

OGLJIČNI ODTIS IZDELAVE PLASTIČNEGA IZDELKA NA 3D TISKALNIKU

PETAR TODOROVIĆ, MARJAN SENEGAČNIK, ŠTEFAN ŽUN

Univerza v Mariboru, Fakulteta za organizacijske vede, Kranj, Slovenija
petar.todorovic@student.um.si, marjan.senegačnik@um.si, stefan.zun@guest.arnes.si

V tem poglavju obravnavamo problematiko ogljičnega odtisa procesa 3D tiskanja ali aditivne proizvodnje, ki je postopek konstruiranja izdelka, plast za plastjo, iz digitalnih modelov z uporabo različnih materialov, predvsem različne vrste plastike. Pregledali bomo okoljski vpliv 3D tiskanja in okoljske vplive v povezanih postopkih (priprava materiala, transport, ravnanje z odpadnimi izdelki). V prispevku preučujemo proizvodnjo, uporabo in odstranjevanje, pri čemer se osredotočamo na porabo energije, vire materiala in ravnanje z odpadki. Poleg tega ta študija vključuje primerjalno oceno med 3D tiskanjem in alternativnimi metodami proizvodnje, da se ugotovi njihov posamezen okoljski vpliv. S celovito analizo želimo prispevati k razumevanju izzivov in priložnosti trajnostnih vidikov 3D tiskanja s plastiko. Z oceno dejavnikov, kot so izraba virov in emisije, si prizadevamo zagotoviti dragocene vpoglede v trajnostne posledice 3D tiskanja s plastiko. Ugotovljeni rezultati prispevajo k širši razpravi o prednostih in slabostih 3D tiskanja v primerjavi z drugimi metodami izdelave.

DOI
[https://doi.org/
10.18690/um.fov.1.2025.5](https://doi.org/10.18690/um.fov.1.2025.5)

ISBN
978-961-286-947-2

Ključne besede:

3D tiskanje,
polilaktid (PLA),
ogljčni odtis,
tlačno vlivanje,
trajnostna proizvodnja



Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

DOI
[https://doi.org/
10.18690/um.fov.1.2025.5](https://doi.org/10.18690/um.fov.1.2025.5)

ISBN
978-961-286-947-2

Keywords:
3D printing,
polylactide (PLA),
carbon footprint,
die casting,
sustainable production

CARBON FOOTPRINT OF PLASTIC PRODUCT MADE WITH A 3D PRINTING

PETAR TODOROVIĆ, MARJAN SENEGAČNIK, ŠTEFAN ŽUN

University of Maribor, Faculty of Organizational Sciences, Kranj, Slovenia
petar.todorovic@student.um.si, marjan.senegacnik@um.si, stefan.zun@guest.arnes.si

This chapter discusses the topic of carbon footprint of 3D printing. 3D printing or additive manufacturing is a procedure of gradually producing an object from digital models, layer by layer, with the use of a variety of materials, in particular different types of plastic. We will look at the environmental impacts of 3D printing as well as the environmental impacts of linked procedures (material preparation, transport, waste treatment). The production, use and disposal of a product are covered with a focus on energy use, material sources and waste treatment. In addition, this study includes a comparative assessment of 3D printing and some alternative methods to determine their environmental impact. Through a comprehensive analysis, we aim to contribute to the understanding of challenges and opportunities of sustainability aspects of 3D printing using plastic materials. By assessing factors such as resource use and emissions, we aim to gain valuable insights into the sustainability implications of 3D printing with plastics. The results obtained contribute to the wider discussion about the advantages and disadvantages of 3D printing compared with alternative methods of production.



1 Uvod

Z nenehnim in hitrim napredkom današnje tehnologije se nenehno razvijajo novi načini izdelave izdelkov, v iskanju proizvodnih metod, ki zagotavljajo učinkovitost, hitrost, znižanje stroškov proizvodnje in dela ter dejavnik, ki je v zadnjih desetletjih postal zelo pomemben, to je ogljični odtis izdelave izdelkov. Eden izmed načinov izdelave je 3D tiskanje. 3D tiskanje je tehnika aditivne proizvodnje za izdelavo širokega izbora struktur in kompleksnih geometrij na podlagi podatkov 3D modela. Tehniko so sprva uporabljali proizvajalci in razvijalci izdelkov za izdelavo prototipov, maket in nadomestnih delov (Peacock, 2014). 3D tiskanje revolucionira proizvodnjo s transformacijo digitalnih modelov v oprijemljive predmete. Širok nabor materialov, ki se trenutno uporablja pri 3D tiskanju, zajema plastiko, kovine, polimere, keramiko in beton (Shahrubudin idr., 2019). Z uporabo materialov, kot so plastika, kovina ali celo bio-črnila, ta aditivni proizvodni postopek omogoča ustvarjalcem, da svoje ideje oživijo z natančnostjo. Od izdelave prototipov do proizvodnje po meri 3D tiskanje preoblikuje industrije in sproža inovacije po vsem svetu.

V zadnjih letih se je 3D (tridimenzionalno) tiskanje zelo uveljavilo. V primerjavi s konvencionalnimi metodami ima vrsto prednosti, med drugim tudi zaradi manjših vplivov na okolje (Shuaib idr., 2021). Pri proizvodnji je čedalje bolj izpostavljen okoljski vidik. Eden od najbolj uporabljanih parametrov, s katerimi merimo vpliv na okolje, je ogljični odtis. Ogljični odtis je možno izračunati za posameznika, organizacijo ali proces, za industrijo pa je zelo primeren parameter izračun ogljičnega odtisa na enoto izdelka, za kar je razvitih več metodologij oziroma standardov, kot so ISO/TS 14067, GHG Protocol Product Standard, PAS 2050 in Climate Declaration (Kavkler, 2016). Seveda bi se v prispevku osredotočili na izračun ogljičnega odtisa pri proizvodnji plastičnih izdelkov (Dormer idr., 2013; Rahim in Raman, 2017; Tonini idr., 2021). Želimo izračunati ogljični odtis, ki nastane pri proizvodnji izdelka na 3D tiskalniku z uporabo metode modeliranja taljenega materiala (Fused Deposition Modeling). To je metoda tridimenzionalnega tiskanja, ki je predvsem zaradi svoje enostavnosti najbolj razširjena (Kogovšek, 2021). Kot material za izdelavo izdelka bi uporabili polilaktid (LCA).

Namen tega poglavja je izračun ogljičnega odtisa in ocena okoljskih vplivov, ki nastanejo pri procesu 3D tiskanja, in ga primerjati z alternativnimi metodami proizvodnje.

V naslednjem podpoglavju bomo predstavili naš metodološki pristop, metode, s katerimi smo zbirali podatke, metode za njihovo analizo in pričakovane rezultate našega prispevka.

2 Metodologija

Cilj je zagotoviti predhodni pregled različnih tehnologij 3D tiskanja in njihov vpliv na okolje, od najbolj do najmanj obremenjujočih. Poleg tega si v tem poglavju prizadevamo oceniti okoljski vpliv filamentov ali vhodnih materialov, uporabljenih v vsaki tehnologiji 3D tiskanja, in jih razvrstiti glede na njihov okoljski odtis. Ocena zajema proizvodnjo materialov, postopek 3D tiskanja, uporabo izdelka in možnost ponovne uporabe materiala oziroma biorazgradljivosti.

Prispevek se osredotoča tudi na primerjavo okoljskih odtisov in stroškovne učinkovitosti dveh proizvodnih tehnologij, in sicer 3D tiskanja termoplastov in brizganja termoplastov. Primarni cilj je oceniti ekonomsko izvedljivost proizvodnje istega izdelka z uporabo teh tehnologij in ugotoviti, katera metoda je ekonomsko ugodnejša.

V začetni fazi je cilj naloge vzpostaviti rangiranje okoljskih vplivov tehnologij 3D tiskanja in pripadajočih filamentnih materialov, kar bo olajšalo izbiro tehnologij z najmanjšo obremenitvijo za okolje. Te razvrstitve bodo pomagale pri prepoznavanju okolju prijaznih tehnologij 3D tiskanja glede na porabo energije in emisij ter okolju najbolj prijaznih filamentnih materialov. Uporaba teh meril je ključnega pomena za odločitve o trajnostnem pristopu 3D tiskanja.

Poudarek bo tudi na oceni okoljskih in stroškovnih vidikov 3D tiskanja in brizganja plastike. Primarni rezultat bo finančna ocena primerjave donosnosti obeh tehnologij za proizvodnjo istega plastičnega izdelka. To vrednotenje bo zajemalo tehnološke, oblikovalske, finančne in okoljske parametre, ki zagotavljajo izbiro najprimernejše tehnologije za specifične zahteve proizvodnje plastičnih izdelkov.

Metode reševanja problema bodo najprej jasno definirane in iskanje rešitve problema. Pri tem procesu bomo uporabili metodo zbiranja podatkov iz različnih virov iz znanstvene in strokovne literature. Pri izračunu ogljičnega odtisa izdelka bomo uporabili katerega izmed za to namenjenih standardov, kot je standardna metoda LCA. Zbrane podatke bomo analizirali in na podlagi analiz podajali sklepe in rešitve.

3 Teoretični del

Najprej bomo definirali ključne besede:

- 3D tiskanje ali aditivna proizvodnja je postopek, ki konstruira fizične objekte plast za plastjo iz digitalnih modelov z uporabo materialov, kot so plastika, kovina ali smola. Ta tehnologija omogoča ustvarjanje zapletenih in prilagojenih modelov, revolucioniranje prototipov, proizvodnje in inovacij v različnih panogah (Campbell in Ivanova, 2013).
- Ogljični odtis je skupna količina toplogrednih plinov, predvsem ogljikovega dioksida in drugih ogljikovih spojin, ki jih je posameznik, organizacija, izdelek ali dejavnost, neposredno ali posredno, izpustil v ozračje; običajno merjeno z ekvivalentom ogljikovega dioksida emisije (Wiedmann idr., 2020).
- Tlačno vlivanje je proizvodni postopek, ki vključuje vbrizgavanje materiala, pogosto tekoče kovine ali plastike, v kalup pri visokem tlaku za izdelavo podrobnih in visokokakovostnih delov. Uporaba pritiska pomaga odpraviti zračne mehurčke in zagotavlja natančno replikacijo zapletenih značilnosti kalupa, kar ima za posledico natančno izdelane in dosledne izdelke (Lee idr., 2014).

V teoretičnem delu prispevka bomo opisali različne vrste 3D tiskanja. 3D tiskanje kot pojem je bilo prvič predstavljeno v 80. letih prejšnjega stoletja (Hull, 1983). 3D tiskanje je vrsta aditivne proizvodnje (AM), ki vključuje proizvodnjo 3D izdelkov z dodajanjem materialov plast za plastjo. Od uvedbe in komercializacije se 3D-tiskanje v veliki meri uporablja v inženirski in proizvodni, zdravstveni in vesoljski industriji, zlasti za izdelavo prototipov in ustvarjanje lahkih kompleksnih oblik in struktur (Yin idr., 2018). Prvi 3D tiskalnik je izdelal 3D Systems Corporation leta 1987. Ta stroj

je deloval na principu stereolitografije (SLA). Ta stroj je omogočil izdelavo kompleksnih delov, plast za plastjo, v delčku časa, ki bi sicer trajal (Turney idr., 2023).

Nekatere prednosti tega načina pridelave v primerjavi s konvencionalnimi načini pridelave so:

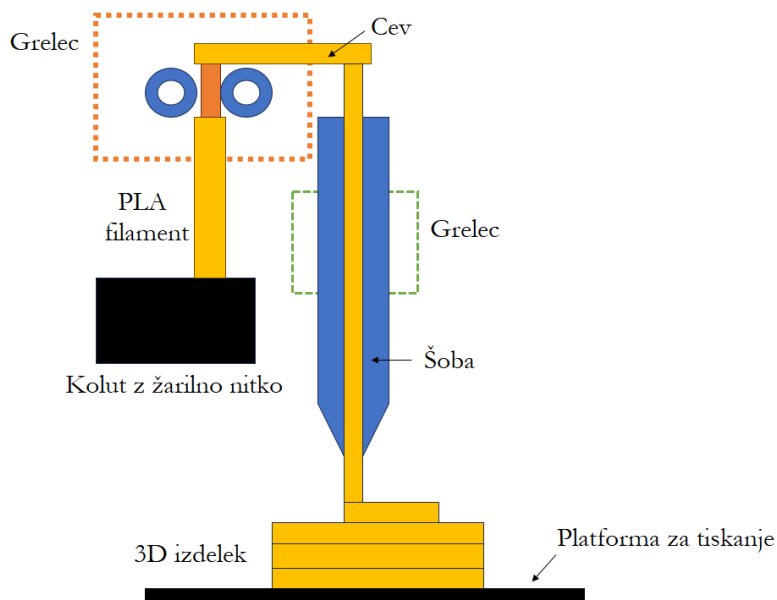
- Izboljšana učinkovitost materiala, saj ni izgube materiala zaradi rezanja ali strojne obdelave.
- Viri imajo večjo učinkovitost, saj ti procesi ne zahtevajo pomožnih virov, kot so orodja, šablone, napeljave in tako naprej.
- Izdelke visoke kompleksnosti in zapletenosti je mogoče izdelati, saj ni omejitev glede orodij.
- Aditivni proizvodni procesi povečujejo fleksibilnost proizvodnje (Prakash idr., 2018).

V naslednjih desetletjih se je razvila druga vrsta 3D tiskanja z uporabo drugačnih materialov in metod. V tem poglavju bomo opisali te različne vrste tiskanja, uporabljene materiale s poudarkom na plastiki, prednosti in slabosti posameznih načinov 3D tiska ter ovrednotili vpliv teh tehnologij na okolje, pri čemer bomo oglični odtis uporabili kot ocenjevalni standard, za izračun katerega je bilo razvitih več metodologij in standardov (Kavkler, 2016). Najbolj zrele metode vključujejo modeliranje taljenega materiala (FDM), selektivno lasersko sintranje (SLS), stereolitografijo (SLA), proizvodnjo laminiranih predmetov (LOM) (Vaezi idr., 2013).

3.1 3D tiskanje z metodo modeliranja taljenega materiala (FDM)

Postopek z metodo modeliranja taljenega materiala (Fused Deposition Modeling) - FDM, ki je razvrščen kot tehnika ekstrudiranja materiala AM, je najenostavnejša, cenovno dostopna in enostavno uporabna tehnika 3D tiskanja za materiale na osnovi polimerov in se v veliki meri uporablja v različnih industrijah (Cuiffo idr., 2017). Modeliranje taljenega nanašanja (FDM), znano tudi kot tehnika izdelave dodatkov z ekstruzijo materiala, uporablja polimere kot surovino (filament). Filament se običajno segreje do staljenega stanja in se nato ekstrudira skozi šobo stroja (3D tiskalnik), kot prikazuje Slika 1. Glava šobe se lahko premika v treh

prostostnih stopnjah (DoF), da nanese ekstrudirani polimer na gradbeno ploščo v skladu z navodili kode G. G-code je računalniški programski jezik, ki se uporablja za pogon računalniško vodenih proizvodnih strojev. Komponente so običajno nanesene na gradbeno ploščo (platformo), ki jo je po tiskanju mogoče odstraniti z odtrganjem ali namakanjem v detergentu, odvisno od vrste termoplasta. Nato lahko natisnjene komponente površinsko očistite, zbrusite, pobarvate ali rezkate, da izboljšate njihov površinski videz in funkcionalnost.



Slika 1: Shematski prikaz naprave za tiskanje z metodo modeliranja taljenega materiala.

Vir: Heinemann, 2016

Obstajajo različni materiali, ki se lahko uporabljajo za modeliranje taljenega nanosa, vendar večina uporabnikov 3D tiskalnikov, tako v domačem kot industrijskem obsegu, najbolj uporablja PLA (Polilaktidna kislina). PLA plastika pomeni polilaktidna kislina. PLA plastika je termoplast narejen na osnovi rastlinskih sestavin. PLA je najbolj uporabljen material iz več razlogov:

- Polimlečna kislina (PLA) je bioplastika, zato je okolju prijazna in ni škodljiva za zdravje ljudi in živali. PLA je zelen material, saj je proizveden iz popolnoma obnovljivih virov, kot so koruza, sladkorni trs, pšenica ali

katerikoli drugi vir z visoko vsebnostjo ogljikovih hidratov (Camargo idr., 2019).

- PLA ima temperaturo posteklenitve med 50 in 70 °C, temperaturo tališča pa med 180 in 220 °C [13–15]. Tako ga lahko večina nizkoenergijskih in stroškovno učinkovitih 3D tiskalnikov iztisne (Liao idr., 2019).
- Plastika PLA je primerna za kompostiranje in se ob odlaganju hitro razgradi, za razliko od druge plastike, ki ima resne izzive pri odlaganju. Ker je PLA med biopolimeri, se razgradi v naravne in nestrupene pline, vodo, biomaso in anorganske soli, ko je izpostavljen naravnim pogojem, hidrolizi ali celo pri sežigu.
- Pokazalo se je, da ima PLA v svoji polkristalni obliki dober upogibni modul, boljšo natezno trdnost in upogibno trdnost.
- PLA je komercialno na voljo na trgu v različnih barvah in teksturah. Zaradi tega je privlačen za uporabnike, zlasti za domače in okrasne upravljalce 3D tiskalnikov.

Naslednji priljubljeni material, ki se uporabljajo pri 3D tiskanju z ekstruzijo materialov, je akrilonitril butadien stiren (ABS) (Perez idr., 2014). ABS (akrilonitril butadien stiren) ima dolgo zgodovino v tehnologijah 3D tiskanja. Ta material je bil ena prvih plastičnih mas, ki se je uporabljala v industrijskih 3D tiskalnikih. Mnogo let kasneje je ABS še vedno zelo priljubljen material zaradi nizkih stroškov in dobrih mehanskih lastnosti. ABS je znan po svoji žilavosti in odpornosti na udarce, kar omogoča tiskanje trpežnih delov, ki bodo vzdržali dodatno uporabo in obrabo. ABS ima tudi višjo temperaturo posteklenitve, kar pomeni, da lahko material prenese veliko višje temperature, preden se začne deformirati.

Drug priljubljen material je najlon. Kot pogosto uporabljen termoplastični material najlon označuje družino sintetičnih polimerov, sestavljenih iz poliamidov z visoko molekularno maso. Najlonski polimeri so žilavi, močni in izjemni zaradi svoje visoke odpornosti na vročino, kemikalije in udarce, kar je zelo zanimivo za komercialne namene. Predvsem 3D tiskanje najlonskega filamenta ponuja veliko priročnost za izdelavo delov majhne količine proizvodnje ali kompleksnih struktur z uporabo 3D tiskalnika, ki temelji na iztiskanju. Poleg tega so najlonski filamenti poceni in jih je enostavno pridobiti prek različnih prodajalcev ali dobaviteljev, zaradi česar je 3D tiskanje za najlonske dele zelo dostopno končnim uporabnikom. Izdelki iz najlona

imajo visoko odpornost proti obrabi, dobro kemično odpornost na organske kemikalije in alkalije. Izdelki iz najlona imajo dolgo življenjsko dobo in lahko delujejo pri temperaturah do 50 stopinj Celzija (Manson idr., 2017).

Vpliv materiala na okolje: plastiko ABS, čeprav ni biorazgradljiva, je mogoče reciklirati, saj je biokompatibilna. V nasprotju s tem je plastika PLA, večinoma pridobljena iz koruznega škroba, razgradljiva in biokompatibilna ter sčasoma razpade na ogljikov dioksid in vodo. Vendar morebitni negativni vpliv plastike PLA na okolje vključuje gensko spremenjeno koruzo, ki se lahko sprosti med razgradnjo (Shaikhmag idr., 2015). Postopek 3D tiskanja FDM oddaja škodljive snovi, kot so hlapne organske spojine, amonijak, cianovodikova kislina, fenol in benzen. ABS plastika, material na osnovi nafte, predstavlja večjo nevarnost kot plastika PLA, saj sprošča od 3 do 30-krat več nevarnih delcev. Znanstvene raziskave, ki uporabljajo tehnologijo fotoionizacije, predlagajo čakalni čas od 10 do 30 minut po 3D tiskanju FDM, da se ravni nanodelcev v zraku vrnejo v normalno stanje. Prekomerni izpusti nanodelcev lahko povzročijo pljučne bolezni in raka. Ukrepi za zmanjšanje nevarnosti nanodelcev vključujejo redno prezračevanje in uporabo FDM 3D tiskalnikov v zaprtih delovnih prostorih (Shaikhmag idr., 2015). Kakovost filameta pomembno vpliva na škodljive emisije med FDM 3D tiskanjem, tudi pri enakih parametrih tiskalnika in izdelka. Različni dobavitelji lahko povzročijo znatne razlike v emisijah (Shaikhmag idr., 2015). Najlon, pridobljen iz premoga in nafte, ima škodljiv proizvodni proces, ki oddaja dušikove okside in porablja velike količine vode in energije. Kljub temu je najlon mogoče reciklirati tako, da ga ponovno segrejete in spremenite v nove izdelke, vključno s filamentom za 3D tiskanje FDM (Manson idr., 2017).

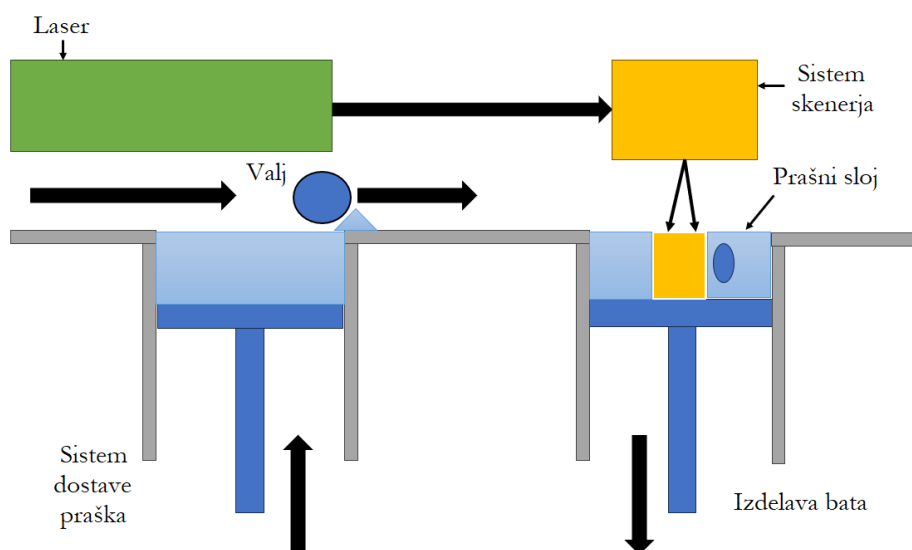
3.2 3D tiskanje z metodo selektivnega laserskega sintranja

Selektivno lasersko sintranje (Selective Laser Sintering, SLS) je aditivna proizvodna tehnologija, ki uporablja visokozmogljiv laser za selektivno taljenje ali sintranje praškastih materialov, običajno polimerov ali kovin, plast za plastjo, za ustvarjanje tridimenzionalnih predmetov. SLS je znan po svoji vsestranskosti, saj omogoča izdelavo kompleksnih in zapletenih struktur brez potrebe po podpornih strukturah. Ta postopek je našel uporabo v različnih industrijah, vključno z vesoljsko in avtomobilsko industrijo, zdravstveno oskrbo in oskrbo s potrošniškim blagom (Gibson idr., 2015).

Ena od ključnih značilnosti SLS je njegova zmožnost dela s širokim naborom materialov, ki ponuja prilagodljivost pri izbiri materialov na podlagi posebnih zahtev uporabe. Na področju polimerov je poliamid (najlon) eden najpogosteje uporabljenih materialov v SLS zaradi svojih ugodnih lastnosti, kot so visoka trdnost, vzdržljivost in toplotna odpornost. Poliamidni prah se, ko je podvržen procesu laserskega sintranja, stopi skupaj, tvori trdne plasti in gradi želeni predmet (Gibson idr., 2015).

Poleg tega so za SLS primerni tudi termoplastični elastomeri, kot je TPU (termoplastični poliuretani). TPU izkazuje elastičnost in prožnost, zaradi česar je idealen za izdelavo funkcionalnih prototipov, prilagojene obutve in komponent z lastnostmi, podobnimi gumi.

Shematsko je naprava za selektivno lasersko sintranje prikazana na Sliki 2.



Slika 2: Shematski prikaz naprave za selektivno lasersko sintranje

Vir: Choudhury idr., 2023

Na področju kovin SLS razširja svojo uporabo na materiale, kot so aluminij, nerjavno jeklo in titan. Te kovine so na voljo v obliki prahu in jih je mogoče selektivno sintrati za proizvodnjo vzdržljivih in strukturno zdravih komponent. Na primer: aluminijeve zlitine se lahko uporabljajo za lahke vesoljske komponente, nerjavno jeklo pa je

izbrano zaradi njegove odpornosti proti koroziji in mehanske trdnosti (Gibson idr., 2015).

Pomembna prednost SLS je zmožnost dela s kompozitnimi materiali, kar izboljša lastnosti končnega izdelka. Polimeri, ojačani z ogljikovimi vlakni, na primer nudijo večjo moč in togost, zaradi česar so primerni za aplikacije, ki zahtevajo lahke, a robustne komponente. Kombinacija polimerne matrice in ojačitvenih vlaken omogoča ustvarjanje delov z izboljšano mehansko zmogljivostjo. V medicinskih aplikacijah so biokompatibilni materiali ključnega pomena, SLS pa ponuja rešitev za izdelavo vsadkov, prilagojenih bolniku. Polietereeterketon (PEEK) je bioinerten polimer, ki se pogosto uporablja v SLS za medicinske namene zaradi svojih odličnih mehanskih lastnosti, odpornosti proti obrabi in biokompatibilnosti. Vsadke PEEK je mogoče natančno izdelati, da ustrezajo pacientovi anatomiji, kar zmanjša tveganje zavrnitve in izboljša splošne rezultate pacienta (Kogovšek, 2021).

Kot pri vsakem proizvodnem procesu tudi na kakovost končnega izdelka vplivajo različni parametri, vključno z močjo laserja, hitrostjo skeniranja in lastnostmi prahu. Pravilna optimizacija teh parametrov je bistvenega pomena za doseganje želenih mehanskih lastnosti in površinske obdelave v delih, proizvedenih s SLS. Skratka, selektivno lasersko sintranje je vsestranska tehnologija aditivne proizvodnje z aplikacijami v različnih panogah. Zaradi sposobnosti dela z različnimi materiali, vključno s polimeri, kovinami in kompoziti, je SLS primeren za izdelavo funkcionalnih prototipov, delov za končno uporabo in prilagojenih medicinskih vsadkov. Tekoči napredek v znanosti o materialih in optimizaciji procesov še naprej širita obseg in zmogljivosti SLS, kar prispeva k njegovemu pomenu v svetu aditivne proizvodnje (Kruth idr., 2005).

Vpliv materiala na okolje: selektivno lasersko sintranje (SLS), aditivna proizvodna tehnologija, ima pozitivne in negativne učinke na okolje. Pozitivno je, da je SLS znan po visoki učinkovitosti materialov, zmanjševanju odpadkov v primerjavi s tradicionalnimi metodami in omogočanju lokalizirane proizvodnje na zahtevo, kar lahko zmanjša emisije ogljika iz logistike. Vendar pa poraba energije tehnologije med procesom sintranja in sproščanje emisij, vključno s hlapnimi organskimi spojinami (HOS) in trdnimi delci, predstavlja okoljske izzive. Pridobivanje materiala lahko prispeva k okoljskemu odtisu, omejena biorazgradljivost nekaterih materialov SLS pa vzbuja pomisleke. Za reševanje teh vprašanj bi se morala prizadevanja

osredotočiti na inovacije materialov za manjši vpliv na okolje, energetske učinkovite tehnologije, zaprtostne sisteme za recikliranje, učinkovite ukrepe za nadzor emisij in celovite ocene življenjskega cikla za usmerjanje trajnostnih praks v industriji SLS (Kogovšek, 2021).

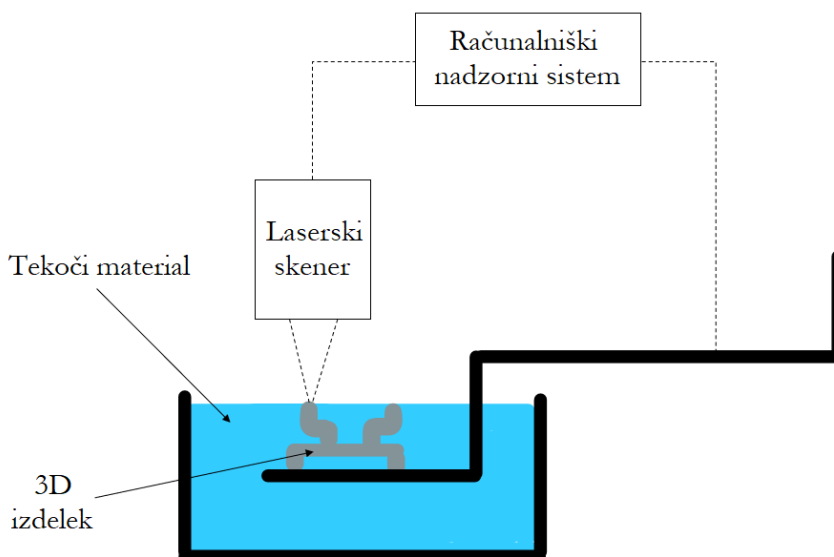
3.3 3D tiskanje z metodo stereolitografije

Stereolitografija (SLA) je široko uporabljena tehnologija 3D tiskanja, ki spada v kategorijo kadne fotopolimerizacije. SLA, ki ga je razvil Chuck Hull v osemdesetih letih 20. stoletja, vključuje plast za plastjo izdelavo predmetov z uporabo tekočih fotopolimernih smol, ki se strdijo, ko so izpostavljene ultravijolični (UV) svetlobi. Ta tehnologija je našla aplikacije v različnih panogah, vključno z avtomobilsko, vesoljsko industrijo, zdravstveno oskrbo in oblikovanjem izdelkov, zaradi svoje zmožnosti izdelave zelo podrobnih in zapletenih modelov (Hull, 1986).

Pri stereolitografiji se postopek 3D tiskanja začne s kadjo tekoče smole. Gradbena platforma je potopljena v smolo, UV-laser pa selektivno skenira in utrjuje smolo plast za plastjo, pri čemer sledi geometrijskim informacijam iz digitalnega modela. Ko je plast utrjena, se gradbena platforma postopoma premika in postopek se ponavlja, dokler ni oblikovan celoten objekt. Končani predmet je nato običajno naknadno obdelan, da se odstrani odvečna smola, in je potrjen dodatnim korakom strjevanja, da se zagotovi strukturna celovitost (Hull, 1986).

Stereolitografija uporablja različne fotopolimerne smole, od katerih je vsaka prilagojena specifični uporabi. Standardne smole, kot so akrilati, se običajno uporabljajo za splošne namene, saj zagotavljajo ravnovesje med močjo in podrobnostmi. Inženirske smole, kot so močne, fleksibilne ali na visoke temperature odporne različice, zadovoljujejo bolj specializirane potrebe. Biokompatibilne smole so bile razvite tudi za uporabo v medicini, vključno z zobnimi modeli in kirurškimi vodili.

Naprava za tiskanje z metodo stereolitografije je prikazana na Sliki 3.



Slika 3: Shematski prikaz naprave za tiskanje z metodo stereolitografije

Vir: Huang idr., 2020

Vpliv materialov na okolje: medtem ko stereolitografija ponuja številne prednosti, kot sta visoka natančnost in površinska obdelava, je bistveno upoštevati njene vplive na okolje. Materiali, uporabljeni pri tiskanju SLA, zlasti fotopolimerne smole, imajo lahko okoljske posledice. Proizvodnja teh smol lahko vključuje energetsko intenzivne procese, pridobivanje in predelava surovin pa lahko prispevata k degradaciji okolja. Poleg tega lahko nekatere smole vsebujejo kemikalije, ki predstavljajo tveganje za okolje in zdravje. Pomembna skrb je potencialno nastajanje nevarnih odpadkov v fazi naknadne obdelave. Preostalo nestrjeno smolo in čistilna sredstva, ki se uporabljajo za odstranjevanje odvečnega materiala, je morda treba skrbno odstraniti, da preprečite onesnaženje okolja. Poleg tega poraba energije, povezana s postopkom UV utrjevanja in proizvodnjo samih smol, prispeva k skupnemu okoljskemu odtisu stereolitografije. Prizadevanja za ublažitev vpliva stereolitografije na okolje vključujejo razvoj bolj trajnostnih fotopolimernih smol na biološki osnovi. Raziskovalci raziskujejo okolju prijazne alternative, pridobljene iz obnovljivih virov, ki bi lahko zmanjšale odvisnost od petrokemičnih materialov. Poleg tega so pobude za recikliranje neuporabljene ali odvečne smole, skupaj z ustreznimi metodami odstranjevanja odpadkov, ključni vidiki zmanjševanja okoljskih učinkov SLA.

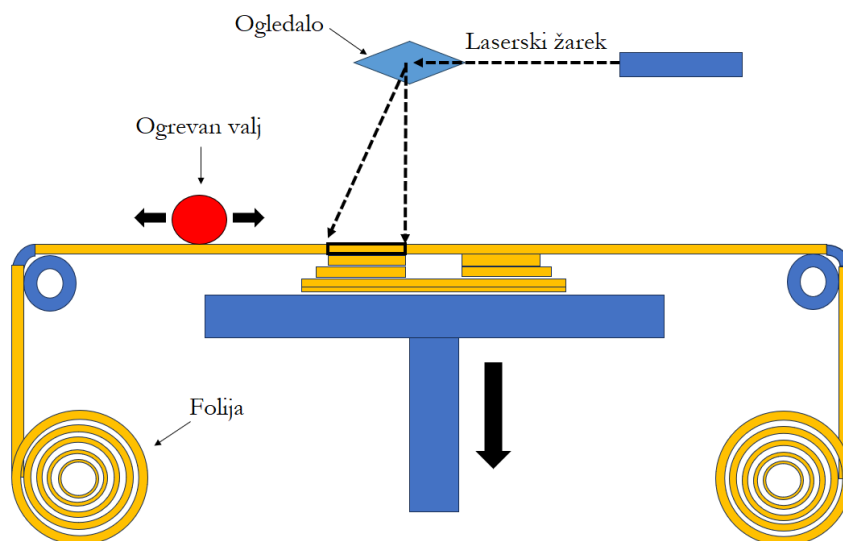
Skratka, stereolitografija je zmožljiva tehnologija 3D tiskanja z različnimi aplikacijami, ki jo poganja njena sposobnost izdelave podrobnih in zapletenih predmetov. Vendar pa je njegov vpliv na okolje dejavnik, ki zahteva stalne raziskave in razvoj trajnostnih materialov in praks. Prizadevanja za optimizacijo porabe energije, zmanjšanje odpadkov in raziskovanje okolju prijaznih alternativnih smol bodo prispevala k temu, da postane stereolitografija bolj okolju prijazna aditivna proizvodna metoda (Kogovšek, 2021).

3.4 3D tiskanje z metodo laminiranih predmetov

Tiskanje z metodo laminiranih predmetov (Laminated Object Manufacturing, LOM) je tehnologija 3D tiskanja, ki spada v kategorijo metod aditivne izdelave. LOM, ki sta ga razvila Michael Feygin in Emanuel Sachs v zgodnjih devetdesetih letih prejšnjega stoletja, uporablja liste ali plasti materiala, običajno papirja ali plastike, ki so povezani skupaj, da ustvarijo tridimenzionalni predmet. Ta postopek vključuje rezanje, zlaganje in lepljenje zaporednih plasti, pri čemer vsaka plast ustreza prečnemu prerezu digitalnega modela. LOM izstopa po svoji preprostosti, stroškovni učinkovitosti in zmožnosti izdelave velikih prototipov z relativno hitrim časom izdelave.

Materiali, ki se običajno uporabljajo v LOM, vključujejo papir, plastiko ali kompozite obeh. Osnovni material, običajno papir, premažemo z lepilom in ga z laserjem ali nožem izrežemo v želeno obliko. Odrezan sloj se nato poveže s prejšnjim slojem in postopek se ponavlja, dokler ni oblikovan celoten predmet. Papirnati materiali so priljubljeni zaradi svoje dostopnosti, cenovne dostopnosti in enostavnega rokovanja. Poleg tega nekateri sistemi LOM uporabljajo materiale, kot so kompozitni laminati, ki združujejo plasti papirja ali tkanine s termoreaktivno smolo, kar povečuje trdnost in vzdržljivost končnega izdelka (Lipson idr., 2013).

Naprava za 3D tiskanje z metodo laminiranih predmetov je prikazana na Sliki 4.



Slika 4: Shematski prikaz naprave za 3D tiskanje z metodo laminiranih predmetov
Vir: IMAGINE THAT 3D, 2015

Vpliv materialov na okolje: z okoljskega vidika predstavlja proizvodnja laminiranih predmetov kombinacijo pozitivnih in negativnih učinkov. Pozitivno je, da so materiali, ki se običajno uporabljajo v LOM (npr. papir), obnovljivi viri. Uporaba trajnostnih materialov je usklajena s prizadevanji za zmanjšanje vpliva proizvodnih procesov na okolje. Poleg tega preprostost tehnologije LOM prispeva k manjši porabi energije med proizvodnim procesom v primerjavi z nekaterimi drugimi tehnologijami 3D tiskanja.

Vendar pa obstajajo tudi okoljski vidiki, povezani z LOM. Lepila, ki se uporabljajo za lepljenje plasti, pogosto vsebujejo kemikalije, proizvodnja teh materialov pa lahko vključuje energetsko intenzivne procese. Poleg tega lahko odlaganje odpadnega materiala, zlasti če vsebuje biološko nerazgradljive sestavine, prispeva k skrbi za okolje.

Prizadevanja za izboljšanje okoljske trajnosti LOM vključujejo raziskovanje alternativnih materialov in lepilnih formulacij. Raziskave se osredotočajo na razvoj bioloških ali recikliranih materialov, ki lahko ohranijo ali izboljšajo mehanske lastnosti predmetov, proizvedenih z LOM. Inovacije v lepilnih tehnologijah si

prizadevajo zmanjšati vpliv lepilnih sredstev na okolje, pri čemer iščejo formulacije, ki so okolju prijaznejše.

Skratka, izdelava laminiranih predmetov je pomembna tehnologija 3D tiskanja, ki se za ustvarjanje predmetov opira na plastenje materialov, običajno papirja ali plastike. Čeprav ponuja prednosti, kot sta stroškovna učinkovitost in uporaba obnovljivih virov, okoljski vidiki izhajajo iz lepil in potencialnih odpadkov, ki nastanejo med postopkom. Nenehne raziskave in napredek na področju materialov in formulacij lepil so namenjeni reševanju teh pomislekov in si prizadevajo, da bi LOM postal okoljsko bolj trajnostna možnost na področju aditivne proizvodnje (Kogovšek, 2021).

3.5 Tlačno vlivanje

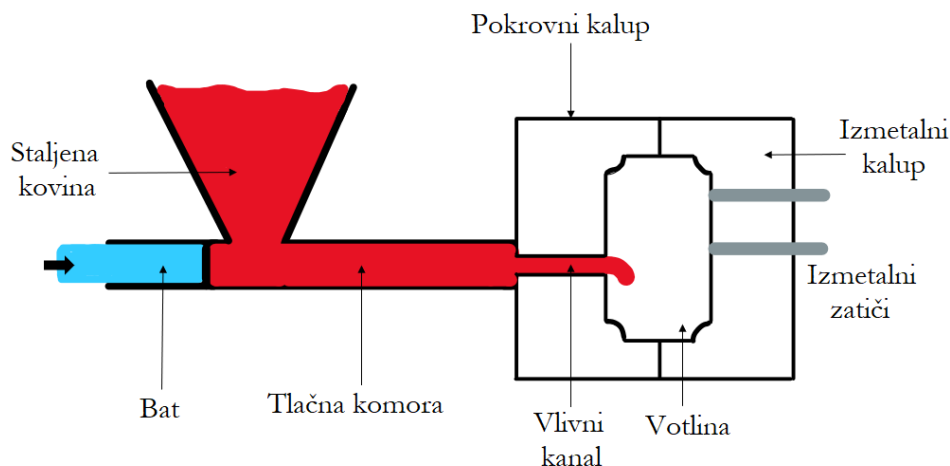
Tlačno vlivanje je proizvodni proces, ki se pogosto uporablja za množično proizvodnjo kompleksnih in natančnih kovinskih komponent. Spada v kategorijo postopkov litja kovin, kjer se staljena kovina potisne v votlino kalupa pod visokim pritiskom, da se ustvarijo zapletene oblike z ozkimi tolerancami. Ta metoda je še posebej priljubljena v avtomobilski, letalski in vesoljski industriji ter industriji zabavne elektronike zaradi zmožnosti izdelave visokokakovostnih, podrobnih delov v velikih količinah (Brevick idr., 2006).

Postopek tlačnega litja vključuje uporabo kalupov za večkratno uporabo, običajno izdelanih iz jekla, ki so znani kot matrice. Dve glavni vrsti tlačnega litja sta tlačno litje v topli komori in tlačno litje v hladni komori. Pri tlačnem litju z vročo komoro, primernem za kovine z nizkim tališčem, kot je cink, se kovina tali v stroju za ulivanje, medtem ko se pri tlačnem litju v hladni komori, ki se uporablja za kovine z višjim tališčem, kot sta aluminij in magnezij, staljena kovina vlije v stroj iz zunanje peči. Pri tlačnem litju se lahko uporabljajo različne kovine in zlitine, odvisno od posebnih zahtev aplikacije. Aluminij, cink in magnezij so zaradi svojih ugodnih mehanskih lastnosti in lastnosti litja med najpogosteje uporabljenimi materiali. Tlačno litje aluminija je v avtomobilski industriji razširjeno za lahke komponente, medtem ko je tlačno litje cinka prednostno za zapletene oblike in stroškovno učinkovitost. Magnezijevo tlačno litje postaja vse bolj priljubljeno zaradi svoje lastnosti, da je lahko, in vse večje uporabe v vesoljskih aplikacijah (Grandt, 2005).

Tlačno litje ponuja številne prednosti, vključno z visoko natančnostjo, odlično površinsko obdelavo in možnostjo izdelave kompleksnih oblik z majhnimi tolerancami. Postopek je zelo učinkovit za obsežno proizvodnjo, saj zagotavlja hiter in stroškovno učinkovit način proizvodnje.

Vendar pa ima, kot vsak proizvodni proces, tudi tlačno litje tako pozitivne kot negativne vidike. Pozitivno je, da tlačno litje omogoča proizvodnjo vzdržljivih in dimenzijsko natančnih komponent na poenostavljen in učinkovit način. Zaradi visoke hitrosti proizvodnje je primeren za izpolnjevanje zahtev množične proizvodnje. Po drugi strani pa je tlačno litje povezano z določenimi izzivi. Stroški orodja za tlačno litje so lahko visoki, zlasti za kompleksne dele, in začetna nastavitve lahko zahteva veliko naložbo. Poleg tega postopek zaradi teh stroškov orodja morda ni tako primeren za proizvodnjo majhnega obsega ali proizvodnjo prototipov.

Shematsko je naprava za tlačno vlivanje prikazana na Sliki 5.



Slika 5: Shematski prikaz naprave za tlačno vlivanje

Vir: WayKen Rapid Manufacturing, 2022

Vpliv na okolje: z vidika vpliva na okolje ima postopek tlačnega litja pozitivne in negativne posledice. Učinkovitost tlačnega litja pri izdelavi velikih količin komponent prispeva k splošnemu ohranjanju virov. Vendar sta pridobivanje in predelava kovin, zlasti aluminija, lahko energetska intenzivna in lahko povzročita

okoljska vprašanja. Odstranjevanje stranskih produktov litja, kot so odpadne kovine ali odvečni material, prav tako zahteva skrben premislek za zmanjšanje vpliva na okolje.

Skratka, tlačno litje je zelo učinkovit proizvodni postopek za množično proizvodnjo zapletenih in natančnih kovinskih komponent. Izbira materialov, vključno z aluminijem, cinkom in magnezijem, je odvisna od posebnih zahtev uporabe. Medtem ko tlačno litje nudi prednosti v smislu učinkovitosti in stroškovne učinkovitosti, okoljski vidiki izhajajo iz energetsko intenzivnega pridobivanja in predelave kovin. Nenehne raziskave in inovacije so namenjene reševanju teh izzivov, s čimer si prizadevajo narediti tlačno litje bolj trajnostno in okolju prijaznejše.

3.6 Ogljični odtis

Ogljični odtis se nanaša na skupno količino toplogrednih plinov, predvsem ogljikovega dioksida (CO₂) in drugih enakovrednih emisij, neposredno ali posredno povezanih s posameznikom, organizacijo, izdelkom ali dejavnostjo v njihovem življenjskem ciklu. Je merilo vpliva na okolje v smislu podnebnih sprememb, ki odraža skupni prispevek h kopičenju toplogrednih plinov v ozračju.

Razumevanje in izračun ogljičnih odtisov sta bistvenega pomena, saj zagotavljata kvantitativno merilo vpliva subjekta na podnebne spremembe. Z naraščajočo ozaveščenostjo o okoljskih vprašanjih in potrebo po trajnostnih praksah posamezniki, podjetja in vlade priznavajo pomen ocenjevanja in zmanjševanja svojih ogljičnih odtisov za ublažitev učinkov podnebnih sprememb.

Običajno uporabljene metode za izračun ogljičnih odtisov vključujejo ISO/TS 14067, standard za izdelke protokola o toplogrednih plinih, PAS 2050, (Greenhouse gas protocol, 2004), LCA (Life cycle assessment):

- ISO/TS 14067 je tehnična specifikacija, ki jo je razvila Mednarodna organizacija za standardizacijo (ISO) za obravnavanje kvantifikacije in sporočanja ogljičnega odtisa izdelkov. Zagotavlja smernice za organizacije za sistematično merjenje in poročanje o emisijah toplogrednih plinov, povezanih z življenjskim ciklom izdelka. Z vzpostavitvijo standardizirane metodologije ISO/TS 14067 pomaga podjetjem pri spodbujanju

preglednosti, omogočanju primerjav in sprejemanju premišljenih odločitev za zmanjšanje njihovega vpliva na okolje. Podpira prizadevanja za trajnost s spodbujanjem doslednega pristopa k oceni ogljičnega odtisa, kar na koncu prispeva k globalnim pobudam za blažitev podnebnih sprememb (ISO, 2013).

- Standard za izdelke protokola o toplogrednih plinih, ki sta ga razvila Svetovni inštitut za vire (WRI) in Svetovni poslovni svet za trajnostni razvoj (WBCSD), je splošno priznan okvir za ocenjevanje in poročanje o emisijah toplogrednih plinov, povezanih z izdelki. Zagotavlja smernice za organizacije za izvajanje ocen življenjskega cikla, količinsko opredelitev emisij in sporočanje o okoljskem vplivu njihovih izdelkov. S sprejetjem celovitega pristopa ta standard omogoča preglednost in doslednost pri določanju ogljičnega odtisa izdelkov, pomaga podjetjem pri trajnostnem odločanju in prispeva h globalnim prizadevanjem za reševanje podnebnih sprememb (WRI & WBCSD, 2018).
- PAS 2050, javno dostopna specifikacija, ki jo je razvil British Standards Institution (BSI), zagotavlja metodologijo za ocenjevanje emisij toplogrednih plinov v življenjskem ciklu blaga in storitev. Organizacijam ponuja smernice za količinsko opredelitev emisij iz celotnega življenjskega cikla izdelka ter spodbuja preglednost in doslednost pri merjenju ogljičnega odtisa. PAS 2050 pomaga podjetjem razumeti in ublažiti njihov vpliv na okolje, olajša sprejemanje odločitev na podlagi informacij in prispeva k trajnostnim praksam (BSI, 2008).
- LCA (Life cycle assessment) je celovita metoda, ki ocenjuje okoljski vpliv izdelka skozi njegov celoten življenjski cikel, vključno s pridobivanjem surovin, proizvodnjo, uporabo in odlaganjem. Upošteva dejavnike, kot so poraba energije, emisije, izčrpavanje virov in nastajanje odpadkov. LCA se lahko uporablja za primerjavo okoljske učinkovitosti različnih procesov in materialov 3D tiskanja.

4 Aplikativni del

V aplikativnem delu prispevka se bomo osredotočili na izračun ogljičnega odtisa med postopkom 3D tiskanja in primerjavo z metodo tlačnega litja. Za praktične namene bomo zgradili preprost izdelek. Izdelali bomo značko za konferenco, ki jo prikazuje Slika 6. Za konstrukcijo bomo uporabili material PLA. Metoda, ki jo bomo uporabili,

pa je metoda tiskanja staljenega materiala. To metodo bomo ovrednotili s področja stroškov, uporabljenih materialov, časa, kakovosti in, kar je najpomembnejše, ogljičnega odtisa.

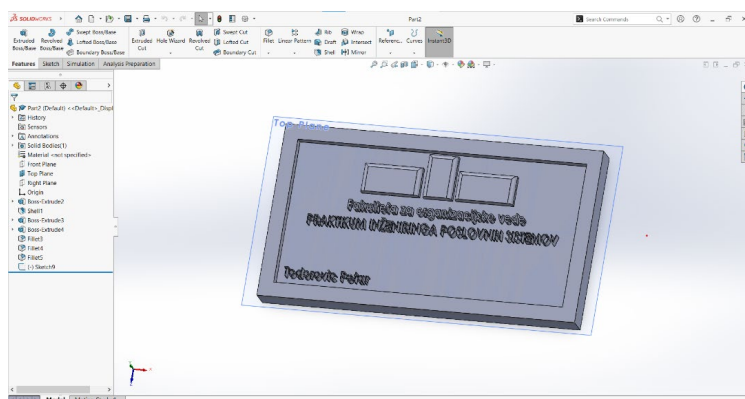


Slika 6: Prikaz izdelka (značke za konferenco)

Vir: lasten

4.1 Proces izdelave izdelka z FDM tehnologijo 3D tiskanja

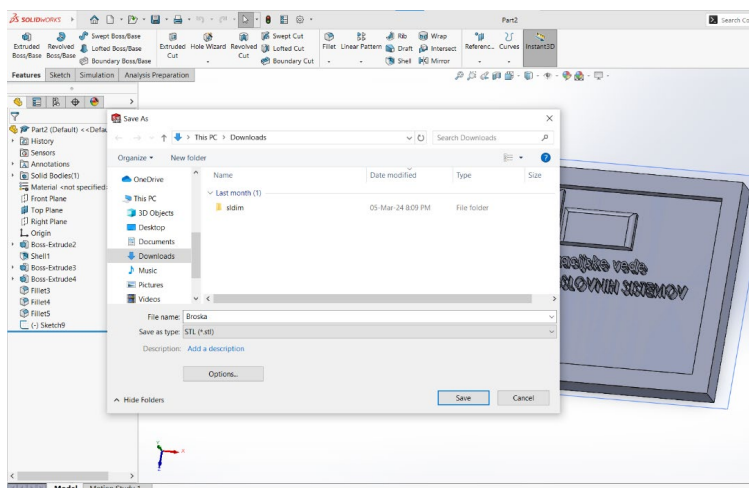
Za načrtovanje izdelka je bilo uporabljeno programsko orodje SolidWorks. Pri načrtovanju izdelka je bilo možno uporabiti zelo preprosto zasnovo. Na Slikah 7, 8 in 9 je prikazano načrtovanje izdelka z orodjem SolidWorks.



Slika 7: Prikaz uporabe orodja SolidWorks pri načrtovanju izdelka (1. del)

Vir: lasten

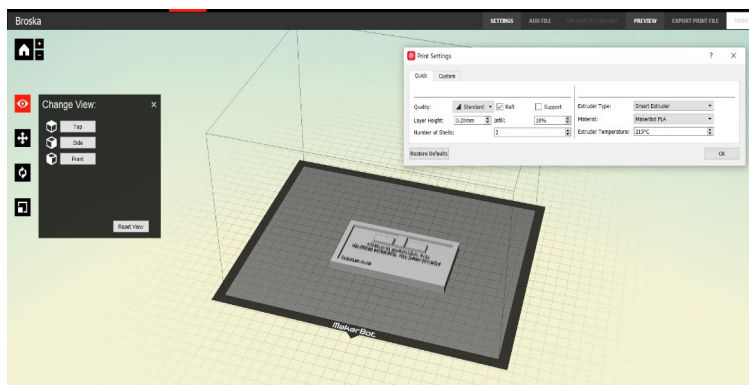
Ko je postopek oblikovanja končan, se shrani kot datoteka .stl, ki jo uporablja večina 3D tiskalnikov.



Slika 8: Prikaz uporabe orodja SolidWorks pri načrtovanju izdelka (2. del)

Vir: lasten

Za tiskanje izdelka smo uporabili 3D tiskalnik MakerBot Replicator+. Datoteko smo naložili v program MakerBot Desktop, ki nam je dal skico izdelka. Po vstavitvi datoteke program izvede analizo časa, potrebnega za izdelavo izdelka, in priporoči potrebne parametre. Pri določanju parametrov lahko na kratko simuliramo proizvodnjo procesa ali pa proces takoj zaženemo.



Slika 9: Prikaz uporabe orodja SolidWorks pri načrtovanju izdelka (3. del)

Vir: lasten

Program je izračunal, da izdelava te broške zahteva približno 31g materiala, v tem primeru PLA filamenta, potreben čas pa je 1h 54m. Temu času prištejemo še čas, da se glava tiskalnika segreje na zeleno temperaturo, v tem primeru 215 stopinj Celzija, in čas, da se izdelek ohladi, da ga lahko odstranimo s površine. Zato bomo čas zaokrožili na 2 uri. 900g PLA filamenta premera 1,75mm stane 32€. Kar pomeni, da bi bila cena izdelave ene take broške, ki zahteva 31g materiala, 1,1€. Če bi natisnili 100 izvodov teh brošur za konferenco, bi bila cena 110€, brez upoštevanja cene tiskalnikov, delovanja tiskalnikov in elektrike ter nekaterih nepredvidenih okoliščin, kot je potreba po menjavi delov tiskalnikov, ker so deli 3D tiskalnikov nagnjeni k lahki obrabi.

Tiskalnik, uporabljen za tiskanje tega izdelka, je MakerBot Replicator+. MakerBot replicator+ je kitajski tiskalnik, zasnovan v Brooklynu. Širok je 52 cm, dolg 44 cm in visok 41 cm. Teža je 18 kg, napajalna napetost, potrebna za ta tiskalnik, je 100-240 V. Uporablja eno glavo s širino šobe 0,4 mm in ima delovno površino širine 22 cm, dolžine 16 cm in višine 20 cm. Ta tiskalnik bere formate .stl, stp in makerbot .makerbot.



Slika 10: 3D tiskalnik Makerbot Replicator+

Vir: lasten

4.2 Izračun ogljičnega odtisa

Ena izmed metod izračuna ogljičnega odtisa izdelka je LCA (Life cycle assessment). Ta metoda upošteva različne faze v življenjskem ciklu izdelka, vključno s pridobivanjem surovin, proizvodnjo, prevozom, uporabo in obdelavo ob koncu življenjske dobe.

- Prvi korak je pridobivanje surovin.

Tu se odločimo za material, ki bo uporabljen za tisk izdelka. V tem primeru je broška narejena iz polilaktidne kisline, PLA. PLA filament je pridobljen iz koruznega škroba ali sladkornega trsa. Ta proces vključuje gojenje pridelkov, žetev, prevoz do predelovalnih obratov in pretvorbo v PLA rezin. Energija, potrebna za proizvodnjo PLA, je odvisna od več dejavnikov, kot so procesna tehnologija, transport ... V povprečju 1 kg PLA rezina zahteva 16 kWh (Guo in Crittenden, 2011).

Predelava PLA rezina v filament zahteva ekstruzijo, ki na splošno zahteva segrevanje rezina in strojev. V povprečju 1 kg PLA filameta zahteva 17 kWh (Guo in Crittenden, 2011).

V našem primeru potrebujemo 31g PLA filameta. Energija, potrebna za njegovo proizvodnjo, bi bila

$$(16 \text{ kWh/kg} + 17 \text{ kWh/kg}) * (31 \text{ g} / 1000 \text{ g}) = 1.023 \text{ kWh} \quad (1)$$

(Delimo s 1000, da dobimo težo v kilogramih.)

Emisija, povezana s porabljeno energijo, je odvisna od uporabljenega vira energije. Toda v povprečju je faktor emisije na kWh 0,5 kgCO₂ (Elbadawi idr., 2023). Za izračun emisije pomnožimo porabljeno energijo z emisijskim faktorjem

$$1.023 \text{ kWh} * 0,5 \text{ kgCO}_2/\text{kWh} = 0,5115 \text{ kgCO}_2 \quad (2)$$

0,5115 kgCO₂ je skupni ogljični odtis za proizvodnjo 31g PLA materiala, ki smo ga uporabili za izdelavo broške.

- Drugi korak je izračun emisij v proizvodnem procesu.

Za izračun ogljičnega odtisa v proizvodnem procesu moramo najprej določiti čas, potreben za izdelavo izdelka. V našem primeru znaša 2 uri.

Uporabljeni MakerBot Replicator+ je v povprečju porabil 182 vatov na uro. To bomo pretvorili v kilovate na uro, kar je 0,182 kWh. Čas izdelave izdelka je 2h, zato bomo dobljeno energijo pomnožili z 2 in dobili 0,364 kWh, ki so potrebne za izdelavo naših izdelkov na tem 3D tiskalniku.

Povprečni emisijski faktor 3D tiskalnikov je 0,08 kg CO₂ na kWh porabljene energije v procesu (Elbadawi idr., 2023).

Za izračun končne emisije pomnožimo porabljeno energijo z emisijskim faktorjem.

$$0.364 \text{ kWh} * 0.08 \text{ kgCO}_2 = 0.02912 \text{ kgCO}_2 \quad (3)$$

- Naslednji dejavnik je prevoz materiala.

PLA filament, ki ga uporablja tiskalnik MakerBot replicator+, ki smo ga uporabili, je bil izdelan na Kitajskem. V tem primeru bomo izračunali emisijo v procesu transporta filameta iz Kitajske v Slovenijo. Predpostavili bomo, da je bila žarilna nitka prepeljana po morju, ker ima manj emisij kot zračni prevoz. Pomorski promet med Slovenijo in Kitajsko znaša 15.360 kilometrov. Za izračun ogljičnega odtisa celotnega transportnega procesa pomnožimo razdaljo v kilometrih s težo izdelka (v našem primeru 31 gramov) in emisijskim faktorjem. Široki faktor emisije je v povprečju 0,1 kg CO₂ na tonski kilometer (Freightosco2 Emissions Sea and Air Freight Calculator, 2023).

$$(15360 \text{ km} * 0.031 \text{ kg} * 0.1 \text{ kgCO}_2 \text{ na tonski kilometer}) / 1000 = 0.0478 \text{ kgCO}_2 \quad (4)$$

(Delili smo s 1000, da smo preračunali v kilograme.)

- Naslednji dejavnik, ki ga moramo upoštevati, je emisija med uporabo izdelka.

Glede na to, da je naš izdelek preprosta broška brez električnih komponent in brez potrebne energije za njeno vzdrževanje, emisije tukaj ne bomo izračunali.

- Končna faza je izračun emisij med odlaganjem ali recikliranjem izdelka.

Za izračun ogljičnega odtisa v tej fazi moramo izračunati emisijo med transportom izdelka IN emisijo med recikliranjem izdelka.

Predvidevamo, da bo ta izdelek recikliran v RCERO Ljubljana (Regionalni center za ravnanje z odpadki). RCERO je oddaljen 40 km. Povprečni emisijski faktor za promet je 0,2 kg CO₂ na kilometer (CO₂ emission performance standards for cars and vans, European Union).

$$40km * 0.2kgCO_2 = 8kg CO_2 \quad (5)$$

Seveda je potrebno upoštevati, da izdelek predstavlja le majhen del mase izdelkov, prepeljanih v razgradnjo. Izdelek ima maso 31 g, ocenimo pa, da tovornjak v povprečju prevažja 5000 kg odpadkov. Kar nas pripelje do številke od 0,00005 kg CO₂.

$$8kg CO_2 * 0,031 kg/5000 kg = 0,00005 kg CO_2 \quad (6)$$

Predvidevamo, da bo vseh 31 g filameta recikliranih. Težo filameta PLA v kilogramih bomo pomnožili s faktorjem emisije pri recikliranju. Ta faktor v povprečju znaša 0,6 kg CO₂ na kilogram PLA filameta (Benavides, Lee in Zaré-Mehrierdi, 2020).

$$0.031 kg * 0.6 kgCO_2 /kg = 0.0186 kgCO_2 \quad (7)$$

Končni ogljični odtis bomo dobili s seštevanjem teh dveh vrednosti.

$$0.00005 CO_2 + 0.0186 kgCO_2 = 0.01865 kgCO_2 \quad (8)$$

Da bi dobili končni ogljični odtis proizvodnje tega izdelka na 3D tiskalniku, seštejemo vse vrednosti, pridobljene v posameznih fazah.

$$0,5115 \text{ kgCO}_2 + 0,02912 \text{ kgCO}_2 + 0,0478 \text{ kgCO}_2 + 0,01865 \text{ kgCO}_2 = 0,60707 \text{ kgCO}_2 \quad (9)$$

4.3 Primerjava metod 3D tiskanja in tlačnega litja na izdelku

Tlačno litje je postopek litja kovin, za katerega je značilno potiskanje staljene kovine pod visokim pritiskom v votlino kalupa. Kalupna votlina je ustvarjena z dvema utrjenima orodnima jeklenima matricama, ki sta bili strojno obdelani v obliko in med postopkom delujeta podobno kot kalup za brizganje.

Da bi primerjali ti dve proizvodni metodi in njun ogljični odtis, bomo za primer vzeli izdelek z enako maso. V tem primeru bomo vzeli izdelek, ki tehta 50 g.

– 3D tiskanje

Iz izračunov, ki smo jih prejeli v zadnjem primeru, je za 31 g PLA filamenta emisija 0,02325 kgCO₂. Za 50 g istega materiala bo emisija 0,0375 kgCO₂.

V tem primeru bomo predpostavili, da smo uporabili isti tiskalnik kot za izdelavo broške. Izdelava tega izdelka traja 3 ure. V 3 urah naš tiskalnik porabi 0,546 kWh.

Povprečni emisijski faktor 3D tiskalnikov je 0,08 kgCO₂ na kWh porabljene energije v procesu.

Za izračun končne emisije pomnožimo porabljeno energijo z emisijskim faktorjem.

$$0,546 \text{ kWh} * 0,08 \text{ kgCO}_2 = 0,04368 \text{ kgCO}_2 \quad (10)$$

Ker ne moremo natančno določiti vseh parametrov, povezanih s transportom za aluminij (razdalja, način in pot transporta, vrsta goriva), se bomo v primerjavi ogljičnega odtisa za obe metodi omejili na fazi priprave materiala in izdelave produkta. Potrebno pa je upoštevati, da s tem ne dobimo popolne informacije o ogljičnem odtisu za celotni življenjski cikel.

Skupni ogljični odtis pri izdelavi 50g izdelka po metodi 3D tiska s PLA filamentom znaša

$$0.0375 \text{ kgCO}_2 + 0.04368 \text{ kgCO}_2 = 0.08118 \text{ kgCO}_2 \quad (11)$$

– Tlačno litje

Povprečna poraba energije za proizvodnjo izdelkov iz tlačnega litja aluminija je 1.6 kWh / KG (Heinemann, 2016). Povprečni emisijski faktor je 0,5 kgCO₂ na kWh (Neto idr., 2008). Skupni izpust iz porabljene energije bi bil

$$1.6 \text{ kWh} * 0,5 \text{ kgCO}_2/\text{kWh} = 0.8 \text{ kgCO}_2 \quad (12)$$

V tej kalkulaciji je zajet proces vlivanja. Da bi dobili končni ogljični odtis proizvodnje tega izdelka, moramo sešteti emisije iz porabljene energije z emisijami iz materialne proizvodnje.

Emisija na kilogram aluminija je 0,5 kg CO₂, za 50g je (Neto idr., 2008).

$$(0,5 \text{ kgCO}_2 / 1000) * 50 = 0,025 \text{ kgCO}_2 \quad (13)$$

(Delili smo s 1000, da smo dobili emisijo na gram, nato pa smo jo pomnožili s 50 g, koliko porabimo za izdelavo tega izdelka.)

Ko dobljene rezultate seštejemo, dobimo končni ogljični odtis proizvodnje tega izdelka.

$$0.8 \text{ kgCO}_2 + 0,025 \text{ kgCO}_2 = 0.825 \text{ kgCO}_2 \quad (14)$$

Ocenjeni ogljični odtis za proizvodnjo istega izdelka (50 g) z uporabo 3D tiskanja s PLA filamentom za 3 ure je približno 0,08118 kgCO₂, medtem ko je ogljični odtis za tlačno litje z aluminijem približno 0.825kgCO₂.

Ta primerjava dokazuje, da ima 3D tiskanje s filamentom PLA za 3 ure bistveno nižji ogljični odtis v primerjavi s tlačnim litjem z aluminijem za proizvodnjo istega izdelka.

Zaradi lažje primerjave smo v izračunu primerjali izdelka z enako maso (50 g). Potrebno pa je upoštevati, da bo izdelek iz PLA pri enaki masi zaradi manjše gostote PLA (1,25 kg/dm³) imel ustrezno večji volumen kot izdelek iz aluminija (gostota 2,7 kg/dm³).

5 Zaključek

Namen pričujočega prispevka je predstavitev različnih oblik 3D tiskanja ter njihovih prednosti in slabosti. Zanimala nas je učinkovitost 3D tiskanja kot proizvodne metode ter vpliva na okolje, kjer smo se predvsem osredotočili na ogljični odtis 3D tiskanja. Predstavili smo tudi primerjavo 3D tiskanja z nekaterimi tradicionalnimi proizvodnimi metodami, kot je tlačno litje. Da bi vse preverili tudi v praksi, smo izdelali izdelek na 3D tiskalniku in izračunali ogljični odtis za ta izdelek. Na drugem primeru smo 3D tiskanje primerjali z metodo tlačnega litja in prišli do zaključka, da je z okoljskega vidika 3D tiskanje manj škodljivo za okolje kot klasična metoda proizvodnje. Poleg tega sta med prednostmi 3D tiska tako manjša količina odpadkov zaradi uporabe točno določene količine materiala, potrebne za izdelavo izdelka, kot tudi nižja poraba energije, ki je potrebna za izdelavo izdelka. Med uporabnimi prednostmi 3D tiskanja je potrebno izpostaviti veliko možnost optimizacije dizajna in personalizacije izdelkov. Kljub vsem tem prednostim pa 3D tiskanje še vedno ne more nadomestiti drugih proizvodnih metod. Čeprav se je obseg razpoložljivih materialov za 3D-tiskanje razširil, tradicionalne metode proizvodnje še vedno ponujajo širši izbor materialov z različnimi lastnostmi, vključno s kovinami, keramiko in kompoziti. Določene aplikacije lahko zahtevajo materiale, ki niso primerni za 3D tiskanje, kar omejuje njegovo sprejetje v nekaterih panogah. Čeprav se je tehnologija 3D tiskanja v zadnjih letih zelo razvila, so še vedno potrebni nadaljnji razvoj in inovacije, da se premagajo obstoječe omejitve in razširijo zmogljivosti tehnologije. Raziskave novih materialov, metod tiskanja in tehnik obdelave lahko dodatno razširijo obseg uporabe 3D tiskanja. Metoda se je pokazala kot zelo uporabna predvsem pri izdelavi prototipov, unikatnih izdelkov ali pa majhnih serij. Pri velikih serijah izdelkov pa bodo verjetno še vedno v prednosti klasične metode, kot sta tlačno litje ali brizganje.

Literatura

- Aluminum casting alloys. (2004). Aluminum Alloy Castings, 7-20. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.aacppa.t51140007>
- ASM international. (2006). Encyclopedic Dictionary of Polymers, 69-69. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30160-0_812
- Benavides, P.T., Lee, U., & Zarè-Mehrjerdi, O. (2020) 'Life cycle greenhouse gas emissions and energy use of polylactic acid, bio-derived polyethylene, and fossil-derived polyethylene', *Journal of Cleaner Production*, 277, p. 124010. doi:10.1016/j.jclepro.2020.124010.
- Camargo, J. C., Machado, Á. R., Almeida, E. C., & Silva, E. F. (2019). Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(5-8), 2423-2443. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03532-5>
- Campbell, T. A., & Ivanova, O. S. (2013). 3D printing of multifunctional nanocomposites. *Nano Today*, 8(2), 119-120. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2012.12.002>
- Coudhury, D., Ponneganti, S., Radhakrishnanand, P., Murty, U.S., Banerjee, S. (2023). Selective laser sintering additive manufacturing of solid oral dosage form: Effect of laser power and hatch spacing on the physico-technical behaviour of sintered printlets. *Applied Materials Today*, 35, 101943. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.101943>
- CO₂ emission performance standards for cars and Vans (no date) Climate Action. Available at: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en (Accessed: 04 April 2024).
- Cuiffo, M. A., Snyder, J., Elliott, A. M., Romero, N., Kannan, S., & Halada, G. P. (2017). Impact of the fused deposition (FDM) printing process on Polylactic acid (PLA) chemistry and structure. *Applied Sciences*, 7(6), 579. <https://doi.org/10.3390/app7060579>
- Dormer, A., Finn, D. P., Ward, P., & Cullen, J. (2013). Carbon footprint analysis in plastics manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 51(51), 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.01.014>
- Elbadawi, M., Basit, A.W., & Gaisford, S. (2023) 'Energy consumption and carbon footprint of 3D printing in pharmaceutical manufacture', *International Journal of Pharmaceutics*, 639, p. 122926. doi:10.1016/j.ijpharm.2023.122926.
- FreightosCO₂ Emissions Sea & Air Freight Calculator (2023) Freightos. Available at: <https://www.freightos.com/freight-resources/air-sea-freight-co2-emissions-calculator/> (Accessed: 03 April 2024).
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). Direct digital manufacturing. *Additive Manufacturing Technologies*, 378-399. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9_14
- Guo, Q., & Crittenden, J. C. (2011). An energy analysis of polylactic acid (PLA) produced from corn grain and corn stover integrated system. *An Energy Analysis of Polylactic Acid (PLA) Produced From Corn Grain and Corn Stover Integrated System*. <https://doi.org/10.1109/issst.2011.5936897>
- Heinemann, T. (2016) 'Energy and resource efficiency in aluminium die casting', *Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management* [Preprint]. doi:10.1007/978-3-319-18815-7.
- Huang, J, Qin, Q. & Wang, J. (2020). A Review of Stereolithography: Processes and Systems. *Processes*, 8(9), 1138. <https://doi.org/10.3390/pr8091138>
- IMAGINE THAT 3D (2015), Laminated Object Manufacturing (LOM), IMAGINE THAT 3D LLC, Pridobljeno 7.4. 2024 na <https://www.imagethat-3d.com/>
- Kogovsek, J. (2021). Okoljski odtis tehnologije 3D tiska izdelkov (J. Kogovsek). Univerza v Mariboru.
- Kruth, J., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L., & Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), 26-36. <https://doi.org/10.1108/13552540510573365>

- Liao, Y., Liu, C., Coppola, B., Barra, G., Di Maio, L., Incarnato, L., & Lafdi, K. (2019). Effect of porosity and crystallinity on 3D printed PLA properties. *Polymers*, 11(9), 1487. <https://doi.org/10.3390/polym11091487>
- Malmodin, J., & Lundén, D. (2018). The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M sectors 2010–2015. *Sustainability*, 10(9), 3027. <https://doi.org/10.3390/su10093027>
- Mertz, L. (2013). New World of 3-D printing offers "Completely new ways of thinking": Q&A with author, engineer, and 3-D printing expert hod Lipson. *IEEE Pulse*, 4(6), 12-14. <https://doi.org/10.1109/mpul.2013.2279615>
- Monson, L., Braunwarth, M., & Extrand, C. W. (2007). Moisture absorption by various polyamides and their associated dimensional changes. *Journal of Applied Polymer Science*, 107(1), 355-363. <https://doi.org/10.1002/app.27057>
- Neto, B. et al. (2008) 'Modelling the environmental impact of an aluminium pressure die casting plant and options for control', *Environmental Modelling & Software*, 23(2), pp. 147–168. doi:10.1016/j.envsoft.2007.05.005.
- Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. S. (2018). Additive manufacturing techniques in manufacturing -an overview. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3873-3882. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.642>
- Rahim, R., & Abdul Raman, A. A. (2017). Carbon dioxide emission reduction through cleaner production strategies in a recycled plastic resins producing plant. *Journal of Cleaner Production*, 141, 1067–1073. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.023>
- Sher, D. (2023, February 15). How toxic are ABS & PLA fumes? 3Dsafety.org examines VOCs. 3D Printing Industry. <https://3dprintingindustry.com/news/toxic-abs-pla-fumes-3dsafety-org-inquires-vocs-60796/>
- Shuaib, M., Haleem, A., Kumar, S., & Javaid, M. (2021). Impact of 3D Printing on the environment: A literature-based study. *Sustainable Operations and Computers*, 2, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.04.001>
- Tonini, D., Schrijvers, D., Nessi, S., Garcia-Gutierrez, P., & Giuntoli, J. (2021). Carbon footprint of plastic from biomass and recycled feedstock: methodological insights. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01853-2>
- Torrado Perez, A. R., Roberson, D. A., & Wicker, R. B. (2014). Fracture surface analysis of 3D-Printed tensile specimens of novel ABS-based materials. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 14(3), 343-353. <https://doi.org/10.1007/s11668-014-9803-9>
- Turney, D. (2021, August 31). History of 3D Printing: It's Older Than You Think. *Autodesk.com*. <https://www.autodesk.com/design-make/articles/history-of-3d-printing>
- Vaezi, M., Seitz, H., & Yang, S. (2013). Erratum to: A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), 1957-1957. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4962-5>
- WayKen Rapid Manufacturing (2022). Automotive Die Casting Overview: Benefits, Materials, and Trend. Pridobljeno 7.4. 2024 na WayKen Rapid Manufacturing. <https://autoprotoway.com/automotive-die-casting-overview/>
- Yin, H., Qu, M., Zhang, H., & Lim, Y. (2018). 3D Printing and Buildings: A Technology Review and Future Outlook. *Technology | Architecture + Design*, 2(1), 94–111. <https://doi.org/10.1080/24751448.2018.1420968>