

<https://doi.org/10.15255/KUI.2025.022>

KUI-22/2026

Pregledni rad

Prispjelo 21. svibnja 2025.

Prihvaćeno 24. srpnja 2025.

# Aditivna proizvodnja u kemijskom inženjerstvu. Drugi dio: procesi za metale i ostale materijale.

D. Vrsaljko, M.-Pere Marković\*, I. K. Cingesar\* i F. Car

Ovo djelo je dano na korištenje pod  
Creative Commons Attribution 4.0  
International LicenseSveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Trg Marka Marulića 19,  
HR-10 000 Zagreb

## Sažetak

Aditivna proizvodnja, obično poznata kao 3D-ispis, sve se više primjenjuje u kemijskom inženjerstvu za izradu složenih komponenti, optimiranje industrijskih procesa i razvoj novih materijala. Dok su polimerne tehnologije dominirale prvim fazama industrijske primjene aditivne proizvodnje, rastuća potreba za materijalima visoke mehaničke čvrstoće, kemijske postojanosti i toplinske stabilnosti usmjerila je razvoj prema metalima, keramici i kompozitima. U ovom radu prikazan je pregled ključnih procesa aditivne proizvodnje koji omogućuju uporabu metalnih i ostalih materijala. Također, analizirane su mogućnosti primjene u kemijskom inženjerstvu, poput izrade reaktora, izmjenjivača topline, katalitičkih nosača i poroznih membrana. Poseban naglasak stavljen je na izazove vezane uz naknadnu obradu te optimiranje parametara proizvodnje za postizanje kemijskih i mehaničkih svojstava nužnih za primjenu na laboratorijskoj i industrijskoj razini. Razvoj aditivne proizvodnje metalnim i ostalim materijalima u ovom području omogućava bržu, ekološki prihvatljiviju i funkcionalno napredniju proizvodnju industrijskih i laboratorijskih komponenti, čime se otvaraju nove mogućnosti za inženjerske i znanstvene primjene.

## Ključne riječi

Aditivna proizvodnja, kemijsko inženjerstvo, metali, keramike, kompoziti

## 1. Uvod

Aditivna proizvodnja (AP), kao skupina tehnologija kod kojih se materijal selektivno dodaje u slojevima radi izrade trodimenzionalnih objekata prema digitalnom modelu, sve se više prepoznaje kao disruptivna platforma u kemijskom inženjerstvu, koja omogućuje brzu izradu složenih geometrija, individualiziranih komponenata te optimiranje funkcionalnosti sustava. U prvom dijelu ove grupe radova analizirane su tehnologije temeljene na polimerima koje, zbog dostupnosti, pristupačne cijene i razmjerno jednostavne obrade, dominiraju u područjima prototipiranja, razvoja mikrosustava te izrade funkcionalnih komponenti, često nižih mehaničkih zahtjeva.<sup>1</sup> Osim analize tehnologija navedeni su osnovni principi procesa, raspoloživi materijali, tipične primjene, ali i terminološke preporuke.

Industrijska primjena aditivne proizvodnje, posebice u područjima koja zahtijevaju visoke mehaničke otpornosti, toplinsku stabilnost i kemijsku inertnost, sve se više oslanja na metalne i keramičke materijale, kao i na kompozite s naprednim funkcionalnostima. Tehnologije poput selektivnog laserskog taljenja, aditivne proizvodnje lučnim zavaranjem te modeliranja ekstrudiranjem paste razvijene su za širok raspon materijala i primjena – od tehničke keramike i metalnih dijelova složenih geometrija, preko biomedicinskih implantata do kulinarskih dekoracija – i danas se nalaze u različitim fazama tehnološke zrelosti, ovisno o vrsti procesa, upotrijebljenom materijalu i stupnju integracije u industrijske sustave.

Ovaj rad donosi pregled glavnih procesa aditivne proizvodnje za metale i ostale materijale s posebnim naglaskom na principe rada, dostupne materijale, ograničenja procesa te primjene relevantne za kemijsko inženjerstvo. Posebna se pažnja posvećuje mogućnostima projektiranja funkcionalnih dijelova za primjene kao što su kemijski reaktori, izmjenjivači topline, porozni mediji i druge komponente gdje klasični postupci izrade ograničavaju geometrijsku složenost, lokalnu funkcionalizaciju i efikasnost sustava.

Kao što je navedeno u prvom dijelu ove serije radova, aktualna norma ISO/ASTM 52900:2017<sup>2</sup> definira sedam osnovnih kategorija aditivne proizvodnje: spajanje sloja praha (engl. *powder bed fusion*), mlazno nanošenje materijala (engl. *material jetting*), ekstrudiranje materijala (engl. *material extrusion*), fotopolimerizacija u posudi (engl. *vat photopolymerisation*), mlazno nanošenje veziva (engl. *binder jetting*), laminiranje listova (engl. *sheet lamination*) i usmjereno nanošenje uz dovod energije (engl. *directed energy deposition*). Ipak, u inženjerskoj praksi često su korisnije klasifikacije temeljene na vrsti materijala koji se upotrebljava za 3D-ispis.

U prvom dijelu<sup>1</sup> prikazani su procesi aditivne proizvodnje upotrebom polimernih materijala, dok se u ovom nastavku fokus usmjerava na tehnologije za metale i ostale materijale, uključujući keramiku, staklo, kompozite, betone, papir, vosak, materijale koji služe kao hrana, materijale u koje su dodane stanice radi izrade bioloških sustava, itd. Cilj ovog pregleda je pružiti kemijskim inženjerima i drugim stručnjacima uvid u trenutačne dosege i razvojne smjerove AP-a s metalima i ostalim materijalima, s naglaskom na inženjerske zahtjeve, prilagodbu materijala i mogućnosti integracije u postojeće procese.

\* Autori za dopisivanje:

dr. sc. Ivan Karlo Cingesar, e-pošta: [icingesar@fkit.unizg.hr](mailto:icingesar@fkit.unizg.hr)

dr. sc. Marijan-Pere Marković, e-pošta: [mmarkovi1@fkit.unizg.hr](mailto:mmarkovi1@fkit.unizg.hr)

## 2. Procesi 3D-ispisa koji primjenjuju metale

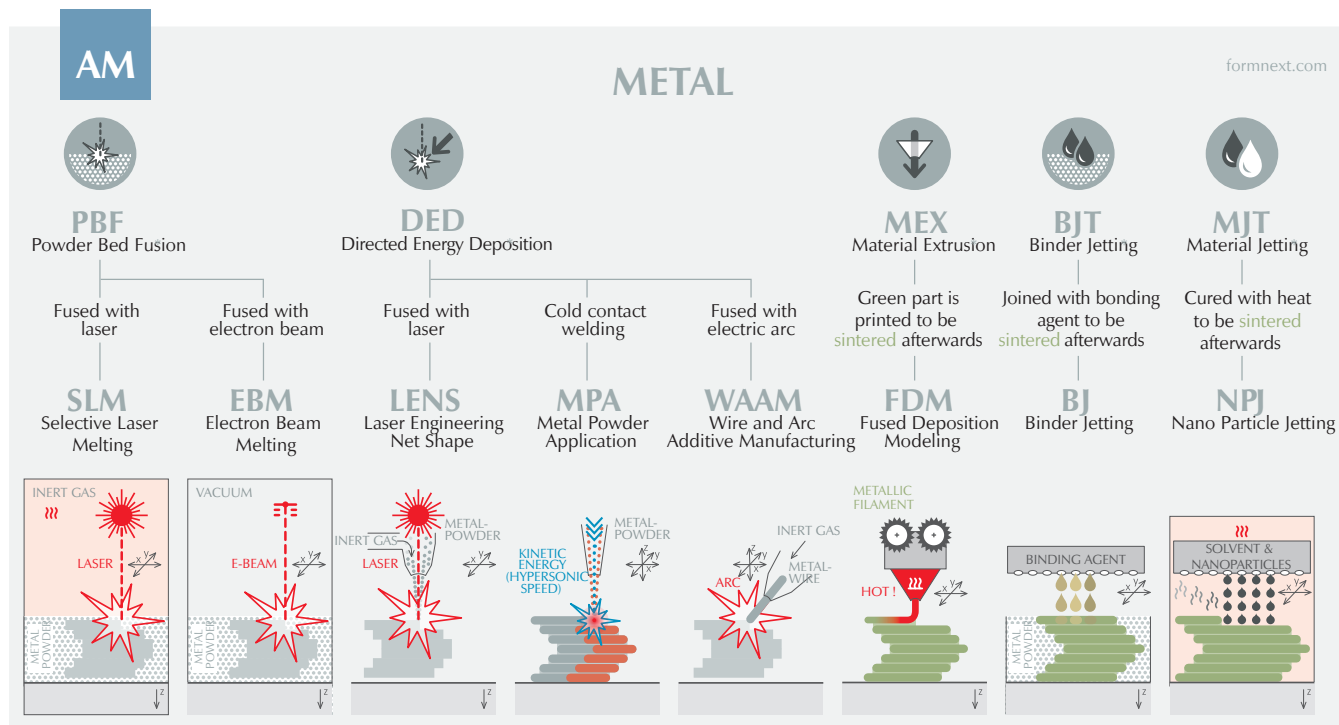
Uz polimere kao dominantne materijale koji su razvijani u početku, sve se više u posljednjih deset godina razvijaju procesi 3D-ispisa koji kao polazni materijal primjenjuju metale. Proizvodi 3D-ispisani od metalnih materijala pronalaze svoju primjenu u poljima u kojima polimere nije moguće upotrijebiti zbog njihovih svojstava, bilo mehaničkih, toplinskih ili fizikalno-kemijskih. Procesi koji primjenjuju metale mogu se podijeliti na (slika 1): selektivno lasersko taljenje (engl. *selective laser melting*, SLM), taljenje snopom elektrona (engl. *electron beam melting*, EBM), lasersku proizvodnju gotovih proizvoda (engl. *laser engineering net shape*, LENS), nanošenje metalnog praha (engl. *metal powder application*, MPA), aditivnu proizvodnju lučnim zavarivanjem (engl. *wire and arc additive manufacturing*, WAAM), proizvodnju rastaljenim filamentom (engl. *fused filament fabrication*, FFF ili engl. *fused deposition modelling*, FDM), mlazno izbacivanje veziva (engl. *binder jetting*, BJ) te mlazno izbacivanje nanočestica (engl. *nano particle jetting*, NPJ).

### 2.1. Selektivno lasersko taljenje

Selektivno lasersko taljenje pripada procesima aditivne proizvodnje spajanjem praha, a prvi ga je predstavio *Fraunhofer Institut* u 90-ima. Ta tehnologija omogućuje brzu proizvodnju, ali i reciklažu neiskorištenog praha te uporabu različitih materijala.<sup>1</sup> Proces se odvija tako da se tanak sloj finog metalnog praha ravnomjerno raspoređuje po platformi i tali laserskom zrakom, nakon čega se podloga spušta za definiranu debljinu sloja i nanosi prah te pono-

vo tali i povezuje s prethodnim slojem pri tome stvarajući željeni proizvod. Čestice metala imaju veličinu između 20 i 50  $\mu\text{m}$ , dok debljina sloja varira od 15 do 150  $\mu\text{m}$ .<sup>4</sup> Prednosti SLM-a uključuju izvrsna mehanička svojstva, visoku gustoću materijala, izostanak kalupa i mogućnost daljnje obrade bez dodatnih potpornih struktura. Nedostaci su potreba za uklanjanjem nesinteriranog praha, relativno niska rezolucija, gruba površina proizvoda, sporiji proces u odnosu na druge procese te prisutnost zaostalih unutarnjih napreznja.<sup>5–7</sup> Ta tehnologija podržava različite metalne legure<sup>8</sup>, uključujući aluminijske<sup>9,10</sup>, bakrene<sup>11</sup>, kobaltne<sup>12,13</sup>, niklove<sup>14,15</sup>, titanijske<sup>16,17</sup> i željezne legure<sup>18,19</sup>, kao i njihove kompozite.

*Zhang i sur.*<sup>20</sup> istražili su utjecaj gustoće energije laserske zrake na taljenje metalnog praha nehrđajućeg čelika 316L. Utvrdili su da snaga laserskog izvora i brzina kretanja zrake najviše utječu na veličinu pora u poroznim strukturama nalik koštanim. Razmak između primarnih dendrita varirao je od 320 do 501 nm, pri gustoći energije od 41,7 do 111,1  $\text{J mm}^{-3}$ . Pri najmanjoj gustoći energije (41,7  $\text{J mm}^{-3}$ ), unutarnja napreznja smanjena su za 36,6 % u odnosu na one pri 111,1  $\text{J mm}^{-3}$ . Također, veća gustoća energije smanjuje mikrotvrdoću materijala te Youngov modul elastičnosti zadovoljava uvjete primjene materijala. S aspekta kemijskog inženjerstva, ta i slična istraživanja svojstava materijala – poput mikrotvrdoće, elastičnosti i mikrostrukture – od ključnog su značaja za dizajn i pouzdanost procesne opreme. Naime, reaktori, cjevovodi i drugi ključni elementi postrojenja pri visokim tlakovima i temperaturama podložni su različitim mehaničkim i toplinskim opterećenjima te koroziji. Odabir materijala s optimalnim svojstvima (npr. visoka otpornost na deformacije, dovoljno niska unutarnja



Slika 1 – Procesi 3D-ispisa koji primjenjuju metale<sup>3</sup>  
Fig. 1 – 3D printing processes that use metals<sup>3</sup>

naprezanja, dobra mehanička stabilnost) izravno utječe na sigurnost, trajnost i učinkovitost procesnih sustava. Tako, primjerice, mikrotvrdoća utječe na otpornost na habanje, dok Youngov modul ukazuje na sposobnost materijala da zadrži oblik bez trajne deformacije pod opterećenjem – što je presudno kod izrade reaktora i cjevovoda u kemijskoj industriji. Kroz ovakva istraživanja kemijski inženjeri mogu optimirati proizvodne parametre i razviti materijale koji ispunjavaju stroge tehničke zahtjeve industrijskih aplikacija.

## 2.2. Taljenje snopom elektrona

Taljenje snopom elektrona aditivni je proizvodni proces sličan SLM-u, pri čemu se sloj metalnog praha srašćuje snopom elektrona. Razvijen je 2003. na *Chalmers tehnološkom sveučilištu* u Švedskoj.<sup>4,21</sup> Proces se odvija pri tlaku od  $10^{-5}$  mbar i temperaturama iznad  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a ključni parametri uključuju snagu, brzinu, fokus i promjer snopa, razmak između linija, temperaturu podloge i komore te plan gibanja snopa.<sup>18</sup> Tijekom taljenja u komoru se upuhuje helij da bi se spriječila oksidacija, što EBM čini pogodnim za obradu titanijskih legura.<sup>16,17</sup> EBM zahtijeva dugotrajan proces hlađenja da bi se spriječila deformacije i pukotine u materijalu, omogućujući obradu krutih materijala, što SLM ne omogućuje.<sup>21,22</sup> Osim titanijskih legura i nehrđajućih čelika, ovom metodom mogu se obrađivati visoko-entropijski materijali i intermetalne legure poput Ti-6Al-4V i Al7075.<sup>21,22</sup> Prednosti uključuju zaštitu od kontaminacije, smanjenje unutarnjih naprezanja, minimalne deformacije, izostanak potpornih struktura i male količine otpada. Nedostaci su elektrostatsko nabijanje praha, gruba površina, ograničene dimenzije proizvoda, veća sklonost zamoru materijala te potreba za električni vodljivim materijalima.<sup>4,21–23</sup>

EBM pronalazi i svoju biomedicinsku primjenu. Tim procesom aditivne proizvodnje moguće je proizvesti razna medicinska pomagala: zubne implantate te različite umjetne zglobove primjerice umjetni kuk ili rame. Materijali od kojih su proizvedeni pomno su razvijani da bi se osigurala odgovarajuća čvrstoća, tvrdoća i slična mehanička svojstva uz poseban fokus na biokompatibilnost i inertnost pri primjeni u ljudskom organizmu. Kao jedan od najčešćih materijala za biomedicinske svrhe upotrebljava se Ti-6Al-4V.<sup>24</sup>

## 2.3. Laserska proizvodnja gotovog proizvoda

Laserska proizvodnja gotovog proizvoda proces je aditivne proizvodnje koji rabi metalni prah, a pripada skupini procesa s usmjerenom depozicijom energije. Tehnologiju su 1997. zajednički razvili *Sandia National Laboratories* i *Pratt & Whitney*, a licencu je preuzela tvrtka *Optomec Inc.*<sup>25–27</sup> U tom procesu metalni prah se tali i nanosi sloj po sloj izravno iz glave 3D-pisača, pri čemu se podloga spušta nakon svakog sloja. LENS se osim za 3D-ispis primjenjuje i za popravak i nadogradnju oštećenih proizvoda.<sup>25</sup> Ključni parametri uključuju brzinu toka praha, snagu lasera i kretanje podloge.<sup>28</sup> Metalni prašci moraju biti kemijski čisti, sferičnog oblika i veličine čestica između  $45$  i  $150\text{ }\mu\text{m}$ . Proces se odvija u inertnoj atmosferi ispunjenoj argonom, što omogućuje upotrebu materijala osjetljivih na oksidaci-

ju.<sup>28,29</sup> Primjerice, uređaj *Optomec 850* omogućuje izradu proizvoda dimenzija  $45 \times 45 \times 105\text{ cm}$ , s rezolucijom  $50\text{ }\mu\text{m}$  u x- i y-osi te  $500\text{ }\mu\text{m}$  u z-osi.<sup>30</sup> Prednosti LENS-a uključuju brzu izradu, mogućnost popravaka proizvoda i 3D-ispis do četiri materijala istovremeno.<sup>4,28,29</sup> Nedostaci su potreba za naknadnom obradom zbog zaostalih naprezanja, loša završna površina pri primjeni više materijala i deformacije dijelova.<sup>4,28–30</sup> Tehnologija omogućuje obradu materijala poput aluminijske, bakra, titanijske i nehrđajućeg čelika.<sup>30</sup>

Primjer zanimljive primjene LENS procesa je popravak bočica za uzorke plina.<sup>27</sup> LENS procesom uklonjeni su nedostaci na bočicama kojima je kasnije ispitana čvrstoća. Bočice su pokazale zadovoljavajuću čvrstoću te ova primjena ukazuje na mogućnost popravka različitih metalnih proizvoda koji se svakodnevno primjenjuju u postrojenjima, laboratorijima i sl.

## 2.4. Nanošenje metalnog praha

Nanošenje metalnog praha, poznato i kao aditivna proizvodnja hladnim raspršivanjem čestica (engl. *cold spray additive manufacturing*, CSAM), primjenjuje kinetičku energiju umjesto toplinske za vezanje materijala, čineći ga pogodnim za toplinski osjetljive materijale. Proces se temelji na ubrzavanju čestica metalnog praha pomoću plina pod visokim pritiskom, poput dušika ili helija, kroz mlaznicu koja postiže nadzvučne brzine ( $500 - 1200\text{ m s}^{-1}$ ). Pri udaru u podlogu, čestice prolaze snažnu plastičnu deformaciju i stvaraju gust, čvrsto vezani sloj bez taljenja materijala. MPA je posebno pogodan za nanošenje prevlaka koje poboljšavaju postojanost na koroziju i habanje te povećavaju električnu i toplinsku provodnost. Zbog niske radne temperature, metoda je prikladna za prevlačenje materijala poput magnezija. Često zahtijeva naknadnu obradu, uključujući toplinsku obradu za uklanjanje unutarnjih naprezanja i mehaničku obradu za poboljšanje površinskih svojstava.<sup>4,31,32</sup> Glavne prednosti MPA procesa uključuju brzo nanošenje slojeva, širok spektar materijala i izostanak taljenja, čime se sprječava oksidacija i stvaranje naprezanja. Nedostaci su složena priprema podloge, ograničena mogućnost izrade finih detalja i nemogućnost obrade krutih materijala koji ne podliježu plastičnoj deformaciji.<sup>4,31–34</sup>

Jedna od primjena tog procesa aditivne proizvodnje je nanošenje prevlaka u različitim granama industrije: automobilske industriji, energetici, medicinske industriji i dr. Prevlake koje se nanose na proizvode najčešće služe zaštiti predmeta od primjerice erozije i korozije površine, različitih kemikalija, zaštiti površine od oksidacije ili visokih temperatura. Mogućnost nanošenja prevlaka i brzog popravka oštećenih metalnih dijelova znatno je povećao mogućnost primjene MPA procesa aditivne proizvodnje.<sup>35</sup>

## 2.5. Aditivna proizvodnja lučnim zavarivanjem

Aditivna proizvodnja lučnim zavarivanjem primjenjuje električni luk za taljenje metalne žice u slojevima, spajajući u procese usmjerene depozicije energije. WAAM je privukao pažnju zbog mogućnosti izrade velikih i izdržljivih metalnih komponenti u industrijama poput zrako-

plovstva i brodogradnje. Proces uključuje neprekidno dodavanje žice u mlaznicu za zavarivanje, gdje se ona tali električnim lukom i rastaljena polaže sloj po sloj. Sustav se sastoji od izvora napajanja, uređaja za dodavanje žice, robotske ili CNC ruke te dovoda inertnog plina koji štiti novi sloj od oksidacije. Najčešće upotrebljavani materijali su čelici, titanijske i aluminijske legure te niklove superlegure. WAAM primjenjuje tehnike poput MIG (engl. *metal inert gas welding*), TIG (engl. *gas tungsten arc welding*) i plazme zavarivanja. Prednosti uključuju visoko iskorištenje materijala, veliku brzinu ispisa ( $1 - 4 \text{ kg h}^{-1}$ ), izradu velikih proizvoda i niže troškove opreme u usporedbi s drugim aditivnim tehnologijama za metale. Nedostaci su loša površinska obrada, ograničena preciznost, stvaranje unutarnjih naprezanja te varijabilna svojstva materijala zbog oscilacija struje i napona, što zahtijeva naknadnu mehaničku i toplinsku obradu.<sup>4,36,37</sup>

Horgar i sur.<sup>38</sup> istražili su 3D-ispis WAAM procesom aluminijske legure AA5183 na podlogu od AA6082-T6, analizirajući mikrostrukturu, tvrdoću, mehanička svojstva te probleme poput plinske poroznosti i nastanka pukotina prilikom naglih promjena temperature materijala. Rezultati pokazuju da proces daje materijal dobre tvrdoće, dobre čvrstoće i visoke duktilnosti, ali relativno velika poroznost materijala zahtijeva optimiranje procesa za konačnu primjenu. Uz daljnje poboljšanje, WAAM bi mogao postati održiv proces za proizvodnju laganih i izdržljivih aluminijskih komponenti. Da bi omogućili pouzdanost, sigurnost i dugotrajnost industrijske opreme kemijski inženjeri u razvoju takvih tehnologija moraju razumjeti odnose između procesnih parametara, npr. brzine taljenja i prijenosa topline te krajnjih svojstava materijala. Uz to, aluminijske legure, zbog svoje male gustoće i dobrih mehaničkih svojstava, imaju velik potencijal za primjenu u industrijama, gdje je optimiranje svojstava materijala poput mase i postojanosti na koroziju važna, primjerice u transportu kemikalija, mobilnim reaktorima ili strukturnim dijelovima kemijskih postrojenja.

## 2.6. Proizvodnja rastaljenim filamentom

Proizvodnja rastaljenim filamentom je proces 3D-ispisa metala ekstrudiranjem kompozitnog materijala. FFF proces za metale sličan je onome za polimere, ali zahtijeva zatvorenu grijanu komoru za smanjenje savijanja i odvajanja proizvoda od podloge. Također, 3D-pisači za metale primjenjuju mlaznicu od nehrđajućeg čelika zbog abrazivnosti metalnih čestica u kompozitnom materijalu. Nakon 3D-ispisa metalnog objekta, potrebno je ukloniti polimerni vezivni materijal i provesti sinteriranje u peći, čime se postiže konačna željena čvrstoća i gustoća. Sinteriranjem dolazi do smanjenja dimenzija objekta, što zahtijeva prilagodbu dizajna. Nakon sinteriranja, predmeti mogu proći dodatnu toplinsku obradu za uklanjanje zaostalih naprezanja i poboljšanje mehaničkih svojstava.<sup>1,4,39,40</sup>

Gong i sur.<sup>41</sup> izmjerili su poroznost od oko 1,5 % u uzorcima ispisanim Ultrafuse 316L filamentom FFF procesom. Mikrostruktura s ekvialnim zrnom, zrno sa svim dimenzijama jednake dužine i austenitna struktura bila je slična onima nakon žarenja. Youngov modul elastičnosti iznosio je 152 GPa, rastezna čvrstoća 465 MPa, a prekidna

čvrstoća 167 MPa, što je niže u odnosu na AISI 316L čelik proizveden konvencionalnim putem i 3D-ispisane uzorke SLM procesom. Poroznost 3D-ispisanih uzoraka smanjuje duktilnost na 31 %, u usporedbi sa 60 % kod žarenog AISI 316L. Ti rezultati pokazuju mogućnost primjene tog procesa za izradu kemijskih reaktora. Analizirajući navedeni rad i proces 3D-ispisa s kemijsko-inženjerskog gledišta, ovaj rad ima značajan doprinos, jer ispituje mogućnost primjene FFF procesa za proizvodnju komponenti kemijskih reaktora. Materijali upotrijebljeni u izradi reaktora moraju imati specifična mehanička svojstva poput visoke čvrstoće, postojanost na koroziju, toplinske stabilnosti i odgovarajuće duktilnosti, da bi mogli izdržati ekstremne uvjete u procesima kao što su visok tlak, visoka temperatura i agresivne kemikalije.

## 2.7. Mlazno izbacivanje veziva

Mlazno izbacivanje veziva je proces aditivne proizvodnje razvijen na *Massachusetts Institute of Technology* početkom 1990-ih, a komercijaliziran 2010. godine. U ovom procesu, za razliku od drugih aditivnih procesa, ne upotrebljava se laserski ili elektronski izvor energije. Umjesto toga, upotrebljava se vezivo za spajanje slojeva metalnog praha, a nakon nanošenja praha i veziva slijedi proces sinteriranja ili uklanjanja veziva. Koraci uključuju nanošenje praha, selektivno nanošenje veziva i ponavljanje tih koraka do zavšetka ispisa. Nakon toga slijedi sinteriranje ili infiltracija s metalom nižeg tališta da bi se popunile praznine. Prednosti BJ procesa uključuju niže početne troškove, visoku brzinu izrade, mogućnost izrade većih serija i širok spektar materijala, dok su nedostaci poroznost, manja čvrstoća, složenost sinteriranja i smanjenje dimenzija tijekom procesa.<sup>1,42-45</sup>

Mostafei i sur.<sup>46</sup> ispitali su primjenu BJ procesa za izradu proizvoda od niklove legure Inconel 625. Utvrdili su da gustoća materijala nakon 3D-ispisa iznosi oko 50 %, dok ostatak čini vezivo. Optimirali su proces sinteriranja, a analizom je utvrđeno da je optimalna temperatura sinteriranja 1280 °C. Nakon 4 h sinteriranja pri toj temperaturi, rastezna čvrstoća materijala iznosi 612 MPa, dok prekidna čvrstoća iznosi 327 MPa, a prekidno istezanje 40,9 %. Sinteriranjem pri višim temperaturama formiraju se veće čestice metala. Pri 1280 °C čestice su veličine  $55 \pm 15 \mu\text{m}$ , a pri 1300 °C  $182 \pm 31 \mu\text{m}$ . Također, utvrđeno je povećanje razmaka između metalnih čelija pri višim temperaturama, što rezultira manjom tvrdoćom. To istraživanje ima izravnu poveznicu s kemijskim inženjerstvom, posebno u području analize i odabira materijala za konstrukciju procesne opreme u kemijskoj industriji. Inconel 625 poznat je po svojoj iznimnoj postojanosti na oksidaciju, koroziju i visoke temperature, što ga čini idealnim za primjenu u kemijskim reaktorima, cjevovodima za agresivne medije, izmjenjivačima topline i komponentama koje rade pri ekstremnim uvjetima, primjerice visok tlak i temperatura.

## 2.8. Mlazno izbacivanje nanočestica

Mlazno izbacivanje nanočestica je proces aditivne proizvodnje u kojem se čestice spajaju isparavanjem otapala iz suspenzije pod utjecajem toplinske energije. Razvila ga je i

patentirala tvrtka *XJet Ltd.* NPJ proces omogućava preciznu kontrolu nanošenja suspenzije, čime se postiže visoka preciznost, gustoća i rezolucija metalnih komponenti. Sličan je BJ procesu, no umjesto veziva upotrebljava se suspenzija metalnih čestica nanometarskih dimenzija. Nakon 3D-ispisa slijedi sinteriranje. Sloj koji se tim procesom izrađuje ima debljinu između 7 i 10  $\mu\text{m}$ , a odstupanja u preciznosti mogu biti do 50  $\mu\text{m}$  za manje proizvode, te 50 – 100  $\mu\text{m}$  za veće. Nakon sinteriranja, dimenzije objekta smanjuju se za oko 13 %. Materijali razvijeni za NPJ proces uključuju nehrđajući čelik 17-4 PH, SS316L, cirkonijev oksid i glinicu. Prednosti NPJ procesa uključuju visoku preciznost, veliku gustoću nakon sinteriranja i finu završnu obradu, dok su nedostaci visoka cijena opreme, složenija naknadna obrada i niža brzina proizvodnje.<sup>47</sup> S obzirom na to da je proces proizvodnje zaštićen patentom, u literaturi ne postoje zabilježene analize i provedbe eksperimenata s metalnim materijalima 3D-ispisanima NPJ procesom.

### 3. Procesi 3D-ispisa koji upotrebljavaju ostale materijale

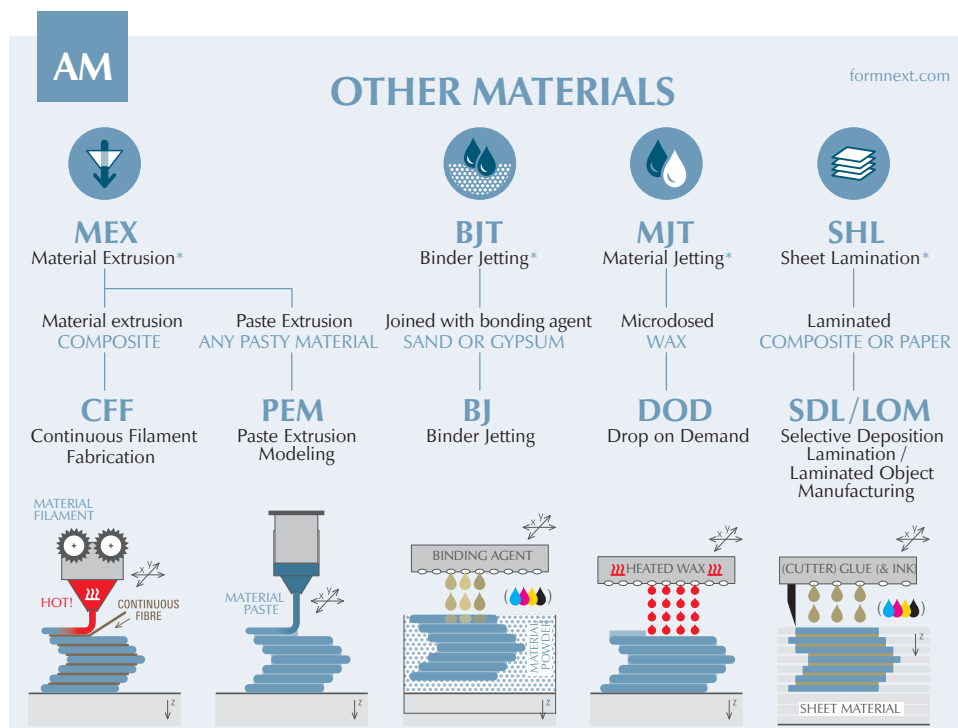
Iako su polimeri i metali često upotrebljavani materijali, postoji nekoliko procesa aditivne proizvodnje koji upotrebljavaju ostale materijale, kao što su keramika, staklo, kompoziti, beton, papir, vosak, materijali koji služe kao hrana, materijali u koje su dodane stanice radi izrade bioloških sustava, itd. Ti procesi mogu se podijeliti na (slika 2): izradu uz kontinuirano ojačavajuće vlakno (engl. *continuous filament fabrication*, CFF), modeliranje ekstrudiranjem paste

(engl. *paste extrusion modelling*, PEM), mlazno izbacivanje veziva (engl. *binder jetting*, BJ), kapanje na zahtjev (engl. *drop on demand*, DOD) te selektivnu laminaciju (engl. *selective deposition lamination*, SDL)/proizvodnju laminiranih objekata (engl. *laminated object manufacturing*, LOM).

#### 3.1. Izrada uz kontinuirano ojačavajuće vlakno

Izrada uz kontinuirano ojačavajuće vlakno je proces aditivne proizvodnje koji upotrebljava kontinuirana vlakna za ojačavanje osnovnog polimernog materijala, čime se dobivaju kompozitni dijelovi visoke mehaničke čvrstoće i krutosti. Taj proces integrira u polimernu matricu vlakna poput ugljičnih<sup>48–51</sup>, staklenih<sup>52</sup> ili aramidnih<sup>53</sup>, stvarajući čvrstu i laganu strukturu postojanu na koroziju i visoke temperature. CFF se najčešće primjenjuje u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji te za proizvodnju sportske opreme i medicinskih uređaja.<sup>50,53–55</sup>

Tijekom izrade, vlakna se kontinuirano izvlače i polažu unutar slojeva osnovnog materijala, čime se optimiraju svojstva kompozita za specifične primjene.<sup>52,55</sup> Ključna prednost CFF procesa je mogućnost prilagodbe smjera i rasporeda vlakana da bi se postigla optimalna otpornost na različite vrste opterećenja. *Araya-Calvo i sur.*<sup>48</sup> na primjeru poliamida 6 3D-ispisanog s raznim udjelima i orijentacijama ugljičnih vlakana, pokazali su da proizvodi podložni torzijskim silama mogu imati vlakna orijentirana u smjeru koji najbolje apsorbira takva naprezanja (što ovisi o smjeru djelovanja sile), dok se kod savojnih opterećenja vlakna polažu usporedno s osima savijanja. Zahvaljujući mogući-



Slika 2 – Procesi 3D-ispisa koji upotrebljavaju ostale materijale<sup>3</sup>  
 Fig. 2 – 3D printing processes that use other materials<sup>3</sup>

nosti prilagodbe orijentacije vlakana u odnosu na opterećenja, taj proces omogućuje razvoj laganih i strukturno učinkovitih dijelova, čime se poboljšava izvedba sustava i smanjuje potrošnja energije. Primjena se proširuje i na razvoj mikroreaktora, gdje prilagođena svojstva kompozita mogu poboljšati otpornost na hidrodinamičke sile i kemijske utjecaje. Osim mehaničkih prednosti, CFF je ekološki prihvatljiv proces, jer smanjuje otpad u odnosu na tradicionalne metode proizvodnje te omogućuje recikliranje plastomera. Međutim, izazovi uključuju složenost postavljanja vlakana i kompatibilnost materijala.

Primjena CFF-a proširila se na industrije u kojima su lagani i čvrsti dijelovi ključni. U zrakoplovstvu omogućuje smanjenje težine i potrošnje goriva, dok se u automobilskoj industriji primjenjuje za lagane komponente otporne na udar.<sup>50</sup> Također, poboljšava performanse sportske opreme<sup>56</sup> i omogućuje razvoj biokompatibilnih medicinskih implantata složenih geometrija.<sup>57</sup> Taj proces ima značajne primjene u kemijskom inženjerstvu, posebice u razvoju strukturno poboljšanih komponenti za kemijske reaktore, izmjenjivače topline i mikrofluidne sustave, gdje su visoka mehanička otpornost i kemijska postojanost ključni zahtjevi.

### 3.2. Modeliranje ekstrudiranjem paste

Modeliranje ekstrudiranjem paste je proces aditivne proizvodnje koji primjenjuje viskozne paste za izradu složenih trodimenzionalnih proizvoda sloj po sloj.<sup>58,59</sup> Paste mogu sadržavati keramiku<sup>60</sup>, biokompatibilne materijale<sup>60</sup>, hranu<sup>59,61</sup> i druge specijalizirane smjese, omogućujući širok raspon primjena, od keramičkih dijelova do biomedicinskih implantata i kulinarskih dekoracija.

U PEM procesu materijal mora imati odgovarajuća reološka svojstva, dovoljno malu viskoznost da bi bio povoljan za ekstruziju, ali i dovoljno viskozna za zadržavanje oblika. Ekstrudiranje se odvija pneumatskim<sup>60</sup>, mehaničkim ili hidrauličkim<sup>62</sup> sustavima kroz mlaznicu prilagođenu viskoznosti i veličini čestica paste. Ovisno o materijalu, slojevi mogu zahtijevati dodatno stvrdnjavanje putem UV svjetla, grijanja, hlađenja ili kemijskih reakcija. Završna obrada uključuje sušenje, sinteriranje i površinsku obradu radi poboljšanja svojstava proizvoda.<sup>58,59</sup>

Prednost PEM procesa je svestranost u odabiru materijala i precizna kontrola nad konačnim svojstvima proizvoda. Keramičke paste omogućuju izradu preciznih dijelova koji nakon sinteriranja postižu potrebnu čvrstoću.<sup>60</sup> Biokompatibilne paste upotrebljavaju se za izradu implantata i medicinskih podloga prilagođenih pacijentima, čime se poboljšava integracija s tkivom.<sup>60,63</sup> Yang i sur.<sup>63</sup> u svojem radu pokazali su pripremu paste miješanjem polimera, keramike i otapala u određenim omjerima. Taj proces uključuje: pripremu biokeramičke paste, 3D-ispis i sušenje, odvajanje i sinteriranje 3D-ispisanih nosača. U industriji keramike PEM omogućuje proizvodnju komponenti s visokom preciznošću za primjene u elektroničkoj i automobilskoj industriji te kemijskom inženjerstvu.<sup>64</sup> U prehrambenoj industriji upotrebljava se za oblikovanje složenih struktura od čokolade, šećera i tijesta, omogućujući inovativne gastronomске kreacije.<sup>61</sup>

### 3.3. Mlazno izbacivanje veziva

Mlazno izbacivanje veziva je proces aditivne proizvodnje u kojem se kapljevitom vezivo upotrebljava za selektivno povezivanje čestica praha sloj po sloj, formirajući čvrste strukture. Materijal, poput hrane, keramike, stakla ili pijeska, puni se u spremnik 3D-pisača, a tanki sloj praha ravnomjerno se raspoređuje pomoću valjka.<sup>65,66</sup> Glava za ispis izbacuje vezivo na određena područja prema digitalnom modelu, povezujući čestice. Nakon svakog sloja, podloga se spušta, a novi sloj praha nanosi se na prethodni. Proces se ponavlja do formiranja cijelog proizvoda.<sup>66,67</sup> Po završetku, proizvod je okružen nevezanim prahom koji se uklanja četkama, propuhivanjem zraka ili vakuumskim sustavima. U nekim slučajevima potrebna je dodatna toplinska ili kemijska obrada da bi vezivo potpuno očvrstnulo.<sup>65,66</sup> Lu i sur.<sup>68</sup> utvrdili su da manja veličina čestica poboljšava čvrstoću neobrađenih dijelova zahvaljujući boljoj distribuciji veziva i većim kapilarnim silama. BJ omogućuje izradu složenih geometrija teško izvedivih tradicionalnim metodama.<sup>65,66</sup> Ovisno o materijalu, naknadna obrada uključuje sinteriranje keramike, toplinsku obradu stakla ili očvršćivanje smolama kod pijeska.<sup>64-66</sup> Proces se primjenjuje u lijevaonici za izradu kalupa, arhitekturi za proizvodnju dekorativnih elemenata i umjetnosti za precizne skulpture.<sup>65-67,69</sup> BJ proces ima važan potencijal i u kemijskom inženjerstvu, posebice u razvoju poroznih struktura za katalizatore, filtracijske sustave i reaktorske komponente. Mogućnost ponovne upotrebe praha i eliminacija potpornih struktura čine taj proces ekonomski i ekološki održivim, dok visoka brzina proizvodnje omogućuje učinkovitu izradu složenih geometrija prilagođenih specifičnim procesnim zahtjevima.

Prednosti BJ procesa uključuju veliku brzinu proizvodnje, mogućnost ponovne upotrebe praha i izostanak potpornih struktura. Međutim, kvaliteta i mehanička svojstva konačnih proizvoda uvelike ovise o parametrima naknadne obrade, uključujući odabir i vezivanje čestica praha, što je ključno za osiguravanje strukturne stabilnosti i funkcionalnosti u kemijskom inženjerstvu i procesnoj industriji. Stoga je optimiranje veziva i postupaka sinteriranja ključna za proširenje primjene BJ tehnologije u kemijskom inženjerstvu, posebice u razvoju naprednih reaktorskih sustava i separacijskih membrana.<sup>65-67</sup>

### 3.4. Kapanje na zahtjev

Kapanje na zahtjev je proces aditivne proizvodnje u kojem se precizno kontrolirane kapljice kapljeviteg materijala selektivno talože sloj po sloj, tvoreći trodimenzionalne proizvode. Materijali poput keramike<sup>70-72</sup>, stakla<sup>70,72</sup>, voska<sup>73</sup> i biokompatibilnih spojeva<sup>70,71</sup> pripremaju se u kapljevitoj obliku s odgovarajućim reološkim svojstvima. Kapljevina se puni u spremnik 3D-pisača, a mlaznice izbacuju kapljice na podlogu prema digitalnom modelu. Nakon ispuštanja, kapljice se očvršćuju ili suše, ovisno o materijalu, proces se ponavlja dok se ne formira cijeli proizvod. Ovisno o materijalu, naknadna obrada uključuje sušenje i sinteriranje keramike, toplinsku obradu stakla ili hlađenje voska. Biokompatibilni materijali prolaze specifične procese očvršćivanja da bi bili sigurni za medicinsku upotrebu. DOD omogućava visoku preciznost u izradi složenih geometrija

i minimalnu potrošnju materijala. Selektivno nanošenje kapljica smanjuje otpad, čineći ga ekološki prihvatljivim procesom. Ključni izazovi uključuju kontrolu viskoznosti i površinske napetosti materijala te razvoj mlaznica koje osiguravaju precizno izbacivanje bez začepljenja.<sup>70–72</sup>

Proces se primjenjuje u mikroelektronici, biomedicini, kemijskom inženjerstvu i dentalnoj industriji. *Calden i sur.*<sup>74</sup> su pokušali poboljšati tehnike doziranja u mikroelektronikom pakiranju i kapsuliranju primjenom DOD procesa. Usredotočili su se na povećanje točnosti i selektivnosti u taloženju kapljica polimera, uzimajući u obzir čimbenike poput viskoznosti početnog materijala i vrste glave 3D-pisača. Analiza je pokazala da DOD proces može precizno polagati kapljice uz minimizirano raspršivanje i stvaranje artefakta, posebno kad se upotrebljavaju materijali niske viskoznosti, čime se postižu bolja kontrola i gustoća teksture važne za napredne primjene. DOD se primjenjuje za izradu mikročipova, biokompatibilnih implantata i dentalnih nadomjestaka visoke točnosti.<sup>75–78</sup> U umjetnosti i dizajnu omogućava stvaranje složenih modela i skulptura, otvarajući nove mogućnosti u personaliziranoj proizvodnji.<sup>70–72</sup>

### 3.5. Selektivna laminacija/proizvodnja laminiranih objekata

Selektivna laminacija, poznata i kao proizvodnja laminiranih objekata, je proces aditivne proizvodnje u kojem se trodimenzionalni predmeti izrađuju postupnim laminiranjem i rezanjem slojeva materijala poput papira, plastike, metala i kompozita.<sup>79,80</sup> Materijal se isporučuje u rolama ili pojedinačnim listovima na koje je ponekad prethodno nanoseno ljepilo, koje se aktivira toplinom ili pritiskom tijekom laminacije. Svaki sloj se precizno reže laserom ili mehaničkim nožem prema digitalnom modelu, a višak materijala može se unakrsno rezati radi lakšeg uklanjanja. Proces se ponavlja dok se ne formira konačni proizvod, nakon čega slijedi uklanjanje viška materijala i, po potrebi, naknadna obrada poput brušenja ili premazivanja radi poboljšanja mehaničkih svojstava.<sup>79–82</sup> SDL/LOM omogućava brzu i ekonomičnu proizvodnju velikih dijelova, čineći ga pogodnim za izradu prototipova, kalupa i modela. Međutim, može biti manje prikladan za izradu vrlo složenih geometrija zbog ograničenja u preciznosti slojeva. Ključni izazovi uključuju preciznu kontrolu rezanja i laminiranja, kao i osiguravanje pravilnog poravnanja slojeva da bi se izbjegle strukturne nepravilnosti.<sup>79,82</sup>

Primjena SDL/LOM procesa obuhvaća industrije poput automobilske, medicinske i dentalne. U automobilskoj industriji primjenjuje se za izradu prototipova i alata, dok u medicini omogućava proizvodnju preciznih anatomskih modela za kirurško planiranje. U dentalnoj industriji primjenjuje se za izradu prilagođenih krunica i mostova.<sup>79–81</sup>

SDL/LOM proces ima primjenu i u kemijskom inženjerstvu, posebice u razvoju funkcionalno gradiranih materijala za separacijske sustave, katalizatore i reaktorske komponente. Mogućnost precizne kontrole gradijenta poroznosti omogućuje optimiranje prijenosa tvari i energije prilikom

protoka fluida, čime se poboljšava učinkovitost procesne opreme. *Zhang i sur.*<sup>83</sup> u svojem istraživanju predstavili su novu metodu toplinske laminacije za izradu funkcionalno gradiranih poroznih materijala, omogućujući preciznu kontrolu gradijenta poroznosti u strukturama. Optimiranjem tlaka, temperature i vremena vezivanja, autori su stigli znatna poboljšanja mehaničkih svojstava.

Optimiranje parametara toplinske laminacije, poput tlaka, temperature i vremena vezivanja, omogućuje poboljšanje mehaničkih svojstava laminiranih struktura, što je ključno za njihovu dugotrajnu stabilnost u kemijskim procesima. Ekološka i ekonomska održivost SDL/LOM procesa, uključujući smanjenje materijalnog otpada i energetske efikasnost, dodatno naglašava njegov potencijal za široku industrijsku primjenu u kemijskom inženjerstvu.

## 4. Zaključak

Predstavljene rad pruža sveobuhvatan pregled tehnologija aditivne proizvodnje usmjerenih na obradu metala, keramike, kompozita i ostalih materijala, s posebnim naglaskom na primjene u kemijskom inženjerstvu. Analiza različitih procesa – od selektivnog laserskog taljenja (SLM), taljenja snopom elektrona (EBM) i laserske proizvodnje gotovih proizvoda (LENS), preko metoda temeljnih na nanošenju metalnog praha (MPA) i aditivne proizvodnje lučnim zavarivanjem (WAAM), do procesa proizvodnje rastaljenim filamentom (FFF) i mlaznog izbacivanja nanočestica (NPJ) – pokazuje kako se tehnologije kontinuirano razvijaju da bi zadovoljile specifične inženjerske zahtjeve.

Svaka od opisanih tehnologija nudi jedinstvene prednosti, poput mogućnosti izrade iznimno složenih geometrija, brze proizvodnje i prilagodbe materijala, dok se istodobno suočava sa specifičnim izazovima – npr. ograničenjima u rezoluciji, potrebi za naknadnom obradom te problemima vezanim uz unutarnje naprezanje i poroznost materijala. Rad također ističe važnost pravilnog odabira procesa prema primjeni, svojstvima materijala i integraciji u postojeće industrijske sustave, što je osobito važno u dizajnu komponenti poput kemijskih reaktora, izmjenjivača topline i poroznih medija.

Daljnji razvoj i optimiranje opisanih tehnologija, usmjereni na poboljšanje kvalitete, povećanje brzine i efikasnosti proizvodnje uz istodobno smanjenje troškova, predstavljaju ključnu perspektivu budućih istraživanja. Implementacija aditivne proizvodnje u industrijskim procesima omogućava postizanje značajnih inženjerskih i ekoloških prednosti te otvara put ka inovacijama koje će unaprijediti konkurentnost i fleksibilnost proizvodnje u kemijskom inženjerstvu.

## ZAHVALA

Ovaj rad financirala je Hrvatska zaklada za znanost projekta HRZZ-IP-2022-10-8004, HRZZ-DOK-2020-01-8955 i HRZZ-DOK-2021-02-5999.

## Popis kratica

### List of abbreviations

AM/AP	– aditivna proizvodnja – additive manufacturing
BJ	– mlazno izbacivanje veziva – binder jetting
CFF	– izrada uz kontinuirano ojačavajuće vlakno – continuous filament fabrication
DOD	– kapanje na zahtjev – drop on demand
EBM	– taljenje snopom elektrona – electron beam melting
FDM/FFF	– proizvodnja rastaljenim filamentom – fused filament fabrication/fused deposition modelling
LENS	– laserska proizvodnja gotovih proizvoda – laser engineering net shape
LOM	– proizvodnja laminiranih objekata – laminated object manufacturing
MPA	– nanošenje metalnog praha – metal powder application
NPJ	– mlazno izbacivanje nanočestica – nano particle jetting
PEM	– modeliranje ekstrudiranjem paste – paste extrusion modelling
SDL	– selektivna laminacija – selective deposition lamination
SLM	– selektivno lasersko taljenje – selective laser melting
WAAM	– aditivna proizvodnja lučnim zavarivanjem – wire and arc additive manufacturing

## Literatura

### References

1. D. Vrsaljko, M.-P. Marković, I. K. Cingesar, F. Car, Aditivna proizvodnja u kemijskom inženjerstvu. Prvi dio: procesi za polimere, *Kem. Ind.* **74** (1-2) (2025) 43–56, doi: <https://doi.org/10.15255/KUI.2024.044>.
2. HRN EN ISO ASTM 52900:2017.
3. S. Ritter, AM Field Guide Compact, Mesago Messe Frankfurt GmbH, Frankfurt am Main, 2022.
4. M. Tebianian, S. Aghaie, N. S. Razavi Jafari, S. R. Elmi Hosseini, A. B. Pereira, F. A. O. Fernandes, M. Farbakhti, C. Chen, Y. A. Huo, A Review of the Metal Additive Manufacturing Processes, *Materials* **16** (2023) 7514, doi: <https://doi.org/10.3390/ma16247514>.
5. B. Gao, H. Zhao, L. Peng, Z. A. Sun, Review of Research Progress in Selective Laser Melting (SLM), *Micromachines* **14** (2023) 57, doi: <https://doi.org/10.3390/mi14010057>.
6. J. Gunasekaran, P. Sevel, I. J. Solomon, Metallic materials fabrication by selective laser melting: A review, *Mater. Today Proc.* **37** (2020) 252–259, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.162>.
7. URL: <https://www.hil prototypes.com/direct-metal-laser-sintering-advantages-and-disadvantages/> (7. 10. 2024.)
8. P. K. Gokuldoss, S. Kolla, J. Eckert, Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting – Selection Guidelines, *Materials* **10** (2017) 672, doi: <https://doi.org/10.3390/ma10060672>.
9. T. Kimura, T. M. Nakamoto, M. Mizuno, H. Araki, Effect of silicon content on densification, mechanical and thermal properties of Al-xSi binary alloys fabricated using selective laser melting, *Mater. Sci. Eng. A* **682** (2017) 593–602, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.11.059>.
10. K. G. Prashanth, R. Damodaram, S. Scudino, Z. Wang, K. Prasad Rao, J. Eckert, Friction welding of Al–12Si parts produced by selective laser melting, *J. Mater. Des.* **57** (2014) 632–637, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.026>.
11. S. Scudino, C. Unterdörfer, K. G. Prashanth, H. Attar, N. Ellendt, V. Uhlenwinkel, J. Eckert, Additive manufacturing of Cu-10Sn bronze, *Mater. Lett.* **156** (2015) 202–204, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.05.076>.
12. E. Liverani, A. Fortunato, A. Leardini, C. Belvedere, S. Siegler, L. Ceschini, A. Ascari, Fabrication of Co-Cr-Mo endoprosthetic ankle devices by means of selective laser melting (SLM), *Mater. Des.* **106** (2016) 60–68, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.083>.
13. Y. J. Lu, S. Q. Wu, Y. L. Gan, S. Y. Zhang, S. Guo, J. J. Lin, J. X. Lin, Microstructure, mechanical property and metal release of As-SLM CoCrW alloy under different solution treatment conditions, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* **55** (2016) 179–190, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.10.019>.
14. P. Kanagarajah, F. Brenne, T. Niendorf, H. J. Maier, Inconel 939 processed by selective laser melting: Effect of microstructure and temperature on the mechanical properties under static and cyclic loading, *Mater. Sci. Eng. A* **588** (2013) 188–195, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.09.025>.
15. P. Wang, B. C. Zhang, C. C. Tan, S. Raghavan, Y.-F. Lim, C.-N. Sun, J. Wei, D. Z. Chi, Microstructural characteristics and mechanical properties of carbon nanotube reinforced Inconel 625 parts fabricated by selective laser melting, *Mater. Des.* **112** (2016) 290–299, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.09.080>.
16. X. Wu, E. W. Lui, A. Pateras, M. Qian, M. Brandt, In situ tailoring microstructure in additively manufactured Ti-6Al-4V for superior mechanical performance, *Acta Mater.* **125** (2017) 390–400, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.12.027>.
17. S. Li, H. Hassanin, M. M. Attallah, N. J. E. Adkins, K. Essa, The development of TiNi-based negative Poisson's ratio structure using selective laser melting, *Acta Mater.* **105** (2016) 75–83, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.12.017>.
18. Y. Zhu, X. Chen, H. Yang, Tribology of selective laser melting processed parts: Stainless steel 316L under lubricated conditions, *Wear* **350** (2016) 46–55, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.01.004>.
19. L. E. Murr, E. Martinez, J. Hernandez, S. Collins, K. N. Amato, S. M. Gaytan, P. W. Shindo, Microstructures and properties of 17–4 PH stainless steel fabricated by selective laser melting, *J. Mater. Res. Technol.* **1** (2012) 167–177, doi: [https://doi.org/10.1016/S2238-7854\(12\)70029-7](https://doi.org/10.1016/S2238-7854(12)70029-7).
20. S. Zhang, S. Xu, Y. Pan, J. Li, T. Li, Mechanism study of the effect of selective laser melting energy density on the microstructure and properties of formed renewable porous bone scaffolds, *Metals* **12** (2022) 1712, doi: <https://doi.org/10.3390/met12101712>.
21. J. Romano, L. Ladani, J. Razmi, M. Sadowski, Temperature distribution and melt geometry in laser and electron-beam melting processes – A comparison among common materials, *Addit. Manuf.* **8** (2015) 1–11, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.003>.
22. URL: <https://amfg.ai/2018/05/16/electron-beam-melting-introduction/> (9. 10. 2024.)

23. W. E. Frazier, Metal additive manufacturing: A review, *J. Mater. Eng. Perform.* **23** (2014) 1917–1928, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>.
24. A. Nouri, A. Sola, 8 – Electron beam melting in biomedical manufacturing u C. Wien (ur.), *Metallic biomaterials processing and medical device manufacturing*, Woodhead Publishing, 2020, str. 271–314, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102965-7.00008-4>.
25. S. Anand Kumar, R. V. S. Prasad, Chapter 2 – Basic principles of additive manufacturing: different additive manufacturing technologies u M. Manjoh, K. Raghavendra, N. Balashanmugam, J. P. Davim (ur.), *Additive Manufacturing – A Tool for Industrial Revolution 4.0*, Woodhead Publishing, 2021., str. 17–35, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822056-6.00012-6>.
26. R. P. Mrudge, N.R. Wald, Laser engineered net shaping advances in additive manufacturing and repair, *Weld. J.* **86** (2007) 44–48.
27. F. P. Jeantette, D. M. Keicher, J. A. Romero, L. P. Schanwald, Method and system for producing complex-shape objects, US Patent 6046426A, National Technology and Engineering Solutions of Sandia LLC.
28. P. S. Korinko, Development of Laser Engineered Net Shape (LENS) Additive Manufacturing for Repair, ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, 2015., doi: <https://doi.org/10.1115/PVP2015-46001>.
29. OPTOMECLENS. MR-7 PSU System Manual, OPTOMECL Inc., Albuquerque, NM, USA, 2009.
30. K.-H. Chang, Chapter 5 - Rapid Prototyping u K.-H. Chang (ur.), *Product Manufacturing and Cost Estimating Using Cad/Cae*, Academic Press, 2013, str. 191–235, doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-401745-0.00005-8>.
31. R. F. Vaz, A. Garfias, V. Albaladejo, J. Sanchez, I. Garcia Cano, A review of advances in cold spray additive manufacturing, *Coatings* **13** (2023) 267, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings13020267>.
32. A. Dass, A. Moridi, State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design, *Coatings* **9** (2019) 418, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings9070418>.
33. Y. Zou, Cold spray additive manufacturing: Microstructure evolution and bonding features, *Accounts Mater. Res.* **2** (2021) 1071–1081, doi: <https://doi.org/10.1021/accounts.1c00138>.
34. W. Li, K. Yang, S. Yin, X. Yang, X. Yi, R. Lupoi, Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: A review, *J. Mater. Sci. Technol.* **34** (2018) 440–457, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.09.015>.
35. S. Yin, P. Cavaliere, B. Aldwell, R. Jenkins, H. Liao, W. Li, R. Lupoi, Cold spray additive manufacturing nad repair: Fundamentals and applications, *Addit. Manuf.* **21** (2018) 628–650, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.017>.
36. T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. M. Miranda, T. G. Santos, J. P. Oliveira, Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM), *Materials* **12** (2019) 1121, doi: <https://doi.org/10.3390/ma12071121>.
37. K. Treutler, V. Wesling, The current state of research of wire arc additive manufacturing (WAAM): A review, *Appl. Sci.* **11** (2021) 8619, doi: <https://doi.org/10.3390/app11188619>.
38. A. Horgar, H. Fostervoll, B. Nyhus, X. Ren, M. Eriksson, O. M. Akselsen, Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire, *J. Mater. Process. Technol.* **259** (2018) 68–74, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.014>.
39. J. M. Costa, E. W. Sequeiros, M. T. Vieira, M. F. Vieira, Additive Manufacturing: Material Extrusion of Metallic Parts, U. Porto J. Eng. **7** (2021) 53–69, doi: [https://doi.org/10.24840/2183-6493\\_007.003\\_0005](https://doi.org/10.24840/2183-6493_007.003_0005).
40. S. Roshchupkin, A. Kolesov, A. Tarakhovskiy, I. Tishchenko, A brief review of main ideas of metal fused filament fabrication, *Mater. Today Proc.* **38** (2021) 2063–2067, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.142>.
41. H. Gong, D. Snelling, K. Kardel, A. Carrano, Comparison of stainless steel 316L parts made by FDM- and SLM-based additive manufacturing processes, *JOM* **71** (2019) 880–885, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3207-3>.
42. S. Meteyer, X. Xu, N. Perry, Y. F. Zhao, Energy and material flow analysis of binder-jetting additive manufacturing processes, *Procedia CIRP* **15** (2014) 19–25, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.030>.
43. E. Sachs, M. Cima, J. Cornie, Three-dimensional printing: Rapid tooling and prototypes directly from a CAD model, *CIRP Ann. Manuf. Technol.* **39** (1990) 201–204, doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61035-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61035-X).
44. P. K. Gokuldoss, S. Kolla, J. Eckert, Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting, and binder jetting – Selection guidelines, *Materials* **10** (2017) 672, doi: <https://doi.org/10.3390/ma10060672>.
45. X. Xu, S. Meteyer, N. Perry, Y. F. Zhao, Energy consumption model of binder-jetting additive manufacturing processes, *Int. J. Prod. Res.* **53** (2014) 7005–7015, doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.937013>.
46. A. Mostafaei, E. L. Stevens, E. T. Hughes, S. D. Biery, C. Hilla, M. Chmielus, Powder bed binder jet printed alloy 625: Densification, microstructure, and mechanical properties, *Mater. Des.* **108** (2016) 126–135, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.067>.
47. URL: <https://xjet3d.com/> (16. 10. 2024.)
48. M. Araya-Calvo, I. López-Gómez, N. Chamberlain-Simon, J. L. León-Salazar, T. Guillén-Girón, J. S. Corrales-Cordero, O. Sánchez-Brenes, Evaluation of compressive and flexural properties of continuous fiber fabrication additive manufacturing technology, *Addit. Manuf.* **22** (2018) 157–164, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.007>.
49. D. Jiang, D. E. Smith, Anisotropic mechanical properties of oriented carbon fiber filled polymer composites produced with fused filament fabrication, *Addit. Manuf.* **18** (2017) 84–94, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.08.006>.
50. F. Lupone, E. Padovano, C. Venezia, C. Badini, Experimental characterization and modeling of 3D printed continuous carbon fibers composites with different fiber orientation produced by FFF process, *Polymers* **14** (2022) 426, doi: <https://doi.org/10.3390/polym14030426>.
51. J. Majko, M. Vaško, M. Handrik, M. Sága, Tensile testing of polymer composites reinforced with continuous fibers produced by CFF method, Computational mechanics 37th conference with international participation, Computational mechanics 2022: book of extended abstracts: 37<sup>th</sup> conference with international participation, 2022, str. 66–69.
52. D. Marciniak, D. Sykutera, P. Czyżewski, Analysis of mechanical properties and structure of samples filled with continuous glass fiber produced in composite filament fabrication technology, *Bull. Pol. Acad. Sci.-Tech. Sci.* **72** (2024) e148841, doi: <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148841>.
53. S. Rijckaert, L. Daelemans, L. Cardon, M. Boone, W. Van Paepegem, K. De Clerck, Continuous fiber-reinforced aramid/PETG 3D-printed composites with high fiber loading through fused filament fabrication, *Polymers* **14** (2022) 298, doi: <https://doi.org/10.3390/polym14020298>.
54. A. Parmiggiani, M. Prato, M. Pizzorni, Effect of the fiber orientation on the tensile and flexural behavior of continuous

- carbon fiber composites made via fused filament fabrication, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **114** (2021) 2085–2101, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06997-5>.
55. V. Mishra, C. K. Ror, S. Negi, V. Mahesh, On mechanical characterization and damage analysis of additively manufactured continuous fiber/poly-lactic acid bio-composite using in-nozzle technique, *Polym. Compos.* **45** (2024) 5017–5027, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.28106>.
  56. G. Leslie, K. Winwood, A. Sanderson, P. Zioupos, T. Allen, Feasibility of additively manufacturing synthetic bone for sports personal protective equipment applications, *Ann. 3D Print. Med.* **12** (2023) 100121, doi: <https://doi.org/10.1016/j.stlm.2023.100121>.
  57. P.-A. Mouthuy, N. Zargar, O. Hakimi, E. Lostis, A. Carr, Fabrication of continuous electrospun filaments with potential for use as medical fibres, *Biofabrication* **7** (2015) 025006, doi: <https://doi.org/10.1088/1758-5090/7/2/025006>.
  58. M. K. Alazzawi, S. Murali, R. A. Haber, Visualizing the effect of extrusion velocity on the spatial variation of porosity in a titanium dioxide/binder system, *Mater. Sci. Appl.* **8** (2017) 933–947, doi: <https://doi.org/10.4236/msa.2017.813068>.
  59. H. Liu, Y. Li, D. Li, Research on rheological properties and extrusion behavior of aqueous alumina paste in paste-extrusion-based SFF processes, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **83** (2016) 2039–2047, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7720-z>.
  60. M. Vaezi, G. Zhong, H. Kalami, S. Yang, 10 – Extrusion-based 3D printing technologies for 3D scaffold engineering, u Y. Deng, J. Kuiper (ur.), *Functional 3D Tissue Engineering Scaffolds*, Woodhead Publishing, 2018., str. 235–254, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100979-6.00010-0>.
  61. S. Zhu, M. A. Stieger, A. J. van der Goot, M. A. I. Schutyser, Extrusion-based 3D printing of food pastes: Correlating rheological properties with printing behaviour, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **58** (2019) 102214, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102214>.
  62. T. A. L. Harris, D. F. Walczyk, M. M. Weber, Manufacturing of high-temperature polymer electrolyte membranes – Part I: System design and modeling, *J. Fuel Cell Sci. Technol.* **7** (2010) 011007, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3119055>.
  63. H. Y. Yang, I. Thompson, S. F. Yang, X. P. Chi, J. R. G. Evans, R. J. Cook, Dissolution characteristics of extrusion freeformed hydroxyapatite–tricalcium phosphate scaffolds, *J. Mater. Sci. Mater. Med.* **19** (2008) 3345–3353, doi: <https://doi.org/10.1007/s10856-008-3473-7>.
  64. I. Hendi, T. Lacondemine, G. Schneider, M. Fendler, Characterization of the anisotropic conductive behavior of a copper paste for structural electronics, *J. Sci. Adv. Mater. Devices* **7** (2022) 100441, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2022.100441>.
  65. M. Ziaee, N. B. Crane, Binder jetting: A review of process, materials, and methods, *Addit. Manuf.* **28** (2019) 781–801, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>.
  66. A. Lores, N. Azurmendi, I. Agote, E. Zuza, A review on recent developments in binder jetting metal additive manufacturing: materials and process characteristics, *Powder Metall.* **62** (2019) 5, doi: <https://doi.org/10.1080/00325899.2019.1669299>.
  67. J. L. Alves, L. Santana, E. M. Ocana Garzon, Chapter 10: Binder jetting u J. Izdebska-Podsiadly (ur.), *Polymers for 3D Printing: Methods, Properties, and Characteristics*, William Andrew, Norwich, NY, 2022., str. 113–125, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818311-3.00010-0>.
  68. K. Lu, M. Hiser, W. Wu, Effect of particle size on three dimensional printed mesh structures, *Powder Technol.* **192** (2009) 178–183, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.12.011>.
  69. Z. F. Zhang, L. Wang, L. T. Zhang, P. F. Ma, B. H. Lu, C. W. Du, Binder jetting 3D printing process optimization for rapid casting of green parts with high tensile strength, *China Foundry* **18** (2021) 335–343, doi: <https://doi.org/10.1007/s41230-021-1057-z>.
  70. H. Dong, W. W. Carr, J. F. Morris, Visualization of drop-on-demand inkjet: Drop formation and deposition, *Rev. Sci. Instrum.* **77** (2006) 085101, doi: <https://doi.org/10.1063/1.2234853>.
  71. H. Dong, W. W. Carr, J. F. Morris, An experimental study of drop-on-demand drop formation, *Phys. Fluids* **18** (2006) 072102, doi: <https://doi.org/10.1063/1.2217929>.
  72. D. Zhao, H. Zhou, Y. Wang, J. Yin, Y. Huang, Drop-on-demand (DOD) inkjet dynamics of printing viscoelastic conductive ink, *Addit. Manuf.* **48** (2021) 102451, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102451>.
  73. T. Ottnad, M. Kagerer, F. Irlinger, T. C. Lueth, Modification and further development of a drop on demand printhead for wax enabling future 3D-printing and rapid prototyping, 2012 IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics (AIM) (2012) 117–122, doi: <https://doi.org/10.1109/AIM.2012.6265958>.
  74. E. Cadalen, T. Séon, C. Josserand, D. Manteigas, Dispensing Improvements with Drop on Demand Technology, 22<sup>nd</sup> European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition (EMPC), 2019., str. 1–8, doi: <https://doi.org/10.23919/EMPC44848.2019.8951793>.
  75. B. W. Jo, A. Lee, K. H. Ahn, S. J. Lee, Evaluation of jet performance in drop-on-demand (DOD) inkjet printing, *Korean J. Chem. Eng.* **26** (2009) 339–348, doi: <https://doi.org/10.1007/s11814-009-0057-2>.
  76. N. Link, R. Semiat, Ink drop motion in wide-format printers I. Drop flow from Drop-On-Demand (DOD) printing heads, *Chem. Eng. Process.* **48** (2009) 68–83, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2008.02.005>.
  77. J. Luo, L. H. Qi, S. y. Zhong, J. M. Zhou, H. J. Li, Printing solder droplets for micro devices packages using pneumatic drop-on-demand (DOD) technique, *J. Mater. Process. Technol.* **212** (2012) 2066–2073, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.05.007>.
  78. X. Wang, W. W. Carr, D. G. Bucknall, J. F. Morris, Drop-on-demand drop formation of colloidal suspensions, *Int. J. Multiphase Flow* **38** (2012) 17–26, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.09.001>.
  79. A. Pilipović, Chapter 11 Sheet lamination u J. Izdebska-Podsiadly (ur.) *Polymers for 3D Printing: Methods, Properties, and Characteristics*, William Andrew, Norwich NY, 2022., str. 127–136, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818311-3.00008-2>.
  80. C. M. Thakar, S. P. Deshmukh, T. A. Mulla, A review on selective deposition lamination 3D printing technique, *Int. J. Adv. Sci. Res. Eng. Trends* **4** (2020) 7–11.
  81. M. Gao, Chapter 11 3D Printing of Nanostructures u Y. Lin, X. Chen (ur.), *Advanced Nano Deposition Methods*, Chemical Industry Press, Weinheim, Njemačka, 2016. <https://doi.org/10.1002/9783527696406.ch11>.
  82. J. Izdebska-Podsiadly, Chapter 3 Classification of 3D printing methods u J. Izdebska-Podsiadly (ur.), *Polymers for 3D Printing: Methods, Properties, and Characteristics*, William Andrew, Norwich, NY, 2022., str. 23–34, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818311-3.00009-4>.
  83. Y. Zhang, J. Wang, Fabrication of Functionally Graded Porous Polymer Structures Using Thermal Bonding Lamination Techniques, *Procedia Manuf.* **10** (2017) 866–875, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.073>.

## SUMMARY

### Additive Manufacturing in Chemical Engineering. Part Two: Processes for Metals and Other Materials.

*Domagoj Vrsaljko, Marijan-Pere Marković,\* Ivan Karlo Cingesar,\* and Filip Car*

Additive manufacturing, commonly known as 3D printing, is increasingly being used in chemical engineering to fabricate complex components, optimise industrial processes, and develop new materials. While polymer technologies dominated the early stages of industrial application of additive manufacturing, the growing need for materials with high mechanical strength, chemical resistance, and thermal stability has driven development toward metals, ceramics, and composites. This paper provides an overview of key additive manufacturing processes that enable the use of metal and other materials. It also analyses potential applications in chemical engineering, such as the fabrication of reactors, heat exchangers, catalytic supports, and porous membranes. Particular emphasis is placed on the challenges associated with post-processing and the optimisation of manufacturing parameters to achieve the chemical and mechanical properties necessary for laboratory and industrial applications. The development of additive manufacturing with metal and other materials in this area enables faster, more environmentally friendly, and more functionally advanced manufacturing of industrial and laboratory components, opening up new possibilities for engineering and scientific applications.

#### Keywords

*Additive manufacturing, chemical engineering, metals, ceramics, composites*

*University of Zagreb Faculty of  
Chemical Engineering and Technology,  
Trg Marka Marulića 19, HR-10 000 Zagreb,  
Croatia*

Review  
Received May 21, 2025  
Accepted July 24, 2025