



## MOŽNOSTI UPORABE LESA V DODAJALNIH TEHNOLOGIJAH (3D-TISKANJU)

### POSSIBLE USES OF WOOD IN ADDITIVE TECHNOLOGIES (3D PRINTING)

Mirko Kariž<sup>1</sup>, Milan Šernek<sup>1</sup>, Manja Kitek Kuzman<sup>1\*</sup>

UDK 655.3.066.51:676.15

Izvleček / Abstract

Pregledni znanstveni članek / Review scientific article

**Izvleček:** Dodajalne tehnologije so v zadnjem desetletju dosegle velik razvoj na področju same tehnike kot tudi materialov za tiskanje. Poseben poudarek je na razvoju materialov, ki bi bili cenejši, iz naravnih virov, brez izpustov škodljivih snovi med postopkom izdelave, z možnostjo uporabe odpadnih surovin ter možnostjo reciklaže po odsluženju. Les oziroma lesni ostanki so ena od možnih surovin, ki bi lahko bile uporabljene za 3D-tiskanje v kombinaciji z naravnimi in sintetičnimi polimeri. Predvidevamo, da se bo v razvoju dodajalnih tehnologij z uporabo lesa širil tudi spekter njihove uporabe na gradbenem področju, recimo tudi pri gradnji montažnih hiš. Narejen je pregled objav na temo 3D-tiskanja v povezavi z naravnimi surovinami, s poudarkom na lesni masi ter postopkih, kjer je možna uporaba lesnih delcev.

**Ključne besede:** 3D-tiskanje, dodajalne tehnologije, les, lesni ostanki, lesno-plastični kompoziti

**Abstract:** Additive manufacturing technologies have developed greatly over the last decade in terms of technology and printing materials. Special emphasis is placed on the development of cheaper materials that are derived from natural sources, without the release of harmful substances during the manufacturing process, with the possibility of using waste materials and recycling after service life. Wood or wood residues are among the potential raw materials that could be used for 3D printing in combinations with natural and synthetic polymers. It is anticipated that, with the development of additive technologies, the use of wood will also expand to the area of structural elements, such as in the construction of prefabricated houses. A review of publications on the topic of 3D printing with natural raw materials with an emphasis on wood biomass and technologies, where the use of wood particles is possible, was made.

**Keywords:** 3D printing, additive technology, wood, wood residues, wood-plastic composites

## 1 UVOD

### 1 INTRODUCTION

Dodajalne tehnologije (ang. additive technologies) je izraz za vrsto različnih tehnik izdelave, katerim je skupno grajenje izdelka po plasteh/slojih. Pogovorno se te tehnologije pogosto imenuje kar 3D-tiskanje, kar izhaja iz ene prvih tehnik, kjer je bilo vezivo nanašano na podoben način kot pri običajnem 2D-tiskanju – brizganje tekočine iz posebnih kartuš (v primeru 3D-tiska – brizganje tekočega veziva na plast praškastega materiala). Nekoč pogost izraz je bil tudi hitro prototipiranje (ang. Rapid prototyping), čemur je bila ta tehnika prvotno namenjena - hitri izdelavi prototipov, vendar se ta izraz vse manj uporablja, saj tudi izdelki niso več samo prototipi, ampak lahko služijo tudi kot pravi izdelki, unikatni, maloserijski, ali pa individualno posamez-

niku prilagojeni izdelki. Veliko razvoja je bilo narejenega na samih tehnikah kot tudi materialih. Ob nihanju cen 3D-tiskalnikov na trgu so le-ti postali dostopnejši tudi za vsakdanjo domačo uporabo tiskanja. Že število iskanj termina »3D printing« na Google pokaže izrazit porast: od leta 2007 do 2015 se je število iskanj tega termina 25-krat povečalo (Wimmer et al., 2015).

Osnovni princip dodajalnih tehnologij je grajenje izdelka po plasteh ali slojih, z dodajanjem materiala v slojih, za razliko od klasičnih obdelovalnih tehnik, kjer izdelek običajno izdelamo z odvzemanjem materiala (odrezovalne tehnike), preoblikovanjem materiala (npr. litje, kovanje) ali pa povezovanjem (varjenje, pritrjevanje) (Conner et al., 2014). Izdelava modelov s 3D-tiskanjem je razmeroma enostavna, saj digitalnemu modelu izdelka z ustreznim programom omogočimo razrez STL/AMF/OBJ datotek na tiskalne plasti, ki določijo 3D-tiskalniku pot, ki jo mora opraviti do celovitega končnega izdelka. Pri izdelovanju z odvzemanjem materiala orodje vedno potrebuje prosto

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenija

\* e-pošta: manja.kitekuzman@bf.uni-lj.si

pot do vseh področij odvzemanja materiala (Warnier, 2014), čemur moramo prilagoditi obliko izdelka. Pri 3D-tiskanju tega problema ni, saj imamo zaradi slojevite gradnje (začasen) dostop do vseh površin – tudi npr. kasnejših notranjih ploskev. Zaradi tega je možno ustvariti oblike, ki jih je z drugimi tehnikami praktično nemogoče brez izdelave raznih kalupov, sestavljanja posameznih delov itd.

Tehnologija 3D-tiskanja se je razvila po l. 1980, ko so vložili prve patentne zahteve za hitro prototipiranje (dr. Kodama, Japonska) ter stereolitografijo

(Chuck Hull, 1986). Sledil je razvoj tehnike ekstrudiranja – modeliranja s spajanjem slojev (Fused deposition modelling FDM), tej pa razvoj ostalih tehnik, npr. SLS tehnologije (selektivno lasersko sintranje), tehnologije LOM (nalaganje krojenih plasti) in pojav prvih tiskalnikov na trgu (povzeto po Glavičić, 2014 ter The Free Beginner’s Guide, 2017).

Pojavile so se tudi različne uporabe od medicine (tisk ledvic), metode bio-tiskanja in 3D-tiskanja z živimi celicami, izdelana je bila proteza noge z vsemi gibljivimi deli (povzeto po Glavičić, 2014 ter The Free

*Preglednica 1. Razvrstitev postopkov dodajalnih tehnologij po ASTM standardu F2792 (prir. po Gao et al., 2015.)  
Table 1. Classification of additive technologies according to ASTM standard F2792 (modified by Gao et al., 2015)*

	Kategorija	Tehnologija	Material	Vir energije	Prednosti/slabosti
Vezalni procesi	Spajanje slojev praškastega materiala	Selektivno lasersko sintranje - Selective laser sintering (SLS)	Poliamidi/polimeri	Laser	+ Visoka natančnost + Visoka trdnost in togost - Podporna struktura + Deli polne gostote
		Neposredno lasersko sintranje kovin - Direct metal laser sintering (DMLS)	Praški kovin, keramični praški		
		Selektivno lasersko taljenje - Selective laser melting (SLM)			
		Taljenje z elektronskim snopom - Electron beam melting (EBM)		Elektronski žarek	
	Polimerizacija v kadi	Stereolitografija – Stereolithography (SLA)	Fotopolimeri, keramika (alumina, Zirconia, PZT)	UV svetloba	+ Visoka hitrost izdelave + Dobra resolucija izdelka - Visoka cena materialov
Brizganje veziva	Kapljično nanašanje ali brizganje veziva - Indirect inkjet printing (3DP)	Polimeri v prahu (mavec, smole), keramični praški, kovinski prah	Toplota	+ Barvno tiskanje + Široka izbira materialov - Poobdelava-impregnacija s smolo - Poroznost izdelkov	
Laminacija plasti	Nalaganje krojenih plasti - Laminated object manufacturing (LOM)	Plastične folije, pločevine, keramični trakovi	Laser	+ Nizki stroški materiala, strojev, postopka - Težavno odstranjevanje ostanka materiala	
Dodajalni procesi	Ekstrudiranje materiala	Modeliranje s spajanjem slojev/ Ciljno nalaganje - Fused deposition modelling (FDM)	Termoplastični polimeri, glina, paste, kovinske paste	Toplota	+ Poceni tiskalniki + Hkratno tiskanje z več materiali - Omejena resolucija - Slaba kakovost površine
		Ekstrudiranje materiala - Contour crafting			
	Brizganje materiala	Brizganje veziva - Polyjet/inkjet tiskanje	Fotopolimeri, vosek	Toplota/UV svetloba	+ Hkratno tiskanje z več materiali + Visoka kakovost površine - Nizka trdnost izdelkov
Lasersko navarjanje	Lasersko navarjanje	Lasersko navarjanje - Laser engineered net shaping (LENS)	Staljen kovinski prah	Laser	+ Popravilo uničenih/izrabljenih delov + Primerno za funkcionalno uporabo - Potrebna poobdelava
		Navarjanje z elektronskim snopom - Electronic beam welding (EBW)			

Beginner's Guide, 2017). Uporaba se je razširila tudi na področja aeronavtične industrije (Kroll & Artzi, 2011), avtomobilske industrije, arhitekture (Wong & Hernandez, 2012), na umetniška področja, področja poučevanja, restavriranja (Short, 2015), ter ostale nišne aplikacije (glasbene aplikacije- zvočniki, glasbila ...). Leta 2014 je NASA na krovu mednarodne vesoljske postaje 3D natisnila prvi predmet, kitajsko podjetje pa v 24 urah uspešno natisnilo 10 hiš iz cenovno ugodnega gradbenega materiala, mešanice ostankov drugih gradbenih procesov in cementa (povzeto po Glavičič, 2014 ter The Free Beginner's Guide, 2017).

Pomemben mejnik je bil tudi razvoj 3D-tiskalnika na Univerzi Bath v Veliki Britaniji, ki je sposoben natisniti sestavne dele za nov 3D-tiskalnik. Ob tem je nastal odprtokodni projekt RepRap, ki spodbuja inovatorje po celem svetu v nadaljnji razvoj te tehnologije. Danes je na osnovi RepRap tiskalnika nastalo več kot 250 vrst 3D-tiskalnikov, ki so jih razvili člani skupnosti, in tako predstavlja resno konkurenco komercialnim proizvajalcem (povzeto po Glavičič, 2014 ter The Free Beginner's Guide, 2017).

Okrog l. 2009 je postal 3D-tisk dostopen širši javnosti – pred tem so bili tiskalniki dragi, namenjeni predvsem razvoju, prototipom in raziskavam: podjetje Makerbot je začelo prodajati komplete za sestavo hišnih 3D-tiskalnikov. Temu je sledil nagel razvoj in porast prodaje novih 3D tiskalnikov (povzeto po Glavičič, 2014 ter The Free Beginner's Guide, 2017).

3D-tiskanje nekateri označujejo kot del četrte industrijske revolucije. 3D-tiskanje naj bi spremenilo dožemanje digitalnega in fizičnega sveta in spremenilo ustaljene proizvodne in transportne poti. Digitalne modele je mogoče enostavneje in hitreje pošiljati po celem svetu in izdelati na samem mestu uporabe, odpade transport fizičnih predmetov, manjša je omejenost z obliko izdelkov, možne so individualizacije vsakega izdelka kupcu. Digitalni model je namreč možno hitro spremeniti v primerjavi z npr. spremembo kalupa za brizganje izdelkov (Nigro, 2017). Sami izdelki so lahko narejeni na mestu uporabe, s tem pa odpade zunanje izvajanje dejavnosti. Prav tako ni odrezkov in s tem odpadkov, kar lahko vodi v proizvodnjo brez odpadkov (Berman, 2012), ki poleg zmanjšanega transporta vodi k proizvodnji z zmanjšanim ogljičnim odtisom.

Ocenjujejo (Nigro, 2016), da bo delež 3D-tiskanja naraščal s 30 % letno rastjo in dosegel vrednost

18 milijard dolarjev do 2021, kar pa je še vedno malo v celotni proizvodni industriji.

Med postopki 3D-tiskanja sicer obstaja precej razlik, vendar jih lahko razdelimo na procese, ki material pri postopku vežejo med seboj (vezalni procesi), ter postopke, kjer material odlagamo (odlagalni postopki) (Preglednica 1). Prednost vezalnih procesov je v tem, da pri tiskanju v prostor tiskanja nanesimo celoten sloj materiala, ki ga utrdimo (povežemo) samo na zelenih mestih. Preostali material (neutrjen) pa služi tudi kot podpora v fazi tiskanja ter ga po končanem tisku enostavno odstranimo (odcejanje smole, stresanje praškastega materiala) in uporabimo pri naslednjem tiskanju. Pri odlagalnih procesih pa material odlagamo na točno določena mesta v vsakem sloju, pri zahtevnejših izdelkih (npr. previsi na izdelku) pa moramo istočasno graditi podporno strukturo, ki jo moramo na koncu fizično odstraniti.

## 2 PREGLED 3D-TEHNIK TISKANJA V POVEZAVI Z NARAVNIMI SUROVINAMI

### 2 REVIEW OF 3D-PRINTING TECHNIQUES USING NATURAL RAW MATERIALS

Zaradi vse večjih zahtev trga po vedno novih in bolj zanimivih izdelkih se razvijajo nove tehnologije 3D- tiskanja, sočasno pa se razvijajo tudi okolju prijazni, (ter tudi cenovno ugodni) materiali, namenjeni 3D- tiskanju. Na trgu obstajajo številni materiali, ki omogočajo različne končne izdelke – lahko gre samo za prototipe, ki so samo za vizualno predstavo in ne prenesejo večjih obremenitev ali pa izdelke, ki so polno funkcionalni in namenjeni dejanski rabi. Eno od področij razvoja materialov je tudi uporaba materialov naravnega izvora kot je npr. les. Lesni ostanki iz lesnopredelovalne industrije oziroma celo biomasa iz lignoceluloznih rastlin se lahko z ustrezno predelavo uporabijo pri različnih tehnikah 3D- tiskanja. Lesne ostanke se običajno zmelje v ustrezno velikost delcev/vlaken in nato uporabi kot polnilo ali pa ojačitveno sestavino materiala. Različna vlakna (steklena, karbonska) in delci (prah, tudi nanodelci) se že vključujejo v materiale za tiskanje, uporabne pri različnih tehnikah. V teh tehnikah bi lahko uporabili tudi lesni prah (ustrezne velikosti delcev), oziroma lesna vlakna ali pa še manjše gradnike lesa: celulozo, lignin, nanocelulozo.

Poleg ostalih dobrih lastnosti pa je les tudi najcenejši med vsemi, tudi bolj tradicionalnimi polnili.

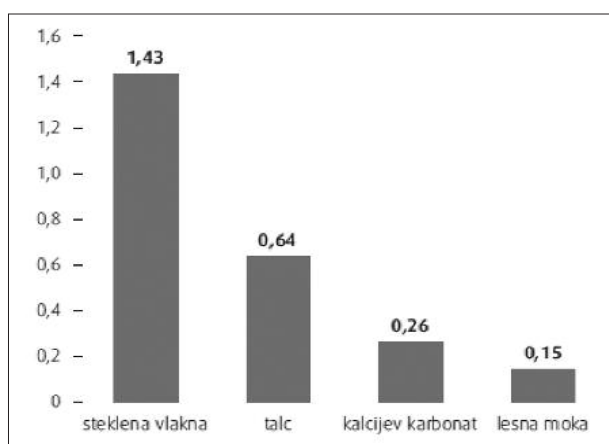
Na sliki 1 so prikazane cene za kilogram različnih polnil (Hančič, 2006).

Velik potencial uporabe lesa v sodobnih proizvodnih tehnologijah predstavljajo: (1) stereolitografija, (2) inkjet prašno tiskanje (3DP)/kapljično nanašanje/brizganje veziva, (3) nalaganje krojenih plasti, (4) modeliranje s spajanjem slojev (FDM) in (5) ekstrudiranje – brizganje materiala.

## 2.1 STEREOLOGRAFIJA (SLA)

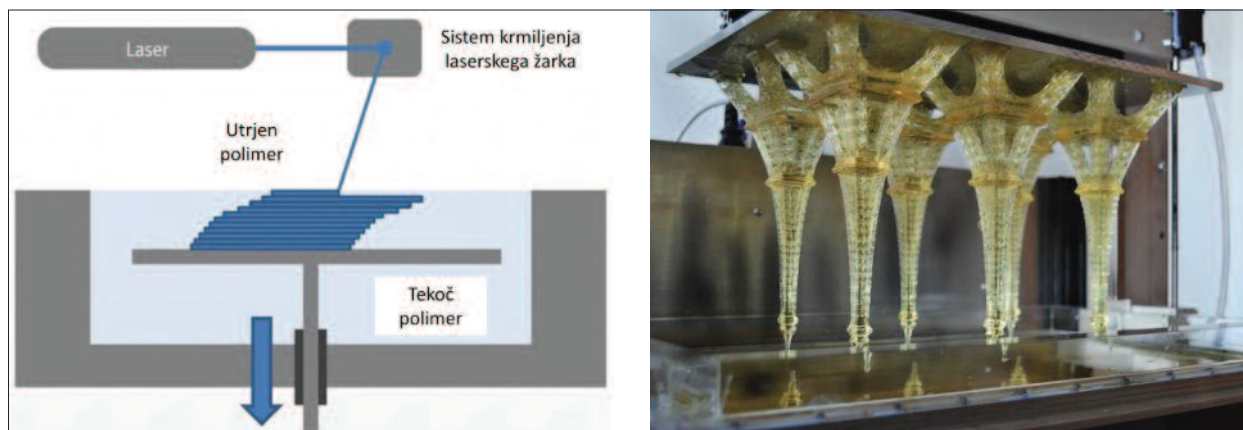
### 2.1 STEREOLOGRAPHY (SLA)

Tehnika SLA deluje na podlagi strjevanja tekočega fotopolimera s pomočjo zunanega vira svet-



Slika 1. Cene polnil v polimernih kompozitih v €/kg (Hančič, 2006)

Figure 1. Prices of fillers in polymer composites (Hančič, 2006)



Slika 2. Osnovni princip gradnje izdelka s stereolitografijo (Kim et al., 2016 – levo) in primer tiskalnika z obrnjeno gradnjo izdelka – platforma se pomika iz bazena smole – desno (Large build volume Solidator ..., 2013)

Figure 2. Left: the principle of building a product with stereolithography (Kim et al., 2016). Right: the example of a reversed building-printing platform moving upwards from a resin (Large build volume Solidator ..., 2013)

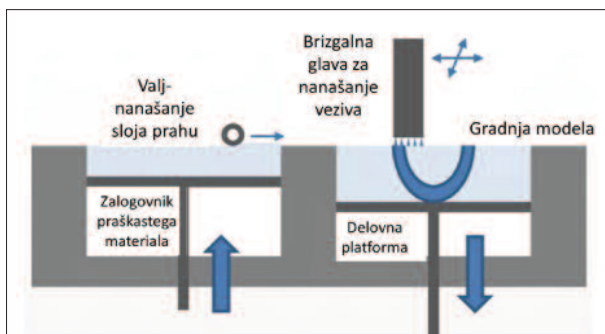
lobe. Delovna plošča se pomika navpično v kad s tekočim polimerom, tako da se na njej ustvari tanek sloj polimera. Vir svetlobe nad gladino polimera s pomočjo optičnih sistemov osvetli površino tekočega polimera na točno določenih mestih (prerezu izdelka) in s tem utrdi prerez izdelka v trenutnem sloju. Sledi spuščanje delovne plošče za debelino sloja, tekoči polimer preplavi novo plast in sledi osvetljevanje/utrjevanje in sprejemanje sloja s predhodnim (Slika 2).

Ko je izdelek v celoti zgrajen, se plošča dvigne iz polimera in odcedi odvečen neutrjen polimer. Predmet je potrebno običajno še dodatno obdelati, očistiti in utrditi (Muck & Križanovskij, 2015). Polimeru je možno dodajati tudi različna vlakna za ojačanje strukture, npr. dodatek kratkih steklenih vlaken izboljša togost in natezno trdnost izdelkov (Cheah et al., 1999; Karalekas & Antoniou, 2004). Vlakna sicer blokirajo del svetlobe in je zato potrebno utrjevanje z večjo močjo oziroma daljšim časom, vendar so mehanske lastnosti boljše in krčenje izdelka po utrjevanju manjše.

## 2.2 KAPLJIČNO NANAŠANJE ALI BRIZGANJE VEZIVA - INKJET PRAŠNO TISKANJE ( 3DP)

### 2.2 INDIRECT INKJET PRINTING (3DP)

Kapljično nanašanje ali brizganje veziva temelji na kapljičnem nanašanju veziva na praškast material. Tiskalnik je sestavljen iz kartuše z vezivom, delovne platforme, sistema za nanašanje sloja praškastega materiala v ustrezni debelini sloja ter zalogovnika praškastega materiala. Podajalnik (valj) nanese ustre-



Slika 3. Princip delovanja kapljičnega nanašanja veziva na praškast material (Kim et al., 2016).

Figure 3. Principle of injection printing of the binder to the powder material (Kim et al., 2016)

zno debelino sloja praškastega materiala iz zalogovnika. Glava z vezivom kapljično nanese vezivo na ustrezna mesta in s tem poveže/utrudi material. Sledi spuščanje delovne platforme, nanos novega sloja praškastega materiala in brizganje veziva (Slika 3).

Tiskalnik lahko vsebuje tudi več kartuš z različno obarvanim vezivom in s tem omogoča barvno tiskanje, na podoben način kot pri običajnem 2D-tisku. Odvečen, neutrjen material, ki med tiskanjem služi tudi kot podpora pri tiskanju predmetov s previsi, se po tiskanju odstrani, natisnjen predmet pa je treba impregnirati s tekočo smolo, da zapolnimo pore in utrdimo površino (Muck & Križanovskij, 2015). Uporabljajo se praškasti materiali različne sestave npr.

Z-Corp tiskalniki uporabljajo mešanico mavca (50 %–95 %), vinil polimera (2 %–20 %) in sulfatne soli (do 5 %) ter ustreznega veziva. Uporabljajo se tudi mešanice naravnih sestavin npr. koruznega škroba, dekstrana, želatine (Lam et al., 2002), kalcijevega fosfata (Inzana et al., 2014), lesnega prahu, fino zmletega prahu iz lupin raznih oreščkov, kombinacije lesnega prahu in komercialnih praškastih materialov (Wahab et al., 2009). Lesni prah oziroma iveri so ena od možnosti, v kombinaciji z različnimi vezivi (Slika 4).

Lesni prah je lahko tudi pomešan z ustreznim vezivom (npr. mavec), ki ga nanašamo v slojih, ter nato na ustreznih mestih brizgamo z vezivom/vodo, odvisno od sestave praškaste faze (Slika 5).

Modele, narejene s takim postopkom, je seveda treba ustrezno obdelati, saj je površina porozna, zaradi česar ima slabše mehanske lastnosti. Običajno se impregnira s smolami ustreznih viskoznosti in nato utrdi. Henke & Treml (2013) sta v začetni raziskavi uporabila lesne iveri, namenjene za izdelavo ivernih plošč, ki sta jih zmešala z mavcem, cementom ali metil celulozo in nasula v posameznih slojih, ki sta jih popršila z vodo z dodatki (aktivatorji), da sta povzročila utrditev mavca/cementa. Trdnost je bila sicer nizka, v rangu izolacijskih plošč iz lesnih vlaken.

Wahab et al. (2009) pa so ugotovili, da dodatek lesnega prahu (do 50 %) komercialni mešanici za tiskanje (mešanica mavca, polimera in soli) izboljša natezne lastnosti izdelka.



Slika 4. Primeri izdelka organske oblike – 3D-tiskanje z lesnim prahom (Freedom Of Creation ..., 2011) – levo, replika maske, tiskana s kombinacijo lesnega prahu in komercialnih praškastih materialov (Woodn't You ..., 2011) – desno.

Figure 4. Example products. Left: 3D printing with wood dust (Freedom Of Creation..., 2011). Right: replica mask printed with a combination of wood dust and commercial powder materials (Woodn't You ..., 2011)



Slika 5. 3D-tiskanje z lesom s tehniko praškaste faze in brizganja veziva (Henke & Treml, 2013)

Figure 5. 3D printing with wood powder and binder injection (Henke & Treml, 2013)

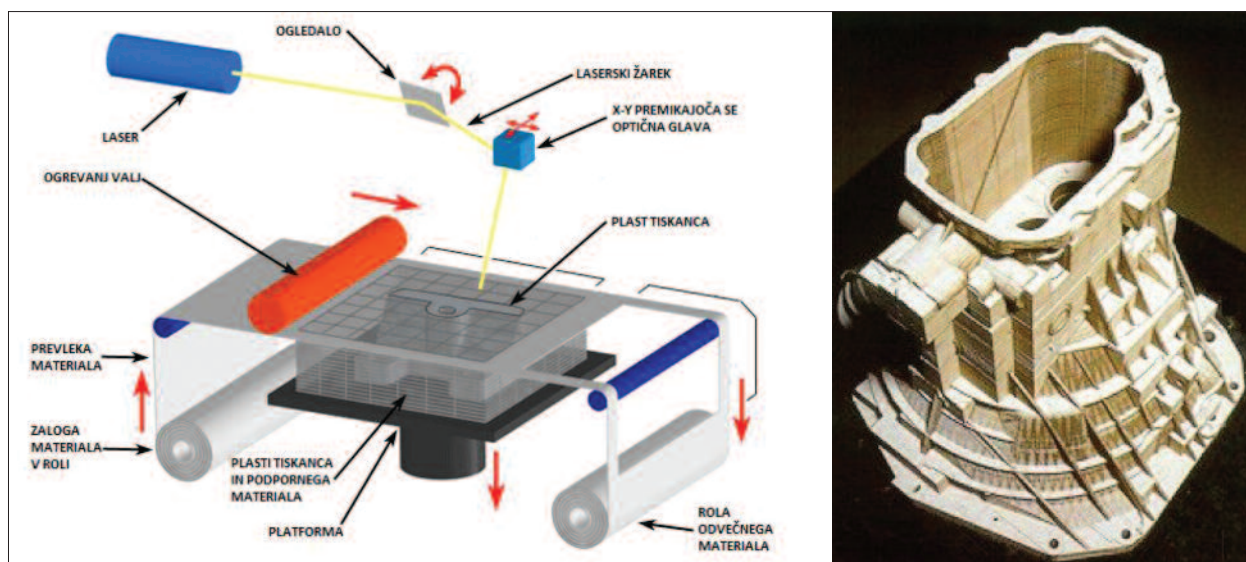
Z dodajanjem lesnega prahu se precej poveča hrupavost površine in trdnost modela, zmanjša pa se dimenzijska natančnost tiskanja in dimenzijska stabilnost modela, kateremu je vzrok sušenje in krčenje lesnega prahu po obdelavi oz. tisku.

## 2.3 NALAGANJE KROJENIH PLASTI (LOM)

### 2.3 LAMINATED OBJECT MANUFACTURING (LOM)

Pri tehniki nalaganja krojnih plasti material reže v plasti in ga sestavimo v celoten izdelek. Teh primernih materialov ni veliko na voljo; gre predvsem za cenovno ugodne folije iz umetnih mas, papirja, lepenske, folij na osnovi celuloznih vlaken. Pri gradnji modela se plast materiala položi na delovno ploščo,

se ustrezno spoji s predhodnim slojem (lepila ali pa taljenje z ogrevalnim valjem) ter odreže slojno obliko. Model se pomakne navzdol za debelino sloja in doda se nov sloj. Ves odvečni material se po koncu odstrani in se ga običajno zavrže. Material se reže z rezilom ali z laserskim žarkom, odvisno od naprave in materiala, ki ga uporabljamo (Slika 6). Natisnjeni objekti so sicer trdni, s površino, podobno prečnemu prerezu vezane plošče, vendar so uporabni predvsem za vizualne prototipe (Warnier, 2014). Tehnika je podobna nekoč precej uporabljeni izdelavi arhitekturnih maket – reliefov iz tankih slojev lesa, ki so se med seboj lepili, tako da obstaja tudi možnost uporabe furnirjev za gradnjo izdelka.



Slika 6. Princip delovanja nalaganja krojnih plasti (Custompartnet, povzeto po Žakelj, 2016) – levo, izgled konceptualnega izdelka – desno (Top 7 Methods ..., 2015)

Figure 6. Left: principles of laminated object manufacturing technology (Custompartnet, adapted by Žakelj, 2016). Right: image of the conceptual product (Top 7 Methods ..., 2015)

## 2.4 MODELIRANJE S SPAJANJEM SLOJEV/CILJNO NALAGANJE (FDM)

### 2.4 FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)

Tehnologija ekstrudiranja termoplastov je razmeroma enostavna tehnika in se najpogosteje uporablja predvsem pri odprtokodnih in cenejših tiskalnikih. Material se dovaja v ekstrudirno glavo, kjer se stali in skozi šobo nanese na delovno površino oz. sloj in tam utrdi. Pri predmetih zahtevnejših oblik je potrebno graditi tudi podporno strukturo, ki jo po tiskanju fizično odstranimo. Po vsakem novo nanesenem sloju se delovna plošča (ali pa ekstrudirna glava, odvisno od tipa tiskalnika) odmakne za debelino sloja in ponovno z ekstrudiranjem zapolnimo sloj modela. Staljen polimer pa se oprime predhodnega sloja in s tem se gradi izdelek (Muck & Križanovskij, 2015).

Uporaba lesa v kombinaciji s termoplastnimi polimeri je že dobro znana s področja lesno-plastičnih kompozitov. Lesno-plastični kompoziti so kompoziti, narejeni iz recikliranega oziroma novega polimera in lesnih delcev. Uporabljajo se termoplastični polimeri, ki se v ekstrudorju stalijo in zmešajo z lesnimi delci ter iztisnejo v različne oblike profilov in plošč. Pri tehniki brizganja v model oziroma iztisovanja skozi matrico smo omejeni z obliko, medtem ko pri 3D-tiskanju lahko izdelamo poljubno obliko brez uporabe kalupov ali matric pri ekstrudiranju. Izdelki iz lesno-plastičnih kompozitov so namenjeni uporabi za zunanje talne obloge, ograje, fasadne obloge, obrobe, vratne in okenske profile, zunanje in notranje pohištvo, v zadnjem času tudi v

avtomobilski industriji kot notranje obloge, deli armaturnih plošč in v navtiki. Lesni delci so lahko dodani kot polnilo in s tem znižajo ceno kompozita, saj so lesni ostanki cenejši kot polimer, ali pa kot ojačitvena komponenta, ki izboljša mehanske lastnosti polimera. S pravo kombinacijo polimera, deležev posameznih komponent, dodatki, vrsto in obliko lesnih delcev (dolžino) lahko izdelamo kompozite z zelo različnimi materiali in lastnostmi (Kim & Pal, 2010; Olakanmi & Strydom, 2016).

Lesno-plastični kompoziti seveda obdržijo del lastnosti lesa kot je higroskopnost in s tem povezane dimenzijske spremembe, dovzetnost za glivni napad ... To lahko omilimo z ustreznimi dodatki ter zadostnim deležem polimera, ki prekrije površine lesnih delcev in jih s tem nekoliko zaščitimo pred vlaženjem. Za doseganje dobrega oblepljanja lesa s polimeri ter s tem tudi boljše mehanske lastnosti kompozita je treba uporabiti dodatke, saj se običajno polimeri zaradi svoje hidrofobne površine slabo oprijemajo na hidrofilno površino lesnih delcev (Adhikary et al., 2008; Kim & Pal, 2010).

Dimenzijske spremembe zaradi spreminjanja vlažnosti lahko tudi funkcionalno uporabimo npr. za izdelavo pametnih materialov, ki pri spremembi klime spreminjajo obliko (Le Duigou et al., 2016) (Slika 7). Elementi, natisnjeni s sloji z različnimi deleži lesa, se pri spreminjanju vlažnosti okolice ukrivljajo in bi lahko služili kot aktivne komponente npr. za nosilce sončnih celic, lopute prezračevanja itd. (Rüggeberg & Burgert, 2015; Le Duigou et al., 2016).

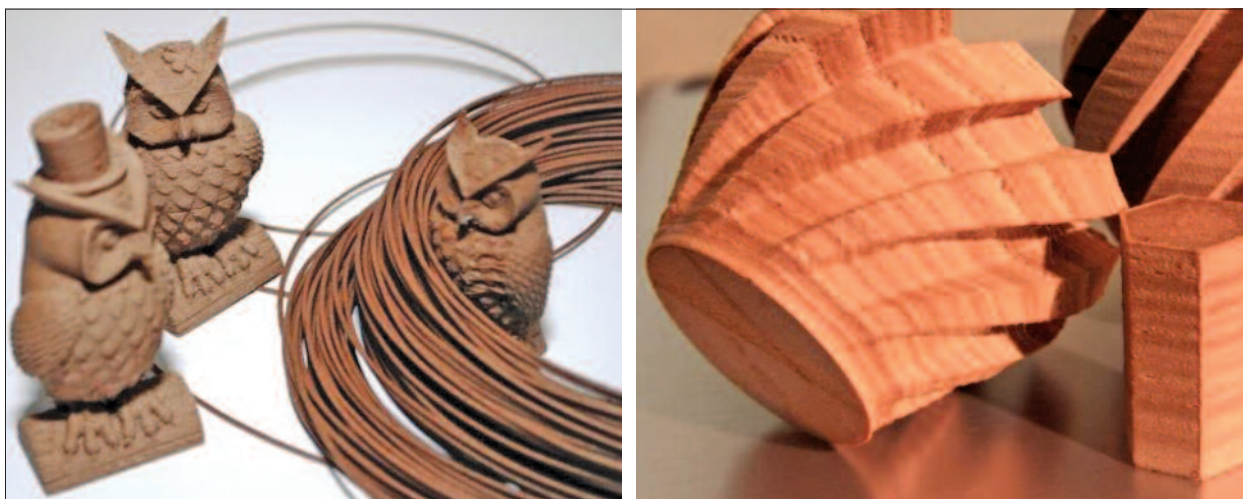


Slika 7. Ukrivljanje 3D-tiskanega elementa z lesnimi delci s sloji z različno strukturo pri spremembi klime – levo in primer uporabe za »prezračevalno odprtino« – desno (Correa et al., 2015).

Figure 7. Right: bending of a 3D-printed element made of wood particles due to a change in climate. Left: example of using of this feature for a ventilation opening (Correa et al., 2015).

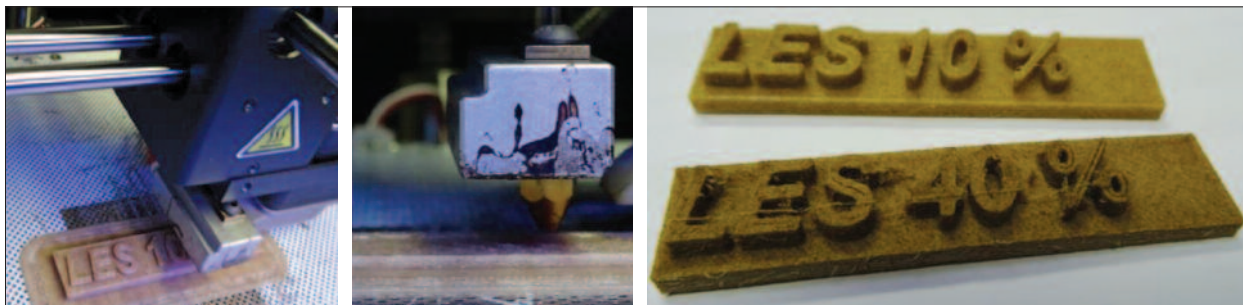
Med različnimi 3D-tehnikami je les najbolj uporaben pri FDM tehniki (Tao et al., 2017). Na trgu so filamenti različnih proizvajalcev z različnimi deleži lesa (npr. Laywoo-d3). Les je v tem primeru najpogosteje polnilo, saj je primešan termoplastičnemu polimeru v fazi izdelave filamenta, vendar tudi delno spremeni lastnosti izdelkov (Tao et al., 2017). Zaradi značilnosti tehnike - iztiskanja skozi šobo, morajo biti delci lesa v filamentu ustrezne velikosti (prah), da ne pride do mašenja šobe (premer odprtine šobe je običajno 0,2 mm – 0,8 mm). Večinoma je v filamentih do 40 % lesa, večji deleži že predstavljajo možnost mašenja šob, staljeni polimeri z večjim deležem imajo previsoko viskoznost za ekstrudiranje na obstoječih 3D-tiskalnikih in filamenti z večjim deležem lesa so bolj krhki (Slika 8).

FDM tehnika je z ustrezno opremo primerna tudi za tisk večjih izdelkov. Horta et al., (2017) so na robotsko roko pritrdili prirejen ekstrudor, ki z mešanico odpadnega HDPE in žagovine lahko tiska tudi večje izdelke. Podobni sistemi z različnimi tehnikami tiska in krmiljenja tiskalne glave npr. tiskanje s poliuretansko peno (Barnett & Gosselin, 2015) s posebno ekstrudirno glavo, obešeno in krmiljeno preko kablov (ang. cable driven robot), tiskanje keramike, gline, mešanice betona (Khoshnevis, 2004), nakazujejo tudi možne uporabe v gradbeništvu oziroma za gradnjo večjih izdelkov, npr. manjših bivalnih enot, gradnjo začasnih bivališč po naravnih katastrofah, celo možnosti gradnje objektov na novih planetih, kot npr. koncept projekta Building lunar base, ki je bil potrjen s strani European Space Agency (Building a lunar base with 3D printing, 2013).



Slika 8. Laywoo-d3 filament s 40% lesa (What Material ..., 2014) – levo in videz »letnic« lesa pri uporabi lesno-plastičnih filamentov in variiranju temperature pri tiskanju (Shades of brown ..., 2012) – desno.

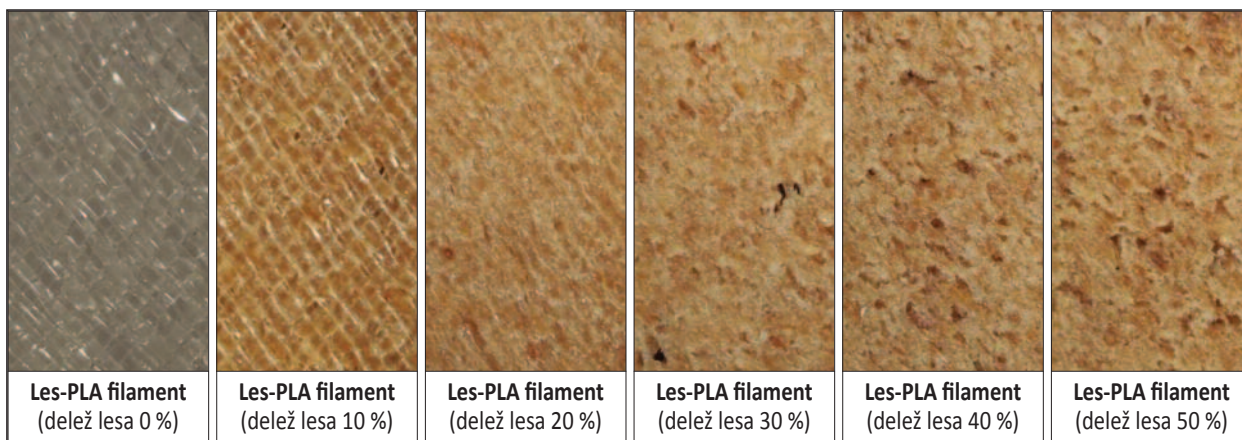
Figure 8. Left: Laywoo-d3 filament with 40% wood (What Material..., 2014). Right: the “wood texture” appearance of a product made from wood-plastic filaments and the use of temperature variations during printing (Shades of Brown ..., 2012).



Slika 9. FDM tehnika 3D-tiskanja s PLA filamenti z do 40 % lesnega prahu (foto: Kariž M.)

Figure 9. FDM 3D-printing technique with PLA filaments with up to 40 % wood dust (photo: Kariž M.)





Slika 10. Videz površine izdelka, tiskanega s filamenti z različnimi deleži lesa (20-kratna povečava) (foto: Žigon, J.)

Figure 10. Appearance of the surface of the product printed with filaments with different wood contents (20x magnification) (photo: Žigon, J.)

Uporaba lesa tudi omejuje uporabo polimerov, le-ti morajo biti kompatibilni z lesom, uporabni so polimeri z nižjim tališčem, saj sicer pri višjih temperaturah pri tiskanju prihaja do obarvanja lesne komponente. Zaradi ustrezne temperature tiskanja (cca med 200 °C in 230 °C, priporoča se 195 °C) se zato največ uporablja PLA polimer. Z variranjem temperature lahko sicer tudi vplivamo na spremembo barve lesa in dosežemo vizualen izgled »letnic« lesa (Slika 9).

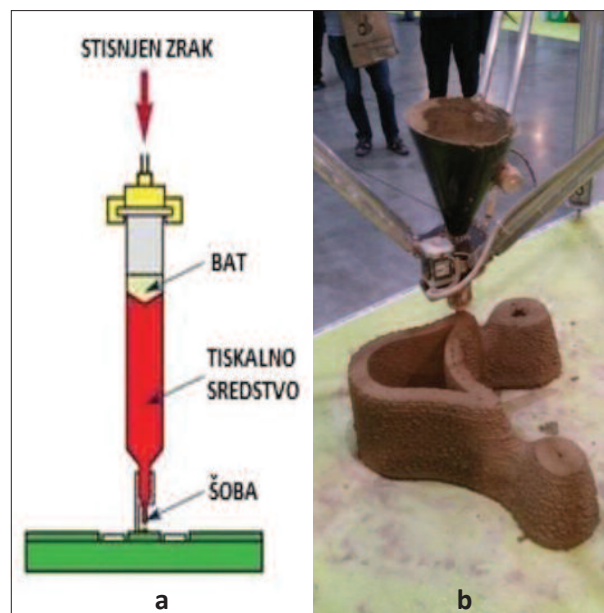
Površina izdelkov, narejenih s filamenti z vsebnostjo lesnega prahu, je hrapava, podobna vlaknenim ploščam in običajno potrebuje obdelavo – brušenje. Pri večjih deležih lesa lahko pride do mašenja šobe in neenakomernega/prekinjenega ekstrudiranja in s tem porozne površine (Slika 10).

## 2.5 EKSTRUDIRANJE MATERIALA

### 2.5 MATERIAL EXTRUSION

V svetu se je najprej razvila predvsem industrija ekstrudiranja polimerov, medtem ko je bila tehnologija ekstrudiranja biopolimerov zaradi raznih težav zapostavljena, kar pa se v zadnjih letih spreminja. Ekstrudiranje ali iztiskovanje materiala je v osnovi zelo podobno tehniki FDM tiskanja – pri obeh tehnikah se material ekstrudira skozi šobo na delovno površino sloj za slojem. Razlika je v materialih ter sami tehniki ekstrudiranja, predvsem tu ni taljenja polimera, ampak gre za ekstrudiranje mešanic z viskoznostjo, podobno pastam. Potrebno silo za ekstrudiranje zagotavljamo s pritiskom zraka ali s pomočjo

pritisnega bata za materialom. Uporabljeni so materiali ustrezne viskoznosti, ki se z lahkoto plastično preoblikujejo in nato utrdijo s pomočjo zraka, sušenja ali pa povišane temperature (Slika 11).



Slika 11. Shema sistema na osnovi ekstrudiranja: a) ekstrudiranje preko pritiska zraka (Initial extruder ..., 2013), b) oziroma preko ekstrudirne glave z vijačnim transporterjem (WASP ..., 2015)

Figure 11. Schematic of an extrusion-based system: a) with air pressure driven extrusion (Initial extruder ..., 2013), b) with an extruder head and screw conveyor (WASP ..., 2015)

Tiskanje z mešanico lesnega prahu in tekočega polimera oz. lepila je podobna 3D-tiskanju keramike ali gline in podobnih past, npr. čokolade v prehranjevalni industriji (Kariž et al., 2016; Pitt et al., 2017). Tehnika bi sicer omogočala enostavnejšo uporabo ostankov- npr. samo mletje, oziroma celo uporaba direktnih ostankov žagovine, brusnega prahu, ki bi se v tiskalni glavi zmešali z lepilom, vendar je zaradi počasnejšega utrjevanja tekočih smol tudi počasnejša. Pred nanašanjem naslednjega sloja mora biti predhodni sloj dovolj utrjen, sicer pride od poseda nja strukture (Slika 12).

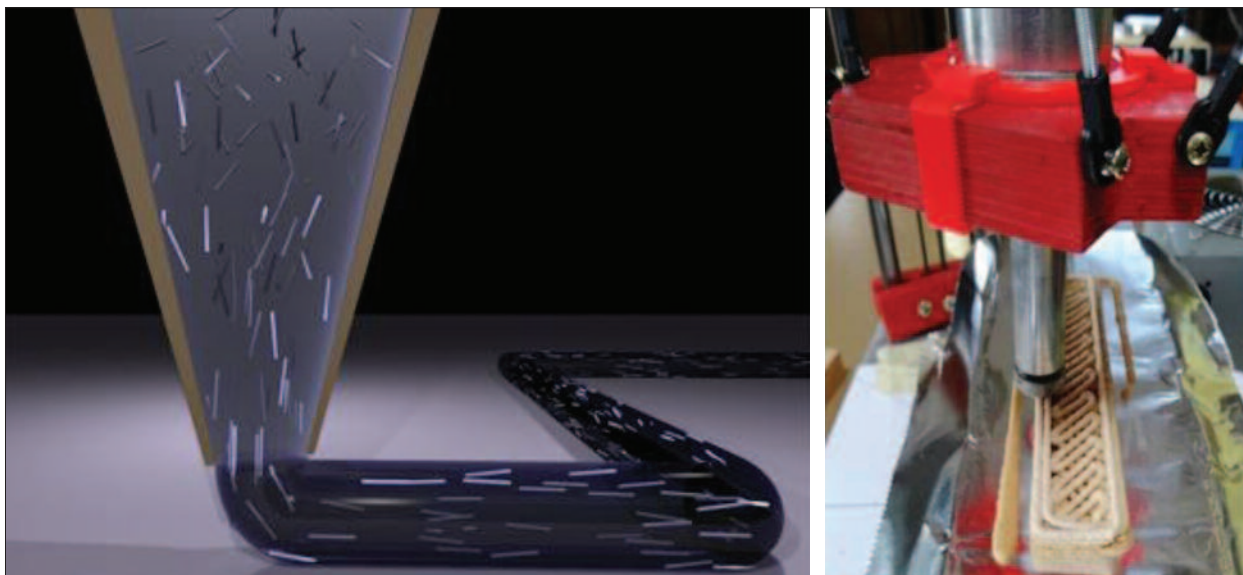
Tudi posamezne komponente lesa predstavljajo zanimivo opcijo za 3D-tiskanje, vendar je potrebno več obdelave lesnih ostankov in uporaba prilagojenih metod tiskanja. Npr. izdelki, natisnjeni z acetatom celuloze, raztopljenim v acetonu, ki po tiskanju izhlapi, so pokazali upogibno trdnost primerljivo z izdelki, tiskanimi iz ABS polimera (sicer s FDM tehnologijo) (Pattinson & Hart, 2017). Še bolj obetajoča je uporaba nanoceluloze kot ojačitvenega dodatka k že znanim tehnikam in materialom. Kumar et al., (2012) so že s primešanim 5 % dodatkom celuloznih nanokristalov optično utrjujočim smolam za stereolitografijo dosegli izboljšanje modula elastičnosti in natezne trdnosti v trdnem stanju za 57 %, ne da bi vplivali na sam način uporabe smole. 30 % dodatek

nanoceluloznih fibril je tako za 3,6-krat izboljšal modul elastičnosti PLA materiala, ki se veliko uporablja v FDM tehniki tiskanja (Žepič et al., 2016), tiskanje pa je mogoče tudi s nanoceluloznimi hidrogeli (Pinomaa 2016; Leppiniemi et al., 2017).

### 3 ZAKLJUČKI 3 CONCLUSIONS

Dodajalne tehnologije imajo seveda tudi nekatere pomanjkljivosti, ki so odvisne od tehnike in izbranega materiala. Predvsem so izdelki trenutno omejeni z velikostjo tiskanja, saj so na trgu predvsem komercialni tiskalniki, ki omogočajo tiskanje predmetov velikost približno 20 cm × 20 cm × 20 cm. Pri izdelkih, kjer želimo večjo resolucijo tiska in s tem boljšo površino, moramo tiskati v tanjših slojih, kar pomeni počasno in s tem tudi dražjo izdelavo. Površina izdelkov običajno potrebuje še dodatno obdelavo, odvisno od izbrane resolucije tiska in tehnike tiskanja (npr. kitanje, brušenje, površinski premazi, impregnacija s smolo ...).

Industrijski 3D-tiskalniki pa že lahko tiskajo modele v velikosti nekaj metrov in vse do modelov velikosti hiše. Nizozemski arhitekti so tako npr. začeli z gradnjo 3D objekta Canal House v Amsterdamu (<http://3dprintcanalhouse.com/>). Ti tiskalniki omogočajo tiskanje izdelkov v zelo veliki resoluciji, kvali-



Slika 12. Uporaba tehnike ekstrudiranja mešanice lesa in veziva pastozne viskoznosti. Usmerjena vlakna v ekstrudiranem materialu – levo (Compton & Lewis, 2014) – levo, in ekstrudiranje (Kariž et al., 2016) – desno.  
Figure 12. Use of the extrusion technique for a viscous paste mixture of wood and binder Left: directional fibres in extruded material (Compton and Lewis, 2014). Right: the extrusion process (Kariž et al., 2016)

teti površine in uporabljajo zelo obstojne materiale - npr. beton (Slika 13).

Pomembno je poznati tudi omejitve dodajalnih tehnologij. Zaradi slojevite gradnje je tudi trdnost izdelkov manjša. Izredno je pomembna kakovost zlepljenosti posameznih slojev, sicer lahko pri obremenitvi pride do razslojevanja. Zato so pomembni parametri tiskanja in lastnosti materialov. Material mora pred nanosom naslednjega sloja dovolj utrditi, da ne pride do posedanja materiala ob obremenitvi z maso naslednjega sloja, vendar hkrati ostati dovolj lepljiv, da se zlepi z novim slojem. Med sloji lahko nastanejo tudi določene napetosti zaradi krčenja/nabrekanja slojev ob utrjevanju, npr. napetosti pri ohlajanju staljenih polimerov pri FDM tehniki in s tem krivljenje izdelkov.

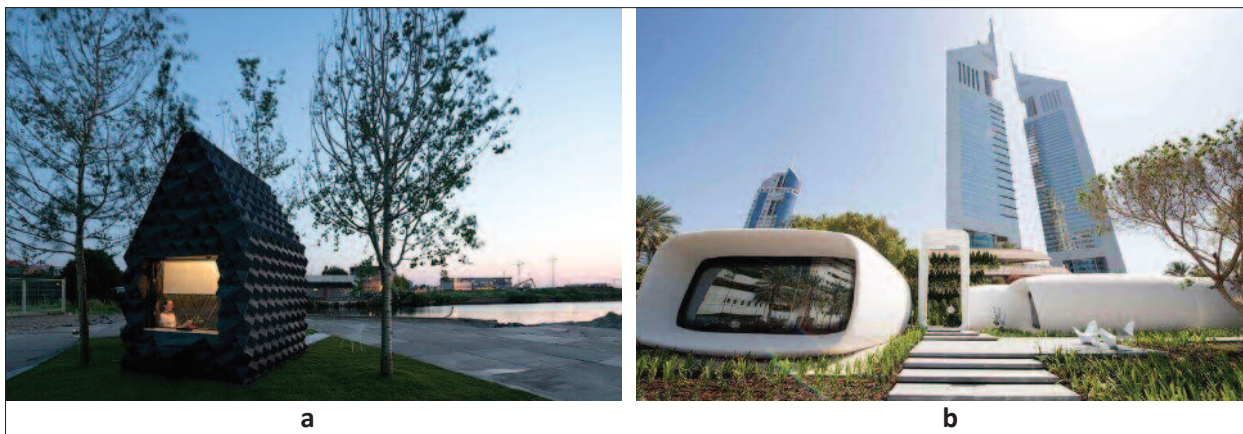
Uporaba lesnih ostankov z ustrezno predelavo v postopkih 3D-tiskanja predstavlja eno od možnosti uporabe lesnih ostankov in dodajanja vrednosti tem ostankom. Za optimalne lastnosti končnih izdelkov moramo lesne ostanke ustrezno obdelati in porabiti na primernih tehnologijah in mestih uporabe, da bi dosegli optimalne rezultate. Na tem področju je potrebnih še precej raziskav, da bi lahko porabili večje količine lesa in razvili nova področja uporabe v npr. arhitekturi, aeronavtiki ... Veliko možnosti obstaja tudi pri uporabi recikliranega lesa, gradbenih ostankov v povezavi z odpadno plastiko. Potrebno je najti metode, kako uporabiti npr. odpadne materiale oziroma reciklirati odpadke/ostanke, kjer bi z majhnimi vložki dobili funkcionalne izdelke. Trenutno bi bilo

mogoče 3D-tiskanje uporabiti npr. za izdelavo posamezniku prilagojenih, personaliziranih, kompleksnejših izdelkov z višjo stopnjo funkcionalnosti in oblikovalskim presežkom. Npr. individualno prilagojena embalaža posebnih oblik, kot osnova pohištva organskih oblik, ki je npr. še tapecirano, za izdelavo kalupov, šablon pri izdelavi pohištva, kot osnovo, ki se jo potem oplašča z bolj odpornimi materiali itd., vendar je treba še razviti ustrezno proizvodno tehnologijo. S 3D-tiskanjem je mogoče izdelati spojnike, s katerimi bi spojili običajne lesene elemente v pohištvo (Grujovic et al., 2017). 3D-tiskanje pa se uveljavlja tudi kot alternativa izdelavi montažnih hiš. Možnosti 3D-tiska in njegove prednosti je potrebno predstaviti končnemu uporabniku. Smiselno bi bilo tudi vlagati v nadaljnje raziskave novih biopolimernih materialov, ki bi po svojih strukturnih zmogljivostih bili celo primerljivi z visokotrdnostnimi kompoziti iz steklenih vlaken.

#### 4 POVZETEK

#### 4 SUMMARY

Additive manufacturing has seen rapid development in the last few years and been applied in many areas, with its use increasing in both industrial manufacturing and among hobbyists. In particular, the field home 3D printing is evolving with the emergence of more affordable and quality printers. Beside printers and printing technologies, another important area is material development. Current re-



Slika 13. Primeri 3D-natisnjenih objektov: a) Urban Cabin (Koslow, 2017), b) »Office of the Future« Dubai (Augur, 2016).

Figure 13. Examples of 3D printed buildings: a) Urban Cabin (Koslow, 2017), b) "Office of the Future" Dubai (Augur, 2016).

search is aimed at producing new materials with better performance, but also lower price, without the use of harmful substances and with the use of recycled and natural materials, and with a low carbon footprint.

Wood has potential for use in various 3D-printing materials. Wood and its residues can be used in several forms, from sawdust or particles of different sizes, to elements that are further machined, such as fibres, cellulose, and nanocellulose, or even just partial components, like lignin. Depending on the particle size, form factor and type of composite, wood can be used as a filler or reinforcement with selected polymers to form wood plastic composite printing materials.

Several additive manufacturing technologies are available and commercially used, but not all are appropriate to use with wood particles. The most suitable are stereolithography (SLA), indirect inkjet printing (3DP), laminated object manufacturing (LOM), fused deposition modelling (FDM), and material extrusion/contour crafting, with wood or similar particles already being used with these approaches.

In stereolithography, wood particles or fibres can be added to UV/laser curing liquid polymer to reinforce the cured material and improve the modulus of elasticity and tensile strength. For indirect inkjet printing (3DP), wood particles/powder can be added to or even used to replace commercial powder printing material (usually a mixture of plaster, vinyl polymer and sulphate salt). Liquid binder, which is injected on a layer of powder printing material during printing, must be modified to bond wood particles and other components of the material, while veneer could be used in laminated object manufacturing, similar to the method used with current polymer foils. Moreover, wood powder or small particles can be mixed with commercial liquid adhesives/resins to form pastes which can then be used with material extrusion/contour crafting techniques to 3D print objects.

Most wood is now used in the form of FDM. Wood powder can be mixed with selected polymers (ABS, PLA) and extruded in the form of filaments, and the resulting 3D printing filaments can then be used in FDM 3D printers, where the filament melts in the hot printer head, extrudes through the printing nozzle and deposits on selected areas in each layer. Com-

mercial filaments with different polymers and ratios of wood are now available on the market.

Wood in combination with polymers can be used to 3D print personalized items and small series, unique products, as well as to make organic shapes for use in furniture, moulds, and connectors for furniture, or even in the construction industry to produce wooden houses.

The wood in these wood-plastic composites retains some of its original properties, including hygroscopicity and associated dimensional changes, and these should be considered when designing 3D-printed parts. Moreover, these weaknesses can be also used as advantages when designing elements that change shape in different climate conditions, thus producing so-called smart materials (for use in ventilation openings and the like).

Overall, wood is a promising material for use in 3D printing, but further research needs to be done to improve existing technologies and materials to increase its use and the added value of wood residues. The future holds great promise for 3D printing as a technology, and for the end users of the related products.

## ZAHVALA

### ACKNOWLEDGEMENTS

Prispevek je pripravljen v okviru dela programske skupine P4-0015, ki jo financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost republike Slovenije (ARRS) in bilateralnega projekta BI-BA-JR /2015/47 (2016/2017) Lastnosti lesnih materialov in lepil za 3D-tehnologijo tiskanja / Properties of wood materials and adhesives for 3D printing technology, ki ga financira ARRS.

## LITERATURA IN VIRI

### LITERATURE

- Adhikary, K. B., Pang, S., & Staiger, M. P. (2008). Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites Part B: Engineering*, 39(5), 807-815.
- Augur, H. (2016). 3D Printed Office Building Unveiled in Dubai. Retrieved from: <https://all3dp.com/3d-printed-office-building> (1.9.2017).
- Barnett, E., & Gosselin, C. (2015). Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot. *Additive Manufacturing*, 7, 27-44.

- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 5, 155-162.
- Building a lunar base with 3D printing (2013). European space agency. Retrieved from: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Engineering\\_Technology/Building\\_a\\_lunar\\_base\\_with\\_3D\\_printing](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing) (18.9.2017).
- Compton, B. G., & Lewis, J. A. (2014). 3D-printing of lightweight cellular composites. *Advanced materials*, 26(34), 5930-5935.
- Conner, B. P., Manogharan, G. P., Martof A. N., Rodomsky, L. M., Rodomsky, C. M., Jordan, D. C., & Limperos, J. W. (2014). Making sense of 3-D printing: creating a map of additive manufacturing products and services. *Additive Manufacturing*, 1-4, 64-76.
- Correa, D., Papadopoulou, A., Guberan, C., Jhaveri, N., Reichert, S., Menges, A., & Tibbits, S. (2015). 3D-Printed Wood: Programming Hygroscopic Material Transformations. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2(3), 106-116.
- Cheah, C. M., Fuh, J. Y. H., Nee, A. Y. C., & Lu, L. (1999). Mechanical characteristics of fiber-filled photo-polymer used in stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, 5(3), 112-119.
- Freedom Of Creation develops Tree-D Printing in Wood. (2011). Retrieved from: <https://www.3Dsystems.com/blog/foc/freedom-of-creation-develops-tree-d-printing> (1.9.2017).
- Glavičič, A. (2014). Zgodovina 3D tiska. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Naravoslovno tehnična fakulteta, Oddelek za tekstilstvo.
- Grujovic, N., Zivic, F., Zivkovic, M., Slijivic, M., Radovanovic, A., Bukvic, L., ... & Sindjelic, A. (2017). Custom design of furniture elements by fused filament fabrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 231(1), 88-95.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., ... & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65-89.
- Google Insights for Search »3D printing« term, <https://trends.google.com/trends/explore?q=3D%20printing>
- Hančič, A. (2006). Brizganje biopolimernih kompozitov. *PlastForma*, 11(1), 24-26.
- Henke, K., & Treml, S. (2013). Wood based bulk material in 3D printing processes for applications in construction. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(1), 139-141.
- Horta, J. F., Simões, F. J. P., & Mateus, A. (2017). Large scale additive manufacturing of eco-composites. *International Journal of Material Forming*, 1-6.
- Initial Extruder Design (2013). University of Notre Dame. Retrieved from: <https://sites.nd.edu/3dp/2013/08/12/initial-extruder-design/> (1.9.2017).
- Inzana, J. A., Olvera, D., Fuller, S. M., Kelly, J. P., Graeve, O. A., Schwarz, E. M., ... & Awad, H. A. (2014). 3D printing of composite calcium phosphate and collagen scaffolds for bone regeneration. *Biomaterials*, 35(13), 4026-4034.
- Kariž, M., Šernek, M., & Kuzman, Kitek M. (2016). Use of wood powder and adhesive as a mixture for 3D printing. *European journal of wood and wood products*, 74(1), 123-126.
- Karalekas, D., & Antoniou, K. (2004). Composite rapid prototyping: overcoming the drawback of poor mechanical properties. *Journal of materials processing technology*, 153, 526-530.
- Kumar, S., Hofmann, M., Steinmann, B., Foster, E. J., & Weder, C. (2012). Reinforcement of stereolithographic resins for rapid prototyping with cellulose nanocrystals. *ACS applied materials & interfaces*, 4(10), 5399-5407.
- Kroll, E., & Artzi, D. (2011). Enhancing aerospace engineering students' learning with 3D printing wind-tunnel models. *Rapid Prototyp J*, 17(5)393-402.
- Kim, J. K., & Pal, K. (2010). Recent advances in the processing of wood-plastic composites. Springer Science & Business Media.
- Kim, G. B., Lee, S., Kim, H., Yang, D. H., Kim, Y. H., Kyung, Y. S., ... & Kwon, S. U. (2016). Three-dimensional printing: basic principles and applications in medicine and radiology. *Korean journal of radiology*, 17(2), 182-197.
- Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation in construction*, 13(1), 5-19.
- Koslow, T. (2017). 3D Printed House – World's 35 Greatest 3D Printed Structures. Retrieved from: <https://all3dp.com/1/3d-printed-house-homes-buildings-3d-printing-construction/#urban-cabin> (1.9.2017).
- Lam, C. X. F., Mo, X. M., Teoh, S. H., & Hutmacher, D. W. (2002). Scaffold development using 3D printing with a starch-based polymer. *Materials Science and Engineering: C*, 20(1), 49-56.
- Large build volume Solidator DLP desktop 3D printer unveiled on Kickstarter (2013). Retrieved from: <http://www.3Ders.org/articles/20131210-large-build-volume-solidator-dlp-desktop-3d-printer-unveiled-on-kickstarter.html> (1.9.2017).
- Leppiniemi, J., Lahtinen, P., Paajanen, A., Mahlberg, R., Metsä-Kortelainen, S., Pinomaa, T., ... & Hytönen, V. P. (2017). 3D-Printable Bioactivated Nanocellulose–Alginate Hydrogels. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(26), 21959-21970.
- Le Duigou, A., Castro, M., Bevan, R., & Martin, M. (2016). 3D printing of wood fibre biocomposites: from mechanical to actuation functionality. *Materials & Design*, 96, 106-114.
- Muck, D., & Križanovskij, I. (2015). 3D-tisk. Pasadena.
- Nigro, S., (2016). Three Ways To Reinvent For The Fourth Industrial Revolution. *Forbes*. Retrieved from: <https://www.forbes.com/sites/hpinc/2016/12/07/three-ways-to-reinvent-for-the-fourth-industrial-revolution/#3528c58a2091> (2.9.2017)
- Nigro, S. (2017). The Fourth Industrial Revolution and you. Retrieved from: <https://newsblog.ext.hp.com/t5/HP-newsroom-blog/The-Fourth-Industrial-Revolution-and-you/ba-p/775> (1.9.2017).
- Olakanmi, E. O., & Strydom, M. J. (2016). Critical materials and processing challenges affecting the interface and functional performance of wood polymer composites (WPCs). *Materials Chemistry and Physics*, 171: 290-302.
- Pattinson, S. W., & Hart, A. J. (2017). Additive manufacturing of cellulosic materials with robust mechanics and antimicrobial functionality. *Advanced Materials Technologies*, 2(4).
- Pinomaa, T. (2016). Modelling the 3D printing of nanocellulose hydrogels. VTT Technical Research Centre of Finland. Retrieved

- from: [http://www.vttresearch.com/Documents/Factory%20of%20the%20future/3D%20printing/3Pinomaa\\_Slides.pdf](http://www.vttresearch.com/Documents/Factory%20of%20the%20future/3D%20printing/3Pinomaa_Slides.pdf) (1.9.2017).
- Pitt, K., Lopez-Botello, O., Lafferty, A. D., Todd, I., & Mumtaz, K. (2017). Investigation into the material properties of wooden composite structures with in-situ fibre reinforcement using additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 138, 32-39.
- Rüggeberg, M., & Burgert, I. (2015). Bio-inspired wooden actuators for large scale applications. *PloS one*, 10(4), e0120718.
- Shades of brown with wood filament, via varying temperature. (2012). Retrieved from: <http://www.tridimake.com/2012/10/shades-of-brown-with-wood-filament-via.html> (1.9.2017).
- Short, D. B. (2015). Use of 3D printing by museums: educational exhibits, artifact education, and artifact restoration. *3D Print Addit Manuf.*, 2(4):209e15.
- Tao, Y., Wang, H., Li, Z., et al., (2017). Development and Application of Wood Flour-Filled Polylactic Acid Composite Filament for 3D Printing. *Materials*, 10(4), 339.
- Top 7 Methods For Making 3D Rapid Prototypes (2015). *Star Rapid*. Retrieved from: <https://www.starrapid.com/blog/top-7-methods-for-making-3d-rapid-prototypes/> (1.9.2017)
- The Free Beginner's Guide (2017). 3D printing industry. Retrieved from: <https://3Dprintingindustry.com/3D-printing-basics-free-beginners-guide#02-history> (14.9.17)
- Wahab, M. S., Wagiman, A., & Zuki, N. M. (2009). Rapid prototyping of wood-based material. In: *Proceedings of MUCEET2009 Malaysian Technical Universities Conference on Engineering and Technology*, June 20-22, 2009, MS Garden, Kuantan, Pahang, Malaysia.
- Warnier, C. (2014). *Printing Things. Visions and Essentials for 3D Printing*. Berlin. Gestalten: 256 p.
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442-458.
- WASP Unveils Rotating Extruder (2015). Retrieved from: <https://www.3printr.com/wasp-unveils-rotating-extruder-5027813/> (1.9.2017).
- What Material Should I Use For 3D Printing? – Advanced Materials Review #1 – BendLay, Laywoo-D3 and LayBrick (2014). Retrieved from: <http://3Dprintingforbeginners.com/3D-printing-materials-bendlay-laywood-laybrick/> (1.9.2017).
- Wimmer, R., Steyrer, B., Woess, J., Koddenberg, T., & Mundigler, N. (2015). 3D printing and wood. *Pro Ligno*, 11(4), 144-149.
- Woodn't You Know It – 3DP in wood (2011). Retrieved from: <https://depts.washington.edu/open3Dp/2011/04/woodnt-you-know-it-3Dp-in-wood/> (1.9.2017).
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 1-10. doi: <https://doi.org/10.5402/2012/208760>
- Žepič, V., Poljanšek, I., Oven, P., & Čop, M. (2016). COST-FP1105: Properties of PLA films reinforced with unmodified and acetylated freeze dried nanofibrillated cellulose. *Holzforschung*, 70(12), 1125-1134.