

Kõrgem Kunstikool Pallas
Mööbliosakond

Puidu 3D printimine: materjal ja tehnoloogia
Lõputöö

Priit Kangur

Juhendajad: prof. Kurmo Kõnsa PhD

Rasmus Eist

Tartu 2020

SISUKORD

SISSEJUHATUS	3
1. 3D PRINTIMISE TEHNOLOOGIAD	4
1.1 Ajalugu ja areng	5
1.2 Erinevad printimistehnoloogiad	8
1.2.1 Sulatatud kihtlisandusega modelleerimine	10
1.2.2 Selektiivne lasertehnoloogia.....	15
1. PUIDU 3D PRINTIMISEKS KASUTATAVAD MATERJALID	17
1.1 FDM puiduflament	17
1.1.1 Filamendi hügrosoopsus.....	21
1.1.2 Filamendi paksuse erinevused	29
1.1.3 Ülevaade olemasolevatest puidufilementidest	33
2.2 Filamendi valmistamine	35
2.3 Sideaine PLA/ filamendi polümeer	38
2.4 Pintimisprotsess ja selle mõjutegurid	45
2.4.1 Protsessi kirjeldus- ideest 3D prinditud objektini	45
2.4.2 Temperatuuri muutmine printimise ajal	48
2. PUIDU 3D PRINTIMISE KATSETUS	50
KOKKUVÕTE	60
SUMMARY	62
KASUTATUD KIRJANDUS	64

SISSEJUHATUS

Puidu 3D printimise valisin ma oma lõputöö teemaks päris mitmel põhjusel. Minu minevik on tugevalt põimunud loodusega ja selle uurimine erinevate nurkade alt on olnud mulle väga hingelähedane. Minu maailm on viinud mind ühe rohkem puidu ja teiste looduslähedaste materjalide juurde. Olen pikalt otsinud võimalusi, kuidas luua võimatut ja disainida vorme, mida traditsiooniliselt on keerukas valmistada. Rohked katsetused puidunikerduste ja erinevate materjalidega on toonud mind innovaatilise 3D printimise maailma, mis avab võimaluse luua enam kui muud vahendid. Mida rohkem olen uurinud antud valdkonda, seda enam on mu silm särama läinud selle ääretult põneva tehnoloogia võimalustest, mis võimaldab printida puitu ruumiliselt.

Teema on aktuaalne väga erinevate nurkade alt, 3D printimine on disainis ja materjalikäsitluses avanud värskest uue ajajärgu ja kiirelt arendatakse nii materjale kui printimise süsteeme, inimeste huvi 3D printimise võimaluste vastu on tugevalt tõusutrendis. Kuid sellega on kaasnenud uus probleem, mis hõlmab 3D printerite ühte kõige traditsioonilisemat materjali plastikut, mis annab looduskeskkonnale negatiivset lööki. Puidufilament on see-eest tugev alternatiiv, mis annab võimaluse vähendada negatiivset mõju loodusele.

Kuna eestikeelseid kirjandust 3D printimise kohta on väga vähe, soovin oma lõputööga anda laiemale ringkonnale teadlikust selle loodusliku materjali printimise kohta. Hetkel on võimalik leida 3D printimisest kaks magistritööd, üks Raili Mõimilt (Tallinna Tehnikaülikool), mis käsitleb betooni 3D printimist ja teine Egon Hermansonilt (Eesti Maailikool), mis kirjeldab 3D printimise survepingeid ning selle käigus käsitletud materjale Ninjaflex, TPU ja ABS.

Antud lõputöös soovin põhjalikumalt uurida puidufilamendi olemust ja koostist. Näen, et antud materjal võiks disainerite seas olla populaarne ja mu lõputöö võiks olla seega suureks sammuks edasi materjali populariseerimisel Eestis.

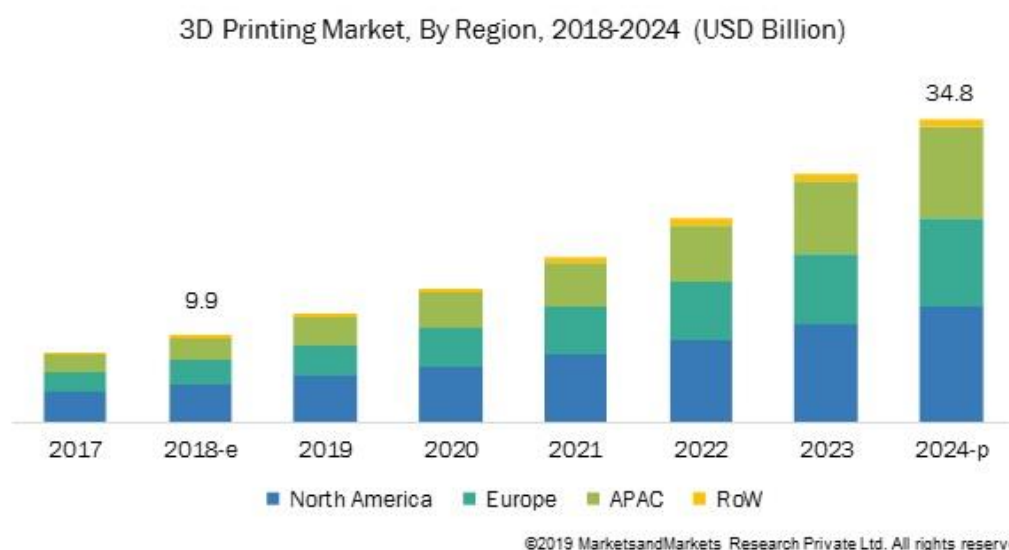
Lõputöö kirjalikus osas analüüsin erinevaid teadustöid ja toon välja olulisema, mis annab pildi materjali olemusest ja võimalikest eripäradest. Praktiliselt viin läbi katse puidufilamendiga 3D printimisel, mille käigus valmistan lambikupli. Katseobjekti valmistamisel soovin näha, kuidas tulevad prinditud detailid välja ning kas esineb printimisel tõrkeid või vigasid.

Soovin tänada Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudi arukate materjalide ja süsteemide laborit efektiivse koostöö eest ning kihtlastussüsteemide spetsialisti Hans Priksi, kes abistas mind katsete läbiviimisel.

1. 3D PRINTIMISE TEHNOLOOGIAD

3D-printimine on ruumilise objekti loomise protsess masina abil, mis lisab üksteise peale kihte, kuni soovitud objekt on valmis. Kolmemõõtmeline ese prinditakse digitaalse mudeli järgi, mis on eelnevalt masinale edastatud. Enamik printeritehnoloogiaid loob objekte kuumutades polüpiimhape (PLA) või akrüülnitriilbutadieenstüreen (ABS) termoplaste temperatuurivahemikus 180–240 kraadi Celsiuse järgi, millega moodustatakse üksteise peale kihtide paksusega on 0,1–0,4 mm. Materjali kihid kuivavad õhu käes kiiresti. (Trust ja Maloy 2017)

3D-printimine on tänapäeval võimsalt levima hakanud tehnoloogia, mida peetakse laialdaselt tööstuslikuks revolutsiooniks (Perrot ja Amziane 2019). Paljud disainerid on leidnud 3D printimises ainulaadseid võimalusi luua vorme ja esemeid nii tootedisainis kui moemaailmas (Bianchini 2019). Kolmemõõtmeline printimine (*additive manufacturing*) on hetkel kujunemisjärgus tehnoloogia, kuigi see on juba praegu väga võimekas ja seda saab kasutada efektiivselt erinevates valdkondades ning printimistehnoloogiat ja printimise materjale arendatakse intensiivselt edasi (Jueru 2020). Printimis materjalide valik on muutunud üpris laiaks, peale termoplastide on võimalik printida ka näiteks tsementi, pronksi, klaasi ja puitu (Trust ja Maloy 2017). Kolmemõõtmeline printimine on jõuliselt arenev (joonis 1), ning sellele ennustatakse järjest kasvavat tõusu. 3D-printimise turu väärtuseks hinnati 2019. aastal 13,7 miljardit USA dollarit ja 2025. aastaks peaks selle väärtus olema 63,46 miljardit USD (3D Printing Market 2019).



Joonis 1. 3D printimise osakaalu tõus (3D Printing Market 2019)

1.1 Ajalugu ja areng

3D printimise ideest räägiti juba möödunud sajandi seitsmekümnendate aastatel, kuid teoks sai see alles 1981, kui Hideo Kodama andis Jaapanis patendi taotluse sisse kiire prototüüpimise *Rapid Prototype* (RP) tehnoloogias, mis kasutas UV valgust, kõvendades fotoreaktiivseid polümeere, tegemist oli hilisema SLA (*Stereolithography*) tehnoloogia eellasega. Ta kaotas küll patendi, sest ei jõudnud õigel ajal patendiametis patenti vormistada. Kolm aastat hiljem 1984 võttis projekti uuesti üles Prantsuse inseneride töörühm Alain Le Méhauté, Olivier de Witte ja Jean-Claude André, kuid see sumbus kiirelt, sest ei olnud usku ärilisse edusse. Samal ajajärgul oli tehnoloogiast huvitatud ka Charles Hull, kes patendeeris esimese SLA patendi USAs 1986 ja asutas ettevõtte *3D Systems* Californias ning tutvustas tööstuslikku SLA-1 printerit (foto 1) aastal 1988. Hetkel on see ettevõtte 3D printerite turuliider ja valdkonna suurimaid innovatsioonikeskusi. (Gregurić 2018)



Foto 1. SLA-1 3D printer, mille valmistas Charles Hull (Gregurić, 2018)

1988 tutvustas Carl Deckard Texase Ülikoolis printerit nimega *Bestly*, see oli esimene *Selective Laser Sintering* (SLS) printeri tehnoloogia, kus kasutati laserit pulbri paagutamiseks. Masin suutis printida lihtsat plastikust objekti. Printeri eesmärk ei olnud sel ajal kvaliteet, vaid sooviti tutvustada ideed ja tehnoloogiat. Deckard registreeris sellele ka patendi. (Gregurić 2018)

Samal ajal kui SLS patent ootas kinnitust patenteeriti ka FDM (*Fused Deposition Modeling*) kihtladestus tehnoloogia patent. Kummaline oli asjaolu, et kõige lihtsam tehnoloogia registreeriti peale SLA ja SLS patendeerimist. Selle registreeris Scott Crump USAs, kes on tuntud ka ettevõtte Stratasys kaasasutaja, mis loodi 1989. Aastal 1992 oli patent ettevõttel olemas ja hakati kiirelt tehnoloogiat arendama, peamine fookus oli meditsiini valdkond. FDM tehnoloogia hakkas levima ja massidesse liikuma alles 2009 aastal, kui FDM patent aegus. (Hornick 2016).

Aastal 2005 sai alguse RepRap (*replicating rapid prototyper*) projekt. Inglismaa Bathi ülikooli vanemõppejõud dr Adrian Bowyer oli inspireeritud 3D-printimisest ja tal oli idee, et 3D-printerid saaks iseennast kopeerida ja luua rohkem versioone iseendast, printides vajalikke komponente. RepRap liikumine sai alguse Bathi ülikoolist, kuid saavutas hiljem populaarsuse kogu maailmas. Projekt oli avatud lähtekoodiga ja keskendus odavate 3D-printerite levitamisele kogu maailmas, mis viis selle demokratiseerimiseni. (3dsourced 2020)

Ajavahemikul 2002-2014 aegus 225 patenti, mis olid 3D printimisega seotud, see on andnud omakorda võimaluse arendada tehnoloogiaid edasi laiemal ringkonnal (Hornick 2016).

Puidu printimine

Aastal 2012 sai 3D-printimise maailm uue materjali Saksa filamendi pioneerilt Kai Parthy käest, kes töötas välja puidufilamendi LayWood-D3. See filament sisaldas 40% ümbertöödeldud puitu ja sideainena *Polylactic acid* (PLA). Materjali suur eripära oli see, et ta muutis värvi, sõltuvalt printimiskuumusest (foto 2), temperatuuril 180 °C oli see hele ja 245 °C juures tumedam. Lisaks sellele, et puidu osakaal oli suur, sai seda väga hõlpsasti lõigata, lihvida värvida või isegi peitsida, mis tegi selle materjali ideaalseks 3D-printitud mudelitele või figuuridele. Materjalil oli puidu ilme ja lõhn. (Wood takes 3D printing 2017). Puidu filament oli alguses väga kallis ja saadaval vaid üks toon (Francois 2012).



Foto 2. Prinditud objekt, kasutades LAYWOO-D3 filament (Quenneville, 2012)

Samal aastal oli kuulda lubadusi, et varsti on võimalik isegi mööblit printida. 2013 tõid turule mitmed iduettevõtted uusi puidust filamente. *ColorFabb's* tõi filamendi *WoodFill*, jämedusega 2.85mm ja 1.75mm, see koosnes 20% ümbertöödeldud puidust ja termopolümeerist. (Could wood-based material lead 2014 3D printing priorities? 2013)

Hiina tootja *PopBit* tõi ka kiirelt turule filamendi *Pop wood*, see oli komposiit papli puidu pulbrist. Selle printimistemperatuur oli vahemikus 170-230C ja sai printimisel temperatuuri muutmisega pruunikaid varjundeid teha, nagu LayWoo-D3 puhul. (Could wood-based material lead 2014 3D printing priorities? 2013)

Paljud leidsid, et puidu baasil materjal on väga atraktiivne, eriti oma orgaanilise koostise ja ökoloogilise iseloomu poolest (Could wood-based material lead 2014 3D printing priorities?, 2013).

Kuna NASA saatis 3D printeri aastal 2014 rahvusvahelisse kosmosejaama (Space Tools On Demand: 3D Printing in Zero G 2014), siis tekkisid ideed, et teistel planeetidel näiteks Marsil saaks hakata tehiskke puid printida, sellejaoks pandi kokku töörühm NIAC, meeskonda hakkas juhtima Lynn Rothchild. (Techcrunch, 2014)

Aastal 2018 printisid Columbia Ülikooli teadlased puu süüga materjali (foto 3). kus kasutasid selleks voxel (kolmemõõtmeline pikselite ruum) süsteemi. Originaalne puitmaterjal skaneeriti sisse CNC masinaga kiht haaval puitu freesides, iga kiht pildistati üles, nii saadi ruumiline 3D mudel. Printimisel kasutati J750 3D printerit. (Stute, Mici, Chamberlain ja Lipson 2018)



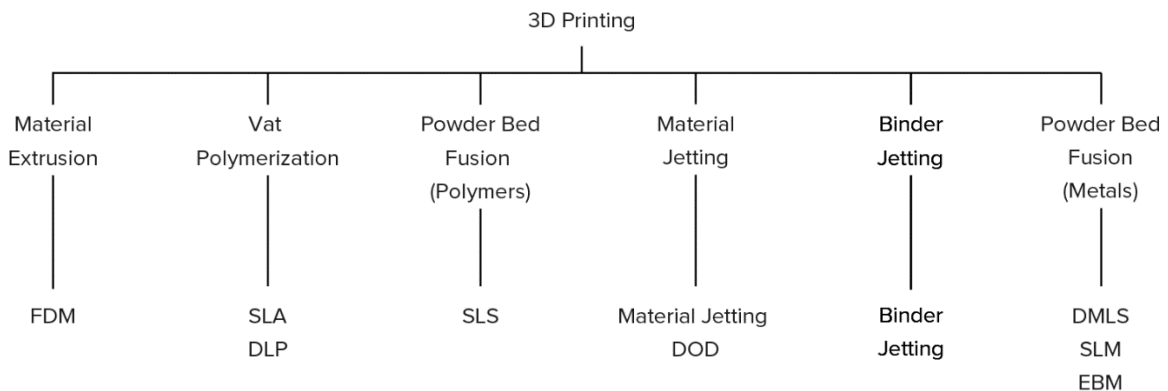
Foto 3. Prindut objekt puidu süüga (Stute, Mici, Chamberlain ja Lipson 2018)

1.2 Erinevad printimistehnoloogiad

Tänapäeval on olemas erinevaid 3D printimistehnoloogiad (3D printing market 2020, Snikhovska 2019, Types of 3D Printing Technology 2020). Nendest olulisemad on järgmised:

- Sulatatud kihtlisandusega modelleerimine (*Fused Deposition Modeling FDM/Fused Filament Fabrication FFF*)
- Stereolitograafia (*Stereolithography SLA*)
- Lamineeritud objektide valmistamine (*Laminated Object Manufacturing LOM*)
- Polyjet printimine (*PolyJet PJ*)
- Pideva vedeliku liidese tootmine (*Continuous Liquid Interface Production CLIP*)
- Multi Jet Fusion (*Multi Jet Fusion MJF*)
- Maskiga stereolitograafia (*Masked Stereolithography MSLA*)
- Digitaalne valgustöötlus (*Digital Light Processing DLP*)
- Selektiivne laserpaagutus (*Selective Laser Sintering SLS*)
- Otsene metallist laserpaagutamine (*Direct Metal Laser Sintering DMLS*)
- Selektiivne lasersulatamine (*Selective Laser Melting SLM*)
- Elektronkiirega sulatamine (*Electron Beam Melting EBM*)
- Jugasulatus (*Material Jetting MJ*)
- Nõudeprint (*Drop on Demand DOD*)
- Liivasideainega jootmine (*Sand Binder Jetting SBJ*)
- Metallsideainega jootmine (*Metal Binder Jetting MBJ*)

Printeritüüpide jagunesmist aitab selgitada joonis 2 (Varotsis 2020).



Joonis 2. Printeritüüpide jagunemine (Varotsis 2020)

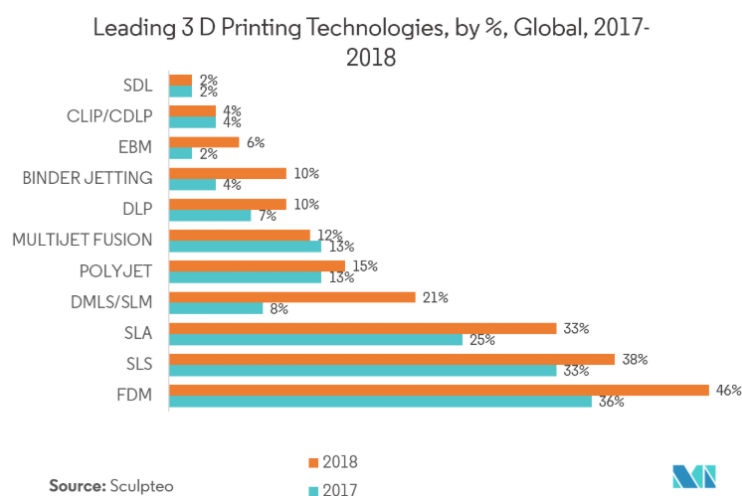
Nii mõnedgi tehnoloogiad on üpris sarnased nagu EBM ja SML, erinevus tuleb sisse selles, et SLS kasutab materjali paagutamiseks laserit, kuid EBM elektronkiirt. (Castells 2016).

Esineb ka sama tehnoloogiat erinevate nimedega, näiteks FDM tehnoloogia puhul, kus kasutatakse *Fused Filament Fabrication* (FFF) ja *Fused Deposition modeling* (FDM). Tegu on sama tehnoloogiaga, nime erinevus tuleb lihtsalt kaubamärgi kaitsest. Kui 3D Printimine sai populaarseks, lõi kogukond RepRap FFF, et inimesed saaksid tehnoloogia üle arutada, kartmata kaubamärke rikkuda. (FFF vs. FDM – what’s the real difference? 2020).

Looduslike materjalide 3D-printimist limiteerib tehniline võimekus, kaubanduslik kättesaadavus, materjali asendatavus olemasolevatega, trükikvaliteet ja aktsepteeritavus tööstuses. Kaubanduslik kättesaadavus hõlmab nende materjalide tootmismahu ja maksumust, näiteks puitu ei saa kasutada SLA printimises, kuna see ei seo ennast ultravioletvalguse kokkupuutel kokku. Kättesaadavus mõjutab nende materjalide tootmismahu ja hinda: on tõestatud, et saepuru ja sool töötavad tehniliselt, kuid puuduvad kaubanduslikud turustajad. Asendatavus seisneb materjali omaduste sobitamises selle kasutamisega. (Environment Policy Committee 2017).

2015 aastal oli kaubanduslikult kättesaadav SLS tehnoloogiale mõeldud puidu printimispulber, kuid enam seda ei ole võimalik osta (Doris 2015). Hetkel on kaubandusvõrgust lihtsalt kättesaadaval väga laias valikus puidufilamente FDM tehnoloogiale (Griffin 2019).

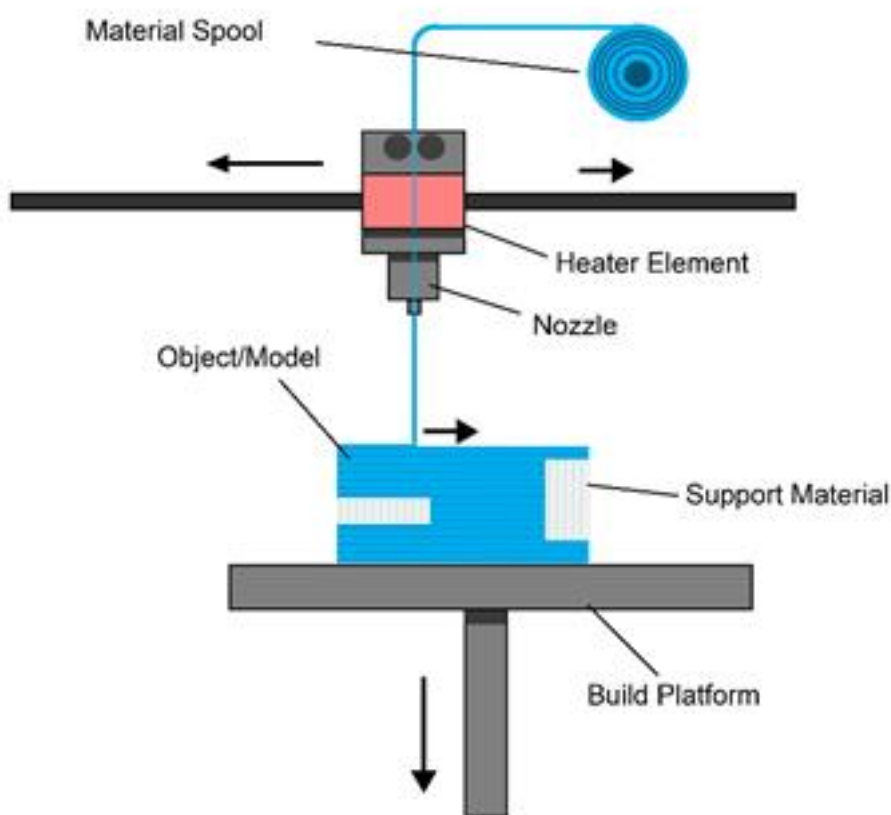
Sculpteo andmetel (joonis 3) on 3D printimistehnoloogiate suurima turuosaga FDM seadmed (3D Printing Market - Growth, Trends, and Forecast (2020 - 2025) 2020). FDM on esikohal tänu tugevale populaarsusele tavakasutajate seas, kuna see on lihtsam süsteem ja taskukohane (Fused Deposition Modeling (FDM): 3D printing with filaments 2020).



Joonis 3. Erinevate 3D printerite populaarsus (3D Printing Market - Growth, Trends, and Forecast (2020 - 2025) 2020)

1.2.1 Sulatatud kihtlisandusega modelleerimine

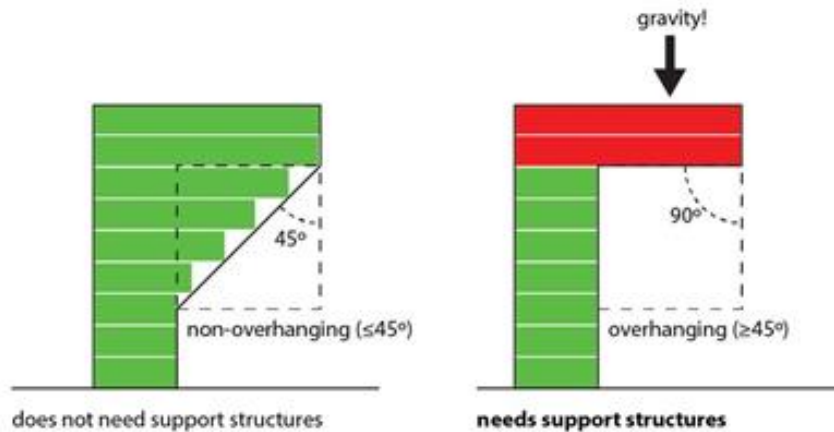
FDM (*Fused Deposition Modeling*) on kõige laialdasemalt kasutatav 3D printimise tehnoloogia. Tegemist on materjali ekstrusioonitehnoloogia (joonis 4), mida prinditakse traadi sarnasest materjalist, mis on keritud ümber pooli. Seda materjali nimetatakse filamendiks (eestikeeles on kasutusel ka lõng ja traat), mis surutakse tõmberullide abil läbi kuumutatud düüsi, kus see muutub vedelaks. Printeripea liigub mööda digitaalselt ettesöödetud koordinaate, kus materjal jahtudes kiirelt tahkub. Üksteise peale kihte printides valmib soovitud ruumiline objekt. (2020 Types of 3D Printing Technology 2020)



Joonis 4. FDM printeri süsteem (Kotturkar 2020)

Tüüpilisemad termoplastid, mida FDM tehnoloogia kasutab on polüpiimhape (PLA), akrüül-niitriil-butadien-stüreen (ABS), polükarbonaat (PC) ja polüeteerimiid (PEI) (2020 Types of 3D Printing Technology 2020), puidu printimise puhul kasutatakse komposiitmaterjali puidukiud ja PLA segu.

Järsemate kallakutega pinnad, mis on üle 45 kraadi vajavad tihtipeale tugistruktuure (joonis 5), et poolikult prinditud objekti osad ei kõverduks gravitatsiooni tõttu printimise ajal alla, toestustugesid saab hiljem eemaldada (3D Printing With Support Structures 2020). UPM on turule toonud *Octofiber UPM Formi 3D* puidu filamenti, mis koosneb tselluloosist ja PLA segust, sellega saab isegi kuni 75 kraadi all printida ilma tugeteta (UPM Formi 3D filament 2020).



Joonis 5. Tugistruktuurid (3D Printing With Support Structures 2020)

FDM tehnoloogia abil toodetud objektidel on tihtipeale nähtavad kihtjooned (foto 4). Printimisel ei tohiks kihi kõrgus ületada 80% pihusti läbimõõdust.

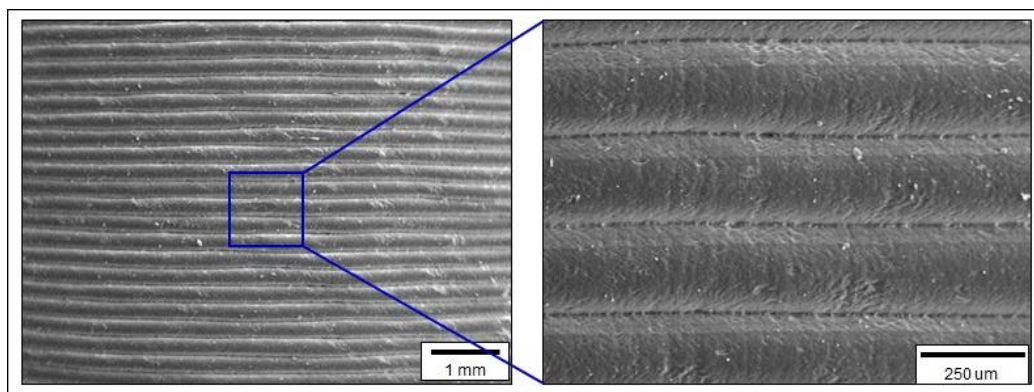


Foto 4. FDM printimisel tekkinud kihtjooned (Bangeas, Drevelegas 2018)

Kui kasutatakse standardset 0,4 mm otsikut, peaks kihi maksimaalne kõrgus olema 0,32 mm. 0,6 mm otsikuga on aga võimalik saavutada kihi kõrgus kuni 0,48 mm. (Ostrem 2018)

Mitme printimispeaga FDM 3D-printer

FDM 3D-printeritel on üldiselt üks printimispea, mida nimetatakse ka ekstruuderiks, kuid mõned masinad on varustatud kahe ekstruuderiga ja mõnikord isegi enamaga. Mitme peaga 3D-printer pakub võimalust printida kahte erinevat värvi (foto 5) või erinevaid materjale. (TOP 11 Dual Extruder 3D Printers 2019)



Foto 5. Kahe erineva filamendiga prinditud objekt (Marc3d3d 2016)

Tänu võimalusele ühes printimisobjektis mitut erinevat materjali kasutada, annab see võimaluse printida objekti toetamiseks tugistruktuure, näiteks kui valida teiseks filamendiks *polyvinyl alcohol* (PVA) siis tugistruktuure ei pea hiljem jõuga ära murdma vaid need saab lahustada vees (foto 6). Objektile ei jää tugedest jälgi ega kahjustusi. (What Is Dual Extrusion? 2020)

Teist printeripead saab kasutada ka vajadusel tugevamate sisestruktuuride tegemiseks. Kui objekt vajab tugevamat tugevust kui põhilament võimaldab siis saab eseme sisse näiteks sünikukiu baasil materjali printida, mis muudab prinditud osa tugevamaks. (What Is Dual Extrusion? 2020)

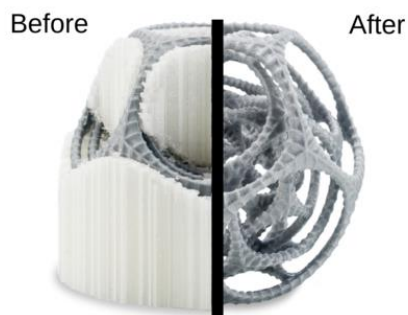


Foto 6. PVA tugistruktuurid (Here are our top tips and tricks for 3D printing with PVA filament 2020)

3D printimise pastakas

On olemas 3D printimise pastakas, millega saab printida ruumilisi esemeid. Tehnoloogia sarnaneb traditsioonilise liimipüssiga, kus kuumutatakse liimi. Kasutajate seas on seadmel kasutusel ka nimetus *doodler* (Flinth 2017). Kasutajad on märkinud, et 3D pastaka kasutus võib põhjustada uimasust, arvatavasti on põhjus printimisel sissehingatavad aurud. Eriti ABS printimise juures on väga oluline hästi ventileeritud ruum. (Mashambanhaka 2019)

Hetkel on olemas kahte tüüpi 3D pastakaid, kuumad ja külmad.

Kuumust kasutatavad pastakad on sarnased FDM tehnoloogiale. Filament sisestatakse ülemisest otsast ja masina sees kuumutatakse see üles (foto 7). Nupule vajutades surutakse vedel materjal läbi otsas oleva düüsi. Niipea kui materjal väljub, hakkab see jaheda õhu tõttu kiirelt kõvenduma. See annab võimaluse joonistada materjali isegi õhku. (Mashambanhaka 2019) Pastakatele on võimalik osta spetsiaalset filamente, mis on poolis või lühikeste pulkadena (foto 8), kuid saab kasutada ka tavalist filamenti, mis on mõeldud FDM printerite jaoks (3D Pen Filament 2020).



Foto 7. 3D pastaka ehitus (Tan 2020)



Foto 8. 3D pastakas koos filamenti pulkadega

Külmad 3D pastakad ei kasuta kuumust. Nendel tekib printides keemiline protsess, mis muudab vedeliku, mida nimetatakse *photopolymer* tahkeks (Granich 2020). Niipea kui vedelik väljub pastaka otsast, muudetakse UV valgusega joon tahkeks (foto 9). Protsess sarnaneb SLA printeri süsteemile (Mashambanhaka 2019). Külma 3D pastakaga ei tekita sulatatud plasti lõhna, mis tekib kuumast pastakaga filamenti sulates (3d printing pin team 2015). See süsteem ei ole väga populaarne, kuigi see on ohutum lastele, sest pastaka ots ei muutu kuumaks (Granich 2020).

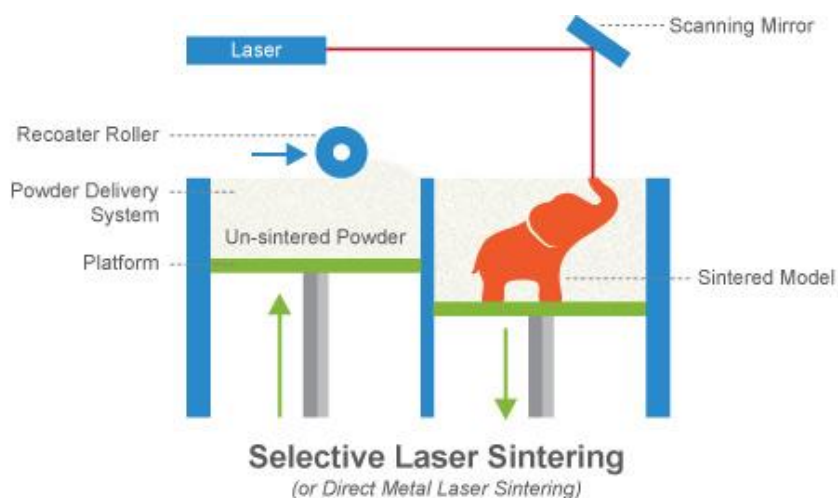


Foto 9. 3D eseme valmistamine kasutades UV valgust (3d printing pin team 2015).

3D pastakaid kasutatakse peamiselt 3D tehnoloogiaga prinditud esemete iluvigade parandamiseks, kunstiliste käsitöö projektides, kiir prototüüpimises ja haridusvaldkonnas lisa õppevahendina (Mashambanhaka 2019).

1.2.2 Selektiivne lasertehnoloogia

SLS (*Selective Laser Sintering*) on 3D-printimistehnoloogia, mis kasutab pulbrilise materjali paagutamiseks laserkiirt (joonis 6). Kõigepealt laotakse maha õhuke kiht, laserit suunates sulatab masin valitud pulbriosakesed kokku. Kui tahke kujutis on moodustatud laotatakse selle peale järgmine pulbrikiht, mida hakkab laser uuesti sulatama, protsessi korratakse kuni soovitud objekt on valmis. Sulatamata pulber ümber eseme toetab eset printimise jooksul, mille tõttu ei ole eseme struktuurist olenevalt vaja lisatoestusi printida nagu FDM tehnoloogia puhul. Järelejäänud kõvendmata pulbrit saab kasutada uue eseme printimiseks. (Lansard 2020)



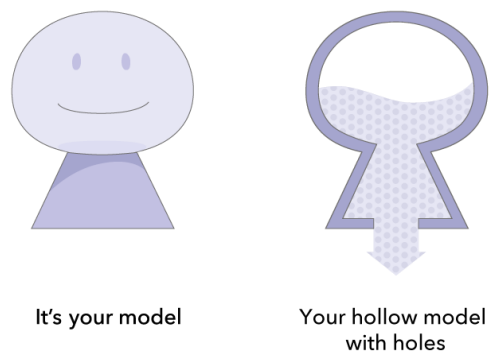
Joonis 6. SLS printimistehnoloogia (Primary 3D Printing Processes 2020)

2015 aastal pakkus Jaapani 3D printimise ettevõtte *Rinkak* SLS tehnoloogiale puidu sisaldusega printimispulbrit (foto 10). Pulbri sees olevat puidusisalduse osakaalu ja sideainete komponente välja ei toodud, kuid seda reklaamiti kui puidu sarnast (*Wood like*) materjali. *Rinkaki* SLS pulbriga oli võimalik printida kuni 3mm paksuseid seinu ning minimaalne kliirens vähemalt 0,2 mm. (Doris 2015)



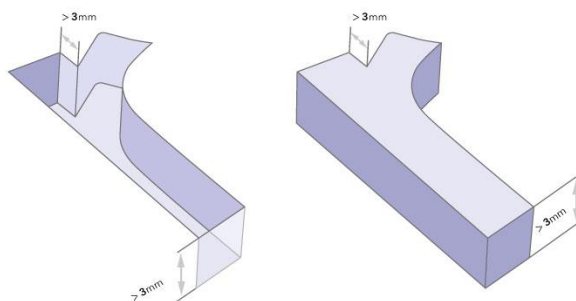
Foto 10. *Rinkaki* SLS pulbriga prinditud näidis (Doris 2015)

Rinkaki SLS puidupulbriga printides saab tootmiskulusid vähendada muutes mudel õõneskonstruktsiooniks (joonis 7), vähendades sellega mahtu ja materjali kulu. Õõnesmudeli loomisel on vajalik luua vähemalt üks auk minimaalse läbimõõduga 12 mm. Ava loomine on vajalik printimise käigus tekkiva tugipulbri eemaldamiseks. Kui auk on liiga väike, ei saa tugipulbrit täielikult eemaldada. Eemaldamise protsessi usaldusväärseks läbiviimiseks on soovitatav luua mitu auku. (Rinkak 2020)



Joonis 7. Õõnesvorm SLS printimisel (Rinkak 2020)

Reljeefsete ja graveeritud detaile mõõtmetelt alla 3 mm saab moodustada, kuid võttes arvesse materjali omadusi ja nähtavust on soovitatav modelleerida minimaalselt mõõtmega 3 mm (joonis 8). Lisaks soovitatakse reljeefkõrguse ja graveeringu sügavuseks kasutada 3 mm miinimum mõõtmena. Väiksemate mõõtmete kasutamisel ei saa kvaliteeti tagada. (Rinkak 2020)



Joonis 8. Reljeefide loomine SLS printimisel (Rinkak 2020)

1. PUIDU 3D PRINTIMISEKS KASUTATAVAD MATERJALID

1.1 FDM puiduflament

Filamendid on loodud spetsiaalselt FDM/FFF tüüpi 3D printimistehnoloogiale (3dinsider 2020).

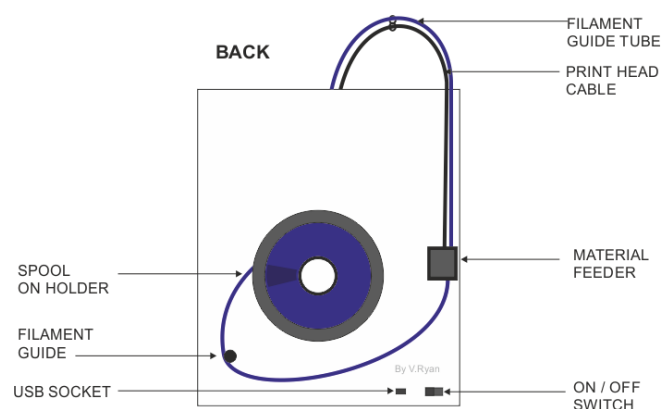
Puidupõhise kiuga 3D printimise filament on komposiitmaterjal, mis ühendab puidukiud (puidutolm või peened osakestesed) ning sideaine PLA (Wood Filled 2020). Tänapäeval on saadaval väga erineva puidu sisaldusega filamente, valikust on võimalik leida kase, kookospähkli, korgi, bambuse, seedri (Greguric 2019), tamme, paju, kirsi, vahtra, oliivipuu ja paljude teiste liikide vahel (Griffiin 2019). Lisaks tehakse katsetusi filamendile täiendavalt sünikukiudude lisamiseks või lisamisel puidu juurde erinevaid taimseid komponente nagu kanep, kenaf ja lina (Mazzanti, Malagutti ja Mollica 2019).

Tavaliselt sisaldab puitfilament 70% PLA ja 30% puidukiudu, kuid kõik sõltub filamenti tootjast (Greguric 2019). Täielikult 100% puidusisaldusega filamenti ei saa valmistada, sest materjal peab printides voolavaks muutuma. PLA on termoplast, mis muutub kuumutamisel plastiliseks ja annab võimaluse puidukomposiidina puitu printida (Gewirtz 2016). Turul kättesaadavatel filamentidele on harvemal juhul lisatud peale PLA ka PHA (Polyhydroxyalkanoate) komponent, et materjal oleks tugevam (creat3d 2020).

Filamendid on tavaliselt läbimõõduga 1,75 mm või 2,85 mm (tuntud kui 3 mm filament), mis on keritud poolile (foto 11). Pool sobitub rullile, tavaliselt 3D-printeri tagaküljele (joonis 9). (Ryan 2015)



Foto 11. Puidu filamendiga pool (creat3d 2020)



Joonis 9. Filamenti teekond FDM printeri taga (Ryan 2015).

Kasutatakse kolme peamist tüüpi puidufilamenti.

Puidutäidis (*Woodfill*). See on levinum filamenti sort, milles on segatud polümeer traditsiooniliste puidusortidega, nagu tamm, vaher, kask jms. Sellel on omane domineeriva puidusordi lõhnad ja visuaalsed omadused ning kui sellegaprintida siis on tunda kergelt põletatud puidu lõhna. Kui temperatuuriseaded on seadistatud õigesti, on kogu printimisprotsessil materjal stabiilne. (Griffin 2019)

Bambustäidis (*Bamboofill*). See on bambusega segatud polümeer, mis on temperatuuri suhtes tundlikum ja ekstruuderi ummistumine tavalisem kui tavaline puidutäide. See tähendab, et peate enne ja pärast iga printimist printimisotsa põhjalikult puhastama ja te ei saa nii laia värvivalikut kui tavalise puidutäidisega, kuid printimine on sujuv. (Griffin 2019)

Korgitäidis (*Corkfill*). Korgitäidis on kergelt poorne ja tunduvalt tumedama värviga kui bambuse- või tavaline puitäidise puhul. Sellel on bambusfilamendiga väga sarnased omadused, kuid materjal on kaalult kergem. (Griffin 2019)

Puidufilamenti ostes on alati oluline jälgida selle lisainfot, sest on olemas puidufilamente, mis ei sisalda päris puidu osakesi, need sisaldavad puidule sarnast värvi, ning printitud lõpptulemus ei ole ka puidule sarnane (Wood Filled 2020). On olemas ka tootjaid, kes ei too puidu sisaldust välja või jätab ähmase info, üheks tootjaks on *Afinia*. Antud filament on palju kiidetud just soodsa hinna poolest. Lähemalt uurides on vaid märges *Wood-infused*, mis viitab justkui puidu olemasolule. (Afinia 2020)

Kuid siinkohal tahaks esile tuua filamenti *PolyWood*, antud materjal ei sisalda puidu osakesi, kuid segusse on lisatud materjali, mis tekitab printimisel vahu efekti, millega imiteeritakse nn puidu rakke (joonis 10). Materjal on PLA esemetest 35 - 40% kergem. (Polywood 2020)



Joonis 10. Polywood filament ja selle võrdlus puidu rakkudega (Polywood 2020)

Puidufilamendi printimisel on näha materjali sees väikseid tumedaid tükke, need on väiksed puidu osakesed. Kui puiduosakesed ei sulda, siis võivad need ummistada protsessi käigus printeripead. Sellepärast on soovitatav alati kasutada suurema avaga düüsi. Erinevatel puidu filamentidel on võimalik printida eri peensusena, üldiselt ei soovitata alla 0,3 mm avaga düüsi kasutada puidu printimisel. Kui suurema avaga printides jäävad eseme pinnale printimiskihid, siis vajadusel saab peale objekti valmimist need maha lihvida (AllThat3D 2020). Tihtipeale soovitatakse puidu puhul isegi 0,5 mm düüsi kasutada, probleemide vältimiseks (simplify3d 2020).

Läbiviidud katsed näitasid, et puidu 3D printimine kulutab printimispea düüsi kiiremini kui teised filamentid nagu PLA ja ABB, põhjuseks on materjali abrasiivsus. Düüsi kulumine põhjustab järjestikust ava suurenemist, mis võib objekti printimise kvaliteeti tunduvalt muuta (How much abrasive filaments damage your nozzle! 2019). Kuigi puidu filament on abrasiivne, siis võrreldes süsinikkiu- või metallfilamentidega on puidu osakesed siiski pehmemad (Wood Filled 2020). Abrasiivsemate materjalide puhul nagu puidufilament soovitatakse kasutada mitte messingust (kõige traditsioonilisem düüs), vaid roostevabast terasest otsikut (foto 12), mis on tunduvalt tugevam, neist veel tugevam on rubiin otsaga düüs (Ostrem 2018).



Foto 12. Düüsid: messing, karastatud teras, roostevaba teras, rubiinpeaga (All about 3D printer nozzles 2019).

Kui projekt peaks printimisel mingil põhjusel katkema, siis ei tohi kindlasti ära unustada eemaldada materjal kuumast printeripeast. Materjali jätmise printimisotsikusse, mis ei ole ära jahtunud kärsatab filamendi üpris kiirelt tumedaks, ning printimise jätkates võib töö ära rikkuda. Suur on ka oht, et kõrbenud puit ummistab otsiku ära ja printimispead peab puhastama puhastusniidiga. (Griffin 2019)

Puitfilamentil on soovituslik hoida kiiret printimiskiirust. Kiirem materjali voolamine vähendab tõenäosust, et filament hakkab otsikus kõrbema ja tekitab probleeme (Griffin 2019).

Esimese printimiskihi 3D töötles on väga oluline. Kui see kiht ei õnnestu printida korrektselt aluse külge (foto 13) ning väändub jahtudes, siis see mõjutab ülejäänud printimist väga tugevalt. Esimene kiht on oluline, et kiht oleks tasane ja objekt püsiks ühe koha peal. Sellejaoks kasutatakse soojendusega printimisalust (Goldschmidt 2019). Puidufilamedi printimisel ei ole vaja printimisplaati kuumutada, kuid selle olemasolul võib seda kuumutada vahemikus 50–70 °C. Esemehiikumise vastu printimise ajal kasutatakse ka PEI lehte, teipi või liimipulka. (Filaments.directory Team 2017)



Foto 13. Printimisel aluse küljest lahti tulnud materjal (Apium 2019)

Puidu filamenti printimise puhul on tavaliselt märgitud temperatuurivahemik 170-220 °C, kuid see varieerub tootjast ja filamenti koostisest (Theias 2019). Mõnikord on välja toodud isegi väiksem printimisvahemik, näiteks YOYI puidufilamenti puhul on märgitud 200-210 °C (Auokayu 2020). Üks põnevaid eripärasid puidufilamentidel võrreldes teiste filamentidega on see, et sellega saab luua temperatuuri muutes pruunikaid värvivarjundeid. Põhjus on selles, et kõrgemal temperatuuril olev ekstruder põletab puidukiudu, luues tumedama tooni. 3D printimise juures tuleb arvestada, et puit on tuleohtlik, liigne kuumus võib kahjustada objekti või isegi süttida. (Theias 2019) Läbiviidud süttivuse testis (foto 14) tulemasinaga, näitas, et puidust prinditud ese põleb tõrgeteta (Deveson 2016). Tavaline puitmaterjal võib süttida põlema temperatuuril 280 °C (Palju 2009). Kasutajad, kes on oma 3D printeri põlema pannud, soovivad paigaldada printeri kohale suitsuanduri (Don't burn your house down 3D Printing. A Cautionary Tale 2018).



Foto 14. Põlev 3D prinditud puidust ese (Deveson 2016).

1.1.1 Filamendi hügrosoopsus

Niiskus on üks väga levinud probleem 3D printimisel. Väheste kogemustega printijad ei saa tihtipeale arugi, miks nende projektid ebaõnnestuvad, kuigi seadistused on kõik õiged, probleem seisneb õhu niiskuses. (Walleser 2020)

Mõned filamendid on hügrosoopsed, mis tähendab, et nad imavad õhust niiskust. Tavaoludes võib PLA filament avatuna ruumis peale 150 tunni möödudes jõuda oma küllastuspunktini ning paisuda kuni 40 mikromeetrit. Enne printimise algust võib filamendi suurenenud läbimõõt, mis võib olla isegi 20–40 mikronit (umbes juuste laius), tekitada hulganisti probleeme, isegi enne kui printimine algab. (Walleser 2020)

Puidufilament on võrreldes ABS ja PLA filamendiga veel rohkem hüdrosoopsem, mis võib tekitada printimisel mitmeid takistusi (Kariz, Sernek ja Kuzman 2018). Tavaliselt tulevad ostetud filamendid vaakumpakendis, et vältida niiskuse probleeme (Kondo 2020).

Niiskussisalduse levinumad probleemid 3D-printimiskonstruktsioonides (Walleser 2020).

- Filament lõheneb või tekitab mullitavat häält, kui surutakse läbi printimispea.
- Esemel ülaosas aukude teke
- Düüsi otsas mullitamine, milles tekib aegajalt auru ja purskeid.
- Filament ei kleepu printimisalusele
- Ekstruudermootor seiskub, kuid filament väljub düüsis edasi
- Ekstruuderi mootor käivitub, kuid filamendi väljapressimine viibib
- Prinditav ese on habras ja puruneb kergesti
- Ekstruuderi ummistused

Sloveenias Ljubljana ülikoolis läbiviidud uuring näitas, et filamendile puidu osakaalu lisamine mõjutab tugevalt selles olevat niiskussisaldust. Katses võrreldi erineva puidu sisalduse osakaaluga filamente kuivas (33%), tavalises (65%) ja niiskes (87%) keskkonnas. (Kariz, Sernek ja Kuzman 2018)

Katses kasutati pöögipuidu (*Fagus sylvatica L.*) jahvatatud puidukiudusid, jahvatus teostati seadmega *Retsch ZM 200*. Seejärel sõeluti puiduosakesed ja kasutati ainult osakesi, mis läksid läbi võrgu ava 0,237 mm. Valmistati kuus erinevat filamenti, puidusisaldusega: 0% (kontrollproovid), 10%, 20%, 30%, 40% ja 50%. Võrdluseks kasutati ka kahte kaubanduslikku

filamenti, milles ei olnud puiduosakesi: *Z-ABS* filament (Zortrax S.A., Poola) ja *PLA PrimaValue* filament (3D Prima, Rootsi). (Kariz, Sernek ja Kuzman 2018)

1,75 mm paksusega filamendid prinditi 3D-printeriga *Zortrax M200* (Zortrax, Poola), mille otsik oli 0,4 mm, filamendikihi paksus 0,19 mm, trükikiirus 30 mm/s ja printimistemperatuurid 275 °C (ABS puhul) ja 230 °C PLA jaoks. Testitükk (80 × 12 × 4 mm) prinditi kolmest täiskihist alt, ülalt ja küljelt, kuid seestpoolt oli võrgusilma struktuur (ruudu suurus 1,25 mm ja joone paksus 0,4 mm). Iga õhu keskkond- ja puidusisalduse kombinatsiooni jaoks trükiti neli proovi, kokku 96 testiklotsi. (Kariz, Sernek ja Kuzman 2018)

Pärast printimist kuivatati proove 24 tunni jooksul laboratoorses ahjus 80 °C juures, et eemaldada järelejäänud niiskus, mõõdeti ja kaaluti ning seejärel konditsioneeriti erinevates kliimades: kuiv (T = 20 °C, õhuniiskus 33%), standard (T = 20 °C, õhuniiskus 65%), niiske (T = 20 °C, suhteline õhuniiskus 87%). Massi ja mõõtmeid mõõdeti 2, 5, 9, 16 päeva pärast. Paindeomadusi testiti seadmel *Zwick-Roel Z005* pärast konditsioneerimist. Kasutati kolmepunktilist paindekatset koormusega 10 mm/min, kuni tekkis murd või 50% jõu langus. (Kariz, Sernek ja Kuzman 2018)

Puidulisandiga filamentidel oli väiksem läbimõõt (tabel 1). Kõik filamendid (erineva puidu ja polümeeri suhtega) toodeti samades tingimustes (ekstruuderi kiirus ja temperatuur), mistõttu läbimõõdu hälve oli tingitud suurema puidusisaldusega segude viskoossuse suurenemisest ja seega suurematest väljapressimisjõududest. (Kariz, Sernek ja Kuzman 2018)

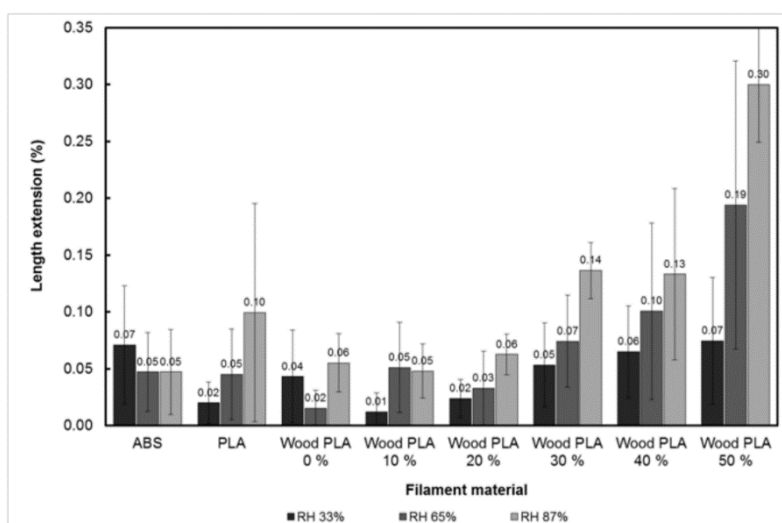
	Filament diameter (mm)	Dry climate (T 20°C, RH 33 %)		Standard climate (T 20°C, RH 65 %)		Humid climate (T 20°C, RH 87%)	
		Moisture content (%)	MOE (N·mm ⁻²) *	Moisture content (%)	MOE (N·mm ⁻²) *	Moisture content (%)	MOE (N·mm ⁻²) *
ABS	1.73	0.4	1313 (70)	0.4	1383 (51)	1.1	1343 (50)
PLA	1.72	0.3	1568 (146)	1.3	1563 (71)	0.8	1477 (38)
Wood PLA 0%	1.61	0.5	1393 (17)	0.6	1442 (39)	1.0	1483 (109)
Wood PLA 10%	1.45	0.9	844 (97)	1.4	768 (75)	2.3	791 (165)
Wood PLA 20%	1.44	0.7	809 (238)	1.4	846 (245)	3.1	542 (255)
Wood PLA 30%	1.47	1.6	771 (36)	2.3	735 (106)	4.0	681 (131)
Wood PLA 40%	1.48	0.8	790 (78)	2.2	798 (75)	3.6	623 (50)
Wood PLA 50%	1.51	1.3	350 (407)	3.0	475 (339)	5.2	469 (155)

Tabel 1. Niiskusesaldus puidufilamendis (Kariz, Sernek ja Kuzman 2018).

3D-printimisel oli kõikide printimismaterjalide puhul programm sama ja see seadistati 1,75 mm läbimõõduga filamenti jaoks. Sellest tulenevalt prinditi õhema läbimõõduga filamentide puhul testitükki vähem materjali ja see mõjutas prinditud osade mehaanilisi omadusi. Näiteks prinditi 50% puidusisaldusega filamenti esemele 23% vähema materjaliga. Filamendis olevad puitosakesed põhjustasid ummistumist ning ebaühtlast voolavust läbi düüsi, mis omakorda põhjustas poorsemat ja ebaühtlast/sulatatud konstruktsiooni, mis vähendas mehaanilisi omadusi. (Kariz, Sernek ja Kuzman 2018)

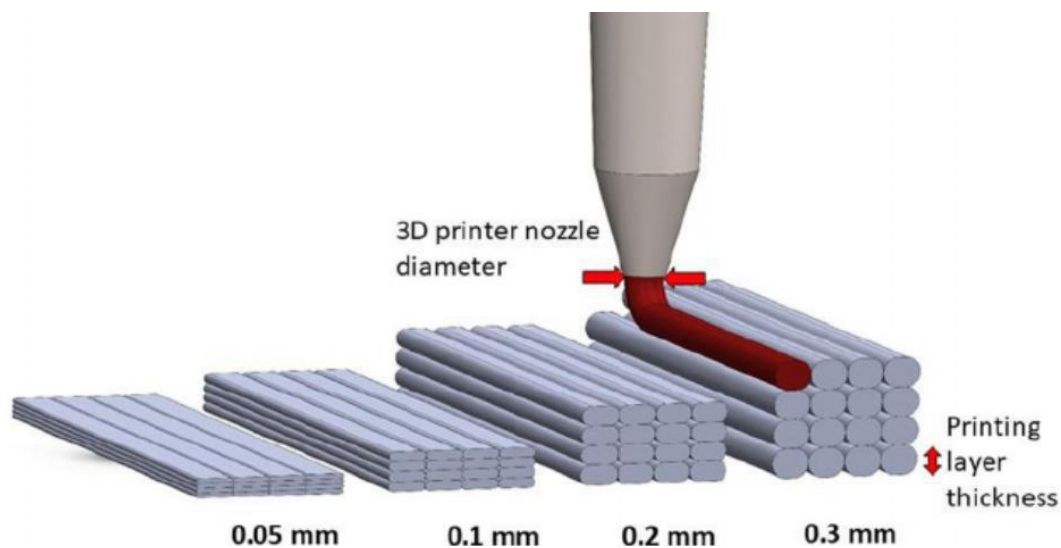
Proovide niiskusesisaldus sõltus kliima ja puidu osakaalu sisaldusest. Puit on hügrokoopne materjal, mis absorbeerib/desorbeerib ümbruse niiskust ja seega paisub/kahaneb. Järelikult on ka puidulisandiga filamendid hügrokoopseid ja muudavad ümbritseva kliimaga oma mõõtmeid. (Kariz, Sernek ja Kuzman 2018)

Kaubanduslikud ABS ja PLA proovidel oli niiskussisaldus madalaim, ning puidukomposiidiga oli niiskus kõrgem ja suurenes puidu sisalduse suurenemisega (5,2% isendite puhul, kus 50% puiduosakesi oli 86% suhteline niiskus). Võrreldes pöögi täispuitu samades tingimustes, siis oli niiskussisaldus filamendis küllaltki madal. Täispuiduga ei ole see võrreldav, sest filamendis kapseldab/ümbritseb polümeer puidu osakesi ja vähendab selle hügrokoopset. 3D-prinditud esemed paisusid kõigis suundades, suurim väärtus oli pikkuse suunas. Kõrgeima puidusisaldusega filamendis (joonis 11) näitasid kõige suuremat paisumist (0,3% isendite puhul, mille puidusisaldus oli 50% 87% niiskusesisaldusega) ja suurim paisumine oli kõige niiskemas kliimas. (Kariz, Sernek ja Kuzman 2018)



Joonis 11. Filamenti paisumine niiskuse toimel (Kariz, Sernek ja Kuzman 2018).

Türgi, Sloveenia ja Korea tehtud koostööuuring näitas vee imendumist puidukomposiit materjalis, sõltuvalt printitud kihtide paksusega, ning sellega seotud paindeomadusi. Nad kasutasid 1.75 mm filamenti, mille puidu sisaldus oli 30% ja PLA 70%. Prinditi 4 erinevat proovituüpi (joonis 12) *Zaxe* 3D printeriga, millel oli düüsi läbimõõt 0,4 mm. Iga katseklotsile prinditi üksteise peale neli printimiskorda, printimiskõrgused aga erinevalt 0.05 mm, 0.1 mm, 0.2 mm ja 0.3 mm. Proovid valmistati raster orientatsiooniga 0°. Printimistemperatuur määrati 200 °C ja alusetemperatuuri 80 °C. Enne katsetamist konditsioneeriti uuringuruum temperatuurile 20 °C ning suhteline õhuniiskus 50%. (Ayrilmiso, Kariz, Kwon ja Kuzman 2018)



Joonis 12. Katsetükid (Ayrilmiso, Kariz, Kwon ja Kuzman 2018).

Proovitükkide veeimavustest viidi läbi vastavalt standardile ISO 62. Katse jaoks kontrolliti kümmet proovi. Katseklotse hoiti vees 28 päeva, temperatuuril 20 °C. (Ayrilmiso, Kariz, Kwon ja Kuzman 2018)

Proovide paindeomadused (paralleelselt printimissuunaga), paindetugevus ja paindemoodul, viidi läbi universaalse testimismasinaga *Lloyd* määrates 1,3 mm/min, ristpea kiiruseks. Proovide tõmbeomadusi (paralleelselt printimissuunaga) testiti ristkorpusega 5 mm/min. Iga proovi tüübi tõmbe- ja paindetugevuse jaoks katsetati viit proovi. (Ayrilmiso, Kariz, Kwon ja Kuzman 2018)

Proovide tihedused varieerusid vahemikus 0,98 kuni 1,01g/cm³. Kuna proovitükkidel suurendati printimiskihtide paksust 0,05 mm-lt 0,3 mm-ni, suurenes ka märkimisväärselt

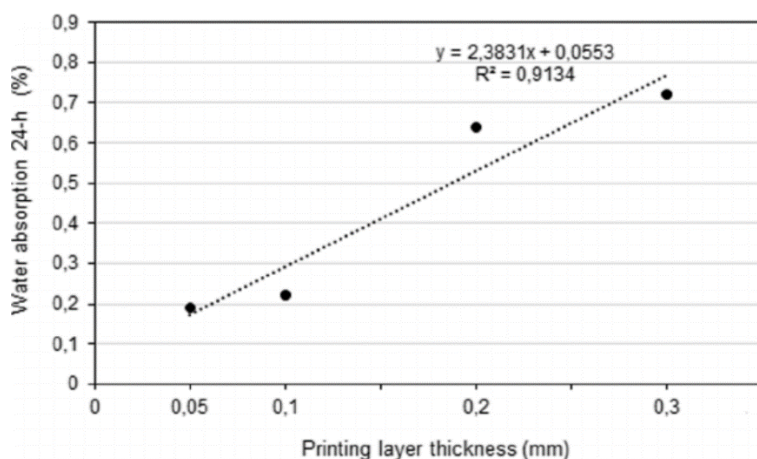
proovide veemavus pärast 28-päevast leotamist normaalse temperatuuriga vees (tabel 3). (Ayrilmiso, Kariz, Kwon ja Kuzman 2018)

3D-printed wood/PLA sample code	Printing layer thickness (mm)	Density (g/cm)	Water absorption (28 days) (%)	Bending properties		Tensile properties	
				Bending strength (MPa)	Bending modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (MPa)
A	0.05	1.008 (0.010)	0.19 (0.03) a	128.3 (4.0) a	4887 (145) a	35.5 (1.5) a	3642 (122) a
B	0.1	0.993 (0.011)	0.22 (0.05) a	121.7 (4.2) b	4350 (125) b	33.9 (1.2) b	3410 (141) b
C	0.2	0.980 (0.009)	0.64 (0.04) b	113.6 (3.8) c	4125 (137) c	28.7 (1.4) c	3115 (133) c
D	0.3	0.975 (0.08)	0.72 (0.06) c	84.3 (2.8) d	3580 (103) d	20.5 (0.7) d	2567 (92) d

Groups with the same letters in a column indicate that there is no statistical difference ($p < 0.05$) between the specimens according to Duncan's multiple range test. The values in the parentheses are standard deviations

Tabel 2. Vee imendumine (Ayrilmiso, Kariz, Kwon ja Kuzman 2018).

Seda saab seletada asjaoluga, et proovide poorsus suurenes printimise paksuse suurenemisega, mille tulemuseks oli suurem veemavus. Trükitud kiudude omavahelised vahed suurenesid prindikihi paksuse suurenemisega (joonis 13). Neid lünki saab veega täita pikaajaliselt vees leotamisega, mis suurendab vee tungimist proovidesse. Teine põhjus on tingitud asjaolust, et prindikihi paksuse suurenemisega puutus veega kokku rohkem puidujahu sisaldavat pinda. Puidufilament sisaldab peenestatud puitu, mis on looduslik hüdrofiilne polümeer, ning oma molekulide ahelates sisaldab suurt hulka hüdroksüülrühmi. Tselluloosi ja hemitselluloosi vabad hüdroksüülrühmad loovad vesiniksideme veemolekulidega. Kuna proovide pindala on suurem, siis selle tulemuseks on ka suurem veemavus. Lineaarse regressioonanalüüsi tulemused on toodud joonisel 11. Lineaarne regressioonanalüüs näitas 3D-prinditud proovide tugevat korrelatsiooni ($R^2 = 0,91$) vee absorptsiooni ja prinditud kihi paksuse vahel. (Ayrilmiso, Kariz, Kwon ja Kuzman 2018)

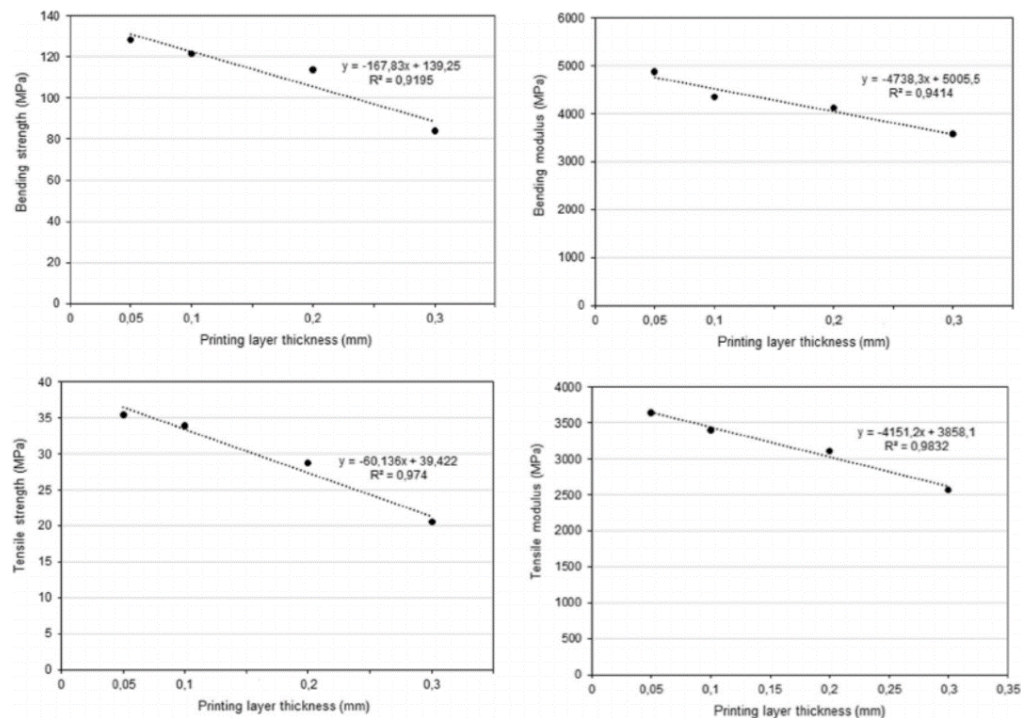


Joonis 13. Seos veemavuse ja printimiskihi paksuse vahel (Ayrilmiso, Kariz, Kwon ja Kuzman 2018).

Proovide mehaanilised omadused on esitatud tabelis 4. Tulemused näitavad, et printimiskihi paksus mõjutab oluliselt 3D-printitud puidu/PLA komposiitide painde- ja tõmbeomadusi. Suurimad mehaanilised omadused leiti proovil, mille printimiskihi paksus oli 0,05 mm, millele järgnes vastavalt 0,1 mm, 0,2 mm ja 0,3 mm. Leiti, et printimiskihi paksusega 0,05 mm on katsekehade paindetugevus ja paindemoodul vastavalt 128,3 MPa ja 4887 MPa. Sarnaseid tulemusi leiti ka tõmbeomaduste osas. (Ayrilmiso, Kariz, Kwon ja Kuzman 2018)

Statistilise analüüsi tulemused näitavad, et kõik erinevate printimiskihtidega eksemplarid erinesid teineteisest märkimisväärselt. Erinevad paksusega proovitükid (vt tabel 4) esindavad statistilisi erinevusi 95% usaldusnivooga. Leiti tugev seos (R^2) mehaaniliste omaduste ja printimiskihi paksuse vahel. Paindetugevuse ja paindemooduli R^2 väärtused leiti vastavalt 0,92 ja 0,94. Sarnane korrelatsioon (joonis 14) leiti ka tõmbetugevuses (0,97) ja tõmbejõumoodulis (0,98). (Ayrilmiso, Kariz, Kwon ja Kuzman 2018)

Nagu on näidatud joonisel 12, saadakse seose arvutamisel teoreetiline sirge ja korrelatsiooni koefitsient (r) mõõdab, kui lähedased on esitatud andmed meie arvutatud teoreetilise sirgjoone suhtes. R^2 on sõltuva muutuja koguvariatsiooni protsent, mida arvestatakse sõltumatu muutujaga. Kihtide arv vähenes printimiskihi paksuse vähenemise funktsioonina, kui kõigi proovide paksus hoiti konstantsena (4 mm). Kuna kihi paksus oli 0,3 mm, oli puidu komposiitproovidel kõige vähem kihte. (Ayrilmiso, Kariz, Kwon ja Kuzman 2018)



Joonis 14. Puidukomposiitmaterjali mehaaniliste tugevuste võrdlus (Ayrilmiso, Kariz, Kwon ja Kuzman 2018).

0,05 mm kihi paksusega proovide suuremat tugevust saab seletada väiksema õhuvahe ja materjali suhtega, mille korral purunemiskoht saavutati suurema koormuse korral. (Ayrilmiso, Kariz, Kwon ja Kuzman 2018)

3D-prinditud komposiitmaterjali proovide tegelikud ristlõiked sõltuvalt prinditud paksusest on esitatud fotodel (foto 15). Mikroskoopiline analüüs näitas, et kihtide paksuse tõus põhjustas suuremaid lünki, mis suurendas proovide ristlõike poorsust. Poorsus vähendas materjalide mehaanilisi omadusi ja suurendab vee imendumist. Kihi paksuse suurendamine muutis düüsi kaudu pressitud materjali suhtelist kogust. Õhema kihiga valmistatud proovide tõmbe- ja paindeomadused näitasid murdumisel suuremat vastupidavust võrreldes katsekehaga, mis oli valmistatud paksema kihiga. (Ayrilmiso, Kariz, Kwon ja Kuzman 2018)

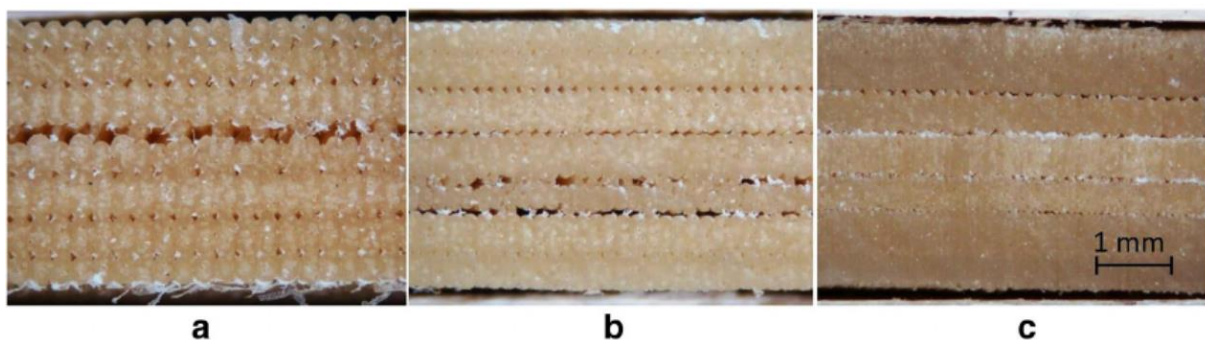


Foto 15. Mikroskoopiline suurendus prinditud ristlõikest kihtidele a 0.3 mm, b 0.2 mm, c 0.1 mm (Ayrilmiso, Kariz, Kwon ja Kuzman 2018).

3D-prinditud proovide veeimavus suurenes trükikihi paksuse suurenemisega 0,05 kuni 0,3 mm. See on seletatav asjaoluga, et 3D-prinditud näidise tühja ruumi hulk suurenes suureneva kihi paksuse piires, mis imab rohkem vett. 3D-trükitud puit/PLA-komposiitmaterjalide proovide elastsus- ja tõmbeomadused paranesid märkimisväärselt, vähendades printimise paksust. Kihi paksuse suurenemine tekitas suuremaid lünki, mis suurendas proovi ristlõike poorsust. Suurem poorsus tingis madalamad mehaanilised omadused. Tulemustest selgus, et printimise kihilisuse vähenemine suurendas proovide tugevust ja moodulit, kuna samas mahus oli rohkem materjali. (Ayrilmiso, Kariz, Kwon ja Kuzman 2018)

Filamendi kuivatamine

Puidufilamendis olev niiskus võib rikkuda kogu prinditud objekti tugevust ja kvaliteeti. Õhuniiskuse filamendi seest välja saamiseks on mitmeid mooduseid. Üks sagedasem moodus kodukasutajate seas on elektrilise ahju kasutamine, kus PLA filamenti hoitakse 4-6 tunni kestel temperatuuril umbes 40-45°C (PLA filament), kuid vale temperatuuri seadistamine võib rikkuda kogu filamendi materjali. Teiseks võimaluseks on spetsiaalsed väiksed kuivatid või toidu dehüdraator. Professionaalseks võimaluseks on kasutada spetsiaalset filamendi kuivatuskappi. (Konde 2020)

3D-printimise filamendikapp on üks parimaid lahendusi niiskusekontrolli saavutamiseks ja filamentide hoiustamisel. Automaatne kapp hoiab õiget niiskust ja temperatuuri, mis takitab niiskuse teket kapi sees. Kuivatuskappi on võimalik seadistada madala, keskmise või niiske õhuniiskuse režiimi peale. Aktiivne kapp suudab hoida filamenti kuivana isegi printimise ajal. (Walleser 2020)

Hügrimeetriga varustatud automaatne niiskuse kontrollkapp (foto 16) võimaldab kiiret ja lihtsat viisi 3D-printeri filamentide hoiustamiseks ilma probleemideta ja liigselt kuumutamata (mis võib juhtuda tavalise elektrilise ahjuga). (Walleser 2020)



Humidity Before



Humidity After Powering On

Foto 16. StatPro 3D filamendi hoiustamiskapp, näha on niiskusetase enne ja pärast kapi käivitamist (Walleser 2020).

1.1.2 Filamendi paksuse erinevused

Esimesed FDM printerid põhinesid 70mil (1,78 mm) filamendil. Kuigi paljud arvavad, et 3.00 mm eksisteeris enne 1,75 mm filamenti, kasutas *Stratasys* enne *RepRapi* ajastut standardit, mis oli 1,75mm filamendile palju lähemal. *RepRapi* kogukond kasutas algusaegadel 3.00 mm filamenti ning alles 2011 sai 1,75 mm filament populaarseks. Hetkel on saada peamiselt kahte erineva diameetriga filamenti (foto 17) 3.00 mm ja 1.75 mm. (Carrier 2018)



Foto 17. Puidufilamendid (*LayWoo-D3*) 3.00 mm ja 1.75 mm

Kuid asjaolu, et kasutatakse kahte erinevat filamendi jämedust peetakse tihti vanaks harjumuseks. Inimesed, kellel on 3D-printer juba olemas, on kindla jämedusega harjunud ja nad tahavad sellest kinni pidada. Teatud filamendi jämeduse valimisel peavad mõned kasutajad 1,75mm filamenti liiga õhukeseks ja seda on liiga lihtne murda, samas 3.00 mm peetakse väga jäigaks, mida on raske käsitleda. (Carrier 2018)

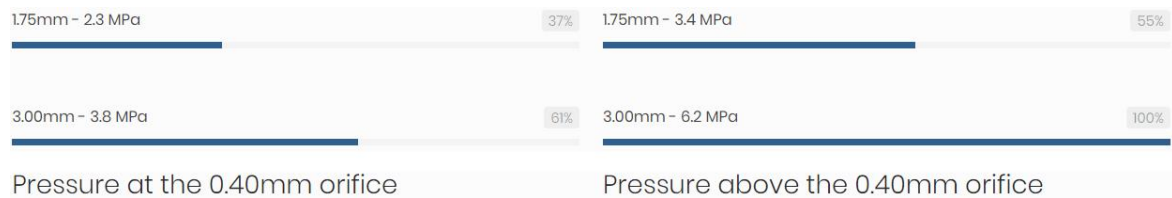
3.00 mm filamendi ostmisel peab teadma, et neid on kaks versiooni. On olemas 3.00 mm filament mille tegelik diameeter on 2.85 mm ja siis on 3.00 mm, millel on reaalselt 3.00 mm diameeter (Carrier 2018). Kõige tavalisemalt on kasutusel 2.85 mm, mida nimetatakse 3.00 mm filamendiks (Carrier 2018). Mõned printeritootjad nagu *Ultimakers* ja *Airwolfs* on ehitanud printerid spetsiaalselt 2.85 mm filamendi jaoks, sisestades tegeliku 3.00 mm filamendi võib põhjustada rohkelt probleeme (Shawki 2016). Spetsialiseerunud filamendi tarnijad lisavad tihipeale õige läbimõõdu eraldi juurde (Carrier 2018). Puidufilamentide puhul on 3.00 mm filament tunduvalt tugevam ja ei lähe nii hapralt katki kui 1.75 mm. (Which filament diameter is better: 1.75 mm or 3 mm? 2017)

Printimise ajal võitleb ekstruuder tekkiva rõhu vastu, et moodustada sulaplastist väljundvoog. Kui rõhk on liiga kõrge, jätab ekstruuderimootor sammud vahele või jahvatab filamendi seina. Filamendi viskoossus printimisel sõltub temperatuurist ja kiirem väljapressimine tähendab seda, et filament saab sulamiseks vähem aega. (Carrier 2018)

Philippe Carrier viis läbi analüüsi ja simulatsiooni, uurimaks rõhkude avaldumist ja temperatuuri käitumist printimise ajal. Ta võrdles 1.75 mm ja 3.00 mm filamenti ja nende printimiskeskondasid. (Carrier 2018)

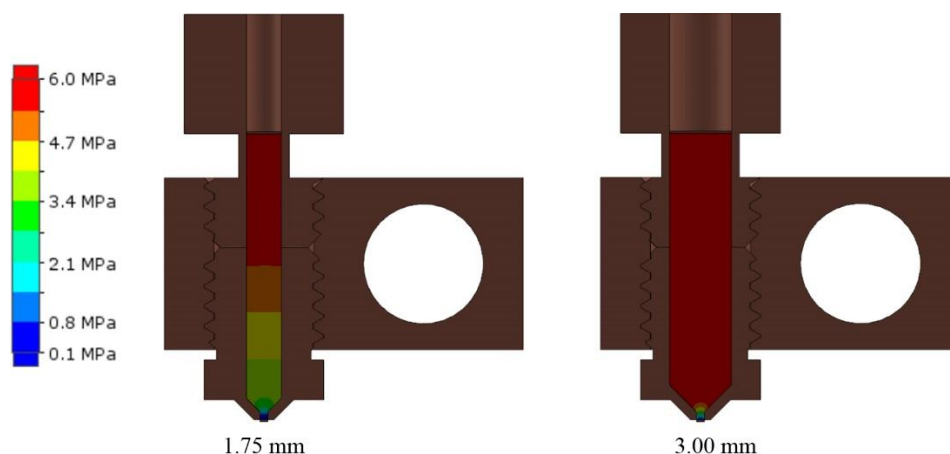
Düüsis ehituses muutub läbimõõt lehrina suurest osast (kust materjal kuumutamiseks sisse pressitakse) väga väikeseks avaks. Selle väikse printimisava järgi nimetatakse düüsi läbimõõtu. Kõige tavalisem düüsi diameeter on 0,40 mm. Läbiviidud arvutuses uuriti rõhuteguri suurenemist, kui minna 3 mm filamendi puhul vahemikust 3,10 mm kuni 0,40 mm ja 1.75 mm filamendi juures vahemikust 2,00 mm kuni 0,40 mm. (Carrier 2018)

Analüüsi tulemus näitas (joonis 15), et rõhk on 3,00 mm filamendi korral umbes 1,63 korda suurem, seega on vajalik jõudu rakendada 3,92 korda rohkem. (Carrier 2018)



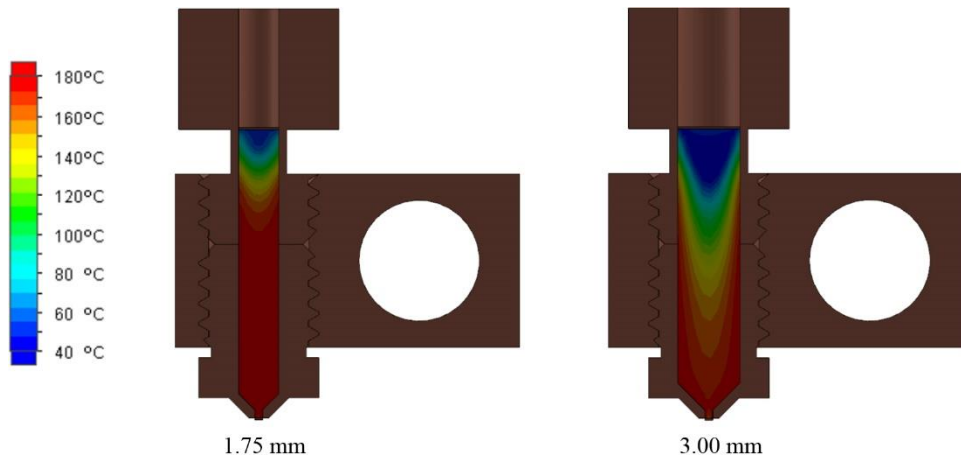
Joonis 15. Rõhu teke 1.75 mm ja 3.00 mm filamentide printimisel (Carrier 2018)

Joonistel (joonis 16) peal on näha visuaalset simulatsiooni, kus kasutati PLA konfiguratsiooniga 1.75 mm ja 3,00 mm filamentide rõhu asetsust printimise ajal. (Carrier 2018)



Joonis 16. Simulatsioon rõhkude asetsemisest printimispeas (Carrier 2018).

Polümeerid on halvad soojusjuhid. Näiteks on PLA soojusjuhtivus toatemperatuuril 0,11 W / mK ja temperatuuril 150 °C kuni 230 °C 0,19 W / mK. See on võrreldes vasega (385 W / mK) üsna madal! Kui filament jõuab sulamiskambrisse (joonis 17), hakkab välimine kest printimispeas soojust neelama. PLA hea soojuseisolatsiooni omadused takistavad kuumuse sattumist filamendi südamikku. Mida paksem on filament (suurem läbimõõt), seda raskem on jõuda soojusel kiirelt keskpunkti. (Carrier 2018)



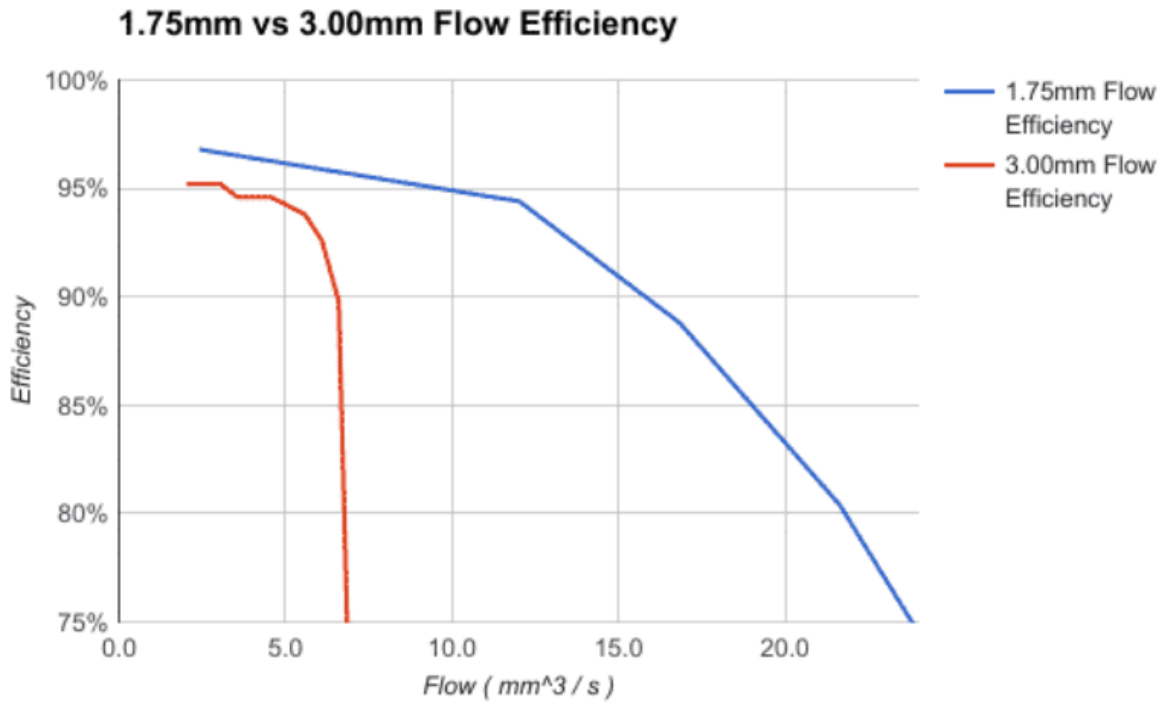
Joonis 17. simulatsioon temperatuuri asetsemisest printimispeas (Carrier 2018).

1,75mm filament on parem peenemate detailide jaoks. Täpus on vajalik kui prinditakse peent detaili ja düüsi diameeter on 0,20 mm. 3.00 mm filamendi puhul ei ole suure jõu ja rõhu tekkimise tõttu väga otstarbekas, kasutada peent düüsi. Trükikiirust tuleb vähendada ja ekstruuder peab olema väga võimas. (Carrier 2018)

Kui printida 2,00 mm läbimõõduga düüsi abil, on ilmselgelt ainus valik 3,00 mm filamendid. 1,75 mm jaoks on vaja keerukamat düüsi konstruktsiooni, et see suudaks printida filamendi enda läbimõõdust laiemalt. (Carrier 2018)

Kiire printimine, ei sõltu alati pihusti suuruselt, kihi kõrgusest ega printimiskiirusest. Kõigi nende sätete segu määrab ruumala voo. Tänu paremale soojusülekanne efektiivsusele 1,75mm materjali juures on printimispea võimeline väljastama suuremat kogust vedelat filamentit, kui võrrelda sama kuumust kasutades 3,00 mm. Pikemast sulamiskambrist oleks kasu mõlema filamendi suurusel. (Carrier 2018)

Gaafikul (joonis 18) on näha võrdlusvoo testi, mis on koostatud 1,75 mm ja 3,00 mm filamendiga. Düüsi suuruseks on 0,80mm. Mõlemas katsefilamendis kasutati sama tootjat, tüüpi ja värvi. Tulemus näitas, et pärast $6 \text{ mm}^3 / \text{s}$ suurenes rõhk 3.00 mm filamendil väga kiiresti ja ekstruuder ei suutnud kiiremini suruda. (Carrier 2018)



Joonis 18. 1.75 mm ja 3.00 mm voolavuse võrdlus (Carrier 2018).

1.1.3 Ülevaade olemasolevatest puidufilamentidest

ColorFabb. See Hollandis asuv ettevõtte pakub standardset puit-, bambus- ja korgitäidet; ColorFabi tugevus on pakutav mitmekesisus. Neilt üks filamendipool maksab 49,99 eurot, kuid saadava kvaliteediga on see väärt. Kuid oluline on teada, et ColorFabi puidutäidisega kiud pole mõeldud algajatele. Nende kõrge kvaliteet ja suhteline kulu tähendavad, et peate oleme kursis selle unikaalse materjali eripäradest ja käitumisest printimisel. (Hestay 2020).

MG Chemicals. See bränd kasutab puiduosakeste jaoks paplit, umbes 25% segatud PLA-ga. Pappi puiduosakesed on suuremad kui teistel puitfilamentidel, nii et ummistumise vältimiseks veenduge, et teil oleks düüs vähemalt 0,4 mm. Kui põletate filamendi ekstruuderis ära, on seda suuremate tükkide tõttu tunduvalt raskem välja kraapida. Alustustamiseks on see suurepärase filament. See on sama vastupidav kui mis tahes muu tavaline puitfilament, kuid hind on 31,45 eurot, mis on tunduvalt soodsam kui teised puidufilamentid. (Hestay 2020).

HatchBox. Sellel ettevõttel on lukustuse kvaliteedikontroll. See tähendab, et nende puitkiud ummistavad teie ekstruuderit väiksema tõenäosusega, kuna nende hälve on eeldatavast läbimõõdust kuni +/- 0,01 mm; nii et kõik teie ostetud hõõgniidid jäävad reklaamitava läbimõõduga millimeetri sajandiku sisse. See on tavalise +/- 0,05 mm tolerantsiga võrreldes väga hea. HatchBox puitfilamentide hind on 34,99 eurot. (Hestay 2020).

Laywood Filaments. Saksa ettevõtte asutaja Kai Parthy leiutas 2013. aastal 3D-printimiseks puitfilamendi. *LayWood Filaments* müüb heledat kirsitüüpi, mis tähendab, et saate katsetada temperatuuri muutmist, et luua erinevat värvi lõpptulemust. Samuti müüakse elastset puitfilament, mis on vahepeal omamoodi kasulik. Filamenti on võimalik osta 34 euroga. (Hestay 2020).

TimberFill. Tegu on Tšehhi ettevõttega (Tracxn 2020). Need puidutäidisega 3D-printimisfilamentid on valmistatud 100% biolagunevatest allikatest. Timberfill pakub suhteliselt suurt puiduvärvide valikut. Saab valida kaneeli, heleda puidu tooni, roosipuu ja šampanja seast - need kõik pakuvad looduslikke variatsioone, mida saab oma projektiga sobitada. See filament on kallim kui enamik teisi, mille hind on 51,45 eurot pooli kohta. (Hestay 2020).

EasyWood. Sellel ettevõttel on lai sortiment, valikus on paju, mänd, oliiv, eebenipuu, seeder, kask ja isegi kookos. Neede filamentide puidusisaldus on 40% ja nad pakuvad alustamsieks ka näidispakke erinevate filamentidega, hinnaga 18 eurot. *EasyWoodi* filamentide poolid maksavad 31 eurot. (Hestay 2020).

Hestay. Antud ettevõtte asub Hollandis. Neil on valikus ainult üks puitfilament, kuid läbimõõt on saadaval kolmes versioonis: 1,75 mm, 2,85 mm või 3,0 mm. Nende filament on PLA põhine ja sisaldab 35% puitu, hind on 36.95 eurot (Hestay 2020).

Torwell 3D. *Torwell* kasutab filamentidest 35% ulatuses ümbertöödeldud puitu. Teine 65% on kõrgekvaliteediline PLA mille tulemuseks on lihtne ja sujuv 3D-printimisprotsess. Saadaval on 1,75 mm või 3,00 mm diameetriga filamendid. See ettevõtte asub Austraalias, mis võib tähendada pikemat tarneaega, kui ei ela selle maailmajao lähedal. (Hestay 2020)

2.2 Filamendi valmistamine

Järgnevas uuringus valmistati mööbli puidujäätmetest PLA lisandiga filament. Valmistati erineva puidusisaldusega (10, 20, 30 ja 40%) filamendid (Pringle, Rudnicki ja Pearce 2018).

Puidumaterjali jäägid saadi erinevatelt mööblitootjatelt. Peale saepuru oli materjaliks ka LDF/MDF ja fenoolvaikudega immutatud melamiin/puitlaastplaat/paber plaate. Neid materjale kasutati saadud kujul ja ei eemaldatud toormaterjalist, et põhjalikumalt kontrollida puidujäätmete ringlussevõetavust. Mööblitootjatelt võeti vastu kõik materjal, olenemata millises seisus või saastunud olid pinnad. Suuremad materjalid, nagu plaadid purustati algselt lintsae kaudu 10x6 cm suurusteks osadeks puiduhakkurisse söötmiseks (foto 18A). (Pringle, Rudnicki ja Pearce 2018).



Foto 18. A) puiduhakkur, B) haamriveski ja C) 80-mikroniline peenosakeste sõeluja (Pringle, Rudnicki ja Pearce 2018).

Materjal purustati hakkuris kolm korda ja erinevad puidupõhised mööblijäätmed segati kokku, et saada iga tarnija materjalidest ühtlane koostise massiprotsent. Järgmiseks suunati materjal haamerveskisse (foto 18B), kus see peenestati tükkideks suurusega 0,75 mm - 3,00 mm 30 minunti jooksul. Liigselt jämedate osakeste välja sõelumiseks kasutati 80 ja 210 mikroniga roostevaba terasest võrkusid (foto 18C). Sõelumine automatiseeriti vibreeriva õhutusseadmega (mudel *H-1756* ettevõttelt *Humboldt*), et toota vähemalt 80 mikronilisi osakesi (Pringle, Rudnicki ja Pearce 2018).

Materjal paigutati esmalt 210 mikromeetrise avaga sõela, mis oli kinnitatud vibratsiooni ajaks kummipaeltega ämbri külge, et võimaldada optimaalset raputamist. Seejärel korrati protsessi 80 mikroni suuruse sõelaga tunni aja vältel. Protsessi lõpuks oli pulber teraviljajahu konsistentsiga. Kogu selle protsessi vältel ei mõõdetud kunagi otseselt niiskusesisaldust. Puidujäätmete pulbermaterjali aglomeratsiooni puudumise ja vaba voolavuse lihtsuse

käitlemise vaatlusel järel dati, et redutseerimisprotsess ajal tekkinud soojus vähendas niiskusesisaldust vastuvõetava tasemeni (Pringle, Rudnicki ja Pearce 2018).

Filamendi sideaineks kasutati PLA graanuleid (*NatureWorks, 4043D*). PLA graanulite temperatuur kuumutati 210 °C-ni, kuni PLA muutus viskoosseks. Puidujäätmete pulbrit lisati järk-järgult samal ajal segades segu (vt foto 19A). Segul lasti taas tõusta temperatuurini 210 °C, et kompenseerida temperatuuri langust materjali lisamisel ja tagada viskoossus segamise ajal. Lisaks suurendati segamiskiirust, et vältida puidupulbri söestumist segamisel. Kui materjal oli ühtlaselt segunenud, eemaldati kuumutuselement ja lasti õhu käes (toatemperatuuril) jahtuda ning asetatati metallpinnale, et see toimiks jahutusradiaatorina (foto 19B). (Pringle, Rudnicki ja Pearce 2018)

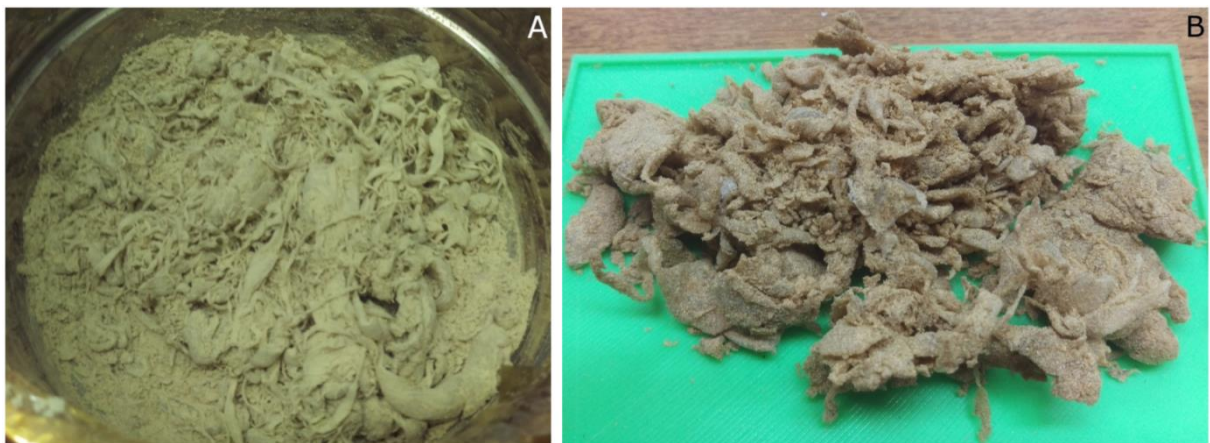


Foto 19. A) Mehaaniline PLA ja puidukiü segamine B) PLA ja puidujäätmete segu, peale jahutamist toatemperatuurini (Pringle, Rudnicki ja Pearce 2018).

Peale jahutamist sisestati mass puiduhakkurisse, et saada umbkaudu 3-4 mm läbimõõduga osakesed (foto 20A). (Pringle, Rudnicki ja Pearce 2018)

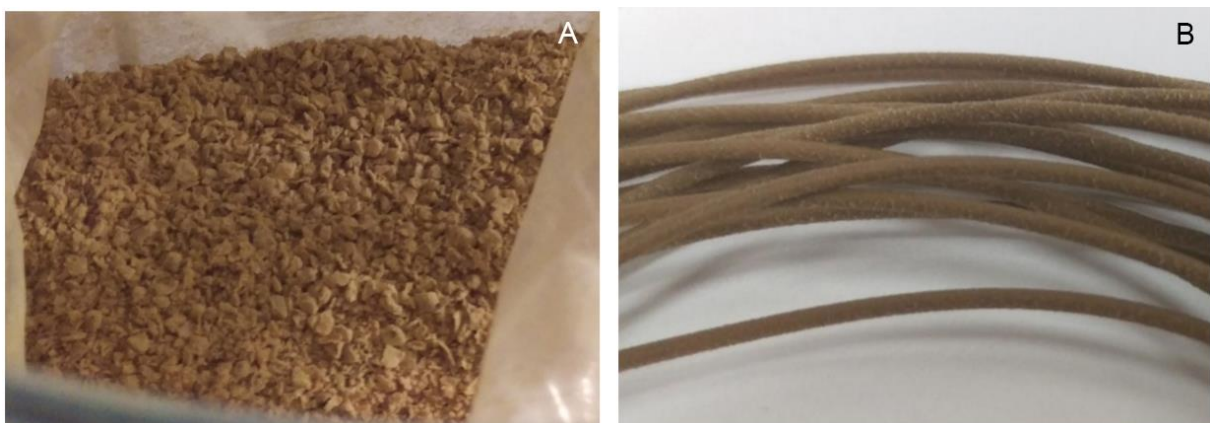


Foto 20. A) hakitud filamendi materjal B) valmistatud filament (Pringle, Rudnicki ja Pearce 2018).

Filament oli vaja valmistada ühtlase ja õige jämedusega, et see oleks sobilik FDM tehnoloogial printimismasinale. Filamendi ehk jõhvi valmistamiseks kasutati materjali ekstruudermasinat,

mis oli vertikaalse kujundusega (foto 21B) ja mootori maksimaalne töökiirus 15 rpm. Erineva puidusisaldusega (10, 20, 30 ja 40%) filamentide valmistamiseks lisati vastavas koguses PLA graanuleid juurde (foto 21A). Ekstrusiooniprotsessi ajal paigutati õhkjahutus väljapressimise juurde, et välimine kiht hanguks kiiremini ning säiluks filamenti sile välispind, kui samal ajal südamik jäi mõnda aega elastseks. Filament jookutati peale väljapressimist läbi mitme anduri (läbimõõt ja pikkus), et kontrollida tolerantsi. Filamenti õige paksus on kriitilise tähtsusega, et vältida printimisprotsessis probleeme. (Pringle, Rudnicki ja Pearce 2018).

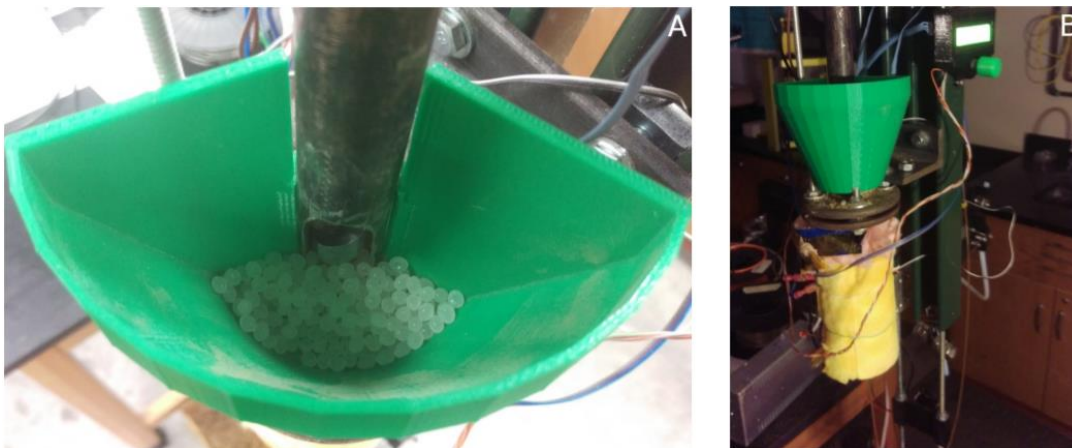


Foto 21. A) PLA pelletite lisamine B) Vertikaalne filamendimasin (Pringle, Rudnicki ja Pearce 2018).

Analüüsidest valmistatud filamente oli näha, et mida suurem on puidusisaldus, seda läbipaistmatum ja puidulaadsem on materjal. Puidu sisalduse suurenemisel suurenes filamenti jäikus, mis määrati kindlaks filamenti spiraalvormis käsitlemisel poolile. Mõõtmisel selgus, et filamenti diameeter on $1,65 \pm 0,10$ mm. See ei olnud ideaalne, sest sooviti saavutada kaubandusliku filamenti jämedust, mis on $1,75 \pm 0,05$ mm. (Pringle, Rudnicki ja Pearce 2018). Printimisel 0.5 mm düüsiga esines rohkelt printimispea ummistust, kuna puiduosakesed olid filamenti sees ebahürtlase suurusega. Pintimiskatsete võrdlemisel täheldati, et mida suurem puidu sisalduse protsent oli materjalis, seda tihedamalt tekkisid ummistused. Teine ummistuse probleem võis olla materjali saastumine, näiteks tolm, mis võib filamendile settida, kui see jäetakse printimiskeskonnas järelevalveta. Selle saastumise vältimiseks on võimalik filamenti ümber enne printerisse sisenemist puhastuskäsn paigaldada, et see puhastaks filamendipinda. (Pringle, Rudnicki ja Pearce 2018).

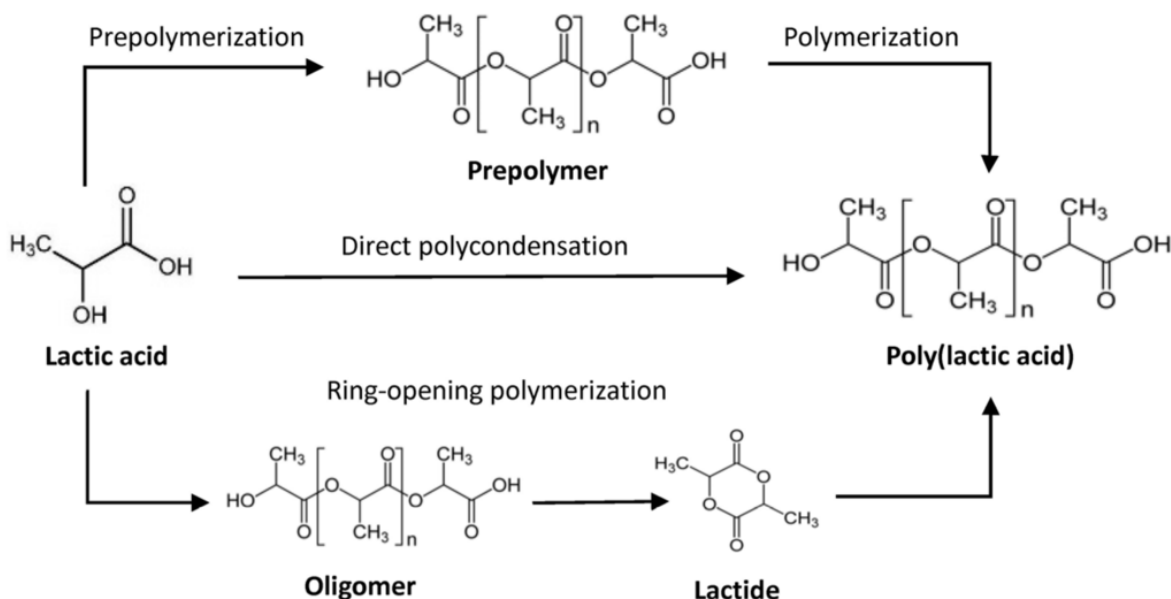
2.3 Sideaine PLA/ filamendi polümeer

Polüpiimhape ehk inglisekeeles *polylactic acid* (PLA) on taastuvatest ressursidest valmistatud polümeer. PLA erineb enamikust termoplastilistest polümeeridest selle poolest, et see on saadud taastuvatest ressursidest nagu maisitärklis, tapioki juur või suhkruroog. Enamik teisi termoplaste on seevastu toodetud taastumatutest naftavarudest. Biomassist saadud plaste (nt PLA) nimetatakse bioplastideks. (Gutierrez 2020)

Polüpiimhape on biolagunev ja selle omadused on sarnased polüpropüleeniga (PP), polüetüleeniga (PE) või polüstüreeniga (PS). Seda saab toota juba olemasolevate tootmisadmetega (need, mis on projekteeritud ja algselt kasutatud naftakeemiatööstuse plastide jaoks). See muudab selle tootmise suhteliselt kuluefektiivseks. (Rogers 2015)

PLA on polüester, mida toodetakse kontrollitud tingimustes fermenteerimisel süsivesikute allikast nagu suhkruroost. Selle ehitusplokid võivad olla piimhappe- või laktiidmonomeerid. Need polümeriseeritakse (joonis 19) hiljem PLA-ks. (Gutierrez 2020)

Algselt läbib mais märja jahvatuse, selles protsessis eraldub tärklis. Seejärel segatakse tärklis happe või ensüümidega ja kuumutatakse. See protsess “lõhustab” tärklise dekstroosiks (D-glükoosiks) või fruktoosiks. Lõpuks saadakse glükoosi kääritamisel L-piimhappe, mis on PLA põhikomponent. Piimhappest PLA-plasti tootmiseks kasutatakse kahte meetodit. Esimeses neist kasutatakse vaheühendina laktiidi, mille tulemuseks on suurema molekulmassiga produkt. Teine meetod seisneb piimhappe otseses polümerisatsioonis. (Gutierrez 2020)



Joonis 19. PLA tootmisprotsess (Hu, Daoud, Cheuk ja Lin 2016).

Polüpiimahapet saab kasutada erinevate toodete valmistamiseks, nagu plastkiled, pudelid ja biolagunevaid meditsiiniseadmeid (nt kruvid, tihvtid, vardad ja plaadid, mis lagunevad eeldatavalt 6–12 kuu jooksul). Materjali madala klaasistumistemperatuuri (60-65 °C) tõttu ei saa seda kasutada valdkondades, kus see peab taluma kuuma (näiteks kuumaplasttopsid). (Rogers 2015)

PLA kui bioplastiku suur eelis on selle mitmekülgsus ja asjaolu, et see laguneb keskkonnaga kokkupuutel looduslikult. Võrreldes tavalise plastiga (mille sama keskkond võib laguneda mitusada kuni tuhat aastat) on see tõeliselt fenomenaalne. Sellest tulenevalt on PLA-l suur potentsiaal olla väga kasulik lühikese elueaga rakendustes, kus biolagunevus on väga kasulik (nt plastveepudeli või puu- ja köögiviljakonteineri kujul). Vaatamata oma võimele aja jooksul biolaguneda, on PLA tavapärasel kasutuses (nt plastik-elektronika osana) äärmiselt vastupidav. (Rogers 2015)

PLA on üks kahest levinumast plastist, mida kasutatakse FDM-masinate (3D-printimine) ja on tavaliselt saadaval 3D-prinditava filamendina (Rogers 2015). PLA materjali allaneelamisel, see seedetraktis midagi halba ei tee ja väljub loomulikult teel ilma lagunemata, kuid seda soovitatakse mitte süüa. Kuigi PLA materjal ei ole toksiline, siis võib filamendis lisatud lisaineid (nt violetne värv), eraldada toksilisi aineid. (Polylactic acid, PLA 2020)

Kui PLA on valmistatud toorainest (nt mais), millele on kasutaja allergiline, siis selle käitlemine ei tekita allergilist reaktsiooni. Tärglise (nt maisitärglise) tootmisel kasutatav kuumus eraldab immunoloogiliselt reageerivad ühendid. Profiliin on valk, mis tavaliselt põhjustab allergilist reaktsiooni ja seda PLA toodetes ei leidu. (Polylactic acid, PLA 2020)

PLA omadused

PLA klassifitseeritakse termoplastseks polüestriks (erinevalt termoreaktiivsest) ja nimetus on seotud sellega, kuidas plast reageerib kuumusele. Termoplastsed materjalid muutuvad sulamistemperatuuril vedelaks (PLA korral 150–160 kraadi Celsiuse järgi). Termoplastiliste materjalide peamine kasulik omadus on see, et neid saab kuumutada sulamistemperatuurini, jahutada ja ilma olulist lagunemist uuesti kuumutada. Juba eelnevalt vormitud termoplasti saab kergesti vormida ja seejärel taaskasutada. Seevastu termoreaktiivseid plaste saab kuumutada ainult üks kord (tavaliselt survevalu protsessi ajal). Esimene kuumutamine põhjustab termoreaktiivsete materjalide kinnitumist (sarnaselt 2-osalise epoksiidiga), mille tulemuseks on keemiline muutus, mida ei saa tagasi pöörata. Kui prooviks te termoreaktiivset plasti teist korda kõrge temperatuurini kuumutada, läheb see lihtsalt põlema. PLA kuulub SPI vaigu tunnuskoodi 7 alla ("muud"). (Rogers 2015)

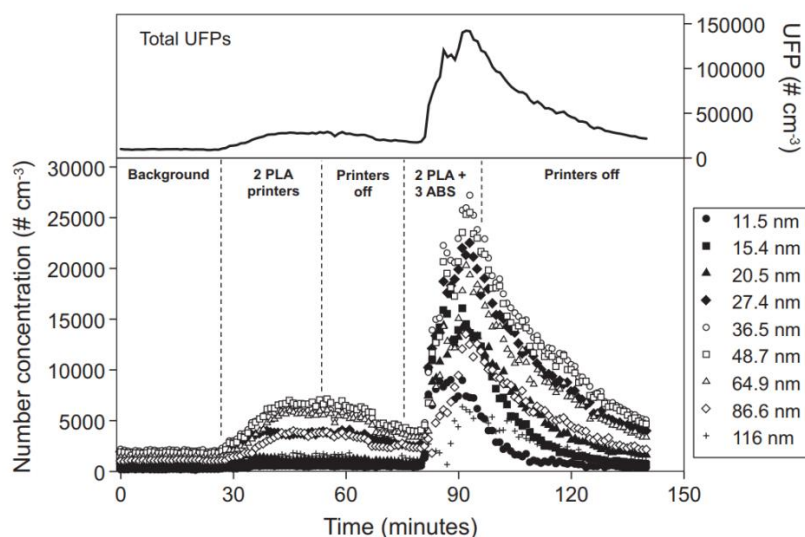
PLA omadused (Rogers 2015).

Tehniline nimi	Polylactic Acid (PLA)
Keemiline valem	$(C_3H_4O_2)_n$
Sulamistemperatuur	PLLA: 157 - 170 °C (315 - 338 °F)
Tüüpiline survevalu temperatuur	PLLA: 178 - 240 °C (353 - 464 °F)
Tõmbetugevus	PLLA: 61 - 66 MPa (8840 - 9500 PSI)
Paindetugevus	PLLA: 48 - 110 MPa (6,950 - 16,000 PSI)
Erikaal	PLLA: 1.24
Kahanemise määr	PLLA: 0.37 - 0.41% (0.0037 - 0.0041 in/in)

Terviseriskid

Polüpiimhape (PLA) on biolagunev ja ei ole toksiline. Seda kasutatakse sageli toidu käitlemisel ja meditsiiniliste implantaatide valmistamisel, mis aja jooksul kehas biolagunevad. 3D printimise ajal PLA sulatamisel tekkivate osakeste sissehingamine võib tekitada terviseriske. (Rogers 2015)

Illinoisi tehnoloogiainstituudis uuriti ülipeente osakeste (UFP) eraldumist õhus (joonis 20) ajal, kui 3D prinditi ABS ja PLA termoplaste (Stephens Azimi Orch Ramos 2013). Antud uuring näitas, et PLA 3D-printerid võivad olla vähem kahjulikud kui ABS-printerid mitte ainult emissioonimäärade erinevuste tõttu, vaid ka seetõttu, et PLA on tegelikult bioühilduv ja seda kasutatakse paljudes meditsiinilistes protseduurides. (Stephens 2013)



Joonis 20. UFP osakeste lendumine 3D printimise ajal (Stephens Azimi Orch Ramos 2013)

Inimeste kokkupuude UFP osakestega on tervise seisukohast üsna oluline. Need ülipeente osakesed ladestuvad nii nina hingamisteedes, kopsudes kui ka alveolaarses piirkonnas. Ladestumine nina hingamisteedesse võib põhjustada haistmisnärvide kaudu, translokatsiooni, ning halvimal juhul insuldi. UFP suurenenud kontsentratsioon kopsudes võib tekitada astma sümptomeid, ning neid on seostatud ka kopsuvähiga (Toglefritz 2018). ABS filamentit printivad kasutajad on märkinud peavalu, pearinglus, iiveldus ja kurgu karedust (McMills 2017).

PLA puudused

PLA-l on suhteliselt madal klaasistumistemperatuur (60-65 °C), mis muudab selle kõrgel temperatuuril töötlemiseks üsna sobimatuks. See materjal võib pehmeneda ja deformeeruda isegi päikese käes kuumenenud autos. (Rogers 2015)

Katses (foto 22) paigutati 136 g raskus PLA topsiku peale, kuumutades 65 °C vajus topsik longu (Creighton 2018).



Figure 5 - Deflection under 0.3lb at 150°F

Foto 22. Raskuse test erinevate plastikutega (Creighton 2018)

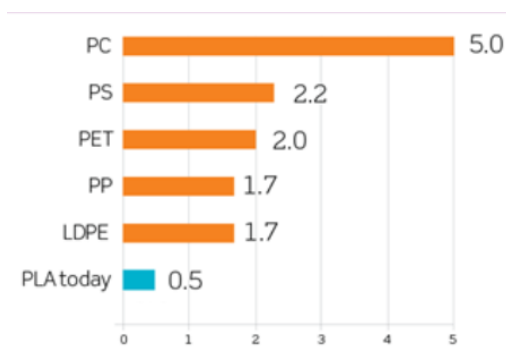
PLA on 3D prototüüpimisel pisut rabadam kui ABS (Rogers 2015).

Mitmed uuringud on näidanud, et merevees on PLA lagunemisvõime väike, mille tõttu ei ole selle kasutus ookeanide prügivõitluses väga suur. Sügavale maapinna sisse kaevatuna, ei ole lagunemine samuti kiire, eriti kuna ese on rõhu all ja puuduvad lagunemisprotsessiks vajalikud komponendid (mikroorganismid ja soojus), vaatamata sellele on materjal loodussõbralik ja ei eralda toksilisi aineid. (Polylactic acid, PLA 2020)

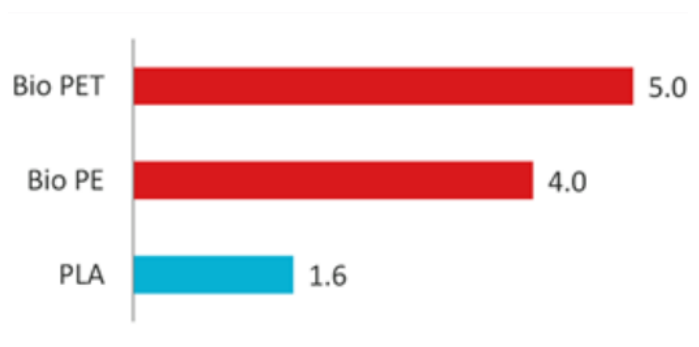
PLA tootmise keskkonnamõju

PLA (polüpiimhape) on nii biopõhine kui ka biolagunev. Selle kasutamine aitab vähendada süsiniku jalajälge ja seda saab utiliseerida erinevatel viisidel, nii taaskasutamisel kui tööstuslikul komposteerumisel. (Bioplastics: The sustainable choice 2020)

Elutsükli analüüs (*life cycle analysis*, LCA) näitab, et PLA tootmisel on süsinikdioksiidi heitkogus neli korda väiksem kui tavalise polüpropüleeni (PP) või polüstireeni (PS) tootmisel (joonis 21) ning 1 kg PLA saamiseks on vaja vaid 1,6 kg taimset biomassi (joonis 22). Muud tüüpi bioplastid vajavad sama koguse lõpptoote saamiseks kuni kolm korda rohkem toorainet. (Bioplastics: The sustainable choice 2020)



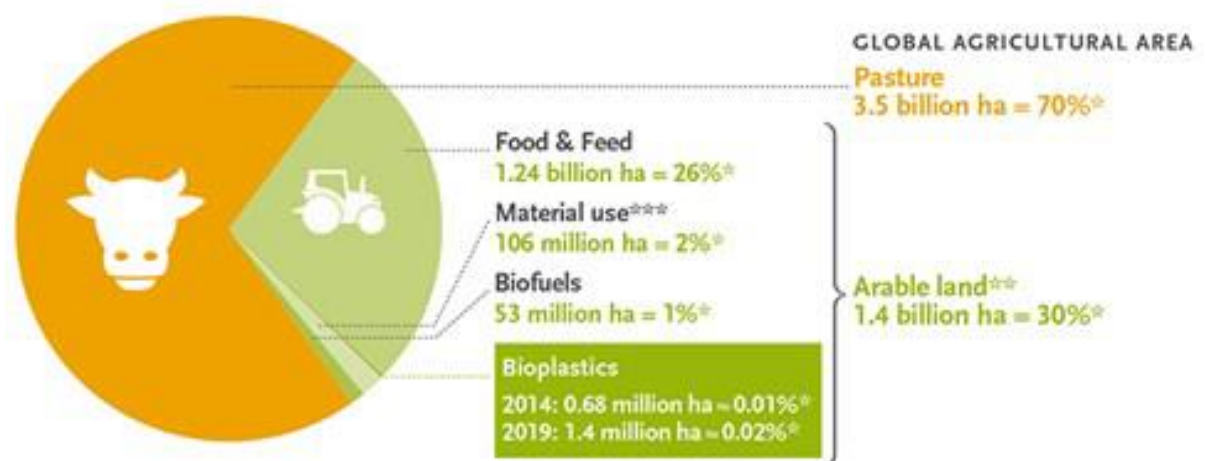
Joonis 21. Süsinikjalajärg plastiku tootmisel (Bioplastics: The sustainable choice 2020).



Joonis 22. Biomassi kasutus kg suhkrul kasutusel kg plastiku tootmisel (Bioplastics: The sustainable choice 2020).

Euroopa Bioplastikute Assotsiatsiooni ja *IfBB* andmetel kasutati 2018. aastal 0,02% haritavast maast biomassi tootmiseks (joonist 23) (Bioplastics: The sustainable choice 2020).

Land use for bioplastics 2014 and 2019



Joonis 23. Haritud maa kasutusprotsent (Bioplastics: The sustainable choice 2020).

PLA jäägid ja lagunemine

Sheni poolt läbiviidud analüüs näitas, et parim PLA materjali utiliseerimise viis on taaskasutus, nagu ka teiste plastide puhul. (Shen 2011)

PLA filamendi jääke on kõige mõistlikum ümbertöödelda filamendi taaskasutusmasinaga (nt *Filabot*). Taaskasutusmasinasse saab sisestada 3D printimisjäägid ning masin pressib välja filamendi, mida saab printeris uuesti taaskasutada. Kuid peab olema ettevaatlik, et ei satuks kokku erinevat tüüpi filamendid, see võib põhjustada filamendi kvaliteedi langust, mis rikub ära uue prinditud eseme! Masinaga saab ise ka filamenti valmistada PLA graanulitest, mis on võimlaik osta kaubandusvõrgust. (Slijkoord 2015)

Biolagunemise protsess ja selle ajaperiood sõltuvad suuresti keskkonnast (soojus, niiskus, bakterid ja seened). PLA laguneb kõige paremini kõrge temperatuuriga (alates 60°C) keskkonnas, kus on rikkalikult mikroorganisme. Koduses kompostihunnikus ei pruugi PLA komposteeruda. Kontrollitud komposteerimiskeskkonnas laguneb PLA loomulikult, mille tõttu klassifitseeritakse seda biolagunevaks ja komposteeruvaks materjaliks. (McCauley 2017)

Berliinis komposteerimistunnelit kasutades lagunes PLA taimepott biojätmete sees 11 päevase tsükli järel täielikult. See oli oluliselt kiirem kui paberi ja enamiku muude orgaaniliste materjalide korral. Isegi apelsinikoored ja banaani koored ei lagunenu täielikult ja vajasis täielikuks lagunemiseks rohkem aega. PLA teekott, mis on tüüpiline tarbekaup, lagunes edukalt ka peale teist tsüklit ehk 22 päeva jooksul. (Zee, Molenveld 2020)

Toatemperatuuril laguneb PLA tunduvalt kauem. Tavalises toatingimustes säilib PLA lagunemiseta palju aastaid, kasutajad on märkinud, et tavatingimustes isegi üle kuue aasta möödudes ei ole visuaalset lagunemisprotsessi tekkinud (Dust 2017). Päikesevalgus ei kiirenda biolagunemist (peale kuumuse), ultravioletvalgus (UV) põhjustab materjalil vaid värvi kaotamist (kui on lisatud värvaineid) ning muutub värvilt luitunuks (Polylactic acid, PLA 2020).

PLA ei biolagune efektiivselt merekeskkonnas. Läbi viidud katses oli 45 päeva möödumisel toimunud lagunemine 10- 18%. Sellegipoolest on PLA naftapõhiste polümeeride kõrval parem keskkonnaalane alternatiiv, kuna päritolu on taastuvatest allikatest ja lagunemisel ei ole eluvormidele toksiline. (Montalvão, Torbati, Hamilton, Machado ja João 2020)

2.4 Pintimisprotsess ja selle mõjutegurid

3D printimisel on vaja mitmeid samme, et tekiks reaalselt käega katsutav objekt. Enne kui objekti saab hakata printima, on vaja luua digitaalne ruumiline ese, mille järgi hakkab 3D printer objekti moodustama. (Flint 2019)

2.4.1 Protsessi kirjeldus- ideest 3D prinditud objektini

3D-printimise eesmärk on luua objektist, mida soovitakse printida, kolmemõõtmelise digitaalfaili füüsiline koopia. Kõige tavalisem viis digitaalse mudeli loomiseks on arvutipõhine disain CAD (*computer-aided design*). Samuti on olemas lai valik professionaalseid ja algtaseme tarkvarasid, mis võimaldavad luua 3D-printimiseks sobivat faili. (Klintevivo 2017)

Oma kujunduse loomiseks võib kasutada 3D-modelleerimise tarkvara, nagu Blender, SketchUp, AutoCad, SolidWorks, Maya, PhotoShop, ThinkerCad või mõnda teist programmi. 3D-prinditava faili loomiseks saab kasutada peaaegu iga 3D-modelleerimise tarkvara. (Klintevivo 2017)

Teine võimalus kolmemõõtmelise digitaalfaili loomiseks on 3D-skaneerimine. 3D-skaneerimine on 3D-printimisega tihedalt seotud tehnoloogia, mis analüüsib reaalse maailma objekti ja loob koheselt selle koopia (Klintevivo 2017). Kõige lihtsam 3D-skaneerimise moodus on fotogrammmeetria. See hõlmab erinevate nurkade alt tehtud objekti fotode seostamist. Fotode tegemiseks kasutatakse kaamerat või nutitelefoni, samal ajal kui fotode kokkusidumine toimub spetsiaalse tarkvara abil. Tarkvara tuvastab pikslid, mis vastavad samale füüsilisele punktile, ja koondab pildid ruumiliseks kujutiseks esmest. (Flint 2019)

Kui CAD kujundus ehk ruumiline kujutis on loodud, peab selle teisendama 3D-printeri failivormingusse. Kõige tavalisem 3D-printimisfailivorming on STL, mis tähistab *STereoLithography* ja on nimetatud kõige esimese 3D-printimisprotsessi järgi. STL-failivormingu peamine eesmärk on 3D-objekti pinnageomeetria kodeerimine. STL-il on ka teisi tähendusi, näiteks standardne kolmnurga keel (*Standard Triangle Language*) ja standardne tesseleerimiskeel (*Standard Tessellation Language*). STL failivorming sisaldab kolmnurkset võrku (hulknurki), mis kirjeldavad kolmemõõtmelise objekti paigutust / pinda. STL-i alternatiivideks on .OBJ ja .3MF. Kõik failivormingud ei sisalda värviteavet. Värvilise 3D-printimise jaoks peab kasutama failivorminguid .X3D, .WRL, .DAE, .PLY. (Klintevivo 2017)

Järgmisena on vaja ese viilutada, see on digitaalse objekti tõlkimine 3D-faili juhisteks, mida 3D-printer hakkab järgima. Selle tegemiseks on vaja spetsiaalset tarkvara (Cura, 3DPrinterOS, IdeaMaker, KISSlicer, Repetier-Host, Slic3r)! Põhimõtteliselt on viilutamine 3D-mudeli jagamine või tükeldamine sadadeks või tuhandeteks horisontaalseteks kihtideks, öeldes masinale samm-sammult, mida täpselt teha. Pärast failide viilutamist genereeritakse uus failivorming (laiendiga .gcode) nimega G-kood. G-kood on kõige laialdasemalt kasutatav arvkode programmeerimiskeel, mida kasutatakse peamiselt arvutipõhises tootmises automatiseeritud tööpinkidel, näiteks 3D-printerite ja CNC tööpinkide (Computer Numerical Controls) juhtimiseks. Kujutisel (foto 23) on näha viilutatud kujutis, kus on määratud 3D printeri liikumisjooned. (Klintevivo 2017)

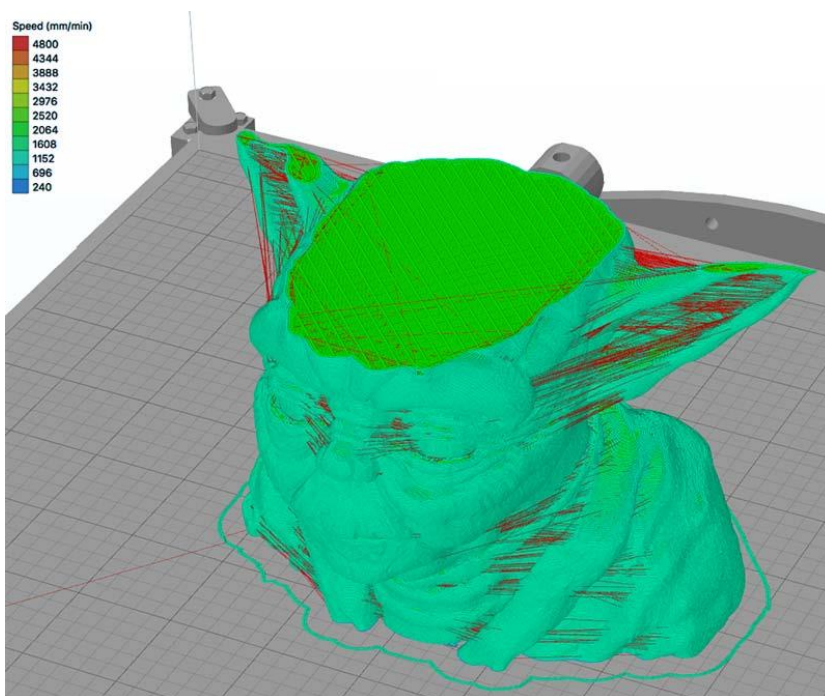


Foto 23. Mudeli digitaalne viilutamine (Klintevivo 2017)

Kui teil on G-kood failina olemas, peab selle printerisse sisestama. Mõnel masinal on USB-kaabel, mis läheb otse arvutist printerisse, kuid kasutatakse ka SD-mälukaarti ja USB-pulka. Mõningatel 3D printeritel on olemas spetsiaalne ekraan ja nupud, mis võimaldavad mugavalt vahetada seadeid või valida õiget faili printimiseks. (Vanceg 2020)

Enne printimise alustamist, tuleks ette valmistada printimisalus, et filament jääks aluse külge korralikult kinni, soovitatakse selleks kasutada spetsiaalset 3D-printimispinda või alternatiivseid vahendeid (pulgaliim, juukselakk, sinine maalariteip, vms). PLA-plasti jaoks tuleks alusplaadile määrata temperatuur umbes 60 kraadi Celsiuse järgi. (Courtney 2019)

Mõnel 3D-printeril on kontrollermenüüs olemas filamendi laadimise ja mahalaadimise võimalus. Enne laadimise/mahalaadimise alustamist veenduge, et ekstruuder pole veel filamendiga koormatud. Kui printimispeas on vana filament, siis eemaldage see kõigepealt. (Courtney 2019)

Kui printeril puudub filamendi mahalaadimisvõimalust, kuumutage ekstruuderit temperatuurini, mis on pisut üle 200 kraadi, siis võtke uus filament ja suruge see ekstruuderisse, samal ajal vajutades vabastuskangi. Pärast seda, kui vana filamendijupp on koonusest välja kukkunud, tõmmake filament sellest välja, jätkates samal ajal vabastuskangile survet. (Courtney 2019)

Kui 3D-printer on varustatud isetasanduva printimisalusega, siis printer mõõdab automaatselt enne printimist aluse kõrguse paika. Kui seda funktsiooni ei ole, siis tuleb valida printeri juhtmenüüst suvandi kodu (home) Z-teljest ja viia see tasapinnaga tasa. Düüsi kahjustuste vältimiseks võib jätta paberijagu vahet aluspinnaga. (Courtney 2019)

3D printerid on valmistatud paljudest liikuvatest ja keerukatest osadest ning eduka printimise saamiseks, vajavad nad korrektset hooldust ja kalibreerimist. Enamik 3D-printerel ei pea pärast printimise käivitamist protsessi jälgima. Seade järgib automatiseeritud G-koodi juhiseid. Niikaua kui tarkvaras ei esine viga või kui masinal ei saa filament otsa, ei tohiks printimisprotsessis probleeme tekkida. (Klintervivo 2017)

3D-prinditud esmete järeltöötlus varieerub sõltuvalt 3D-printimistehnoloogiast ja materjalist millega need on prinditud. Tihtipeale ei vaja prinditud esemed suuremat järeltöötlust, tugede olemasolul eemaldatakse need. Mõndade materjalide puhul (puit ja metall) on mõeldav järeltöötluse tegemine esteetilisema välimuse loomiseks. Järeltöötlus võib olla aeganõudev toiming. (Klintervivo 2017)

2.4.2 Temperatuuri muutmine printimise ajal

Puidufilamenti turule tulekuga oli üheks suureks uudiseks, et sellega saab luua pruunikaid värvivarjundeid, vastavalt temperatuuri muutmisele printimise ajal. (Francois 2012)

Selle efekti katsetamiseks viidi läbi uuring, kus kasutati ettevõttelt *Orbi-Tech* toodetud *Laywoo-d3* puidufilamenti. *LayWoo-d3* on valmistatud taaskasutatud puidust (40%) koos termopolümeeriga (60% PLA). Puidu osakaal filamendis võimaldab 3D-printitud esemel saada puidu väljanägemise. Temperatuuri tõstmise korral, tõmbuvad filamendis olevad puiduosakesed tumedaks. Materjal on võrreldes tavaliste filamentidega (PLA või ABS) tunduvalt kallim. (Trying Out the Orbi-Tech LayWoo-d3 3D Printer Filament 2014)

Testimisel prinditi väikesed monopoli mängu nupumajad (foto 24), kasutades filamenti tootja soovitusel erinevaid temperatuure. Printimisel kasutati *Replicator 2* 3D printerit, düüsi läbimõõduks standardne 0,2 mm, kiiruseks 60 mm / s. Kõrgema temperatuuri (230 ja 250 kraadi) korral tekkisid üpris tumedamad testitükid, kuid kihid ei moodustunud väga hästi ja järjekindlalt. 200 kraadi juures ja madalamal temperatuuril 160-ni langetades olid printimistulemused palju paremad, kuid sellega olid proovitükid heledate toonidega. Samuti täheldati, et madal temperatuur muutis printitud 3D-objektid sujuvamaks ja nende printimiseks kasutatud kihte on raskem näha, kõrgema temperatuuri korral tulid kihid rohkem nähtavale. (Trying Out the Orbi-Tech LayWoo-d3 3D Printer Filament 2014)

LayWoo-D3 3D-printeri filamentit tuleks printerisse ja printipeasse sisestamisel käsitleda ettevaatlikumalt kui teisi filamente, kuna see on habras ja võib kergesti murduda. Printeriga filamentit printides jäi materjal pikemaks ajaks printeripeasse kinni, mis põhjustas düüsi ummistumise. Puhastamise käigus tuli düüsist välja must ja põlenud puitmaterjal. Seega on soovitatav selle filamendiga printimisel olla ettevaatlik ja puhastada seda tavalise PLA filamendiga (näiteks kui printimine on lõpetatud). (Trying Out the Orbi-Tech LayWoo-d3 3D Printer Filament 2014)

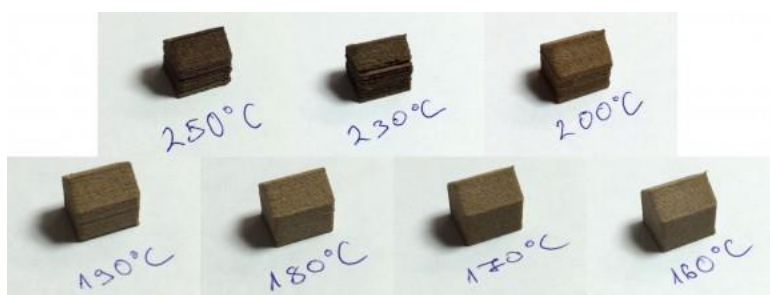
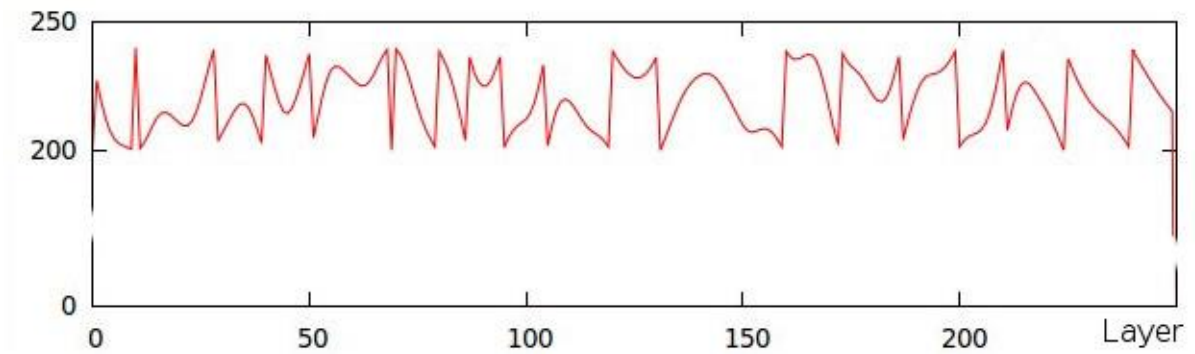


Foto 24. Katseklotsid 160 - 250 (Trying Out the Orbi-Tech LayWoo-d3 3D Printer Filament 2014)

Järgmises katses viis läbi Jeremie Francois temperatuuri muutmise printimise ajal (foto 25). Ta kasutas Laywoo-D3 printimisfilamenti ja Ultimaker FDM printerit. Prinditud kihtide kõrguseks määrati 0.2mm ja seinte paksuseks 1.2mm, täidisvõrestik 20%. Printimisel jääke ei tekkinud. (Francois 2012)

Printimisel kasutati python pluginat temperatuuri kõigutamiseks (joonis 24), temperatuuri vahemikuks valiti 200 – 240C° (Francois 2012).



Joonis 24. Python pluginaga temperatuuri kõigutamine (Francois 2012)



Foto 25. 3D prinditud ese, kasutades temperatuuri muutmist (Francois 2012)

2. PUIDU 3D PRINTIMISE KATSETUS

Puidufilamendiga printimise katsetamiseks otsustasin valmistada laevalgustikupli. Antud eseme printisin välja Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudi laboris, kasutades FDM tehnoloogial 3D-printerit (*lulzbot taz 6*). Antud testi läbiviimisel kasutasin puidufilamenti (*LayWoo-D3*), mis sisaldab 40% puiduosakesi ja 60% PLA. Katses jälgisin materjali käitumist printimisprotsessil ja järeltöötles.

Katse algas katsekeha disainimisega (foto 26). Valgustikupli disain lähtus materjali iseloomust. Eesmärk oli luua vorm, mis peegeldaks puidulikku väljanägemist. Pindadel katsetasin erineva kraadi all nurkasid, eesmärk oli näha, kui hästi prindib masin kaldus olevaid pindasid ning kas printimispõhjaga 45 kraadi all pinnad tulevad korrektselt välja. Katsekeha alumises osas moodustub kolmnurkadest voltidest (sisse-välja) ja ülemises osas tihedamad rombid (keskosa välja suunatult) ja järjest väiksemaks muutudes kulmineerub tipus sik-sak mustriks. Kuna katsekeha pinnamaterjal on õhuke, et valgusallika kiirgus sellest läbi kumaks, siis sellele tugevuse andmiseks on voltide loomine oluline. Eseme väljaprintimine oli mõeldud mitmes osas, et vältida tugistruktuuride (printimise ajal tekkivad toetused) tõttu materjalikadu ja katsetada liimimise võimalikkust. Eseme modeleerisin *SketchUp 2019* programmiga.

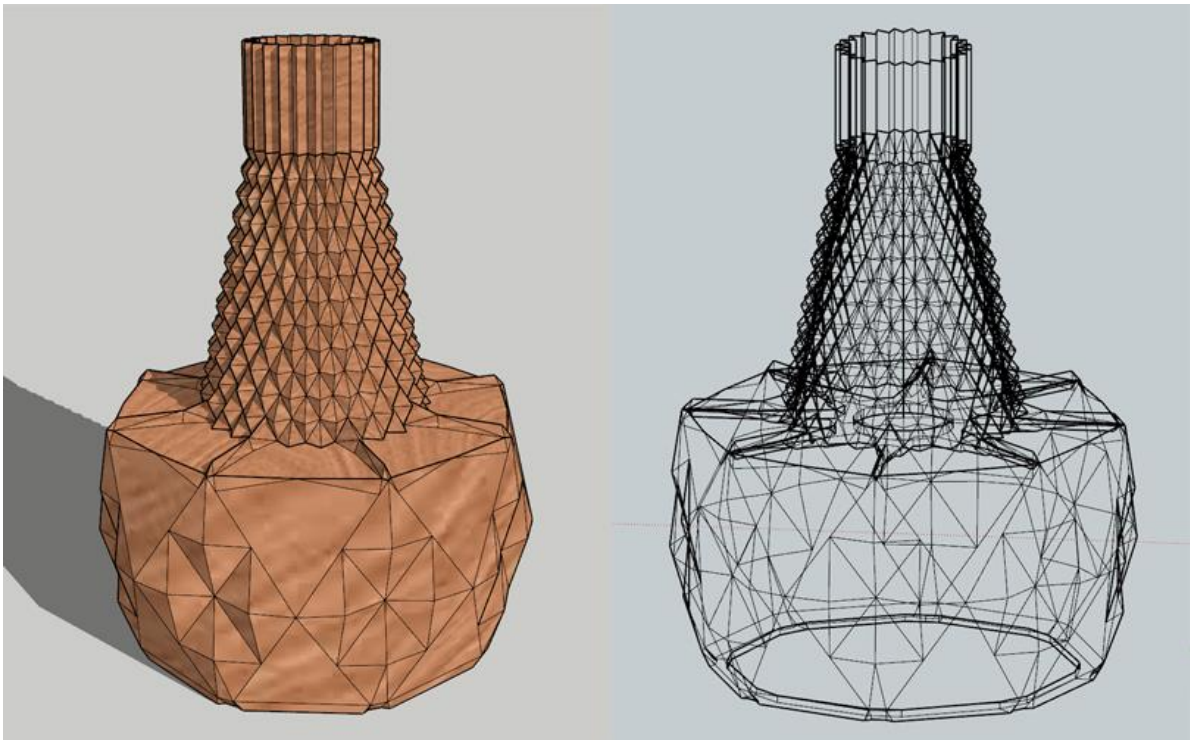


Foto 26. Modeleeritud lambikuppel

Mudeli lugemisel 3D-printimisprogrammiga (*Simply 3D*) selgus üllatav asjaolu, kuigi *SketchUp* programmi järgi oli kõik korrektne, esinesid siiski mõningad mikrovead, mis tuli eemaldada. Vead esinesid joonte sidumispunktes, kus joonte otsad ei haakunud korrektselt kokku. Vigade ilmnemisel sai vajalikud otsad kokku siduda.

Kuna puidufilamendis olev PLA võib juba 60 kraadi juures deformeeruda (vaikselt sulada), siis pidasin vajalikuks teha katse LED pirniga (Rustic Pyramid-6, 6W 540lm) (foto 27), mida mul oli kavas paigutada lambikupli sisse. Pirni valisin lähtudes lambikupli disainelementidest ja LED tehnoloogia madala soojuse eralduse tõttu. Pirni klaas koosneb kolmnurksetest tahkudest.

Katse läbiviimiseks hoidsin pirni voolu all kaks tundi, et see saavutaks maksimaalse temperatuuri. Pirni lähedale (0.5 mm kaugusele) asetasin papitüki, et mõõta selle kuumenemist. Katse viisin läbi termokaameraga (Flir TG165). Tulemustest selgus, et pirniklaasi temperatuur tõusis maksimaalselt 30°C juurde (foto 28). Papitüki temperatuur pirnipoolisel pinnal oli 29.7° C ja välispinnal 25.4° C. Fotol 26 olev punane ala küündis 34,5°C ja alumiiniumist lambipesa ümbris, mis töötab ka kui jahuti, 27.2° C. Antud testi tulemused näitasid, et pirni kasutus antud lambis on sobilik ja ei põhjusta puidukomposiitmaterjali deformatsioone.



Foto 27. Projektis kasutatav E27 pirnisokkel ja LED pirn

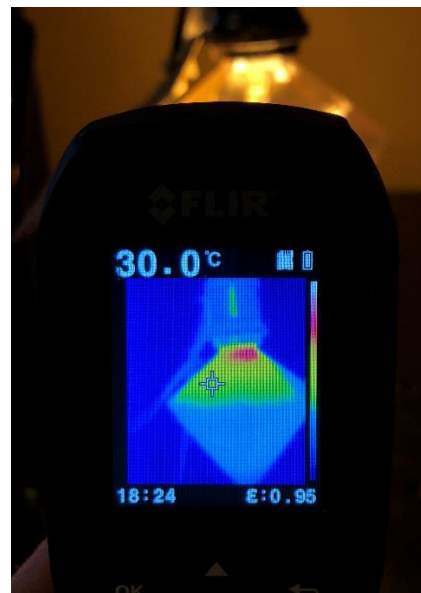


Foto 28. Termokaameraga temperatuuri mõõtmine

Printimisel kasutasin LayWoo-D3 puidufilamenti diameetriga 3 mm. Printimiseks valisin 0.5 mm düüsi (tavaliselt kasutatakse PLA puhul 0.2 mm), jämedama düüsi kasutusega püüdsin vältida ummistuste tekkimisi. Puidufilamendi sisestamisel tõstsin temperatuuri 230 °C juurde, et puhastada printimispea vanadest filamendijääkidest. Kui printimispea oli puhas, sai alustadada testimist.

Peale esmaste testitükkide printimist esines tugev düüsi ummistuse probleem, see oli põhjustatud ebapiisava jahutuse tõttu. Üks ventilaator tuli välja vahetada. Peale ventilaatori vahetust tundus, et suuri tõrkeid enam ei teki ja sai printima pandud esimene suurem detail objektist (ülemine osa). Printimiskihi kõrguseks määrasin 0.2 mm, kuumutuskeha temperatuuriks 195 °C ja aluse temperatuuriks 60°C. Printimiskiirus oli 36 mm/s ja välimistel kihtidel 50% aeglasem. Antud katsekeha jäi siiski pooleli, kuna düüs ummistus.

Antud tulemustest sai järeldada mitmeid olulisi asjaolusid. Kasutatud materjal on üpris kapriisne ja käitub kohati ettearvamatult. Printimisel on vajalik testirõnga (*skirt*) tekitamine ümber objekti enne eseme printimist (foto 29), sest filament ei hakka düüsisist kohe välja pressima, alles poole testirõnga pealt hakkab printimine korralikult tööle. Tundus, et põhjus on filamendi aeglasemas soojenemises kui tavalise PLA puhul. Katsetes oli näha, et puidufilamendi korral on testirõnga tekitamine väga vajalik.

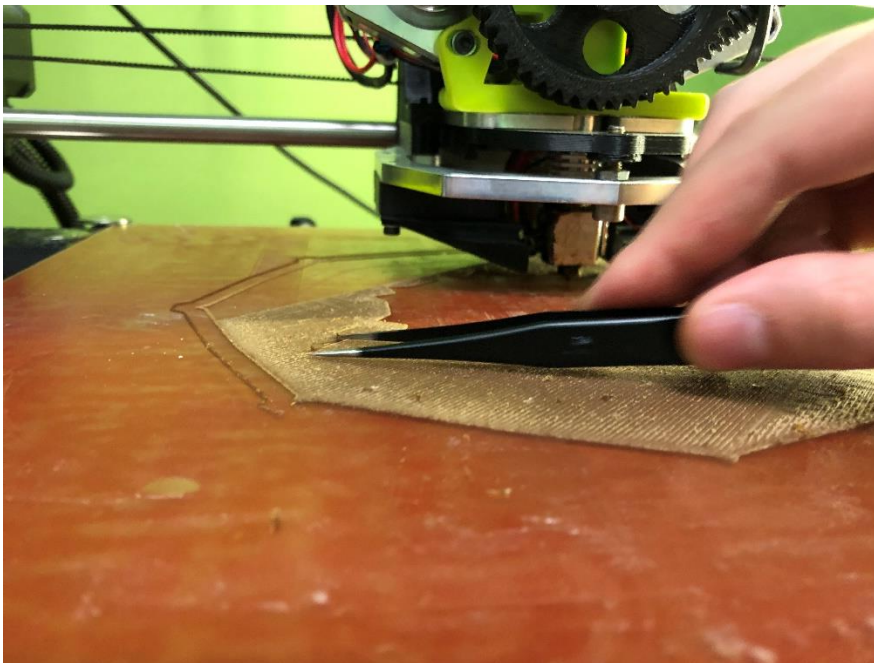


Foto 29. Testirõngas ümber objekti ja printimispinna puhastamine jääkidest printimise ajal.

Proovides valmis objektil kätega printimispiindasid lahti rebida, selgus et filament haakus kihtide vahel hästi ja pinnad ei rebenenud lihtsalt. Printimisel haakus materjal aluse külge hästi, ei olnud vaja kasutada täiendavalt teipi või liimi.

Selgus ka huvitav asjaolu, et kui printer lõpetab printimisjoone ja liigub nn tühikäigul uude kohta, siis jätkub düüsisist filamenti välja voolamine, mis tekitab niite printimisobjekti sees, see võib omakorda põhjustada järele lohisevaid filamendijääke. Kuna materjali sees on eri suurusega puiduosakesed, siis võivad nad kergelt ummistada düüsi. Printimise ajal tekkis vahepeal düüsi taha printimisjääke, mis kogunemisel võivad sattuda objekti sisse või pinnale (foto 30). Erisuuruses jääkide satumine materjali sisse võib tekitada korrapäratusi või rikkuda ära kogu projekti. Üks moodus probleemi parandamisel on printimise ajal tekkinud jäägid ära korjata kasutades pintsette (foto 29).

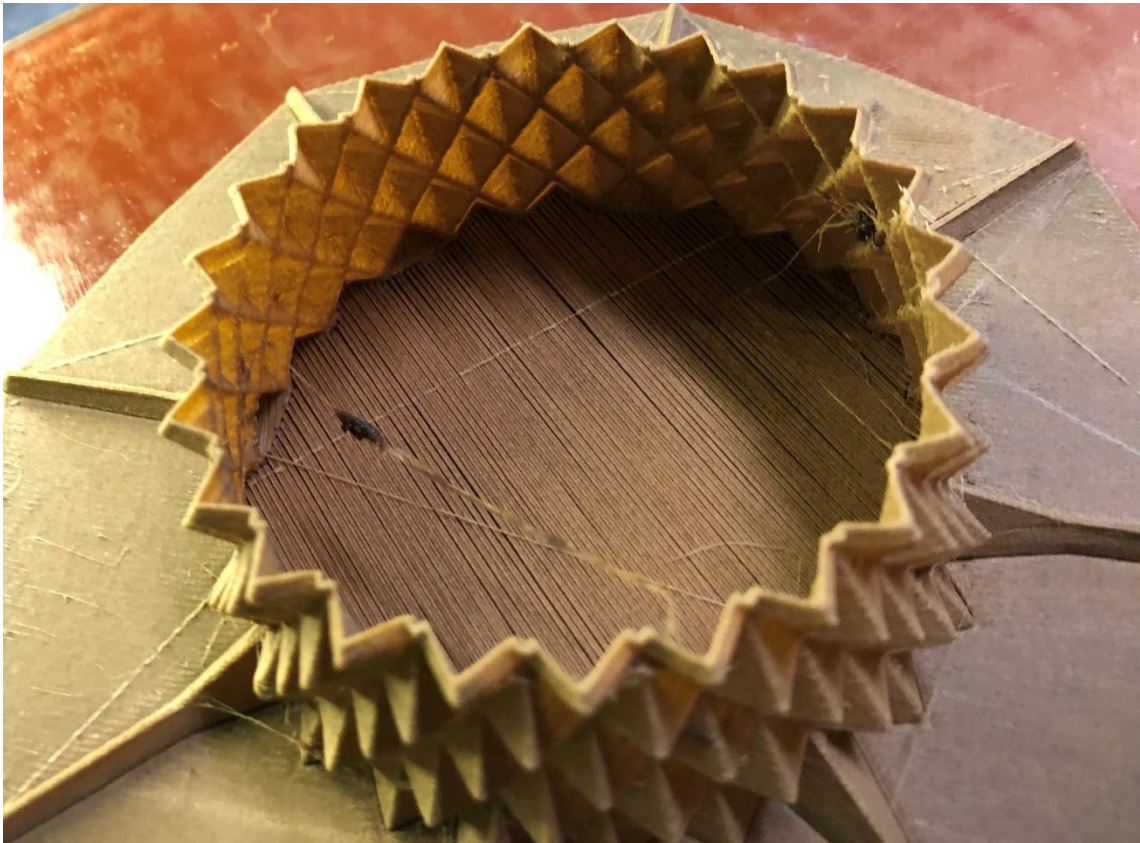


Foto 30. Objekti sees kaootilised filamenti niidid ja tumedad jäägikogumid

Et vähendada ummistuse probleeme, hankisime suurema düüsi. Katsed jätkusid 0.6 mm düüsiga ja pinna kõrguseks sai määratud 0.34 mm. Alumise objekti printimisel sai katsetatud kahe seina paksuse printimist. Ummistust enam ei tekkinud! Kuid mõningad defeksed elemendid siiski tekkisid. Esiteks juba eelnevalt kirjeldatud materjali kogunemine düüsi ümber, mis ühel hetkel võib materjali sisse jääda (foto 31). Erinevates kohtades oli näha materjalide jääkide objekti külge jäämist ja ülemises osas jäi kõrbenud materjal pikalt kahe seina vahele, mis tuli hiljem järeltöötluses eemaldada. Võrreldes seina kvaliteeti 0.5 mm ja 0.6 mm läbimõõduga düüside korral, ei täheldanud pinna kvaliteedi langust.

Kahe seina printimisel kasutas printer edasi-tagasi printimist, mille tõttu jäi tagasipööramis kohtadesse tume rant, programm valis tagasipööramisekohad automaatselt voltimiskohtadesse (foto 32).



Foto 31. Printimisjääkide sattumine objekti sisse



Foto 32. Printeripea tagasipööramisest tekkinud defekt

Pirnipesa kinnitamiseks disainisin haralise tähiku. Tähiku vahele tekitasin suured avad, et lambikupli kasutamisel saaks pirnist tekkinud soojus liikuda vabalt üles. Antud detaili sisse määrasin täidise (*fill* 20%) mesilaskärje struktuuriga (foto 33). Detaili kõrguseks 4 mm ja keskmine ava diameetriga 42 mm. Pirnipesa sobitus täpselt avasse ja alt kinnitasin pirnipesa tähiku külge alumiiniumist mutriga. Tähik oli prinditud esemetes ainuke täidetud element, sest see osa hoiab kogu lambikuplit üleval (foto 34). Peale printimist proovides käega painutada oli detail piisavalt jäik ja tugev. Tähiku kinnitasin puiduliimiga kupli sisse.

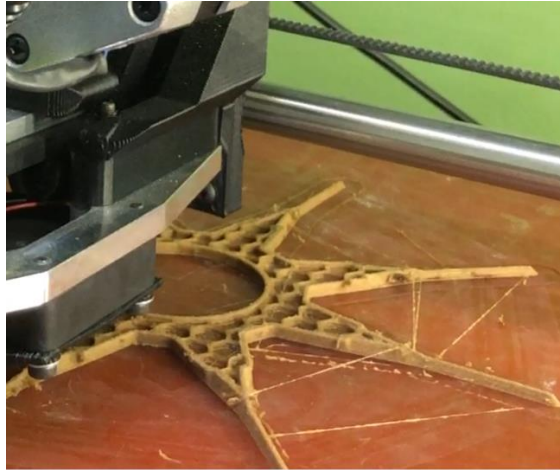


Foto 33. Mesilaskärje täidis



Foto 34. Pirnipesa sobitamine tähikusse

Kui muidu kasutatakse printimisdetailide kokkuliimimisel üpris tugevaid liime, näiteks *super attack*'i siis eeldasin, et puidu filamenti on võimalik kokku liimida ka tavalise puiduliimiga. Selleks viisin läbi katse, kus õrnalt karestatud pinnad liimisin kokku *Cascol indoor D2* puiduliimiga, kasutades väikseid surveklambreid (foto 35). Peale liimi kuivamist proovides käte vahel esemeid lahutada, näitas tulemus, et liimühendus on tugev. Lahti tõmmates rebenesid pigem prinditud osad kui liimühendus. Mis andis kindluse kasutamaks antud liimi projektis.



Foto 35. Klambritega katseliimimine

Järgmiseks printimisdetailiks sai valitud lambikupli ülemine osa, mis esimese printimisega katkestus. Seekord kasutades 0.6 mm düüsi viis ummistuse tõenäosust väikemaks. Seda osa sai katsetatud ühekihilise *vase mode* süsteemiga, kus printer prindib ringiratast ilma tagasipööramata nagu tegi alumise osa printimisel. Printimisel alguses jälgisin esimese kahe aluskihi printimist, et ei tekiks defekti ja jätsin ööseks printima (detaili printimine kestis 4.5 tundi). Kuna tegu oli ringiratast printimisega, ilma tagasipööramata siis lootsin, et ei teki väga palju järele lohisevaid printimisjääke ja ülemises osas siksakid koristavad ära väikesed jäägiosad.

Järgmisel päeval oli näha, et printimisprotsess oli edukalt lõpule viidud, kuid siiski olid objekti sees printimisjäägid erinevates kohtades (foto 36) ja sees oli ka näha niite. Mul oli planeeritud tugevndusketas ülemise osa sisse, et ühekihiline materjal hoiaks vormi ja käega kinnivõttes ei oleks habras. Kuid analüüsidest seina jäikust jätsin tugevndusketta printimata, kuna ei näinud selle vajalikkust.



Foto 36. Printimisdefektid ülemise osa sees

Sissejäänud tumedate osade eemaldamine ei olnud lihtne, sest need olid materjali sisse sulanud. Nende eemaldamisel katsetasin erinevaid mooduseid. Üks moodus oli lahtise leegiga (pikema tilaga vägumihkel) õrnalt kuumutamine liigutades leeki edasi ja tagasi (umbes 10 mm kauguselt), et pind muutuks pehmemaks. Selle juures on muidugi oluline, et materjal ei saa liiga palju kuumust, muidu muutub pind kiirelt tumedaks. See andis keskmise tulemuse, raske oli saada õiget kuumus, liigselt kuumutamine annab koheselt pöördumatu defekti. Kuid sellega oli võimalik õrnalt tagasi suruda vormi turritavad osad, mis oli defektide tõttu vales kohas.

Järgmise moodusena katsetasin tinutuskolbi, see oli päris hea, kuid materjal sulas selle all ääretult kiirelt, mis võis kergelt tekitada nn vao. Liiga kaua hoides materjali lähedal oli oht, et materjal tõmbub tumedaks. Samas sai sellega kiirelt siluda mõndasid kohti, mis andis hea tulemuse.

Kolmandaks viisiks oli 3D pastaka kasutus (foto 37), sellega sai efektiivselt auke täita, kuid temperatuuri oli raske õigeks saada ja liiga kaua ilma printimata oodates ehk valides kohta kuhu käsitsi materjali printida tõmbas pastakas materjal tumedaks. Teine probleem 3D pastaka kasutamisel oli samasugune nagu 3D printerigi korral. Nimelt, peale väiske osa printimist jätkus filamendi voolamine surve all, mis tekitas olukorra, kus oli liiga palju materjali korruga.

Neljandaks mooduseks oli manuaalne vaibanoaga osade ära lõikamine, noaga lõikamine oli efektiivsem kui materjal oli pehmem, kuid väga suur oht oli, et liiga suure surumisega murdub materjali sein. Kui mingi osa oli lahti lõigatud õnnestus neid pintsettidega ära korjata.



Foto 37. 3D pastakas

Peale tähiku ja pealmise osa kokku liimimist sai analüüsitud kandepinda. Antud pildil (foto 38) on näha, et nii ülemise osa juures olev harali toestused ja tähiku jalad jooksevad kohakuti, mis annavad kandetugevust juurde.



Foto 38. Kandepinna analüüs

Erinevate nurkade ja kallakute printimises ei esinenud probleeme. Katsekehal ei esinenud kallakutega 45 kraadi ja vähem aluspinnalt mõõtes raskusi.

Peale eseme kokkuliimimist ja pirni sisestamist oli näha väikeseid defekseid kohtasid. Kõik pinnad, mis on natuke paksemad annavad kohe tumedama pinna (foto 39). Samas ei paista need väga silma ülemises osas kaugelt vaadates, kuna väikeste rombidega on pind kirjum. Selliseid alasid saab eemaldada kui koorida või lihvida õrnalt pinda, samal ajal kui valgus seest paistab.



Foto 39. Defektid, mida on valgusega näha.

Üldmulje tuli lambile päris hea (foto 40), vaatamata defektidele. Idee alumisse kupli osasse kahekordne sein printida, et valgust summutada võrreldes ülemise osaga tasus ära, tänu sellele on ülemine ja alumine osa rohkem valguse läbipastvusega tasakaalus.

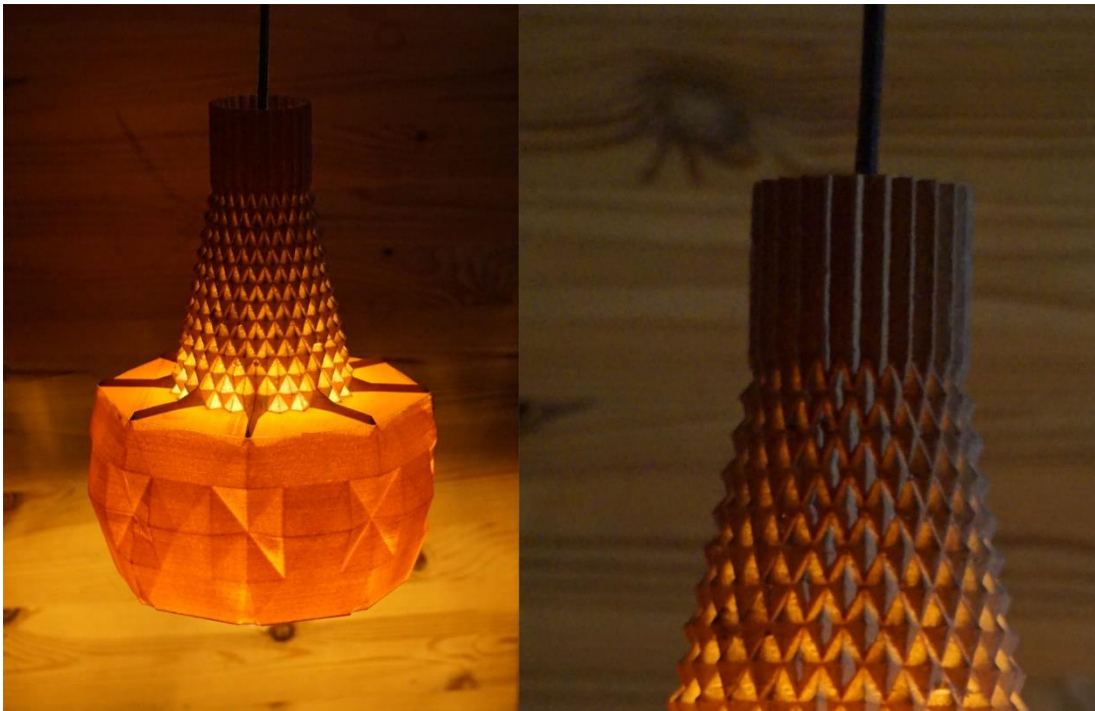


Foto 40. Katsetuskehadest kokku monteeritud lambikuppel

Projekti läbiviimisel pean tõdema, et sellise kapriise materjaliga 3D printimisel tuleks valvata printimisprotsessi ja korjata ära jäägid manuaalselt, kui need peaksid tekkima.

Antud katsetus tõestas, et puidufilamendiga on võimalik printida edukalt valgusobjekti. Kuid esmakordse printimisega võib tekkida erinevaid vigasid. Lambikupli disainimisel peab arvestama seina paksuseid ja valgustugevust, mis tekib pirnilt, et üldmulje jääks hea. Edaspidises katses võiks proovida temperatuuri muutmist, mis tekitab tumedamaid printimisjooni, kuid valguse läbikumamisel võivad need tugevalt võimenduda.

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli uurida puidu 3D printimitehnoloogiaid ja nende kasutusvõimalusi, lähtudes Eesti kontekstist. Analüüsisin võimalikke puidufilmante, nende kättesaadavust ja loodussõbralikkust.

Töö käigus selgus, et hetkel on võimalik hankida ainult FDM tehnoloogiale põhinevat puidukoostisega filamenti, mille puidusisaldus on enamasti 40%. Täielikult 100% puidusisaldusega filamenti ei saa kahjuks teha, sest tehnoloogia põhineb materjali sulatamisel, mida ainult puitmaterjal kahjuks ei võimalda. Seetõttu on filamenti üheks võtmetähtsusega komponendiks loodusliku päritoluga termopolümeer PLA. Sideaine sulab kuumutamisel efektiivselt ja annab võimaluse puidukiuga komposiitmaterjaliks segatuna esemeid 3D printida. PLA on bioplast, mida valmistatakse erinevatest taimedest nagu suhkrupeet või mais. PLA ei tekita allergilisi reaktsioone ja lagunemisel looduskeskkonnas ei eralda toksilisi aineid. Antud infole toetudes saab järeldada, et materjal on looduslik, pärit 100% taastuvatest allikatest.

Lõputöös selgus, et parim filamenti utiliseerimise viis on selle taaskasutus. Kuna puidufilament on termoplastne siis saab seda efektiivselt korduvalt üles sulatada. Jaemüügis on olemas spetsiaalsed väiksed masinad millega saab seda kodutingimustes teha. Tõin välja ka detailse õpetuse, kuidas ise mööblijääkidest puidufilamenti valmistada.

Puidufilament on eriskummaline materjal, prinditud ese näeb puidusarnane välja ja lõhnab samuti nagu puit. Seda on võimalik saagida, lihvida, liimida ja isegi peitsida, mis muudab materjali kergelt järeltöödeldavaks. Uurides materjali iseloomu ja füüsilisi omadusi näen, et materjal on kõige sobilikum kasutamaks dekoratiivsel eesmärgil, kus disainer soovib tuua esile puidu pinda, samuti saab materjali kasutada eetilistel otsustel oma loodusläheduse tõttu.

Praktilise katse läbiviimisel tegin läbi terve protsessi arvutis modelleerimisest kuni lõppviimistlemiseni. Antud katsekeha printisin välja TÜ Tehnoloogiainstituudi laboris limiteeritud ajaperioodil. Antud katse kinnitas düüsi kergelt ummistamise probleeme, mis esines kui kasutasin 0.5 mm düüsi. Probleemi tekke põhjus on arvatavasti puidukiud, mis ei sula, kui nad kogunevad liiga tihedalt ava ette tekib ummistus. Düüsi vahetamisega 0.6 mm vastu seda enam ei esinenud, kuid jätkus probleem, kus vahepeal tekkisid printimispea külge puidukiud kogumikud, mis jäid prinditud keha sisse. Kuna puidukiud filamenti sees muutusid temperatuuri toimel kergelt tumedaks siis see oli tõsine probleem ka järeltöötlemisel. Samamoodi

oli näha, et kui printimisel peaks masin kohapeal seisma kasvõi korraks, näiteks tagasipööramisel, et uut kihti printida, siis tekkis tume kuumutus joon. Selle vea eemaldamist saaks kaotada, kui kasutada võtteid, kus tagasipööramist ei esine. Iseäralik tunnusjoon oli ka düüsisist materjali välja pressimine, kui filamendi sissesöötmine peatus. See probleem on seotud arvatavsti filamendi viskoossusega. Printimispeas tekib rõhk ning väikse düüsi läbimöödu tõttu ei suruta materjali koheselt välja. Seda probleemi saaks teoreetiliselt muuta, kui programmeerida printimisprogramm nii, et peale filamendi sissesöötmise peatumist kerib masin filamenti korraks tagasi, et alandada rõhku printimispea sees, kuid selle hüpoteesi kinnitamiseks oleks vaja lisa katseid. Peale katsekeha printimist täheldasin, et printimiskiirust saaks tunduvalt suurendada, kuid see võib tekitada pinna printimiskvaliteedi langust.

Materjali edasistes uuringust võiks teha katseid kiiruse reguleerimisega ja printimispinna kõrguse muutmisega, mis võivad mõjutada puiduosakeste jääkkogumike tekkimist printimise ajal.

Protsessi käigus õppisin selgeks iseseisvalt 3D printeriga printimise, nüüd tean kui lihtsalt võivad joonte ühendusvead tekkida disainiprotsessis mudelit valmistamisel. Sain kinnituse oletusele, et filamendi sees olev sideaine on looduslik. Mõistsin, et kahe printimispeaga 3D printer annab tugeva eelise tugistruktuuride valmistamisel keerukate vormide juures, kui kasutada PVA filamenti, mis vees ise ära lahustub. Kuna olen ennast kurssi viinud puidufilamendi eripäradest ja olemusest siis julgen vabalt ja enesekindlalt rääkida materjalist ja anda juhtnööre huvilistele. Lõputöö kirjutamine andis mulle rohkelt inspiratsiooni ja ideid, et kuidas tehnoloogiat saaks kasutada disainivaldkonnas toodete valmistamiseks. Kindlasti jätkan materjali katsetustega ja tahan läbi teha filamendi tootmisprotsessi puidujäätmetest.

SUMMARY

Wood 3D Printing: Material and Technology

The aim of this thesis was to study wood 3D printing technologies and their application possibilities. I analyzed wood filaments, their availability and nature-friendliness.

In the work, it became clear that at present it is possible to buy only wood-based filament based on FDM technology, the wood content of which is usually 40%. Unfortunately, a filament with a completely 100% wood content cannot be made, because the technology is based on melting the material, which unfortunately only the wood material does not allow. Therefore, one of the key components of the filament is the natural thermopolymer PLA. The binder melts efficiently when heated and makes it possible to print objects in 3D when mixed with wood fiber composite material. PLA is a bioplastic made from various plants such as sugar beet or corn. PLA does not cause allergic reactions and does not release toxic substances when decomposed in the natural environment. Based on this information, it can be concluded that the material is natural, from 100% renewable sources.

The thesis revealed that the best way to utilize filament is to reuse it. As the wood filament is thermoplastic, it can be effectively melted repeatedly. At retail, there are small machines that can be used for it at home. I also gave a detailed tutorial on how to make a wooden filament from furniture waste.

Wood filament is a strange material, the printed object looks like wood and smells like wood. It can be sawn, sanded, glued and even stained, which makes the material easy to post-process. Examining the nature and physical properties of the material, I see that the material is most suitable for decorative purposes, where the designer wants to highlight the surface of the wood, and the material can also be used for ethical decisions due to its closeness to nature.

During the practical experiment, I went through the whole process from computer modeling to final finishing. I printed out this test specimen in the laboratory of the UT Institute of Technology. This experiment confirmed the problems of lightly clogging the nozzle that occurred when using a 0.5 mm nozzle. The cause of the problem is probably wood fibers that do not melt if they accumulate too tightly in front of the opening to form a blockage. By changing the nozzle to 0.6 mm, this no longer occurred, but the problem continued, where in

the meantime clusters of wood fibers formed inside the print head, which remained inside the printed body. As the wood fibers inside the filament became slightly dark due to the temperature, this was also a serious problem in the post-processing. Similarly, it could be seen that if the machine were to stand still for a moment during printing, for example when turning back to print a new layer, a dark heating line appeared. Removing this error could be eliminated by using non-rollback techniques. A special feature was also the extrusion of material from the nozzle when the feeding of the filament stopped. This problem is probably related to the viscosity of the filament. Pressure builds up in the print head and due to the small nozzle passage, the material is not pushed out immediately. This problem could theoretically be reversed by programming the printing program so that after the filament feed stops, the machine rewinds the filament briefly to reduce the pressure inside the print head, but additional experiments would be needed to confirm this hypothesis. After printing the test piece, I noticed that the printing speed could be significantly increased, but this could cause a decrease in the print quality of the surface.

Further research on the material could include experiments with speed control and changes in the height of the printing surface, which may affect the formation of residual aggregates of wood particles during printing.

During the process, I learned how to print independently with a 3D printer, now I know how easily line connection errors can occur in the design process when making a model. I received confirmation that the binder inside the filament is natural. Writing my thesis gave me a lot of inspiration and ideas on how technology can be used in the field of design to make products.

KASUTATUD KIRJANDUS

2020 Types of 3D Printing Technology, All3DP. (2020). [www] <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/> (02.02.2020)

3D Printing Market - Growth, Trends, and Forecast (2020 - 2025). (2020). [www] <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/3d-printing-market> (05.03.2020)

3d printing pin team (2015). CreoPop: New 3D Printing Pen with Extended Capabilities [www] <http://www.3dprintingpin.com/creopop-new-3d-printing-pen/> (23.04.2020)

3D Printing With Support Structures (2020). [www] <https://www.instructables.com/lesson/Bottle-Lock-Part-3-3D-Printing-With-Support-Struct/> (11.05.2020)

3dinsider. (2020). 16 Different Types of 3D Printing Materials. [www] <https://3dinsider.com/3d-printing-materials/> (01.02.2020)

3dsourced (2020). The Complete History of 3D Printing: From 1980 to 2020. [www] <https://3dsourced.com/guides/history-of-3d-printing/> (02.02.2020)

Afinia (2020). [www] https://store.afinia.com/Specialty-PLA-Filament--Wood-infused_p_70.html#tab-4 (14.05.2020)

All about 3D printer nozzles (2019). [www] https://filament2print.com/gb/blog/56_nozzles-guide-classification-recommendations.html (03.04.2020)

AllThat3D. (2020). Wood Filament Review – Easy 3D Printing with Wood Filament. [www] <https://www.allthat3d.com/wood-filament/> (19.04.2020)

Apium (2019). 3D printing troubleshooting guide. [www] <https://apiumtec.com/en/troubleshooting-guide-3d-printing-failures> (22.02.2020)

Auokayu (2020). YOYI Wood Filament 1.75mm Wood pla 3D Printer Filament [www] https://www.auokayu.com/index.php?main_page=product_info&products_id=8653 (03.04.2020)

Ayrlmiso, Kariz, Kwon and Kuzman (2018). Effect of printing layer thickness on water absorption and mechanical properties of 3D-printed wood/PLA composite materials. University-Cerrahpasa. Istanbul.

Bangeas, P. Drevelegas, K. (2018). Three-dimensional printing as an educational tool in colorectal surgery [www] <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30468636/> (16.04.2020)

Bianchini, R. (2019). 3D printing and digital manufacturing. Is this the future of design? [www] <https://www.inexhibit.com/case-studies/3d-printing-digital-manufacturing-is-future-of-design-here/> (24.04.2020)

Bioplastics: The sustainable choice. (2020). [www] <https://www.total-corbion.com/about-pla/sustainability/> (21.04.2020)

Carrier, P. (2018). 3D printing filament size: 1.75mm vs 3.00mm [www] <https://dyzedesign.com/2018/02/3d-printing-filament-size-1-75mm-vs-3-00mm/> (09.02.2020)

Castells, R. (2016). DMLS vs SLM 3D Printing for Metal Manufacturing [www] <https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing> (11.04.2020)

Could wood-based material lead 2014 3D printing priorities? (2013). 3ders. [www]

Courtney (2019). Step By Step Guide to Using a 3D Printer [www] <https://thetechninfluencer.com/how-to-use-a-3d-printer/> (21.03.2020)

Creat3d (2020). [www] <https://www.creat3d.shop/colorfabb-filament/colorfabb-plapha-chocolate-brown-175mm.html> (13.04.2020)

Creighton. M (2018). A Comparison of PLA with Other Commodity Plastics [www] <https://www.creativemechanisms.com/blog/a-comparison-of-pla-with-other-commodity-plastics> (11.04.2020)

Don't burn your house down 3D Printing. A Cautionary Tale (2018). [www] <https://www.thissmarthouse.net/dont-burn-your-house-down-3d-printing-a-cautionary-tale/> (23.02.2020)

Doris (2015). Rinkak Offers SLS 3D Printing Service Using Wood Like Material [www] <https://www.3printr.com/rinkak-offers-sls-3d-printing-service-using-wood-like-material-2628783/> (17.03.2020)

Dust (2017). PLA lifespan? Will it biodegrade on me? [www] <https://reprap.org/forum/read.php?1,781159> (25.04.2020)

Environment Policy Committee (2017). Estimating the environmental impacts of widespread 3d printing [www] [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/EPOC/WPRP W\(2016\)1/FINAL&docLanguage=En](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/EPOC/WPRP W(2016)1/FINAL&docLanguage=En) (10.04.2020)

Flint, J. (2019). Types of 3D Scanning Technologies. [www] <https://3dinsider.com/3d-scanning-technology/> (14.03.2020)

Flinth, J. (2017). Everything You Need to Know About 3D Pens [www] <https://3dinsider.com/what-are-3d-pens/> (08.02.2020)

Francois (2012). Shades of brown with wood filament, via varying temperature [www] <http://www.tridimake.com/2012/10/shades-of-brown-with-wood-filament-via.html> (26.03.2020)

Francois, J (2012). Review : printing with wood filament [www] <http://www.tridimake.com/2012/10/review-wood-filament.html> (26.05.2020)

Goldschmidt, B. (2019). 3D Printer Bed Adhesion: All You Need To Know [www] <https://all3dp.com/2/3d-printer-bed-adhesion-all-you-need-to-know/> (05.04.2020)

Granich, M. (2020). 7 Best 3D Printing Pens for Kids & Adults Reviewed [www] <https://www.technolocheese.com/3d-printing-pens/> (01.02.2020)

Granich, M. (2020). 7 Best 3D Printing Pens for Kids & Adults Reviewed [www] <https://www.technolocheese.com/3d-printing-pens/> (12.03.2020)

Gregurić, L. (2018). History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented? [www] <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/> (26.03.2020)

Gutierrez,R,J. (2020). PLA Plastic/Material: All You Need to Know in 2020 [www] <https://all3dp.com/1/pla-plastic-material-polylactic-acid/> (17.03.2020)

Hestay. (2020). [www] <https://www.hestay.nl/en/hout-3d-printer-filament.html> (26.05.2020)

Hornick, J, F. (2016). How Patents Die: Expiring 3D Printing Patents [www] <https://www.finnegan.com/en/insights/articles/how-patents-die-expiring-3d-printing-patents.html> (15.03.2020)

How much abrasive filaments damage your nozzle! (2019). [www] <https://www.youtube.com/watch?v=uvlMeTnjriQ> (06.02.2020)

Hu, Y. Daoud, W, A. Cheuk, K, K, L. ja Lin, C, S, K. (2016). Newly Developed Techniques on Polycondensation, Ring-Opening Polymerization and Polymer Modification: Focus on Poly(Lactic Acid). (2020). [www] <https://www.mdpi.com/1996-1944/9/3/133/htm> (27.04.2020)

I. Wagner. 3D printing market size worldwide from 2013 to 2021. (2020). [www] <https://www.statista.com/statistics/796237/worldwide-forecast-growth-3d-printing-market/> (03.04.2020)

Kariz, M. Sernek, M. ja Kuzman, M, K. (2018). Effect of humidity on 3D-printed specimens from wood-pla filaments. University of Ljubljana. Ljubljana

Klinterivo. (2017). How 3d printing works? [www] <http://my3dconcepts.com/explore/how-3d-printing-works/> (14.03.2020)

Kondo, K. (2020). How to Dry Filament: PLA, ABS, & Nylon [www] <https://all3dp.com/2/how-to-dry-filament-pla-abs-and-nylon/> (09.04.2020)

Lansard, M. (2020). Categories of 3D printing technologies [www] <https://www.aniwaa.com/guide/3d-printers/3d-printing-technologies/> (17.03.2020)

Mashambanhaka, F. (2019). Is a 3D Printing Pen a Toy or a Serious Tool? [www] <https://all3dp.com/2/is-a-3d-printing-pen-a-toy-or-a-serious-tool/> (15.03.2020)

McCauley, K. (2017). 8 Things You Need To Know About PLA Plastic [www] <https://lawprintpack.co.uk/packaging/8-things-you-need-to-know-about-pla-plastic/> (23.04.2020)

McMills, A, E. (2017). 3D Printing Basics for Entertainment Design. [www] <https://www.goodreads.com/book/show/36429159-3d-printing-basics-for-entertainment-design> (11.03.2020)

Montalvão, G, R. Torbati, Hamilton, A. Machado, R ja João, A. (2020). Behaviour of 3D printed PLA and PLA-PHA in marine environments. University of Southampton. Highfield.

Muthuraj, R (2019). Is Polylactic acid (PLA) biodegradable? [www] https://www.researchgate.net/post/Is_Polylactic_acid_PLA_biodegradable (10.04.2020)

Ostrem, K. (2018). 3D Printer Nozzle Size & Material – What to Know & Which to Buy [www] <https://all3dp.com/2/3d-printer-nozzle-size-material-what-to-know-which-to-buy/> (01.05.2020)

Palju, U. (2009). Puidutöötlemisettevõtete tuleohutust tagavad ennetusmeetmed. Päästekolledž. Tallinn.

Primary 3D Printing Processes (2020). [www] <https://www.printspace3d.com/3d-printing-processes/> (18.03.2020)

Quenneville, D. (2012). Changing the look of 3D printed wood [www] <https://www.ponoko.com/blog/ponoko/changing-the-look-of-3d-printed-wood/> (13.02.2020)

Rinkak. (2020). Wood like. [www] https://www.rinkak.com/jp/materials/wood_like/details (13.05.2020)

Rogers, T. (2015). Everything You Need To Know About Polylactic Acid (PLA) [www] <https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-polylactic-acid-pla-prototypes> (01.05.2020)

Ryan. (2015). Filament spool 3d printers [www] <http://www.technologystudent.com/cam/printer3d1.html> (12.04.2020)

Sculpteo. (2020). Fused Deposition Modeling (FDM): 3D printing with filaments. (2020). [www] <https://www.sculpteo.com/en/glossary/fdm-fused-deposition-modeling-definition/> (26.05.2020)

Shawki. A (2016). 1.75 mm vs 2.85mm filament [www] <https://www.slideshare.net/AhmedShawki15/175-mm-vs-285mm-filament> (11.04.2020)

Shen, J, J. (2011). Comparative Life cycle Assessment of Polylactic acid (PLA) and Polyethylene terephthalate (PET) [www] https://nature.berkeley.edu/classes/es196/projects/2011final/ShenJ_2011.pdf (24.04.2020)

Slijkoord, J, W. (2015). Is recycling pla really better than composting? [www] <https://3dprintingindustry.com/news/is-recycling-pla-really-better-than-composting-49679/> (22.04.2020)

Snikhovska, K. (2019). The different types of 3D printing technology 2019 [www] <https://penandplastic.com/3d-printer-types/> (04.02.2020)

Space Tools On Demand: 3D Printing in Zero G (2014). [www] https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/3D_Printing-v3.pdf (04.02.2020)

Stephens, B, S. (2013). Could particle emissions from desktop 3D printers reach unhealthy levels? [www] <https://www.elsevier.com/connect/could-particle-emissions-from-desktop-3d-printers-reach-unhealthy-levels> (21.03.2020)

Stute, F. Mici, J. Chamberlain, L. ja Lipson, H. (2018). Digital Wood: 3D Internal Color Texture Mapping. Columbia University. New York.

Zee, M. ja Molenveld, K (2020). The fate of (compostable) plastic products in a full scale industrial organic waste treatment facility [www] <https://edepot.wur.nl/514397> (23.04.2020)

Tan, J, T. (2020). Best 3-D Pens – Draw and print your own 3-dimensional objects [www] <https://www.colourmylearning.com/2016/04/best-3-d-pens-draw-and-print-your-own-3-dimensional-objects/#> (18.02.2020)

Techcrunch (2014). How NASA Prints Trees [www] <https://techcrunch.com/2014/02/09/how-nasa-prints-trees/> (01.05.2020)

Toglefritz (2018). Can filters be used to reduce 3D printer emissions? [www] <https://toglefritz.com/can-filters-be-used-to-reduce-3d-printer-emissions/> (23.04.2020)

TOP 11 Dual Extruder 3D Printers (2019). [www] <https://www.3dnatives.com/en/dual-extruder-3d-printer-171020174/> (03.05.2020)

Tracxn. (2020). 3D Printing Startups in Czech Republic [www] <https://tracxn.com/explore/3D-Printing-Startups-in-Czech-Republic> (13.05.2020)

Trying Out the Orbi-Tech LayWoo-d3 3D Printer Filament (2014). 3dprinting [www] <https://3dprinting-blog.com/tag/wood-like-filament/> (24.04.2020)

UPM Formi 3D filament. (2020). [www] <https://octofiber.com/upm-formi-3d-filament.html> (24.03.2020)

Walleser, M. 3D Printer Filament Storage: Is Humidity A Silent Killer for 3D Printed Parts? (2018). [www] <https://blog.gotopac.com/2018/03/01/how-3d-printer-filament-storage-cabinets-instantly-improve-3d-print-part-quality/> (08.04.2020)

Vanceg. The 3D Printing Process 2020. (2020). [www] <https://www.instructables.com/id/The-3D-Printing-Process/#intro>(26.03.2020)

Varotsis, A, B. (2020). Introduction to binder jetting 3D printing [www] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/> (24.04.2020)

What Is Dual Extrusion? (2020). [www] <https://all3dp.com/2/dual-extrusion-3d-printing-simply-explained-2/> (07.05.2020) marc3d3d (2016). Easter Island Moai - Dual extrusion style [www] <https://www.thingiverse.com/thing:1560492> (26.05.2020)

Which filament diameter is better: 1.75 mm or 3 mm? (2017). [www] https://filament2print.com/gb/blog/31_differences-filament-175mm-3mm.html (21.02.2020)

Wood Filled. (2020). [www] <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/wood-filled/> (15.03.2020)

Wood takes 3D printing. (2017). filament 2print [www] https://filament2print.com/gb/blog/30_wood-takes-3d-printing.html (01.04.2020)