

# Napredni kompoziti za FDM 3D tisak u autoindustriji

---

**Butković, Domagoj**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:358446>

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

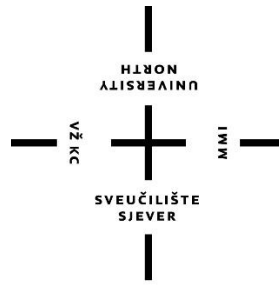
*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-26**



*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)





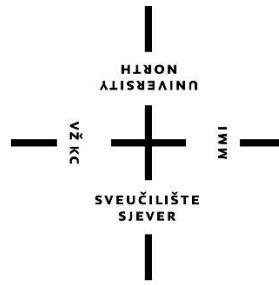
**Sveučilište  
Sjever**

Diplomski rad br. 015/MMD/2020

## **Napredni kompoziti za FDM 3D tisak u autoindustriji**

Domagoj Butković, 0798/336D

Varaždin, rujan 2020.



# Sveučilište Sjever

Odjel za multimediju

Diplomski rad br. 015/MMD/2020

## **Napredni kompoziti za FDM 3D tisak u autoindustriji**

### **Student**

Domagoj Butković, 0798/336D

### **Mentor**

doc. dr. sc. Krunoslav Hajdek

Varaždin, rujan 2020.

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za multimediju

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Multimedija

PRISTUPNIK Domagoj Butković

MATIČNI BROJ 0798/336D

DATUM 04.09.2020

KOLESIJ 3D tisak

NASLOV RADA Napredni kompoziti za FDM 3D tisak u autoindustriji

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Advanced composites for FDM 3D printing in the automotive industry

MENTOR dr. sc. Krunoslav Hajdek

ZVANJE Docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. Izv.prof.dr.sc. Dean Valdec-predsjednik
2. Doc.art. Robert Geček-član
3. Doc.dr.sc. Krunoslav Hajdek-mentor
4. Doc.art.dr.sc. Mario Periša-zamjenski član
5. \_\_\_\_\_

## Zadatak diplomskog rada

BROJ 015/MMD/2020

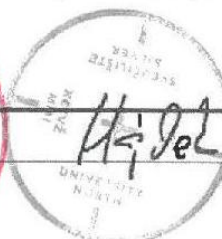
OPIS

Svakim danom popularnost 3D tiska, odnosno aditivne proizvodnje raste. Kroz vrijeme nalazi sve više i više primjena u različitim industrijama, što uključuje i automobilsku industriju. Ovaj se rad fokusira na primjenu naprednih kompozitnih materijala, odnosno analizira i uspoređuje prije provedena istraživanja vezana za napredne kompozite koji imaju potencijal da budu primijenjeni u proizvodnji automobila. Cilj ovog rada je sakupiti već postojeća istraživanja vezana za napredne kompozitne materijale koji se primjenjuju u FDM 3D tisku, te zaključiti kakav potencijal oni imaju u proizvodnji automobila.

U radu je potrebno:

- Opisati 3D tisak općenito, te njegovu primjenu u autoindustriji
- Opisati način rada FDM 3D printera
- Napraviti istraživanja vezana za napredne kompozitne materijale u autoindustriji
- Predstaviti prethodno povedena istraživanja vezana za napredne kompozitne materijale koji se koriste u autoindustriji
- Izraditi zaključak istraživanja

ZADATAK URUČEN



## Sažetak

FDM tehnologija 3D tiska sve češće nalazi primjenu u industrijskom okruženju. Dva su glavna faktora koja utječu na povećanu primjenu – poboljšanje tehnoloških mogućnosti 3D printera i sve širi raspon dostupnih polimernih i kompozitnih materijala za izradu proizvoda. Autoindustrija je vrlo brzo prepoznala prednosti i nove mogućnosti koje 3D tisak donosi, stoga je to jedno od područja industrije koje najbrže uvodi tehnologiju 3D tiska za prototipiranje i proizvodnju. Potreba za lakšim i čvršćim materijalima oduvijek je prisutna u autoindustriji, stoga ne iznenađuje potreba za naprednim materijalima u 3D tisku koji tu potrebu zadovoljavaju. Nagli razvoj materijala rezultirao je širokim rasponom naprednih kompozitnih materijala, te je gotovo nemoguće naći objedinjeni pregled trenutnog stanja dostupnih materijala. Stoga je cilj ovoga rada stvoriti objektivni pregled naprednih kompozita i njihovih mehaničkih karakteristika.

U ovom će radu biti kratko opisan 3D tisak, kratka povijest, glavne metode i načini rada 3D printera, ponajviše Fused Deposition Modeling (FDM) tehnika 3D tiska, i primjena 3D tiska u automobilske industrije - od prvog 3D isprintanog auta, preko rješenja rezervnih dijelova do restauracije klasičnih vozila. Na kraju općenitog djela o 3D tisku u autoindustriji, nalaze se neke informacije i fotografije prikupljene osobnim istraživanjem o 3D tisku u firmi Rimac Automobili. Imamo intervju proveden na licu mjesta s glavnim čovjekom zaduženim za 3D tisak u firmi, i za kraj nešto fotografija 3D printera koje koriste i dijelova koje su isprintali.

Nakon tog općenitog prvog dijela, rad se fokusira na kompozitne termoplastične polimere i nanokompozite. U tom poglavlju se nalazi mnogo različitih eksperimenata s raznolikim kompozitima, te je svaki sažeto opisan i data su najvažnija svojstva za svaki od njih.

Nakon općenitog pregleda naprednih kompozita, rad se fokusira na kompozite ugljičnih vlakana, te su oni puno detaljnije opisani i objašnjeni. Na isti način se u zadnjem poglavlju govori o spojevima polimera i metala.

Ključne riječi: 3D tisak, 3D printer, kompoziti, FDM, plastika, polimeri, automobil, dijelovi

## **Summary**

FDM technique for 3D printing keeps finding itself in industrial environments. There are two main factors which caused the spread of its application - advancements of capabilities of 3D printers and a huge increase in available polymer and composite materials for 3D printing. The automotive industry soon recognized these advantages and the new possibilities granted by 3D printing, so it is an industry which is introducing 3D printing very rapidly for prototyping and production. The need for lighter and harder materials has always been present in the automotive industry, therefore the need for advanced materials to be used in 3D printing is not surprising. The sudden development of materials resulted in a wide array of advanced composite materials, and it is nearly impossible to find a united overview of the current state of available materials. Therefore, the goal of this thesis is to create an objective overview of advanced composites and their mechanical properties.

In this thesis, the process of 3D printing, its history, main techniques and how they work will be summarized. FDM will be described into more detail, as well as the application of 3D printing in the automotive industry. After the general overview of 3D printing in the automotive industry, there is some information gathered through research at Rimac Automobili, a Croatian supercar company, along with some photos taken there. An interview has been conducted with the person in charge of 3D printing at the company.

After that, we are getting more technical with composite thermoplastic polymers and nanocomposites. That chapter contains a wide range of experiments with different composites, where each is summarized and the main properties are given for each one.

Finally, the thesis focuses on carbon fiber and metal composites, which are described in detail.

Keywords: 3D printing, 3D printer, composites, FDM, plastic, polymer, automobile, parts

|   |    |
|---|----|
| <b>Uvod</b>   | 1  |
| <b>1.1 Cilj i struktura rada</b>                                  | 1  |
| <b>Općenito o temi</b>  | 3  |
| <b>2.1 Kratka povijest 3D tiska</b>                               | 3  |
| <b>2.2 Tipovi i način rada 3D printera</b>                        | 4  |
| 2.2.1 Stereolithography (SLA)                                     | 5  |
| 2.2.2 Digital Light Processing (DLP)                              | 5  |
| 2.2.3 Fused Deposition Modeling (FDM)                             | 6  |
| 2.2.4 Selective Laser Sintering (SLS)                             | 6  |
| 2.2.5 Selective Laser Melting (SLM)                               | 6  |
| 2.2.6 Electronic Beam Melting (EBM)                               | 6  |
| 2.2.7 Laminated Object Manufacturing (LOM)                        | 7  |
| 2.2.8 Binder Jetting (BJ)   | 7  |
| 2.2.9 Material Jetting (MJ)                                       | 7  |
| <b>2.3 3D tisak u autoindustriji</b>                              | 7  |
| 2.3.1 Prvi 3D isprintan automobil - Strati                        | 8  |
| 2.3.1 Ključne primjene 3D tiska u autoindustriji                  | 10 |
| 2.3.2 Prednosti 3D tiska u autoindustriji                         | 10 |
| 2.3.3 Rješenje problema rezervnih dijelova                        | 11 |
| 2.3.4 Povratak klasika zahvaljujući 3D tisku                      | 12 |
| 2.3.5 Vodeći proizvođači automobila koji koriste 3D tisak         | 13 |
| 2.3.5 Intervju kod Rimac Automobila                               | 16 |
| 2.3.6 Fotografije slikane kod Rimac Automobila vezane za 3D tisak | 23 |
| <b>3. Fused Deposition Modeling (FDM)</b>                         | 25 |
| <b>3.1 Kako izgleda i funkcionira FDM printer?</b>                | 26 |
| <b>3.2 Rezolucija</b>   | 28 |
| <b>3.3 Okvir</b>  | 29 |
| <b>3.4 Podloga</b>  | 30 |
| <b>3.5 Kretanje ekstrudera</b>                                    | 30 |
| <b>3.6 Ekstruder</b>  | 33 |
| <b>3.7 Filament</b>   | 34 |
| <b>3.8 Prianjanje na podlogu</b>                                  | 36 |

|  |    |
|--|----|
| <b>3.9 Slicer programi</b>   | 37 |
| <b>3.10 Poravnanje podloge</b>   | 37 |
| <b>4. Kompozitni termoplastični polimeri i nanokompoziti</b>             | 39 |
| <b>4.1 Proces proizvodnje kod 3D tiska</b>                               | 40 |
| <b>4.2 Materijali koji se koriste u FDM 3D tisku</b>                     | 40 |
| <b>4.3 Kompoziti ojačani česticama</b>                                   | 41 |
| 4.3.1 Željezni/najlonski kompoziti                                       | 41 |
| 4.3.2 Željezni/ABS kompoziti   | 41 |
| 4.3.3 Bakreni/ABS i željezni/ABS kompoziti                               | 41 |
| 4.3.4 Čađani/PP/SCG kompoziti  | 42 |
| 4.3.5 Stroncijev titanat( $\text{SrTiO}_3$ )/ABS kompoziti               | 42 |
| 4.3.6 Glinica ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )/ABS kompoziti                  | 42 |
| 4.3.7 Trikalcijev fosfat/polipropilenski kompoziti                       | 42 |
| 4.3.8 Glinica ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )/Najlon6 kompoziti              | 43 |
| 4.3.9 Grafitni/PA6/PS/POE-g-MAH kompoziti                                | 43 |
| <b>4.4 Kompoziti ojačani prirodnim vlaknima</b>                          | 43 |
| 4.4.1 Juteni/ABS kompoziti   | 43 |
| 4.4.2 Juteni/PLA kompoziti   | 43 |
| <b>4.5 Kompoziti ojačani sintetičkim vlaknima</b>                        | 44 |
| 4.5.1 Ugljična vlakna(CF)/PLA kompoziti                                  | 44 |
| 4.5.2 Ugljična vlakna(CF)/ABS kompoziti                                  | 44 |
| 4.5.3 Kontinuirano staklo, ugljik, kevlarška vlakna /najlonski kompoziti | 44 |
| 4.5.4 Kontinuirana ugljična vlakna/PLA kompoziti                         | 45 |
| <b>4.6 Kompoziti ojačani nanomaterijalima</b>                            | 45 |
| 4.6.1 TPU/PLA/GO nanokompoziti   | 45 |
| 4.6.2 PBT nanokompoziti  | 45 |
| 4.6.3 Nanoštapići cinkovog oksida/ABS kompoziti                          | 46 |
| 4.6.4 Nanoplateleti grafena/ABS kompoziti                                | 47 |
| 4.6.5 Kloisitni/PLA kompoziti  | 47 |
| 4.6.6 Titanov oksid/ABS kompoziti  | 47 |
| 4.6.7 Grafen u PLA/PLA kompoziti   | 47 |
| <b>4.7 Polimerske mješavine</b>  | 47 |



|   |           |
|---|-----------|
| 4.7.1 ABS/SEBS/UHMWPE polimerske mješavine  | 48        |
| 4.7.2 UHMWPE/HDPE/PEG polimerske mješavine  | 48        |
| 4.7.3 PC/SEBS-g-MA polimerske mješavine   | 48        |
| <b>4.8 Izazovi kod upotrebe termoplastičnih kompozita u aditivnoj proizvodnji</b> | <b>49</b> |
| 4.8.1 Defekti uzrokovani nadopunama   | 49        |
| 4.8.2 Dizajnerska ograničenja 3D printera   | 49        |
| <b>5. Ugljična vlakna (CF)</b>  | <b>50</b> |
| <b>5.1 Ugljična vlakna i PLA</b>  | <b>50</b> |
| 5.1.1 Priprema materijala   | 50        |
| 5.1.2 Priprema za eksperiment   | 50        |
| 5.1.3 Procedura mjerenja  | 51        |
| 5.1.4 Utjecaj ugljičnih vlakana na vlačnu čvrstoću                                | 51        |
| 5.1.5 Utjecaj ugljičnih vlakana na čvrstoću savijanja                             | 52        |
| 5.1.6 Test mikrotvrdoće   | 53        |
| 5.1.7 Udarni test   | 54        |
| 5.1.8 Dinamička mehanička analiza   | 54        |
| 5.1.9 Termogravimetrijska analiza   | 55        |
| 5.1.10 Zaključak za ugljična vlakna i PLA   | 56        |
| <b>5.2 Ugljična vlakna i ABS</b>  | <b>57</b> |
| 5.2.1 Priprema procedura za eksperiment   | 57        |
| 5.2.2 Procedure mjerenja  | 58        |
| 5.2.3 Utjecaj pomoćnog grijača i prekaljivanja                                    | 59        |
| 5.2.4 Utjecaj pomoćnog grijača i prekaljivanja na mehanička svojstva              | 60        |
| 5.2.5 Utjecaj kuta rastera na vlačna svojstva                                     | 63        |
| 5.2.6 Površinske anomalije nakon pomoćnog grijanja i prekaljivanja                | 64        |
| 5.2.7 Površinske anomalije uzrokovane različitim kutevima rastera                 | 65        |
| 5.2.8 Zaključak za ugljična vlakna i ABS  | 68        |
| <b>6. Metali</b>  | <b>69</b> |
| <b>6.1 Željezo/ABS i bakar/ABS</b>  | <b>69</b> |
| 6.1.1 Priprema metal/ABS kompozita  | 69        |
| 6.1.2 Proizvodnja FDM filamenata  | 70        |
| 6.1.3 Toplinska vodljivost  | 71        |

|   |           |
|---|-----------|
| 6.1.4 Vrućinski kapacitet                   | 74        |
| 6.1.5 Dinamička mehanička svojstva          | 75        |
| 6.1.6 Ponašanje kompozita pod naporom       | 78        |
| 6.1.7 Proizvodnja i primjena kompozita      | 79        |
| 6.1.8 Zaključak za željezo/ABS i bakar/ABS  | 80        |
| <b>6.2 Nehrđajući čelik/ABS</b>             | <b>80</b> |
| 6.2.1 Materijali                            | 80        |
| 6.2.2 Kompoziti i izrada testnih primjeraka | 81        |
| 6.2.3 Vlačno testiranje                     | 81        |
| 6.2.4 Fraktografija                         | 81        |
| 6.2.5 Homogenost kompozita                  | 82        |
| 6.2.6 Vlačna svojstva                       | 82        |
| 6.2.7 Fraktografski rezultati i analiza     | 83        |
| 6.2.8 Zaključak za nehrđajući čelik i ABS   | 86        |
| <b>7. Zaključak</b>                         | <b>87</b> |
| <b>8. Literatura</b>                        | <b>89</b> |

# 1. Uvod

Da bismo uopće počeli s temom 3D tiska u automobilske industriji, potrebno je najprije ukratko opisati i definirati 3D tisak. Najjednostavnije rečeno, 3D tisak je proces izrade trodimenzionalnih predmeta iz digitalne datoteke. Taj proces je aditivan, što znači da radi tako da se predmet izrađuje sloj po sloj, od prvog do zadnjeg, i tada je predmet gotov. Svaki sloj možemo shvaćati kao tanku krišku presjeka našeg predmeta. 3D printanje je suprotan proces od subtraktivne proizvodnje kod koje počinjemo s komadom materijala koji rezbarimo kako bi dobili konačan proizvod pomoću raznih alata i strojeva. Iz tog razloga pomoću 3D tiska možemo dobiti složene oblike, i pritom uštedjeti na materijalu potrebnom za izradu [1].

U početku ovoga rada će biti istraženo do koje mjere automobilska industrija utilizira tehnike 3D tiska, kada se 3D tisak počeo koristiti u automobilske industriji, koji proizvođači ga najviše koriste itd.

## 1.1 Cilj i struktura rada

Ciljevi ovog rada su doći do zaključka da li je 3D tisak isplativ u autoindustriji, kako se može poboljšati, te probati procijeniti kako će se 3D tisak koristiti u budućnosti automobilske industrije; hoće li on postati “vođa svake tvornice automobila” ili ga kroz nekoliko godina uopće neće biti? Nadalje, doći ćemo do zaključka vezanog za napredne kompozitne materijale: koji imaju potencijalnu budućnost u autoindustriji a koji ne.

Rad je strukturiran tako da se počinje od vrlo širokog područja 3D tiska, pa se svakim poglavljem fokusira prema zadanoj temi.

Prvi dio rada je fokusiran na općenitu teoriju oko 3D tiska i 3D printera. Opisuje se 3D tisak općenito, najrelevantnije tehnologije 3D tiska, te primjena 3D tiska u autoindustriji.

U drugom dijelu rada se polako približavamo glavnoj temi ovog rada, te općenito govorimo o 3D tisku u autoindustriji, kako se i gdje primjenjuje, te neke općenite činjenice i konkretni primjeri iz realnog svijeta. Ovdje se također nalazi intervju proveden u tvrtki Rimac Automobili na temu 3D tiska, odnosno kako ga oni koriste. Razgovor je proveden u samoj firmi s glavnom osobom zaduženom za 3D tisak u Rimac Automobilima, snimljen te pretpikan i prenesen u cijelosti. Intervju prati nekoliko fotografija njihovih 3D printera i 3D isprintanih dijelova.

U trećem dijelu rada se sužavamo na samu temu ovoga rada, odnosno na FDM tehnologiju 3D tiska, kako točno funkcionira te koji filamenti postoje, kakvi su i kako ih je moguće poboljšati da bi se mogli koristiti za napredne i zahtjevne primjene.

Četvrto poglavlje se fokusira na područje naprednih kompozitnih filamenata. U njemu se nalazi mnogo različitih spojeva, od kojih je svaki ukratko opisan, te su za svakog dana važnija svojstva.

Peto poglavlje se fokusira isključivo na kompozite od ugljičnih vlakana (carbon fiber/CF) i polimera. Specifično, istražene su kombinacije ugljičnih vlakana i PLA, te ugljičnih vlakana i ABS-a uz posebne uvjete izrade s pomoćnim grijačem. Za razliku od prethodnog poglavlja, ovdje se ide u puno veće detalje za svaki kompozitni materijal.

Zadnje, šesto poglavlje govori o kombinacijama metala i ABS-a. Specifično, provedeni su se eksperimenti spajanja bakra i ABS-a, željeza i ABS-a te nehrđajućeg čelika i ABS-a i upotreba tih kompozita kao filamenata za FDM 3D tisak.

## 2. Općenito o temi

U ovom poglavlju će se ukratko proći povijest 3D tiska, nakon čega će biti objašnjene najznačajnije tehnike, pa 3D tisak u samoj autoindustriji, a za kraj intervju proveden u firmi Rimac Automobili vezan za njihovu upotrebu aditivne proizvodnje.

### 2.1 Kratka povijest 3D tiska

1859. godine, Francuz François Willème predstavlja prvo 3D skeniranje koristeći 24 fotoaparata kako bi fotografirao subjekte iz različitih kuteva. 1892. godine, Joseph E. Blanthier dobiva patent za izradu 3D topografskih karata pomoću slojevanja - sličan se princip koristi u suvremenim 3D printerima.

1980. se pojavljuju prvi konkretni pokušaji 3D tiska. Prvi patent dolazi u svibnju 1980. godine. Dr. Hideo Kodama opisuje sistem fotopolimera. Njegova ideja uključuje fotopolimerni materijal izložen UV svjetlu kako bi se stvrdnuo.

1986. Chuck Hull je izumio SLA (stereolithography apparatus). Radi se o 3D printanju sloj po sloj pomoću procesa koji laserima povezuje molekule koje sačinjavaju polimere.

1987. Carl Deckard ima drugačiju ideju, i osmišljava način da prah pretvori u čvrste predmete pomoću lasera.

1989. S Scott Crump uz pomoć još dvoje ljudi smišlja novi patent aditivne proizvodnje zvan FDM (Fused Deposition Modeling). U ovoj tehnici imamo polimer koji se topi i slojevito nanosi kako bi se dobio 3D predmet.

1999. 3D tisak se širi na medicinsku industriju, kada je prvi put 3D isprintani mjehur ugrađen u pacijenta.

2004. Adrian Bowyer započinje RepRap projekt kojim želi smisliti način da se 3D printer isprinta drugim 3D printerom. Ideja je da se 3D tisak proširi tako da netko kupi 3D printer, pa printa printere za svoje kolege.

2008. u Nizozemskoj nastaje firma Shapeways kojoj bilo tko može poslati 3D modele, a oni će ih isprintati. Iste godine nastaje prva upotrebljiva umjetna noga.

2011. u Engleskoj se printa prva bespilotna 3D letjelica, za ukupnu cijenu manju od 7000 dolara. Iste godine se pojavljuje prototip automobila s isprintanom karoserijom.



Slika 1: Urbee, prvi automobil s isprintanom karoserijom

2013. popularnost 3D tiska raste, te osvaja pažnju Obame, tadašnjeg predsjednika Amerike, koji izjavljuje da 3D tisak ima potencijal značajno promijeniti način izrade gotovo svega.

2018. 3D tisak je pronašao svoju primjenu u svakoj industriji - 3D tisak kuća, 3D tisak u svemiru, napredak 3D tiska proteza [2].

## **2.2 Tipovi i način rada 3D printera**

Ima više vrsta 3D printera i metoda, a razlog tome je isti kao i kod klasičnih 2D printera - ovisno o primjeni! Imamo 6 elemenata na koje treba paziti kada se bira tip printera:

- 1) cijena
- 2) kvaliteta
- 3) brzina
- 4) mogućnosti
- 5) praktičnost

## 6) očekivanja

Neki printeri tiskaju samo tekst, neki drugi tekst i slike. Tehnologije i materijali također variraju, kao i načini kako se tinta nanosi na papir. 3D printeri su još pametniji - i oni također nude niz opcija i odabira kvalitete, materijala i cijene. Glavni tipovi 3D printera su:

- 1) Stereolithography (SLA)
- 2) Digital Light Processing (DLP)
- 3) Fused Deposition Modeling (FDM)
- 4) Selective Laser Sintering (SLS)
- 5) Selective Laser Melting (SLM)
- 6) Electronic Beam Melting (EBM)
- 7) Laminated Object Manufacturing (LOM)
- 8) Binder Jetting (BJ)
- 9) Material Jetting (MJ)[3]

### **2.2.1 Stereolithography (SLA)**

SLA je tehnologija koja se koristi kad je preciznost na prvom mjestu. Poseban tip plastike, tekući fotopolimeri se sloj po sloj nanose i stvaraju 3D predmet. Plastika se zagrije i otopi, pa se stvrdne na dodir. Printer nanosi svaki sloj koristeći UV (ultraljubičasti) laser. Nakon printa, predmet mora ići u "kemijsku kupku" kako bi se odstranio višak. Za kraj se predmet stavlja u UV komoru kako bi se do kraja stvrdnuo. U nekim slučajevima predmet ide na brušenje pijeskom i bojanje. SLA je jedna od najpopularnijih metoda 3D tiska u više industrija [3].

### **2.2.2 Digital Light Processing (DLP)**

DLP je najstariji princip 3D tiska, a izumio ga je Larry Hornbeck 1987. godine. Sličan je kao SLA pošto isto radi s fotopolimerima. Plastična smola ide u prozirnu komoru. Bitna razlika u odnosu na SLA je tip korištenog svjetla. DLP ne koristi UV, već tradicionalne izvore svjetla, obične lampe. Zbog toga se dobiva na brzini, jer se smola jako brzo stvrdne, unutar nekoliko sekundi. Brže je zbog toga što osvijetli čitav sloj odjednom, dok SLA mora proći svakim slojem, a to traje. DLP je također robustan i proizvodi modele visoke rezolucije svaki put. Također može koristiti jeftinije materijale za detaljne predmete, što smanjuje otpad i cijenu tiska [3].

### **2.2.3 Fused Deposition Modeling (FDM)**

FDM koristi termalnu plastiku za tisak. Popularan je za izradu prototipa, koncepata i pomoć pri manufakturi. Ova tehnologija izrađuje precizne detalje i daje odličan omjer čvrstoće i težine. Prije početka procesa tiska, korisnik mora svoj 3D model 'narezati' u više slojeva putem posebnog slicer programa. Takav 3D model ide printeru koji onda gradi predmet sloj po sloj - do dizne dolazi plastika koja se zagrijava, topi, i nanosi na prethodni sloj. Po potrebi printer može isprintati držače za određene predmete koji se uklanjaju nakon završetka tiska. Vrijeme izrade ovisi o veličini i kompleksnosti predmeta. Nakon otiska predmet zahtjeva čišćenje, pošto dijelovi FDM tiska imaju vidljive crte slojeva. Da bi se uklonile, predmet bi trebalo ručno izbrusiti kako bi postao gladak s uravnoteženom površinom. Krajnji proizvodi su funkcionalni i čvrsti [3].

### **2.2.4 Selective Laser Sintering (SLS)**

SLS tehnologija koristi jake CO<sub>2</sub> lasere kako bi se čestice stopile. Radi tako da se platforma spušta sa svakim prolaskom lasera. Ovaj proces se ponavlja sloj po sloj do kraja visine predmeta. Tijekom procesa imamo nesinteriranu podršku praha sa strane koji štiti predmet. Zbog toga 3D predmet ne treba ostale načine podrške tijekom tiska. Nakon printanja, netko mora odstraniti višak praha. SLS nam daje čvrste i precizne dijelove od široke palete materijala. SLS je vrlo sličan SLA po pitanju brzine i kvalitete. Ključna razlika je u materijalima pošto SLS koristi prah, a SLA tekuću smolu [3].

### **2.2.5 Selective Laser Melting (SLM)**

SLM slično kao SLA koristi jaki laser kako bi oformio 3D predmete. Tijekom procesa tiska, laser topi prah. Najjednostavnije rečeno: prah + vrućina + preciznost + slojevi = savršeni 3D predmet. Kad laser dođe u dodir s materijalom, selektivno povezuje čestice. Nakon ovakvog ciklusa, printer ponavlja postupak za idući sloj. Tad se predmet spušta za debljinu sloja. Nakon tiska, netko odstranjuje višak praha s predmeta. Glavna razlika SLM i SLS principa je da SLM do kraja rastopi prah, a SLS ga samo djelomično topi. SLM proizvodi su uglavnom čvršći jer imaju manje praznina [3].

### **2.2.6 Electronic Beam Melting (EBM)**

EBM je sličan kao SLM pošto koristi prah. Razlika je izvor snage. SLM koristi jaki laser u komori s inertnim plinom. EBM koristi jaku elektronsku zraku u vakuumu. Osim toga, ostatak procesa je manje-više isti. EBM se koristi za tisak metalnih dijelova. Glavne karakteristike su



mogućnosti dobivanja kompleksnih geometrija zadržavajući pritom slobodu dizajna. EBM dijelovi su jako čvrsti i gusti [3].

### **2.2.7 Laminated Object Manufacturing (LOM)**

LOM radi tako da spaja slojeve plastike ili papira pomoću vrućine i pritiska. Laser ili oštrica kojom upravlja računalo izreže predmet u željeni oblik. Svakim slojem platforma se pomiče dolje za otprilike milimetar i pol. Printer tada polaže novi list materijala preko postojećeg gotovog sloja gdje se pričvršćuje zagrijanim valjkom. Proces se ponavlja za svaki sloj do završenog 3D otiska. Ovaj princip nije vrlo popularan, ali je i dalje jedan od najbržih i najjeftinijih za izradu velikih 3D prototipa [3].

### **2.2.8 Binder Jetting (BJ)**

BJ je proces 3D tiska koji koristi 2 tipa materijala da bi izradio predmete: materijal na bazi praha (uglavnom gips) i neka vrsta ljepila. Ljepilo služi za povezivanje slojeva gipsa. Printer radi slično kao 2D printer, a nakon svakog sloja platforma se spušta za idući sloj. Proces se ponavlja do kraja tiska. BJ ne daje vrlo precizne ili čvrste rezultate, ali može tiskati u boji [3].

### **2.2.9 Material Jetting (MJ)**

MJ nema izumitelja, odnosno MJ je više tehnika nego proces 3D printanja. Draguljari to koriste već stoljećima. Radi se o tradicionalnom procesu kojim se izrađuje kvalitetan nakit. Zahvaljujući dolasku 3D tiska, MJ je danas automatizirani proces. MJ 3D printeri rade dijelove visoke rezolucije, uglavnom za dentalnu i draguljarsku industriju. Kada 3D model dođe do printera, printer stavlja rastopljeni vosak na aluminijsku platformu kako bi gradio slojeve. Ovo postiže pomoću dizni koje jednoliko prolaze područje slojevanja. Nanosom novog sloja, materijal se hladi i stvrdnjava pomoću UV lampe. Po završetku se odstranjuju eventualni dijelovi isprintani za podršku, a daljnjeg procesa nema [3].

## **2.3 3D tisak u autoindustriji**

U ovom potpoglavlju se govori o 3D tisku unutar same autoindustrije. Razne teme su obrađene, ali ipak je najznačajniji intervju kod Rimac Automobila koji dolazi na kraju.

### 2.3.1 Prvi 3D isprintan automobil - Strati

Strati je električni automobil Američke firme Local Motors. Radi se o prvom autu na svijetu koji ima većinu 3D isprintanih dijelova. Auto se printao 44 sata u 2014. godini. Nakon tiska, sastavljao se 3 dana, a prvi put je išao na testnu vožnju u rujnu 2014. godine.



Slika 2: Strati, prvi 3D isprintani automobil

Strati je isprintan termoplastikom koristeći BAAM (Big Area Additive Manufacturing) proces izrade - veliki FDM 3D printer. Ovaj materijal je u potpunosti biorazgradiv, a može se i ponovno procesirati i upotrijebiti za printanje drugog auta. Nakon tiska, mehanika i elektronika se ručno slažu - elektromotor, baterija, amortizeri itd.

ORNL (Oak Ridge National Laboratory) je firma koja se bavi tiskom ovog automobila, i cijelo vrijeme rade na smanjenju vremena tiska, a trenutno žele smanjiti vrijeme na ispod 10 sati.

Iako je 2010. godine 3D isprintan hibridni automobil Urbee, Strati se i dalje smatra prvim 3D isprintanim automobilom zato što je interijer Urbeeja tradicionalan, odnosno nije došao od 3D printera, dok je 3D tisak korišten za cijeli Strati osim za bitne mehaničke dijelove [4].



Slika 3: Strati, prvi 3D isprintani automobil

Jay Rogers iz firme Local Motors smatra da je problem što se dan danas automobili proizvode isto kao i 1915. - na pokretnim trakama s tisućama zasebnih dijelova. Stratijem je dokazao da to ne mora biti tako.

Zahvaljujući prirodi 3D printanja, moguće je dizajnirati strukture koje bi apsorbirale udarac u slučaju nesreće, te krajeve pojasa staviti duboko u strukturu samog auta. U slučaju totalke, bilo bi moguće izvaditi mehaničke i električne dijelove, rastopiti plastičnu karoseriju i ponovno je isprintati. Iako je Strati malen i slab, to ne znači da se ne bi mogao 3D isprintati auto i u njega staviti motor od 200 konjskih snaga.

Siromašnijim bi zemljama dobro došla ovakva tehnologija za prijevoz, ali ovakvo nešto bi lako moglo zainteresirati i milijardera koji želi auto od 1000 konjskih snaga koji on sam može dizajnirati i imati jedan jedini baš takav na svijetu. Moderni su auto kompleksni, ali ako spojimo tehnologiju 3D tiska i elektromotora koji imaju vrlo malo pokretnih dijelova, možemo vidjeti budućnost vrlo jednostavne izrade automobila [5].

### **2.3.2 Ključne primjene 3D tiska u autoindustriji**

Dizajniranje - Detaljni, glatki i precizni 3D otisci u realnoj veličini se često primjenjuju u autoindustriji kako bi se prikazali koncepti novih vozila. Razlog je jednostavan - upotreba CAD modela nije dovoljno dobra kod pronalaska potencijalnih problema kod dizajna. Također, 3D isprintani modeli se mogu aerodinamički testirati.

Odobrovanje prototipa - kao i u mnogim ostalim industrijama, prototipovi su ključan dio procesa proizvodnje u automobilizmu. 3D tisak omogućava brzo dobivanje prototipa u ranim fazama. 3D tisak je sada jedan od najpopularnijih načina odobravanja prototipa - od malog otiska s detaljima do predmeta u realnoj veličini za testiranja.

Predprodukcija - 3D specijalisti ovu primjenu smatraju najvažnijom. 3D tisak može napraviti kalupe i alate. Pomoću toga proizvođači mogu za nisku cijenu napraviti primjerke, te uštedjeti potencijalne gubitke u budućnosti kod ulaganja u skupe alate.

Dijelovi po narudžbi - aditivna proizvodnja se koristi kako bi se dijelovi prilagodili specifičnom vozilu (kako bi se prilagodili klijentu i bili lakši) ili vozaču (npr. sjedala u autima za utrke). Ovo je posebice korisno kada se cijena posebnih dijelova opravda poboljšanjem performansi vozila [6].

### **2.3.3 Prednosti 3D tiska u autoindustriji**

3D tisak može zamijeniti tradicionalne i skupe načine proizvodnje. 3D isprintani dijelovi od plastike su jeftiniji i rade se brže. To donosi sveukupno niže cijene proizvodnje, pogotovo kad se radi o proizvodnji kompleksnih šasija.

Za razliku od tradicionalnih pristupa dizajniranja vozila gdje se koristi široka paleta materijala, 3D tisak u dizajnu automobila smanjuje količinu potrebnih materijala i nastalog otpada što je višestruko korisno u svim dijelovima procesa proizvodnje.

Dizajn pomoću 3D tiska omogućava autoindustrijskim dizajnerima da isprobaju više opcija istog detalja kroz više verzija tijekom razvoja novog modela. To donosi bolju fleksibilnost, koja rezultira boljim konačnim dizajnom i olakšava rađanje potrebnih preinaka kroz proces evaluacije modela. Ovo pomaže proizvođačima da ne zaostaju za suvremenim tržištem, već da budu u toku, ili čak ispred konkurencije [6].

### 2.3.4 Rješenje problema rezervnih dijelova

Rezervni dijelovi su uvijek predstavljali veliki izazov za automobilsku industriju. Potreba je nepredvidljiva, stoga je često upitno koliko je izrada rezervnih dijelova financijski isplativa. Vrijednost proizvoda je nestabilna, a što je manje rezervnih dijelova, to su vredniji. Masovna proizvodnja dijelova koji će možda zatrebati u budućnosti nije rješenje, jer zahtijeva veliki skladišni prostor.

3D tisak je u sjajnom položaju da napravi značajne pozitivne primjene na automobilsku industriju i njen problem rezervnih dijelova. Najveći faktori pri rješavanju problema dijelova 3D tiskom su nabava materijala koji mogu postići performanse tradicionalnih materijala koji se inače koriste za izradu dijelova. Tome se približavamo, stoga pitanje nije 'hoće li 3D tisak preuzeti zadaću izrade rezervnih dijelova?' već 'kada?'

Pomoću CAD-a, dizajn svakog dijela može stajati kao digitalni primjerak, i otjerati potrebu za čuvanjem dijelova u skladištu u prošlost. U budućnosti će se čak u trgovini po zahtjevi kupca moći 3D isprintati specifičan dio. Pristupačnost tehnologije će potaknuti dobavljače da otvore nove prostore kako bi osigurali laku dopremu 3D isprintanih komponenata i dijelova.

Čak i dijelovi kojih više nema bi se mogli ponovno napraviti po potrebi, ili skenirati i ponovno dobiti. Neki ljudi vole starije automobile, a njihovi dijelovi će se možda moći 3D printati u budućnosti [7].



Slika 4: 3D isprintan automobilski dio

### 2.3.5 Povratak klasika zahvaljujući 3D tisku

Veliki problem ljubitelja klasičnih automobila iz prošlog stoljeća je pronalazak rezervnih dijelova. Pomoću 3D tiska bit će moguće ponovno doći do tih starih dijelova.

Porsche ima mnogo klasičnih automobila koji su se kratko proizvodili, stoga je proizvodnja rezervnih dijelova za njih na tradicionalne načine financijski neisplativa. Osim same cijene proizvodnje, skladištenje je također dio problema. 3D tiskom na zahtjev pronašli su rješenje i to Powder Bed Fusion procesima za metalne i plastične dijelove. Firma je otvorila novi odjel zvan Porsche Classic posvećen održavanju njihovih starih vozila na životu.

3D printani dijelovi nisu ograničeni na proizvođače. Ljubitelji klasika su pokazali kako ova tehnologija može dati funkcionalne komponente. Kolekcionar oldtimera Jay Leno navodno ima zbirku automobila vrijednosti oko 50 milijuna dolara, i dijelovi mu predstavljaju problem. Leno koristi Rapidform program firme 3D Systems kako bi 3D skenove pretvorio u CAD modele, te tako za svoje aute printa zamjenske dijelove.

Slična priča dolazi od ekipe koja želi vratiti Pro-Touring Camara iz 1969. u život pomoću 3D tiskanih dijelova. Tim je sastavio vrlo kompleksne dijelove, uključujući i motor, te im je za to sve trebalo ukupno 200 sati 3D tiskanja. Iako su otprije poznati s restauracijom vozila, veliku su pomoć dobili od tima iz V8 Speed & Restoration Shopa [8].

3D otisnuti dijelovi za Camara su došli iz CAD datoteka, slika, specifikacija i servisnih dijagrama. Harrell je dizajnirao motor, a Grey i O'Brien su se posvetili dizajnu.

Svoj su auto predstavili na SEMA showu u Las Vegasu, i time dokazali kako je moguće spasiti stari auto 3D printerom. Inspirirali su mnoge ljubitelje i kolekcionare automobila da spase aute koji se ne proizvode već godinama. Francuska firma GRYP se bavi restauracijom starih vozila, ne samo zbog nedostatka zastarjelih dijelova, već i zbog visokih cijena rijetkih dijelova. 3D tisak je za njih riješio taj problem i omogućio im da pomažu auto ljubiteljima po cijeloj Francuskoj, ali i dalje [9].



Slika 5: 3D isprintana maska za Camara iz 1969.

### **2.3.6 Vodeći proizvođači automobila koji koriste 3D tisak**

Ford - Razvijaju načine da koriste 3D tisak u proizvodnji već godinama. U svibnju 2015. godine, koristili su 3D isprintane dijelove motora za trkaći auto s EcoBoost motorom, tvrdeći kako su dijelovi dovoljno dobri da izdrže ekstremne uvjete poput utrka. U ožujku 2017. su objavili da testiraju velike 3D isprintane dijelove, i da 3D tisak postaje sve jeftiniji i efikasniji.

Bugatti - Testiraju 3D isprintanu kočionu čeljust na Chiron superautu. 3D tisak im daje veću slobodu pošto dio može biti sačinjen od titana u slojevima umjesto od standardnog aluminijskog.

Mini - Vlasnici mogu sami izraditi određene dijelove za svoj auto, dijelovi se printaju u Njemačkoj i pošalju klijentu unutar nekoliko tjedana.



Slika 6: Fordova 3D isprintana usisna grana

Mercedes-Benz - Služe se 3D tiskom za izradu rezervnih dijelova od metala za starije modele automobila i kamiona.

Honda - Ostvarili su suradnju s Kabuku i razvili električni kombi. Bitnije komponente su proizvedene na tradicionalne načine, ali karoserija i prostor za prtljagu su 3D isprintani.

Kia - Prvi put su upotrijebili 3D printanje za Telluride SUV koncept. Isprintani su dijelovi interijera koji daju autu vrlo moderan i specifičan izgled. Nedavno su dobili odobrenje za proizvodnju.

Toyota - U suradnji s Clemson sveučilištem, Toyota izrađuje uBox, auto za Generaciju Z. Neki se dijelovi mogu personalizirati pomoću 3D tiska. Toyota također koristi 3D tisak za brzu izradu novih prototipa.

BMW - Koriste 3D tisak za izradu boljeg krova na svom i8 Roadsteru. Zahvaljujući novoj tehnologiji, dio je jači i lakši od svog prethodnika.



Volkswagen - Umjesto korištenja tehnologije za izradu prototipa, Volkswagen Autoeuropa koriste 3D tisak kako bi izradili alate za proizvodnju na pokretnoj traci. Tako smanjuju ovisnost o vanjskim dobavljačima dijelova za strojeve, te ne gube vrijeme čekajući potreban dio.



Slika 7: BMW-ov isprintani krov

Local Motors - Firma iza prvog 3D isprintanog automobila napravila je Ollija, 3D isprintanog autonomnog taksija [10].



Slika 8: Local Motors Olli

### **2.3.7 Intervju kod Rimac Automobila**

U sklopu izrade ovog diplomskog rada, 18. lipnja 2020. je posjećena tvrtka Rimac Automobili u Svetoj Nedelji koja se primarno bavi proizvodnjom baterijskih paketa i električnih hiperautomobila. Intervju je obavljen tako da se razgovaralo s glavnom osobom zaduženom za 3D tisak u tvrtki, Markom Veličkovom. Postavljana su mu relevantna pitanja na koja je on odgovarao, njegovi odgovori su snimljeni diktafonom, pa pretipkani u tekst:

#### **1) Kada ste prvi puta počeli koristiti 3D tisak?**

U našoj firmi od 2013. Imali smo 1 mali desktop printer. Poslije su došla 2 Ultimakera, onda su došla 3 Zortraxa, i sad već godinu dana imamo najveći industrijski printer od Stratasysa, oni su lideri u toj tehnologiji, oni su izmislili tu tehnologiju. Fortus 450, stroj od 150 000€, znači industrijska mašina, ove male smo iskoristili maksimalno, ovaj prvi Zortrax ima 13 000 sati rada, što je za desktop igračku od 2000€ odlično.

## **2) Koji je prvi dio auta 3D isprintan?**

Prvo je korišten za prototipne dijelove baterijskog paketa. Najviše smo ga u početku koristili za neke holdere ćelija u baterijskom paketu. Dijelovi kućišta, dijelovi elektronike, neki nosači PCB-ova, nosači elektronika. Znači na početku se koristio za brzi i jeftini prototipni razvoj baterijskih paketa.

## **3) Kako se taj dio proizvodio prije 3D tiska?**

Mi smo relativno mala firma, nova, i ova tehnologija je nova. Tako da prije to nismo proizvodili. Jednostavno smo prije 3D printanja imali drukčije ćelije, i drukčije se paket slagao. 3D print nam je ubrzao neke stvari i dodao nam nove mogućnosti da brže i jeftinije prototipiramo i da radimo više iteracija, znači jedna komponenta se znala u 7-8 verzija printati da se dođe točno do toga što se želi.

## **4) Koje tehnike 3D tiska koristite?**

In-house je FDM, ali 90% toga što šaljemo van je SLS, jedno 10% SLA. Tu i tamo smo nešto sitno u metalu radili, uglavnom FDM, SLA, i SLS. Krajnji cilj nam je in-house imati SLS stroj, ali trenutno jednostavno nemamo mjesta za njega, jer on treba minimum 50-ak kvadrata, a mi trenutno za to nemamo mjesta.

## **5) Koje materijale koristite?**

Uglavnom su razne vrste polimera, najviše ABS, ASA, ULTEM, ta 3. Kod SLS-a PA6 i PA12. Metal nismo puno printali. Neke usisnike, nešto sitno od titana, neke aluminijske kvake ali davno. Naš auto nema standardni motor s unutarnjim izgaranjem, motori su jednostavni, nema ispuha, puno stvari koje klasični auti imaju, naš nema, tako da nemamo toliko potrebe za printanjem metala. I još uvijek je to jako skupa tehnologija, pa je rijetko isplativo.

## **6) Koji se dijelovi danas 3D printaju?**

Mi proizvodimo jako puno dijelova, ali to se ništa uglavnom ne koristi u finalnom proizvodu. Sve se to koristi u prototipnoj fazi projekta. Od koncepta, do prototipa, ali kad projekt završi razvojni dio, traže se druge tehnologije proizvodnje. Radili smo neke manje projektiće po recimo 10-15 baterijskih paketa, i u njima smo koristili 3D printane dijelove. Ali trenutno za razvoj, za alate, naprave, šablone, i design office, dečki iz dizajna puno 3D printaju za validaciju dizajna i za puno iteracija.

Na primjer, printao sam im 5-6 volana, u 1:1 da vide koji je profil volana, da vide kako tipke rade, pozicije tipki, i tako. Praktički smo cijeli interijer printali više puta, od tipki, nosača za LCD-ove, kvaka, gumbića, ulaza/izlaza za ventilaciju, sve smo to printali. A na kraju se to proizvodi drugim tehnologijama. Nešto bude injection moulding, nešto bude CNC glodanje, razne tehnologije postoje. Ali u razvoju često više komada printamo, da potvrdimo da je to to, da smo s tim zadovoljni i da to može ići u daljnju produkciju.

### **7) Koji će se dijelovi uskoro početi 3D printati?**

Razmišljamo o nekim stvarima u baterijskim paketima, da bi 3D printali, mogli bi raditi kompleksnije pakete. Neke kompleksnije geometrije i mogli bi biti raznovrsniji, lakši. Na primjer, u proizvodnji se gleda da se sve pojednostavi, da se koriste što jednostavniji komadi, a s 3D printanjem možemo raditi zanimljive stvari, i to nam je kratkoročni plan - vidjeti kako bi se ta tehnologija mogla iskoristiti. Za sad je to samo još uvijek za razvoj i prototipiranje.

### **8) Da li mislite da će uskoro doći faza gdje ćete na 3D tisku raditi finalne proizvode?**

Da. To definitivno dolazi. U manjim serijama, u manjim projektima, manje komada smo to već radili. Koristili smo 3D printane dijelove kao finalni proizvod, funkcionalni, ali to je sve za manje serije. Za neke ozbiljnije projekte, polako se prebacujemo na velikoserijsku proizvodnju, zasad nema, ali u budućnosti će sigurno biti, jer mogućnosti su velike, svašta se može napraviti, a tehnologija postaje jeftinija, i materijali se razvijaju. Prije 5-10 godina je bio puno manji izbor materijala, danas se jako puno radi na razvoju toga, puno toga dolazi na tržište, i te neke tehnologije, pogotovo SLS, ona zbog načina rada ima dobre rezultate. Komadi koji izlaze su jako dobri, imaju dobra mehanička svojstva po svim osima, i mogu se dobiti jako kompleksne geometrije, i stvarno se može koristiti kao end-use part, već sad ali mi to jako rijetko koristimo kao finalni proizvod. U bližoj budućnosti će se sigurno u većim serijama koristiti printani komadi.

### **9) Koji programi vam pomažu kod 3D tiska?**

Inženjeri koriste 3DX, Catia, Solidworks, Autodesk. To se modelira u bilo čemu, čak i u besplatnim open-source programima. Onda to dolazi kod mene na pripremu za 3D print. Slice-anje, nekad mi napomenu postavke, nekad ja sam biram visinu stroja, postotak ispune i to je to. Pripremu i poslije obradu ako treba nešto, ukloniti potporni materijal, novi stroj potporni materijal printa s posebnim materijalom, i on je topiv u lužini. Isprinta se neka pozicija, support

se ne može potrgati rukom jer je takva geometrija, ostavi se u kadici s lužinom na par sati, potporni materijal se otopi, ispere, i imamo finalni komad kad se osuši.

#### **10) Koliko % ukupne proizvodnje se provodi 3D tiskom?**

Ovisi od projekta do projekta, od komponente od komponente. Ako bi generalizirali, možda oko 5% stvari koje radimo. Finalni je još i manje, možda 1-2%.

#### **11) Kakav % je bio u 2015.?**

To je auto u prototipnoj fazi, nije to još serijska proizvodnja. Mi sad radimo nekoliko prototipa koji idu na crash testove, ne moraju biti do kraja funkcionalni, zavisi od testa do testa. Prije smo i više koristili, jer i taj auto se zvao Concept One. Samo ime auta to govori, to je bio rani razvoj auta, na razvoju i sklapanju je radilo 20-ak ljudi. Relativno nova tehnologija, malo ljudi, malo novaca i znanja, pa se onda i više printalo. Bila je manja serija, proizvedeno ih je 10-ak. Na primjer, kućište od fara je veliko, ono je 3D printano. Ako ih mi trebamo ukupno 20, za to se ne isplati raditi kalup. To smo 3D printali. Onda imamo nosače za display, iza za elektroniku, to je isto 3D printano, ima dosta 3D printanih dijelova u Concept One-u. C\_Two recimo neće u konačnici imati 3D isprintano kućište za farove, iako sad u prototipnoj fazi ima. Poslije serijski auto neće biti 3D printan.

#### **12) Kakav % će biti u 2025.?**

Vjerojatno puno veći. Mi nismo tipična auto industrija. Jako smo mladi, a auto nam je samo showcase tehnologije. Naš izvorni posao i prihodi su od razvoja i proizvodnje baterijskih paketa. Za nas i razne proizvođače proizvodimo baterijske projekte. Koenigsegg je bio 80 komada, Aston Martin 150, još neki projekti od 10 do 50 komada. Sad krećemo u veću seriju. za C\_Two ćemo raditi 300 baterijskih paketa. I naravno još neke druge projekte gdje krećemo 1 000, 10 000, pa sve do nekoliko stotina tisuća baterijskih paketa.

Neki alati i naprave će sigurno biti 3D printani da se pomogne tehničarima sklapanje bilo čega, od karbonskih dijelova do baterijskih paketa, do sklapanja auta. Prije smo 3D print više koristili za funkcionalne dijelove, jer je firma bila manja i novija, trošili smo više novaca za razvoj.

Može se uštedjeti dosta novaca, 3D tehnologija je brža od drugih, i pruža se mogućnost više iteracija. Danas postoje materijali koji su vrlo čvrsti i otporni, koristimo ih kao kalupe za karbonske dijelove. Na primjer, da neki karbonski dio idemo glodati na CNC glodalici, bilo bi puno skuplje zbog materijala, i sporije je. Onda se 3D tisak isplati, pogotovo ako se ne ide u veću seriju. Onda isprintamo komad, prebrusi se, uredi, i koristi se kao kalup bilo kojeg drugog

materijala, recimo aluminijski. Onda se koristi kao obični kalup, i na njega se laminira karbon i ide dalje u standardni proces, na pečenje pod tlakom.

To je dobro, što se kompozita tiče, za brzo prototipiranje. Kada imamo prototipni dio, on ne mora biti vizualno savršen, i možemo ga jako brzo proizvesti za neku manju seriju. Ako će ići u veliku seriju, onda se u pravilu radi karbonski ili aluminijski kalup. Ali za male serije i brzo prototipiranje, printani kalup je funkcionalan, dobar, dovoljno precizan i jako praktičan. I puno je jeftinije. Neke stvari koje su se prije proizvodile tjednima ili mjesecima danas možemo dobiti u roku od nekoliko dana. Mi imamo slučajeva da neki mali dio inženjer nacrtava u roku od 2 sata, pa se isprinta u roku od 2 sata. Dakle on već za manje od 5 sati može fizički objekt držati u ruci, i validirati i procijeniti da li je na dobrom putu ili nije. Prema tome, za takve stvari ta je tehnologija još uvijek najbolja.

### **13) Imate li neki konkretan primjer uštede vremena?**

Uglavnom prodavači opreme imaju takve primjere. Ako netko želi prodati neki stroj, reći će da je ova tehnologija ovoliko brža.

Primjer: za neki dio bi po starome trebao 1 dan pripreme sirovca za glodanje, 1 dan glodanja, 1 dan laminacije, 1 dan pripreme kalupa i onda je gotovo. A ovako je već 3. dan bilo u proizvodnji i koristio se taj kalup. Uštedjeli smo 5-6 dana i sigurno 60-70% cijene od klasičnog proizvodnog procesa.

Što je razlika? Glodalici treba toliko sati, 3D printeru toliko. U realnosti u proizvodnji, 1 odjel priprema sirovac za glodanje, onda to treba transportirati do glodalice, to povlači birokraciju oko papira. Tu indirektno ima još uštede, ne samo direktno, s glodanja to onda treba ići na drugi odjel, netko se treba pobrinuti za logistiku, sve zahtjeva i vremena i novca. Ima direktno, a indirektna ušteda je puno veća, pošto je proces skraćen. 3D printer je na jednoj lokaciji, a ovako se provode 2-3 dodatne operacije na 2-3 različita odjela. Pravljenje sirovca, glodanje, priprema kalupa, laminiranje da se dođe do nečega. U 3D tisku imamo 1 radni nalog i gotov proizvod. Ako radimo s više odjela, svaki odjel ima svoje zadatke i timeline pa se to mora uskladiti.

Velika prednost 3D printa su kompleksne tehnologije. Puno smo slobodniji raditi neke stvari koje se na CNC glodalici ili ne mogu napraviti, ili ih je preteško napraviti. Neki negativni kutevi, tunelići. U 3D printeru se sve to drugačije orijentira, software izgenerira potporni materijal koji se poslije odstrani, tako da s te strane je isto jednostavnije 3D printati. Materijal i završna obrada je češće lošija nego na CNC glodalicama i tokarilicama, ali mogu se dobiti puno kompleksnije

geometrije. A danas, pogotovo u autoindustriji, puno se radi na inovacijama, na uštedama materijala i mase, uvijek se ide u ekstreme. Pogotovo ovo što mi radimo, to nije jeftin auto, to je na tržištu preko 2 000 000€, rade se ekstremi. Za takve stvari nam 3D tehnologija baš pomaže, jer neke stvari, iako se mogu odraditi drugim tehnologijama, bilo bi preskupo i predugo bi trajalo.

Puno je logičnije s ekološke strane; kod 3D tiska nemamo problem s viškom materijala kao kod CNC glodalice, CNC glodalica otklanja višak materijala i taj se višak baca u otpad, dok se kod 3D printa sav materijal iskoristi (osim supporta). Industrijski naziv za 3D printanje je aditivna tehnologija, jer se dodaje. To je velika prednost, za zadnji branik se hrpa materijala mora maknuti da se dođe do konačne geometrije. A ako 3D printamo, nema tog viška, a sve to košta.

Što se geometrije tiče, treba skupi, 6-osni CNC stroj da se dobije kompleksna geometrija. S ovim 3-osnim strojevima se ne može dobiti ni blizu takav rezultat. Tek kad imamo neki puno skuplji možemo doći blizu geometrije koju možemo dobiti 3D printom. Predmeti se dijele po tome koliko osi imaju, klasični CNC stroj je na 3 osi, X, Y, Z. Ako negdje postoji neki negativni kut, to se s tim strojem ne može dobiti. On mora imati 5 osi da dođe ispod i pogloda. A takav je stroj duplo skuplji nego 3-osni.

#### **14) Da li smatrate da će Rimac ikad napraviti 100% 3D isprintani auto, ako da, kada?**

Teško je procijeniti. Iskreno, u bližoj budućnosti ne. Sljedećih 20 godina ne. Neke firme pokušavaju, ali to nije zadovoljavajućih karakteristika niti performansi. Mi radimo hypercar od 1900 KS, ubrzanje do 100 je manje od 2 sekunde, to trebaju biti materijali koji mogu tako nešto izdržati.

Tehnologija će se sigurno sve više koristiti, ali ići u procjene da nešto bude 100% isprintano, to je tehnološki trenutno nemoguće. Ne mogu se neke elektroničke komponente 3D tiskati. Mi imamo baterije unutra, PCB pločice, elektroniku, uređaje, GPS, radare, kamere, to je zasad znanstvena fantastika. To nije u bližoj budućnosti moguće. Tko će isprintati neki čip, neke komponente? Žice, wiring? Ne. 100+ godina. Za 20 godina će se puno više koristiti ta tehnologija i bit će puno više end-use dijelova koji će se koristiti 3D printani, ali baš 100%? Možda čak i nikad.

#### **15) Kako bi se proizvodnja odvijala da 3D tisak ne postoji?**

Sad svi najavljuju industriju 4.0. Proizvodilo bi se tehnologijom koja je prije postojala. Teško je procjenjivati što bi bilo kad (ne bi) bilo.

Proizvodilo bi se nekim tehnologijama, ima majstora, ima strojeva raznih i proizvelo bi se. Sve više se priča o 3D printanju, dakle da se ne gomilaju dijelovi na skladištima, nego se nešto po narudžbi proizvede. Mi bi to proizveli, pitanje bi bilo koliko bi to koštalo i koliko bi vremena trebalo.

Sve se može proizvesti što i 3D printom, samo, recimo, neka stvarčica se isprinta za 2-3 sata, da se ide raditi drugom tehnologijom, trebalo bi 8 sati ili više.

#### **16) Koje modele 3D printera koristite?**

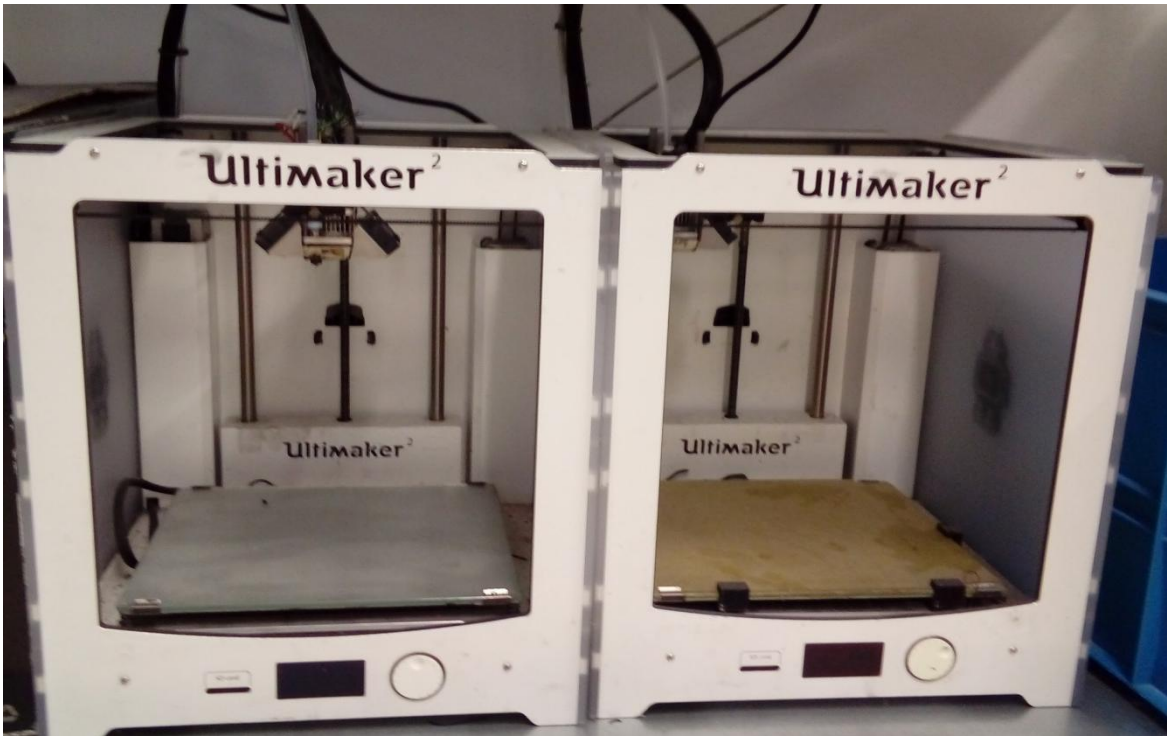
Stratasys Fortus 450 MC - oni su patentirali FDM tehnologiju. Zato drugi proizvođači ponekad koriste FFF ili neko drugo ime. Imamo 3 Zortraxa M200. To su mali desktop printeri, relativno jeftini, dobri su za brzo i jeftino prototipiranje, 2 Ultimakera 2 koja slabo koristimo. U planu je uzeti još jedan stroj od Stratasysa, ali malo manji. Krajnji cilj je SLS stroj, i vjerojatno ćemo imati novo postrojenje uskoro, pa ćemo imati 3 tehnologije na raspolaganju, in-house. Sad kad trebamo nešto van FDM tehnologije, šaljemo van kod nekog dobavljača, pa to oni odrade. No to nije uvijek idealno jer treba čekati, a i skupo je. Kada imamo in-house, ispada jeftinije.



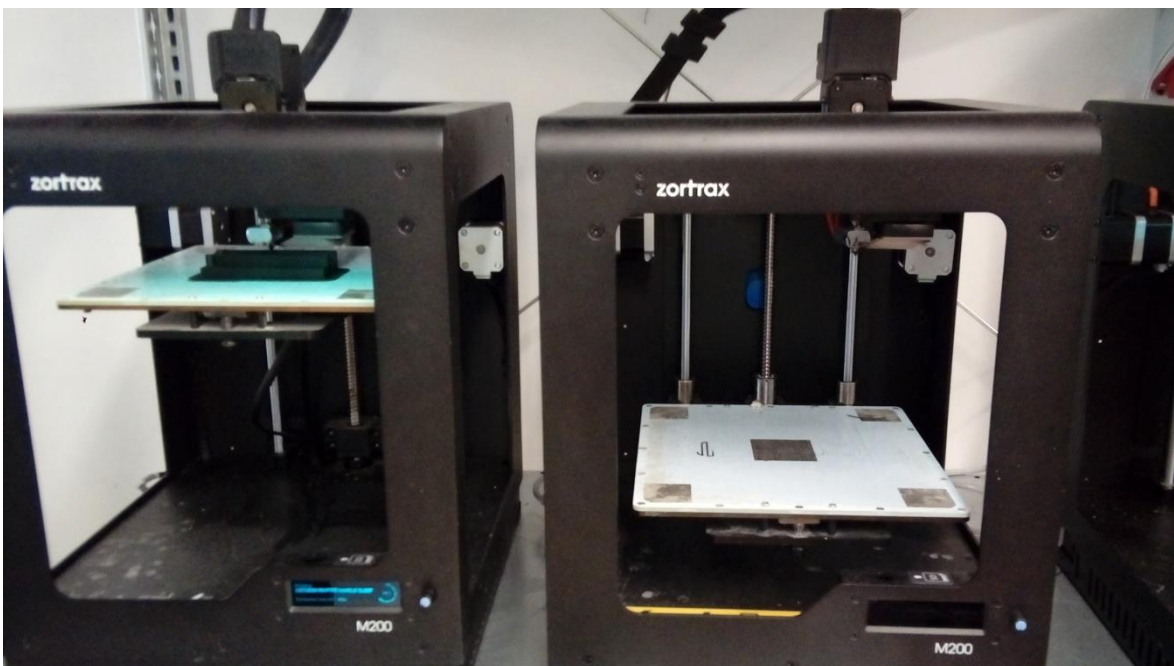
### 2.3.8 Fotografije slikane kod Rimac Automobila vezane za 3D tisak



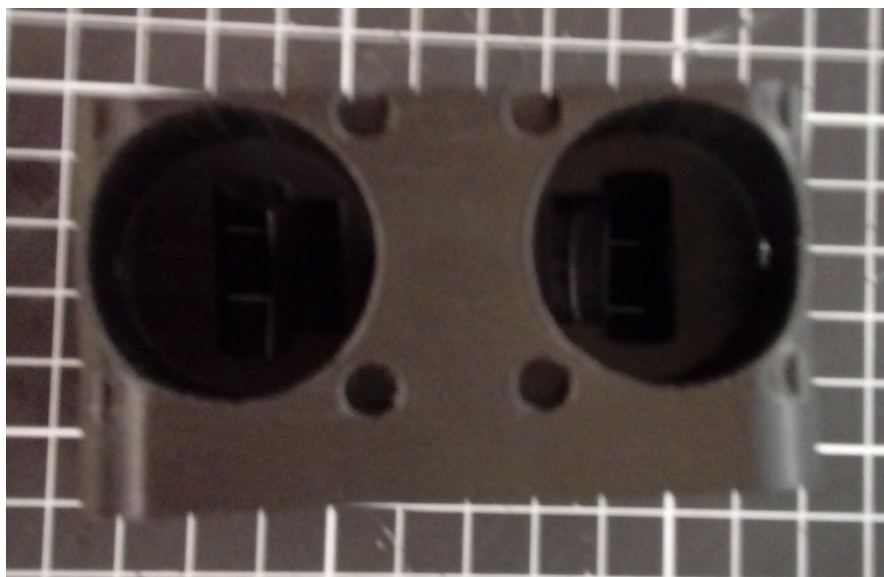
Slika 9: Stratasys Fortus 450mc 3D printer



Slika 10: Ultimaker 2 3D printeri



Slika 11: Zortrax M200 3D printeri



Slika 12: 3D isprintani predmet s kompleksnim geometrijama



Slika 13: 3D isprintano kućište senzora

## **3. Fused Deposition Modeling (FDM)**

Pošto je tema ovog rada napredni kompoziti za FDM 3D tisak u autoindustriji, detaljno objašnjenje rada FDM-a je potrebno, stoga je ovo poglavlje posvećeno upravo tome.

### **3.1 Kako izgleda i funkcionira FDM printer?**

Da bismo došli do naprednih primjena ove tehnologije, moramo je prvo definirati i objasniti kako točno radi.

3D printeri za šire mase postali su dostupni oko 2009. godine, a nagli je porast krenuo u 2012. godini. Pošto je ova industrija vrlo mlada, još se vidi odakle je sve krenulo. Naime, većina 3D printera za kućnu upotrebu je poteklo od RepRap projekta. RepRap je kratica za “Replicating Rapid Prototyper”. Radi se o globalnoj zajednici ljubitelja tehnologije koji su se ujedinili kako bi razvijali hardver i softver za 3D tisak. Njihov je cilj ovu tehnologiju učiniti što više pristupačnom čim većem broju ljudi, a to postižu ulaganjem svojeg truda i vremena za sve nas [11].

Prvi RepRap projekt se usredotočio upravo na FDM printer. Mnoge komponente i tehnike proizvodnje su došle od originalnog RepRap projekta. Iako danas postoje 3D printeri koje možemo sami složiti, odmah se mogu kupiti 3D printeri koji su već složeni, odnosno spremni za upotrebu odmah iz kutije [11].

Svaki FDM printer mora imati sljedeće komponente:

- Filament
- Extruder (ekstruder)
- Build plate (podloga)
- Linear movement components (pokretne komponente)
- Frame (okvir)
- Controller unit (upravljačka jedinica)

Filament je uglavnom žica od termoplastike omotana oko kalema iz koje se dobiva 3D otisak. Debljina je 1.75mm ili 2.85mm.

Ekstruder je set dijelova koji uzimaju filament i guraju ga kroz grijač

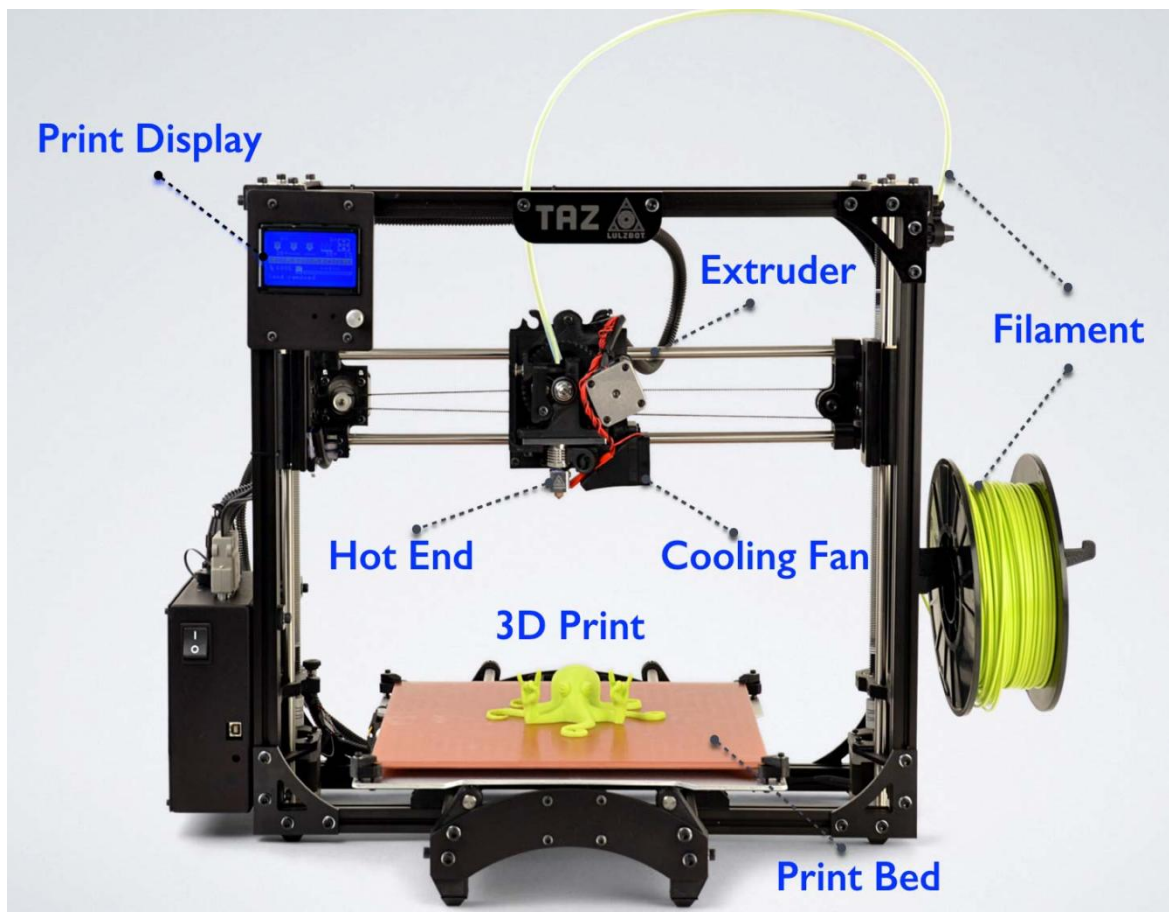
Podloga je ravna ploča na kojoj započinje 3D otisak

Motorići pogone remenje i ekstruder tamo gdje je to potrebno

Okvir drži ekstruder na mjestu, i uglavnom je od metala

Grijač je dio ekstrudera koji zagrijava filament na određenu temperaturu (ovisno o materijalu) s diznom na kraju kako bi rastopljeni filament mogao teći

Ventilator regulira temperaturu na kojoj se svaki sloj hladi, te se tako slojevi bolje povezuju



Slika 14: FDM 3D printer

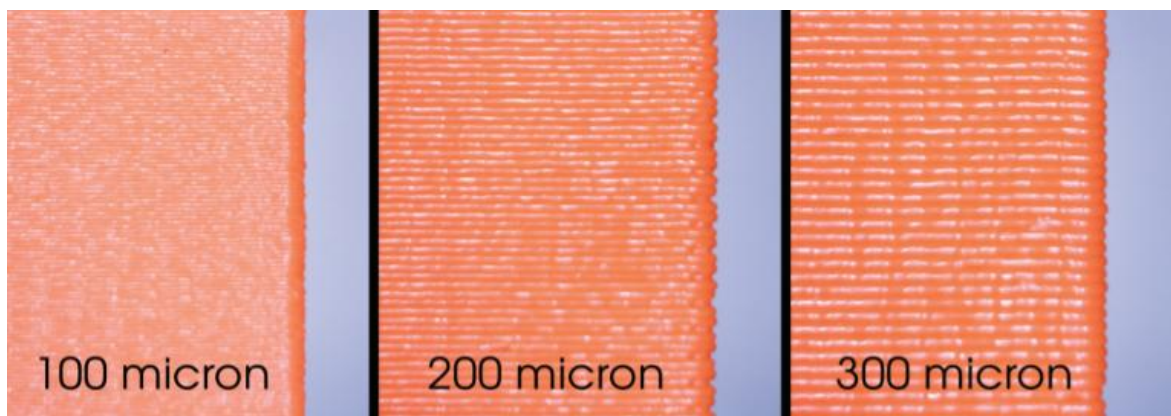
Valja imati na umu da postoji mnogo različitih 3D printera na tržištu s raznim funkcijama. Na primjer, neki 3D printeri imaju pomičnu podlogu, dok kod drugih sve pokrete radi ekstruder. Oba dizajna su prihvatljiva, a izbor se temelji primarno na osobnim preferencama krajnjeg potrošača [11].

## 3.2 Rezolucija

Definirajmo kako se mjeri kvaliteta 3D otiska. U području standardnog 2D printanja, pronalazimo printere koji tvrde da imaju rezoluciju od 600 ili 1200 dpi (dots per inch/točke po inču). Dakle što je više točaka po inču, rezolucija je veća. Sličan se princip primjenjuje i kod 3D tiska [11].

Svaki 3D printer ima 2 tipa rezolucije: Sloj Z (ploha Z, odnosno visina, gore/dolje) i XY (plohe X i Y, odnosno širina i dužina, naprijed/nazad i lijevo/desno).

Z rezolucija je najčešća mjera kod FDM printera. Na slici 15 vidimo da su ove 3 kockice iste veličine, ali su isprintane različitim rezolucijama slojeva. Korištene mjere su mikroni, odnosno dijelovi milimetra. 1000 mikrona je 1 milimetar, dakle 100 mikrona bi bilo 0.1 milimetar [11].



Slika 15: Usporedba slojeva

Kod ove 3 kockice sa slike, slojevi su najgušći lijevo, a ako trebamo finiju površinu, onda moramo odabrati manju visinu sloja te tako u konačnici dobijemo više slojeva na svojem 3D isprintanom predmetu. Što je niža razina mikrona, to će horizontalne crte na predmetu biti manje uočljive [11].

Predmet koji se printa na visini sloja od 150 mikrona će se printati duplo duže od istog predmeta s 300 mikronskih slojeva. To je tako jer printer mora printati duplo veći broj slojeva za isti predmet. Što je manji broj mikrona, to se predmet duže printa, ali je tada i kvaliteta otiska veća [11].

Druga mjera za rezoluciju je XY preciznost, odnosno koliko precizno printer nanosi svaki sloj. Pošto većina printera koristi diznu od 0.4 milimetra ili 400 mikrona, ograničeni su na otprilike 250 mikrona na rubovima slojeva. Iako je ovo vrlo dobra rezolucija, postoje daleko preciznije tehnologije ako su detalji presudni [11].

### 3.3 Okvir

Kada prvo pogledamo 3D printer, to je prvo što primjećujemo. Oblik. Postoje mnogi 3D printeri koji su postigli uspjeh preko crowdfunding web stranica poput Kickstartera i Indiegogo zbog atraktivnog izgleda. Ako je izgled privlačan, vjerojatnije je da će ljudi pretpostaviti da se radi o kvalitetnom printeru. Ovo je samo djelomično istina, te je ključno obaviti vlastito istraživanje i dobro se informirati prije donošenja odluke o kupnji. Ne valja suditi printer po izgledu; mnogi 3D printeri koriste 3D isprintane dijelove. Pa zašto i ne bi? Tako se smanjuje cijena i olakšava se potencijal za nadogradnju u budućnosti. Ako se pojavi nadogradnja postojećeg dizajna, možemo ju sami isprintati doma. Valja imati na umu da se 3D isprintani dijelovi mogu nalaziti na 3D printeru bilo kakve cijene, a postoje i oni koji nemaju ništa 3D isprintanih dijelova. Za 3D printere vrijedi isto pravilo kao i za sve proizvode: valja pročitati forume i recenzije na internetu i tako provjeriti kakav je taj specifičan 3D printer, neovisno o količini 3D isprintanih dijelova koje koristi [11].

Okvir treba izdržati test vremena. 3D printeri imaju pomične dijelove. Slučajno se pomiču i udaraju kada se otisci miču s podloge. Ako planiramo pomicati printer, čvrstoća okvira je nešto što treba imati na umu. Postoje mnogi 'kit' printeri koji se trebaju složiti, a ipak su vrlo čvrsti. Kod pregledavanja 3D printera, važno je obratiti pažnju na proizvođačev odabir konstrukcije: Kakva je debljina metala koji drži okvir? Da li se horizontalna prečka koja nosi ekstruder savija, hoće li to uzrokovati probleme u poravnanju? Koliko čvrsto podloga stoji na svom mjestu? Koliko ju je jednostavno olabaviti i podesiti? Kakve komponente sačinjavaju ekstruder? Da li su izrađene posebno za taj printer, ili ga koriste ostali printeri i proizvođači [11].

Primjer kvalitetnog 3D printera dolazi iz San Francisca od firme Type A Machines (TAM). Započeli su s prodajom 3D printera koji su se slagali od šperploče. Kada se doznalo za njihov prvi printer, firma je htjela osvojiti i ljude koji se bave 3D tiskom iz hobija i manje proizvođače, te su stoga prešli na metalnu šasiju. Pošto su se odlučili pristupu bez 3D printanih dijelova, cijena je narasla, ali je naraslo i zadovoljstvo potrošača. Ne treba previše pažnje obraćati na način proizvodnje dijelova koje 3D printer koristi, već na to da li on dobro radi i koliko je izdržljiv. Osim metalnog okvira, ovi 3D printeri imaju još dobrih značajki. Imaju posebno izrađene ekstrudere i kvalitetnije kabele, kao i tiše motore [11].

### 3.4 Podloga

Podloga je dio 3D printera na kojem se 3D model printa, sloj po sloj. Različiti proizvođači koriste različite materijale za podlogu, a najčešći su staklo i akrilna ploča. Ključno je da je podloga u ravnini s putanjama ekstrudera, u protivnom će otisci ispasti loši, asimetrični, nahereni, ili u najgorem slučaju nikakvi. Mnogi misle da podešavanje podloge u ravninu znači ravnanje podloge s tlom, ali to je pogrešno. Podloga mora biti u ravnini s putanjom samog ekstrudera da bi otisak ispao kako treba. Najjednostavnije rečeno, ekstruder i podloga moraju biti savršeno paralelni [11].

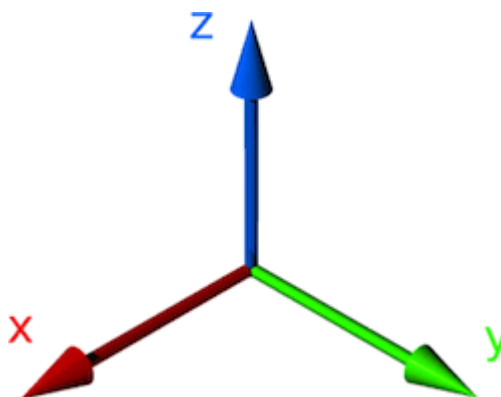
Kod odabira 3D printera, dobro je istražiti koliko je jednostavno poravnati ekstruder s podlogom. Danas vrlo malo FDM printera koristi automatizaciju za poravnanje. U većini slučajeva, zadatak je krajnjeg korisnika da ručno kalibrira podlogu s ekstruderom, i to često, kako ne bi dolazilo do loših otisaka [11].

Također treba razumjeti da su podloge različite. Neke su grijane, što omogućava da se više materijala isprinta na njih. Mnogo se toga može printati bez grijane podloge, ali imati opciju grijane podloge otvara nove mogućnosti kod odabira materijala. Naravno, to se odražava na cijeni samog printera [11].

### 3.5 Kretanje ekstrudera

Svaki 3D printer mora imati pomični ekstruder da bi printao. Postoje 2 glavna tipa sustava pokreta 3D printera, Kartezijanski i Delta. Oba su dobra ali vrlo različito funkcioniraju [11].

Kartezijanski je prvi tip koji se pojavio, a pokret se temelji na principima koje smo učili u školi. Postoje 3 osi u kartezijanskom printeru - X, Y i Z. X je pokret lijevo/desno, Y je naprijed/natrag, a Z je gore/dolje.



Slika 16: Kartezijanske koordinate



Ovi izrazi mogu biti malo drugačiji od printera do printera. Neki će printeri pomaknuti diznu naizgled lijevo ili desno, ali će to nazvati pomakom na Y osi. Unatoč tome, svi Kartezijanski printeri koriste X/Y/Z koordinate, crtajući svaki sloj u XY prostoru, te se pomiču u Z smjeru za novi sloj pa počinju cijeli XY proces ispočetka [11].

Delta printeri imaju drugačiju filozofiju. Posuđuju tehnike koje se već dugo koriste na pokretnim trakama. Umjesto linearnog X/Y/Z sustava, koriste sistem koji se temelji na ‘plutajućem’ ekstruderu kojeg se u strane pomiče pomoću 3 ruke koje su pričvršćene na linearne šine i koloture [11].

Ali zašto je izumljen Delta printer ako je Kartezijanski došao prvi i radi dobro? Delta printeri su riješili 2 problema koje Kartezijanski sustav ima. Kartezijanski printeri su ograničeni na visinu (Z) zbog glavnog šarafa koji podiže ili spušta podlogu ili ekstruder. Ti su šarafi skupi, a što su duži, to je veća opasnost da neće ostati ravni. Delta printeri nemaju taj problem jer nema tog šarafa, već ekstruder glatko ide prema gore preko šina pomoću kolotura. Duge i glatke šine nisu problematične poput šarafa, stoga Delta printeri mogu printati puno više predmete od Kartezijanskih u sličnom cjenovnom rangu [11].

Osim toga, Delta printeri su često brži jer uglavnom pokušavaju izbaciti čim više opterećenja iz ekstrudera. Kartezijanski printeri uglavnom imaju cijeli mehanizam za guranje filameta i za zagrijavanje direktno iznad ekstrudera, a Delta printeri koriste Bowden ekstruder za tiskanje filameta. U Bowden sustavu, grijač i dizna su blizu podloge, ali aparat koji je zadužen za držanje i guranje filameta je smješten negdje drugdje. Zbog manjeg opterećenja, Delta printeri mogu biti brži [11].



Slika 17: Delta 3D printer

Međutim, Delta printeri imaju 2 nedostatka. Printaju na kružnoj podlozi. Preciznost oko rubova okrugle ploče je slabija jer je jedna ruka rastegnuta do kraja, pa se mogu pojaviti deformacije. Mnogi printeri izbjegavaju ovaj problem tako što preporučuju print u užem srednjem području podloge, ili ‘zabranjivanje’ printeru da išta radi blizu rubova. Dakle Delta printeri nude veće Z područje za tisak, ali zato mogu imati manje X/Y područje [11].

Drugi nedostatak je vezan za Bowden ekstruder. Filament se gura kroz potencijalno dugu cijev, uglavnom izrađenu od teflona, iz veće daljine. Iako to ne predstavlja problem za većinu

standardnih filamenata, do problema može doći zbog zakrivljenosti cijevi ako koristimo neki lako savitljivi filament. To se događa zato što se savijanje povećava u dugoj udaljenosti od ekstrudera do vrućeg kraja, pa filament može izaći kroz grijač neravnomjerno [11].

### 3.6 Ekstruder

Filament prolazi kroz ekstruder, ili sustav ekstrudera. Ekstruder je skupina dijelova koji tjeraju filament u prolaz, zagriju filament do točke topljenja, i onda izguraju rastopljeni materijal kroz malu diznu na podlogu. Ekstruder se sastoji od više dijelova i to su:

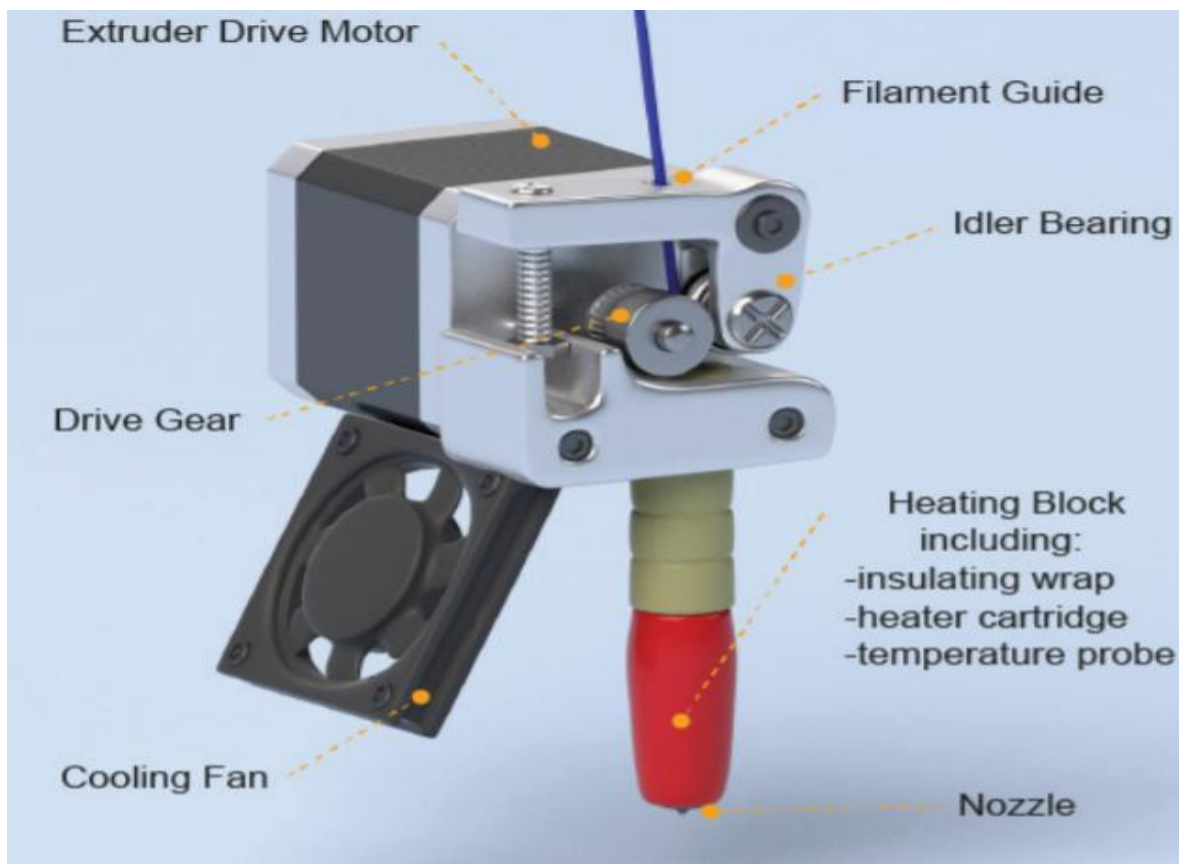
- Drive gear (pogonski zupčanik: drži filament)
- Extruder drive motor (motorić: pokreće drive gear)
- Filament channel (prolaz: ovdje se filament navodi)
- Idler bearing (ležaj praznog hoda: stišće filament uz drive gear)
- Heating block (grijač: topi filament)
- Nozzle (dizna: rastopljeni filament teče do podloge)
- Cooling fan (ventilator: hladi)

Svi FDM printeri imaju varijacije na ovu konfiguraciju. Neki imaju ekstruder sustave složene kao 1 dio, gdje je sve skriveno u jednom zamjenjivom djelu, a neki lakše dopuštaju korisnicima da mijenjaju ili nadograđuju komponente ekstrudera po potrebi [11].

Standardni promjeri dizni variraju, ali su uglavnom oko 0.4 milimetra. Ove dimenzije određuju debljinu filameta. Iako se ove dimenzije mogu podesiti u postavkama printera, promjer dizni određuje neke bitne stvari: manja dizna omogućava tanje rubove i bolje definiranu površinu, a promjer dizne ograničava količinu materijala koja može proći. Ako treba isprintati veliki predmet brzo, potrebna je veća dizna. Treba imati na umu da veličina dizne ne određuje veličinu isprintanog. Na primjer, 0.4mm dizna daje 0.48mm liniju. Svaka dizna između 0.35mm i 0.45mm je dovoljno velika za printanje većih predmeta, ali i dovoljno malena za preciznije detalje [11].

Ako treba isprintati specijalizirane predmete, veće ili manje, mnogi printeri nude izmjenu veličine dizne za postizanje određenih rezultata. Ako znamo da nam treba 3D printer i da ćemo trebati različite promjere dizni, tada treba gledati printere na kojima promjena dizni nije vrlo komplicirana, i kojima to ne utječe na garanciju. Mnogi proizvođači daju garanciju za sami

printer, i zasebnu, kraću garanciju za sustav ekstrudera zbog toga što se taj ekstruder brže troši. Uglavnom se dizne i zupčanici koji tjeraju filament smatraju potrošnim dijelovima jer se oni najviše troše pri normalnom radu. Nema pravila za koliko bi se često ti dijelovi trebali mijenjati, varira od jednom godišnje pa to jednom svakih nekoliko godina, a to ovisi o tome koliko se često printer koristi i kako se održava. Ako je u planu jako puno koristiti printer, onda valja istražiti kako se ti dijelovi mijenjaju i čiste [11].



Slika 18: Sustav ekstrudera

### 3.7 Filament

Možemo napraviti vrlo jednostavnu usporedbu da bi definirali filament: ono što je filament 3D printeru je toner u 2D printeru. Bez filameta, 3D printer nema materijala za tisak. Postoje dvije standardne veličine, a to su 1.75mm i 2.85mm. Te se veličine odnose na debljinu, odnosno promjer žice. Svaki 3D printer je dizajniran za jednu veličinu, te se druga veličina ne može koristiti ako printer nije namijenjen za to. Između promjera nema velike razlike u cijeni, a 1.75mm je uglavnom češći odabir. Razlog tome je to što je potrebno oko 6 puta manje sile za tiskanje tanje žice nego deblje. Tanje žice ne zahtijevaju velike i jake motorice, pa to smanjuje težinu glave printera [11].



Slika 19: Kalem filamenta

Postoji široka paleta materijala koji se mogu koristiti u 3D printerima, a upravo FDM printeri nude najveći izbor različitih materijala. Najrasprostranjeniji materijal je PLA (polylactic acid), a zapravo se radi o tipu nejestivog šećera koji se dobiva uglavnom iz kukuruza. Ostali značajni tipovi materijala:

- TPE (thermoplastic elastomer) - fleksibilan materijal kojeg možemo stisnuti, pa će se vratiti u prvobitno stanje
- ABS (acrylonitrile butadiene styrene) - isti materijal od kojeg se izrađuju Lego kockice. Izdržljiv, dobro podnosi napor. Baziran je na nafti, a ima miris zapaljenog stiropora kad se printa
- Pomoćni materijali - materijali osmišljeni za potporu glavne strukture koja se printa. Topljivi su, a neki primjeri su PVA (polyvinyl alcohol) i HIPS (high impact polystyrene)
- PET (polyethylene terephthalate) - isti materijal od kojeg se izrađuje ambalaža za piće, značajno bolji od ABS-a. Može se reciklirati i nema mirisa.
- Najlon - Vrlo čvrst i izdržljiv, dobar za zahtjevnije namjene, ali se s njim teže printa.

Cijene materijala se kreću od 150kn/kg do 450kn/kg. Važno je znati da najskuplji filament ne mora biti i najbolji [11].

Standardni ABS je bijele boje, i ima slična svojstva kao najlon. Grijač mora biti postavljen na 270°C za glavni materijal, a 265°C za potporni materijal ako je potreban. Temperatura ambijenta

se postavlja između 50 i 80°C. Ako se temperature postave prenisko, pojavljuje se rizik od delaminacije. Ako su temperature previsoke, materijal može postati previše tekući za printanje, pa oksidira i postane smeđe boje. Povrh toga, pojavljuje se rizik distorzije komponenata [12].

ABSi je ABS s povećanom snagom udarca. Prozračan je i dostupan u više boja [12].

PC (polycarbonate) je otprilike 10% slabiji od ABS-a, ali ABS je lomljiviji - snaga savijanja je gotovo duplo veća od ABS-a. Također je otporniji na temperaturu, 125°C u odnosu na ABS-ovih 90°C. Upravo to ga čini idealnim materijalom za funkcionalne prototipove i manje serije [12].

PC-ABS spaja dobra mehanička svojstva ABS-a s fleksibilnosti PC-a [12].

PC-ISO je materijal koji se može sterilizirati, pa se koristi za medicinske svrhe i zadovoljava ISO 10993-1 i USP Class VI standarde [12].

PPSPH (polyphenylsulfone) je prva plastika visokih performansi u aditivnoj proizvodnji. S usporedivim mehaničkim svojstvima ima gotovo dvostruko veću otpornost na temperature u odnosu na ABS. PPSPH se može printati samo u debljim slojevima od 0.254mm, ali je i proces sporiji [12].

### **3.8 Prianjanje na podlogu**

U svijetu 3D tiska, korisnici često pronalaze nove, inovativne načine dolaženja do željenih rezultata, pa se ta praksa proširi kroz zajednicu. Jedno od tih područja je pronalaženje novih i inovativnih načina kako da se otisci pričvrste uz podlogu [11].

Slikarska vrpca: primjena ove trake na podlogu se pokazao kao efikasan način lijepljenja otiska. Traku je lako skinuti, stoga se traka može početi guliti za vrijeme printanja. Na žalost, to se može odnositi i na model koji se tiska, stoga treba paziti da su rubovi trake dobro zalijepljeni kako ne bi došlo do guljenja. Uz malo sreće, neće puknuti kada se otisak makne, što znači da se traka može ponovno iskoristiti za idući otisak. Slikarska vrpca dobro radi samo za PLA otiske [11].

Ljepilo u stiku: ovaj odabir je mnogo jeftiniji od slikarske vrpce. Mana je to što se podloga mora čistiti mokrim papirnatim ručnikom kako bi se riješili ostataka ljepila. A ako se podloga ne može odvojiti, treba obratiti posebnu pažnju da voda ne dođe u dodir s osjetljivim elektroničkim komponentama ispod [11].

Kaptonova traka: ovo je transparentna narančasta traka, posebno napravljena za visoke temperature, u originalu napravljena za NASA-u. Dovoljno je izdržljiva na temperature, i dovoljno je ljepljiva da bi se otisak za nju primio. Kaptonova traka se najčešće koristi u

kombinaciji s grijanom podlogom kako bi se materijali poput ABS-a, a donekle i PLA, bolje primili za podlogu [11].

Specijalizirane podloge za 3D tisak: prodaju se kao dodaci treće strane koji pomažu prijanjanju na podlogu. Ovakve podloge uglavnom dobro funkcioniraju i ne trebaju se često čistiti, ali postoji rizik da dizna napravi štetu na podlozi, koja je potom neupotrebljiva i onda ju treba zamijeniti [11].

### **3.9 Slicer programi**

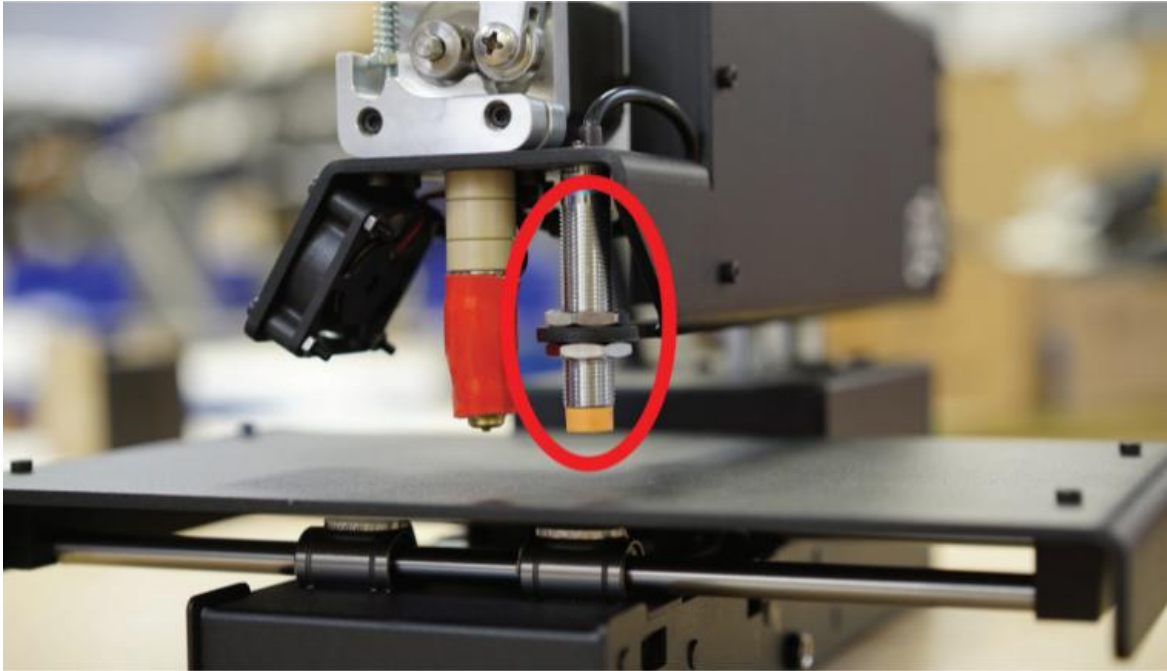
Slicer je tip programa koji prevodi geometriju 3D predmeta u pokrete koje 3D printer pročitava i odradi. Brine se za različite postavke poput temperature i brzine tiska. Slicer je također zadužen za izradu potpornih struktura ako za njih ima potrebe. Većina 3D printera dolazi s preporukom koji slicer koristiti, i od njega je uvijek najbolje početi. U uputama će biti profili napravljeni za specifičan model printera u pitanju i za filament koji se koristi [11].

Slicer programi su različiti, što znači da su neki bolji a neki lošiji. Moguće je isti model printati na istom printeru 2 puta s različitim slicerima, i dobiti različite rezultate. Ako proizvođač 3D printera nema svoj slicer program, trebamo ga odabrati sami. Postoje besplatni sliceri, ali neki koštaju. Većina besplatnih slicera će dobro raditi na većini 3D printera sve dok je 3D model s kojim se radi dobar i bez grešaka. Iako svi mogu malo popraviti 3D model, puno je bolje biti siguran da je model dobar u startu [11].

### **3.10 Poravnanje podloge**

Jedan od najključnijih koraka da bi se dobio dobar otisak je briga da prvi sloj sjedne ravnomjerno i da se pričvrsti za podlogu kako treba. Vrlo malo FDM printera ima automatsko poravnanje podloge, stoga ovaj zadatak najčešće korisnik obavlja sam [11].

Printrobot Simple Metal je printer koji ima automatsko poravnanje podloge. Pored dizne se nalazi senzor, ali on ne podešava samu podlogu, već detektira kut podloge, pa tijekom printanja kompenzira kut po potrebi. Tako se sprječava da jedna strana bude kraća od druge [11].



Slika 20: Senzor

Čak je i kod ovog printera potrebno ručno centrirati visinu podloge, a ako rubovi ne budu 100% na mjestu, otisak će i dalje ispasti dobar [11].

Za ostale printere je ovaj proces potrebno obaviti ručno, a to se provodi u 2 koraka:

- 1) Poravnanje podloge tako da svi rubovi sačinjavaju ravnu plohu
- 2) Podešavanje visine podloge tako da prvi sloj ispadne kako treba

Poravnanje rubova se uglavnom vrši pomoću 4 šarafa ispod podloge. Kada se podloga poravna, trebala bi biti 0.1mm od dizne. Ovo se lako testira običnim komadom papira. Dizna se spusti u početni položaj, te se list papira gurne ispod dizne. Ako je dizna preblizu, papir će se teško pomicati ili neće moći proći uopće. Ako je dizna predaleko, papir će proći bez ikakvog otpora. Iako su ovo neke općenite upute, uvijek treba provjeriti službene upute podešavanja koje su došle od proizvođača [11].



## 4. Kompozitni termoplastični polimeri i nanokompoziti

Polimeri su od ključne važnosti u području aditivne proizvodnje, a uskoro će biti i kod proizvodnje OEM(original equipment manufacturer) dijelova. Većina materijala koji su trenutno u upotrebi se mogu podijeliti u dvije grupe, a to su termoplastike i kompozitne termoplastike. Metode za upotrebu polimernih termoset i elastomer materijala u 3D tisku su se počele pojavljivati tek nedavno. U ovom dijelu rada ćemo proći kroz nedavno postignute napretke vezane za upotrebu termoplastike i kompozitnih materijala u 3D tisku, kao i potrebu za poboljšanjem svojstava kako bi polimerni materijali doživjeli puni sjaj u području aditivne proizvodnje [13].

Aditivna proizvodnja, odnosno 3D tisak je proces združivanja slojeva materijala kako bi dobili 3D predmete iz datoteka napravljenih u CAD (Computer Aided Design) programu. Predmeti se sekvencijalno proizvode sloj po sloj u X-Y području koordinatnog sustava, pa se dodaje novi sloj pomakom na Z osi. Charles Hull je 1986. godine prvi puta predstavio aditivnu proizvodnju strojem koji je bio sposoban izraditi 3D predmet. Onda do danas, ta je tehnologija jako napredovala, te sada imamo široku paletu različitih tehnika 3D tiska [13].

Prednost 3D tiska je što nam daje mogućnost izrade složenih geometrija sačinjenih od više različitih materijala - dvije karakteristike koje nije lako postići tradicionalnim tehnikama subtraktivne proizvodnje, kao npr. CNC glodanjem. Osim što 3D tisak skraćuje ciklus dizajna i proizvodnje, također nudi mogućnost smanjenja cijene proizvodnje i povećava učinkovitost proizvodnog procesa kada je potrebno nešto izraditi on-demand. 3D tisak smanjuje otpad materijala za otprilike 90% u usporedbi sa subtraktivnom proizvodnjom. Također ima potencijal izrade laganih ali čvrstih struktura koje bi se mogle primjenjivati u zrakoplovstvu, autoindustriji, vojsci, replikaciji umjetnina ili arhitekturi. CAD tehnologije omogućavaju izradu ovakvih dizajnova koji omogućavaju lagane ali čvrste strukture [13].

Važan izazov u svijetu aditivne proizvodnje je nedostatak naprednih polimernih materijala i nanokompozita koji bi postigli potrebne performanse. Upravo zato se sve više pažnje pridodaje razvoju novih materijala visokih performansi, ubrzanju i povećanju učinkovitosti procesa i proširivanju područja primjene. Uvođenje i razvoj novih polimera i ostalih termoplastika za 3D tisak se radi s ciljem da se na 3D tisku počnu proizvoditi dijelovi koji će se koristiti u krajnjem proizvodu [13].

Učestali problem pri uporabi termoplastike u aditivnoj proizvodnji je njihov nedostatak snage i funkcionalnosti za veća opterećenja. Upotreba polimera visokih performansi je poželjna, ali cijena i zahtjevi za ekstremnije uvjete (na primjer, visoke temperature) predstavljaju veliki izazov, pogotovo ako se radi o proizvodnji većih serija. Česti materijali koji se koriste u 3D tisku su termoplastike, u koje se mogu dodavati ostali materijali na bazama vlakana, čestica ili nanočestica. Miješanje tradicionalnih polimera se radi s ciljem da jači polimer učvrsti slabijeg. Dokazano je da na mehanička svojstva 3D isprintanih dijelova utječu svojstva materijala prije samog tiska, kao i odabrana metoda proizvodnje i orijentacija izrade, između nekih ostalih faktora. Upravo zato je važno usredotočiti se na stalan razvoj svojstava polimera, od molekularne do makroskopske razine [13].

#### **4.1 Proces proizvodnje kod 3D tiska**

Početak procesa 3D tiska počinje na računalu, odnosno dizajniranjem 3D modela u nekom CAD programu za modeliranje. Dijelove je moguće dobiti iz CAD modela konverzijom u .STL format datoteke. U .STL formatu, trokutaste se strane mogu upotrijebiti za simulaciju oblika predmeta. Slicing program je potreban za optimizaciju predmeta za 3D printer. Slicing program pretvara .STL datoteku u drugu datoteku, primjerenu za specifičan 3D printer u pitanju. Univerzalnost CAD formata datoteke (unatoč njihovoj sloj po sloj tehnici tiska) je vrlo velika prednost aditivne proizvodnje [13].

#### **4.2 Materijali koji se koriste u FDM 3D tisku**

Najdostupniji termoplastični materijali za FDM su acrylonitrile butadiene styrene (ABS), polylactic acid (PLA), polyvinyl alcohol (PVA), polycaprolactone (PCL) i polyamide (Nylon). Inženjerske termoplastike s dobrim svojstvima su također dostupne - polyether ether ketone (PEEK) i polyetherimide (PEI). Ovi napredni inženjerski polimeri nude odlična mehanička i toplinska svojstva ali za relativno visoku cijenu. Važno je i znati da ne može svaki komercijalni 3D printer raditi s ovakvim naprednim polimerima.[13]

Čestice, vlakna i nanomaterijali se uglavnom koriste kako bi se ojačali standardni FDM termoplastični filamenti. Tijekom tiska slojeva, važno je ograničiti veličinu nadopune u skladu s veličinom dizne kako se dizna ne bi zaštopala. Također, skupljanje nadopune također može začepiti diznu [13].

### **4.3 Kompoziti ojačani česticama**

Dokazano je da korištenje dopuna materijala česticama dobro utječe na snagu i izdržljivost predmeta. Dodatak materijala od čestica se često koristi i primjenjuje se na sve više i više izotropnih i konvencionalno izrađenih kompozitnih dijelova od polimera. Kod 3D tiska, svojstva toka, svojstva gašenja, veličina vokselizacije, debljina sloja mogu uzrokovati probleme kada se koriste termoplastični kompoziti bazirani na česticama. Kod FDM 3D tiska, to uključuje varijaciju debljine filameta, začepeljivanje dizne, delaminaciju slojeva i prepunjavanje materijala. Sljedeći primjeri se odnose na materijale za koje se smatra da su unutar konvencionalnog dometa (10 do 100 mikrona) [13].

#### **4.3.1 Željezni/najlonski kompoziti**

Metalno-polimerni kompoziti koji koriste najlon kao matricu (grubo: 50-80 $\mu$ m i glatko: <30 $\mu$ m) a metal kao dopune postoje. Miješanje taline željeza i najlona se izvodi upotrebom ekstrudera s jednom šarafom. Metalno-polimerni kompoziti s veličinom čestica od 50-80 $\mu$ m su pokazali puno bolje rezultate u ispitima čvrstoće u odnosu na čestice veličina <30 $\mu$ m za isti volumen. Dosljednost u smislu veličina čestica je značajno utjecala na svojstva kompozita. Metalno-polimerni kompoziti s velikom razlikom u veličinama čestica su dali slabije rezultate u ispitima čvrstoće. Najveće snage izdržljivosti su primijećene kod omjera 30:70% gdje je 30% željezo, a 70% najlon. Vlačna čvrstoća je 3.87MPa, a modul 54.52MPa [13].

#### **4.3.2 Željezni/ABS kompoziti**

Kompoziti s visokim udjelom željeza za FDM filamente su pripremljeni tako da se ABS polimer koristio kao matrica, a željezo kao metalna nadopuna. Maksimalna vlačna čvrstoća u iznosu od 12.8MPa je postignuta s 24% udjela željeza. Što se tiče izbora vezača, parafinski vosak je upotrijebljen kao primjereniji surfaktant/kompatibilizator za kompozite željeza/ABS-a u odnosu na palmin stearin. Upotreba kompozita s visokim udjelom metala nudi mogućnost razvoja primjerenog materijala za kalupe za injekcijsko lijevanje i filament žice za FDM [13].

#### **4.3.3 Bakreni/ABS i željezni/ABS kompoziti**

Istraživanja su se također posvetila otkrivanju učinka kombinacije bakra i ABS-a za primjenu na FDM tehnologiji. Istraživanja su se primarno fokusirala na određivanje veličine nadopune i tipove metalnih nadopuna. Termalna provodljivost ABS/Cu i ABS/Fe kompozita se poboljšala s većim dodatkom metala. Međutim, mehanička svojstva kompozita s metalnim udjelima su se

značajno spustila na 10% u odnosu na željezni prah zbog slabog prijanjanja između metalnih dopuna i polimerne matrice [13].

#### **4.3.4 Čađani/PP/SCG kompoziti**

Demonstrirane su mogućnosti upotrebe konduktivnih termoplastičnih kompozita u FDM tisku. Električno provodan filament je napravljen procesom miješanja taline polipropilena (PP), homopolipropilena (SCG) i čađe (CB) u ekstruderu s jednim šarafom. Rezultati su pokazali da se kod postotaka težine većih od 30% dobiva električni otpor od  $10^{-2}$  ohma, što omogućava upotrebu za printanje strujnih krugova i senzora. Prednost upotrebe CB-a kao nadopunjača čestica je omogućavanje veće termalne stabilnosti i veće električne provodljivosti. Potencijalna područja primjene električki vodljivih termoplastičnih kompozita su senzori, 2D strujni krugovi i 3D strujni krugovi. Problem slabog prijanjanja dvaju polimera u 2D i 3D strujnim krugovima se može riješiti djelomičnim ovijanjem ili učvršćivanjem unutar strujnog kruga [13].

#### **4.3.5 Stroncijev titanat( $\text{SrTiO}_3$ )/ABS kompoziti**

Istražene su primjene stroncijevog titanata ( $\text{SrTiO}_3$ ) udjela 5% kao keramičke nadopune ABS-u. Miješanje taline stroncijevog titanata i ABS-a je izvedeno ekstruderom s 2 šarafa. Najbolja vlačna čvrstoća čistog ABS-a je  $33.96 \pm 1.74 \text{MPa}$ , a  $\text{ABS/SrTiO}_3$   $21.60 \pm 0.63 \text{MPa}$ .  $\text{ABS/SrTiO}_3$  pokazuje loša mehanička svojstva zbog svoje lomljivosti i prisutnosti mikrorupa [13].

#### **4.3.6 Glinica ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )/ABS kompoziti**

Osim stroncijevog nitrata, istražena je i kombinacija glinice kao nadopune ABS filamentu. Najbolja vlačna čvrstoća samog ABS-a je  $33.96 \pm 1.74 \text{MPa}$ , a za  $\text{ABS/Al}_2\text{O}_3$  iznosi  $28.8 \pm 2.62 \text{MPa}$ . Pronađene su slične greške kao i kod prethodne primjene sa stroncijevim titanatom, odnosno prisutnost mikrorupa zbog kojih  $\text{ABS/Al}_2\text{O}_3$  kompoziti nemaju zadovoljavajuću vlačnu čvrstoću [13].

#### **4.3.7 Trikalcijev fosfat/polipropilenski kompoziti**

FDM 3D tisak je upotrijebljen za formaciju skela s kontroliranom poroznošću. To je dobiveno tako što su se termoplastičnim kompozitima dodali polipropilen (PP) kao matrica i trikalcijev fosfat (TCP) kao keramička dopuna. Filament se dobio miješanjem talina PP-a i TCP-a pomoću ekstrudera s jednim šarafom. Istraživači su optimizirali CAD model i parametre printera za pripremu složenih poroznih struktura. PP/TCP kompoziti su pokazali vlačnu čvrstoću od  $19.8 \text{MPa}$  i tlačnu čvrstoću od  $12.7 \text{MPa}$  [13].

### **4.3.8 Glinica ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )/Najlon6 kompoziti**

Istraženi su efekti varijacije veličine čestica kod termoplastičnih kompozita za FDM sirovine. Istražen je efekt veličine jednostruke čestice (SPS), veličine dvostruke čestice (DPS) i veličine trostruke čestice (TPS) glinice u poliamid6/najlon6 kompozitima. SPS kompoziti su dali optimalne rezultate za postotno produženje. Međutim, DPS kompoziti su pokazali bolja mehanička svojstva po pitanju vlačne čvrstoće (44.52MPa), čvrstoće popuštanja (31.19MPa) i Youngovog modula (871.81MPa) [13].

### **4.3.9 Grafitni/PA6/PS/POE-g-MAH kompoziti**

Izrađeni su polimerno-grafitni kompoziti s dobrim svojstvima toplinske vodljivosti, pa je moguća upotreba za svrhe hlađenja. Upotrebom Haakeovog ekstrudera s 2 šarafa, POE-g-MAH, polistiren (PS), poliamid 6 (PA6) i grafitne pahuljice su otopljene i promiješane. Kanalići za odvod vrućine su napravljeni od rastopljenih termoplastičnih kompozita. Zbog prisustva rupa kod FDM tiska, canalići su otkazani [13].

## **4.4 Kompoziti ojačani prirodnim vlaknima**

Ovo kratko potpoglavlje govori o kompozitima s jutom.

### **4.4.1 Juteni/ABS kompoziti**

Predstavljena je mogućnost primjene vlakana jute kao pojačanja za termoplastične kompozitne filamente za FDM 3D tisak. Visoke temperature tijekom miješanja taline u ekstruderu s 2 šarafa i istiskivanje kroz diznu su dovele do toplinske degradacije vlakana jute. Također je došlo do formacije praznina koje su u konačnici oslabile materijal. Vlačna čvrstoća jutelih/ABS kompozita je  $8.63 \pm 3.59 \text{MPa}$  što je značajno manje od čistog ABS-a, odnosno  $17.73 \pm 2.52 \text{MPa}$  [13].

### **4.4.2 Juteni/PLA kompoziti**

Pripremljeni su termoplastični kompoziti pojačani vlaknima jute za 3D tisak (JFRTP). Termoplastični kompoziti se sastoje od vlakana jute u svrhu ojačanja i PLA kao polimerne matrice. Vlačna čvrstoća JFRTP-a je  $57.1 \pm 5.33 \text{MPa}$ . Zavrnuti juti prolaskom kroz diznu utječe na orijentaciju vlakana za vrijeme istiskivanja. Mehanička svojstva JFRTP-a variraju zbog odstupanja vlakana, lošeg povezivanja vlakana i polimera te nastanka praznina [13].

## **4.5 Kompoziti ojačani sintetičkim vlaknima**

Ovo potpoglavlje se fokusira na sintetička vlakna, što uključuje i ugljična vlakna, o kojima se kasnije u radu ulazi u puno veće detalje.

### **4.5.1 Ugljična vlakna(CF)/PLA kompoziti**

Poboljšanja po pitanju krutoće su primijećena kod PLA kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima (CF). PLA/CF kompoziti pokazuju manji napor u odnosu na čisti PLA, što dovodi do lomljivih 3D isprintanih struktura. Morfološkom analizom i mikroskopom se došlo do zaključka da se ugljična vlakna poravnaju sa smjerom printanja tijekom istiskivanja materijala kod FDM printera [13].

### **4.5.2 Ugljična vlakna(CF)/ABS kompoziti**

Napravljena je termoplastika pojačana ugljičnim vlaknima (CFRP) za svrhu upotrebe kao filament u 3D FDM tisku. Termoplastični kompoziti prolaze drugu ekstruziju upotrebom ekstrudera s jednim šarafom kako bi se postigla visoka nasipna gustoća. Istiskivanje jednim šarafom daje ujednačen tok i bolje prijanjanje slojeva za vrijeme printanja. Ugljična vlakna (dužina 150 $\mu$ m i 100  $\mu$ m) u kombinaciji s ABS-om poboljšavaju mehanička svojstva FDM isprintanog predmeta. Bolja vlačna čvrstoća je primijećena kod CFRP kompozita s 5%-tnim udjelom ugljičnih vlakana, dok su CFRP kompoziti s 7.5%-tnim udjelom pokazali najveću srednju vrijednost za modul elastičnosti. Kod 10% ili više udjela ugljičnih vlakana, poroznost se povećava i to dovodi do slabe vlačne čvrstoće, žilavosti, čvrstoće popuštanja i rastegljivosti CFRP 3D isprintanog predmeta [13].

### **4.5.3 Kontinuirano staklo, ugljik, kevlarska vlakna /najlonski kompoziti**

Kontinuirano staklo, ugljik i kevlarska vlakna pojačala su najlonske kompozite i tako su vlačna svojstva povećana do 6.3 puta za vlačnu čvrstoću i 5 puta za čvrstoću na savijanje. Svejedno postoje određena ograničenja kod upotrebe kontinuiranog vlakna kao pojačanje termoplastičnim kompozitima. Povećan udjel vlakana je rezultirao oformljavanjem praznina zbog slabe povezanosti između površine vlakna i matrice. Isto se ponašanje kompozita ojačanih vlaknima može primijetiti kod tradicionalnog procesiranja termoplastike [13].

#### **4.5.4 Kontinuirana ugljična vlakna/PLA kompoziti**

Kontinuirani CFRP kompozit je napravljen metodom impregnacije unutar dizne. Integracija ovog inovativnog načina je dala vlačnu čvrstoću  $185.2 \pm 24.6 \text{MPa}$  i modul  $19.5 \pm 2.08 \text{MPa}$ . Upotreba tehnike impregnacije unutar dizne u FDM tisku je dala bolja mehanička svojstva u odnosu na uobičajen proces miješanja taline kratkih vlakana u polimernoj matrici. Kod termoplastičnih kompozita ojačanih vlaknima, orijentacija i sadržaj vlakana su bili ključni parametri kako bi se dobila optimalna svojstva. Razvoj tehnika impregnacije unutar dizne nudi mogućnost tiska dijelova dovoljno jakih za upotrebe u svrhu nosivosti tereta. Može se povući zaključak da su parametri poput debljine sloja, razmaknutosti otvora i brzine punjenja utjecali na svojstva isprintanih predmeta. Optimalna čvrstoća savijanja od  $335 \text{MPa}$  i modul od  $30 \text{GPa}$  su postignuti s udjelom ugljičnih vlakana od 27% [13].

#### **4.6 Kompoziti ojačani nanomaterijalima**

Provedeni su i razni eksperimenti ojačavanja nanomaterijalima, te je njima posvećeno ovo potpoglavlje.

##### **4.6.1 Poliuretan/polilaktična kiselina/grafenov oksid (TPU/PLA/GO) nanokompoziti**

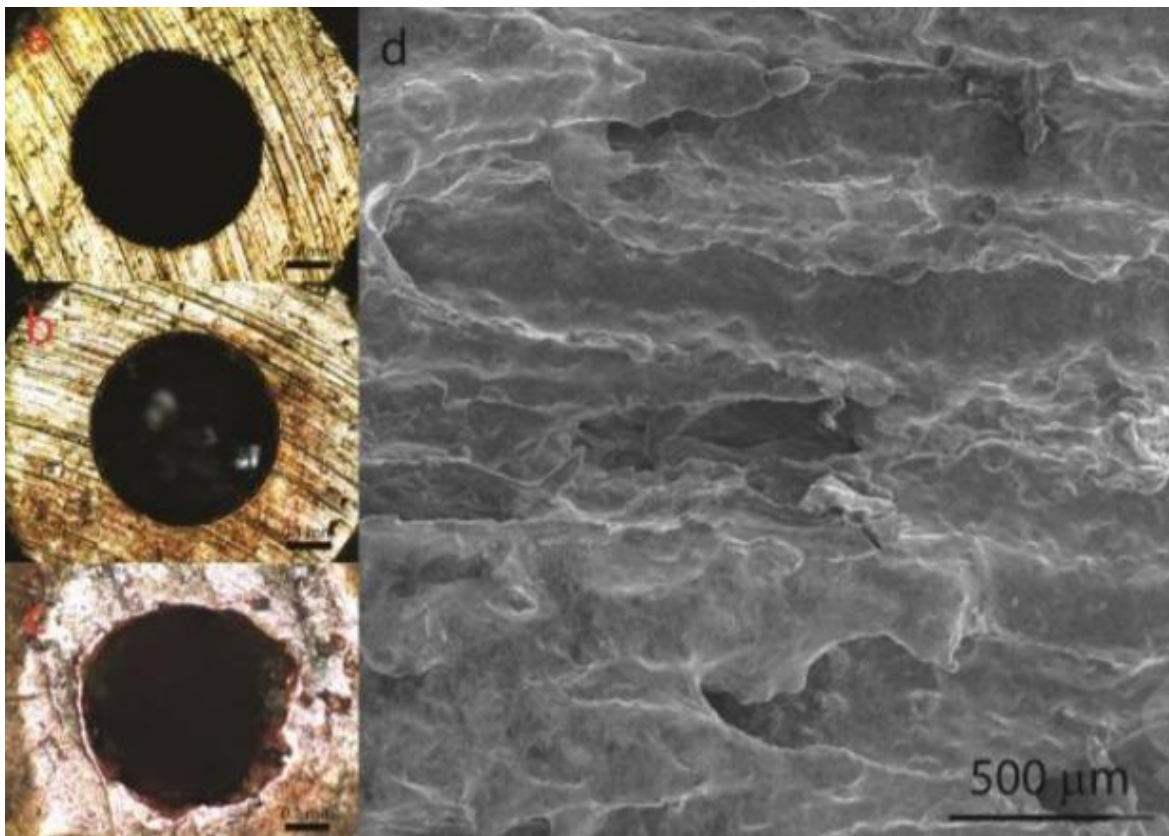
TPU/PLA/GO nanokompoziti su napravljeni procesom miješanja otapala. Dobiveni nanokompoziti se prilagođavaju u filament koji je onda pogodan za FDM 3D tisak. Uključivanje GO nanodopuna u TPU i PLA nanokompozite je poboljšalo mehanička svojstva i toplinsku stabilnost. Mehaničko ponašanje TPU/PLA/GO nanokompozita je vrlo ovisno o orijentaciji printanja. Nanokompoziti se mogu koristiti kao potencijalni biomaterijali za tkiva zbog svoje kompatibilnosti sa NIH3T3 ćelijama [13].

##### **4.6.2 Ugljična nanovlakna i grafenske nadopune/polibutilen tereftalat (PBT) nanokompoziti**

Predstavljeno je FDM tiskanje PBT-a pojačanog nanomaterijalima uz upotrebu ugljičnih nanocjevčica i grafena kao nadopune. Rezultati su pokazali da PBT/CNT 3D isprintani dijelovi imaju odlična elastična svojstva, vodljivost i lakoću printanja u usporedbi s PBT/G kompozitima. Što se tiče lakoće printanja, nastanak praznina je doveo do grube površine i lomljivosti PBT/G 3D isprintanih predmeta. Praznine su nastale kao posljedica isparavanja vlage grafena pri visokim temperaturama. Zbog razlike u strukturama nanomaterijala (1D u CNT-u i 2D u

grafenu), nagomilavanje čestica uzrokuje povećan električni otpor. Komercijalno dostupni 3D FDM printeri imaju određena ograničenja kada se radi o upotrebi termoplastičnih kompozita. Na primjer, kod upotrebe kompozita koji su pojačani nanomaterijalima, skraćuje se vijek trajanja dizne zbog toga što dolazi u doticaj s abrazivnim materijalima. Na slici 21, SEM analiza pokazuje utjecaj koji printanje PBT/CNT-a i PBT/G-a ima na diznu [13].

Gore lijevo na slici 21 je nova dizna, prije tiska. Ispod se nalazi dizna nakon tiska otprilike 10cm PBT/G-a. Na dnu je dizna nakon printanja otprilike 1.5m PBT/CNT-a. Na desnom dijelu slike je SEM slika isprintanog PBT/G-a kroz oštećenu diznu [13].



Slika 21: Posljedice abrazije na diznu

#### 4.6.3 Nanoštapići cinkovog oksida/ABS kompoziti

ABS-u je dodato 2% nanoštapića cinkovog oksida. Pomoću ekstrudera s 2 šarafa, nanoštapići cinkovog oksida su rastopljeni s ABS-om da bi se došlo do termoplastičnog kompozita. Rezultati su pokazali da kod ABS/ZnO kompozita nastaju pukotine, odnosno da su lomljivi. Vlačna čvrstoća kod ABS/ZnO-a je  $20.70 \pm 0.55 \text{ MPa}$ , što je mnogo manje od čistog ABS-a, odnosno  $33.96 \pm 1.74 \text{ MPa}$ . Loša svojstva ABS/ZnO-a su pripisana prisutnosti mikropraznina kada su se dodale dopune od mikroštapića [13].



#### **4.6.4 Nanoplateleti grafena/ABS kompoziti**

Sadržaj nadopune grafenskih nanopeleta od 4% je dodan ABS-u procesom miješanja taline. Dodatak grafenskih nanoplateleta je poboljšao modul elastičnosti čistog ABS-a za gotovo 30%. Vlačna čvrstoća od  $38.8 \pm 0.8 \text{MPa}$  je postignuta, kao i modul od  $1866 \pm 118 \text{MPa}$ . Osim poboljšanja vlačnih svojstava, dodatak grafenskih nanoplateleta je poboljšao toplinsku stabilnost [13].

#### **4.6.5 Kloisitni/PLA kompoziti**

Razvijen je biorazgradivi termoplastični kompozit pomoću nano glinske dopune Kloisit 30B (C-30B) i PLA s melaminskim polifosfatom (MPP) kao matricom. Nanokompoziti su pripremljeni miješanjem taline, a filament se dobio kasnijim procesiranjem kroz ekstruder s jednim šarafom. PLA/MPP polimerne mješavine su pokazale lošu toplinsku vodljivost što je dovelo do otpornosti na plamen ali značajno oslabilo mehanička svojstva. Dodatkom C-30B nano glinskih nadopuna, termoplastičnim nanokompozitima su poboljšana mehanička svojstva. Vlačna čvrstoća 3D isprintanih PLA/MPP/C-30B nanokompozita je  $70.0 \pm 3.8 \text{MPa}$ , a modul  $3.91 \pm 0.22 \text{GPa}$ . Po pitanju mehaničkih svojstava 3D isprintanih i lijevanih PLA/MPP/C-30B nanokompozita, nije primijećena značajna razlika [13].

#### **4.6.6 Titanov oksid/ABS kompoziti**

Istražen je efekt dodatka 5% nanočestica titanovog dioksida ( $\text{TiO}_2$ ) ABS-u. Nije se pronašla značajna razlika u vlačnoj čvrstoći 3D isprintanih dijelova od čistog ABS-a ( $16.23 \pm 3.07 \text{MPa}$ ) i ABS/ $\text{TiO}_2$  ( $16.22 \pm 3.53 \text{MPa}$ ). Dodatak  $\text{TiO}_2$  nanočestica uglavnom daje bolju vlačnu čvrstoću, ali varijacija veličine dopune  $\text{TiO}_2$  je utjecala na krajnje rezultate [13].

#### **4.6.7 Grafen u PLA/PLA kompoziti**

Printerski mehanizam s dvostrukom glavom je upotrijebljen za čisti PLA i grafen u PLA (G-PLA). Upravljanje parametara printanja omogućava istraživačima da odrede omjer PLA i G-PLA. Viši sadržaj G-PLA je smanjio električni otpor termoplastičnih kompozita [13].

### **4.7 Polimerske mješavine**

Provedeni su pokušaji povezivanja više različitih polimera u svrhu dobivanja jačih kompozitnih materijala. Njima je posvećeno ovo potpoglavlje.

#### **4.7.1 ABS/SEBS/UHMWPE polimerske mješavine**

Pripremljene su polimerske mješavine ABS-a, stiren etilen butadien stirena (SEBS) i ultra teškog molekularnog polietilena (UHMWPE) miješanjem taline u ekstruderu s 2 šarafa. Omjer ABS/SEBS polimerskim mješavina korišten u ovom istraživanju je bio 95:5 i 80:20 postotaka težine. Povećanje udjela SEBS-a nije pokazalo značajne razlike po pitanju vlačne čvrstoće. Međutim, povećanjem udjela SEBS-a je primijećena veća razina deformacije plastike zbog većeg toka plastike prema oštećenom području. Dodatkom UHMWPE-a u polimersku mješavinu, polimeri/polimerni kompoziti su oformljeni gdje ABS/SEBS služi kao matrica. 3 polimerske mješavine pokazuju mehanizam lomljenja s prisutnošću fibrila i sferoida kod slomljenog područja. Za sferoide se vjeruje da su zapravo UHMWPE koji se nije pomiješao s ABS/SEBS matricom. Vlačna čvrstoća je smanjena s povećanim težinskim udjelom ABS/SEBS/UHMWPE-a u polimerskim mješavinama u usporedbi s čistim ABS isprintanim dijelom [13].

#### **4.7.2 UHMWPE/HDPE/PEG polimerske mješavine**

Pokazalo se da je polimersko miješanje UHMWPE-a s polietilenom visoke gustoće (HDPE) poboljšalo mogućnosti istiskivanja unutar kompozita ako je udio HDPE-a 60%. Polimerskom mješavinom UHMWPE-a i HDPE-a je riješen problem vrlo visoke viskoznosti čistog UHMWPE-a. Stoga je moguće koristiti UHMWPE/HDPE polimerske mješavine za 3D tisk umjetnih implantata zbog UHMWPE-ovih biokompatibilnih karakteristika. Također se pokazalo da polietilen glikol (PEG) nije koristan kod UHMWPE polimerskih mješavina. PEG poremećuje prijenos topline i smanjuje kinetički utjecaj kod polimerskih mješavina, što dovodi do smanjenja toplinske stabilnosti [13].

#### **4.7.3 PC/SEBS-g-MA polimerske mješavine**

Nova mješavina polikarbonata/stiren etilen butilen stirena s graftom anhidrida maleinske kiseline je napravljena kao novi gumirani filament za FDM tisk. Smanjenje ukupne vlačne čvrstoće je primjećeno kako se povećavao udio SEBS-g-MA. Međutim, postotno produženje PC/SEBS-g-MA polimerskih mješavina se povećalo sa SEBS-g-MA sastavom. Najbolja vlačna čvrstoća iznosa 23.82MPa je primijećena kod polimerskih mješavina s 25% udjela SEBS-g-MA. Polimerske mješavine sa 75% udjela SEBS-g-MA pokazuju gumirane karakteristike s produženjem od čak 784.48% [13].

Kod FDM 3D tiska je važno obraćati pažnju na problem prianjanja slojeva jer može doći do problema s raznim polimerima koji imaju različite karakteristike hlađenja nakon istiskivanja kroz

diznu na prethodni sloj. Temperatura i vlaga oko printera može imati značajan utjecaj na kvalitetu konačnog otiska. Smanjena mehanička svojstva isprintanog predmeta su primijećena već kod uvjeta od 0.16% vlage ili više zbog povećane poroznosti pri izradi slojeva [13].

## **4.8 Izazovi kod upotrebe termoplastičnih kompozita u aditivnoj proizvodnji**

Na prvi pogled se može činiti kako 3D tisak donosi veliku revoluciju u proizvodnji, te kako će potjerati subtraktivnu proizvodnju u prošlost. Međutim, i aditivna proizvodnja ima svoje loše strane, nedostatke i probleme. Ovo potpoglavlje je posvećeno njima.

### **4.8.1 Defekti uzrokovani nadopunama**

Formacija praznina i mikropraznina je čest problem pri dodaji nadopuna termoplastikama. Slabo prijanjanje i isparavanje promjenljivih spojeva s dopunama tijekom miješanja taline i istiskivanja materijala uzrokuje oformljivanje praznina i mikropraznina. Kvaliteta krajnjeg proizvoda ovisi o kvaliteti procesa miješanja. Prilikom testiranja pritiska, može doći do pukotina te nekonzistentne kvalitete i svojstava kod 3D isprintanih dijelova. Što se tiče kompozita s česticama i nanomaterijalima, nagomilavanje i nejednaka podjela je učestao problem. Dodavanje nadopune kompozitima s problemom nagomilavanja i nejednake podjele nije financijski isplativo, pogotovo kada se radi o skupljim nadopunama i nanonadopunama. Osim toga, varijacija u veličini čestica unutar termoplastičnih kompozita može uzrokovati nekonzistentna termomehanička svojstva proizvoda [13].

Po pitanju kompozita ojačanih vlaknima, komercijalno dostupni 3D printeri su ograničeni na termoplastične kompozite s kratkim vlaknima. Upotreba kontinuiranog pojačanja vlaknima na isprintanom djelu zahtjeva složenu strukturu glave printera i programiranje. Povrh toga, loše prijanjanje između vlakana i termoplastike može uzrokovati nekonzistentnu kvalitetu i svojstva termoplastičnih kompozita. Predobrada je potrebna kako bi se dobila dobra adhezija između vlakna i matrice. Prirodna vlakna se mogu raspasti pri visokim temperaturama, pa to može uzrokovati praznine [13].

### **4.8.2 Dizajnerska ograničenja 3D printera**

Komercijalno dostupni 3D printeri nisu prilagođeni za termoplastične kompozite s različitim dopunama. Što se tiče FDM-a, teško je uvesti vlakna u 3D tisak zbog ograničenih vrsta komercijalno dostupnih dizni. Upotreba više anizotropnih i većih dopuna može oštetiti ili začepiti diznu [13].

## **5. Ugljična vlakna (CF)**

U prethodnom se poglavlju ukratko prošlo kroz mnoštvo raznih kombinacija kompozita. Ovo poglavlje se dodatno sužava, i to na ugljična vlakna (carbon fiber).

### **5.1 Ugljična vlakna i PLA**

Ovo potpoglavlje detaljno objašnjava eksperiment miješanja ugljičnih vlakana s PLA kako bi se dobio novi, potencijalno bolji kompozitni materijal za upotrebu u FDM 3D tisku.

#### **5.1.1 Priprema materijala**

Sirovi materijali koji su se upotrijebili u ovom eksperimentu su kuglice od čiste PLA termoplastike i prah ugljičnog vlakna. Prah ugljičnog vlakna ima dvije različite prosječne dužine vlakna, a to su 150 mm (Panex 30) i 100 mm (Panex 35), s uobičajenim promjerom vlakna od 7.2  $\mu\text{m}$ . Kuglice i prah su pomiješani u mikseru s različitim udjelima ugljičnih vlakana, 12%, 15% i 20%. Filamenti ugljičnih vlakana su pripremljeni pomoću ekstrudera sa šarafom pri temperaturi istiskivanja od 2200 $^{\circ}\text{C}$ , brzini prinosa od 2m/min kroz diznu promjera 1.75mm. Daljnji filamenti su izrezani na malene komadiće i ponovno stavljeni u ekstruder kako bi se postigla homogena raspodjela nasjeckanih ugljičnih vlakana [14].

#### **5.1.2 Priprema za eksperiment**

Proizvodnja čistog PLA i PLA ojačanog nasjeckanim ugljičnim česticama je provedena na PRATHAM-3 3D printeru. Dimenzije postolja printera su 300x300mm, a maksimalna visina 230mm. Promjer dizne iznosi 0.4mm, a najviša moguća temperatura 2600 $^{\circ}\text{C}$  [14].

Za tisak geometrijskih oblika, upotrijebljeni su "CURA" programi. Taj se program pobrinuo da su postavke poput temperature postolja, temperature dizne, brzina dizne i gustoća ispune primjerene za različite uzorke. Prvo je primjerak nacrtan u nekom CAD programu pa spremljen u .STL datoteku. Nakon toga se .STL datoteka učitala u CURA program [14].

Nakon postavljanja postavki tiska spomenutih u prethodnom odlomku, program uspostavlja kontakt s 3D printerom, te proces tiska započinje. FDM 3D printer je proizveo fine dijelove od PLA i CFRP kompozita. Promjer dizne je 0.4mm, a temperatura je postavljena na 230 $^{\circ}\text{C}$  tijekom FDM procesa. Brzina je postavljena na 60mm/s za sve slojeve, a temperatura podloge na 600 $^{\circ}\text{C}$ . Debljina svakog sloja je 0.2mm, a gustoća ispune 100% [14].

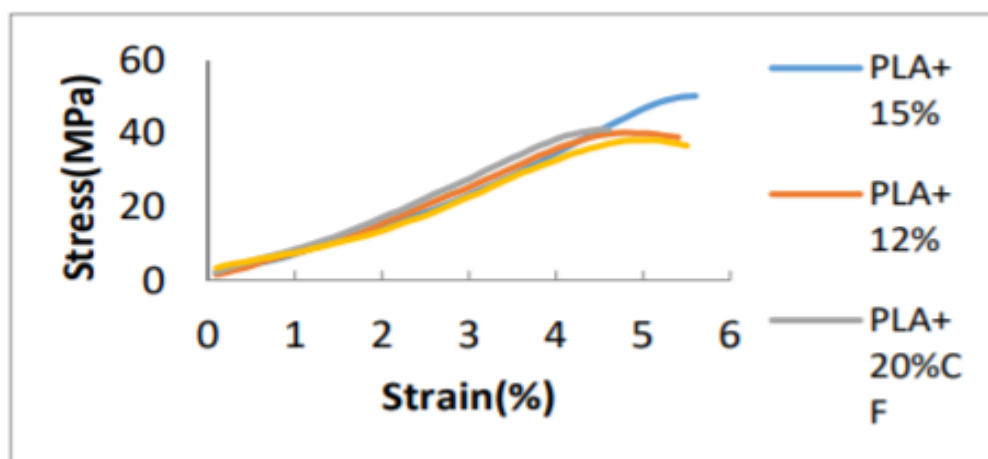
### 5.1.3 Procedura mjerenja

Provedeni su vučni ispiti te ispiti savijanja u skladu s ASTM D638 i ASTM D790 standardima. Testirana su 3 uzorka na svakom testu kako bi se došlo do čim preciznijih rezultata. Mehanička svojstva dijelova od čistog PLA i CFRP-a su otkrivena trostrukim testiranjem tako da su se 3 uzorka testirala, po 1 za svaki udio ugljičnih vlakana. ASTM E 384 i ASTM D 256 standardi su provedeni kod ispita mikrotvrdoće i Izod testa čvrstoće [14].

3 uzorka dimenzija 15x15x15mm su upotrijebljena za ispit mikrotvrdoće, a za Izod test čvrstoće 3 testna uzorka dimenzija 55x10x10mm s V-usjekom u sredini. Testovi mikrotvrdoće i Izod testovi čvrstoće se mjere u HV i J/m ili KJ/m<sup>2</sup>. Termomehanička svojstva su proučena provođenjem TGA i DMA testova [14].

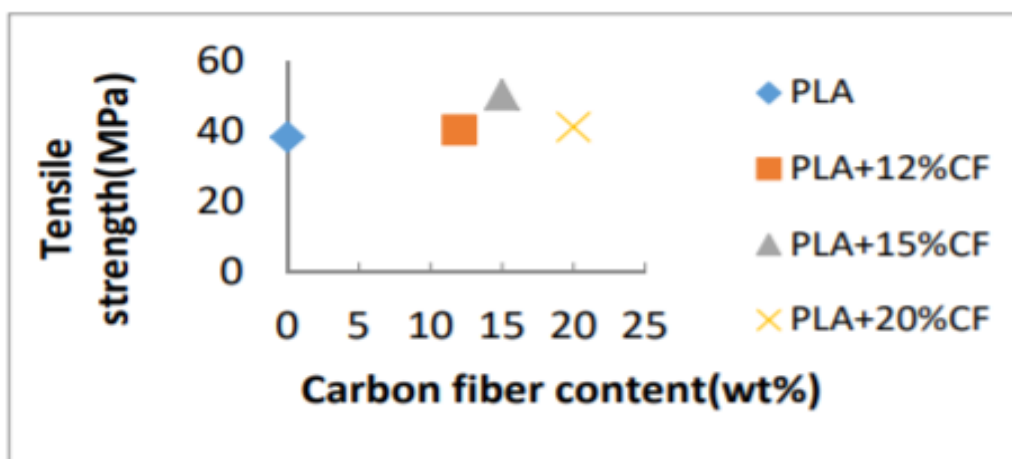
### 5.1.4 Utjecaj ugljičnih vlakana na vlačnu čvrstoću

Testiranje vlačne čvrstoće čistog PLA i CFRP-a je provedeno na univerzalnoj testnoj spravi. Vlačna svojstva su testirana upotrebom 3 uzorka kako bi se osigurala dosljednost rezultata testiranja. Brzina testiranja od 10mm/min je primijenjena tijekom testa [14].



Slika 22: Krivulje vlačne čvrstoće u odnosu na udio ugljičnih vlakana

Uobičajene krivulje za čisti PLA i CRFP su prikazane na slici 22. Na slici 23 vidimo utjecaj ugljičnih vlakana na vlačna svojstva CFRP kompozita. Vidimo da povećanje udjela ugljičnih vlakana s 0% na 12% daje i povećanu vlačnu čvrstoću, te se čvrstoća dalje povećava i kod 15% udjela ugljičnih vlakana. Međutim, već kod udjela ugljičnih vlakana od 20% vidimo pad u vlačnoj čvrstoći. Najveća srednja vrijednost (50MPa) se nalazi kod udjela ugljičnih vlakana od 15%, dok je srednja vrijednost najmanja kod čistog PLA, i to 38MPa [14].

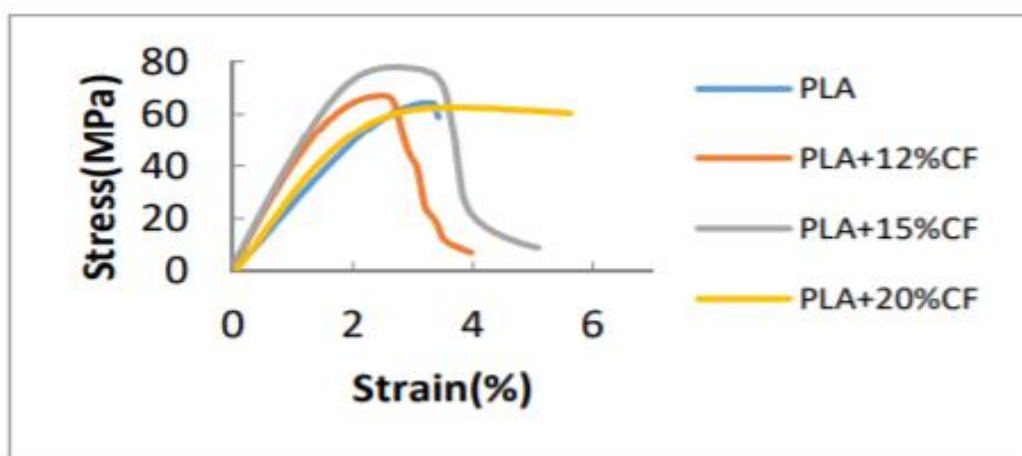


Slika 23: Utjecaj udjela ugljičnih vlakana na vlačnu čvrstoću

### 5.1.5 Utjecaj ugljičnih vlakana na čvrstoću savijanja

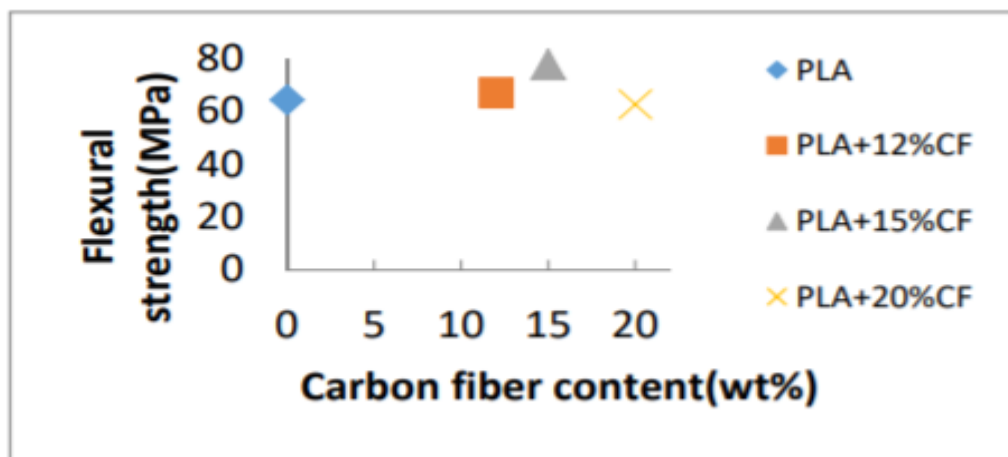
Test čvrstoće savijanja se provodi na istoj spravi za testiranje na kojoj je proveden i ispit vlačne čvrstoće, samo što je instalacija prilagođena na drugačiji način. Promjer indentera je podešen na 5mm, a brzina spuštanja je 5mm/min. Test čvrstoće je prekinut kada je maksimalno naprezanje vanjske površine doseglo 5% ili dok nije došlo do pucanja uzorka [14].

Čisti PLA primjerci, kao i PLA primjerci s udjelom ugljičnih vlakana od 12% pucaju unutar ograničenja naprezanja od 5%, dok primjerci s višim udjelima, odnosno 15% i 20% nisu pukli pri 5% ili manje na ispitu čvrstoće savijanja. Uobičajene krivulje primjeraka su prikazane na slici 24. Vidi se da je izdržljivost savijanja čistog PLA 64MPa, te da je povećana na 67MPa kod udjela ugljičnih vlakana od 12%. Udio ugljičnih vlakana od 15% daje najveću snagu savijanja od 78MPa, dok udio od 20% pada na snagu od 63MPa, što je manje od čistog PLA [14].



Slika 24: Krivulje čvrstoće savijanja u odnosu na udio ugljičnih vlakana

Utjecaj ugljičnih vlakana na snagu savijanja predmeta od CFRP kompozita je prikazana na slici 25. Vidi se da je na dosadašnjim testovima najbolje rezultate dao PLA s udjelom ugljičnih vlakana od 15% [14].



Slika 25: Utjecaj udjela ugljičnih vlakana na čvrstoću savijanja

### 5.1.6 Test mikrotvrdoće

Test mikrotvrdoće je proveden na čistom PLA i na CFRP kompozitu kako bi se izmjerio efekt pojačanja PLA ugljičnim vlaknima u ovisnosti o udjelu. Test mikrotvrdoće je metoda procjene tvrdoće materijala ili otpora na probijanje kada su testni uzorci vrlo mali ili tanki. U tablici 1 se vide rezultati svojstva mikrotvrdoće CFRP kompozita [14].

Tablica 1. svojstva mikrotvrdoće CFRP kompozita

| mikrotvrdoća | jedinica | PLA         | PLA+12%CF   | PLA+15%CF   | PLA+20%CF   |
|--------------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|              | HV       | 20.17-20.65 | 25.75-27.37 | 32.76-35.09 | 37.09-37.38 |

Mjerna jedinica tvrdoće za ovaj test je tvrdoća po Vickersu, odnosno HV. Sila od 0.1KN je primijenjena na površinu uzorka. Nakon udubljenja smo dobili vrijednosti tvrdoće koje vidimo u tablici 1 iznad. Analizom dobivenih rezultata doznajemo da je vrijednost tvrdoće čistog PLA niža od PLA s dodatkom ugljičnih vlakana, što znači da je i otpor na probijanje manji kod PLA. S povećanjem udjela ugljičnih vlakana, tvrdoća se također povećava. Udio od 12% pokazuje mali pomak u tvrdoći, ali 15% i 20% pokazuju veći pomak [14].

### 5.1.7 Udarni test

Izod test je proveden kako bi se došlo do udarne snage PLA i CFRP kompozita. Energija apsorbirana prije pucanja je energija pucanja. Energija pucanja se preračuna pa se iz nje dobije otpor materijala koji se mjeri u džulima. Udarne snage čistog PLA i PLA pojačanog ugljičnim vlaknima je prikazana u tablici 2:

Tablica 2. udarne snage čistog PLA i PLA pojačanog ugljičnim vlaknima

| Udarne snage | jedinica          | PLA  | PLA+12%CF | PLA+15%CF | PLA+20%CF |
|--------------|-------------------|------|-----------|-----------|-----------|
|              | KJ/m <sup>2</sup> | 4    | 3.03      | 2.72      | 6.11      |
|              | J/m               | 40.8 | 30.7      | 27.5      | 62.3      |

Udarne čvrstoća čistog PLA iznosi 40.8 J/m, što je više od PLA pojačanog ugljičnim česticama s udjelima 12% i 15%. Dodatkom 12% i 15% ugljičnih vlakana, udarne čvrstoća je 30.7, odnosno 27.5 J/m. Povećanje udjela ugljičnih vlakana na 20% daje veliki pomak u udarnoj čvrstoći do 62.3 J/m što je više od čistog PLA [14].

### 5.1.8 Dinamička mehanička analiza

Tablica 3. modul pohrane, tangencija gubitka i Tg za CFRP kompozit

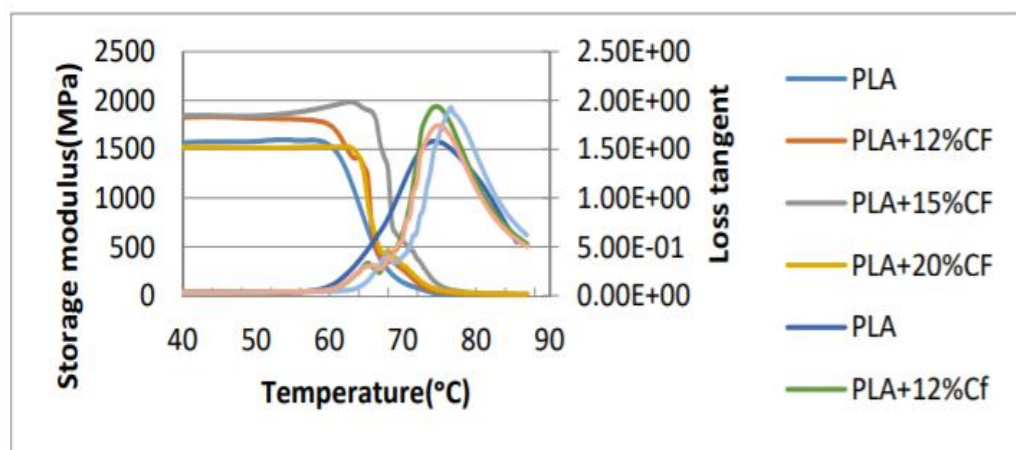
|                     | PLA   | PLA+12%CF | PLA+15%CF | PLA+20%CF |
|---------------------|-------|-----------|-----------|-----------|
| modul pohrane (MPa) | 1564  | 1815      | 1841      | 1517      |
| tangencija gubitka  | 1.609 | 1.556     | 1.515     | 1.421     |
| Tg(0C)              | 74.8  | 75.4      | 77.8      | 76.0      |

Iz tablice 3 se vidi da je modul pohrane i Tg od 15% CFRP udjela najviši u odnosu na ostale mješavine zahvaljujući ujednačenom međufaznom povezivanju. Najveće pojačanje među nasjekanim vlaknima i matricom pokazuje poboljšanu toplinsku stabilnost kompozita [14].



Dinamička mehanička svojstva uzoraka od čistog PLA i CFRP kompozita su izmjerena pomoću DMA. Na slici 26 se nalazi analiza modula pohrane i tangencije gubitka. Tangencija gubitka je omjer modula gubitka i modula pohrane, što opisuje viskoznost i elastičnost materijala [14].

Modulus pohrane dolazi do najveće vrijednosti, pa se smanjuje kako temperatura raste, što je vidljivo na slici 26. Vrh krivulje tangencije gubitka je tranzicija temperature materijala ( $T_g$ ). To pridodaje povećanju molekularne mobilnosti polimera. Modul pohrane kod PLA s 15% udjela ugljičnih vlakana pokazuje veliki pomak u odnosu na uzorke čistog PLA. Razlog je to što krutoća primjerka raste povećanjem ugljičnih vlakana u PLA, a prijenos pritiska se vrši na razini matrice vlakna. Niža vrijednost inicijalnog modula pohrane kod 20% udjela ugljičnih vlakana u usporedbi s 15% je sličan rezultatima testa savijanja. To je tako zbog prevelike količine nasjeckanih ugljičnih vlakana u rastopljenoj PLA matrici tijekom tiska. Prevelika količina može imati loš utjecaj na matricu, što može dati defektan konačan rezultat otisnutog predmeta [14].



Slika 26: Modul pohrane i tangencija gubitka kod 3 isprintana primjerka

### 5.1.9 Termogravimetrijska analiza

Oko 2% promjenjivog materijala se nalazilo u kompozitu. Došlo je do degradacije od jednog stupnja. Maksimalna se degradacija odvija između 300°C i 400°C. Gubitak viška težine se događa između 400°C i 600°C bez mnogo toplinske degradacije. Ostatak degradacije je dovršen nakon 600°C. Temperaturni vrhunac degradacije za uzorke s 3 razine udjela ugljičnih vlakana je sljedeći: 365°C za 12%, 375°C za 15% te 360°C za 20%. Iz toga doznajemo da je toplinska stabilnost najpovoljnija kod PLA kompozita s udjelom ugljičnih vlakana od 15% [14].

Tablica 4. termogravimetrijska analiza za PLA s različitim udjelima ugljičnih vlakana

| Test                | jedinica | PLA+12%CF | PLA+15%CF | PLA+20%CF |
|---------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| promjenjivi sadržaj | postotak | 2.220     | 2.360     | 2.006     |
| polimerski sadržaj  | postotak | 86.18     | 82.684    | 90.439    |
| ugljični sadržaj    | postotak | 11.6      | 14.956    | 7.555     |

Odgovarajuće vrijednosti u postotcima nakon odstranjivanja viška iz PLA su 11.6% za 12%, 14.95% za 15% te 7.55% za 20%, što je vidljivo u tablici 4 iznad. Otkriveno je da je kod CFRP kompozita s 20% udjela ugljičnih vlakana odstranjeno najviše viška [14].

### 5.1.10 Zaključak za ugljična vlakna i PLA

U ovom su eksperimentu pripremljeni CFRP kompozitni filamenti kombiniranjem ugljičnih vlakana i PLA procesom ekstruzije. Pokusi dodavanja udjela ugljičnih vlakana u raznim količinama u PLA su pokazali da se mogu postići bolja mehanička svojstva kod FDM isprintanih dijelova. Istražene su i promjene kod vlačne čvrstoće, kao i čvrstoće savijanja za svaki primjerak. Izod testom i testom mikročvrstoće se istražila tvrdoća predmeta i udarna snaga svakog primjerka. TGA i DMA testovima se došlo i do informacija o promjeni toplinsko mehaničkih svojstava, a zaključci su sljedeći[14]:

- Dodavanjem ugljičnih vlakana u iznosu od 15% u čisti PLA može povećati vlačnu čvrstoću za 32%, a čvrstoću savijanja za 22% u usporedbi s čistim PLA. Uzorak s 15% udjela ugljičnih vlakana je također imao i najbolju srednju vrijednost vlačne čvrstoće kao i čvrstoće savijanja. Srednja vrijednost ovih svojstava je bila manja kod uzoraka s 20% udjela [14].
- Čisti PLA nema veliku tvrdoću, ali ona se povećava za 85% kada se doda 20% ugljičnih vlakana, dok je kod primjeraka s 15% udjela primijećeno povećanje tvrdoće od 20% [14].
- Udarna čvrstoća čistog PLA je bolja od 12% i 15% udjela ugljičnih vlakana. Kompozit PLA s 20% udjela ugljičnih vlakana pokazuje bolja svojstva, odnosno udarna čvrstoća je povećana za 53% u odnosu na čisti PLA [14].

- Pojačanje ugljičnim vlaknima od 15% povećava modul pohrane za 18% i staklenu tranziciju temperature za 3°C u usporedbi s čistim PLA. Modul pohrane i staklena tranzicija temperature se povećavaju s povećanjem udjela ugljičnih vlakana do 15%, a iznad toga se smanjuju. CFRP kompozit s 15% udjela ugljičnih vlakana ima bolju toplinsku stabilnost i bolju povezanost vlakna i matrice [14].

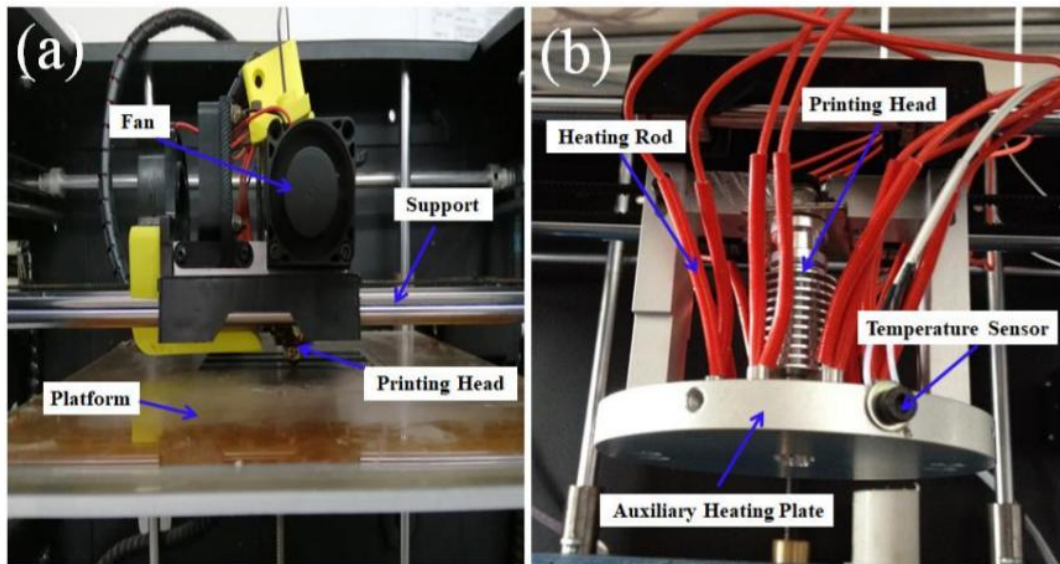
- Temperaturna degradacija kod 15% udjela ugljičnih vlakana je viša u odnosu na udjele od 12% i 20%. Kod 12% i 15% gubitak ugljičnih vlakana je malen, dok je kod 20% vrlo velik [14].

## **5.2 Ugljična vlakna i ABS**

Ovo potpoglavlje detaljno objašnjava eksperiment miješanja ugljičnih vlakana s ABS-om kako bi se dobio novi, potencijalno bolji kompozitni materijal za upotrebu u FDM 3D tisku.

### **5.2.1 Priprema procedura za eksperiment**

Materijali su kratki CF/ABS kompozitni filamenti s prosječnim promjerom od 1.75mm. Prah ugljičnih vlakana ima prosječnu duljinu vlakna od 100 µm i promjer od 7 µm. Za tisak CF/ABS-a je upotrijebljen novi, neuobičajeni FDM 3D printer prikazan na slici 27. U usporedbi sa standardnim FDM 3D printerom, ovaj ima pomoćnu grijaću ploču koja se može micati skupa s glavom printera. Promjer pomoćne grijaće ploče je 150mm, a zagrijava se elektroničkim putem. PID (Proportion, Integration, Differential) kontrolna tehnika upravlja temperaturom zagrijavanja. PID upravljačka jedinica upravlja grijaćom šipkom koja zagrijava ploču postepeno od sobne do željene temperature. Tijekom procesa tiska, senzor i termoelektrična baterija povezana s PID upravljačem se brinu da temperatura ne varira. Parametri procesa tiska su sljedeći: promjer dizne je 0.4mm, kvaliteta tiska je 0.2mm za svaki sloj, brzina tiska je 50mm/s za sloj, gustoća ispune je 100%, orijentacije ispune su 0°, 45° i 90° i nezavisne su, temperatura dizne je 230°C, temperatura platforme je 100°C, a temperature grijane ploče su 80°C, 160°C i 240°C [15].

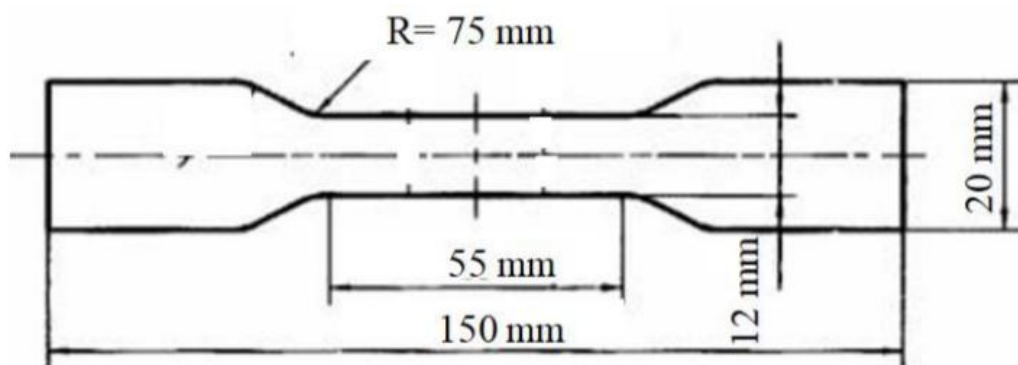


Slika 27: Usporedba standardnog FDM printera (a) i posebnog FDM printera korištenog u ovom eksperimentu (b)

Peć za sušenje LVO-LC-0B je upotrijebljena za prekaljivanje. Proces prekaljivanja se odvio na sljedeći način: nakon što je FDM dio isprintan, odmah je stavljen u peć postavljenu na 150°C na pola sata, nakon čega je prirodno ohlađen na sobnoj temperaturi. Razlog za odabir temperature od upravo 150°C i vremena od pola sata je taj što se na ovaj način isprintalo 5 uzoraka koji su pokazali dobra mehanička svojstva i slabo iskrivljenje [15].

### 5.2.2 Procedure mjerenja

ISO 527-2:2012 (E) standard je praćen za vlačni test. Dimenzije upotrijebljenog uzorka za testiranje vlačne čvrstoće su tip-1BA, a prikazane su na slici 28. Debljina primjerka je bila 4mm. Brzina vlačnog testa je bila 20mm/min. Vlačna čvrstoća različitih primjeraka je provedena na spravi za ispit materijala WDW5105. Testirano je 5 primjeraka za svaki uvjet tiskanja. Oštećene površine CF/ABS kompozitnih dijelova su proučene SEM mikroskopom JSM-7800F. Prijelazna temperatura CF/ABS kompozita je dobivena diferencijalnom kalorimetrijom skeniranja u rasponu od 50°C do 300°C u atmosferi s nitrogenom. Brzina skeniranja je bila 10°C min<sup>-1</sup>. Prijelazne su temperature izračunate TA programom za analizu [15].

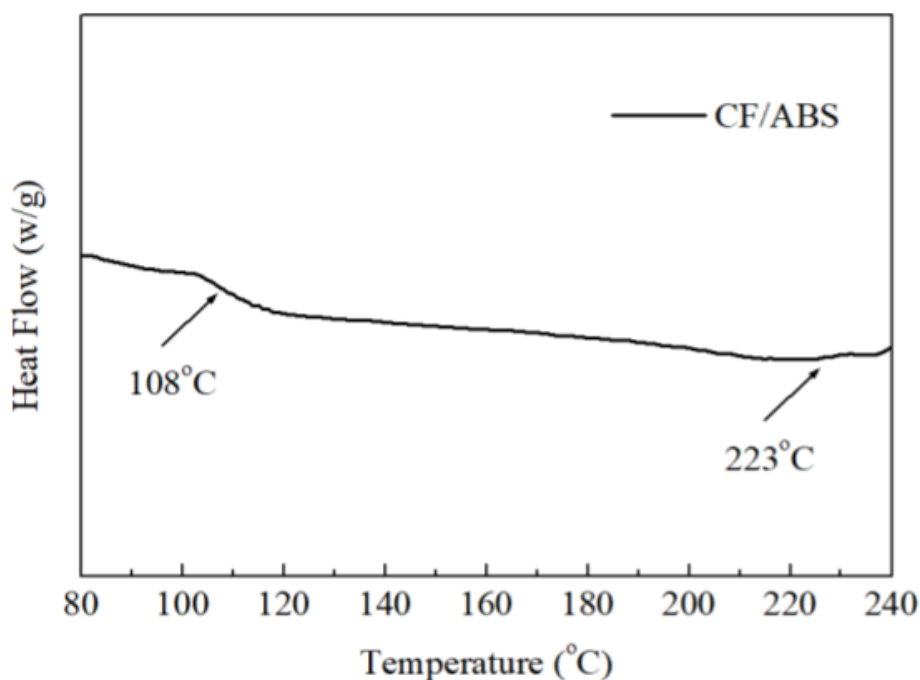


Slika 28: Dimenzije primjerka

Testovi cikličkog zamora su provedeni kalibriranim strojem za ispitivanje mehaničkih svojstava 12ZP-15, Z020. Svo testiranje je provedeno pri sobnoj temperaturi od 25°C. Konstantna frekvencija od 1 Hz je iskorištena preko sinusnog vala. Po maksimalnoj vlačnoj sili CF/ABS primjerka od 0.5 kN, izabrane su sile od 0.15, 0.25 i 0.35 kN. 5 primjeraka je testirano [15].

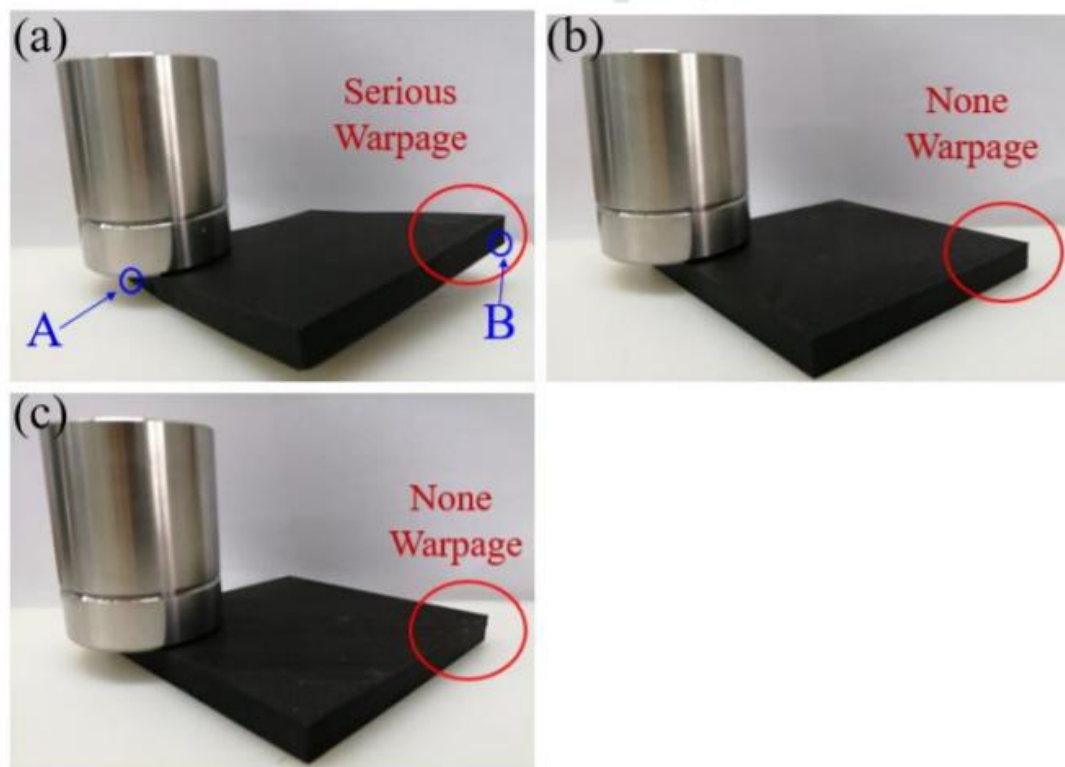
### 5.2.3 Utjecaj pomoćnog grijača i prekaljivanja

Svrha pomoćne grijaće ploče je kako bi se područje printanja prethodno zagrijalo, te kako bi se odgodilo hlađenje oformljenog područja. Temperature pomoćne ploče se određuju sukladno sa stanjem toka CF/ABS kompozita. Kao što vidimo na slici 29, CF/ABS kompozit ima velik raspon temperature za obradu, uglavnom od 160°C do 220°C [15].



Slika 29: DSC krivulja CF/ABS kompozita

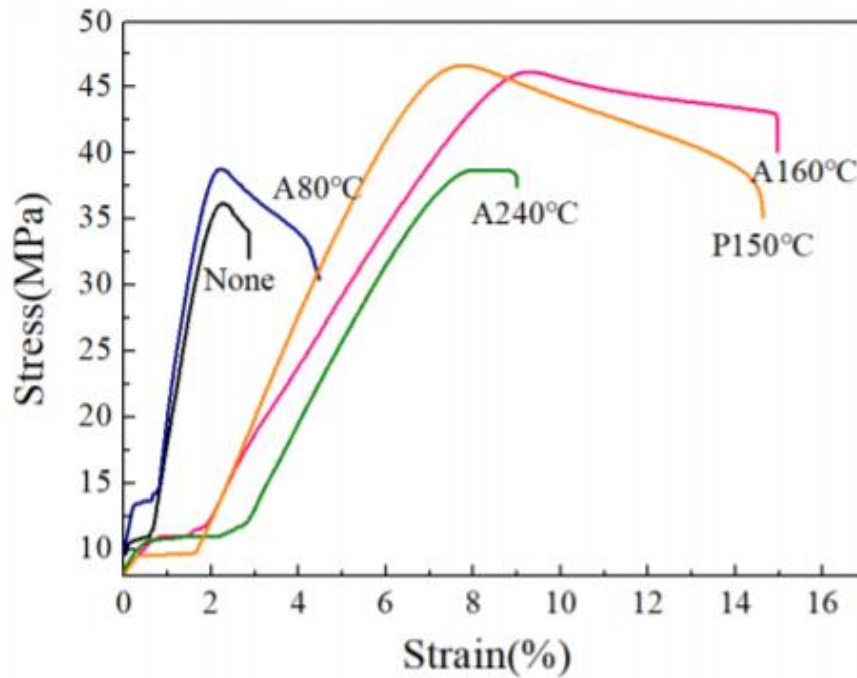
$T_g$  (prijelazna temperatura stakla) ABS-a je oko  $100^\circ\text{C}$ , a  $T_d$  (temperatura degradacije) ABS-a je otprilike  $220^\circ\text{C}$ . Zbog toga su temperature pomoćne grijače ploče postavljene na  $80$ ,  $160^\circ\text{C}$ , i  $240^\circ\text{C}$ . Kako bi se otkrilo da li se pomoćnom grijaćom pločom uistinu može smanjiti izobličenje 3D isprintanih predmeta iz CF/ABS kompozita, dijelovi dimenzija  $100\times 100\times 100\text{mm}$  su proizvedeni tradicionalnim FDM-om, kao i alternativnim FDM-om s pomoćnim grijanjem. Slika 30 prikazuje izobličenje FDM isprintanog predmeta. Ugao djela pridržava uteg (točka A), a suprotni kraj je podignut. Vertikalna udaljenost ( $l_d$ ) od točke izobličenja (točka B) preko horizontalne plohe je definirana kao kvantitativna mjera izobličenja. Vertikalna udaljenost FDM djela bez pomoćnog grijanja iznosi  $12.3\text{mm}$ , a vertikalna udaljenost FDM djela s pomoćnim grijanjem je samo  $1.7\text{mm}$ . Vertikalna udaljenost FDM djela s toplinskim prekaljivanjem nakon tiska je  $1.8\text{mm}$ . Rezultati pokazuju da dolazimo do najmanjeg izobličenja kod upotrebe pomoćne grijače ploče, te nakon toga dio pošaljemo na prekaljivanje [15].



Slika 30: FDM isprintani dijelovi: (a) bez ikakvog grijanja, (b) pomoćna ploča zagrijana na  $160^\circ\text{C}$ , (c) prekaljivanje na  $160^\circ\text{C}$

#### 5.2.4 Utjecaj pomoćnog grijača i prekaljivanja na mehanička svojstva

Rezultati ispita vlačne čvrstoće CF/ABS kompozita izrađenih uz pomoćni grijač i prekaljivanje uz kut rastera od  $0^\circ$  su prikazani na slici 31.

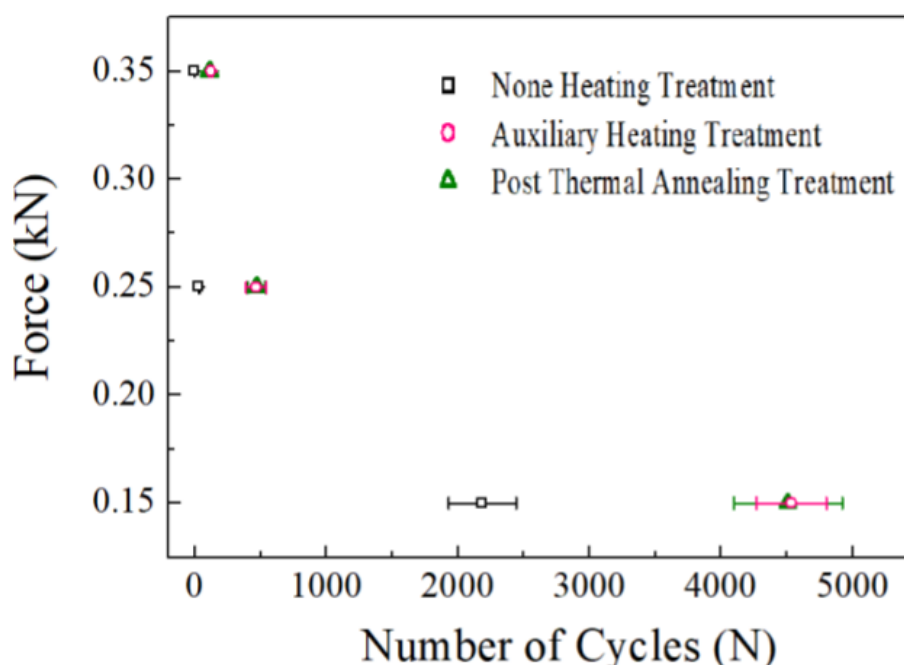


Slika 31: Krivulje rezultata vlačnih testova primjeraka

Slika 31 pokazuje da su vlačna čvrstoća i rastegljivost CF/ABS kompozita bez dodatnog grijanja kod proizvodnje manji u odnosu na primjerke s dodatnim grijanjem i prekaljivanjem. U usporedbi s uobičajenim krivuljama naprezanja kod primjeraka proizvedenih bez dodatnog grijanja, vlačna čvrstoća i rastegljivost su gotovo nepromijenjeni kod niže pomoćne temperature od 80°C. Jedno moguće objašnjenje je vezano za  $T_g$  ABS-ove matrice - pomoćna temperatura grijača od 80°C je preniska da bi se postiglo povezivanje između susjednih traka. Kada se pomoćna grijača temperatura s 80°C podigne na 160°C, vlačna čvrstoća raste s  $38.4 \pm 1.5$  MPa na  $46.1 \pm 1.4$  MPa, i onda pada na  $39.5 \pm 1.5$  MPa kad pomoćna temperatura prekorači 240°C. Iz toga zaključujemo da je 160°C idealna temperatura za dobivanje najpovoljnijih rezultata po pitanju svojstava vlačne čvrstoće. Povrh toga, u usporedbi s CF/ABS kompozitima isprintanih bez pomoćnog zagrijavanja, prosječna rastegljivost i žilavost se mogu dodatno poboljšati dodatkom pomoćnog procesa grijanja kako bi se dobio kompozitni otisak visoke kvalitete. Preciznije rečeno, prosječna žilavost CF/ABS kompozita proizvedenog s pomoćnim grijanjem od 160°C je gotovo 5 puta bolja u usporedbi s istim kompozitom proizvedenim bez dodatnog zagrijavanja. Međutim, podizanje temperature na 240°C je nepogodno za vlačna svojstva predmeta pošto uzrokuje degradaciju ABS-ove matrice. U uvjetima kuteva rastera od 0°, 45° i 90°, vlačna čvrstoća i žilavost CF/ABS kompozita imaju jednak trend [15].

Na temelju rezultata testova vlačne čvrstoće primjeraka CF/ABS-a, najveća se snaga pokazala pod kutem od  $0^\circ$  s pomoćnim zagrijavanjem od  $160^\circ\text{C}$  (površina primjerka tijekom procesa tiska je  $150^\circ\text{C}$ ). Kako bi se usporedila razlika u jačinama primjeraka proizvedenih uz pomoćni grijač i primjeraka koji su prošli proces prekaljivanja, proizveden je primjerak pod kutem od  $0^\circ$  koji je podvrgnut prekaljivanju pri  $150^\circ\text{C}$ . Vlačna čvrstoća primjerka proizvedenog prekaljivanjem je  $46.4 \pm 1.5$  MPa, a rastegljivost  $14.6 \pm 0.4\%$ . Vlačna čvrstoća predmeta proizvedenog uz pomoć pomoćnog grijača je  $46.1 \pm 1.4$  MPa, a rastegljivost  $15.1 \pm 0.3\%$ . Radi se o maloj razlici u rezultatima između proizvoda pomoćnog grijača i prekaljivanja. Iz toga zaključujemo kako pomoćno grijanje daje skoro jednake rezultate kao i prekaljivanje [15].

Ciklički zamor je ključan parametar kod evaluacije mehaničkih svojstava FDM isprintanih dijelova. Utjecaj pomoćnog zagrijavanja i prekaljivanja na zamor CF/ABS-a je daljnje proučen. Na slici 32 vidimo kako se ciklički zamor CF/ABS primjerka značajno povećava pomoćnim zagrijavanjem i prekaljivanjem [15].



Slika 32: Ciklički zamor CF/ABS primjeraka

Razlog tomu je što toplinska obrada može poboljšati mobilnost polimernih makromolekula, što omogućava bolje poslagivanje segmenata i formaciju usklađene faze. Materijal veće snage se uglavnom može dobiti nakon prekaljivanja, i važno je znati da to ima jednak utjecaj kao i pomoćno grijanje. Međutim, postoji ograničenje veličine kalupa za prekaljivanje, prema tome mogao bi nastati problem kod većih dijelova. Pomoćno zagrijavanje se odvija tijekom samog procesa 3D tiska, što miče ograničenja veličine kalupa za prekaljivanje [15].

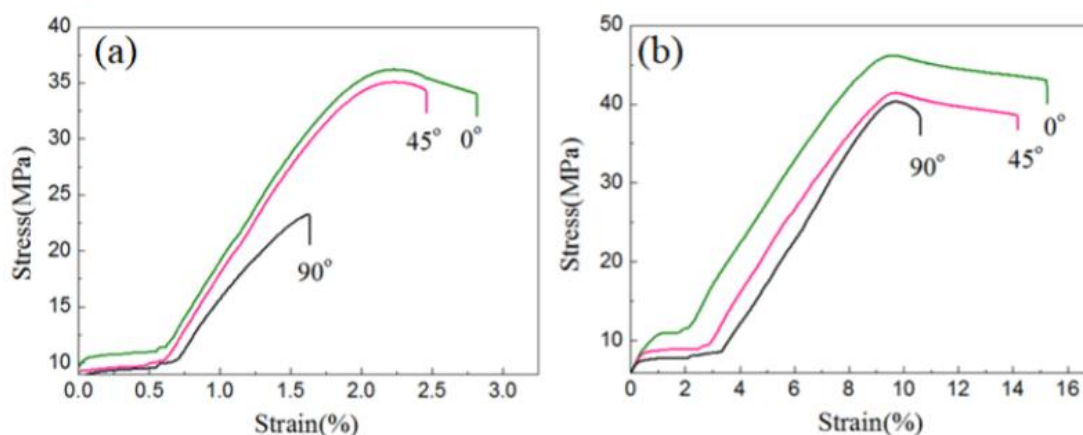


## 5.2.5 Utjecaj kuta rastera na vlačna svojstva

Mehanička anizotropija FDM dijelova je ovisna o orijentaciji filameta, odnosno kutovima rastera. Rasterski kutovi su postavljeni na  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$ . Pri temperaturi  $160^\circ\text{C}$  pomoćnog grijača, proizvedeno je po 5 dijelova za svaki kut rastera [15].

Vlačna svojstva CF/ABS kompozita su dobivena kako bi se evaluirali utjecaji pomoćnog grijanja i kuta rastera na mehanička svojstva. Vlačna čvrstoća i rastegljivost CF/ABS dijelova su značajno povećani pomoćnim zagrijavanjem. X-orijentacija (kut rastera od  $0^\circ$ ) pokazuje veću vlačnu čvrstoću i rastegljivost u usporedbi s ostalim orijentacijama, odnosno  $45^\circ$  i  $90^\circ$ . Povrh toga, kroz proces pomoćnog zagrijavanja, velika praznina u vlačnim svojstvima primjeraka s drugim orijentacijama je smanjena [15].

Vlačna svojstva ne ovise samo o samom materijalu, već i o stilu gradnje i orijentacijama. Postoje razlike kod vlačne čvrstoće i rastegljivosti CF/ABS kompozita, ovisno o kutovima rastera. S kutom rastera od  $0^\circ$ , istisnute linije filameta su poravnate X-orijentaciji što je dulja dimenzija primjerka, i to daje najveći otpor deformaciji pod pritiskom. S rasterskim kutom od  $90^\circ$ , istisnute linije su paralelne Y-orijentaciji što je okomito na najdulju stranicu primjerka, stoga je tada otpor prema deformaciji pod pritiskom lošiji. S kutom rastera od  $45^\circ$ , linije su pod kutem od  $45^\circ$  u odnosu na najdulju stranicu, što daje osrednji otpor prema deformaciji. Za CF/ABS kompozit, kut rastera ima vrlo značajan utjecaj na vlačnu čvrstoću i rastegljivost. Razlika je značajno smanjena nakon procesa pomoćnog grijanja, pogotovo pri  $160^\circ\text{C}$  [15].

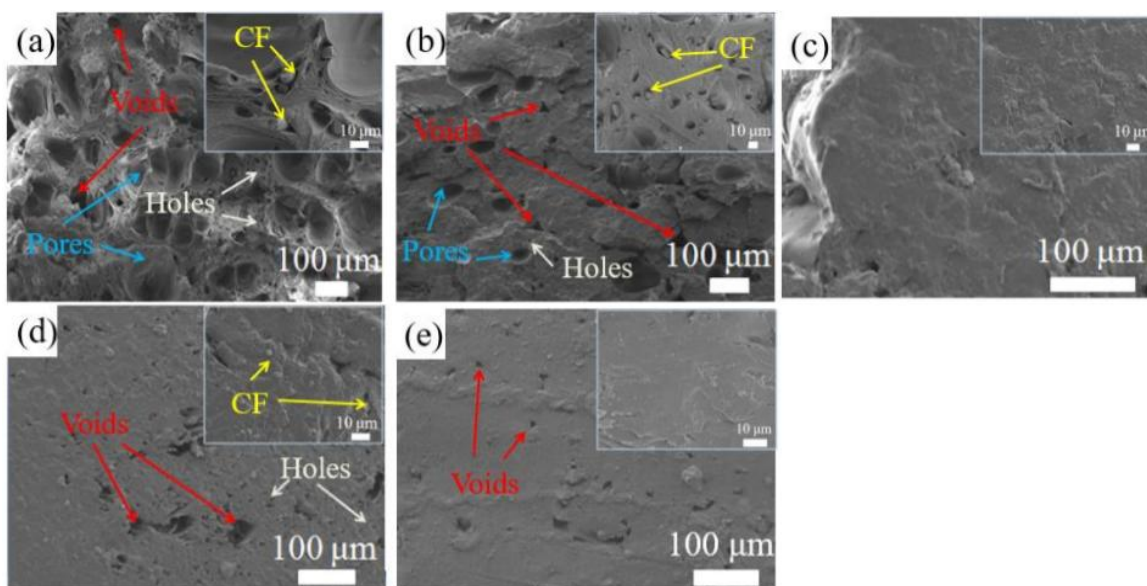


Slika 33: Krivulje naprezanja ovisno o kutu rastera: (a) bez pomoćnog grijanja, (b) s pomoćnim grijanjem od  $160^\circ\text{C}$

Razina mehaničke anizotropije se računa kao razlika između vlačnih čvrstoća primjeraka s različitim kutovima rastera. Što je manja razina anizotropije, bolja je homogenost primjerka. Nakon pomoćne toplinske obrade, razina anizotropije primjerka je smanjena s 0.34 na 0.11. To pokazuje da pomoćna toplinska obrada ne poboljšava samo mehanička svojstva, već i smanjuje anizotropiju [15].

### 5.2.6 Površinske anomalije kod primjeraka nakon pomoćnog grijanja i prekaljivanja

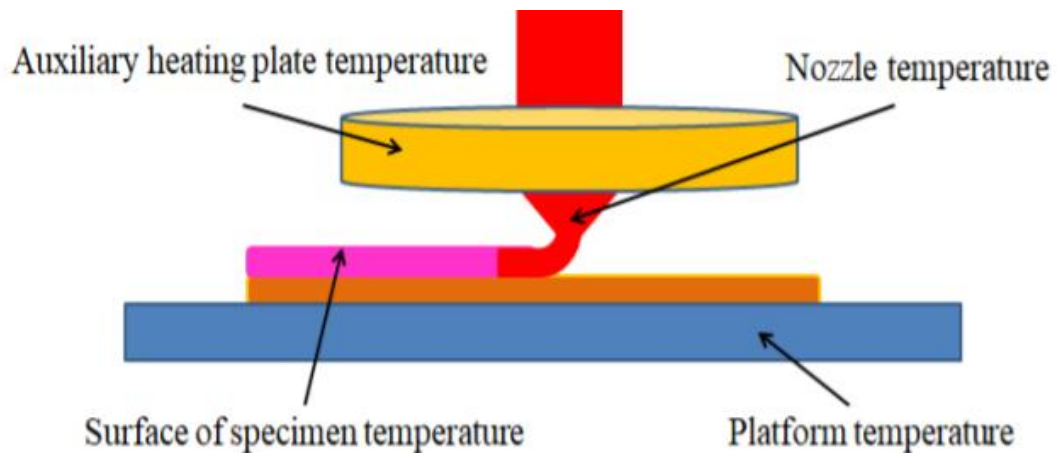
Površinske anomalije svakog FDM isprintanog primjerka su proučene pomoću SEM uređaja pod različitim razinama povećanja, kako je prikazano na slici 34.



Slika 34: Površinske anomalije primjeraka pod kutom od 0° nakon pomoćnog grijaćeg procesa: (a) bez pomoćnog grijanja, (b) 80°C, (c) 160°C, (d) 240°C, (e) prekaljivanje pri 150°C

Poroznost CF/ABS kompozitnog primjerka određuje njegova vlačna svojstva i izobličenje. Pri izradi 3D predmeta od CF/ABS kompozita FDM tehnikom, poroznost se pojavljuje na 3 različita načina, kao što je vidljivo na slici 34 (pore, praznine i rupe). Pore se uglavnom pojavljuju zbog pojave plinova prilikom istiskivanja CF/ABS kompozita. Praznine nastaju zbog fizičkog razmaka između slojeva tijekom nanosa novog sloja. Rupe se pojavljuju zbog izvučenih ugljičnih vlakana s površine uzorka. Vidi se kako je poroznost primjeraka spravljenih uz asistenciju pomoćnog grijača manja u odnosu na primjerak napravljen bez pomoćnog grijanja [15].

Tijekom FDM taloženja, proces vlaženja određuje područje koje dolazi u dodir s kuglicama, te jaka ovisnost temperature o viskoznosti polimera ograničava temperaturni doseg za formaciju veza između slojeva. Upotrijebljen je infracrveni termometar za mjerenje temperature primjerka za svaku temperaturnu točku 5 puta.  $\Delta T$  je definiran kao razlika između  $T_N$  (temperatura dizne) i  $T_S$  (površinska temperatura uzorka).  $\Delta T$  koristimo kako bi neizravno prikazali promjenu topljenja od dizne u usporedbi sa slojem koji se tiska, kako je prikazano na slici 35 [15].



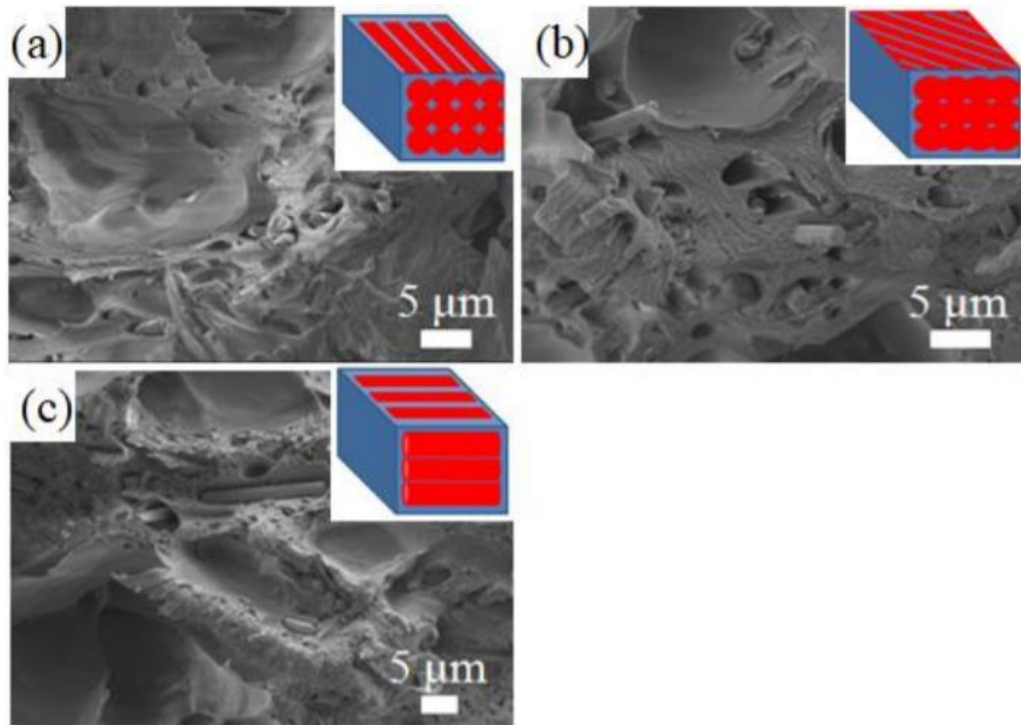
Slika 35: Shematski prikaz kategorizacije temperatura u FDM tisku

Veći  $\Delta T$  rezultira većom poroznošću i većem toplinskom naporu. Stvara koncentraciju toplinskog napora, što dovodi do izobličenja i smanjena mehaničke snage. Pokazalo se da proces pomoćnog grijanja smanjuje  $\Delta T$ . S pomoćnim procesom grijanja, molekularna mobilnost susjednih kuglica se povećava kako bi se postigla bolja difuzija CF/ABS kompozita, a poroznost primjerka se smanjuje kako bi se povećala vlačna svojstva. Međutim, zbog degradacije ABS-a pri visokim temperaturama, kada temperatura pomoćnog grijača prekorači  $240^{\circ}\text{C}$ , poroznost CF/ABS kompozita se ponovno počinje pojavljivati. Što se tiče CF/ABS primjeraka koji su prekaljivani, 3D isprintani slojevi su odlično međusobno pričvršćeni, te nisu zamijećena vidljiva oštećenja niti deformacije [15].

### 5.2.7 Površinske anomalije kod primjeraka uzrokovane različitim orijentacijama kuta rastera

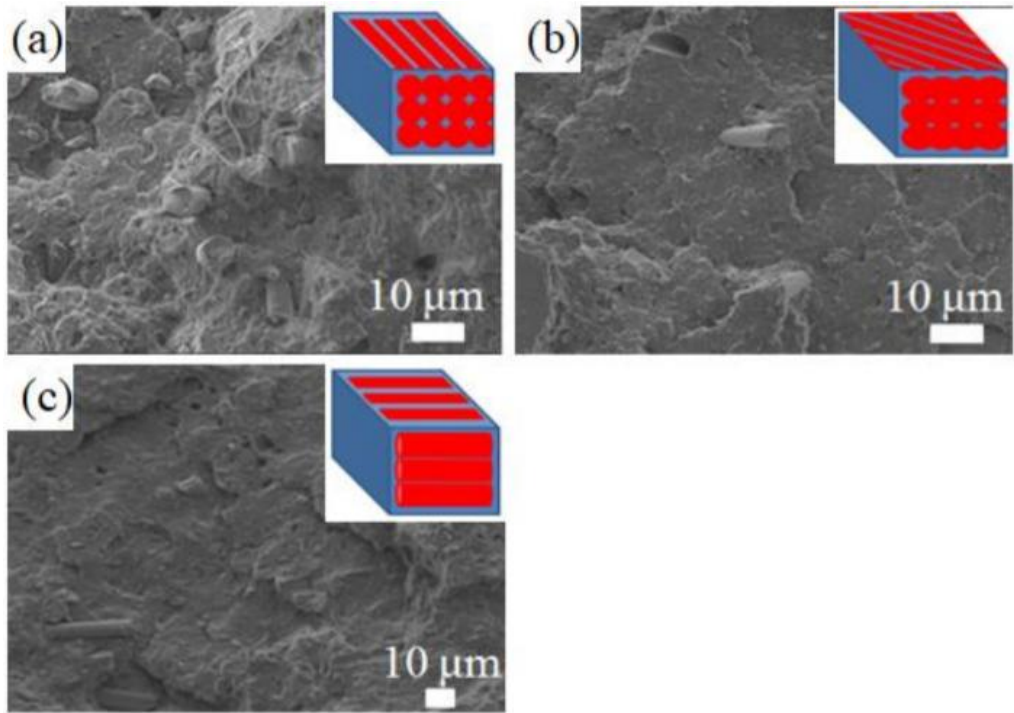
Proces vlaženja je ključan ako nam je važno poboljšati vlačna svojstva i smanjiti izobličenja FDM isprintanih dijelova. Ovaj proces određuje transverzalnu viskoznost prema orijentacijama kuglica i površinske napetosti isprintanog materijala. Postoje ogromne razlike između koeficijenta toplinske ekspanzije između ABS matrice i pojačanih ugljičnih vlakana. Ugljična vlakna imaju viši CTE nego ABS matrica. Zbog toga na toplinska svojstva CF/ABS kompozita

jako utječu orijentacije ugljičnih vlakana, koje ovise o poravnanju vlakana prilikom samog tiska. Na slici 36 vidimo da pod kutem od  $90^\circ$  ima mnogo više praznina i pora u odnosu na rasterski kut od  $0^\circ$ . To je ograničeno termomehaničkim efektom ugljičnih vlakana pri orijentaciji tiska, a nije zamijećeno kod transverzalnih orijentacija [15].

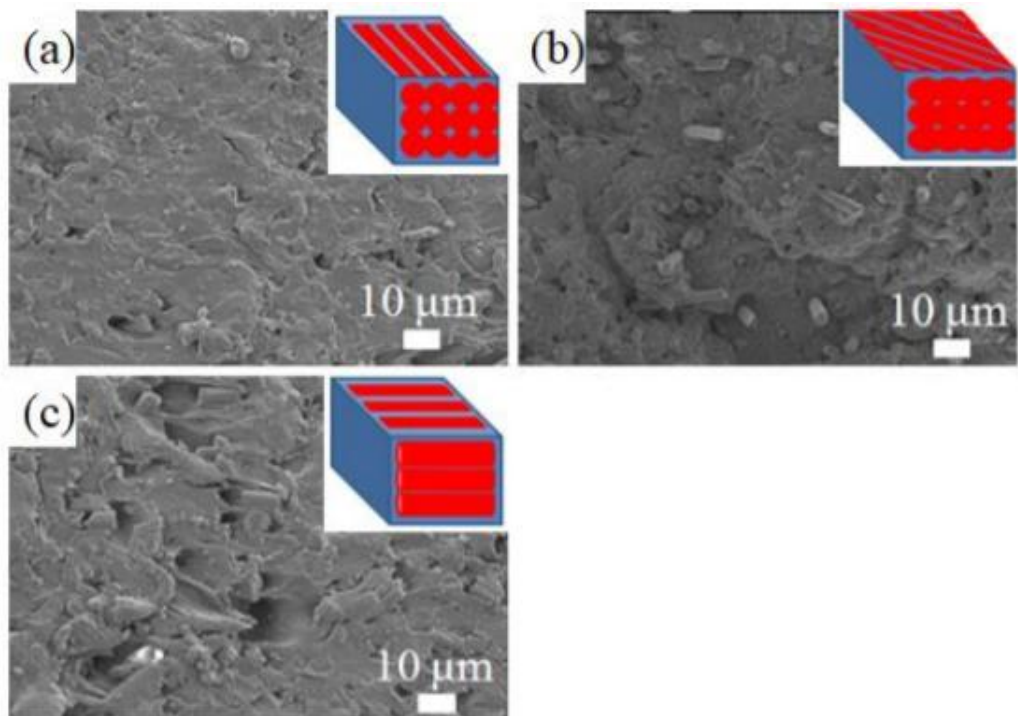


Slika 36: Površinske anomalije bez pomoćnog grijanja uz kuteve rastera od: (a)  $0^\circ$ , (b)  $45^\circ$  i (c)  $90^\circ$

Slike 36, 37 i 38 prikazuju kako je prosječna veličina praznina smanjena zahvaljujući procesu pomoćnog grijanja. Na slici 37 vidimo kako primjerci izrađeni s pomoćnim grijačem na  $160^\circ\text{C}$  ne pokazuju vidljivu poroznost, a na prethodnoj slici 36 vidimo kako postoje značajne pore na primjercima isprintanim bez pomoćnog grijanja. Ovaj se fenomen može pripisati povećanoj molekularnoj mobilnosti ABS matrice. Međutim, kada temperatura prekorači  $240^\circ\text{C}$ , pore se ponovno počinju pojavljivati, vidljivo na slici 38. Ove pore mogu uzrokovati točke koncentriranog napora, što dovodi do slabljenja vlačnih svojstava [15].



Slika 37: Površinske anomalije primjeraka izrađenih uz pomoćno grijanje od 160°C uz kuteve rastera od: (a) 0°, (b) 45° i (c) 90°



Slika 38: Površinske anomalije primjeraka izrađenih uz pomoćno grijanje od 240°C uz kuteve rastera od: (a) 0°, (b) 45° i (c) 90°

### 5.2.8 Zaključak za ugljična vlakna i ABS

Proučen je utjecaj pomoćnog grijanja i prekaljivanja na vlačna svojstva CF/ABS kompozita isprintanih FDM tehnikom 3D tiska. Analiza je obavljena vlačnim testovima te su primjerci proučeni SEM uređajem. Zaključci su sljedeći [15]:

- Kod FDM 3D tiska iz CF/ABS kompozitnih materijala, pomoćni grijači i prekaljivanje mogu učinkovito smanjiti iskrivljenja isprintanih predmeta. Vlačna svojstva i ciklički zamor CF/ABS primjeraka su podjednaki i kod izrade uz pomoćni grijač i kod primjene procesa prekaljivanja [15].
- Optimalna radna temperatura pomoćnog grijača je između  $T_g$  i  $T_d$  ABS-ove matrice. U slučaju da temperatura prekorači  $T_d$  ABS-ove matrice, vlačna čvrstoća i rastegljivost CF/ABS predmeta se ponovno smanjuje [15].
- Anizotropija CF/ABS primjerka se može značajno smanjiti pomoćnom toplinskom obradom [15]
- Poroznost CF/ABS kompozitnih dijelova se može odrediti procesom pomoćnog grijanja, međutim temperatura ne bi smjela prekoračiti  $T_d$  ABS-ove matrice kako bi se spriječio nastanak pora [15].

## 6. Metali

U prethodnom smo se poglavlju suzili na upotrebu ugljičnih vlakana za FDM 3D tisak, a u ovom idemo dalje s upotrebom metala.

### 6.1 Željezo/ABS i bakar/ABS

Ovo potpoglavlje detaljno objašnjava eksperiment miješanja željeza te bakra s ABS-om kako bi se dobili novi, potencijalno bolji kompozitni materijali za upotrebu u FDM 3D tisku.

#### 6.1.1 Priprema metal/ABS kompozita

Kako bi se razvili novi kompoziti od mješavina metala i polimera, željezni prah te bakreni prah su pomiješani s ABS prahom, i to u različitim udjelima (5%, 10%, 20%, 30% i 40%) s ciljem dobivanja dobrog filameta za upotrebu u FDM 3D tisku. Glavni razlozi zašto su za ovaj eksperiment izabrani upravo željezo i bakar su njihova solidna mehanička i toplinska svojstva, kao i njihova mogućnost lakog miješanja i povezivanja s polimerima. Čistoća oba metalna praha je 99.7%, dok je veličina čestice od 45 $\mu$ m upotrijebljena za željezo, a veličine 10 $\mu$ m i 45 $\mu$ m su upotrijebljene kod bakra. Gramatura željeznog praha je 7.88 gr/cm<sup>3</sup>, a oblik čestica je nepravilan za željezo, a sferičan za bakar [16].

Upotrijebljeni polimer je P400 akrilonitril butadien stiren (ABS) od Stratasysa. Ovaj ABS je upravo polimer kojeg Stratasys preporučuje za upotrebu za provedbe eksperimenata na njihovom FDM3000 stroju. Gramatura ovog ABS-a je 1.05gr/cm<sup>3</sup>. Za proizvodnju ABS mikročestica, dovoljna količina P400 filameta je pretvorena u kuglice na mehaničkoj sjeckalici. Nakon toga su ABS kuglice mljevene u sitan prah tehnikom kriogenog mljevenja. Tijekom ovog procesa, tekući nitrogen je zamrznuo ABS kuglice što je oslabilo njihovu molekularnu energiju. Ovaj proces ne oštećuje niti mijenja kemijski sastav materijala, prema tome radi se o vrlo učinkovitom procesu proizvodnje praha od polimera [16].

ABS kuglice su samljevene na veličinu čestica od 450-500 $\mu$  kako bi se dobila homogena mješavina metala i ABS-a. Željena veličina čestica ABS-a se dobila tako da se proces mljevenja odvijao 3 puta u intervalima od 5 minuta u kojima su se čestice rasporedile u veličinama od 450 do 500 $\mu$ m. Kompozitne mješavine su onda stavljene u homogenizator varijabilne brzine kako bi se dobila što je moguće homogenija raspodjela metalnog praha u ABS matrici. SEM slike primjeraka su analizirane kako bi se uvjerali da je homogena mješavina postignuta. Na kraju je mješavinama dodana vrlo malena količina surfaktanta. Prema nekim prijašnjim istraživanjima,

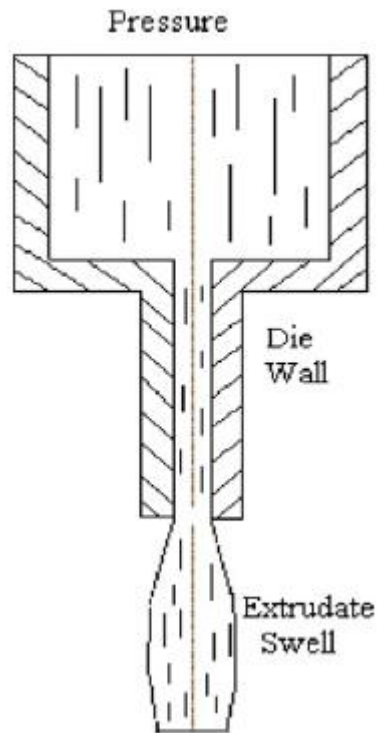
dodatak surfaktanta je povećao homogenu raspodjelu metalnih čestica u polimernoj matrici. Surfaktant dolazi u kontakt s česticama metala, što smanjuje visoko energične površine metala, i to u konačnici daje puno manju napetost između kompozitnih čestica u fazi topljenja. Čestice metala premazane surfaktantom sa slabom energijom se dobro povezuju s česticama polimera [16].

### **6.1.2 Proizvodnja FDM filamenata**

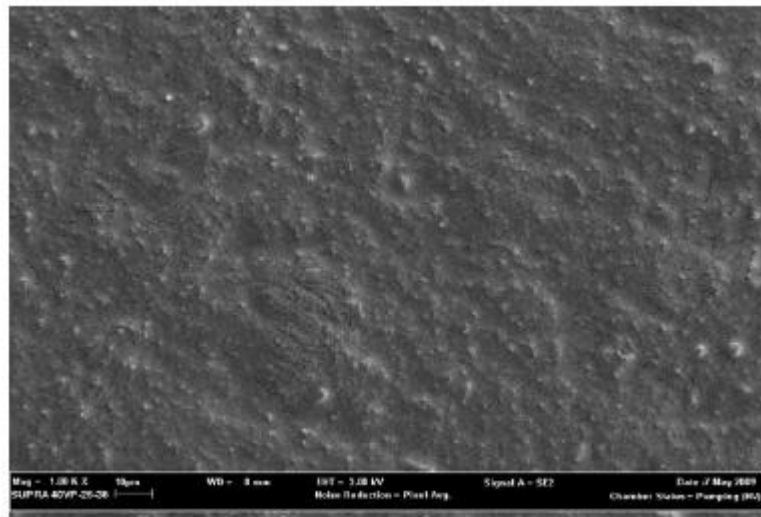
Da bi se FDM 3D tiskom proizveo predmet od novog kompozita, potrebno je napraviti filament za FDM stroj. Potrebna količina kompozitnog materijala mora imati točno određenu količinu svakog elementa, što u ovom slučaju uključuje ABS, željezo i surfaktant. Količina svakog od ovih elemenata ovisi o potrebnoj količini filameta za FDM procesiranje. U ovom slučaju, količine elemenata su određene uzimajući u obzir CAD model koji će se koristiti [16].

Ekstruder s jednim šarafom je upotrijebljen za dobivanje filameta iz kompozitnih materijala. Filament za FDM mora biti specifične veličine, snage i svojstava. Tijekom procesa ekstruzije, fenomen nazvan “die swell” se pojavljuje, što znači da polimer po izlasku nabubri. Na slici 39 je taj fenomen jasno vidljiv. Elastično ponašanje polimera je većinski odgovorno za nabubranje. Događa se uglavnom zbog elastičnog oporavka deformacije metalno-polimernog kompozita i elastičnih svojstava rastopljenog polimera. Kako bi se ovaj efekt minimizirao, odnosno kako bi se dobio konzistentan promjer nakon ekstrudera primjeren za kasniju upotrebu na FDM stroju, razne varijable su podešene. One su: brzina šarafa, pritisak i temperatura, kao i optimizacija rubnih napora tijekom procesa istiskivanja. Kratak kalup će uzrokovati jako nabubranje, samim time duži kalup će ga smanjiti. U skladu s time, kalup je produžen s 5mm na 10mm što smanjuje nabubrenje. Zbog bubrenja, promjer upotrijebljenog kalupa je manji od promjera do kojeg se htjelo doći za sami filament. Promjer kalupa je 1.65mm, a filament do kojeg se došlo je spadao u domet od 1.78mm do 1.85mm zbog bubrenja. Samim time, geometrija kanala izlaznog toka je različita od geometrije potrebnog proizvoda. Upotrebom prave geometrije za kalup i dobrim postavkama, proizvedeni su željeni filamenti unutar granica tolerancije. Na slici 40 vidimo SEM sliku željeznog/ABS kompozita, te se vidi jednolika raspodjela željeznih čestica u ABS-ovoj matrici [16].





Slika 39: Shematski prikaz nabubravanja nakon ekstruzije



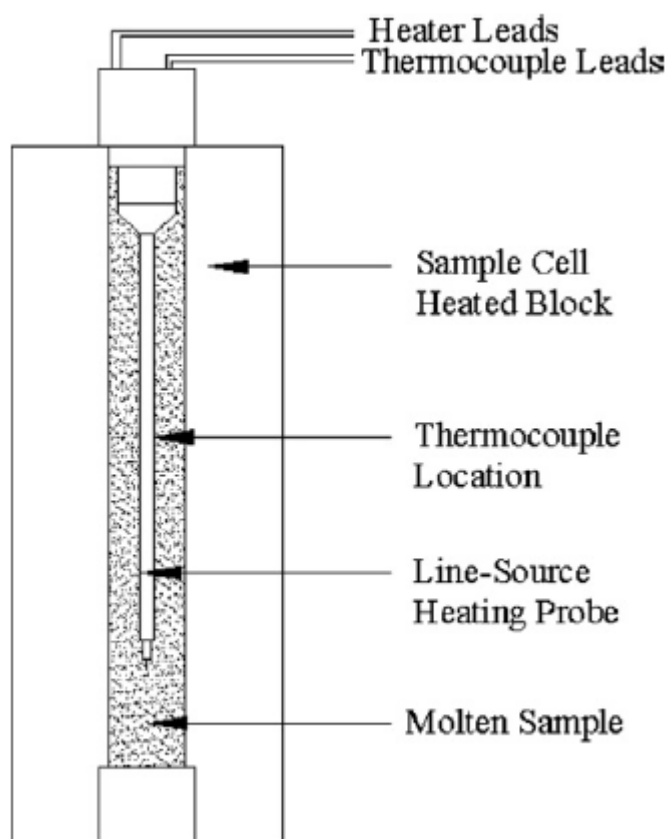
Slika 40: SEM slika željeznog/ABS kompozita zumiranog 1000x

### 6.1.3 Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost metalno-polimernih kompozita je vrlo važno svojstvo materijala, a određuje se različitim udjelima metalnih i polimernih materijala. Ovo je svojstvo pogotovo korisno za

dobro funkcioniranje kalupa za injekcijsko lijevanje. Životni vijek kalupa za injekcijsko lijevanje uvelike ovisi o vrijednosti toplinske vodljivosti materijala kalupa [16].

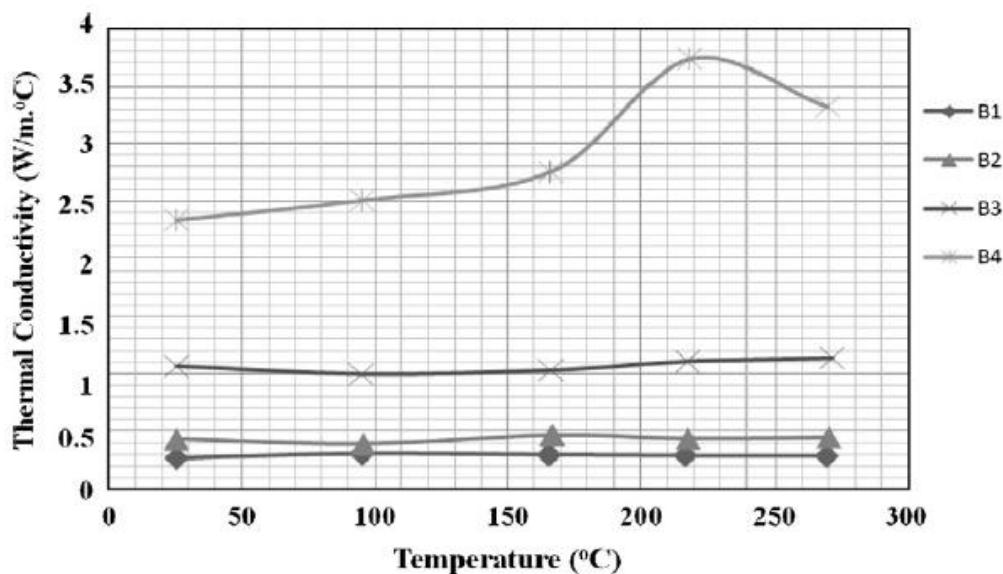
Testovi toplinske vodljivosti za kompozite su provedeni u Autodeskovom stroju u skladu s ASTM D5930 metodom testiranja. U ovoj metodi, toplinska se vodljivost mjeri prolaznim linijskim grijanjem kako je prikazano na slici 41 [16].



Slika 41: Shematski prikaz stroja za testiranje toplinske vodljivosti

Linijski grijač prolazi duž sonde s temperaturnim senzorom na sredini sonde. Određena količina vrućine ( $Q$ ) se šalje na linijski grijač. Kada se postigne temperaturna ravnoteža, promjena u temperaturi u senzoru se bilježi kroz vrijeme [16].

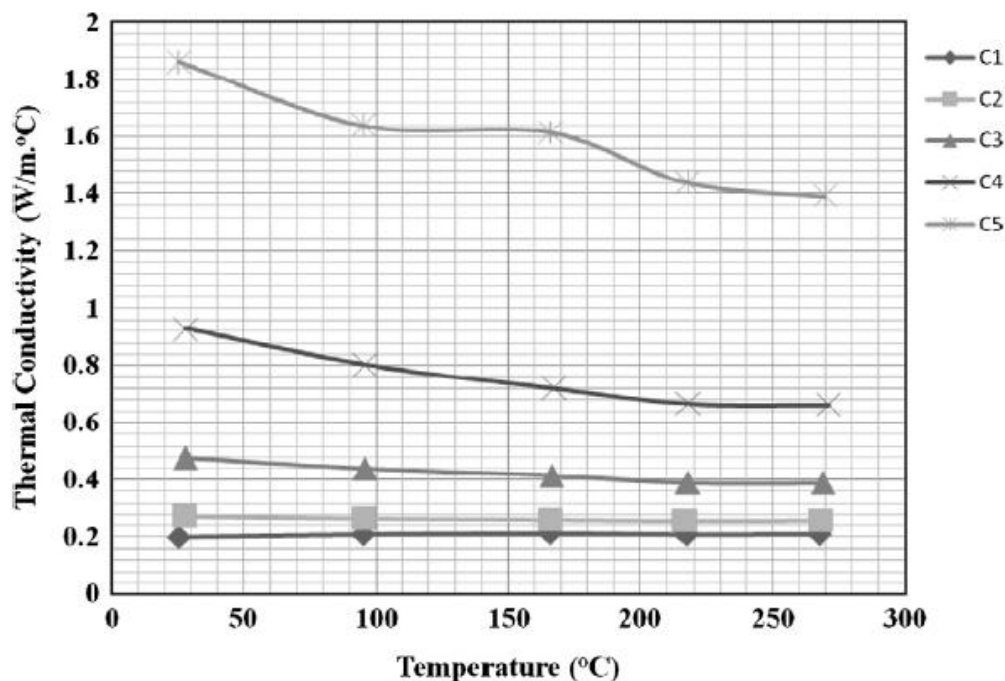
Na slici 42 vidimo varijaciju toplinske vodljivosti kompozita bakra i ABS-a s različitim udjelima metala pri različitim temperaturama. Vidljivo je da kod manjih udjela metalnih dopuna temperatura ima zanemariv utjecaj, dok kod veće koncentracije bakra, odnosno 30% iznad prijelazne temperature stakla, dolazi do značajnog povećanja toplinske vodljivosti kompozita od bakra i ABS-a. Vjeruje se da je to rezultat povećanja mobilnosti čestica u polurastopljenoj matrici pri temperaturama iznad prijelazne temperature stakla [16].



Slika 42: Toplinska vodljivost ABS-a s dodatkom bakra pri raznim temperaturama

Povrh toga, zamijećeno je da dodatak bakrenih čestica od svega 10% ne može utjecati na toplinsku otpornost matrice ABS-a, odnosno tek kod 20% koncentracije čestica lanci vodljivosti se počinju oformljavati, pa se toplinska vodljivost popravlja. Ovaj je efekt vrlo značajan za udio bakra od 30% gdje su čestične veze već oformljene i njihova mobilizacija je olakšana zbog promjene faze ABS matrice iz krutog stanja u tekuće stanje iznad prijelazne temperature stakla [16].

Slika 43 prikazuje toplinsku vodljivost ABS kompozita kojima je dodano željezo u različitim udjelima pri drugačijim temperaturama. U usporedbi s prethodnom slikom 42, utjecaj čestica željeza na toplinsku vodljivost ABS-a je slabiji u odnosu na čestice bakra. Toplinski otpor ABS matrice se značajno povećava samo kad koncentracija čestica željeza nadmaši 30%. Kod udjela 30%+, formacija veza metalnih čestica se počinje pojavljivati u matrici, te se tada toplinska vodljivost ABS-a značajno poboljšava [16].



Slika 43: Toplinska vodljivost ABS-a s dodatkom željeza pri raznim temperaturama

Važno je napomenuti da se toplinska vodljivost dobiva kroz molekularne vibracije i slobodno kretanje elektrona. Povrh toga, pošto je toplinska vodljivost željeza samo 380 puta veća od ABS polimera, vrućina ne putuje samo kroz željezne veze već i kroz samu polimernu matricu. Dodatnim povećanjem udjela željeza, razmak između čestica postaje vrlo malen. Stoga ima veliku vjerojatnost stvaranja učinkovitog kontakta sa susjednim česticama kako bi se oformile veze. Toplinska vodljivost čestica utječe na promjenu toplinske vodljivosti kompozita. Ako se udio čestica dopune približi maksimumu, može dovesti do toga da čestice ne mogu postići dobru, homogenu smjesu. Postojanje nakupina kod velikih količina može dovesti do praznina u kompozitu, što u konačnici smanjuje toplinsku vodljivost materijala [16].

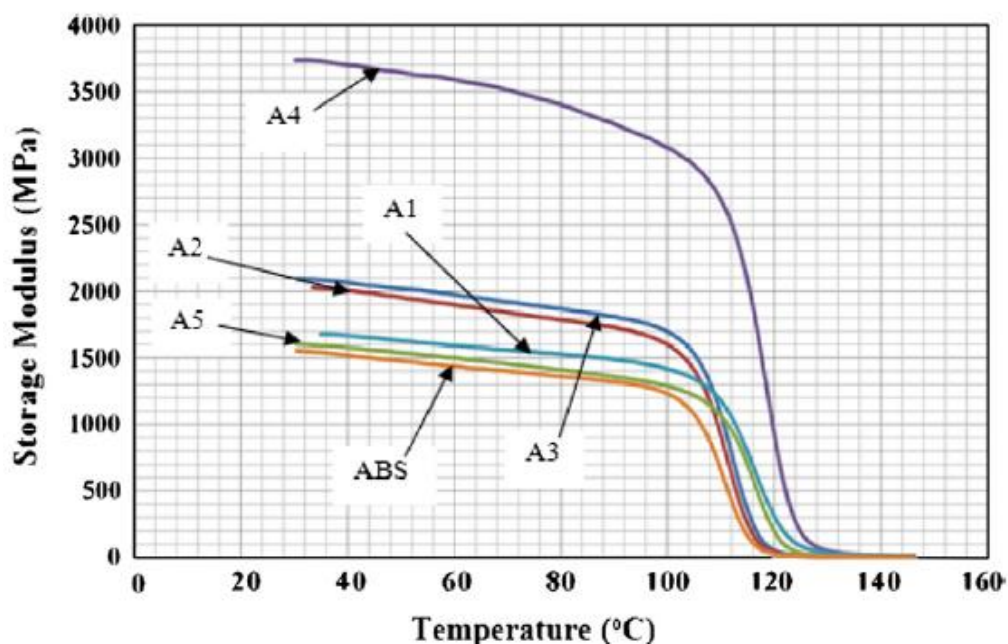
#### 6.1.4 Vrućinski kapacitet

Vrućinski kapacitet i vrućinski tok su izmjereni standardnom diferencijalnom kalorimetrijom moduliranom na  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  za svakih 40s s temperaturnim pomakom od  $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$  do  $150^{\circ}\text{C}$ . Pokazalo se da 10% željeza smanjuje vrućinski kapacitet ABS-a. Dodavanje željeznog praha potvrđuje trend smanjenja vrućinskog kapaciteta što znači da se toplinska vodljivost povećava za otprilike isti postotak. Povećanje toplinske vodljivosti je još jedna prednost novog materijala jer je precizan i pouzdan za skraćivanje ciklusa hlađenja kada se koristi kao materijal za alate za injekcijsko lijevanje [16].

### 6.1.5 Dinamička mehanička svojstva

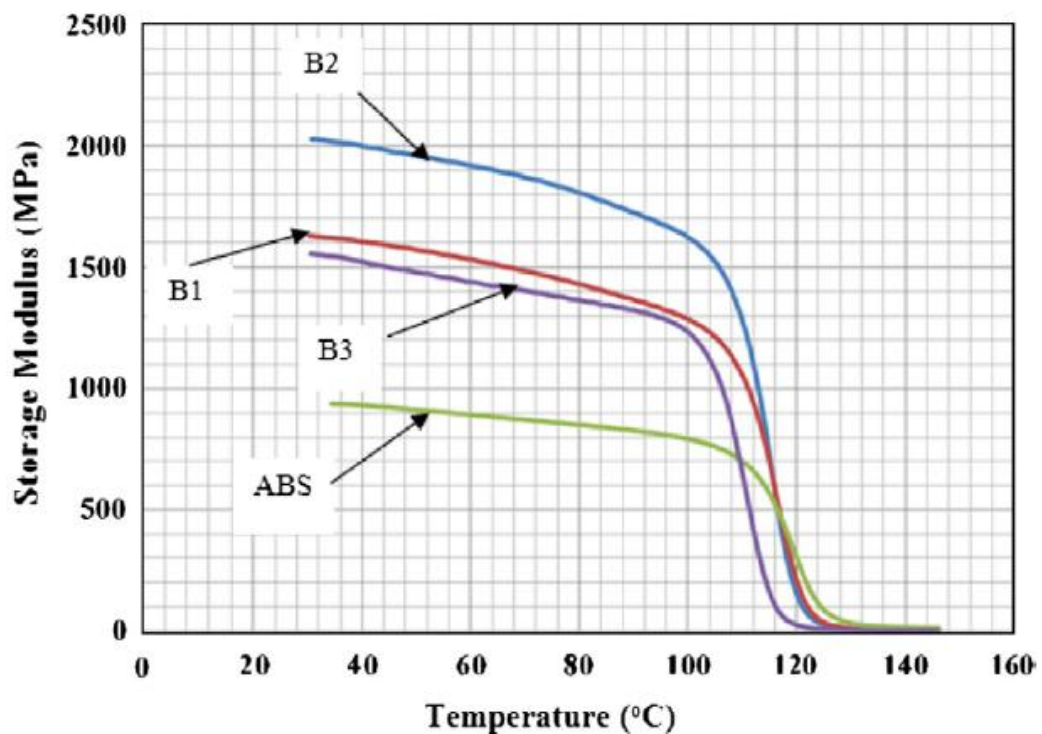
Dinamička mehanička analiza je provedena na multifrekvencijskom dvostrukom DMA uređaju što je idealan eksperiment za brzu usporedbu mehaničkih svojstava materijala poput modula pohrane i modula gubitka, kao i prijelazne temperature stakla. U ovoj se metodi materijal zagrijava konstantnom stopom i deformira se pri konstantnoj amplitudi i frekvenciji. Testni program upotrijebljen se sastojao od jedne frekvencije s amplitudom od  $15\mu\text{m}$ , temperaturnim prijelazom od  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  do  $150^\circ\text{C}$  [16].

Dinamički modul pohrane polimernih kompozita predstavlja elastičnost polimerne matrice i definira mogućnost kompozita da pohranjuje energiju u deformiranom stanju. Slika 44 prikazuje varijaciju mehaničkog odaziva krutog stanja raznih kompozita bakra i ABS-a u širokom temperaturnom rasponu. Ispod prijelazne temperature stakla u krutom stanju, postoji značajno povećanje modula pohrane kompozita kako se udio dopune povećava. Najveća vrijednost od otprilike 3.5-4 GPa pri sobnoj temperaturi se dobiva za modul pohrane kompozita bakra/ABS-a s 30% bakra (uzorak A4 na slici 44). Ovo dokazuje da se čestice bakra odlično povezuju s ABS matricom što povećava krutoću kompozita. Međutim, trend se preokreće za udio bakra veći od 30%. Pri velikim udjelima bakra, odnosno 40%, zbog značajne aglomeracije čestica (uzorak A5) i nakupljanja međučestičnih praznina, matrica postaje slabija [16].



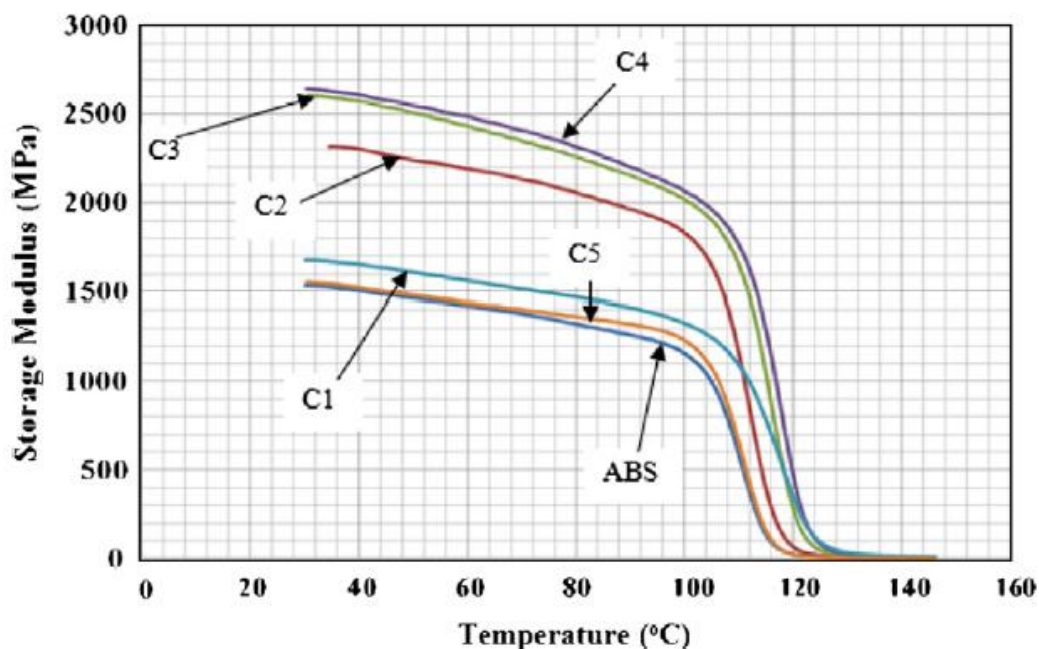
Slika 44: Modul pohrane raznih kompozita bakra/ABS-a uz veličinu čestica od  $10\mu\text{m}$

Slika 45 prikazuje dinamički mehanički odaziv bakrenih/ABS kompozita koji sadrže velike čestice bakra od 45 $\mu$ m pod temperaturnim promjenama. Primijećeno je da se modul pohrane kompozita povećava s povećanjem udjela bakra sve do udjela od 10%, ali se daljnjim povećanjem značajno smanjuje. Trend pokazuje manja ojačanja kod kompozita s velikim česticama, a razlozi tomu bi mogli biti slabije povezivanje i loše raspodjele dopune unutar matrice. Važno je napomenuti kako se tijekom pripreme ovih kompozita nije koristio nikakav dodatak za spajanje. Uglavnom se preporučuje upotreba nekog dodatka za spajanje kako bi se postiglo bolje povezivanje metalne nadopune i polimerne matrice. Najveći modul pohrane od otprilike 2 GPa se u ovom slučaju može postići upotrebom većih bakrenih čestica. Kompoziti s velikim udjelom velikih čestica bakra od 30% i 40% se nisu mogli ispitati zbog štetnog povezivanja između čestica i polimerne matrice [16].



Slika 45: Modul pohrane raznih kompozita bakra/ABS-a uz veličinu čestica od 45 $\mu$ m

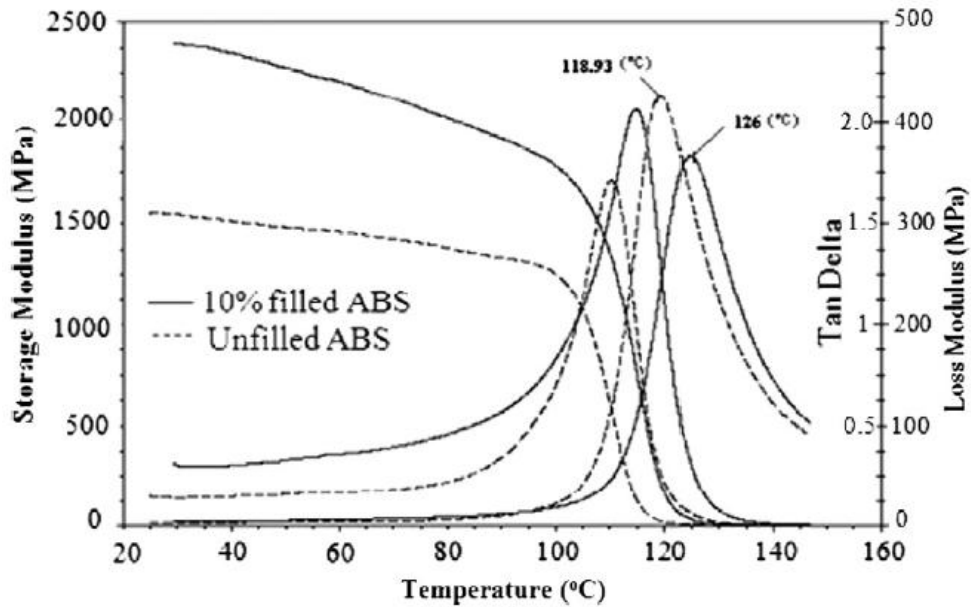
Na slici 46 je prikazana varijacija modula pohrane kompozita željeza i ABS-a pri različitim temperaturama. Slično kao i kod slučaja bakra, efekt pojačanja dodatkom željeznih čestica je jasan sve do 30% gdje modul pohrane željeznog/ABS kompozita dostiže doseg od 2.5-3 GPa pri sobnoj temperaturi, te zatim pada na modul pohrane ABS matrice. U usporedbi s bakrom iste veličine čestica, vrijednosti krutoće su mnogo veće za željezo/ABS, i to za 10-20% [16].



Slika 46: Modul pohrane raznih kompozita željeza/ABS-a uz veličinu čestica od 45 $\mu$ m

Krutoća sva 3 tipa kompozita dramatično opada kako se temperatura bliži prijelaznoj temperaturi stakla gdje matrični polimer prelazi iz krutog stanja u polutekuće stanje, pa se potencijal za vezanje čestica dopune i matrice smanjuje [16].

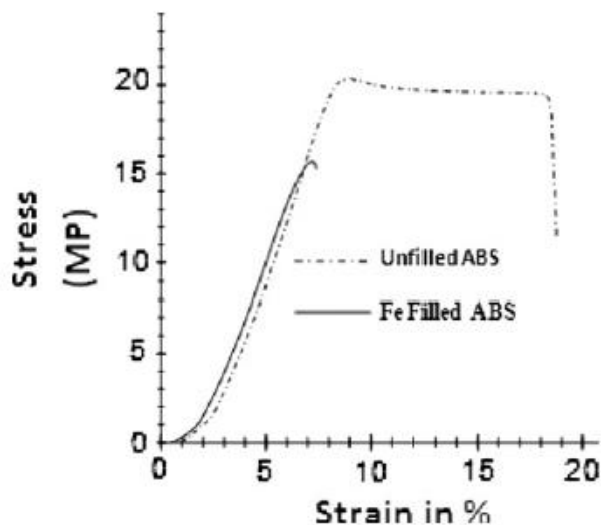
Kako bi vidjeli efekt ukrcavanja čestica na prijelaznu temperaturu stakla, slika 47 pokazuje usporedbu dinamičkih mehaničkih svojstava kompozita s 10% željeza (prikazanog punom crtom) i čistog ABS-a (prikazanog točkastom crtom). Kao što se vidi iz grafova, prijelazna temperatura stakla se pomaknula za 7°C za kompozitni materijal. Daljnjim povećanjem prijelazne temperature stakla, točka omekšanja novog kompozitnog materijala će biti viša, što pokazuje kako bi se novi materijal mogao koristiti za kalupe ili za injekcijsko lijevanje polimera i plastika s nižom točkom omekšavanja [16].



Slika 47: Usporedba mehaničkih dinamičkih svojstava čistog ABS-a i ABS-a s 10% nadopune željeznog praha

### 6.1.6 Ponašanje kompozita pod naporom

Za mjerenje maksimalnog opterećenja i produženja do točke pucanja, standardan vlačni ispit je proveden na Zwick/Z010 uređaju pri brzini od 50mm/min. Barem 3 uzorka su pripremljena za svaki test, a u obzir su uzete prosječne vrijednosti. Slika 48 prikazuje utjecaj željeznog praha na vlačnu čvrstoću i izduženje [16].



Slika 48: Utjecaj željeznih čestica na vlačnu čvrstoću matrice ABS-a

ABS kojem je dodano željezo ispada lomljiv i tvrd, sa slabim mogućnostima produženja. Tablica 5 ispod pokazuje usporedbu vrijednosti maksimalnog izduženja pri najvećem naporu i kod točke



pucanja zajedno s vrijednostima najvećeg opterećenja i opterećenja kod pucanja za čisti ABS i ABS s dodatkom željeza [16].

Tablica 5. usporedba ponašanja čistog ABS-a i ABS-a s dodatkom željeza pod naporom

| Uzorak    | $F_{\max}$ (N) | $F_{\text{break}}$ (N) | Break(mm) | $F_{\max}$ (mm) |
|-----------|----------------|------------------------|-----------|-----------------|
| Čisti ABS | 709.3          | 690.7                  | 2.06      | 2.02            |
| ABS+10%Fe | 609.9          | 344.9                  | 5.32      | 2.37            |

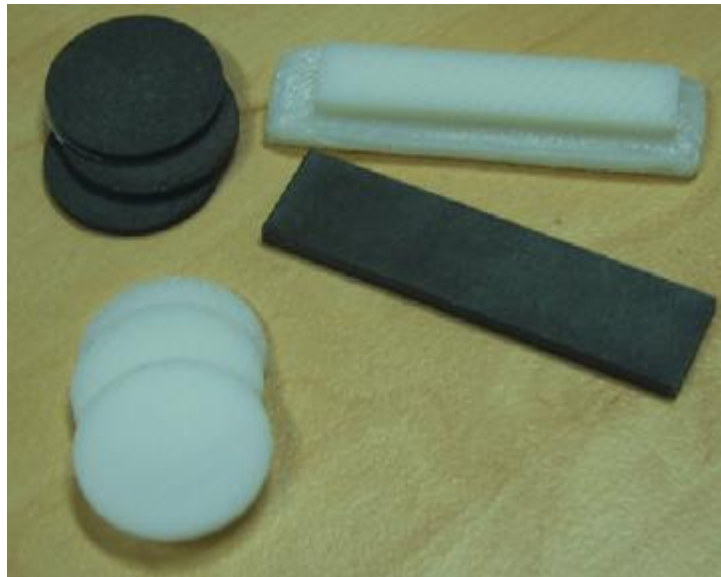
Iako se radi o maloj razlici kod izduženja pri najvećem naporu, poprima značaj kod točke pucanja. Vlačna čvrstoća jako pada kao posljedica dodatka 10% željeznog praha. Trenutna mješavina novog materijala ne sadrži nikakve aditive koji bi potencijalno mogli poboljšati povezivanje čestica željeza s polimernom matricom. Prema nekim drugim istraživanjima, postoje faktori koji utječu na integritet i dugotrajnost metalno-polimernih veza. Ti faktori su morfologija površinskog oksida na metalu i stabilnost oksidnih slojeva. Ovi problemi se istražuju kako bi se razvile jače veze metala i polimera. Uz poboljšanje toplinskih svojstava, također se može dobiti jača mehanička snaga [16].

### 6.1.7 Proizvodnja i primjena kompozita

Željezni/ABS filamentu sačinjeni od novog kompozitnog materijala su stavljeni u FDM3000 stroj i poslani u liquefier glavu za proizvodnju. FDM liquefier glava i FDM Quickslice program su upotrijebljeni bez modifikacija. U ranim fazama FDM procesa, pojavilo se nekoliko problema vezanih za varijaciju u veličini filamenta, preveliku količinu materijala, začepljenje dizne i delaminaciju nekoliko slojeva zbog prisustva plastifikatora. Svi su ovi problemi riješeni izradom ujednačenijeg filamenta, regulacijom količine plastifikatora i odabirom primjerenih vrijednosti FDM parametara poput debljine sloja, širine linije, uzoraka ispune i promjera dizne. U prvim pokušajima je vrijeme izrade predmeta iz novog materijala trajalo gotovo dvostruko dulje u odnosu na izradu istog predmeta od čistog ABS-a. Međutim, nakon izrade ujednačenijeg filamenta, vrijeme izrade je u konačnici ispalo gotovo jednako kao i kod običnog ABS-a [16].

Jedan od glavnih ciljeva ovog eksperimenta je razvoj novih metal/polimer kompozitnih materijala za izravnu uporabu u FDM-u s dugoročnim ciljem razvoja funkcionalnih dijelova.

Upotrebom takvih kompozita, otvara se mogućnost proizvodnje kalupa za injekcijsko lijevanje sa željenim toplinskim i mehaničkim svojstvima primjerenim za takvu upotrebu. Veća toplinska vodljivost novih metal/polimer kompozita u kombinaciji s hlađenim kanalima u proizvodnji po principu sloj po sloj će rezultirati smanjenoj cijeni izrade i uštedom vremena [16].



Slika 49: Testni uzorci proizvedeni novim kompozitom željeza i ABS-a

### **6.1.8 Zaključak za željezo/ABS i bakar/ABS**

Novi kompoziti za FDM 3D tisak su napravljeni dodavanjem željeznog i bakrenog praha u ABS. Fleksibilni filamenti novog kompozitnog materijala su proizvedeni i procesirani na FDM3000 stroju te su dobiveni dijelovi, odnosno uzorci. Zbog matrice bogate metalom, predmeti izrađeni od ovog materijala FDM 3D tiskom će biti krući u odnosu na predmete od čistih polimera, stoga će moći podnositi veće pritiske. Usporedba toplinske vodljivosti i dinamičkog mehaničkog testa novih kompozita pokazuje obećavajuću budućnost primjene novih materijala u funkcionalnim konačnim dijelovima [16].

## **6.2 Nehrđajući čelik/ABS**

Ovo potpoglavlje detaljno objašnjava eksperiment miješanja nehrđajućeg čelika i ABS-a kako bi se dobio novi, potencijalno bolji kompozitni materijal za upotrebu u FDM 3D tisku.

### **6.2.1 Materijali**

ABS kuglice su upotrijebljene za in-house proizvodnju ABS-a i ABS-SS (stainless steel, nehrđajući čelik) kompozitnih filamenata. Aceton je izabran kao otapalo za ovo istraživanje zbog

svoje kompatibilnosti s ABS-om i visokog tlaka pare, što mu omogućava da normalno ispari pri sobnoj temperaturi, što u konačnici daje kraća vremena sušenja u odnosu na ostala, manje isparljiva otapala. Prah nehrđajućeg čelika (420 SS; gustoća:  $2.83\text{g/cm}^3$ , sastav: 0.29 C – 0.33 O – 0.01 S – 0.02 N – 14.0 Cr – 0.62 Si – 0.07 Ni – 84.66 Fe) je upotrijebljen kao dodatak ABS-u. Pripremljena su 3 ABS kompozita s 3 različita udjela čeličnog praha, a ti udjeli su 10%, 15% i 23%. Pošto je do praha od sferičnih čestica teško doći i košta puno, upotrijebljen je nesferični, vodom atomizirani prah nehrđajućeg čelika. Nepravilna morfologija (najduža prosječna čestica je  $\sim 30\ \mu\text{m}$ ) dodatno olakšava povezivanje praha s polimernom matricom zbog povećane površinske gruboće i boljeg mehaničkog povezivanja [17].

### **6.2.2 Kompoziti i izrada testnih primjeraka**

Za početak proizvodnje ABS-SS kompozita, 60g ABS-a je stavljeno u staklenku od 300ml te je dodano  $\sim 150\text{ml}$  acetona, i to se na mahove miješalo kroz period od 48 sati. Kada se ABS u potpunosti otopio, SS prah je dodan te je mješavina odmah mehanički promiješana na  $\sim 30\text{min}$ , pa je prolivena kako bi se dobila ploča debljine  $\sim 1\text{mm}$  koja se sušila na zraku. Nakon sušenja na zraku, ploče ABS-SS kompozita su izrezane u komade od  $2.5 \times 2.5\text{mm}$ . Kompozitna je sirovina tada stavljena u peć na  $100^\circ\text{C}$  na period od 48 sati kako bi svi ostaci acetona nestali. Nakon sušenja, sirovina je pretvorena u filamente [17].

Izabrana geometrija tiska je pratila ASTM D638 Type V specifikacije vlačnog ispitivanja primjerka. Rasterske orijentacije od  $0/90^\circ$  i  $45/-45^\circ$  su upotrijebljene za horizontalne i vertikalne vlačne šine. Primjerci su isprintani na printeru Hyrel System 30M s glavom MK1-250 [17].

### **6.2.3 Vlačno testiranje**

Vlačni primjerci su testirani na uređaju Instron 5567A pri sobnoj temperaturi i brzini od  $1\text{mm/min}$ . UTS i napor do otkaza su izmjereni na minimalno 3 primjerka za svaki materijal. Iz rezultata je tad izvučen prosjek i to je zapisano zajedno s maksimalnim vrijednostima i standardnim devijacijama. Mjerenja su ponovljena ako je prosječna vrijednost ispala statistički različita od trenda kako bi se osigurala obnovljivost [17].

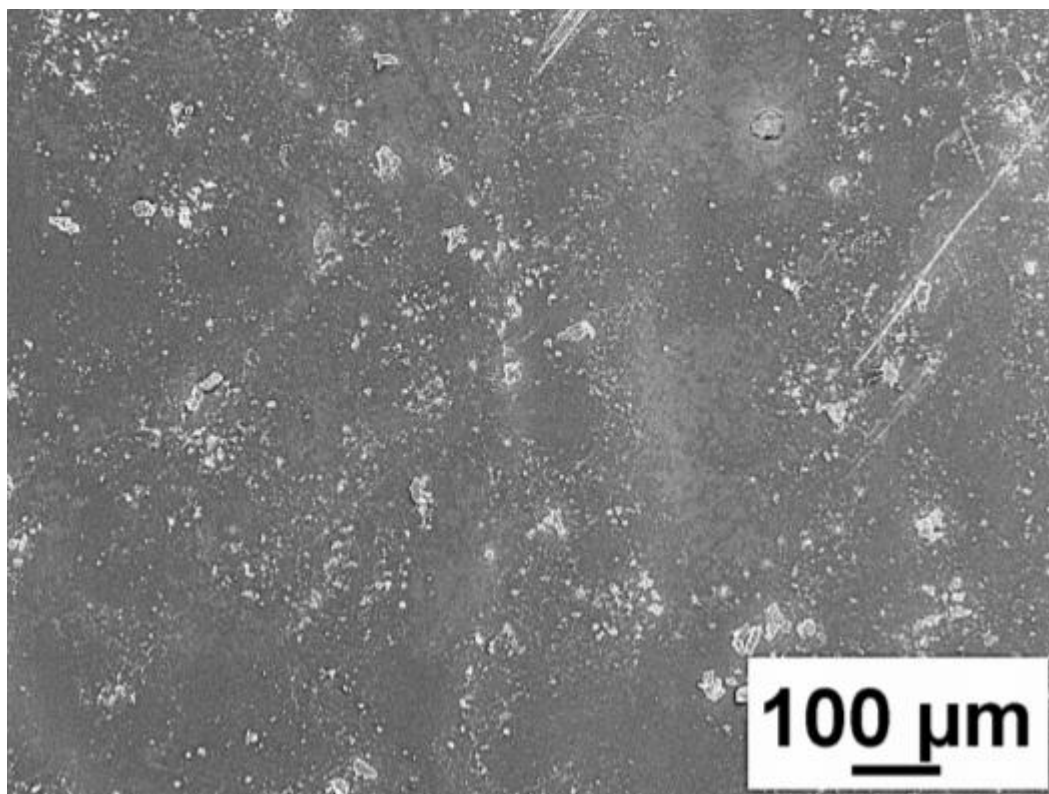
### **6.2.4 Fraktografija**

Frakture na površinama testiranih vlačnih primjeraka su proučene SEM uređajem kako bi se otkrile karakteristike fraktura kao i utjecaj čestica SS-a na mehaniku fraktura. Napon od  $5\text{kV}$  je

upotrijebljen i slike fraktura su proučene pod povećanjima od 23x i 150x. Više slika je spremljeno za svaki uzorak i razinu povećanja [17].

### 6.2.5 Homogenost kompozita

Homogenost ABS-SS kompozita je važan faktor u konačnoj kvaliteti isprintanog predmeta. Na slici 50 se vidi da se postigla jednolika raspodjela čestica, što potvrđuje učinkovitost procesa miješanja, odnosno jednolike raspodjele mikročestica. Dodatan dokaz jednolike raspodjele čestica je velika obnovljivost MDSC očitavanja (svo otapalo je isparilo nakon prvog grijanja do 250°C). Uočeni su oštri prijelazi stakla [17].

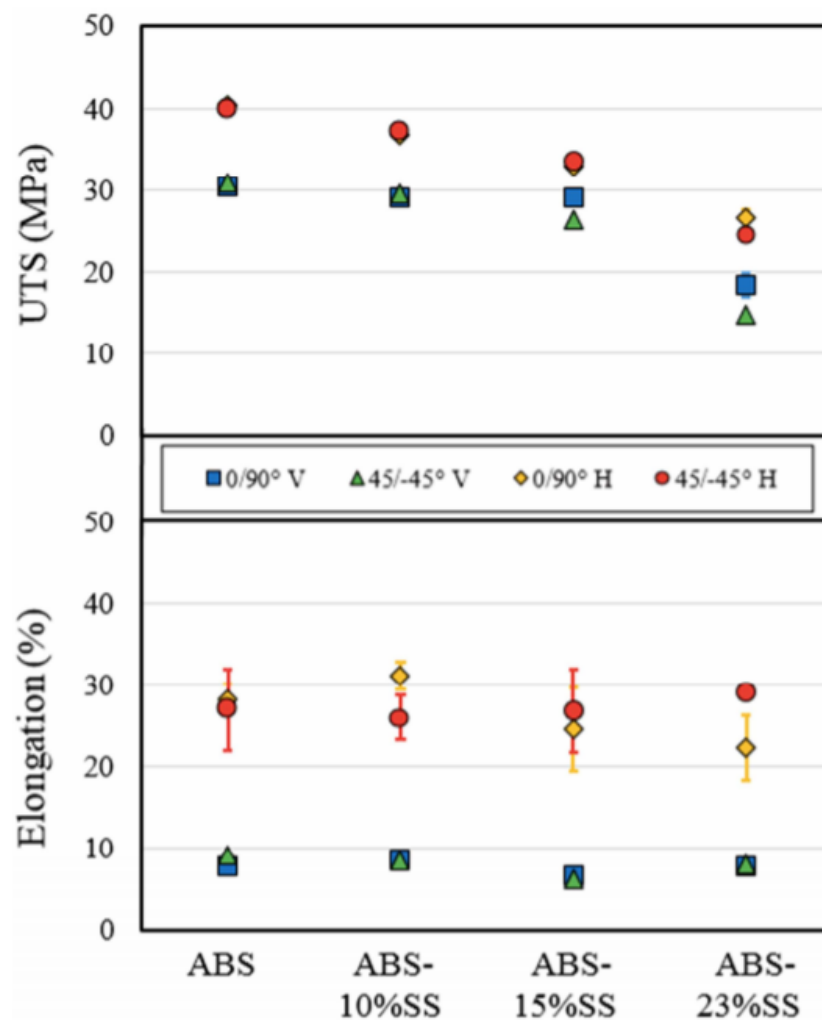


Slika 50: SEM slika kod povećanja od 150x ABS-23%SS ploče nakon sušenja, otkriće homogene raspodjele čestica nehrđajućeg čelika

### 6.2.6 Vlačna svojstva

Vlačna svojstva svih kompozita su vidljiva na slici 51. Općenito govoreći, vrijednosti vlačne čvrstoće ABS-SS kompozita su usporedive s čistim ABS-om, te ostaju relativno konstantne s povećanjem SS-a do 15%. Smanjenje vlačne čvrstoće je primijećeno kod 23% udjela SS-a, odnosno pao je za ~56% po vertikali i ~63% po horizontali. Ti rezultati dokazuju da veći udjeli SS-a loše utječu na konačni predmet, smanjujući njegova mehanička svojstva. Nisu primijećene značajne razlike u vlačnoj čvrstoći između različitih orijentacija rastera (0/90° te 45/-45°) za sve

kompozite. Međutim, svi horizontalno isprintani predmeti su pokazali ~30% bolje vlačne čvrstoće u odnosu na vertikalno isprintane predmete. Napor do pucanja čistog ABS-a i svih ABS-SS kompozita je sličan, neovisno o orijentaciji tiska. Pošto čestice SS-a uglavnom ne djeluju među sobom, izduženje/napor do pucanja uvelike ovisi o stanju polimerne matrice, čija su vlačna svojstva osjetljiva na smjer tiskanja. Zbog toga se očekuju poboljšanja mehaničkih svojstava kada se modificira interakcija metalnog praha i polimerne matrice obrađivanjem površine na razne načine prije miješanja. To može značiti upotrebu silanskog vezivnog sredstva, za koje je dokazano da poboljšava mehanička svojstva kod drugih metal/polimer kompozita [17].

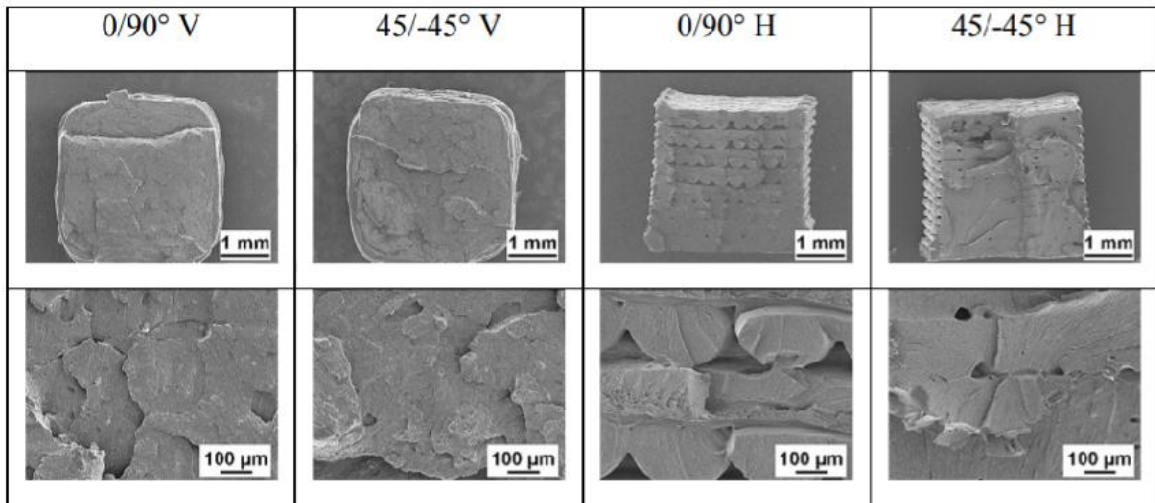


Slika 51: Vlačna svojstva, napor do pucanja za sve orijentacije izrade i kuteve rastera za čisti ABS i za sve ABS-SS kompozite

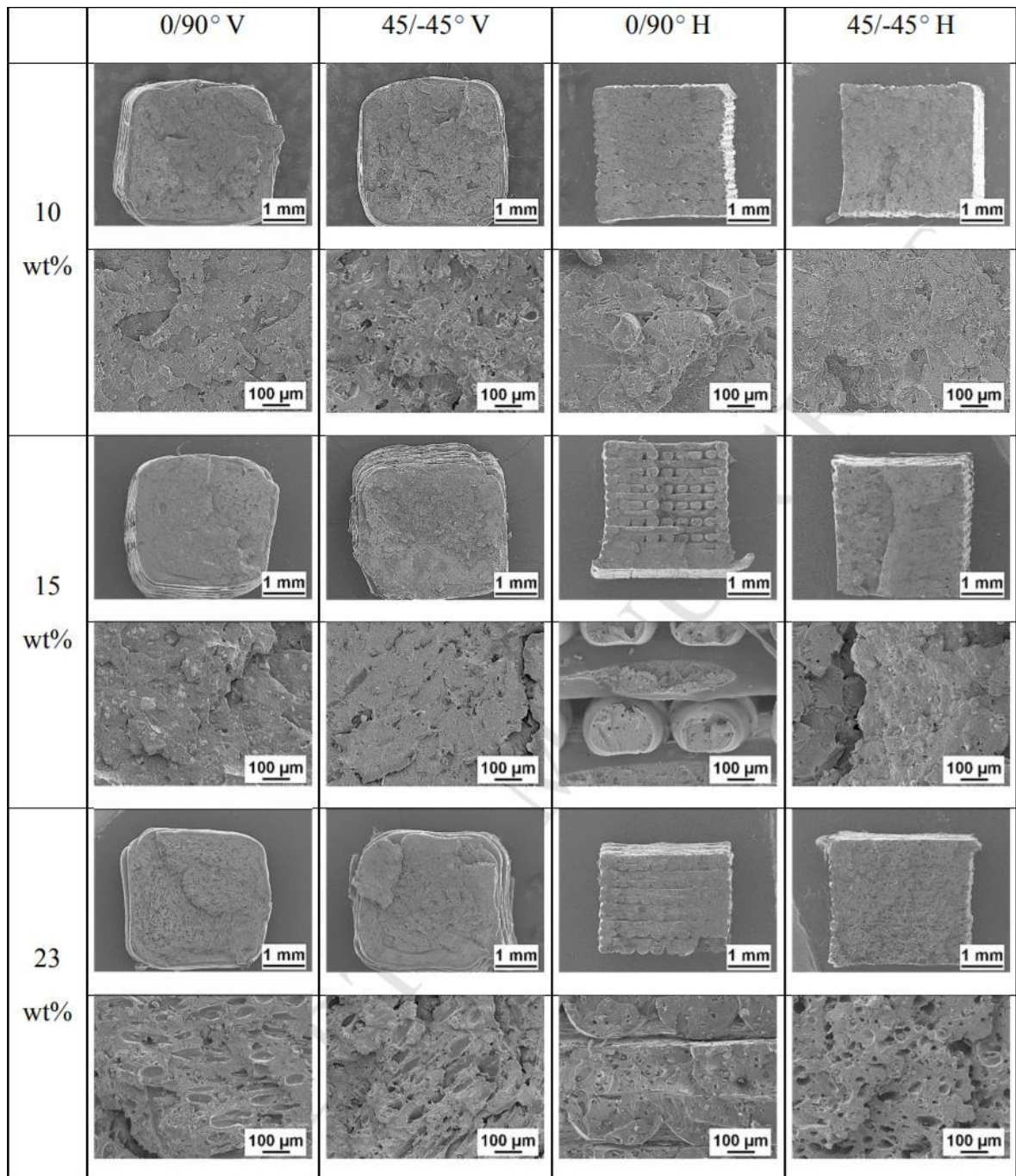
### 6.2.7 Fraktografski rezultati i analiza

Kako bi se bolje razumjeli rezultati vlačnih ispita, fraktografija je provedena nad svim puknutim primjercima. SEM slike popucalih površina su prikazane na slikama 52 i 53. Općenito govoreći,

prijelomi se pojavljuju između tiskanih slojeva za vertikalni smjer tiska, dok se pojavljuju preko kuglica za horizontalni smjer tiska. Ovo pokazuje kako inter-slojni (inter-kuglični) mehanizmi stapanja s delaminacijom kod pucanja dominiraju mehanička svojstva vertikalnih uzoraka, dok ekstrudirane jake kuglice dominiraju svojstva u horizontalnim slučajevima [17].



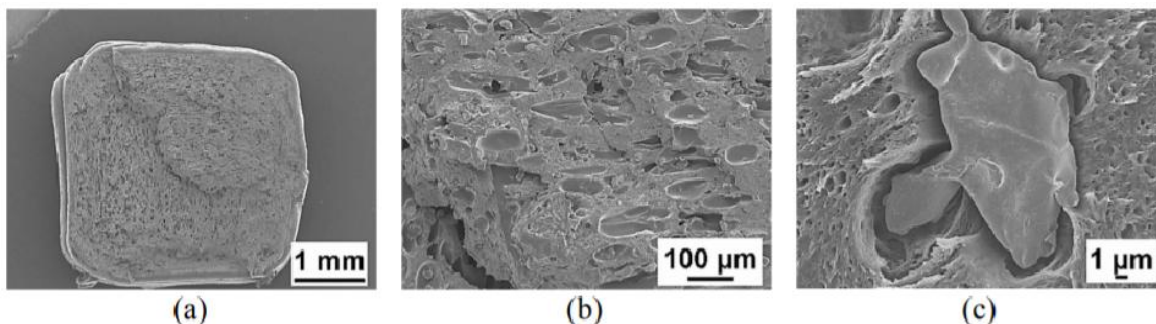
Slika 52: SEM slike fraktura čistog ABS-a pri povećanju od 23x (gornji red) i 150x (donji red) za 4 konfiguracije tiska



Slika 53: SEM slike fraktura ABS-SS kompozita. Svaki par redova pokazuje povećanja od 23x i 150x. Šupljine na površini 23% ABS-SS kompozita odgovaraju mjestima gdje su se nalazili aditivi SS praha, što je jasno vidljivo na donjoj desnoj slici

Različiti udjeli SS-a dovode do različitog ponašanja širenja prijeloma. Do 15% udjela SS-a, broj fraktura za vertikalno isprintane primjerke je veći od običnog ABS-a. Za uzorak od 23%, broj fraktura je sličan kao i kod čistog ABS-a. SS čestice kod 10% i 15% preusmjeravaju prijelome i na susjedne slojeve [17].

SEM slike fraktura pokazuju nepotpuno prijanjanje SS površine s ABS polimernom matricom, vidljivo na slici 54. S ovim se naglašava jedan od najvećih problema koji se javlja kod pokušaja izrade korisnog polimer/metal kompozita: nedovoljna granična snaga. Iako se SS ne prijanja u potpunosti u matricu, nepravilan oblik čestice pridonosi mogućnosti da se čestice zaglave u matrici [17].



Slika 54: SEM slike fraktura ABS-23%SS kompozita pri 0/90° V konfiguraciji tiska pri povećanjima od 23x(a), 150x(b) i 4300x(c). Na (c) vidimo česticu SS-a koja se nije dobro stopila s matricom

Tragovi produžetaka vidljivi na slici 54 (a) i (b) imaju čestice SS-a fiksirane na kraj svakog traga, čiji su smjerovi u skladu sa smjerom postavljanja sloja, što ukazuje važnu ulogu čestica na mehanizam oštećenja. Unatoč nepotpunom spajanju s polimernom matricom, prisustvo čestica SS-a jasno utječe na širenje fraktura. Poboljšanje otpora na štetu materijala se može postići ako se čestice uspiju bolje stopiti s matricom. Površinske obrade su pokazale kako je ovo moguće, a daljnja istraživanja njihovog utjecaja na mehanička svojstva bi bila jako korisna [17].

### 6.2.8 Zaključak za nehrđajući čelik i ABS

Istražen je način proizvodnje, toplinska i mehanička svojstva homogenih metalno-polimernih kompozita upotrebom nove metodologije procesiranja i 3D tiska. Slike površinskih prijeloma su otkrile negativan utjecaj većih udjela SS-a na nastanak štete duž čitave površine. Rezultati su jasno pokazali da kompoziti polimera i metala mogu biti proizvedeni bez smanjenja mehaničkih svojstava, dok istovremeno mogu dodavati nove funkcionalnosti poput magnetskih svojstava za isprintani dio. Nadalje, razvijena metodologija se može primijeniti na bilo koji praškasti aditiv (metal, keramika,...) u topivim termoplastičnim polimernim matricama, što otvara još mogućnosti za razvoj polimerno-metalnih kompozita za buduću upotrebu za strukturalne primjene [17].



## 7. Zaključak

Kao i sve ostale dobre nove tehnologije, 3D tisak se od početka zadržao i neprestano se razvija i poboljšava. Iz dana u dan sve je bolji, a i pristupačniji svakome. Koristi se u gotovo svakoj industriji, pa je samim time našao vrlo veliku i dobru primjenu kada se radi o proizvodnji automobila. Sve više proizvođača a i manjih nezavisnih firmi i entuzijasta ga počinje koristiti. Iz toga je lako zaključiti da 3D tisak ne ide nikamo nego naprijed, i nastaviti će se razvijati i proširivati još više. Možda će u budućnosti prosječan auto biti većinom proizveden 3D tiskom. Sudeći po brzini napretka i već postojećoj primjeni, ovakav scenarij je za budućnost i više nego realan.

Aditivna proizvodnja ima mnoštvo beneficija u odnosu na subtraktivnu, a manja cijena izrade, veća brzina izrade, ušteda materijala i vrlo značajno smanjenje proizvedenog otpada su samo neki od njih. Unatoč činjenici da je danas nemoguće u potpunosti zamijeniti subtraktivnu proizvodnju 3D tiskom, moguće je da će u budućnosti scenarij biti upravo takav, ili da će u najmanju ruku aditivna proizvodnja biti vodeća, a subtraktivna sporedna.

Neki od detaljno objašnjenih i analiziranih kompozita koji su bili fokus petog i šestog poglavlja bi mogli bez problema pronaći svoju primjenu u autoindustriji, veću od samo prototipiranja. Povrh toga, stručnjak iz tvrtke Rimac Automobili je potvrdio kako se sve kreće upravo u tom smjeru, da se 3D tisak počinje sve više i više koristiti za izradu dijelova za konačnu uporabu i na većim serijama. Mnogi uporno rade na istraživanjima sličnim ovima koja su predstavljena u ovome radu. Prema tome, apsolutno je za očekivati da se iz dana u dan razvijaju sve bolji kompoziti koji će se bez problema moći koristiti u mnogim zahtjevnim industrijama za konačne dijelove, što naravno uključuje i automobilsku industriju.



**IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

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

Ja, DOMAGOJ BUTKOVIC (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom NAPREONI KOMPZITI ZA FOM 3D TISAK U AUTOINDUSTRIJI (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

DOMAGOJ BUTKOVIC  
D. Butkovic

(vlastoručni potpis)

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

Ja, DOMAGOJ BUTKOVIC (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom NAPREONI KOMPZITI ZA FOM 3D TISAK U AUTOINDUSTRIJI (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

DOMAGOJ BUTKOVIC  
D. Butkovic

(vlastoručni potpis)

## 8. Literatura

1. Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing - Andreas Gebhardt (2012.), doi: <https://doi.org/10.3139/9783446431621>
2. <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/history-of-3d-printing-milestones/> (Pristup: 19/06/2020.)
3. <https://3dinsider.com/3d-printer-types/> (Pristup: 19/06/2020.)
4. [https://en.wikipedia.org/wiki/Strati\\_%28automobile%29](https://en.wikipedia.org/wiki/Strati_%28automobile%29) (Pristup: 22/06/2020.)
5. <https://www.popularmechanics.com/cars/a16726/local-motors-strati-roadster-test-drive/> (Pristup: 22/06/2020.)
6. C. W. J. Lim, K. Q. Le, Q. Lu and C. H. Wong, "An Overview of 3-D Printing in Manufacturing, Aerospace, and Automotive Industries," in IEEE Potentials, vol. 35, no. 4, pp. 18-22, July-Aug. 2016, doi: 10.1109/MPOT.2016.2540098.
7. Savastano M., Amendola C., D'Ascenzo F., Massaroni E. (2016) 3-D Printing in the Spare Parts Supply Chain: An Explorative Study in the Automotive Industry. In: Caporarello L., Cesaroni F., Giesecke R., Missikoff M. (eds) Digitally Supported Innovation. Lecture Notes in Information Systems and Organisation, vol 18. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-40265-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-40265-9_11)
8. <https://3dprinting.com/automotive/3d-printed-car-parts-bring-back-the-classics/> (Pristup: 29/06/2020.)
9. <http://www.v8speedshop.com> (Pristup: 29/06/2020.)
10. <https://www.techrepublic.com/pictures/photos-10-major-automakers-using-3d-printing-today/> (Pristup: 29/06/2020.)
11. Make: Getting Started with 3D Printing - Liza Wallach Kloski and Nick Kloski (2016.)
12. Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing - Andreas Gebhardt, Jan-Steffen Hotter (2016.)
13. Valino AD, Dizon JRC, Espera AH, Chen Q, Messman J, Advincula RC, Advances in 3D Printing of Thermoplastic Polymer Composites and Nanocomposites, Progress in Polymer Science (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.101162>

14. Mechanical and Thermo-mechanical Properties of Carbon fiber Reinforced Thermoplastic Composite Fabricated Using Fused Deposition Modeling Method(2020) by Vinayak C. Gavalia, Pravin R. Kubadea, Hrushikesh B. Kulkarnib, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.012>
15. Y.U. Ning, X. Sun, Z. Wang, et al., Effects of auxiliary heat on warpage and mechanical properties in carbon fiber/ABS composite manufactured by fused deposition modeling, Materials & Design (2020), <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108978>
16. M. Nikzad, S.H. Masood, I. Sbarski: Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modeling (2011), doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.01.056>
17. Ryder MA, Lados DA, Iannacchione GS, Peterson AM, Fabrication and properties of novel polymer-metal composites using fused deposition modeling, Composites Science and Technology (2018), doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.01.049>

## **Popis slika**

Slika 1 (str. 4): Urbee, prvi automobil s isprintanom karoserijom, izvor:

<http://sites.psu.edu/alwaleedafaliq/wp-content/uploads/sites/4596/2013/11/urbee2.jpg>

Slika 2 (str. 8): Strati, prvi 3D isprintani automobil, izvor: <http://3dprint.com/wp-content/uploads/2014/11/113.png>

Slika 3 (str. 9): Strati, prvi 3D isprintani automobil, izvor:

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c0/Strati\\_printing\\_details.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c0/Strati_printing_details.jpg)

Slika 4 (str. 12): 3D isprintan automobilski dio, izvor: <https://i.ytimg.com/vi/patFalkEs-k/maxresdefault.jpg>

Slika 5 (str. 13): 3D isprintana maska za Camara iz 1969., izvor: <http://www.v8speedshop.com>

Slika 6 (str. 14): Fordova 3D isprintana usisna grana, izvor:

<https://www.techrepublic.com/pictures/photos-10-major-automakers-using-3d-printing-today/>

Slika 7 (str. 15): BMW-ov isprintani krov, izvor: <https://www.techrepublic.com/pictures/photos-10-major-automakers-using-3d-printing-today/>

Slika 8 (str. 16): Local Motors Olli, izvor: <https://www.techrepublic.com/pictures/photos-10-major-automakers-using-3d-printing-today/>

Slika 9 (str. 24): Stratasys Fortus 450mc 3D printer, izvor: osobno istraživanje

Slika 10 (str. 25): Ultimaker 2 3D printeri, izvor: osobno istraživanje

Slika 11 (str. 25): Zortrax M200 3D printeri, izvor: osobno istraživanje

Slika 12 (str. 26): 3D isprintani predmet s kompleksnim geometrijama, izvor: osobno istraživanje

Slika 13 (str. 26): 3D isprintano kućište senzora, izvor: osobno istraživanje

Slika 14 (str. 28): FDM 3D printer, izvor: <http://my3dconcepts.com/wp-content/uploads/2017/01/Hardware-components-of-FDM-3D-Printers.jpg>

Slika 15 (str. 29): Usporedba slojeva, izvor: referenca [11] u literaturi

Slika 16 (str. 32): Kartezijanske koordinate, izvor: <https://i.stack.imgur.com/mg50D.png>

Slika 17 (str. 33): Delta 3D printer, izvor: <https://i.pinimg.com/736x/35/20/d5/3520d5dd33f69a64ae7fb4974c985251.jpg>

Slika 18 (str. 35): Sustav ekstrudera, izvor: referenca [11] u literaturi

Slika 19 (str. 36): Kalem filamenta, izvor: <https://images.monoprice.com/productlargeimages/105501.jpg>

Slika 20 (str. 39): Senzor, izvor: referenca [11] u literaturi

Slika 21 (str. 49): Posljedice abrazije na diznu, izvor: referenca [13] u literaturi

Slika 22 (str. 55): Krivulje vlačne čvrstoće u odnosu na udio ugljičnih vlakana, izvor: referenca [14] u literaturi

Slika 23 (str. 56): Utjecaj udjela ugljičnih vlakana na vlačnu čvrstoću, izvor: referenca [14] u literaturi

Slika 24 (str. 57): Krivulje čvrstoće savijanja u odnosu na udio ugljičnih vlakana, izvor: referenca [14] u literaturi

Slika 25 (str. 57): Utjecaj udjela ugljičnih vlakana na čvrstoću savijanja, izvor: referenca [14] u literaturi

Slika 26 (str. 60): Modul pohrane i tangencija gubitka kod 3 isprintana primjerka, izvor: referenca [14] u literaturi

Slika 27 (str. 62): Usporedba standardnog FDM printera i posebnog FDM printera korištenog u ovom eksperimentu, izvor: referenca [15] u literaturi

Slika 28 (str. 63): Dimenzije primjerka, izvor: referenca [15] u literaturi

Slika 29 (str. 64): DSC krivulja CF/ABS kompozita, izvor: referenca [15] u literaturi

Slika 30 (str. 65): FDM isprintani dijelovi: (a) bez ikakvog grijanja, (b) pomoćna ploča zagrijana na 160°C, prekaljivanje na 160°C, izvor: referenca [15] u literaturi

Slika 31 (str. 66): Krivulje rezultata vlačnih testova primjeraka, izvor: referenca [15] u literaturi

Slika 32 (str. 67): Ciklički zamor CF/ABS primjeraka, izvor: referenca [15] u literaturi

Slika 33 (str. 69): Krivulje naprezanja ovisno o kutu rastera: (a) bez pomoćnog grijanja, (b) s pomoćnim grijanjem od 160°C, izvor: referenca [15] u literaturi

Slika 34 (str. 70): Površinske anomalije primjeraka pod kutem od 0° nakon pomoćnog grijaćeg procesa: (a) bez pomoćnog grijanja, (b) 80°C, (c) 160°C, (d) 240°C, (e) prekaljivanje pri 150°C, izvor: referenca [15] u literaturi

Slika 35 (str. 71): Shematski prikaz kategorizacije temperatura u FDM tisku, izvor: referenca [15] u literaturi

Slika 36 (str. 72): Površinske anomalije bez pomoćnog grijanja uz kuteve rastera od: (a) 0°, (b) 45° i (c) 90°, izvor: referenca [15] u literaturi

Slika 37 (str. 73): Površinske anomalije primjeraka izrađenih uz pomoćno grijanje od 160°C uz kuteve rastera od: (a) 0°, (b) 45° i (c) 90°, izvor: referenca [15] u literaturi

Slika 38 (str. 73): Površinske anomalije primjeraka izrađenih uz pomoćno grijanje od 240°C uz kuteve rastera od: (a) 0°, (b) 45° i (c) 90°, izvor: referenca [15] u literaturi

Slika 39 (str. 77): Shematski prikaz nabubranja nakon ekstruzije, izvor: referenca [16] u literaturi

Slika 40 (str. 77): SEM slika željeznog/ABS kompozita zumiranog 1000x, izvor: referenca [16] u literaturi

Slika 41 (str. 78): Shematski prikaz stroja za testiranje toplinske vodljivosti, izvor: referenca [16] u literaturi

Slika 42 (str. 79): Toplinska vodljivost ABS-a s dodatkom bakra pri raznim temperaturama, izvor: referenca [16] u literaturi

Slika 43 (str. 80): Toplinska vodljivost ABS-a s dodatkom željeza pri raznim temperaturama, izvor: referenca [16] u literaturi

Slika 44 (str. 82): Modul pohrane raznih kompozita bakra/ABS-a uz veličinu čestica od 10 $\mu$ m, izvor: referenca [16] u literaturi

Slika 45 (str. 83): Modul pohrane raznih kompozita bakra/ABS-a uz veličinu čestica od 45 $\mu$ m, izvor: referenca [16] u literaturi

Slika 46 (str. 84): Modul pohrane raznih kompozita željeza/ABS-a uz veličinu čestica od 45 $\mu$ m, izvor: referenca [16] u literaturi

Slika 47 (str. 85): Usporedba mehaničkih dinamičkih svojstava čistog ABS-a i ABS-a s 10% nadopune željeznog praha, izvor: referenca [16] u literaturi

Slika 48 (str. 85): Utjecaj željeznih čestica na vlačnu čvrstoću matrice ABS-a, izvor: referenca [16] u literaturi

Slika 49 (str. 87): Testni uzorci proizvedeni novim kompozitom željeza i ABS-a, izvor: referenca [16] u literaturi

Slika 50 (str. 90): SEM slika kod povećanja od 150x ABS-23%SS ploče nakon sušenja, otkriće homogene raspodjele čestica nehrđajućeg čelika, izvor: referenca [17] u literaturi

Slika 51 (str. 91): Vlačna svojstva, napor do pucanja za sve orijentacije izrade i kuteve rastera za čisti ABS i za sve ABS-SS kompozite, izvor: referenca [17] u literaturi

Slika 52 (str. 92): SEM slike fraktura čistog ABS-a pri povećanju od 23x (gornji red) i 150x (donji red) za 4 konfiguracije tiska, izvor: referenca [17] u literaturi

Slika 53 (str. 93): SEM slike fraktura ABS-SS kompozita. Svaki par redova pokazuje povećanja od 23x i 150x. Šupljine na površini 23% ABS-SS kompozita odgovaraju mjestima gdje su se nalazili aditivi SS praha, što je jasno vidljivo na donjoj desnoj slici, izvor: referenca [17] u literaturi

Slika 54 (str. 94): SEM slike fraktura ABS-23%SS kompozita pri 0/90° V konfiguraciji tiska pri povećanjima od 23x(a), 150x(b) i 4300x(c). Na (c) vidimo česticu SS-a koja se nije dobro stopila s matricom, izvor: referenca [17] u literaturi

Sveučilište  
SjeverSVEUČILIŠTE  
SIEVERIZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

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

Ja, Domagoj Butković pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom Napredni kompoziti za FDM 3D tisak u autoindustriji te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
Domagoj Butković

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

Ja, Domagoj Butković neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom diplomskog rada pod naslovom Napredni kompoziti za FDM 3D tisak u autoindustriji čiji sam autor.

Student/ica:  
Domagoj Butković