

Projektiranje 3D modela boce i ispis modela korištenjem FDM 3D tehnologije ispisa

Blažeković, Ana

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:280784>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-02**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR KOPRIVNICA



DIPLOMSKI RAD br. 58/ARZO/2023

**Projektiranje 3D modela boce i ispis modela
korištenjem FDM 3D tehnologije ispisa**

Ana Blažeković

Koprivnica, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE SJEVER

SVEUČILIŠNI CENTAR KOPRIVNICA

Studij Ambalaža, recikliranje i zaštita okoliša



DIPLOMSKI RAD br. 58/ARZO/2023

**Projektiranje 3D modela boce i ispis modela
korištenjem FDM 3D tehnologije ispisa**

Student:

Ana Blažeković, 0231005880

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Dean Valdec

Koprivnica, rujan 2023.

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za ambalažu, recikliranje i zaštitu okoliša		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Ambalaža, recikliranje i zaštita okoliša		
PRISTUPNIK	Ana Blažeković	MATIČNI BROJ	0231005880
DATUM	01.09.2023.	KOLEGIJ	Tisak i oplemenjivanje ambalaže
NASLOV RADA	Projektiranje 3D modela boce i ispis modela korištenjem FDM 3D tehnologije ispisa		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Designing a 3D model of a bottle and printing the model using FDM 3D printing technology		
MENTOR	dr.sc. Dean Valdec	ZVANJE	izvanredni profesor
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. izv.prof.dr.sc. Krunoslav Hajdek, predsjednik 2. izv.prof.dr.sc. Dean Valdec, mentor 3. izv.prof.dr.sc. Petar Miljković, član 4. izv.prof.dr.sc. Bojan Šarkanj, zamjenski član 5.		

Zadatak diplomskog rada

BROJ	58/ARZO/2023
OPIS	<p>3D tehnologija ispisa neizostavni je dio projektiranja i izrade ambalaže. Ispisom 3D modela ambalaže omogućuje se analiza fizičkih karakteristika i redizajn ambalaže prije same finalne izrade što uključuje povećanje učinkovitosti i funkcionalnosti gotovog proizvoda. Na taj način skraćuje se cijeli ciklus dizajniranja i projektiranja nove ambalaže s ciljem otklanjanja mogućih grešaka kod proizvoda. U ovom radu bit će opisani cjelokupni proces izrade nove ambalaže u obliku boce, od projektiranja do ispisa modela te će biti prikazane mogućnosti koje ovakav način projektiranja ambalaže nudi.</p> <p>U radu je potrebno:</p> <ul style="list-style-type: none">— Teoretski opisati 3D pisače, vrste i načine ispisa te materijale koji se primjenjuju— Navesti primjenu 3D pisača, posebno u ambalažnoj industriji— Opisati FDM tehnologiju 3D ispisa kao najzastupljeniju tehnologiju i primijeniti je u praktičnom dijelu rada prilikom ispisa— Projektirati 3D model boce u programu Autodesk Fusion 360— Opisati sve potrebne predradnje za ispis 3D modela boce na 3D pisaču— Ispisati 3D model boce na 3D pisaču Creality Ender 3 V2— Iznijeti zaključak

ZADATAK URUČEN

4.9.2023

POTPIS MENTORA

SVEUČILIŠTE
SJEVER



ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru, izv. prof. dr. sc. Deanu Valdecu na pomoći, strpljenju i savjetima pruženima za vrijeme pisanja ovog diplomskog rada.

Želim zahvaliti svojoj obitelji te djeci Larisi i Leonu koji su me podržavali i bili puni razumijevanja tijekom cijelog razdoblja mojeg studiranja.

Najveće hvala mojem suprugu Marinu bez čije podrške, pomoći i vjere u mene i moje sposobnosti ništa od ovoga ne bi bilo moguće.

Sažetak

FDM tehnologija najčešće je korišten proces 3D ispisa. 3D pisači omogućuju da se računalno izrađeni 3D model pretvori u opipljivi oblik. Nazivi Fused Deposition Modeling (FDM) ili Fused Filament Fabrication (FFF) koriste se za tehnologiju izrađivanja modela koja se odvija tako da se otopljeni materijal polaže slojevito, odnosno sloj na sloj. FDM tehnologija 3D ispisa je najzastupljenija i najpovoljnija tehnologija 3D ispisa te ju se zato i najčešće koristi. 3D pisači mogu se koristiti za poboljšanje dizajna i funkcionalnosti materijala za pakiranje te pojednostavnjuju izradu ambalaže jer je moguće odmah vidjeti sve nedostatke koji su se javili kod dizajna nove ambalaže. Potrebne izmjene u dizajnu i izgledu moguće je napraviti u kratkom roku, bez većih dodatnih troškova. U teorijskom dijelu ovog rada obrađena je povijest 3D pisača, objašnjeni su postupci 3D ispisa i upotreba 3D pisača u ambalažnoj industriji te je na kraju objašnjena FDM (Fused Deposition Modeling) tehnologija 3D ispisa koja se koristi za ispis modela boce u praktičnom dijelu rada. U praktičnom dijelu rada prikazano je modeliranje 3D modela boce u softveru Autodesk Fusion 360 kroz sve etape, od izrade tijela boce pa sve do konačnog izgleda boce. Model boce prikazan je u softveru Ultimaker Cura što prethodi ispisu modela na 3D pisaču. Prikazani su svi koraci koji prethode pripremi za ispis, od generiranja G-coda pa sve do prijenosa datoteke do pisača. Na kraju je prikazan sam ispis modela boce na pisaču Creality Ender 3 V2.

Ključne riječi: 3D ispis, FDM, 3D model, ambalaža, projektiranje, Creality Ender 3 V2

Abstract

FDM technology is the most commonly used 3D printing process. 3D printers allow us to turn a 3D computer generated model into a tangible form using a 3D printer. Fused Deposition Modeling (FDM) or Fused Filament Fabrication (FFF) is what we call the same model-making technology in such a way that the melted material is laid layer by layer (layer upon layer). FDM 3D printing technology is the most common and cheapest 3D printing technology which is why it is used the most. 3D printers can be used to improve the design and functionality of packaging materials. 3D printers simplify the production of packaging because all defects in the design of new packaging can be seen immediately. The necessary changes in design and appearance can be made in a short time without major additional costs. In the theoretical part of this paper is described the history of 3D printers, 3D printing procedures, the use of 3D printers in the packaging industry, and finally the FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printing technology which is used to print the bottle model in the practical part of the this paper. In the practical part of of this paper it is shown how the 3D model of the bottle was modeled in the Autodesk Fusion 360 program, from the creation of the body of the bottle to the final appearance of the bottle. The model of the bottle in the Ultimaker Cura program is shown, which precedes the printing of the model on a 3D printer. All the steps that precede the preparation for printing are shown, from generating the G-code to transferring the file to the printer. At the end, the printing of the bottle model on the Creality Ender 3 V2 printer is shown.

Keywords: *3D printing, FDM, 3D model, packaging, design, Creality Ender 3V2*

Popis korištenih kratica

3D - Trodimenzionalni
FDM - Fused deposition modeling
FFF - Fused filament fabrication
RP - Rapid prototyping
CAD - Computer-aided design
SLA - Stereolitografija
DMLS - Direct metal laser sintering
ABS - Akrilonitril-Butadien-Stiren
PLA - Polilaktična kiselina
DLP - Digital light processing
SLS - Selective laser sintering
SLM - Selective laser melting
EBM - Electron beam melting
DOD - Drop on demand
LOM - Laminated object manufacturing
UV - Ultraljubičasto
PHB - Polyhydroxybutyrate
STL - Standard triangle language
AMF - Additive manufacturing file
ABS - Acrylonitrile butadiene styrene
PA - Polyamid
PC - Polycarbonate
PVA - Polyvinyl Alcohol
PPSF - Polyphenylsulfone
PPSU - Polyphenylsulfone
CAD - Computer-aided design
CAM - Computer-aided manufacturing
CAE - Computer-aided engineering
OBJ - Object file
JPF(JPEG) - Joint photographic experts group
PNG - Portable network graphic
BMP - Bitmap
GIF - Graphics Interchange Format

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Povijest i razvoj 3D pisača	2
2.1. Brza proizvodnja prototipova.....	3
2.2. RepRap projekt.....	4
2.3. Postupci 3D ispisa	6
2.3.1. Tehnologija fotopolimerizacije u kadi	9
2.3.2. Tehnologija stapanja naslaga praha	12
2.3.3. Material i Binder Jetting tehnologija ispisa	14
2.4. Budućnost 3D ispisa.....	15
3. Upotreba 3D pisača u ambalažnoj industriji.....	17
3.1. Personalizirana ambalaža	17
3.2. Učinkovita izrada prototipova i unapređenje dizajna ambalaže.....	19
3.3. Izrada rezervnih dijelova strojeva na zahtjev	21
3.4. Prednosti za okoliš	24
4. FDM 3D pisači	26
4.1. Dijelovi FDM 3D pisača	26
4.2. Rezolucija FDM 3D pisača	26
4.3. Izrada 3D modela	27
4.4. Proces rada FDM 3D pisača.....	28
4.5. Prednosti i nedostaci FDM 3D pisača	31
4.6. Područja primjene FDM 3D pisača.....	31
4.7. Materijali za primjenu kod FDM 3D tehnologije ispisa	32
5. Praktični dio – izrada modela i ispis modela boce pomoću 3D pisača.....	35
5.1. Izrada 3D modela u softveru Autodesku Fusionu 360.....	35
5.2. Prikaz modela boce u softveru Ultimakeru Curai	42
5.3. Priprema 3D ispisa	43
5.3.1. G-code.....	43
5.3.2. Creality Ender 3 V2 pisac	45
5.3.3. Ispis modela boce na Crealityju Enderu 3 V2 pisacu	46
6. Zaključak	52
7. Literatura	55

1. Uvod

Pojavom stolnih 3D pisaa otvorila su se sasvim nova podruaja primjene tehnologije trodimenzionalnog ispisa. Tehnologija stara više od tri desetljeća koja je dotad bila visoko profesionalizirana i finansijski zahtjevna postala je dostupna širokom spektru tržišta. Tada su se ti vrlo usko orijentirani profesionalni uređaji počeli intenzivnije koristiti što je dovelo do otvaranja novih podruaja primjene te novih korisnika.

Upotreba 3D pisaa odnosno aditivna proizvodnja razvija se brzo i u svim smjerovima. Konkurencija na svjetskom tržištu proizvodnih usluga i proizvoda posljednjih je godina u porastu. Postalo je važno, ako ne i ključno, plasirati novi proizvod na tržište prije konkurenata. Mnogi procesi kao što su dizajn, testiranje, proizvodnja i distribucija proizvoda postali su ograničeni vremenom i materijalnim sredstvima. Zato su se 3D pisaa počeli koristiti i u ambalažnoj industriji i to za izradu prototipova, personaliziranih pakiranja te za unapređenje dizajna ambalaže.

3D pisaa mogu se koristiti za poboljšanje dizajna i funkcionalnosti materijala za pakiranje. Ispisivanjem 3D modela ambalaže prije izrade finalnog proizvoda omogućuje se analiza fizičkih karakteristika modela te se po potrebi mogu napraviti izmjene. Svaka odluka o unošenju nužnih promjena koje bi mogle povećati učinkovitost i funkcionalnost proizvoda može biti donesena prije nego što se proizvod počne proizvoditi na komercijalnoj razini. Tako se može skratiti cijeli ciklus dizajniranja i projektiranja nove ambalaže te se pomoću 3D modela mogu otkloniti neke od pogrešaka kod finalnog proizvoda.

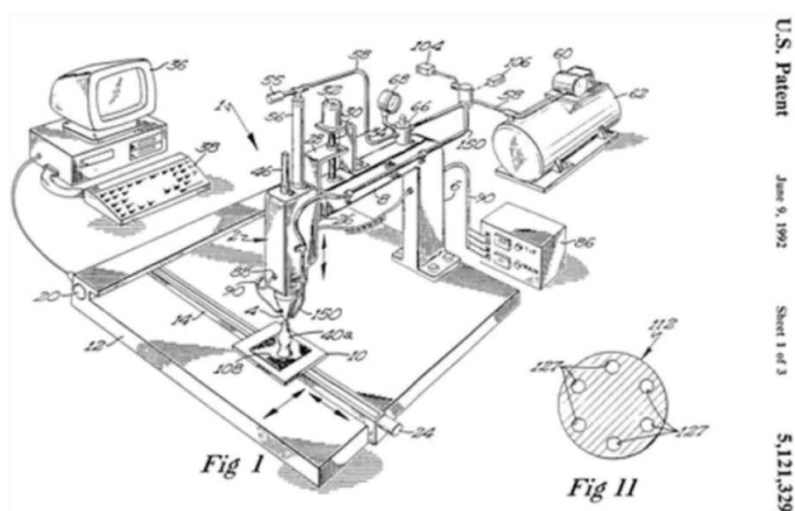
FDM tehnologija najčešće je korišten proces 3D ispisa. 3D pisaa omogućuju da se 3D računalno izrađeni model pretvori u opipljiv oblik. Smanjenje cijene 3D pisaa učinilo je ovu tehnologiju dostupnijom široj populaciji te su se 3D pisaa počeli sve više koristiti u raznovrsnim područjima primjene.

2. Povijest i razvoj 3D pisača

U 80-im godinama prošlog stoljeća predložen je novi način industrijske proizvodnje - aditivna proizvodnja. U procesu aditivne proizvodnje 3D objekti se proizvode dodavanjem slojeva materijala, umjesto uklanjanjem beskorisnog materijala iz cijelog bloka [1]. Ovaj način izrade nazvan je 3D ispisivanje u odnosu na sličnu tehnologiju koja se koristila u ink-jet pisačima. Od tada je samo u SAD-u objavljeno više od 300.000 patenata u području tehnologije 3D ispisa. U isto vrijeme na internetu su postali dostupni računalni softveri otvorenog koda koji pomažu u izradi 3D objekata. Danas je cijena stolnog 3D pisača toliko povoljna da je ova tehnologija dostupna gotovo svima.

Scott i Lisa Crump su 1988. godine postali zaslužni za izum modeliranja odlaganjem taline, a kasnije je ovaj izum dobio naziv FDM tehnologija. Iduće, 1989. godine poduzeće Stratasys unaprijedilo je prijašnju tehnologiju Scotta Crumpa koja je zatim 1992. godine patentirana u Americi. Sljedeći korak u razvoju ove tehnologije također se dogodio 1992. godine kada Stratasys proizvodi svoju prvu seriju 3D pisača. Zatim tvrtka Stratasys 2002. godine lansira seriju *Dimension* kojoj je cilj tržište dostupno svima. Nakon toga 2007. godine Stratasys postaje vodeći u brzom proizvodnji prototipova (*rapid prototyping*) te je trenutno vlasnik 180 patenata vezanih za 3D tehnologiju.

Patent na FDM istekao je 2009. godine. Kao rezultat toga cijene FDM pisača pale su s cijena koje su bile više od 10.000 USD na cijene koje su manje od 1.000 USD što je uzrokovalo pojavu proizvođača 3D pisača prilagođenih potrošačima. Na slici 2.1. prikazan je izvorni patent za FDM pisače, odobren prije više od 25 godina.



Slika 2.1. Izvorni FDM patent, odobren prije više od 25 godina

Izvor: <https://images.app.goo.gl/vUeDuT8MB4PHhQwq5>

Zatim se 2007. godine na tržištu pojavio prvi 3D pisač po cijeni od 10.000 dolara, a na tržište ga je stavio 3D Systems. Međutim, cilj je bio da se 3D pisač može kupiti za manje od 5.000 dolara. Tehnologija 3D ispisa time je postala dostupnija za različite korisnike te u različitim djelatnostima, a najviše za prosječne korisnike.

2.1. Brza proizvodnja prototipova

Jedna od glavnih primjena aditivne proizvodnje je proizvodnja prototipova (*Rapid Prototyping*) jer je jedan od razloga razvoja ove tehnologije i potreba za bržom, alternativnom proizvodnjom prototipova. Primjerice, kod izrade kalupa za injekcijsko brizganje postupak izrade može trajati i do nekoliko tjedana i troškovi su poprilično veliki, stoga ta tehnologija nije praktična ako se kroz određeno vrijeme javi potreba za izmjenom određenog dijela dizajna kalupa. Zato se za izradu kalupa mogu koristiti i 3D pisači. [3]

Brza izrada prototipova također se može koristiti za brzu izradu nezavršene verzije proizvoda radi testiranja dizajnerskih ideja i dobivanja podataka koji će pomoći u poboljšanju nekog proizvoda. Izraz je usko povezan s tehnologijom aditivne proizvodnje (3D ispis) budući da se izvorno koristio za opisivanje procesa izrade 3D modela pomoću podataka dobivenih iz računalno potpomognutog dizajna (CAD) koji bi se zatim koristili za 3D ispis objekta ili dijela objekta u svrhu testiranja [4]. Pri dizajniranju fizičkog proizvoda brza izrada prototipova omogućuje isprobavanje različitih materijala, veličina, oblika, boja i mnogih drugih obilježja kako bi se testiralo kako ta obilježja utječu na oblik, pristajanje i funkciju. Zatim se ta saznanja mogu upotrijebiti za poboljšanje konačnog proizvoda.

Brza izrada prototipova koristi se jer se tako:

- povećava učinkovitost veza između razvoja i proizvodnje,
- smanjuje vrijeme razvoja,
- smanjuju skupe pogreške,
- produljuje vijek trajanja proizvoda tako da se u ranoj fazi konstruiranja dodaju potrebne značajke i uklanjaju suvišne značajke.

Brza izrada prototipova koristi se kako bi se smanjilo vrijeme za razvoj proizvoda jer se omogućuju korekcije na proizvodu u ranoj fazi razvoja. Pruža pogled na proizvod s aspekta marketinga, kupca, proizvodnje i inženjerstva te omogućava ispravljanje pogrešaka dok još nisu preskupe.

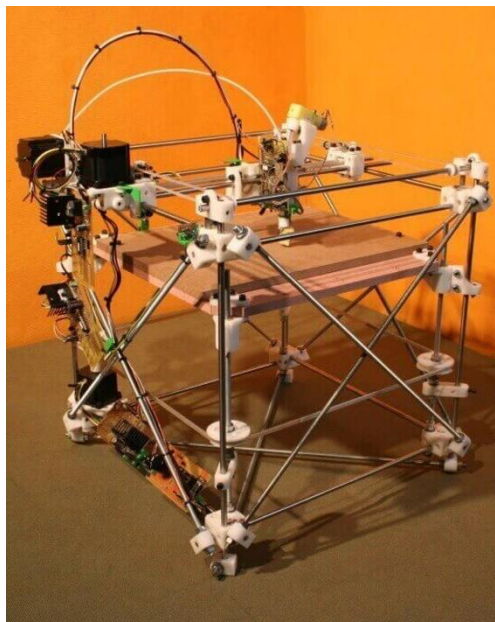
Kod brze izrade prototipova mogu se koristiti i niskobudžetni 3D pisači, a svaki od njih ima svoje prednosti i nedostatke te ih je općenito moguće podijeliti prema postupku ispisivanja, ovisno o tome upotrebljavaju li materijale u čvrstom stanju, prah ili kapljevine. [5]

Neke od najčešće korištenih tehnologija 3D ispisa su FDM (*Fused Deposition Modeling*), SLA (stereolitografija), SLS (selektivno lasersko srašćivanje), Polyjet/Multijet i DMLS (izravno lasersko srašćivanje metala).

2.2. RepRap projekt

Prekretnica za dostupnost tehnologije 3D ispisa dogodila se 2007. godine. Dr. Adrian Bowyer sa Sveučilišta Bath izmislio je RepRap kao *open source* projekt, odnosno samoreplicirajući 3D pisac 2004. godine te je u idućim godinama razvijao tu tehnologiju. Zatim se 2007. godine ovaj *open source* projekt počeo sve više primjenjivati. [2]

RepRap je prvi samoreplicirajući proizvodni stroj [6]. To je stroj u obliku besplatnog stolnog 3D pisca koji može ispisivati plastične predmete. Budući da su mnogi dijelovi RepRapa izrađeni od plastike i RepRap ispisuje te dijelove, on se zapravo replicira izrađujući komplet koji svatko može sastaviti uz određeno vrijeme i određene materijale. Na slici 2.2. prikazan je RepRap stolni model 3D pisca.



Slika 2.2. Prikaz RepRap stolnog modela 3D pisca

Izvor: <https://all3dp.com/history-of-the-reprap-project/>

Glavni izazov bio je pronaći tehnologiju pogodnu za izradu mehaničkih i strukturnih dijelova kao i elektronike i remena. Tehnologija brze izrade prototipova postojala je mnogo godina i zahtijevala je skupe, patentirane profesionalne strojeve koji su koristili aditivne tehnike za stvaranje čvrstih objekata te je postojala potreba za jednostavnim i jeftinijim 3D pisačima. [7]

Bowjerova ideja postigla je velik uspjeh i mali tim ljudi počeo je raditi na projektu. Između 2006. i 2008. godine proizveden je prototip pisača koji je mogao ispisati vlastite dijelove, a dobio je ime *RepRap Darwin*. Nakon njega su uslijedile verzije *Mendel* i *Huxley*.

Već je 2010. godine postojala prilično velika zajednica okupljena oko ovog projekta te je razmjenjivala dizajne i povratne informacije putem interneta. Projekt RepRap počeo se razvijati neovisno o središnjem timu. Ljudi su započeli eksperimente na nekoliko potkomponenti stroja kao što su okvir, elektronika, softver, materijali za ispis i objekti za ispis. Ova situacija zapravo je bila drugi, neslužbeni cilj dr. Bowyera, pokretanje prirodnog, darvinističkog procesa spontane i difuzne evolucije. Svaki pojedinac odabrao je neke stavke koje su u projekt uveli drugi ljudi, a neke je odbacio. U modernim 3D pisačima mogu se prepoznati doprinosi desetaka ljudi u svakom dijelu (elektronika, pogon žarne niti i sve ostalo), a ti doprinosi spontano su odabrani jer su se istaknuli kvalitetom, praktičnošću, lakoćom obrade, otpornošću ili svestranošću.

Važna promjena dogodila se u jesen 2011. godine, kada je mladi Josef Prusa napravio svoj 3D pisač *Prusa Mendel*. Nazvan je *Ford Model T* 3D pisač jer je imao jako pojednostavljene dijelove okvira. *Prusa Mendel* uglavnom je zahtijevao uobičajene dijelove dostupne u lokalnim trgovinama i brzo je postao najpoznatiji 3D pisač na svijetu. [7]

Učinci brzog širenja RepRap projekta diljem svijeta su veliki i uključuju mnogo više ljudi od angažirane zajednice uključene u projekt. Zahvaljujući dostupnosti takvih jeftinih strojeva pokrenuti su i drugi projekti, a došlo je i do pozitivnog utjecaja na gospodarstvo (jer su s poslovanjem započeli proizvođači dijelova ili filamenata te pružatelji usluge ispisa na zahtjev, oformljeni su centri za podršku, pokrenuti su tečajevi i otvorene trgovine). Danas postoje deseci ili čak stotine 3D pisača, a svi su oni izvedeni iz prethodno opisanog RepRap projekta Darwinove evolucije. Neke od njih prodaju tvrtke, drugi su potpuno otvorenog koda i stoga su dostupni svima koji žele sami izgraditi svoj 3D pisač. RepRap je sustav s mnogo subjekata koji djeluju slijedeći načelo otvorenog hardvera i koristeći besplatne, otvorene licence za razmjenu znanja.

RepRap pisači temelje se na tehnologiji FDM (*Fused Deposition Modeling*) koju karakterizira proces taljenja plastične niti i nanošenja taljenog materijala na vrh jednog sloja, sloj po sloj, a svi slojevi izrađeni su od istog materijala. Nedostatak ove tehnologije je što zbog toplinskog skupljanja veliki predmeti mogu pucati ili se deformirati, posebno ABS, a vrijeme ispisa traje i do nekoliko dana što je često rizik jer svaki kvar dovodi do ponovnog pokretanja cijelog procesa ispisa. Zato se veći predmeti često dijele na manje komade koji se kasnije mogu sastaviti. Materijali korišteni kod FDM ispisa su termoplasti, uključujući PLA (derivat kukuruznog škroba ili šećerne trske), ABS (dobro poznata plastika koja se većinom koristi u industrijskoj proizvodnji), najlon, polikarbonat, a također se koriste i drveni filamenti. Ovi materijal imaju različita fizička i mehanička svojstva i njihova temperatura taljenja kreće se od 170 °C do 300 °C, ovisno o materijalu, boji i proizvođaču. Na slici 2.3. prikazani su koluti PLA materijala debljine 3 mm koji se koriste za ispis modela na RepRap pisačima.



Slika 2.3. Koluti PLA materijala debljine 3 mm koji se koriste za RepRap pisače

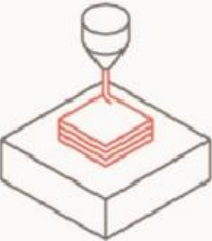
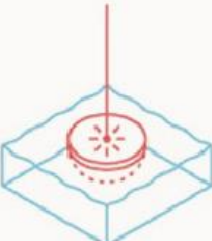
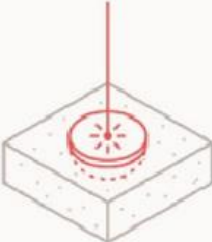

Izvor:

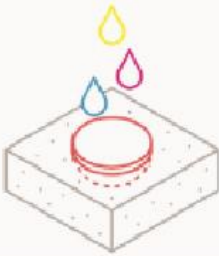
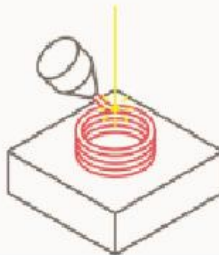
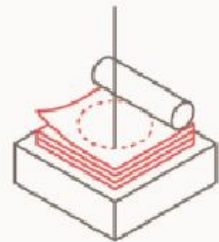
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=bd3869ba16fd0690d1348e25e67db9ac7c18dbe8#page=77>

2.3. Postupci 3D ispisa

Postoje brojni načini klasificiranja 3D pisača. Često se koristi klasifikacija prema osnovnoj tehnologiji, stoga se 3D pisači razvrstavaju ovisno o tome koriste li proces lasera, tehnologiju pisača, tehnologiju ekstruzije i slično. Postupci 3D ispisa također se mogu podijeliti ovisno o

materijalu koji se koristi kod ispisa, a može se koristiti materijal na bazi tekućine, na bazi praha te onaj koji ima čvrstu osnovu. Norma ISO/ASTM 52900:2021 stvorena je za standardizaciju terminologije te se u njoj također klasificira svaka od različitih metoda 3D ispisa [8]. Uspostavljeno je ukupno sedam kategorija procesa 3D ispisa. Svaka kategorija s pridruženim opisom procesa ispisa prikazana je na slici 2.4.

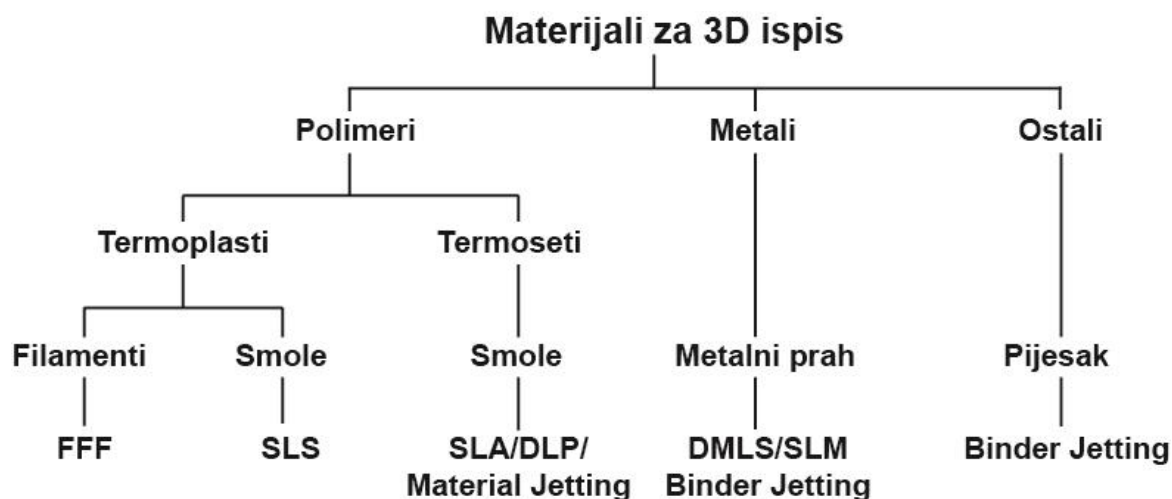
PROCES	OPIS	TEHNOLOGIJA
<p>Material Extrusion</p> 	<p>Proces aditivne proizvodnje u kojem se materijal selektivno raspršuje kroz mlaznicu ili otvor</p>	<p>Fused Filament Fabrication (FFF), češće se naziva Fused Deposition Modeling (FDM)</p>
<p>Vat Polymerization</p> 	<p>Aditivni proizvodni proces u kojem se tekući fotopolimer u bačvi selektivno stvrdnjava svjetlosno aktiviranom polimerizacijom</p>	<p>Stereolitografija (SLA), Digital Light Processing (DLP)</p>
<p>Powder Bed Fusion</p> 	<p>Aditivni proizvodni proces u kojem toplinska energija selektivno spaja slojeve praha</p>	<p>Selective laser sintering (SLS), Direct metal laser sintering (DMLS), Selective laser melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM)</p>
<p>Material Jetting</p> 	<p>Proizvodni proces u kojem se kapljice materijala selektivno talože i stvrdnjavaju na ploči.</p>	<p>Material Jetting (MJ), Drop-on-Demand (DoD)</p>

PROCES	OPIS	TEHNOLOGIJA
Binder Jetting 	Proizvodni proces u kojem tekući vezivni agens selektivno povezuje slojeve praha.	Binder jetting (BJ)
Direct Energy Deposition 	Proizvodni proces u kojem se fokusirana toplinska energija koristi za stapanje materijala topljenjem dok se taloži.	Laser Engineering Net Shaping (LENS), Based Metal Deposition (LBMD)
Sheet Lamination 	Proizvodni proces u kojem se listovi materijal spajaju kako bi se formirao 3D model.	Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM), Laminated Object Manufacturing (LOM)

Slika 2.4. Klasifikacija različitih metoda 3D ispisa s opisima

Izvor: The 3D printing Handbook: Technologies, design and applications

Kao i tehnologije 3D ispisa, materijali za 3D ispis također mogu biti podijeljeni u kategorije. Većina materijala za 3D ispis može se podijeliti u dvije skupine; polimeri i metali. Klasifikacija materijala za 3D ispis (vrste materijala i 3D pisači na kojima se koriste različiti materijali) prikazana je na slici 2.5.



Slika 2.5. Klasifikacija materijala koji se mogu koristiti za 3D ispis

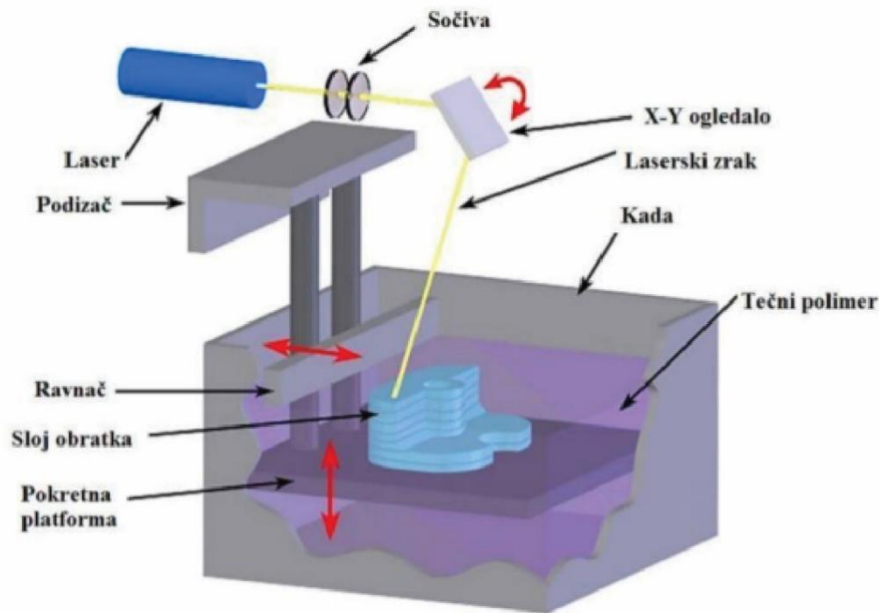
Izvor: The 3D printing Handbook: Technologies, design and applications

2.3.1. Tehnologija fotopolimerizacije u kadi

Tehnologija fotopolimerizacije u kadi (*Vat Photopolymerisation*) je proces aditivne tehnologije u kojem se tekući fotopolimeri u posudi selektivno stvrđavaju polimerizacijom uz pomoć svjetla. Vrste 3D pisaa koji koriste tu tehnologiju su SLA (*Stereolithography*) i DLP (*Direct Light Processing*).

Stereolitografija (SLA) je tehnologija koja se koristi kada je potrebno postići iznimno visok stupanj preciznosti. Smatra se početkom aditivne proizvodnje, a začetnik ove tehnologije 3D ispisa je Charles W. Hull koji je patentirao tehnologiju 1986. godine i osnovao tvrtku 3D Systems [3]. Ovim 3D pisaaem objekt se ispisauje tako da se selektivnim očvršćivanjem fotoosjetljivog polimera stvara sloj po sloj objekta uz pomoć ultraljubičastih (UV) laserskih zraka. Kod SLA tehnologije ispisa koristi se fotoosjetljivi polimer u tekućem stanju, odnosno smola.

Ovaj proces koristi zrcala, jedno na x osi i jedno na y osi. Zrcala se koriste za brzo usmjeravanje laserske zrake preko kade, odnosno područja ispisa. Uz pomoć laserske zrake, smola se stvrđava i skrućuje. Ovim procesom sastavlja se dizajn, sloj po sloj u niz točaka i linija koje su pisaaču dane kao skup koordinata. Standardni SLA pisaači koriste laser s veličinom točke od 130 do 150 mikrometara (može varirati o veličini stroja). Na slici 2.6. prikazana je shema SLA 3D pisaača te njegovi dijelovi.



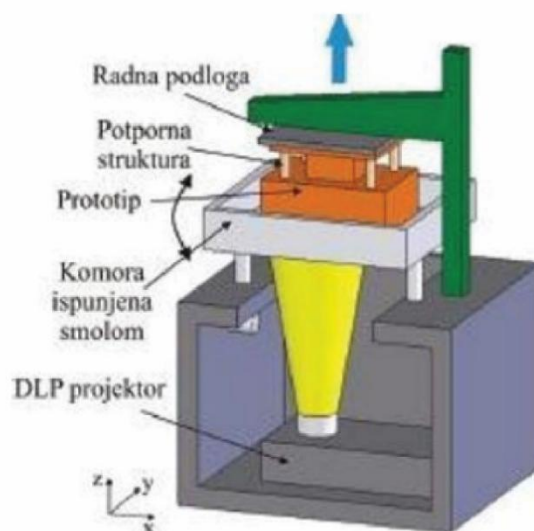
Slika 2.6. Prikaz SLA 3D pisača i procesa izrade modela sa svim definiranim dijelovima

Izvor: https://eprints.grf.unizg.hr/3026/1/Z925_Moric%CC%81_Anamarija.pdf

SLA tehnologija proizvođačima omogućuje smanjenje vremena potrebnog za izlazak proizvoda na tržište, snižavanje troškova razvoja proizvoda, stjecanje veće kontrole nad procesom dizajniranja i poboljšanje dizajna proizvoda [9]. Raspon primjena uključuje modele za konceptualizaciju, pakiranje i prezentaciju, prototipove za dizajn, analizu i funkcionalno testiranje, dijelove za prototip alata i alate za male serije proizvodnje, modele za oblikovanje, alate za učvršćivanje i slično.

Neke od prednosti SLA pisača su visoka dimenzijska točnost, izrada glatkih površina, mogućnost izrade detalja i brzina izrade modela. Među nedostatke ubraja se krhkost objekta, a potrebna je i dodatna ručna obrada, model gubi mehanička svojstva uslijed dugotrajnog izlaganja sunčevoj svjetlosti, ima kratak vijek trajanja lasera te je dodatan nedostatak visoka cijena materijala.

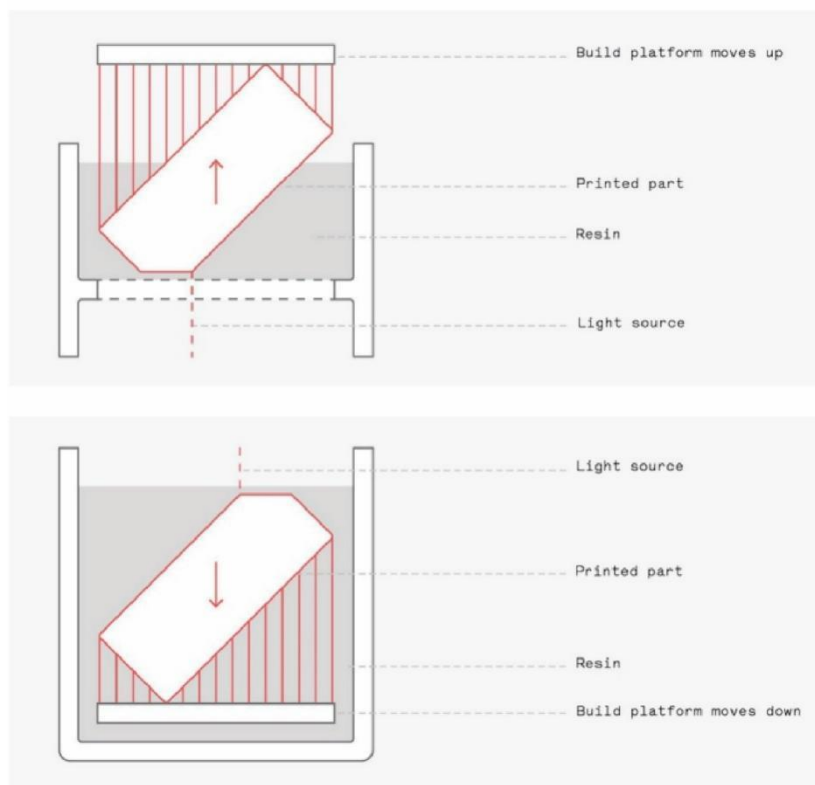
DLP slijedi gotovo identičnu metodu proizvodnje kao i SLA tehnologija. U postupku se koristi fotoosjetljiva akrilna smola na koju se iz DLP izvora svjetlosti projicira slika presjeka modela za taj sloj. Projektor kojim se slika projicira nalazi se ispod radne podloge. Smola je smještena u komori koja je napravljena od stakla i prekriva projektor. Prvi sloj modela napravljen je na donjoj površini smole koja očvršćuje uz pomoć svjetlosti koja se projicira iz projektora. Zatim se radna podloga podiže za debljinu novog sloja te se postupak ponavlja. Na slici 2.7. prikazana je shema DLP 3D pisača te njegovi dijelovi.



Slika 2.7. Prikaz DLP 3D postupka ispisa s definiranim dijelovima pisača

Izvor: https://eprints.grf.unizg.hr/3026/1/Z925_Moric%CC%81_Anamarija.pdf

Predmeti ispisani tehnologijom fotopolimerizacije zahtijevaju potporne strukture. Mjesto i veličina potporne strukture ovisi o vrsti pisača koji se koristi. Bottom-up pisači imaju izvor svjetla smješten ispod posude sa smolom s prozirnim dnom. U početku je platforma za izgradnju postavljena tako da postoji samo jedna debljina sloja između baze kade i platforme. Izvor svjetlosti (laser, UV lampa ili LED zaslon) stvrdnjava tanki sloj smole koja ga učvršćuje. Nakon što je prvi sloj očvrstnut i zalijepljen za platformu za izradu, pisač izvodi korak odvajanja. Odvaja stvrdnuti prvi sloj od dna posude i pomiče se gore za jedan sloj debljine. Top-down pisači postavljaju izvor svjetla iznad platforme za izradu. Platforma za izgradnju počinje na samom vrhu posude za smolu tankim slojem smole koji ga oblaže. Izvor svjetlosti stvrdnjava tanki sloj smole. Nakon što se prvi sloj stvrdne, platforma za izradu pomiče se jedan sloj prema dolje, za debljinu sloja te se proces ponavlja [8]. Za Bottom-up pisače potporne strukture su složenije. Na slici 2.8. prikazano je kako se ispisuju potporne strukture, ovisno o tome je li pisač Bottom-up ili Top-down.



Slika 2.8. Prikaz izgleda potpornih struktura, ovisno o tome je li pisač Bottom-up ili Top-down

Izvor: The 3D printing Handbook: Technologies, design and applications

2.3.2. Tehnologija stapanja naslaga praha

Tehnologijom stapanja naslaga praha (*Powder Bed Fusion*) koriste se sljedeći 3D pisači: SLS (*Selective Laser Sintering*), SLM (*Selective Laser Melting*), EBM (*Electron Beam Melting*) i DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*). Najkorištenija metoda je selektivno lasersko srašćivanje (SLS).

Selektivno lasersko srašćivanje (SLS) koristi se od 1992. godine kada je takav pisač stavljen na tržište, a njegov razvoj počeo je 1987. godine. Materijal za ispis na SLS pisaču dolazi u obliku praha koji se spaja pomoću snažnih laserskih zraka ugljičnog dioksida da se dobije konačan proizvod. SLS tehnologija se u 3D pisačima izvodi u slojevima tako da se uz pomoć cilindra koji rotira prah doprema u komoru koja služi za modeliranje. [10]

Višak praha ujedno je i potporna konstrukcija te ne postoji potreba za dodatnim potpornim strukturama kao što je to potrebno kod FDM i SLS pisača. Ispisani modeli spremni su za upotrebu nakon minimalnog čišćenja i obrade. Na slici 2.9. prikazan je model ispisan pomoću SLS tehnologije.



Slika 2.9. Model ispisan pomoću SLS tehnologije ispisa

Izvor: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/politehnikapu%3A138/datastream/PDF/view>

Neke od prednosti SLS postupka ispisa su brzina postupka ispisa, mogućnost izrade vrlo malih modela, nema potrebe za potpornim strukturama, a prah koji se ne upotrijebi prilikom ispisa može se koristiti kod izrade idućeg modela. Neki od nedostataka su: pisač treba veliku radnu površinu, kod korištenja nekih materijala može doći do stvaranja otrovnih plinova, kako bi se očistio višak materijala potrebna je posebna oprema, početna ulaganja su velika i model se mora ohladiti prije upotrebe.

SLM (*Selective Laser Melting*) je tehnologija koja se koristi laserom za ispis 3D predmeta [6]. U procesu ispisa prah se topi pomoću lasera. Radi na principu selektivnog povezivanja čestica pomoću lasera. Nakon takvog postupka pisač ponavlja isti postupak kako bi stvorio idući sloj. Zatim se model spušta za debljinu ispisanog sloja. Višak praha se nakon ispisa odstranjuje s modela.

DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*) je tehnologija izravnog laserskog taljenja metala ili laserske fuzije praha koja točno oblikuje složene geometrijske oblike koje nije moguće proizvesti drugim metodama proizvodnje metala [11]. DMLS ispisani dijelovi su jači i gušći od metalnih lijevanih dijelova i omogućuju proizvođačima da prvi izađu na tržište uz kraće vrijeme obrade. Metalni 3D ispis idealan je postupak za složene komponente u industrijama nafte i plina te za prilagođene medicinske vodiče, dijelove za zrakoplove i teške funkcionalne prototipove.

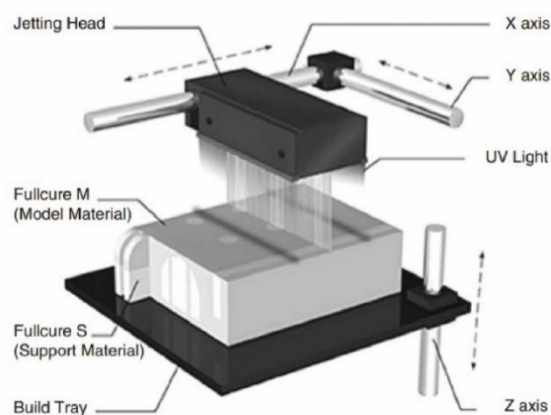
EBM (*Electronic Beam Melting*) nalikuje SLM tehnologiji ispisa budući da se za ispis također koristi prah. Razlika je u izvoru snage, SLM ispisuje predmet koristeći jaki laser koji

se nalazi u komori s inertnim plinom, a EBM ispisa predmet korištenjem jake laserske zrake u vakuumu. Proces ispisa zapravo je vrlo sličan, a EBM se također koristi kod ispisa metalnih dijelova. Dijelove dobivene EBM ispisom karakteriziraju jaka čvrstoća i gustoća.

2.3.3. *Material i Binder Jetting* tehnologija ispisa

Material jetting tehnologija ispisa često se uspoređuje s 2D ispisom. Koristi se fotopolimer ili kapljice voska koje se stvrđavaju kada su izložene svjetlu, a dijelovi se izgrađuju sloj po sloj [6]. Glava za ispis izbacuje stotine sitnih kapljica fotopolimera i zatim ih stvrđava pomoću UV svjetla. Nakon što je sloj nanesen i očvrstnuo, platforma se spušta za jednu debljinu sloja te dolazi do ponavljanja procesa. Takvi pisari danas se koriste za izradu dijelova visoke rezolucije, u dentalnoj i draguljarskoj industriji.

Jedna od velikih prednosti *material jettinga* je da se predmeti mogu ispisati korištenjem dva različita materijala, jedan se koristi kao glavni materijal, a drugi kao topiva potporna struktura. Tako da se za razliku od ostalih metoda 3D ispisa u kojima se potporna struktura mora ručno odvojiti u ovom obliku ispisa ona lako otapa. Ova metoda ispisa koristi termoreaktivne fotopolimerne smole za ispis objekata. Smola se raspršuje u sitnim kapljicama na platformu za izradu, a zatim se suši UV svjetlom. Zato *material jetting* tehnologija zahtijeva materijale niske viskoznosti koji se mogu uspješno izbaciti u obliku kapljica. To znači da se većina smole zagrijava na temperaturi od 30 °C do 60 °C, ovisno o pisaru i materijalu. Na slici 2.10 prikazan je 3D pisar tvrtke Stratasys s *material jetting* tehnologijom.



Slika 2.10. Prikaz modela Stratasys 3D Polyjet pisara

Izvor:

https://eprints.ukh.ac.id/id/eprint/183/1/2015_Book_AdditiveManufacturingTechnolog.pdf

Binder jetting je proces ispisa u kojemu se koriste dvije vrste materijala za izradu modela; neki materijal na bazi praha (najčešće gips, a može se koristiti i metalni prah) i ljepilo koje služi za povezivanje slojeva gipsa. *Binder jetting* pomiče ispisnu glavu te se na površini praha talože kapljice veziva koje povezuju čestice praha kako bi se proizveo ispisan sloj [8]. Nakon što je sloj ispisan, sloj praha se spušta i novi sloj praha se raspoređuje preko nedavno ispisanog sloja. Ponavljanjem ovog postupka stvara se čvrsti dio. Model se zatim ostavi u prahu dok se ne stvrdne, a nevezani prah se uklanja komprimiranim zrakom.

Binder jetting tehnologija može ispisivati u boji, ali modeli nisu precizni i čvrsti. Iako dijelovi u boji proizvedeni *binder jetting* ispisom općenito nisu funkcionalni, mogućnost ispisa u boji otvara mnoge praktične primjene. Puna boja omogućuje izradu realističnih prototipova te može prikazati izgled modela prije ulaganja u proizvodnju. Također se može koristiti za prikazivanje gradijenta na modelu koji dizajnerima omogućuje da steknu uvid u to kako bi mogao izgledati konačan proizvod. Na slici 2.11. prikazan je model ispisan u boji *binder jetting* tehnologijom 3D ispisa.



Slika 2.11. Model ispisan u boji upotrebom binder jetting tehnologije 3D ispisa

Izvor: The 3D printing Handbook: Technologies, design and applications

2.4. Budućnost 3D ispisa

Sa stajališta inženjerstva i dizajna, 3D pisaci postaju točniji, mogu izravno ispisivati male proizvode (mikronske veličine) i vrlo velike proizvode (veličine zgrade). Razvijeni su novi materijali za ove procese, a 3D ispis postaje brži, jeftiniji, sigurniji, pouzdaniji i ekološki prihvatljiviji.

Jedna od središnjih točaka za poboljšanje aditivne proizvodnje sastoji se od optimizacije njezinih značajki kako bi ova tehnologija bila konkurentna u odnosu na konvencionalne

proizvodne procese u različitim proizvodnim linijama [12]. U usporedbi s tradicionalnim sredstvima, korištenje 3D ispisa je i dalje preskupo. Drugi važan dio je onaj o proučavanju novih materijala. Celuloza je biljni materijal koji se stoljećima koristi za izradu papira, a pojavila se kao novi resurs za bolji, brži i povoljniji trodimenzionalni ispis. Njezina prednost u odnosu na polimere koji su se dosad najviše koristili kod 3D ispisa je što se može reciklirati i što je biorazgradiva.

Posebno zanimljivo područje i polje proučavanja je svemirski sektor u kojemu bi aditivna proizvodnja također trebala igrati važnu ulogu. Nacionalna uprava za zrakoplovstvo i svemir SAD-a (NASA) traži načine da se uz pomoć 3D pisača grade kuće na površini Marsa. Konačni cilj je omogućiti astronautima da ostanu na Crvenom planetu duže vrijeme. Provode se različiti projekti za istraživanje materijala i mogućnosti 3D tehnologije što znači da bi se dio potrebne infrastrukture na drugom planetu mogao izgraditi uz korištenje postojećih resursa.

Također se razvija aditivna proizvodnja u okruženju 4.0, odnosno provodi se studija o mogućnosti pozicioniranja aditivne proizvodnje u uslužnom okruženju. Izraz industrija 4.0 skovan je kako bi opisao pametnu tvornicu, viziju računalno potpomognute proizvodnje sa svim procesima međusobno povezanim putem interneta. Tvornice s potpuno kompjuteriziranim proizvodnim procesima bolje su pripremljene za brži odgovor na promjene na tržištu budući da su u svoje proizvodne procese integrirale veću fleksibilnost i individualizaciju. Međutim, kako bi se postigla stvarna poboljšanja u učinkovitosti i fleksibilnosti proizvodnje, proizvođači moraju moći upravljati i analizirati velike količine podataka, a najveći izazov bit će im softver. Industrijske tvrtke također bi trebale napraviti tehnološki skok u industriju 4.0 u području aditivne proizvodnje. [12]

Razlozi koji pokazuju da bi upotrebu 3D pisača trebalo uvesti u tvrtke u okruženju povezane industrije leže u tome što se zahvaljujući tehnologiji 3D ispisa može postići:

- kreativan dizajn proizvoda,
- više prilagođenih proizvoda visoke kvalitete i performansi,
- proizvodnja vođena potražnjom s manje proizvedenog otpada i učinkovitim korištenjem energije,
- potrošač može biti dizajner i „korisnik“ proizvoda.

3. Upotreba 3D pisača u ambalažnoj industriji

Prije pojave 3D pisača pojam tiskanja ili ispisivanja povezivao se s dvije dimenzije. Od 2003. godine došlo je do velikog rasta u 3D tehnologiji ispisivanja. Kako je dizajn ambalaže važan potrošačima koji kod odabira proizvoda sve više gledaju na ambalažu u koju je taj proizvod pakiran, proizvođači se natječu za pozornost na policama i u reklamama, a ekološka pakiranja postaju sve veći dio industrije ambalaže.

Budući da razvoj nove ambalaže može biti skup i dugotrajan proces, 3D ispis se počeo sve više koristiti kod izrade prototipova ambalaže, za izradu personaliziranih pakiranja, unapređenje dizajna ambalaže te kod izrade rezervnih dijelova strojeva [13]. Kod 3D ispisa postoji širok izbor dostupnih materijala, prozirnih, obojenih, neprozirnih, krutih, materijala koji su otporni na visoke temperature i posjeduju visoka svojstva žilavosti. Mogu se ispisivati predmeti od dva različita materijala u specifičnim koncentracijama i strukturama kako bi se dobila jedinstvena mehanička svojstva i pružio bliži pogled, opip i funkcija željenog krajnjeg proizvoda. Materijali koji se koriste kod 3D ispisa osmišljeni su kako bi odgovorili na vizualne zahtjeve i provjere dizajnera i inženjera u svakoj industriji.

Na današnjem sve konkurentnijem tržištu, zadovoljavanje potreba i ukusa potrošača postaje glavna briga proizvođača. Ambalaža proizvoda koje potrošači kupuju mora zadovoljiti potrebe potrošača u smislu funkcije, izgleda i troška proizvoda. Zato dizajn pakiranja igra važnu ulogu u marketingu te je cilj pronaći što brži, povoljniji i jednostavniji način kako proizvesti što bolju ambalažu koja će zadovoljiti sve aspekte, od praktičnosti, privlačnosti pa sve do ekologije. Tu bi u budućnosti veliku ulogu mogli igrati 3D pisači, a već ih i danas mnoge kompanije koriste u razvoju ambalaže.

3.1. Personalizirana ambalaža

Možda zbog brzog usvajanja mobilnog pristupa internetu i društvenih medija ili nekog drugog razloga, tvrtke počinju prihvaćati prednost personaliziranog pakiranja. Coca-Cola je nedavno pokrenula kampanju pod nazivom „Share a Coca-Cola“ koja je korisnicima omogućila da podijele svoje osobne limenke Coca-Cole sa svojim prijateljima putem društvenih mreža, a Nutella je kreirala sličnu kampanju nudeći personalizirane staklenke [14]. Kako se krećemo prema izrazito personaliziranom gospodarstvu, proizvodne metode poput 3D ispisa koje korisnicima omogućuju stvaranje visoko prilagođenih proizvoda sigurno će postati istaknutije.

Trend personaliziranog pakiranja posebno je značajan za industriju hrane i pića u kojoj su prilagođene rođendanske torte i boce alkoholnih pića vrlo poželjni darovi za članove obitelji i

prijatelje. Uz 3D ispis strukturni dizajn pakiranja može se prilagoditi na zahtjev potrošača. Budući da je trend 3D selfija već u porastu, lako je vidjeti kako bi se 3D skeniranje i 3D ispis mogli na sličan način primijeniti za prilagođeno pakiranje proizvoda.

Jedan od primjera upotrebe 3D pisača kod personaliziranih pakiranja je Pepsi koji je koristio 3D pisac za izradu replike maske Black Panther za limenke soka kao dio promotivne kampanje za film. Suočeni s ciljem razvoja i proizvodnje 250 kompliciranih maski u što kraćem roku, u poduzeću Pepsi odlučili su da bi izrada kalupa bila preskupa [15]. Primarni izazov s kojim su se susreli dok su razvijali repliku maske Black Panther bilo je određivanje kako najbolje proizvesti dio. Tim dizajnera i inženjera tražio je proizvodno rješenje koje bi moglo proizvesti vrlo složenu geometriju, a da je istovremeno izrada ekonomična s obzirom na male količine jer su trebali proizvesti samo 250 maski. Kombinacija ova dva faktora dovela ih je do 3D ispisa. Dok su istraživali odgovarajuće proizvodne procese 3D ispisa razmotrili su ukupno pet tehnologija te je na kraju odabrana *Multi Jet Fusion* tehnologija 3D ispisa jer je imala potrebnu preciznost za repliciranje finih karakteristika maske i duboku crnu boju koja bi trajala nekoliko godina. Sveukupno, od konceptualizacije do konačnog proizvoda, bilo je potrebno manje od šest mjeseci, a sve zahvaljujući tehnologiji 3D ispisa. Uspjeh maske Black Panther pokazuje potencijal 3D ispisa za unapređenje dizajna pakiranja. Na slici 3.1. prikazana je maska Black Panther za limenke soka izrađena tehnologijom 3D ispisa.



Slika 3.1. Maska Black Panther za limenke Pepsi soka izrađena tehnologijom 3D ispisa

Izvor: <https://www.plasticstoday.com/packaging/pepsico-discloses-details-black-panther-3d-printed-mask-project-cans>

3.2. Učinkovita izrada prototipova i unapređenje dizajna ambalaže

Tehnologija 3D ispisa je zbog svoje preciznosti i funkcionalnosti te zbog značajne uštede novca i vremena omogućila velik napredak u području izrade prototipova. Uz pomoć CAD geometrije te izrade modela neke ambalaže uz pomoć 3D pisača moguće je izbjeći neke pogreške u dizajnu ili funkcionalnosti ambalaže već u ranoj fazi izrade prototipa [14]. Zato je moguće na brži i povoljniji način postići rješenja koja u potpunosti udovoljavaju tehničkim te estetskih zahtjevima.

Svi u ambalažnoj industriji znaju da je pakiranje proizvoda važno kao i sam proizvod, a možda i više, i to je jedan od razloga zbog kojih je izrada prototipova toliko važna kada se radi o prodaji. Prije plasiranja proizvoda na tržište ključno je prvo izraditi njegov prototip kako bi se dobile povratne informacije i kako bi se osiguralo da konačni proizvod ispunjava točne zahtjeve ciljanih kupaca. Ovo je također ključno za uočavanje bilo kakvih nedostataka. Budući da se 3D prototipovi mogu proizvesti brzo i ekonomično, to ubrzava vrijeme i smanjuje troškove potrebne da se proizvod plasira na tržište. Ostale metodologije proizvodnje pakiranja kao što su injekcijsko prešanje, termooblikovanje i puhanje sve su skuplje za kratkotrajne proizvodne cikluse i potrebno im je više vremena za izradu gotovog prototipa. S 3D ispisom prototip se može od CAD nacрта do gotovog proizvoda napraviti u nekoliko dana.

Tvrtka Stratasys, koja se bavi proizvodnjom 3D pisača, iskoristila je sajam Cosmopack te je 2023. godine pokazala kako stručnjaci za kozmetičko pakiranje mogu ubrzati cikluse razvoja proizvoda i potaknuti kreativnost. Pokazali su da je to moguće učiniti iskorištavanjem njihovih naprednih tehnologija 3D ispisa u tijeku rada, u svim fazama od dizajna do proizvodnje, od ultra-realističnih funkcionalnih prototipova do visokokvalitetnih dijelova za krajnju upotrebu te robusnih pomoćnih sredstava za proizvodnju [16]. Također su pokazali kako Stratasysova rješenja za 3D ispis omogućuju dizajnerima kozmetičke industrije i marketinškim odjelima da proizvedu vizualno realistične modele u boji s prozirnošću tekstura i složenim oblicima, zahvaljujući naprednim tehnologijama tvrtke. 3D ispis omogućuje stvaranje modela visoke kvalitete te ubrzava donošenje odluka i omogućuje dizajnerima i marketinškim odjelima da ubrzaju razvojni ciklus proizvoda. Pokazali su kako funkcionira 3D pisac J55 Prime koji omogućuje dizajnerima izradu dijelova u pet materijala istovremeno tiskanih u jednom ispisu te pruža taktilne, tekstualne te senzorne mogućnosti u punoj boji. Na tom pisacu može se ispisivati u pantone bojama pa se štede sati vremena koji su se trošili na tehniku ručnog bojanja modela. Na slici 3.2. prikazan je model bočice parfema ispisan Stratasysovim 3D pisacem J55 Prime.

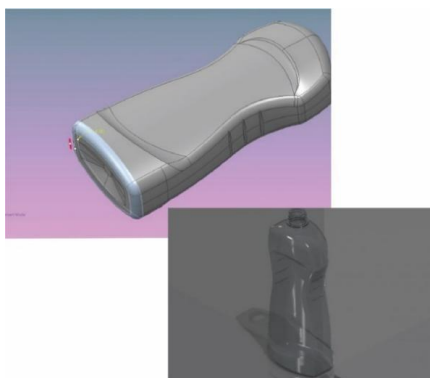


Slika 3.2. Bočica parfema ispisana 3D pisačem tvrtke Stratasys J55 Prime

Izvor: <https://www.infopack.es/en/new/from-concept-to-series-production-stratasy-brings-end-to-end-3d-printing-to-cosmopack-2023>

Jedan od primjera koji pokazuje kako se 3D modeliranje i ispis koristi za unapređenje dizajna ambalaže i izradu prototipa je redizajn PET ambalaže za deterdžent za posuđe Čarli tvornice Labud d.d. Kroz ovaj primjer pokazano je kako je prema dizajnerskom rješenju napravljen digitalni model prototipa koji je zatim ispisan 3D pisačem. Kod dizajniranja ambalaže za deterdžent za posuđe, novi oblik ambalaže je doraden i unaprijeđen te su iz digitalnog modela izrađeni prototipovi boce uz pomoć 3D pisača na uređaju *Stratasys Dimension Elite* u veličini od 500, 1000 i 1500 ml. [17]

Na primjeru se može jasno vidjeti koja je prednost korištenja 3D tehnologije ispisa kod izrade prototipova zato što se svi nedostaci mogu odmah uvidjeti te se izmjene mogu napraviti u kratkom roku. Bitno je naglasiti da ispisani prototip ima sve karakteristike kao i prava ambalaža te da daje osjećaj kao da se u ruci drži već gotov proizvod. Na slici 3.3. prikazan je CAD model PET ambalaže za Čarli.



Slika 3.3. CAD model boce Čarli korišten za 3D ispis

Izvor: <https://izit.hr/primjeri-iz-prakse/izrada-prototipa-pet-ambalaze/>

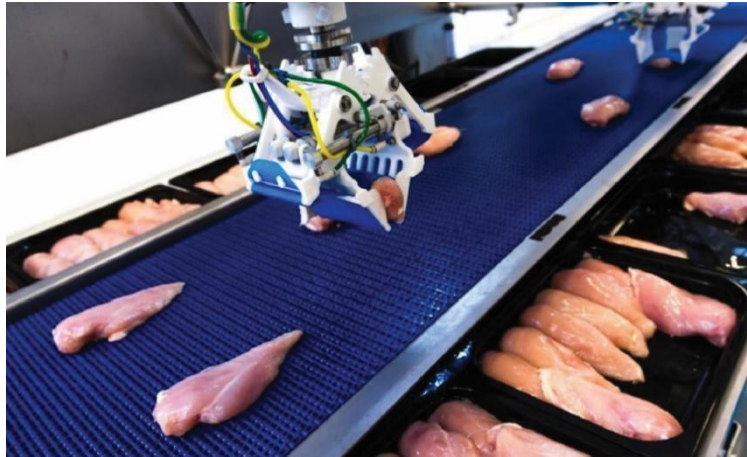
3.3. Izrada rezervnih dijelova strojeva na zahtjev

Brzina dolaska do tržišta nikada nije bila važnija u sektoru robe široke potrošnje jer robne marke imaju cilj razviti nove dizajne pakiranja kako bi odgovorile na stalno promjenjive želje kupaca i izdvojile se od konkurencije. Zato se, ponajviše u industriji hrane i pića, počeo koristiti 3D ispis kao jedna od tehnologija za razvoj proizvoda i proizvodnih linija koja služi da bi se optimizirali procesi i smanjili troškovi. U nastavku će biti prikazano nekoliko primjera koji pokazuju kako se 3D pisaci mogu koristiti za izradu rezervnih dijelova na zahtjev i koje su prednosti tehnologije 3D ispisa u odnosu na konvencionalnu izradu.

Poduzeća koja se bave proizvodnjom hrane i pića mogu povećati vrijeme neprekidnog rada linije korištenjem 3D ispisa za proizvodnju rezervnih dijelova. Tehnologija pomaže osigurati bržu dostupnost određenih rezervnih dijelova čime se izbjegavaju neplanirani zastoji. Postrojenja za punjenje pića napreduju zahvaljujući brzini s proizvodnim stopama u rasponu između 40.000 i 80.000 boca ili limenki na sat [15]. Ako proizvodnja stane njezina profitabilnost brzo opada. U najgorem slučaju pronalaženje problema, traženje rezervnog dijela, otprema i ugradnja mogu potrajati nekoliko dana. 3D ispis omogućuje proizvodnju rezervnih dijelova na zahtjev što pomaže u smanjenju skupih zastoja. Smanjenje neplaniranih zastoja pomaže proizvođačima da odgode skupa ulaganja u nova sredstva i povećaju produktivnost.

Budući da 3D ispis nudi fleksibilnost dizajna, alati se mogu dizajnirati ergonomski što radnicima pruža veću jednostavnost korištenja i poboljšava točnost pri obavljanju zadataka.

Jedan od primjera koji pokazuje kako se 3D pisac može koristiti za izradu rezervnih dijelova na zahtjev i koje su njegove prednosti u odnosu na konvencionalnu izradu daje islandska tvrtka za preradu hrane Marel. Oni su, u suradnji s danskim tehnološkim institutom, napravili najlonske hvataljke integrirane u robotske ruke koje hvataju meso, poput fileta, kako bi ga podigli na pokretnu traku i s pokretne trake [15]. Nove hvataljke imaju mnogo 3D tiskanih plastičnih dijelova s manje potrebnih vijčanih spojeva. Mnogo se lakše čiste te su laganije. Rok isporuke 3D ispisanih hvataljki može biti samo tri dana što pomaže u smanjenju troškova. Na slici 3.4. prikazana je Robo Batcher hvataljka koja ima dijelove ispisane 3D pisacem.



Slika 3.4. Robo Batcher hvataljka koja ima dijelove ispisane 3D pisačem

Izvor: <https://marel.com/en/news/robobatcher-gets-a-firm-grip-on-styling>

Drugi primjer ispisa dijelova na zahtjev je okretač limenki Twister koji je 3D ispisan korištenjem termoplastičnog materijala. U pivovari stroj za uvrtnje limenki okomito okreće limenke piva za 180° nakon što su napunjene i spojene tako da se mogu pasterizirati stojeći naopako [15]. Prednost 3D ispisa kod razvoja ovog dijela je što osim bržeg razvoja 3D ispis stvara zavoje kroz koje limenke prolaze velikom brzinom. Kronos je već uspješno testirao uređaj za uvrtnje limenki s do 150.000 limenki na sat te planira ugraditi komponentu u svaku od svojih novih linija za konzerviranje. Prednost 3D ispisa u ovom slučaju je što su za klasične proizvodne procese potrebni alati ili kalupi koji se moraju točno uskladiti s dijelovima koji se proizvode. U 3D ispisu, nasuprot tome, 3D model stvoren u CAD-u ispisuje se u slojevima, a jedini alat koji je ovdje potreban je 3D pisač te može služiti za ispisivanje različitih dijelova na zahtjev. Na slici 3.5. prikazan je dio za uvrtnje limenki ispisan 3D pisačem koji koristi Kronos.



Slika 3.5. Kronos dio za uvrtnje limenki ispisan 3D pisačem

Izvor: <https://www.rapidcenter.nl/nl/applicaties/twist-the-can>

Kompanija PepsiCo otišla je još dalje u upotrebi 3D pisača i to 3D ispisom kalupa za boce na čemu štedi 96 %. Kompanija PepsiCo morala bi potrošiti do 10.000 dolara za proizvodnju jednog seta alata za metalne kalupe, ovisno o njegovoj složenosti, a nakon što se izradi digitalni dizajn nove boce bila bi potrebna do četiri tjedna za strojnu obradu metalnog kalupa korištenjem konvencionalne proizvodnje, a zatim dodatna dva tjedna da se nabavi probna jedinica za stvarno puhanje prototipova.

Iako su 3D pisači bili izvrsni u izradi prototipova dizajna, prvi pokušaji 3D ispisa alata za kalupe nisu bili uspješni. Kada su se 3D ispisani kalupi koristili u strojevima za puhanje, mogli su proizvesti samo oko 100 boca prije nego što je kalup počeo otkazivati. To je potaknulo tim u PepsiCo da istraži korištenje hibridnog pristupa kombinirajući dijelove konvencionalnog metalnog kalupa s 3D ispisanim umetcima. Ovaj hibridni model koji je PepsiCo patentirao krajem 2020. godine uključuje korištenje univerzalne metalne vanjske ljuske kalupa koji odgovara većini komercijalnih strojeva za puhanje.

Kompanija PepsiCo proizvodi boce na dnevnoj bazi koristeći svoj hibridni pristup alatima i to već mjesecima. Ispitivanja puhanja u PepsiCo centru za istraživanje i razvoj dala su podatke koji pokazuju da su uzorci iz 3D ispisano kalupa usporedivi s uzorcima iz metalnog kalupa. Koristili su više različitih 3D pisača kako bi potvrdili da koncept alata za kalup nije vezan za pislač, ali su na kraju odabrali Nexa3D NXE 400 i njegov xPEEK147 materijal iz Henkel Loctitea za 3D ispis umetaka za alat [18].

Trenutno im nije namjera zamijeniti metalne kalupe za proizvodnju velikih količina jer je za redovitu proizvodnju ipak najbolje uložiti u metalnu opremu jer se očekuje da će ti kalupi proizvoditi milijune boca godišnje. Međutim, u budućnosti im je cilj ispisati metalne 3D kalupe koji će moći u potpunosti zamijeniti kalupe dobivene konvencionalnim metodama. Primjenjujući svoju patentiranu tehnologiju i hibridni pristup, PepsiCo koristi aditivnu proizvodnju kao pokretač u različitim aspektima razvoja boca te tako ubrzava i poboljšava proizvodnju visokokvalitetnih, funkcionalnih prototipova. Na slici 3.6. prikazani su 3D kalupi za boce ispisani korištenjem xPEEK147-Black materijala iz Henkela korištenjem Nexa3D NXE 400 3D pisača.



Slika 3.6. 3D kalupi za boce ispisani korištenjem xPEEK147-Black materijala iz Henkela korištenjem Nexa3D NXE 400 3D pisača

Izvor: <https://packaging360.in/news/pepsico-saves-96-by-3d-printing-bottle-molds/>

3.4. Prednosti za okoliš

3D ispis može se koristiti za ispisivanje iz više vrsta materijala, ne samo iz plastike, a također su razvijeni i 3D pisaci koji opet mogu upotrijebiti sav višak materijala koji se ne iskoristi kod ispisa nekog predmeta pa zapravo nema otpada. Uz nedavni zakon prema kojemu se plastične vrećice zabranjuju i uvode se alternative za njih, to je pokazatelj koliko je ozbiljan postao problem zagađenja plastičnim otpadom.

Perpetual Plastic Project možda je inovirao rješenje za plastični otpad. Tim koji stoji iza projekta stvorio je instalaciju za recikliranje gdje se plastični otpad reciklira na licu mjesta u nove proizvode pomoću 3D pisača. Proces uključuje čišćenje i sušenje otpadne plastike, usitnjavanje plastike na male komadiće, ekstruziju plastike u filament za ispis i zatim 3D ispis novog proizvoda na temelju digitalnog nacrtu. [14]

Također su popularni filamentni od PLA (polilaktična kiselina) koja je prirodni termoplastični poliester koji se može reciklirati te se dobiva iz obnovljivih izvora kao što su kukuruzni škrob ili šećerna trska. Međutim, da bi se normalni PLA filament razgradio mora biti u jedinstveno kontroliranom okolišu ili industrijskom stroju za recikliranje. Ali zato postoje i filamentni koji podupiru tvrdnju o biorazgradivosti, a neki od njih su NonOilen, Algix Alga i Compost 3D.

Compost3D je filament koji je proizvela tvrtka B4Plastics, a reklamiraju ga kao prvi filament čija se razgradnja može pratiti na pametnom telefonu i čije se vrijeme kompostiranja može izračunati prije nego što se objekt počne ispisivati [19]. Kao i kod većine plastike, vrijeme

kompostiranja nije brzo, iako je bolje od tradicionalnog PLA-a. B4Plastics procjenjuju da će 0,25 mm Compost3D filamentu trebati tri mjeseca da se razgradi, a 1,5 mm će trebati između 12 i 18 mjeseci.

Filament NonOilern na PHB najbolja je opcija u klasi kada se radi o biorazgradivom filamentu. Napravljen je od kombinacije PLA i PHB koja se može kompostirati kod kuće [19]. Dostupan je u samo jednoj boji filameta jer se ne koriste nikakve dodatne boje. Ako se korisnici ne odluče na kompostiranje u vlastitom dvorištu, u ponudi je i softver u kojemu im se može poslati filament, a oni će ga reciklirati u svojem industrijskom stroju gdje se razgrađuje u biomasu, vodu i CO₂. Degradacija NonOilena odvija se tri puta brže od standardnog PLA.

Inovativni proizvođač održive ambalaže GaeaStar predstavio je šalice od terakote koje se izrađuju od gline, vode i soli, pod nazivom Earth Cup. Pakiranje, koje je proizvedeno tehnologijom 3D ispisa, smatra se geo neutralnim zato što se proizvodi iz prirodnih materijala koji iza sebe ne ostavljaju štetni otpad [20]. Šalice ili zdjelice se ispisuju za manje od 30 sekundi, iznenađujuće su izdržljive, tanke poput ljuske jajeta, a 10 puta jače od papirnatih čaša. Mogu se koristiti uz bilo koji prehrambeni proizvod ili bilo koje toplo ili hladno piće. Šalice se mogu razgraditi pretvaranjem u prah ili se mogu oprati i ponovno upotrijebiti (npr. za posude za cvijeće). Na slici 3.7. prikazana je Earth Cup šalica ispisana 3D pisačem.



Slika 3.7. Prikaz Earth Cup šalice ispisane 3D pisačem

Izvor: <https://www.packagingdigest.com/sustainability/geo-neutral-earth-cup-goes-drink-dust>

4. FDM 3D pisači

3D ispis je aditivni proces izrade trodimenzionalnog predmeta tako da se slojevi materijala lijepe jedan na drugi prema dizajnu koji je napravljen na računalu uz korištenje softvera za 3D modeliranje [21]. Njegova prednost pred tradicionalnim načinima proizvodnje predmeta je veća iskorištenost materijala zato što se materijali ne bruse, ne režu te se ne buše, već je sav materijal iskoristiv za izradu određenog predmeta. Stoga se mogu proizvesti i oblici koji se ne mogu proizvesti nekim drugim metodama, kao što su lagane i čvrste konstrukcije. FDM (*Fused Deposition Modeling*) tehnologija 3D ispisa je najzastupljenija i najpovoljnija tehnologija 3D ispisa, stoga je i najčešće korištena.

4.1. Dijelovi FDM 3D pisača

Svaki pojedini FDM pisac sastoji se od određenih dijelova, a to su [6]:

- filament,
- ekstruder (*Extruder*),
- podloga (*Build Plate*),
- pokretna komponenta (*Linear Movement Components*),
- okvir (*Frame*),
- upravljačka jedinica (*Controller Unit*).

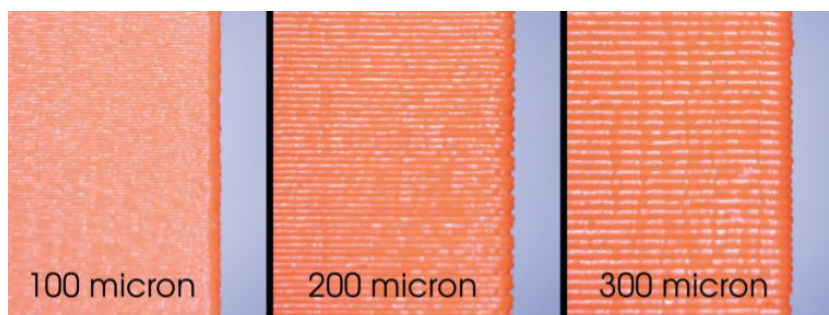
Filament je žica od termoplastike debljine 1,75 mm ili 2,85 mm. Ekstruder je dio koji uzima filament i gura ga kroz grijač. Podloga je ploča na koju se radi 3D ispis. Motori služe za pogon remenja i ekstrudera. Okvir služi za držanje ekstrudera na mjestu te je uglavnom metalni. Grijač je dio ekstrudera koji služi za zagrijavanje filameta ovisno o zadanoj temperaturi koja ovisi o vrsti materijala. Ventilator služi za regulaciju temperature na kojoj se slojevi hlade kako bi se bolje povezali.

Postoje različiti 3D pisači na tržištu, a jedna od razlika među njima je da neki pisači imaju pomičnu podlogu, a drugi imaju pomičan ekstruder koji omogućuje sve pokrete.

4.2. Rezolucija FDM 3D pisača

3D pisači imaju i rezoluciju ispisa. Kod 3D pisača rezolucija se određuje slojem Z (ploha Z određuje visinu, odnosno pomak gore-dolje) te X i Y plohama (označavaju širinu i dužinu, odnosno pomak naprijed-nazad i lijevo-desno). Z rezolucija smatra se najčešćom mjerom rezolucije kod FDM pisača. [6]

Na slici 4.1. vidljive su tri kocke istih veličina, ali ispisane različitom rezolucijom slojeva.



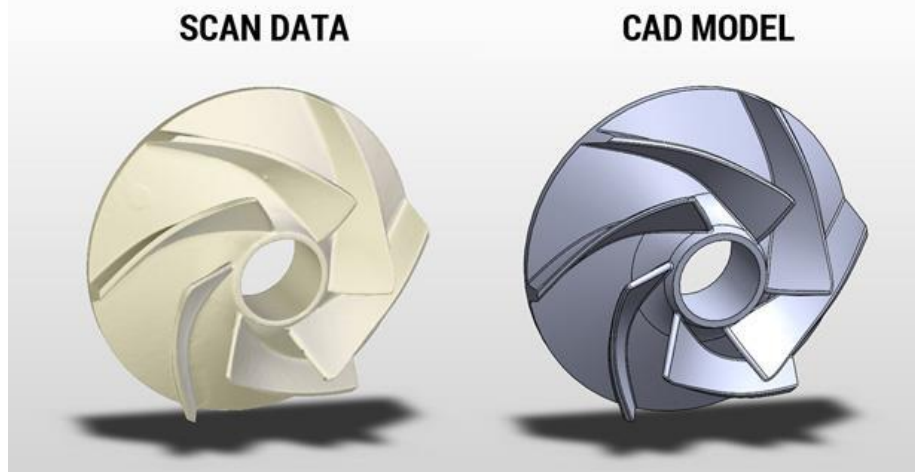
Slika 4.1. Razlike u kockama iste veličine koje su ispisane različitom rezolucijom slojeva

Izvor: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:358446>

Na primjeru kockica na slici vidi se da su slojevi najgušći na lijevoj slici što znači da ako je potrebna finija površina, onda se mora odabrati manja visina sloja da se dobije više slojeva na ispisanom 3D primjerku. To znači da će se primjerak koji se ispisuje na visini sloja od 150 mikrometara ispisivati duplo duže nego što bi se ispisivao predmet koji se ispisuje na 300 mikrometara. Ispisivanje predmeta na visini sloja od 150 mikrometara trajat će duplo duže od ispisa istog predmeta na visini sloja od 300 mikrometara. Dakle, manji broj mikrometara znači da će se primjerak dulje ispisivati, ali će i kvaliteta otiska biti bolja.

4.3. Izrada 3D modela

Da bi se 3D model mogao ispisati potreban je 3D CAD model koji se može izraditi na dva različita načina; 3D modeliranjem ili 3D skeniranjem. 3D modeliranjem stvara se računalna simulacija prikaza 3D objekta u tri dimenzije. Neki od softvera koji se koriste za 3D modeliranje su *Autodesk Fusion360*, *AutoCAD*, *SolidWorks*, *Inventor* i *Tinkercad* [3]. Za razliku od 3D modeliranja, postoji i 3D skeniranje što je postupak u kojemu se postojeći fizički objekt mjeri i snima te se pomoću 3D skenera pretvara u digitalni oblik. 3D modeliranje se najčešće koristi kod razvijanja novih proizvoda, a 3D skeniranje kada se želi ispisivati nešto što već postoji. Na slici 4.2. prikazan su modeli dobiveni 3D modeliranjem i 3D skeniranjem.



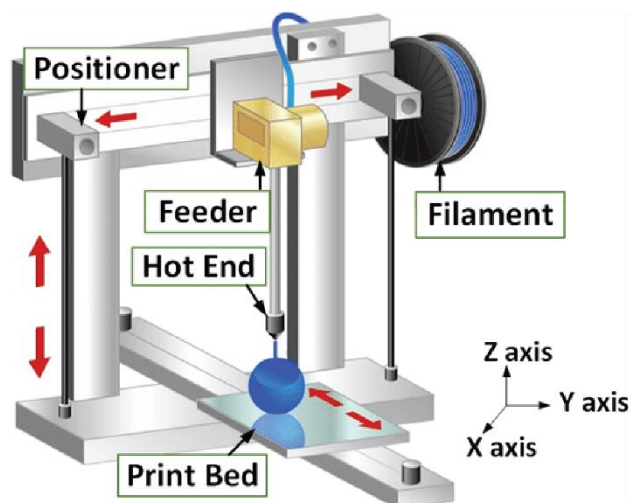
Slika 4.2. Razlika između modela dobivenih 3D modeliranjem i 3D skeniranjem

Izvor: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:212:152056>

Prije ispisa svaku datoteku treba izrezati na slojeve, a to se radi tako da se 3D model pretvori u jednu od klasičnih datoteka kao što je STL (*Stereolithography*) ili AMF (*Additive manufacturing file*). Datoteka koja ima gušću mrežu bolje prikazuje početni 3D model, a samim time zauzima i veću memoriju na računalu. STL datoteka sadrži samo geometriju modela, a AMF datoteka sadrži i neke druge informacije kao što su vrsta materijala, tekstura, boja i slično.

4.4. Proces rada FDM 3D pisača

Tehnologija rada FDM 3D pisača temelji se na izradi pomoću čvrstih materijala koji rade na principu ekstruzije kroz mlaznicu [22]. Zapravo se plastično vlakno konstantno dobavlja kroz zagrijanu mlaznicu maloga promjera. Zbog zagrijane mlaznice materijal se topi te se zatim nanosi slojevito. Za vrijeme nanošenja materijala mlaznica se pomiče po X i Y osi i ravnomjerno istiskuje materijal. Kada je završeno nanošenje jednog sloja, radni stol se pomiče po Z osi te počinje s nanošenjem idućeg sloja. Širina nanesenog sloja u horizontalnoj ravni kreće se otprilike oko 0,25 mm [22]. S obzirom na dobavljanje materijala kroz mlaznicu te izravno nanošenje na prethodno učvršćeni sloj, stvara se mala količina materijala koja nije iskorištena. Na slici 4.3. prikazani su dijelovi FDM 3D pisača.



Slika 4.3. Dijelovi FDM 3D pisača s prikaznom X, Y i Z osi

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/The-mechatronic-structure-of-an-FDM-3D-printer-with-inevitable-variations-arising-from_fig2_328324778

Zbog izrade potporne konstrukcije uređaj može koristiti dvije vrste materijala. Jedan materijal služi za izradu modela, a drugi za potpornu konstrukciju. Materijal korišten za izradu potporne konstrukcije mora biti topljiv u vodi ili lako lomljiv da se kod čišćenja gotovog proizvoda može lako odstraniti. Na slici 4.4. prikazane su faze izrade modela 3D ispisivanjem.



Slika 4.4. Faze izrade modela 3D ispisivanjem

Izvor: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:212:152056>

Nakon što se 3D model pretvori u STL/AMF datoteku, ona se reže na slojeve. Izrada slojeva karakteristična je za aditivnu proizvodnju te se zbog toga razlikuje od drugih

tehnologija. Ovisno o točnosti i finoći 3D modela datoteka se može izrezati na različit broj dijelova. Što je broj slojeva veći te što je niža visina određenog sloja i sama kvaliteta 3D ispisanog objekta je bolja. Na slici 4.5. prikazan je postupak rezanja CAD 3D modela na slojeve.



Slika 4.5. Postupak rezanja CAD 3D modela na slojeve

Izvor: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:212:152056>

Prije nego što se 3D pisač pusti u rad, pripremljenu datoteku bitno je pripremiti za 3D ispis, ovisno o vrsti tehnologije koja se koristi. Kod pripreme 3D ispisa potrebno je pripremiti sve na računalu te prethodno pripremiti i 3D pisač. Pod pripremom 3D pisača smatra se da se pisač očisti, kalibrira i učita se materijal koji će se koristiti za ispisivanje. Kod pripreme na računalu bitno je odabrati parametar 3D ispisa te odabrati pravilnu orijentaciju objekta koji će se ispisivati. Kada se svi parametri podese te se pripremi 3D pisač, potrebno je kreirati G-code koji će sadržavati sve informacije koje su bitne za kretanje 3D pisača (za parametre ispisa, vrstu materijala itd.) što se na kraju očitava na 3D pisaču. [3]

Nakon što se ispisivanje završi ispisan objekat je ponekad potrebno doraditi, što podrazumijeva uklanjanje potpornog materijala, bojanje, brušenje itd. Na slici 4.6. vidi se ispisan 3D model s potpornom strukturom te nakon što je ona uklonjena.



Slika 4.6. 3D model s potpornom strukturom te nakon što je ona uklonjena

Izvor: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:212:152056>

Može se reći da je FDM tehnologija ispisa fleksibilna kod mogućnosti izrade modela. Modeli izrađeni ovom tehnologijom mogu iznutra biti šuplji, mogu imati nagibe, mogu biti

zakrivljeni te imaju sve ostale značajke kako bi model bio funkcionalan. Nagib modela ne bi trebao biti preko 45° ako se ne koristi potporni materijal.

4.5. Prednosti i nedostaci FDM 3D pisača

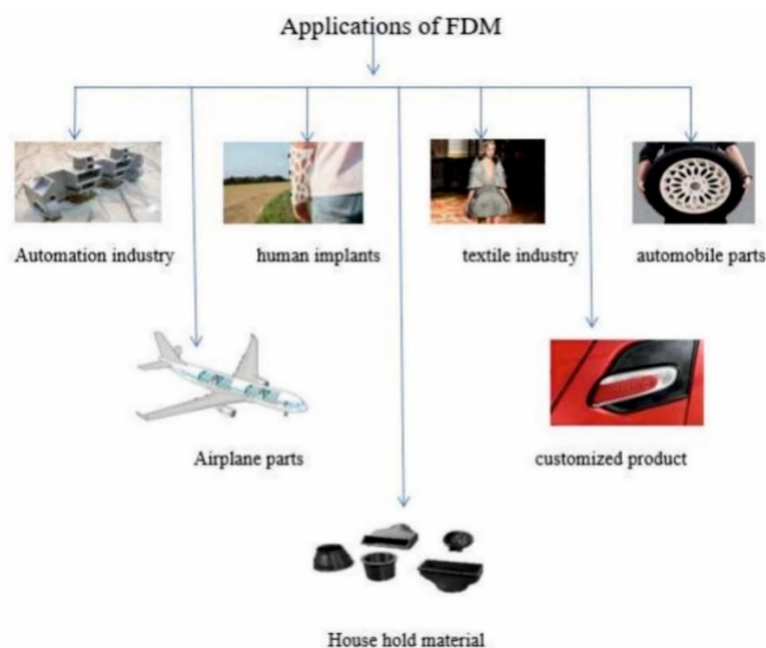
FDM pisači imaju svoje prednosti i nedostatke u odnosu na druge vrste 3D pisača. Prednosti FDM pisača očituju se u manjoj potrošnji energije, činjenici da ne koristi laserski snop, bez posebnih je zahtjeva za ventilaciju i hlađenje, jednostavan je za primjenu, uređaj je relativno povoljan i ima niske troškove održavanja, omogućuje izradu više prototipova u jednom ciklusu, nema velikog otpada materijala i oblici su postojani. [23]

Nedostaci FDM pisača su ograničenje vrsta materijala koji se mogu koristiti kod ispisa, nužna je primjena potporne konstrukcije, u smjeru koji je okomit na smjer izrade prototipovi su niže čvrstoće, cijena materijala je dosta visoka, a zbog oscilacija temperatura kod izrade modela može doći do njegovog raslojavanja.

4.6. Područja primjene FDM 3D pisača

Dijelovi ispisani na FDM pisaču prikladni su za detaljne funkcionalne prototipove, trajne proizvodne alate i proizvodnju male količine proizvoda. Ova se tehnologija koristi u industrijama poput zrakoplovstva, medicine, robe široke potrošnje, arhitekture i automobilske industrije. FDM pisači su zbog svoje niske cijene pogodni za kućnu i uredsku upotrebu. [24]

Na slici 4.7. prikazana su neka od područja primjene FDM pisača.



Slika 4.7. Područja primjene FDM pisača

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Application-areas-of-FDM_fig1_356209638

U zrakoplovnoj industriji tehnologija 3D ispisa pruža slobodu dizajna u komponentama i proizvodnji. Ta tehnologija u zrakoplovstvu ima potencijal za izgradnju lakih dijelova, poboljšanih i složenih geometrija koje mogu smanjiti potrebu za energijom i resursima [25]. 3D tehnologija ispisa naširoko je korištena za proizvodnju rezervnih dijelova nekih zrakoplovnih komponenti kao što su motori. Dijelovi motora lako se oštećuju i zahtijevaju redovitu zamjenu te je stoga tehnologija 3D ispisa dobro rješenje za nabavu takvih rezervnih dijelova. U zrakoplovnoj industriji prednost se daje legurama na bazi nikla zbog otpornosti na oksidaciju/koroziiju i toleranciju na oštećenja.

U automobilskoj industriji tehnologija 3D ispisa koristi se za proizvodnju prototipova te dijelova motora. Ta tehnologija može smanjiti troškove i vrijeme te stoga omogućuje testiranje novih dizajna u vrlo brzom vremenu.

Danas se 3D tehnologija ispisa koristi kod izrade sportske obuće, cipela po narudžbi te tenisica. Veliki proizvođači obuće kao što su Nike, New Balance te Adidas nastoje razviti masovnu proizvodnju obuće koristeći 3D ispis [25]. U modnoj industriji, koristeći tehnologiju 3D ispisa, moguće je dizajnirati te proizvoditi odjevne predmete pomoću mrežastog sustava te se mogu ispisivati ukrasi za tradicionalni tekstil. Neke od prednosti razvoja proizvoda korištenjem 3D tehnologije ispisa su prilagođavanje i stiliziranje proizvoda na zahtjev. Korištenjem 3D tehnologije ispisa smanjuju se troškovi te se proizvodi mogu isporučivati u manjim količinama u kraćem roku.

Tehnologija 3D ispisa može se koristiti za ispis 3D kože, istraživanje lijekova i farmaceutskih proizvoda, kosti i hrskavice, zamjenskih tkiva, organa te konačno za modele koji služe za vizualizaciju, obrazovanje i komunikaciju.

FDM pislačima mogu se stvoriti proizvodni dijelovi i funkcionalni prototipovi s izvanrednom toplinskom i kemijskom otpornošću te izvrsnim omjerima čvrstoće i težine.

4.7. Materijali za primjenu kod FDM 3D tehnologije ispisa

FDM materijali moraju imati odgovarajući modul savijanja i čvrstoću kako bi se filament pravilno formirao. Ovisno o materijalu te njegovom sastavu određuje se na kojoj temperaturi će prijeći iz krutog u tekuće stanje. Ta temperatura može biti različita i za isti materijal koji je od istog proizvođača, ali je samo različite boje. Bitno je da se točno odredi temperatura na kojoj se materijal dovoljno otapa da može izaći iz mlaznice kontinuirano, a opet je bitno da je dovoljno krut da se može brzo ohladiti te da se smanjuju deformacije uslijed promjene

temperature. Za svaki materijal na kolutu navedeno je koja je temperatura kojom se zagrijava glava pisača te na kojoj temperaturi se mora zagrijati podloga (krevet) na koju se ispisuje [26]. Primjerice, za PLA materijale temperatura je između 180 °C i 220 °C, a ovisna je o vlažnosti materijala, proizvođaču te boji materijala. Zbog toplinske stabilnosti PLA materijala grijana podloga nije toliko važna jer je materijal dovoljno toplinski stabilan da se model ne odvaja od površine i da ne dolazi do deformacija prilikom hlađenja. Kada se ispisuju ABS te ostali materijali preporučeno je zagrijati ploču na temperaturu između 70 °C i 100 °C kako model prilikom hlađenja prevelikom brzinom ne bi pucao ili se deformirao. Podloga bi u tom slučaju trebala biti zagrijana na temperaturu između 230 °C i 250 °C. U tablici 4.1. nalaze se neki od korištenih materijala kod FDM tehnologije 3D ispisa te njihove temperature taljenja.

Tablica 4.1. Podjela materijala za primjenu prilikom ispisa FDM pisačima

Naziv	Kratica	Temp. taljenja	Boje	Opis
Polilaktidna kiselina	PLA	180°C -230°C	Razne boje	Biorazgradljivi plastični derivat. Izradci su izrađeni robusni i relativno lomljivi, nisu otporni na visoke temperature.
Akilonitril butadien stiren	ABS	210°C - 260°C	Razne boje uključujući fluorescentne i termoboje	Tijekom taljenja ispušta neugodne mirise koji mogu biti štetni za zdravlje. Izradci su manje robusni i manje osjetljivi i lomljivi. Otporni su na više temperature.
Poliamid 6.6 (Nylon)	PA	oko 245°C	Prirodna bijela boja	Izradci su savitljivi, male mase, te otporne na kemikalije, male površinske napetosti. Primjena za proizvode u medicini.
Polikarbonat (aromatski poliester karbonske kiseline)	PC	270°C - 300°C	Razne boje	Čvrst i otporan materijal. Široka primjena.
Polivinil alkohol	PVA	oko 170°C	Bijela boja	Polimer topljiv u (vrućoj) vodi. Koristi se za potporne konstrukcije za izratke izrađene od PLA i ABS.

Izvor: <https://hrcak.srce.hr/166533>

Još neki materijali koji se koriste za FDM postupak 3D ispisa su termoplastični materijali otporni na vlagu. Neki od osnovnih materijala koji se koriste su: [27]

- ABS plus termoplastika koja je ekološki stabilna te 40 % čvršća nego standardni ABS materijal,
- ABS-M30 termoplastika koja je od 25 % do 70 % čvršća nego standardni ABS te ima dobru vučnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje,
- PC termoplastika koja se najčešće koristi u industriji zbog svoje visoke vučne čvrstoće te otpornosti na visoke temperature,
- PPSF/PPSU termoplastika koja je od svih materijala koji se koriste kod FDM ispisivanja najotpornija na toplinu i kemikalije te se zbog toga može primjenjivati pod visokim temperaturama i otporna je na koroziju,
- ULTEM 9085 je novije razvijena vrsta termoplastike koja se primjenjuje u svemirskoj i pomorskoj industriji. Odlikuje ju čvrstoća, lagana je i teško zapaljiva te je zbog toga idealna za izradu funkcionalnih prototipova.

Na slici 4.8. prikazane su različite vrste filameta koji se koriste kod ispisa FDM 3D pisačima.



Slika 4.8. Prikaz različitih vrsta filamenata koji se koriste kod ispisa FDM pisačima

Izvor: [Autor]

5. Praktični dio – izrada modela i ispis modela boce pomoću 3D pisača

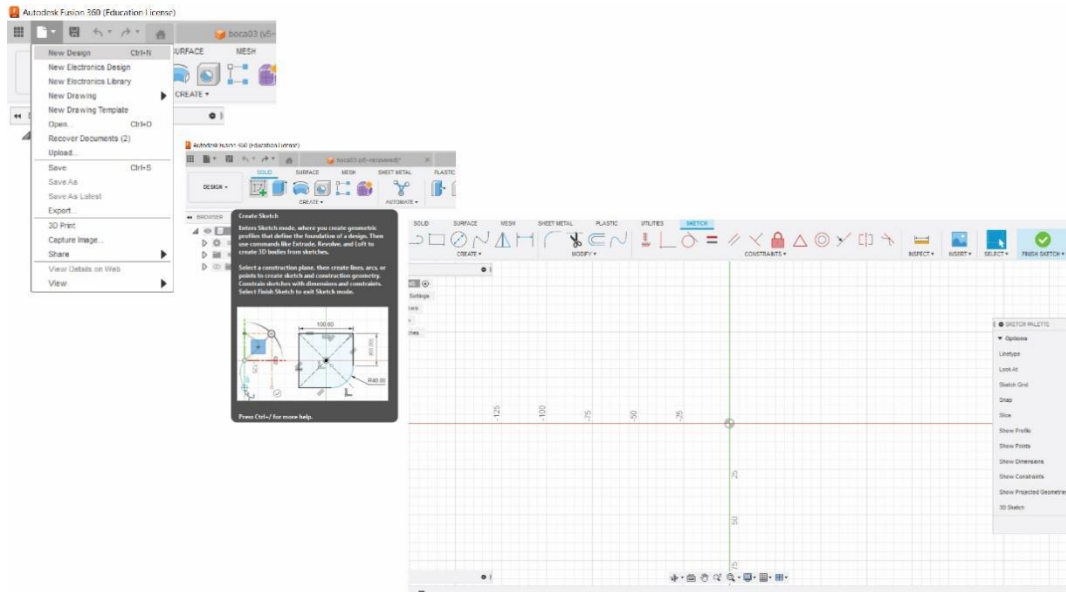
U praktičnom dijelu diplomskog rada prikazana je izrada 3D modela boce u softveru Autodesk Fusion 360 i postupak ispisa modela pomoću 3D pisača Crealityj Ender 3 V2 te svi koraci koji prethode ispisu 3D modela boce. 3D pisači pojednostavljaju izradu ambalaže jer je moguće odmah vidjeti sve nedostatke. Potrebne izmjene u dizajnu i izgledu moguće je napraviti u kratkom roku i bez većih dodatnih troškova.

5.1. Izrada 3D modela u softveru Autodesku Fusionu 360

Fusion 360 je novi Autodeskov proizvod koji je osmišljen kao snažan softverski paket za 3D modeliranje s integriranim CAM modulom koji se temelji na značajkama ugrađenima u softver. Autodesk Fusion 360 povezuje cijeli proces razvoja proizvoda u jednu platformu temeljenu na oblaku koja radi i na Mac i PC platformama. Kombinira industrijski i mehanički dizajn, suradnju, simulaciju i strojnu obradu u jednom softveru. Alati u softveru Fusion 360 omogućuju brzo i jednostavno istraživanje dizajnerskih ideja s integriranim konceptom u skup alata za proizvodnju. [28]

Ovaj softver treba dobru mrežnu vezu za rad u suradnji s drugim članovima tima. Softver je odličan izbor za one pojedince i tvrtke koji se žele razvijati i mnogo pristupačniji od bilo kojeg drugog softvera koji nudi Autodesk. Autodesk Fusion 360 je softver koji se koristi za dizajniranje te projektiranje proizvoda, vizualizaciju, animaciju, izradu tehničke dokumentacije, 3D ispis i simulaciju. Omogućava parametarsko i izravno modeliranje, modeliranje površinama i modeliranje slobodnim formama. Fusion 360 je jedini softver koji povezuje cijeli proces razvoja proizvoda u jedinstvenu CAD/CAM/CAE platformu temeljenu na oblaku. Pruža svu potrebnu podršku za usmjeravanje učinka napredovanju inženjerskih i proizvodnih vještina.

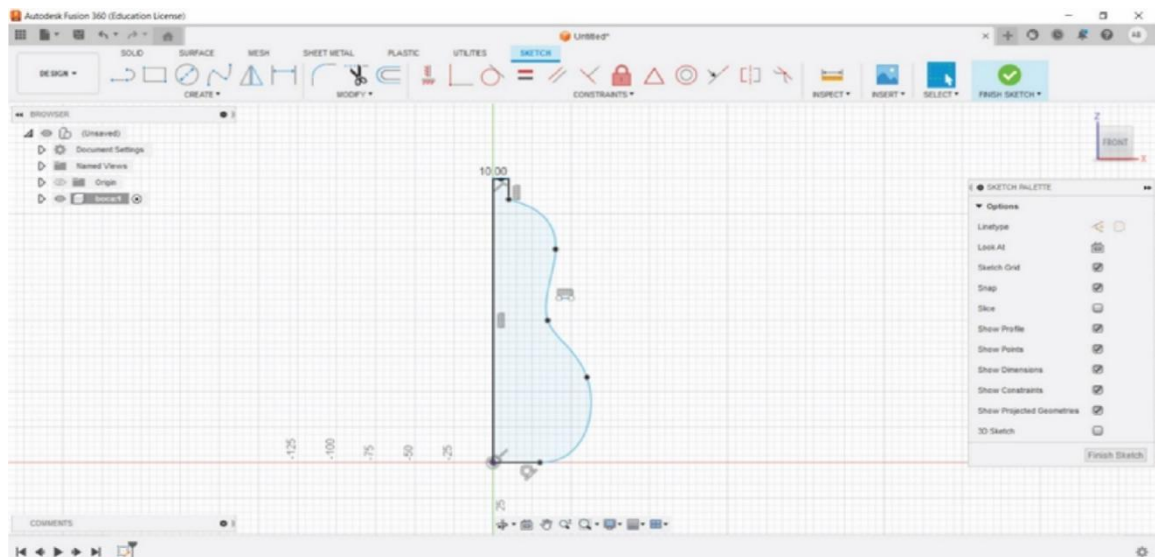
Izrada modela započela je izradom novog projekta, klikom na ikonu *File*, zatim *New design* te na kraju *Create Sketch* kako bi se dobila radna površina za izradu novog modela. Na slici 5.1. prikazan je postupak izrade novog projekta u softveru Autodesku Fusionu 360.



Slika 5.1. Postupak izrade novog projekta u softveru Autodesku Fusionu 360

Izvor: [Autor]

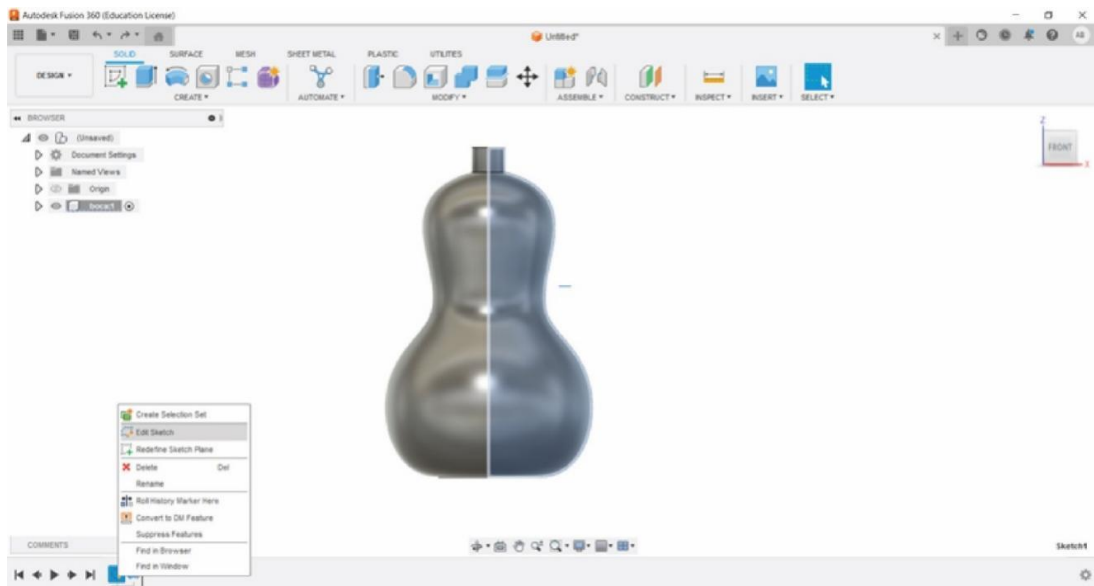
Izrada modela počela je izradom tijela boce tako da se prvo pomoću alata *Line* odredila visina boce te širina dna (baze) boce. Za početak je nacrtana polovica boce te je pomoću alata *Spline* izrađen zaobljeni oblik boce prema želji koji se kasnije može preoblikovati uz pomoć točaka. Vrh boce je izrađen pomoću alata *Line* u kojemu se može zadati dimenzija otvora boce. Na slici 5.2. vidljivo je kako je izrađena polovica tijela boce s otvorom.



Slika 5.2. Izrada polovice modela boce uz pomoć alata *Line* i *Spline*

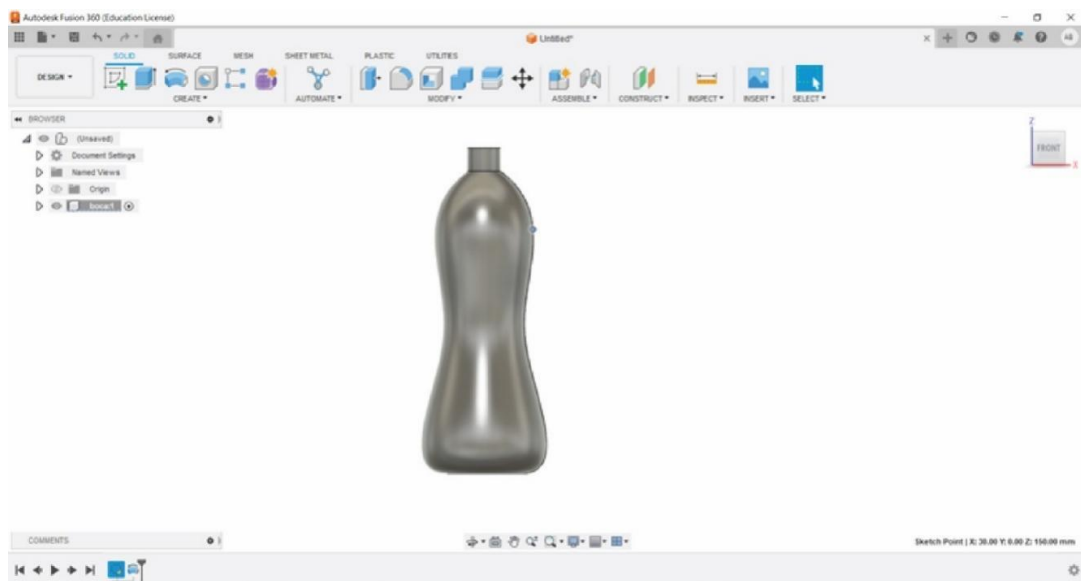
Izvor: [Autor]

Nakon izrade polovice boce, pomoću alata *Revolve* izrađena je druga polovica boce i odmah je dobiven 3D oblik boce koji se može naknadno mijenjati ovisno o tome kakav se dizajn boce želi postići. Alat *Revolve* stvara čvrsto tijelo okretanjem odabranog profila ili geometrije modela oko osi u softveru Fusion 360. Ako se oblik boce želi promijeniti uz pomoć opcije *Edit sketch* vraća se na 2D oblik pa se uz pomoć točaka može mijenjati prema vlastitim željama. Na slici 5.3. vidi se oblik boce dobiven nakon korištenja alata *Revolve*, dok je na slici 5.4. prikazan konačni oblik boce dobiven nakon korištenja opcije *Edit sketch*.



Slika 5.3. Oblik boce dobiven nakon korištenja alata Revolve

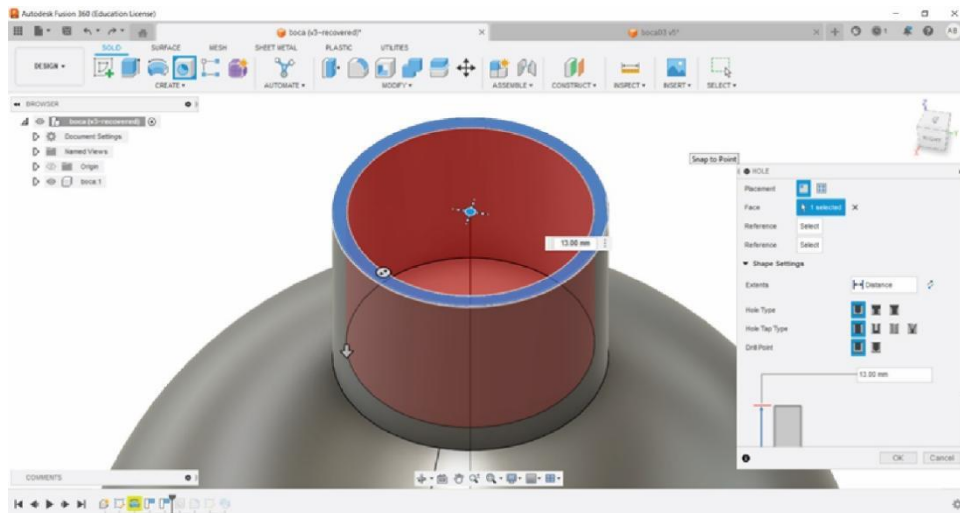
Izvor: [Autor]



Slika 5.4. Konačni oblik boce dobiven nakon korištenja opcije Edit sketch

Izvor: [Autor]

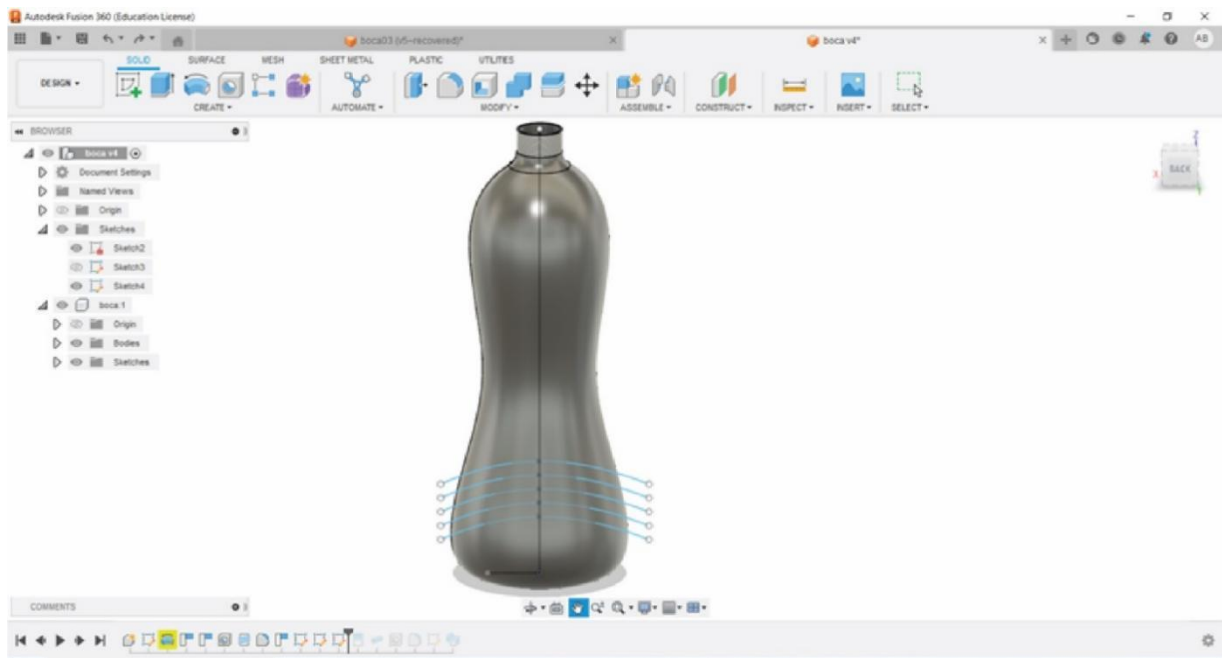
Kako bi boca imala otvor, uz pomoć alata *Hole* definiran je jednostavan otvor u čvrstom tijelu boce. Odabrana je točka u sredini otvora kako bi se definiralo njegovo središte. Prema potrebi su prilagođene i postavke veličine, oblika i položaja otvora boce. Izrada otvora boce pomoću alata *Hole* prikazana je na slici 5.5.



Slika 5.5. Izrada otvora boce korištenjem alata Hole

Izvor: [Autor]

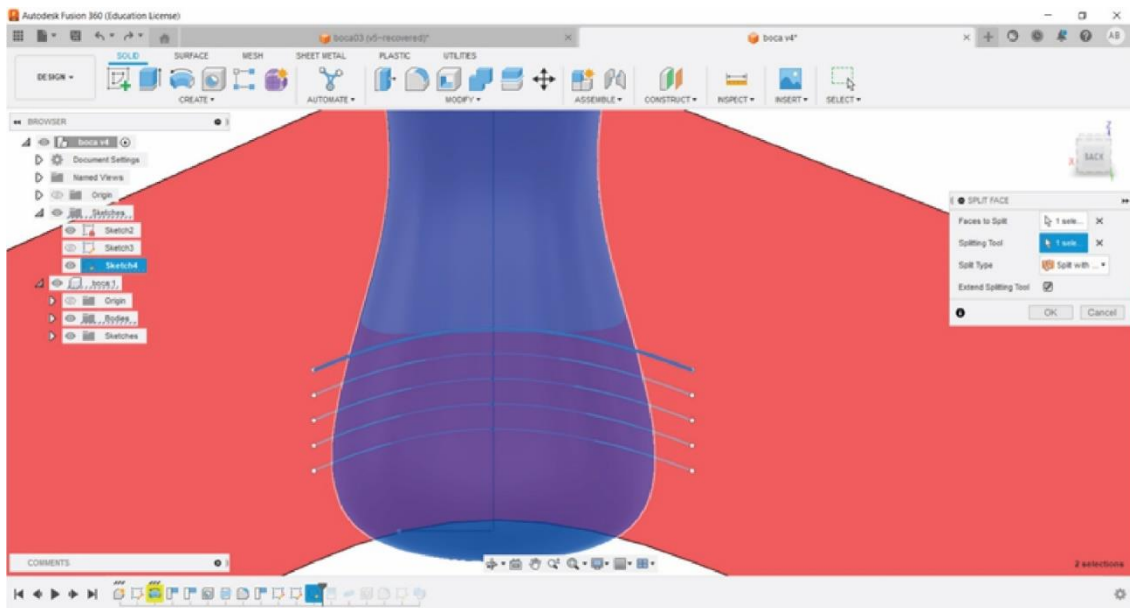
U softveru Autodesku Fusionu 360 kod izrade modela mogu se dodavati i različite krivine koje mogu služiti za ukrašavanje boce. Kod ove boce dodane su udubljene linije oko jednog dijela boce kako tijelo ne bi bilo sasvim ravno. To se može napraviti na više načina, a jedan način prikazan je u nastavku. Korištenjem alata *Fit Point Spline* nacrtana je linija na tijelu boce kao što je prikazano na slici 5.6. Zatim je linija duplicirana uz pomoć alata *Rectangular Pattern* duž linearnih osi u redovima ili stupcima. Kod dupliciranja je potrebno odrediti os duž koje će se u ovom slučaju linija rasporediti te se označava objekt (linija) koji se duplicira. Može se upisati koliko se linija želi duplicirati i odrediti u kojem smjeru da se dupliciraju. Također se može upisati udaljenost između njih. U ovom slučaju dodane su još četiri linije, kako bi ih ukupno bilo 5.



Slika 5.6. Dodavanje linija korištenjem alata *Fit Point Spline* i dupliciranje pomoću alata *Rectangular Pattern*

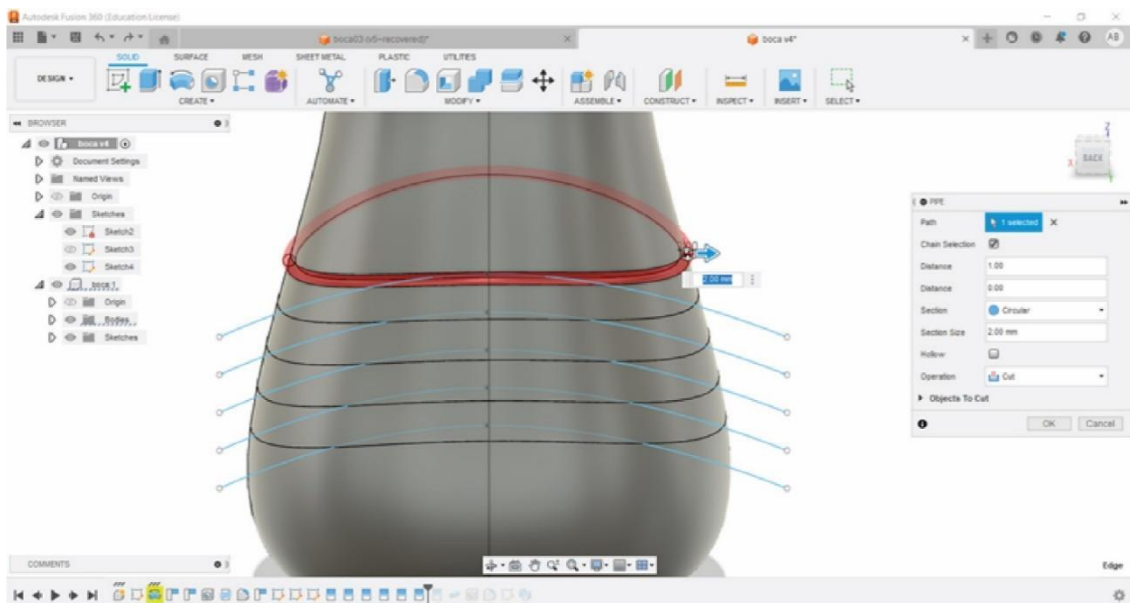
Izvor: [Autor]

Zatim se pomoću alata *Split Face* tijelo boce podijelilo te su uz pomoć alata *Pipe* napravljene krivine oko tijela boce. Kod alata *Split Face* označava se tijelo koje se dijeli i linija koja služi za dijeljenje tijela te se postupak ponavlja dok se ne označi svaka nacrtana linija, kao što je prikazano na slici 5.7. To se radi kako bi se željeno udubljenje u boci dobilo oko cijele boce, a ne samo s jedne strane. Zatim su pomoću alata *Pipe* napravljena udubljenja u boci tako da se označio *path* odnosno linija koju je zadana, zatim operacija *cut* i zadala se debljina, odnosno dubina udubljenja koje se željelo stvoriti na boci, kao što je prikazano na slici 5.8.



Slika 5.7. Upotreba alata Split Face za dijeljenje tijela boce

Izvor: [Autor]

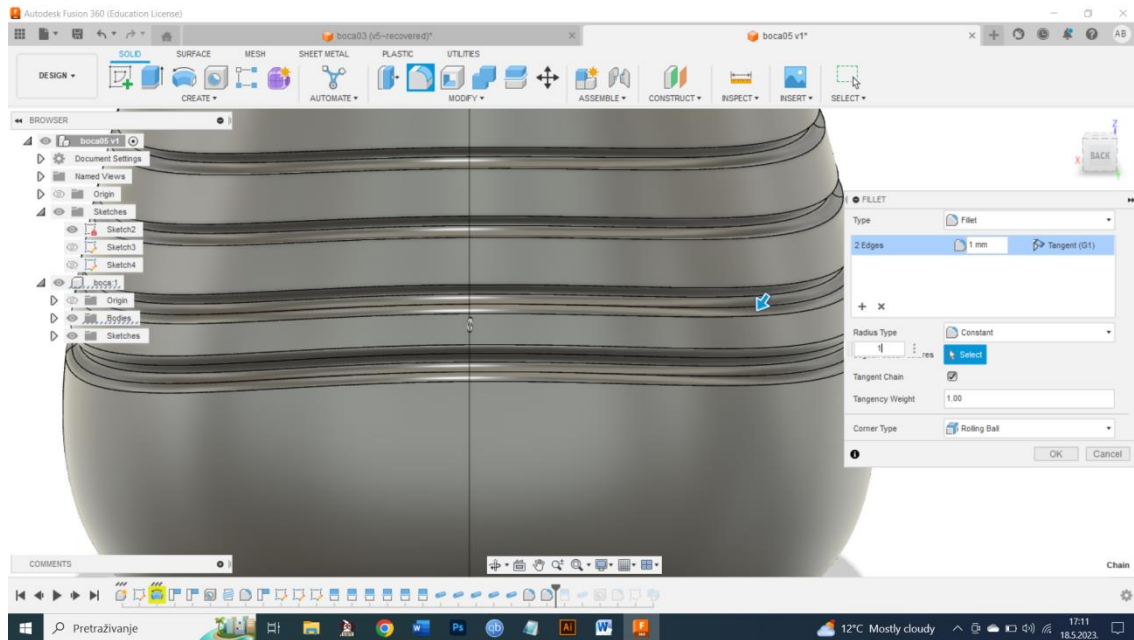


Slika 5.8. Upotreba alata Pipe za stvaranje udubljenja na boci

Izvor: [Autor]

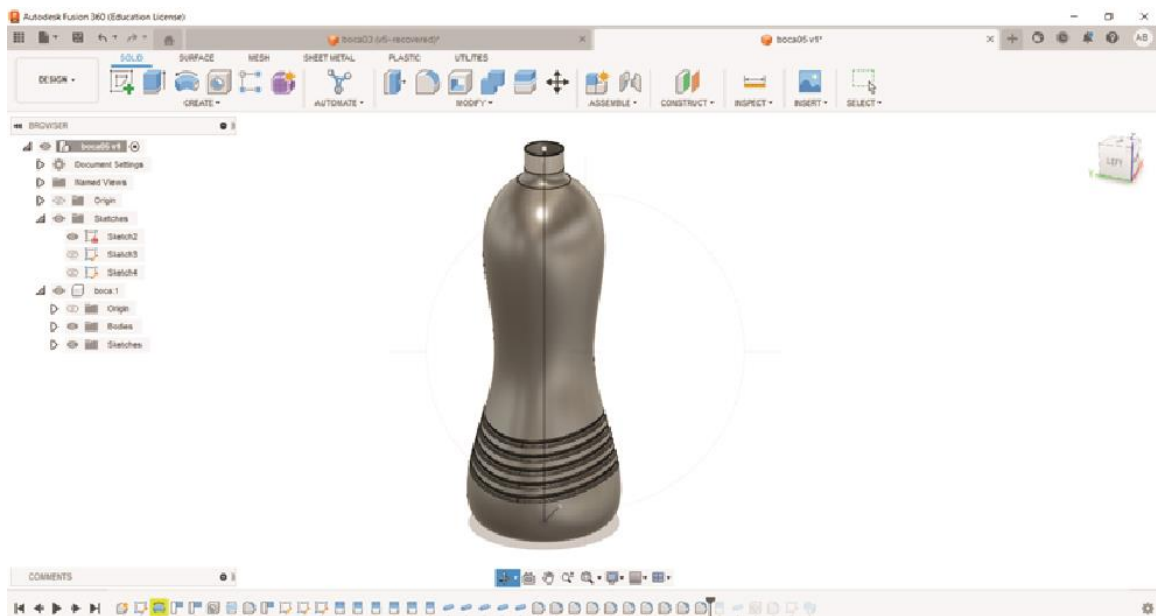
Za svaku su liniju posebno, uz pomoć alata *Fillet*, zaobljeni rubovi svakog udubljenja na boci kako ne bi bili oštri. Korištenjem alata *Fillet* zaokruženi su rubovi čvrstog materijala i to uklanjanjem materijala s vanjskih rubova ili dodavanjem materijala na unutarnje rubove. Kod korištenja ovog alata može se upisati radijus na koji se želi zaokružiti ili se koristi povlačenje

strelice kao što je prikazano na slici 5.9. Nakon završetka izrade modela koji je prikazan na slici 5.10, model je spremljen kao STL datoteka.



Slika 5.9. Upotreba alata Fillet za zaobljavanje rubova udubljenja na boci

Izvor: [Autor]



Slika 5.10. Prikaz gotovog modela boce izrađenog u softveru Autodesk Fusion 360

Izvor: [Autor]

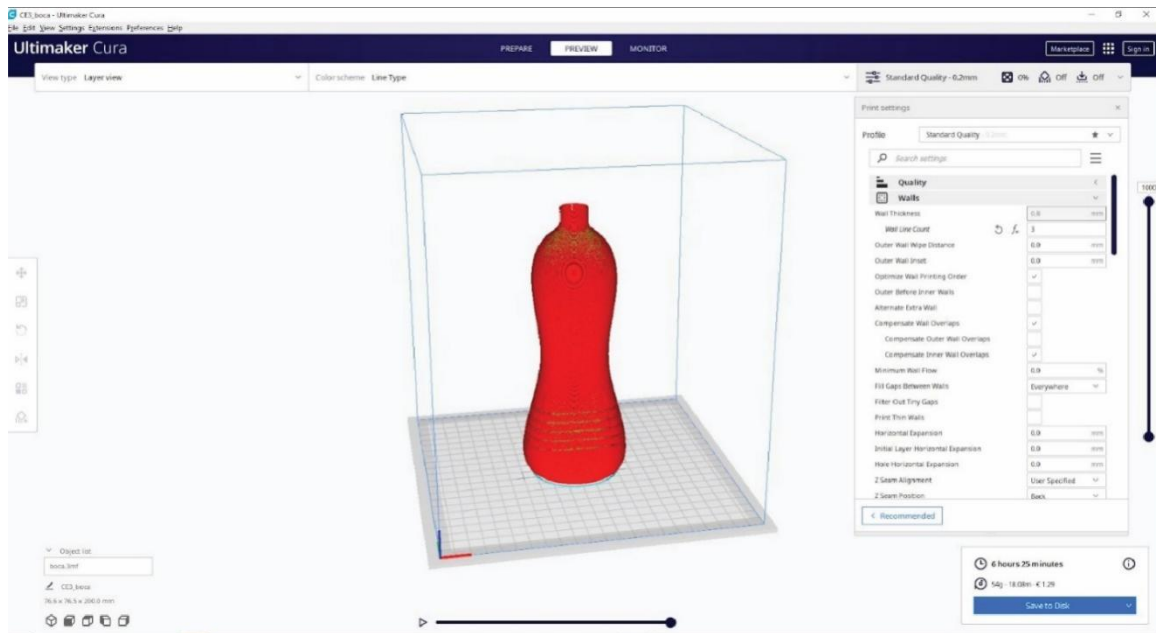
5.2. Prikaz modela boce u softveru Ultimakeru Curai

Ultimaker Cura je softver za generaciju G-koda. *Slicer* ili rezač je važan softverski alat u bilo kojem tijeku rada 3D ispisa. On priprema digitalne modele za 3D ispis tako što ih reže u horizontalne slojeve koji se mogu 3D ispisati [25]. Rezači su složene aplikacije. Oni mogu uzeti 3D model bilo kojeg oblika ili veličine i izračunati strategiju 3D ispisa koja će vjerno reproducirati model u fizičkom svijetu. Rezači isto tako mogu generirati uzorke koji ispunjavaju unutarnju geometriju modela tako da imaju dodatnu snagu i krutost. Također mogu generirati i potporne strukture za modele tako da se dobiju bolji rezultate 3D ispisa. Softver Ultimaker Cura započeo je kao softverski projekt Davida Braama oko 2010. godine. Nazvao ga je *Cura* jer je bio zamišljen kao *lijek* za pretjerano složene i tehnički zahtjevne aplikacije za rezanje koje su bile dostupne u to vrijeme, a od kojih su se mnoge temeljile na naredbenom retku i bile zastrašujuće za početnike.

Datoteke izvezene za 3D ispis (kao što su STL ili AMF) predstavljaju samo geometriju modela i teško ih je urediti kada su potrebne promjene. STL je najpoznatiji format za 3D ispis, ali AMF je sve popularniji jer osim geometrije modela ovaj noviji format sadrži i druge karakteristike kao što su podaci o boji i teksturi [25]. 3D model se uvodi u rezač gdje se postavlja, skalira i okreće prema potrebi. Zatim se reže na slojeve. Moguće je podesiti niz postavki rezanja, primjerice visinu sloja ili gustoću.

Primarna svrha bilo kojeg rezača za 3D ispis je generiranje uputa za 3D pisač. U većini slučajeva ove će upute ispisati kao G-kod. Softver Ultimaker Cura je jednostavan, ali moćan softver za 3D rezanje. Profili ispisa optimizirani su za Ultimaker 3D pisače, ali softver izrezuje 3D datoteke za bilo koju marku odnosno model 3D pisača. Softver podržava STL, AMF i OBJ 3D formate datoteka i također ima funkciju koja uvozi i pretvara 2D slike (JPG, PNG, BMP i GIF) u 3D ekstrudirane modele. Softver omogućuje otvaranje i postavljanje više modela na postolje za ispis (svaki s različitim postavkama rezanja ako je potrebno). To omogućuje ispis više modela istovremeno, čineći upravljanje procesom ispisa jednostavnijim.

Za ispis 3D modela boce u softveru Ultimaker Cura podešena je debljina stijenke boce 0,8 mm, temperatura mlaznice (230 °C), temperatura ležaja (66 °C), vrijeme ispisa 6 sati i 25 minuta. Također je podešeno da se ispisuje samo stijenka boca te da nema ispune, kao što je prikazano na slici 5.11.



Slika 5.11. Prikaz modela boce u softveru Ultimaker Cura

Izvor: [Autor]

5.3. Priprema 3D ispisa

5.3.1. G-code

G-code je programski jezik koji govori stroju kako da nešto učini. Uz 3D ispis, G-code sadrži naredbe za pomicanje dijelova unutar pisača. G-code se sastoji od G i M komandi kojima je dodijeljen neki pokret ili radnja. G-code daje upute 3D pisačima o svakoj radnji koju pisač mora poduzeti, uključujući pokrete, brzinu, temperaturu i još mnogo toga.

Sastoji se od nekoliko različitih slova i brojeva koji imaju određena značenja ili upute, a na primjeru je prikazano što koje slovo znači kod čitanja koda na 3D pisaču.

G ili M s odgovarajućim brojem označavaju određenu akciju koju pisač mora poduzeti. Za većinu pisača ove su kombinacije slova i brojeva univerzalne. X iza kojeg slijedi broj i Y nakon kojeg slijedi broj, ove kombinacije slova i brojeva označavaju X i Y koordinate mjesta gdje glava pisača mora ići. Neki G-kodovi također mogu uključivati Z koordinatu. Nadalje, ove upute sadrže podatke o brzini kretanja (F) prema zadanim koordinatama, odnosno pisaču govore koliko brzo ili sporo treba pomicati glavu pisača. E nakon kojeg slijedi broj govori pisaču koliko će se filameta ispustiti iz ekstrudera. Postoje neka dodatna slova i brojevi koji se koriste za M kodove. Primjerice, T označava koji se ekstruder koristi, počevši od T0 i

pomičući se prema gore prema broju ekstrudera. S označava stupanj u Celzijusu za ekstruder.
[29]

Primjer G-coda s prikazanim načinom pisanja:

```
G1 F1800 X89.999 Y89.150 E49.60291 G0 X89.999 Y89.716 F9000
```

Ručno uređivanje G-coda može se koristiti za prilagodbu početnih i završnih rutina, podešavanje brzine ventilatora, postavljanje različitih temperatura i puno drugih stvari. Ručno uređivanje G-coda također može biti korisno kada treba riješiti probleme s 3D ispisom.

Nakon što je 3D model pripremljen za ispis, postoje dva načina za slanje G-coda na pišač. Prvi je korištenje softvera za komunikaciju računala s pišačem, a drugi je korištenje memorijske SD kartice [26]. Korištenje SD memorijske kartice mnogo je lakše rješenje jer nema računala o kojemu ovisi izrada modela. Na slici 5.12 prikazan je dio G-coda modela boce koji se koristi za 3D ispis.

```
;FLAVOR:Marlin
;TIME:23108
;Filament used: 18.0811m
;Layer height: 0.2
;MINX:71.922
;MINY:71.93
;MINZ:0.2
;MAXX:148.078
;MAXY:148.07
;MAXZ:200
;Generated with Cura_SteamEngine 4.12.1
M140 S76
M105
M190 S76
M104 S236
M105
M109 S236
M82 ;absolute extrusion mode
; Ender 3 Custom Start G-code
G92 E0 ; Reset Extruder
G28 ; Home all axes
G1 Z2.0 F3000 ; Move Z Axis up little to prevent scratching of Heat Bed
G1 X0.1 Y20 Z0.3 F5000.0 ; Move to start position
G1 X0.1 Y200.0 Z0.3 F1500.0 E15 ; Draw the first line
G1 X0.4 Y200.0 Z0.3 F5000.0 ; Move to side a little
G1 X0.4 Y20 Z0.3 F1500.0 E30 ; Draw the second line
G92 E0 ; Reset Extruder
G1 Z2.0 F3000 ; Move Z Axis up little to prevent scratching of Heat Bed
G1 X5 Y20 Z0.3 F5000.0 ; Move over to prevent blob squish
G92 E0
G92 E0
G1 F1500 E-6.5
;LAYER_COUNT:1000
;LAYER:0
M107
G0 F6000 X87.058 Y87.53 Z0.2
;TYPE:SKIRT
G1 F1500 E0
G1 F1200 X87.561 Y87.039 E0.02338
G1 X88.115 Y86.513 E0.04879
G1 X88.681 Y85.989 E0.07444
G1 X88.897 Y85.796 E0.08408
G1 X89.047 Y85.668 E0.09063
G1 X89.534 Y85.266 E0.11164
```

Slika 5.12. Prikaz dijela G-code datoteke boce za 3D ispis

Izvor: Autor

G-code 3D modela boce na 3D pisač prije početka ispisa prebačen je preko *micro SD* kartice čiji se utor nalazi na samom 3D pisaču. Pisač je u tom slučaju potpuno samostalan, ne ovisi o računalu i čita programirane podatke sa SD kartice.

5.3.2. Creality Ender 3 V2 pisač

Creality Ender 3 V2 je verzija najpopularnijeg 3D pisača za početnike. Ovaj pisač je izuzetno jednostavan za postavljanje i namijenjen je studentima i svima koji bi se željeli upoznati s 3D tehnologijama. Ender 3 V2 ima površinu za ispis $220 \times 220 \times 250$ mm i aluminijski stol za grijanje. Maksimalna razlučivost ispisa ovim 3D pisačem je 100 mikrometara. [30]

Karakterizira ga jednostavno i lako 3D ispisivanje predmeta. Ender 3 V2 je nadograđena i naprednija verzija Ender 3 Pro 3D pisača. Pisač ima noviju i unaprijeđenu platformu s mnogim poboljšanim karakteristikama u odnosu na prethodne modele istog pisača, a jedna od najnovijih karakteristika je tiši rad kod ispisivanja. Pisač ima zaslon u boji s poboljšanim karakteristikama koji omogućuje jednostavno rukovanje i podešavanje postavki pisača te informiranost o njima u svakome trenutku ispisivanja modela. Pisač ima poboljšanu preciznost 3D ispisa ako je brzina ispisivanja povećana. Radna podloga od karbonskog stakla i aluminijska omogućuje jednoliku rasprostranjenost topline po svim dijelovima podloge. Isto tako, poboljšava prianjanje između sloja ispisanog modela i podloge pisača. Upravo to smanjuje mogućnost odljepljivanja ispisanog modela od podloge za ispis tijekom ispisivanja modela. Na slici 5.13. nalazi se prikaz Creality Ender 3 V2 pisača.



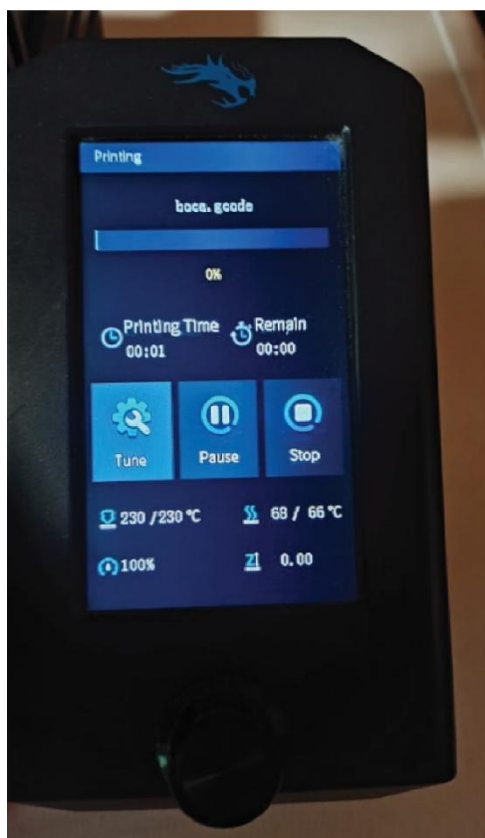
Slika 5.13. Prikaz Creality Ender 3 V2 pisača

Izvor: <https://printer3d.hr/shop/creality-ender-3-v2/>

Pisač Creality Ender 3 V2 sastoji se od mlaznice otporne na toplinu, grijanog stola za tisak, tzv. kreveta, kutije za alate, zaslona u boji, zatezača osi X i Y kojim se podešava napetost remena osi X i Y, vodilice, pogonskog motora i matice za izravnavanje (niveliranje).

5.3.3. Ispis modela boce na Crealityju Enderu 3 V2 pisaču

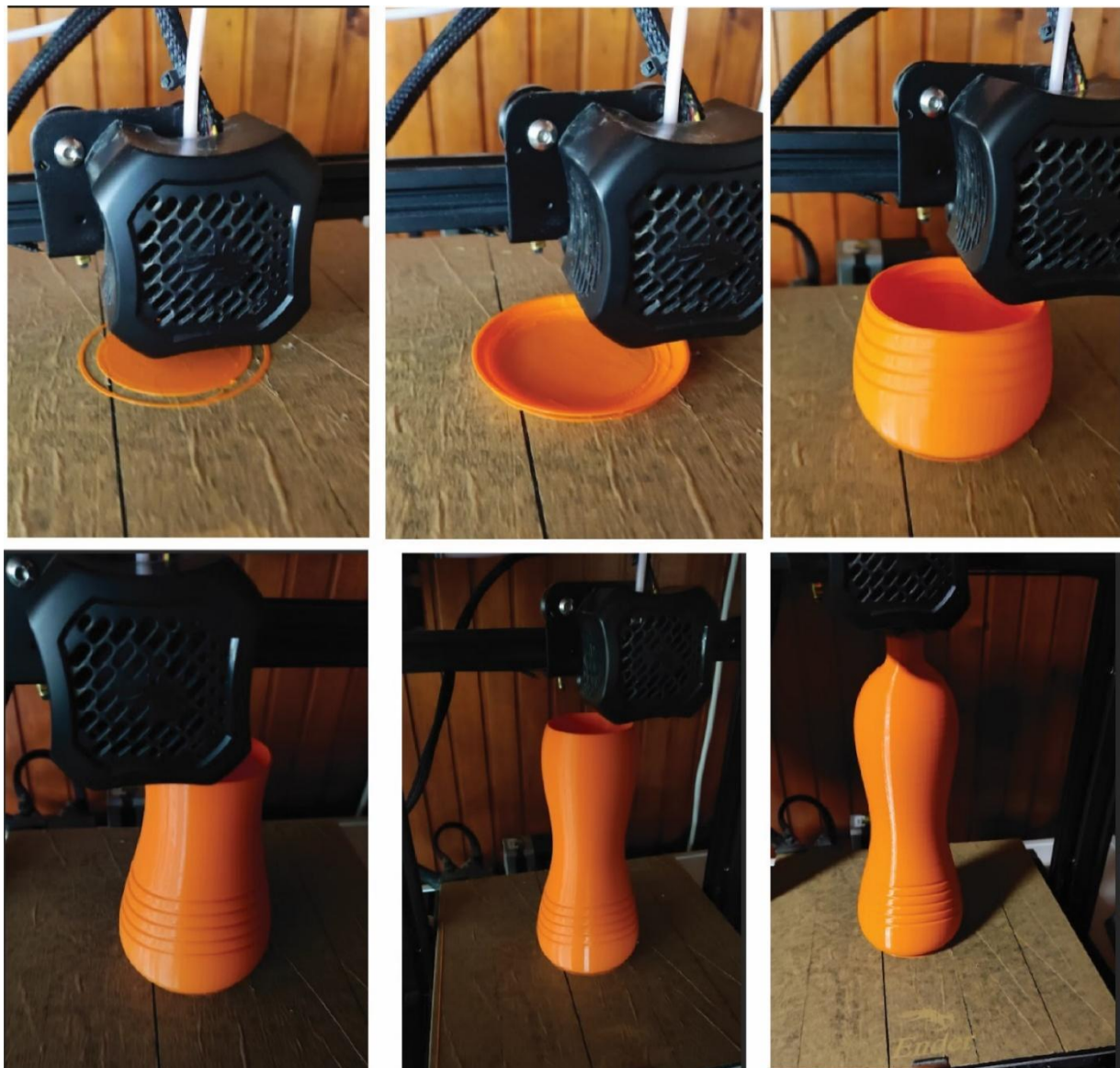
Ispis modela boce započeo je umetanjem *micro SD* kartice u pisač, a kartica sadrži G-code. Za 3D ispis modela boce korišten je filament materijala polilaktične kiseline (PLA). Tijekom ispisa na zaslonu sa strane bilo je vidljivo vrijeme trajanja ispisa, koliko vremena je do završetka ispisa, temperature mlaznice i vrućeg ležaja (kreveta). Temperatura mlaznice i vrućeg ležaja postavljena je ovisno o vrsti materijala s kojim se ispisivalo (u ovom slučaju PLA). Ti podaci mogu se naći na naljepnici koja se nalazi na filamentu. Zaslona na kojem se nalaze ti podaci prikazan je na slici 5.14.



Slika 5.14. Zaslona pisača na kojem je prikazana temperatura podloge i mlaznice

Izvor: Autor

Kod ispisa plastika rastopljena pomoću mlaznice izlazi iz glave 3D pisača koja je smještena nadomak podloge za ispis. Pomicanjem glave pisača rastopljene niti plastike polagane su na podlogu na kojoj se objekt ispisuje te se on izrađivao sloj po sloj. Ploča se pomicala lijevo-desno i gore-dolje, glava se pomicala lijevo-desno. Podloga na koju se boca ispivala sastoji se od aluminijska i stakla. Aluminijska podloga bila je grijana, a ispisivalo se na staklenu podlogu. Ako se poveća temperatura, smanjuje se vrijeme trajanja ispisa. Na slici 5.15. prikazan je proces ispisa boce po fazama. Ispis modela boce trajao je 9 sati i 47 minuta, a jedan sloj plastike koja se nanosi u slojevima debljine je 0,2 mm.



Slika 5.15. Princip ispisa 3D modela boce

Izvor: Autor

Model boce nije imao potpurnu strukturu koju bi trebalo ukloniti, brušenjem su dorađeni spojevi na dnu i grlu boce. Na slici 5.16. prikazan je gotov 3D model boce ispisan 3D pisačem Creality Ender 3 V2.

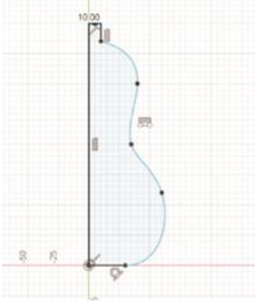
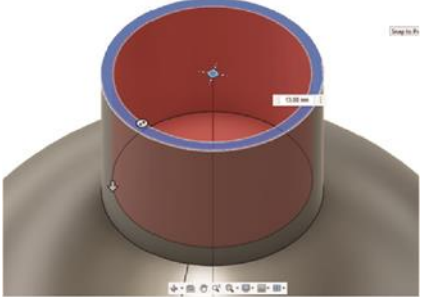



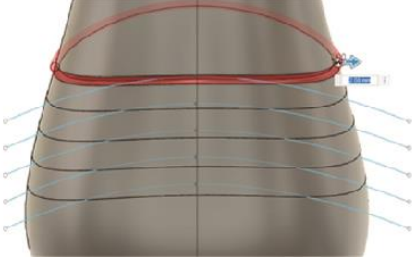
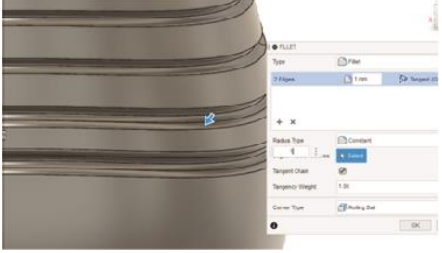

Slika 5.16. Gotov 3D model boce ispisan na pisaču Creality Ender 3 V2




Izvor: Autor

U tablici 5.1. prikazane su sve faze od početka do kraja izrade 3D modela boce, od projektiranja boce u softveru Autodesk fusion 360, svi koraci koji prethode ispisu modela boce, do konačnog ispisa modela na pisaču Creality Ender 3 V2.

Tablica 5.1. Faze izrade modela 3D boce

FAZA IZRADE MODELA	OPIS	SLIKA
<p>Izrada polovice modela boce korištenjem alata <i>Line</i> i <i>Spline</i></p>	<p>Pomoću alata <i>Line</i> odredila se visina boce te širina dna (baze) boce. Za početak je bila nacrtana polovica boce. Pomoću alata <i>Spline</i> izrađen je zaobljeni oblik boce prema želji koji se kasnije preoblikovao pomoću točaka. Vrh boce izrađen je pomoću alata <i>Line</i> gdje je i podešena dimenzija otvora boce.</p>	
<p>Oblik boce dobiven nakon korištenja alata <i>Revolve</i></p>	<p>Nakon izrade polovice boce, pomoću alata <i>Revolve</i> izrađena je druga polovica boce. Alat <i>Revolve</i> stvara čvrsto tijelo okretanjem odabranog profila ili geometrije modela oko osi u softveru Autodesk Fusion 360.</p>	
<p>Izrada otvora boce korištenjem alata <i>Hole</i></p>	<p>Kako bi boca imala otvor, uz pomoć alata <i>Hole</i> definiran je jednostavan otvor u čvrstom tijelu boce.</p>	
<p>Dodavanje linija korištenjem alata <i>Fit Point Spline</i> i dupliciranje pomoću alata <i>Rectangular Pattern</i></p>	<p>Korištenjem alata <i>Fit Point spline</i> nacrtana je linija na tijelu boce. Zatim je linija duplicirana uz pomoć alata <i>Rectangular Pattern</i>. Kod dupliciranja je određena os duž koje će se u ovom slučaju duplicirati linija.</p>	

FAZA IZRADE MODELA	OPIS	SLIKA
Upotreba alata <i>Split Face</i> za dijeljenje tijela boce	Pomoću alata <i>Split Face</i> podijeljeno je tijelo boce te su zatim pomoću alata <i>Pipe</i> napravljene krivine (udubljenja) na boci.	
Upotreba alata <i>Fillet</i> za zaobljavanje rubova	Za svaku liniju su posebno pomoću alata <i>Fillet</i> zaobljeni rubovi udubljenja na boci, kako ne bi bili oštri. Korištenjem alata <i>Fillet</i> zaokruženi su rubovi i to uklanjanjem materijala s vanjskih rubova.	
Prikaz modela boce u softveru <i>Ultimaker Cura</i>	Za ispis modela ove boce u softveru <i>Ultimaker Cura</i> podešena je debljina stijenke boce 0,8 mm, temperatura mlaznice (230 °C), temperatura ležaja (66 °C), vrijeme ispisa 6 sati i 25 minuta. Također je podešeno da se ispisa samo stijenka boce te da nema ispunje.	
Prikaz dijela G-code datoteke boce za 3D ispis	G-code 3D modela boce na 3D pisač prebačen je preko <i>micro SD</i> kartice čiji se utornalazi na samom 3D pisaču. Pisač je u tom slučaju bio potpuno samostalan i nije ovisio o računalu te je čitao programirane podatke sa <i>SD</i> kartice.	<pre> G92 E0 G92 E0 G1 F1500 E-6.5 ;LAYER_COUNT:1000 ;LAYER:0 M107 G0 F6000 X87.058 Y87.53 Z0.2 ;TYPE:SKIRT G1 F1500 E0 G1 F1200 X87.561 Y87.039 E0.02338 G1 X88.115 Y86.513 E0.04879 G1 X88.681 Y85.989 E0.07444 G1 X88.897 Y85.796 E0.08408 G1 X89.047 Y85.668 E0.09063 G1 X89.534 Y85.266 E0.11164 </pre>

FAZA IZRADE MODELA	OPIS	SLIKA
<p>Zaslon pisača na kojem je prikazana temperatura podloge i mlaznice</p>	<p>Na zaslonu pisača navedene su osnovne informacije o boci koja se ispisa. Za 3D ispis modela boce korišten je materijal polilaktidne kiseline (PLA). Tijekom ispisa na zaslonu je bilo vidljivo vrijeme trajanja ispisa, koliko je još ostalo do završetka ispisa, temperatura mlaznice te temperatura vrućeg ležaja (kreveta).</p>	
<p>Princip ispisa 3D modela boce</p>	<p>Kod ispisa modela boce plastika je pomoću mlaznice izlazila iz glave 3D pisača koja je smještena nadomak podloge za ispis. Pomicanjem glave pisača rastopljene niti plastike bile su položene na podlogu na kojoj se boca ispisivala te se ona izrađivala sloj po sloj. Ploča se pomicala gore-dolje, a glava lijevo-desno. Podloga se sastojala od aluminijske i staklene podloge. Aluminijska podloga je bila zagrijana, a na staklenu podlogu se ispisivalo. Ispis modela boce trajao je 9 sati i 47 minuta, a jedan sloj plastike bio je debljine nanosa 0,2 mm.</p>	
<p>Gotov 3D model boce ispisan na pisaču Crealityj Ender 3 V2</p>		

Izvor: Autor

6. Zaključak

Fused Deposition Modeling (FDM) je najuspješnija i najpopularnija aditivna tehnika proizvodnje koja koristi termoplastične materijale kao sirovine. Zbog nekih nedostataka kao što je loša obrada površine ta tehnologija se još nije implementirala u svim područjima primjene.

Ova tehnika ispisa jedna je od proizvodnih metoda u klasi inženjerstva aditivne proizvodnje koja postaje sve popularnija za proučavanje i razvoj u industriji. Tehnikom aditivne proizvodnje mogu se stvoriti različiti složeni oblici i strukture uz pravilno upravljanje materijalom što rezultira manjim otpadom i raznim drugim prednostima u odnosu na konvencionalnu proizvodnju što ju čini sve popularnijom. Pomoću 3D tehnologije ispisa moguće je proizvesti niz personaliziranih artikala tako da svaki proizvod može biti drugačiji uz zadržavanje niskih cijena zbog masovne proizvodnje. Ne zahtijeva dodatne troškove izrade kalupa i alata za proizvode po narudžbi.

3D pisari mogu pojednostavniti procese izrade prototipova kod dizajna ambalaže. Tehnologija je sposobna izraditi modele u gotovo svim oblicima, a širok raspon filamenata može se koristiti za imitaciju različitih ciljanih materijala. Primjena 3D pisara kod dizajna ambalaže je u potpunosti prihvatljiva i sve se više koristi. 3D model ambalaže je opipljiv model za razliku od 2D modela, gdje se mogu vidjeti sve prednosti i nedostaci prije masovne proizvodnje. Svi nedostaci se mogu ispraviti prije izrade kalupa, primjerice kalupa za boce. Izrada kalupa je skupa i dugotrajna, a novi model boce može se vrlo lako ispisati 3D pisčem uz manje troškova i u manjem vremenskom roku. Kao što je prikazano u ovom radu, model boce može se izraditi i na kućnom 3D pisaru te nije potrebno veliko ulaganje kod ispisa. Vrijeme za ispis jedne boce je samo nekoliko sati te se uz dizajn same boce sve može napraviti u samo nekoliko dana.

Kod dizajna modela boce prikazanog u ovom radu prikazani su alati koji se mogu koristiti kod modeliranja u softveru Autodesk Fusion 360, koji je jedan od softvera u kojima se može izvesti 3D modeliranje. Može se napraviti različit oblik boce, s različitim udubljenjima ili ispupčenjima, ovisno o želji dizajnera. Nakon ispisa boce lako se mogu uvidjeti neki nedostaci koji se mogu prepraviti prije masovne proizvodnje neke nove boce. Kako je Creality Ender 3 V2 niskobudžetni pisar, na pisarima koji su skuplji i imaju kvalitetni ispis može se dobiti još bolja replika neke ambalaže te se još lakše mogu uvidjeti nedostaci i dobre strane prije proizvodnje.

U ovome radu prikazano je kako se boca može ispisati na niskobudžetnom pisaču i funkcionalna je te se na njoj mogu uvidjeti sve prednosti i nedostaci. Pokazana je primjena 3D pisača u ambalažnoj industriji, posebno u dizajnu novih oblika boca. Tehnologija 3D ispisa može se koristiti i kod ispisa personaliziranih boca, uz korištenje malo kvalitetnijih 3D pisača.

HLKON
ALISBBAINA

Sveučilište
Sjever

SVEUČILIŠTE
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU

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, ANA BLAZEKUĆIĆ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica ~~završnog/diplomskog~~ (obrisati, nepotrebno) rada pod naslovom PROJEKTI KAME 3D MODELA BOCE I ČIPSA MOZAKA (upisati naslov) te da u ~~KORIŠTENJE FOT 3D TEHNOLOGIJE IZPRA~~ navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Blazekucić Ana
(vlastoručni potpis)

Sukladno čl. 83. 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.

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

7. Literatura

- [1] Savini G. S. A., A short history of 3D printing, a technological revolution just started, 2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON), Tel-Aviv, Israel, 2015, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7307314/authors#authors> (pristupljeno 08.04.2023)
- [2] Budimir, I., 3D printeri, Završni rad, Rijeka, Sveučilište u Rijeci, 2015, URL: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:186:268129> (pristupljeno 08.04.2023)
- [3] Kalčić, M., 3D printanje i izrada brzih prototipova, Završni rad, Pula, Istarsko veleučilište, 2020, URL: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:212:152056> (pristupljeno 08.04.2023)
- [4] Chapman, A., Rapid Prototyping: How to use 3D printing for your rapid prototyping needs, UltiMaker, 2022, URL: <https://www.wevolver.com/article/rapid-prototyping-how-to-use-3d-printing-for-your-rapid-prototyping-needs> (pristupljeno 16.04.2023)
- [5] Radoš, I., Usporedba niskobudžetnih 3D printera, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014, URL: <https://repositorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A2669/datastream/PDF/view> (pristupljeno 08.04.2023)
- [6] Butković, D., Napredni kompoziti za FDM 3D tisak u autoindustriji, Diplomski rad, Varaždin, Sveučilište Sjever, 2020, URL: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:358446> (pristupljeno 22.04.2023)
- [7] Ranellucci, A., Reprap, Slic3r and the Future of 3D, Low-cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development, 2013., URL: <https://3dprintingindustry.com/news/slic3r-alessandro-ranellucci-3d-printing-software-35190/> (pristupljeno 22.04.2023)
- [8] Redwood, B., Shoffer, F. i Garret, B., The 3D printing handbook, Technologies, design and applications, Amsterdam: 3D Hubs, 2017.
- [9] Chua, C. K. i Leong, K. F., 3D printing and additive manufacturing, principles and applications, Singapur: World Scientific Publishing Co., 2015.
- [10] Morić, A., FDM tehnologija 3D tiska, Završni rad, Zagreb, Grafički fakultet, 2019, URL: <https://eprints.grf.unizg.hr/3026/> (pristupljeno 22.04.2023)
- [11] Stratasys, 3D printing technologies, URL: <https://www.stratasys.com/en/stratasysdirect/technologies/3d-printing/> (pristupljeno 30.04.2023)

- [12] Jiménez, M., Romero, L., Domínguez, I. A., del Mar Espinosa, M. i Domínguez, M., Additive manufacturing technologies: an overview about 3D printing methods and future prospects, Complexity, 2019, URL: <https://www.hindawi.com/journals/complexity/2019/9656938/> (pristupljeno 30.04.2023)
- [13] Mohamed, D. R. F. i Mahmoud, D. A. S. , Emphasizing the advantage of 3d printing technology in packaging design, International Design Journal, 2012, URL: <https://www.faa-design.com/files/1/1/1-1-abeer-abs.pdf> (pristupljeno 06.05.2023)
- [14] PD models, How 3D printing is affecting the packaging industry, URL: https://www.pdmodels.co.uk/en/blog/3dprinting/3d_printed_packaging (pristupljeno 13.05.2023)
- [15] Autonomus manufacturing, How 3D Printing Transforms the Food and Beverage Industry, 2020, URL: <https://amfg.ai/2020/08/17/how-3d-printing-transforms-the-food-and-beverage-industry/> (pristupljeno 20.05.2023)
- [16] Infopack, From concept to series production: Stratasys brings end-to-end 3d printing to Cosmopack, 2023, URL: <https://www.infopack.es/en/new/from-concept-to-series-production-stratasys-brings-end-to-end-3d-printing-to-cosmopack-2023> (pristupljeno 20.05.2023)
- [17] Ižit, 3d tehnologija – izrada prototipa pet ambalaže, 2015, URL: <https://izit.hr/primjeri-iz-prakse/izrada-prototipa-pet-ambalaze/> (pristupljeno 20.05.2023)
- [18] All3DP, PepsiCo Saves 96% by 3D Printing Bottle Molds, 2022, URL: <https://all3dp.com/4/pepsico-saves-by-3d-printing-bottle-molds/> (pristupljeno 21.05.2023)
- [19] Haines, J., The Best Biodegradable 3D Printer Filaments of 2022, All3dp, 2022, URL: <https://all3dp.com/2/best-biodegradable-3d-printer-filament/> (pristupljeno 03.06.2023)
- [20] Lingle, R., Geo-Neutral ‘Earth Cup’ Goes from Drink to Dust, Packaging Digest, 2023, URL: <https://www.packagingdigest.com/sustainability/geo-neutral-earth-cup-goes-drink-dust> (pristupljeno 03.06.2023)
- [21] Prlić, O. i Lacković, A., Novi oblik e-poslovanja kroz 3d print tehnologiju, Polytechnic and design, str. 101-106., 2014, URL: <https://doi.org/10.19279/TVZ.PD.2014-2-1-12> (pristupljeno 03.06.2023)
- [22] Žiljak, V., Metode rada i odabir materijala za 3d ispis, Međunarodni znanstveni skup Tiskarstvo 2011, Stubičke toplice, Str: 43-51, 2011, URL: <https://www.tiskarstvo.net/tiskarstvo2011/Tiskarstvo2011%20zbornik%20b5.pdf#page=28> (pristupljeno 03.06.2023)
- [23] Leko, H.: 3D pisaci, Završni rad, Zagreb, Grafički fakultet, 2015., URL: <http://eprints.grf.unizg.hr/id/eprint/2239> (pristupljeno 04.06.2023)

- [24] Vinay Shah, V., Kumar, R. i Singh Chohan, J., A Review on surface enhancement approaches for thermoplastics developed through Fused Deposition Modeling, European Journal of Molecular & Clinical Medicine ISSN 2515-8260 Volume 07, Issue 07, 2020, URL: https://www.researchgate.net/figure/Application-areas-of-FDM_fig1_356209638 (pristupljeno 04.06.2023)
- [25] Shahrubudin, N., Ramlan, R. i Lee, T., An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications, ScienceDirect, Malaysia, 2019, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919308169> (pristupljeno 04.06.2023)
- [26] Barešić, V., Izrada FDM uređaja, Završni rad, Karlovac, Veleučilište u Karlovcu, 2016, URL: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:048936> (pristupljeno 04.06.2023)
- [27] Višković, M., 3D pisači i njihova primjena, Završni rad, Pula, Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, 2017, URL: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:137:398510> (pristupljeno 04.06.2023)
- [28] Verma, G. i Weber, M., Autodesk Fusion 360 Black Book, India: BPB Publication, First Edition, 2018
- [29] Baumann, F. W., Schuermann, M., Odefey, U. i Pfeil, M., From GCode to STL: Reconstruct Models from 3D Printing, Materials Science and Engineering 280 (2017) 012033, 2017, URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/280/1/012033> (pristupljeno 06.06.2023)
- [30] Creality, Creality Ender 3 V2: An upgraded version of a phenomenal 3D printer, URL: <https://www.creality.com/products/ender-3-v2-3d-printer-csco> (pristupljeno 06.06.2023)

POPIS SLIKA

Slika 2.1: Izvorni FDM patent, odobren prije više od 25 godina.....	2
Slika 2.2: Prikaz RepRap stolnog modela 3D pisača.....	4
Slika 2.3: Koluti PLA materijala debljine 3mm koji se koriste za RepRap pisače.....	6
Slika 2.4: Klasifikacija različitih metoda 3D ispisa s opisima.....	8
Slika 2.5: Klasifikacija materijala koji se mogu koristiti za 3D ispis	9
Slika 2.6: Prikaz SLA 3D pisača i procesa izrade modela sa svim definiranim dijelovima ..	10
Slika 2.7: Prikaz DLP 3D postupka ispisa s definiranim dijelovima pisača.....	11
Slika 2.8: Prikaz izgleda potpornih struktura, ovisno o tome je li pisač Bottom-up ili Top-down	12
Slika 2.9: Model ispisan pomoću SLS tehnologije ispisa	13
Slika 2.10: Prikaz modela Stratasys 3D Polyjet pisača.....	14
Slika 2.11: Model ispisan u boji upotrebom binder jetting tehnologije 3D ispisa	15
Slika 3.1: Maska Black Panther za limenke Pepsi soka izrađena tehnologijom 3D ispisa	18
Slika 3.2: Bočica parfema ispisan 3D pisačem tvrtke Stratasys J55 Prime	20
Slika 3.3: CAD model boce Čarli korišten za 3D ispis.....	20
Slika 3.4: Robo Batcher hvataljka koja ima dijelove ispisan 3D pisačem	22
Slika 3.5: Kronos dio za uvrtnanje limenki ispisan 3D pisačem.....	22
Slika 3.6: : 3D kalupi za boce ispisan korištenjem xPEEK147-Black materijala iz Henkela korištenjem Nexa3D NXE 400 3D pisača	24
Slika 3.7: Prikaz Earth Cup šalice ispisan 3D pisačem.....	25
Slika 4.1: Razlike u kockama iste veličine koje su ispisan različitom rezolucijom slojeva. 27	
Slika 4.2: Razlika između modela dobivenih 3D modeliranjem i 3D skeniranjem	28
Slika 4.3: Dijelovi FDM 3D pisača s prikazom X, Y i Z osi	29
Slika 4.4: Faze izrade modela 3D ispisivanjem	29
Slika 4.5: Postupak rezanja CAD 3D modela na slojeve	30
Slika 4.6: 3D model s potpornom strukturom te nakon što je ona uklonjena	30
Slika 4.7: Područja primjene FDM pisača	31
Slika 4.8: Prikaz različitih vrsta filamenata koji se koriste kod ispisa FDM pisačima.....	34
Slika 5.1: Postupak izrade novog projekta u softveru Autodesk Fusion 360.....	36
Slika 5.2: Izrada polovice modela boce uz pomoć alata Line i Spline	36
Slika 5.3: Oblik boce dobiven nakon korištenja alata Revolve	37
Slika 5.4: Konačni oblik boce dobiven nakon korištenja opcije Edit sketch	37

Slika 5.5: Izrada otvora boce korištenjem alata Hole	38
Slika 5.6: Dodavanje linija korištenjem alata Fit Point Spline i dupliciranje pomoću alata Rectangular Pattern	39
Slika 5.7: Upotreba alata Split Face za dijeljenje tijela boce	40
Slika 5.8: Upotreba alata Pipe za stvaranje udubljenja na boci	40
Slika 5.9: Upotreba alata Fillet za zaobljavanje rubova udubljenja na boci	41
Slika 5.10: Prikaz gotovog modela boce izrađenog u softveru Autodesk Fusion 360.....	41
Slika 5.11: Prikaz modela boce u softveru Ultimaker Cura.....	43
Slika 5.12: Prikaz dijela G-coda datoteke boce za 3D ispis.....	44
Slika 5.13: Prikaz Creality Ender 3 V2 pisača.....	45
Slika 5.14: Zaslona pisača na kojem je prikazana temperatura podloge i mlaznice.....	46
Slika 5.15: Princip ispisa 3D modela boce.....	47
Slika 5.16: Gotov 3D model boce ispisan na pisaču Creality Ender 3 V2.....	48

POPIS TABLICA

Tablica 4.1: Podjela materijala za primjenu prilikom ispisa FDM pisačima.....	33
Tablica 5.1: Faze izrade modela 3D boce	54

5.0%

Results of plagiarism analysis from 2023-09-03 15:53 UTC

Projektiranje 3D modela boce i ispis modela korištenjem FDM 3D tehnologije ispis.a.docx

Date: 2023-09-03 15:46 UTC

All sources 100 | Internet sources 52 | Organization archive 37 | Plagiarism Prevention Pool 11

<input checked="" type="checkbox"/>	[0]	0.7%	13 matches	<input checked="" type="checkbox"/> 1 documents with identical matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[2]	0.6%	11 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[3]	0.5%	8 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[4]	0.3%	8 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[5]	0.3%	8 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[6]	0.2%	7 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[7]	0.3%	5 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[8]	0.3%	5 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[9]	0.2%	5 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[10]	0.3%	4 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[11]	0.2%	5 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[12]	0.2%	5 matches	<input checked="" type="checkbox"/> 4 documents with identical matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[17]	0.3%	5 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[18]	0.2%	4 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[19]	0.2%	3 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[20]	0.2%	5 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[21]	0.2%	3 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[22]	0.2%	5 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[23]	0.2%	4 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[24]	0.2%	4 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[25]	0.2%	3 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[26]	0.2%	4 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[27]	0.1%	4 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[28]	0.2%	3 matches	
<input checked="" type="checkbox"/>	[29]	0.1%	3 matches	