



## Одржавање квалитета унутрашње средине у просторијама са 3D штампањем на бази смола и UV извора – емисије VOC и стратегије вентилације

### Maintaining Indoor Environmental Quality in Rooms with Resin-Based and UV 3D Printing – VOC Emissions and Ventilation Strategies

Теодора Рашковић, Игор Мујан, Факултет техничких наука, Нови Сад

#### Студијски програм – ЕНЕРГЕТИКА И ПРОЦЕНА ТЕХНИКА

**Кратак садржај** – У уводном делу, на основу претходних студија и вредности добијених експериментима, усвајају се концентрације органских испарљивих једињења, након чега се врши упоредна анализа са резултатима изведеног експеримента. Истраживање је спроведено у школској учионици у којој се налазе три mSLA штампача. Циљ рада је сагледавање утицаја услова очвршћавања на својства и квалитет ваздуха у просторији.

Приликом извођења експеримента коришћени су сензори SEN55 и SCD41 ради мерења концентрација загађујућих материја. У закључку су дате препоруке и мере за унапређење квалитета ваздуха у просторији, као и правци даљих истраживања.

**Кључне речи:** адитивна производња, стереолитографија, органска испарљива једињења

**Abstract** – In the introductory part, based on previous studies and values obtained through experiments, concentrations of volatile organic compounds are adopted, followed by a comparative analysis with the results of the conducted experiment. The study focuses on a school classroom equipped with three mSLA printers. The aim of the research is to summarize the curing conditions and their impact on the properties and air quality within the room. During the experiment, SEN55 and SCD41 sensors were used to measure pollution concentrations. The conclusion provides recommendations and measures for establishing and maintaining air quality in the room, as well as directions for future research.

**Keywords:** additive manufacturing, stereolithography, volatile organic compounds

#### НАПОМЕНА:

Овај рад произтекао је из мастер рада, чији ментор је био др Игор Мујан, доцент

#### 1. УВОД

У даљој еволуцији производног сектора, као једна од перспективних технологија јавља се адитивна производња, која се развија већ неколико деценија.

Студијом је процењен утицај нискоемисионих 3D штампача и материјала на квалитет унутрашњег ваздуха у образовним просторијама које првобитно нису пројектоване за изворе емисија попут оних са 3D штампача.

У објектима овог типа изложеност хемикалијама и честицама које задовољавају критеријуме заштите и здравља на раду обично премашује нивое прихватљиве за кориснике, јер је изложеност често дужа и укључује мешавине многих загађујућих материја.

VOC (испарљива органска једињења) у затвореном простору достижу вредности које су два до пет пута више од оних у спољашњем ваздуху. Предложени аналитички модел је експериментално доказан.

#### 2. ЕМИСИЈЕ ИЗ АДИТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ

Процес адитивне производње представља значајан извор емисија испарљивих органских једињења и честице различитих величина. Концентрације и врсте емитованих једињења зависе од типа материјала, температуре процеса и затворености простора у којем се изводи штампање [1].

Честице у ваздуху могу бити чврсте или течне, најчешће у облику прашине, дима, магле или испарења. Величина честице има кључан утицај на здравље. Честице мање од 10  $\mu\text{m}$  могу доспети до доњег респираторног тракта, док наночестице (<100 nm) могу доспети у крвоток [2].

Још један значајан загађивач који се емитује током адитивне производње јесте формалдехид (CH<sub>2</sub>O). Он настаје као секундарни производ термичке оксидације органских материјала, посебно полимера који садрже метилне и метиленске групе. Формалдехид је безбојан гас оштрог мириса и један од најпознатијих канцерогена у унутрашњем ваздуху. Изложеност чак и малим концентрацијама (0,1 ppm) може изазвати иритацију очију и слузокоже, док хронична изложеност доводи до оштећења плућног ткива и повећаног ризика од појаве карцинома носне шупљине и грла [3].

Испарљива органска једињења (VOC) имају тачке кључања у опсегу од 50 °C до 250 °C и притиске испаравања од 0,1 Pa до 0,01 Pa. Материјали као што су полимери и смоле првенствено апсорбују, а затим реемитују органска испарљива једињења [4].

### 3. 3D ШТАМПА

За разлику од уобичајених конвенционалних метода, које подразумевају уклањање материјала са већег блока, 3D штампа функционише адитивно, градећи објекат у слојевима.

Овакав приступ минимизује отпад [5].

Врста материјала која се користи, дизајн слојева и њихово повезивање указују на главне разлике између уређаја за адитивну производњу.

Према агрегатном стању материјала, који може бити у чврстом или течном облику, разликују се поједине врсте адитивних технологија. Стереолитографија (SLA), која ће бити опширније обрађена, селективно ласерско синтеровање (SLS), очвршћавање дигитално обрађеним светлосним сигналом (PolyJet) и производња термопластичним филаментом (FDM) [6]. Током процеса штампе, из течних фотополимера могу се ослобађати испарљива органска једињења (VOC) [4].

Полиакрилна смола, која се користи у процесу стереолитографије, представља фотополимер који прелази из течног у чврсто стање при излагању светлости таласне дужине 405 nm.

За потребе штампања примењује се mSLA (UV LCD) технологија, која као основну сировину користи течну смолу Creality 3D Printer UV Sensitive Resin и LCD екран са UV светлом [7].

### 4. ПРЕТХОДНЕ СТУДИЈЕ

Приликом израде овог рада и спровођења истраживања на ову тему, дошло се до сазнања да су истраживања емисија насталих активним деловањем адитивне производње релативно оскудна. Ова појава је вероватно последица веће заступљености ове врсте производње у неиндустријским срединама.

Емисије и нуспроизводи процеса који се најчешће помињу у литератури јесу испарљива органска једињења, прашкасте материје, формалдехиди, алкохоли и оксидујући гасови.

#### 4.1. Експеримент из литературе релевантан за истраживање теме

Поступак експеримента у литератури је изведен у етапама на следећи начин: У првој фази се мери концентрација TVOC-а када машина није у раду. Друга фаза се бави мерењем током процеса адитивне производње. Трећа фаза анализираног експеримента укључује мерење након обраде.

Просечне концентрације TVOC-а за три фазе су 122,70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 1.052,71  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  и 1.774,15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , респективно, а укупан просек је 1.034,25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  [8].

### 5. УТИЦАЈ 3D ШТАМПЕ НА ЉУДСКО ЗДРАВЉЕ И ЖИВОТНУ СРЕДИНУ

Рад ових уређаја у затвореним просторима може имати утицај на квалитет ваздуха и здравље људи који се у том простору налазе. Процес штампе, нарочито код технологија као што су FDM (fused deposition modeling) и SLA (stereolithography), може ослобађати

ултрафине честице (UFPs) и испарљива органска једињења [12].

Ултрафине честице су микроскопске честице пречника мањег од 100 nm. Због своје величине, ове честице могу лако продриети дубоко у плућа и друге делове респираторног система. Количина и врста честица које се емитују зависи од материјала који се користи.

Поред честица, током процеса 3D штампе долази и до ослобађања формалдехида и оксидујућих гасова. Када је реч о VOC, мора се назначити да ова једињења могу довести до иритације очију и хроничних здравствених ефеката.

Развој и широка доступност desktop 3D штампача отворили су нове могућности у образовању, истраживању и малим производним процесима. Ипак, повећан број уређаја у школама, предузећима и домаћинствима доводи до раста укупне потрошње енергије. Сваки појединачни штампач можда не троши значајну количину струје, али њихов укупан број и учестала употреба имају приметан еколошки утицај.

Већина отпада из ових процеса завршава на депонијама или у воденим токовима, где се не разграђује у потпуности и може представљати ризик за животну средину [11].

Поред потенцијално негативних утицаја на људско здравље, VOC се такође могу емитовати у атмосферу и контаминирати ваздух због својих ниских тачака кључања. Такође, утврђено је да су испарљива органска једињења кључни прекурсори формирања озона при тлу и PM честица, које доприносе стварању фотохемијског смога и доводе до озбиљног загађења ваздуха и еколошких проблема.

Стога, због опасних ефеката по здравље и еколошки живот, потребно је проценити емисије и могуће негативне ефекте [8].

#### 5.1. Мере опреза

Штампа полимеризацијом користи течну фотополимерну смолу која садржи везива, мономере и фотоинцијаторе. Везива могу укључити имуне сензибилизаторе попут акрилата, а фотоинцијатори могу садржати тешке метале. Неопходна је употреба једнократних нитрилних рукавица. Ова једињења се емитују из течне смоле током њихове употребе [10].

Заштитне блокаде и заштитни UV поклопац морају бити на свом месту током рада. Када се ради одржавања уклања поклопац, морају се носити заштитне UV наочаре.

Да би се смањила изложеност, рад треба преместити на места где се налази најмањи број људи у директној линији светлости. На изложеност људи, количину и време задржавања загађења утичу величина простора, врста вентилације, смер струјања ваздуха, као и положај штампача [5].

Препорука је такође вентилација простора и употреба НЕРА филтера.

### 6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО МЕРЕЊЕ У ЛАБОРАТОРИЈИ

Помоћу преносивих сензора, SEN55, SCD41, Factory Calibrated Electrochemical Alcohol Sensor (0–5 ppm) и НСНО сензор (SEN0231) праћене су концентрације

честица и испарљивих једињења у реалном времену. Подаци су снимани на SD картицу како би лакше могли да се обраде у Excel окружењу.

Табела 1. Сензори и једињења чије присуство бележе

| Сензор  | Бележење                                 |
|---------|------------------------------------------|
| SEN55   | Темп., RH, PM., TVOC, оксидујућих гасова |
| SCD41   | Темп., RH, CO <sub>2</sub>               |
| SEN0376 | Присуство алкохола у ваздуху             |
| SEN0231 | HCHO, CH <sub>2</sub> O                  |

У Табели 1. су приказани сензори коришћени за спровођење експеримента [13, 14, 15, 16].

### 6.1. Опис експеримента

Услови у учионици и распоред нису мењани, прозори и врата су били затворени како би се смањило утицај спољашњих извора. Мерења су вршена у близини штампача. Дистрибуције су снимане и осредњаване на 1 минут. На слици 1, приказана је учионица са 3D штампачима (а) и мерна станица (б).



Слика 1. Поставка експеримента (а) и мерна станица (б)

Током извођења експеримента забележене су концентрације за фазу припреме, процес штампања и пост-процес. Започет је у 8.45 часова, извршена су мерења концентрација акумулираних у просторији док штампачи нису у раду. Затим је уследила припрема штампача, која је подразумевала употребу алкохола ради уклањања вишка течне смоле са делова за штампу, сипање процеђене течне смоле. Овај процес за сва три штампача није трајао дуго.

Сама штампа је трајала 42 минута за сва три модела и започета је у 9.20 часова. Штампачи су били затворени током процеса.

У фазу након штампе, односно само одвајање и очвршћавање модела, укључено је и прање, као и скидање потпорне структуре. Време потребно за прање сва три модела било је 5 минута, након чега су модели остављени да се додатно осуше и стврдну на прозору. На слици 2 је приказан поступак уклањања модела из штампача.



Слика 2. Завршетак штампања и уклањање модела

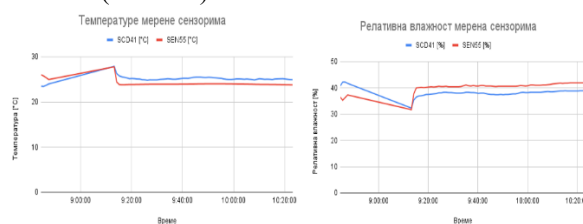
Експеримент, односно период бележења, завршен је у 10.20 часова. Мерење је могло да се настави још неко време, али су мириси од штампе били доста

интензивни. Ово је било и очекивано, с обзиром на то да су током овог периода производње прозори и врата били затворени како би се остварили стабилни услови.

### 6.2. Резултати мерења

Упркос заступљености више врста технологија 3D штампе, за потребе рада и спровођење самог експеримента коришћени су Anycubic Photon S (SLA штампачи) који као главну сировину користе фотополимерну смолу Creality 3D Printer UV Sensitive Resin. Употребом опреме за мерење – SEN55, SCD41, Factory Calibrated Electrochemical Alcohol Sensor (0–5 ppm) и HCHO сензор (SEN0231) – праћене су концентрације честица и испарљивих једињења у реалном времену. Након извршеног експеримента, подаци су обрађени и приказани у наставку.

Измерена релативна влажност, температура и емисије CO<sub>2</sub> су уједначене, што имплицира да су услови стабилни (Слика 3).



Слика 3. График температуре и релативне влажности за два сензора

За све прашкасте материје су концентрације скоро идентичне и варирају око 6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Што је могуће уочити и са слике 4.



Слика 4. Концентрације свих PM честица по времену

Приликом анализирања резултата добијених за укупна органска једињења (Слика 5) уочава се пораст на самом почетку мерења који је узрокован припремом штампача и радом са смолом и алкохолом. Када је започета припрема модела и сам рад на рачунару, концентрација се смањила. Током штампе, TVOC се континуирано емитују, око 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



Слика 5. Резултати мерења органских испарљивих једињења

Максимална вредност ових емисија,  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  достигнута је када су истовремено отворена сва три поклопаца штампача и третирани модели накнадном обрадом. Препоручени праг за затворене просторије, који износи  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , у фази пост-процеса је прекорачен [1].

## 7. ЗАКЉУЧАК

Резултати мерења преузети из литературе могу се имплементирати и на систем задат у овом раду. Када се помноже просечне концентрације са штампачима у раду  $1034 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , вредност концентрације органских испарљивих једињења расте до  $3000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

За спроведени експеримент добијени су нешто другачији подаци. Резултати за испитиване штампаче показују минималне емисије честица, али високе емисије волатилних испарљивих једињења. Два сензора која су требала да мере присуство алкохола и формалдехида остала су у режиму спавања. Измерена релативна влажност, температура и емисије  $\text{CO}_2$  су уједначене, што имплицира да су услови стабилни. Током периода штампања емисије су биле готово уједначене вредности од око  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Из овога је могуће закључити да се усвојени подаци из литературе у многоме разликују од података добијених експериментом.

Препорука је да се пројектује и експлоатише локална вентилација у непосредној близини штампача, јер поклопац на штампачу не представља никакав вид заштите. Одједном се ослобађа целокупна заробљена количина ових једињења, што доводи до већих проблема.

Препоручује се употреба адитивне производње у добро вентилираним просторијама, затварање штампача у кућиште са НЕРА и активним угљеничним филтерима, коришћење заштитне опреме (нитрилне рукавице, заштитне наочаре) при раду са смолом, као и смањен боравак у просторији током активне штампе. Емисије укључују сензибилизаторе, канцерогене и иритансе који могу изазвати иритације и друге здравствене проблеме при изложености.

Процене изложености указале су на високе *TVOC* вредности за све три фазе SLA технологије.

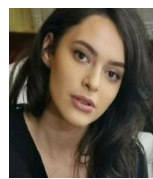
Као правци даљег истраживања предлаже се мерење присуства алкохола и формалдехида.

## 8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gu, J., et al, "Characterization of emissions from polymer-based 3D printing", *Environmental Science & Technology*, 54(2), 960–968, 2020.
- [2] C. Arden Pope & Dockery, D. W. "Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect", *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709–742, 2006.
- [3] International Agency for Research on Cancer (IARC), "Formaldehyde, 2-Butoxyethanol and 1-tert-Butoxypropan-2-ol", *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, Vol. 100F, 2012.
- [4] Игор Мујан, Александар Анђелковић, Мина Солаковић. "Квалитет унутрашње климе" (скрипта)

- [5] Qian Zhang, Aika Y. Davis, Marilzn S. Black, Emission and Chemical Exposure Potentials from Stereolithography Vat Polymerization 3D Printing and Post-processing Units", *ACS Chemical Health and Safety*, 29, 184-191, 2022.
- [6] Nguyen L.H., Straub M. & Gu. M, "Acrilate-Based Photopolymer for Two Photon Microfabrication and Photonic Applications. *Advanced Functional Materials*", 15 (2), str 209-216. doi:10.1002/adfm.2004400212, 2005.
- [7] Ngo, T.D., Kashani A, Imbalzano G, Nguyen K.T.Q, Hui D, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges", *Composites Par*, 2018.
- [8] Yiran Yang and Lin Li, "Total Volatile Organic Compound Emission Evaluation and Control for Stereolithography Additive Manufacturing Process", Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois at Chicago, Chicago, IL 60607, USA, 2017
- [9] S. J. Rees, J. D. Spitler, M. G. Davies, и P. Haves, „Qualitative comparison of North American and U.K. Cooling load calculation methods“, *HVAC and R Research*, том 6, изд. 1, стр. 75–99, 2000, doi: 10.1080/10789669.2000.10391251.
- [10] Michigan State University, Environmental Health and Safety. "Stereolithography (SLA) 3D Printing Safety Fact Sheet." Environmental Health and Safety, Michigan State University, 2020.
- [11] <https://tangiblecreative.com/the-environmental-impact-of-3d-printing/>
- [12] <https://us.snapmaker.com/blogs/news/3d-printing-and-indoor-air-quality-safety-measures> (приступљено у октобру 2025.)
- [13] <https://sensirion.com/products/catalog/SEN55> (приступљено у новембру 2025.)
- [14] <https://sensirion.com/products/catalog/SCD41> (приступљено у новембру 2025.)
- [15] [https://www.dfrobot.com/product-2186.html?gad\\_source=1&gad\\_campaignid=834127384&gclid=Cj0KCQjwsPzHBhDCARIsALiWNG2xWD1b7g\\_NJ4hxQ4QOP0Xiy78J5otA3z7m5KcQzHddbscnrreT7loaAtcxEALw\\_wcB](https://www.dfrobot.com/product-2186.html?gad_source=1&gad_campaignid=834127384&gclid=Cj0KCQjwsPzHBhDCARIsALiWNG2xWD1b7g_NJ4hxQ4QOP0Xiy78J5otA3z7m5KcQzHddbscnrreT7loaAtcxEALw_wcB) (приступљено у новембру 2025.)
- [16] <https://www.dfrobot.com/product-1574.html?srsId=AfmBOop6Xc5tlGZC41e6UFanEsSpcUnFx-aLiOL0JUFXvW1zBCgCdk2b> (приступљено у новембру 2025.)

### Кратка биографија:



**Теодора Рашковић** рођена је у Врбасу 2000. године. Дипломски рад на Факултету техничких наука из области Чистих енергетских технологија одбранила је 2023. године. Мастер рад из исте области одбранила је 2024. године. Од 2024. године запослена је у Средњој техничкој школи „Михајло Пупин“ у Кули.

**Контакт:** [teodora.raskovic5@gmail.com](mailto:teodora.raskovic5@gmail.com)



**Доцент др Игор Мујан** рођен је у Новом Саду 1987. године. Докторирао је на Факултету техничких наука 2021. године. Од 2022. године запослен је у звању доцента, на Катедри за топлотну технику, Департаман за енергетику и процесну технику.