

# Ekološka održivost u 3D tisku

---

**Baždarić, Toni**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Graphic Arts / Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:216:207794>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-12**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Graphic Arts Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAFIČKI FAKULET

# ZAVRŠNI RAD

Toni Baždarić



Sveučilište u Zagrebu  
Grafčki fakultet

Smjer: Tehničko – tehnološki

# ZAVRŠNI RAD

EKOLOŠKA ODRŽIVOST U 3D TISKU

Mentor:

izv.prof.dr.sc. Ivana Bolanča Mirković

Student:

Toni Baždarić

Zagreb, 2019.

## **SAŽETAK**

3D tisak je oblik tehnologije aditivne proizvodnje (AM) u kojoj se 3D objekt stvara postavljanjem slojeva materijala uz pomoć računalnog projektiranja. Popularnost 3D pisača brzo raste kroz poboljšanja prenosivosti, točnosti i dostupnosti brze izrade prototipova sa širokim rasponom novih aplikacija. Posljednjih godina, zbog sve veće potražnje za različitim složenim proizvodima, mnogi novi materijali (funkcionalni materijali, biomaterijali, pametni materijali) koriste se za 3D tisak. Najviše istraživanja provodi se u svrhu ispitivanja novih materijala u 3D tisku no malo se zna o aspektima okoliša. Stoga će se u ovom preglednom radu posebno pozornost dati emisijama iz procesa 3D tiska kao i korištenju biorazgradivih materijala kao filamenata u svrhu postizanja što veće ekološke održivosti.

### **Ključne riječi:**

3D tisak, materijali, emisije, ekologija

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. PRIMJENA 3D TISKA .....	2
2.1 Medicina.....	3
2.2 Autoindustrija.....	3
3. MATERIJALI.....	5
3.1 Digitalni i pametni materijali .....	5
3.2 Keramički materijali.....	6
3.3 Elektronički materijali.....	8
3.4 Biomaterijali.....	9
3.5 Polylactic Acid (PLA) - Polilaktična kiselina.....	10
3.6 Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) .....	11
4. EKOLOŠKI ASPEKTI 3D PROIZVODA .....	13
4.1 Utjecaji na okoliš.....	14
5. EMISIJE IZ PROCESA 3D TISKA .....	15
5.1 Mjerenje koncentracije plinova.....	16
5.2 Mjerenje koncentracije čestica .....	17
6. ZAKLJUČAK.....	18
7. LITERATURA .....	20

## 1. UVOD

Aditivna proizvodnja (AM), poznata kao 3D tisak, može se definirati kao "proces spajanja materijala za izradu dijelova 3D modela, obično sloj po sloj, za razliku od metoda suptraktivne i formativne proizvodnje" u Međunarodnoj organizaciji za standardizaciju (ISO) /Američko društvo za testiranje i materijale (ASTM) 52900: 2015 standard. Na temelju standarda, AM procesi se mogu svrstati u sedam kategorija: (1) nanošenje veziva, (2) usmjereno energetska odlaganje; (3) istiskivanje materijala; (4) nanošenje materijala; (5) fuzija sloja praha; (6) laminiranje lista; i (7) fotopolimerizacija u kadi. U posljednjih nekoliko godina, zbog sve veće potražnje za složenim proizvodima i multifunkcionalnosti, mnogi novi materijali, kao što su nanomaterijali, funkcionalni materijali, biomaterijali, pametni materijali ili čak i brzосуšeći beton, se koriste za 3D ispisivanje i kao sirovine za ispis stvarnih dijelova nekog objekta. Međutim, postoje ograničeni osvrti na nedavni razvoj tih novih materijala i primjena u 3D tisku. Postavlja se jako važno pitanje kada se integriraju novi materijali s 3D ispisom, tj. postoji li dovoljna povezanost između tih novih materijala i trenutnih 3D tehnologija kako bi se zadovoljili novi zahtjevi proizvoda [1].

### Odabir teme

Napretkom računalne i grafičke tehnologije, modernizacijom inženjerske prakse, te samim razvojem suvremenih alata moguće je na više načina izraditi prototipove zbog bolje točnosti i preciznosti i proizvodnje određenih proizvoda u što kraćem vremenskom periodu. Upotrebom 3D tiska se može vjerno prikazati model koji se računalno generira i na taj način se proizvode dijelovi za razne industrije (medicina, autoindustrija, arhitektura, građevina...)

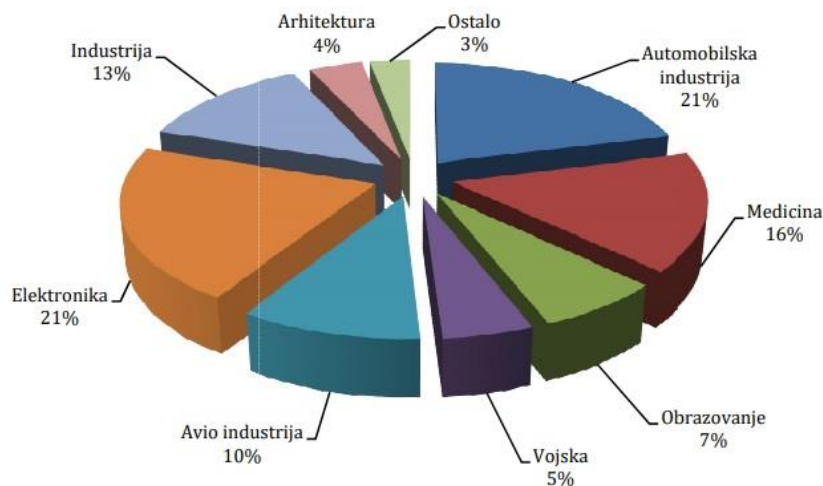
### Cilj i svrha rada

U ovome radu su opisani osnovni postupci i tehnologije aditivne proizvodnje, pregled najkorištenijih materijala u procesu izrade, ekološki razvoj i održivost, odnosno emisije koje su uključene u proces 3D tiska.

## 2. PRIMJENA 3D TISKA

Već sada sa sigurnošću možemo reći da će 3D tehnologija promijeniti svijet oko nas. Dosad se pokazala kao jedna jako korisna i bitna tehnologija u različitim industrijama, a s razvojem 3D printera i materijala koje on koristi za otiskivanje, možemo zaključiti kako će ona biti još dostupnija i u narednim godinama.

3D tisak se već pokazao korisnim u različitim područjima kao što su npr. dizajn i primijenjena umjetnost, gdje omogućava izradu 3D modela u ranoj fazi razvoja proizvoda, bez potrebe izrade skupih kalupa. Izrada prototipova 3D ispisom koristi se u strojarstvu i elektrotehnici kao najpovoljnija varijanta, a arhitektima pomaže u izradi detaljnih modela koji su dosta čvrsti i otporni. U medicini 3D ispis je zaslužan za izradu anatomske točne modele i replika specifičnih za pojedinog pacijenta i medicinsko stanje. Praktičnija je, fleksibilnija i povoljnija varijanta za proizvodnju gotovo bilo kakvog proizvoda, koji se radi u manjim serijama (Slika 1) [3].

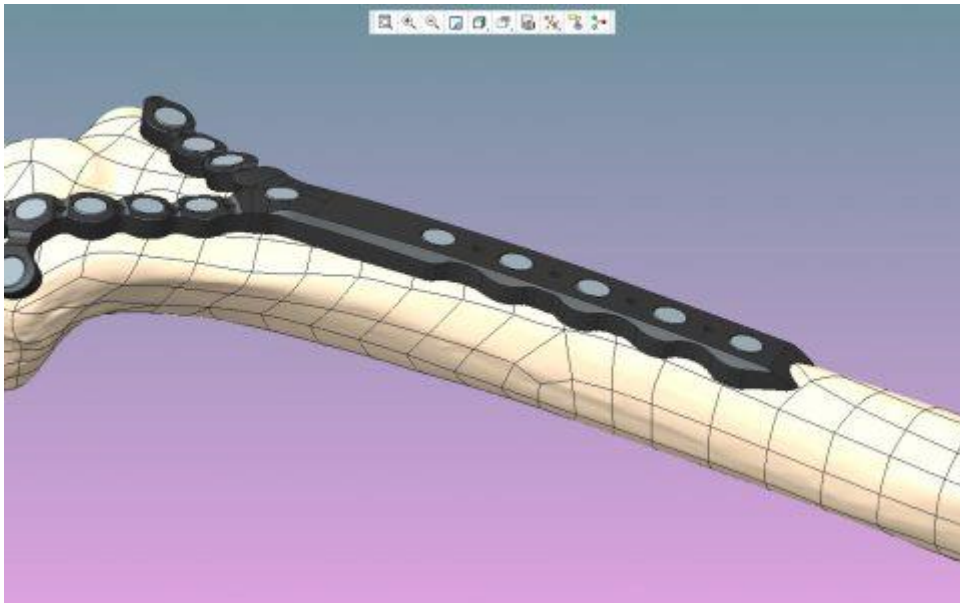


**Slika 1.** Industrije koje koriste 3D printer

(Izvor: Nikola Zadravec; završni rad; Primjena 3D skenera i 3D printera za izradu elemenata konstrukcija)

## 2.1 Medicina

3D tehnologija dosta je pridonijela razvoju medicine. Najveći napredak se postigao u kirurgiji i ortopediji, osobito kada je riječ o tretiranju lomova kostiju. Svaka fraktura kostiju je specifična na svoj način, s time da svaki čovjek ima unikatan oblik kostiju i moguće je odstupanje u nekom mjerilu od pravila prema građi tijela, uzrastu pacijenta te strukturi same kosti. 3D tehnologijom mogu se izraditi svi potrebni alati za stabilizaciju kostiju prema mjeri pacijenta (Slika 2).



**Slika 2.** CAD model s pločicom

(Izvor: Nikola Zadavec; završni rad; Primjena 3D skenera i 3D printera za izradu elemenata konstrukcija)

## 2.2 Autoindustrija

3D printeri omogućavaju autoindustriji znatno smanjenje troškova, povećanje produktivnosti u proizvodnji, te dosta utječu na razvoj i dizajn automobila. Od razredbenog plana pa sve do krajnjeg projekta, omogućavaju da prototip, što je više moguće, odgovara gotovom proizvodu. 3D tehnologijom se sada izrađuju alati i šablone za preciznu ugradnju koristeći industrijsku termoplastiku, koji su se prije izrađivali tradicionalnim metodama od metala. Korištenjem aditivne proizvodnje (AM), tj. 3D



printera, proizvođači kupcima mogu ponuditi brojne opcije personalizacije vozila. Neki od poznatijih svjetskih proizvođača automobila kao što su BMW, Bentley, Opel, Honda, Volvo itd. skoro jedno desetljeće 3D printere koriste kao važan segment razvojnog i proizvodnog procesa (Slika 3) [3].



**Slika 3.** Opel koristi 3D printane alate za sastavljanje u proizvodnji

(Izvor: Nikola Zadavec; završni rad; Primjena 3D skenera i 3D printera za izradu elemenata konstrukcija)

### 3. MATERIJALI

U ovom pregledu obratit će se pažnja na najnoviji razvoj novih materijala i njihove primjene u području 3D tiska. Novi materijali su definirani kao skupina naprednih materijala koji se mogu ispisati 3D tehnologijom za specifične nove primjene. Riječ je o interdisciplinarnom istraživačkom području između naprednih materijala i 3D tiska. Ključni izazov je riješiti 3D ispis naprednih materijala bez sadržavanja originalnih svojstava materijala. Poboljšanje performansi i nove aplikacije omogućene su uglavnom u slobodnom dizajnu i optimizaciji. Primjerice, 3D tiskanje pametnih materijala rezultira aplikacijama za 4D ispisivanje, dok 3D tisak biomaterijala dovodi do aplikacija bioprinta i tako dalje. Nadalje će se opisati karakteristike četiriju vrsta naprednih materijala: (1) pametni materijali; (2) keramički materijali; (3) elektronički materijali, (4) biomaterijali. Raspravljat će se o osnovnim zahtjevima tih materijala i njihovim kritičnim izazovima, kao i o novoj mogućnosti 3D tiska [1].

#### *3.1 Digitalni i pametni materijali*

Digitalni materijal je napredni kompozitni materijal koji se sastoji od dva ili tri fotopolimera u specifičnim mikrostrukturama i omjerima. Može se koristiti za stvaranje funkcionalnog prototipa s podesivim karakteristikama, kao što su površinska tvrdoća, boje i teksture. Primjerice, neki uređaji mogu ugraditi preko 360,000 boja i učitati do šest materijala odjednom bez zamjene posuda u jednom procesu izrade. Osim toga, digitalni materijali mogu simulirati različite elastomere, oponašati standardnu plastiku, proizvesti fotorealistične detalje za različite vrste apliciranja, kao što su funkcionalna izrada prototipa, izrada alata, medicinskih modela i komunikacijskih modela. Također je uključen i dizajn digitalnih materijala za fizičko ispisivanje 3D voksel<sup>1</sup>. Tu se prvenstveno misli da digitalni materijal pruža mogućnost izrade objekata s više materijala s iznimnom točnošću koristeći sferični voksel [4].

---

<sup>1</sup> Voksel (engl. Voxel, od riječi „volumetric“ i „pixel“) u trodimenzionalnoj grafici predstavlja najmanji dio trodimenzionalnog prostora neke scene, koji se može obrađivati ili prikazati.

Pametni materijali definirani su kao materijali koji imaju sposobnost transformirati svoj oblik pod utjecajem vanjskih podražaja. 4D ispis je tema koja se pojavljuje u području 3D tiska, gdje je četvrta dimenzija vrijeme, a osnovni koncept 4D ispisa temelji se na 3D ispisu programiranih pametnih materijala koji mogu postupno mijenjati oblik s vremenom pod utjecajem vanjskih podražaja, kao što su voda i toplina. Moguće je ostvariti i primjenu koncepta 4D tiska na dizajn i izradu aktivnog origamija, gdje se ravna ploča s aktivnim zglobovima može sklopiti u 3D komponentu. Nedavno je uveden novi pristup 4D ispisa koji može stvoriti arhitekture s više materijala pomoću polimera s memorijom oblika. Ovaj pristup temelji se na prikazu mikro-stereolitografije koja pripada fotopolimerizaciji (Slika 4) [5].



**Slika 4.** Prikaz pametnih materijala za 4D

(Izvor: S. Tibbits; 4D printing: multi-material shape change)

### *3.2 Keramički materijali*

Određeni materijali, kao što su keramika i beton, nisu baš prikladni za 3D tisak jer se pojedinačni prah ne može spojiti zajedno primjenom topline njihove točke taljenja. Suprotno tome, metali i polimeri se mogu stopiti zajedno primjenom topline na temperaturu prijelaza na staklo ili temperaturu taljenja. U usporedbi s metalima i polimerima, iznimno visoka točka taljenja keramičkih materijala jedan je od najkritičnijih izazova u području 3D tiska. Sadašnje AM metode mogu proizvesti keramičke dijelove bez pukotina ili velikih pora optimizacijom parametara AM procesa, a njihova mehanička svojstva slična su tradicionalnim keramičkim dijelovima. Također je moguće proizvesti dijelove keramike bez pora ugrađivanjem tehnika koloidne obrade u AM proces ili izvođenje dodatnih koraka zgušnjavanja nakon AM postupka. Važno je naglasiti da su neizravni AM procesi koji uključuju više koraka prikladniji za izradu

različitih vrsta keramike, dok su izravni AM procesi koji uključuju samo jedan korak prikladniji za proizvodnju dijelova keramike u kraćem vremenu.

Zbog jednostavnosti paralelne obrade više dijelova i niske cijene sirovine, tehnologije na bazi praha jedna su od najekonomičnijih AM metoda za proizvodnju keramičkih dijelova. Međutim, jedno od postojećih ograničenja što se tiče keramike je dostupnost početnih materijala za proizvodnju sirovine. Kako bi se pozabavili keramikom u AM procesu, otkriven je novi način izrade 3D dijelova pomoću specifičnih keramičkih monomera koji se miješaju s UV fotoinicijatorom. Nekoliko zakrivljenih, složenih i poroznih oblika, kao što su vadičep, mikrorešetke i strukture u obliku košnice, mogu se lako izraditi pomoću stereolitografskog aparata (SLA) <sup>2</sup>3D pisača. 3D tiskani keramički dijelovi pokazali su izvrsnu termičku stabilnost nakon pirolize na 1000°C i gotovo da uopće nije zabilježeno skupljanje. Ovi keramički materijali su se pokazali dobrima za sustave toplinske zaštite, pakiranje elektroničkih uređaja, mikroelektromehaničke sustave i porozne plamenike [6].

---

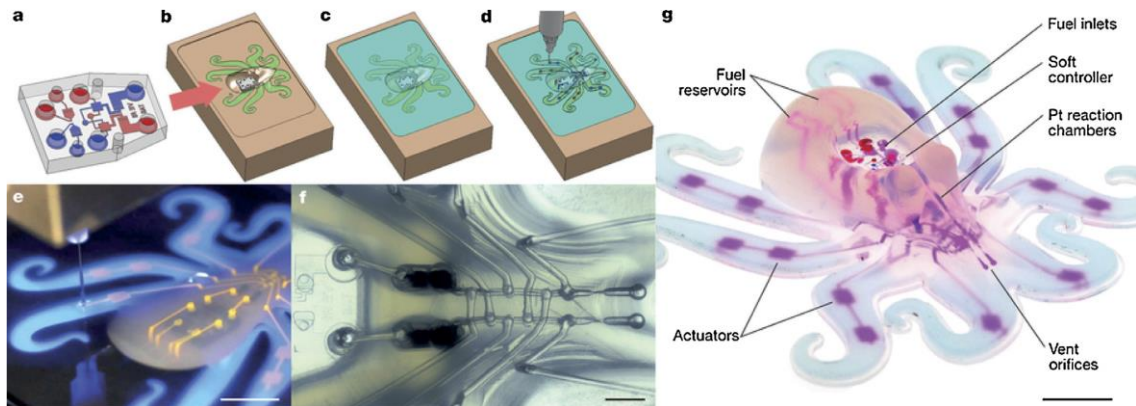
<sup>2</sup> Stereolitografija, SLA, je jedna od najfinijih tehnika 3D tiska. Uz pomoć nje mogu se otisnuti izuzetno mali i fini detalji sa savršeno glatkom površinom koja ne zahtijeva nikakve dodatne obrade.

### *3.3 Elektronički materijali*

U posljednjih nekoliko desetljeća došlo je do značajnog napretka što se tiče elektroničkih materijala u području aditivne proizvodnje (AM). Postavlja se jedno zanimljivo istraživačko pitanje; Je li 3D tisak potpuno funkcionalnih elektroničkih uređaja najbolji pristup za izradu elektronike napravljene po narudžbi? Trenutne AM tehnologije omogućuju izradu funkcionalne elektronike, kao što su antena, kondenzatori, otpornici i induktori, u jednom koraku bez naknadne obrade. Aerosol jet tisak i inkjet tisak su dvije najčešće korištene tehnologije u ovom području i mogu se klasificirati kao beskontaktni tisak zbog njihovih mlaznica koje nisu u izravnom kontaktu s 3D tiskanom elektronikom. Postoji metoda za ispis otpornika na plastičnoj podlozi, koja može postići veću otpornost s visokom ponovljivošću pomoću provodnog polimera. Dokazano je da pet različitih materijala: (1) nanočestice kvantnih točaka; (2) elastomerni matriks; (3) provodni polimeri; (4) metalni nosači, (5) UV-ljepljive podloge s prozirnim slojem, mogu biti tiskani i potpuno integrirani u komponente uređaja s aktivnim svojstvima. Svjetleće diode tiskane 3D printerom pokazuju čista i prilagodljiva svojstva emisije boja. Na temelju literaturnih radova može se zaključiti da je 3D tisak svestrana metoda za izradu elektroničkih uređaja i da je sposobna integrirati mnoge različite klase materijala.

Konvencionalni roboti sastavljeni su od krutih materijala i elektroničkih komponenti, što je zahtijevalo višestruke korake za izradu različitih komponenti i zatim njihovo sastavljanje u funkcionalne robote. S pojavom 3D tiska moguće je izraditi meke robote, sastavljene od mekih materijala i bez ikakvih elektroničkih komponenata koje koriste više materijala. Takvi roboti sastavljeni su samo od mekih materijala, kontrolirani mikrofluidnom logikom koja autonomno regulira kretanje robota (Slika 5). Ova nova tehnika 3D tiska omogućuje programiranje sklopa više materijala i integriranog dizajna predproizvodnog dijela, koji može poslužiti kao smjernica za sljedeću generaciju potpuno mekih robota. Razna istraživanja pokazuju komercijalno prihvatljivo rješenje za izradu prototipa emitera korištenjem 3D tiska i time smanjenje ukupnih troškova proizvodnje antena. Iako trenutne tehnologije 3D tiska mogu ispisivati različite materijale, uključujući polimere, metale i keramiku, dobiveni dijelovi općenito su ograničeni samo na jedan materijal i samo na jednu funkcionalnost. Nedavno je

objavljen pregled koncepta multi-procesnog 3D ispisa, također poznatog kao hibridni 3D ispis, za povećanje funkcionalnosti komponenti. Uvođenjem robotskog postavljanja komponenta ili kombiniranjem dvaju komplementarnih procesa (aditivnog i suptraktivnog), multi-procesni 3D tisak omogućuje ugradnju različitih materijala i aktivnih komponenti koje dijele multifunkcionalnost [7].



**Slika 5.** Potpuno mekani, autonomni robotski model

(Izvor: J.-Y. Lee et al. ; Applied Materials Today )

### 3.4 Biomaterijali

Nedavni razvoj biokompatibilnih materijala omogućio je 3D bio-tisak funkcionalnih živih tkiva, koje se mogu primijeniti na regenerativnu medicinu radi rješavanja potrebe za transplantacijom organa. Općenito govoreći, materijali 3D tiska su vrlo ograničeni, uglavnom prirodni polimeri i biokompatibilni sintetički polimeri, ali odabir materijala jedan je od najkritičnijih koraka u 3D biotisku. Jedan od kritičnih izazova za biotisak je proizvodnja 3D vaskularnih strukturalnih stanica. Nedavno je objavljen integrirani printer organskih tkiva (ITOP)<sup>3</sup> koji može proizvesti tkivne stanice ljudske veličine bilo kojeg oblika s dobrom mehaničkom stabilnošću. Važno je napomenuti da ITOP može generirati bilo kakav oblik s više tipova stanica i biomaterijala, a sposobnost ITOP-a pokazana je izradom donje i gornje čeljusti, hrskavice i mišića kostiju.

<sup>3</sup> Integrirani printer organskih tkiva (ITOP) je printer koji pohranjuje biorazgradive materijale slične plastici tvoreći "oblik" tkiva i vodenih gelova koji sadrže stanice.

Nedavno su organi na čipovima, također poznati kao mikrofiziološki sustavi koji ponavljaju strukturu i funkciju izvornog tkiva in vitro, postali obećavajuća alternativa u usporedbi sa standardnim studijama na životinjama u biomedicinskim istraživanjima. Međutim, sadašnji organi na čipovima oslanjali su se na višefazne litografske procese i nedostatak integriranih senzora. Kako bi se pozabavili ovim kritičnim pitanjem, uvedena je izrada nove klase instrumentalnih kardioloških mikrofizioloških uređaja pomoću 3D biotiska koji tiska s više materijala [8].

### *3.5 Polylactic Acid (PLA) - Polilaktična kiselina*

Polilaktična kiselina (Polylactic Acid - PLA) je drugačiji od većine termoplastičnih polimera po tome što se dobiva iz obnovljivih izvora poput kukuruznog škroba ili šećerne trske. Većina plastike, naprotiv, izvedena je od destilacije i polimerizacije neobnovljivih rezervata nafte. Plastika koja se dobiva iz biomase (npr. PLA) poznata je kao "bioplastika".

PLA je biorazgradiv i ima karakteristike slične polipropilenu (PP), polietilenu (PE) ili polistirenu (PS). Može se proizvoditi iz već postojeće proizvodne opreme (projektirane i izvorno korištene za plastiku petrokemijske industrije). To ga čini relativno jeftinim za proizvodnju. Prema tome, PLA ima drugi najveći volumen proizvodnje bilo koje druge bioplastike (najčešće se obično navodi kao termoplastični škrob) (Slika 6).

Postoji širok raspon primjena za PLA. Neke od najčešćih primjena uključuju plastične folije, boce i biorazgradive medicinske uređaje (npr. vijke, igle, šipke i ploče za koje se očekuje da se razgrađuju u roku od 6-12 mjeseci). PLA se sužava pod toplinom i stoga je pogodan za upotrebu kao materijal za omatanje. Osim toga, lakoća s kojom se PLA topi dopušta neke zanimljive primjene u 3D tisku.<sup>4</sup> S druge strane, njegova niska temperatura prijelaza u staklenu formu čini mnoge vrste PLA (na primjer, plastične čaše) neprikladnim za držanje vruće tekućine.

Proizvodnja PLA je popularna ideja jer predstavlja ispunjenje sna o troškovno učinkovitoj proizvodnji plastike bez nafte. Velika prednost PLA kao bioplastike je

---

<sup>4</sup> To je postupak u kojem se PLA tiska u obliku unutarnje ispune, a zatim oblaže materijalima nalik na žbuku. PLA se kasnije sagorijeva jer ima nižu temperaturu taljenja od okolnog materijala. Krajnji rezultat je praznina koja se može ispuniti (često s rastaljenim metalom).

njegova svestranost i činjenica da se prirodno razgrađuje kada je izložena okolišu. Na primjer, PLA boca ostavljena u oceanu obično bi se razgradila za 6 do 24 mjeseca. U usporedbi s običnom plastikom (koja u istom okruženju može potrajati nekoliko stotina do tisuću godina da se razgradi) to je doista fenomenalno. Prema tome, postoji visok potencijal za PLA da bude vrlo koristan u budućnosti jer se sve više upućuje na biorazgradivost (npr. kao plastična boca za vodu ili kao spremnik za voće i povrće). Treba naglasiti da, unatoč svojoj sposobnosti da se razgrađuje kada je izložen elementima okoliša, PLA je izuzetno jak u svakoj normalnoj primjeni (npr. kao plastični dio elektronike) [9].



**Slika 6.** Izgled PLA plastike

(Izvor: <https://www.fabtolab.com/abs-r-filament-m3d>)

### *3.6 Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)*

Akrilonitril butadien stiren (ABS) je neproziran termoplastični i amorfni polimer. "Termoplastika" (za razliku od "termoset") ima veze s načinom na koji materijal reagira na toplinu. Termoplasti postaju tekući (tj. imaju "stakleni prijelaz") na određenoj temperaturi (105°C u slučaju ABS plastike). Mogu se zagrijati do točke taljenja, ohladiti i ponovno zagrijati bez značajne degradacije. Umjesto spaljivanja, termoplastike poput ABS-a se rastapaju, što im omogućuje lakše ubrizgavanje i zatim recikliranje. Suprotno tome, termoset plastike se mogu zagrijavati samo jednom (tipično tijekom postupka injekcijskog prešanja). Prvo zagrijavanje uzrokuje postavljanje termoset materijala (slično kao 2-dijelni epoksid), što rezultira kemijskom promjenom koja nije povratna. Ako biste pokušali zagrijati termoset plastiku na visoku temperaturu po drugi put, ona bi jednostavno izgorjela. Ova karakteristika čini duroplastične materijale lošim



kandidatima za recikliranje. ABS je također amorfni materijal što znači da ne pokazuje uređene karakteristike kristalnih krutina.

ABS ima jaku otpornost na korozivne kemikalije i / ili fizičke utjecaje. Vrlo je jednostavan za obradu i ima nisku temperaturu taljenja, što ga čini posebno jednostavnim za uporabu u proizvodnim procesima ubrizgavanja ili 3D tisku na FDM stroju.<sup>5</sup> ABS je također relativno jeftin (oko 1,50\$/kg). ABS plastika se obično ne koristi u uvjetima visoke temperature zbog niske točke taljenja. Sve te karakteristike dovode do toga da se ABS koristi u velikom broju industrija. ABS se lako obrađuje, brusi, lijepi i boji. To ga čini izvrsnim materijalom za izradu prototipa. ABS-om se mogu napraviti razni funkcionalni kozmetički završeci. To je razlog zbog kojeg se često koristi za kućišta koja mogu imati različite teksture ili sjajne površine (Slika 7) [10].



**Slika 7.** ABS granulati

(Izvor: <https://www.indiamart.com/proddetail/abs-plastic-granule-13267428891.html>)

---

<sup>5</sup> FDM (Fused Deposition Modeling) tehnologija gradi konceptualne modele, funkcionalne prototipove i dijelove za krajnju uporabu od različitih tipova plastomera, od standardne plastike do plastike visokih performansi.

## 4. EKOLOŠKI ASPEKTI 3D PROIZVODA

Velik dio istraživanja proveden prema razmišljanjima kako AM može pridonijeti održivom razvoju odstupa od sljedeća tri argumenta: (1) Pruža mogućnosti za poboljšanje učinkovitosti resursa omogućujući redizajn proizvoda i procesa kako bi se minimizirao unutarnji otpad; (2) produžuje životni ciklus proizvoda kroz tehničke pristupe i snažnije odnose između proizvoda i osoba; i (3) pojednostavljuje vrijednosne lance smanjenjem logističke složenosti i približavanjem proizvodnje potrošaču. Provedba AM bi mogla omogućiti smanjenje intenziteta emisija energije i ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>) na oko 5% do 2025. godine. Implikacije na okoliš AM tehnologija iz perspektive jediničnih procesa obično se analiziraju pomoću tri različita pokazatelja: prinos materijala, izravna potrošnja energije, i emisije. 3D pisari emitiraju ultra-fine čestice u svoje izravno okruženje, sugerirajući da su vrsta i volumen emisija izravno povezani s korištenim materijalom za gradnju. Polilaktička kiselina (PLA) i akrilonitril butadien stiren (ABS) mogu se klasificirati kao visoki "emiteri", iako je ABS termoplastika predstavljala mnogo veću stopu emisije u usporedbi s PLA.

Otkriveno je da je potrošnja električne energije uvijek glavni pokretač utjecaja na okoliš u AM procesima. Utjecaji na okoliš aktivnosti vezanim za izradu prototipova nisu iznenađujuće smanjeni s većim stupnjem iskorištenosti. Što se tiče primjene AM-a za decentralizaciju proizvodnih aktivnosti, prezentirana je tehnička procjena mogućeg utjecaja uvođenja AM-a u konfiguraciju opskrbnih lanaca za rezervne dijelove. Postoje neki pristupi koji tehnički i ekonomski procjenjuju učinak primjene AM na decentralizaciju proizvodnih aktivnosti. Međutim, nijedna sveobuhvatna studija ne pokušava procijeniti utjecaj na okoliš proizvoda proizvedenog u decentraliziranom proizvodnom sustavu koji koristi AM u usporedbi s njegovim centraliziranim izlazima. Kako bi pridonio znanju o ekološkoj dimenziji DMS-a, uspoređuje se utjecaj na okoliš jednog 3D tiskanog proizvoda proizvedenog pod DMS-om i konvencionalnog ekvivalentnog proizvoda proizvedenog u CMS-u [11].

#### 4.1 Utjecaji na okoliš

Razmatranja okoliša uglavnom se odnose na potrošnju energije, prirodnih resursa kao i emisije otrovnih plinova. 3D tisak tehnologija ima sposobnost izrade dijelova ekološke prirode. U usporedbi s tradicionalnom proizvodnjom, 3D tisak koristi optimiziranu metodu dizajna za izradu koja automatski smanjuje potrošnju energije i prirodnih resursa. U osnovi postoje dvije vodeće metode nazvane analiza životnog ciklusa (LCA) <sup>6</sup>i procjena utjecaja na okoliš (EIA) za određivanje utjecaja na okoliš. Te metode prikazuju da tehnologija 3D tiska ima dobre ekološke karakteristike. Nema potrebe za tekućinama za rezanje i ljepilima u procesu 3D tiska, koji su glavni uzrok negativnih utjecaja u procesu proizvodnje. Eksperimentalni rezultati dobiveni primjenom LCA metode jasno su pokazali da aditivna laserska metoda smanjuje ukupni utjecaj na okoliš do 70% u usporedbi s tradicionalnom proizvodnjom. Analizirana su tri procesa prilagodljive proizvodnje (AM) nazvanih SLS (Selektivno Lasersko Sinteriranje), SLA (Stereolitografija) i FDM (Taložno povezivanje) i otkriveno je da je potrošnja energije mnogo manja u usporedbi s konvencionalnim metodama izrade. Tijekom proučavanja performansi opreme koja se temelji na SLS tehnici, prosječna potrošnja energije opreme iznosi oko 19,6 kWh.

U LCA usporedbi proizvodnje 3D tiskom i tradicionalnom proizvodnjom, procesima FDM i Inkjet koristeći računalnu numeričku kontrolu (CNC) <sup>7</sup>glodalicom (jedan od tradicionalnog procesa) utvrđeno je da u aspektima utjecaja na okoliš proces 3D tiska je prikladniji i održiviji od bilo kojeg drugog tradicionalnog proizvodnog procesa. Nedavno se provelo istraživanje LCA za recikliranje polietilena visoke gustoće koji se koristi kao ulazni materijal za proces 3D tiska te se usporedbom emisija energije i stakleničkih plinova za konvencionalno i LCA recikliranje, pronašao nizak utjecaj LCA na okoliš [12].

---

<sup>6</sup> Procjena životnog ciklusa (LCA, također poznata kao analiza životnog ciklusa, analiza ekobalance i analiza od kolijevke do groba ili od kolijevke do kolijevke) je tehnika za procjenu utjecaja na okoliš povezanog sa svim fazama života proizvoda od vađenja sirovina kroz izradu materijala, proizvodnju, distribuciju, uporabu, popravak i održavanje, te odlaganje ili recikliranje.

<sup>7</sup> CNC upravljanje, računalno numeričko upravljanje ili računalom podržano numeričko upravljanje (eng. Computer Numerical Control) je upravljanje alatnim strojevima pomoću posebnih kodiranih naredbi (instrukcija) koje se učitavaju u upravljačkom računalu.

## 5. EMISIJE IZ PROCESA 3 D TISKA

Korištenje 3D pisača u netradicionalnim proizvodnim okruženjima može dovesti do toga da nove skupine ljudi budu izložene opasnim emisijama, kao što su štetne prašine i kemikalije. Ti korisnici možda nisu adekvatno obučeni ili nemaju odgovarajuće objekte za upravljanje takvim sustavima. Sve veći broj ljudi može biti izložen česticama i kemikalijama koje se oslobađaju tijekom primjene ME tehnologije u uredima, okruženjima za hobije, domovima ili školama. Mogu se pojaviti zdravstvene zabrinutosti u vezi s emisijama čestica i plinova iz ME, posebno s obzirom na to da tipična konstrukcija niskotarifnih AM strojeva nema ugrađeni sustav za zadržavanje zagađenja ili pročišćenje zraka. Takve značajke su obično dostupne u naprednijim i skupljim AM strojevima. Dosadašnja istraživanja pokazala su da toplinska obrada polimernih materijala može proizvesti onečišćujuće tvari u zraku, koje uzrokuju karcinogene i respiratorne probleme. Sastav para koji nastaje zagrijavanjem plastike može biti složen i varirati ovisno o vrsti plastike, formulaciji i uvjetima obrade.

Nekoliko znanstvenih studija identificiralo je štetne učinke nanočestica na zdravlje (tj. čestice manje od 100 nanometara [nm]). Kada se jednom udahnu, nanočestice mogu dospjeti do alveolarne regije pluća, pa čak i prenijeti u druge vitalne organe. One mogu biti štetnije od čestica veličine mikrometra ( $\mu\text{m}$ ) s istim kemijskim sastavom. Vjerojatnost takvih karakteristika pripisuje se njihovoj velikoj aktivnoj površini s obzirom na njihovu malu veličinu, što dovodi do pojačanih interakcija s biološkim tekućinama i stanicama.

Stručnjaci za ovo područje proveli su studiju o uvjetima na radnom mjestu i razvrstali ME 3D pisače kao emitere s visokim udjelom čestica. Proučavali su i brzinu emisije čestica koja iznosi od  $3.2 \cdot 10^9$  čestica u sekundi i  $3.3 \times 10^8$  za filamente ABS i PLA: „Koliko znamo, po prvi puta smo pokazali da su čestice emitirane sa stolnog 3D pisača djelomično isparljive i sastoje se od HOS-a koji su uglavnom termoplastični aditivi.“ Drugi znanstvenici su pak proučavali emisije aerosola i plinova iz tri ME 3D pisača koji su koristili ABS i PLA i vršili mjerenja u komori. Stope emisije aerosola bile su značajno niže od onih u primjeru prije, a emitirane srednje veličine čestica značajno su

varirale između korištenih polimera i 3D pisaa. Što se tiče tehnologije prskanja veziva, pokazale su se značajne emisije hlapivih organskih spojeva (HOS) i aerosola. Iako rezultati nisu izravno usporedivi, što se može pripisati vrlo različitim tehnologijama, emitirane čestice bile su veće od onih koje su emitirane ekstrudiranjem materijala (ME), kako se i očekivalo zbog rukovanja prašinom: „Naši podaci, koji nadopunjuju rezultate prethodnih studija, dovode do zaključka da u pogledu emisija čestica i plinova, 3D tehnologije ispisa i kemijskog sastava filamenata još uvijek treba optimizirati.“

Također su izmjerene emisije plinova i hlapivih organskih spojeva jeftinog ME 3D pisaa koristeći najčešće plastične polimere na tržištu. Kako bi omogućili usporedbu zadanih i korisnički definiranih postavki, također je procijenjen utjecaj temperature ekstrudera na emisije. Stope emisije izmjerene su u ispitnoj komori i procijenjene u ispitnoj prostoriji pune veličine u kontroliranim uvjetima. Na kraju je korišteno modeliranje dinamike aerosola u zatvorenom prostoru.

### *5.1 Mjerenje koncentracije plinova*

Tijekom ispitivanja, prosječna koncentracija CO<sub>2</sub> komore varirala je između 405 i 482 ppm. Nije bilo jasne veze između koncentracije CO<sub>2</sub> i zagrijavanja ekstrudera ili procesa tiska. Nije bilo drugih odabranih spojeva razgradnje (CO, NO, NO<sub>2</sub> i HCN) ili butadiena prilikom tiska s ABS-om (nije mjereno pri ispisu s PLA). Uočene su količine formaldehida, acetaldehida i acetona u obojenju i u ABS i PLA ispisu. Izmjerene koncentracije formaldehida varirale su između 2 i 3 µg/m<sup>3</sup>, što odgovara brzini emisije od 30 do 40 nanograma po sekundi (ng /s<sup>1</sup>). Nisu primijećene značajne razlike između koncentracija aldehida ispuštenih iz tiskarskih materijala. Koncentracija ukupnog HOS-a kretala se u rasponu od 230 do 270 µg/m<sup>3</sup> i bila je na razini pozadinske koncentracije komore. Nekoliko manjih fluktuacija su se dogodile povremeno u koncentracijama HOS-a, ali nisu bile povezane s tiskarskim događajima. Iako su izmjerene male koncentracije HOS-a, uočene su neke kvalitativne razlike između emitiranih spojeva. ABS tisak emitirao je uočljive količine stirena (14 µg/m<sup>3</sup>, 200 ng/ s<sup>1</sup>), koje nisu detektirane u PLA tisku. Također su bile prisutne emisije 1-butanol i 2-propanol, koje najvjerojatnije potječu iz instrumenata za mjerenje čestica.[14]

Tijekom studija sobe izmjereni su isti spojevi kao oni mjereni tijekom ispitivanja komore. Nisu otkriveni plinoviti spojevi, kao što su CO, NO, NO<sub>2</sub>, HCN i 1,3-butadien, ili aerosolna masa iz plastičnih materijala. Otkrivene su uočljive količine formaldehida u koncentracijama od 2 do 3 µg/m<sup>3</sup>, kao što je to bio slučaj i kod ispitivanja u komori. Koncentracije UHOS-a (Ukupna količina HOS-a) varirale su između 250 i 520 µg/m<sup>3</sup> za oba tiskana polimera. Također je utvrđena količina stirena (2 µg/m<sup>3</sup>) tijekom tiska ABS-a. Koncentracija HOS-a, mjerena ppbRAE-om, neznatno se povećala u odnosu na vrijeme, ali čini se da to nije povezano s tiskarskim događajima [14].

### *5.2 Mjerenje koncentracije čestica*

Iako je aerosol izmjeren u velikom rasponu veličina, samo je raspon nanočestica otkrio značajnu emisiju čestica. Izmjerene su masene koncentracije aerosola ispod granice kvantifikacije (LOQ) (LOQ = 0,07 mg/m<sup>3</sup>) za oba ispitivana materijala. Kada je ekstruder dosegao točku taljenja materijala, otkriven je nalet nanočestica. Nakon toga se koncentracija stabilizira tijekom ispisa. Mehanički pokretni dijelovi pisača nisu proizveli značajne emisije čestica. Emisije prije i poslije tiskanja mogu se smatrati zanemarivima, iako je uočeno nekoliko čestica koje ulaze u buku komore i / ili instrumenata.

Učinak kvara pisača na koncentraciju i raspodjelu aerosola uzrokovao je snažno povećanje koncentracije broja čestica, povećanje srednje veličine čestica došlo je od 8,8 do 15,5 nm i širenje raspodjele veličine do 100 nm. Kod ispisa s ABS-om utjecao je i preostali ABS ostatak na površini mlaznice, koji je doveo do veće veličine čestica i veće emisije čestica. PLA ispis na Te = 200 ° C na početku je oslobodio neke čestice, ali se emisija brzo smanjila na zanemarive vrijednosti. PLA ispis na Te = 230 ° C pokazao je veliko povećanje emisije čestica, dosegnuvši vrijednosti dobivene s ABS-om na sličnoj temperaturi. Naglo smanjenje temperature u ekstruderu nakon 40 minuta rezultiralo je drastičnim smanjenjem emisije čestica. Potrebno je napomenuti da je maksimalna temperatura ekstrudera 200 ° C preporučena za PLA, a viša temperatura korištena je samo u svrhu ispitivanja. Procjena ukupne koncentracije za emisiju čestica temeljila se na mjerenjima SMPS, s obzirom da je to bio jedini instrument koji je pokrивao raspon veličina i koncentraciju emitiranih čestica [14].

## 6. ZAKLJUČAK

Primjena AM tehnologije u svrhu izrade proizvoda, prototipa, funkcionalnih dijelova ili alata relativno je novi način proizvodnje. Postupci aditivne tehnologije pri proizvodnji pružaju jednostavan, učinkovit, brz i jeftin način izrade. Kontinuirani razvoj aditivne proizvodnje pogoduje sve većoj primjeni u sve više grana industrije, odnosno puno se više koristi negoli konvencionalni načini izrade (lijevanje, kovanje, obrada odvajanjem čestica, itd.). Najveći nedostatak aditivne proizvodnje je visoka cijena profesionalnih-industrijskih uređaja za 3D tiskanje te visoka cijena materijala koji se koriste u određenim postupcima. Međutim, napredak 3D pisača te sve veći broj proizvođača istih, rezultira time da se cijena profesionalnih uređaja ipak postepeno smanjuje te tako postaje dostupnija sve većem broju korisnika. Cilj ovog rada je bio ukratko predstaviti razvoj aditivne proizvodnje te opisati ekološke probleme i kako emisije koje proizlaze iz samog 3D tiska utječu na ljudsko zdravlje [2].

U ovome radu proučavane su emisije s nisko-standardnog ME 3D pisača, temeljenog na plinovitim i aerosolnim komponentama izmjerenim u komornim i konvencionalnim sobnim prostorima. Mjerenja aerosola provedena su u okruženjima bez pozadinskih emisija, s mjerenjem čestica koje su obuhvaćale veličine od 1 nm do 31  $\mu\text{m}$ , te je procijenjen utjecaj temperature tiska na emisije plinova i čestica. 3D tiskanje je proizveo značajnu količinu emisija nanočestica, kada se tiska s ABS-om. PLA ispis, koristeći preporučene postavke, nije proizveo značajne koncentracije nanočestica. Temperatura ekstrudera igrala je važnu ulogu u emisiji čestica, pri čemu su emisije naočigled rasle kako se temperatura povećavala. Neispravnost pisača također je uzrokovala povećanje emisije čestica i veličine čestica. Čestice su izrađene od spojeva visoke i niske hlapljivosti, i nisu zabilježene vatrostalne jezgre. Hlapljivi organski i drugi plinoviti spojevi nisu otkriveni ili su, ako su pronađeni, samo u tragovima, niži od bilo koje granične vrijednosti izloženosti. Polimeri za tiskanje razlikovali su se uglavnom po količini stirena prisutnog tijekom ispisivanja ABS-a. Slijedeći preventivni pristup, potrebno je donijeti mjere opreza kada se koriste 3D pisači u netradicionalnim postavkama [13].

Iako je uporaba 3D pisača potpuno sigurna, potrebno je biti oprezan pri istodobnom radu s nekoliko pisača, što je uobičajeno u većini javnih tiskarskih mjesta, škola ili radnih mjesta: ovdje će koncentracija čestica prelaziti indikativnu vrijednost od  $4 \cdot 10^4$   $\text{cm}^3$  (8-satni TWA) tijekom dugih razdoblja izlaganja [13]. Materijal koji se koristi ima važnu ulogu u ukupnom izlaganju česticama, a savjetuje se da se grijani dijelovi pisača održavaju čistima i da se koriste niže temperature ekstrudera koje daju dobre rezultate ispisa. Kućišta, lokalna ispušna ventilacija i sustavi za filtriranje zraka mogu se koristiti za smanjenje izloženosti korisnika potencijalno opasnim emisijama. Ugrađivanje tih značajki u 3D pisače tijekom faze projektiranja sigurno bi donijelo najbolji rezultat [14].



## 7. LITERATURA

1. C.K. Chua, K.F. Leong, (2017). **3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications**, 5th ed., World Scientific Publishing Company.
2. Filip Jurman, (2017). **Primjena aditivne proizvodnje u procesu razvoja novih proizvoda**, Završni rad, Politehnika Pula.
3. Nikola Zadavec, (2017). **Primjena 3D skenera i 3D printera za izradu elemenata konstrukcija**, Završni rad, Sveučilište Sjever.
4. J. Hiller, H. Lipson, (2009) . **Design and analysis of digital materials for physical 3D voxel printing**, Rapid Prototyp. J. 15 str. 137–149.
5. S. Tibbits, (2014). **4D printing: multi-material shape change**, Archit. Des. 84 str. 116–121.
6. J. Deckers, J. Vleugels, J.-P. Kruth, 5 (2014) . **Additive manufacturing of ceramics**, J. Ceram. Sci. Technol. 5 str. 245–260.
7. N. Saengchairat, T. Tran, C.K. Chua, (2017). **A review: additive manufacturing for active electronic components**, Virtual Phys. Prototyp. 12 str. 31–46.
8. S.V. Murphy, A. Atala, (2014). **3D bioprinting of tissues and organs**, Nat. Biotechnol. 32 str. 773–785.
9. Tony Rogers, (2015). **Everything You Need To Know About Polylactic Acid (PLA)**, Creative Mechanisms Blog.
10. Tony Rogers, (2015). **Everything You Need To Know About ABS Plastic**, Creative Mechanisms Blog.

11. Felipe Cerdas, Max Juraschek, Sebastian Thiede, and Christoph Herrmann, (2017). **Life Cycle Assessment of 3D Printed Products in a Distributed Manufacturing System**, Institute of Machine Tools and Production Technology (IWF).
12. Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S., and Iribarne, M., (2015). **Comparing Environmental Impacts of Additive Manufacturing vs Traditional Machining Via Life-Cycle Assessment**, Rapid Prototyping Journal, Vol. 21, No. 1, str. 14-33.
13. Stephens, B., P. Azimi, Z. El Orch, and T. Ramos, (2013). **Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers**, Atmospheric Environment 79: str. 334–339.
14. Kim, Y., C. Yoon, S. Ham, J. Park, S. Kim, O. Kwon, and P.-J. Tsai. (2015). **Emissions of nanoparticles and gaseous material from 3D printer operation**, Environmental Science & Technology.