

VPLIV 3D TISKANJA NA ZDRAVJE

PODROČJE: EKOLOGIJA Z VARSTVOM OKOLJA
RAZISKOVALNA NALOGA

AVTOR: Anže Jaklič

9. razred

Mentorica: Tatjana Keržan, prof. biologije

Šolsko leto: 2021/2022

OŠ DANILE KUMAR, Ljubljana

KAZALO VSEBINE

KAZALO VSEBINE	3
KAZALO SLIK	4
KAZALO TABEL	7
ZAHVALA	8
POVZETEK.....	9
1 UVOD	10
1.1 Motivacija.....	10
1.2 Namen, cilji in hipoteze	11
1.3 Metodologija dela.....	11
2 TEORETIČNI DEL	12
2.1 3D tiskanje.....	12
2.1.1 Uporaba in prednosti 3D tiskanja	12
2.1.2 Metode 3D tiskanja	13
2.2 Zrak	19
2.2.1 Zunanja onesnaževala	19
2.2.2 Notranji zrak	20
2.2.3 Prašni delci.....	20
2.2.4 Lahkohlapni ogljikovodiki.....	22
3 RAZISKOVALNI DEL	23
3.1 3D tiskanje in uporabljeni materiali	23
3.2 Merjenje izpustov	29
3.3 Priprava ocene tveganja za zdravje	33
4 REZULTATI.....	35
4.1 Meritve lahkohlapnih ogljikovodikov	35
4.2 Meritve prašnih delcev	40
4.3 Ocena tveganja za zdravje.....	43
5 RAZPRAVA	46
6 ZAKLJUČKI.....	48
7 KAZALO VIROV	49
7.1 Pisni viri	49
7.2 Spletni viri.....	49

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz različnih vrst 3D tiskanja (Proces FDM: ciljno nalaganje snovi (levo), SLA: stereolitografija (sredina) in SLS: selektivno lasersko sintranje (desno))	13
Slika 2: Prikaz delovanja stereolitografskih 3D tiskalnikov.....	13
Slika 3: Proces končne obdelave stereolitografskih izdelkov (levo čiščenje in desno končno strjevanje).....	14
Slika 4: Grafični prikaz metode selektivnega laserskega sintranja.....	15
Slika 5: Prikaz različnih načinov premikanja FDM 3D tiskalnika	16
Slika 6: Prikaz poti materiala	16
Slika 7: Fotografija tiskalnika z dvema vzporednima glavama	17
Slika 8: Prikaz delovanja mešalne šobe (levo), fotografija šobe za mešanje barv (desno)	18
Slika 9: Prikaz onesnaževal v zaprtih prostorih in njihovih virov: 1. Tobačni dim; 2. Alergeni (vključno s cvetnim prahom); 3. Ogljikov monoksid (CO) in dušikov dioksid (NO ₂); 4. Vlaga; 5. Kemikalije; 6. Radon	20
Slika 10: Prikaz globine prodora prašnih delcev glede na njihovo velikost	22
Slika 11: Postavitve 3D tiskalnika <i>Crealiti Ender 3</i>	23
Slika 12: Testni model: Set šestih šahovskih figuric v programskem rezalniku (zgoraj) in nekaj natisnjenih setov v različnih materialih (spodaj)	25
Slika 13: Nadomestna glava tiskalnika, ki je narejena v celoti iz kovine in omogoča tiskanje na višjih temperaturah.....	28
Slika 14: Približna slika skrajšane poti filamenta po teflonski cevki »direct drive«	29
Slika 15: Merilec zračnih izpustov <i>uHoo</i>	30
Slika 16: Grafični prikazi meritev v aplikaciji <i>uHoo</i>	31
Slika 17: Odprta (levo) in zaprta (desna) merilna komora	32
Slika 18: Komora s 3D tiskalnikom in <i>uHoo</i> merilcem.....	33
Slika 19: Izsek iz Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb z opredeljenimi dopustnimi koncentracijami notranjih onesnaževalcev zraka.....	34
Slika 20: Izpusti lahkih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela s poliaktično kislino (PLA)	35
Slika 21: Izpusti lahkih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela s poliaktično kislino (PLA) z dodatkom lesa	36
Slika 22: Izpusti lahkih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela z materialom polietilen tereftalat glikol (PETG)	36

Slika 23: Izpusti lahkihplapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela z materialom akrilonitril stiren akrilat (ASA).....	36
Slika 24: Izpusti lahkihplapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela z najlonom	37
Slika 25: Izpusti lahkihplapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela z materialom polivinil alkohol (PVA)	37
Slika 26: Izpusti lahkihplapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela z visokozmogljivim polistirenom (HIPS).....	37
Slika 27: Izpusti lahkihplapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela z materialom akrilonitril butadien stiren (ABS)	38
Slika 28: Izpusti lahkihplapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela s fleksibilnim materialom, sestavljenim iz poliuretana in dodatkov	38
Slika 29: Izpusti lahkihplapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela z najlonom z dodanimi karbonskimi vlakni	38
Slika 30: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela s poliaktično kislino (PLA)	40
Slika 31: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela s poliaktično kislino (PLA) z dodatkom lesa	40
Slika 32: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela z materialom polietilen tereftalat glikol (PETG).....	41
Slika 33: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela z materialom akrilonitril stiren akrilat (ASA)	41
Slika 34: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela z najlonom	41
Slika 35: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela z materialom polivinil alkohol (PVA)	42
Slika 36: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela z visokozmogljivim polistirenom (HIPS).....	42
Slika 37: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela z materialom akrilonitril butadien stiren (ABS)	42
Slika 38: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela s fleksibilnim materialom, sestavljenim iz poliuretana in dodatkov	43
Slika 39: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela z najlonom z dodanimi karbonskimi vlakni.....	43

Slika 40: Koncentracije lahkihhlapnih ogljikovodikov (VOC) za prostor s 30 kubičnimi metri zraka (moja soba) ob 3D tiskanju z različnimi materiali (PLA: poliaktična kislina, Les: PLA z dodatkom lesa, PETG: polietilen tereftalat glikol, ASA: akrilonitril stiren akrilat, PVA: polivinil alkohol, HIPS: visokozmogljivi polistiren, ABS akrilonitril butadien stiren, Karbonska vlakna: najlon z dodatkom karbonskih vlaken).....	44
Slika 41: Koncentracije lahkihhlapnih ogljikovodikov (VOC) za prostor s 576 kubičnimi metri zraka (učilnica) ob 3D tiskanju z različnimi materiali (PLA: poliaktična kislina, Les: PLA z dodatkom lesa, PETG: polietilen tereftalat glikol, ASA: akrilonitril stiren akrilat, PVA: polivinil alkohol, HIPS: visokozmogljivi polistiren, ABS akrilonitril butadien stiren, Karbonska vlakna: najlon z dodatkom karbonskih vlaken).....	44

KAZALO TABEL

Tabela 1: Osnovne lastnosti uporabljenih materialov (PLA: poliaktična kislina, les: PLA z dodatkom lesa, PETG: polietilen tereftalat glikol, ASA: akrilonitril stiren akrilat, PVA: polivinil alkohol, HIPS: visokozmogljivi polistiren, ABS akrilonitril butadien stiren, najlon z dodatkom karbonskih vlaken).....	24
Tabela 2: Osnovne nastavitve rezalnika <i>Ultimaker Cura</i> za obdelavo in rezanje testnega modela šahovskih figuric	26
Tabela 3: Priporočene temperature šobe za 3D tiskanje s testnimi materiali (PLA: poliaktična kislina, Les: PLA z dodatkom lesa, PETG: polietilen tereftalat glikol, ASA: akrilonitril stiren akrilat, PVA: polivinil alkohol, HIPS: visokozmogljivi polistiren, ABS akrilonitril butadien stiren, Karbonska vlakna: najlon z dodatkom karbonskih vlaken)	26
Tabela 4: Priporočene temperature podlage za tiskanje s testnimi materiali (PLA: poliaktična kislina, Les: PLA z dodatkom lesa, PETG: polietilen tereftalat glikol, ASA: akrilonitril stiren akrilat, PVA: polivinil alkohol, HIPS: visokozmogljivi polistiren, ABS akrilonitril butadien stiren, Karbonska vlakna: najlon z dodatkom karbonskih vlaken)	27
Tabela 5: Končne koncentracije lahkih hlapnih ogljikovodikov (VOC končna) v $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pri tiskanju testnega modela za posamezne materiale (PLA: poliaktična kislina, Les: PLA z dodatkom lesa, PETG: polietilen tereftalat glikol, ASA: akrilonitril stiren akrilat, PVA: polivinil alkohol, HIPS: visokozmogljivi polistiren, ABS akrilonitril butadien stiren, Karbonska vlakna: najlon z dodatkom karbonskih vlaken).....	39
Tabela 6: Skupna masa izpusta lahkih hlapnih organskih spojin (VOC) med 3D tiskanjem v poskusni komori in ocena izpustov v eni uri pri tiskanju testnega modela za posamezne materiale (PLA: poliaktična kislina, Les: PLA z dodatkom lesa, PETG: polietilen tereftalat glikol, ASA: akrilonitril stiren akrilat, PVA: polivinil alkohol, HIPS: visokozmogljivi polistiren, ABS akrilonitril butadien stiren, Karbonska vlakna: najlon z dodatkom karbonskih vlaken).....	39
Tabela 7: Čas 3D tiska, ki je potreben, da dosežemo mejno vrednost koncentracije hlapnih organskih spojin za prostor in učilnico v urah (PLA: poliaktična kislina, Les: PLA z dodatkom lesa, PETG: polietilen tereftalat glikol, ASA: akrilonitril stiren akrilat, PVA: polivinil alkohol, HIPS: visokozmogljivi polistiren, ABS akrilonitril butadien stiren, Karbonska vlakna: najlon z dodatkom karbonskih vlaken).....	45

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem:

- gospe mentorici, profesorici biologije, Tatjani Keržan za vse nasvete, ki mi jih je dala pred in med izdelavo raziskovalne naloge;
- Osnovni šoli Danile Kumar za financiranje uporabljenih filamentov;
- gospe profesorici slovenščine in zgodovine Brigiti Praznik Lokar za lektoriranje raziskovalne naloge;
- dr. Davidu Kocmanu, vodji Odseka za znanosti o okolju na Inštitutu Jožef Stefan, za izposojajo komore in merilca, uporabljenih v raziskavi, in za vse nasvete ob merjenju in izvedbi eksperimenta;
- doc. dr. Andreji Kuček s Katedre za javno zdravje Medicinske fakultete Univerze v Ljubljani, ki me je naučila osnov o povezavah med okoljem in zdravjem ter me založila z obilo uporabne literature, in
- staršem za pomoč pri fotografiranju, priganjanje k delu, njihove zamisli in vso spodbudo ob tiskanju, merjenju in pisanju te raziskovalne naloge.

POVZETEK

3D tiskanje je relativno nova hitro razvijajoča se oblika proizvodnje. V zadnjih letih je postala dostopna tudi za domačo uporabo. Pred dobrim letom sem si kupil 3D tiskalnik in začel z raziskovanjem sveta 3D tiska. Pri tem sem pa želel preizkusiti tudi čim več materialov. Med temi materiali pa je tudi nekaj takih, za katere je splošno znano, da ob tiskanju sproščajo določene zdravju škodljive snovi. Zanimalo me je, katere snovi se sproščajo ob tiskanju na domačem tiskalniku in pa predvsem, ali so koncentracije teh snovi tudi zdravju škodljive. Po pregledu literature sem ugotovil, da se pod najnevarnejše snovi uvrščajo materiali, ki vsebujejo stiren. Med njimi so najbolj običajni: akrilonitril butadien stiren (ABS), akrilonitril stiren akrilat (ASA) in visokozmogljivi polistiren (HIPS).

V raziskavi sem meril koncentracije lahkih organskih spojin (VOC) in koncentracijo manjših prašnih delcev ($PM_{2,5}$) po 3D tisku pri tisku z desetimi različnimi materiali. Za raziskavo sem uporabil nizkocenovni 3D tiskalnik *Creality Ender 3*. Za merjenje koncentracije VOC in $PM_{2,5}$ sem uporabil napravo za merjenje kvalitete notranjega zraka *uHoo*. Merilnik sem skupaj s 3D tiskalnikom postavil v komoro iz pleksi stekla in z vsakim materialom natisnil model šestih šahovskih figuric. Pridobljene podatke sem preračunal in primerjal z dopustnimi vrednostmi. Ugotovil sem, da 3D tiskanje na domačem tiskalniku z vidika $PM_{2,5}$ ni problematično. Po drugi strani pa po 3D tiskanju z različnimi materiali zaznamo izpuste VOC v tako majhnih koncentracijah, da pri domači rabi niso zdravju škodljivi.

Znanje, ki sem ga pridobil, mi bo pomagalo pri tem, da bom vedel, kako pogosto moram prostor zračiti ob tiskanju s posameznimi materiali, da le-to ne bo ogrožalo mojega zdravja. Podatke, ki jih imam, lahko uporabim tudi širše: preračunam jih lahko na poljubno število 3D tiskalnikov, poljubne modele ali poljubne velikosti prostora in tako v različnih situacijah predvidim varno 3D tiskanje.

Ključne besede: 3D tiskanje, lahki organski ogljikovodiki, manjši prašni delci, vpliv na zdravje

1 UVOD

3D tiskanje je sodoben način izdelave predmetov v trirazsežnem prostoru. S cenovno dostopnostjo tiskalnikov se je 3D tiskanje v zadnjih desetih letih začelo uveljavljati tudi v domačem in šolskem okolju. Pri 3D tisku uporabljamo različne materiale, pri nekaterih se med tiskanjem lahko v zrak sproščajo tudi nekatere za človeka škodljive snovi. Boljši 3D tiskalniki imajo zaprte gradilne komore, v katerih zajemajo in varno odvajajo škodljive snovi, pri večini domačih 3D tiskalnikov pa hlapi med tiskanjem prosto in nenadzorovano uhajajo v zrak.

1.1 Motivacija

Pred dobrim letom sem si kupil 3D tiskalnik in začel z raziskovanjem sveta 3D tiska. Naučil sem se osnov risanja v 3D programih in že tisk z osnovnimi materiali me je povsem navdušil – zelo hitro sem namreč ugotovil, da lahko z relativno majhnim časovnim in denarnim vložkom pri 3D tiskanju dosežemo presenetljive rezultate. Na internetu je veliko knjižnic, iz katerih lahko pridobim nešteto modelov uporabnih in okrasnih predmetov, s programi za 3D risanje pa lahko modele prilagodim ali pa jih oblikujem povsem po svoje. Danes lahko brez posebnega znanja o strojništvu sestavim in natisnem tudi kompleksne plastične mehanizme.

Za 3D tiskanje je možno uporabiti zelo veliko različnih materialov. Vsak material ima svoje specifične lastnosti, zaradi katerih je posebej primeren za tisk prav določenih predmetov. Kot vsak navdušen uporabnik 3D tiskalnika si seveda tudi jaz želim čim večje število možnih materialov preskusiti tudi sam. Pred uporabo novih materialov doma pa je moja starša zanimalo, ali je tiskanje s temi materiali lahko zdravju škodljivo. Nekateri izmed materialov so v določeni literaturi označeni kot nevarni in so odsvetovani za uporabo pri 3D tisku, drugi viri sicer trdijo, da so nenevarni in jih smemo uporabljati enako kot ostale materiale. Materiali, ki so najpogostejše označeni za problematične, so tisti, ki vsebujejo stiren. Med njimi so najbolj običajni: akrilonitril butadien stiren (ABS), akrilonitril stiren akrilat (ASA) in visokozmogljivi polistiren (HIPS). Stiren, ki je poglavitna sestavina teh materialov, je topen v acetonu, kar pomaga pri glajenju 3D natisnjenih izdelkov po tiskanju. Ker se podatki o vplivu 3D tiskanja na zdravje pri uporabi filamentov različnih proizvajalcev razlikujejo (različni proizvajalci uporabljajo različne deleže osnovnih gradnikov) in ker raziskave na temo vpliva 3D tiskanja na zdravje človeka niso preveč pogoste in dostopne, sem se odločil, da bom sam izvedel

raziskavo o vplivu 3D tiskanja na zdravje – oceniti želim morebitno škodljivost 3D tiska s svojim domačim tiskalnikom pri desetih materialih.

1.2 Namen, cilji in hipoteze

Osnovni namen raziskave je proučiti, ali se ob 3D tiskanju sproščajo snovi, ki bi bile lahko škodljive za človeka, glavni cilj pa je izmeriti koncentracijo za človeka nevarnih snovi, ki se sproščajo ob 3D tiskanju v domačem okolju. Iz pridobljenih podatkov bom ugotovil, ali je tiskanje testnega modela škodljivo za zdravje in pa koliko časa bi moral tiskati, da bi koncentracija škodljivih snovi v prostoru presegla še varno koncentracijo škodljivih snovi. Pred raziskovanjem sem si zastavil štiri hipoteze:

Hipoteza 1:

Z nizkocenovnim 3D tiskalnikom bom uspel natisniti testni model z vsemi desetimi materiali in izmeriti izpuste zdravju škodljivih snovi.

Hipoteza 2:

Med vsemi uporabljenimi materiali je akrilonitril butadien stiren (ABS) najbolj problematičen z vidika možnih škodljivih vplivov na zdravje.

Hipoteza 3:

Ob 3D tiskanju z materialoma, ki sta jima dodana les ali karbonska vlakna, se v zrak sprošča večja količina prašnih delcev.

Hipoteza 4:

Tiskanje z nizkocenovnim 3D tiskalnikom v domačem ali šolskem okolju zdravju ni škodljivo.

1.3 Metodologija dela

Moja raziskava je umeščena na področje ekologije z varstvom okolja. Zdravje in dobro počutje je odvisno od okolja, v katerem prebivamo. V raziskavi se ukvarjam z onesnaževanjem notranjega zraka. Področje najprej teoretično predstavim, potem pa izvedem poskus s tiskanjem testnega modela z desetimi različnimi materiali. Domači 3D tiskalnik sem postavil v komoro iz pleksi stekla in z merilcem za merjenje kakovosti zraka v notranjih prostorih izmeril koncentracijo prašnih delcev in koncentracijo lahko hlapnih organskih spojin v komori. Podatki meritev so osnova za oceno škodljivosti 3D tiska.

2 TEORETIČNI DEL

V nadaljevanju bom opisal nekatere ključne pojme, dejstva in naravne zakone, ki so nujno potrebni za razumevanje raziskovalnega dela.

2.1 3D tiskanje

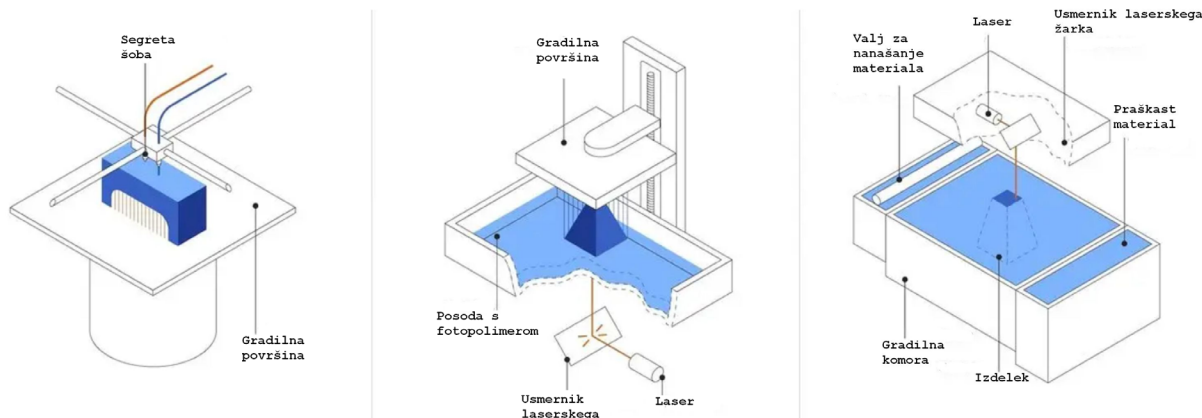
3D tiskanje je proces izdelave izdelka v prostoru. Proces se izvaja v računalniško krmiljeni napravi – 3D tiskalniku. Izdelek nastane s postopnim nalaganjem več zelo tankih plasti eno na drugo. 3D tiskalnik za delovanje potrebuje set ukazov oz. navodila. Imenujemo jih G-navodila (*angl. G-code*). Do 3D tiskalnika jih lahko dostavimo s pomočjo USB kabla ali pa SD kartice. Za kreiranje datoteke z navodili potrebujemo predmet, ki ga hočemo natisniti tudi v digitalni obliki. Predmet lahko z računalniškimi programi narišemo sami ali pa željeni objekt prenesemo iz spletnih knjižnic. Digitalno skico predmeta odpremo v programu za pretvorbo modela v seznamu G-navodil in jo posredujemo tiskalniku. Ko se 3D tisk konča in ko se gradilna površina ohladi, lahko izdelek odstranimo z gradilne površine.

2.1.1 Uporaba in prednosti 3D tiskanja

3D tiskanje se najpogosteje uporablja pri hitri izdelavi prototipov, nadomestnih delov in pa čisto posebnih delov, za katere klasična izdelava z vlivanjem v kalupe ni mogoča. Pogosto je sam izdelek, sploh če filamente kupujemo, dražji in za izdelavo potrebujemo več časa kot pri masovnem brizganju vroče plastike v kalupe. 3D tiskanje je tako največkrat lažje, enostavnejše in cenejše predvsem pri izdelavi predmetov, ki jih ne potrebujemo v velikih količinah, saj za 3D tiskanje ni treba izdelati kalupa. Materiali filamentov, uporabljanih pri 3D tisku, so po navadi umetne mase, ki pa jim lahko primešamo različne dodatke – npr. les, karbonska vlakna ipd. Takšni sestavljeni filamenti so lahko po izgledu ali mehanskih lastnostih primerljivi s tradicionalnimi materiali, npr. lesni filament z lesom in pa filament z dodanimi karbonskimi vlakni z aluminijem. Ima pa 3D tisk eno bistveno prednost pred klasičnimi postopki obdelave materialov – pri klasični obdelavi (rezkanju, CNC-obdelavi) moramo veliko materiala zavreči, saj običajno pri teh metodah material odstranjujemo. Tovrstnega odpadnega materiala pri 3D tisku ni.

2.1.2 Metode 3D tiskanja

V nadaljevanju so predstavljene tri najpogostejše metode 3D tiskanja: stereolitografija (SLA), selektivno lasersko sintranje (SLS) in ciljno nanašanje snovi (FDM: *angl. Fused Deposition Modeling*) (Slika 1).



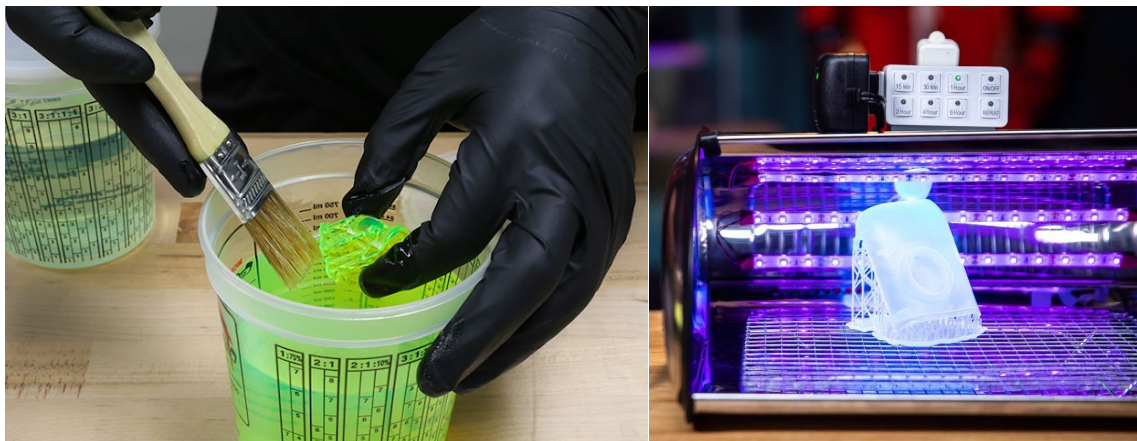
Slika 1: Prikaz različnih vrst 3D tiskanja (Proces FDM: ciljno nalaganje snovi (levo), SLA: stereolitografija (sredina) in SLS: selektivno lasersko sintranje (desno))
(https://formlabs.com/blog/comparing-fdm-sls-sla-3d-printing/?utm_source=facebook&utm_medium=social&fbclid=IwAR3HsSHLYFRWn04XmNv48INVpUQSyTjb_Sce_haRMqv7KaughIwN9Oqys0I)

Stereolitografija je eden prvih postopkov, uporabljenih za 3D tiskanje. Pri 3D tiskanju s SLA metodami se tekoči fotopolimer ob ultravijolični (UV) svetlobi strjuje in spremeni v polimer. UV-svetlobo običajno usmerjamo s spodnje strani modela, ki se med 3D tiskom dviga iz posode s fotopolimerom. Spodnjo stran 3D tiska lahko osvetljujemo z UV-zaslončkom ali projektorjem, ki lahko osvetli tudi celotno površino naenkrat, ali pa z laserjem, ki osvetljuje in strjuje le eno točko naenkrat. Celotna gradilna površina se po vsaki plasti dvigne in s tem se prostor pod modelom ponovno zapolni s fotopolimerom, postopek nanašanja nove plasti pa se lahko ponovno začne. Delovanje stereolitografskih 3D tiskalnikov je prikazano na sliki (Slika 2).



Slika 2: Prikaz delovanja stereolitografskih 3D tiskalnikov
(https://diyodemag.com/education/exploring_3d_masked_stereolithography_3d_printing)

Stereolitografski 3D tiskalniki imajo običajno najmanjše gradilne volumne, torej lahko natisnejo najmanjše izdelke, v primerjavi z ostalimi so zelo natančni in nimajo velikih težav z dimenzijsko točnostjo. Pri SLA 3D tiskanju votlih izdelkov je treba v natisnjenem predmetu zagotoviti primerne luknje, da lahko fotopolimer odteka nazaj v kad in da tako v končnem izdelku nimamo več tekočega fotopolimera. Po 3D tisku z metodami SLA moramo izdelek še očistiti odvečnega polimera v za to primernih topilih in model obdelati v posebni komori, ki še enkrat osvetli celotno površino, in s tem zaključimo izdelavo modela (Slika 3).

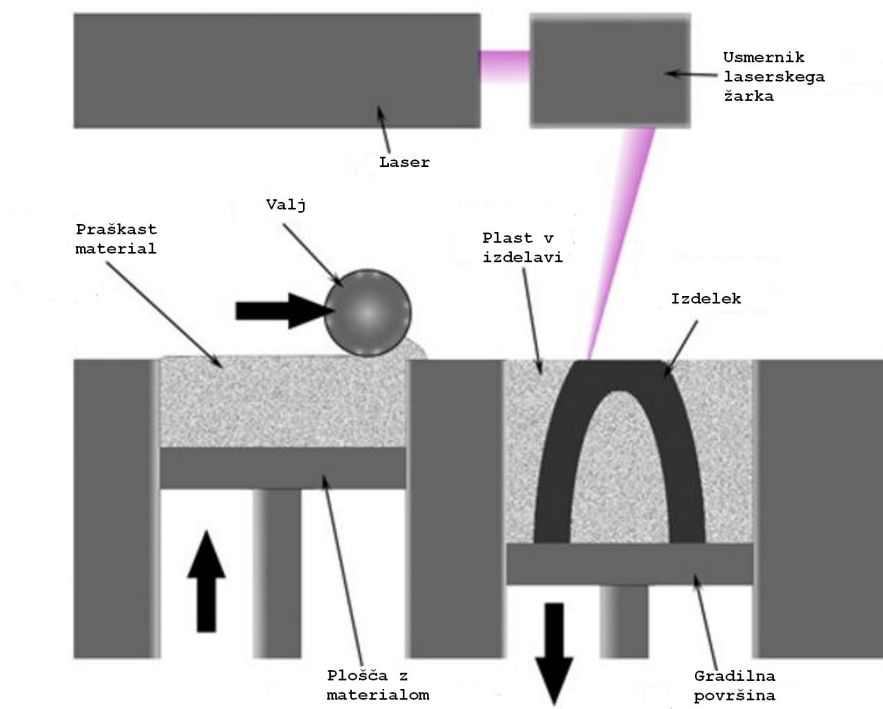


Slika 3: Proces končne obdelave stereolitografskih izdelkov (levo čiščenje in desno končno strjevanje) (<https://www.youtube.com/watch?v=etLOLUowvPI>, <https://www.matterhackers.com/articles/how-to-print-clean-and-post-process-sla-3d-prints>)

Izdelki, natisnjeni s SLA metodami, niso tako obstojni, kot so modeli, natisnjeni s FDM tehnologijo. Velika težava je tudi, da so fotopolimeri, ki se jih uporablja za SLA 3D tiskanje, okolju in zdravju škodljivi. Nevarni so predvsem za vodno okolje, ključno je njihovo primerno skladiščenje. Za fotopolimere splošno velja, da lahko škodujejo zdravju pri dolgotrajni ali ponavljajoči se izpostavljenosti (Stavki o nevarnosti, 2022). Pri uporabi fotopolimerov je treba nositi zaščitne rokavice, nekateri pa priporočajo tudi zaščitne maske.

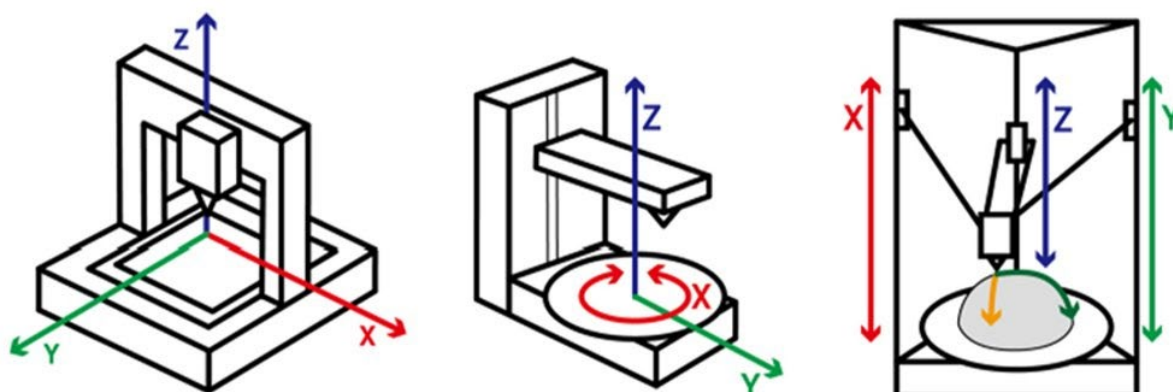
Pri postopku selektivnega laserskega sintranja laserski žarek stali material za tiskanje (kovinski ali plastični prah) in ga pritrdi na prej narejeno plast, če pa prejšnje plasti ni, pa na podlago. SLS 3D tiskalniki so običajno dražji od ostalih, a omogočajo tiskanje brez podpornikov in tiskanje kovine in ostalih zelo trdnih materialov. Pred sintranjem vsake plasti valj iz prekata za shranjevanje praškastega materiala nanese material na prejšnjo plast in nato lahko laser začne s sintranjem. Po vsaki plasti se gradilna miza z modelom spusti, plošča z materialom pa se dvigne tako, da lahko valj ponovno nanese novo plast materiala (Slika 4).

S SLS 3D tiskalniki lahko natisnemo modele, ki se po trdnosti lahko primerjajo s trdnostjo litega železa. To je posebno uporabno pri 3D tiskanju nadomestnih delov, npr. kovinski rotor za jedrsko elektrarno Krško, kjer niso imeli originalnega nadomestnega dela (Fišer, 2017).



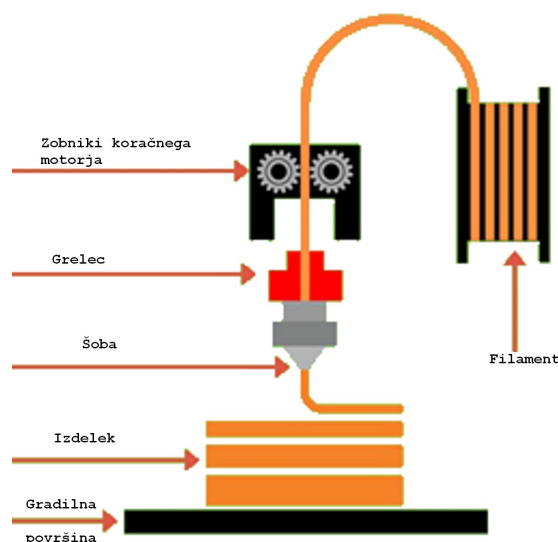
Slika 4: Grafični prikaz metode selektivnega laserskega sintranja
(<https://cdn.mos.cms.futurecdn.net/FdqSBkaEosNrvCn9Ep49d7.jpg>)

Danes najpogostejša tehnologija 3D tiskanja je tehnologija ciljnega nalaganja snovi. Pri tej tehnologiji, podobno kot pri ostalih opisanih metodah, material nalagamo plast za plastjo. Plast je običajno visoka 0,2 mm. Posebnost pri FDM metodi je, da nanašamo material samo na točke, kjer ga zares potrebujemo. Ob nanašanju segreta šoba tudi pritrdi nastajajočo plast na prejšnjo. 3D tiskalnike vodijo trije koračni motorji, ki glavo premikajo po treh oseh (x, y, in z). Da dosežemo tiskanje plasti eno na drugo, moramo pri vsaki plasti povečati razdaljo med virom materiala in gradilno površino. Pri nekaterih tiskalnikih se oddaljuje vir materiala (šoba), pri drugih pa gradilna površina. Za osi x in y pri metodah SLS in SLA praviloma ne uporabljamo gibljivih delov, pri metodi FDM pa se mora šoba glede na gradilno površino premikati. To lahko dosežemo s premikanjem gradilne površine, šobe ali pa kombinacijo obojega (Slika 5). Večina FDM 3D tiskalnikov premika le šobo ali pa šobo in gradilno površino, skoraj nikoli pa ne vidimo, da bi se premikala le gradilna površina. Kombinacija premikanja šobe in gradilne površine je pogosta pri nizkocenovnih 3D tiskalnikih, kot je na primer v moji raziskavi uporabljen *Crealiti Ender 3* (Slika 5).



Slika 5: Prikaz različnih načinov premikanja FDM 3D tiskalnika
(<https://all3dp.com/2/3d-printer-axis-the-basics-simply-explained/>)

Pri FDM tehnologiji na izdelek nanašamo polimer pri temperaturi, pri kateri polimer prehaja iz steklastega (trdega) stanja v viskoelastično (gumijasto) stanje. Najprej se filament odvije iz koluta in potuje skozi zobnike koračnega motorja ekstrudorja, ki potiska filament skozi teflonsko cevko do segrete šobe in na koncu na izdelek (Slika 6).



Slika 6: Prikaz poti materiala
(<https://twotrees3d.com/fdm-3d-printer-how-do-fdm-3d-printers-work/>)

S tem, da material nanašamo le na dele, kjer ga potrebujemo, dosežemo, da nam ni treba paziti na luknje za odtekanje materiala, saj je povesod, kjer ni plastike, zrak. Ker moramo pri FDM

tiskanju premikati celo glavo, ki nanaša material, ne pa samo svetlobnih žarkov, ki utrjujejo del plasti materiala, je tiskanje veliko počasnejše. Pri istem času 3D tiska je FDM tiskanje tudi manj natančno. S problemom hitrosti ob 3D tiskanju se je ukvarjal tudi Tadej Vidrih v raziskavi z naslovom Vpliv hitrosti tiskanja na geometrijsko stabilnost 3D tiskanih vzorcev na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani. Pri FDM tiskanju teža izdelka ni omejitveni faktor, kot je pri SLA metodi, saj izdelka pri FDM ne premikamo ali pa ga premikamo samo po x osi. Prav tako je menjava materiala pri FDM metodi veliko lažja, ker le potisnemo drugo vrsto filamenta skozi šobo in potiskamo toliko časa, dokler se material v šobi ne zamenja. Zaradi te lastnosti je pri FDM metodi 3D tiskanja veliko lažje izvedljivo tiskanje z več materiali, saj imamo lahko več šob, ki jih uporabljamo za različne barve ali vrste filamenta (Slika 7). Tiskalnice z dvema ali več vzporednimi šobami uporabljamo za 3D tiskanje modelov, ki potrebujejo podporne elemente – v prvi šobi npr. uporabimo filament iz poliaktične kisline, kot podporni material v drugi šobi pa uporabimo polivinil alkohol, ki je vodotopen.

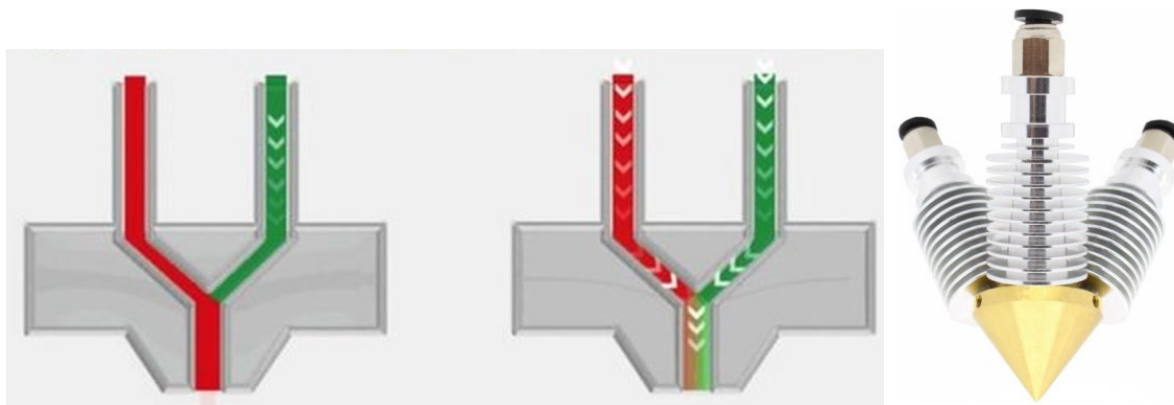


Slika 7: Fotografija tiskalnika z dvema vzporednima glavama
(<https://tobuya3dprinter.com/dual-extruders-worth/>)

Po 3D tisku izdelek, natisnjen z osnovnim materialom in polivinil alkoholom, namočimo v vodo za nekaj ur in polivinil alkohol se raztopi, tako da nam ostane le še končni izdelek iz poliaktične kisline, ki pa ni topna v vodi. Podobno velja tudi za kombinacijo ABS in visokozmogljivi polistiren (HIPS), saj HIPS lahko raztopimo v topilu D limolen, ki ga lahko najdemo tudi v nekaterih citrusih.

Tiskanje z dvema vzporednima glavama uporabljamo tudi, kadar želimo narediti izdelek iz dveh različnih materialov, ki imata lahko različne lastnosti (barva, fizikalne lastnosti) ali pa različno priporočeno temperaturo tiskanja. Tako lahko tiskamo na primer filament z dodanimi

karbonskimi vlakni skupaj s polivinil alkoholom, čeprav imata skoraj za 100 °C različno temperaturo 3D tiskanja. Poznamo pa tudi šobe, v katerih mešamo več različnih materialov, ki morajo imeti enake priporočene temperature, saj si v tem primeru delijo šobo, ki pa ne more biti segreta na več temperaturah hkrati (Slika 8).



Slika 8: Prikaz delovanja mešalne šobe (levo), fotografija šobe za mešanje barv (desno)
(<https://community.ultimaker.com/topic/21133-mixed-colour-printing/>,
<https://www.azurefilm.com/en/diamond-extruder-3-in-1-24v-0-4mm>)

Mešanje filamentov je zaenkrat razvito za uporabo do treh filamentov hkrati, so pa že v razvoju 3D tiskalniki in glave, ki bi lahko tiskale hkrati tudi s petimi filamenti. Z uporabo cijan, magenta, rumenega, belega in črnega filameta bi lahko dosegli 3D tiskanje s celotno barvno lestvico. Pri razvoju 3D tiskanja s celotno barvno lestvico je problematičen predvsem razvoj programskih orodij za pripravo navodil za tiskanje.

Postopek 3D tiskanja se začne z izdelavo ali pridobitvijo virtualne oblike predmeta, ki ga želimo natisniti. Ta virtualna zasnova se lahko zapiše v CAD (*angl. Computer Aided Design*) datoteki s programom za 3D modeliranje (za ustvarjanje popolnoma novega objekta) ali s 3D skenerjem (za kopiranje obstoječega objekta). 3D skener naredi 3D digitalno kopijo predmeta. Obstaja tudi veliko spletnih knjižnic, od koder lahko prenesemo obstoječe 3D datoteke, če še ne znamo uporabljati programov za 3D risanje ali pa hočemo prihraniti čas.

2.2 Zrak

Čist zrak je osnovni pogoj za zdravje in dobro počutje ljudi. Dnevno vsak odrasel človek vdihne med 10 in 20 kubičnih metrov zraka, kar predstavlja 12 do 24 kilogramov zraka. Za normalno delovanje organizma pa v zraku ne sme biti preveč onesnaževal. Plast zraka ob Zemlji, v kateri živimo tudi ljudje, imenujemo troposfera. Pri morski gladini je naravno zrak sestavljen iz 78 % dušika, 21 % kisika in 1 % drugih plinov (Eržen, 2010).

2.2.1 Zunanja onesnaževala

Med onesnaževala zunanjega zraka so najpomembnejši: ozon, dušikovi oksidi, žveplov dioksid, prašni delci različnih velikosti in ogljikov monoksid. Zadnja dva sta opisana v poglavjih 2.2.3 in 2.2.4.

Ozon (O_3) je plin, katerega molekula je sestavljena iz treh atomov kisika. Plin je naravno prisoten v drugi plasti atmosfere – stratosferi, ki leži med 13 in 15 km nad površjem Zemlje. Tam nas ščiti pred ultravijoličnimi žarki. Prizemni ozon nastaja predvsem poleti s fotokemično reakcijo iz dušikovih spojin. Za človeka je nevaren, saj je zelo reaktiven plin in povzroča poškodbe organizma. Povzroča draženje grla, oči in nosu, pri daljši izpostavljenosti pa lahko tudi vnetja dihalnih poti in spremembe v delovanju pljuč.

Dušikovi oksidi so molekule, ki vsebujejo dušik in kisik v različnih razmerjih. Najpogostejši je dušikov dioksid. Najpomembnejši vir dušikovih oksidov predstavlja promet; znano je, da se izpusti dušikovih oksidov povečujejo s povečano hitrostjo vožnje. Izpostavljenost dušikovim oksidom povzroča zoženje dihalnih poti. Raziskave kažejo, da daljša izpostavljenost dušikovim oksidom prispeva k razvoju astme.

Žveplov dioksid najpogosteje nastaja med gorenjem fosilnih goriv in v nekaterih industrijskih procesih. V atmosferi lahko žveplov dioksid in dušikovi oksidi tvorijo številne ostale snovi in soli, ki kasneje v obliki kislega dežja ali pa zimskega smoga pridejo na zemeljsko površino. Vdihavanje žveplovega dioksida povzroča zoženje dihalnih poti, zato so ljudje, ki imajo astmo, bolj občutljivi kot vsi ostali.

2.2.2 Notranji zrak

Praviloma se veliko več pozornosti posveča onesnaženosti zunanjega zraka, čeprav je lahko izpostavljenost škodljivim snovem v notranjem zraku še bolj problematična, saj v notranjih prostorih večina preživi veliko več časa (tudi 90 % časa) kot zunaj. V notranjih prostorih, ki jih ne prezračujemo sistematično, se strupene snovi tudi nabirajo, tako da je koncentracija škodljivih snovi lahko hitro previsoka. Na sliki (Slika 9) so prikazana nekatera pomembnejša onesnaževala zraka v zaprtih prostorih in njihovi viri (NIJZ, 2017). Poleg šestih naštetih sodita med ključna onesnaževala v notranjih prostorih še prašni delci različnih velikosti in lahkohlapni ogljikovodiki. Oboje natančneje predstavim v nadaljevanju.



Slika 9: Prikaz onesnaževal v zaprtih prostorih in njihovih virov: 1. Tobačni dim; 2. Alergeni (vključno s cvetnim prahom); 3. Ogljikov monoksid (CO) in dušikov dioksid (NO₂); 4. Vlaga; 5. Kemikalije; 6. Radon (<https://www.eea.europa.eu/sl/eea-signali/signali-2013/clanki/kakovost-zraka-v-zaprtih-prostorih>)

2.2.3 Prašni delci

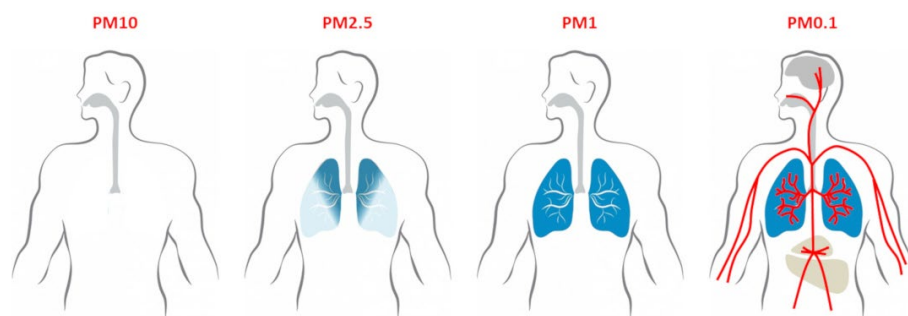
Prašni delci (PM; *angl. Particulate Matter*) so kompleksna mešanica organskih in anorganskih snovi, ki so prisotni v zraku. Sestava teh delcev je odvisna od vira delcev. Velikost delcev običajno opisujemo z njihovim t. i. aerodinamičnim premerom, ki je definiran kot premer okroglega delca z gostoto 1 g/cm³. Delci enake oblike, a z različno gostoto imajo različen aerodinamični premer. Za spremljanje onesnaženosti jih delimo v štiri skupine:

- PM₁₀: delci z aerodinamičnim premerom do 10 µm,
- PM_{2,5}: delci z aerodinamičnim premerom do 2,5 µm,
- PM_{1,0}: delci z aerodinamičnim premerom do 1 µm in
- ultrafini delci (UFP): zelo fini delci z aerodinamičnim premerom do 0,1 µm.

Pri podajanju podatka o onesnaženosti zraka velja, da podatek o vseh delcih, manjših od zgornje meje določene skupine, npr. $PM_{2,5}$, ne zavzema le delcev z aerodinamičnim premerom med 1 μm in 2,5 μm , temveč zajema tudi vse, ki so pod 1 μm . Splošno velja, da je v frakciji PM_{10} približno 70 % delcev manjših od 2,5 μm . Razdelitev suspendiranih (lebdečih) delcev na grobe, fine in ultra fine je pomembna z vidika določevanja časa, ki je potreben, da se delci izločijo iz atmosfere, vpliva na žive organizme in pa razdalje, ki jo lahko delci prepotujejo v zraku (Uršič, 2019).

Prašni delci lahko nastanejo z lomljenjem ali drobljenjem večjih kosov materiala ali kot posledica zapletenih reakcij med v zraku prisotnimi snovmi, izpuščajo se tudi pri gorenju, poznamo pa še veliko drugih virov. V Sloveniji raziskave kažejo, da so zunanji vir manjših prašnih delcev večinsko promet in kurišča. Različno veliki prašni delci se različno hitro usedejo na podlago. Največji delci se iz zraka izločijo kmalu po nastanku zaradi lastne teže, lahko pa jih na tla spere dež. Manjši prašni delci se lahko vežejo v kosme in s tem nastanejo večji delci, ki se lažje izločijo iz zraka, lahko pa tudi reagirajo s površinami stavb in ostalimi predmeti (Eržen, 2010).

Kot je prikazano na sliki (Slika 10), lahko različno veliki delci prodrejo različno globoko v človeško telo. Prašni delci, ki so večji od 10 μm , se običajno ustavijo v vlažnem okolju nosne votline in žrela. Do pljučnih mešičkov prodrejo prašni delci, katerih aerodinamični premer znaša manj kot 2–3 μm . Delci velikosti do 0,1 mikrona naj bi bili sposobni prehajati iz pljučnih mehurčkov v kri in tako povzročati zdravstvene težave celo v drugih organih telesa. Za pojav negativnih učinkov na zdravje so poleg velikosti prašnih delcev pomembne tudi njihove fizikalno-kemijske lastnosti. Specifična površina zelo finih prašnih delcev ($< 0,1 \mu m$) je bistveno večja kot površina enako težkih, vendar večjih prašnih delcev, kar olajša raztapljanje in absorpcijo snovi, ki so vezane nanje. Ker jih alveolarni makrofagi slabše odstranjujejo, ostanejo zelo fini prašni delci dlje časa v področju pljučnih mešičkov in povzročajo draženje (Bilban, 2014).



Slika 10: Prikaz globine prodora prašnih delcev glede na njihovo velikost (<https://molekule.science/air-quality-other-pollutants-beyond-particulate-matter-pm/>)

2.2.4 Lahkohlapni ogljikovodiki

Lahkohlapni ogljikovodiki (VOC; *angl. Volatile Organic Compounds*) so snovi, ki vsebujejo ogljik in vodik. Te snovi pri sobni temperaturi zlahka izhlapijo – imajo visok parni tlak. Koncentracija VOC je v prostorih lahko tudi desetkrat višja kot na prostem, ne glede na to, ali živimo v urbanem ali podeželskem okolju, saj je dandanes človekovo življenje prepleteno s snovmi, ki vsebujejo VOC. Lahkohlapne organske spojine so pogost del gospodinjskih izdelkov, kot so barve, odstranjevalci barve, topila, sredstva za zaščito lesa, aerosolni razpršilci, čistila, razkužila, osvežilci zraka, goriva, avtomobilski izdelki, gradbeni materiali, pisarniška oprema, kopirni stroji, tiskalniki, korektorne tekočine, grafični materiali, lepila, novo pohištvo ipd. Iz vseh teh snovi VOC izhlapevajo, medtem ko jih uporabljamo in tudi ko so shranjeni. Da preprečimo zadrževanje teh snovi v našem bivalnem okolju, moramo dovolj pogosto zračiti, predvsem pa vedeti, kateri izdelki izpuščajo VOC, in tako čim bolj zmanjšati vire lahkohlapnih ogljikovodikov v našem bivalnem okolju. Zelo pomembno je na primer, da kupimo le tolikšno količino barve, goriva ipd., kolikor je bomo dejansko porabili, in teh snovi ne shranjujemo v večjih količinah doma.

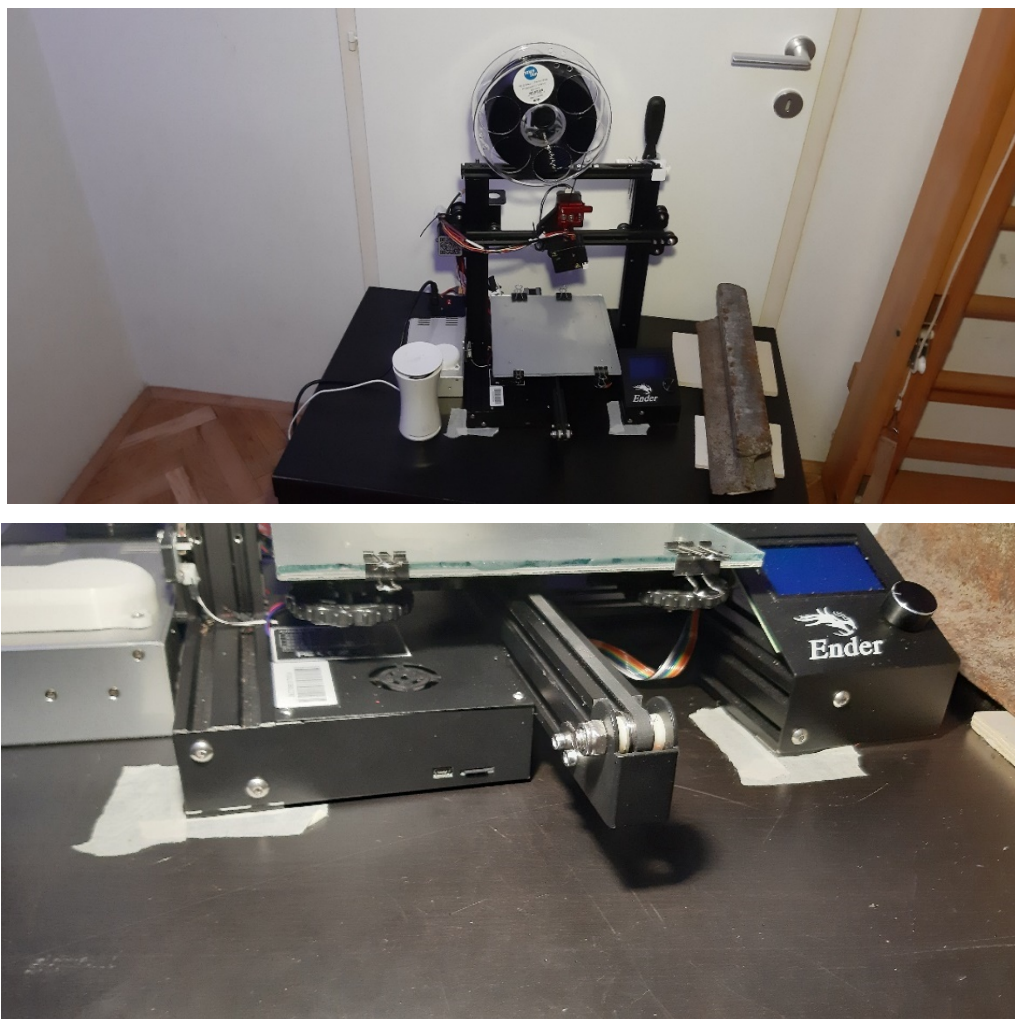
Kemijsko VOC predstavljajo različne kemijske spojine. Med več sto različnimi kemijskimi spojinami, ki jih najdemo v obliki VOC, sodijo med najbolj škodljive za zdravje: benzen, stiren, formaldehid in trikloretilen. Za določanje kemijske sestave večine hlapnih organskih spojin moramo izvesti kompleksne laboratorijske postopke. Za VOC kot celoto je v Sloveniji postavljena dopustna koncentracija $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Priloga 1). Kratkoročni vplivi VOC na zdravje so: draženje nosu in grla, alergijske kožne reakcije, slabost, bruhanje, utrujenost, vrtoglavica. Pri daljši ponavljajoči izpostavljenosti pa lahko nastanejo tudi hujše bolezni, kot je rak (Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality, 2022).

3 RAZISKOVALNI DEL

V prvem delu tega poglavja predstavim postopek tiskanja in uporabljene materiale, v drugem delu je prikazana uporabljena metoda za merjenja izpustov, nazadnje opisujem, kako sem pripravil oceno tveganja za zdravje.

3.1 3D tiskanje in uporabljeni materiali

V raziskavi sem uporabil klasičen nizkocenovni FDM 3D tiskalnik *Creality Ender 3*. Ta izdelek gradi iz filamenta – polne plastične žice s premerom 1,75 mm, navite na kolutu. V teoretičnem delu je delovanje ekstrudorskega tiskalnika predstavljeno opisno in shematsko (Slika 6). Tiskalnik sem postavil na nižjo mizico, narejeno iz iverne plošče, in lego prilagodil tako, da se je lahko prosto gibal v vse smeri, ne da bi ga pri tem ovirala merilna komora. Lego 3D tiskalnika sem nato označil z ličarskim lepilnim trakom, da sem porabil manj časa za nastavljanje tiskalnika na točno pozicijo pred vsakim tiskom (Slika 11).



Slika 11: Postavitve 3D tiskalnika *Creality Ender 3*

Preizkusil sem 10 različnih materialov:

1. poliaktično kislino (PLA),
2. poliaktično kislino z lesnim dodatkom (les),
3. polietilen tereftalat glikol (PETG),
4. akrilonitril stiren akrilat (ASA),
5. najlon,
6. polivinil alkohol (PVA),
7. visokozmogljivi polistiren (HIPS),
8. akrilonitril butadien stiren (ABS),
9. fleksibilni material,
10. najlon z dodatkom karbonskih vlaken (karbonska vlakna).

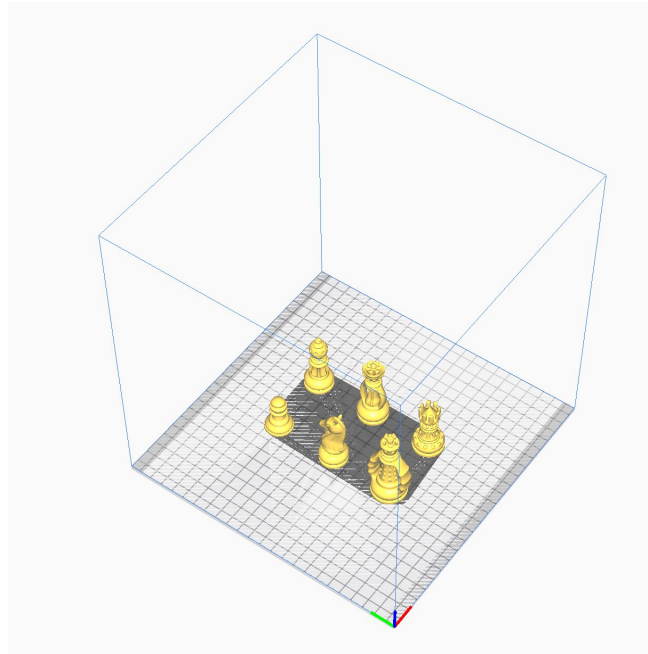
Vsi materiali so bili kupljeni pri proizvajalcu filamentov Azurefilm. Na podlagi informacij, dostopnih na straneh Azurefilm (<https://www.azurefilm.si/>) in podjetja Prusa 3D (<https://help.prusa3d.com/>), so v tabeli (Tabela 1) zbrane osnovne lastnosti uporabljenih materialov.

Tabela 1: Osnovne lastnosti uporabljenih materialov (PLA: poliaktična kislina, les: PLA z dodatkom lesa, PETG: polietilen tereftalat glikol, ASA: akrilonitril stiren akrilat, PVA: polivinil alkohol, HIPS: visokozmogljivi polistiren, ABS akrilonitril butadien stiren, najlon z dodatkom karbonskih vlaken)

Material	Možno glajenje in lepljenje z acetonom	Enostavno tiskanje	Higroskopen filament	Potrebna jeklena šoba	Odpornost na ultravijolične žarke
PLA		Da			
Les				Da	
PETG		Da			
ASA	Da	Da			Da
Najlon			Da		
PVA		Da	Da		
HIPS	Da	Da			
ABS	Da				
Fleksibilni			Da		
Karbonska vlakna			Da	Da	

Za testni model sem si izbral set šestih šahovskih figuric iz spletne knjižnice *Thingiverse* (<https://www.thingiverse.com/thing:34017>). Ta komplet vsebuje eno figurico vsake vrste, kot je vidno na sliki (Slika 12). Podpornikov, ki so pri nekaterih modelih potrebni pri tiskanju, nisem uporabljal. Figurice sem postavil in v programu *Free Cad* (<https://www.freecadweb.org/index.php>) združil na razdaljo 6 centimetrov tako, da sem imel v

rezalniku vedno isti model z istimi medsebojnimi razdaljami in s tem sem omogočil identične gibe 3D tiskalnika v vseh primerih: za vsak tisk sem porabil približno 12,7 m filameta (izračun porabe filameta v programskem rezalniku).



Slika 12: Testni model: Set šestih šahovskih figuric v programskem rezalniku (zgoraj) in nekaj natisnjenih setov v različnih materialih (spodaj)

Za obdelavo in rezanje modela sem uporabil programski rezalnik *Ultimaker Cura* (<https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>) z večinsko privzetimi nastavitvami za 3D tiskalnik *Creality Eder 3* – nekaj osnovnih je povzetih v tabeli (Tabela 2).

Tabela 2: Osnovne nastavitve rezalnika *Ultimaker Cura* za obdelavo in rezanje testnega modela šahovskih figuric

Višina plasti	Število sten	Število zgornjih in spodnjih plasti	Glajenje	Delež polnila	Vrsta polnila
0,2 mm	4	4	Vklopljeno	20 %	Giroid

Dodatne nastavitve so odvisne od samega uporabljenega materiala. Ena pomembnejših nastavitvev je temperatura šobe. Pri 3D tiskanju nam je pred nanašanjem na prejšnji sloj cilj doseči ravno prav viskozen material. To dosežemo s pravilno nastavitvijo temperature šobe. Za različne materiale proizvajalec navaja različne temperaturne razpone za 3D tiskanje. Za raziskavo sem uporabil srednjo priporočeno temperaturo za vsak filament. Vse uporabljene temperature so prikazane v tabeli (Tabela 3).

Tabela 3: Priporočene temperature šobe za 3D tiskanje s testnimi materiali (PLA: poliaktična kislina, Les: PLA z dodatkom lesa, PETG: polietilen tereftalat glikol, ASA: akrilonitril stiren akrilat, PVA: polivinil alkohol, HIPS: visokozmogljivi polistiren, ABS akrilonitril butadien stiren, Karbonska vlakna: najlon z dodatkom karbonskih vlaken)

Material	PLA	Les	PETG	ASA	Najlon	PVA	HIPS	ABS	Fleksibilni	Karbonska vlakna
Temperatura šobe (°C)	215	215	230	250	260	200	235	260	230	280

Za tiskanje potrebujemo tudi segreto gradilno površino. Na *Creality Ender 3* tiskalniku se le ta segreje do 110 °C. Običajna plošča se hitro obrabi in zato so bolj primerne steklene plošče. Se pa materiali slabše primejo na steklo, zato sem na steklo nanese snov Dimafix (<http://www.dima3d.com/en/home/dimafix/>), ki ob segreti površini prepreči zdrs modelov iz tiskalne površine med tiskanjem. Pri tiskanju nekaterih materialov (npr. akrilonitril butadien stirena) je priporočeno imeti segreto komoro, v kateri je 3D tiskalnik. Uporabljen 3D tiskalnik nima lastne komore, a je njeno funkcijo v poskusu dobro prevzela merilna komora, opisana v naslednjem poglavju. Za delovanje nanešene plasti pršila Dimafix in tudi za preprečitev krčenja spodnje strani izdelka med 3D tiskanjem pa moramo gradilno površino segreti na določeno temperaturo. Zahtevane temperature gradilne površine so navedene v tabeli (Tabela 4).

Tabela 4: Priporočene temperature podlage za tiskanje s testnimi materiali (PLA: poliaktična kislina, Les: PLA z dodatkom lesa, PETG: polietilen tereftalat glikol, ASA: akrilonitril stiren akrilat, PVA: polivinil alkohol, HIPS: visokozmogljivi polistiren, ABS akrilonitril butadien stiren, Karbonska vlakna: najlon z dodatkom karbonskih vlaken)

Material	PLA	Les	PETG	ASA	Najlon	PVA	HIPS	ABS	Fleksibilni	Karbonska vlakna
Temperatura podlage (°C)	55	55	80	110	100	55	90	110	60	105

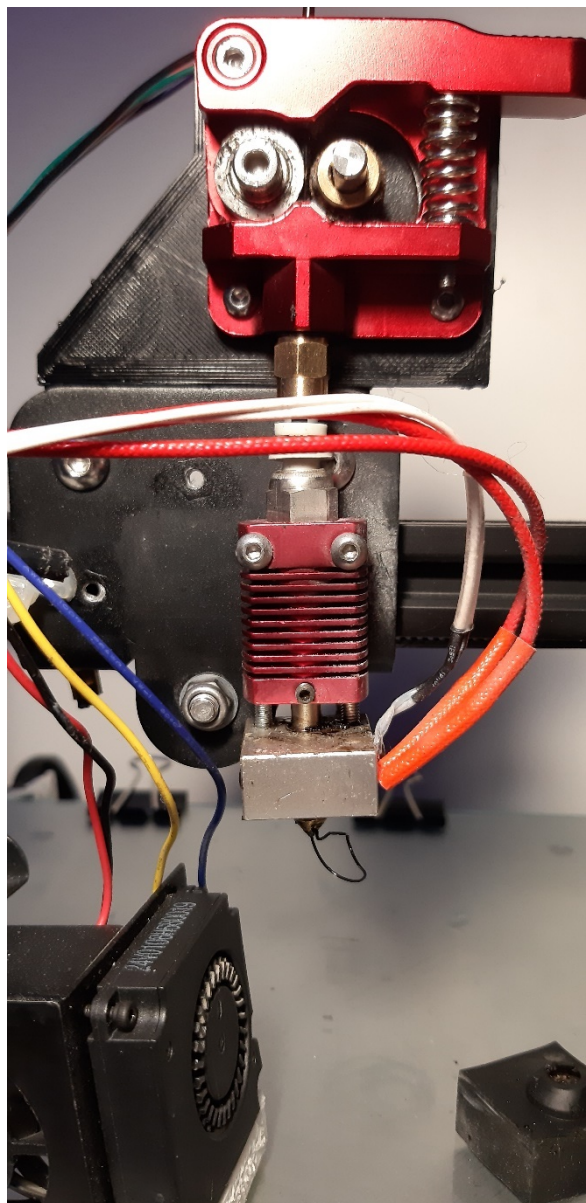
Kljub temu da s temperaturo šobe nastavljamo viskoznost polimera, je pri določenih materialih potrebno počasnejše 3D tiskanje. Pri večini materialov sem uporabil hitrost 50 mm/s, saj je to hitrost, pri kateri dosežemo najboljše rezultate v najkrajšem času. Hitrost 3D tiska seveda vpliva tudi na končni čas, ki je potreben za izdelavo 3D natisnjenega izdelka. Testni model se je pri hitrosti 50 mm/s tiskal 5 ur, 18 minut in 2 sekundi.

Ker sem v poskusu uporabil tudi nekaj precej nestandardnih materialov, je bilo treba domači tiskalnik *Creality Ender 3* v nekaj delih ustrezno prilagoditi. Za tiskanje materialov, ki vsebujejo večje delce (koščki lesa in karbonska vlakna), sem moral uporabiti 0,6-milimetrsko jekleno šobo (namesto klasične 0,4-mm). Ob 3D tiskanju s temperaturo šobe večjo od 245 °C se začne teflonska cevka, ki služi dostavi filamenta do grelca in šobe, taliti in s tem prepreči filamentu nadaljnjo pot skozi cevko. S tem se ekstruzija pri 3D tisku ustavi. Ker 3D tiskalnik ustavitve filamenta ne zazna in tudi ne ugasne grelca, je velika nevarnost za začasno ali pa trajno zamašitev šobe. Da se izognemo stiku teflonske cevke z visoko temperaturo, moramo teflonsko cevko premakniti stran od vročega dela. Vendar pa, če cevko le premaknemo višje, se zaradi pritiska in taljenja plastike ter zaradi odvečnega prostora začne mašiti celotna glava 3D tiskalnika. Poznamo posebne glave, ki so narejene prav za reševanje omenjene težave. Te glave imajo celoten grelni del iz kovine in teflonska cevka filament pripelje le do sredine glave, kjer so temperature bistveno nižje kot v sredini grelnega dela pri šobi (Slika 13). S prilagoditvijo tiskalnika z omenjeno glavo sem lahko tiskal tudi materiale, pri katerih so za tisk potrebne višje temperature.



Slika 13: Nadomestna glava tiskalnika, ki je narejena v celoti iz kovine in omogoča tiskanje na višjih temperaturah

Pri tiskanju fleksibilnih filamentov zaradi trenja med teflonsko cevko in fleksibilnim filamentom ni možna natančna kontrola ekstruzije, zato moramo koračni motorček z zobnikom, ki potiska filament, prestaviti tik nad glavo 3D tiskalnika. Tako lahko pot, ki jo mora filament opraviti v teflonski cevki, zelo skrajšamo in s tem tudi omogočimo primerno kontrolo nad podajanjem filameta, ki vstopa v šobo. Za pritrditev koračnega motorčka na okvir pa sem moral 3D natisniti še dodatek, ki to omogoča (Slika 14).



Slika 14: Približna slika skrajšane poti filameta po teflonski cevki »direct drive«

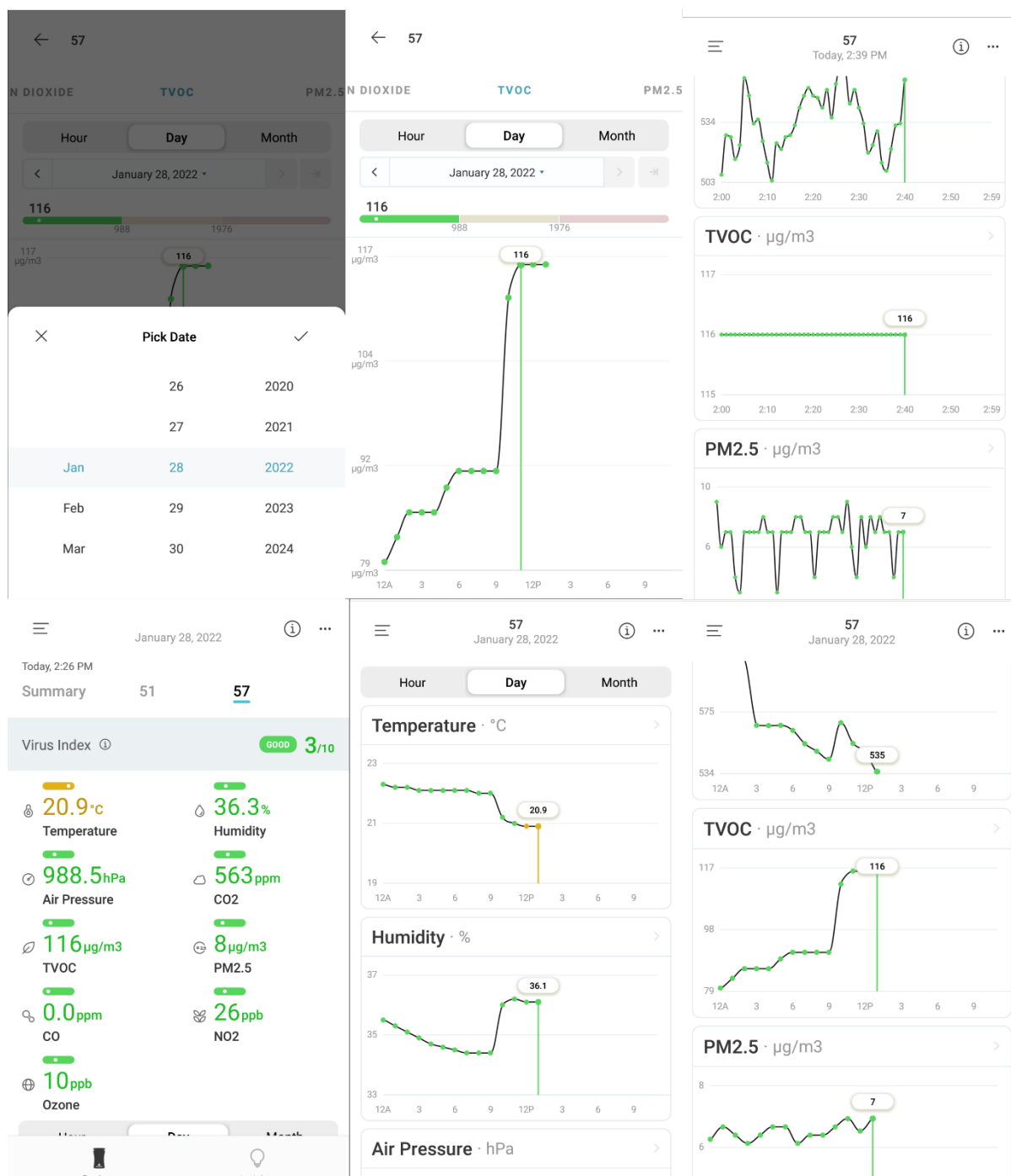
3.2 Merjenje izpustov

Za merjenje izpustov sem v raziskavi uporabljal merilec *uHoo* (<https://getuhoo.com/>) (Slika 15). To je pametni merilnik kakovosti zraka za domačo uporabo. Ohišje merilca je izdelano iz bele termo plastike akrilonitril butadien stiren, spodaj je prilepljena kovinska utež, oblečena v gumo, da se senzor ne prevrne ali zdrsne. Skupna masa merilca je 278 g, visok je 163 mm in premer okroglega tlorisa je 86 mm. V merilec zrak prihaja skozi reže na dnu merilca in skozi režo pod pokrovom. Za sprotno meritev merilec *uHoo* porabi 0,9 W elektrike pri 5 V.



Slika 15: Merilec zračnih izpustov *uHoo*

UHoo merilec meri relativno vlažnost zraka, temperaturo zraka, zračni pritisk, koncentracijo ogljikovega dioksida in ogljikovega monoksida, koncentracijo lahkih ogljikovodikov (VOC), koncentracijo delcev do velikosti $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) in pa koncentracijo dušikovega dioksida ter ozona. Meritve *uHoo* merilec pošilja na zunanji strežnik, uporabnik pa lahko z aplikacijo na pametnem telefonu spremlja kvaliteto zraka v prostoru v realnem času (in za nazaj) s pomočjo različnih grafičnih prikazov (Slika 16). Pri osnovni verziji *uHoo* aplikacije moramo meritve ročno prepisovati iz grafov, pri verziji *Pro* pa lahko vse meritve hitro pridobimo tudi v digitalnem zapisu.

Slika 16: Grafični prikazi meritev v aplikaciji *uHoo*

Enostaven uporabniški vmesnik in majhna naprava, ki jo je enostavno namestiti, naredita *uHoo* merilec zelo prijazen za uporabnika. Ima pa naprava *uHoo* zaradi svoje enostavnosti tudi kar nekaj lastnosti, ki otežujejo njeno uporabo oziroma jo za kompleksnejše poskuse naredijo manj uporabno. Ob zagonu potrebuje dve uri, da se senzorji popolnoma segrejejo, in v tem času meritve lahkih ogljikovodikov niso uporabne. Prav tako na meritve slabo vplivajo hitre spremembe temperature okoliškega zraka. Večkrat, ko sem bolj temeljito zračil, je vrednost

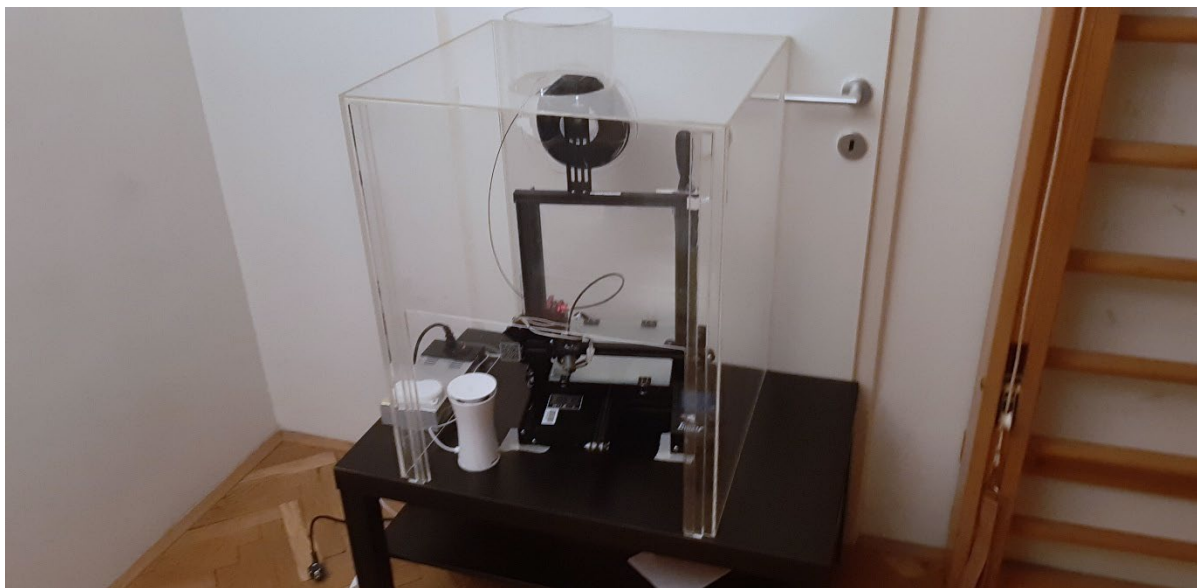
meritve koncentracije VOC močno narasla. Sprva se mi je to zdelo zelo čudno, saj bi moral zunanji zrak vsebovati veliko manj lahkih ogljikovodikov. Napačne meritve sem lahko obrazložil le s tem, da se senzorji med zračenjem preveč shladijo in ne morejo več normalno delovati. V specifikacijah sicer piše, da naj bi merilnik deloval med $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, a v praksi se je izkazalo, da naprava daje smiselne vrednosti VOC po približno pol ure delovanja na sobni temperaturi.

Za meritev realnega izpusta snovi, ki izstopajo med 3D tiskanjem, sem potreboval prostor, ki nima pretoka zraka in v katerem ni morebitnih ostalih virov izpustov. Tiskalnik sem postavil v miren kletni prostor (v času raziskave notri ni bilo možnih motečih dejavnikov), čez 3D tiskalnik pa sem poveznil posebej za poskus pripravljeno komoro, narejeno iz prozornega pleksi stekla (Slika 17). Tako sem lahko skoraj vse izpuste, ki so nastali med 3D tiskanjem, ujel in jih izmeril. Merilno komoro sem položil na mizo z zadnjo steno, obrnjeno proti vratom, in jo naslonil na vrata in kljuko. Sprednjo odprtino sem zaprl s pokrovom, ki je del komore, zgornjo pa s kosom plastike in obtežil (Slika 17).



Slika 17: Odprta (levo) in zaprta (desna) merilna komora

uHoo merilec sem postavil v komoro. Kabla 3D tiskalnika in *uHoo* merilca pa sem speljal skozi za kable namenjeno luknjo v komori do vtičnic. Komora na 3D tiskalniku z merilcem je prikazana na sliki (Slika 18).

Slika 18: Komora s 3D tiskalnikom in *uHoo* merilcem

3.3 Priprava ocene tveganja za zdravje

V raziskavi me je zanimalo, ali so lahko izpusti, ki nastanejo ob 3D tiskanju, zdravju škodljivi. Od vseh izpustov, ki jih meri naprava *uHoo*, sem se osredotočil na VOC in $PM_{2,5}$. Z merilcem *uHoo* lahko izmerimo le, da gre za lahkohlapno organsko spojino, ne pa tudi za katero. Zato sem se odločil, da bom tveganje za zdravje računal po principu najslabšega možnega primera. Predpostavil sem, da je koncentracija vseh hlapnih organskih spojin enaka tisti, ki je naj bi jo predstavljala najbolj problematična spojina v posameznem materialu. S tem sem se izognil oceni količine posameznega VOC v izpustih. Izračun posameznih snovi na podlagi dostopnih meritev bi bil preveč kompleksen, hkrati pa različni dobavitelji materialov za proizvajalce pri polimerizaciji ne uporabljajo enakega razmerja osnovnih gradnikov, tako da podatki za konkretno uporabljen material v resnici niso dostopni.

Za vsak material sem pripravil oceno za tiskanje v svoji sobi in šolski učilnici. Moja soba meri približno 3 m x 4 m x 2 m ter ima tako prostornino 30 m³. Prostornina tipične šolske učilnice je približno 500 m³ (Neufert, 2002). Za oceno tveganja za zdravje potrebujemo realno koncentracijo snovi v prostoru, torej moramo preračunati koncentracijo škodljive snovi v komori na koncentracijo v sobi in učilnici. Iz največje koncentracije VOC oziroma $PM_{2,5}$ v $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ki sem jo izmeril v komori, sem najprej izračunal količino snovi v komori (v μg) in iz tega naredil preračun na prostornino sobe oziroma učilnice. Za lažjo razlago rezultata sem izračunal še količino VOC in $PM_{2,5}$, ki nastane pri tiskanju z vsakim od materialov eno uro.

Koncentracije lahkih ogljikovodikov in prašnih delcev, ki so še dopustne, in torej ne vplivajo na zdravje, so zapisane v Prilogi 1 – Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Uradni list RS, št. 42/02 z dne 15. 5. 2002). Za VOC pravilnik določa dopustno mejo v notranjih prostorih $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pri prašnih delcih pa pravilnik podaja dopustno vrednost v notranjih prostorih za PM_{10} , ki je $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Slika 19). Dopustne meje za $\text{PM}_{2,5}$, ki jo lahko merim z napravo *uHoo*, pravilnik ne podaja. Ocenjeno pa je, da je med PM_{10} približno 70 % takih (Uršič, 2019), ki so manjši od 2,5 mikrometrov, zato sem pri pripravi ocene tveganja za zdravje pri $\text{PM}_{2,5}$ kot dopustno mejo v notranjih prostorih vzel $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabela 7: Dopustne koncentracije notranjih onesnaževalcev zraka

		Enota	Dopustna vrednost
Ogljikov dioksid*	(CO_2)	mg/m^3	3.000
Radon**	(Rn)	Bq/m^3	400
Amoniak in amini***	(NH_3)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	50
Formaldehid***	(H_2CO)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100
Hlapne organske snovi****	(VOC)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	600
Ogljikov monoksid	(CO)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	10
Ozon	(O_3)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100
Masna koncentracija lebdečih trdnih delcev frakcije PM_{10} *****		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100

* Koncentracija vključuje CO_2 v zunanjem zraku ($700 \mu\text{g}/\text{m}^3$) in emisijo CO_2 človeka.

** Povprečna letna koncentracija radona v stanovanjskih objektih. Priporočilo 200 Bq/m^3 .

*** Nanaša se na emisijo gradbenega materiala, ne na emisijo človeka ali človekove aktivnosti.

**** Vsaj 70 % hlapnih organskih snovi mora biti identificiranih, njihove koncentracije ne smejo prekoračiti največjih dopustnih vrednosti (npr. karcinogenov, alergenov itn.). Nanaša se na emisijo gradbenega materiala, ne na emisijo človeka ali človekove aktivnosti.

***** Masna koncentracija prostorsko nastalih lebdečih trdnih delcev se meri skladno s SIST EN 12341 nepretrgoma 24 ur pri normalni človekovi aktivnosti v prostoru.

Slika 19: Izsek iz Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb z opredeljenimi dopustnimi koncentracijami notranjih onesnaževalcev zraka

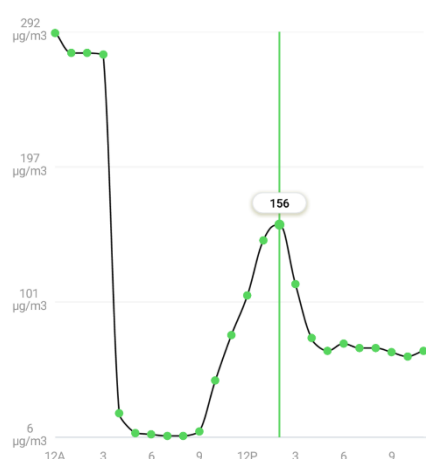
Končna ocena tveganja za zdravje je podana v vsakemu razumljivi obliki: Pri koliko časa 3D tiskanja s posameznim materialom bi bila presežena dopustna vrednost VOC ali $\text{PM}_{2,5}$ v sobi ali učilnici? Ob tem sem predpostavil, da prostora ne zračimo.

4 REZULTATI

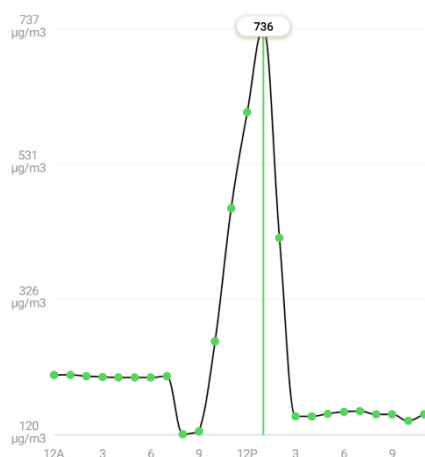
V nadaljevanju so predstavljeni rezultati poskusa, ločeni po materialih. Rezultate prikazujem v treh sklopih: meritve VOC, meritve PM_{2,5} in ocena vplivov na zdravje.

4.1 Meritve lahkihhlapnih ogljikovodikov

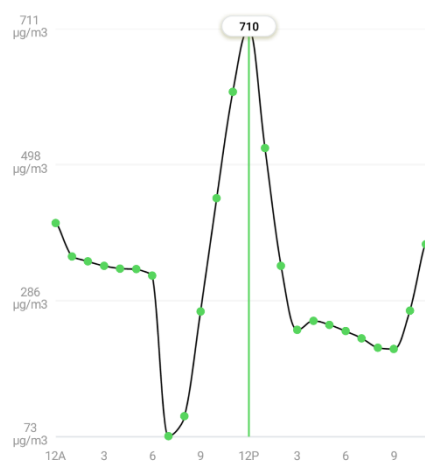
Slike (Slika 20 do Slika 29) prikazujejo meritve VOC pri tiskanju s posameznim materialom. S poskusi sem začel med 6. in 9. uro zjutraj, vse meritve so trajale 5 ur in 18 minut, grafi pa prikazujejo izmerjene koncentracije v celem dnevu. Pred začetkom poskusa so vrednosti VOC v zraku nihale tudi do več 10 mikrogramov na kubični meter. Vrednosti VOC pred in po poskusu niso pomembne, saj takrat komora ni bila vedno ustrezno nameščena, v prostoru pa je bilo možnih več različnih motečih dejavnikov (menjava filamenta, 3D tiskanje predmetov, ki niso povezani z raziskavo ipd.). Ključno pa je bilo pred poskusom prostor ustrezno prezračiti in zagotoviti začetno koncentracijo VOC nič. Zračenje pred začetkom tiska je na vsakem grafu vidno kot padec koncentracije pred strmo rastjo. Pri večini materialov senzor *uHoo* ni zaznal začetne vrednosti nič. Senzor, ki ni zmožen zaznavanja hitrih sprememb, se je pri odprtem oknu preveč shladil, ko pa se je ponovno dovolj segrel za zanesljive meritve, pa so VOC že bili prisotni v komori zaradi začetka tiskanja, tako da se koncentracija lahkihhlapnih organskih spojin začne ponekod dvigovati šele po prvi polovici ure tiskanja. V nobenem primeru ta pomanjkljivost ne vpliva na končne meritve oziroma rezultate poskusa.



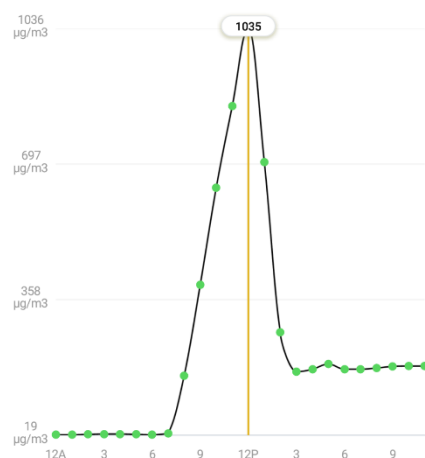
Slika 20: Izpusti lahkihhlapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela s poliaktično kislino (PLA)



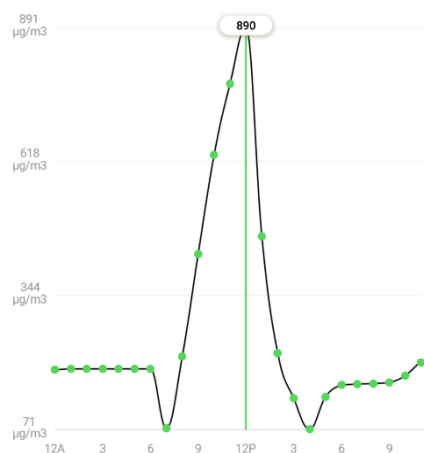
Slika 21: Izpusti lahkihlahapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela s poliaktično kislino (PLA) z dodatkom lesa



Slika 22: Izpusti lahkihlahapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela z materialom polietilen tereftalat glikol (PETG)



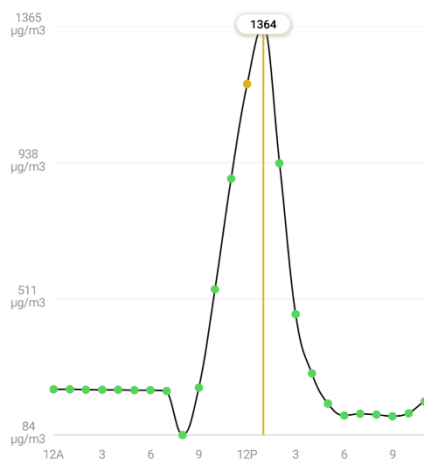
Slika 23: Izpusti lahkihlahapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela z materialom akrilonitril stiren akrilat (ASA)



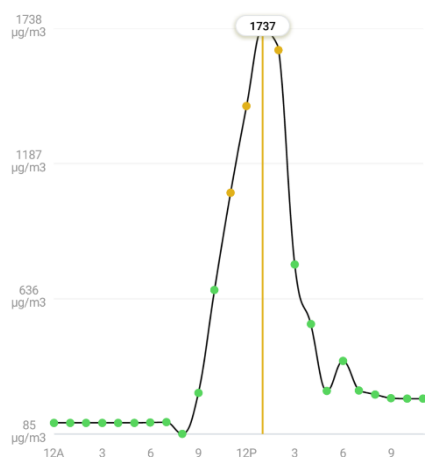
Slika 24: Izpusti lahkihlahlapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela z najlonom



Slika 25: Izpusti lahkihlahlapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela z materialom polivinil alkohol (PVA)



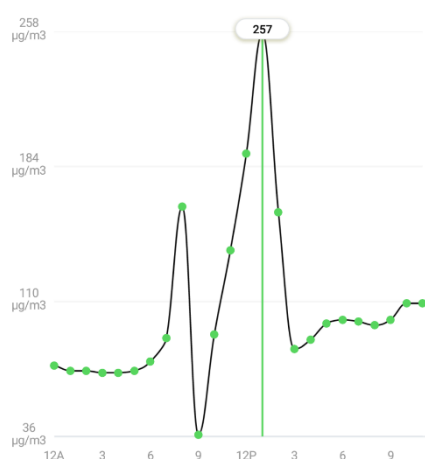
Slika 26: Izpusti lahkihlahlapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela z visokozmogljivim polistirenom (HIPS)



Slika 27: Izpusti lahkihlahlapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela z materialom akrilonitril butadien stiren (ABS)



Slika 28: Izpusti lahkihlahlapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela s fleksibilnim materialom, sestavljenim iz poliuretana in dodatkov



Slika 29: Izpusti lahkihlahlapnih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela z najlonom z dodanimi karbonskimi vlakni

Iz zgoraj prikazanih grafov je razvidno, da se ob tiskanju materialov, ki vsebujejo stiren (ABS, HIPS, ASA), sprosti veliko več hlapnih organskih spojin kot pri ostalih materialih. Ko vrednosti presežejo $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, so na grafu označene z oranžno barvo. Količina lahkih hlapnih organskih spojin v komori premo sorazmerno narašča s časom, tako da lahko za nadaljnje izračune uporabljam le tri vrednosti: začetno in končno koncentracijo VOC ter čas meritve (318 minut). Začetna koncentracija je zaradi sistematičnega prezračevanja pred začetkom vsakega poskusa (opisano zgoraj) vedno nič. Končne koncentracije za vsak uporabljen material so zapisane v tabeli (Tabela 5). Najvišje koncentracije VOC pri tiskanju testnega modela sem zabeležil pri ABS ($1737 \mu\text{g}/\text{m}^3$), končne vrednosti nad $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pa sem zmeril še pri HIPS in ASA.

Tabela 5: Končne koncentracije lahkih hlapnih ogljikovodikov (VOC končna) v $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pri tiskanju testnega modela za posamezne materiale (PLA: poliaktična kislina, Les: PLA z dodatkom lesa, PETG: polietilen tereftalat glikol, ASA: akrilnitril stiren akrilat, PVA: polivinil alkohol, HIPS: viskozno-mogljivi polistiren, ABS akrilnitril butadien stiren, Karbonska vlakna: najlon z dodatkom karbonskih vlaken)

Material	PLA	Les	PETG	ASA	Najlon	PVA	HIPS	ABS	Fleksibilni	Karbonska vlakna
VOC končna ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	156	736	710	1035	890	556	1364	1737	529	257

Za potrebe ocene tveganja za zdravje, prikazane v zadnjem poglavju rezultatov, sem za vsak material izračunal še skupno maso izpusta lahkih hlapnih organskih spojin med 3D tiskanjem v poskusni komori in koliko mikrogramov VOC med tiskanjem s posameznim materialom v eni uri izpusti 3D tiskalnik. Podatki so prikazani v tabeli (Tabela 6) spodaj.

Tabela 6: Skupna masa izpusta lahkih hlapnih organskih spojin (VOC) med 3D tiskanjem v poskusni komori in ocena izpustov v eni uri pri tiskanju testnega modela za posamezne materiale (PLA: poliaktična kislina, Les: PLA z dodatkom lesa, PETG: polietilen tereftalat glikol, ASA: akrilnitril stiren akrilat, PVA: polivinil alkohol, HIPS: viskozno-mogljivi polistiren, ABS akrilnitril butadien stiren, Karbonska vlakna: najlon z dodatkom karbonskih vlaken)

Material	PLA	Les	PETG	ASA	Najlon	PVA	HIPS	ABS	Fleksibilni	Karbonska vlakna
Skupna masa hlapnih snovi (μg)	40	188	181	265	227	142	349	444	135	66
VOC v 1 uri (μg)	8	35	34	50	43	27	66	84	26	12

4.2 Meritve prašnih delcev

Kot drugo morebiti zdravju škodljivo snov sem meril količino manjših prašnih delcev v zraku. Naprava *uHoo* meri prašne delce PM_{2,5}, to so delci s premerom, manjšim od 2,5 µm. Spodaj so prikazani grafi za posamezne materiale. Tako kot pri meritvah VOC se tudi v primeru PM_{2,5} v izračunu zanemari meritve pred začetkom tiska oziroma sem pred začetkom tiska s prezračevanjem zagotovil ničelne koncentracije PM_{2,5} v komori.



Slika 30: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela s poliaktično kislino (PLA)



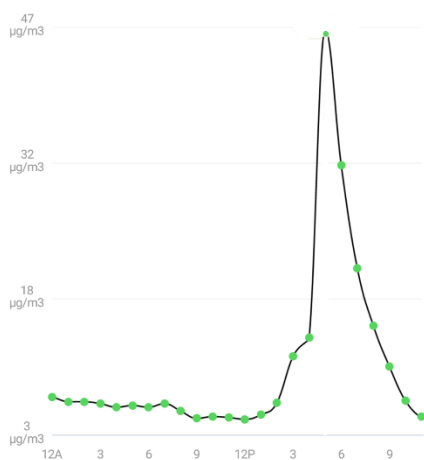
Slika 31: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela s poliaktično kislino (PLA) z dodatkom lesa



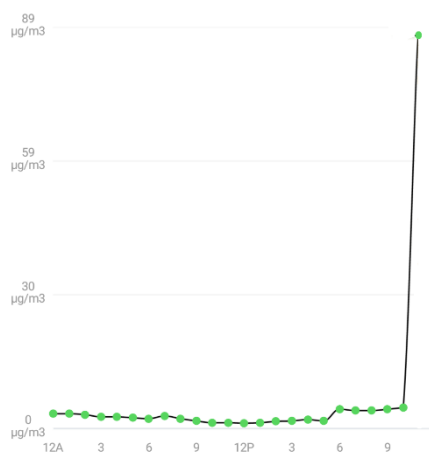
Slika 32: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela z materialom polietilen tereftalat glikol (PETG)



Slika 33: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela z materialom akrilonitril stiren akrilat (ASA)



Slika 34: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela z najlonom



Slika 35: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela z materialom polivinil alkohol (PVA)



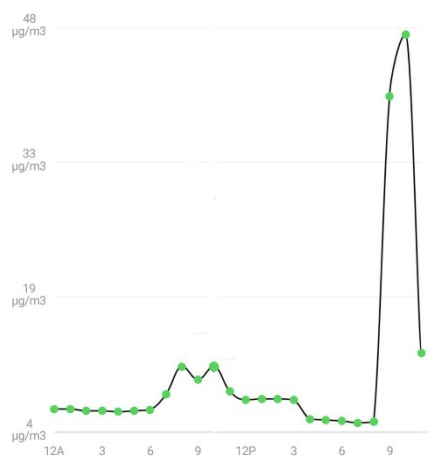
Slika 36: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela z visokozmogljivim polistirenom (HIPS)



Slika 37: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela z materialom akrilonitril butadien stiren (ABS)



Slika 38: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela s fleksibilnim materialom, sestavljenim iz poliuretana in dodatkov

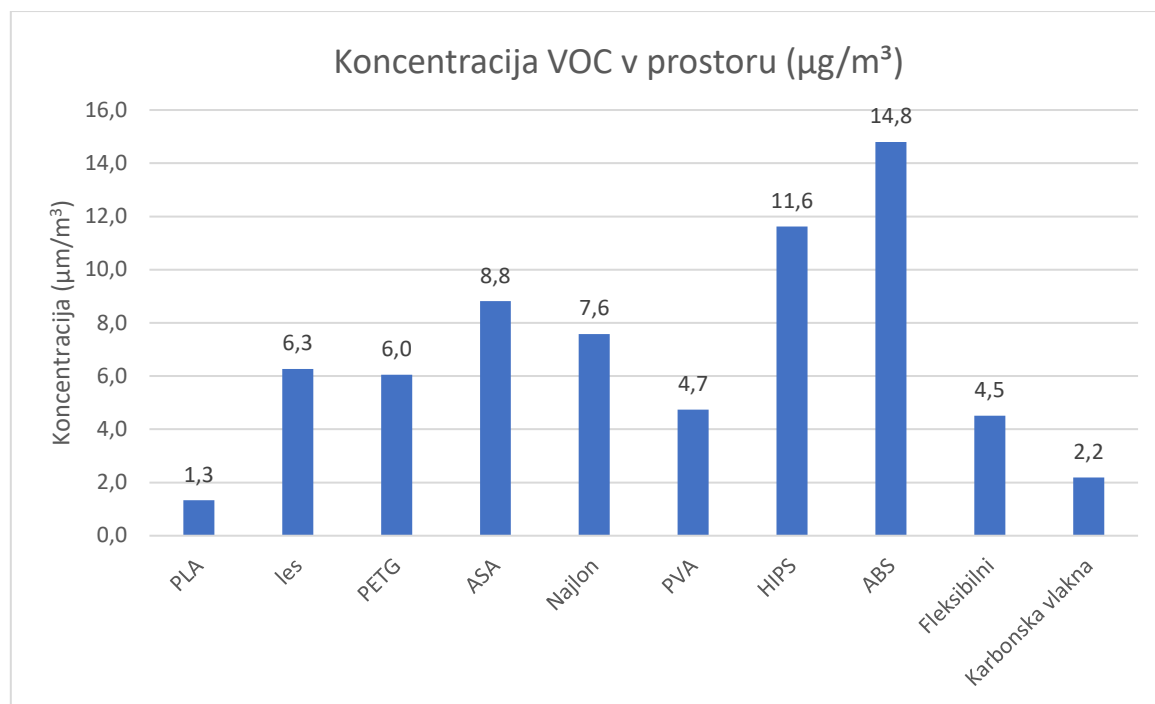


Slika 39: Koncentracije prašnih delcev manjših od 2,5 µm, pri tiskanju testnega modela z najlonom z dodanimi karbonskimi vlakni

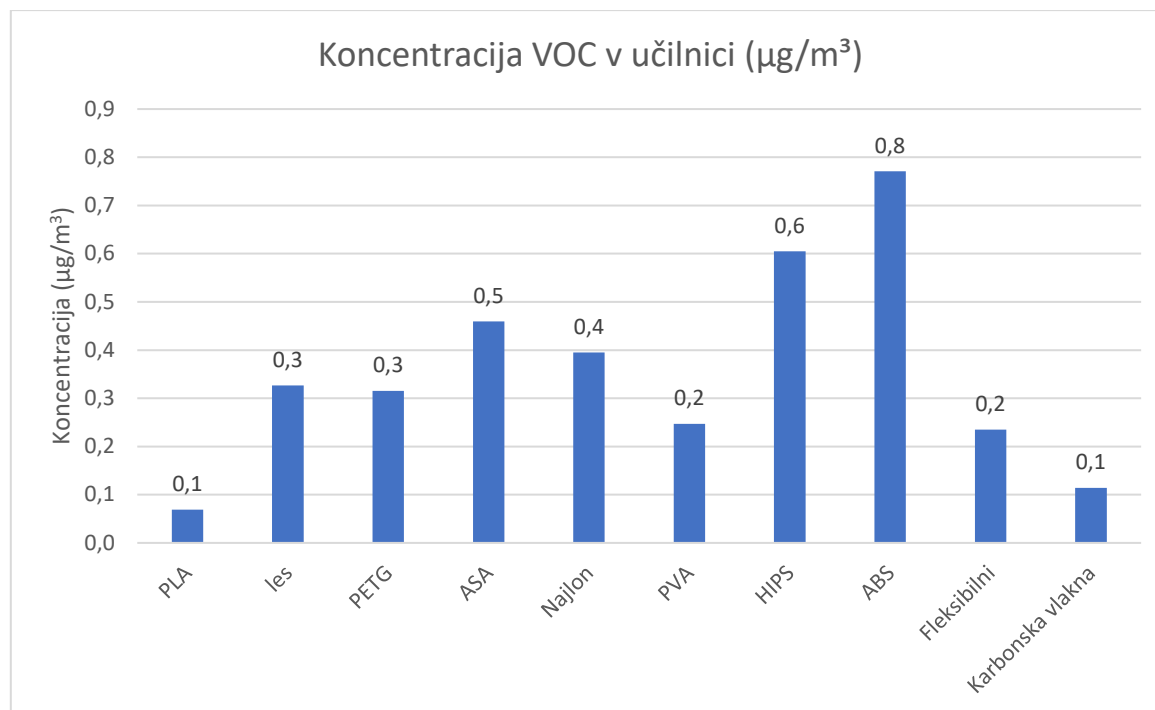
Iz grafov lahko vidimo, da pri nobenem izmed materialov koncentracija prašnih delcev PM_{2,5} v času tiskanja ni narasla. Iz tega lahko sklepamo, da se ob 3D tiskanju s katerim koli izmed testnih filamentov v zrak prašni delci ne sproščajo.

4.3 Ocena tveganja za zdravje

Ocena tveganja za zdravje je pripravljena za 3D tiskanje v moji sobi s prostornino 30 m³ in v učilnici s prostornino 576 m³. Ker se je v poskusu izkazalo, da delež prašnih delcev PM_{2,5} ni problematičen, sem pripravil oceno le za VOC. Spodaj so prikazane koncentracije VOC ob 3D tiskanju testnega modela z vsemi uporabljenimi materiali v sobi (Slika 40) in učilnici (Slika 41). V nobenem primeru ni presežena dovoljena koncentracija VOC v notranjih prostorih, kot jo definira Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (600 µg/m³).



Slika 40: Koncentracije lahkihplapnih ogljikovodikov (VOC) za prostor s 30 kubičnimi metri zraka (moja soba) ob 3D tiskanju z različnimi materiali (PLA: poliaktična kislina, Les: PLA z dodatkom lesa, PETG: polietilen tereftalat glikol, ASA: akrilonitril stiren akrilat, PVA: polivinil alkohol, HIPS: viskozomogljivi polistiren, ABS akrilonitril butadien stiren, Karbonska vlakna: najlon z dodatkom karbonskih vlaken)



Slika 41: Koncentracije lahkihplapnih ogljikovodikov (VOC) za prostor s 576 kubičnimi metri zraka (učilnica) ob 3D tiskanju z različnimi materiali (PLA: poliaktična kislina, Les: PLA z dodatkom lesa, PETG: polietilen tereftalat glikol, ASA: akrilonitril stiren akrilat, PVA: polivinil alkohol, HIPS: viskozomogljivi polistiren, ABS akrilonitril butadien stiren, Karbonska vlakna: najlon z dodatkom karbonskih vlaken)

V tabeli (Tabela 7) je prikazano, kako dolgo časa bi smel tiskati s posameznim materialom, da tiskanje ne bi bilo škodljivo za zdravje (ko še ne dosežemo $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$), če bi tiskali v sobi ali učilnici. Pri vzporednem tiskanju z večjimi tiskalniki le delimo število ur, pri katerem dosežemo mejno koncentracijo VOC s številom uporabljenih 3D iskalnikov. Pri najbolj problematičnem materialu (akrilonitril stiren akrilat) bi škodljivo koncentracijo VOC dosegli po 214 urah tiskanja brez prezračevanja, pri materialu PLA, ki ga najpogosteje uporabljamo, pa po 1985 urah tiskanja brez prezračevanja.

Tabela 7: Čas 3D tiska, ki je potreben, da dosežemo mejno vrednost koncentracije hlapnih organskih spojin za prostor in učilnico v urah (PLA: polilaktična kislina, Les: PLA z dodatkom lesa, PETG: polietilen tereftalat glikol, ASA: akrilonitril stiren akrilat, PVA: polivinil alkohol, HIPS: visokozmogljivi polistiren, ABS akrilonitril butadien stiren, Karbonska vlakna: najlon z dodatkom karbonskih vlaken)

Material	PLA	Les	PETG	ASA	Najlon	PVA	HIPS	ABS	Fleksibilni	Karbonska vlakna
SOBA (Dovoljena izpostavljenost v urah)	2393	507	526	361	419	671	274	215	706	1453
UČILNICA (Dovoljena izpostavljenost v urah)	45947	9739	10095	6925	8054	12892	5255	4126	13550	27890

5 RAZPRAVA

Ob zaključku želim preveriti svoje štiri začetne hipoteze.

Hipoteza 1: Z nizkocenovnim 3D tiskalnikom bom uspel natisniti testni model z vsemi desetimi materiali in izmeriti izpuste zdravju škodljivih snovi. → DRŽI

Med raziskavo sem uspel natisniti testni model z vsemi materiali, ki sem si jih izbral. Ocenjujem, da bi enako uspešno lahko natisnil tudi kompleksnejše modele. Pri večini materialov je bilo 3D tiskanje presenetljivo enostavno. Začetne težave pri nekaterih materialih sem uspel rešiti z manjšimi nadgradnjami domačega nizkocenovnega 3D tiskalnika *Crealty Ender 3*. Ob 3D tisku s katerim koli izmed poskusnih materialov sem uspel v komori iz pleksi stekla z merilcem kvalitete notranjega zraka *uHoo* pridobiti ustrezne meritve za oceno tveganja za zdravje.

Hipoteza 2: Med vsemi uporabljenimi materiali je akrilonitril butadien stiren najbolj problematičen z vidika možnih škodljivih vplivov na zdravje. → DRŽI

Ob 3D tiskanju z materialom akrilonitril butadien stiren se v zrak med vsemi materiali sprošča največ lahkih organskih spojin. Iz tega lahko sklepamo, da gre tudi za najnevarnejši material med izbranimi. Za natančnejšo oceno nevarnosti posameznih materialov pa bi morali izvesti še veliko kompleksnejše in dražje postopke za določanje dejanske količine posameznih VOC, ki izstopajo iz 3D tiskalnika med tiskanjem.

Hipoteza 3: Ob 3D tiskanju z materialoma, ki sta jima dodana les ali karbonska vlakna, se v zrak sprošča večja količina prašnih delcev. → NE DRŽI

Pri 3D tiskanju materialov z dodatkom lesa in karbonskih vlaken z uporabljenim *uHoo* merilcem za merjenje kakovosti notranjega zraka nisem zaznal bistvenih sprememb koncentracije prašnih delcev – naprava med 3D tiskom ni nikoli zaznala značilnega povečanja prašnih delcev PM_{2,5}. Pri raziskavi sem zasledil le manjše nihanje koncentracije PM_{2,5}, ki pa je popolnoma nepovezano s poskusom. Predpostavljam, da so dodane primesi večje od 2,5 µm.

Hipoteza 4: Tiskanje z nizkocenovnim 3D tiskalnikom v domačem ali šolskem okolju zdravju ni škodljivo. → DELOMA DRŽI

Pri 3D tiskanju velike večine materialov se v zrak sprosti zelo majhna količina snovi, ki bi bila lahko škodljiva za zdravje človeka. Upoštevati pa moramo še, da se količina snovi, ki se izpusti v zrak, razširi in s tem tudi razredči po celotnem prostoru. Ob povečanem številu 3D tiskalnikov in manjšem prostoru ali podaljšanju časa 3D tiska se lahko koncentracije nevarnih snovi v prostoru teoretično povečajo tudi do mere, ko bi lahko imele škodljive posledice za zdravje pri človeku. Pri manjšem številu 3D tiskalnikov v povprečno velikem prostoru (v sobi, večji od 30 m³) in ob času tiska do 6 ur 3D tiskanje z vsemi materiali, uporabljenimi v raziskavi (poliaktična kislina, poliaktična kislina z dodatkom lesa, polietilen tereftalat glikol, akrilonitril stiren akrilat, najlon, polivinil alkohol, visokozmogljivi polistiren, fleksibilni material in najlon z dodatkom karbonskih vlaken), zdravju ni škodljivo, kljub temu da ob tiskanju nekaterih materialov nastaja neprijeten vonj. 3D tiskanje z materiali, kot je akrilonitril butadien stiren, pa je lahko v prostoru z volumenom 30 m³ varno le s 40 3D tiskalniki, saj bi ob uporabi več 3D tiskalnikov ob daljšem času od 6 ur koncentracija nevarnih snovi v prostoru preveč narasla.

6 ZAKLJUČKI

V raziskovalni nalogi sem izpolnil osnovni cilj. Izmeril sem koncentracijo lahkih ogljikovodikov in manjših prašnih delcev v komori po koncu peturnega 3D testnega tiska z desetimi materiali. Iz pridobljenih podatkov sem razbral, da se med 3D tiskanjem v zrak prašni delci, manjši od $2,5\ \mu\text{m}$, ne sproščajo. Pri meritvi izpustov lahkih organskih spojin pa so bile koncentracije v komori po tisku veliko višje. Pri nekaterih materialih so bile koncentracije visokohlapnih ogljikovodikov celo tako visoke, da so presegle dopustno vrednost $600\ \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ob tiskanju ljudje seveda ne prebivamo v tiskalni komori, ampak v veliko večjih prostorih in v šolah v še večjih učilnicah. Zato sem količino nastalih VOC preračunal na prostornino svoje sobe oziroma v drugem primeru učilnice. Pri vseh materialih so bile po preračunu koncentracije veliko pod dopustno mejno. Ugotovil sem, da bi v svoji sobi lahko brez zračenja tiskal najbolj problematičen material – akrilonitril butadien stiren 215 ur, najmanj problematičen material (polilaktično kislino) pa kar 2393 ur. Obe vrednosti veliko presegata običajne čase 3D tiskanja, tako da tiskanje z enim tiskalnikom v moji sobi ni nevarno. Ob večjem številu tiskalnikov in stalni proizvodnji delov iz akrilonitril butadien stirena pa bi lahko koncentracije kmalu presegle mejno vrednost $600\ \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Med delom sem se naučil veliko o prednostih in slabostih vseh uporabljenih materialov, ki jih brez raziskave v tako kratkem obdobju niti ne bi preizkusil. Ugotavljam tudi, da imajo različni proizvajalci filamentov različna razmerja osnovnih gradnikov v polimerih in s tem se ob tiskanju pri nazivno enakih materialih v zrak sproščajo različne koncentracije snovi. Menim, da je potrebnih še več tovrstnih raziskav za različne dobavitelje filamentov. Ker sem v poskusu uporabil tudi nekaj nestandardnih materialov, je bilo treba domači tiskalnik v nekaj delih ustrezno prilagoditi. Prvič sem se podal na področje 3D tiska pri višjih temperaturah. Pri nadgradnji z glavo, ki je narejena v celoti iz kovine, sem odkril tudi nekaj nastavitvev v programskem rezalniku, ki jih prej sploh nisem uporabljal. Vse novo znanje o 3D tiskanju z uporabljenimi materiali bom lahko s pridom uporabljal v nadaljnjih projektih.

To je moja druga šolska raziskovalna naloga. Izkušnje s prvo so mi sicer pomagale pri sestavljanju strukture te raziskovalne naloge, a opisovanje vseh dejstev in postopkov ni bilo nič lažje – še vedno sem imel s tem zelo veliko dela. Smatram pa, da je bil vložen trud smiseln – z rezultati te raziskave si bom lahko precej pomagal pri bodočem načrtovanju varnih 3D tiskov.

7 KAZALO VIROV

7.1 Pisni viri

- Bilban M. (2014). *Vpliv zračnega onesnaženja na zdravje*. Zavod za varstvo pri delu, Katedra za javno zdravje.
- Eržen I., Gajšek P., Hlastan Ribič C., Kukec A., Poljšak B., Kragelj Zaletel L. (2010). *Zdravje in okolje: izbrana poglavja*. Maribor: Medicinska fakulteta.
- Nacionalni inštitut za javno zdravje (2017). *Notranji zrak – priporočila za prebivalce*.
- Neufert E. (2002). *Projektiranje v stavbarstvu: osnove, standardi, predpisi za konstrukcije, gradnja, oblikovanje, potrebni prostor, namembnost prostorov, mere zgradb, prostorov in opreme – s človekom kot merilom in ciljem: priročnik za projektante, izvajalce in študente*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije.
- UR.L. (2002). *Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb*, št. 42/02 Priloga 1: Vrste zraka, Načrtovana hitrost zraka, Parametri načrtovanja, Količina zraka. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo.
- Uršič A. (2019). *Ocena vpliva onesnaženosti zraka z delci PM_{2,5} na umrljivost v krajih s prekomerno onesnaženim zrakom*.
- Vidrih T. (2018). *Vpliv hitrosti tiskanja na geometrijsko stabilnost 3D tiskanih vzorcev*. Univerza v Ljubljani: Fakulteta za strojništvo.

7.2 Spletni viri

- Azurefilm. Dostopno na spletni strani: <https://www.azurefilm.si/> [13. 2. 2022].
- Dimafix. Dostopno na spletni strani: <http://www.dima3d.com/en/home/dimafix/> [13. 2. 2022].
- Fišer, Ž. (2017). *Mejnike 3D-tiska postavljamo v Sloveniji*. Dostopna na spletni strani: <https://slovenien.ahk.de/sl/infocenter/novice-podrobno/mejnike-3d-tiska-postavljamo-v-sloveniji> [13. 2. 2022].
- Fotografija dveh vzporednih tiskalnih glav. Dostopno na spletni strani: <https://tobuya3dprinter.com/dual-extruders-worth/> [13. 2. 2022].
- Free cad. Dostopno na spletni strani: <https://www.freecadweb.org/index.php> [13. 2. 2022].
- Grafični prikaz selektivnega laserskega sintranja. Dostopno na spletni strani: <https://cdn.mos.cms.futurecdn.net/FdqSBkaEosNrvCn9Ep49d7.jpg> [13. 2. 2022].
- Izpiranje stereolitografskih izdelkov. Dostopno na spletni strani: <https://www.youtube.com/watch?v=etLOLUowvPI> [13. 2. 2022].
- Kakovost zraka v zaprtih prostorih. Dostopno na spletni strani: <https://www.eea.europa.eu/sl/eea-signali/signali-2013/clanki/kakovost-zraka-v-zaprtih-prostorih> [13. 2. 2022].

- Končna obdelava stereolitografskih izdelkov. Dostopno na spletni strani: <https://www.matterhackers.com/articles/how-to-print-clean-and-post-process-sla-3d-prints> [13. 2. 2022].
- Prikaz delovanja mešalne šobe. Dostopno na spletni strani: <https://community.ultimaker.com/topic/21133-mixed-colour-printing/> [13. 2. 2022].
- Prikaz globine prodora prašnih delcev. Dostopno na spletni strani: <https://molekule.science/air-quality-other-pollutants-beyond-particulate-matter-pm/> [13. 2. 2022].
- Prikaz delovanja stereolitografskih 3D tiskalnikov. Dostopno na spletni strani: https://diyodemag.com/education/exploring_3d_masked_stereolithography_3d_printing [13. 2. 2022].
- Prikaz poti materiala. Dostopno na spletni strani: <https://twotrees3d.com/fdm-3d-printer-how-do-fdm-3d-printers-work/> [13. 2. 2022].
- Prikaz premikanja FDM tiskalnikov. Dostopno na spletni strani: <https://all3dp.com/2/3d-printer-axis-the-basics-simply-explained/> [13. 2. 2022].
- Prikaz šobe za mešanje barv. Dostopno na spletni strani: <https://www.azurefilm.com/en/diamond-extruder-3-in-1-24v-0-4mm> [13. 2. 2022].
- Prusa 3D. Dostopno na spletni strani: <https://help.prusa3d.com/> [13. 2. 2022].
- Različne vrste 3D tiskanja. Dostopno na spletni strani: https://formlabs.com/blog/comparing-fdm-sls-sla-3d-printing/?utm_source=facebook&utm_medium=social&fbclid=IwAR3HsSHLYFRWn04XmNv48INVpUQSyTjb_Sce_haRMqv7KaughIwN9Oqys0I [13. 2. 2022].
- Stavki o nevarnosti. Dostopno na spletni strani: <https://www.msds-europe.com/sl/stavki-h/> [13. 2. 2022].
- Thingiverse model. Dostopno na spletni strani: <https://help.prusa3d.com/> [13. 2. 2022].
- uHoo. Dostopno na spletni strani: <https://getuhoo.com/> [13. 2. 2022].
- Ultimaker cura. Dostopno na spletni strani: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura> [13. 2. 2022].
- Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality. Dostopno na spletni strani: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality> [13. 2. 2022].