

Doprinos 3D ispisa zelenoj analitičkoj kemiji The contribution of 3D printing to green analytical chemistry

¹Benjamin Radetić, ¹Nikola Sakač

¹Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet Varaždin

e-mail: bradetic@gfv.hr, nsakac@gfv.hr

Sažetak: *U ovom radu istražuje se doprinos 3D ispisa zelenoj analitičkoj kemiji usklađivanjem njegovih metoda s 12 načela zelene kemije, koja imaju za cilj smanjiti štetni utjecaj na okoliš i poticati održivost. Zelena kemija naglašava smanjenje toksičnih reagensa, otpada i potrošnje energije, s ključnom ulogom u analitičkoj kemiji kroz optimizaciju pripreme uzoraka i primjenu zelenijih metodologija, poput izravnih mjerenja bez otapala. 3D ispis kao inovativni proces proizvodnje omogućuje izradu prilagođenih alata, posebice mikrofluidnih uređaja. Ovi uređaji, korišteni za kemijske reakcije, odvajanja ili detekciju spojeva, nude prednosti poput smanjenja troškova proizvodnje, potrošnje reagensa i povećanja prenosivosti uređaja. Predstavljeno je nekoliko metoda 3D ispisa (primjerice FDM, SLA, SLS) i materijala, naglašavajući njihovu prilagodljivost i preciznost u izradi složenih analitičkih uređaja. Integracija 3D ispisa u zelenu analitičku kemiju omogućuje brzu proizvodnju i prilagodbu, pružajući alate za održive kemijske procese te predstavlja rješenja za unaprjeđenje načela zelene kemije, povećanje učinkovitosti i smanjenje ekološkoga otiska.*

Ključne riječi: *zelena analitička kemija, 3D ispis, mikrofluidni uređaji, zaštita okoliša*

Abstract: *This research provides the contribution of 3D printing to green analytical chemistry by aligning its methods with the 12 principles of green chemistry, which aim to reduce environmental harm and promote sustainability. Green chemistry emphasizes minimizing toxic reagents, waste, and energy usage. It plays a vital role in analytical chemistry by optimizing sample preparation and introducing greener methodologies, such as direct and solvent-free measurements. 3D printing, as an innovative*

manufacturing process, enables the creation of custom tools, especially microfluidic devices. These devices, used for chemical reactions, separations, or compound detection, offer advantages like reduced production costs, reagent usage, and increased portability. Several 3D printing methods (e.g., FDM, SLA, SLS) and materials are presented, emphasizing their versatility and precision in producing complex analytical devices. The integration of 3D printing into green analytical chemistry enables rapid prototyping and in situ production, providing tools for sustainable chemical processes and presents solutions to improve green chemistry principles, efficiency enhancement, and environmental impact reduction.

Keywords: *green analytical chemistry, 3D print, microfluidic devices, environmental protection*

Uvod

Zelena kemija podrazumijeva korištenje kemijskih tehnika i metoda koje smanjuju ili uklanjaju upotrebu ili stvaranje sirovina, proizvoda, nusproizvoda, otapala ili reagensa koji su opasni za ljudsko zdravlje ili okoliš. Predstavlja glavni razlog za poticanje održivoga razvoja u industriji i laboratorijima te se primjenjuje tijekom cjeloživotnoga ciklusa kemijskoga proizvoda uključujući njegov dizajn, proizvodnju, uporabu te konačno odlaganje. Uporaba određenih analitičkih metoda razvijenih za analizu različitih vrsta uzoraka, uključujući okolišne uzorke koji stvaraju veliku količinu kemijskog otpada, rezultira velikim utjecajem na okoliš i ljude. Uzimajući u obzir trenutačnu zabrinutost javnosti po pitanjima zaštite okoliša, uporaba toksičnih reagensa i otapala povećana je do mjere u kojoj su postali neodrživi za nastavak bez ekološki prihvatljivijega rješenja (Sajid i Płotka-Wasyłka, 2022.).

Jedan od izazova s kojim se kemijska industrija danas suočava jest prijelaz na zelene, održive proizvodne procese koji učinkovito koriste sirovine, uklanjaju otpad, izbjegavaju korištenje otrovnih i opasnih materijala te smanjuju potrošnju energije. To je moguće ostvariti primjenom dvanaest načela zelene kemije koja razmatraju različite aspekte analitičkoga postupka te nude korake koji se mogu poduzeti kako bi kemijski materijali i procesi bili okolišno što prihvatljiviji (Guardia i Garrigues, 2014.; Muratagić, 2021.).

Radi toga, zelena analitička kemija ima za cilj pružiti praktične alternative tradicionalnim kontrolama kako bi se zamijenile onečišćujuće metode (Armenta et al., 2008.).

3D ispis je tehnologija koja je primjenjiva u raznim područjima. Osim standardne

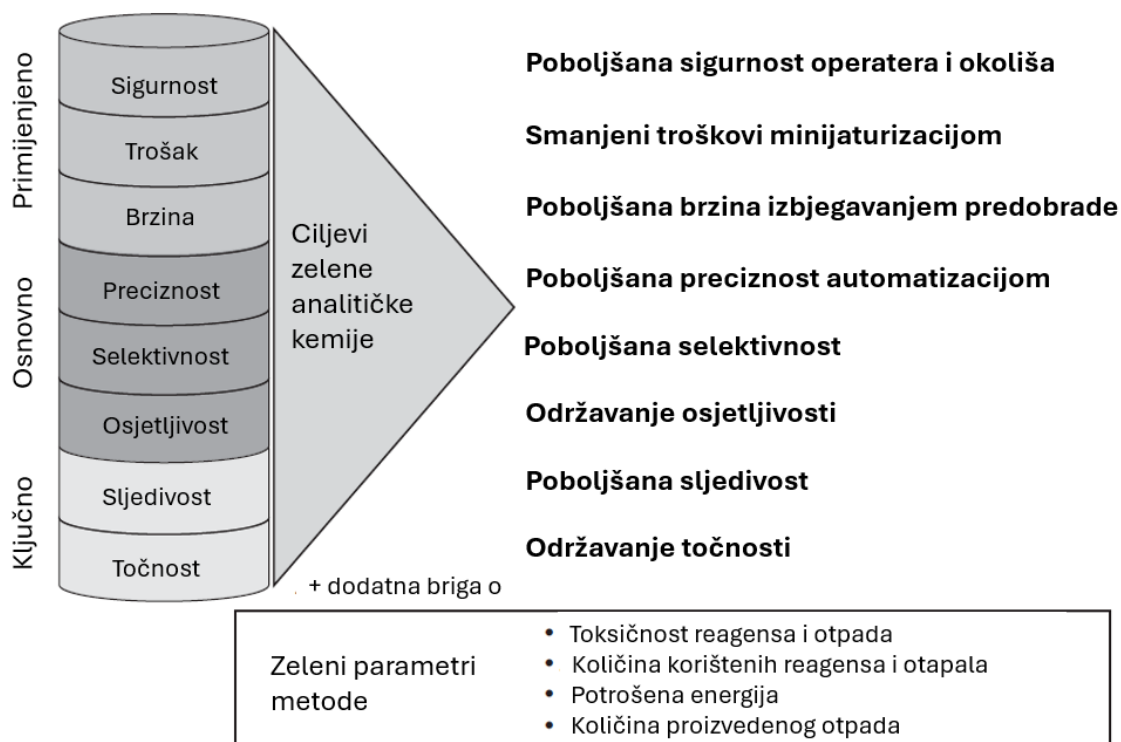
proizvodnje, donosi nove mogućnosti kod istraživačkih i razvojnih aktivnosti. U analitičkoj kemiji posebni je naglasak na području pripreme uzoraka. Primjerice, omogućuje stvaranje uređaja koji mogu poboljšati određene postupke (ekstrakcija čvrste faze) pružajući značajke koje se ne mogu dobiti s drugim uobičajenim tehnikama. Stoga, 3D ispis može pružiti alternative za dobivanje poboljšanih i „zelenijih“ metodologija u skladu s 12 načela zelene kemije (Mestre-Manrique et al., 2023.).

Zelena kemija

Kao što je već spomenuto, cilj 12 načela zelene kemije (ACS Green Chemistry Institute, 2024.; Muratagić, 2021.) jest zamjena opasnih tvari s onima koje manje onečišćuju ili ukoliko je moguće, bezopasnim proizvodima te sprječavanje nastanka otpada zajedno s ograničenom upotrebom tvari i energije. Ova su načela više usredotočena na sprječavanje nego na uklanjanje onečišćenja kemikalija te pružaju smjernice za poboljšanje metoda sinteze korištenjem obnovljivih sirovina, smanjenje potrošnje energije i smanjenje kemijske toksičnosti spojeva. U navedenim načelima postoji izravna veza analitičke metodologije i potrebe za njihovim poboljšanjem kako bi omogućile praćenje i kontrolu procesa prije nastanka opasnih tvari (Guardia i Garrigues, 2014.; Muratagić, 2021.). Smanjenje štetnoga utjecaj analitičkih metoda na okoliš postiže se smanjenjem količine otapala potrebnih u prethodnoj obradi uzorka, smanjenjem količine i toksičnosti otapala i reagensa koji se koriste pri mjerenjima povećanjem učinkovitosti (automatizacija i minijaturizacija) te razvojem alternativnih izravnih analitičkih metoda koje ne zahtijevaju otapala ili reagens (Butler et al., 2015.). Daljinska istraživanja i izravna mjerenja neobrađenih uzoraka su trenutačno najzelenije metodologije te je zbog toga razvoj prijenosnih instrumenata koji mogu omogućiti daljinska mjerenja uzoraka bez upotrebe reagensa i otapala od velikoga značaja.

Ciljevima zelene analitičke kemije mogu se dodati takozvani zeleni parametri koji uključuju procjenu i kvantifikaciju toksičnosti ili same prirode korištenih reagensa i otapala, volumen korištenih reagensa i otapala, potrošene energije i količine proizvedenoga otpada (Slika 1). Dakle, zelena analitička kemija dodaje dodatnu komponentu s naglaskom na očuvanje okoliša (Guardia i Garrigues, 2014.).

Slika 1. *Ciljevi zelene analitičke kemije s dodatnom komponentom očuvanja okoliša.*



Izvor: Guardia i Garrigues, 2014.

3D ispis

Trodimenzionalni (3D) ispis je proces aditivne proizvodnje pomoću kojega se iz digitalnoga dizajna dobiva fizički predmet dodavanjem različitih materijala sloj po sloj. Stoga, to je tehnika koja spaja znanja iz područja računalne tehnologije i materijala. 3D ispis stvara određenu konstrukciju objekta iliti fizički predmet postepenim taloženjem kemijskoga materijala. Organski materijali su najčešći, ali dostupni su i materijali poput keramike ili metala. Osim standardne proizvodnje, 3D ispis donosi nove mogućnosti u različitim područjima istraživačkih i razvojnih aktivnosti uslijed svoje jednostavnosti, mogućnosti izrade i pristupačnosti (kuće ili manje ustanove bez potrebe za dodatnom tehničkom opremom) (Nesterenko, 2020.; Pohanka, 2016.; Su, 2021.). 3D ispis ima široku primjenu, stoga se može koristiti u bioanalitičkoj i analitičkoj kemiji (Fei et al., 2022.; Li et al., 2020.; Rud et al., 2024.; Salentijn et al., 2017.; Su, 2021.) (senzori i biosenzori, elektrokemijski uređaji, mikrofluidni uređaji) gdje može pružiti prednost *in situ* proizvodnje i brze prilagodbe određenim uvjetima, u medicini (Hussan et al., 2024.; Long Ng et al., 2024.; Mamo et al., 2023.; Yan et al., 2018.) kod proizvodnje predmeta prilagođenih potrebama pacijenata ili prehrambenoj industriji (Hai Alami et al., 2024.; Palaniyappan et al., 2024.; Song et al., 2023.). Sustav aditivne proizvodnje je sam po sebi proizvodni sustav i stoga se za potrebe klasifikacije treba koristiti sistematizacijom

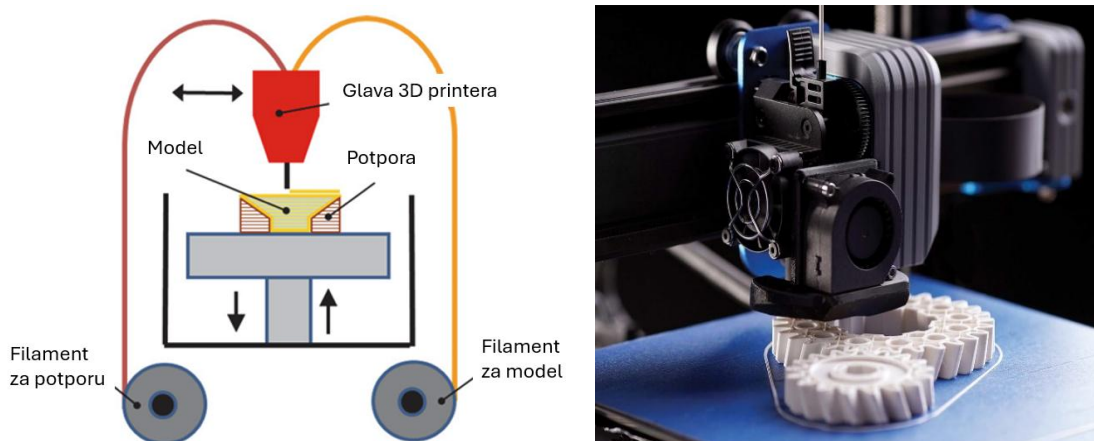
proizvodnih procesa. U svakom proizvodnom sustavu postoje četiri elementa: materijal, energija, alat i tehnologija (metoda). Materijali koji se uobičajeno koriste su krutine, tekućine ili prah. Nadalje, važno je znati koja vrsta energije je potrebna (toplina, UV zračenje) te alati kojima se postižu 3D ispisi (mlaznice, injektori) (Jiménez et al., 2019.).

Metode 3D ispisa

U analitičkoj kemiji, 3D ispis se sve više koristi za izradu prilagođenih alata i uređaja. Neke od uobičajeno korištenih metoda 3D ispisa su stereolitografija, tehnologija taložnoga očvršćivanja, laminacija te selektivno lasersko sinteriranje i taljenje (Pohanka, 2016.; Su, 2021.). Navedene metode omogućuju brzi razvoj prilagođenih analitičkih alata, pomažući istraživačima da prilagode uređaje specifičnim eksperimentalnim potrebama i poboljšaju fleksibilnost u analitičkoj kemiji.

Tehnologija taložnoga očvršćivanja (od eng. „*Fused Deposition Modeling*“, FDM) je najčešća metoda 3D ispisa pogodna za gradnju objekata od termoplastičnih polimera ili metala s niskom temperaturom taljenja (Slika 2). Široko je dostupna zbog niske cijene uređaja i niske cijene termoplastičnih materijala dostupnih kao filamenata. Filamenti za FDM 3D printere su polimeri koji se pod visokom temperaturom omekšaju i oblikuju, a hlađenjem stvrđavaju.

Slika 2. Tehnologija taložnoga očvršćivanja (FDM)



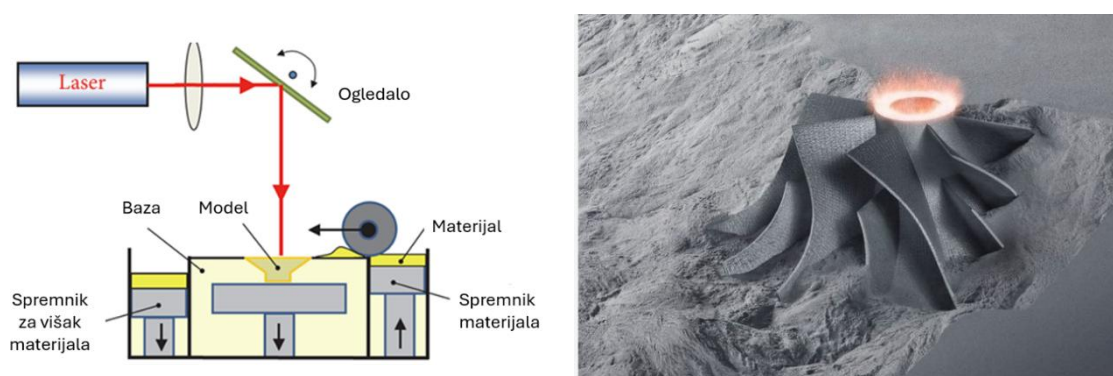
Izvor: HLH Rapid, 2024.; Jiménez et al., 2019.

Velik je broj termoplastičnih materijala dostupnih i prikladnih za FDM metodu. Mogu se koristiti metali poput aluminija te polimeri kao ABS (od eng. „*Acrylonitrile butadiene styrene*“), PLA (od eng. „*polylactic acid*“), PET (od eng. „*polyethylene terephthalate*“) koji

su najčešće korišteni zbog cijene i jednostavnosti 3D ispisa (Mikrotvornica d.o.o., 2024.; Pohanka, 2016.).

Selektivno lasersko sinteriranje (od eng. „*Selective Laser Sintering*“, SLS) i taljenje (od eng. „*Selective Laser Melting*“, SLM) metode su 3D ispisa koje koriste visokoenergetski izvor (laser) za stapanje praškastoga materijala kako bi se proizveo 3D objekt (Slika 3). Laserski snop svjetlosti se izravno primjenjuje na određena područja sloja praha, uzrokujući spajanje čestica. Kod SLM-a laser u potpunosti topi prah dok kod SLS-a laser sinterira praškasti materijal spajajući čestice na temperaturi malo nižoj od točke taljenja. SLS proces obično sinterira praškaste polimerne materijale kao što su najlon dok se SLM primjenjuje na metalne prahove kao što su aluminijske legure, titan i nehrđajući čelik uz prisustvo inertnoga plina radi sprječavanja oksidacije materijala (Mikrotvornica d.o.o., 2023.; Pohanka, 2016.).

Slika 3. SLS/SLM metoda 3D ispisa

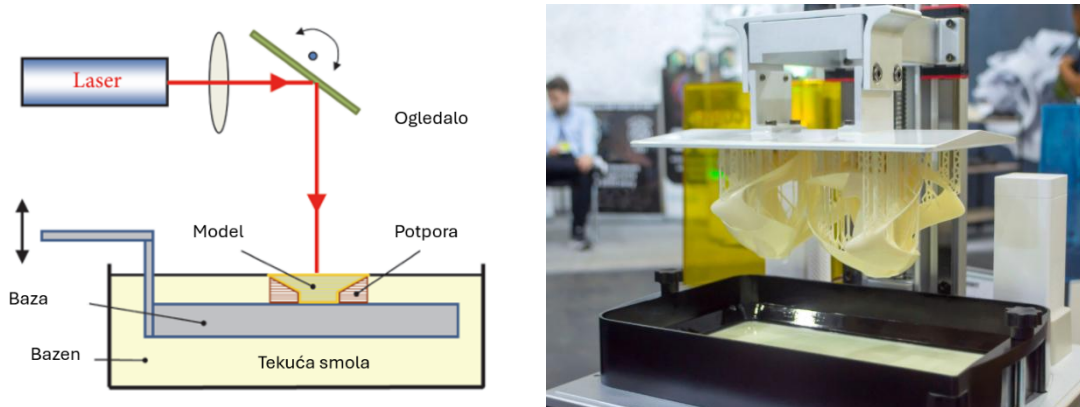


Izvor: Jiménez et al., 2019.; Manufacturing Guide Sweden AB, 2024.

Stereolitografija iliti SLA je jedna od najinovativnijih i najpreciznijih tehnologija za stvaranje 3D objekata (Slika 4). SLA 3D printeri koriste fotoosjetljivi polimer (smolu) kako bi stvorili predmete odnosno koriste precizno fokusiran laserski snop (najčešće UV laser) kako bi “iscrtali” sloj po sloj unutar bazena smole. SLA printeri su poznati po svojoj iznimnoj preciznosti i sposobnosti stvaranja detaljnih objekata s glatkim površinama što ih čini idealnim za primjene gdje je potrebna visoka razlučivost uz veliku brzinu ispisa. SLA tehnologija podržava različite vrste fotoosjetljivih smola kao što su metakrilat, epoksidna smola, epoksi akrilat, polimerna smola i keramika, uključujući materijale s različitim svojstvima kao što su čvrstoća, prozirnost, elastičnost i otpornost na visoke temperature. SLA printeri, iako obično skuplji, daju bolju točnost ispisa nego FDM (Pohanka, 2016.;

Protosfera, 2024.).

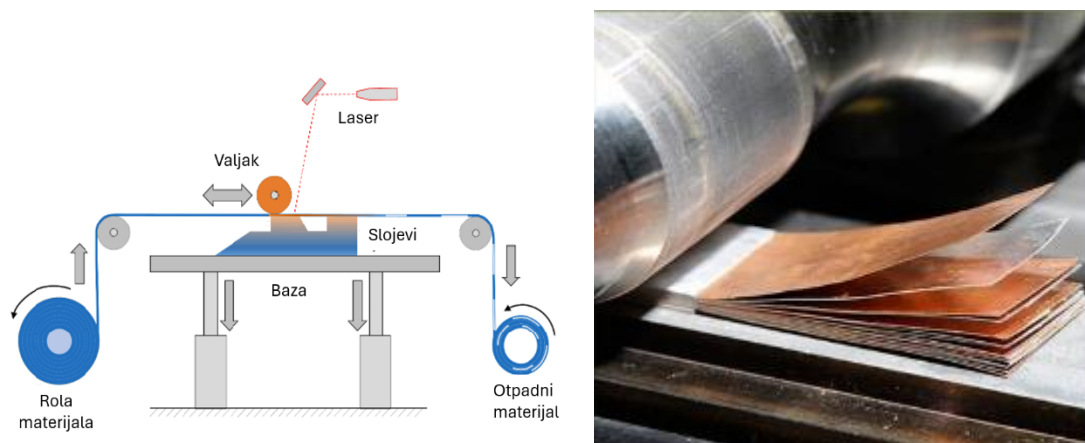
Slika 4. Stereolitografija



Izvor: Jiménez et al., 2019.; Protosfera, 2024.

Laminacija je metoda taloženja materijala pri čemu se presjek objekta urezuje laserom u tanki sloj role materijala koji se zatim lijepi sloj po sloj (Slika 5). Slojevi objekta se izrađuju na bazi koja se opskrbljuje tankim slojem materijala (papir, plastika ili metalna folija) s dovodnoga valjka. Prednosti ove metode uključuju brzinu, nisku cijenu i lakoću rukovanja materijalom, ali čvrstoća i cjelovitost modela ovisi o korištenom ljepilu te ovisno o materijalu može zahtijevati naknadnu obradu.

Slika 5. Metoda laminacije



Izvor: Jiménez et al., 2019.

Materijali za 3D ispis

Nadalje, kao i svaki proizvodni proces, 3D ispis zahtijeva visokokvalitetne materijale koji

zadovoljavaju uređaje visoke kvalitete. Tehnologija 3D ispisa stvara potpuno funkcionalne dijelove u širokom rasponu materijala uključujući keramiku, metal, polimere i kombinacije u obliku kompozita.

PLA je najpopularniji termoplastični materijal zbog lakoće 3D ispisa, jednostavne obrade i cjenovne pristupačnosti te je izvrstan za vizualne ispise i brze izrade prototipova, figurica te igrački. Jednostavan je za oblikovanje prilikom 3D ispisa, biorazgradiv je, nije toksičan i ne ispušta mirise. Međutim, teži deformaciji pri primijeni topline, krhak je i lako se lomi. PETG je materijal izrađen od polietilen-tereftalata (PET) s dodatkom glikola (G u nazivu) koji se dodaje u sastav tijekom polimerizacije što rezultira bistrijim, manje lomljivim filamentom s lakšom uporabom u odnosu na osnovni PET. Prednost PETG filameta jest otpornost na UV zračenje i temperaturna stabilnost do 80°C, čvrstoća i iznimna izdržljivost dok su nedostaci dulje vrijeme potrebni za prilagodbu retrakcije, temperatura i brzina 3D ispisa te apsorbiranje vlage iz zraka čime se smanjuje kvaliteta i trajanje materijala. ABS filament je termoplastični materijal koji se koristi za izgradnju krutih objekata. Idealan je za 3D ispis krutih objekata koji trebaju imati visoku čvrstoću i udarnu otpornost. Može izdržati visoku ili vrlo nisku temperaturu te je dugotrajan. Nedostatak je što se lako uvija pri ispisu te ima neugodan i nadražujući miris, stoga se preporuča korištenje zatvorenoga radnog volumena 3D printera (Mikrotvornica d.o.o., 2021.).

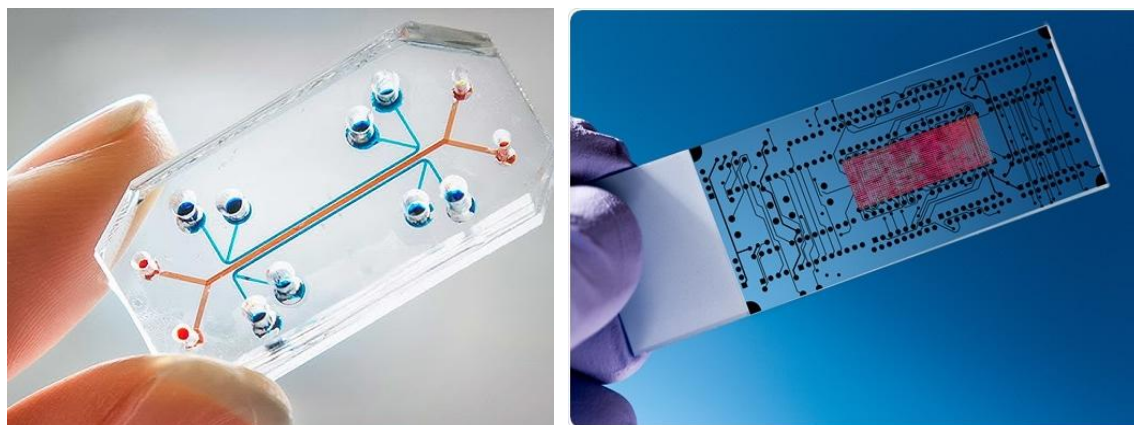
Kod stereolitografije, primjerice, UV zrake se primjenjuju na tekuće monomere kako bi ih povezali u polimere. Najčešće korišteni monomeri uključuju vinil i akrilate, epoksidne smole, poliuretane i siloksane dok kod proizvodnje primjerice mikrofluidnih uređaja najčešći polimeri uključuju polidimetilsiloksan (PDMS), polimetilmetakrilat (PMMA) te kopolimere (COC) (Niculescu et al., 2021.; Waldbaur et al., 2011.).

3D ispis mikrofluidnih uređaja

Mikrofluidni uređaji privukli su značajnu pozornost još 1990-ih godina. Općenito govoreći, mikrofluidika predstavlja znanost i tehnologiju sustava koji obrađuju ili upravljaju malim količinama fluida, koristeći kanale dimenzija od nekoliko desetaka do stotina mikrometara. Takvi mali uređaji na mikrorazini korisni su alati za provođenje kemijskih reakcija, odvajanja ili detekcije različitih spojeva. Nadalje, mikrofluidni uređaji mogu se proizvesti od raznih materijala, koristeći pri tome različite metode izrade. Smanjenje veličine, težine, potrošnje energije i jeftina serijska proizvodnja ovih uređaja učinile su tehnologiju vrlo privlačnom za brojne primjene, stoga je njihov razvoj i uporaba za medicinske, biološke i kemijske primjene u velikom porastu. Takvi uređaji (Slika 6) pokazuju veliki potencijal za

smanjenje troškova proizvodnje, potrošnje reagensa i vremena analize te povećanje učinkovitosti i prenosivosti uređaja (Niculescu et al., 2021.).

Slika 6. *Primjer mikrofluidnih uređaja*



Izvor: AZO Life Sciences, 2024.

Uslijed brze i jednostavne proizvodnje, 3D ispis je široko primijenjen u proizvodnji mikrofluidnih uređaja. FDM metoda je jednostavna, učinkovita i pristupačna, ali ključni izazov FDM-a je postizanje mikrofluidnih kanala visoke razlučivosti, odnosno ispod 100 μm koji su potrebni za različite mikrofluidne primjene, ograničen izbor prozirnih materijala, potreba za izuzetno glatkim završnim obradama površina i ograničenja u preciznoj izradi šupljih i praznih dijelova. SLA metoda, s druge strane, nudi veću točnost i preciznost u odnosu na FDM uz kraće vrijeme ispisa uređaja. SLA metoda jedna je od najbitnijih metoda kada su u pitanju razvoji prototipova u industriji. Osim toga, kao jedna od obećavajućih metoda pri izradi kompleksnih mikrofluidnih uređaja spominje se i ESCARGOT metoda (Saggiomo i Velders, 2015.; Smit, 2015.). ESCARGOT metoda je jednostavna i jeftina metoda izrade složenih PDMS mikrofluidnih uređaja. Multijet i Inkjet metode su vrlo slične FDM metodi, s razlikom što umjesto filameta koriste smole pri ispisu iz mlaznica uz laser kao sredstvo za skrućivanje materijala i stvaranja slojeva. Također, ove metode nude veću preciznost te bržu proizvodnju. Uz navedene metode spominju se i injekcijsko prešanje (od eng. „*Injection molding*“) i vruće utiskivanje (od eng. „*Hot embossing*“) kao metode proizvodnje polimernih dijelova pri čemu se materijali tope i oblikuju u zadanim kalupima pod određenom temperaturom i tlakom. Detaljan opis svih metoda proizvodnje može se pronaći na (He et al., 2016.; Niculescu et al., 2021.; Scott i Ali, 2021.; Waldbaur et al., 2011.). Iako su mikrofluidni uređaji široko primjenjivi,

postojeća tehnologija i metode se mogu dodatno poboljšati, uređaji se mogu smanjiti, čipovi se mogu uklopiti s raznim drugim uređajima, procesi se mogu bolje kontrolirati te su moguće nove primjene.

Zaključak

Zelena kemija predstavlja glavni razlog za poticanje održivoga razvoja u industriji i laboratorijima korištenjem kemijskih tehnika i metoda koje smanjuju ili uklanjaju upotrebu ili stvaranje sirovina, proizvoda, nusproizvoda, otapala ili reagensa koji su opasni za ljudsko zdravlje ili okoliš te se primjenjuje tijekom cijeloga životnoga ciklusa kemijskoga proizvoda uključujući njegov dizajn, proizvodnju, uporabu te konačno odlaganje. Jedan od izazova s kojim se kemijska industrija danas suočava jest prijelaz na zelene, održive proizvodne procese koji učinkovito koriste sirovine, izbjegavaju korištenje otrovnih i opasnih materijala te smanjuju potrošnju energije.

Trodimenzionalni (3D) ispis je proces aditivne proizvodnje pomoću kojega iz digitalnoga dizajna dobivamo fizički predmet dodavanjem različitih materijala sloj po sloj. 3D ispis donosi nove mogućnosti u različitim područjima istraživačkih i razvojnih aktivnosti uslijed svoje jednostavnosti, mogućnosti izrade i pristupačnosti. Ima široku primjenu i može se koristiti u bioanalitičkoj i analitičkoj kemiji kod proizvodnje mikrofluidnih uređaja gdje može pružiti prednost *in situ* proizvodnje i brze prilagodbe određenim uvjetima. Mikrofluidni uređaji korisni su alati za provođenje kemijskih reakcija, odvajanja ili detekcije različitih spojeva te kao takvi uređaji pokazuju veliki potencijal za smanjenje troškova proizvodnje, potrošnje reagensa i vremena analize te povećanje učinkovitosti i prenosivosti uređaja.

Literatura

ACS Green Chemistry Institute. 12 Principles of Green Chemistry.
<https://www.acs.org/green-chemistry-sustainability/principles/12-principles-of-green-chemistry.html> (22.09.2024.)

Armenta, S., Garrigues, S., de la Guardia, M. (2008). "Green Analytical Chemistry", *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 27(6), 497-511.

AZO Life Sciences. What is Lab-on-a-Chip?.
<https://www.azolifesciences.com/article/What-is-Lab-on-a-Chip.aspx> (29.04.2024.)

Butler, M., Innes, A., Kaatz Chary, L., Krel, O., LaTourelle, A., McCracken, L., Metcalf,

- C. (2015). *Green Chemistry Guide*. Los Angeles.
- Fei, G., Nie, L., Zhong, L., Shi, Q., Hu, K., Parra-Cabrera, C., Oprins, H., Ameloot, R., Yang, S. (2022). "Photocurable resin-silica composites with low thermal expansion for 3D printing microfluidic components onto printed circuit boards", *Materials Today Communications*, vol. 31.
- Guardia, M., Garrigues, S. (2012). *Handbook of Green Analytical Chemistry Handbook of Green Analytical Chemistry*. Ujedinjeno Kraljevstvo. John Wiley & Sons, Ltd.
- Hai Alami, A., Ghani Olabi, A., Khuri, S., Aljaghoub, H., Alasad, S., Ramadan, M., Ali Abdelkareem, M. (2024). "3D printing in the food industry: Recent progress and role in achieving sustainable development goals", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15(2).
- He, Y., Wu, Y., Fu, J., Gao, Q., Qiu, J. (2016). "Developments of 3D Printing Microfluidics and Applications in Chemistry and Biology: a Review", *Electroanalysis*, vol. 28(8), 1658–1678.
- HLH Rapid. What is FDM 3D Printing?. <https://hlhrapid.com/knowledge/what-is-fdm-3d-printing/> (26.04.2024.)
- Hussan K S, J., Subramaniam, M. P., Kenz K T, M., Sreeram, P., Parvathi, S., PS, S., Pullanchiyodan, A., Mulhivill, D. M., Raghavan, P. (2024). "Fabrication and challenges of 3D printed sensors for biomedical applications-Comprehensive review", *Results in Engineering*, vol. 21.
- Jiménez, M., Romero, L., Domínguez, I. A., Espinosa, M. del M., Domínguez, M. (2019). "Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects", *Complexity*, vol. 2019, 1-30.
- Li, F., Ceballos, M. R., Balavandy, S. K., Fan, J., Khataei, M. M., Yamini, Y., Maya, F. (2020). "3D Printing in analytical sample preparation", *Journal of Separation Science*, vol. 43(9–10), 1854–1866.
- Long Ng, W., An, J., Kai Chua, C. (2024). "Process, Material, and Regulatory Considerations for 3D Printed Medical Devices and Tissue Constructs", *Engineering*, vol. 36, 146-166.
- Mamo, H. B., Adamiak, M., Kunwar, A. (2023). "3D printed biomedical devices and their applications: A review on state-of-the-art technologies, existing challenges, and future perspectives", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 143.
- Manufacturing Guide Sweden AB. Selective Laser Sintering, SLS.

- <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-sintering-sls> (26.04.2024.)
- Mestre-Manrique, F., Payà-Pou, R., Beneito-Cambra, M., Simó-Alfonso, E. F., Carrasco-Correa, E. J. (2023). "Is 3D printing a good alternative to prepare novel devices for Green Analytical sample preparation?", *Advances in Sample Preparation*, vol. 6.
- Mikrotvornica d.o.o. Filamenti za 3D ispis. <https://www.3dprintaj.com/filamenti-za-3d-ispis/> (23.04.2024.)
- Mikrotvornica d.o.o. SLS tehnologija 3D printanja. <https://www.3dprintaj.com/sls-tehnologija-3d-printanja/> (23.04.2024.)
- Mikrotvornica d.o.o. FDM/FFF tehnologija 3d printanja. <https://www.3dprintaj.com/fdm-fff-tehnologija-3d-printanja/> (23.04.2024.)
- Muratagić, E. Procesi zelene kemije u farmaceutskoj industriji. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:159:950153> (15.05.2024.)
- Nesterenko, P. N. (2020). "3D printing in analytical chemistry: current state and future", *Pure and Applied Chemistry*, vol. 92(8), 1341-1355.
- Niculescu, A.-G., Chircov, C., Bîrcă, A. C., Grumezescu, A. M. (2021). "Fabrication and Applications of Microfluidic Devices: A Review", *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 22(4).
- Palaniyappan, S., Sivakumar, N. K., Bodaghi, M., Rahaman, M., Pandiaraj, S. (2024). "Preparation and performance evaluation of 3D printed Poly Lactic Acid composites reinforced with silane functionalized walnut shell for food packaging applications", *Food Packaging and Shelf Life*, vol. 41.
- Pohanka, M. (2016). "Three-Dimensional Printing in Analytical Chemistry: Principles and Applications", *Analytical Letters*, vol. 49(18), 2865-2882.
- Protosfera. Stereolitografija (SLA) - Precizna tehnologija 3D printanja. <https://protosfera.hr/stereolitografija-sla-precizna-tehnologija-3d-printanja/> (23.04.2024.)
- Rud, P., Chapek, S., Medvedev, P., Polozhentsev, O., Soldatov, S., Bagliy, A., Guda, A., Soldatov, A., Soldatov, M. (2024). "3D printed cell for the in situ dynamic light scattering monitoring of nanoparticle size distribution in microfluidics", *Microchemical Journal*, vol. 196.
- Saggiomo, V., Velders, A. H. (2015). "Simple 3D Printed Scaffold-Removal Method for the Fabrication of Intricate Microfluidic Devices", *Advanced Science*, vol. 2(9).
- Sajid, M., Płotka-Wasyłka, J. (2022). "Green analytical chemistry metrics: A review",

- Talanta*, vol. 238(2).
- Salentijn, G. I., Oomen, P. E., Grajewski, M., Verpoorte, E. (2017). "Fused Deposition Modeling 3D Printing for (Bio)analytical Device Fabrication: Procedures, Materials, and Applications", *Analytical Chemistry*, vol. 89(13), 7053-7061.
- Scott, S., Ali, Z. (2021). "Fabrication Methods for Microfluidic Devices: An Overview", *Micromachines*, vol. 12(3).
- Smit, S. ESCARGOT: A New Approach for Microfluidic Devices. <https://www.advancedsciencenews.com/escargot-new-approach-microfluidic-devices/> (02.05.2024.)
- Song, D., Chen, X., Wang, M., Wu, Z., Xiao, X. (2023). "3D-printed flexible sensors for food monitoring", *Chemical Engineering Journal*, vol. 474.
- Su, C. K. (2021). "Review of 3D-Printed functionalized devices for chemical and biochemical analysis", *Analytica Chimica Acta*, vol. 1158.
- Waldbaur, A., Rapp, H., Länge, K., Rapp, B. E. (2011). "Let there be chip—towards rapid prototyping of microfluidic devices: one-step manufacturing processes", *Analytical Methods*, vol. 3(12), 2681-2716.
- Yan, Q., Dong, H., Su, J., Han, J., Song, B., Wei, Q., Shi, Y. (2018). "A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications", *Engineering*, vol. 4(5), 729-742.