dimenzija pa se bolje uklapaju u manje urede ili prostorije
- FDM zahtijeva znatno veću količinu električnog napajanja. [12–15]

Bitno je spomenuti da su gotovi svi materijali koji se koriste na FDM uređajima istovremeno kompatibilni s FFF uređajima što uvelike olakšava proizvodnju i odabir materijala. [15]

3.1. Opis postupka i glavnih dijelova 3D pisača za FFF postupak

Istekom patenta tvrtke *Stratasys* te velikom zainteresiranosti kupaca, na tržištu su se pojavili mnogobrojni proizvođači 3D pisača, što je uzrokovalo pojavu mnoštva različitih izvedbi i modela. Takvi uređaji su bili lako cjenovno dobavljivi, a uz to nisu zahtijevali posebno inženjersko predznanje osim osnovnog CAD modeliranja. Bez obzira o kojem je proizvođaču riječ, svaki uređaj za FFF postupak se sastoji od: koloture s materijalom za izradu prototipa, sustava za provođenje materijala, mehanizma za ekstrudiranje, mlaznice za dobavu filamenta te radne podloge. U nekim slučajevima, kada je potrebno izraditi proizvod složene geometrije, nužna je potporna struktura. Nerijetko se za izradu potporne strukture koristi različiti materijal od onoga za ispis osnovne strukture. Tada se, pored koloture s osnovnim materijalom, nalazi kolotura s materijalom za potporne strukture, te mlaznica za dobavu potpornog materijala koji se do ekstrudera dovodi zasebnim putem. Osnovni dijelovi FFF uređaja prikazani su na slici 3.3 u nastavku. [7,16]



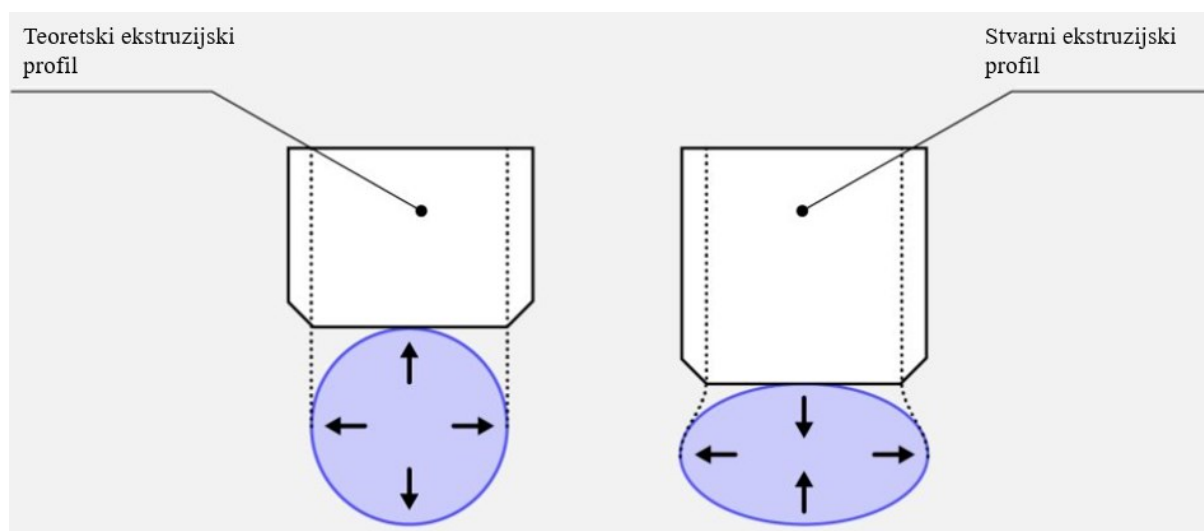
Slika 3.3 Shematski prikaz uređaja za FFF postupak [7]

Ključni dio u procesu ovog postupka aditivne tehnologije jest mehanizam za ekstrudiranje koji se može podijeliti u četiri dijela:

- motor za ekstrudiranje filamenta
- manji spremnik kroz koji prolazi filament bez taljenja materijala
- grijani dio u kojem se tali materijal
- mlaznica u kojoj dolazi do promjene poprečnog presjeka. [16]

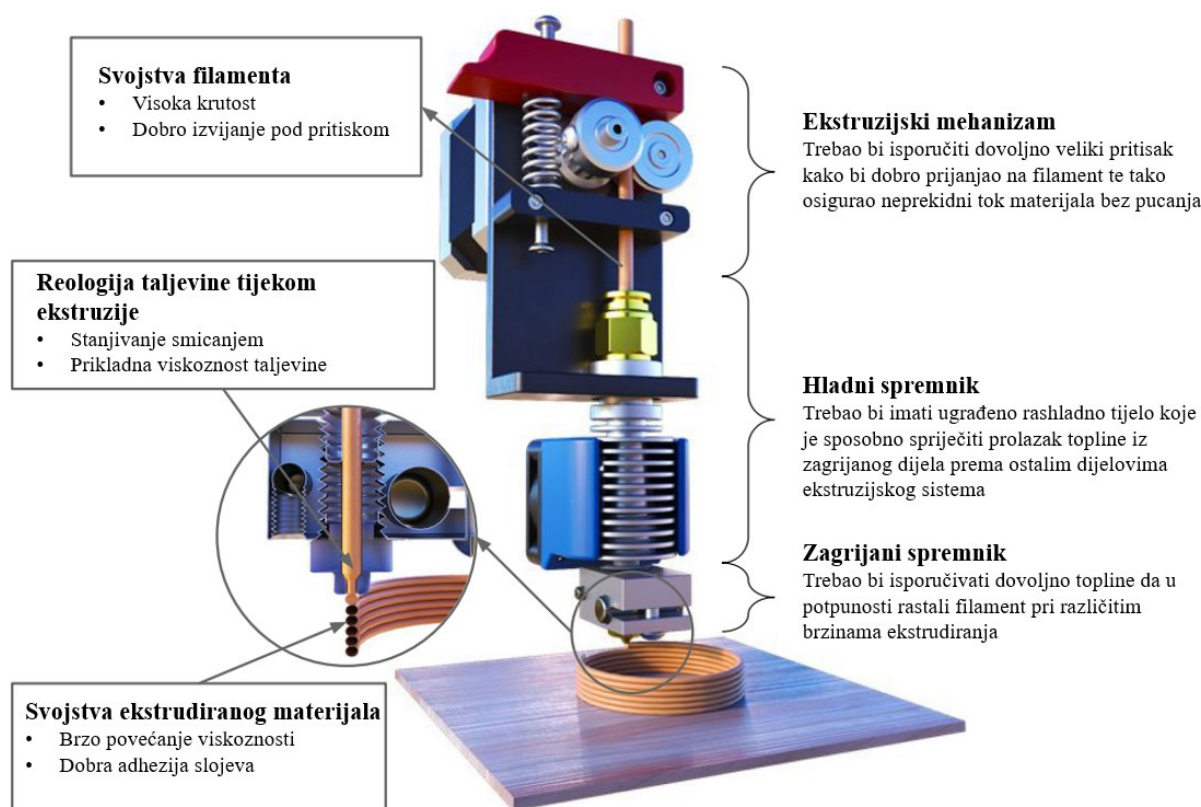
Inicijalni dio ekstruzijskog procesa jest najodgovorniji za kontinuirano tečenje filamenta, što je presudno za postizanje najbolje moguće kvalitete 3D ispisanog proizvoda. U konvencionalnim 3D pisačima dvije su izvedbe motora koje pokreću uređaj. Jedna od varijanti je sa, a druga je bez promijene stupnja prijenosa. Bez obzira koji motor se nalazi u uređaju, on se izravno povezuje s pogonskim zupčanikom koji je pak s jedne strane u kontaktu s filamentom, a s druge strane s kompresijskim zupčanikom. Primarni zadatak mehanizma je stvoriti odgovarajući pritisak na filament. Preveliki pritisak i povišena brzina ekstrudiranja, prilikom uporabe krto materijala, mogu negativno djelovati na izradak uzrokujući raspadanja filamenta. S druge

strane, i nedovoljni pritisak ima negativne posljedice jer dovodi do nehomogenog tečenja materijala. Nakon prolaska kroz zupčanike, materijal dolazi do spremnika čija je funkcija odvojiti hladni i zagrijani dio ekstruzijskog mehanizma, odnosno simulira rashladno tijelo pa je često unutar spremnika smješten ventilator za reguliranje temperature. U slučaju da konstrukcijsko rješenje spremnika nije zadovoljavajuće i da toplina prelazi u rashlađeni dio mehanizma, ono bi uzrokovalo taljenje filameta što bi posljedično zaustavilo tečenje materijala. Upravo to održavanje filameta u čvrstome stanju u spremniku jest zaslužno za uspješno ekstrudiranje jer se tada filament ponašao kao klip koji vrši pritisak na rastaljeni materijal. Sljedeći dio ekstruzijskog mehanizma je grijaći spremnik, mjesto taljenja filameta. Kako se u aditivnim tehnologijama, pa tako i u FFF postupku, najčešće koriste polimeri i njihovi kompoziti potrebno je razmotriti njihovo ponašanje u rastaljenom stanju. Naime, takvi materijali, zahvaljujući slabim van der Waalsovima silama u strukturi, sklone su fizikalnim promjenama prilikom zagrijavanja iznad temperature staklišta (T_g). Također, polimerni materijali imaju nizak koeficijent prijelaza topline. To je važno uzeti u obzir prilikom konstruiranja grijaćeg spremnika jer se samom njegovom geometrijom, odnosno duljinom spremnika, može postići duže zadržavanje filameta pri povišenoj temperaturi što će materijalu osigurati dovoljno vremena za postizanje zahtijevanog stupnja viskoznosti. Posljednji dio ekstruzijskog sustava je mlaznica. Ona je izravno spojena na grijaći spremnik te bi trebala biti zagrijana pri istoj temperaturi. Na mlaznici ujedno dolazi do redukcije i promijene poprečnog presjeka iz filamentnog u oblik rastaljene čestice materijala kao što je prikazano na slici 3.4.[16]



Slika 3.4 Teoretski i stvarni profil filameta pri izlasku iz mlaznice [17]

Naime, kod uobičajenih FFF uređaja poprečni presjek filameta je u domeni od 1,75 – 2,85 mm. Stoga, ulazni promjer mlaznice mora biti u rasponu filamentnog poprečnog presjeka dok izlazni dio varira u rasponu između 0,15 i 1,00 mm, ovisno o izvedbi. Promjer izlaznog dijela mlaznice izravno utječe na kvalitetu površine jer se manjim promjerima proizvode prototipovi s kompleksnim i preciznim detaljima. Oprečno tome, smanjeni promjer mlaznice otežava protočnost materijala i usporava brzinu ispisa proizvoda. Također, karakteristike mlaznice imaju izraziti utjecaj na izabrani ekstruzijski pritisak. Naime, uspješnost ovog dijela procesa aditivne tehnologije, prije svega je određena maksimalnim pritiskom ostvarivim ekstruzijskim mehanizmom koji je pak diktiran temperaturom taljenja (T_m) i brzinom ekstrudiranja. Na slici 3.5 predočen je ekstruzijski mehanizam s istaknutim najvažnijim dijelovima. [16]



Slika 3.5 Dijelovi i karakteristike ekstruzijskog mehanizma [16]

Cjelokupni FFF postupak započinje konstruiranjem CAD modela u jednom od računalnih softvera te prebacivanjem istoga u STL oblik datoteke. Ta vrsta datoteke je nužna jer je kao takva razumljiva računalnim programima (tzv. *slicerima*) s pomoću kojih se model dijeli u horizontalne slojeve. Nakon podešavanja niza utjecajnih parametara, materijal se s kolotura s pomoću motora dovodi do sustava za ekstrudiranje koji u najčešćim izvedbama ima slobodu

kretanja u dvije ravnine, X i Y. U tom trenutku, nerastaljeni filament preuzima ulogu klipa tako što stvara kontinuirano tečenje materijala. Nadalje, dolaskom materijala do vrućeg spremnika, on se zagrijava malo iznad temperature njegovog taljenja. Temperaturu je potrebno pažljivo regulirati, jer prevelika količina toplinske energije može uzrokovati oksidaciju ili ekstruziju prevelike količine rastaljenog filameta što se negativno odražava na dimenzijsku točnost prototipova. Promjenom poprečnog presjeka te napuštanjem mlaznice, materijal dopijeva u područje sobne temperature, a kako se uglavnom radi o polimernim filamentima, u takvim uvjetima brzo očvršćuje. Kako bi se osigurala dovoljna fluidnost filameta i adhezivnost slojeva prije očvršćivanja na radnoj podlozi, preporučljivo je održavati temperaturu kapljevito materijala malo iznad temperature očvršćivanja polimera. Izradom prvoga sloja u skladu sa svim zadanim parametrima, podloga, koja ima slobodu kretanja u vertikalnoj ravnini, se spušta za debljinu novog sloja te se postupak ciklički ponavlja dok se ne izradi čitav 3D proizvod. U pravilu nije potrebna naknada obrada ili čišćenje, već je izradak spreman za uporabu ili povezivanje s ostalim dijelovima u sklop. [7,16]

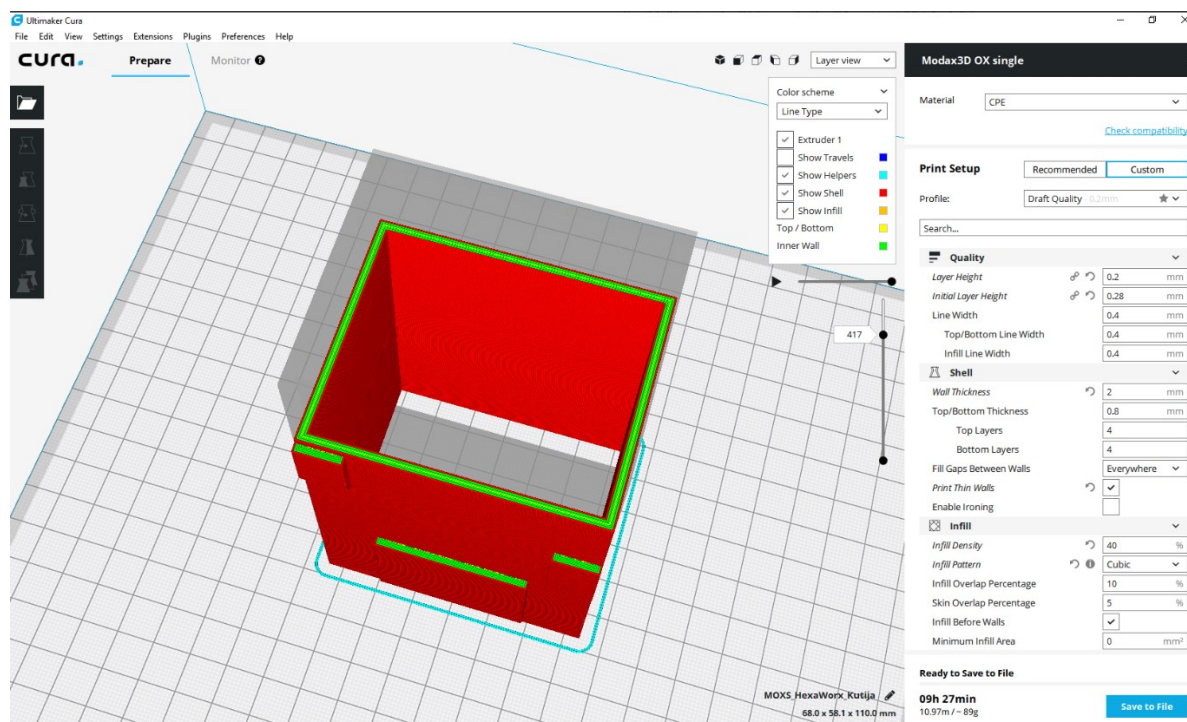
Međutim, ponekad je potrebno ukloniti potporna strukturu. Potporna struktura, korištena je kod gotovo svih aditivnih tehnologija jer sprečava deformaciju, osigurava dobro povezivanje izratka s radnom podlogom ili osnovnim dijelom proizvoda. U FFF aditivnoj tehnologiji se svaki sljedeći sloj može nanositi malo stršeći prema van u odnosu na prethodni sloj što omogućuje blago proširenje konture izratka. Takvim rješenjima se pristupa kada geometrija proizvoda zatvara kut $\geq 45^\circ$ s radnom podlogom. U slučajevima, kada je prepust manji od 45° u odnosu na radnu podlogu ili prototip uključuje konstrukcije u obliku mostova, nužna je uporaba potporne strukture. One se uglavnom pojavljuju u dvije forme; rešetkastoj ili u obliku stabla kao što je prikazano na slici 3.6. Kako bi se što lakše uklonila potporna struktura nakon završetka procesa, poželjno je koristiti lako razgradive materijale. Sukladno tome, najčešće se koriste polivinilni alkohol (PVA) i polistiren velike žilavosti (HIPS). Polivinilni alkohol je sintetički polimer, bez boje i mirisa, topiv u vodi pa je idealan za potporne strukture zbog laganog uklanjanja. Nedostatak PVA je temperaturna osjetljivost koja često uzrokuje začepljenje mlaznice 3D pisača. S druge strane, HIPS se rastapa u biljnim uljima, ali je manje osjetljiv na temperaturne promjene. Iako se uporabom bilo kojeg materijala kao potporne strukture ne pojavljuje potreba za naknadnom obradom, značajno se produžuje vrijeme i povisuje cijena proizvodnje. [6,18]



Slika 3.6 Dva osnovna oblika potporne strukture [6]

3.2. Utjecajni parametri FFF postupka

Konverzijom trodimenzionalnog modela u oblik datoteke, kasnije i programskog jezika koji je razumljiv FFF uređaju dolazi se do zahtjevnog i kompleksnog dijela procesa, točnije do izbora odgovarajućih parametra proizvodnje. Naime, računalni programi, kolokvijalno nazvani „sliceri“ s pomoću numeričkog jezika upravljaju uređajima kao što su 3D pisači ili CNC strojevi. Kako je jedan od nedostatak aditivne tehnologije nanošenja rastaljenog materijala upravo to da su mehanička svojstva izratka uvelike ovisna o parametrima procesa, to dovodi do pojave anizotropnosti svojstava. Dakle, organizirati FFF tehnologiju pogodnu za veću serijsku proizvodnju svodi se zapravo na pronalaženje optimalnih utjecajnih parametara. Na slici 3.7 prikazano je sučelje jednog „slicer“ programa s nizom parametra koji se mogu modificirati. [19]



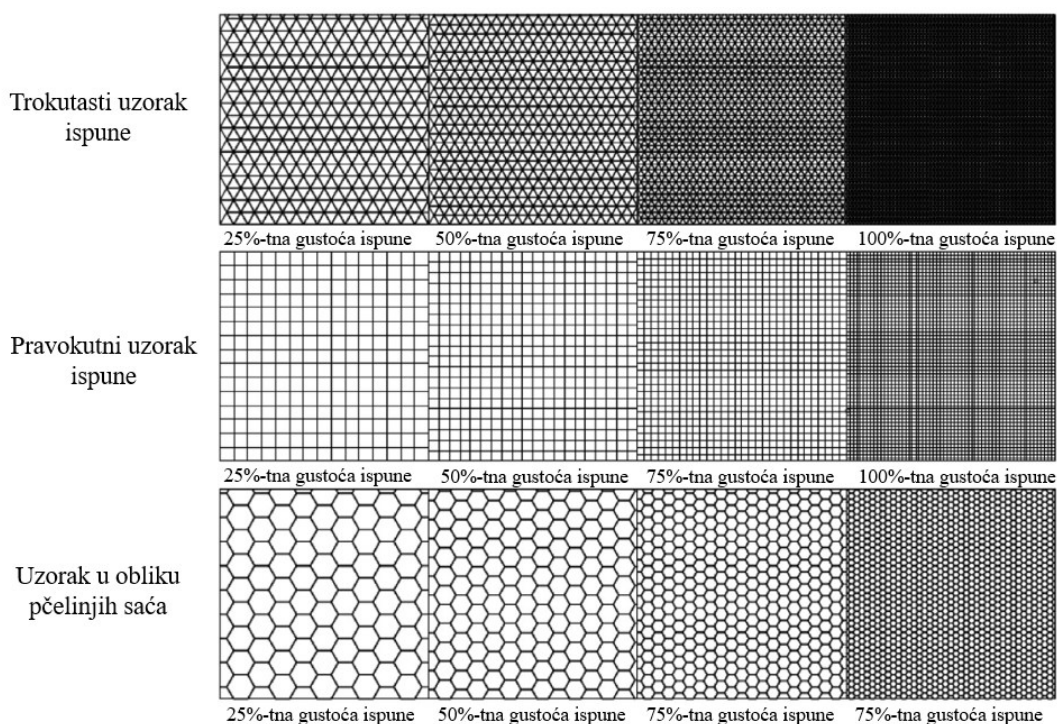
Slika 3.7 Sučelje slicer programa Cura [19]

U nastavku su nabrojani najznačajniji parametri:

- **Debljina sloja** – odnosi se na debljinu (ili visinu) sloja nanesenog istiskivanjem filameta iz vrha mlaznice, a mjereni se u smjeru Z osi. U pravilu, promjer ekstrudera i materijal diktiraju debljinu sloja koja je uglavnom manja od samog promjera mlaznice.
- **Orijentacija izratka** – opisuje kako je dio pozicioniran na radnoj podlozi u odnosu na koordinatne osi te kutove koje zatvara s radnom podlogom.
- **Raster orijentacija** – to je kut s obzirom na X os podloge izratka, točnije kut pod kojim se ekstrudira materijal. Proteže se u rasponu od 0° do 90°.
- **Razmak između rastera** – udaljenost između dviju susjednih putanja alata na jednom sloju ispisanog prototipa.
- **Temperatura ekstrudiranja** – temperatura na koju je zagrijan plastomerni filament unutar mlaznice prije samog ekstrudiranja u FFF procesu. Prilagođava se u skladu s parametrima kao što su brzina ispisa i odabrani materijal filameta.
- **Brzina ispisivanja** – brzina mlaznice kojom se kreće u horizontalnoj ravnini iznad radne podloge.
- **Uzorak ispune** – uzorak u obliku kojeg se materijal taloži unutar strukture proizvoda izrađenog FFF uređajem. Često korišteni uzorci su: dijamantni, poprečni, linearni,

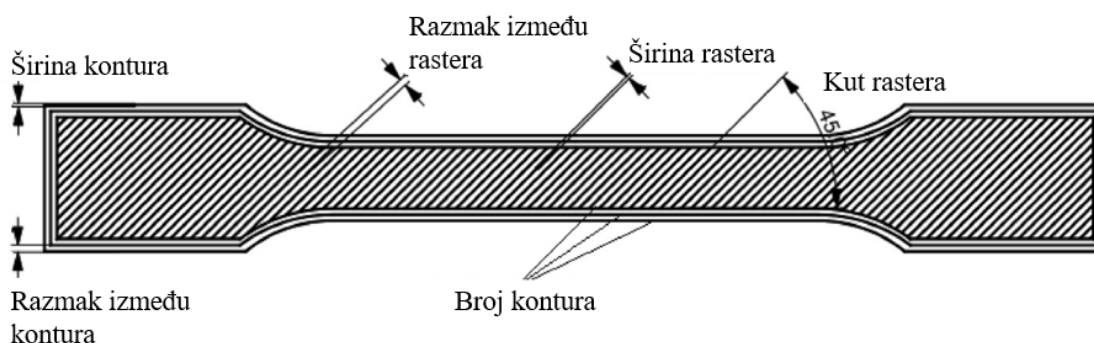
trokutasti te oblik pčelinjih saća. Upravo ovaj zadnji posjeduje veću mehaničku otpornost od ostalih navedenih uzoraka.

- **Gustoća ispune** – vanjski slojevi ispisanih prototipova tehnikom nanošenja rastaljenog materijala su uglavnom puni i čvrsti, dok unutrašnjost ne mora biti u potpunosti ispunjena, već prevladavaju različiti uzorci određenog postotka ispune koji definiraju gustoću cijele strukture. Različiti oblici i gustoće ispuna vidljivi su na slici 3.8. [20]



Slika 3.8 Različiti oblici i gustoće ispune [20]

- **Promjer mlaznice** – promjer vrha mlaznice
- **Širina rastera** – širina linije rastaljenog filameta duž putanje ekstrudera. Prvenstveno ovisi o promjeru vrha mlaznice.
- **Broj kontura** – broj čvrstih vanjskih slojeva koji okružuju unutrašnju strukturu FFF proizvoda.
- **Širina kontura** – odnosi se na debljinu vanjskih slojeva koje okružuju unutrašnju strukturu.
- **Razmak između kontura** – udaljenost između čvrstih vanjskih slojeva odnosno kontura. Različiti procesni parametri povezani s putanjom alata definirani na uzorku prikazani su na slici 3.9. [20]



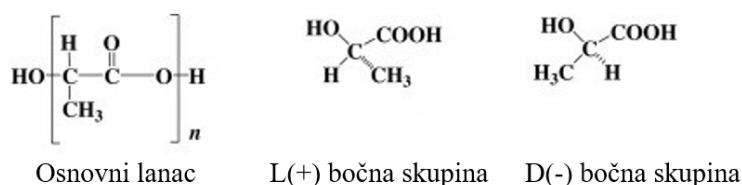
Slika 3.9 Definirani procesni parametri [20]

3.3. Materijali korišteni u FFF aditivnoj tehnologiji

Kada je riječ o materijalima za FFF postupak, najčešće izbor pada na polimerne materijale. Iako se ne mogu proizvoditi na svim 3D pisacima primjenom tehnike nanošenja rastaljenog materijala, kompoziti koji su kombinacija polimera i ugljičnih, staklenih ili metalnih vlakana, također se smatraju pogodnim za ovaj postupak pružajući razne strukturalne prednosti. Teoretski, moguće je čak ispisivati hranu (npr. čokoladu) i biološke paste, ali se takvi materijali koriste uglavnom za eksperimentalna istraživanja i radove. Prilikom uporabe bilo kojeg FFF uređaja potrebno je provjeriti koji su njemu kompatibilni materijali. Na neke 3D pisace moguće je primijeniti tek nekoliko materijala, drugi ne prihvaćaju abrazivne kompozitne materijale, a neki su čak ograničeni samo na one filamente proizvedene pod okriljem matičnih proizvođača uređaja. Ipak, polimerni materijali, najraširenija su skupina sirovina za FFF aditivnu tehnologiju. Zbog specifične nadmolekularne strukture, zatim viskoznosti koja dopušta ekstrudiranje pri vrlo visokim vrijednostima tlaka uz istovremeno brzo očvršćivanje te dobre međuslojne adhezije, najradije se upotrebljavaju amorfni polimeri. Kao tri najznačajnija izdvajaju se: polilaktična kiselina (PLA), akrilonitril/butadien/stiren (ABS) i polietilen tereftalat glikol (PETG). [4,7]

Polilaktična kiselina je biorazgradiv, biokompatibilan i obnovljiv poliester koji se uglavnom dobiva iz kukuruznog škroba. Monomer mliječne kiselina potječe iz prirodnih izvora bakterijskom fermentacijom kukuruza, šećerne trske, krumpira i drugih biomasa. Zbog dobrih mehaničkih svojstava i dobre obradivosti česta je zamjena za polimere na bazi nafte. S druge strane, PLA je hidrofoban polimer, niske vrijednosti žilavosti i toplinske stabilnosti. Svojstva

PLA ovise o odnosu L i D bočnih skupina mliječne kiseline prikazanih na slici 3.10. L-PLA pruža veću kristalnost strukture što uzrokuje višu temperaturu taljenja i krhkost. Čisti PLA se tali pri temperaturi od 180 °C, a temperatura staklišta je otprilike ≈60 °C. [21]



Slika 3.10 Osnovni lanac i bočne skupine PLA [21]

PLA svoju primjenu pronalazi u brojnim biomedicinskim područjima pa se koristi za proizvodnju šavova, stentova, medija za dijalize te uređaja za isporuku lijekova. Tijekom godina razvijen je veći broj tipova polilaktične kiseline. Sukladno tome na tržištu se mogu pronaći: PLA s dodatkom bakrenih čestica, PLA s brončanim česticama, PLA s dodatkom drvenih vlakana, PLA s fosforescentnim česticama, LOW Warp PLA i drugi. Za procese aditivnih tehnologija PLA filament uglavnom dolazi u dva promjera, 1,75 mm i 2,85 mm. Skladištenje PLA predstavlja jednu od nedostatak zbog njegove higroskopnosti, privlačnost molekula vode iz zraka, koja se odražava kroz povećanje krhkosti i promjera filameta, pojavu mjehurića i loma. U tablici 3.2 nabrojana su pozitivna i negativna svojstva polilaktične kiseline. [22]

Tablica 3.1 Prednosti i nedostaci PLA [7,22]

| Prednosti | Nedostaci |
|---|---|
| Relativno niska temperatura 3D ispisa (temperatura mlaznice 190-220 °C, a podloge 50-60 °C) | Tendencija k deformiranju prilikom izlaganja povišenim temperaturama |
| Lako pigmentiran materijal, već mala naknadna obrada značajno povećava kvalitetu površine | Nisu namijenjeni za vanjsku upotrebu jer s vremenom gube funkcionalnost |
| Niska temperatura staklišta omogućuje detaljizirane površine | Ne koriste se za izradu dijelova koji će biti u doticaju s hranom |
| Biorazgradiv i netoksičan, bez neugodnih mirisa tijekom procesa | Higroskopan materijal |

Akrilonitril/butadien/stiren ili skraćeno ABS je polimer dobiven kopolimerizacijom tri monomera različite zastupljenosti: akrilonitrila (23-41%), butadiena (10-30%) i stirena (29-60%). Promjenom volumnog udjela bilo koje komponente utječe se na konačna svojstva ABS-a. Svaki od monomera pospješuje neku od karakteristika:

- akrilonitril – sintetski monomer proizveden od propilena i amonijaka, segment ABS-a koji mu daje kemijsku otpornosti i toplinsku stabilnost
- butadien – zapravo nusprodukt proizvodnje etilena zahvaljujući kojemu ABS posjeduje visoke vrijednosti žilavosti i otpornosti na udarce
- stiren – produkt katalitičke reakcije dehidrogenacije etilbenzena pružajući krutost i istovremenu obradivost ABS polimera. [23]

U pravilu ABS ima zadovoljavajuću krutost i žilavost pri niskim temperaturama te se mogu ostvariti proizvodi vrlo dobre dimenzijske točnosti, a uz dodatak UV stabilizatora primjenjiv je i u vanjskim uvjetima. Neke od prednosti i nedostatak materijala prikazani su u tablici 3.3. [23]

Tablica 3.2 Prednosti i nedostaci ABS [7,23]

| Prednosti | Nedostaci |
|--|--|
| Otpornost na visoke temperature | Jako osjetljiv na temperaturne promijene što dovodi do izvijanja i pucanja izradaka |
| Brza i učinkovita naknadna obrada | Potrebno kućište 3D pisača zbog održavanja temperature, ali i sprečavanja širenja neugodnog mirisa karakterističnog za ABS |
| Poprilično otporan na UV zračenje | Za aditivnu tehnologiju potrebne visoke temperature |
| Dobra otpornost na udarce, prije pucanja materijala doći će do deformacije | Higroskopan materijal |

Polietilen tereftalat glikol jest poliester, nastao dodatkom glikola u procesu polimerizacije običnog polietilen tereftalata. Za posljedicu prisustva glikola u sastavu polimera, dobiva se bistriji, manje lomljivi filament, odnosno superiorniji i uporabljiviji materijal u odnosu na sami PET. Primjenjuje se za bilo koje proizvode koji zahtijevaju čvrstoću i žilavost, a važan atribut mu je mogućnost primjene na otvorenom što sugerira otpornost na sunčevu svjetlost i druge klimatske uvjete. Također, neizostavan problem gotov svih filamenata jest upijanje vlage iz okoliša pa se higroskopnost očituje i kod PETG-a. Na industrijskom tržištu se ovaj materijal pojavljuje pod različitim nazivima poput: Fillamentum CPE HG100, 3D4Makers PETG Carbon, ColorFabb nGen, Azurefilm Silk i mnogi drugi. Svojstva PETG-a, koja su smještena između karakteristika PLA-a i ABS-a, nabrojana su u tablici 3.4 u nastavku. [24,25]

Tablica 3.3 Prednosti i nedostaci PETG [26]

| Prednosti | Nedostaci |
|---|--|
| Izvrсна adhezija slojeva pa su prototipovi žilavi i čvrsti | Visoke temperature procesa (220-250°C) |
| Otporan na UV zračenje i temperaturno stabilan do 80 °C | Komplicirana razgradnja materijala |
| Nema pojave uvijanja pa je dopuštena upotreba rashladnih uređaja i ne zahtijeva grijanu radnu podlogu | Pojava „stringing-a“ – tanke niti filameta zaostaju na izratku uslijed dugotrajnog kretanja mlaznice |
| Koristi se za izradu dijelova koji će biti u kontaktu s hranom | Higroskopian materijal |

Osim gore navedenih najzastupljenijih materijala u FFF aditivnoj tehnologiji, u nastavku su nabrojani ostali primjenjivi materijali i njihove osnovne karakteristike:

Tablica 3.4 Ostali primjenjivi materijali i njihova svojstva [27]

| Materijal | Svojstva |
|---------------------------------|---|
| Poliamid | Čvrst, istovremeno fleksibilan s dobrom otpornošću na udarce, abraziju i kemikalije |
| CPE (kopoliester) | Izdržljiv sa sjajnom završnom obradom, i dobrom otpornošću na udarce i toplinu |
| PC (polikarbonat) | Čvrst materijal, toplinski otporan do 110 °C |
| TPU (termoplastični poliuretan) | Fleksibilan materijal sličan gumi s visokom otpornošću na udarce i trošenje |
| PP (polipropilen) | Izdržljiv i otporan materijal koji zadržava oblik i nakon savijanja i torzije |
| PVA (polivinil alkohol) | Materijal topiv u vodi; korištena za potporne strukture |

3.4. Prednosti i nedostaci FFF postupka [1,4,7,22]

Postupak aditivne tehnologije nanošenjem rastaljenog materijala posjeduje niz prednosti u odnosu na druge procese. Neke od tih prednosti su spomenute u prethodnom dijelu rada, ali u nastavku će biti nabrojana preostala svojstva kojima se FFF u pozitivnom smislu izdvaja od drugih postupaka:

- mogućnost proizvodnje prototipova u širokom rasponu dimenzija možda je najznačajnija prednost naspram ostalih aditivnih tehnologija
- zbog jeftinih dijelova i jednostavne konstrukcije, 3D pisači postaju uređaji većeg radnog opsega; pri tome im cijena stagnira, a kvaliteta i mehanička svojstva izratka su iznenađujuće dobra s obzirom na potrebna ulaganja u opremu i materijal

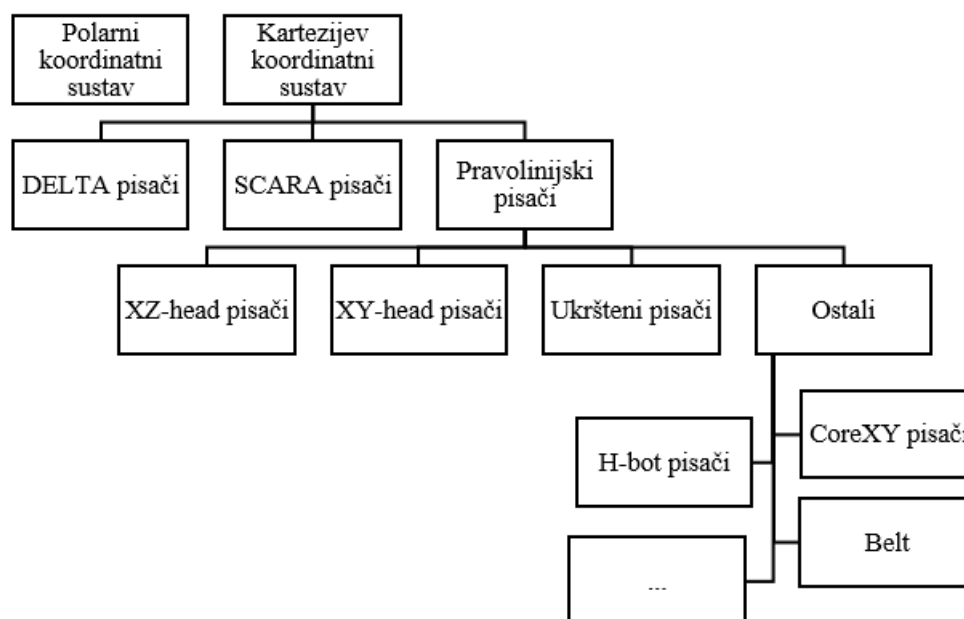
- konvencionalni filamenti koji se koriste u ovom postupku su jeftiniji i lako dobavljivi uspoređujući ih s drugim materijalima koji se koriste kod selektivnog laserskog srašćivanja. Također, široki je spektar polimernih materijala koji se mogu primjenjivati, a da pri tome ne zahtijevaju posebne modifikacije i pripreme.
- uglavnom nema potrebe za čišćenjem ili hlađenjem prototipa, osim uklanjanja potporne strukture, dok se kod drugih alternativnih metoda proizvod uranja u alkoholne kupke ili naknadno obrađuje stlačenim zrakom
- ne upotrebljavaju se otrovni materijali pa stoga nema potrebe za smještanjem uređaja u posebne prostorije
- proizvod je pogodan za različite procese naknadne obrade poput bojanja, pjeskarenja, galvaniziranja, bušenja...

S druge strane, ova aditivna tehnologija ima i neke nedostatke, a neki od njih su navedeni u nastavku:

- jeftini dijelovi imaju i negativnu stranu, pa se iz tog razloga na podešavanje uređaja često gubi puno vremena te su nužna učestala umjeravanja i kontrola dijelova (npr. napetost remena, čišćenje ekstrudera, podmazivanje pa čak i zamjena mlaznica)
- kvaliteta sirovine izrazito utječe na uspješnost proizvodnje jer filamentna dimenzijska nepreciznost može dovesti do niza problema pri ekstrudiranju
- filament se mora pažljivo skladištiti kako bi se izbjegla apsorpcija vlage
- slabije adhezijske veze između slojeva nego kod drugih aditivnih tehnologija
- temperaturne oscilacije kojima je podložan materijal nakon izlaska iz mlaznice uzrokuju pojavu zaostalih naprezanja ili raslojavanje strukture
- mehanička svojstva proizvoda, pogotovo čvrstoća, ovise o usmjerenosti strukture (čvrstoća je manja u smjeru okomitome na slaganje slojeva) i položaju na radnoj podlozi
- postiziva dimenzijska točnost je određena karakteristikama mlaznice te je u pravilu lošija nego kod drugih aditivnih procesa. Uže dimenzijske tolerancije postižu se primjenom mlaznica manjih promjera što rezultira produljenim trajanjem proizvodnje.

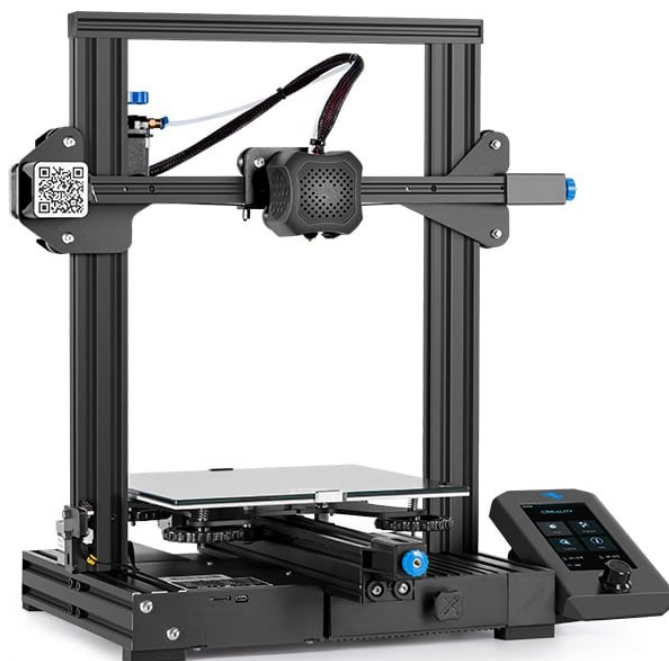
3.5. Sistematizacija uređaja za FFF postupak

Od svoje pojave 1980-tih godina prošlog stoljeća, uređaji za aditivnu proizvodnju doživjeli su veliki razvitak u pogledu tehnologije te ekspanzije u broju proizvođača. U praksi, mnoštvo je kriterija prema kojima bi se mogli sistematizirati uređaji za tehnologiju nanošenja rastaljenog materijala, ali vjerojatno dva najvažniju su operativni koordinatni sustav i osnovni mehanizam rada. Kako bi se ostvarila hijerarhija uređaja, nužno je razumjeti pozicioniranje u trodimenzionalnom prostoru. Svaka točka u prostoru, koristeći Kartezijev koordinatni sustav, se može opisati s pomoću tri koordinate koje leže na X, Y i Z osi pri čemu je svaka os okomita na preostale dvije. Dok se preko jedne osi može uspješno odrediti pozicija duž linije, koristeći sve tri osi, bilo koja točka zauzima svoje, točno određeno mjesto u prostoru. Dakle, preko X i Y osi opisuje se horizontalna orijentacija, dok Z os odgovara poziciji u vertikalnoj ravnini. Iako se ne oslanjaju svi 3D pisači na Kartezijeve koordinatni sustav, za pravilno funkcioniranje svakog FFF uređaja potrebna je neka vrsta opisivanja pozicija, kako bi se moglo upravljati ekstruzijskim sklopom. Stoga, neki uređaji koriste polarni dvodimenzionalni koordinatni sustav, od kojih je jedna linearna, polumjer od ishodišta, a druga kutna dimenzija. Treća dimenzija, odnosno visina, se reproducira jednostavnim podizanjem mlaznice. Kako nema u potpunosti točne sistematizacije FFF uređaja, kategorizacija se često temelji upravo na korištenim koordinatnim sustavima koja se može vidjeti na grafu 3.11. [28,29]



Slika 3.11 Sistematizacija FFF uređaja s obzirom na koordinatne sustave [28]

Zbog kompleksnosti i istovremene sličnosti teško je odrediti jasnu granicu i razliku među uređajima za FFF tehnologiju. Stoga, XZ-head i XY-head pisači su zapravo konstrukcijski isti uređaji, ali se navode kao dvije zasebne kategorije. Prvi spomenuti, **XZ-head** sustav kretanja, sastoji se od dvije paralelne i učvršćene konstrukcije građene od dviju vodilica smještenih u vertikalnoj ravnini (Z os). One omogućuju podizanje i spuštanje vodilice na kojoj se nalazi glava pisača čija je sloboda kretanja moguća samo u X osi. Kako bi se sustavu omogućilo ostvarivanje i treće dimenzije, radna podloga se pomiče u Y smjeru, prema naprijed ili prema natrag. Upravo to kretanje radne podloge je najveći nedostatak ovog tipa uređaja jer zahtijeva veći dio prostora za proizvodnju. Međutim, zbog jednostavnosti i prihvatljivih cijena najraširenija su vrsta 3D pisača. Ender 3 V2 (slika 3.12) i Prusa i3 MK3S+ pripadaju u ovu skupinu FFF uređaja. [30]



Slika 3.12 Primjer XZ-head pisača (*Ender 3 V2*) [30]

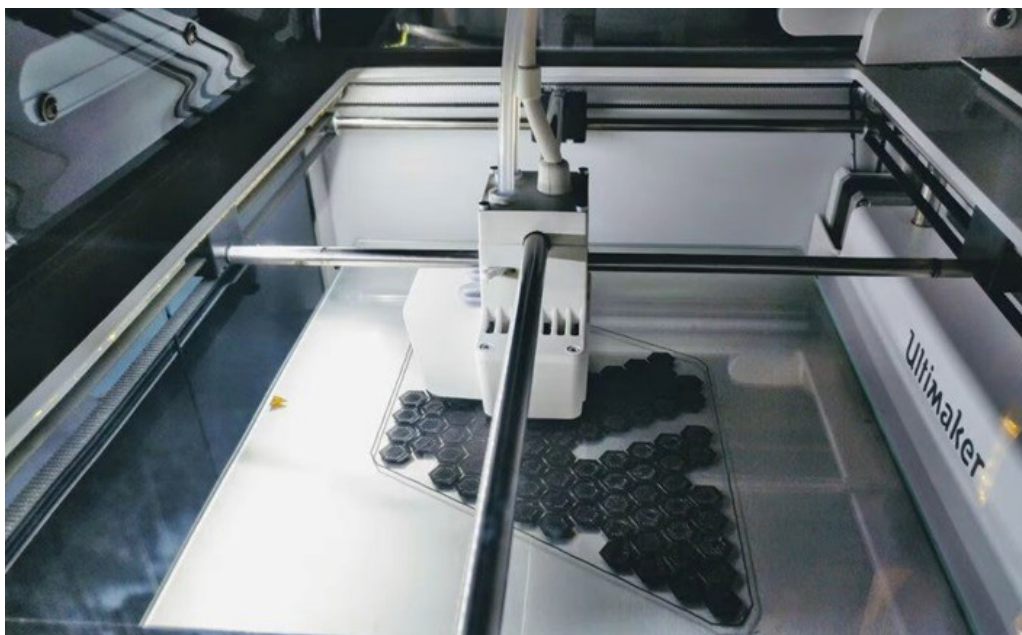
S druge strane, Creality Ender 5 (slika 3.13), kao da je preokrenuta inačica prethodna dva spomenuta pisača. Naime, konstrukcija koja se nalazila u Z osi sada su zapravo vodilice u Y osi što je povećalo slobodu kretanja glave pisače u još jednom, dodatnu smjeru, dok se radna podloga kreće potpuno zasebno, u vertikalnoj ravnini. Uređaje s takvim sustavom kretanja i kinematikom se svrstavaju u **XY-head pisače**. Opisane promijene, rezultirale su drugačijim izgledom, nalikom na CoreXY pisače. Uistinu, cijeli sustav za pokretanje glave pisača je

identičan CoreXY pisačima, dvije vodilice u Y osi i jednom u X osi, s razlikom da se kod XY-head pisača koriste dva odvojena motora za ostvarivanje kinematike u smjeru svake pojedine osi. Jednostavnije sklapanje uređaja ga čini pristupačnijim od CoreXY pisača. [30]



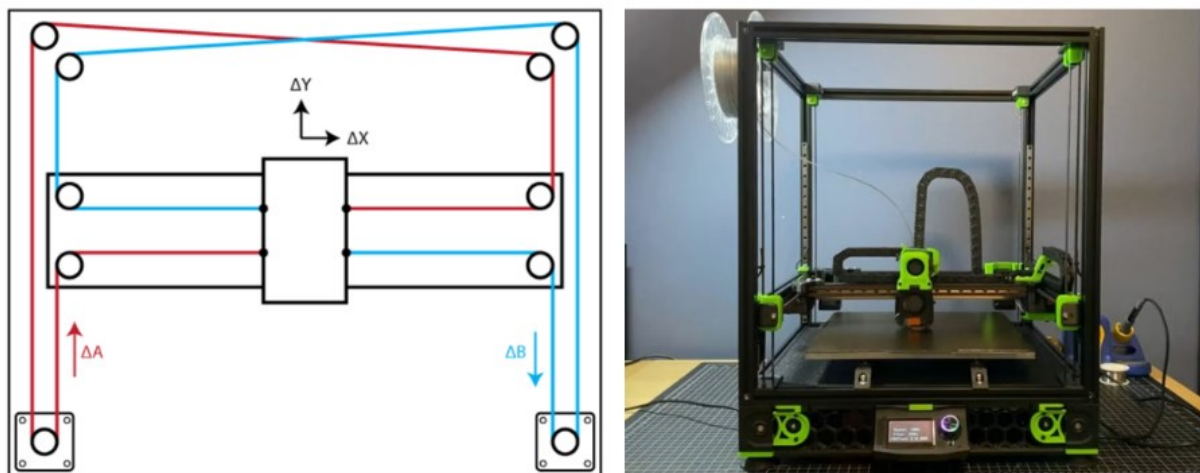
Slika 3.13 Primjer XY-head pisača (*Creality Ender 5*) [30]

Treća inačica pravolinijskih pisača su oni nalik uređaju **Ultimaker S5**, prikazan na slici 3.14. Osnovu njegovog mehanizma rada uključuje konstrukcija kvadratnog oblika na čijim stranicama se nalaze potporne vodilice koje omogućuju kretanje po X, odnosno Y osi. Dvije nasuprotne vodilice, povezane su trećom. Na mjestu na kojem se sijeku dvije vodilice smještena je glava pisača. Dakle, kako se mijenja pozicija vodilica duž X i Y osi tako se mijenja i točka sjecišta poprečnih vodilica te se ostvaruje kinematika glave pisača. Ovakvi uređaji pružaju vrlo precizno i stabilno kretanje po horizontalnoj ravnini, dok se visina izradaka osigurava pomicanjem radne podloge prema gore ili prema dolje. [30]



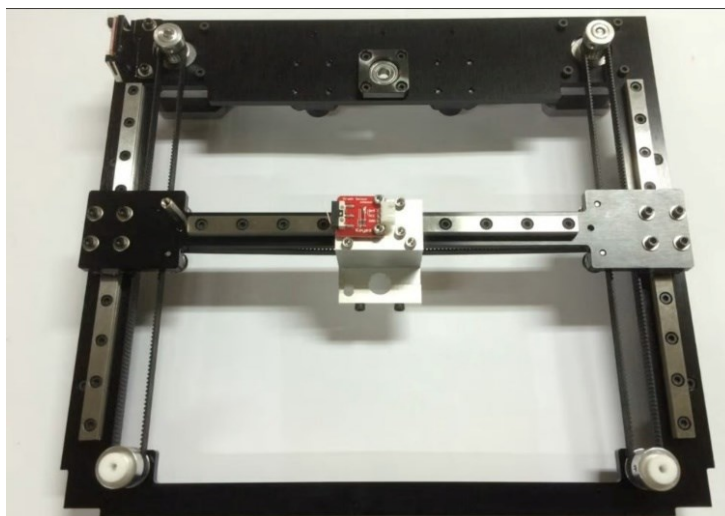
Slika 3.14 3D pisač *UltiMaker S5* [30]

CoreXY pisači (slika 3.15), kao što je *Voron 2.4*, koriste Kartezijev koordinatni sustav. Iako tlocrt uređaja izgleda jednostavno, sustav za kretanje je poprilično kompleksan. Kao i kod XY-head uređaja, glava pisača se pomiče koračnim (eng. *step*) motorom horizontalno po X i Y osima, dok se radna podloga pomiče po Z osi. Međutim, inovativnost ovih pisača je mogućnost kretanja glave pisača u dijagonalnom smjeru u slučaju rada samo jednog motora. Također, sustav remena i remenica koji su puno dulji, doprinosi znatno nižem stupnju trošenja jer se stvaraju manji zakretni momenti. Shematski prikaz CoreXY 3D pisača prikazan je na slici 3.15 gdje su plavom i crvenom bojom prikazane moguće putanje kretanja glave pisača. Zbog fiksiranosti motora, tijekom postupka se generiraju manje vibracije nego na ostalim uređajima što pospješuje kvalitetu izradaka. Isto tako, zbog dimenzijske točnosti moguće je ostvariti utrošak jednake količine materijala kao na drugim uređajima, a da se pri tome proizvode detaljizirani dijelovi manjih dimenzija. S druge strane, sustav remena koji ovim uređajima donosi prednost u smislu proizvodnje, često mogu uzrokovati tehničke poteškoće jer nerijetko dolazi do narušavanja njihove paralelnosti, a samim time i funkcionalnosti. [31]



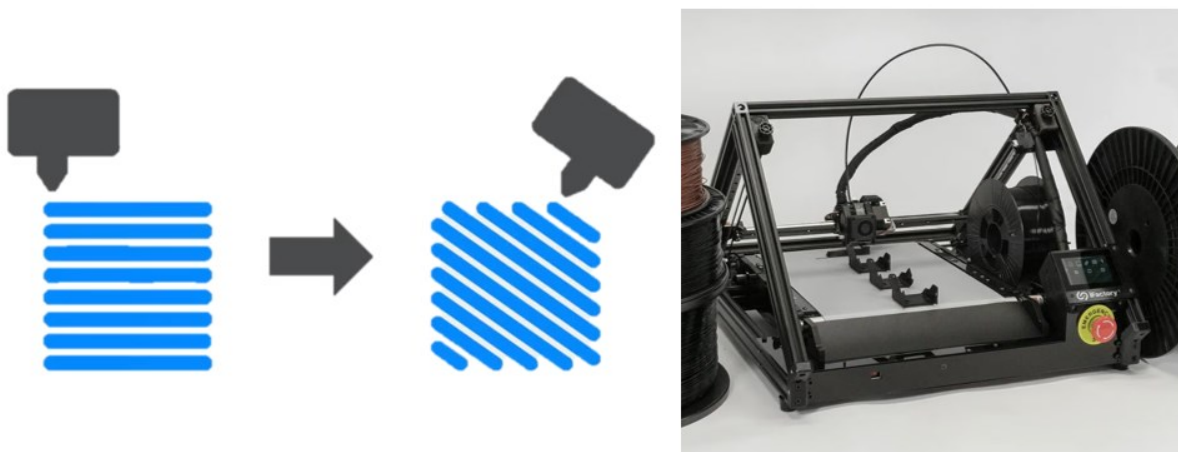
Slika 3.15 Shematski prikaz CoreXY pisača (lijevo),
CoreXY pisač Voron 2.4 (desno) [31,32]

Geometrija **H-bot 3D pisača** (slika 3.16) sastoji se od dva paralelna i jedne poprečne platforme, baš poput slova H, od kuda i potječe naziv ovakvih uređaja. Njihovi sustavi kretanja uveliko podsjećaju na one kod CoreXY pisača, jer poput njih i ovdje su dvije paralelne vodilice i jedna poprečna smještene u horizontalnoj ravnini i omogućuju kretanje glave pisače u smjeru X, odnosno Y osi. Još jedna sličnost jest u sustavu remena koji se koriste za ostvarivanje kinematike, samo što se kod H-bot pisača koristi jedan dulji remen, umjesto dva kraća. Upravo opisan sustav kretanja jest zapravo osnovni nedostatak jer za zadovoljavajuću učinkovitost potrebno je izrazito precizno poravnanje remena i održavanje njegove krutosti. Čak i svako malo odstupanje propisanih postavku rezultira nepreciznošću i izvijanjem 3D ispisanog proizvoda. [30]



Slika 3.16 Konstrukcija H-Bot 3D pisača [30]

Belt 3D pišači se mogu kategorizirati kao podvrsta kartezijskih uređaja jer se prema mehaničkoj konstrukciji već vizualno razlikuju od ostalih. S obzirom na sustav gibanja ekstruzijske glave, Belt 3D pišaču su zapravo izvedbe CoreXY pišača, nagnuti pod kutom od 45° , a umjesto radne podloge nalazi se pokretna traka. Takva geometrija uređaja i pozicija glave pišača rezultira drugačijim položajem rastera na poprečnom presjeku proizvoda ilustriranom na slici 3.17. Dakle, koordinatni sustav ovih uređaja nagnije se pod određenim kutom zajedno s okvirom, a radna podloga je u ovom slučaju zamijenjena vrstom pokretne trake koja ima slobodu gibanja u smjeru Y i Z osi. Zbog specifične radne podloge na ovim FFF uređajima se mogu izrađivati praktički beskonačno dugi dijelovi ili se serijski mogu proizvoditi prototipovi manjih dimenzija. S druge strane, zbog konstantnog gibanja, radna podloga ne može postići visoke temperature, pa je sukladno tome ograničen izbor filameta koji se koristi u ovom postupku izrade prototipova. [29]



Slika 3.17 Putanja mlaznice kod ostalih FFF uređaja i kod Belt 3D pišača (lijevo), primjer Belt 3D pišača (desno) [29]

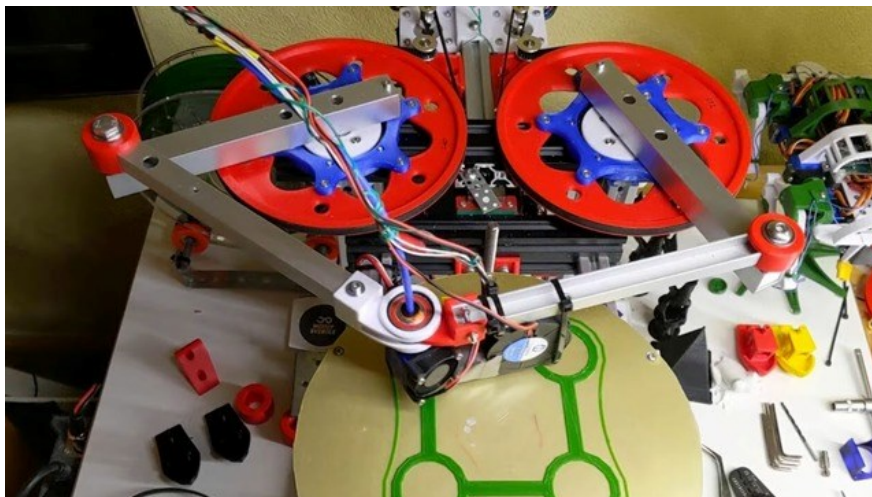
Delta pišači također koriste Kartezijev koordinatni sustav, ali s nešto drugačijom konstrukcijskom izvedbom. Ekstruzijska glava pišača je s pomoću tri ruke u obliku vodicica, koje su međusobno odvojene pod jednakim kutom, pričvršćena za nepomičnu platformu. Ruke se sinkronizirano pomiču gore dolje, šire se i uvlače, sve s ciljem promjene kutova, a time i kontrolom položaja mlaznice. Zbog specifičnog sustava kretanja, delta uređaji moraju biti drugačije programirani kako bi se željene koordinate pretvorile u trokutaste pokrete. Radna podloga je za razliku od prethodnih FFF uređaja, okruglog umjesto pravokutnog oblika. Glavna prednost ovih pišača jest brzina izrade zbog manjeg broja pokreta potrebnih za izradu istog

proizvoda i kompatibilnost s materijalima koji se ne mogu koristiti na drugim pisačima. Jedna od izvedbi delta 3D pisača vidljiv je na slici 3.18 u nastavku. [30,31]



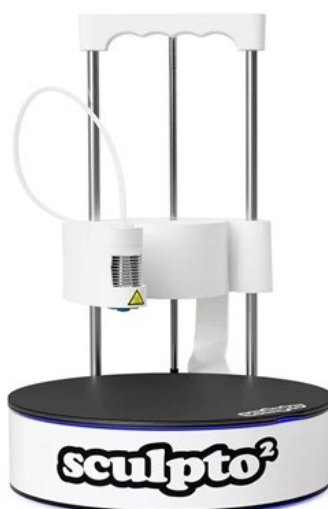
Slika 3.18 Primjer delta 3D pisača [31]

SCARA 3D pisači (eng. *Selective Compliance Assembly Robot Arm*) su nešto kompliciranije izvedbe uređaja za nanošenje rastaljenog materijala koristeći tehnologiju razvijenu na početku 1980-tih godina. Iako svojom kinematikom upravljaju s pomoću Kartezijevog koordinatnog sustava kao i prethodno opisani pisači, zbog jedinstvene mehaničke izvedbe se svrstavaju u posebnu kategoriju. Konstrukcija SCARA pisača povezuje glavu pisača s robotskom rukom koja je upravljana s dva sinkronizirana motora translirajući mlaznicu u horizontalnom smjeru. Kontrola kretanja u vertikalnom smjeru odvija se zasebnim motorom. Radna podloga nije nužno zagrijana ni pričvršćena za postolje što uvelike pospešuje mobilnost ovih uređaja. Pored velike slobode kretanja, kompleksnost konstrukcije i mnoštvo dijelova ipak čine glave nedostatke ovih 3D pisača. Slika 3.19 predočava primjer SCARA 3D pisača. [30,31]



Slika 3.19 Primjer SCARA uređaja [28]

Polarni 3D pisači, prvobitno predstavljani 2015. godine, suprotno svim prethodnima koriste polarni koordinatni sustav za upravljanje kinematikom. U polarnom koordinatnom sustavu se točke u prostoru raspoređene na kružnoj, a ne pravokutnoj mreži pa se za potpuno opisivanje koordinata koriste dvije dimenzije, radijus (udaljenost od ishodišta do točke) i kut. Filament se kod ovih uređaja ekstrudira jednakom tehnikom kao i kod kartezijskih pisača, dok im je glava pisača povezana sa zakrivljenom rukom koja ima slobodu kretanja u vertikalnom smjeru. Radna podloga je također specifična jer je rotirajuća, ali i kružnog oblika pa se lakše iskorištava puni potencijal njezine površine. Također, izuzetak ovih FFF uređaja je mogućnost funkcioniranja sa samo dva koračna motora što rezultira tišim radnom s manje vibracija. [30]



Slika 3.20 Primjer 3D pisača s polarnim koordinatnim sustavom [30]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

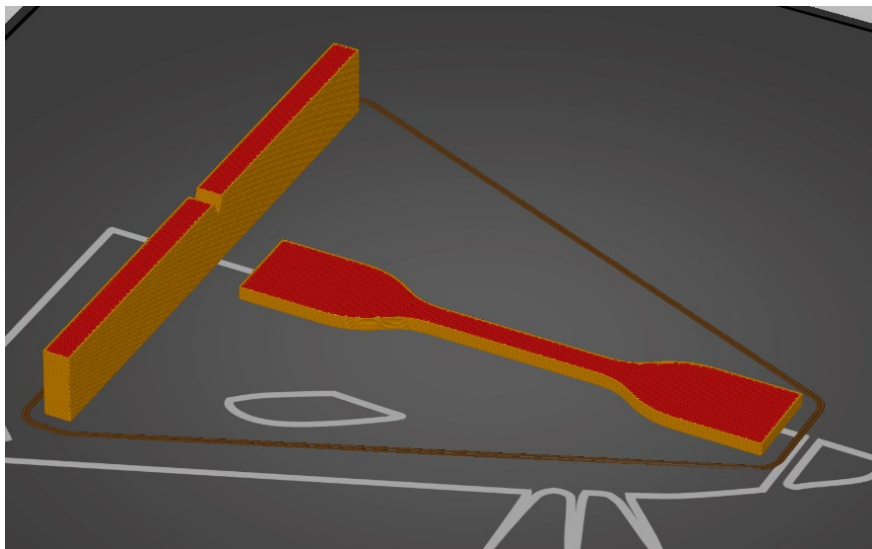
4.1. Opis ispitivanja

Cilj eksperimentalnog dijela jest ispitati postoji li razlika u vrijednostima mehaničkih svojstava ispitnih tijela koja su proizvedena pri istim parametrima, ali na različitim uređajima za tehnologiju nanošenja rastaljenog materijala. Također, ispitivanjem se htjela utvrditi povezanost rasporeda ispitnih tijela na radnoj podlozi s njihovim mehaničkim svojstvima, točnije žilavosti te rasteznom čvrstoćom. Postupak ispitivanja, a time i proizvodnje, započinje oblikovanjem trodimenzionalnog modela u računalnom programu *Solidworks*. Nakon pohranjivanja modela u STL oblik datoteke s pomoću softvera *SuperSlicer* podesili su se parametri procesa te odredile i označile pozicije ispitnih tijela. Tako modificirana datoteka čitljiva je 3D pisacima te slijedi proces ispisa ispitnih tijela. Nakon završetka izrade, izmjerene su dimenzije ispitnih tijela prikladnim uređajima te se pristupilo ispitivanju žilavosti i statičkom – vlačnom ispitivanju. Kasnije se na temelju dobivenih rezultata i provedene statističke analize podataka zaključivalo o mehaničkim svojstvima ispitnih tijela i utjecaju izabranih pisaca na ta svojstva.

4.1.1. Softver *SuperSlicer*

SuperSlicer je besplatan računalni softver kojime se generiraju instrukcije za 3D pisace, omogućuje se podešavanje raznih parametara ispisa, ali isto tako prilagodba i obrada više različitih modela istovremeno. Sučelje *SuperSlicer*-a se sastoji od: trodimenzionalnog pogleda, prethodnog pregleda ispisanog izratka, postavke filameta i postavki uređaja. Važno za provođenje ovog ispitivanja jest to da je ovaj softver kompatibilan sa svim korištenim uređajima u eksperimentalnom dijelu rada. Nakon učitavanja, prema normama HRN EN ISO 179-2:2020. i HRN EN ISO 527-2_2012. izrađenih modela u softver te pozicioniranja ispitnih tijela na radnoj podlozi, potrebno je odrediti glavne parametre ispisa. Jedan od najvažnijih parametra je debljina sloja, koja je iznosila 0,1 mm, pri čemu je samo debljina prvog sloja bila 0,2 mm. Sljedeći značajan parametar jest postotak ispune koji je za potrebe ovog ispitivanja podešen na 35 %. Kako je kvaliteta FFF tehnologije temperaturno ovisna, potrebno je naglasiti temperaturne parametre pa je tako radna podloga bila zagrijana na 60 °C, temperatura filameta pri izlasku iz mlaznice 210 °C u slučaju prvog sloja, dok je za ostale slojeve ona iznosila 205 °C. Na svim FFF uređajima korištenim za ispisivanje ispitnih tijela primijenjeni su identični, gore

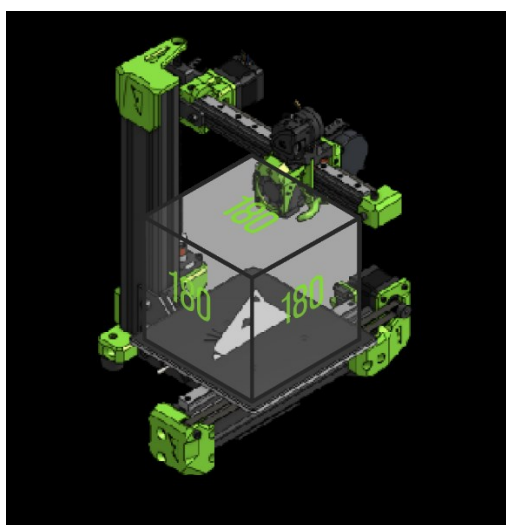
navedeni parametri. Na slici 4.1 u nastavku su prikazana ispitna tijela otvorena u softveru *SuperSlicer*.



Slika 4.1 Modeli ispitnih tijela u *SuperSlicer*-u

4.1.2. 3D pisač *RatRig V-Minion*

RatRig V-Minion spada u XZ-head pisače čiji ekstruzijski sustav ostvaruje linearna gibanja. Načelo rada detaljnije je opisano u poglavlju 3.5. Kako je vidljivo na slici 4.2, maksimalne dimenzije proizvoda koji se mogu ispisivati na ovom uređaju su relativno male (180 x 180 x 180 mm). [33]



Slika 4.2 Shematski prikaz maksimalnog radnog volumena pisača *RatRig V-Minion*-a [33]

Aluminijska konstrukcija osigurava korištenje velike brzine ispisa uz vrlo malo vibracija i nižu razinu buke. U sustavu za ekstrudiranje ukomponiran je *EVA* sustav koji dopušta primjenu velikog broja mlaznica. U ovom ispitivanju, koristile su se dvije različite mlaznice. Jedna serija ispitnih tijela je ispisana *Dragonfly Hotend* oblikom ekstruzijskog mehanizma uz primjenu obične mlaznice, a druga serija *Bondtech HTC* mlaznicom (slika 4.3). Kao i konstrukcija, tako je i radna podloga izrađena od aluminijske legure debljine 5 mm. Najčešći korišteni materijali za ispis ovim 3D pisačem su: polilaktična kiselina (PLA), akrilonitril/butadien/stiren (ABS), polietilen – tereftalat glikol (PETG) i akrilonitril/stiren/akrilat (ASA).



Slika 4.3 Standardna i CHT mlaznica korištena na pisaču *RatRig V-Minion*-u [34,35]

4.1.3. 3D pisač *Voron 2.4*

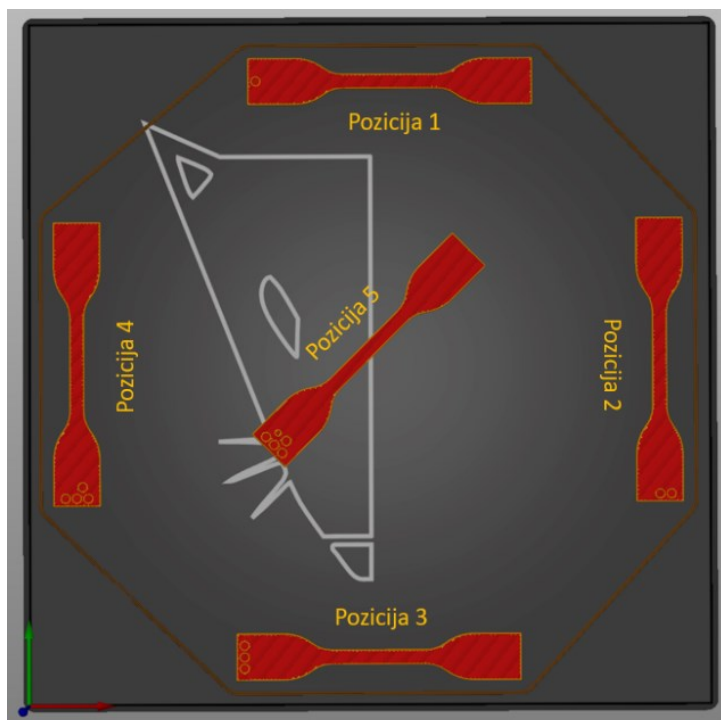
Voron 2.4 pripada CoreXY skupini uređaja za aditivnu tehnologiju nanošenja rastaljenog materijala. 3D pisači ove vrste koriste Kartezijev koordinatni sustav prilikom translacije sustava za ekstrudiranje u horizontalnom smjeru, dok se radna podloga neovisno giba po vertikali. Glavna prednost *Voron* pisača je mogućnost kombiniranja raznovrsnih dijelova prema vlastitim preferencijama prilikom sklapanja uređaja. Konstrukcija je izrađena od aluminijske legure, a maksimalne postizive dimenzije prototipova su 350 x 350 x 400 mm. Ekstruzijski mehanizam korišten prilikom ispisa ispitnih tijela treće serije je *Phateus Rapido* (slika 4.4) čija je najviša dopuštena temperatura ekstrudiranja 285 °C. [32]



Slika 4.4 Ekstruzijski mehanizam *Phatesu Rapido* [34]

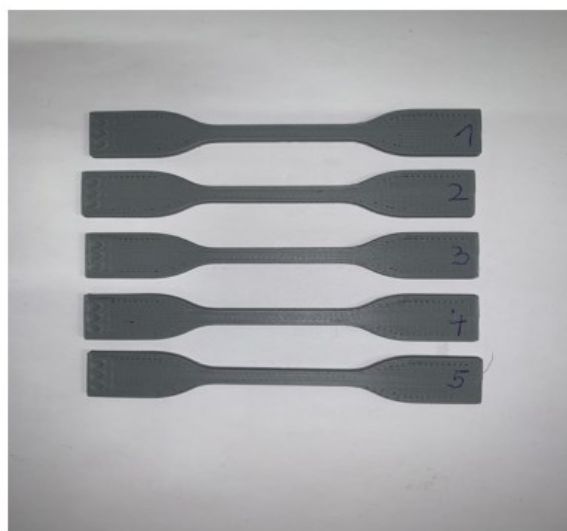
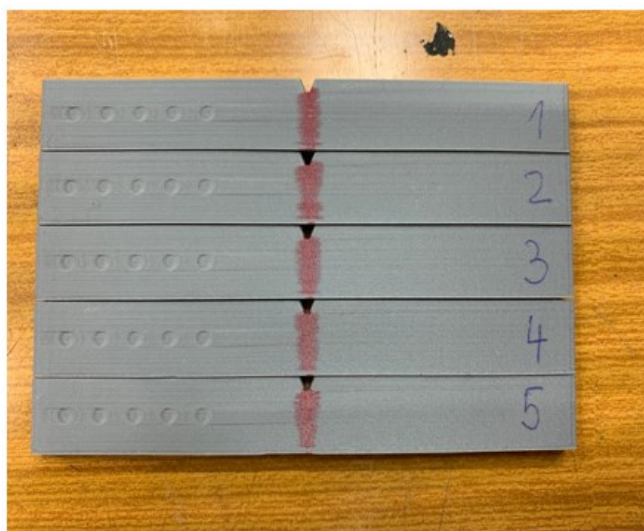
4.1.4. Materijal za ispitivanje

Eksperimentalni dio diplomskog rada, odnosno ispitivanje udarnog rada loma te rasteznih svojstava provedeno je u Centru za aditivne tehnologije Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, na za to predviđenim uređajima. Ispitivanja su propisana normama kojima se točno definiraju oblici i dimenzije ispitnih tijela. Osnovni preduvjet prilikom izbora filamentnog materijala jest kompatibilnost sa svim uređajima korištenim za ispis ispitnih tijela, pa je za rad izabrana polilaktična kiselina, odnosno PLA. Ispitna tijela su izrađena dvama uređajima za FFF aditivnu tehnologiju s različitim mlaznicama i ekstruzijskim mehanizmima. Sukladno tome, ispitna tijela su kategorizirana u tri skupine. Prva skupina izrađena je 3D pislačem *RatRig V - Minion* uporabom HTC mlaznice, druga skupina istim uređajem, ali je filament ekstrudiran kroz običnu (standardnu) mlaznicu. Treća skupina je pak ispisana *Voron-om 2.4* koji je kompatibilan s *Phateus Rapido* ekstruzijskim sustavom, primijenjenim u ovom slučaju. Raspored ispitnih tijela i dodijeljene pozicije na radnoj podlozi unutar programske podrške *SuperSlicer* vidljive su na slici 4.5.



Slika 4.5 Raspored ispitnih tijela na radnoj podlozi i njima pridružene pozicije

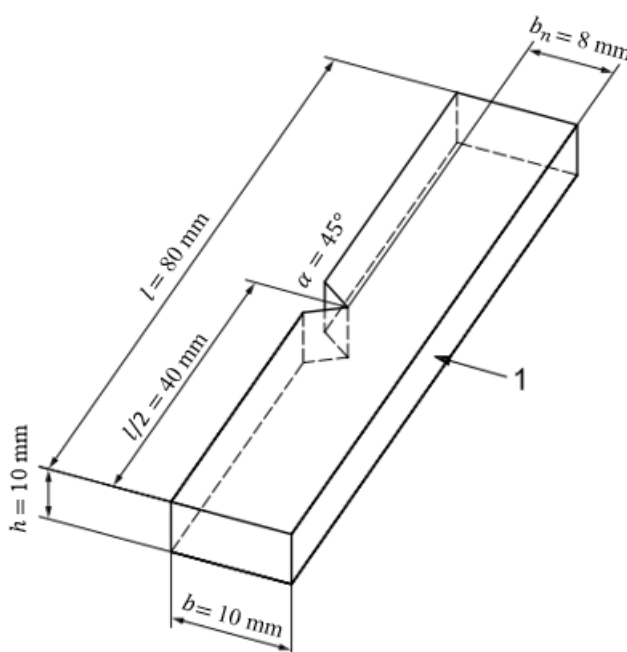
Na svakoj poziciji ispisivanje se ponavljalo pet puta s ciljem dobivanja 5 jednakih ispitnih tijela. To je nužno kako bi se rezultati ispitivanja mogli pravilno obraditi i sukladno tome dobiti mjerodavni statistički podatci. Na slici 4.6. prikazana su ispitna tijela za ispitivanje udarnog rada loma i ispitivanje rasteznih svojstava.



Slika 4.6 Serija ispitnih tijela za ispitivanje udarnog rada loma (lijevo), serija ispitnih tijela za rastezno ispitivanje (desno)

4.2. Ispitivanje žilavosti

Žilavosti materijala određuje se na temelju udarnog rada loma što predstavlja količinu energije koja se utroši prilikom loma ispitnog tijela. Ovisno o vrsti naprezanja koja je primijenjena tijekom ispitivanja postoji savojna i rastezna lomna žilavost. Savojna žilavost se određuje preko udarca bata u ispitna tijela s ili bez zareza. Također, u ovisnosti o izvedbi bata postoje ispitivanja prema Charpyu i Izodu. U ovome radu savojna žilavost je ispitana Charpyjevim batom prema normi HRN EN ISO 179-2:2020. [36] Na slici 4.7 u nastavku je prikazana standardizirana epruveta za ispitivanje žilavost s V zarezom.



Slika 4.7 Normirana epruveta za ispitivanje udarnog rada loma [36]

pri čemu su:

l [mm] – duljina ispitne epruvete

b_N [mm] – visina ispitne epruvete ispod zareza

b [mm] – ukupna visina epruvete

h [mm] – debljina ispitne epruvete

$l/2$ [mm] – udaljenost ravnine simetrije zareza od uzdužne osi ispitne epruvete

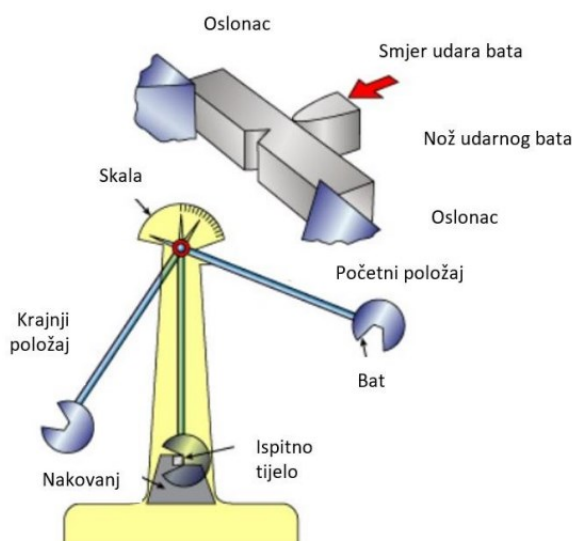
1 – smjer udarca bata.

Nakon završetka ispisa ispitnih tijela, a prije provođenja ispitivanja udarnog rada loma Charpyjevim batom pristupilo se mjerenju epruveta, a ostvarene dimenzije su prikazane u prilogu rada. Mjerni uređaji korišteni u radu vidljivi su na slici 4.8.



Slika 4.8 Digitalni mikrometar za mjerenje debljine (lijevo), digitalno pomično mjerilo (desno)

Na slici 4.9 shematski je prikazano ispitivanje žilavosti po Charpyju.



Slika 4.9 Shematski prikaz ispitivanja udarnog rada loma po Charpyju [8]

Prije početka samog ispitivanja potrebno je izmjeriti i po potrebi podesiti udaljenost između oslonaca uređaja za ispitivanje žilavosti. U ovome slučaju razmak između oslonaca je iznosio 62 mm. Ispitivanje započinje pozicioniranjem ispitnih tijela na oslonce uređaja (slika 4.10). Nakon toga je potrebno osigurati početni položaj bata na određenoj visini pri čemu on posjeduje

potencijalnu energiju. Puštanjem bata, potencijalna energija se pretvara u kinetičku energiju te se dio energije troši prilikom loma ispitnog tijela. Mjesto udarca bata u ispitno tijelo prikazano je na slici 4.10. Krajnji položaj bata bit će na nižoj visini od početnog, upravo zbog utroška energije prilikom loma. Razlika između potencijalne energija u početnom i krajnjem položaju, očitanoj na mjernoj skali, je zapravo udarna energija loma. Na temelju udarne energije loma izračunava se savojna žilavost po Charpyju prema formuli:

$$a_{CN} = \frac{E_C}{b_N \times h}$$

gdje su:

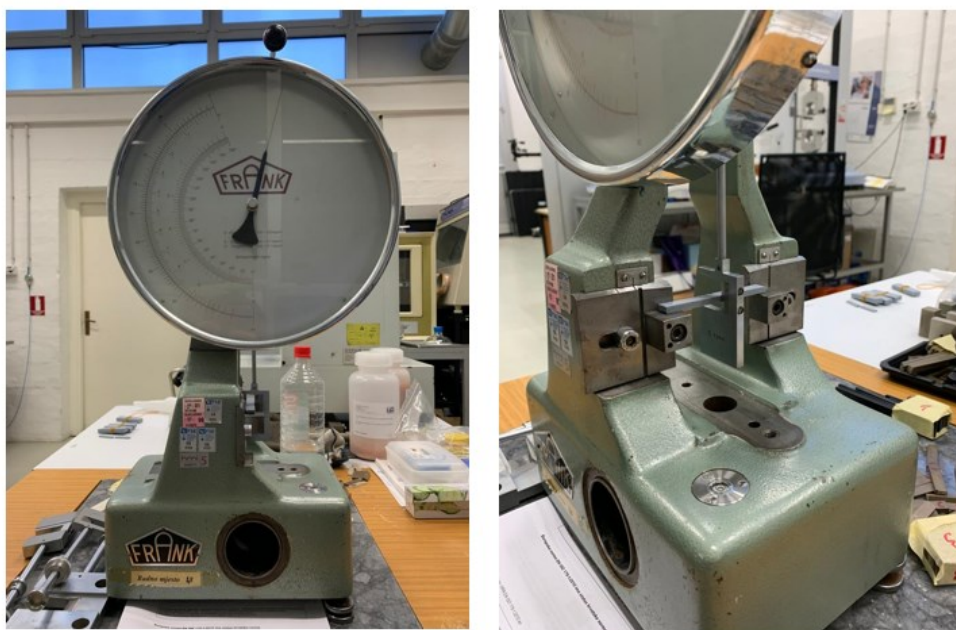
a_{CN} [kJ/m²] – savojna žilavost prema Charpyju

E_C [J] – udarna energija loma

b_N [mm] – visina ispitnog tijela ispod zarez

h [mm] – debljina ispitnog tijela. [36]

Ispitivanje je provedeno na uređaju za određivanje udarne energije loma marke *Frank* pri čemu je korišten bate mase 5 kpcm. Uređaj i bat prikazani su na slici 4.10 u nastavku. Kao što je vidljivo na slici 4.10 ispitno tijelo je na osloncima postavljeno tako da bat udari sa suprotne strane od one na kojoj se nalazi zarez.



Slika 4.10 Uređaj marke Frank za određivanje udarnog rada loma (lijevo), položaj ispitnog tijela na osloncima uređaja prilikom udara bata (desno)

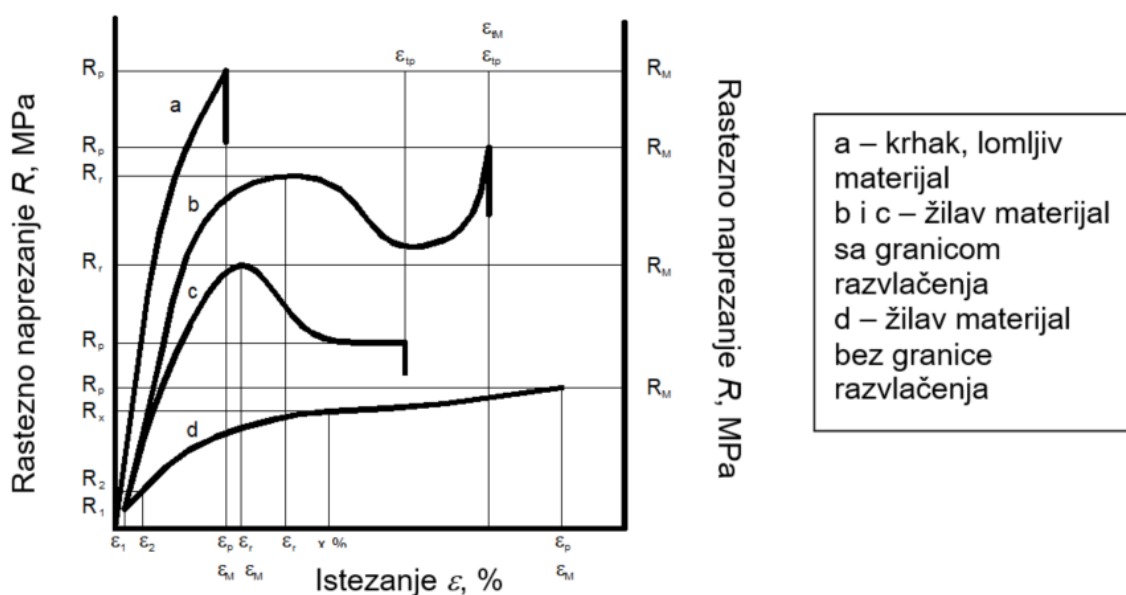
4.3. Ispitivanje rastezних svojstava

Prilikom ispitivanja rastezних svojstava potrebno je odrediti ili prema normi izabrati dimenzije ispitnih tijela prikladnih za uređaje i materijale korištene u radu. Kada se definiraju rastezne karakteristike zapravo se pokušavaju odrediti neka od sljedećih svojstava:

- **mjerna duljina** L_0 [mm] – početna udaljenost između umjerne crte na središnjem dijelu ispitnog tijela
- **brzina ispitivanja** v [mm/min] – brzina odvijanja zahvata na kidalici tijekom provođenja ispitivanja
- **rastezno naprezanje** R [MPa] – ono naprezanje koje uzrokuje rastezna sila u nekome trenutku unutar mjerne duljine po jedinici površine početnog presjeka ispitnog tijela
- **granica razvlačenja** R_r [MPa] – naprezanje uzrokovano rasteznom silom na početnu površinu poprečnog presjeka ispitnog tijela. Također se može definirati i kao vrijednost naprezanja pri kojoj nagib krivulje u grafu $\sigma - \varepsilon$ prvi put poprima vrijednost nula. Ponekad može biti manja od maksimalnog postignutog naprezanja (slika 4.11 krivulja b)
- **prekidna čvrstoća** R_p [MPa] – naprezanje što ga generira prekidna sila na početnu površinu poprečnog presjeka ispitne epruvete
- **vlačna čvrstoća** R_m [MPa] – naprezanje koje izaziva maksimalna sila na početnu površinu poprečnog presjeka ispitnog tijela
- **konvencionalna granica razvlačenja** R_x [MPa] – ono naprezanje u materijalu koje izaziva unaprijed dogovorenu trajnu deformaciju od X %. Određuje se kod materijala čija granica razvlačenja nije jasno izražena, odnosno kod onih materijala koji pokazuju izrazito nelinearno ponašanje na grafu $\sigma - \varepsilon$. Ipak, vrijednost X mora biti niže od istezanja prilikom rastezne čvrstoće.
- **rastezno istezanje** ε [%] – omjer povećanja duljine i mjerne duljine. Izraz primjenjiv do granice razvlačenja
- **prekidno ili ukupno istezanje** $\varepsilon_p = \varepsilon_u$ [%] – omjer je prekidnog (ukupnog) produljenja i početne mjerne duljine epruvete, odnosno istezanje u trenutku prekida materijala kod kojeg nema jasno izražene granice razvlačenja. Vidljivo sa slike 4.11, krivulje a i d posjeduju prekidno istezanje ako ispitno tijelo pukne prije granice razvlačenja.

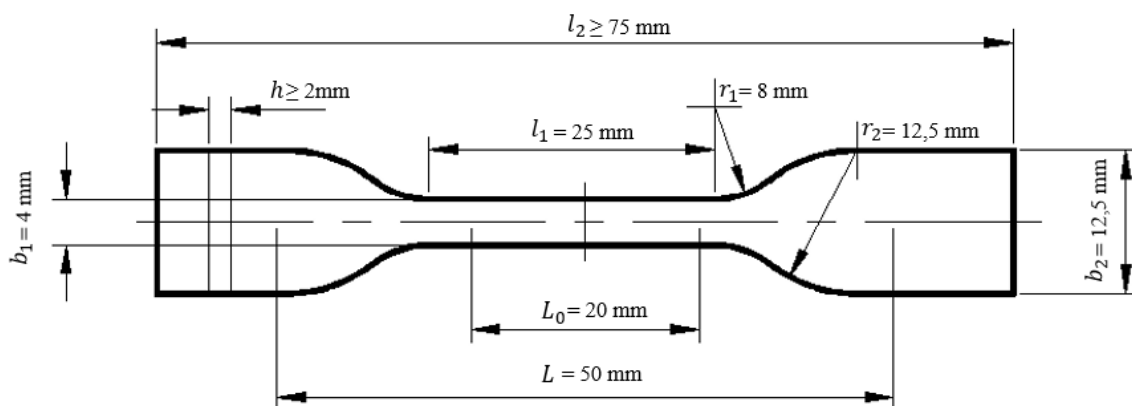
- modul elastičnosti E [MPa]** – modul rastezljivosti kojim se opisuje ovisnost naprezanje i istežanja. Zbog nelinearnog ponašanja polimernih materijala, modul elastičnosti se ne definira kao tangenta iz ishodišta, već kao pravac kojim se spajaju točke na krivuljama pri normom određenim vrijednostima istežanja $\epsilon_1 = 0,05 \%$ i $\epsilon_2 = 0,25 \%$. [37,38]

Na slici 4.11 u nastavku prikazane su karakteristične krivulje polimernih materijala u grafu $\sigma - \epsilon$ iz kojeg se lako očitavaju neka od gore navedenih svojstava i vrijednosti.



Slika 4.11 Graf rastezno naprezanje – istežanje za karakteristične slučajeve [37]

Ispitivanje rasteznih svojstava provedeno je prema normi HRN EN ISO 527-2_2012. U skladu s normom i mogućnostima korištenih 3D pisača za ispitivanje se koristilo specijalno ispitno tijelo 5A. Na slici 4.12 u nastavku prikazano je izabrano ispitno tijelo i osnovne standardizirane dimenzije.



Slika 4.12 Normirano ispitno tijelo za vlačno ispitivanje [37]

gdje su:

l_2 [mm] – ukupna duljina

b_2 [mm] – širina pri krajevima koji se stežu u čeljustima kidalice

l_1 [mm] – duljina uskog paralelnog dijela

b_1 [mm] – širina uskog dijela

r_1 [mm] – mali radijus

r_2 [mm] – veliki radijus

L [mm] – početna udaljenost između čeljusti kidalice

L_0 [mm] – mjerna duljina

h [mm] – debljina.

Postupak određivanje rasteznih svojstava započinje izborom standardiziranog ispitnog tijela iz norme te ispisom ispitnih tijela na uređajima za FFF aditivnu tehnologiju. Izrađenim ispitnim tijelima se pomičnim mjerilom (slika 4.8) mjere osnovne dimenzije, širina b i debljina h . Rezultati mjerenja predočeni su u prilogu. Nakon toga pristupa se statičkom – vlačnom ispitivanju na kidalici u kojoj se ispitna tijela jednoosno opterećuju kontinuiranom silom rastezanja. Računalni program, preko kidalice i ekstenziometra, bilježi iznose sile i pripadajuće produljenje iz kojeg će se kasnije generirati $\sigma - \varepsilon$ graf. Ispitivanje se provodilo na kidalici *Shimadzu AGS-X* (slika 4.13), brzina razvlačenja čeljusti kidalica je podešena na $v = 2 \text{ mm/min}$. Na slici 4.13 prikazana su ispitna tijela u čeljustima kidalice.



Slika 4.13 Kidalica Shimadzu AGS-X (lijevo),
ispitna tijela u čeljustima kidalice tijekom vlačnog ispitivanja (desno)

Rastezna čvrstoća računa se sukladno jednadžbi:

$$R_m = \frac{F_{max}}{A_0}$$

gdje su:

R_m [MPa] – rastezna čvrstoća

F_{max} [N] – maksimalna sila

A_0 [mm²] – površina početnog poprečnog presjeka ispitnog tijela. [37]

Ukupno istežanje ispitnog tijela izračunava se prema formuli:

$$\varepsilon_u = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_{kon} - l_{poč}}{l_0}$$

gdje su:

ε_u [%] – ukupno istežanje

Δl [mm] – produljenje mjerne duljine

l_0 [mm] – početna mjerna duljina ispitnog tijela. [37]

Modul elastičnosti ispitnog tijela izračunava se prema formuli:

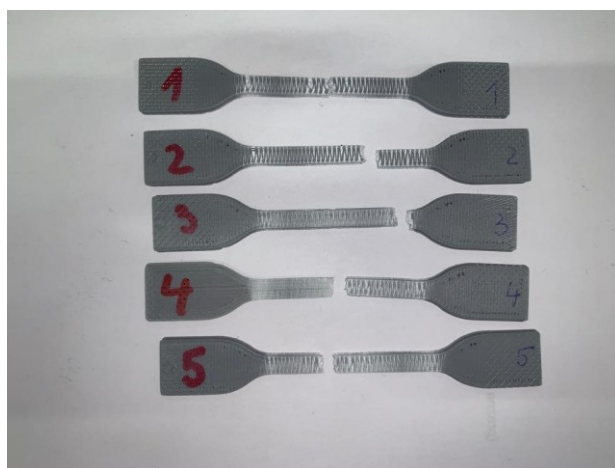
$$E = \frac{R_2 - R_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

gdje su:

E [MPa] – modul rasteznosti ispitnog tijela

R_1, R_2 [MPa] – rastezna naprezanja za istežanja $\varepsilon_1 = 0,05\%$ i $\varepsilon_2 = 0,25\%$. [37]

Na slici 4.14 prikazan je primjer ispitnog tijela nakon provedenog ispitivanja rasteznih svojstava.



Slika 4.14 Serija ispitnih tijela nakon provedenog rasteznog ispitivanja

4.4. Rezultati ispitivanja

Prvobitno modelirana normirana ispitna tijela u računalnom programu *Solidworks*, ispisana su aditivnim postupkom nanošenja rastaljenog polimernog materijala. Na svakoj od pet prethodno određenih pozicija (slika 4.5) proizvedeno je pet serija ispitnih tijela te su se prije bilo kakvog ispitivanja mjerile dimenzije ispitnih tijela za to prikladnim mjernim uređajima.

4.4.1. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Tako pripremljena ispitna tijela podvrgnuta su ispitivanju udarnog rada loma, na temelju čijih rezultata će se zaključivati o žilavosti ispitnih tijela. Dimenzije i pripadajuće vrijednosti energije loma za sva ispitna tijela prikazane su u tablicama u prilogu.

Kako se na svakoj poziciji ispisivalo pet ispitnih tijela (serija), u tablicama u nastavku su prikazane prosječne vrijednosti udarnog rada loma određene pozicije (\bar{X} (a_{CN})). Sami rezultati ukazivali su na velika rasipanja i odstupanja od prosječne vrijednosti. Stoga, kako bi se postigla što je moguće reprezentativnija ispitna tijela te s ciljem dobivanja mjerodavnijih rezultata, najmanje i najveće izmjerene vrijednost udarnog rada loma svake pozicije nisu uzete u razmatranje.

Sukladno tome, u tablici 4.1 prikazane su vrijednosti savojne žilavosti (a_{CN}) izabranih ispitnih tijela svake pozicije te prosječne vrijednosti savojne žilavosti pozicija ($\bar{X}(a_{CN})$) ispitnih tijela ispisanih na 3D pisaču *RatRig V-Minion* primjenom *CHT* mlaznice. Također, predočene su površine poprečnih presjeka izabranih ispitnih tijela (A_0) te pripadajuća udarna energija loma (E_C).

Tablica 4.1 Rezultati ispitivanja udarnog rada loma za ispitna tijela ispisana *RatRig CHT* mlaznicom

| RATRIG V-MINION CHT MLAZNICA | | | | | | | | | | |
|------------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------------|----------------------------|--------------|--|---------------------------|
| Pozicija | Serija 1 | | | Serija 2 | | | Serija 3 | | | \bar{X} (a_{CN}) |
| | A_0 / mm ² | E_C / J | a_{CN} / kJ/m ² | A_0 / mm ² | E_C / J | a_{CN} / kJ/m ² | A_0 / mm ² | E_C / J | a_{CN} / kJ/m ² | |
| Pozicija 5 (••••) | 30,450 | 0,128 | 4,204 | 31,008 | 0,128 | 4,128 | 31,661 | 0,125 | 3,948 | 4,093 |
| Pozicija 1 (•) | 31,301 | 0,120 | 3,834 | 31,827 | 0,086 | 2,702 | 31,515 | 0,106 | 3,364 | 3,300 |
| Pozicija 2 (••) | 30,832 | 0,127 | 4,119 | 31,801 | 0,127 | 3,994 | 30,705 | 0,128 | 4,169 | 4,093 |
| Pozicija 3 (•••) | 32,209 | 0,091 | 2,825 | 31,937 | 0,095 | 2,975 | 31,286 | 0,098 | 3,132 | 2,977 |
| Pozicija 4 (••••) | 31,321 | 0,120 | 3,831 | 30,445 | 0,120 | 3,941 | 31,800 | 0,125 | 3,931 | 3,901 |
| | | | | | | | | | $a_{CN} / \text{kJ/m}^2 = 3,673$ | |

Istim načelom u tablici 4.2 prikazani su i obrađeni rezultati ispitivanja udarnog rada loma na ispitnim tijelima izrađeni 3D pisačem *RatRig V-Minion* pri čemu se koristio *Dragonfly* ekstruzijski mehanizam i standardna mlaznica.

Tablica 4.2 Rezultati ispitivanja udarnog rada loma za ispitna tijela ispisana *RatRig* standardnom mlaznicom

| RATRIG V-MINION STANDARDNA MLAZNICA | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------------|----------------------------|--------------|--|---------------------------|
| Pozicija | Serija 1 | | | Serija 2 | | | Serija 3 | | | \bar{X} (a_{CN}) |
| | A_0 / mm ² | E_C / J | a_{CN} / kJ/m ² | A_0 / mm ² | E_C / J | a_{CN} / kJ/m ² | A_0 / mm ² | E_C / J | a_{CN} / kJ/m ² | |
| Pozicija 5 (••••) | 30,476 | 0,124 | 4,069 | 30,713 | 0,126 | 4,103 | 31,150 | 0,128 | 4,109 | 4,093 |
| Pozicija 1 (•) | 29,415 | 0,108 | 3,672 | 30,328 | 0,107 | 3,528 | 30,338 | 0,106 | 3,494 | 3,565 |
| Pozicija 2 (••) | 30,418 | 0,111 | 3,649 | 30,013 | 0,111 | 3,698 | 29,140 | 0,098 | 3,363 | 3,570 |
| Pozicija 3 (•••) | 31,987 | 0,090 | 2,814 | 30,199 | 0,092 | 3,046 | 30,920 | 0,092 | 2,975 | 2,945 |
| Pozicija 4 (••••) | 30,784 | 0,116 | 3,768 | 32,077 | 0,099 | 3,086 | 31,583 | 0,115 | 3,641 | 3,499 |
| | | | | | | | | | $a_{CN} / \text{kJ/m}^2 = 3,534$ | |

Sukladno postupku primijenjenom na prve dvije skupine ispitnih tijela, na isti su način u tablici 4.3 prikazani rezultati ispitivanja provedena na ispitnim tijelima ispisanim s pomoću 3D pisaa *Voron 2.4* s *CHT* mlaznicom.

Tablica 4.3 Rezultati ispitivanja udarnog rada loma za ispitna tijela ispisana *Voron 2.4 CHT* mlaznicom

| VORON 2.4 CHT MLAZNICA | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------------|----------------------------|--------------|--|---------------------------|
| Pozicija | Serija 1 | | | Serija 2 | | | Serija 3 | | | \bar{X} (a_{CN}) |
| | A_0 / mm ² | E_C / J | a_{CN} / kJ/m ² | A_0 / mm ² | E_C / J | a_{CN} / kJ/m ² | A_0 / mm ² | E_C / J | a_{CN} / kJ/m ² | |
| Pozicija 5 (••••) | 31,512 | 0,156 | 4,950 | 31,752 | 0,179 | 5,637 | 31,473 | 0,159 | 5,052 | 5,213 |
| Pozicija 1 (•) | 31,356 | 0,138 | 4,401 | 31,980 | 0,130 | 4,065 | 32,058 | 0,119 | 3,712 | 4,059 |
| Pozicija 2 (••) | 31,003 | 0,164 | 5,290 | 31,361 | 0,162 | 5,166 | 31,680 | 0,160 | 5,051 | 5,169 |
| Pozicija 3 (•••) | 31,855 | 0,108 | 3,390 | 31,850 | 0,110 | 3,454 | 31,652 | 0,111 | 3,507 | 3,450 |
| Pozicija 4 (••••) | 31,315 | 0,155 | 4,950 | 31,282 | 0,152 | 4,859 | 30,720 | 0,160 | 5,208 | 5,006 |
| | | | | | | | | | $a_{CN} / \text{kJ/m}^2 = 4,579$ | |

4.4.2. Ispitivanje rastezних svojstava

Pripremljena i izmjerena ispitna tijela podvrgnuta su ispitivanju rastezних svojstava koje se provodilo na kitalici *Shimadzu AXS-G*. U tablicama u nastavku, zbog većeg broja ispisanih ispitnih tijela na jednoj poziciji, bit će predočene prosječne vrijednosti promatranih svojstava, a to su: maksimalna sila tijekom ispitivanja (F_{\max}), rastezna čvrstoća ispitnog tijela (R_m), ukupno istezanje (ε_p), modul elastičnosti (E) i prekidna čvrstoća (R_p). Također, izračunate su i u tablicama prikazane standardne devijacije (s) i aritmetičke sredine (\bar{x}) prosječnih vrijednosti promatranih svojstava.

U tablici 4.4 prikazane su vrijednosti za pojedina rastezna svojstava ispitnih tijela ispisanih na uređaju *RatRig V-Minion* primjenom *CHT* mlaznice.

Tablica 4.4 Rezultati rasteznog ispitivanja za ispitna tijela ispisana *RatRig V-Minion CHT* mlaznicom

| RATRIG V-MINION CHT MLAZNICA | | | | | |
|------------------------------|----------------|---------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|
| Pozicija | F_{\max} / N | R_m / N/mm ² | ε_p / % | E / N/mm ² | R_p / N/mm ² |
| Pozicija 5 (•••••) | 160,65 | 22,80 | 15,22 | 1860,32 | 9,44 |
| Pozicija 1 (•) | 162,44 | 22,19 | 21,20 | 1425,82 | 11,54 |
| Pozicija 2 (••) | 154,16 | 20,44 | 17,68 | 1371,12 | 11,05 |
| Pozicija 3 (•••) | 161,17 | 21,92 | 17,62 | 1536,89 | 8,45 |
| Pozicija 4 (••••) | 160,32 | 21,63 | 16,11 | 1281,71 | 9,55 |
| s | 3,23 | 0,87 | 2,28 | 224,07 | 1,26 |
| \bar{x} | 159,75 | 21,80 | 17,57 | 1495,17 | 10,01 |

U tablici 4.5 prikazani su rezultati ispitivanja druge skupine ispitnih tijela izrađenih na istom 3D pisaču kao i prethodna ispitna tijela, s razlikom da se u ovom slučaju koristio drugačiji ekstruzijski mehanizam i standardna mlaznica.

Tablica 4.5 Rezultati rasteznog ispitivanja za ispitna tijela ispisana *RatRig V-Minion* standardnom mlaznicom

| RATRIG V-MINION STANDARDNA MLAZNICA | | | | | |
|--|-----------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| Pozicija | F_{\max} / N | $R_m / \text{N/mm}^2$ | $\epsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ | $R_p / \text{N/mm}^2$ |
| Pozicija 5 (••••) | 154,66 | 20,14 | 16,11 | 1520,36 | 11,34 |
| Pozicija 1 (•) | 158,46 | 21,80 | 20,64 | 1521,97 | 11,97 |
| Pozicija 2 (••) | 146,89 | 20,31 | 16,97 | 1614,52 | 10,69 |
| Pozicija 3 (•••) | 153,51 | 20,45 | 21,03 | 1284,60 | 11,30 |
| Pozicija 4 (••••) | 151,57 | 19,72 | 16,45 | 1346,36 | 11,89 |
| s | 4,25 | 0,79 | 2,39 | 1457,56 | 0,519 |
| \bar{x} | 153,02 | 20,48 | 18,24 | 136,94 | 11,44 |

U konačnici i treća skupina ispitnih tijela podvrgnuta ispitivanju ispisana je na *Voron 2.4* pisaču s pomoću *CHT* mlaznice.

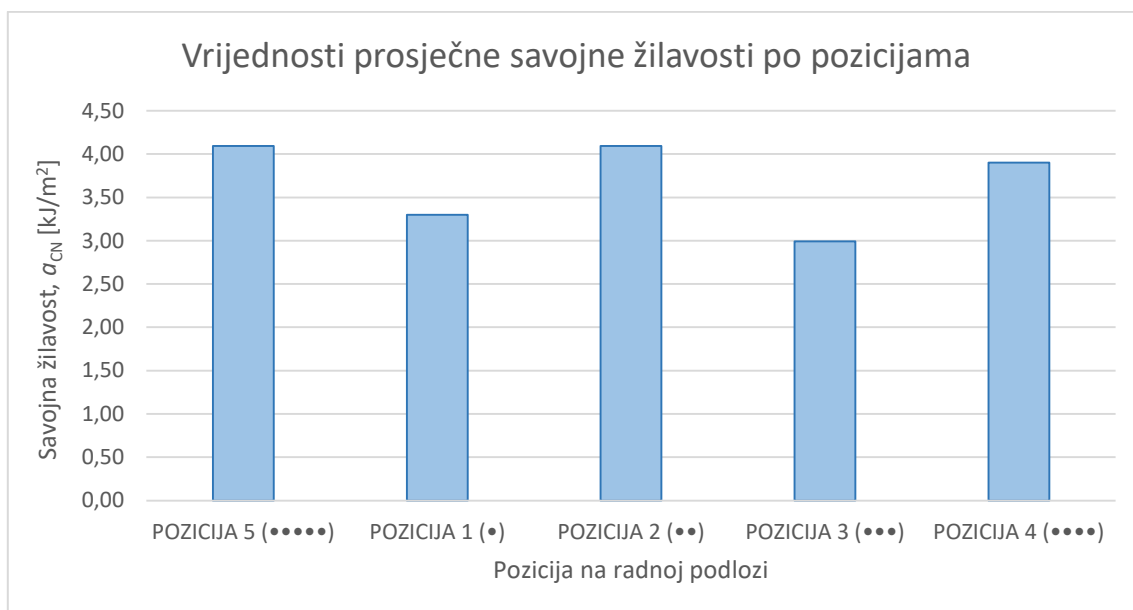
Tablica 4.6 Rezultati rasteznog ispitivanja za ispitna tijela ispisana *Voron 2.4 CHT* mlaznicom

| VORON 2.4 CHT MLAZNICA | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| Pozicija | F_{\max} / N | $R_m / \text{N/mm}^2$ | $\epsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ | $R_p / \text{N/mm}^2$ |
| Pozicija 5 (••••) | 233,99 | 28,35 | 14,51 | 1911,12 | 17,14 |
| Pozicija 1 (•) | 243,99 | 31,97 | 44,73 | 2163,58 | 17,47 |
| Pozicija 2 (••) | 261,13 | 33,34 | 47,18 | 1646,13 | 17,69 |
| Pozicija 3 (•••) | 261,52 | 33,22 | 72,04 | 1886,63 | 21,12 |
| Pozicija 4 (••••) | 240,45 | 30,26 | 46,91 | 1786,92 | 15,26 |
| s | 12,49 | 2,12 | 20,43 | 190,25 | 2,12 |
| \bar{x} | 248,22 | 31,43 | 45,07 | 1878,88 | 17,74 |

4.5. Analiza rezultata

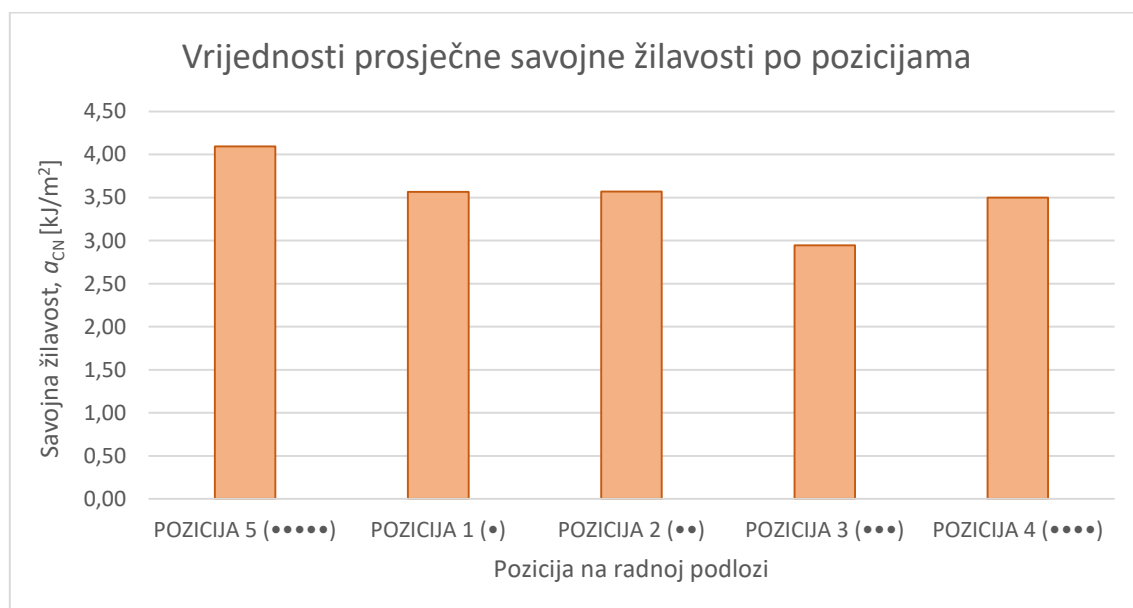
4.5.1. Analiza rezultata ispitivanja udarnog rada loma

Na sljedeća tri dijagrama grafički će biti predloženi rezultati savojne žilavosti po pozicijama za sve skupine ispitnih tijela. Na slici 4.15 grafički su prikazane vrijednosti prosječne savojne žilavosti po pozicijama za ona ispitna tijela koja su ispisana 3D pisačem *RatRig V-Minion* s *CHT* mlaznicom. Najveća savojna žilavost postignuta je na pozicijama 2 i 5 te iznose 4,094 kJ/m², dok je najniža vrijednost zabilježena na poziciji 3 pri čemu je vrijednost iznosila 2,977 kJ/m².



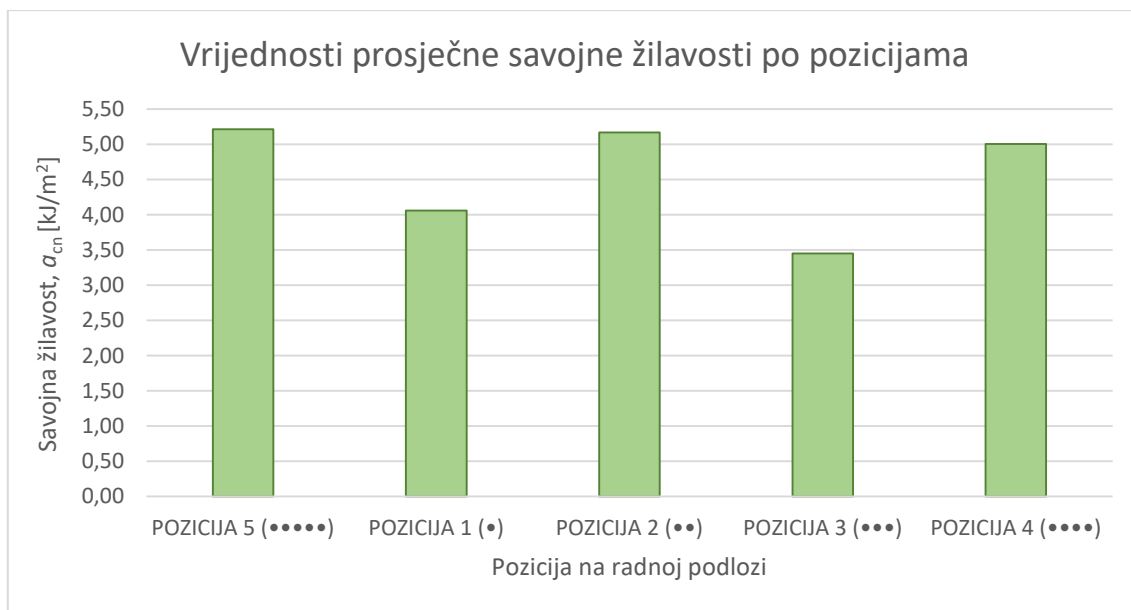
Slika 4.15 Vrijednost prosječne savojne žilavosti po pozicijama za ispitna tijela ispisana *RatRig V-Minion CHT* mlaznicom

U dijagramu na slici 4.16 prikazane su vrijednosti savojne žilavosti dobivene provođenjem ispitivanja udarnog rada loma na ispitnim tijelima izrađenim uređajem *RatRig V-Minion* uporabom *Dragonfly* ekstruzijskog mehanizma i standardne mlaznice. Iz slike 4.15 jasno proizlazi da najveću savojnu žilavost posjeduju ispitna tijela ispisana na poziciji 5 radne podloge s 4,093 kJ/m², dok su najniže vrijednosti zabilježene na poziciji 3 čija su ispitna tijela reproducirala savojnu žilavost od 2,945 kJ/m².



Slika 4.16 Vrijednost prosječne savojne žilavosti po pozicijama za ispitna tijela ispisana *RatRig V-Minion* standardnom mlaznicom

Posljednji od tri grafa (slika 4.17), prikazuje savojne žilavosti skupine ispitnih tijela ispisanih 3D pisačem *Voron 2.4* i uporabom *CHT* mlaznice. I u ovom slučaju, ispitna tijela na poziciji 5 radne podloge posjeduju najveću otpornost udarnom opterećenju iznosa $5,213 \text{ kJ/m}^2$, dok s druge strane ispitna tijela pozicionirana na poziciji 3 tijekom izrade ponovo pokazuju najmanju vrijednost savojne žilavosti od $3,450 \text{ kJ/m}^2$.

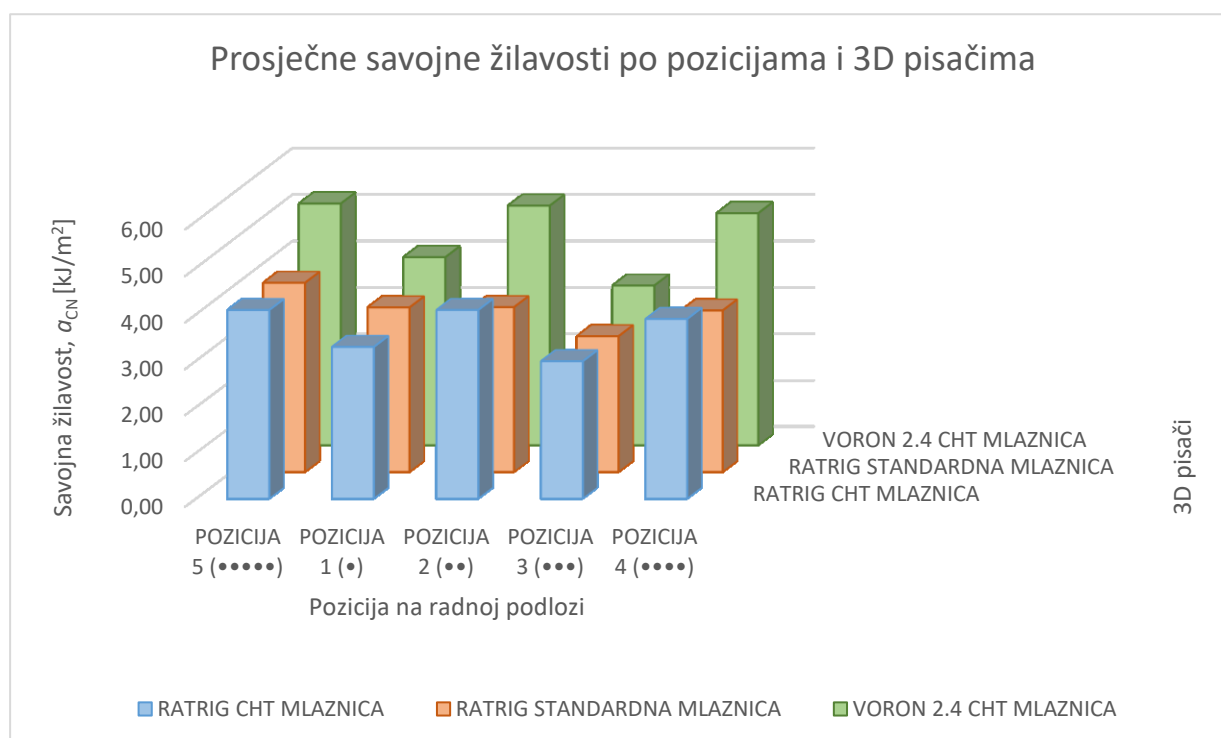


Slika 4.17 Vrijednost prosječne savojne žilavosti po pozicijama za ispitna tijela ispisana *Voron 2.4* *CHT* mlaznicom

Na slici 4.18 u nastavku usporednu su prikazane savojne žilavosti prema pozicijama i pripadajućim 3D pisačima. Iz grafa se vidi blagi trend raspored vrijednosti savojne žilavosti u skladu s pozicijama. Kod gotovo svih pisača najveće otpornost udarnom opterećenju pružaju ispitna tijela koja su se nalazila na sredini radne podloge (pozicija 5) tijekom ispisa. Jedina anomalija jest visoka vrijednost savojne žilavosti ispitnih tijela pozicije 2 ispisanih *RatRig* 3D pisačem te uporabom *CHT* mlaznice. Suprotno njima, najlošija svojstva žilavosti, u svim skupinama ispitnih tijela, reproduciraju ona ispisana na poziciji 3. Savojne žilavosti ispitnih tijela na preostalim pozicijama oblikuju pravilan uzorak raspodjele svojstava i to tako da ispitna tijela na pozicijama 4 i 2 posjeduju podjednake vrijednosti savojne žilavosti, koje su u usporedbi s ispitnim tijelima na poziciji 1, znatno više. Razlog odstupanja vrijednosti lomne žilavosti s obzirom na pozicije na radnoj podlozi mogu se pripisati orijentaciji ispitnih tijela jer ispitna tijela ispisana paralelno s osi X pokazuju bolja svojstva. Nadalje, raspored grijača radne podloge isto tako ne smije biti zanemaren. Naime, ispitna tijela koja su locirana na sredini radne

podloge (pozicija 5) imaju veću žilavost od ispitnih tijela na periferiji radne podloge (preostale pozicije).

Također, na slici 4.18 vidljive su jasne razlike u maksimalnim postizivim vrijednostima savojne žilavosti. Dok skupine ispitnih tijela ispisanih *RatRig* 3D pisačem, bez obzira na različitost korištenih mlaznica, pokazuju otprilike jednake rezultate ($a_{CN} = 4,09 \text{ kJ/m}^2$), ispitna tijela izrađena *Voron-om* 2.4 s pomoću *CHT* mlaznice ipak osiguravaju znatno višu savojnu žilavost ($a_{CN} = 5,20 \text{ kJ/m}^2$). Iako su osnovni parametri procesa ispisa identični na oba uređaja, način ostvarivanja tih parametara je nešto drugačiji. Zbog različite kinematike dvaju pisača tijekom ispisa, mlaznice se kreću različitim putanjama s ciljem postizanja istog oblika, a to posljedično uzrokuju drugačiji uzorak i razmak između rastera. Upravo razmak između rastera može biti kompromitiran zbog održavanja primarnog parametra, postotka ispune, konstantnim i jednake vrijednosti kao i na *RatRig* 3D pisaču. Dakle, sami mehanizam rada dvaju pisača osnovni je razlog odstupanja maksimalnih postizivih vrijednosti savojne žilavosti ispitnih tijela.

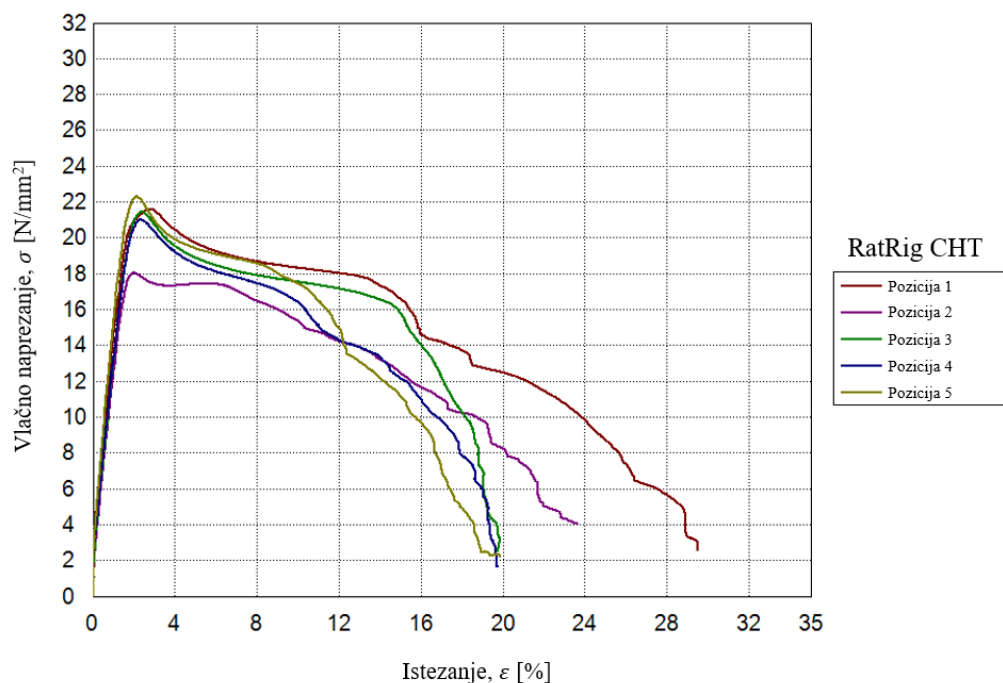


Slika 4.18 Prosječne vrijednosti savojnih žilavosti po pozicijama i 3D pisačima

4.5.2. Analiza rezultata rasteznog ispitivanja

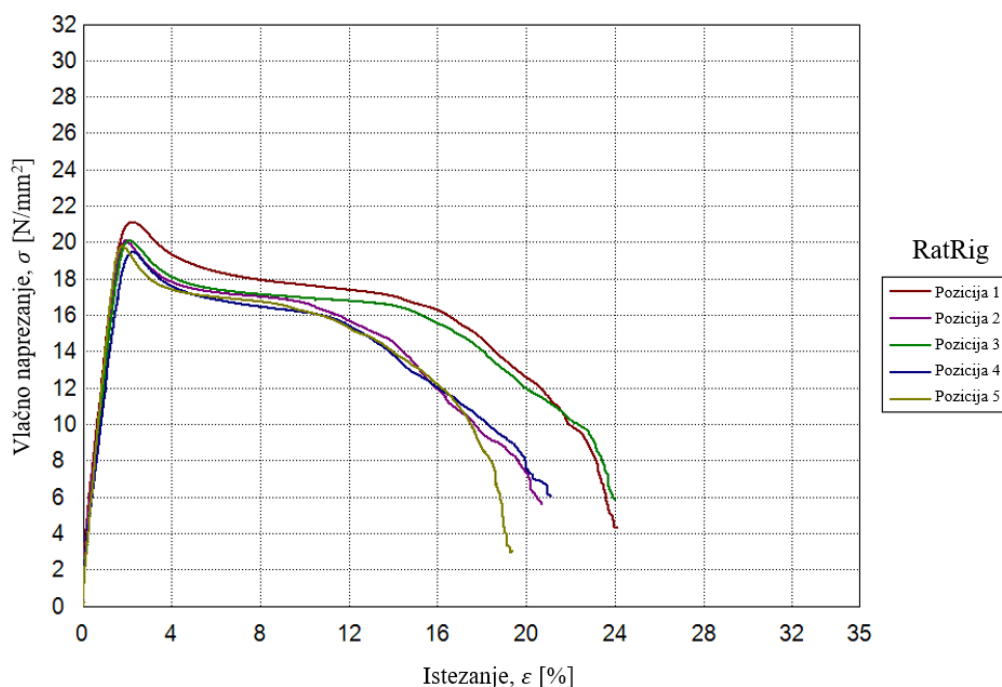
Na osnovi rezultata rasteznih ispitivanja prikazanih u prethodnom poglavlju te s pomoću računskog programa oblikovan je graf $\sigma - \epsilon$ s karakterističnim krivuljama za svaku poziciju. U nastavku će biti prikazana 3 grafa za svaku pripadajuću skupinu ispitnih tijela.

Na slici 4.19 prikazan je graf $\sigma - \epsilon$ za ispitna tijela ispisana 3D pisačem *RatRig V-Minion* te uporabom *CHT* mlaznice. Iz grafa je jasno vidljiv trend ponašanja ispitnih tijela prilikom kontinuiranog jednoosnog rasteznog opterećenja. Ispitna tijela ispisana na sredini radne podloge pokazuju najveću rasteznu čvrstoću (R_m). Sva ostala ispitna tijela pokazuju otprilike jednake rezultate rastezne čvrstoće, dok jedino ispitna na poziciji 2 odstupaju od prosjeka. S druge strane, analizom vrijednosti modula elastičnosti (E) i istežljivosti (ϵ) uočava se znatno odstupanje rezultata pri čemu najveću istežljivost pokazuju ispitna tijela ispisana na poziciji 1 radne podloge, a najmanju ispitna tijela sa sredine radne podloge. Također, ispitna tijela s najvećom istežljivosti posjeduju najmanji modul rastežljivosti (pozicija 1), dok ona s najmanjom istežljivosti imaju najveći modul elastičnosti (pozicija 5).



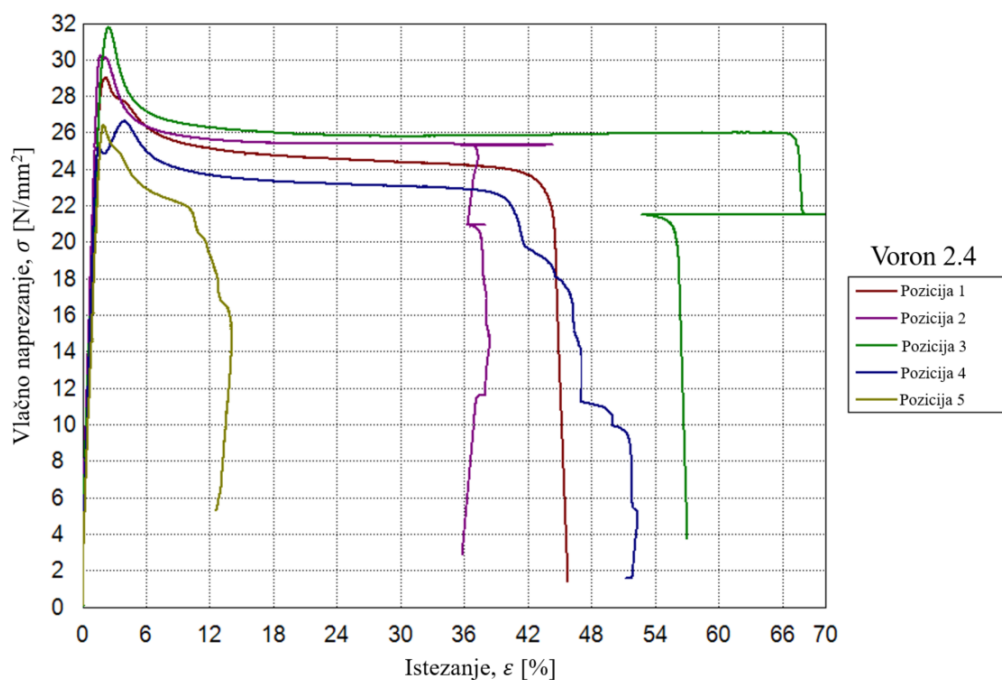
Slika 4.19 Graf $\sigma - \epsilon$ za ispitna tijela ispisana *RatRig V-Minion CHT* mlaznicom

Na isti način oblikovan je graf naprežanje – istezanje za drugu skupinu ispitnih tijela ispisanih *RatRig V – Minion* pisačem s *Dragonfly* ekstruzijskim mehanizmom uporabom obične mlaznice. Vidljivo je manje rasipanje rezultata te slično ponašanje krivulja bez obzira na pozicije na radnoj plohi. U ovom slučaju, ispitna tijela izrađena na poziciji 1 su ona koja su reproducirala najveću rasteznu čvrstoću (R_m), najveću istezljivost (ϵ) imaju ispitna tijela ispisana na poziciji 3, a modul rastezljivosti (E) pak ispitna tijela smještena na poziciji 2 radne podloge.



Slika 4.20 Graf $\sigma - \epsilon$ za ispitna tijela ispisana *RatRig V-Minion* običnom mlaznicom

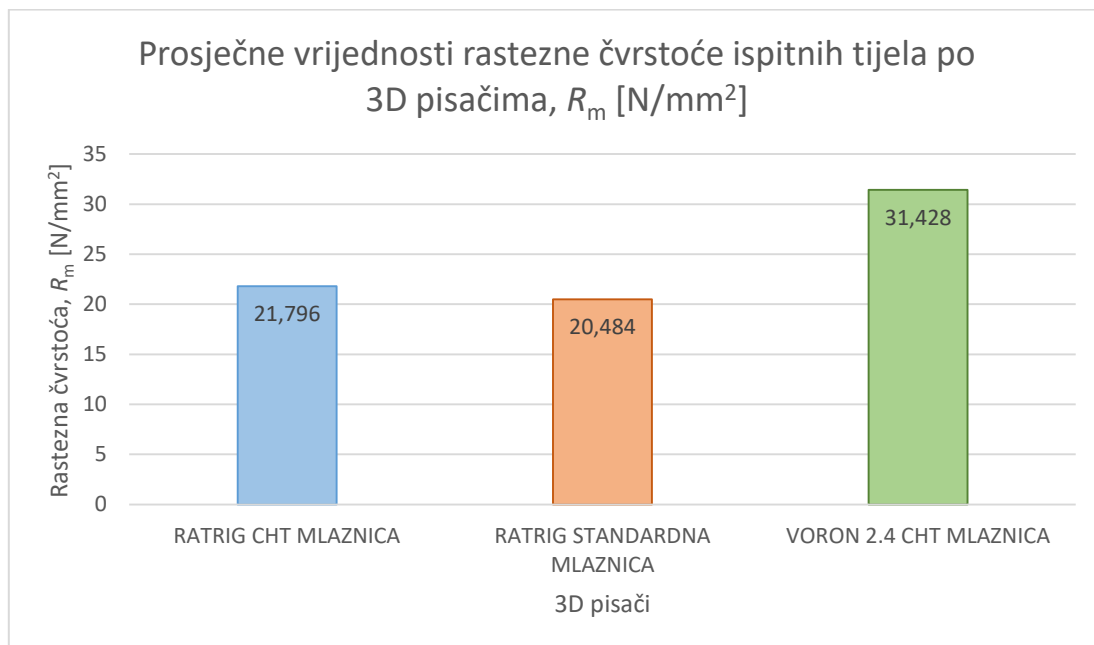
Graf $\sigma - \epsilon$ posljednje skupine ispitnih tijela, ispisanih 3D pisačem *Voron 2.4*, prikazan je na slici 4.21 u nastavku. Iz grafa se uočava veliko rasipanje i odstupanje rezultata, ali i puno strmiji završeci krivulja što upućuje na krhkiji lom ispitnih tijela. Najveću vrijednost rastezne čvrstoće (R_m) imaju ispitna tijela pozicije 3. Ista ispitna tijela pokazuju i najveću istezljivost (ϵ) te najvišu prekidnu čvrstoću (R_p). Ispitna tijela pozicije 1 na radnoj podlozi posjeduju najveći modul rastezljivosti (E).



Slika 4.21 Graf $\sigma - \epsilon$ za ispitna tijela ispisana *Voron 2.4 CHT* mlaznicom

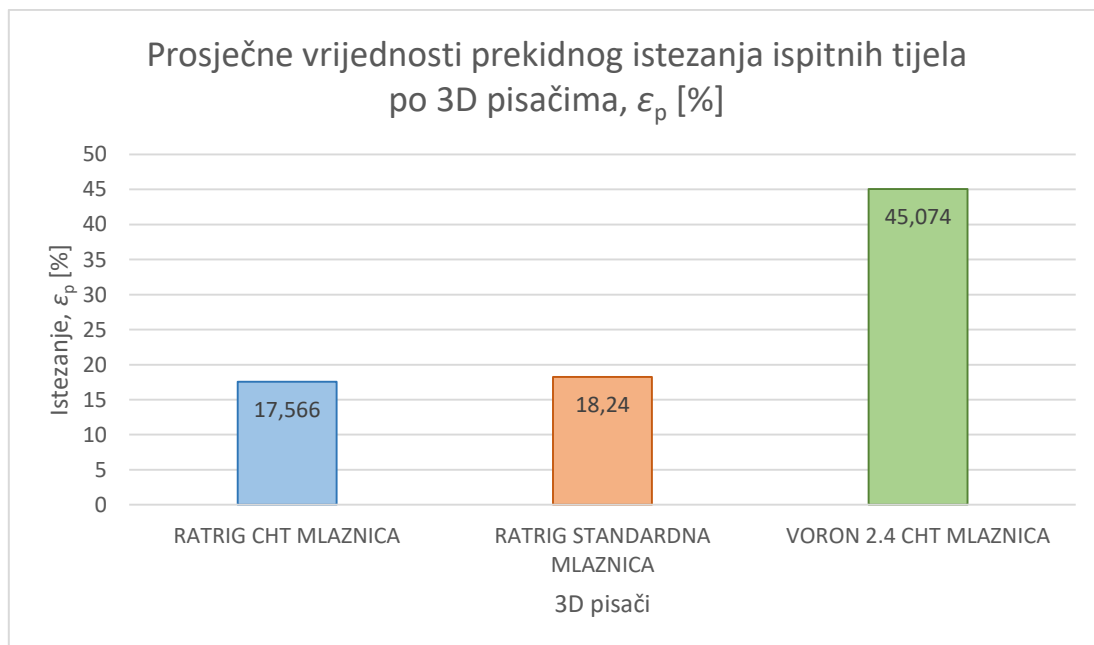
Kako je vidljivo iz gore prikazanih grafova, postoje određena odstupanja i rasipanja rezultata u ovisnosti o pozicijama na radnoj podlozi na kojima su ispisana ispitna tijela. Za razliku od savojne žilavosti, ovdje se ipak ne može prikazati točan uzorak raspodjele rastezних svojstava među ispitnim tijelima. Međutim, jasna je razlika između maksimalnih postizivih vrijednosti s obzirom na korištene 3D pisaače. I u ovom slučaju rezultati postignuti *RatRig* uređajem za FFF tehnologiju otprilike su podjednaki i usporedivi, nevažno koja se mlaznica koristila prilikom ispisivanja ispitnih tijela. S druge strane, ako se prve dvije skupine ispitnih tijela uspoređuju s ispitnim tijelima izrađenim *Voron 2.4*, razlike su prilične. Najvažnija promatrana rastezna svojstva te njihove prosječne vrijednosti prikazani su na slikama u nastavku. Razlog takvog odstupanja ponovo se može pripisati drugačijoj kinematici rada dvaju uređaja. Naime, velika je vjerojatnost da se orijentacija rastera, koja je definirana kinematikom uređaja, poklapa sa smjerom primijenjene jednoosne sile tijekom rasteznog ispitivanja. Dakle, ispitna tijela čija je usmjerenost rastera paralelna s djelovanjem vlačne sile pokazivat će bolja rastezna svojstva. Zbog manjih dimenzija ispitnih tijela, postotak ispune ipak ima manji utjecaj na vrijednosti ispitivanja nego u slučaju određivanja otpornosti na udarno opterećenje.

Na slici 4.22 prikazane su ukupne prosječne vrijednosti rastezne čvrstoće (R_m) svih pozicija postignute na 3D pisačima korištenim u eksperimentalnom dijelu rada.



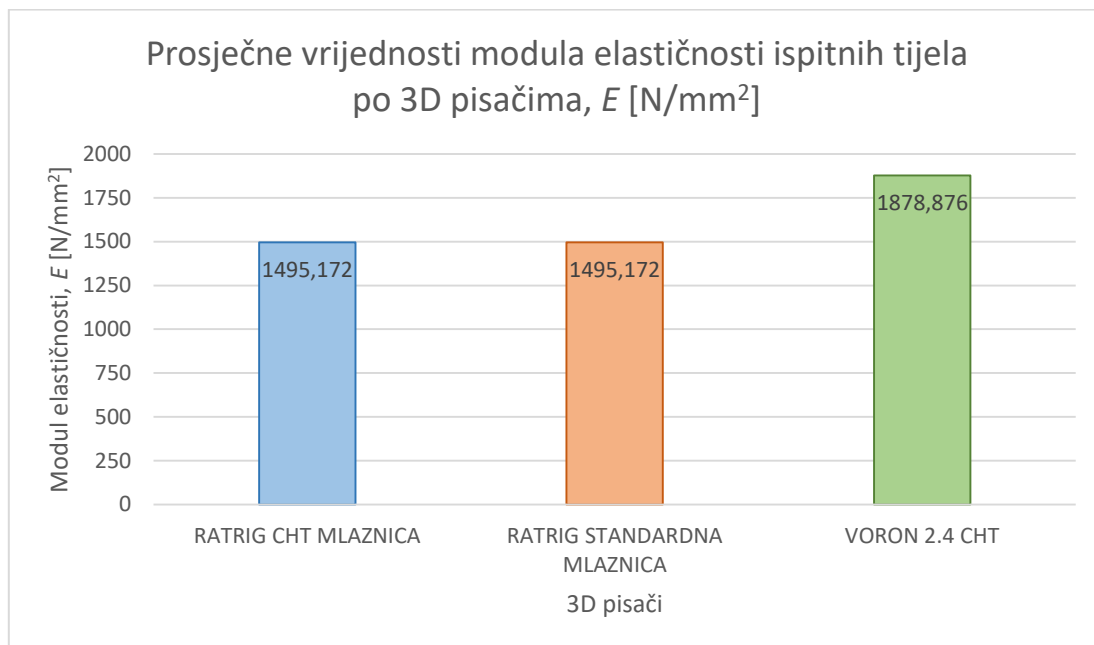
Slika 4.22 Prosječne vrijednosti rastezne čvrstoće ispitnih tijela 3D pisača svih pozicija

Na slici 4.23 predočene su ukupne prosječne vrijednosti prekidnog istezanja (ϵ_p) svih pozicija postignute na 3D pisačima korištenim u eksperimentalnom dijelu rada.



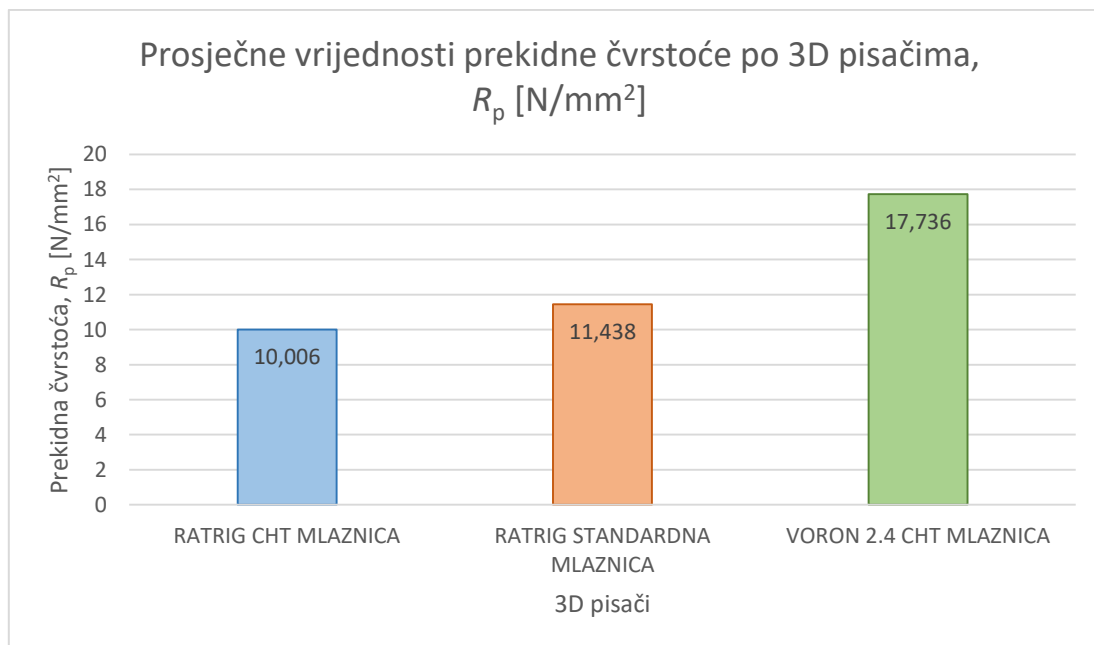
Slika 4.23 Prosječne vrijednosti prekidnog istezanja ispitnih tijela 3D pisača svih pozicija

Na slici 4.24 prikazane su ukupne prosječne vrijednosti modula elastičnosti (E) svih pozicija postignute na 3D pisačima korištenim u eksperimentalnom dijelu rada.



Slika 4.24 Prosječne vrijednosti modula elastičnosti ispitnih tijela 3D pisača svih pozicija

Na slici 4.25 prikazane su ukupne prosječne vrijednosti prekidne čvrstoće (R_p) svih pozicija postignute na 3D pisačima korištenim u eksperimentalnom dijelu rada.



Slika 4.25 Prosječne vrijednosti prekidne čvrstoće ispitnih tijela 3D pisača svih pozicija

Iz analize rezultata dobivenih ispitivanjem udarnog rada loma, na temelju kojih se zaključivalo o žilavosti ispitnih tijela, proizlazi da su kod svih korištenih 3D pisača ispitna tijela na sredini radne podloge (pozicija 5) pružale najveću otpornost udarnom opterećenju. Suprotno tome, najlošiju savojnu žilavost reproduciraju proizvodi ispisani na poziciji 3. Ispitna tijela na pozicijama 2 i 4 imaju podjednake vrijednosti, koje su u usporedbi sa žilavosti ispitnih tijela na poziciji 1, znatno više. Razlog odstupanja vrijednosti savojne žilavosti promjenom pozicije ispisa na radnoj podlozi pripisuje se orijentaciji i rasporedu grijača radne podloge.

S druge strane, iako i kod rasteznih svojstava postoji razlika između postizivih vrijednosti s obzirom na pozicije ispisa ispitnih tijela, ipak se ne nazire točan uzorak raspodjele tih svojstava. Ono što je zajedničko rezultatima ispitivanja udarnog rada loma i ispitivanja rasteznih svojstava jest razlika između maksimalnih vrijednosti s obzirom na korištene 3D pisače. Rezultati oba ispitivanja pokazuju da ispitna tijela ispisana *Voron 2.4* 3D pisačem reproduciraju značajno više vrijednosti savojne žilavost i rasteznih svojstava, nego ona ispitna tijela izrađena *RatRig* 3D pisačem, bez obzira na korištenu vrstu mlaznice. Razlike u rezultatima mogu se objasniti drugačijom kinematikom rada dvaju uređaja.

5. ZAKLJUČAK

Od same svoje pojave aditivne tehnologije izazvale su revoluciju, podignule inovativnost i raznolikost tržišta. Kroz mnoštvo izvedbi, potpomognute rapidnim razvojem i unaprjeđenjem, svakim danom pronalaze svoju primjenu u sve većem broju industrija. Otkrivanjem novih materijala i proširenjem spoznaja o postojećim, barijera koja je postojala u pogledu primjenjivih materijala postaje zanemariva. Aditivni postupci znatno su utjecali na razvoj informatičke tehnologije, koja je zapravo dopustila da aditivne tehnike, poput nanošenja rastaljenog polimernog materijala (eng. *Fused Filament Fabrication*), uđu u naše domove i postanu neizostavni dio svakodnevice. Jedan od razloga izbora ove teme upravo i jest susret s 3D pisačima u svakodnevnom životu te zaintrigiranost lakoćom i širinom njihove primjene. Stoga, na temelju provedenog istraživanja, eksperimentalnog ispitivanja i analizom dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- postoji razlika u postizivim vrijednostima savojne žilavosti i rasteznih svojstava s obzirom na pozicije ispitnih tijela na radnoj podlozi
- pozicija i orijentacija ispitnih tijela na radnoj podlozi prilikom ispisa utječu na savojnu žilavost i rastezna svojstva ispitnih tijela te na maksimalne postizive vrijednosti tih svojstava
- uočen je pravilan uzorak raspodjele savojne žilavosti prema pozicijama
- uporabom istog 3D pisača, istog materijala, istih osnovnih parametara ispisa, uz primjenu različitih mlaznica, proizvodi će pokazivati slična rastezna svojstva i vrijednosti savojne žilavosti
- različite kinematike i mehanike rada 3D pisača utječu na rastezna svojstva i žilavost proizvedenih dijelova
- uporabom istih mlaznica, istog materijala, istih osnovnih parametara ispisa, uz primjenu različitih 3D pisača, proizvodi će pokazivati različita rastezna svojstva i vrijednosti savojne žilavosti
- za očekivati je veliko rasipanje rezultata tijekom rasteznog ispitivanja, pogotovo prosječne vrijednosti rezultata povezanih s istežljivošću
- različiti načini ostvarivanja istih parametara utječu na mehanička svojstva izradaka.

6. LITERATURA

- [1] Godec Damir, Šercer Mladen. Aditivna proizvodnja. 1. Zagreb; 2015.
- [2] Aditivna proizvodnja. In: Hrvatska enciklopedia.
- [3] Godec D, Gonzalez-Gutierrez J, Nordin A, Pei E, Ureña Alcázar J, editors. A Guide to Additive Manufacturing. Cham: Springer International Publishing; 2022. doi: 10.1007/978-3-031-05863-9
- [4] Gibson I, Rosen D, Stucker B, Khorasani M. Additive Manufacturing Technologies. Cham: Springer International Publishing; 2021. doi: 10.1007/978-3-030-56127-7
- [5] What is an STL File? All3DP. 2021;
- [6] 3D Printing Support Structures: A Complete Guide. AMFG. 2018;
- [7] Pilipović Ana. Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernoga prototipa. 2012.
- [8] Leonarda Vukonić. Utjecaj naknadnog umreživanja kod postupka svjetlosnog očvršćivanja kroz LCD zaslon. 2021.
- [9] Types of 3D printers of 3D printing technologies overview. 3D Printing from scratch. 2015;
- [10] Wohlers T.T. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress. Wohlers Report. 2016;
- [11] Davies Sam. Retiring Stratasys founder Scott Crump on his 3D printing legacy. TCT Magazine. 2020;
- [12] Team Xometry. FDM vs. FFF: Differences and Comparisson. Xometry. 2022;
- [13] Introduction to Fused Filament Fabrication (FFF) 3D printing technology . BCN3D. 2019;
- [14] FFF vs FDM: Difference and Best Printers. Digital manufacturing experts. 2020;
- [15] Gao X, Qi S, Kuang X, Su Y, Li J, Wang D. Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond. Addit Manuf. 2021 Jan;37:101658. doi: 10.1016/j.addma.2020.101658
- [16] Shaqour B, Abuabiah M, Abdel-Fattah S, Juaidi A, Abdallah R, Abuzaina W, et al. Gaining a better understanding of the extrusion process in fused filament fabrication 3D printing: a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021 May 2;114(5–6):1279–91. doi: 10.1007/s00170-021-06918-6
- [17] Izadi M, Farzaneh A, Mohammed M, Gibson I, Rolfe B. A review of laser engineered net shaping (LENS) build and process parameters of metallic parts. Rapid Prototyp J. 2020 Apr 14;26(6):1059–78. doi: 10.1108/RPJ-04-2018-0088
- [18] Godec Damir. Metodički razvoj polimernih proizvoda. Zgreb; 2021.
- [19] Kunc Patricija. 3D model u .stl formatu je preduvjet 3D printanja. 3D Printaj. 2019;
- [20] Jaisingh Sheoran A, Kumar H. Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research. Mater Today Proc. 2020;21:1659–72. doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.296
- [21] Deshmukh K, Basheer Ahamed M, Deshmukh RR, Khadheer Pasha SK, Bhagat PR, Chidambaram K. Biopolymer Composites With High Dielectric Performance: Interface Engineering. In: Biopolymer Composites in Electronics. Elsevier; 2017. p. 27–128. doi: 10.1016/B978-0-12-809261-3.00003-6
- [22] Sanković Denis. PLA filament za potrebe 3D ispisa. 3D Printaj. 2021;
- [23] Shi Y, Yan C, Zhou Y, Wu J, Wang Y, Yu S, et al. Polymer materials for additive manufacturing—powder materials. In: Materials for Additive Manufacturing. Elsevier; 2021. p. 9–189. doi: 10.1016/B978-0-12-819302-0.00002-X

- [24] Han M. Depolymerization of PET Bottle via Methanolysis and Hydrolysis. In: Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles. Elsevier; 2019. p. 85–108. doi: 10.1016/B978-0-12-811361-5.00005-5
- [25] Slump Gabriel. PLA vs ABS PETG: The Main Differences. All3DP. 2022;
- [26] Sanković Denis. PETG filamenti za potrebe funkcionalnog 3D ispisa. 3D Printaj. 2021;
- [27] Roberson David. What is FFF 3D printing? UltiMaker. 2021;
- [28] Carolo Lucas. 3D Printer Axis: The Basics Simply Explained. All3DP. 2022;
- [29] O'Connell Jackson. Belt 3D Printer: All You Need to Know. All3DP. 2022;
- [30] O'Connell Jackson. 3D Printer Gantry: All You Need to Know. All3DP. 2022;
- [31] Makovec Deni. Prototipno modeliranje 3D pisača. [Varaždin]: Sveučilište Centar Varaždin; 2020.
- [32] O'Connell Jackson. Voron 2.4 3D Printer Kit: Review the Specs. All3DP. 2021;
- [33] RatRig. www.ratrig.com.
- [34] BondTech. www.bondtech.com.
- [35] 3D Jake. www.3djake.com.
- [36] Određivanje svojstva žilavosti po Charpyju - 2. dio (HRN EN ISO 179-2:2020).
- [37] Određivanje rasteznih svojstava - 2. dio (HRN EN ISO 527-2:2012).
- [38] Šercer Mladen, Križan Božidar, Basan Robert. Konstruiranje polimernih proizvoda. Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2009.

7. PRILOZI

Tablica 7.1 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rasteznih svojstava ispisanih *RatRig CHT* mlaznicom

Tablica 7.2 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rasteznih svojstava ispisanih *RatRig* standardnom mlaznicom

Tablica 7.3 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rasteznih svojstava ispisanih *Voron 2.4 CHT* mlaznicom

Tablica 7.4 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje udarnog rada loma ispisanih *RatRig CHT* mlaznicom i pripadajuće vrijednosti energije loma

Tablica 7.5 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje udarnog rada loma ispisanih *RatRig* standardnom mlaznicom i pripadajuće vrijednosti energije loma

Tablica 7.6 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje udarnog rada loma ispisanih *Voron 2.4 CHT* mlaznicom i pripadajuće vrijednosti energije loma

Tablica 7.7 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 1 radne podloge ispisanih *RatRig CHT* mlaznicom

Tablica 7.8 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 2 radne podloge ispisanih *RatRig CHT* mlaznicom

Tablica 7.9 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 3 radne podloge ispisanih *RatRig CHT* mlaznicom

Tablica 7.10 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 4 radne podloge ispisanih *RatRig CHT* mlaznicom

Tablica 7.11 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 5 radne podloge ispisanih *RatRig CHT* mlaznicom

Tablica 7.12 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 1 radne podloge ispisanih *RatRig* standardnom mlaznicom

Tablica 7.13 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 2 radne podloge ispisanih *RatRig* standardnom mlaznicom

Tablica 7.14 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 3 radne podloge ispisanih *RatRig* standardnom mlaznicom

Tablica 7.15 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 4 radne podloge ispisanih *RatRig* standardnom mlaznicom

Tablica 7.16 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 5 radne podloge ispisanih *RatRig* standardnom mlaznicom

Tablica 7.17 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 1 radne podloge ispisanih *Voron 2.4 CHT* mlaznicom

Tablica 7.18 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 2 radne podloge ispisanih *Voron 2.4 CHT* mlaznicom

Tablica 7.19 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 3 radne podloge ispisanih *Voron 2.4 CHT* mlaznicom

Tablica 7.20 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 4 radne podloge ispisanih *Voron 2.4 CHT* mlaznicom

Tablica 7.21 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 5 radne podloge ispisanih *Voron 2.4 CHT* mlaznicom

Tablica 7.1 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rastezних svojstava ispisani *RatRig CHT* mlaznicom

| RATRIG V-MINION CHT MLAZNICA | | | | | | |
|------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Pozicija | | Seriya 1 | Seriya 2 | Seriya 3 | Seriya 4 | Seriya 5 |
| Pozicija 5 (•••••) | h /mm | 1,88 | 1,89 | 1,87 | 1,87 | 1,88 |
| | b_1 / mm | 3,77 | 3,77 | 3,76 | 3,71 | 3,76 |
| Pozicija 1 (•) | h /mm | 2,08 | 1,85 | 1,78 | 1,89 | 2,02 |
| | b_1 / mm | 3,85 | 3,88 | 3,65 | 3,98 | 3,74 |
| Pozicija 2 (••) | h /mm | 2,02 | 1,97 | 1,91 | 2,03 | 2,06 |
| | b_1 / mm | 3,78 | 3,73 | 3,74 | 3,82 | 3,82 |
| Pozicija 3 (•••) | h /mm | 2,01 | 1,97 | 1,95 | 1,96 | 1,90 |
| | b_1 / mm | 3,81 | 3,76 | 3,73 | 3,75 | 3,73 |
| Pozicija 4 (••••) | h /mm | 1,95 | 1,92 | 2,01 | 2,04 | 1,88 |
| | b_1 / mm | 3,74 | 3,72 | 3,84 | 3,84 | 3,81 |

Tablica 7.2 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rastezних svojstava ispisani *RatRig* standardnom mlaznicom

| RATRIG V-MINION STANDARDNA MLAZNICA | | | | | | |
|-------------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Pozicija | | Seriya 1 | Seriya 2 | Seriya 3 | Seriya 4 | Seriya 5 |
| Pozicija 5 (•••••) | h /mm | 1,98 | 2,01 | 2,06 | 2,01 | 2,03 |
| | b_1 / mm | 3,74 | 3,77 | 3,87 | 3,80 | 3,83 |
| Pozicija 1 (•) | h /mm | 1,88 | 1,96 | 1,90 | 1,90 | 1,92 |
| | b_2 [mm] | 3,72 | 3,76 | 3,87 | 3,74 | 3,73 |
| Pozicija 2 (••) | h /mm | 1,88 | 1,90 | 1,90 | 1,92 | 1,88 |
| | b_1 / mm | 3,90 | 3,77 | 3,80 | 3,75 | 3,85 |
| Pozicija 3 (•••) | h /mm | 1,92 | 1,99 | 1,99 | 1,99 | 2,00 |
| | b_1 / mm | 3,73 | 3,82 | 3,79 | 3,83 | 3,81 |
| Pozicija 4 (••••) | h /mm | 2,01 | 1,95 | 2,00 | 2,01 | 2,01 |
| | b_1 / mm | 3,81 | 3,88 | 3,85 | 3,87 | 3,85 |

Tablica 7.3 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rastezних svojstava ispisani Voron 2.4 CHT mlaznicom

| VORON 2.4 CHT MLAZNICA | | | | | | |
|-------------------------------|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Pozicija | | Seriya 1 | Seriya 2 | Seriya 3 | Seriya 4 | Seriya 5 |
| Pozicija 5 (•••••) | <i>h</i> /mm | 1,96 | 2,06 | 2,03 | 2,03 | 2,03 |
| | <i>b</i>₁ / mm | 3,97 | 4,02 | 4,04 | 4,07 | 4,33 |
| Pozicija 1 (•) | <i>h</i> /mm | 1,96 | 2,00 | 1,99 | 1,91 | 1,95 |
| | <i>b</i>₁ / mm | 3,87 | 3,78 | 3,79 | 3,95 | 3,87 |
| Pozicija 2 (••) | <i>h</i> /mm | 1,96 | 1,98 | 1,95 | 1,91 | 1,92 |
| | <i>b</i>₁ / mm | 3,90 | 4,05 | 4,06 | 4,19 | 4,05 |
| Pozicija 3 (•••) | <i>h</i> /mm | 1,87 | 1,91 | 1,93 | 1,89 | 1,88 |
| | <i>b</i>₁ / mm | 4,14 | 4,16 | 4,21 | 4,06 | 4,18 |
| Pozicija 4 (••••) | <i>h</i> /mm | 1,97 | 2,00 | 1,92 | 2,01 | 1,96 |
| | <i>b</i>₁ / mm | 3,91 | 4,11 | 4,08 | 4,01 | 4,05 |

U sljedeće tri tablice će osim dimenzija ispitnih tijela za ispitivanja udarnog rada loma biti prikazane i pripadajuće vrijednosti energije loma (E_C) za sva ispitna tijela na svim pozicijama radne podloge i standardna devijacija (s) vrijednosti energije loma.

Tablica 7.4 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje udarnog rada loma ispisanih *RatRig CHT* mlaznicom i pripadajuće vrijednosti energije loma

| Pozicija | | RATRIGE V-MINION CHT MLAZNICA | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------|-------------------------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|---------------|
| | | Seriya 1 | E_C / kpcm | Seriya 2 | E_C / kpcm | Seriya 3 | E_C / kpcm | Seriya 4 | E_C / kpcm | Seriya 5 | E_C / kpcm | s (E_C) |
| Pozicija 5 (••••) | h /mm | 3,85 | 1,30 | 3,75 | 1,28 | 3,80 | 1,28 | 3,88 | 1,25 | 3,90 | 1,19 | 0,04301 |
| | b_N /mm | 8,06 | | 8,12 | | 8,16 | | 8,06 | | | | |
| Pozicija 1 (•) | h /mm | 3,90 | / | 3,98 | / | 3,85 | 1,20 | 3,91 | 0,86 | 3,91 | 1,06 | 0,17088 |
| | b_N /mm | 8,12 | | 8,18 | | 8,13 | | 8,14 | | 8,06 | | |
| Pozicija 2 (••) | h / mm | 3,80 | 1,22 | 3,76 | 1,27 | 3,85 | 1,27 | 3,74 | 1,28 | 3,89 | 1,13 | 0,06269 |
| | b_N /mm | 8,20 | | 8,20 | | 8,26 | | 8,21 | | 8,19 | | |
| Pozicija 3 (•••) | h / mm | 3,91 | 1,06 | 3,89 | 0,91 | 3,89 | 0,95 | 3,85 | 0,87 | 3,82 | 0,98 | 0,07232 |
| | b_N /mm | 8,25 | | 8,28 | | 8,21 | | 8,24 | | 8,19 | | |
| Pozicija 4 (••••) | h / mm | 3,92 | 1,20 | 3,82 | 1,20 | 3,78 | 0,96 | 4,00 | 1,25 | 3,83 | 1,28 | 0,12657 |
| | b_N /mm | 7,99 | | 7,97 | | 8,21 | | 7,95 | | 7,99 | | |

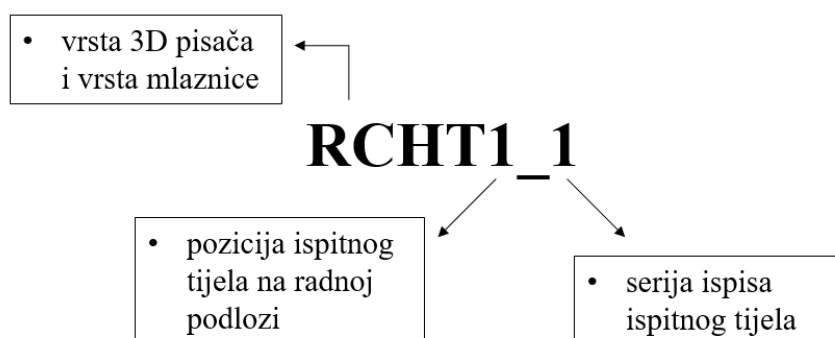
Tablica 7.5 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje udarnog rada loma ispisanih *RatRig* standardnom mlaznicom i pripadajuće vrijednosti energije loma

| Pozicija | | RATRIGE V- MINION STANDARDNA MLAZNICA | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------|---------------------------------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|---------------|
| | | Seriya 1 | E_C / kpcm | Seriya 2 | E_C / kpcm | Seriya 3 | E_C / kpcm | Seriya 4 | E_C / kpcm | Seriya 5 | E_C / kpcm | s (E_C) |
| Pozicija 5 (••••) | h /mm | 3,80 | 1,24 | 3,82 | 1,26 | 3,82 | 1,35 | 3,75 | 1,15 | 3,86 | 1,28 | 0,07232 |
| | b_N /mm | 8,02 | | 8,04 | | 8,03 | | 8,11 | | 8,07 | | |
| Pozicija 1 (•) | h /mm | 3,73 | 1,21 | 3,70 | 1,08 | 3,81 | 1,07 | 3,88 | 0,91 | 3,75 | 1,06 | 0,10644 |
| | b_N /mm | 7,91 | | 7,95 | | 7,96 | | 7,97 | | 8,09 | | |
| Pozicija 2 (••) | h / mm | 3,93 | 1,11 | 3,78 | 1,11 | 3,76 | 0,98 | 3,74 | 1,19 | 3,75 | 0,81 | 0,1490 |
| | b_N /mm | 7,74 | | 7,94 | | 7,75 | | 7,90 | | 7,79 | | |
| Pozicija 3 (•••) | h / mm | 3,92 | 0,90 | 3,71 | 0,92 | 3,88 | 1,06 | 3,82 | 0,88 | 3,78 | 0,92 | 0,07127 |
| | b_N /mm | 8,16 | | 8,14 | | 8,25 | | 8,30 | | 8,18 | | |
| Pozicija 4 (••••) | h / mm | 3,68 | 1,17 | 3,70 | 1,16 | 3,78 | 0,98 | 3,86 | 1,25 | 3,83 | 0,99 | 0,09618 |
| | b_N /mm | 8,41 | | 8,32 | | 8,43 | | 8,31 | | 7,99 | | |

Tablica 7.6 Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje udarnog rada loma ispisanih *Voron 2.4 CHT* mlaznicom i pripadajuće vrijednosti energije loma

| Pozicija | | VORON 2.4 CHT MLAZNICA | | | | | | | | | | |
|--------------------|-----------|------------------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|---------------|
| | | Seriya 1 | E_C / kpcm | Seriya 2 | E_C / kpcm | Seriya 3 | E_C / kpcm | Seriya 4 | E_C / kpcm | Seriya 5 | E_C / kpcm | s (E_C) |
| Pozicija 5 (•••••) | h /mm | 3,89 | 1,56 | 3,90 | 1,56 | 3,86 | 2,12 | 3,92 | 1,79 | 3,90 | 1,59 | 0,24131 |
| | b_N /mm | 8,07 | | 8,08 | | 8,07 | | 8,10 | | 8,07 | | |
| Pozicija 1 (•) | h /mm | 3,90 | 1,50 | 3,80 | 1,11 | 3,81 | 1,38 | 3,90 | 1,30 | 3,90 | 1,19 | 0,15372 |
| | b_N /mm | 8,21 | | 8,26 | | 8,23 | | 8,20 | | 8,22 | | |
| Pozicija 2 (••) | h / mm | 3,88 | 1,55 | 3,89 | 1,64 | 3,93 | 1,62 | 3,96 | 1,60 | 4,03 | 1,81 | 0,09864 |
| | b_N /mm | 7,98 | | 7,97 | | 7,98 | | 8,00 | | 8,01 | | |
| Pozicija 3 (•••) | h / mm | 3,88 | 1,08 | 3,87 | 1,12 | 3,87 | 1,07 | 3,87 | 1,10 | 3,86 | 1,11 | 0,02074 |
| | b_N /mm | 8,21 | | 8,19 | | 8,22 | | 8,23 | | 8,20 | | |
| Pozicija 4 (••••) | h / mm | 3,84 | 1,61 | 3,89 | 1,55 | 3,84 | 1,50 | 3,92 | 1,52 | 3,84 | 1,60 | 0,04827 |
| | b_N /mm | 8,01 | | 8,05 | | 7,99 | | 7,98 | | 8,00 | | |

U tablicama u nastavku prikazani su rezultati rasteznog ispitivanja provedenog na svim ispitnim tijelima u eksperimentalnom dijelu rada. U tablicama će biti predočene vrijednosti: maksimalnih sila (F_{\max}), rasteznih čvrstoća (R_m), prekidnih sila (F_p), prekidnih čvrstoća (R_p), prekidnih istežljivosti (ε_p) i modula elastičnosti (E). Osim rasteznih svojstava izračunate su prosječne vrijednosti (\bar{x}) i standardna devijacija (s). Oznake ispitnih tijela u tablici predstavljaju sljedeće:



Slika 7.1 Oznake ispitnih tijela u tablicama priloga

pri čemu je:

RCHT – *RatRig* s *CHT* mlaznicom

R – *RatRig* sa standardnom mlaznicom

VRON – *Voron 2.4* s *CHT* mlaznicom

Tablica 7.7 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 1 radne podloge ispisanih *RatRig CHT* mlaznicom

| Ispitno tijelo | F_{\max} / N | $R_{\max} / \text{N/mm}^2$ | F_p / N | $R_p / \text{N/mm}^2$ | $\varepsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ |
|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| RCHT1_1 | 159,006 | 19,8559 | 87,9335 | 10,9807 | 20,5050 | 1187,37 |
| RCHT1_2 | 168,842 | 23,5221 | 73,1468 | 10,1904 | 19,5950 | 1334,43 |
| RCHT1_3 | 157,202 | 24,1961 | 74,9620 | 11,5379 | 28,5200 | 1797,25 |
| RCHT1_4 | 161,134 | 21,4215 | 102,387 | 13,6112 | 16,1400 | 1342,19 |
| RCHT1_5 | 166,011 | 21,9742 | 86,0802 | 11,3941 | 21,2200 | 1467,88 |
| \bar{x} | 162,439 | 22,1939 | 84,9019 | 11,5429 | 21,1960 | 1425,82 |
| s | 4,86489 | 1,72370 | 11,7611 | 1,26939 | 4,53446 | 230,181 |

Tablica 7.8 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 2 radne podloge ispisanih *RatRig CHT* mlaznicom

| Ispitno tijelo | F_{\max} / N | $R_{\max} / \text{N/mm}^2$ | F_p / N | $R_p / \text{N/mm}^2$ | $\epsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ |
|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| RCHT2_1 | 159,442 | 20,8814 | 67,3389 | 8,81908 | 14,2150 | 1002,01 |
| RCHT2_2 | 157,717 | 21,4637 | 79,6906 | 10,8451 | 22,9950 | 1461,68 |
| RCHT2_3 | 149,468 | 20,9239 | 120,331 | 16,8451 | 8,07000 | 1473,71 |
| RCHT2_4 | 154,718 | 19,9517 | 74,2134 | 9,57024 | 20,000 | 1212,98 |
| RCHT2_5 | 149,468 | 18,9940 | 71,9690 | 9,14566 | 23,0950 | 1705,20 |
| \bar{x} | 154,163 | 20,4429 | 82,7086 | 11,0450 | 17,6750 | 1371,12 |
| s | 4,60686 | 0,97548 | 21,4959 | 3,33235 | 6,46746 | 269,993 |

Tablica 7.9 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 3 radne podloge ispisanih *RatRig CHT* mlaznicom

| Ispitno tijelo | F_{\max} / N | $R_{\max} / \text{N/mm}^2$ | F_p / N | $R_p / \text{N/mm}^2$ | $\epsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ |
|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| RCHT3_1 | 162,271 | 21,1894 | 89,8314 | 11,7302 | 23,1950 | 1314,56 |
| RCHT3_2 | 160,214 | 21,6295 | 69,5578 | 9,39057 | 16,1400 | 1715,75 |
| RCHT3_3 | 167,114 | 22,9757 | 46,1626 | 6,34668 | 13,8450 | 1442,92 |
| RCHT3_4 | 158,844 | 21,6114 | 59,6205 | 8,11164 | 20,3550 | 1413,74 |
| RCHT3_5 | 157,406 | 22,2105 | 47,1369 | 6,65119 | 14,5600 | 1797,48 |
| \bar{x} | 161,170 | 21,9233 | 62,4618 | 8,44606 | 17,6190 | 1536,89 |
| s | 3,77608 | 0,69142 | 18,0834 | 2,20332 | 4,01140 | 208,162 |

Tablica 7.10 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 4 radne podloge ispisanih *RatRig CHT* mlaznicom

| Ispitno tijelo | F_{\max} / N | $R_{\max} / \text{N/mm}^2$ | F_p / N | $R_p / \text{N/mm}^2$ | $\epsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ |
|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| RCHT4_1 | 155,795 | 21,3623 | 83,6023 | 11,4634 | 14,4200 | 1233,07 |
| RCHT4_2 | 161,719 | 22,6422 | 84,2158 | 11,7910 | 12,5400 | 1288,11 |
| RCHT4_3 | 159,508 | 20,6660 | 70,7928 | 9,17196 | 19,3950 | 1434,54 |
| RCHT4_4 | 155,710 | 19,8771 | 72,1121 | 9,20549 | 19,1550 | 1246,03 |
| RCHT4_5 | 168,885 | 23,5780 | 43,9803 | 6,14010 | 15,0150 | 1206,81 |
| \bar{x} | 160,323 | 21,6251 | 70,9407 | 9,55439 | 16,1050 | 1281,71 |
| s | 5,42456 | 1,49104 | 16,3157 | 2,26782 | 3,03575 | 90,3423 |

Tablica 7.11 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 5 radne podloge ispisanih *RatRig CHT* mlaznicom

| Ispitno tijelo | F_{\max} / N | $R_{\max} / \text{N/mm}^2$ | F_p / N | $R_p / \text{N/mm}^2$ | $\epsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ |
|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| RCHT5_1 | 154,11 | 21,7444 | 97,8851 | 13,8108 | 12,7950 | 2716,14 |
| RCHT5_2 | 158,796 | 22,2863 | 52,8193 | 7,41292 | 16,1400 | 1748,09 |
| RCHT5_3 | 155,420 | 22,1044 | 48,3131 | 6,87125 | 14,1600 | 1639,34 |
| RCHT5_4 | 178,161 | 25,6801 | 76,8185 | 11,0726 | 17,3150 | 1554,80 |
| RCHT5_5 | 156,749 | 22,1748 | 56,8565 | 8,04330 | 15,6850 | 1643,22 |
| \bar{x} | 160,648 | 22,7980 | 66,5385 | 9,44218 | 15,2190 | 1860,32 |
| s | 9,94170 | 1,62387 | 20,6301 | 2,93375 | 1,76464 | 483,304 |

Tablica 7.12 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 1 radne podloge ispisanih *RatRig* standardnom mlaznicom

| Ispitno tijelo | F_{\max} / N | $R_{\max} / \text{N/mm}^2$ | F_p / N | $R_p / \text{N/mm}^2$ | $\epsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ |
|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| R1_1 | 144,517 | 20,6641 | 79,5635 | 11,3766 | 19,0350 | 1272,40 |
| R1_2 | 164,250 | 22,2875 | 95,4469 | 12,9514 | 17,9650 | 1749,71 |
| R1_3 | 156,547 | 21,2903 | 90,8963 | 12,3618 | 18,6700 | 1258,55 |
| R1_4 | 157,743 | 21,0886 | 66,2184 | 8,85272 | 22,3850 | 1329,95 |
| R1_5 | 169,416 | 23,6561 | 102,412 | 14,3001 | 25,1250 | 1999,24 |
| \bar{x} | 158,495 | 21,7973 | 86,9074 | 11,9685 | 20,6360 | 1521,97 |
| s | 9,38260 | 1,19780 | 14,2407 | 2,03811 | 3,03203 | 334,738 |

Tablica 7.13 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 2 radne podloge ispisanih *RatRig* standardnom mlaznicom

| Ispitno tijelo | F_{\max} / N | $R_{\max} / \text{N/mm}^2$ | F_p / N | $R_p / \text{N/mm}^2$ | $\epsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ |
|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| R2_1 | 149,471 | 20,3861 | 76,4974 | 10,4334 | 18,4200 | 1493,85 |
| R2_2 | 150,442 | 21,0027 | 79,1057 | 11,0437 | 16,9550 | 1774,47 |
| R2_3 | 140,244 | 19,4244 | 78,3030 | 10,8453 | 15,9750 | 1510,88 |
| R2_4 | 144,458 | 20,0636 | 69,5054 | 9,65352 | 18,2750 | 1762,60 |
| R2_5 | 149,808 | 20,6974 | 83,0332 | 11,4719 | 15,2150 | 1530,79 |
| \bar{x} | 146,885 | 20,3148 | 77,2889 | 10,6896 | 16,9680 | 1614,52 |
| s | 4,41239 | 0,60840 | 4,96325 | 0,68933 | 1,40319 | 141,267 |

Tablica 7.14 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 3 radne podloge ispisanih *RatRig* standardnom mlaznicom

| Ispitno tijelo | F_{\max} / N | $R_{\max} / \text{N/mm}^2$ | F_p / N | $R_p / \text{N/mm}^2$ | $\epsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ |
|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| R3_1 | 150,832 | 21,0612 | 81,8396 | 11,4276 | 20,6600 | 1481,54 |
| R3_2 | 146,542 | 19,2772 | 92,1647 | 12,1241 | 18,3850 | 1257,60 |
| R3_3 | 154,670 | 20,5076 | 89,8266 | 11,9100 | 23,5500 | 1274,68 |
| R3_4 | 165,294 | 21,6873 | 84,9899 | 11,1510 | 24,0550 | 1412,08 |
| R3_5 | 150,224 | 19,7145 | 75,5294 | 9,91200 | 18,4750 | 997,087 |
| \bar{x} | 153,512 | 20,4496 | 84,8700 | 11,3049 | 21,0250 | 1284,60 |
| s | 7,18907 | 0,97778 | 6,59972 | 0,86835 | 2,7009 | 186,097 |

Tablica 7.15 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 4 radne podloge ispisanih *RatRig* standardnom mlaznicom

| Ispitno tijelo | F_{\max} / N | $R_{\max} / \text{N/mm}^2$ | F_p / N | $R_p / \text{N/mm}^2$ | $\epsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ |
|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| R4_1 | 142,129 | 18,5593 | 86,4601 | 11,2900 | 18,5700 | 1524,95 |
| R4_2 | 158,556 | 20,9564 | 81,6949 | 10,7976 | 16,4950 | 1263,51 |
| R4_3 | 154,570 | 20,0740 | 96,5627 | 12,5406 | 18,8800 | 1427,98 |
| R4_4 | 151,857 | 19,5221 | 98,2857 | 12,6352 | 14,2200 | 1104,30 |
| R4_5 | 150,712 | 19,4757 | 94,1912 | 12,1718 | 14,1050 | 1411,07 |
| \bar{x} | 151,565 | 19,7175 | 91,4389 | 11,8870 | 16,4540 | 1346,36 |
| s | 6,07773 | 0,88035 | 7,07886 | 0,80798 | 2,28436 | 164,469 |

Tablica 7.16 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 5 radne podloge ispisanih *RatRig* standardnom mlaznicom

| Ispitno tijelo | F_{\max} / N | $R_{\max} / \text{N/mm}^2$ | F_p / N | $R_p / \text{N/mm}^2$ | $\epsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ |
|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| R5_1 | 142,215 | 19,2048 | 88,5296 | 11,9551 | 14,0100 | 1441,97 |
| R5_2 | 149,763 | 19,7637 | 93,1470 | 12,2923 | 13,1900 | 1732,57 |
| R5_3 | 160,292 | 20,1064 | 95,2911 | 11,9529 | 15,1750 | 1580,85 |
| R5_4 | 154,998 | 20,2929 | 93,6079 | 12,2556 | 18,2150 | 1712,13 |
| R5_5 | 166,035 | 21,3552 | 64,1187 | 8,24689 | 19,9450 | 1134,28 |
| \bar{x} | 154,661 | 20,1446 | 86,9389 | 11,3406 | 16,1070 | 1520,36 |
| s | 9,22067 | 0,79330 | 13,0007 | 1,73685 | 2,87005 | 245,291 |

Tablica 7.17 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 1 radne podloge ispisanih *Voron 2.4 CHT* mlaznicom

| Ispitno tijelo | F_{\max} / N | $R_{\max} / \text{N/mm}^2$ | F_p / N | $R_p / \text{N/mm}^2$ | $\epsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ |
|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| VOR1_1 | 234,202 | 30,8762 | 137,358 | 18,1087 | 52,7300 | 2059,71 |
| VOR1_2 | 232,271 | 30,7236 | 135,891 | 17,9750 | 56,4300 | 1769,48 |
| VOR1_3 | 246,210 | 32,6448 | 125,016 | 16,5757 | 21,5750 | 2138,96 |
| VOR1_4 | 246,701 | 32,6995 | 127,433 | 16,8909 | 43,3700 | 1853,65 |
| VOR1_5 | 260,585 | 32,9146 | 140,880 | 17,7946 | 49,5400 | 2996,12 |
| \bar{x} | 243,994 | 21,9717 | 133,316 | 17,4690 | 44,7290 | 2163,58 |
| s | 11,4107 | 1,07584 | 6,77647 | 0,68983 | 13,8024 | 488,848 |

Tablica 7.18 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 2 radne podloge ispisanih *Voron 2.4 CHT* mlaznicom

| Ispitno tijelo | F_{\max} / N | $R_{\max} / \text{N/mm}^2$ | F_p / N | $R_p / \text{N/mm}^2$ | $\epsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ |
|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| VOR2_1 | 254,498 | 33,2938 | 118,218 | 15,4654 | 55,7600 | 1568,87 |
| VOR2_3 | 257,295 | 32,4991 | 165,753 | 20,9364 | 39,5200 | 1742,50 |
| VOR2_4 | 259,816 | 32,4652 | 118,210 | 14,7708 | 36,6500 | 1880,24 |
| VOR2_5 | 272,911 | 35,0966 | 152,418 | 19,6011 | 56,8050 | 1392,91 |
| \bar{x} | 261,130 | 33,3387 | 138,650 | 17,6934 | 47,1838 | 1646,13 |
| s | 8,14881 | 1,23290 | 24,2170 | 3,03655 | 10,5801 | 211,490 |

Tablica 7.19 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 3 radne podloge ispisanih *Voron 2.4 CHT* mlaznicom

| Ispitno tijelo | F_{\max} / N | $R_{\max} / \text{N/mm}^2$ | F_p / N | $R_p / \text{N/mm}^2$ | $\epsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ |
|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| VOR3_1 | 279,113 | 36,0528 | 180,704 | 23,3413 | 65,0400 | 1668,62 |
| VOR3_2 | 244,562 | 30,7795 | 141,805 | 17,8470 | 68,7400 | 1826,44 |
| VOR3_3 | 295,506 | 36,3686 | 197,117 | 24,2596 | 69,8800 | 1445,44 |
| VOR3_4 | 251,222 | 32,7393 | 155,470 | 20,2609 | 77,8950 | 2740,11 |
| VOR3_5 | 237,192 | 30,1832 | 156,470 | 19,9095 | 78,6550 | 1752,53 |
| \bar{x} | 261,519 | 33,2247 | 166,311 | 21,1237 | 72,0420 | 1886,63 |
| s | 24,7489 | 2,88737 | 22,1999 | 2,63188 | 5,97065 | 498,049 |

Tablica 7.20 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 4 radne podloge ispisanih *Voron 2.4 CHT* mlaznicom

| Ispitno tijelo | F_{\max} / N | $R_{\max} / \text{N/mm}^2$ | F_p / N | $R_p / \text{N/mm}^2$ | $\epsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ |
|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| VOR4_1 | 243,828 | 31,6548 | 62,5992 | 8,12691 | 27,1600 | 1824,20 |
| VOR4_2 | 241,542 | 29,3847 | 132,581 | 16,1291 | 56,9450 | 2146,19 |
| VOR4_3 | 236,171 | 30,1485 | 128,727 | 16,4327 | 30,5050 | 1284,89 |
| VOR4_4 | 236,640 | 29,3594 | 150,172 | 18,6315 | 62,9850 | 1610,73 |
| VOR4_5 | 244,082 | 30,7485 | 134,916 | 16,9963 | 56,9500 | 2068,59 |
| \bar{x} | 240,453 | 30,2592 | 121,799 | 15,2633 | 46,9090 | 1786,92 |
| s | 3,82821 | 0,97131 | 34,0806 | 4,10467 | 16,7264 | 351,027 |

Tablica 7.21 Vrijednosti rasteznih svojstava ispitnih tijela na poziciji 5 radne podloge ispisanih *Voron 2.4 CHT* mlaznicom

| Ispitno tijelo | F_{\max} / N | $R_{\max} / \text{N/mm}^2$ | F_p / N | $R_p / \text{N/mm}^2$ | $\epsilon_p / \%$ | $E / \text{N/mm}^2$ |
|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| VOR5_1 | 230,147 | 29,5773 | 125,960 | 16,1877 | 10,3500 | 1695,88 |
| VOR5_2 | 239,708 | 29,5773 | 125,960 | 16,1877 | 19,5900 | 5307,09 |
| VOR5_3 | 232,223 | 28,3157 | 149,398 | 18,2166 | 19,5450 | 1530,76 |
| VOR5_4 | 232,770 | 28,1732 | 135,320 | 16,3784 | 6,98500 | 1684,20 |
| VOR5_5 | 235,109 | 26,7477 | 144,758 | 16,4687 | 16,0900 | 2337,69 |
| \bar{x} | 233,991 | 28,3520 | 141,671 | 17,434 | 14,5120 | 1911,12 |
| s | 3,65126 | 1,05609 | 10,9873 | 1,10156 | 5,64768 | 381,198 |