

# ADITIVNE TEHNOLOGIJE

---

**Grgurić, Ivana**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:276233>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-06**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

# ADITIVNE TEHNOLOGIJE

---

**Grgurić, Ivana**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:276233>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2023-02-17**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
*Specijalistički diplomski stručni studij strojarstva  
Proizvodno strojarstvo*

Ivana Grgurić

**Aditivne tehnologije**  
**Additive technologies**

Završni rad

Karlovac, 2019.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
*Specijalistički diplomski stručni studij strojarstva  
Proizvodno strojarstvo*

Ivana Grgurić

**Aditivne tehnologije**

**Additive technologies**

Završni rad

dr.sc. Tanja Tomić, dipl.ing.stroj.

Karlovac, 2019.

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

Zahvaljujem se svima koji su mi omogućili uspješno izvršavanje obveza koje sam preuzela prilikom upisa na specijalistički stručni studij strojarstva.

Posebno se zahvaljujem mentorici, dr.sc. Tanji Tomić, na pruženom vremenu i pomoći prilikom izrade ovog rada.

Ivana Grgurić

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
2. UVOD.....	1
2.1. Razvoj aditivne tehnologije.....	1
2.2. Primjena aditivne proizvodnje .....	2
2.3. Načela aditivne proizvodnje.....	3
2.4. Materijali u aditivnoj proizvodnji .....	4
3. POSTUPCI ADITIVNE PROIZVODNJE .....	5
3.1. Laminiranje (LOM).....	5
3.1.1. Materijali.....	5
3.1.2. Princip rada .....	5
3.1.3. Prednosti i nedostaci postupka.....	6
3.1.4. Primjena postupka.....	6
3.1.5. Proizvođači.....	7
3.1.6. Uređaji dostupni na tržištu .....	7
3.2. Stereolitografija (SLA).....	8
3.2.1. Materijali.....	8
3.2.2. Princip rada .....	9
3.2.3. Prednosti i nedostaci postupka.....	9
3.2.4. Primjena postupka.....	10
3.2.5. Proizvođači.....	10
3.2.6. Uređaji dostupni na tržištu .....	11
3.3. Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (DLP).....	12
3.3.1. Materijali.....	12
3.3.2. Princip rada .....	12
3.3.3. Prednosti i nedostaci postupka.....	13
3.3.4. Primjena postupka.....	13
3.3.5. Proizvođači.....	13
3.3.6. Uređaji dostupni na tržištu .....	14
3.4. Selektivno lasersko srašćivanje modela (SLS) .....	15
3.4.1. Materijali.....	15
3.4.2. Princip rada .....	15
3.4.3. Prednosti i nedostaci postupka.....	16
3.4.4. Primjena postupka.....	16
3.4.5. Proizvođači.....	17
3.4.6. Uređaji dostupni na tržištu .....	17
3.5. 3D tiskanje (3DP).....	18
3.5.1. Materijali.....	18
3.5.2. Princip rada .....	19

---

3.5.3.	Prednosti i nedostaci postupka.....	19
3.5.4.	Primjena postupka.....	20
3.5.5.	Proizvođači.....	20
3.5.6.	Uređaji dostupni na tržištu.....	21
3.6.	Modeliranje topljenim depozitima (FDM).....	22
3.6.1.	Materijali.....	22
3.6.2.	Princip rada.....	23
3.6.3.	Prednosti i nedostaci postupka.....	23
3.6.4.	Primjena postupka.....	24
3.6.5.	Proizvođači.....	25
3.6.6.	Uređaji dostupni na tržištu.....	25
3.7.	PolyJet.....	27
3.7.1.	Materijali.....	27
3.7.2.	Princip rada.....	27
3.7.3.	Prednosti i nedostaci postupka.....	28
3.7.4.	Primjena postupka.....	28
3.7.5.	Proizvođači.....	28
3.7.6.	Uređaji dostupni na tržištu.....	29
3.8.	Proizvodnja kontinuiranim tekućim povezivanjem (CLIP).....	30
3.8.1.	Materijali.....	30
3.8.2.	Princip rada.....	30
3.8.3.	Prednosti i nedostaci postupka.....	31
3.8.4.	Primjena postupka.....	31
3.8.5.	Proizvođači.....	31
3.8.6.	Uređaji dostupni na tržištu.....	32
4.	PRAKTIČNI DIO RADA.....	33
4.1.	Proizvodi.....	33
4.2.	Materijali za FDM postupak.....	36
4.3.	Izrada modela.....	37
4.4.	Učitavanje modela u programski paket za upravljanje 3D uređajem.....	38
4.5.	3D uređaj.....	41
4.6.	Ispisani proizvodi.....	43
5.	ZAKLJUČAK.....	45
	LITERATURA.....	47

## POPIS SLIKA

Slika 1. Područja primjene aditivne proizvodnje. [4].....	2
Slika 2. Gotovi proizvodi nastali aditivnim postupcima. [5] .....	3
Slika 3. Slojevita proizvodnja po koracima. [4].....	3
Slika 4. Postupak proizvodnje laminiranih objekata. [6] .....	5
Slika 5. Primjeri proizvoda nastalih LOM postupkom. [8].....	7
Slika 6. ArkePro 3D pisac. [9] .....	7
Slika 7. Princip SLA postupka [3] .....	9
Slika 8. Primjeri proizvoda nastalih SLA postupkom. [11] .....	10
Slika 9. Formlabs Form 2 SLA 3D pisac. [11].....	11
Slika 10. Princip rada DLP postupka. [12].....	12
Slika 11. Proizvodi nastali DLP postupkom. [13].....	13
Slika 12. Colido DLP 2.0 DLP 3D pisac. [15] .....	14
Slika 13. Postupak Selektivnog laserskog srašćivanja. [6] .....	15
Slika 14. Proizvodi nastali SLS postupkom. [16] .....	16
Slika 15. Sinterit Lisa SLS 3D pisac. [16] .....	17
Slika 16. Princip rada 3D print postupka. [17].....	19
Slika 17. Proizvodi nastali 3DP postupkom. [19] .....	20
Slika 18. HP Jet Fusion 580 Color. [19] .....	21
Slika 19. Princip rada Taložnog očvršćivanja. [20] .....	23
Slika 20. Proizvodi nastali FDM postupkom. [21].....	24
Slika 21. Ultimaker 2 Extended +. [23] .....	26
Slika 22. PolyJet postupak. [6].....	27
Slika 23. Proizvodi nastali PolyJet postupkom. [24] .....	28
Slika 24. Objekt 1000 Plus PolyJet 3D pisac. [26] .....	29
Slika 25. Princip CLIP postupka. [28] .....	30
Slika 26. Proizvodi nastali CLIP postupkom. [27].....	31
Slika 27. Carbon M2 CLIP 3D pisac. [29].....	32
Slika 28. Prototip rashladnog sustava protočnog UV sterilizatora vode.....	33
Slika 29. Princip rada rashladnog sustava. ....	34
Slika 30. Prototip čašice kuka. ....	35
Slika 31. Implantat kuka. [35].....	35
Slika 32. Prikaz dostupnih boja PLA Herz filamenta. [33].....	36
Slika 33. Strojni dio u virtualnom radnom prostoru stroja.....	38
Slika 34. Pregled ispisa. ....	39
Slika 35. Pregled slojeva u 2D pogledu (presjek). ....	40
Slika 36. „Export G-code“ .....	41
Slika 37. 3D uređaj.....	42
Slika 38. Ispisani Duct_bottom. ....	43
Slika 39. Ispisani Duct_middle. ....	43
Slika 40. Ispisani Duct_top. ....	44
Slika 41. Rashladni sustav protočnog UV sterilizatora vode. ....	44



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristike ARKePro pisača. [9].....	8
Tablica 2. Karakteristike Formlabs Form 2 SLA 3D pisača. [11] .....	11
Tablica 3. Karakteristike Colido DLP 2.0 pisača. [15] .....	14
Tablica 4. Karakteristike Sinterit Lisa SLS 3D pisača. [16] .....	18
Tablica 5. Karakteristike HP Jet Fusion 580 Color pisača. [19] .....	21
Tablica 6. Karakteristike Ultimaker Extende + pisača. [23] .....	26
Tablica 7. Karakteristike Objet 1000 Plus PolyJet 3D pisača. [23] .....	29
Tablica 8. Karakteristike Carbon M2 CLIP 3D pisača. [29].....	32
Tablica 9. Karakteristike Herz PLA materijala. [33] .....	36
Tablica 10. Struktura STL datoteke .....	37
Tablica 11. Parametri korišteni pri izradi proizvoda. ....	39

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis
ABS	Akronitril-butadien-stiren (eng. Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)
AM	Aditivna proizvodnja (engl. Additive Manufacturing)
CAD	Computer Aided Design (3D modeliranje)
CAM	Proizvodnja podržana računalom (engl. Computer Aided Manufacturing)
CLIP	Kontinuirana tekuća proizvodnja (engl. Continuous Liquid Interface Production)
3D	Trodimenzionalno
3DP	Trodimenzionalni tisak (engl. 3D Printing)
DLP	Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (eng. Digital Light Processing)
EP	Epoksidna smola
FPU	Flexible Polyurethane
FDM	Modeliranje topljenim depozitima (engl. Fused Deposition Modeling)
LENS	Izravno taloženje metala laserom (engl. Laser Engineered Net Shaping)
LOM	Izrada prototipa laminiranjem (engl. Laminated Object Manufacturing)
PA	Poliamid
PC	Polikarbonat
PE	Polietilen
PET	Poli(etilen-tereftalat)
PLA	Polilaktid
PVA	Poli(vinil-amid)
PVC	Poli(vinil-klorid)
PRM	Brza proizvodnja (engl. Rapid Manufacturing)
RP	Brza izrada prototipova (engl. Rapid Prototyping)
RT	Brza izrada alata (engl. Rapid Tooling)
SLA	Stereolitografija (engl. Stereolithography)
SLS	Selektivno srašćivanje laserom (engl. Selective Laser Sintering)
STL	Programski jezik za prostorni opis volumena (engl. Standard Tessellation Language)
TPE	Elastoplastomer
UMA	Urethane Methacrylate
UV	Ultraljubičasto (eng. Ultraviolet)

## SAŽETAK

U ovom su radu opisani osnovni postupci i tehnologije aditivne proizvodnje, materijali, primjena i uređaji (3D pisači) koji su najzastupljeniji na tržištu.

U prvom je poglavlju opisan razvoj te primjena, načela i materijali aditivne proizvodnje.

Drugo poglavlje opisuje ukratko postupke aditivne proizvodnje te materijale za pojedini postupak i princip rada, navodi prednosti i nedostatke postupka, a zatim primjenu te proizvođače i uređaje dostupne na tržištu.

Praktični dio rada predstavljen je u trećem poglavlju. Opisuje proizvode ispisane od polimernog materijala „Fused Deposition Modeling“ tehnologijom i objašnjava postupak po koracima od modeliranja do samog ispisa na 3D uređaju. Izrađeni su prototipovi čašice kuka i rashladnog sustava protočnog UV sterilizatora vode.

Ključne riječi:

Aditivne tehnologije

3D pisači

„Fused Deposition Modeling“ tehnologija

## **SUMMARY**

This thesis describes the basic processes and technologies of additive manufacturing, materials, applications and devices (3D printers) that are most prominent in the market.

The first chapter describes the development and application, principles and materials used in additive manufacturing.

The second chapter briefly describes the methods of additive manufacturing and materials for each process and principles of operation, lists the advantages and disadvantages of the process, and then the application of those manufacturers and devices available on the market.

The practical part of the work is presented in the third chapter. Describes the products made using the Fused Deposition Modeling technology and explains the step-by-step process from modeling to 3D printing. The prototype of the hip cup and the cooling system of the flow-through UV sterilizer were analyzed.

Key words:

Additive technology

3D printers

„Fused Deposition Modeling“ Technology

## 2. UVOD

Aditivna proizvodnja je proces kojim se proizvod izrađuje dodavanjem materijala sloj po sloj na temelju podataka iz 3D modela. Smatra se jednom od ključnih razvojnih tehnologija koja pruža nove pristupe proizvodnji i kojom se relativno brzo dobiva gotovi proizvod. Omogućuje nam izradu vrlo složenih geometrijskih izradaka koje bi klasičnim postupcima bilo vrlo teško izvesti. Ne zahtjeva dodatne alate jer se proizvodi na opremi za aditivne postupke a na temelju 3D modela. U aditivnoj je proizvodnji bila zastupljena uglavnom primjena polimera dok se unatrag nekoliko godina počinju intenzivnije primjenjivati metali, čemu je razlog razvoj novih sustava za preradu praškastih materijala.

### 2.1. Razvoj aditivne tehnologije

Šezdesetih godina prošlog stoljeća u institutu „Batelle Memorial“ izveden je eksperiment kojim se uz pomoć presijecanja dviju laserskih zraka različitih valnih duljina u sredini posude smole pokušao polimerizirati materijal na mjestu presijecanja. [1]

1967. godine Wyn K. Swainson se prijavljuje za patent pod nazivom „Metode iz 3D objekta pomoću holografije“ (engl. „*Method of Producing a 3D Figure by Holography*“) primjenjujući postupak s dvostrukim laserom izvedenim 1950-tih godina. Krajem 1970-tih, Dynell Electronics Corp. kompaniji dodijeljen je niz patenata za čvrstu fotografiju. Izum je uključivao rezanje poprečnih presjeka računalnom kontrolom, koristeći glodalicu ili laser, te spremanje u registar kako bi se stvorio 3D objekt. [2]

1980. godine Hideo Kodama iz Instituta za industrijski općinski institut u Nagoyi (Nagoyya, Japan) među prvima je izmislio jedno-zračno lasersko stvrdnjavanje, prema različitim izvorima. [2]

1982., Alan Herbert iz 3M Laboratorija za sektor grafičkih tehnologija u svom radu „Solid Object Generation“ u časopisu „*Journal of Applied Photographic Engineering*“ opisuje sustav koji usmjerava lasersku zračnu zonu argona na površinu fotopolimera pomoću sustava zrcala povezanog s uređajem x-y plotera. [2]

1984. godine, Jean-Claude Andre s francuskim Nacionalnim centrom za znanstveni rad u Nancyu u Francuskoj i kolegama koji rade za Francusku tvrtku Cilas Alcatel Industrial Laser Company, podnijeli su patent pod nazivom „Apparatus for Fabricating a Model of an Industrial Part“, koji uključuje laserski pristup s jednim snopom svjetla. [2]

1987. godine američka tvrtka „3D systems“ razvija stereolitografiju, čime započinje i razvoj postupaka aditivne proizvodnje. Postupak je definiran očvršćivanjem fotopolimera u tankim slojevima uzrokovano djelovanjem ultraljubičastog zračenja putem lasera. [3]

1992. godine se na tržištu pojavljuje Selektivno lasersko srašćivanje gdje se ističu tvrtke DTM i Teijin Seiki. [3]

1996. godine tvrtka *Stratasys* predstavila je uređaj *Genysis*, koji je radio prema načelima postupka ekstrudiranja, slično kao i FDM postupak, no temeljio se na aditivnom procesu razvijenom u *IMB Watson Research Center*. Nakon osam godina proizvodnje i prodaje

sustava za stereolitografiju tvrtka 3D Systems plasirala je na tržište svoj prvi 3D pisac (Actua 2100) s ink-jet mehanizmom. [3]

1997. godine osniva se tvrtka AeroMet, te razvija sustav koji koristi laser visoke snage te sraščuje dodane čestice koje se koriste za izradu proizvoda od titanovih legura, tj. laserska aditivna proizvodnja. Do napuštanja tog projekta u prosincu 2005. godine AeroMet je proizvodio dijelove za zrakoplovnu industriju kao pružatelj usluga. [3]

2002. godine francuska tvrtka *Phenix Systems* prodaje uređaj Phenix 900, uređaj koji koristi postupak sraščivanja keramike i metala u čvrstoj fazi.

2004. tvrtka *Object Geometris* predstavlja seriju neprozirnih materijala u boji pod nazivom Vero FullCure 800, koji omogućuju postizanje boljih mehaničkih svojstva kod proizvoda te pruža kvalitetniju vizualizaciju detalja na istim. Također iste godine tvrtka *3D Systems* prodaje uređaj InVision HR, uređaj visoke razlučivosti koji pogađa ciljano tržište draguljara. Tvrtka *DSM Somos* predstavlja noanokompozitne materijale, materijale visoke istezljivosti, materijale postojane na trošenje i toplinski postojane materijale za aditivnu proizvodnju temeljenu na slojevima. [3]

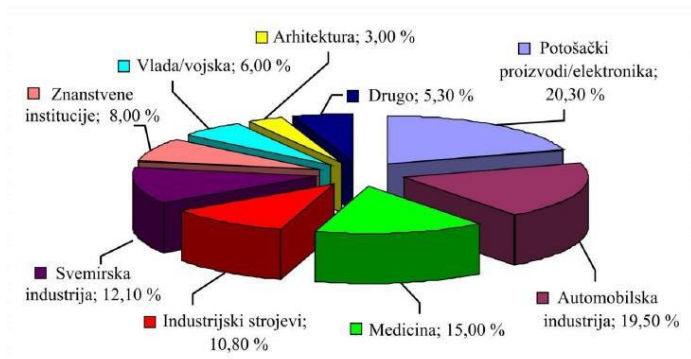
2009. godine je definiran pojam aditivne tehnologije kao krovni termin od strane međunarodne komisije *ASTM International Committee f42*. [2]

2011. godine tvrtka *Optomec* objavljuje novu glavu za širokokutno raspršivanje Aerosol Jet kojoj je namjena ispisivanje 3D i konformne elektronike. Iako je poznata uglavnom u industriji aditivne proizvodnje za „LENS“ opremu, Optomecov Aerosol Jet ispis proizašao je iz DARPA-inog programa pod imenom *Mesoscopic Integrated Conformal Electronics*. Svrha namjene jest korištenje za tisak 3D elektronike, solarnih ćelija i zaslona. [1]

2013. godine švedska tvrtka *Arcam* objavljuje stroj Arcam Q10. *Materialise* najavljuje HeartPrint servis uz pomoć kojega se može printati specifične kardiovaskularne modele po mjeri pacijenta koji se koriste u pred-operativnom planiranju i pri testiranju medicinskih uređaja. [1]

## 2.2. Primjena aditivne proizvodnje

Aditivna proizvodnja ima široku primjenu, od proizvoda automobilske i zrakoplovne industrije, arhitekture, medicine do elektronike i proizvoda široke primjene. Slika 1. prikazuje područja primjene aditivne proizvodnje.



Slika 1. Područja primjene aditivne proizvodnje. [4]

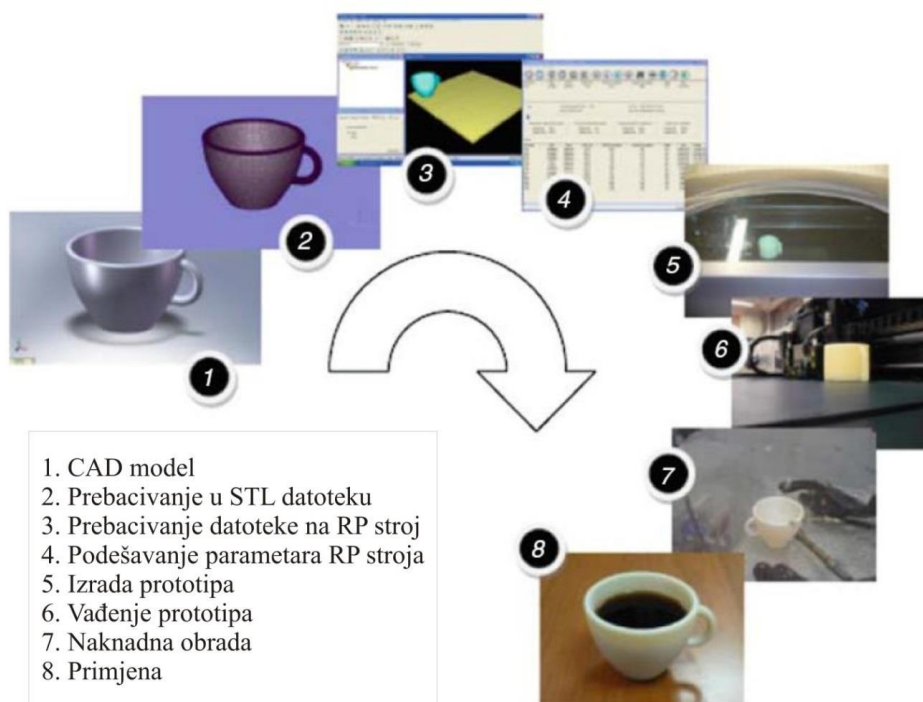
Kao što je iz slike vidljivo aditivne tehnologije se najviše primjenjuju kod proizvodnje proizvoda široke potrošnje, u automobilskoj industriji, medicini, svemirskoj industriji. Slijedi nekoliko slikovnih primjera iz područja najveće primjene.



Slika 2. Gotovi proizvodi nastali aditivnim postupcima. [5]

### 2.3. Načela aditivne proizvodnje

Prilikom primjene postupaka aditivne proizvodnje, proizvod nastaje na principu dodavanja materijala sloj po sloj. Takvo načelo izrade proizvoda suprotno je klasičnim postupcima obrade, kao što su obrada odvajanjem čestica (tokarenje, glodanje, brušenje i sl.) ili obrada deformiranjem (kovanje, vučenje i sl.). Svaki proizvodni postupak prolazi kroz nekoliko faza prikazanih na slici 3.



Slika 3. Slojevita proizvodnja po koracima. [4]

Koraci postupka biti će detaljnije obrađeni u praktičnom djelu zadatka.

#### **2.4. Materijali u aditivnoj proizvodnji**

U aditivnoj proizvodnji najčešće se koriste tri tipa materijala: [6]

- polimeri,
- keramika,
- metali.

Polimerni materijali su najzastupljeniji. Još neki od materijala koji se koriste su papir, ljepljivi papir, čokolada i sl.

U teoriji je moguće proizvesti predmet od bilo kojeg materijala, koristeći tehniku proizvodnje sloj po sloj, ali finalna kvaliteta proizvoda će biti uvelike određena materijalom koji se koristio.

Od polimernih materijala naviše se koriste: ABS, PC, PLA, epoksi smole, vosak, polimerske smole i sl.

Metali koji se koriste u aditivnoj proizvodnji su zlato, srebro, aluminij, kobalt, legure kobalta i kroma te legure titana.

Neke od keramika koje se koriste su porculan, silikon-karbid, kvarcno staklo.



### 3. POSTUPCI ADITIVNE PROIZVODNJE

Pojam aditivna proizvodnja podrazumijeva RP, RM i RT postupke. RP postupak je postupak brze izrade prototipova ( engl. Rapid Prototyping ), od kojih se neki koriste i za brzu izradu proizvoda i brzu izradu alata, RM označava brzu izradu proizvoda ( engl. *Rapid Manufacturing* ) koja se primjenjuje za izradu gotovih dijelova koji kao takvi idu u prodaju, a RT postupak označava brzu izradu alata ( engl. *Rapid Tooling* ) a obuhvaća postupke za brzu izradu složenih alata, kalupa i oblika koji se koriste za izradu gotovih proizvoda. Za svaki postupak je opisan proces izrade modela, materijali koji se koriste i njihova svojstva, primjena, prednosti i nedostaci te proizvođači. Postupci su navedeni kronološki kao što su se počeli primjenjivati u praksi.

#### 3.1. Laminiranje (LOM)

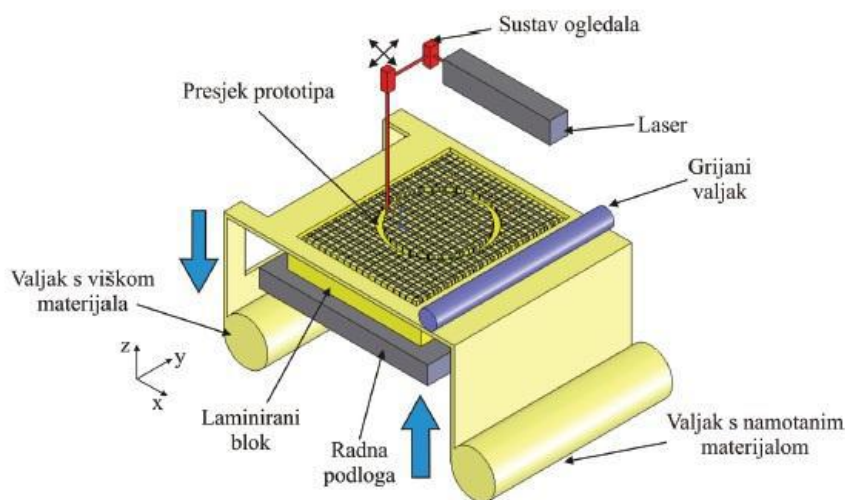
Postupak je predstavljen 1985. godine. Laminiranje ( eng. Laminated Object Manufacturing - LOM ) jedan je od najbržih postupaka kojim se izrađuju puni modeli srednjih veličina.

##### 3.1.1. Materijali

Od materijala se najčešće koriste papir, kompoziti ili polimerna folija namotana na valjak. U novije vrijeme primjenjuje se metalna i keramička folija.

##### 3.1.2. Princip rada

Princip rada je prikazan na slici 4.



Slika 4. Postupak proizvodnje laminiranih objekata. [6]

Materijal se pomoću valjka dovodi na radnu površinu. Folija s donje strane ima raspršeno vezivno sredstvo koje osigurava čvrsto povezivanje slojeva. Kad se radi o papiru, valjak nanosi vezivo (polimer, ljepilo) na donju stranu papira. Nakon toga, uz pomoć optičkog sustava, laserska zraka izrezuje konturu poprečnog presjeka i okolni materijal radi lakšeg odvajanja.

Osim lasera koristi se i oštri nož za rezanje papira. Nakon izrezivanja, zagrijani valjak prelazi preko folije kako bi se osiguralo bolje povezivanje sloja. Platforma na kojoj se nalazi model spušta se za visinu sloja i čitav postupak se ponavlja dok proizvod nije gotov. Na kraju se višak materijala odstranjuje s platforme radi lakšeg odvajanja gotovog proizvod od radne podloge.

### 3.1.3. Prednosti i nedostaci postupka

Zbog usporedbe s ostalim postupcima, karakteristike postupka prikazane su kroz prednosti i nedostatke. [6]

Prednosti : - jednostavan postupak

- debljina sloja je konstantna, ovisi o debljini folije
- niska zaostala naprezanja
- niža cijena materijala i uređaja
- relativno velika brzina izrade
- mogućnost izrade velikih proizvoda.

Nedostaci : - ograničena primjena

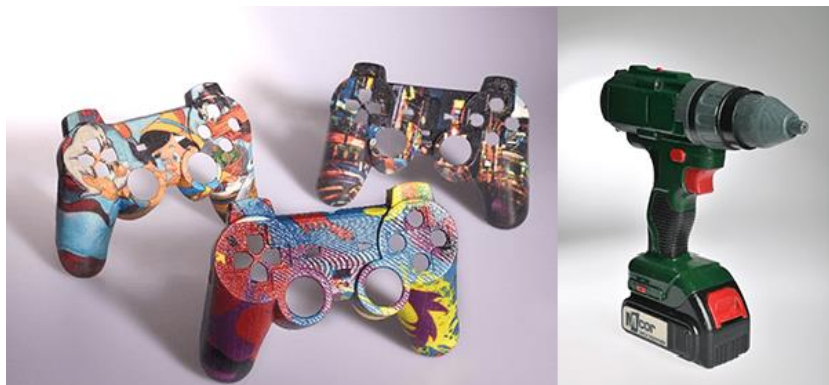
- mali izbor materijala
- veliki otpad materijala
- opasnost od zapaljenja papira prilikom rezanja laserom
- pri rezanju nastaju dim i štetni plinovi.

### 3.1.4. Primjena postupka

Ovaj se postupak primjenjuje za izradu proizvoda široke potrošnje kao npr. maske za razne opreme za igranje ili akumulatorske bušilice. [7]

Primjena : - konceptualni dizajn

- kod modela koji nemaju sitnih detalja .



Slika 5. Primjeri proizvoda nastalih LOM postupkom. [8]

### 3.1.5. Proizvođači

Najčešće spominjani proizvođači na tržištu navedeni su u daljnjem tekstu.

Proizvođač : - Mcor Technologies, Irska [6,8,9]

- Stratasys, SAD [6,8,9]

- Solido, Izrael [6,8,9].

### 3.1.6. Uređaji dostupni na tržištu

ArkePro je trenutno na tržištu među najviše korištenim pisačima koji se primjenjuju za LOM postupak. Karakteristike ovog pisača dane su u tablici 1. [9]



Slika 6. ArkePro 3D pisač. [9]

Tablica 1. Karakteristike ARKePro pisača. [9]

Proizvođač	Mcor
Model	ARKePro
Godina proizvodnje	2018.
Cijena uređaja ( \$ )	23,000
Dimenzije uređaja ( mm )	880 x 633 x 593
Tolerancija ( xy ) ( mm )	0.2
Max. volumen proizvoda ( mm )	184 x 168 x 125
Min. debljina sloja ( mm )	0.1

### 3.2. Stereolitografija (SLA)

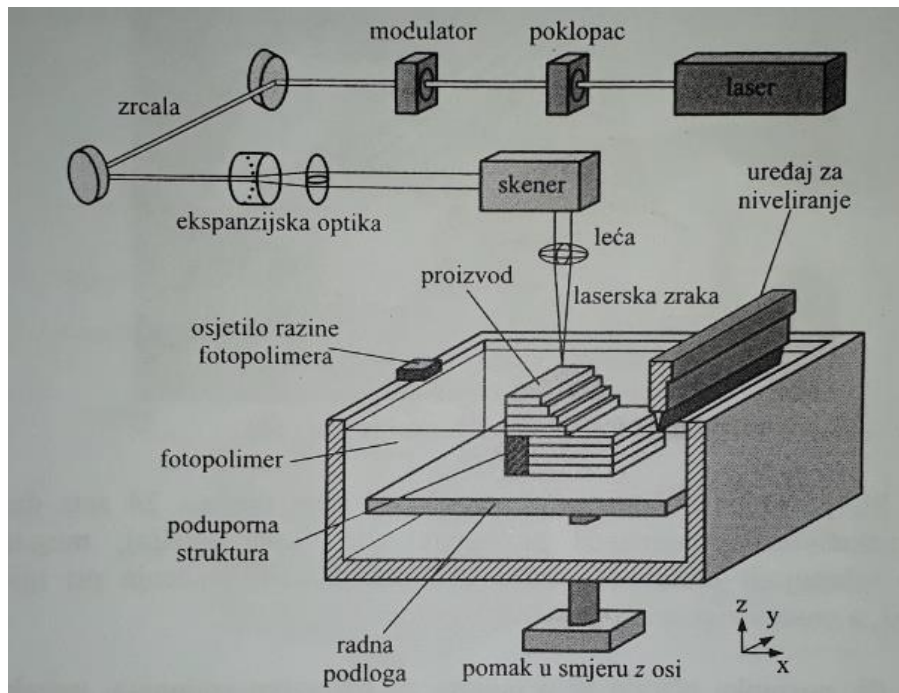
Postupak je predstavljen 1987. godine. Jedna od najčešće upotrebljivanih tehnologija aditivne proizvodnje jest stereolitografija. Proces se temelji na fotolitografskim metodama s UV polimerizacijom. Proizvodi s pomoću postupaka stereolitografije nastaju polimeriziranjem niskoviskozne polimerne kapljevine sloj po sloj.

#### 3.2.1. Materijali

Stereolitografijom se uglavnom prerađuju fotopolimeri temeljeni na akrilnim, vinilnim ili epoksidnim smolama. [3]

### 3.2.2. Princip rada

Princip rada prikazan je na slici 7.



Slika 7. Princip SLA postupka [3]

Princip rada se temelji na skrućivanju fotopolimera pri izlaganju UV svjetlosti koje se stvara pomoću Helij-kadmijskog (He-Cd) ili argonskog lasera (Ar). Fokusiranim UV svjetlom se očvršćuje sloj polimera iznad radne površine. Radna površina je smještena jedan sloj ispod vrha površine kapljevito fotopolimera. U sljedećem prolazu se radna površina spušta za debljinu sljedećeg sloja prema dolje. Valjak za izravnavanje kapljevito fotopolimera služi za izbjegavanje pojave mjehurića u izradcima. Nakon završenog procesa potrebno je ukloniti potpurnu strukturu. Potrebno je minimalno 1 sat naknadnog zračenja kako bi se uklonila sva kapljevita područja.

### 3.2.3. Prednosti i nedostaci postupka

Zbog usporedbe s ostalim postupcima, karakteristike postupka prikazane su kroz prednosti i nedostatke. [6,7]

Prednosti : - kvaliteta površine  
 - brzina izrade  
 - mogućnost izrade vrlo finih detalja.

Nedostaci: - visoka cijena materijala i njihovo pravilno skladištenje

- mora se koristiti potporna struktura
- potrebno vrijeme za naknadno zračenje
- skupo održavanje lasera
- izbor materijala se svodi na fotopolimere.

### 3.2.4. Primjena postupka

Primjeri proizvoda nastalih SLA postupkom su dentalni aparat i nakit. [11]

Neke od primjena ovog postupka navedene su u daljnjem tekstu. [6,7,10]

Primjena : - u različitim granama industrije gdje su potrebni modeli za testiranje oblika i

pozicioniranje,

- za izradu kalupa
- za brzu izradu alata
- za izradu kopča i aplikacija otpornih na toplinu
- u medicini jer se koristi za izradu određenih dijelova kostiju.



Slika 8. Primjeri proizvoda nastalih SLA postupkom. [11]

### 3.2.5. Proizvođači

Najčešće spominjani proizvođači na tržištu navedeni su u daljnjem tekstu.

Proizvođači dostupni na tržištu : - 3D Systems, SAD [6]

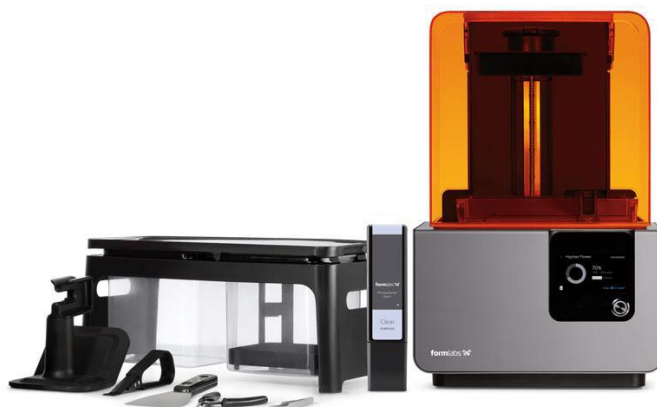
- DWS, Italija [6]

- DMEC, Japan [6]

- Formlabs, SAD [11].

### 3.2.6. Uređaji dostupni na tržištu

Pisači za SLA postupak imaju dobre karakteristike i svestranih su mogućnosti kako za izradu prototipova tako i gotovih proizvoda. Ne zahtijevaju posebno održavanje i vrlo su pouzdani. Jedan od trenutno najtraženijih na tržištu je Formlabs Form 2 SLA 3D pisač. Karakteristike ovog pisača dane su u tablici 2. [11]



Slika 9. Formlabs Form 2 SLA 3D pisač. [11]

Tablica 2. Karakteristike Formlabs Form 2 SLA 3D pisača. [11]

Proizvođač	Formlabs
Model	Form 2
Veličina laserske točke ( $\mu\text{m}$ )	140
Cijena uređaja ( \$ )	4,999
Tolerancija ( xy ) (mm )	0.2
Max. volumen proizvoda ( mm )	145 x 145 x 175
Debljina sloja ( $\mu\text{m}$ )	25 - 100

### 3.3. Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (DLP)

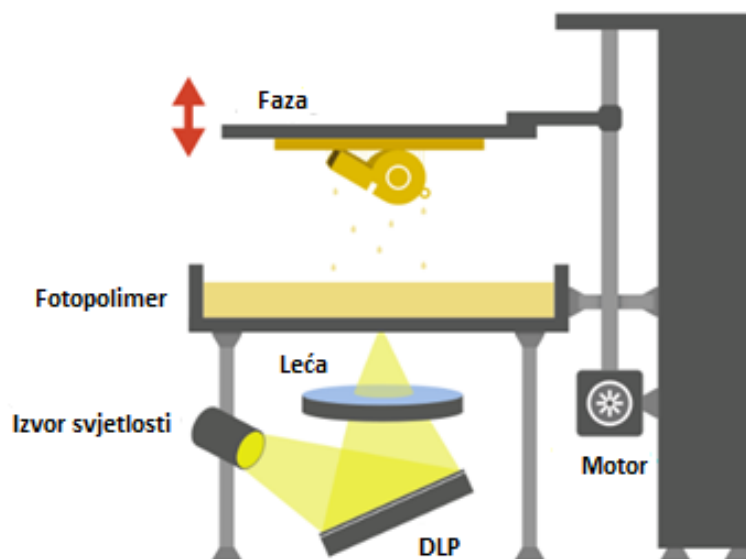
Postupak je predstavljen 1987. godine. engl. „Digital Light Processing“ je postupak koji koristi fotopolimere pa je sličan stereolitografiji. Razlika je izvor svjetlosti, DLP koristi konvencionalan izvor svjetlosti kao što je svjetiljka a prednost manja količina otpada i manji troškovi rada. [12].

#### 3.3.1. Materijali

Glavni materijal za primjenu je fotopolimerna smola.

#### 3.3.2. Princip rada

Princip rada je prikazan na slici 10.



Slika 10. Princip rada DLP postupka. [12]

Princip rada : DLP projicira svjetlo preko cijelog sloja i istovremeno preko dna područja printa te se tako stvrdnjava svaki sloj dok se objekt diže iz polimerne tekućine.



### 3.3.3. Prednosti i nedostaci postupka

Zbog usporedbe s ostalim postupcima, karakteristike postupka prikazane su kroz prednosti i nedostatke. [6]

Prednosti : - niska cijena uređaja za printanje  
 - brza i jednostavna izmjena materijala  
 - velika brzina printanja  
 - različit područja primjene

Nedostaci : - nemogućnost izrade proizvoda većih dimenzija  
 - visoka cijena tehnologije  
 - potrebna je potporna struktura.

### 3.3.4. Primjena postupka

DLP postupak se najčešće primjenjuje u dentalnoj medicini za izradu raznih pomagala. [13]

Neke od primjena ovog postupka navedene su u daljnjem tekstu. [6]

Primjena : - zdravstvo, stomatologija  
 - proizvodnja nakita



Slika 11. Proizvodi nastali DLP postupkom. [13]

### 3.3.5. Proizvođači

Najčešće spominjani proizvođači na tržištu navedeni su u daljnjem tekstu.

Proizvođači dostupni na tržištu : - EnvisionTEC, Njemačka [6]  
 - CoLiDo, Kina [14]

### 3.3.6. Uređaji dostupni na tržištu

Uređaji za DLP postupak troše vrlo malo materijala pa su prihvatljivi zbog troškova po ispisu. Znatno su brži od uređaja za SLA postupak jer u samo nekoliko sekundi mogu ispisati i polimerizirati jedan sloj preko cijele ploče. Najviše se primjenjuju u dentalnoj medicini. Jedan od boljih trenutno u ponudi je prikazan na slici 12. [14]

Karakteristike ovog pisača dane su u tablici 3. [15]



Slika 12. Colido DLP 2.0 DLP 3D pisač. [15]

Tablica 3. Karakteristike Colido DLP 2.0 pisača. [15]

Proizvođač	CoLiDo
Model	Colido DLP 2.0
Godina proizvodnje	2018.
Cijena uređaja ( \$ )	3,300
Tolerancija ( xy ) ( $\mu\text{m}$ )	50
Max. volumen proizvoda ( mm )	100 x 76 x 150
Debljina sloja ( $\mu\text{m}$ )	50

### 3.4. Selektivno lasersko srašćivanje modela (SLS)

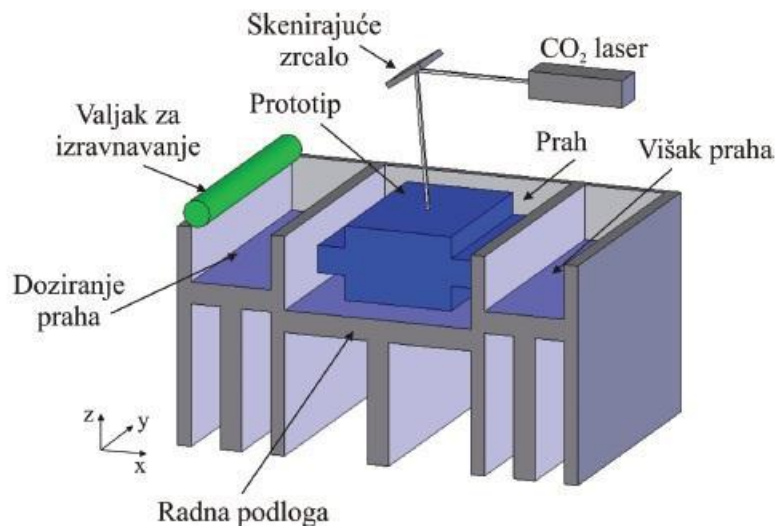
Postupak je predstavljen 1989. godine. Selektivno lasersko srašćivanje je postupak koji je prvotno bio namijenjen izradi iz polimernih materijala ali se kasnije počeo primjenjivati i na metale i keramiku.

#### 3.4.1. Materijali

Ovim je postupkom moguće je prerađivati većinu materijala praškastog oblika. U proizvodnji se koriste polimerni materijali (PVC, elastomeri, PA, itd.), materijali poput keramike, voskova, metalnih prahova. Kod izrade metalnih proizvoda koriste se metalni prahovi sa polimernim i metalnim vezivima te jednokomponentni prahovi za koje nije potrebno koristiti veziva. Pri korištenju materijala sa vezivima, vezivo se odstranjuje pri naknadnoj obradi čime se dobivaju porozni proizvodi, pa se gustoća povećava dodatnom naknadnom obradom.

#### 3.4.2. Princip rada

Princip rada je prikazan na slici 13.



Slika 13. Postupak Selektivnog laserskog srašćivanja. [6]

SLS metoda za brzu izradu proizvoda radi tako što se zraka ugljičnog dioksida lasera usmjerava na zagrijani praškasti materijal koji se pod utjecajem visoke temperature srašćuje. Krutost predmeta izrade postiže se visokom temperaturom između čestica praškastog materijala, te se tako povećava adhezija i prah se formira pod utjecajem laserskog zračenja u određeni model koji je definiran digitalnim 3D CAD oblikom. Između pojedinih slojeva koji su debljine od 0,05 - 0,12 mm prelazi rotirajući valjak kojime se izravnava i nanosi novi sloj

praškastog materijala sve dok se ne dobije 3D proizvod definiranog oblika. Potreban je period hlađenja prije nego se izradak izloži okolnoj atmosferi.

### 3.4.3. Prednosti i nedostaci postupka

Zbog usporedbe s ostalim postupcima, karakteristike postupka prikazane su kroz prednosti i nedostatke. [6]

Prednosti : - brzina postupka sa malo zaostalih naprežanja  
- mogućnost korištenja velikog broja materijala  
- izrada vrlo malih modela.

Nedostaci : - kvaliteta površine i preciznost,  
- gustoća modela,  
- vrijeme hlađenja(pogotovo velikih izradaka),  
- čišćenje stroja prilikom promjene vrste materijala,  
- skupo početno ulaganje.

### 3.4.4. Primjena postupka

Proizvodi nastali ovom tehnologijom često se primjenjuju u proizvodnji obuće te tekstilnoj industriji. [16]

Neke od primjena ovog postupka navedene su u daljnjem tekstu. [6]

Primjena : različite grane industrije gdje su potrebni vizualni prototipovi, funkcionalni prototipovi i kalupi za lijevanje, medicina.



Slika 14. Proizvodi nastali SLS postupkom. [16]

### 3.4.5. Proizvođači

Najčešće spominjani proizvođači na tržištu navedeni su u daljnjem tekstu.

Proizvođači dostupni na tržištu : - EOS, Njemačka [6]  
- DTM Corp., SAD [7]  
- Sinterit, Poljska [16]  
- Formlabs, SAD [11].

### 3.4.6. Uređaji dostupni na tržištu

SLS 3D pisači koriste laserski uređaj za skutnjavanje praškastog materijala u krute objekte. Složeni dijelovi mogu se ispisati bez potpore a slaganje objekata omogućuje korištenje punog volumena izrade. Savršeni su za proizvodnju prototipova. Danas su ovi pisači sve traženiji među inženjerima i znanstvenicima, dok su unatrag nekoliko godina bili primjenjivani uglavnom u velikim industrijama. Kao jedan od češće korištenih na tržištu ističe se Sinterit Lisa SLS 3D pisač prikazan na slici 15. [9]

Karakteristike ovog pisača dane su u tablici 4. [9]



Slika 15. Sinterit Lisa SLS 3D pisač. [16]

Tablica 4. Karakteristike Sinterit Lisa SLS 3D pisača. [16]

Proizvođač	Sinterit
Model	Sinterit Lisa
Godina proizvodnje	2018.
Cijena uređaja ( \$ )	5,837
Dimenzije uređaja ( mm )	620 x 400 x 660
Tolerancija ( xy ) (mm)	0.1
Min. debljina sloja (mm )	0.08

### 3.5. 3D tiskanje (3DP )

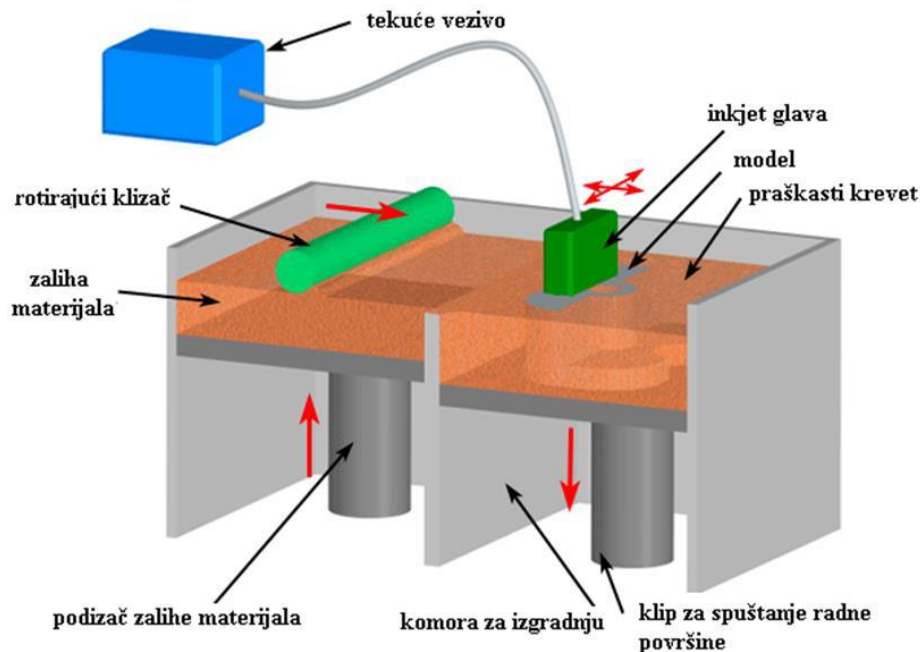
Postupak je predstavljen 1989. godine. 3DP – 3D Printing je postupak kojim se pomoću injekt mlaznica nanosi tekuće vezivo na praškast polimerni materijal kojeg povezuje. Često dolazi do zabune prilikom spomena ovog postupka jer je postalo uobičajeno za sve postupke aditivne proizvodnje koristiti naziv 3D printanje, međutim ovo je postupak koji kao materijal koristi polimerni ili metalni prah.

#### 3.5.1. Materijali

Materijal je prah temeljen na gipsu i dodacima.

### 3.5.2. Princip rada

Princip rad je prikazan na slici 16.



Slika 16. Princip rada 3D print postupka. [17]

Postupak se temelji na zagrijavanju komore koja se ispunjava slojem polimernog praha. Rotirajućim klizačem se nanosi novi sloj praškastog materijala unutar komore i nakon toga se dodaje tekuće vezivo pomoću glave koja prolazi komorom. Preostali praškasti materijal koji se nalazi oko predmeta služi kao potporna konstrukcija, ali se koristi ponajviše sve dok traje proces izrade. [18]

### 3.5.3. Prednosti i nedostaci postupka

Zbog usporedbe s ostalim postupcima, karakteristike postupka prikazane su kroz prednosti i nedostatke. [6]

Prednosti : - brza izrada

- niska cijena
- dimenzijska postojanost
- izrada modela srednjih dimenzija
- mogućnost prikaza u bojama
- lošija točnost izrade modela velikih dimenzija.

- Nedostaci : - mali izbor materijala
- loša kvaliteta površine izradka
  - vrijeme potrebno da se materijal stvrdne
  - potrebno je čišćenje modela.

### 3.5.4. Primjena postupka

Proizvodi nastali ovom tehnologijom, prikazani na slici 17. imaju široku primjenu od etuia za mobitele do pomoćnih izradaka u proizvodnji.

Neke od primjena ovog postupka navedene su u daljnjem tekstu. [6,7,19]

Primjena : - izrada kalupa i jezgre za lijevanje

- implantati
- medicinska pomagala
- dekorativni elementi, makete.



Slika 17. Proizvodi nastali 3DP postupkom. [19]

### 3.5.5. Proizvođači

Najčešće spominjani proizvođači na tržištu navedeni su u daljnjem tekstu.

- Proizvođači dostupni na tržištu :
- Z Corporation, SAD [6]
  - VoxelJet, Njemačka [6]
  - Specific Surface, SAD [7]
  - TDK Corporation, Japan [7]
  - Hewlett-Packard, SAD [19].



### 3.5.6. Uređaji dostupni na tržištu

Uređaji za ovaj postupak rade i do 10 puta brže od uređaja za SLS postupak. Printaju dijelove u punoj boji i proizvod ima dobra površinska svojstva. [19] Na tržištu postoji sve veći broj kvalitetnijih pisaača a jedan od njih je prikazan na slici 18. Karakteristike uređaja nalaze se u tablici 5.



Slika 18. HP Jet Fusion 580 Color. [19]

Tablica 5. Karakteristike HP Jet Fusion 580 Color pisača. [19]

Proizvođač	HP
Model	HP Jet Fusion 580 Color
Godina proizvodnje	2018.
Cijena uređaja ( \$ )	5,837
Dimenzije uređaja ( mm )	1565 x 955 x 1505
Rezolucija	1200 dpi
Debljina sloja ( mm )	0.08

### 3.6. Modeliranje topljenim deponitima (FDM)

Postupak je predstavljen 1990. godine. Modeliranje topljenim deponitima ili FDM (engl. „*Fused Deposition Modeling*“) je postupak dobivanja proizvoda po principu sloj po sloj koristeći najčešće rastaljeni polimerni materijal. U literaturi se spominje i kao taložno očvršćivanje ili srašćivanje. Uređaji za izvođenje ovog postupka rade na principu troosnog NC obradnog centra. Kvaliteta izvedbe površine proizvoda često se uspoređuje s SLS postupcima, međutim proizvodi dobiveni ovom metodom su porozniji.

Razlikujemo uređaje sa i bez grijane komore. Uređaji s grijanom komorom su skuplji i imaju veću preciznost i ponovljivost. Uređaje bez grijane komore dijelimo na one sa i bez grijane radne podloge.

#### 3.6.1. Materijali

Uređaji bez grijane komore najčešće upotrebljavaju Akrilonitril-butadien-stiren (ABS) i Polilaktid (PLA). Odnosno za ABS trebaju biti opremljeni sa grijanom radnom podlogom.

Osim navedenih koriste se i Poliamid (PA), Elastoplastomeri (TPE), Poli(etilen-tereftalat) (PET), Poli(vinil-klorid) (PVC), Poli(vinil-amid) (PVA), Polietilen (PE) itd., ali su u istraživačkoj fazi. Vjerojatno ćemo u skoroj budućnosti vidjeti i njih u ponudi. Također je moguće ekstrudirati i čokoladu. [6] Zbog naglog rasta popularnosti ovakvih uređaja izbor materijal se neprestano širi.

ABS je najpopularniji materijal za FDM postupak ali za uređaje s grijanom radnom podlogom zbog deformacija koje se događaju za vrijeme printanja zbog temperaturnih razlika u raznim zonama. Nije jako osjetljiv na temperaturu pa je primjenjiv za izradu gdje temperatura treba biti precizno kalibrirana. Ima jači miris kad je vruć i često se iskrivljava na donjim kutevima što otežava skidanje s platforme. Omogućuje bolje definiranu površinu pa je efikasan za primjenu izrade objekata s većim skošenjima. [30]

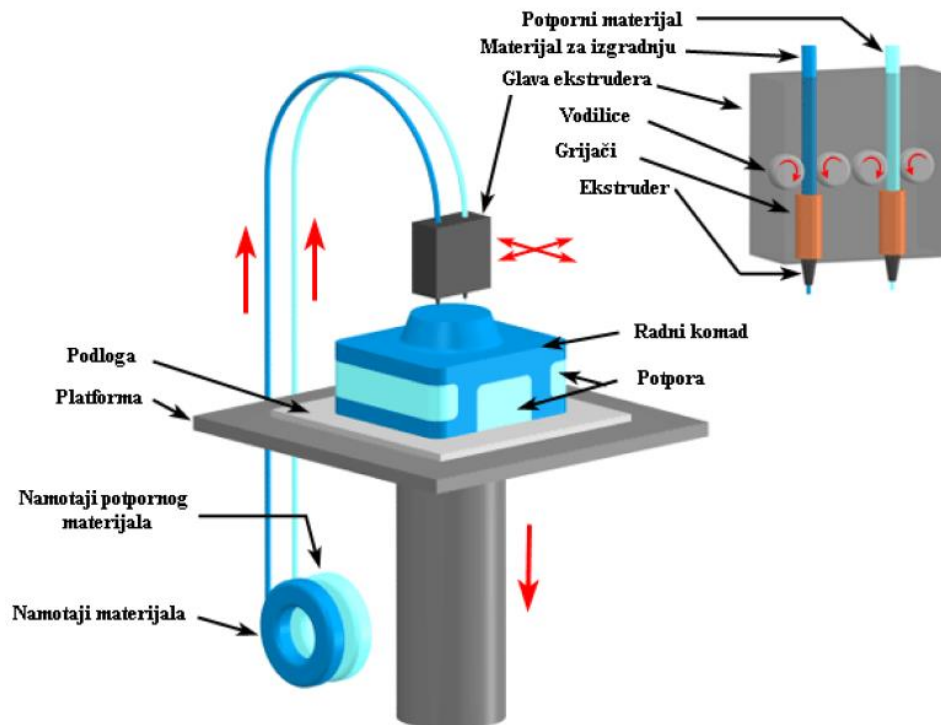
Najveće je čvrstoće od sličnih materijala. Bez obzira koliko se puta rastopi i očvrstne, zadržava svoja kemijska svojstva. Ovo je jedna od najčešće korištenih plastika u industriji. Prva je plastika koja je korištena u 3D printerima i zbog toga još i danas ima veliku ulogu u svijetu 3D printa. [31]

PLA postaje sve prisutniji u proizvodnji. Biorazgradiv je i nema miris kao ABS. Ne zahtijeva korištenje grijanje platforme i ne iskrivljava se koliko i ABS. [30]

Najjednostavniji je za printanje. Pripada skupini termoplastika pa kao i ABS zadržava svoja kemijska svojstva bez obzira koliko se puta rastope i očvrstnu. Nastaje preradom kukuruzne škrobi i jedan je od rijetkih filamenata koji nije baziran na nafti. Definitivno broj jedan u kategoriji „eco-friendly“. Krut, ovaj materijal je izuzetno krhak i zbog toga lagano puca, a pošto se printa na donjoj granici temperature, termički je nestabilan već pri 70 °C – nikako nije dobar izbor za 3D print šalice za kavu! . [31] PLA postaje sve prisutniji u proizvodnji.

### 3.6.2. Princip rada

Princip rada je prikazan na slici 19.



Slika 19. Princip rada Taložnog očvršćivanja. [20]

Polimerni materijal u obliku žice prolazi kroz ekstruzijsku mlaznicu kroz koju se kontrolira protok materijala. Mlaznica se grije kako bi dosegla temperaturu tališta materijala, te ima slobodu kretanja u horizontalnim i vertikalnim smjerovima. Putanja mlaznice je kontrolirana od strane programskog sustava za upravljanje. Printer putanju određuje u odnosu na prethodno učitani 3D model koji se želi izraditi. Dio se izrađuje postepenim ekstrudiranjem termoplastičnog materijala sloj po sloj. Prilikom doticaja sa podlogom ili prethodno izrađenim slojem, pri pomicanju mlaznice materijal se gotovo trenutačno skrućuje.

### 3.6.3. Prednosti i nedostaci postupka

Zbog usporedbe s ostalim postupcima, karakteristike postupka prikazane su kroz prednosti i nedostatke. [6]

Prednosti : - relativno brza izrada

- malo početno ulaganje
- niska cijena materijala i potrošnih dijelova
  
- mogućnost korištenja više materijala
- mogućnost izrade modela iz dva različita materijala odnosno dvije različite boje
- sigurnost rada stroja
- prototipove je moguće naknadno bojati, brusiti i sl.
- nije potrebno hlađenje prototipa
- moguća izrada više prototipova odjednom, odnosno koliko ih stane na radnu podlogu.

Nedostaci : - nepredvidljivo skupljanje materijala

- vidljive su linije slojeva stoga je često potrebna naknadna obrada
- deformiranje materijala i raslojavanje
- čvrstoća je smanjena u okomitom smjeru prema smjeru izrade
- nemogućnost izrade oštih rubova jer je mlaznica okruglog presjeka
- dimenzijska točnost i postojanost.

#### 3.6.4. Primjena postupka

Proizvodi nastali ovim postupkom, prikazani na slici 20. primjenu nalaze u kulinarstvu i automobilskoj industriji. Prikazani su kalupi za izradu kolača i prototip Nascar-ovog automobila. Neke od primjena ovog postupka navedene su u daljnjem tekstu. [6,10,21]

Primjena: - koncept za vizualizaciju

- direktna upotreba
- investicijsko lijevanje
- medicina-kirurška rekonstrukcija
- elastične komponente.



Slika 20. Proizvodi nastali FDM postupkom. [21]

### 3.6.5. Proizvođači

Najčešće spominjani proizvođači na tržištu navedeni su u daljnjem tekstu.

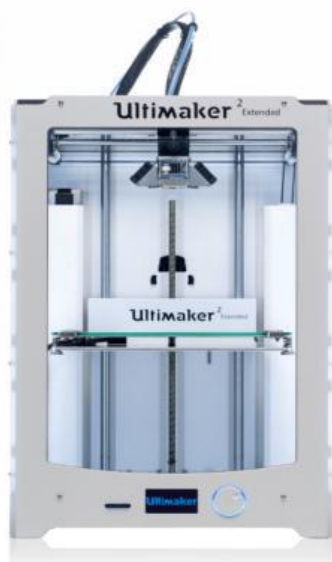
- Proizvođač : - Stratasys, SAD [6,7]  
- Ultimaker, Nizozemska [23].

### 3.6.6. Uređaji dostupni na tržištu

Uređaji za FDM postupak izrađuju proizvod tehnikom slaganja slojeva odozdo prema gore. Postizanje zahtjevane kvalitete nije jednostavno, puno je čimbenika koji na to utječu. Neki od njih su model koji se proizvodi i karakteristike pisača. Glavni parametri FDM 3D printera su brzina ispisa, temperatura mlaznice, visina slojeva i brzina uzimanja filameta. Gotovo svaki takav printer korisnicima nudi podešavanje navedenih parametara uporabom softvera kojim se kontrolira 3D printer. Glavna mana FDM 3D pisača je tzv. "warping". Pošto se već isprintani slojevi i njihovi dijelovi hlade različito od novonastalih slojeva, dolazi do termičkih mikro stezanja i rastezanja, što rezultira povlačenjem donjih slojeva sa podloge za ispis. [22] *Warping* se može ukloniti uporabom grijanih podloga za printanje koje zagrijavaju i održavaju prethodno isprintane slojeve na određenoj temperaturi kako ne bi došlo do većih temperaturnih razlika između slojeva, a samim time i *warpinga*. Ukoliko 3D printer nema grijanu podlogu za printanje, možete se poslužiti "pik-trakom", ili profesionalnim adhezivnim sredstvom "Magigoo". [22]

Također jedan od parametara FDM 3D printera je popunjenost. 3D printani objekti su vrlo rijetko potpuno ispunjeni, iz razloga što 100%-tna ispunjenost zahtijeva više materijala i povećava vrijeme printanja. Najčešće se koristi 20%-tna popunjenost, ali ukoliko je potrebna izuzetna čvrstoća objekta, popunjenost se može podestiti na 80%, 90% ili čak 100%. S druge strane, ako se printa neki objekt gdje čvrstoća gotovo da i nije bitna, popunjenost se može podesiti na niže vrijednosti, npr. 10%. [22]

Jedan od boljih pisača na tržištu je prikazan na slici 21. Karakteristike ovog pisača prikazane su u tablici 6.



Slika 21. Ultimaker 2 Extended +. [23]

Tablica 6. Karakteristike Ultimaker Extended + pisača. [23]

Proizvođač	Ultimaker
Model	Ultimaker Extended +
Godina proizvodnje	2016.
Cijena uređaja ( \$ )	do 2,999
Dimenzije izradka ( mm )	223 x 223 x 305
Brzina printanja sloja ( mm/s )	300
Min. debljina sloja ( $\mu\text{m}$ )	20

### 3.7. PolyJet

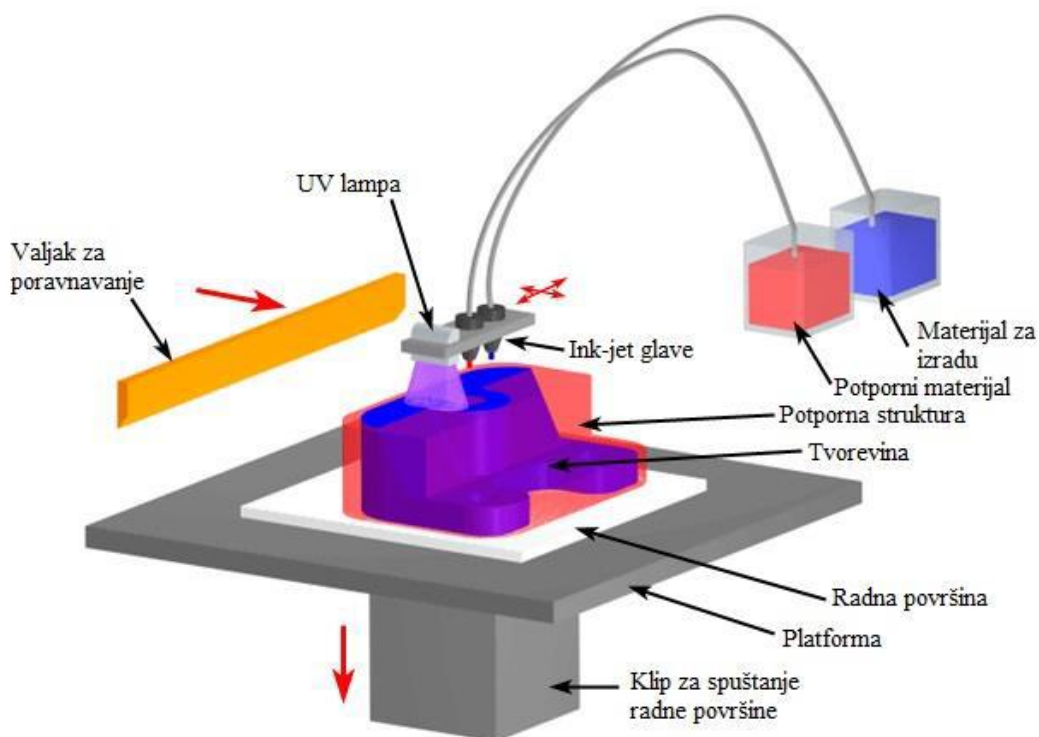
Postupak je predstavljen 2000. godine. Nastao je kombinacijom stereolitografije i 3D tiskanja.

#### 3.7.1. Materijali

Za ovaj se postupak koriste kapljeviti materijali. Upotrebljavaju se dva različita materijala, jedan za potporna struktura koja se lako uklanja nakon završetka postupka a drugi za model. Upotrebljavaju se fotopolimerni akrilni materijali, ABS i elastični polimeri. Najčešće se upotrebljavaju FullCure fotopolimerni akrilni materijali jer omogućuju izradu modela visoke preciznosti. [6]

#### 3.7.2. Princip rada

Princip rad je prikazan na slici 22.



Slika 22. PolyJet postupak. [6]

Princip rada ovog postupka temelji se na tiskanju sloja fotopolimernog materijala pomoću dvije glave s mlaznicama koje istovremeno tiskaju materijal za potporu i za izradak. Nakon završenog sloja, radna se podloga spušta za debljinu sloja ( $16\mu\text{m}$ ) i počinje se tiskati drugi sloj. Očvršćivanje se vrši pod utjecajem UV svjetlosti. Kada je izradak završen, potporna se struktura uklanja vodm pri tlaku 40 bara ili ručno, zavisi od oblika izradka. Gotovi proizvodi mogu se polirati, brusiti, bojati, itd.

### 3.7.3. Prednosti i nedostaci postupka

Zbog usporedbe s ostalim postupcima, karakteristike postupka prikazane su kroz prednosti i nedostatke. [6]

Prednosti : - dimenzijska točnost zbog glatke površine i tankog sloja

- primjena u uredima
- brz postupak
- proizvod može biti od kombiniranih materijala
- mogućnost izrade sitnih detalja i tankih stijenki.

Nedostaci : - troškovi uređaja

- troškovi materijala
- potrebna je potporna konstrukcija
- potrebna peć za otapanje potporne strukture.

### 3.7.4. Primjena postupka

Proizvodi ispisani ovom tehnologijom primjenu često nalaze u automobilskoj i sportskoj industriji. Neke od primjena ovog postupka navedene su u daljnjem tekstu. [6]

Primjena : - medicinska pomagala

- dekorativni elementi.



Slika 23. Proizvodi nastali PolyJet postupkom. [24]

### 3.7.5. Proizvođači

Najčešće spominjani proizvođači na tržištu navedeni su u daljnjem tekstu.

Proizvođač : - Stratasys, SAD [24]

- Objet Geometries Ltd, Izrael [6, 26]
- Flashforge, Kina [29].



### 3.7.6. Uređaji dostupni na tržištu

Postupak PolyJet ima prednost pred ostalima zbog mogućnosti spajanja različitih materijala i boja u gotovi proizvod. Uređaji za ovaj postupak pružaju visoku razinu kvalitete.

PolyJetova sposobnost miješanja materijala omogućuje i različite funkcionalnosti unutar istog printanog materijala. To znači da se složeni predmeti, poput protetske ruke ili noge - te njihovi fleksibilni zglobovi umetnuti između tvrdih plastičnih dijelova - mogu ispisati u jednom procesu. [25]

Jedan od najboljih uređaja u ponudi na tržištu je prikazan na slici 24. a njegove karakteristike su prikazane u tablici 7.



Slika 24. Objet 1000 Plus PolyJet 3D pisač. [26]

Tablica 7. Karakteristike Objet 1000 Plus PolyJet 3D pisača. [23]

Proizvođač	Stratasys
Model	Objet 1000 Plus
Debljina sloja ( $\mu\text{m}$ )	16
Cijena uređaj ( \$ )	250,000
Max. volumen proizvoda ( mm )	1000 x 800 x 500

### 3.8. Proizvodnja kontinuiranim tekućim povezivanjem (CLIP)

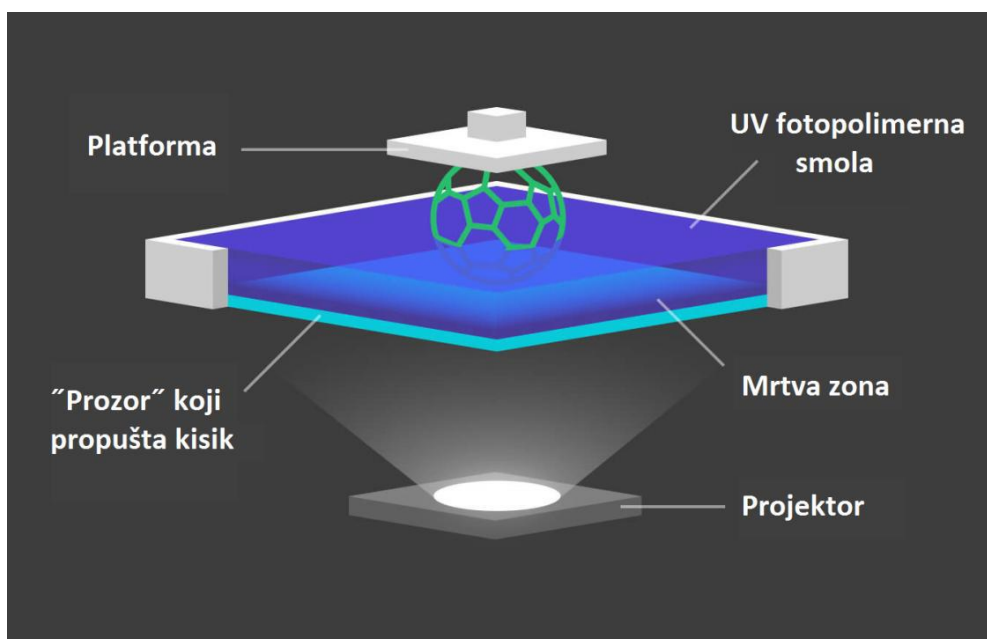
Postupak je predstavljen 2015. godine. Ovaj postupak je metoda 3D ispisa koji na temelju fotopolimerizacije stvara glatke, čvrste predmete raznih oblika pomoću smola.

#### 3.8.1. Materijali

Najviše materijala za ovaj postupak razvila je američka firma Carbon. Neki od njih su : Epoksidna smola (EPX 82), Uretan Metakrilat (UMA), Fleksibilni poliuretan (FPU), silikon. [27]

#### 3.8.2. Princip rada

Princip rad je prikazan na slici 25.



Slika 25. Princip CLIP postupka. [28]

Princip rada ovog postupka je drugačiji od dosad navedenih jer ne stvara proizvod sloj po sloj nego izradak nastaje iz jednog komada koji se izrađuje iz tekućeg polimera. Ovaj je postupak 25 – 100 puta brži od bilo kojeg drugog postupka opisanog u ovom radu.

CLIP je fotokemijski proces koji pažljivo balansira svjetlost i kisik kako bi brzo proizveo dijelove. Djeluje tako što projicira svjetlost kroz prozor koji propušta kisik u rezervoar smole koja se otvrdnjava UV-zrakama. Kako se projicira niz UV slika, dio se učvršćuje i platforma za izgradnju raste. [27]

### 3.8.3. Prednosti i nedostaci postupka

Zbog usporedbe s ostalim postupcima, karakteristike postupka prikazane su kroz prednosti i nedostatke. [27]

Prednosti : - brza izrada

- mogućnost izrade komplicirane geometrije
- širok izbor materijala
- točnost izrade.

Nedostaci : - visoka cijena uređaja

- relativno nova tehnologija pa još nema svih testnih podataka.

### 3.8.4. Primjena postupka

Proizvodi prikazani na slici 26. su primjer primjene ovog postupka u sportskoj industriji (navlake za ručice volana bicikla) i kao pomoćni dijelovi u proizvodnji (držač za elektro kablove). Neke od primjena ovog postupka navedene su u daljnjem tekstu. [27]

Primjena : - medicinska pomagala

- dijelovi automobila
- sportska industrija.



Slika 26. Proizvodi nastali CLIP postupkom. [27]

### 3.8.5. Proizvođači

Najzastupljeniji proizvođač na tržištu naveden je u daljnjem tekstu.

Proizvođač : - Carbon, SAD [27]

### 3.8.6. Uređaji dostupni na tržištu

Carbon je razvio tehnologiju po nazivom CLIP postupak koji koristi digitalnu projekciju svjetlosti, optiku propusnu za kisik i programabilne tekuće smole za proizvodnju dijelova s odličnim mehaničkim svojstvima, razlučivošću i površinskom obradom. [27]

Na tržištu se ističe Carbon M2 CLIP pislač, prikazan na slici 27., a njegove karakteristike prikazane su u tablici 8.



Slika 27. Carbon M2 CLIP 3D pislač. [29]

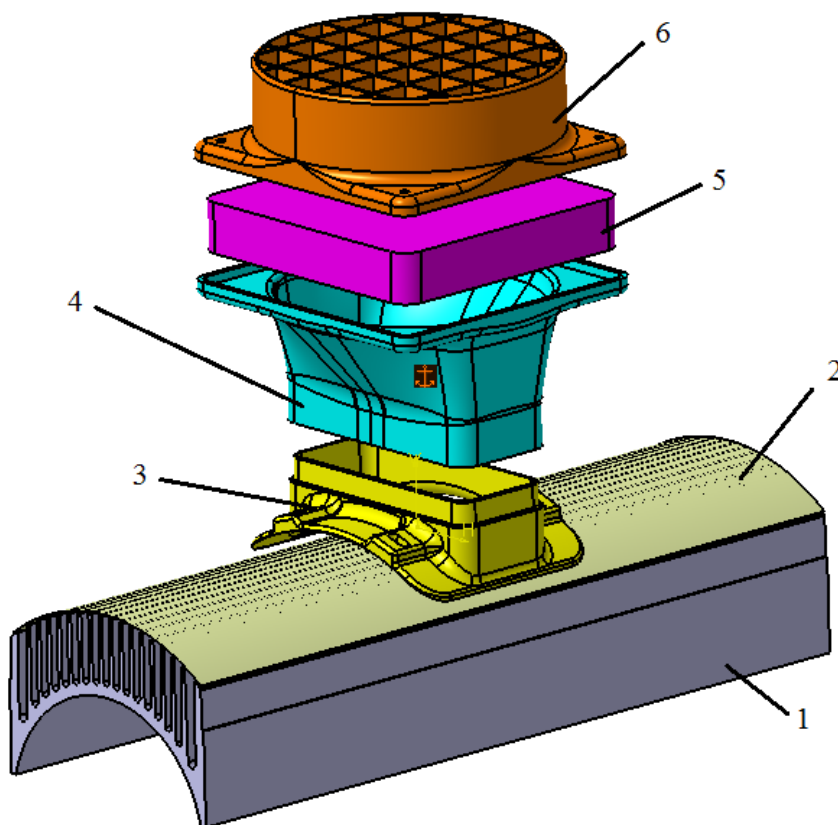
Tablica 8. Karakteristike Carbon M2 CLIP 3D pislača. [29]

Proizvođač	Carbon
Model	M2
Max. volumen proizvoda ( mm )	190,5 x 111,8 x 325,1
Debljina sloja ( $\mu\text{m}$ )	75
Cijena uređaja ( \$ )	162,500

## 4. PRAKTIČNI DIO RADA

### 4.1. Proizvodi

U ovom dijelu rada biti će opisani proizvodi koji su ispisani FDM tehnologijom. Prvi proizvod je prototip rashladnog sustava protočnog UV sterilizatora vode za bolnice. Poštivajući zahtjeve proizvođača, nisu navedeni njegovi podaci budući se radi o testnom proizvodu.



Slika 28. Prototip rashladnog sustava protočnog UV sterilizatora vode.

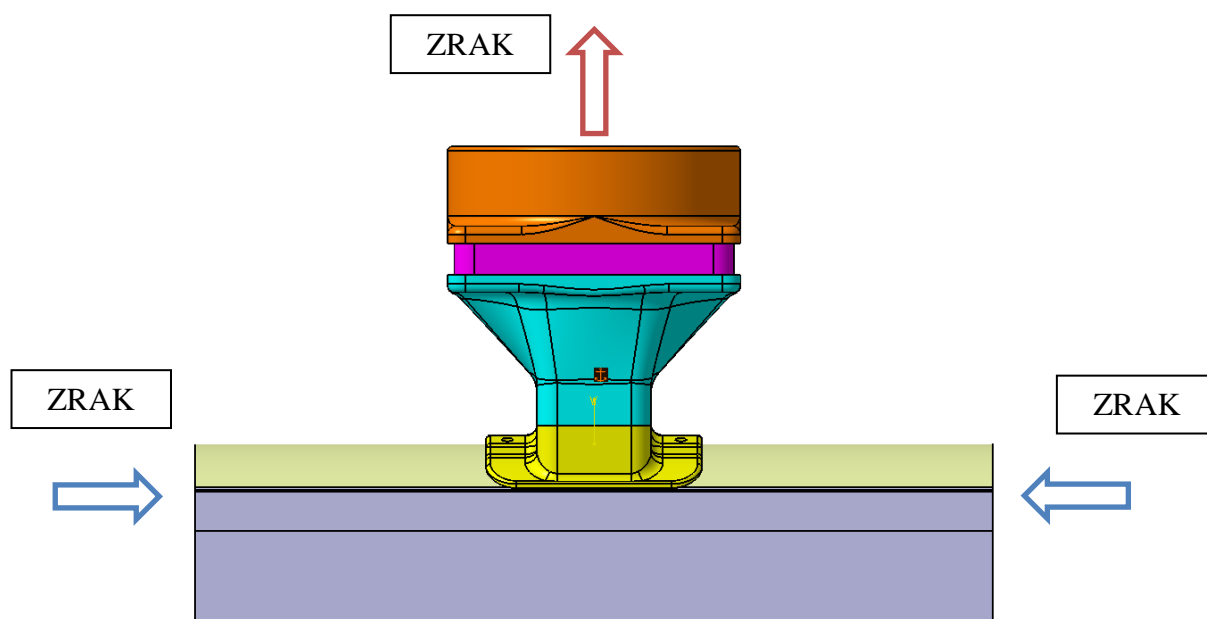
Dijelovi rashladnog sustava za usis zraka su:

1. Aluminijski hladnjak
2. Zaštitni lim
3. Duct\_bottom
4. Duct\_middle
5. Ventilator
6. Duct\_top

Standardni dijelovi su aluminijski hladnjak (130 x 750 mm), zaštitni lim i standardni ventilator (d = 140 mm). Duct\_bottom, Duct\_middle i Duct\_top su dijelovi rashladnog sustava za usmjeravanje zraka koji se izrađuju na FDM uređaju.

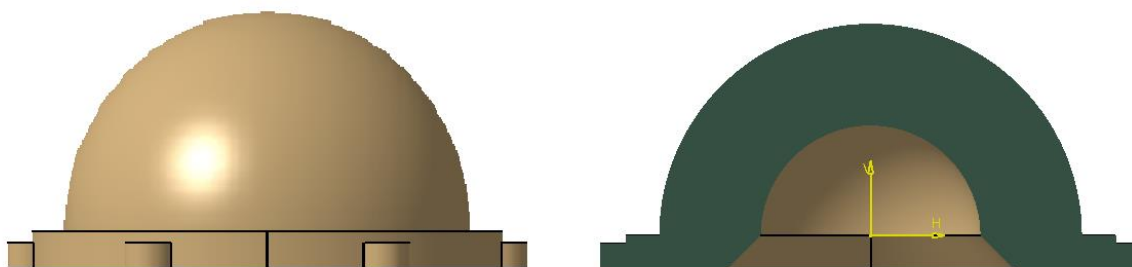
Princip rada:

Hladnjak je pričvršćen na cijevni protočni spremnik vode u kojem se odvija sterilizacija pomoću UV zraka. Pod utjecajem UV svjetla voda se zagrijava te ju je potrebno ohladiti. Pasivno hlađenje nije dovoljno pa je potrebno osigurati protok zraka. Ventilator usisava zrak sa bočnih strana hladnjaka, hladi ga i potom se radni fluid odvodi van. (Slika 29.)



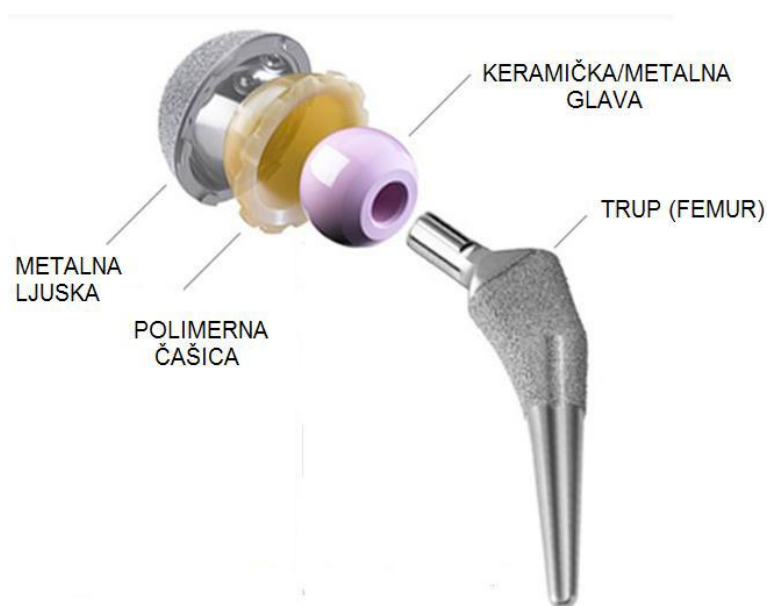
Slika 29. Princip rada rashladnog sustava.

Drugi je proizvod prototip čašice kuka.



Slika 30. Prototip čašice kuka.

Polimerna čašica je smještena između metalne ljuske i keramičke/metalne glave kao što je prikazano na slici 30. Metalna ljuska i metalna glava su najčešće od titanske legure. Metalna čašica fiksira se u zdjelicu na mjestu prijašnje zglobne čašice. Polimerna čašica ulazi u metalnu ljusku gdje je osigurana od pomaka i rotacije čvrstim dosjedom i oblikom. Polimerna čašica opterećena je preko metalne/keramičke glave proteze čiji trup ulazi u kost noge (femur). [34]



Slika 31. Implantat kuka. [35]

## 4.2. Materijali za FDM postupak

FDM je postupak koji zbog svoje pristupačnosti postaje sve popularniji pa se širi i izbor materijala. Međutim, do sada su najčešće primjenjivani ABS i PLA materijali. Korišteni materijal je Herz PLA. Njegove karakteristike prikazane su u tablici 9.

Tablica 9. Karakteristike Herz PLA materijala. [33]

<b>Promjer</b>	<b>1.75 mm</b>
Boja	Crna/ Crvena/ Žuta/ Narančasta
Neto težina	1 kg
Pakiranje	Zavojnica od kartona
Temp. printanja	190-230 °C
Temp. Printanja potporne strukture	50-70°C, ako je moguće
Gustoća	1,24 g/cm <sup>3</sup>
<b>Dimenzije zavojnice</b>	
Promjer	200 mm
Promjer jezgre	52 mm
Visina	65 mm



Slika 32. Prikaz dostupnih boja PLA Herz filameta. [33]



### 4.3. Izrada modela

Dijelovi su modelirani u Catia V5 Part Design-u. Izrađene modele pohranjujemo u obliku STL datoteka. STL – Standard Tessellation Language je grafička datoteka za pohranu 3D modela. Nema podataka o mjernim jedinicama, mjerilu i sl. Može biti tipa „binary“ ili ASCII.

Tablica 10. Struktura STL datoteke

Vertices, v (čvorovi)	Vektor čvorova (prostorne točke) stl mreže zadan je pomoću tri prostorne koordinate x, y, z. Oblak točaka u prostoru.
Faces, f (Lica)	Vektor „lica“ trokutaste mreže (trokuta) definira povezanost između čvorova, tj. pokazuje koji čvor je spojen s kojim i koje lice zatvara (pointer).
Normals, n (normale)	Vektor normala – svako lice (face) posjeduje normalu koja definira dali je površina pozitivno ili negativno orijentirana, tj. da li promatramo njenu „unutarnju“ ili „vanjsku“ stranu. Normale su jedinični vektori okomiti na pripadajuću površinu. Ako normale nisu definirane izračunavaju se pomoću pravila desne ruke.
Color, c (boja)	Boja u binarnim stl datotekama definirana je pomoću RGB skale. Najčešće u binarnim datotekama ne postoji zapis boje, nego se uzima „default“ postavka softwera koji stl datoteku otvara.
Header, A (naslov/ime)	Naslov, kako i samo ime govori sadrži podatke o nazivu modela. Može biti duljine do 80 znakova (char).

Obzirom da je postupak isti za oba proizvoda, u ovom dijelu rada biti će prikazan postupak za izradu prototipa rashladnog sustava protočnog UV sterilizatora vode.

#### 4.4. Učitavanje modela u programski paket za upravljanje 3D uređajem

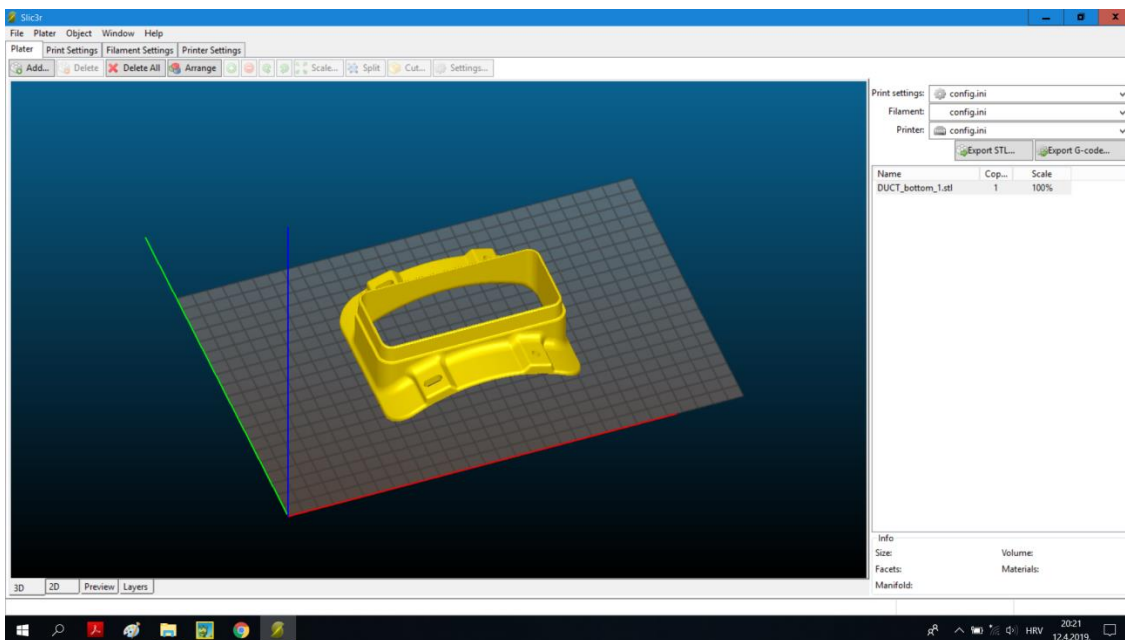
SLIC3R – „open source“ je programski paket kojim ćemo se poslužiti za upravljanje 3D uređajem.

Slic3r je alat koji je potreban za pretvaranje 3D modela u upute za ispis 3D pisačem. On reže model u horizontalne rezove (slojeve), generira putanje alata kako bi ih ispunio i izračunava količinu materijala koja se ekstrudira.

Potpuno je otvoren i neovisan od bilo koje tvrtke ili proizvođača pisača. Kompatibilan je jer podržava sve poznate vrste zapisa G-koda, omogućuje fino podešavanje i potpunu kontrolu, ali i zahtjeva korisnika s naprednijim znanjem.

Postupak je opisan slijedećim koracima :

1. Učitavanje 3D modela u program Slic3r; prikazano na slici 33. Odabirom izbornika „File\_Import“ učitavamo odabrani 3D model na virtualnu radnu podlogu.



Slika 33. Strojni dio u virtualnom radnom prostoru stroja.

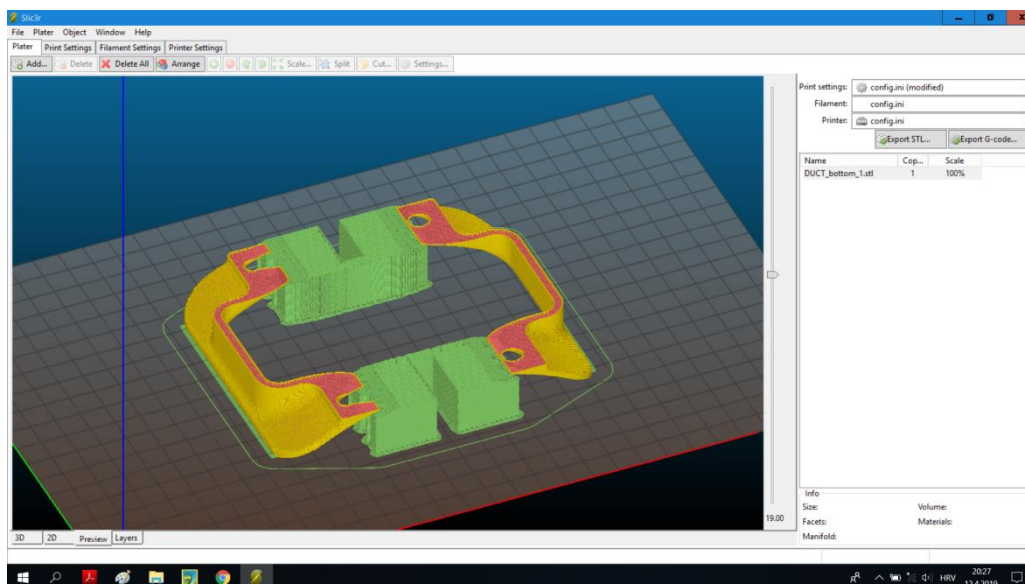
2. Nakon učitavanja modela na virtualnu radnu podlogu potrebno je podesiti parametre ispisa. Odabirom izbornika „Print Settings“ definiramo postavke kao što su ispunjenost modela (Infill), temperature ispisa, visina sloja i sl. Parametri za ispis prikazani su u tablici 11.

Tablica 11. Parametri korišteni pri izradi proizvoda.

Ispunjenost (%)	20
Visina sloja (mm)	0.2
Temperatura mlaznice (°C)	210
Temperatura grijane radne podloge (°C)	65
Brzina glave prilikom ekstrudiranja materijala (mm/s)	40
Brzina glave kad nema ekstrudiranja (mm/s)	90

3. Napraviti provjeru ispisa.

Pomoću funkcije „Preview“ pogledamo tijek ispisa; prikazano na slici 34.

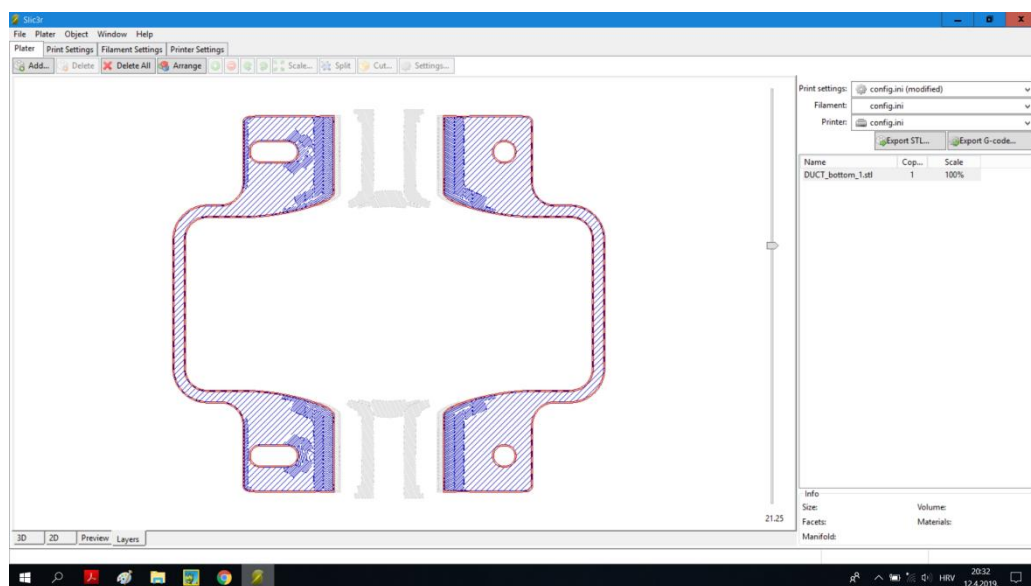


Slika 34. Pregled ispisa.

Objašnjenje slike: zeleni dio predstavlja potpurnu strukturu, žutom bojom su označeni vanjski slojevi, a crveni dio predstavlja ispunu (tzv. saće).

Možemo napraviti pregled slojeva i u 2D pogledu.

Crvenom linijom označeni su vanjski slojevi (dva puna sloja), a plava označava ispunu (Infill). Na mjestima je ispunu gušća što predstavlja promjenu geometrije na tim mjestima, a program je sam određuje.

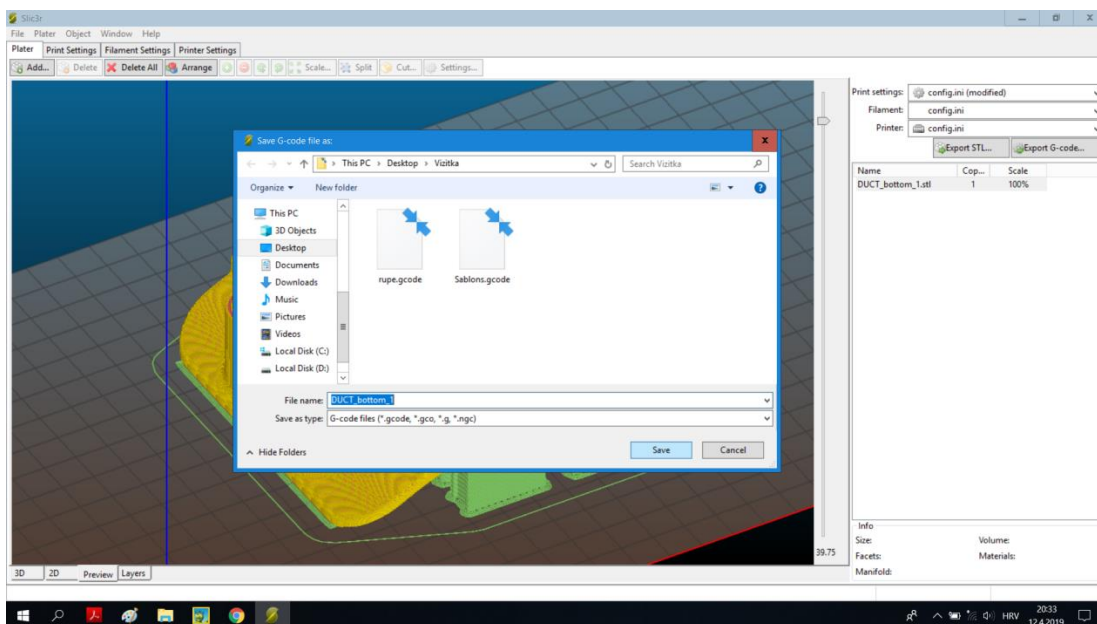


Slika 35. Pregled slojeva u 2D pogledu (presjek).

#### 4. „Export G-code“

Odabirom funkcije Export G-code pokrećemo izradu G-code-a.

„G-code“ premještamo na memorijsku SD karticu kojom pokrećemo ispis na 3D uređaju. Informacije o potrebnoj količini materijala i vremenu ispisa možemo naći u „G-code-u“. Primjer exporta je prikazan na slici 36.



Slika 36. „Export G-code“.

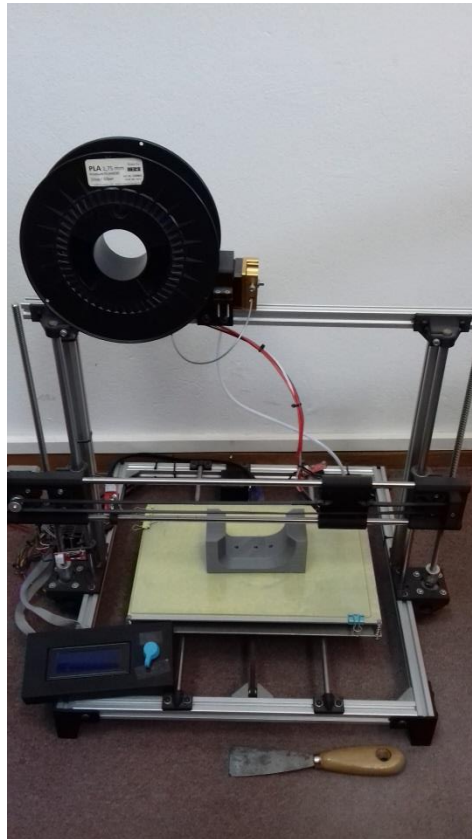
#### 4.5. 3D uređaj

FDM uređaj koji se koristi za ispis 3D modela je OpenBeam 1.4 (slika 37.) koji je dostupan na internet stranicama specijaliziranim za međusobno dijeljenje CAD modela i nacrtā. Bilo tko sa naprednijim tehničkim znanjima u mogućnosti je koristiti upute na internetu te izraditi vlastiti printer.

3D uređaj ima radni prostor dimenzija 210 x 297 mm u x-y smjeru i 200 mm u smjeru z-osi. Radna ploča printera je staklena sa grijačem što omogućava bolje prianjanje ekstrudiranog materijala za radnu podlogu. Z-os pogonjena je sa dva motora i pripadajućim trapeznim vretenima (Tr8x2) kako bi se osigurala stabilnost debljine ispisa. X i y-osi pogonjene su sa po jednim motorom i zupčastim remenom.

Upravljački sklop ovog printera se sastoji od multifunkcionalnog Arduino Mega 2560 modula te na njega spojenog RAMPS 1.4 upravljačkog sklopa printera. Arduino Mega 2560 je mikrokontrolerska pločica bazirana na Atmega 2560 mikrokontroleru. Na Arduino mikrokontrolersku ploču se sprema upravljački program printera, u ovom slučaju skup uputa

napisanih u C++ programskom jeziku, koji upravlja funkcijama te preko mnoštva digitalnih i analognih ulaza i izlaza prati stanja senzora te šalje informacije upravljačkim sklopovima na RAMPS 1.4 upravljačkoj ploči.



Slika 37. 3D uređaj.

#### 4.6. Ispisani proizvodi

U nastavku su prikazani ispisani dijelovi rashladnog sustava protočnog UV sterilizatora vode. Nakon skidanja s radne podloge, dijelovi su odvojeni od potporne strukture i prolaze završnu obradu koja se sastoji od brušenja brusnim papirom, bojanja crnom bojom i lakiranja bezbojnim lakom.

Slika 38. prikazuje ispisani Duct\_bottom. Okvirno vrijeme potrebno za ispis ovog dijela je šest sati.



Slika 38. Ispisani Duct\_bottom.

Slika 39. prikazuje ispisani Duct\_middle. Okvirno vrijeme potrebno za ispis ovog dijela je deset sati.



Slika 39. Ispisani Duct\_middle.



Slika 40. prikazuje ispisani Duct\_top. Okvirno vrijeme potrebno za ispis ovog dijela je dvanaest sati.



Slika 40. Ispisani Duct\_top.

Slika 41. prikazuje rashladni sustav protočnog UV sterilizatora vode sa standardnim i ispisanim dijelovima. Hladnjak u sivoj boji, koji je uobičajeno standardni dio, za potrebe prezentacije je također ispisan.



Slika 41. Rashladni sustav protočnog UV sterilizatora vode.



## 5. ZAKLJUČAK

Aditivne tehnologije ispunjavaju zahtjeve današnje proizvodnje. U kratkom vremenskom roku isporučuju proizvode dobre kvalitete i povoljne cijene. Postupci aditivnih tehnologija su u znaku stalnih usavršavanja pa iako su negdje bitna ograničenja u vidu cijene uređaja za ispis, s vremenom će se i ona smanjivati. Iako tradicionalan način proizvodnje neće biti lako moguće u potpunosti zamijeniti, postupci aditivnih tehnologija šire svoj djelokrug.

Cilj ovog rada bio je ukratko opisati postupke aditivne tehnologije i proizvesti, odnosno „ispisati“ proizvode od polimernog materijala.

U praktičnom dijelu rada modelirani su prototipovi čašice kuka i rashladnog protočnog UV sterilizatora vode u CatiaV5 Part Design-u. Za upravljanje 3D uređajem korišten je Slic3r programski paket. Obzirom da je postupak isti za oba proizvoda a u mogućnosti smo testirati samo prototip rashladnog protočnog UV sterilizatora vode, prikazan je postupak za taj proizvod, po koracima. Prototip je ispisan FDM tehnologijom od PLA materijala na 3D uređaju OpenBeam 1.4, čije su karakteristike također prikazane u radu. Testiranjem je utvrđeno da proizvod u potpunosti odgovara postavljenim zahtjevima.

## PRILOZI

### I. CD-R disc

## LITERATURA

- [1] Wohlers T.; Garnett T.; History of additive manufacturing; Wohlers Associates, INC.; 2014. <http://wohlersassociates.com/history2014.pdf> (.)
- [2] Wohlers T.; Rapid prototyping, Tooling & Manufacturing State of the Industry; Wohlers Associates, INC; 2005. <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2015/NIST.IR.8059.pdf>
- [3] Godec, D.; Šercer M.; Aditivna proizvodnja; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015
- [4] Godec, D., Šercer M.: Značaj aditivnih postupaka proizvodnje tvorevina u suvremenom razvoju i proizvodnji, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [5] <https://pcchip.hr/printer/3d-printeri-iz-virtualnog-u-materijalno/> (18.03.2019.)
- [6] Pilipović, A.: Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernoga prototipa, doktorski rad, FSB, Zagreb, 2012.
- [7] <http://www.sfsb.hr/~tgaleta/predmeti/rip/> (18.03.2019.)
- [8] <https://www.mcorotechnologies.com/industries/manufacturing-and-industrial/> (20.03.2019.)
- [9] <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/mcor-arkepro/>
- [10] Ana Pilipović: Aditivna proizvodnja, Polimeri 33(2012)3-4, 134 – 135.
- [11] <https://formlabs.com/store/form-2/buy-printer/> (20.03.2019.)
- [12] <https://www.think3d.in/digital-light-processing-dlp-3d-printing-technology-overview/> (20.03.2019.)
- [13] <https://www.mykulzer.hr/2018/05/24/sve-sto-trebate-znati-o-3d-printanju-u-stomatologiji/> (22.03.2019.)
- [14] <https://www.3dprinter.hr/3d-printeri/atum3d-dlp-za-iznimno-kvalitetne-i-precinedetalje> (25.03.2019.)
- [15] <https://all3dp.com/1/best-resin-dlp-sla-3d-printer-kit-stereolithography/#colido-dlp-2-0> (25.03.2019.)
- [16] <https://www.3dprintingstudios.com/product/sinterit-lisa/> (28.03.2019.)
- [17] <http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering> (28.03.2019.)
- [18] 24\_04\_2018\_\_28943\_Aditivna\_proizvodnja\_s\_polimerima\_2018
- [19] <https://www.8.hp.com/us/en/printers/3d-printers/3dcolorprint.html> (01.04.2019.)
- [20] <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling> (01.04.2019.)
- [21] <http://blog.zmorph3d.com/quality-in-fdm-3d-printing/> (03.04.2019.)
- [22] <https://www.3dglobe.net/fdmfff> (03.04.2019.)
- [23] <https://www.3dnatives.com/en/xxl-3d-printer/> (03.04.2019.)
- [24] <https://www.stratasys.com/polyjet-technology> (03.04.2019.)
- [25] <https://www.3d-printeri.com/polyjet-1> (03.04.2019.)
- [26] <https://trimech.com/products/3d-printers/polyjet-technology/objet1000-plus> (03.04.2019.)
- [27] <https://www.carbon3d.com/materials/epx-epoxy/> (03.04.2019.)

- 
- [28] <https://www.sculpteo.com/en/glossary/carbon-3d-printer-and-clip-technology> (07.04.2019.)
- [29] <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/carbon3d-m2/> (07.04.2019.)
- [30] <http://www.3dporta.hr/index.php/materijali/item/127-materijali-za-3d-print.html> (07.04.2019.)
- [31] <https://seekrators.org/3d-print/vodic-kroz-filamente-za-pocetnike> (10.04.2019.)
- [32] Noorani, R.: Rapid Prototyping: Principles and Applications, John Wiley & Sons, Inc., SAD, 2006.
- [33] <https://herz-filament.hu/en/65-PLA-New-Line-175mm-filament/121-PLA-filament-175mm-black/flypage.tpl.html> (10.04.2019.)
- [34] <http://www.hipreplacement.com/technology/implants/bearings> (10.04.2019.)
- [35] <http://evertsmith.com/img/content/480-hip-components.jpg> (10.04.2019.)