

[[Ocena izpostavljenosti VOC in PM2,5 pri uporabi 3D tiskalnika]]

Strokovni članek

[[Anže]] [[Jaklič]]

Izveleček

[[Uvod: Med 3D tiskom se pri uporabi določenih filamentov v zrak sproščajo za zdravje škodljive snovi. Materiali, ki so najpogosteje označeni za problematične, so tisti, ki vsebujejo stiren: akrilonitril butadien stiren (ABS), akrilonitril stiren akrilat (ASA) in visokozmogljivi polistiren (HIPS). Namen raziskave je bil opredeliti snovi, ki se sproščajo ob 3D tiskanju na domačem tiskalniku, s ciljem oceniti vpliv koncentracije teh snovi na zdravje. Metode: V eksperimentalni raziskavi smo z merilnikom kakovosti notranjega zraka uHoo merili koncentracije lahkih organskih spojin (VOC) in koncentracijo delcev PM2,5 po 3D tisku z desetimi različnimi materiali: ABS, ASA, HIPS, polilaktično kislino samostojno in z lesnim dodatkom, polietilen tereftalat glikol, polivinil alkohol, fleksibilni material, najlon samostojno in z dodatkom karbonskih vlaken. Merilnik in 3D tiskalnik smo postavili v komoro iz pleksi stekla in z vsakim materialom natisnili model. Zmerjene koncentracije opazovanih onesnaževal smo primerjali z zakonsko določenimi vrednostmi na področju kakovosti notranjega zraka. Rezultati: 3D tiskanje na domačem tiskalniku z vidika PM2,5 ni problematično, saj v izpustih po tisku v zraku ne zaznavamo teh delcev. Najvišje koncentracije VOC pri tiskanju testnega modela smo zabeležili pri ABS (1737 µg/m³), končne vrednosti nad 1000 µg/m³ pa smo izmerili še pri HIPS in ASA. Dovoljena koncentracija VOC v notranjih prostorih bi bila presežena po 214 urah tiskanja z ABS brez prezračevanja prostora. Zaključek: 3D tisk pri domači rabi in v šolskem okolju ni škodljiv. Ker je sestava filamentov, uporabljenih pri 3D tisku, izjemno raznolika, se zdi smiselna tudi uvedba deklaracij na filamentih, ki bi opredeljevale količino izpustov ob tiskanju.]]

Kaj je znanega?

Med 3D tiskom se pri uporabi določenih filamentov iz določenih materialov v zrak sproščajo za zdravje škodljive snovi. Materiali, ki so najpogosteje označeni za problematične, so tisti, ki vsebujejo stiren: akrilonitril butadien stiren (ABS), akrilonitril stiren akrilat (ASA) in visokozmogljivi polistiren (HIPS).

Kaj je novega?

Določili smo, katere snovi se sproščajo ob 3D tiskanju na domačem tiskalniku ter podali oceno ali so njihove koncentracije problematične v smislu potencialnega vpliva na zdravje.

Prispelo
Sprejeto

Pošta

Licenca

[[DAN]]. [[MESEC]]. [[LET
O]]

Kodrespondenca [[anže.ja
klic@dijadi.gimb.org]]

Članek je licenciran pod
pogoji Creative Commons
Attribution 4.0

International license (CC-
BY licenca). This article is
licensed under the
Creative
Commons Attribution 4.0
International License (CC-
BY license).

Navajajte kot
Ključne besede
DOI
ISSN
Izdaja

[[10.26318/JZ-2024-6]]
2591-0906
Nacionalni inštitut za
javno zdravje

1. Uvod

3D tiskanje je sodoben način izdelave predmetov v trirazsežnem prostoru. Proces 3D tiska se izvaja v računalniško krmiljeni napravi – 3D tiskalniku. Izdelek nastane s postopnim nalaganjem več zelo tankih plasti eno na drugo. S cenovno dostopnostjo tiskalnikov se je 3D tiskanje v zadnjih desetih letih začelo uveljavljati tudi v domačem in šolskem okolju. 3D tiskanje je 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 ponavadi 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 filament z dodanimi karbonskimi vlakni z aluminijem. Pri nekaterih filamentih se med tiskanjem lahko v zrak sproščajo tudi nekatere za človeka škodljive snovi (1)(2). Boljši 3D tiskalniki imajo zaprte gradilne komore, v katerih zajemajo in varno odvajajo škodljive snovi, pri večini bolj dostopnih 3D tiskalnikov pa hlapi med tiskanjem prosto in nenadzorovano uhajajo v zrak v zaprtih prostorih (3).

V notranjih prostorih z neustreznim prezračevanjem koncentracije onesnaževal hitro narastejo nad priporočene oz. dovoljene vrednosti. Med najpomembnejša onesnaževala notranjega zraka sodijo: tobačni dim, alergeni, ogljikov monoksid in dušikov dioksid, radon, prašni delci različnih velikosti in lahkohlapni ogljikovodiki (4)(5). Zadnji dve onesnaževali sta pomembni pri ocenjevanju morebitne škodljivosti 3D tiska.

Prašni delci (angl. Particulate Matter – PM) so kompleksna mešanica organskih in anorganskih snovi, ki so prisotne v zraku. Nastanejo z lomljenjem ali drobljenjem večjih kosov materiala ali kot posledica zapletenih reakcij med prisotnimi snovmi v zraku, nastajajo tudi pri gorenju, poznamo pa še veliko drugih virov. Sestava teh delcev je odvisna od vira delcev. Velikost delcev običajno opisujemo s t. i. aerodinamičnim premerom, ki je opredeljen kot premer okroglega delca z gostoto 1 g/cm³. Za spremljanje onesnaženosti zraka jih delimo v štiri skupine: (1) PM₁₀ – delci z aerodinamičnim premerom do 10 µm; (2) PM_{2,5} – delci z aerodinamičnim premerom do 2,5 µm; (4) PM_{1,0} – delci z aerodinamičnim premerom do 1 µm in (5) ultrafini delci (UFP) – zelo fini delci z aerodinamičnim premerom do 0,1 µm. Razdelitev prašnih 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 razdalje, ki jo lahko delci prepotujejo v zraku (6). Za pojav negativnih učinkov na zdravje so poleg velikosti delcev pomembne tudi njihove fizikalno-kemijske lastnosti (7).

Lahkohlapne organske spojine (angl. Volatile Organic Compounds – VOC) 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 (8). Lahkohlapne organske spojine pogosto najdemo v gospodinskih izdelkih, kot so barve, odstranjevalci barv, topila, sredstva za zaščito lesa, aerosolni razpršilniki, 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 med samo uporabo in tudi med shranjevanjem. 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 (9). Za določanje kemijske sestave večine hlapnih organskih spojin moramo izvesti kompleksne laboratorijske postopke. Za celokupni VOC v notranjem zraku je v Sloveniji postavljena dopustna koncentracija 600 µg/m³ (10). Kratkoročni vplivi na zdravje pri akutni izpostavljenosti VOC so: draženje sluznice nosu in grla, alergijske kožne reakcije, slabost, bruhanje, utrujenost in vrtoglavica. Pri daljši, ponavljajoči se, izpostavljenosti pa lahko pride tudi do nastanka nekaterih rakavih obolenj (11).

Osnovni namen raziskave je bil proučiti, ali se ob 3D tiskanju sproščajo snovi, ki bi bile lahko škodljive za človeka, glavni cilj pa je bil izmeriti koncentracijo delcev PM_{2,5} in lahkohlapnih ogljikovodikov, ki se sproščajo ob 3D tiskanju v domačem okolju. Iz pridobljenih podatkov želimo ugotoviti, ali je 3D tiskanje škodljivo za zdravje ter določiti časovni okvir, v katerem bi koncentracije škodljivih snovi v prostoru presegle v pravilniku določeno (10) še varne koncentracije škodljivih snovi.

2. Materiali in metode

V raziskavi smo merili koncentracije VOC in koncentracijo delcev PM_{2,5} po 3D tisku z desetimi različnimi materiali. Pridobljene rezultate smo primerjali z zakonsko opredeljenimi vrednostmi na področju kakovosti notranjega zraka (10).

2.1 Opis poskusa


V raziskavi smo uporabil klasičen nizkocenovni 3D tiskalnik Creality Ender 3. Tiskalnik izdelek gradi iz filameta – polne plastične žice s premerom 1,75 mm, navite na kolutu. Preizkusili smo 10 različnih materialov:

1. polilaktično kislino (PLA),
2. polilaktično 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 in
10. najlon z dodatkom karbonskih vlaken (karbonska vlakna).

Vsi materiali so bili kupljeni pri proizvajalcu filamentov Azurefilm (12).

Za testni model smo izbrali set šestih šahovskih figuric iz spletne knjižnice Thingiverse (13). Figurice smo postavili na razdaljo 6 centimetrov tako, da smo imeli vedno isti model z istimi medsebojnimi razdaljami ter s tem omogočili identične gibe 3D tiskalnika v vseh primerih: za vsak tisk smo porabili približno 12,7 m filameta. Za obdelavo in rezanje modela smo uporabili programski rezalnik Ultimaker Cura (14) z večinsko privzetimi nastavitvami za 3D tiskalnik Creality Ender 3 (višina plasti 0,2 mm; 4 stene; 4 zgornje in spodnje plasti; Giriod polnilo; 20 % polnila).

Dodatne nastavitve so odvisne od samega uporabljenega materiala med nalaganjem plasti. Ena pomembnejših nastavitvev je temperatura šobe, saj z njo uravnavamo viskoznost materiala. Za različne materiale proizvajalec navaja različne temperaturne razpone za 3D tiskanje. Za raziskavo smo uporabili srednjo priporočeno temperaturo za vsak filament. Vse uporabljene temperature so prikazane v Tabeli 1.

 Tabela 1 Priporočene temperature šobe in podlage za 3D tiskanje s testnimi materiali.

Legenda: 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.

Za gradilno površino smo uporabili stekleno ploščo, prevlečeno s snovjo Dimafix (15), ki ob segreti površini prepreči zdrs modelov iz tiskalne površine med tiskanjem. Tanka plast polivinil alkohola, ki je sestavni del Dimafixa, ne bi smela vplivati na meritve, saj se grelna površina ne segreje dovolj, da bi povzročila razpad materiala. 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 1.

Kljub temu da s temperaturo šobe nastavljamo viskoznost polimera, je pri določenih materialih potrebno počasnejše 3D tiskanje. Pri večini materialov smo uporabili hitrost 50 mm/s, saj je to hitrost, pri kateri na tem tiskalniku dosežemo najboljše rezultate v najkrajšem času. Hitrost 3D tiska seveda vpliva tudi na

končni čas, ki je potreben za izdelavo 3D natisnjene izdelka. Testni model se je pri hitrosti 50 mm/s tiskal 5 ur, 18 minut in 2 sekundi.

Za merjenje opazovanih onesnaževal v notranjem zraku smo v raziskavi uporabljal merilnik uHoo (16). To je pametni merilnik kakovosti zraka za domačo uporabo, ki meri relativno vlažnost zraka, temperaturo zraka, zračni pritisk, koncentracijo ogljikovega dioksida in ogljikovega monoksida, koncentracijo lahkih ogljikovodikov, koncentracijo delcev do velikosti 2,5 µm (PM2,5 in koncentracijo dušikovega dioksida ter ozona. Izmerjene vrednosti uHoo merilnik pošilja na zunanji strežnik, uporabnik pa lahko do njih dostopa z aplikacijo na pametnem telefonu.

Za meritve koncentracij snovi, ki nastajajo med 3D tiskanjem, smo potrebovali prostor, ki nima pretoka zraka in v katerem ni morebitnih ostalih virov onesnaževanja notranjega zraka. Tiskalnik smo postavili v kletni prostor (v času raziskave notri ni bilo možnih motečih dejavnikov npr. sprememb v temperaturi, zračnih tokov in dodatnih virov izpustov nepovezanih s samim eksperimentom). V posebej za poskus pripravljeno komoro, narejeno iz prozornega pleksi stekla. Tako smo lahko vse izpuste, ki so nastali med 3D tiskanjem, ujeli in jih izmerili. Komora na 3D tiskalniku z merilnikom je prikazana na Sliki 1.



Slika 1 Komora s 3D tiskalnikom in uHoo merilnikom.

2.2 Priprava ocene potencialnih učinkov na zdravje

Od vseh izpustov, ki jih meri naprava uHoo, smo se v raziskavi osredotočili na VOC in PM2,5. Koncentracije VOC in PM2,5, ki so še dopustne z vidika varovanja zdravja, so zapisane v Prilogi 1 Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb (10). Za VOC pravilnik določa dopustno mejo v notranjih prostorih 600 µg/m³, pri delcih pa pravilnik podaja dopustno vrednost v notranjih prostorih za PM10, ki je 100 µg/m³. Dopustne meje za PM2,5, kar lahko merimo z napravo uHoo, pravilnik ne podaja vrednosti. Ocenjeno pa je, da je med PM10 približno 70 % delcev (6), ki so manjši od 2,5 mikrometra, zato smo pri pripravi potencialnih učinkov na zdravje pri PM2,5 kot dopustno mejo v notranjih prostorih opredelili 70 µg/m³.

Ocena potencialnega učinka na zdravje je podana v obliki časa 3D tiskanja s posameznim materialom, v katerem bi bila presežena dopustna vrednost VOC ali PM2,5 v prostoru. Ob tem smo predpostavili, da prostora ne zračimo. Za vsak material smo pripravili oceno za tiskanje v sobi in šolski učilnici. Soba meri približno 3 x 4 x 2,5 m ter ima tako prostornino 30 m³. Prostornina tipične šolske učilnice je približno 500 m³ (17). Iz največje koncentracije VOC oziroma PM2,5 v µg/m³, ki smo jo izmerili v komori, smo najprej izračunali količino snovi v komori (v µg) in iz tega naredili preračun na prostornino sobe oziroma učilnice (17). Za lažjo razlago rezultata smo izračunali še količino VOC in PM2,5, ki nastane v eni uri pri tiskanju z vsakim od materialov.

3. REZULTATI

3.1 Lahkohlapni ogljikovodiki

Grafi na Sliki 2 prikazujejo meritve VOC pri tiskanju s posameznim materialom. Grafi prikazujejo izmerjene koncentracije v celem dnevu. Vsi poskusi so se pričeli med 6. in 9. uro zjutraj. Z oranžno barvo je na grafu označena časovna komponenta/čas, ko so bile vrednosti najvišje in so presegle 1000 µg/m³. Pred začetkom poskusa so vrednosti VOC v notranjem 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 filameta, 3D tiskanje predmetov, ki niso povezani z raziskavo ipd.). Za oceno sprememb v koncentracijah med poskusom pa je bilo ključno tik pred začetkom poskusa prostor ustrezno prezračiti in zagotoviti začetno koncentracijo VOC pod mejo detekcije.



Slika 2 Izpusti lahkih ogljikovodikov pri tiskanju testnega modela z različnimi materiali. Začetek poskusa med 6. in 9. uro, konec označen z navpično zeleno/oranžno črto.

Legenda: 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

Količina VOC v komori premo sorazmerno narašča s časom, tako da lahko za nadaljnje izračune uporabljamo 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 enaka nič. Končne koncentracije za vsak uporabljen material so zapisane v Tabeli 2. Najvišje koncentracije VOC pri tiskanju testnega modela smo zabeležili pri ABS (1737 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), končne vrednosti nad 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pa smo zmerili še pri HIPS in ASA

Za vsak material smo izračunali skupno maso izpusta lahkih organskih spojin med 3D tiskanjem v poskusni komori in koliko mikrogramov VOC med tiskanjem s posameznim materialom v eni uri izpusti 3D tiskalnik. Rezultati so prikazani v Tabeli 2

Tabela 2 Končne koncentracije lahkih organskih ogljikovodikov (VOC končna) v $\mu\text{g}/\text{m}^3$, skupna masa izpusta lahkih organskih spojin (VOC) med 3D tiskanjem v poskusni komori, ocena izpustov v eni uri pri tiskanju testnega modela za posamezne materiale in ocenjene koncentracije lahkih organskih ogljikovodikov za prostor 30 m^3 (VOC30) in učilnico 500 m^3 (VOC500).

Legenda: 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.

Ocena potencialnega učinka za zdravje je pripravljena za 3D tiskanje v sobi s prostornino 30 m^3 in v učilnici s prostornino 500 m^3 . Koncentracije VOC ob 3D tiskanju testnega modela z vsemi uporabljenimi materiali v sobi in učilnici so podane v Tabeli 2. V nobenem primeru ni presežena dovoljena koncentracija VOC v notranjih prostorih, kot jo opredeljuje Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tabela 3 prikazuje, koliko časa bi smeli tiskati s posameznim materialom, da s tiskanjem ne bi presegli predpisane vrednosti VOC v notranjih prostorih, ki jih določa Pravilnik. Pri najbolj problematičnem materialu (akrilonitril stiren akrilat) bi predpisano koncentracijo VOC dosegli po 214 urah tiskanja brez prezračevanja, pri materialu PLA, ki je najpogosteje uporabljen, pa po 1985 urah tiskanja brez prezračevanja.

Tabela 3 Čas tiskanja v urah, ki je potreben, da dosežemo mejno vrednost koncentracije hlapnih organskih spojin za prostor in učilnico.

Legenda: 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.

3.2 Delci PM_{2,5}

Kot drugo morebiti zdravju škodljivo snov smo merili koncentracijo delcev PM_{2,5} v zraku. Tako kot pri meritvah VOC smo pred začetkom meritev poskušali zagotoviti, da v komori ni bilo prisotnih PM_{2,5} delcev. Z meritvami smo ugotovili, da pri nobenem izmed materialov koncentracija delcev PM_{2,5} v času tiskanja ni narasla, opazovano gibanje koncentracij pa je bilo naključno in nepovezano s poskusom. Iz tega lahko sklepamo, da se ob 3D tiskanju s katerim koli izmed testnih filamentov v zrak delci 2,5 μm ne sproščajo.

4. Razprava

V raziskavi smo izmerili koncentracijo VOC in PM_{2,5} v testni komori po koncu peturnega 3D testnega tiska z desetimi izbranimi materiali.

Ker smo v poskusu uporabili tudi nekaj nestandardnih materialov, je bilo potrebno domači tiskalnik Creality Ender 3 v nekaj delih ustrezno prilagoditi. Za tiskanje materialov, ki vsebujejo večje delce (koščki lesa in karbonska vlakna), smo uporabili 0,6-milimetrsko jekleno šobo (namesto klasične 0,4-milimetrske). 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. Če pa 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. S prilagoditvijo tiskalnika z omenjeno glavo smo tako lahko tiskali tudi materiale, pri katerih so za tisk potrebne višje temperature. Tovrsten dodatek ne vpliva na izpuste VOC ali PM_{2,5}, saj ohranja enak volumen segrete plastike ter ne vključuje delov, iz katerih bi med postopkom 3D tiskanja lahko izhajali PM_{2,5} ali VOC.

Za merjenje izpustov smo v poskusu uporabili merilnik uHoo (16). Enostaven uporabniški vmesnik, majhna, ter primerno zanesljiva naprava (18), ki jo je enostavno namestiti, naredita uHoo merilnik zelo prijazen za uporabnika. Ima pa merilnik uHoo zaradi svoje enostavnosti tudi kar nekaj lastnosti, ki otežujejo njegovo uporabo oziroma ga za kompleksnejše poskuse naredijo manj primerne. Ob zagonu merilnik potrebuje dve uri, da se senzorji popolnoma segrejejo, v tem času pa meritve lahkih ogljikovodikov niso ustrezne. Prav tako na meritve slabo vplivajo hitre spremembe temperature okoliškega zraka, kot je že opisoval (19). V naši raziskavi je, kljub temeljitem zračenju, ki naj bi zagotovilo koncentracije VOC pod mejo detekcije, senzor v nekaterih primerih (npr. PVA) ob začetku poskusa zaznal nekaj VOC. Ker v neposredni bližini v zunanjem zraku ni bilo potencialnih virov VOC, je tovrsten rezultat presenetljiv. Napačne meritve pa lahko obrazložimo s tem, da se senzorji med zračenjem preveč shladijo in ne morejo več normalno delovati, kot že pojasnjeno zgoraj in ugotavljano tudi pri (19). V specifikacijah sicer piše, da naj bi merilnik deloval med -10 °C in 50 °C, a v praksi se je izkazalo, da naprava daje smiselne vrednosti VOC po približno pol ure delovanja na sobni temperaturi. Zračenje pred začetkom tiska je na vsakem grafu vidno kot padec koncentracije VOC pred strmo rastjo. V nobenem primeru ta pomanjkljivost ne vpliva na končne meritve oziroma rezultate poskusa.

Vaisanen s sodelavci (20) povzema, da je do sedaj že več deset različnih raziskav pokazalo, da se pri toplotni ekstruziji ob 3D tisku pogosto sproščajo VOC, kot tudi ultrafini in večji delci, do PM₁₀; tudi v koncentracijah, ki bi bile lahko za zdravje škodljive. Iz naših rezultatov lahko vidimo, da se med 3D tiskanjem v zrak delci velikosti 2,5 µm ne sproščajo. Rezultat je presenetljiv predvsem pri obeh materialih, ki vsebujeta dodatke: polilaktično kislino z lesnim dodatkom in najlon z dodatkom karbonskih vlaken. Pri oblikovanju lesa ali karbonskih vlaken z brušenjem ali žaganjem se tovrstni delci sproščajo v velikih količinah kar lahko negativno vpliva na zdravje (21). Pri 3D tisku pa najverjetneje ti delci ostanejo vezani v polimeru in se ne sproščajo prosto v zrak.

Pri meritvi izpustov VOC so bile koncentracije v komori po tisku veliko višje od začetnih koncentracij. Pri nekaterih materialih so bile koncentracije VOC tako visoke, da so presegle dopustno vrednost 600 µg/m³. Ob tiskanju se osebe ne nahajamo direktno v tiskalni komori, ampak v veliko večjih prostorih oz. v večjih učilnicah. Zato smo količino nastalih VOC preračunali na prostornino sobe oziroma standardne učilnice (17). Pri vseh materialih so bile po preračunu koncentracije veliko pod dopustno zakonsko opredeljeno mejo. Ugotavljamo, da bi v sobi z volumnom 30 m³ lahko brez zračenja tiskali najbolj problematičen material (akrilonitril butadien stiren) 215 ur, najmanj problematičen material (polilaktično kislino) pa 2393 ur. Obe vrednosti veliko presegata običajne čase 3D tiskanja, tako da lahko zaključimo, da 3D tiskanje za domačo uporabo ni nevarno z vidika učinkov na zdravje. Ob večjem številu tiskalnikov in stalni proizvodnji delov iz akrilonitril butadien stirena pa bi lahko koncentracije presegle mejno vrednost 600 µg/m³.

Za natančnejšo oceno emisij posameznih materialov pa bi morali izvesti še veliko kompleksnejše in dražje postopke za določanje dejanske količine posameznih VOC, ki so lahko posledica 3D tiskanja (1)(2). Z merilnikom uHoo lahko izmerimo le celokupni VOC, ne pa tudi posamezne spojine. V naši raziskavi smo tako tveganje za zdravje računali po principu najslabšega možnega primera. Predpostavili smo, da je koncentracija vseh hlapnih

organskih spojin enaka tisti, ki naj bi jo predstavljala najbolj problematična spojina v posameznem materialu. S tem smo se lahko izognili 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.

5. Zaključek

Pri 3D tiskanju velike večine materialov se v zrak sprosti zelo majhna količina lahkih organskih spojin ter delcev PM_{2,5}, 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 tiskanja se lahko koncentracije VOC 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 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), ne presežemo s pravilnikom določenih mej (10), 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 volumnom 30 m³ varno le s tiskanjem z manj kot 40 3D tiskalniki naenkrat, saj bi ob uporabi več 3D tiskalnikov v času, daljšem od 6 ur, koncentracija VOC v prostoru preveč narasla.

Različni proizvajalci filamentov uporabljajo različna razmerja osnovnih gradnikov v polimerih in s tem se ob tiskanju pri nazivno enakih materialih v zrak sproščajo različne koncentracije snovi. Vsekakor so potrebne nadaljnje podobne raziskave za različne dobavitelje filamentov in proizvajalcev plastike. Za popoln pregled nad morebitnimi zdravju škodljivimi izpusti ob 3D tiskanju pa bila smiselna tudi uvedba deklaracij na filamentih, ki bi opredeljevale količino izpustov ob tiskanju.

Reference

- Byrley P, Wallace MAG, Boyes WK, Rogersdybrey K. Particle and volatile organic compound emissions from a 3D printer filament extruder. *Sci Total Environ* 736: 139604. [↵](#)
- Davis AY, Zhang Q, Wong JPS, Weber RJ, Black MS. Characterization of volatile organic compound emissions from consumer level material extrusion 3D printing. *Building and Environment* 2019; 160: 106209. [↵](#)
- Kerr T. 3D Printing: Introduction to Accessible, Affordable Desktop 3D Printing. Cham: Springer, 2022. [↵](#)
- Nacionalni inštitut za javno zdravje. Notranji zrak – priporočila za prebivalce. Ljubljana: NIJZ, 2017. [↵](#)
- Kakovost zraka v zaprtih prostorih [spletna stran na Internetu]. Pridobljeno 7. 3. 2023 s spletne strani: www.eea.europa.eu/sl/eea-signali/signali-2013/clanki/kakovost-zraka-v-zaprtih-prostorih. [↵](#)
- Uršič A. Ocena vpliva onesnaženosti zraka z delci PM_{2,5} na umrljivost v krajih s prekomerno onesnaženim zrakom. Ljubljana: NIJZ, 2021. [↵](#)
- Bilban M. Vpliv zračnega onesnaženja na zdravje. *Zavod za varstvo pri delu, Katedra za javno zdravje. Delo in varnost* 2014; 59: 20-5. [↵](#)
- Bilban M, Rejc T, Dovjak M, Kuček A. Sindrom bolnih stavb in bolezni, povezane z bivanjem v grajenem okolju: opredelitev učinkov na zdravje in dejavnikov tveganja. *Delo in varnost* 2017; 62: 28-43. [↵](#)
- Kuček A, Galičič A, Jovišič R, Pohar M, Golja V. Emisije hlapnih in polhlapnih organskih spojin iz gradbenih proizvodov in ocena njihovega vpliva na zdravje. *J zdravje* 2021; 3: 1-9. [↵](#)
- Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Uradni list RS, št. 42/02, 105/02, 110/02 – ZGO-1 in 61/17 – GZ). [↵](#)
- Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality [spletna stran na Internetu]. Pridobljeno 7. 3. 2023 s spletne strani: www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality. [↵](#)
- Azurefilm [spletna stran na Internetu]. Pridobljeno 1. 9. 2023 s spletne strani: www.azurefilm.si. [↵](#)
- Thingiverse model [spletna stran na Internetu]. Pridobljeno 1. 9. 2023 s spletne strani: <https://help.prusa3d.com>. [↵](#)
- Ultimaker cura [spletna stran na Internetu]. Pridobljeno 1. 9. 2023 s spletne strani: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>. [↵](#)
- Dimafix [spletna stran na Internetu]. Pridobljeno 1. 9. 2023 s spletne strani: <http://www.dima3d.com/en/home/dimafix>. [↵](#)
- uHoo [spletna stran na Internetu]. Pridobljeno 1. 9. 2023 s spletne strani: <https://getuhoo.com>. [↵](#)
- Neufert E. Projektiranje v stavbarstvu: osnove, standardi, predpisi za konstrukcije, gradnja, oblikovanje, potrebni prostor, namembnost prostorov, mere zgrajenih prostorov in opreme – s človekom kot merilom in ciljem: priročnik za projektante, izvajalce in študente. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije, 2002. [↵](#)
- Baldelli A. Evaluation of a low-cost multi-channel monitor for indoor air quality through a novel, low-cost, and reproducible platform. *Meas Sens* 2021; 17: 1. [↵](#)
- Salthammer T. TVOC – Revisited. *Environ Int* 2022; 167: 107440. [↵](#)
- Väisänen A, Alonen L, Ylönen S, Hyttinen M. Volatile organic compound and particulate emissions from the production and use of thermoplastic biocomposite printing filaments. *J Occup Environ Hyg* 2022; 19: 381-93. [↵](#)
- GZS. Priročnik dobre prakse o zaščiti zdravja delavcev z varno prakso ravnanja in uporabe kristalnega silicijevega dioksida in izdelkov, ki ga vsebujejo. Ljubljana: GZS, 2021. [↵](#)