

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Luka ŽAKELJ

**TRIDIMENZIONALNO TISKANJE Z MEŠANICO LEPILA IN
LESNEGA PRAHU**

MAGISTRSKA NALOGA
Magistrski študij - 2. stopnja

**THREE-DIMENSIONAL PRINTING WITH A MIXTURE OF
ADHESIVE AND WOOD POWDER**

M. Sc. THESIS
Master Study Programmes

Ljubljana, 2016

Magistrska naloga je zaključek magistrskega študija lesarstva - 2. stopnja. Izvedena je bila na Katedri za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja magistrskega dela imenoval prof. dr. Milana Šerneka, za somentorja doc. dr. Mirko Kariža in za recenzentko izr. prof. dr. Manjo Kitek Kuzman.

Mentor: prof. dr. Milan Šernek

Somentor: doc. dr. Mirko Kariž

Recenzent: izr. prof. dr. Manja Kitek Kuzman

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Podpisani izjavljam, da je magistrsko delo rezultat lastnega raziskovalnega dela. Izjavljam, da je elektronski izvod identičen tiskanemu. Na univerzo neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravici shranitve avtorskega dela v elektronski obliki in reproduciranja ter pravico omogočanja javnega dostopa do avtorskega dela na svetovnem spletu preko Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete.

Luka Žakelj

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Du2
DK	UDK 630*824.8
KG	tridimenzionalno tiskanje/lepila za les/lesni prah/upogibna trdnost/modul elastičnosti
AV	ŽAKELJ, Luka
SA	ŠERNEK, Milan (mentor)/KARIŽ, Mirko (somentor)/KITEK KUZMAN, Manja (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2016
IN	TRIDIMENZIONALNO TISKANJE Z MEŠANICO LEPILA IN LESNEGA PRAHU
TD	Magistrska naloga (Magistrski študij - 2. stopnja)
OP	IX, 48 str., 6 pregl., 31 sl., 5 pril., 30 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Tridimenzionalno tiskanje predstavlja nov način izdelovanja predmetov iz računalniškega modela v realen izdelek. Od klasičnih izdelovalnih tehnologij, ki temeljijo na odvzemanju materiala (rezkanje, struženje, brušenje), se razlikuje po tem, da izdelek nastaja z dodajanjem materiala v plasteh. Razvitih je že veliko tehnologij, ki so predvsem primerne za tiskanje s polimeri ali kovinami. V raziskavi smo uporabili tehnologijo 3D-tiskanja za tiskanje kompozita na lesni osnovi. Naš namen je bil prilagoditi obstoječo strojno opremo (3D-tiskalnik) do te mere, da bo omogočal tiskanje mešanice lepila in lesnega prahu ter določiti optimalno mešanico lesnega prahu in lepila za optimalno ekstrudiranje materiala ter zadovoljive mehanske lastnosti natisnjenega izdelka. Pripravili smo dve vrsti mešanic (s PVAc in UF-lepilom) z različnimi deleži lesnega prahu (od 12,5 % do 25 %). V prvem delu raziskave smo določali optimalno mešanico lesnega prahu in lepila ter sile, potrebne za ekstrudiranje mešanice skozi šobo tiskalne glave. V drugem delu pa smo natisnili preizkušance in jih testirali na upogibno trdnost. Ugotovili smo, da so lastnosti končnega natisnjenega materiala predvsem odvisne od lastnosti uporabljenega lepila. Po rezultatih opravljene raziskave lahko sklepamo, da je tridimenzionalno tiskanje z mešanico lepila in lesnega prahu možno, vendar v omejenih dimenzijah (predvsem ploščati izdelki) in z omejenimi mehanskimi lastnostmi izdelka.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Du2
DC UDC 630*824.8
CX three-dimensional printing/adhesives for wood/wood powder/bending strength/elasticity modulus
AU ŽAKELJ, Luka
AA ŠERNEK, Milan (mentor)/KARIŽ, Mirko (somentor)/KITEK KUZMAN, Manja (recenent)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2016
TI THREE-DIMENSIONAL PRINTING WITH A MIXTURE OF ADHESIVES AND WOOD POWDER
DT M. Sc. Thesis (Master Study Programmes)
NO IX, 48 p., 6 tab., 31 fig., 5 ann., 30 ref.
LA sl
AL sl/en
AB Three-dimensional printing is a new way of making real objects from a computer model. From the classical production technologies, based on the removal of the material (milling, turning, grinding) is different in that the product is formed by adding material in layers. There have been developed many technologies that are especially suitable for printing with polymers or metals. In this study we used 3D printing technology to print a mixture of adhesive and wood powder. Our intention was to adapt existing hardware (3D printer) to the extent that will allow printing a mixture of adhesive and wood powder, and to determine the optimal mix of adhesive and wood powder for optimum extrusion material and satisfactory mechanical properties of the printed product. We prepared two types of mixtures (with PVAc and UF adhesive) with different proportions of the wood powder (from 12.5% to 25%). In the first part of the study, we determined the optimal mixture of wood powder and the adhesive and the force needed for extrusion of the mixture through the nozzle of the print head. In the second part, we printed test pieces and tested for flexural strength. We have found out that the properties of the finished printed materials mainly depend on the properties of the adhesive. According to the results of research carried out we can conclude that the three-dimensional printing with a mixture of glue and wood powder is possible, but in limited sizes (mainly flat products) and with limited mechanical properties of the product.

KAZALO VSEBINE

	str.
Ključna informacijska dokumentacija.....	III
Key words documentation.....	IV
Kazalo vsebine.....	V
Kazalo preglednic.....	VII
Kazalo slik.....	VIII
Kazalo prilog.....	IX
1 UVOD.....	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 CILJ MAGISTRSKE RAZISKAVE.....	2
1.3 DELOVNE HIPOTEZE.....	2
2 PREGLED OBJAV.....	3
2.1 TRIDIMENZIONALNO TISKANJE	3
2.2 ZGODOVINA 3D-TISKANJA.....	4
2.3 TEHNOLOGIJA 3D-TISKANJA.....	6
2.3.1 Vezalni procesi	6
2.3.1.1 Stereolitografija (SLA)	6
2.3.1.2 Selektivno lasersko sintranje (SLS).....	7
2.3.1.3 Inkjet prašno tiskanje (3DP)	8
2.3.1.4 Nalaganje krojenih plasti (LOM)	10
2.3.2 Odlagalni procesi	11
2.3.2.1 Ciljno nalaganje (FDM).....	11
2.3.2.2 Ekstrudiranje ali brizganje.....	12
2.3.2.3 Polyjet.....	13
2.4 TRIDIMENZIONALNO TISKANJE Z NARAVNIMI MATERIALI	14
2.4.1 Laywoo-3D	15
2.4.2 Laybrick Sandstone	16
2.5 PRIMERNI MATERIALI ZA 3D-TISKANJE Z MEŠANICO LEPILA IN LESNEGA PRAHU	17
2.5.1 Lepilo	17
2.5.1.1 Polivinilacetatno lepilo	17
2.5.1.2 Urea-formaldehidno lepilo	18
2.5.1.3 Poliuretansko lepilo	18
2.5.1.4 Talilna lepila	19
2.5.2 Les	19
2.5.3 Lesno plastičen kompozit	20
3 MATERIAL IN METODE.....	22
3.1 LES	22
3.2 LEPILO	23
3.2.1 Mekol D3	23
3.2.2 W-Leim Plus 3000.....	23
3.3 PRIPRAVA LESNEGA PRAHU	24
3.4 PRIPRAVA MEŠANICE LESNEGA PRAHU IN LEPILA	24

3.5	MERJENJE SILE EKSTRUDIRANJA	26
3.6	TISKANJE PREIZKUŠANCEV	27
3.7	DOLOČANJE UPOGIBNE TRDNOSTI NATISNJENIH PREIZKUŠANCEV	30
3.8	TISKANJE 3D-IZDELKA	31
4	REZULTATI.....	32
4.1	SILA EKSTRUDIRANJA.....	32
4.2	ODVISNOST SILE EKSTRUDIRANJA OD DELEŽA LESA V MEŠANICI	33
4.3	ODVISNOST SILE EKSTRUDIRANJA OD HITROSTI POTISKANJA PRI MEŠANICI Z 20-% DELEŽEM LESA IN PVAC-LEPILA.....	34
4.4	ODVISNOST SILE EKSTRUDIRANJA OD VELIKOSTI ŠOBE	36
4.5	MODUL ELASTIČNOSTI IN UPOGIBNA TRDNOST V ODVISNOSTI OD DELEŽA LESA	37
4.6	DIMENZIJSKA STABILNOST.....	38
4.7	NATISNJENI IZDELEK	39
5	RAZPRAVA IN SKLEPI.....	40
5.1	RAZPRAVA.....	40
5.2	SKLEPI	42
6	POVZETEK	43
7	VIRI	45

ZAHVALA

PRILOGE

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Zgodovinski pregled ključnih ter najbolj odmevnih dogodkov, povezanih z razvojem 3D-tiskarske tehnologije (Glavičič, 2014)	4
Preglednica 2: Potrebna količina lepila in lesnega prahu za pripravo 75 ml mešanice z različnimi deleži lesa	25
Preglednica 3: Povprečne vrednosti potrebnih sil za ekstrudiranje posameznih mešanic iz PVAc-lepila	32
Preglednica 4: Povprečne vrednosti potrebnih sil za ekstrudiranje posameznih mešanic iz UF-lepila	32
Preglednica 5: Hitrosti pomikanja materiala skozi šobo v odvisnosti od hitrosti potiskanja bata v tiskalni glavi	35
Preglednica 6: Izmerjene vrednosti preizkušancev takoj po tiskanju in po 14 dneh sušenja	39

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: Stereolitografija (Wikipedia)	7
Slika 2: Selektivno lasersko sintranje (Britannica)	8
Slika 3: Inkjet prašno tiskanje (Custompartnet)	9
Slika 4: Nalaganje krojenih plasti (Custompartnet)	10
Slika 5: Ciljno nalaganje (Custompartnet)	11
Slika 6: Ekstrudiranje ali brizganje (3D Printing of Ceramics for the Arts)	12
Slika 7: Polyjet 3D-tiskanje (Rapid Prototyping)	13
Slika 8: Laywoo-3D v kolutu (Lulzbot)	15
Slika 9: Izdelek Laywoo-3D (get3D)	15
Slika 10: Laybrick Sandstone v kolutu (Feedtheprinter)	16
Slika 11: Izdelek iz Laybrick Sandstone (Nick Lievendag)	16
Slika 12: WPC v obliki peletov (WPC Asia)	20
Slika 13: Mlinček za mletje lesa Retsch ZM 200	24
Slika 14: Presejan lesni prah	25
Slika 15: Ekstrudiranje mešanice	26
Slika 16: Testirna naprava Zwick/Z100	26
Slika 17: Uporabljen 3D-tiskalnik	27
Slika 18: Program Repetier host in model preizkušanca, pretvorjen v G-kodo	28
Slika 19: Možni vzorci in gostota tiskanja (Slic3r Manual)	28
Slika 20: Izbran vzorec tiskanja	29
Slika 21: Shematski prikaz natisnjene preizkušance	29
Slika 22: Tiskalna glava 3D-tiskalnika	29
Slika 23: Vstavljen preizkušanec v testni napravi Zwick/Z005	31
Slika 24: Odvisnost sile ekstrudiranja od deleža lesa v mešanici lesnega prahu in lepila	33
Slika 25: Odvisnost sile potiskanja od hitrosti ekstrudiranja pri mešanici z 20-% deležem lesa in lepila Mekol D3	34
Slika 26: Odvisnost sile ekstrudiranja od velikosti šobe	36
Slika 27: Modul elastičnosti in upogibna trdnost v odvisnosti od deleža lesa	37
Slika 28: Preizkušanec iz PVAc-lepila takoj po tiskanju in po 14 dneh sušenja	38
Slika 29: Preizkušanec iz UF-lepila takoj po tiskanju in po 14 dneh sušenja	38
Slika 30: Natisnjeni izdelki	39

KAZALO PRILOG

Priloga A: Podatki meritev sile ekstrudiranja mešanice iz PVAc lepila

Priloga B: Podatki meritev sile ekstrudiranja mešanice iz UF lepila

Priloga C: Podatki meritev sil ekstrudiranja pri različnih hitrostih mešanice iz PVAc lepila
z 20 % deležem lesa

Priloga D: Podatki meritev sil ekstrudiranja pri različnih velikostih šobe mešanice iz PVAc
lepila z 20 % deležem lesa

Priloga E: Podatki meritev testiranja trdnosti natisnjenih preizkušancev

1 UVOD

Tehnologija tridimenzionalnega tiskanja se v zadnjem času hitro razvija in nam ponuja neizmerne nove možnosti izdelave izdelkov. 3D-tiskanje omogoča direktno izdelovanje dejanskih predmetov iz računalniških virtualnih modelov, in s tem odpira nove možnosti uporabe. Razvito je bilo že veliko tehnologij 3D-tiskanja, ki omogočajo tiskanje z umetnimi materiali, kot so razni polimeri, materiali na osnovi kovin ter nekaj ostalih materialov. Razvito je bilo tudi nekaj 3D-tehnologij, ki so bolj univerzalne in omogočajo tiskanje raznoraznih materialov, tudi z naravnimi kompoziti. Eden takih materialov bi bil lahko kompozit na osnovi lesa ter lepila.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Les je eden najbolj tradicionalnih naravnih materialov, uporaben v najširšem smislu, zato se pojavlja vprašanje, zakaj ga ne bi uporabili tudi za tiskanje 3D-predmetov. Izdelke, natisnjene s 3D-tiskalnikom iz lesnih materialov, bi lahko uporabili za izdelavo raznih prototipov zapletenih organskih oblik. Za razliko od ostalih materialov, ki so gostejši in s tem težji, ima les nižjo gostoto. Kar pomeni, da bi tako natisnjene izdelke lahko uporabili kot embalažo kompleksnih oblik, za izdelavo kalupov pri lameliranem pohištvu in kot osnovo pohištva za oblaganje z mehansko bolj odpornimi materiali.

Kot naraven material ima les veliko dobrih lastnosti. Z vidika trajnostnega razvoja ima les veliko prednost pred ostalimi materiali. Je material, ki je v določenih predelih sveta dostopen v skoraj neizmernih količinah in je za razliko od ostalih materialov obnovljiv vir, ne samo kot material, ampak tudi kot energija. Pri predelavi lesa porabimo daleč najmanj energije. Les ima čez celotno življenjsko dobo zelo nizki ogljični odtis. Vsekakor je les eden od okolju najprijaznejših materialov in zato zelo sprejemljiv tudi za 3D-tiskanje.

1.2 CILJ MAGISTRSKE RAZISKAVE

V preteklosti je bilo opravljenih že nekaj študij o 3D-tiskanju lesa ter tako bilo razvito tudi nekaj materialov na osnovi lesa, s katerimi je možno tiskati 3D-predmete. Glavni cilj naše raziskave je proučiti možnosti 3D-tiskanja z mešanico lepila za les ter lesnega prahu.

Zaradi boljšega razumevanja lastnosti materialov za 3D-tiskanje je bilo najprej potrebno narediti pregled materialov in nato definirati glavne lastnosti povezane s 3D-tiskanjem. Cilj raziskave je bil preučiti možnost 3D-tiskanja z mešanico običajnih lepil, uporabljenih v lesni industriji in lesnim prahom, pridobljenim iz ostankov lesa. Določiti je bilo potrebno optimalno razmerje mešanice lepila in lesnega prahu, pri kateri bo najlažje ekstrudiranje materiala in bo hkrati material dovolj viskozen, da ne bo stekal pri nalaganju plasti. Poleg tega je bilo potrebno določiti tako mešanico, da bo imela ustrezne mehanske lastnosti za nadaljnjo uporabo natisnjenih izdelkov, ter kot končni cilj demonstrirati uporabo optimalne mešanice za 3D-tiskanje izbranega prototipa izdelka.

1.3 DELOVNE HIPOTEZE

Predvidevamo, da je z mešanico lepila in lesnega prahu mogoče 3D-tiskati enostavne izdelke. Lastnosti natisnjenega izdelka bodo predvsem odvisne od uporabljenega lepila in deleža lesa v mešanici. Bistvenega pomena za uspešno tiskanje so reološke lastnosti materiala, ki se spreminjajo z deležem lesnega prahu v mešanici in tipom uporabljenega lepila. Potrebna je dovolj velika viskoznost mešanice lepila in lesnega prahu in hitra utrditve, da ne pride do stekanja in kolapsa v plasteh naložene strukture. Predvidevamo, da s pravilno izbiro vrste lepila za les in deleža lesnega prahu v mešanici ter s pravilnim postopkom lahko pripravimo (mletje lesnih ostankov, presajanje) ustrezen material za 3D-tiskanje in ga uspešno uporabimo.

2 PREGLED OBJAV

2.1 TRIDIMENZIONALNO TISKANJE

3D-tiskanje je pogovorni izraz za izdelovanje predmetov s postopnim nanašanjem oziroma dodajanjem snovi. Je postopek za izdelavo tridimenzionalnih trdnih predmetov iz digitalnega 3D-modela. Nastajanje 3D-predmetov je proces dodajanja zaporednih plasti materiala do končne oblike predmeta. Postopek je dokaj enostaven. 3D-tiskalnik prebere obliko 3D-predmeta po posameznih plasteh, ki so lahko glede na želeno obliko končnega predmeta različnih oblik, ter jih zapiše oziroma natisne v pravilnem zaporedju.

Postopek izdelovanja z dodajanjem je drugačen od ostalih bolj tradicionalnih in poznanih postopkov, kot so rezkanje, žaganje ali rezanje. Ti postopki vsebujejo odstranjevanje ali odzemanje materiala do končne oblike. Pri izdelovanju z odzemanjem orodje vedno potrebuje prosto pot do področja, kjer se bo odzema material, kar nam lahko povzroča nemalo težav pri možnostih oblikovanja želenih oblik predmetov (Warnier, 2014).

Tridimenzionalno tiskanje lahko navajamo tudi z drugimi izrazi, ki bolj natančno opredeljujejo sam proces proizvodnje, kot so hitro prototipiranje, hitro izdelovanje, stereo litografija, izdelovanje po slojih, namizno izdelovanje ali prosto prostorno izdelovanje. Kakor koli že, uporaba te terminologije sovпада z izrazom 3D-tiskanje, ki prevladuje v širšem strokovnem področju in se nanaša na nizko zmogljivi postopek izdelovanja z dodajanjem (Warnier, 2014).

Vsako tridimenzionalno tiskanje se prične z digitalnim 3D-modelom predmeta, katerega hočemo narediti. Le-tega je dokaj enostavno pridobiti s prenosom s spleta, bolj vešči pa 3D-modele v digitalni obliki pridobijo tudi iz obstoječega fizičnega predmeta z uporabo 3D-skenerjev, ali na osnovi izrisa z uporabo CAD (Computer Aided Design) programov, ki omogočajo 3D-modeliranje. Z vsemi metodami dobimo digitalno obliko 3D-modela, ki jo moramo zapisati v takšno obliko, da jo bo 3D-tiskalnik razumel. To omogočajo posebni programi, ki 3D-model zapišejo po posameznih plasteh v X in Y koordinate. 3D-tiskalnik nato prebere koordinate, po katerih se pomika tiskalna glava, in natisne sloj za slojem v končno obliko fizičnega predmeta (Evans, 2012).

Večina procesov tiskanja omogoča tiskanje v različnih resolucijah. Večja, boljša resolucija pomeni tanjše plasti ter tudi tanjše linije, kar pomeni večjo natančnost. Te linije se na končnem izdelku po površini opazijo tudi pri boljših resolucijah, kar pa daje izdelku grobo, neravno površino. V večini primerov se površino še lahko dodatno izboljša s peskanjem, loščenjem ali poliranjem, odvisno od materiala, iz katerega je natisnjen izdelek (Evans, 2012).

2.2 ZGODOVINA 3D-TISKANJA

Če 3D-tiskanje obravnavamo široko, bi lahko rekli, da se je tridimenzionalne predmete začelo izdelovati že mnogo pred našimi časi. Z razvojem tehnologije, predvsem računalništva, je 3D-tiskanje dobilo povsem nov pomen. Ko sedaj govorimo o 3D-tiskanju, imamo v mislih predvsem tiskanje predmetov iz računalniških modelov. Z razvojem računalnika in njegovih aplikacij se je začel tudi razvoj 3D-tiskanja, kakršnega poznamo danes.

Preglednica 1: Zgodovinski pregled ključnih ter najbolj odmevnih dogodkov, povezanih z razvojem 3D-tiskarske tehnologije (Glavičič, 2014)

Leto	Dogodki
1980	Dr. Kodama (Japonska) je vložil prvo patentno prijavo za RP (Rapid Prototyping) tehnologijo, ki zaradi nepravočasno vložene specifikacije ni bila sprejeta.
1983	Chuck Hull je izumil stereo litografijo (SLA), postopek tiskanja, ki omogoča ustvarjanje 3D-predmetov iz digitalnih podatkov.
1986	Chuck Hull je patentiral SLA-tehnologijo. Ustanovil je 3D Systems, ki je še danes ena izmed največjih organizacij na področju 3D-tiska. Postavil je temelje formatu datoteke <i>.stl</i> , ki ga potrebujemo za 3D-tisk na praktično katerem koli 3D-tiskalniku.
1988	Scott Crump, soustanovitelj podjetja Stratasys, je izumil tehnologijo FDM □ modeliranje s spajanjem slojev (l. 1992 pridobljena licenca).
1989	Card Deckard je patentiral SLS-tehnologijo (selektivno lasersko sintranje), ki ga je kasneje kupilo podjetje 3D Systems. Podoben postopek je patentiral R. F. Housholder (l. 1979), vendar ga ni komercializiral.
1991	Podjetje Helisys je razvilo tehnologijo LOM (nalaganje krojenih plasti).
1992	Razvit je prvi pravi SLA-tiskalnik podjetja 3D Systems, ki je sposoben natisniti zapletene predmete v razmeroma kratkem času. Podjetje DTM je naredilo prvi 3D-tiskalnik DTM-tehnologije (Desktop manufacturing), ki je namenjen ustvarjanju manjših prototipov.
1993	MIT (Massachusetts Institute of Technology) je patentiral tehnologijo 3DP (trirazsežno tiskanje).
1999	Začetek uporabe 3D-tiska v medicini. Prvič so uporabljene metode bio-tiskanja in 3D-tiskanja z živimi celicami za ustvarjanje umetnega mehurja, ki je uspešno implementiran v paciente.
2002	Medicina: tisk delujočih ledvic, ki niso implementirane v paciente, so pa v laboratoriju »živele« 4 mesece.
2005	Na Univerzi Bath v Veliki Britaniji je razvit 3D-tiskalnik, ki je sposoben natisniti sestavne dele za nov 3D-tiskalnik. Nastaja odprtokodni projekt RepRap, ki spodbuja inovatorje po celem svetu v nadaljnji razvoj te ideologije. Danes RepRap stoji za množico več kot 250 vrst 3D-tiskalnikov, ki so jih razvili člani skupnosti, in tako predstavlja resno konkurenco komercialnim proizvajalcem 3D-tiskalnikov.
2006	Prvi 3D-tiskalnik SLS-tehnologije postaja dostopen proizvodnji industrijskih delov. Razvit prvi 3D-tiskalnik, ki je sposoben tiskati z več materiali.

2008	Projekt RepRap: 3D-tiskalnik narejen pred tremi leti je natisnil dele za svojega prvega potomca. Podjetje Shapeways je omogočalo storitev izrisa in tiska predmetov za umetnike, arhitekta in oblikovalce. Medicina: natisnjena je proteza noge z vsemi deli in je natisnjena v enem delu ter je gibljiva v sklepih.
2009	3D-tisk postaja dostopen širši javnosti □ podjetje Makerbot začneja prodajati komponente za sestavo hišnih 3D-tiskalnikov. Družba Organovo uporablja 3D-biotiskalnik za tisk krvnih žil.
2010	Zračna industrija je predstavila prvo robotsko letalo, ki je v celoti natisnjeno. Avtomobilska industrija je predstavila Urbeeja, prvi 3D-natisnjen avto, ki je zasnovan kot okolju prijazen in cenovno dostopen.
2011	Nizozemsko podjetje I Materialise je začelo ponujati storitev tiska s srebrom in zlatom. Na Dunaju je razvit najmanjši, najlažji in najcenejši 3D-tiskalnik (tehta 1,5 kg in stane okoli 1200 EUR). Predstavljen je prvi 3D-tiskalnik čokolade, prvi 3D-natisnjen bikini in začel se je graditi 3D-tiskalnik hrane.
2012	Medicina: implementacija prve natisnjene čeljusti.
2013	Število 3D-tiskalnikov se je v primerjavi z letom 2011 potrojilo.
2014	NASA je na krovu mednarodne vesoljske postaje s 3D-tiskalnikom ustvarila prvi predmet. Gre za nadomestni del 3D-tiskalnika. Kitajsko podjetje Yingchuang New Materials je v 24 urah uspešno natisnilo kar 10 hiš iz cenovno ugodnega gradbenega materiala, mešanice ostankov drugih gradbenih procesov in cementa.

2.3 TEHNOLOGIJA 3D-TISKANJA

V zadnjih 40 letih je bilo raziskano in razvito veliko tehnologij s postopnim dodajanjem snovi z enim samim ciljem: natisniti predmet. Medtem ko v bistvu vsak od pristopov naredi predmet iz posameznih slojev, obstajajo velike razlike med tehnologijami. Predvsem nastajajo razlike zaradi različnih pristopov spajanja posameznih plasti med seboj ter različnih materialov, ki se uporabljajo.

Na splošno gledano lahko 3D-tiskarski proces razdelimo na dve kategoriji. Pri prvem procesu tiskalne glave material med samim postopkom vežejo med seboj (vezalni proces), pri drugem pa tiskalne glave material odlagajo (odlagalni proces). Med vezalne procese spadajo metode, kot so stereolitografija (SLA), selektivno lasersko sintranje (SLS), inkjet prašno tiskanje (3DP) ter nalaganje krojenih plasti (LOM). Metode, ki spadajo med odlagalne procese, pa so ciljno nalaganje (FDM), polyjet foto polimerizacija ter ekstrudiranje/iztiskanje ali brizganje (Warnier, 2014).

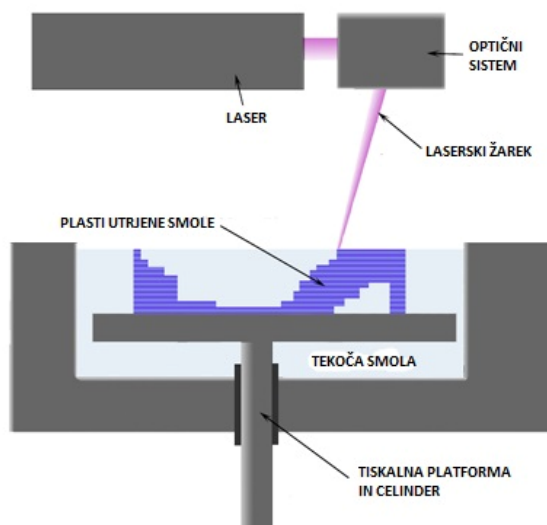
Vse našteje metode so najbolj razširjene v industriji, obstaja pa še nekaj drugih metod, ki pa so uporabne bolj za specifične zadeve. Ena od takih metod je selektivno lasersko taljenje (SLM). Metoda je podobna SLS, le da delcev prahu med sabo ne veže, ampak jih stopi. Podobno deluje tudi metoda taljenja z elektronskim žarkom (EBM), ki uporablja elektronske žarke namesto UV-žarkov (Warnier, 2014).

2.3.1 Vezalni procesi

Vezalni procesi delujejo tako, da celotno plast prahu ali tekočine, ki se nahaja na tiskalni površini, vežejo med seboj po posameznih plasteh v obliko želenega predmeta. To pomeni, da se predmet tiska tudi v odvečnem materialu. S takšnimi procesi lahko izdelujemo bolj zahtevne oblike, saj odvečni material deluje kot podporni in ga tako tudi neposredno uporabimo, kar pa ne velja pri stereolitografiji.

2.3.1.1 Stereolitografija (SLA)

Stereolitografija je omogočila enostavnejšo proizvodnjo 3D-modelov, saj je iz laboratorijske uporabe naredila velik preskok in prišla v komercialno uporabo. Je proces, ki uporablja foto polimerizacijo za utrjevanje tekoče plastike oz. foto polimerov. Foto polimer je tekoč polimer »smola«, ki se nahaja v tiskalnem koritu in utrjuje pri izpostavitvi svetlobe. Tiskanje poteka s pomočjo laserskih žarkov, ki tiskajo predmet po plasteh eno na drugo (Slika 1).



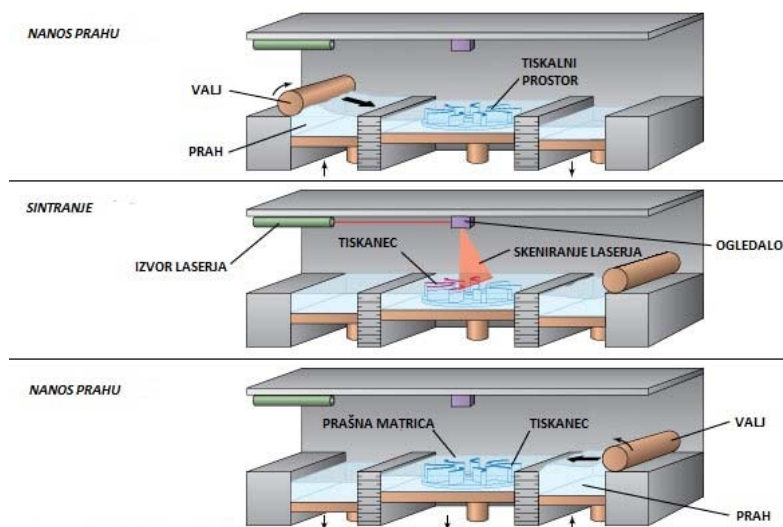
Slika 1: Stereolitografija (Wikipedia)

SLA je natančna tehnika, primerna za tiskanje zelo podrobnih predmetov z dokaj visoko resolucijo. Primerna je predvsem za tiskanje vizualnih prototipov. Same lastnosti natiskanih predmetov so odvisne od lastnosti polimera, ki spominja na skupino inženirske plastike, podobno gumi. Barvna lestvica je zelo omejena. Večina polimerov je transparentnih ali prosojnih zaradi čim bolj optimalnih razmer utrjevanja. Obstajajo tudi neprosojni polimeri, ki pa so zelo omejeni na črne, bele, zelene ali rjave odtenke barve (Bartolo, 2011).

Za razliko od podobnih procesov, pri katerih je prisoten podporni material, ta tehnika ne omogoča čezrobne tiskanje. Pri podobnih tehnikah, ki omogočajo čez robno tiskanje, se tudi zaradi boljše podpore uporablja trdnejši material. Pri SLA-tehniki se uporablja tekoč material, ki pa nima zadostne podpore, da bi omogočal večje čezrobno tiskanje, kar je manjša pomanjkljivost te tehnike (Bartolo, 2011).

2.3.1.2 Selektivno lasersko sintranje (SLS)

Selektivno lasersko sintranje je še en razširjen 3D-tiskarski proces, ki je relativno hiter ter primeren za tiskanje strukturnih delov, kar omogoča tiskanje končnih izdelkov. Deluje na principu taljenja prahu s pomočjo močnih laserskih žarkov, ki stopijo delce prahu, ti pa se pri ohlajanju povežejo med seboj v trdnejši material. 3D-predmet se ravno tako natisne po plasteh. Na tanko plast prahu, ki se nahaja na tiskalni podlagi, laser izriše plast predmeta. Nato se ta podlaga spusti za debelino plasti in valji čez natisnjeno plast nanesejo še eno plast prahu, na katero laser ponovno nariše naslednjo plast in tako tiskalnik plast za plastjo natisne 3D-predmet (Slika 2).



Slika 2: Selektivno lasersko sintranje (Britannica)

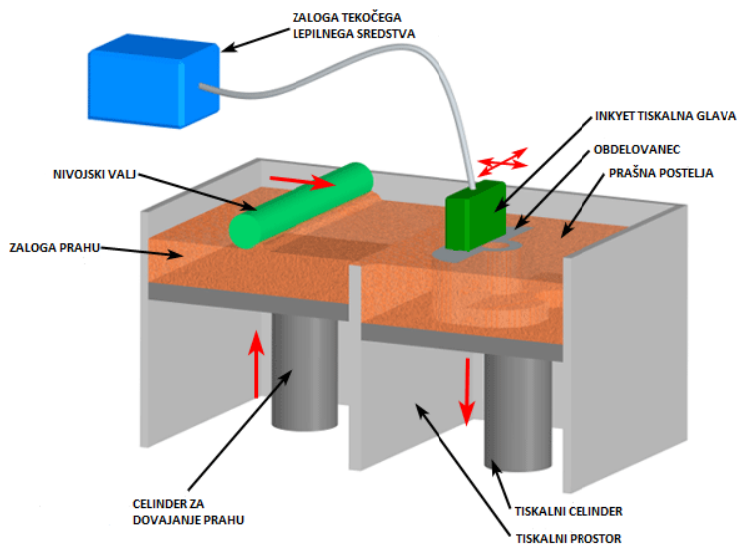
Takšen način tiskanja se je izkazal za zelo uspešnega in prilagodljivega v 3D-tiskarski tehnologiji. Naprave so zelo prilagodljive na veliko različnih materialov. Največkrat uporabljen material je v večini primerov plastični prah in posebni najlon, ki je zelo trden ter precej prilagodljiv. Vseeno pa lahko uporabimo veliko različnih materialov, ki se lahko zmeljejo v prah in se stalijo pri intenzivnem laserskem žarjenju. V zadnjih letih je bilo razvitih veliko izboljšav SLS-procesa, ki so sedaj primerne za tiskanje predmetov iz raznih kompozitnih materialov iz kovine, keramike, stekla ter peska (Kovač, 1999).

Prah ima v primerjavi z drugimi materiali, iz katerih tiskamo, veliko prednosti. Zaradi svojih dobrih podpornih lastnosti omogoča čezrobno tiskanje in tako, za razliko od SLA, tiskanje bolj zahtevnih oblik. Odvečni prah, ki pri tiskanju deluje kot podpora, je možno enostavno odstraniti s sesalcem ali kompresorjem tudi iz majhnih odprtin. Prav tako pa se odvečni prah lahko ponovno uporabi za naslednje tiskanje, kar daje celotnemu procesu pozitivne učinke glede izkoristkov (Kovač, 1999).

2.3.1.3 Inkjet prašno tiskanje (3DP)

Inkjet prašno tiskanje deluje na istem principu kot SLS-tehnologija. Razlikuje se samo v načinu povezovanja prašnih delcev. SLS-tehnologija delce združuje skupaj z laserskim taljenjem, 3DP pa za združevanje uporablja lepilo, ki ga tiskalna glava razprši po površini tiskalne plasti. Takšen proces uporablja podobne tiskalne glave, kot so v namiznih tiskalnikih, in je zato zelo podoben tiskanju na papir. Ker se uporabljajo inkjet tiskalne glave, nekatere tovrstne naprave omogočajo tiskanje predmetov v različnih odtenkih barve. Predmeti, natisnjeni s 3DP, so bolj krhki od predmetov, natisnjenih s SLS-tehnologijo, a je to težavo mogoče odpraviti z dodatno površinsko obdelavo s smolami, ki poleg izboljšanja trdnosti izostrijo tudi barvo predmeta (Slika 3) (Warnier, 2014).

3DP se po večini uporablja za tiskanje prototipov. Največja prednost pred ostalimi podobnimi procesi je možnost tiskanja v različnih barvah ter cenovna ugodnost za takšen tip prototipov.

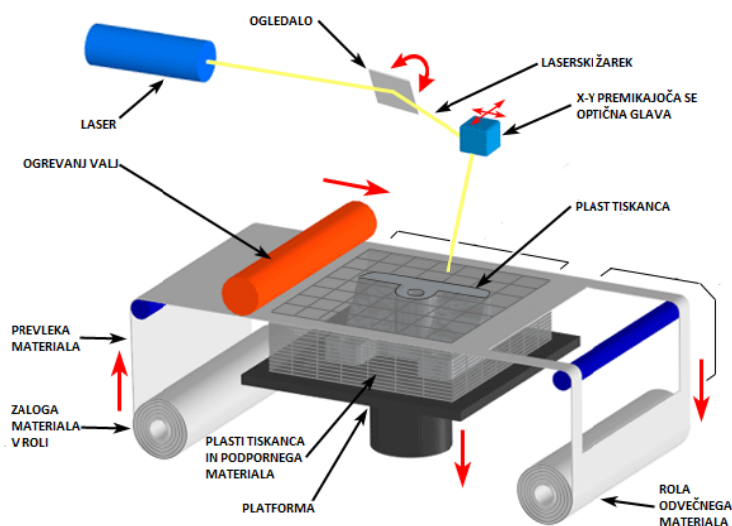


Slika 3: Inkjet prašno tiskanje (Custompartnet)

Najbolj razširjen in ugoden material, ki se ga uporablja v 3DP-procesih, je prah, podoben mavcu z dodatnimi komponentami, katerega se v trden predmet poveže s tekočimi vezivi. Obstajajo tudi tiskalne naprave z več tiskalnimi glavami, ki omogočajo tiskanje v polnih barvah podobno kot namizni tiskalniki na papir. To omogoča tiskanje predmetov v realnih barvah ter tako izdelavo foto bolj realističnih prototipov. Znanstveniki vsakodnevno odkrivajo alternative, ki izboljšujejo uporabnost 3DP. Najbolj se osredotočajo na keramiko in steklo. Prašne delce stekla ali gline je možno zlepiti skupaj v predmet in nato z dodatnim kaljenjem, pri katerem vezivo izgori iz tiskanega predmeta, doseči zadostno trdnost (Warnier, 2014).

2.3.1.4 Nalaganje krojenih plasti (LOM)

Nalaganje krojenih plasti je metoda, pri kateri material režemo po plasteh v lamele, te pa se združijo v celoten predmet. Material se reže ali z rezilom ali z laserskim rezalnikom odvisno od naprave in materiala, ki ga uporabljamo. Pri izbiri materialov ni velikih možnosti. Gre za cenovno ugodne folije iz umetnih mas ali folije na osnovi celuloznih vlaken. Zadnje izboljšave LOM-procesa omogočajo tudi barvno tiskanje, podobno kot 3DP-tehnologija. Predmeti, natisnjeni na tak način, so dokaj trdni, uporabni predvsem za vizualne prototipe. Sama tehnologija je dokaj enostavna ter omogoča enostavno čezrobno tiskanje brez dodatnih priprav, kar omogoča tiskanje zahtevnih oblik (Slika 4) (Warnier, 2014).



Slika 4: Nalaganje krojenih plasti (Custompartnet)

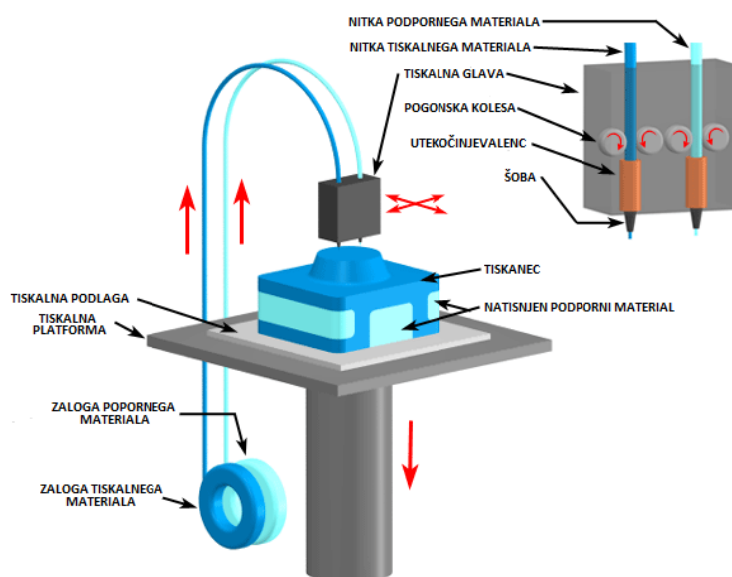
2.3.2 Odlagalni procesi

Pri odlagalnih procesih gre za ekstrudiranje/iztiskanje tekočega materiala skozi šobo, ki se nahaja na tiskalni glavi. Ta material odlaga v ravni liniji čez celotno plast tiskanega predmeta, plast za plastjo na tiskalno površino. Za razliko od vezalnih procesov se predmet tiska samostojno, brez odvečnega materiala, kar pa nam onemogoča čezrobno tiskanje brez predhodne priprave primerne tiskalne površine.

2.3.2.1 Ciljno nalaganje (FDM)

Ciljno nalaganje je 3D-tiskarski proces, kjer žarilno nitko iz termoplastičnega materiala dovajamo v grelni komoro na tiskalni glavi, kjer se segreje do tekočega stanja, da jo lahko ekstrudiramo skozi šobo. Predmet se tiska po plasteh v končno obliko iz termoplastičnega materiala, ki se takoj po ekstrudiranju začne odlagati in s tem pridobivati svojo trdnost ter dimenzijsko obstojnost. Sam postopek je zelo podoben in je bil zasnovan na podlagi procesa lepljenja s talilnim lepilom (Slika 5) (Warnier, 2014).

Zaradi uporabe standardnih termoplastičnih materialov, ki so dokaj trdni, je tehnologija uporabna tudi za izdelovanje funkcionalnih delov z dobro mehansko trdnostjo. Ena od pomanjkljivosti procesa je, da na površinah ostajajo sledi posameznih plasti, ki pa jih je z dodatno obdelavo možno zgladiti.



Slika 5: Ciljno nalaganje (Custompartnet)

FDM v večini deluje s termoplastičnimi materiali, kot so najlon, ABS, PLA (razgradljiva plastika), ter z raznimi polikarbonati. V raziskavah so bili preizkušeni še drugi kompoziti na osnovi termoplastičnih materialov. Kompoziti so bili razviti na podlagi termičnih lepil kot povezovalni material z dodanimi prašnimi polnili, kot so les, kovina ali keramika.

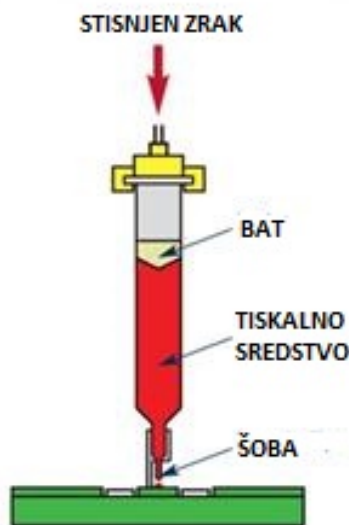
Poleg tega so bili razviti tudi eksperimentalni sistemi, ki so še dodatno predhodno segrevali material do tekočega stanja, da se ga je tako lažje vlivalo oziroma potiskalo skozi šobo (Stratasys, 2015).

V večini primerov z FDM lahko tiskamo samo v eni barvi. Obstajajo pa tudi namizni 3D-tiskalniki z dvema tiskalnima glavama, ki omogočajo dvobarvno tiskanje. Z eno glavo tiskamo eno barvo, z drugo glavo drugo barvo ter tako povečamo možnosti uporabe. Predvsem lahko izboljšamo zunanjo vizualno podobo izdelkov (Stratasys, 2015).

S takšno tehnologijo ne moremo tiskati čez robne površine, ker nimamo podpornega materiala, kot ga ima na primer SLS-tehnologija. Za čezrobno tiskanje moramo predhodno pripraviti primerno tiskalno površino/podporo (tiskalno posteljo), ki bo podpirala in omogočala čezrobno tiskanje. To lahko storimo tako, da predhodno z istim tiskalnikom natisnemo posteljo in jo z dodatno obdelavo pripravimo tako, da se material, ki ga bomo nato tiskali čezenj, ne bo sprijemal. Obstaja tudi druga možnost, s 3D-tiskalniki z dvema tiskalnima glavama, ki je morda bolj elegantna. Takšen princip delovanja omogoča hkratno tiskanje predmeta, kakor tudi postelje, paziti moramo samo na to, da se material ne sprime, to pa najlažje storimo z dvema materialoma, ki imata različne lastnosti (Warnier, 2014).

2.3.2.2 Ekstrudiranje ali brizganje

Ta proces je zelo podoben FDM, pri katerem se material ekstrudira skozi šobo in tako v linijah odlaga na tiskalno površino, pri tem postopno riše plast za plastjo tiskanega predmeta. Najbolj se razlikuje po tem, da ni potrebno materiala topiti, ampak ga ekstrudiramo skozi šobo takšnega, kot je. Gre za materiale, ki se z lahkoto plastično preoblikujejo in se v nadaljnji obdelavi strjujejo ter pridobijo končno obliko (Slika 6).



Slika 6: Ekstrudiranje ali brizganje (3D Printing of Ceramics for the Arts)

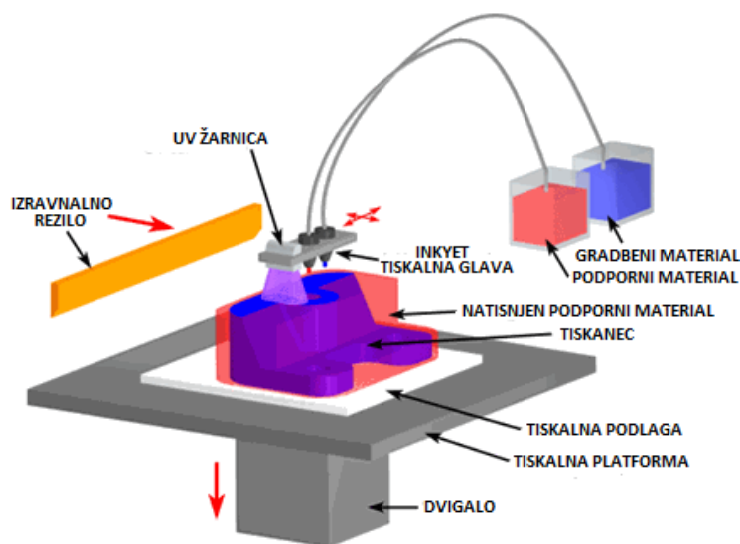
Ekstrudiranje ali brizganje se v večini primerov uporablja za eksperimentalne namene. Predvsem z namenom preizkušati možnosti 3D-tiskanja širokega območja pastam podobnega materiala.

Zaradi nizkih tehničnih zahtev se za tiskalni medij lahko uporablja skoraj kakršen koli material, ki se ga da stisniti skozi šobo. Pastam podobni materiali, ki se pogosto uporabljajo v ta namen, so beton in cement (za tiskanje velikih objektov, kot so arhitekturne strukture), glina (za tiskanje keramike), plemenite kovinske gline, različne hrane, kot sta čokolada ali testo, ter razni v prah zmleti biološki materiali (Warnier, 2014).

2.3.2.3 Polyjet

Polyjet je najnovejši razviti proces za tiskanje 3D-predmetov. Ravno tako kot pri SLA, se za tiskalni medij uporablja tekoče foto polimere. Za razliko od SLA, kjer se foto polimere v predmet povezuje s pomočjo laserskih žarkov, polyjet uporablja tiskalno glavo, podobno inkjet tiskalnikom, in mikro velike delce foto polimerov direktno nanaša oziroma odlaga na tiskalno podlago. Na koncu je z UV-svetlobo potrebno utrditi še zgornjo tekočo plast, da dobimo končno obliko (Slika 7).

Polyjet proces je zmožen tiskanja v visoki ločljivosti z več materiali v različnih barvah in je primeren za tiskanje realističnih 3D-prototipov s privlačnim videzom, ki daje občutek končnega produkta.



Slika 7: Polyjet 3D-tiskanje (Rapid Prototyping)

Z uporabo več različnih tiskalnih glav oziroma kartuš (kakor pri namiznih računalniških tiskalnikih) je polyjet proces zmožen simultanegega tiskanja z več materiali in barvami. Večina visoko zmogljivih naprav je zmožna simultanegega tiskanja s 14 različnimi materiali in barvami v spektru več kot 100 možnosti. To pomeni, da se material v istem natisnjem

3D-predmetu lahko razlikuje od togega do fleksibilnega, kakor tudi od barvitnega do prosojnega (Stratasys, 2015).

Podporne površine, potrebne za tiskanje čezrobnih površin, so pri tej tehnologiji potrebne. Možno jih je simultano natisniti z eno izmed tiskalnih glav. Za ta namen se uporablja gelom podobne materiale, ki jih je po končanem tiskanju možno enostavno izplakniti s predmeta (Stratasys, 2015).

2.4 TRIDIMENZIONALNO TISKANJE Z NARAVNIMI MATERIALI

Z razvojem 3D-tiskalne tehnologije se je vseskozi razvijal tudi material, s katerim je bilo mogoče tiskati 3D-predmete. V začetnih fazah razvoja se je 3D-tiskarsko tehnologijo začelo razvijati na podlagi umetnih materialov, kot so razni polimeri. Ti so zaradi svojih dobrih povezovalnih, talilnih in trdnostnih lastnosti zelo primerni za 3D-tiskanje. V tem času je bilo tudi zelo dobro razvito 3D-tiskanje s kovinami, ki v sedanjem času omogoča tiskanje zelo preciznih predmetov, uporabnih v najrazličnejših namenih, od avtomobilske industrije do medicine in še mnogo več. Vsi ti materiali so pri pridobivanju iz naravnih virov dokaj energetsko potratni ter so ekološko bolj ali manj nesprejemljivi. Zato se je v zadnjih letih začelo razvijati materiale, ki so bolj ekološko sprejemljivi, kot so razni materiali za tiskanje iz kamnin in lesa. Ti materiali so še vedno mešanica umetnih ter naravnih materialov. Na trgu sta se pojavila tudi že dva materiala s komercialnim imenom Laywoo-3D na lesni osnovi in Laybrick Sandstone na kameni osnovi, oba sta namenjena za tiskanje s FDM-postopkom.

2.4.1 Laywoo-3D

3D-tiskanje z lesnimi materiali se trenutno še razvija. Obstaja pa že komercialni material, ki se ga prodaja pod imenom Laywoo-3D in je namenjen za 3D-tiskanje s FDM-tehnologijo, kar pomeni, da se tiska po principu taljenja in utrjevanja. Seveda sam les tega ne omogoča, zato je material sestavljen iz 40 % lesnega prahu ter 60 % PLA (polylactic acid) polimera. Končni izdelki, tiskani iz tega materiala, imajo teksturo lesa in služijo kot imitacija lesnih izdelkov. Z lesnim materialom LAYWOO-3D tiskamo pri temperaturah od 185 °C do 230 °C, pri čemer zaradi vsebnosti lesa, ki pri višjih temperaturah potemni, dobimo temnejše natisnjene predmete oziroma posamezne sloje in tako imitirajo rani ter kasni les (Sliki 8 in 9) (Lulzbot, 2015).



Slika 8: Laywoo-3D v kolotu (Lulzbot)



Slika 9: Izdelek Laywoo-3D (get3D)

2.4.2 Laybrick Sandstone

Raziskave, ki potekajo na področju 3D-tiskanja s kamnitimi materiali, so predvsem usmerjene v gradbeniške namene za tiskanje večjih objektov, kakor so hiše, stanovanjski objekti ter ostali arhitekturni objekti. Prav tako kot lesni material za 3D-tiskanje obstaja tudi kameni material, ki se ga prodaja pod komercialnim imenom Laybrick sandstone. Sestavljen je iz mlete krede in polimerov ter je namenjen za tiskanje s FDM-tehnologijo. Za gladko teksturo površin ga tiskamo pri temperaturi 165 °C, pri 210 °C pa na končnih natisnjenih predmetih dobimo bolj grobo površino. Mogoče ga je dobiti tudi v različnih barvah ter granulacijah velikosti trdnih zrn (Sliki 10 in 11) (Feed the printer, 2015).



Slika 10: Laybrick Sandstone v kolutu (Feedtheprinter)



Slika 11: Izdelek iz Laybrick Sandstone (Nick Lievendag)

2.5 PRIMERNI MATERIALI ZA 3D-TISKANJE Z MEŠANICO LEPILA IN LESNEGA PRAHU

2.5.1 Lepilo

V lesni industriji obstaja veliko vrst lepil, ki so primerna za lepljenje lesa. Izbira ustreznega lepila je pogojena predvsem od namembnosti uporabe končnega izdelka. Poleg nekaterih ostalih so v lesni industriji najbolj razširjena PVAc, formaldehidna, poliuretanska in talilna lepila. Vsako od teh lepil ima svoje lastnosti, ki jih je potrebno upoštevati pri proizvodnji, kakor tudi pri končni uporabi izdelka. Njihove lastnosti pogojujejo uporabnost pri 3D-tiskanju z mešanico lepila in lesnega prahu.

2.5.1.1 Polivinilacetatno lepilo

Polivinilacetatna (PVAc) lepila so na splošno zelo razširjena lepila ne samo v lesarstvu, ampak so uporabna tudi za lepljenje drugih poroznih materialov. Poznana so pod imenom bela lepila, proizvajalci pa jih prodajajo pod svojimi komercialnimi imeni, pri nas najbolj znana Mekol ter Rakoll. V lesni industriji jih največkrat uporabljajo zaradi enostavne uporabe, relativno dobrih mehanskih lastnosti utrjenega lepilnega spoja ter predvsem zaradi nizke cene.

PVAc-lepila za les so sestavljena iz polivinil acetata ter več dodatkov, ki ustrezno modificirajo lepilo za predviden namen uporabe. Osnovno vezivo PVAc-lepil je vodna disperzija polivinil acetata. Ta je plastomerni oz. termoplastični polimer, ki nastane pri polimerizaciji vinil acetata. Poleg osnovnega linearnega polimera PVAc-lepila vsebujejo še mehčala, topila, polnila in razne dodatke, kot so zgoščevala, barvila, zaščitna sredstva, protipenilci, omakala in sredstva za povečanje začetne lepljivosti (Šernek in Kutnar, 2008).

V lesni industriji se PVAc-lepila uporablja za najrazličnejše namene, vendar je treba pri izbiri lepila upoštevati številne dejavnike, ki vplivajo na trajnost lepilnih spojev. PVAc-lepila so plastomerna in so namenjena za nekonstrukcijsko uporabo, vendar je z dodatki možno izboljšati posamezne lastnosti in tako tudi možnosti uporabe. Vsekakor moramo paziti, kaj uporabljamo, saj je na tržišču več različnih vrst PVAc-lepil, namenjenih za različno uporabo. Nekatere vrste teh lepil vsebujejo dodatke za boljšo zamrežitev, kar pomeni, da je lepilni spoj tako bolj trden, kakor tudi bolj voodporen. Različno pripravljena in modificirana PVAc-lepila lahko uporabimo za najrazličnejša lepljenja masivnega lesa, lesnih kompozitov in drugih materialov. Največ se uporabljajo za širinsko, debelinsko in dolžinsko lepljenje masivnega lesa, predvsem za notranje in stavbno pohištvo, ne pa za masivni konstrukcijski les. S posebnimi dodatki v PVAc-lepilih je možno tudi lepiti lakirane površine in les z drugimi materiali. Zaradi enostavne uporabe in ker ne vsebuje formaldehida, je primerno tudi za furniranje ivernih in vlaknenih plošč, predvsem z nižjimi temperaturami stiskanja, in kot montažno lepilo za lepljenje sestavnih delov (Šernek in Kutnar, 2008).

2.5.1.2 Urea-formaldehidno lepilo

Urea-formaldehidna (UF) lepila so v lesarstvu uporabljana predvsem za lepljenje plošč in v proizvodnji ploskovnega pohištva. Ne glede na to, da vsebuje formaldehid, so mehanske lastnosti, cena in pa enostavna uporaba dovolj tehten razlog za široko uporabo v lesarstvu.

UF-lepila so sestavljena iz uree in formaldehida. Urea ali sečnina oziroma karbamid je kristalen higroskopičen prah bele barve, brez vonja in topen v vodi. Pridobivajo jo iz ogljikovega dioksida in amonijaka pod pritiskom v avtoklavah ali pa z delno hidrolizo cianamida. Za razliko od uree je formaldehid brezbarvni plin ostrega vonja, ki se z vodo meša v vseh razmerjih. Vodna raztopina se imenuje formalin, ki ima kisli pH, v komercialni rabi pa jo običajno dobimo kot okoli 40-% vodno raztopino formaldehida. Formaldehid pridobivajo s procesom oksidacije metanola ob prisotnosti katalizatorja. UF-lepilo utrjuje kemično kakor tudi fizikalno. Kar pomeni, da lepljenje v splošnem poteka v hladnem, toplem ali vročem, vendar se v praksi najpogosteje uporablja vroče lepljenje pri temperaturi 90-120 °C. Zaradi povišane temperature je proces utrjevanja hitrejši, potreben čas stiskanja pa krajši, saj se trden lepilni spoj hitreje formira (Šernek, 2005).

UF-lepilo se največ uporablja pri izdelavi ivernih, vlaknenih, vezanih plošč, pri izdelavi notranjega pohištva, predvsem za furniranje, navsezadnje ga je možno uporabiti tudi za lepljenje konstrukcijskega lesa. Na trgu obstaja več vrst UF-lepil za različno uporabo. Dobimo ga v trdnem prašnem stanju, kakor tudi v tekočem stanju. Vsekakor moramo paziti, kaj uporabljamo, predvsem moramo vedeti, da ima lepilo v tekočem stanju (kot vodna disperzija) krajši čas uporabnosti, kakor lepilo v prašnem stanju (Šernek, 2005).

2.5.1.3 Poliuretansko lepilo

Poliuretanska lepila (PU) so namenjena za lepljenje bolj zahtevnih aplikacij. V lesarstvu se jih uporablja predvsem za širinsko, debelinsko ter dolžinsko lepljenje lesa za zunanjo uporabo. Predvsem so primerna za montažno lepljenje zunanjega pohištva, ki je podvrženo zunanjim vremenskim vplivom, in za lepljenje lesa z drugimi materiali, kot so plastika, kovina itd. (Šernek, 2005).

PU-lepila nastanejo z reakcijo poliadicije. Poliadicija je kemijska reakcija spajanja molekul, ki vsebujejo nenasičene vezi z nasičenimi molekulami, ki imajo vsaj dve funkcionalni skupini. Majhne molekule se pri poliadiciji vežejo na velike molekule, ob tem pa nastajajo vzporedni produkti, kot sta na primer voda ali formaldehid. PU-lepilo med samim procesom lepljenja enostransko nanesemo na čisto površino. Lepilo popršimo z vodno meglo in lepljenje stisnemo za minimalno 20 minut. Nižje temperature in nanos lepila brez vodne megle podaljšajo odprti čas in čas stiskanja lepljencev, višje temperature in pršenje lepila z vodno meglo pa ju skrajšajo (Šernek, 2005).

Na trgu se pojavlja veliko vrst PU-lepil z različnimi namembnostmi. Zelo priljubljena so v gradbeništvu, kot lepilo za lepljenje izolacijskih materialov in za lepljenje oz. zapolnitev večjih vrzeli. V lesni industriji prav tako obstaja več različnih proizvajalcev, ki prodajajo PU-lepilo pod svojimi komercialnimi imeni, v Sloveniji najbolj znano Mitopur E20 proizvajalca Mitol.

2.5.1.4 Talilna lepila

Talilna lepila uvrščamo med termoelastična polimerna lepila, ki so pri normalni temperaturi v trdnem stanju, s segrevanjem se zmehčajo in talijo, preidejo v tekoče stanje, ki je primerno za nanašanje. Odlikuje jih kratek čas vezanja, le nekaj sekund, kar omogoča visoko produktivnost. V lesni industriji jih uporabljajo predvsem za robno lepljenje različnih vrst robnih trakov.

Razvrščamo jih glede na vrsto polimera-elastomera, ki v formaciji talilnega lepila nastopa kot vezivo: lepila na osnovi etilenvinilacetatnih polimerov, na osnovi poliamidov, poliolefinov (polietilen, polipropilen, polibutilen, poliizobutilen) in na osnovi poliuretanov. Poleg elastomerov vstopajo v formacijo običajno še druge komponente, kot so razne smole, voski, polnila in antioksidanti (Jerončič Kocjan, 2004).

Talilna lepila, namenjena za lesno industrijo, so v večini primerov dobavljiva v obliki granulatih zrn ali pa so že nanesena na lepljenec. V industriji so predvsem priljubljena zaradi hitrega utrjevanja. Lepilo je potrebno segreti na delovno temperaturo (160-220 °C), ga nanesti na površino in lepljenec pod tlakom ohladiti. Po končanem postopku lepljenja obdelovanec lahko takoj naprej obdelujemo in nam ni potrebno čakati več ur do dokončne utrditve kot pri večini drugih vrst lepil (Jerončič Kocjan, 2004).

2.5.2 Les

Botanično gledano je les sekundarni ksilem, ki ga kambij v procesu sekundarne rasti proizvaja navznoter v smeri stržena. Tehnično gledano pa ga je mogoče definirati kot trdo vlakneno snov pod skorjo debel in vej dreves ter grmov. Sestavljajo ga različna tkiva in celice kot so: osnovno vlakneno tkivo iz raznih tipov vlaken, trahejni členi, aksialen in trakovni parenhim, itd. Suh les je kemično sestavljen iz celuloze (40-50 %), hemiceluloze (25-30 %), lignina (25-30 %), ekstraktivnih snovi in neorganskih mineralnih snovi (Čufar, 2006).

Najpomembnejše prednosti lesa pred ostalimi materiali so njegova obnovljivost, razširjenost, vsestranska uporabnost, visoka trdnost glede na gostoto, relativna enostavnost in čistost pridobivanja predelave ter obdelave. Največja prednost pred ostalimi pa je predvsem nizka poraba energije pri predelavi. Pri lesu cenimo njegovo toplino zaradi

vzajemnega učinka toplih barv in nizke toplotne prevodnosti. Privlačita nas njegova naravnost in dekorativnost, ki je posledica najrazličnejših barvnih in zgradbenih tekstur.

V Sloveniji je relativni pomen lesa za nacionalno gospodarstvo zaradi velike gozdnatosti še posebej velik in se utegne še povečati. Glede na botanično zgradbo slovenskih gozdov in uporabnost sodijo med najpomembnejše lesne vrste smrekovina, borovina, jelovina, bukovina, hrastovina, in javorovina (Čufar, 2006).

2.5.3 Lesno plastičen kompozit

Lesno plastičen kompozit (WPC - wood plastic composite) je material, izdelan iz dveh osnovnih komponent - iz mešanice lesnih vlaken in matričnega polimera. Kot tretja komponenta v materialu pa so kemični dodatki, ki so za izboljšanje lastnosti ključnega pomena, a so na pogled neopazni del osnovne strukture materiala (razen mineralnih polnil in pigmentov, če so dodani). Dodatki zagotavljajo skoraj popolno integracijo polimera in lesne moke (v prahu) in hkrati olajšajo optimalne pogoje za predelavo.

V končno celoto je struktura WPC-materiala povezana šele ob vključitvi lesne moke v matrično povezavo polimera ob prisotnosti kemičnih dodatkov. Ta postopek je storjen ob povišani temperaturi z ekstrudiranjem oz. iztiskanjem ali stiskanjem na manjši volumen. S takšnim postopkom dobimo končni komercialni produkt, ki se v odvisnosti od nadaljnjega proizvodnega procesa pojavi bodisi v obliki peletov (WPC-zrna) (Slika 12), kot surovina za ekstrudiranje, ali kot končni WPC-produkt v obliki desk, plošč, profilov, itd. (WPC Asia, 2015).



Slika 12: WPC v obliki peletov (WPC Asia)

Izraz WPC se pogosto uporablja kot izraz za opredelitev naravno plastičnih materialov, v katerih kot ena od komponent ni samo les, ampak je lahko eden od naravnih celulozno vlaknastih surovin, kot so na primer riževe luščine, lan, pšenica, bombažni peclji, itd. Običajno se tovrstna komponenta pojavlja v obliki prahu, redkeje pa lahko tudi v obliki vlaken oz. zrn (WPC Asia, 2015).

Večina tovrstnih materialov je izdelanih iz polietilena (PE), polipropilena (PP) ali polivinil klorida (PVC). V osnovi obstajata dva razloga. Prvič, les zahteva temperaturo obdelovanja nižjo od 200 °C, ti polimeri imajo nižjo temperaturo tališča, s čimer tudi preprečimo pooglenitev lesa. Drugič, tržna cena teh polimerov je nižja od nekaterih ostalih, še posebej, če se uporabljajo v reciklirani obliki (WPC Asia, 2015).

WPC-dodatke lahko razdelimo v dve skupini. V skupino funkcionalnih dodatkov, ki se dodajajo za izboljšanje prožnosti, trdnosti, UV-odpornosti, požarne odpornosti, odpornosti na vremenske vplive, itd. Druga skupina pa so predelovalni dodatki, ki izboljšajo predvsem gladkost obdelave in vključujejo maziva, kompatibilizatorje, vlažila, mehčala (za PVC), itd. (WPC Asia, 2015).

3 MATERIAL IN METODE

Celotna raziskava je bila opravljena na Oddelku za lesarstvo v laboratorijih Katedre za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin. Naš glavni cilj je bil raziskati možnosti 3D-tiskanja z mešanico lepila in lesnega prahu na ekstruderskem tiskalniku. Raziskava je bila zastavljena tako, da smo najprej ugotovili potrebno silo za ekstrudiranje različnih mešanic. Nato smo z mešanicami natisnili ploščate preizkušance ter na univerzalnem testirnem stroju Zwick določili upogibno trdnost ter izmerili dimenzijsko obstojnost različnih mešanic. Na koncu smo za demonstracijo še natisnili enostaven izdelek.

3.1 LES

Pri raziskavi smo za vse mešanice uporabili izključno les navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.), ki smo ga zmleli v lesni prah. Les bukovine ima visoko gostoto (680 kg/m^3), je trd in se zelo krči in nabreka. Stabilnost je neugodna, trdnostne lastnosti so glede na gostoto nadpovprečno visoke (npr. dobra upogibna trdnost), elastičnost je nižja. Les je zelo žilav, manj elastičen in zelo trden. Dobro se cepi in predvsem po parjenju se dobro upogiba. Nezaščiten bukovina je podvržena okužbi z glivami in insekti in je le zmerno trajna, zato je potrebna hitra in pravilna manipulacija po poseku. Z izjemo rdečega srca, ki je otiljen, se dobro impregnira (Čufar, 2006).

Bukov les je ob smreki zaradi pogostosti in velikih dimenzij naša gospodarsko najpomembnejša drevesna vrsta. Les je trd, težak, elastičen in na prostem slabše obstojen. Uporaben je za izdelavo pohištva, zlasti upognjenega, parketa, vezanih plošč in za železniške pragove, slabši les uporabljajo celo za pridobivanje celuloze. Ima veliko ogrevalno moč, iz njega pridobivajo kakovostno oglje (Brus, 2008).

3.2 LEPILO

Mešanice so bile narejene iz dveh različnih lepil. Uporabili smo PVAc-lepilo Mitol Mekol D3 ter urea-formaldehidno lepilo W-Leim 3000. Pri lepilih smo predvsem gledali na to, da omogoča enostavno rokovanje ter tekom raziskave ugotovili, da mora dokaj počasi utrditi, da imamo za tiskanje 3D-predmetov dovolj časa.

3.2.1 Mekol D3

Lepilo Mekol D3 je belo mizarsko lepilo, narejeno kot vodna disperzija polivinil acetatnega (PVAc) polimera. Uporablja se zlasti tam, kjer se zahteva vodoodporno lepilo po standardu EN 204 D3. Namenjeno je predvsem za lepljenje vrat, oken, pohištva za vlažne prostore, kuhinjske pulte, stopnice... Lepilo odlikuje predvsem visoka trdnost spoja, kratek čas stiskanja ter povečana odpornost na temperaturo ali organska topila. Lepilo je zelo široko uporabno. Predvsem ga uporabljajo kot montažno lepilo, poleg tega je primerno tudi za hladno, vroče ter visokofrekvenčno lepljenje furniranih ali laminatnih površin. Za kakovostno lepljene morajo biti površine dobro pripravljene - ravne, gladke, suhe, brez prahu, maščob ali drugih nečistoč. Najbolj optimalni pogoji so pri temperaturi 18-20 °C, relativni zračni vlažnosti 60-70 % in vlažnosti lesa 8-10 %. Čas stiskanja je odvisen od temperature okolja, vlažnosti ter vrste lesa, tlaka pri stiskanju in količine nanesenega lepila. Pri širinskem lepljenju je za vroče stiskanje s 70 °C čas stiskanja 4-8 min in 15-30 min pri hladnem stiskanju (20 °C). Pri lepljenju lesa z višjo vlago, pri večjih nanosih lepila in/ali pri nižjih temperaturah lepljenja je potrebno oz. priporočeno ustrezno podaljšanje potrebnega časa stiskanja. Nadaljnja obdelava lepljencev je priporočljiva po 12 urah. Glavna vzroka, da smo ga v raziskavi izbrali, pa sta predvsem dolg odprti čas (pri nanosu lepila 200 g/m² ca. 7 min) ter enostavno čiščenje z vodo, kar nam je predvsem olajšalo delo pri tiskanju.

3.2.2 W-Leim Plus 3000

Lepilo W-Leim Plus 3000 je narejeno na osnovi urea-formaldehida (UF) in ga v lesni industriji uporabljajo predvsem za furniranje ivernih plošč. W-Leim Plus 3000 vsebuje 100 % suhe snovi, kar pomeni, da je med transportom in skladiščenjem v prašni obliki. Med samim procesom furniranja je potrebno lepilo pripraviti v ustrezno vodno disperzijo, ki je odvisna od načina nanašanja. Za ročno nanašanje ga zmešamo v razmerju 5 : 3 (lepilo : voda), v primeru strojnega nanašanja pa ga mešamo z nekoliko več vode v razmerju 5 : 3,5. Odprti čas lepila je odvisen od sobne temperature in je od 20 do 30 min. Pri višjih temperaturah lepilo hitro utrdi. Pri temperaturi 100 °C tanki filmi lepila utrdijo v 2 minutah. Prav tako lepilo utrdi tudi pri sobnih temperaturah, ampak v občutno daljšem času (od 12 do 14 ur). Največje prednosti lepila so enostavno rokovanje, dolg rok trajanja ter enostavno čiščenje z vodo. Vsi ti dejavniki pomembno vplivajo pri izbiri tako v industriji, kakor so tudi pri naši raziskavi.

3.3 PRIPRAVA LESNEGA PRAHU

Za izdelavo lesnega prahu smo uporabili bukov les, ki je bil posušen na okoli 10 % ravnovesne vlažnosti. V prvi fazi smo les z grobim mlinom zmleli v žagovino. S takšnim načinom mletja smo dobili lesne delce v velikosti od 1 do 4 mm. V drugi fazi smo še enkrat zmleli žagovino z bolj finim mlinom (Slika 13). S tem mlinčkom smo lahko žagovino zmleli v zelo drobne delce. Uporabili smo najbolj fino rezilo in pri 18000 vrt/min zmleli žagovino v lesni prah. Nazadnje smo prah še s sitom presejali, da smo izločili ostanke večjih delcev. Za izdelavo mešanic za 3D-tiskanje smo tako uporabili lesni prah z delci, ki smo jih dobili po sejanju na situ z velikostjo odprtin 0,237 mm (Slika 14).



Slika 13: Mlinček za mletje lesa Retsch ZM 200

3.4 PRIPRAVA MEŠANICE LESNEGA PRAHU IN LEPILA

Priprava mešanice lesnega prahu (Slika 14) in lepila je bila dokaj enostavna. Posamezne komponente smo stehtali v 150 ml čašo in jih dobro premešali. Predhodno smo si pripravili preglednico z izračunanimi količinami posameznih komponent za vsako vrsto mešanice (mešanice z različnimi deleži lesa) (Preglednica 2). Paziti smo morali predvsem na natančno tehtanje posameznih komponent mešanice. Ker smo za testiranje/tiskanje na enkrat uporabili dokaj majhno količino mešanice (75 ml), smo morali biti natančni, saj bi lahko prišlo do napak in posledično do nenatančnih rezultatov.

Mešanice smo pripravili tako iz PVAc, kakor tudi iz UF-lepila. Pri pripravi mešanice iz UF-lepila smo imeli nekaj več opravkov, saj smo morali najprej pripraviti vodno disperzijo UF-lepila v prahu. Pripravili smo jo v takšnem razmerju (UF prah : voda), da smo dobili zelo podobno viskoznost, kot jo ima PVAc-lepilo.



Slika 14: Presejan lesni prah

Za vsako vrsto lepila smo pripravili 5 različnih mešanic z različnimi deleži lesa. Za mešanico iz UF-lepila smo pripravili mešanice z 12,5; 15; 17,5; 20 in 22,5 % deležem lesa. Za mešanice iz PVAc-lepila pa smo pripravili mešanice z 15; 17,5; 20; 22,5 in 25 % deležem lesa.

Preglednica 2: Potrebna količina lepila in lesnega prahu za pripravo 75 ml mešanice z različnimi deleži lesa

Delež lesa (%)	0	15	17,5	20	22,5	25
Lepilo (g)	75,00	63,75	61,88	60,00	58,13	56,25
Les (g)	0,00	11,25	13,13	15,00	16,88	18,75

3.5 MERJENJE SILE EKSTRUDIRANJA

Namen merjenja sile ekstrudiranja (Slika 15) je bil, ugotoviti, katere mešanice lepila in lesnega prahu so najbolj optimalne za 3D-tiskanje na 3D-tiskalniku, ki smo ga uporabljali. Zanimal nas je tudi vpliv sestave mešanice na tlak, ki ga potrebujemo za zagotovitev ekstrudiranja materiala skozi izbrano šobo. Želeli smo narediti takšno mešanico lesnega prahu in lepila, da se jo bo dalo s čim manjšo silo potisniti skozi šobo.

Celoten preizkus smo opravili z nastavki na testirnem stroju Zwick/Z100 (Slika 16). Z zmesjo lesnega prahu in lepila smo napolnili kovinsko tubo in z batom mešanico potisnili skozi 3 oziroma 4-mm šobo. Za vsako zmes smo naredili po 3 meritve.



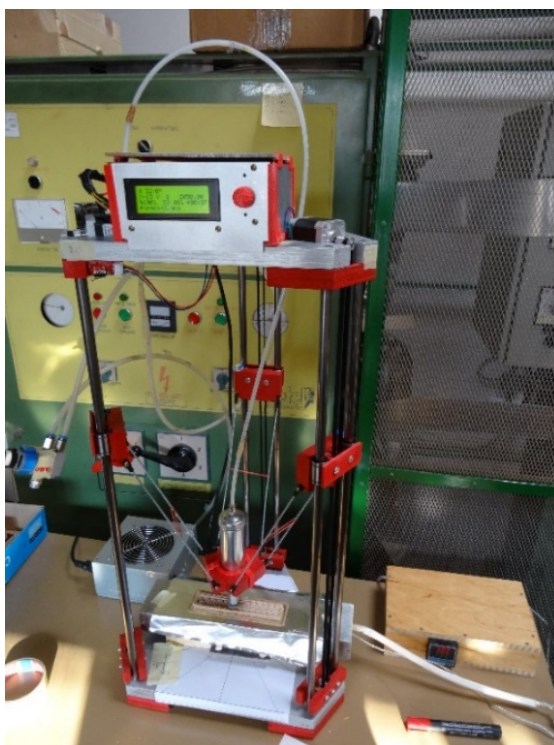
Slika 15: Ekstrudiranje mešanice



Slika 16: Testirna naprava Zwick/Z100

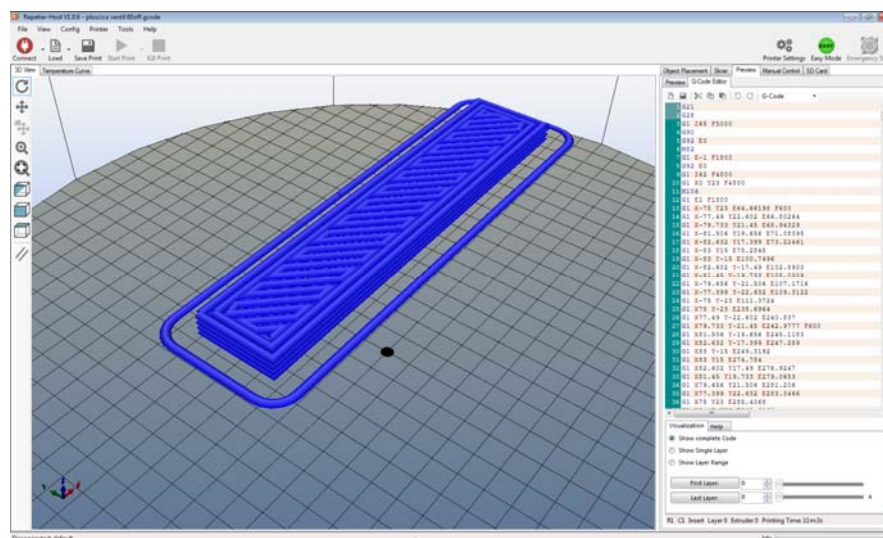
3.6 TISKANJE PREIZKUŠANCEV

V raziskavi smo za tiskanje uporabili doma narejen delta tip 3D-tiskalnik (fiksna miza in premikajoča se tiskalna glava) (Slika 17). Zavedati se moramo, da tovrstni doma narejeni enostavni tiskalniki niso za profesionalno uporabo in zato tudi niso zelo natančni. Uporabni so predvsem za tiskanje prototipov, raznih manjših unikatnih okrasnih predmetov. Mi smo ga uporabili za eksperimentalne namene. Gre za zelo enostaven 3D-tiskalnik s tremi pokončnimi osmi. Vsaka os ima svoj koračni motor, ki pomika tiskalno glavo (Slika 23) po X, Y in Z koordinatah.



Slika 17: Uporabljen 3D-tiskalnik

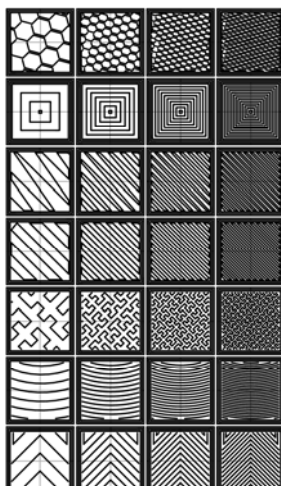
Pred tiskanjem je bilo potrebno pripraviti računalniški model oz. preizkušanec izrisati in ga pretvoriti v ustrezen zapis. Preizkušanec smo izrisali z računalniškim programom SolidWorks. Preizkušanec je bil dimenzij $150 \times 30 \times 8 \text{ mm}^3$ (L $\times$ Š $\times$ D) (Slika 21). Iz SolidWorksa smo model (preizkušanec) izvozili v obliki datoteke .stl. Model smo nato v programu Repetier host pripravili za 3D-tiskanje - razrezali v posamezne sloje in pripravili G-kodo, s katero je bil krmiljen tiskalnik (Slika 18). V G-kodo smo morali naknadno dopisati še nekaj dodatnih ukazov M106 in M107, s katerimi smo krmilili dotok stisnjenega zraka (vklop, izklop) in s tem iztiskanje materiala. Stisnjen zrak je bil krmiljen preko elektropnevmatskega ventila, nameščenega na tiskalniku. Tako smo nadzorovali potek tiskanja (iztiskanje materiala) med potrebnimi netiskalnimi/prostimi prehodi tiskalne glave.



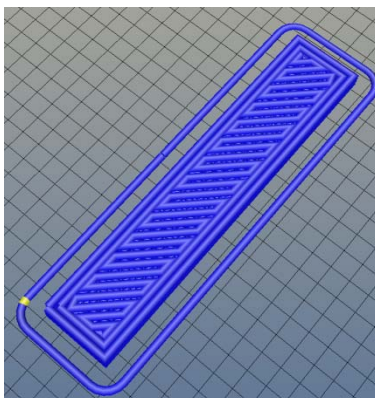
Slika 18: Program Repetier host in model preizkušanca, pretvorjen v G-kodo

Parametri tiskanja so bili nastavljeni na podlagi geometrije preizkušanca ter meritev sil, potrebnih za ekstrudiranje različnih mešanic. Preizkušanec je bil natisnjen v 4 slojih debeline 2 mm. Prekritost posameznega sloja z materialom je bila nastavljena na 85 %. Hitrost pomikanja tiskalne glave je bila nastavljena na 10 mm/s. Iz sil potrebnih za ekstrudiranje smo preračunali potreben tlak za potiskanje bata v tiskalni glavi. Tlak za tiskanje je bil nastavljen od 0,05 do 0,4 N/mm², odvisno od uporabljene mešanice.

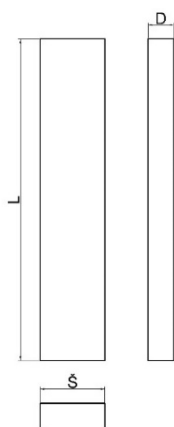
Namen raziskave je bil tudi, ugotoviti trdnost materiala, natisnjenega s 3D-tiskalnikom. Za vsako mešanico smo natisnili po 3 preizkušance, ki smo jih kasneje upogibno obremenjevali in ugotavljali upogibno trdnost. 3D-tiskalnik omogoča tiskanje različnih struktur (Slika 19), ki bi lahko vplivale na trdnost natisnjenih predmetov. Mi smo se odločili natisniti najbolj običajno mrežasto strukturo (Slika 20). Vsekakor bi veljalo preverjati tudi trdnost drugih struktur, ampak zaradi zadostne obsežnosti naše raziskave za enkrat tega še nismo preverili.



19: Možni vzorci in gostota tiskanja (Slic3r Manual)



Slika 20: Izbran vzorec tiskanja



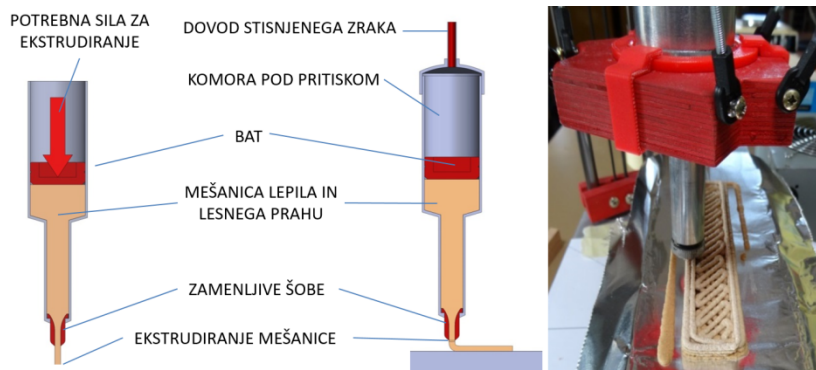
L - dolžina preizkušanca (150 mm)

Š - širina preizkušanca (30 mm)

D - debelina preizkušanca (8 mm)

Slika 21: Shematski prikaz natisnjenega preizkušanca

Pri tiskanju smo imeli nekaj težav s tiskalnikom, kar pa ni vplivalo na rezultate raziskave. Več težav smo imeli s sušenjem samih preizkušancev. Preizkušance smo tiskali na grelni plošči, segreti na 80 °C, zato, ker smo hoteli, da material čim hitreje utrdi in ne steče. Ko so bili preizkušanci natisnjeni, smo jih položili na ploščo, prav tako segreto na 80 °C, kjer smo jih pustili približno 2 uri. Med samim sušenjem so preizkušanci zaradi izhajanja vode iz površine spreminjali obliko ter tudi dimenzije.



Slika 22: Tiskalna glava 3D-tiskalnika

3.7 DOLOČANJE UPOGIBNE TRDNOSTI NATISNjenih PREIZKUŠANCEV

Testiranje smo opravljali na univerzalnem testnem stroju Zwick/Z005 (Slika 24). Vsakemu preizkušancu smo najprej izmerili širino in debelino, ju vnesli v računalniški program ter preizkušanec postavili v nastavek naprave in ga nato upogibno obremenjevali do porušitve oziroma do maksimalno možne deformacije. Hitrost obremenjevanja je bila nastavljena na 15 mm/min. Računalniški program je nato na podlagi izmerjene sile ter izmerjenih dimenzij izračunal modul elastičnosti (Enačba (1)) in upogibno trdnost (Enačba (2)) natisnjenih preizkušancev.

Modul elastičnosti smo izračunali po enačbi:

$$MOE = \frac{L \cdot (F_2 - F_1)}{4 \cdot b \cdot t^3 \cdot (a_2 - a_1)} \quad \dots(1)$$

MOE - modul elastičnosti (N/mm²)

F₂ - 40 % sile porušitve (N)

F₁ - 10 % sile porušitve (N)

a₁ - poves pri sili F₁ (mm)

a₂ - poves pri sili F₂ (mm)

L - razdalja med podporama (mm)

b - širina preizkušanca (mm)

t - višina preizkušanca (mm)

Upogibno trdnost smo izračunali po enačbi:

$$MOR = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad \dots(2)$$

MOR - upogibna trdnost (N/mm²)

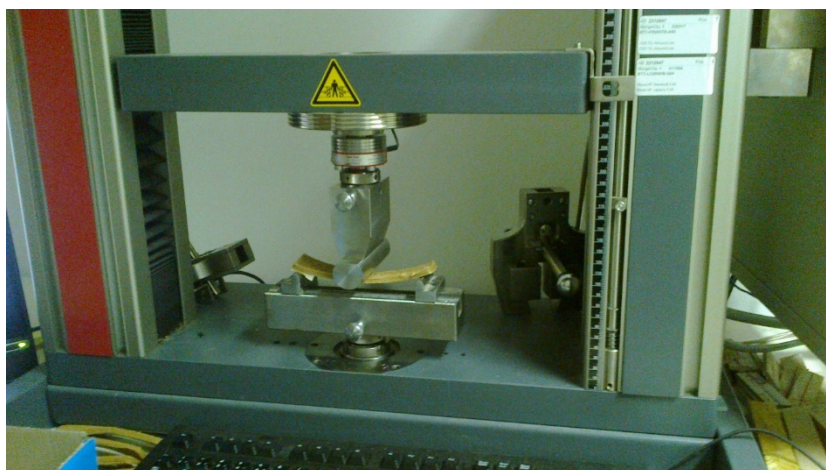
F_{max} - sila porušitve (N)

L - razdalja med podporama (mm)

b - širina preizkušanca (mm)

t - višina preizkušanca (mm)

Preizkušance smo testirali 7 dni po tiskanju, da so se dobro posušili in utrdili. Preizkušanci so se med tem časom sušenja dimenzijsko deformirali, predvsem so se skrčili ter skrivilili. Zaradi velikega krivljenja smo pri testiranju imeli nekaj težav, saj smo testirali krive preizkušance. V nastavke testnega stroja smo krive preizkušance postavili tako, da je bila krivina postavljena navzgor. Na rezultate smo poizkušali čim manj vplivati, zato tudi nismo uporabili fiksne podpore, da se je preizkušanec med obremenjevanjem vseeno lahko postavil v optimalno lego. Za vsako mešanico smo pripravili po 3 upogibne preizkušance.



Slika 23: Vstavljen preizkušane v testni napravi Zwick/Z005

3.8 TISKANJE 3D-IZDELKA

Naš končni cilj je bil natisniti nekakšen izdelek, ki bi prikazoval možnosti tiskanja s 3D-tiskalnikom ter predvsem prikazati možnosti tiskanja 3D-predmetov z mešanico lesnega prahu in lepila. V mislih smo imeli od bolj okrasnih do bolj funkcionalnih predmetov. Pri oblikovanju predmeta smo bili predvsem omejeni pri višini predmeta ter nekonstrukcijski uporabnosti zaradi nezadostne trdnosti materiala. Na koncu smo se odločili natisniti enostavno škatlico s pokrovom (Slika 31), ki nam za tiskanje ni predstavljala večjih težav. Mešanica za tiskanje predmeta je bila pripravljena iz UF-lepila z 20-% deležem lesnega prahu.

4 REZULTATI

4.1 SILA EKSTRUDIRANJA

V Preglednici 3 so prikazane povprečne vrednosti potrebnih sil za ekstrudiranje posameznih mešanic iz PVAc-lepila z različnimi deleži lesa. Meritve so bile opravljene s 4-mm šobo pri treh različnih hitrostih. Poleg povprečnih sil prikazuje tudi potrebno količino posameznih komponent v mešanici (masa lepila oz. lesa) ter povprečno silo ekstrudiranja pri 3-mm šobi (hitrost potiskanja je bila pri 3-mm šobi 10 mm/min).

Preglednica 3: Povprečne vrednosti potrebnih sil za ekstrudiranje posameznih mešanic iz PVAc-lepila

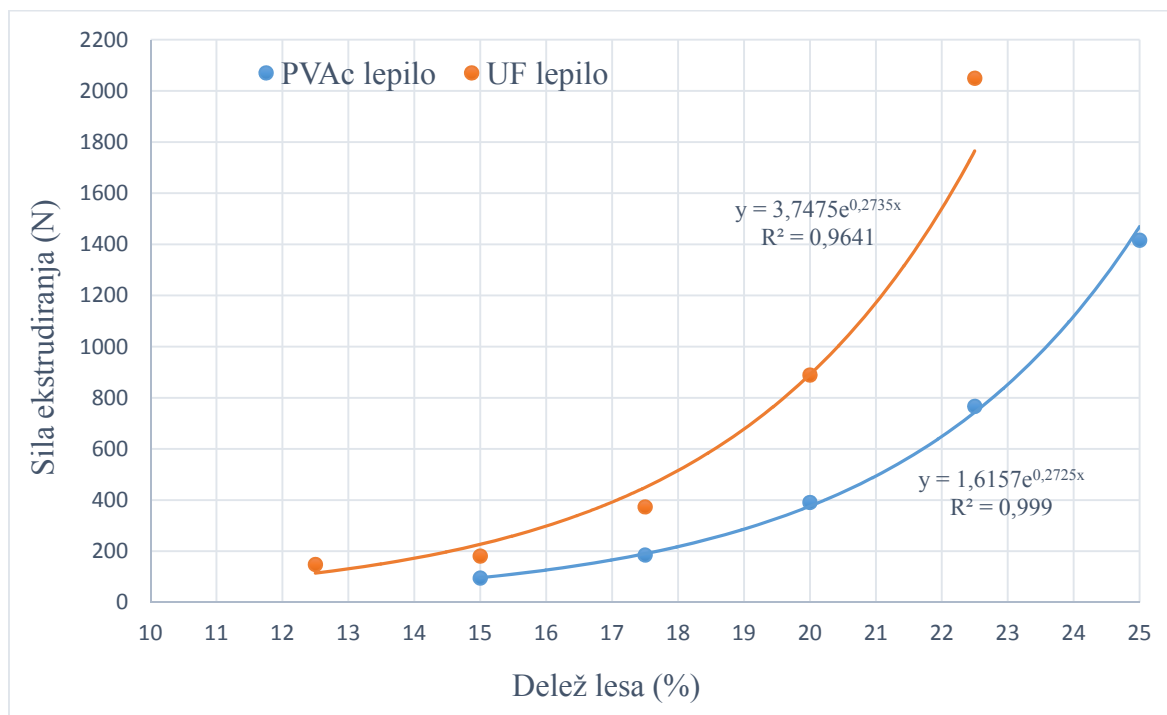
Oznaka mešanice	Delež lesa	Les	Lepilo	Hitrost pomika bata (mm/min)			
				4-mm šoba		3-mm šoba	
				5	10	15	10
(/)	(%)	(g)	(g)	(N)	(N)	(N)	(N)
PVAc-0	0	0	75	/	18,2	/	/
PVAc-15	15	11,3	63,8	/	95,5	/	/
PVAc-17,5	17,5	13,1	61,9	/	185,5	/	/
PVAc-20	20	15	60	281	391,2	438	512
PVAc-22,5	22,5	16,9	58,1	/	766,8	/	/
PVAc-25	25	18,8	56,3	/	1416,3	/	/

V Preglednici 4 so prikazane povprečne vrednosti potrebnih sil za ekstrudiranje posameznih mešanic iz UF-lepila z različnimi deleži lesa. Meritve so bile opravljene s 4-mm šobo pri hitrosti 10 mm/min. Poleg povprečnih sil prikazuje tudi potrebno količino posameznih komponent v mešanici.

Preglednica 4: Povprečne vrednosti potrebnih sil za ekstrudiranje posameznih mešanic iz UF-lepila

Oznaka mešanice	Delež lesa	Les	Lepilo	Voda	Sila
(/)	(%)	(g)	(g)	(g)	(N)
UF-12,5	12,5	12,9	50	40	148,5
UF-15	15	15,9	50	40	181,5
UF-17,5	17,5	19,1	50	40	373,7
UF-20	20	22,5	50	40	889,2
UF-22,5	22,5	26,1	50	40	2049,7

4.2 ODVISNOST SILE EKSTRUDIRANJA OD DELEŽA LESA V MEŠANICI

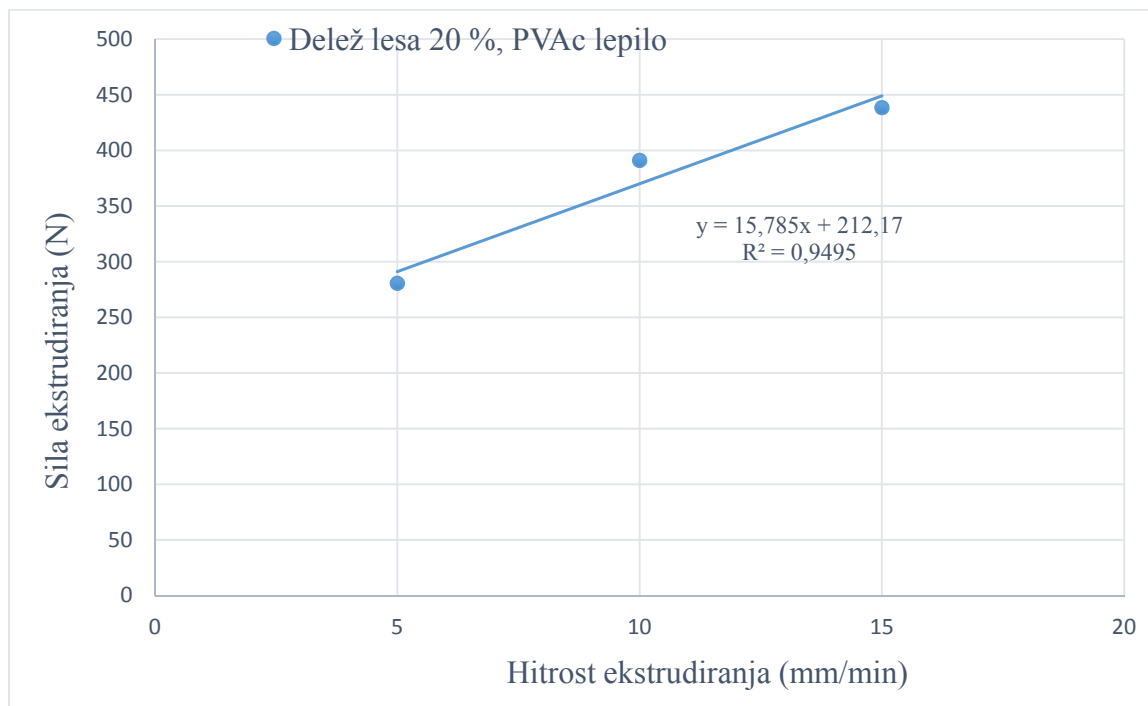


Slika 24: Odvisnost sile ekstrudiranja od deleža lesa v mešanici lesnega prahu in lepila

Odvisnost sile ekstrudiranja od deleža lesa dveh vrst mešanic je prikazana na Sliki 25. Vsaka točka je povprečna vrednost šestih meritev. Oranžna krivulja prikazuje eksponentno funkcijo za mešanico iz UF-lepila, modra krivulja pa prikazuje eksponentno funkcijo za mešanico iz PVAc-lepila. Rezultati so pokazali, da z majhno spremembo deleža lesa v mešanici zelo vplivamo na silo ekstrudiranja.

Determinacijski koeficient (R^2) je zelo blizu vrednosti 1, kar pomeni, da z izbranim eksponentnim modelom pojasnimo večino variabilnosti.

4.3 ODVISNOST SILE POSISKANJA OD HITROSTI EKSTRUDIRANJA PRI MEŠANICI Z 20-% DELEŽEM LESA IN PVAC-LEPILA



Slika 25: Odvisnost sile ekstrudiranja od hitrosti potiskanja pri mešanici z 20-% deležem lesa in lepila Mekol D3

Slika 25 prikazuje odvisnost sile potiskanja od hitrosti ekstrudiranja. Pri preizkusu mešanice iz PVAc-lepila in 20-% deležem lesa smo opravili tudi test s tremi različnimi hitrostmi - 5, 10 in 15 mm/min. Pri hitrosti 5 mm/min je bila sila potiskanja 281 N, pri 10 mm/min 391 N in pri 15 mm/min 438 N.

Rezultati so pričakovani. Opazimo, da se sila potiskanja z višanjem hitrosti ekstrudiranja skoraj linearno povečuje. Z višanjem deleža lesa v mešanici, kakor tudi z višanjem hitrosti potiskanja, se pričakovano sila ekstrudiranja povečuje. Vse skupaj pomeni, da je za zadovoljivo tiskanje potrebno vzpostaviti optimalno ravnovesje deleža lesa v mešanici in pravšnjo hitrost, ki mora biti za malenkost višja, kakor hitrost tiskanja (hitrost pomikanja tiskalne glave). Če vzpostavimo pravšnje razmere, potem lahko učinkovito tiskamo tudi s takšnim materialom.

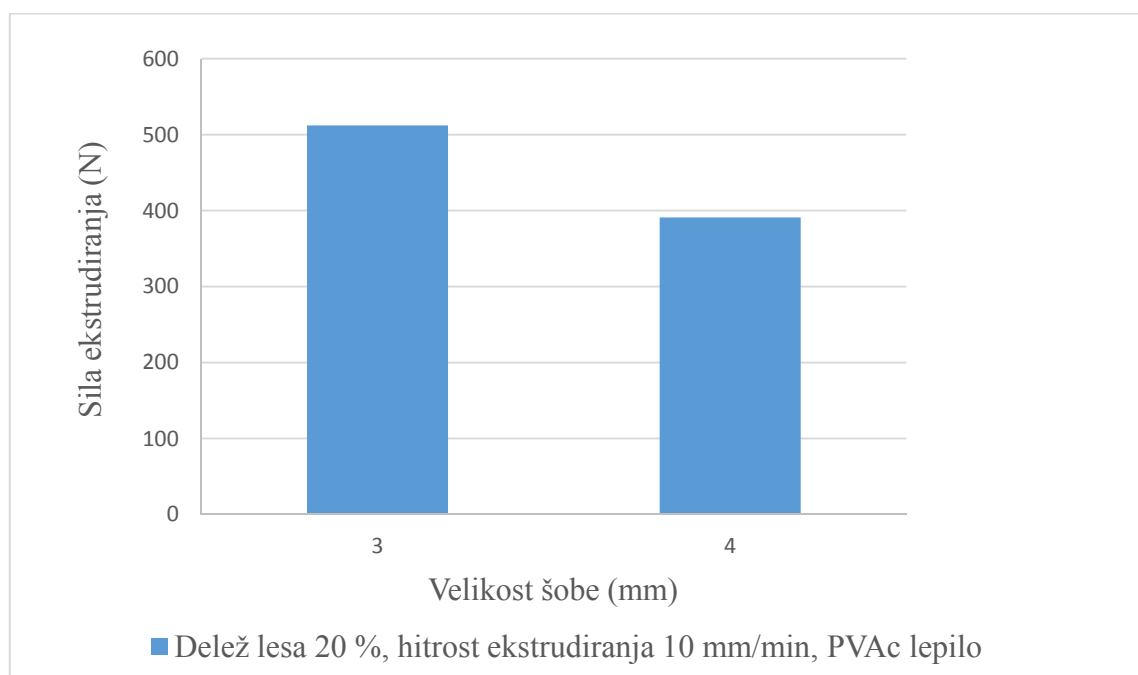
Na podlagi hitrosti pomikanja bata smo izračunali hitrost pomikanja mešanice skozi šobo tiskalne glave (Preglednica 5). V preglednici so predstavljene hitrosti pomikanja tako bata kakor tudi hitrost iztiskanja mešanice skozi šobo, ki je v primerjavi s hitrostjo pomikanja bata pričakovano večja. Rezultat je tak zaradi večje površine bata, ki potiska material skozi manjšo površino šobe. Iz teh rezultatov lahko sklepamo, kakšna naj bi bila hitrost tiskanja (hitrost pomikanja tiskalne glave po površini). Mi smo tiskali s hitrostjo 10 mm/s, kar pomeni, da smo iztislili večjo količino materiala skozi šobo, kakor bi jo lahko s hitrostjo pomikanja tiskalne glave nanесли na tiskalno površino. To je pomenilo, da se je mešanica na tiskalni površini zgoščevala in poleg tega vtisnila v tiskalno podlago/prejšnji sloj in s tem izboljšala povezanost slojev (bolje obdržala na tiskalni površini).

V Preglednici 5 so predstavljene hitrosti potiskanja bata v tiskalni glavi, količina materiala, ki jo potisne bat v sekundi, in hitrosti pomikanja materiala skozi šobo pri dani hitrosti potiskanja bata.

Preglednica 5: Hitrosti pomikanja materiala skozi šobo v odvisnosti od hitrosti potiskanja bata v tiskalni glavi

Hitrost bata (mm/min)	Volumski pretok pri batu	Hitrost iztiskanja materiala skozi šobo
	(mm ³ /s)	(mm/s)
5	90	13
10	179	25
15	269	38

4.4 ODVISNOST SILE EKSTRUDIRANJA OD VELIKOSTI ŠOBE

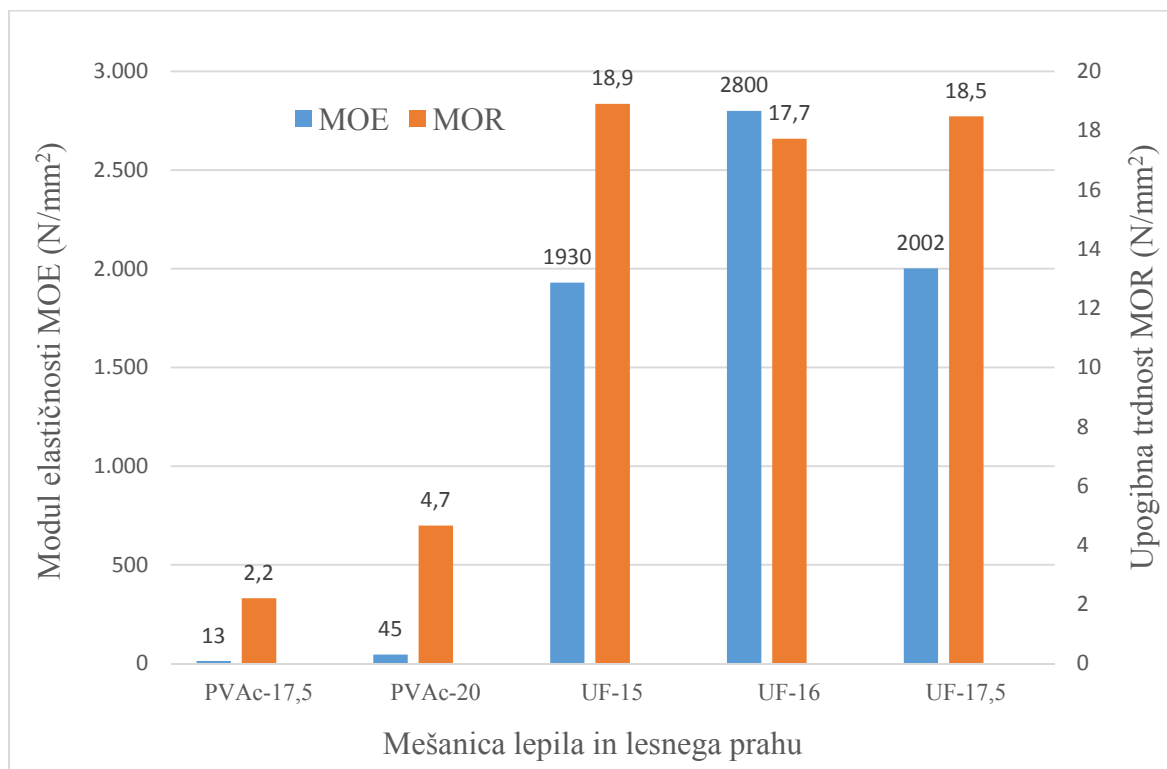


Slika 26: Odvisnost sile ekstrudiranja od velikosti šobe

Slika 26 prikazuje silo potiskanja mešanice lepila in lesnega prahu preko 3 mm in 4 mm velike šobe. Test smo opravili z mešanico iz PVAc-lepila z 20-% deležem lesa in pri hitrosti potiskanja 10 mm/s. Pri 4 mm veliki šobi je sila potiskanja znašala 391 N, pri 3 mm veliki šobi pa 512 N.

Kakor smo pričakovali, je bila sila potiskanja pri manjši šobi višja kakor pri večji šobi, saj smo pri istih pogojih morali potisniti skozi manjšo odprtino več materiala kakor pri večji šobi. Kar pa pomeni, da smo morali potiskati z večjo silo.

4.5 MODUL ELASTIČNOSTI IN UPOGIBNA TRDNOST V ODVISNOSTI OD DELEŽA LESA



Slika 27: Modul elastičnosti in upogibna trdnost v odvisnosti od deleža lesa

Slika 27 prikazuje modul elastičnosti (MOE) in upogibno trdnost (MOR) različnih mešanic. Meritve so bile opravljene z mešanicami iz PVAc-lepila s 17,5 ter 20-% deležem lesa in iz UF-lepila s 15; 16 ter 17,5-% deležem lesa.

Pri preizkušanjih, narejenih iz mešanice PVAc-lesni prah, se je izkazalo, da so preizkušanci zelo prožni. Pri obremenjevanju se preizkušanci niso porušili, kar pomeni, da so imeli zelo veliko deformacijo. Zaradi tega je bil modul elastičnosti zelo nizek. Podobno se je izkazalo pri upogibni trdnosti. Za mešanico s 17,5-% deležem lesa je upogibna trdnost znašala skromnih 2,9 N/mm², za mešanico s 20-% deležem lesa pa 4,7 N/mm².

Pri preizkušanjih, narejenih iz UF-lepila, so bili rezultati precej boljši. Preizkušanci so se pri obremenjevanju kar hitro zlomili in niso imeli večje deformacije. Izkazalo se je, da so preizkušanci narejeni iz mešanice UF-lepilo-lesni prah trdnejši. Modul elastičnosti je pri mešanici s 15-% deležem lesa znašal 1930 N/mm², pri 16-% deležu lesa 2800 N/mm² ter pri 17,5-% deležu lesa 2002 N/mm². Upogibna trdnost je bila v primerjavi z mešanico iz lepila Mekol D3 prav tako nekoliko višja: 18,9; 17,7 ter 18,5.

Pričakovali smo, da bodo preizkušanci, natisnjeni iz mešanice PVAc-lesni prah, bolj prožni in da bodo preizkušanci, natisnjeni iz mešanice UF-lesni prah, bolj krhki. Lahko rečemo, da je tako ena kakor druga vrsta mešanic uporabna za različne vrste izdelkov. Mešanica PVAc-lesni prah je zaradi velike prožnosti uporabna za izdelke, ki so bolj pod dinamično obremenitvijo. Mešanica UF-lesni prah pa je bolj uporabna za izdelke z višjo trdoto, ki so bolj površinsko obremenjeni.

4.6 DIMENZIJSKA STABILNOST



Slika 28: Preizkušanec iz PVAc-lepila takoj po tiskanju (levo) in po 14 dneh sušenja (desno)

Na Sliki 28 je prikazan preizkušanec takoj po tiskanju in po 14 dneh sušenja. Natisnjen je bil iz mešanice PVAc-lesni prah z 20-% deležem lesa. Preizkušanec z dimenzijami $158,5 \times 33,2$ mm (L $\times$ Š) se je po 14 dneh skrčil na $147,4 \times 29,38$ mm.



Slika 29: Preizkušanec iz UF-lepila takoj po tiskanju (levo) in po 14 dneh sušenja (desno)

Slika 29 prav tako prikazuje preizkušanec takoj po tiskanju in po 14 dneh sušenja. Preizkušanec na tej sliki je natisnjen iz mešanice UF-lesni prah z 20-% deležem lesa. Iz $150,4 \times 30,5$ mm se je skrčil na $147,6 \times 29,4$ mm. Poleg skrčka se je preizkušanec zelo deformiral.

Preglednica 6: Izmerjene vrednosti preizkušancev takoj po tiskanju in po 14 dneh sušenja

Oznaka mešanice	Dimenzije takoj		Dimenzije 7 dni		Skrček po dolžini	Skrček po širini
	po tiskanju		po tiskanju			
	l_1	$š_1$	l_2	$š_2$		
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(%)
PVAc-20	158,5	33,2	147,4	29,4	7,0	11,4
UF-20	150,4	30,5	147,6	29,4	1,9	3,6

Predvidevamo, da so se preizkušanci skrivali oziroma neenakomerno deformirali zaradi neenakomernega sušenja čez celoten prerez. Površina se je hitreje posušila, kar je onemogočalo sušenje sredice preizkušancev. Med sušenjem je vlažnostni gradient po prerezu povzročal različne skrčke, kar je povzročilo krivljenje. Upoštevati pa moramo, da smo preizkušance sušili na 80 °C segreti površini, samo 2 uri, nato pa 14 dni pri sobni temperaturi. Če bi preizkušance sušili pri višjih temperaturah krajši čas, bi se morda hitreje posušili, kar pa ostaja še odprto vprašanje za naslednje raziskave.

4.7 NATISNJENI IZDELEK

Kot prikaz možnosti tiskanja z mešanico lepila in lesnega prahu nam je na koncu uspelo natisniti enostaven izdelek.



Slika 30: Natisnjeni izdelki

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

Na področju umetnih mas, kovin in drugih podobnih materialov 3D-tiskanje obstaja že vrsto let. V tem času je bilo razvitih več različnih tehnologij 3D-tiskanja, ki so se izboljševale in omogočale hitrejša, natančnejša ter kakovostnejša tiskanje predvsem umetnih materialov ter kovin. V zadnjih letih so se začele razvijati tudi 3D-tehnologije, primerne za tiskanje ostalih, bolj kompleksnih 3D-predmetov, ter tudi ostalih materialov. Razvijajo se tehnologije, primerne za tiskanje od mikroskopskih 3D-predmetov do velikih arhitekturnih objektov. Vsekakor se 3D-tehnologija razvija v smer, da jo bo možno uporabiti v najrazličnejše namene - v vsakdanji profesionalni kakor tudi osebni rabi - za tiskanje najrazličnejših 3D-predmetov iz vseh vrst materialov.

Namen naše raziskave je bil razviti material na osnovi lesnega prahu in lepila, ki bi omogočal 3D-tiskanje različnih 3D-predmetov. Za tiskanje smo uporabili obstoječi ekstrudijski tiskalnik, ki omogoča tiskanje raznih pastam podobnih materialov. Med samo raziskavo smo imeli kar nekaj težav z materialom kakor tudi s samim tiskalnikom. Tekom raziskave smo tiskalnik spreminjali in ga izboljševali ter ga na koncu prilagodili do takšne mere, da je omogočal tiskanje z razvitim materialom.

Raziskavo smo pričeli z zelo širokim spektrom možnosti, predvsem pri izbiri in razvoju materiala. Na začetku nismo natančno vedeli, kakšne vrste lesnega prahu, lepila in kakšni dodatki bi najboljše ustrezali našemu cilju, zato smo veliko eksperimentirali in iskali najboljše rešitve. Naš cilj je bil razviti material na osnovi lesnega prahu, ki povezuje lepilo. Osnovni mešanici smo poizkušali dodati različne materiale, ki bi izboljšali pomanjkljivosti osnove. Poizkušali smo z dodajanjem moka in mavca za zmanjšanje stekanja na tiskalni površini ter tudi z dodajanjem poliuretanskega lepila za izboljšanje dimenzijske stabilnosti. Vsi ti dodatki se tekom raziskave niso najboljše obnesli in so povzročali še nekaj dodatnih težav.

Raziskavo smo nadaljevali z razvitim osnovnim materialom, lesni prah v kombinaciji z lepilom. Iz bukovega lesa, ki smo ga zmleli v prah (velikost delcev od 0,001 do 0,237 mm), smo pripravili več različnih mešanic iz dveh vrst lepil. Uporabili smo navadno belo mizarsko PVAc-lepilo Mekol D3 in urea-formaldehidno lepilo W-Leim 3000. Pripravili smo mešanice z 12,5; 15; 17,5; 20 in 22,5-% deležem lesa, na podlagi katerih smo izmerili potrebno silo potiskanja skozi 3 in 4 mm veliko šobo. Test smo opravili s tremi različnimi hitrostmi (5, 10 in 15 mm/min). S tem testom smo ugotovili potrebno silo potiskanja, ki jo je bilo potrebno kasneje s stisnjenim zrakom vzpostaviti na tiskalni glavi. Obenem pa smo ugotovili tudi optimalno hitrost pomikanja tiskalne glave ob tiskanju.

Drugi cilj raziskave je bil raziskati trdnost končnega natisnjene ter posušenega oz. utrjenega materiala. Da smo trdnost lahko preizkušali, smo s tiskalnikom natisnili upogibne preizkušance dolžine 160 mm, širine 30 mm in debeline 8 mm. Preizkušanci so se med procesom sušenja zelo dimenzijsko deformirali. Preizkušanci, natisnjeni iz PVAc-lepila, so se skrčili za okoli 10 %, preizkušanci natisnjeni iz UF-lepila pa so se skrčili nekaj manj, približno za 2,5 %. Testiranje smo opravili na univerzalnem testnem stroju ZWICK/Z005, na katerem smo imeli ne malo težav z vpenjanjem preizkušancev, ker so se le-ti pri sušenju poleg krčenja kar precej ukrivili oz. oblikovno deformirali. Preizkušanci, narejeni iz mešanice PVAc-lepila in lesnega prahu, so izkazali zelo nizko upogibno trdnost (največja izmerjena $4,7 \text{ N/mm}^2$), kakor tudi modul elastičnosti. Preizkušanci, natisnjeni iz PVAc-lepila, so bili na otip zelo prožni in elastični ter niso dajali občutka o veliki trdnosti, za razliko od preizkušancev, natisnjenih iz mešanice UF-lepila in lesnega prahu, ki pa so izkazali nekaj boljše rezultate. Največja izmerjena upogibna trdnost preizkušancev, natisnjenih iz mešanice UF-lepila in lesnega prahu, je znašala $18,9 \text{ N/mm}^2$ pri 15-% deležu lesa, najvišji izmerjeni modul elastičnosti pa 2800 N/mm^2 pri 16-% deležu lesa v mešanici.

Zaradi nizkega deleža lesa v mešanici, les nima večjega vpliva na samo trdnost materiala. Trdnost materiala je v tem primeru bolj kot ne odvisna od trdnosti samega utrjenega lepila, kar se je pokazalo in je tudi razumljivo glede na delež lesa v materialu. Predvidevamo, da se z večjim deležem lesa, trdnost ne bi drastično povečala. Da bi izdelali trdnejši material, bi morali vsekakor uporabiti večje delce lesa, npr. vlakna ali iveri, kar bi pomenilo, da bi bilo potrebno uporabiti povsem drugačno tehniko 3D-tiskanja.

Namen celotne raziskave je bil s 3D-tiskalnikom natisniti končen 3D-izdelek iz razvite mešanice lepila in lesa. Natisnili smo nekaj enostavnih ploščatih predmetov. Naš namen je bil dosežen, saj nam je uspelo natisniti enostaven predmet, za kaj bolj zahtevnega pa bo potrebno raziskati dodatne možnosti in rešitve, ki so se pokazale med raziskavo in bi vsekakor bile vredne nadaljnjih raziskav.

5.2 SKLEPI

Na podlagi opravljene raziskave lahko sklepamo, da:

- je mešanico iz lepila in lesnega prahu možno uporabiti za 3D-tiskanje enostavnih ploščatih predmetov;
- je 3D-tiskalnik možno uspešno uporabiti za tiskanje mešanice lepila in lesnega prahu;
- so trdnostne lastnosti natisnjenega materiala odvisne od lastnosti uporabljenega lepila in deloma od deleža lesa;
- so preizkušanci, natisnjeni iz mešanice PVAc-lepila in lesnega prahu, izkazovali zelo nizek modul elastičnosti (MOE) in nizko upogibno trdnost (MOR);
- so preizkušanci, natisnjeni iz mešanice UF-lepila in lesnega prahu, izkazovali boljše trdnostne lastnosti kot preizkušanci, natisnjeni iz mešanice PVAc-lepila in lesnega prahu, ampak so bili zelo krhki.

Glede na rezultate opravljene raziskave lahko zaključimo, da je tridimenzionalno tiskanje z mešanico lepila in lesnega prahu z določenimi omejitvami možno. Z osnovno mešanico je možno učinkovito tiskati 3D-predmete ploščatih dimenzij z omejeno debelino. Uspelo nam je natisniti nekaj enostavnih predmetov. Za tiskanje bolj zahtevnih predmetov pa bodo potrebne dodatne raziskave na področju materiala kakor tudi na področju drugačnih 3D-tehnik tiskanja.

6 POVZETEK

Tehnologija tridimenzionalnega tiskanja se v zadnjem času sunkovito razvija in postaja zelo pomembna panoga v industriji kakor tudi v širši osebni rabi. Z razvojem tehnologije je 3D-tiskanje postalo zelo dostopno za vsakogar in zelo primerno za hitro prototipiranje ali za hitro izdelovanje predmetov zahtevnih oblik. Pri 3D-tiskanju gre za izdelovanje predmetov iz računalniškega modela, ki ga oblikujemo oz. dizajniramo s pomočjo računalniških programov in tako ustvarjamo fizično uporabne predmete.

Naša raziskava je bila zasnovana z namenom raziskati možnosti 3D-tiskanja z mešanico lepila in lesnega prahu. Pri raziskavi smo se ukvarjali tako z razvojem razpoložljive tehnologije kakor tudi z razvojem samega materiala, kateremu smo posvetili največ pozornosti. Opravili smo meritve reoloških lastnosti še tekočega materiala ter meritve trdnostnih lastnosti utrjenega materiala.

Ker tiskalna glava ni omogočala visokih tlačnih sil, smo material morali prilagajati, da je bil ustrezno viskozen. Zato smo morali ugotoviti silo ekstrudiranja skozi šobo pri več različnih vrstah mešanic. Za primerjavo smo silo izmerili z različno velikimi šobami ter pri različnih hitrostih ekstrudiranja. Po pričakovanjih so rezultati pokazali, da sila ekstrudiranja narašča z večanjem deleža lesa v mešanici. Podobno je tudi s primerjavo šob ter hitrostjo, z manjšanjem premera šobe oziroma večanjem hitrosti se sila ekstrudiranja povečuje. Poizkušali smo ugotoviti, katera mešanica lepila in lesnega prahu je najbolj optimalna za tiskanje. Na koncu se je izkazalo, da je najbolj optimalna mešanica z 20-% deležem lesa tako pri mešanici iz PVAc-lepila kakor tudi UF-lepila. Za to mešanico smo se odločili predvsem zaradi ne previsokih sil ekstrudiranja.

Pri samih trdnostnih lastnostih nas je najbolj zanimala upogibna trdnost. Pričakovali smo zelo podobne rezultate kot pri reoloških lastnostih, a na koncu se je le izkazalo, da so lastnosti mešanice lepila in lesnega prahu predvsem odvisne od lastnosti lepila. Pričakovali smo, da se bo trdnost z večanjem deleža lesa povečala bolj očitno, kakor se je na koncu izkazalo. Za mešanice iz PVAc-lepila in lesnega prahu smo takoj po končanem sušenju lahko opazili, da preizkušanci izkazujejo plastične lastnosti, kar se je kasneje pri testiranju še bolj izrazito izkazalo, ker jih nismo mogli obremeniti do porušitvene sile (preizkušanec se kljub veliki deformaciji ni zlomil). Modul elastičnosti ter upogibna trdnost sta bila zelo nizka, vseeno smo pričakovali nekoliko boljše rezultate. Pri mešanici iz UF-lepila in lesnega prahu je bilo nekoliko drugače. Modul elastičnosti in upogibna trdnost sta bila glede na vsebnost lesnega prahu pričakovana. Iz rezultatov smo opazili, da ni večjih razlik z različnimi deleži lesa v mešanici. Kot že omenjeno, lastnosti končnega materiala niso tako odvisne od deleža lesa v mešanici, kakor so odvisne od lastnosti samega lepila. To je vsekakor pričakovati, saj je delež lepila v mešanici veliko večji v primerjavi z deležem lesa.

Glede na to, da nismo zasledili, da bi se s podobno tematiko že kdo ukvarjal, lahko rečemo, da je s takšno tehnologijo in takšnim materialom možno natisniti enostavne ploščate tridimenzionalne predmete. Potrebno pa je upoštevati določene trdnostne ter dimenzijske omejitve, ki nam onemogočajo večje oz. širše uporabnosti natisnjenih izdelkov.

7 VIRI

- Bártolo P. J. 2011. Stereolithography: Materials, Processes and Applications. Leiria, Polytechnic Institute of Leiria: 340 str.
- Brus R. 2008. Dendrologija za gozdarje: študijsko gradivo. 2. Natis. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 311 str.
- Čufar K. 2006. Anatomija lesa; študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 185 str.
- Evans B. 2012. Practical 3D Printers. The science and art of 3D printing. New York, Springer Science+Business Media: 306 str.
- Fused Deposition Modeling. 2015. Stratasys. 26.10.2015
<http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology> (18.12.2015)
- Fused Deposition Modeling. 2009. Custompartnet. 5.9.2009
<http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/fdm.png> (17.10.2015)
- Glavičič A. 2014. Zgodovina 3D tiska. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovno tehnična fakulteta, Oddelek za tekstilstvo: 2 str.
- History of 3D Printing. 2012. 3D Printing Industry. 20.4.2012
<http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/> (17.10.2015)
- Initial extruder design. 2013. 3D Printing of Ceramics for the Notre Dame. 12.08.2013
http://blogs.nd.edu/3dp/files/2013/08/081213_2048_3DPrinting01.jpg (17.10.2015)
- Inkjet prašno tiskanje. 2009. Custompartnet. 5.9.2009
<http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/3dp.png> (17.10.2015)
- Izdelek iz Laybricka. 2015. Nick Lievendag. 15.10.2015
<http://nicklievendag.com/wp-content/uploads/laybrick-1024x576.jpg> (17.10.2015)
- Izdelek iz Laywoo-3D/ja. 2015. Get3D. 15.10.2015
<http://get3d.pl/43-215-thickbox/laywood.jpg> (17.10.2015)

- Kariž M., Šernek M., Kitek Kuzman M. 2016. Use of wood powder and adhesive as a mixture for 3D printing. European journal of wood and wood products (Holz als Roh- und Werkstoff), 74: 123-126
- Kovač M. 1999. Selektivno lasersko sintranje modelov. PlastForma, 30, 4: 16-18
- Laminated Object Manufacturing. 2009. Custompartnet. 5.9.2009
<http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/lom.png> (17.10.2015)
- LayBrick Filament. 2015. Feed the printer. 15.10.2015
<http://feedtheprinter.com/special-filament/laybrick-filament/laybrick-3-mm>
(17.10.2015)
- Laywoo-D3. 2015. Lulzbot. 15.10.2015
https://www.lulzbot.com/sites/default/files/styles/uc_product_full/public/p/newimages/2013/06/DSC_0019_0.JPG?itok=j5RnOgFa (17.10.2015)
- Lesno plastičen kompozit. 2015. WPC Asia. 31.10.2015
<http://wpc-composite-decking.blogspot.si/p/what-is-wood-plastic-composite-wpc.html> (26.11.2015)
- Mekol D3. 2005. Tehnični list. Mitol, tovarna lepil, d.d., Sežana, (12.2.2005)
- Mitopur E11. 2005. Varnostni list. Mitol, Tovarna lepil, d.d., Sežana, (3.3.2005)
- Možni vzorci in gostota tiskanja. 2015. Slic3r Manual. 15.10.2015
<http://manual.slic3r.org/expert-mode/infill> (26.11.2015)
- Polyjet. 2015. Stratasys. 26.10.2015
<http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/polyjet-technology> (18.12.2015)
- Polyjet. 2015. Rapid Prototyping. 15.10.2015
<http://blog.nus.edu.sg/u0804594/files/2011/10/Polyjet-Process.png> (17.10.2015)
- Selective laser sintering. 2014. Encyclopædia Britannica. 2.4.2014
<http://media-2.web.britannica.com/eb-media/19/153619-004-66FCF088.jpg>
(17.10.2015)

Stereolithography. 2015. Wikimedija Foundation Inc. 28.8.2015

https://en.wikipedia.org/wiki/File:Stereolithography_apparatus_vector.svg
(17.10.2015)

Šernek M., Kutnar A. 2008. Polivinilacetatna lepila za les. Les, 60, 10: 364-369

Šernek M. 2005. Lepila za les (študijsko gradivo). Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 78 str.

Warnier C. 2014. Printing Things. Visions and Essentials for 3D Printing. Berlin, Gestalten: 256 str.

What is 3D printing. 2014. 3D Printing. 15.6.2014

<http://3dprinting.com/what-is-3d-printing/> (17.10.2015)

WPC v obliki paletov. 2015. WPC Asia. 31.10.2015

<http://wpc.asia/sites/default/files/styles/taxonomy-catalog/public/taxonomy-product-type/npe-pellets.jpg?itok=Ij8fkdkz> (26.11.2015)

W-Leim Plus 3000. 2012. Technisches merkblatt. Henelit Lackfabrik GmbH. Villach, (1.3.2012)

3D Printing Technologies & Materials Overview. 2013. Materialise NV. 24.9.2013

<http://manufacturing.materialise.com/all-available-materials> (17.10.2015)

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju prof. dr. Milanu Šerneku za strokovno pomoč pri nastajanju in oblikovanju magistrske naloge. Zahvalil bi se tudi recenzentki izr. prof. dr. Manji Kitek Kuzman za strokovno mnenje o tem delu.

Velika zahvala za nastanek te magistrske naloge gre tudi somentorju doc. dr. Mirku Karižu, ki mi je veliko pomagal in svetoval na osnovi lastnih izkušenj s 3D-tiskanjem.

Rad bi se iskreno zahvalil tudi vsem mojim bližnjim, ki so me med študijem iskreno spodbujali in podpirali.

PRILOGE

Priloga A:

Podatki meritev sile ekstrudiranja mešanice iz PVAc-lepila

Material			Meritve pri hitrosti 10 mm/min						Povprečne vrednosti pri 4 mm šobi in hitrostih:			Šoba
Delež lesa	Les (g)	Lepilo (g)	Meritev 1	Meritev 2	Meritev 3	Meritev 4	Meritev 5	Meritev 6	15 mm/min	10 mm/min	5 mm/min	3 mm
0	0	75	19	17	17	20	18	18	/	18	/	/
15	11	64	94	89	86	110	97	97	/	96	/	/
17,5	13	62	208	182	178	182	182	181	/	186	/	/
20	15	60	444	374	391	374	365	399	438	391	281	512
22,5	17	58	719	686	786	804	787	819	/	767	/	/
25	19	56	1422	1462	1469	1266	1415	1464	/	1416	/	/

Priloga B:

Podatki meritev sile ekstrudiranja mešanice iz UF-lepila

Količina materiala				Meritev						Povprečje 10mm/min, šoba 4 mm
Delež lesa	Les (g)	Lepilo (g)	Voda (g)	Meritev 1	Meritev 2	Meritev 3	Meritev 4	Meritev 5	Meritev 6	
12,5	12,9	50	40	134	135	163	148	158	153	149
15	15,9	50	40	164	180	190	173	198	184	182
17,5	19,1	50	40	354	352	389	381	390	376	374
20	22,5	50	40	890	972	1034	817	806	816	889
22,5	26,1	50	40	2216	2016	2023	2083	1984	1967	2050

Priloga C:

Podatki meritev sil ekstrudiranja pri različnih hitrostih mešanice iz PVAc-lepila z 20-% deležem lesa

Hitrost (mm/min)	Meritev 1	Meritev 2	Meritev 3	Meritev 4	Meritev 5	Meritev 6	Povprečje
15	405	385	406	495	473	466	438
10	444	374	391	374	365	399	391
5	239	256	268	308	303	309	281

Priloga D:

Podatki meritev sil ekstrudiranja pri različnih velikostih šobe mešanice iz PVAc-lepila z 20-% deležem lesa

Velikost šobe (mm)	Meritev 1	Meritev 2	Meritev 3	Meritev 4	Meritev 5	Meritev 6	Povprečje
4	444	374	391	374	365	399	391
3	506	525	517	501	515	510	512

Priloga E:

Podatki meritev testiranja trdnosti natisnjenih preizkušancev

	Dimenzije preizkušanca			Poves pri sili F_1	Poves pri sili F_2	10 % sile porušitve	40 % sile porušitve	F_{max}	MOR	MOE
	l	d	š	a_1	a_2	F_1	F_2			
Oznaka mešanice	mm	mm	mm	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N	N/mm ²	N/mm ²
PVAc-20	130	5,12	28,2	0,67	8,82	1,48	3,96	17,3	4,56	44
PVAc-20	130	4,6	27	0,87	10	1,98	5,02	16,2	5,51	69
PVAc-20	130	5,33	27	2,03	10	2,44	4,77	20,3	5,17	39
PVAc-20	130	4,6	27	1,96	11,3	1,83	3,13	9,9	3,39	29
pov.								15,9	4,7	45,4
PVAc-17,5	130	5,3	27	3,64	9,96	1,73	2,65	12	3,08	20
PVAc-17,5	130	4,8	27	2,14	9,98	1,15	1,31	4,3	1,35	4
PVAc-17,5	130	4,9	27	2,76	9,61	1,49	2,1	7,8	2,34	15
PVAc-17,5	130	4,3	27	4,54	10	1,72	2,01	5,3	2,05	13
pov.								7,3	2,2	13,1
UF-16	130	5,6	27					96,4	22,2	2180
UF-16	130	6	27					106	21,2	2540
UF-16	130	4,3	27					32,7	12,8	4950
UF-16	130	7	27					99,6	14,7	1530
pov.								83,7	17,7	2800
UF-15	130	6,6	27,45					95,5	15,6	1580
UF-15	130	6,34	27,9					131	22,7	2110
UF-15	130	5,97	32					112	19,2	1740
UF-15	130	6,58	32					127	17,9	1980
UF-15	130	4,6	27,5					57	19,1	2240
pov.								106,8	19,7	2018
UF-17,5	130	7,29	27,49					115	15,3	1430
UF-17,5	130	6,67	29,83					134	19,7	2400
UF-17,5	130	6,25	27,9					102	18,3	2320
UF-17,5	130	6,33	28,21					121	20,9	2630
UF-17,5	130	6,8	28,5					123	18,2	1230
pov.								120	19,275	2145

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Luka ŽAKELJ

**TRIDIMENZIONALNO TISKANJE Z MEŠANICO
LEPILA IN LESNEGA PRAHU**

MAGISTRSKA NALOGA

Magistrski študij - 2. stopnja

Ljubljana, 2016