



1918

**TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL**  
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

POLÜMEERMATERJALIDE INSTITUUT  
POLÜMEERIDE TEHNOLOOGIA ÕPPETOOL

# **TAASKASUTATUD MATERJALID 3D PRINTIMISEL**

**Bakalaureusetöö**

**Kadi Kruuse**

Juhendaja: Andres Krumme, Polümeeride tehnoloogia õppetool,  
juhataja

Materjalitehnoloogia õppekava KAOB 02/09

Tallinn 2015

Deklareerin, et käesolev bakalaureusetöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli bakalaureusekraadi taotlemiseks ja et selle alusel ei ole varem taotletud akadeemilist kraadi.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud või (avaldamata tööde korral) toodud autorlus välja põhitekstis.

.....

Kadi Kruise

# SISUKORD

LÜHENDID.....	5
SISSEJUHATUS.....	6
1. 3D PRINTIMINE .....	7
1.1. Printimise evolutsioon kui kihtlisandustehnoloogia .....	7
1.2. 3D printimine Eestis .....	8
1.3. 3D printimise tulevikuvisionid .....	9
2. 3D PRINTIMISE TEHNOLOOGIAD .....	11
2.1. Sulatatud materjali sadestamisega modelleerimine .....	12
2.2. Printerid, mis sulatavad, seovad või liimivad .....	14
2.2.1. Stereolitograafia.....	14
2.2.1.1. Polyjet-printimine.....	15
2.2.2. Laserpaagutamine .....	16
3. 3D PRINTIMISES KASUTATAVAD POLÜMEERID .....	19
3.1. ABS .....	19
3.2. PLA .....	20
3.3. PA 12.....	20
4. MATERJALIDE TAASKASUTUS 3D PRINTIMISEL .....	24
4.1. Materjalid.....	25
4.2. Seadmed.....	29
4.3. Filabot.....	30
5. EKSPERIMENTAALNE OSA .....	32
5.1. Materjalid.....	32

<b>5.2. Seadmed/ tehnoloogiad.....</b>	<b>33</b>
<b>5.3 Tulemuste analüüs.....</b>	<b>35</b>
<b>KOKKUVÕTE .....</b>	<b>37</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>39</b>
<b>KASUTATUD KIRJANDUS.....</b>	<b>40</b>

## LÜHENDID

3D	Kolmemõõtmeline
ABS	Akrüülnitriit Butadieen Stüreen
CAD	Arvuti abil projekteerimine (computer aided design)
EDM	Elektromehaaniline disain ja tootmine (electromechanical design and manufacturing)
FDM	Sulatatud materjali sadestamisega modelleerimine
HDPE	Kõrgtihe polüetüleen
IT	Infotehnoloogia
LDPE	Madaltihe polüetüleen
LS	Laserpaagutamine
MFR	Sulavooluindeks
PA	Polüamiid
PC	Polükarbonaat
PET	Polüetüleentereftalaat
PLA	Polüpiimhape
PPP	Perpetual Plastic Project
PS	Polüstüreen
PVC	Polüvinüülkloriid
SL	Stereolitograafia
STL	Faili formaat
WOOF	Washington Open Objects Fabricators õpilasorganisatsioon

## SISSEJUHATUS

Koos rahvastiku kasvu ja tehnoloogia arenguga on saanud ühiskonnas populaarseks polümeeri põhised tooted. Polümeeride erinevad omadused võimaldavad väga mitmekülgset kasutamist (kilekottidest lennukidetailideni) ning nende suureks eeliseks on töötuse lihtsus, mis võimaldab toota kiiresti, odavalt ja suurtes kogustes.

Üks polümeeride töötlemise tehnoloogiad, mis on just viimaste aastate jooksul kõige rohkem hoogu kogunud, on 3D printimine. 3D printimine tähendab arvutis programmide abil tehtud virtuaalse kolmemõõtmelise mudeli muutmist reaalseks käega katsutavaks esemeks. Enne printimist jagab programm mudeli kihtideks ning seejärel prindib objekti kiht kihi haaval terviklikuks.

Tänapäeva ja ka tuleviku tootmist iseloomustav sõna on keskkonnasäästlikkus, millest tulenevalt arenevad ka materjalid ja nende valikud. Miks mitte siduda just ökonoomsus ja 3D printimise valdkonnad ühte ning avastada aina rohkem 3D printimiseks kasutatavaid materjale inimtegevuse tagajärel tekkinud prügist ja plastjätmeist.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on leida taaskasutust PA 12 pulbrile, mis tekib suurtes kogustes jäägina Tallinna Tehnikaülikooli mehhatroonikainstituudis laserpaagutuse protsessi tulemusena ja kuuluks äraviskamisele. Idee on toota filament, mida saaks kasutada teistsuguses 3D printimise protsessis, mis põhineb FDM tehnoloogial.

Et mõista neid projektis toimuvaid protsesse, uurisin 3D printimist lähemalt. Töö teoreetiline osa käsitleb 3D printimise arengut, tehnoloogiaid, materjale ja taaskasutust ning eksperimentaalses osas annan ülevaate projektist endast.

# 1. 3D PRINTIMINE

Printimistehnoloogiaid on laialdaselt uuritud juba varem, kuid peamiselt kahemõõtmelist printimist. Nüüdseks on antud valdkond arenenud hüppeliselt ning printimine ei piirdu ainult musta tindi ja pabertrükiga. Viimastel aastatel on hakatud rohkem kasutama kolmemõõtmelist printimist ja seda arendatakse pidevalt.

## 1.1. Printimise evolutsioon kui kihtlisandustehnoloogia

Ametlik tööstuslik nimi 3D printimisele on kihtlisandustehnoloogia, mis iseloomustab hästi vastavate masinate tööd. Printimisel pannakse kolmemõõtmelised objektid kokku toormaterjali kihtidest (kihtlisandus) ja loovad need kihid vastavalt ettenähtud korratavale ja süstemaatilistele protsessidele (tehnoloogia). Kolmemõõtmeliste objektide moodustamiseks järgivad printerid arvuti käske [1].

Vanim kihtlisandustehnoloogia meetod on stereolitograafia, mis kasutab valguse toimet tahkestuvaid vedelikke ehk fotopolümeere. Sellele meetodile järgnesid kiiresti uued, termoplastse pulbri paagutamisel (laserpaagutamine) ja termoplastide sulamassi valul põhinevad meetodid [2].

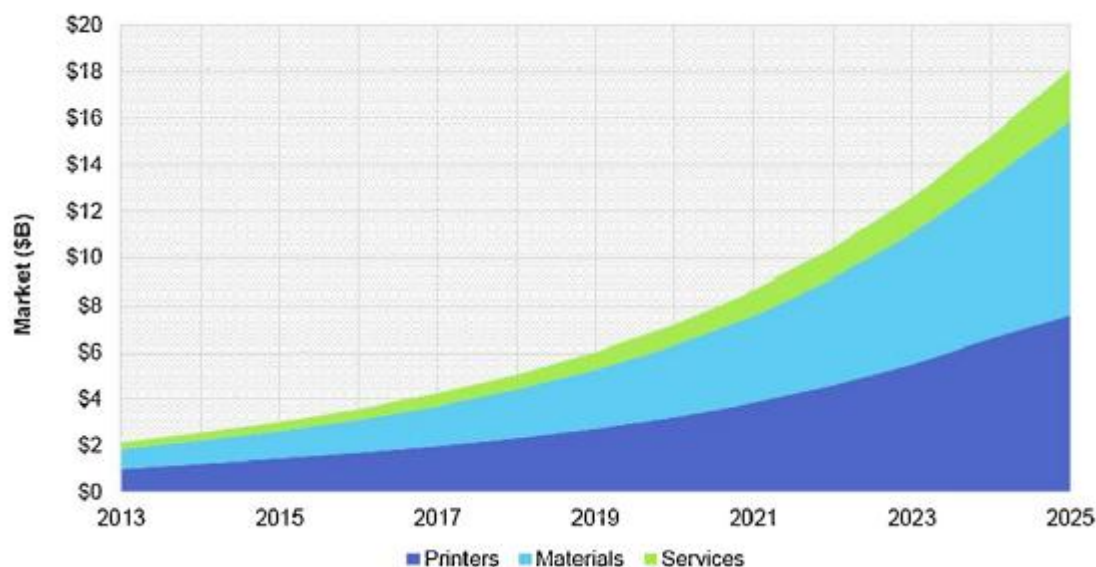
Esmakordselt demonstreeriti 3D printimist aastal 1980, mis oli seotud firma Ballistic Particle Manufacturing patenditaotlusega. Esimene kaubanduslikult edukas tehnoloogia oli ModelMaker Sanders Prototype'st (nüüd Solidscape), mis võeti kasutusele 1994. aastal. See printis põhiliselt vedelasse olekusse kuumutatud vaha. Aastal 1996 tuli 3D süsteemiga turule Actua 2100, teine vaha-baasil trükimasin, mis turustati aastal 1999 kui ThermoJet. 2001 sisenes turule Sanders Design International seadmega Rapid ToolMaker, kuid ei pidanud turul kaua vastu Solidscape'ga tekkinud konflikti tõttu.

Kolmemõõtmeline printimine on avardanud võimalusi mitmesugustele sektoritele nagu näiteks infotehnoloogia (IT), arstiteadus, transport, kosmosetehnoloogia jne [3].

Kui tuua näiteid kosmosetehnoloogia valdkonnast, on NASA Mars Roveri paljud metalliosad valmistatud 3D printeriga. Nendel osadel on keeruline geomeetria ja sisehülsid, mida poleks saanud toota millegi muuga, kui ainult 3D printeriga [1].

3D printimise turule ennustatakse tulevikus kiiret kasvu, mis hõlmab endas materjale, printereid ja teenuseid. Tänu sellele kogub 3D printimine populaarsust ka Eestis.

Kihtlisandustehnoloogiaga seotud globaalse turu maht on hetkel umbes 2,7 miljardit eurot ja see võib kasvada aastaks 2025 juba 16,3 miljardi euroni (vt Joonis 1) [4]. Ennustuste kohaselt hakkavad inimesed rohkem keskenduma ise printimisele, kui teenuste kasutamisele.



Joonis 1 3D printimise tööstuse koguturg [4].

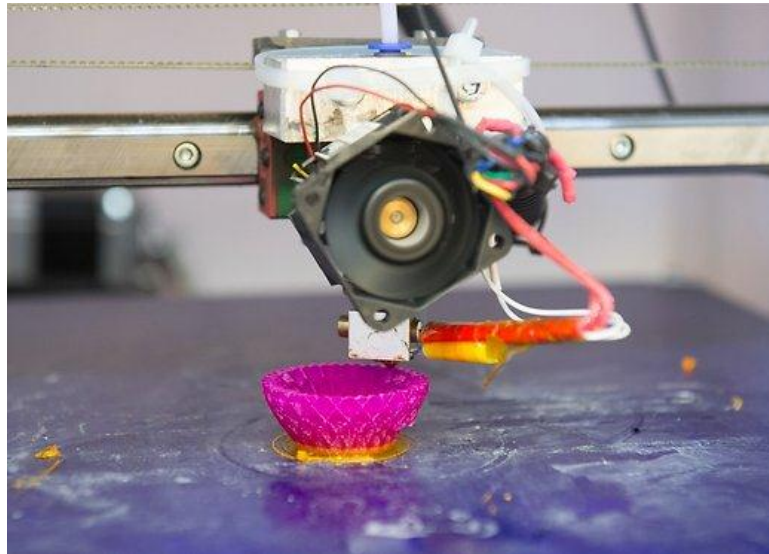
## 1.2. 3D printimine Eestis

Kolmemõõtmeline printimine levib Eestis kiirelt. Tugeva IT-riigina on meil suur potentsiaal arendada uus täiustatud printer, sest usun, et meil on olemas selleks vajalikud teadmised.

Eesti esimene teadaolevalt 3D printeri valmistaja ja disainija on EDM Machinery. EDM-is valmistatud printer maksab umbes 3000 eurot. Sama tehnoloogiat kasutavad printerite hinnad võivad ulatuda 25000 euroni ja kõige odavamad printerid maksavad alla 200 euro [5].

EDM Machinery kasutab oma printerites FDM-tehnoloogiat, mis on tänapäeval kõige levinum. Materjal on odav ning mudeli valmistamine võtab küllaltki vähe aega. Joonisel 2 oleva miniatuurse vaasi valmistamiseks kulub vähem kui kaks tundi [5].





Joonis 2 EDM Machinery esimene prototüüp 3D printeriga (miniatuurne vaas) [5].

Printer trükib maksimaalselt 300 x 300 x 250 millimeetri suuruseid detaile ja on praegu pakutavaist masinaist üks suurema tööalaga printereid [6].

Lisaks nendele on Eestis tekkinud veel mitmed ettevõtteid, kes pakuvad 3D printimise teenuseid nagu näiteks Wolfprint, Eesti Templitehas OÜ, BALTAL OÜ.

Hardi Meybaum'i algatatud haridus- ja arendusprogramm Eesti 2.0 eesmärgiks on inspireerida koolinoori valima tehnoloogiapõhist tulevikku. Programmi esimene pilootprojekt annab ära 50 3D printerit Eesti põhikoolidele ja gümnaasiumitele. Nii aidatakse tehnoloogiahuvilistel noortel osa saada maailma ühest olulisemast teadussaavutusest. Selle programmi kaudu omandab noor põhiteadmised käesoleva tehnoloogia kohta ja jõuab arusaamiseni, et ka tema on võimeline looma unikaalseid tooteid. Projekti käivitamisele on aidanud kaasa rida eraisikuid ja ettevõtteid, nende hulgas GrabCAD, Planet OS, Makerbot, Stratasys [7].

### **1.3. 3D printimise tulevikuvisionid**

Tõenäoliselt võib kihtlisandustehnoloogia olla vahend, mis muudab inimeste kultuuri igaveseks. Varsti on rohkem materjalivalikuid, parem printimise lahutusvõime, suurem tootmise kiirus ja madalam masinate maksumus.

Hetkel on 3D printimisel kolm olulist aspekti. Sellest esimene on kontroll objektide kuju üle. Tänapäeva 3D printerid suudavad toota objekte peaagu igast materjalist, alates polüamiidist kuni klaasini, šokolaadist kuni titaanini. Masstootmisest saab massi kohandamine ehk tarbija vajaduste rahuldamine. Tulevikus 3D printimise tehnoloogia paranemisel on kõigil võimalus disainida ja teha keerukaid tooteid ise. Kuna 3D printimine ei vaja suuri ressursse vaid spetsiifilisi oskusi, siis on see paremaks alternatiiviks traditsioonilisele tootmisele [1].

Teine aspekt on kontroll ainekoostise üle. Tulevikus on võimalik teha materjale materjali sees. Kui 3D printerid saavad segada toormaterjale uuel viisil, siis oleme täiesti uute materjaliklasside ilmumise tunnistajaks. Mitme materjaliga printides on võimalik kasutada mitut erinevat materjali samaaegselt ning toode on kohe nõ kokku pandud. Sellise aspekti olemasolul on võimalik printida tavalist tennisereketit, mis nutikalt võimendab meie unikaalselt tagantkäelööki. Vaatamata sellele, et need võimalused on kauged, suudab osa materjaliteadlasi ennustada nende uute materjalide omadusi ja osad disainerid suudavad ära kasutada uut disainiruumi. Uued disainivahendid on vajalikud, et suurendada inimeste loovust [1].

Kolmas aspekt on kontroll käitumise üle. Sellest lähtuvalt suureneb võimalus programmeerida materjale toimima soovitud viisidel. Liigutakse passiivsete osade ja materjalide printimisest integreeritud, aktiivsete süsteemide printimisse, mis suudavad tajuda ja reageerida, arvutada ning käituda vastavalt vajadustele. Hetkel võib see olla teaduslik fantastika, aga 3D printerid on juba esimene samm uute masinate generatsiooni lainest, mis disainib, valmistab, parandab ja taastöötleb teisi masinaid [1].

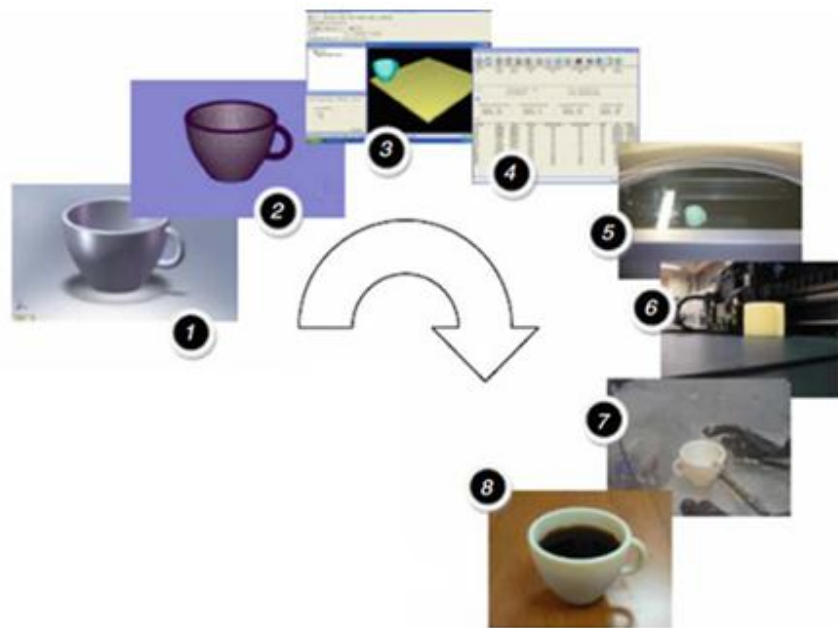
## 2. 3D PRINTIMISE TEHNOLOOGIAD

3D printerid ei lõika ega kujunda esemeid nii nagu inimesed või traditsioonilised tootmismasinad seda teevad. Valmistades objekte kihtidena on võimalus toota esemeid füüsiliselt laiemas ulatuses [1].

Kihtlisandustehnoloogiline protsess koosneb kaheksast sammust (vt Joonis 3), mis on üldiselt sobilik kõikidele selle valdkonna tehnoloogiatele. Seejuures võivad esineda mõningad variatsioonid, sõltuvalt kasutatud tehnoloogiast ja konkreetse eseme või osa disainist [3].

Protsessi kaheksa sammu:

1. CAD modelleerimine.
2. STL konverteerimine. STL on faili formaat, mille lühend on tuletatud sõnast STereoLitograafia, mis oli esimene kaubanduslik kihtlisandustehnoloogia 3D süsteem.
3. Mudelite paigutus, viilustamine.
4. Masina tööparameetrite seadmine.
5. Ehitamine.
6. Mudeli eemaldamine.
7. Järeltöötlus.
8. Kasutamine [3].



Joonis 3 Kihtlisandustehnoloogia protsessi 8 etappi [3].

3D printimisel on kaks peamist tehnoloogia gruppi. Esimene neist on sulatatud materjali sadestamisega modelleerimine (FDM), mis ladestab toormaterjali kihtidena. FDM tüüpi 3D printerid on kasutusel peamiselt inimeste kodudes ja kontorites. Teine grupp on FDM meetodist vanemad tehnoloogiad, mis kasutavad toormaterjali ühendamisel (mitte ei langeta või ladesta) kuumust või kiirgust, kõvendamaks nii valgustundlikku fotopolümeeri (SL) või pulbrit (LS). See printerite grupp on vähem levinud tavakasutajate seas, kuna seadmes kasutatavad kiired on ohtlikud ning masina maksumus on kallid [1].

## **2.1. Sulatatud materjali sadestamisega modelleerimine**

FDM printeri töötehnoloogia põhineb sellel, et masin surub toormaterjali läbi printeripea. Sellisele 3D printimise protsessi tüübile on omane, et enne printimistöö algust läbitakse mitu ettevalmistusetappi. Esimene etapp on disaini faili loomine. Disaini fail tuleb salvestada spetsiaalsesse formaati, mida 3D printeri tarkvara suudab lugeda ja töödelda. Pärast disaini faili lugemist kalkuleerib printeri tarkvara mehaanilise tee ja printeripea füüsilise tegevuse. Printimisel on vaja teada disaini kuju kontuuri, kuhu düüs ladestab ja kui palju materjali prindipea välja pigistab [1].

Peale seda, kui 3D printeri tarkvara on planeerimise lõpetanud, võib füüsiline printimise protsess alata. Plastikust filamenti keritakse trumlilt ja juhatakse tõmberullide abil sulatuskambrisse. Düüs kuumutatakse plastiku sulamistemperatuurini ja selle mehhanismi abil on võimalik kontrollida sulatatud plastiku voolamist (vt Joonis 4) [8, 3]. FDM tüüpi printerid liigutavad printeripead mööda määratud horisontaalseid ja vertikaalseid rööpaid [1].

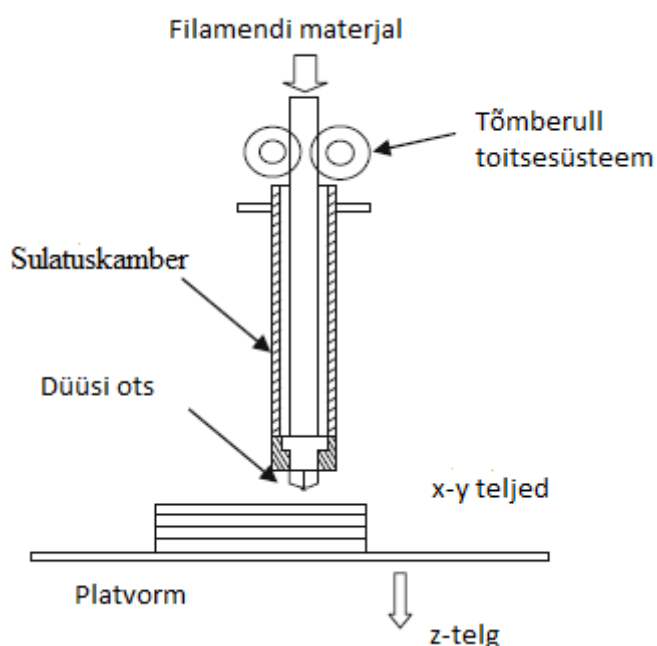
Pärast esimese kihi printimist naaseb printeripea algasendisse, et langetada teine kiht esimese peale. Printer jätkab protsessi kordamist seni kuni valmib disaini failis kirjeldatud detail. Kogu protsess võib kesta tunde või lausa päevi [1].

Kõigile väljaulatuvatele osadele tuleb konstrueerida ja valmistada tugikonstruktsioonid, mis hiljem täiendavate operatsioonide käigus eemaldatakse [2]. Selleks peab printimisel kasutama kahte materjali ja kahte prindipead: modelleerimise materjal, mis moodustab valmis tehtud osa, ja tugimaterjal, mis on tellinguks lõpetatud osale [8].

Tugede valmistamiseks on välja töötatud spetsiaalsed materjalid, mis on kergesti eraldatavad või ära murtavad. Näiteks veeslahustuvad tugimaterjalid on eemaldatavad pestes [2].

FDM tehnoloogia eeliseks on selle madal maksumus ja võimalus kasutada mitmekülgseid materjale [1].

FDM printerite peamine puudus on, et nad suudavad printida ainult materjale, mida saab läbi printeripea sulatada ja suruda. Enamus FDM printereid, mis on saadaval tänapäeva turgudel, kasutavad spetsiaalset plasti tüüpi. 3D printimise plastid on müügil rulli ja filamendi kuju standarditena [1].



Joonis 4 FDM skeem [3].

FDM on kasutusel järgmistes üldistes rakendusvaldkondades:

1. Kavandite ja presentatsioonide mudelid ning prototüübid: FDM 3D printerid suudavad luua mudeleid ja prototüüpe uute toodete disainide ja testide jaoks.
2. Hariduslik kasutus: õpetajad saavad kasutada FDM tehnoloogiat õppetöös, edendamaks uurimistööd teaduse, tehnika, disaini ja kunsti alal.
3. Asjaarmastajad ja ettevõtjad kasutavad FDM 3D printimist, et muuta tootmist käepärasemaks, luues uusi kaubaartikleid, tarbija nõuetele kohandatud seadmeid ja leiutisi [8].

## **2.2. Printerid, mis sulatavad, seovad või liimivad**

Teises 3D printerite grupis on seadmed, mis kasutavad toormaterjali kihtide saamiseks sulatamis või sidumisprotsessi. Kaks variatsiooni sellel meetodil, mida laialdaselt kasutatakse, on stereolitograafia ja laserpaagutamine [1].

### **2.2.1. Stereolitograafia**

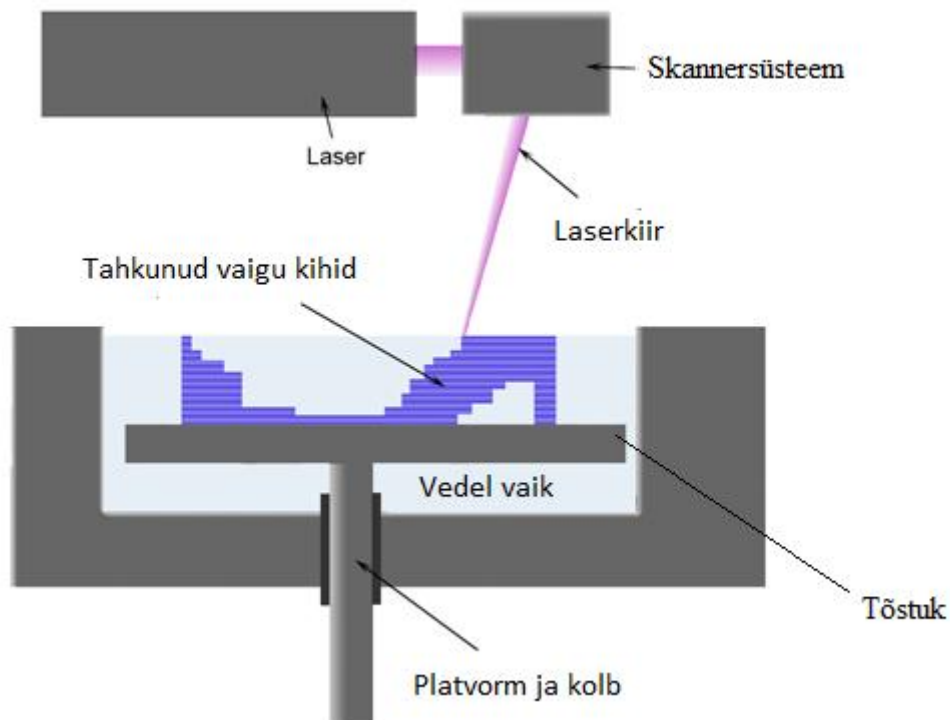
Esimene saadaolev meetod 3D printimisel oli stereolitograafia. SL meetodi korral on vann täidetud vedela fotopolümeerse vaiguga. Enamik fotopolümeerseid materjale nõuab tahkestumiseks ultraviolet (UV) kiirgust, kuid on ka vaikusid, mis tahkuvad nähtavas valguses. Vaigu aurude levimise vältimiseks peab süsteem olema isoleeritud. Liikuv laud või tõstuk asub protsessi algul kihipaksuse võrra allpool. Skannersüsteem, millesse kuuluvad kiired ja täpselt CAD andmete järgi juhitud mootorid, liigutab laserkiirt X-Y pinnas. Vaik kõveneb alades, mida laserkiir läbib. Alusplaat lastakse ruumilise keha saamiseks kõvendatud kihi paksuse võrra allapoole vedela vaigu taset, misjärel laserkiir katab detaili ristlõike (vt Joonis 5). Edasi asetatakse uus kiht ja nii kogu detaili ulatuses [2].

Pärast objekti printimist tuleb liigne materjal eemaldada ja lihvida pinnad käsitsi. Stereolitograafiaga saadud detailidel on tavaliselt kõige parem pinna kvaliteet. Sõltudes sellest, mis on prinditud, kõvendatakse valmistoode UV kiirguse ahjus [1].

SL printimisel on positiivne see, et laser on kiire ja täpne. Mitmed laserid saavad töötada paralleelselt ja jälgida kujusid kõrgemal täpsusel, kui suudab näiteks FDM printeripea. Tänapäeva tööstuse 3D printerid suudavad toota täpseid mudeleid ja osi 10 mikromeetri paksusega. Fotopolümeeride kvaliteedi paranemise ja valiku suurenemise tagajärjel saavad SL printerid toota laialdasemalt objekte, mis on spetsialiseerunud materjalide omadustega [1].

SL printimise puuduseks on see, et kõvenemata vaigust lähtuvad gaasid on sissehingamisel mürgised. Samuti ei ole fotopolümeerid nii tugevad ja vastupidavad, kui on termoplastsed materjalid [1].

Materjal saab olla ainult valguskõvenev, seega seab see piiranguid materjali valikule. Materjal on ebastabiilne ning valmis detail võib aja jooksul deformeeruda ja teda ei saa kaua säilitada [2]. SL printerid on masina maksumuse ja selle korrashoidmise keerukuse tõttu liiga kallid kodukasutajatele. Käesoleval hetkel saavad SL printerid printida ainult ühte materjali korraga [1].



Joonis 5 Stereolitograafia skeem.

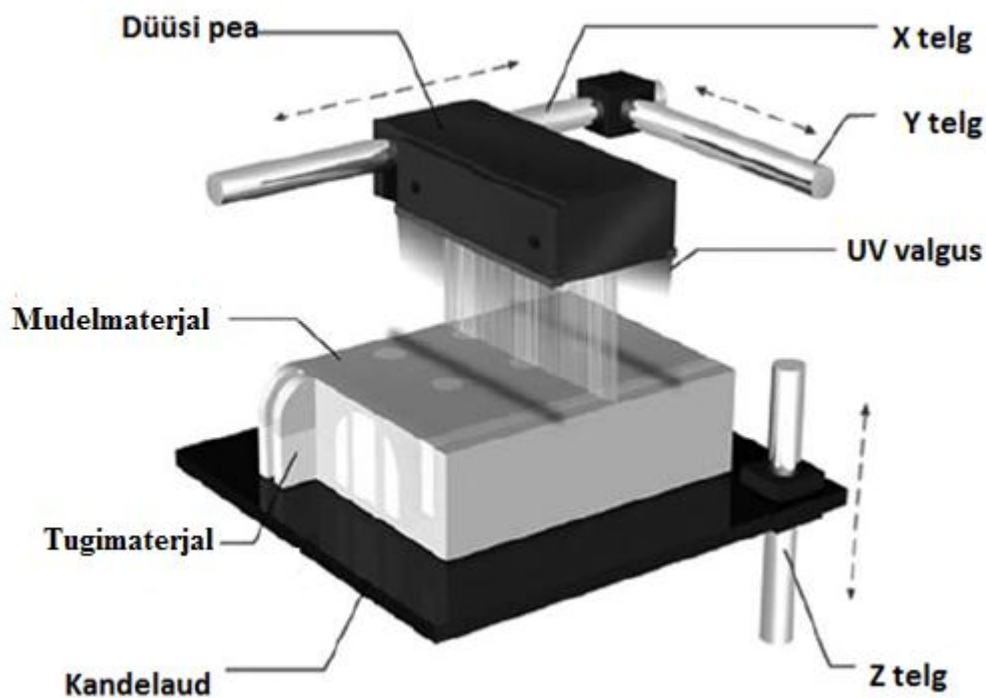
### 2.2.1.1. Polyjet-printimine

Polyjet-printerid on arendatud aastal 2000 Iisraeli ettevõtte Object Geometries poolt. Polyjet printerid on laenanud tehnoloogia võtteid kahelt peamiselt 3D printerite grupilt (FDM ja SL), kombineerides printeripea, mis pihustab vedelat vaiku äärmiselt õhukesteks kihtideks ja kõvendab selle UV lambiga [1].

Polyjet-printeri printeripeas on tuhandeid düüse, kus pooled pihustavad mudelmaterjali ja pooled tugimaterjali, seega saab ühes printimise töös kasutada mitut materjali korraga. Joonisel 6 on näha täpsemat Polyjet-printimise skeemi [3].

Polyjet-printimise kasu seisneb selles, et piisakeste pihustamine on kihtide langetamisel kiire ja täpne. Kihtide paksus on ligikaudu 16 mikromeetrit. Tänu Polyjet printerite täpsusele on need ideaalsed masinad meditsiini ja tööstusvaldkondades, kus toodete suur täpsus ja printimise kiirus on määrava tähtsusega.

Peamiseks Polyjet-printeri puuduseks on, et fotopolümeerid on kõrgelt spetsialiseerunud, kallid, haprad ja rabedad materjalid, mis piirab nende rakenduse ulatust [1].



Joonis 6 Polyjet printeri skeem [1].

### 2.2.2. Laserpaagutamine

Laserpaagutamine on tavaliselt viidatud kui LS. LS jälgib meetodit, mis sarnaneb SL printeritele. Vedela fotopolümeeri asemel kasutavad LS printerid termoplastse materjali pulbrit [1].

Need printerid kasutavad suure võimsusega CO<sub>2</sub> laserit, mis sulatab pulbrikihi pinda.

Üldiselt on protsessil kolm osa, mis on sarnane igale LS masina operatsioonile: soojenemise osa, valmistamise (paagutamise) osa ja jahtumise osa [9].



- 1. Soojenemise osa.** Detaili alusplaat ja pulbristatud materjal on eelkuumutatud ning temperatuur on fikseeritud 172-178 °C vahel, allpool materjali sulamistemperatuuri (190-210 °C standardse PA 12 korral ( vt Tabel 3)) [9].
- 2. Objekti valmistamise osa.**
  - 2.1 Objekti ehitamiseks on laotatud õhtuke pulbrikiht.
  - 2.2 Laser sulatab pulbrit vastavalt detaili ristlõikele.
  - 2.3 Kui läbilõige on sulatatud, laotatakse täiendav pulbrikiht rulli mehhanismi poolt eelmise laotatud kihi peale. See valmistab ette järgmise kihi ristlõike sulatamist.
  - 2.4 Sammud 2.2 ja 2.3 on korduvad, sulatades igat kihti alloleva kihi peale. Protsessi korratakse seni kuni objekt on terviklik (vt Joonis 7) [8].
- 3. Jahtumise osa.** Objekti valmistamise lõpus on temperatuur endiselt kõrge, 140 °C - 180 °C vahel. Tahkunud osa võib välja võtta alles siis, kui selle temperatuur langeb 45-60 °C vahele, sest muidu võivad need väänduda ja deformeeruda [9].

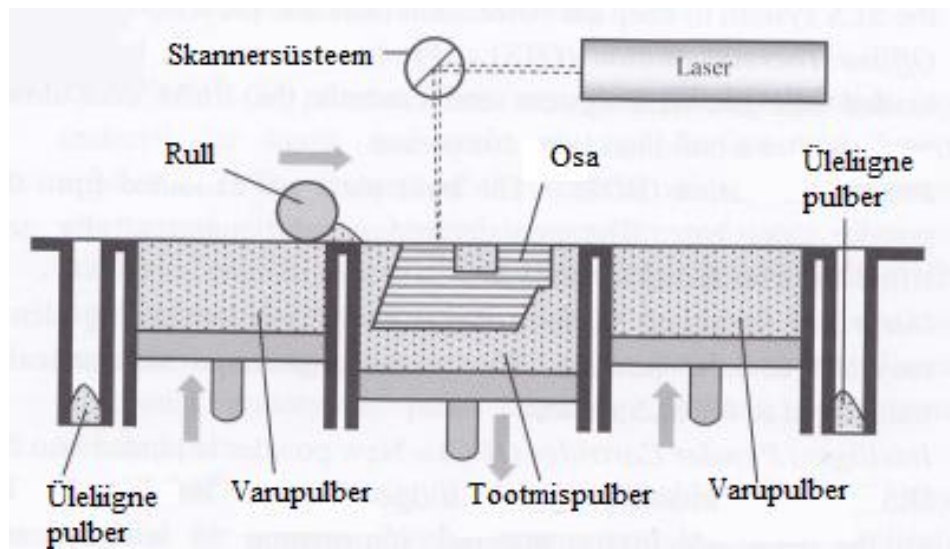
Tahke objekti valmimise korral jääb selle ümber lahtine või mitte paagutatud pulber. LS üks protsess kasutab detaili valmistamiseks umbes 10-20 % materjali ja ülejäänud 80-90 % on mitte paagutatud pulber, mis on ümbertöödeldav [9].

Seadme valmistamiskamber on isoleeritud ja selle sisemine temperatuur on allpool pulbri sulamistemperatuuri. See kiirendab oluliselt toote valmistamise protsessi. Peale objekti vormimist, pühitakse liigne materjal maha ja vajadusel viimistletakse toote pind käsitsi [2].

Printimisel pulbriga, vedelate materjalide asemel, on omad eelised. Pulbriga prinditud objekt on printimise protsessis tõenäoliselt vähem kokkukukkuv, sest mittesulanud pulber käitub kui sisseehitatud tugi. Mõnel juhul võib lahtise pulbri ülejääke taaskasutada näiteks mõnes teises printimistöös. Pulbristatud materjal on tihti paindlikum, sest paljud toormaterjalid saadakse pulbrilisel kujul, kaasa arvatud pulbristatud polüamiid, teras, pronks ja titaan [1].

Negatiivseks pooleks on see, et LS printerid loovad objekte, mille pind kaldub olema pigem poorne kui sile. Käesoleval hetkel ei saa LS printerid printida erinevaid pulbritüüpe üheaegselt. Pulbritel on kalduvus valel käsitlemisel laiali paiskuda, seega vajab LS printer tihendatud kambrit [1].

LS printimise protsess on kuum. Sõltuvalt kihtide suurusest ja paksusest, peavad suuremad osad maha jahtuma ligikaudu kuni üks päev [1].



Joonis 7 Laserpaagutamise protsessi skeem [8].

### **3. 3D PRINTIMISES KASUTATAVAD POLÜMEERID**

Praegusel ajal on väga laialt levinud plastfilamendil põhinev printimine. Termoplastsed materjalid, mida FDM tehnoloogia kasutab, on ABS, PLA, PC, PA, PS plastid, millest kõige populaarsemad on ABS ja PLA. Laialdane kasutus on tingitud madalast hinnast ja lisaks on ABS kergesti printitav ning PLA keskkonnasõbralik [10].

#### **3.1. ABS**

ABS (akrüülnitriit butadien stüreen kopolümeer) on naftal põhinev mittebiolagunev termoplastne polümeer, mida saab taaskasutada uue filamendi tootmises. ABS sulamassi töödeldakse üldiselt temperatuuril 210-250 °C, seepärast peaks 3D printer olema varustatud alusplaadiga (pind, millele detail printitakse), mida saab soojendada, et vältida printitud detaili kõverdumist või pragunemist. ABS on üks parimaid stüreenipõhiseid polümeere ja tänapäeval kasutatakse seda paljudes erinevates valdkondades nagu näiteks elektroonika ja autotööstus [11]. Lisaks üldistele ABS tunnustele on Tabelis 1 välja toodud mõned ABS füüsikalised näitajad.

ABS materjali tunnused:

- tugev
- vastupidav, kõva ja jäik
- hea keemiline vastupidavus hapetes, leelistes, lahustites
- hea survetöödeldavus
- väga kõrge löögitugevus
- kõrge tõmbetugevus
- suurepärane painduvus [11].

Piirangud kasutamisel:

- kehv ilmastikukindlus [11].

**Tabel 1****ABS füüsikalised näitajad [12].**

<b>Tg(°C)- klaasiirrdetemperatuur</b>	<b>Tm(°C)- sulamistemperatuur</b>	<b>Tõmbetugevus (MPa)</b>	<b>Tõmbemoodul (GPa)</b>	<b>Katkevenivus (%)</b>
105	205	42,5- 44,8	2,21	23-25

### 3.2. PLA

PLA (polüpiimhape) on kõige populaarsem 3D printimisel kasutatav plast. Seda just seepärast, et PLA on biolagunev ning vajab printimiseks suhteliselt madalat temperatuuri. PLA on toatingimustes rabe ning puruneb painutamisel kergelt. PLA-l on suurem hõõrdumine, mis teeb selle ekstrudeerimise raskemaks ning suurendab ekstruuderi ummistamise ohtu. Samuti talub PLA vähem kuumust kui ABS. PLA-d prinditakse tavaliselt temperatuuril 160-180 °C, mis on tingitud sulamistemperatuurist (vt Tabel 2) [13]. PLA monomeer, laktiid, on toodetud käärimise või keemiliste sünteeside teel. PLA-l on unikaalsed omadused, nagu näiteks hea väljanägemine, kõrge mehaaniline tugevus ja madal toksilisus [14].

**Tabel 2****PLA füüsikalised näitajad [12].**

<b>Tg(°C)- klaasiirrdetemperatuur</b>	<b>Tm(°C)- sulamistemperatuur</b>	<b>Tõmbetugevus (MPa)</b>	<b>Tõmbemoodul (GPa)</b>	<b>Katkevenivus (%)</b>
60-65	175	57,8	3,3	3,8

### 3.3. PA 12

Polüamiidid koosnevad erineva pikkusega metüleenahelatest, mis vahelduvad amiidi rühmadega. Polüamiidid liigitatakse meelis olevate süsinikuaatomite arvu kaudu. Näiteks PA 12 meelis (  $-\text{NH}(\text{CH}_2)_{11}\text{CO}-$ ), mis on ka uuritud käesoleva bakalaureuse töö käigus, on 12 süsiniku aatomit [15].

PA 12 pulber on väga laialdaselt kasutatud materjal LS protsessis. Paagutuse protsessi tagajärel tekib suurtes kogustes pulbrijääke, mille omadused on halvenenud. LS protsessis degradeerunud mittepaagutatud PA 12 pulbri rakendamise tulemusena toodetakse osad, mis on kehvema ning karedama pinna kvaliteediga [9].

Masinas oleva PA 12 pulbri omadused halvenevad LS protsessi tingimuste tõttu (kuumus, ehitamise aeg, jahtumise aeg jne) ja edasiseks kasutuseks segatakse degradeerunud pulber uue PA 12 pulbriga [9].

Kui segus on ülekaalus väga degradeerunud pulber, siis on võimalus, et toodetud detailid on defektsed. Selle ära hoidmiseks rakendatakse kõrget uue pulbri suhtarvu, mis on tavaliselt 50% või rohkem [9].

Amiidirühmad (-CO-NH-) polüamiidides moodustavad vesiniksidemeid makromolekuli ahelate vahel, mis seeläbi edendavad kristallilisust ning suurendavad nende tugevust ja vastupidavust kemikaalide suhtes. See on iseloomulik kõikidele polüamiididele, mis on poolkristalsed. Kõikidest kaubanduslikult kättesaadavatest polüamiididest on PA 12'1 amiidigrupi madalaim kontsentratsioon, mis omakorda annab talle madalaima niiskuse adsorptsiooni [16].

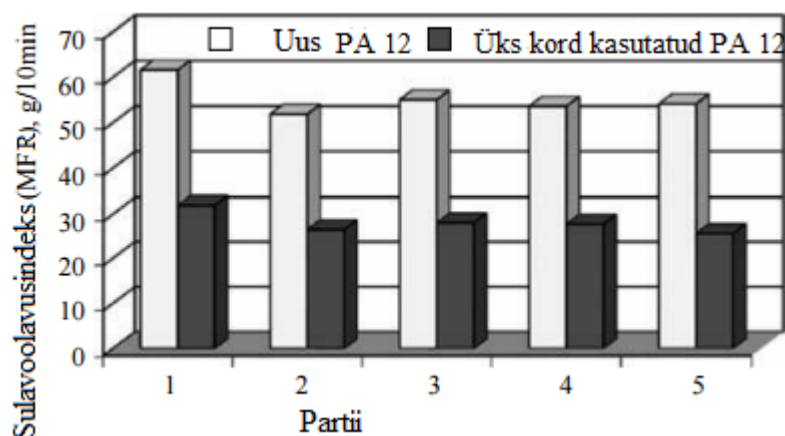
### Omadused

PA 12 on kihtlisandustehnoloogias laialdaselt kasutatud tema järgmiste silmapaistvate omaduste tõttu: 1) kõrge sitkus, 2) väga hea vastupidavus määretele, õlile, kütustele, veele, leelistele, soolalahustele ja paljudele orgaanilistele lahustele, 3) madal liugehõõrdetegur ja kõrge kulumiskindlus, 4) müra ja vibratsiooni summutus [16]. PA 12 füüsikalised näitajad on numbriliselt välja toodud Tabelis 3.

## PA 12 füüsikalised näitajad [17].

OMADUS	VÄÄRTUS
Tihedus	1.01 g/cm <sup>3</sup>
Pinnakõvadus	RR105
Tõmbetugevus	50 MPa
Paindeelastsusmoodul	1,4 GPa
Pikenemine purunemisel	200%
Maksimaalne töötemperatuur	70 °C
Veeimavus	0,25%
Dielektriline tugevus	60 MV/m
Sulamistemperatuur	190 °C- 210 °C

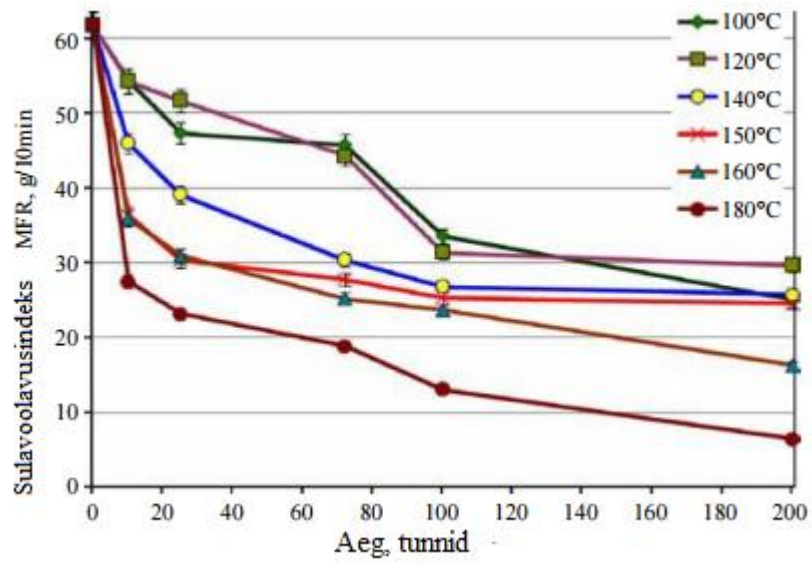
Sulavooluindeksit defineeritakse, kui polümeeri massi voolavust kümne minuti jooksul läbi kindla diameetri ja pikkusega kappillaari [9]. Andmetel, mis on näidatud Joonisel 8, on uue PA 12 pulbri sulavooluindeks keskmiselt 55 g/10 min ning ühe korra kasutatud PA 12 puhul on see keskmiselt 25 g/10 min, mis on üle kahe korra väiksem, kui on uue PA 12 sulavooluindeks.



Joonis 8 Värske ja ühe korra kasutatud PA 12 sulavoolavusindeksi variatsioon [9].

Lisaks pulbri ümbertöötlemisele mõjutavad PA 12 sulavooluindeksit pulbri töötlemise temperatuur ja aeg. Jooniselt 9 on näha, et mida kõrgem on temperatuur ja mida pikem on rakendatav kuumutamise aeg, seda madalam on pulbri sulavooluindeks.

Mõõtmise alguses oli PA 12 sulavooluindeks 60 g/10 min, mis näitas suurt kukkumist peale 200 tunnist kuumutamist. Näiteks 180 kraadi juures kukkus MER näitaja 7 g/10 min; 100 kraadi korral tuli uueks MER näitajaks 25 g/10 min, mis oli 3,5 korda suurem võrreldes 180 kraadiga.



Joonis 9 PA 12 värse pulbri sulavoolavusindeks, sõltuvalt ajast ja temperatuurist [9].

## 4. MATERJALIDE TAASKASUTUS 3D PRINTIMISEL

Globaalselt on plastide tootmine kasvanud viimase 30 aasta jooksul 500%; ennustuste kohaselt kasvab aastane plastitoodang 2050. aastaks 850 miljoni tonnini [18]. Sellele kasvule aitab kaasa ka 3D printerite areng, mis võimaldavad printida väga erinevaid tooteid- väga lihtsatest kuni väga keerulisteni. Nii 3D printimise protsessi tagajärjel (tugimaterjalid ja ebaõnnestunud detailid) kui ka valmistoote elutsükli lõpul tekib jäätmeid, millest osa ei ole võimalik ümbertöödelda. Washingtoni Ülikooli professor Mark Ganter väidab, et enamus printimise materjalidest, mis on saadaval turul, ei ole väga keskkonnasõbralikud [1]. Plastijäätmeid reostavad keskkonda ja vett, kuna plastid lagunevad looduses aeglaselt (10 kuni 450 aastat prügilas) ning need on põletamisel mürgised [18].

Lõpp-tarbija plastide neli klassifikatsiooni on:

1. Mittetaastuv plast- plastid, mida ei saa uuesti kasutada.
2. Taastuv plast- plastid, mida saab uuesti kasutada.
3. Taastöödeldav plast- taastöödeldud plastid, mis on uuesti kasutatavad toote tegemiseks.
4. Kokku pandud plast- jääk plasti tootmisest, mida saab kokku panna uueks tooteks [18].

Kilogramm filamenti maksab jaekaubanduses keskmiselt 20- 46 eurot. Kui teha 3D printeri filamenti ise taaskasutatud plastist, oleks selle maksumus 0,10 senti kilogrammi kohta. Arengumaades on filamenti saamine raske. Kui kasutajad suudaksid teha filamenti taaskasutades plasti ja müüa näiteks kilogramm materjali 14 euro eest, teeniksid nad piisavalt raha, et tulla välja vaesusest samal ajal olles ka keskkonnasõbralik [19].

Kuna tegu on küllaltki areneva valdkonnaga, siis informatsioon ümbertöödeldud materjali kvaliteedi kohta on piiratud.



## 4.1. Materjalid

Aktiivselt tegelevad erinevate polümeersete materjalide ümbertöötlemisega Perpetual Plastic Project (PPP) ja Washington Open Objects Fabricators Club (WOOF). PPP projekt tutvustab inimestele 3D printimise võimalusi plastijäätmetega. Projekti käigus koguti erinevaid plastijäätmeid, mis peenestati ning saadud materjali ribadest valmistati ekstruuderiga filament, mida kasutati lõpuks 3D printimisel FDM meetodil. Prinditud katsekeha kandis nimetust PPP sõrmus [20].

Washington Open Objects Fabricators (WOOF) Club õpilasorganisatsioon kogus prügimäelt 19 kg plastkanistreid, millest filamendi tootmiseks kasutati PPP meeskonnale sarnast meetodit. Katsetamaks ümbertöödeldud filamendi sobivust FDM printeris, disainis meeskond paadi, mille printimine ka õnnestus [1].

PPP'l õnnestus järgmiste polümeeride ümbertöötlemine: PLA, PS, LDPE, PA.

PLA on üks laialdasem materjal, mida kasutatakse ühekordsete joogitopside valmistamisel. Seda on kerge ekstruuderis töödelda ja FDM printida. Meetodi etapid, kuidas plasttopsid saab FDM prinditud sõrmus, on kujutatud Joonisel 10 [20].



Joonis 10 PLA taaskasutus 3D printimisel. Paremalt on 3D prinditud sõrmuseid [20].

Plasttopside populaarsusest ajendatuna prooviti teist sarnast ühekordselt kasutatavat materjali, polüstireeni (PS), millest samuti valmistati filament ja prinditi sõrmus (vt Joonis 11) [20].



Joonis 11 PS'i taaskasutus 3D printimisel [20].

Kolmas materjal, millega eksperimenteeriti, oli madaltihe polüetüleen (LDPE). LDPE on toormaterjaliks kilekottide ja paljude pudelikorkide tootmisel. Katkised kilekotid, mida katses kasutati, lõigati tükkideks käsitsi, sest need ei sobinud kasutamiseks topside jaoks disainitud peenestis. Sõrmuse printimine õnnestus nii materjaliga, mis oli tehtud kilekottidest ( vt Joonis 12) kui ka pudelikorkidest (vt Joonis 13); ümbertöödeldud kilekottidest tehtud sõrmus oli mõnevõrra paksud [20].



Joonis 12 LDPE'i kilekottide taaskasutus 3D printimisel [20].



Joonis 13 LDPE'i pudeli korkide taaskasutus 3D printimisel [20].

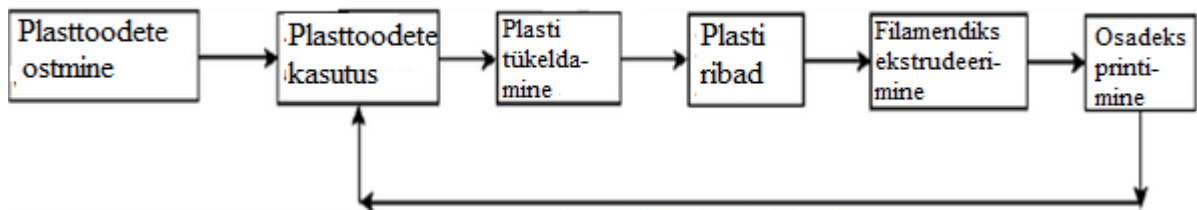
Järgmisena katsetati polüamiidi (PA) pulbriga, mis oli jäämaterjal PPP meeskonna laserpaagutamise masinast. 3D printimine PA'ga oli raskendatud, aga sellegi poolest õnnestus PPP sõrmus valmis teha (vt Joonis 14) [20].



Joonis 14 PA taaskasutus 3D printimisel [20].

Plast piimakanistrid on tehtud kõrgtihe polüetüleenist (HDPE), mis on laialdaselt kasutatav termoplasti liik. WOOF katsetas HDPE ümbertöötlemist, mille täpne taaskasutuse skeem on viidatud Joonisel 15 [23]. Katsetuste käigus selgus, et filamendiks ümbertöödeldud HDPE tõmbub peale FDM printimist kokku (umbes 2%); seda tuleb arvesse võtta uute disainide koostamisel. Pärast mõnda disaini parandust, printis meeskond kaks päeva FDM meetodil paati, mis suudab kanda 68 kg (vt Joonis 16) [1].

3D prinditud paat oli huvitav ja kasulik projekt, sest see tõestas, et taaskasutatud piimakanne saab korduvkasutada reaalseks ja tarvitamiskõlblikuks objektiks [1]. Lisaks mõningase saaste elimineerimisele, taaskasutades oma enda piimakanistreid kulub tootmiseks 90% vähem energiat, kui teha naftast kasutamata plasti [19].



Joonis 15 HDPE taaskasutuse skeem 3D printimisel [19].



Joonis 16 3D prinditud plastpaat, valmistatud jahvatatud piimakanistritest [1].



## 4.2. Seadmed

Ekstrusioon on protsess, kus survestatakse kuumutatud, pooltahket plasti läbi suulise, kusjuures ristlõike kuju säilib pärast plasti jahtumist ja tahenemist. Operatsioon on tavaliselt pidev, mis on jagatud kolmeks staadiumiks [21].

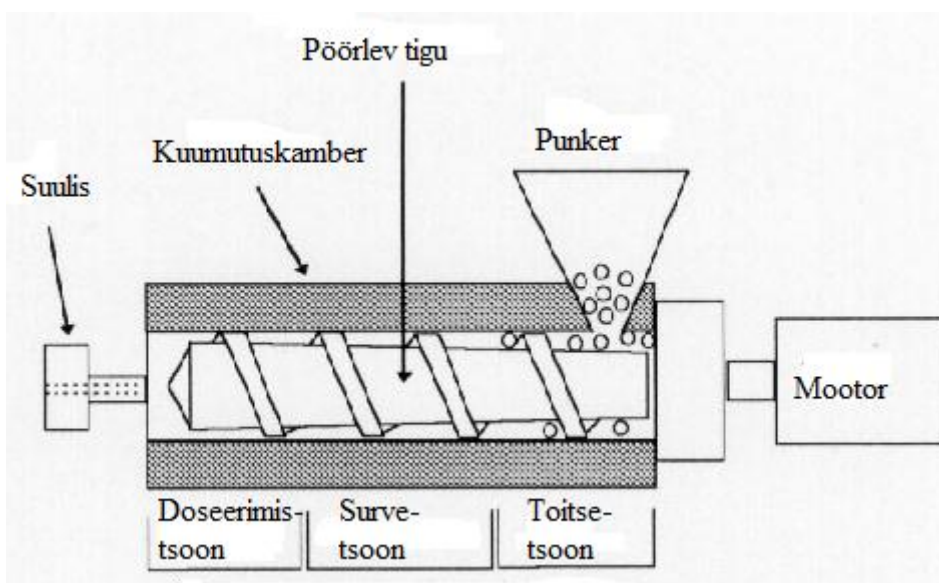
### Ekstrusiooni staadiumid:

- 1) Materjali plastifikatsioon ekstruuderi silindris.
- 2) Plastse materjali vormimine suulises.
- 3) Vormitud kuju fikseerimine ja jahutamine.

Termoplastne materjal graanulitena on toidetud punkrisse. Plastist graanulid viiakse teo abil sealt edasi soojendisse. Seal graanulid sulatatakse ning surutakse läbi suulise, mille tulemusena tekib pikk ja ühtlane silindriline detail, mida võib nimetada filamendiks (vt Joonis 17).

Detaili kuju sõltub seega suulise kujust. Pärast materjali suulisest läbisurumist see jahutatakse ning vajadusel tükeldatakse sobivasse pikkusesse [22].

Suulisest lahkuv materjal on jahutatud õhuvoolu, veepihusti või veerenni abil [21].



Joonis 17 Ekstruudri iseloomulik skeem [23].

Ekstruuderil on kokku kolm tsooni, mis jaotatakse:

- a) toitetsoon – toimub materjali soojendamine, toitetsooni lõpus algab materjali üleminek voolavasse olekusse;
- b) survetsoon – materjal läheb lõplikult voolavasse plastsesse olekusse nii, et juurdeantava kuumuse materjali sisehõõrdumisest tekkiva soojuse arvel. Materjali ruumala väheneb üleminekul tahkest olekust voolavasse 2-2,5 korda;
- c) doseerimistsoon– toimub sulataolise materjali lõplik segunemine ja homogeniseerimine ning tekib materjali ühtlane vool suulise suunas;

Kaks hiljutist tehnoloogilist saavutust, *RepRap* (3D printer FDM tehnoloogial) ja *RecycleBot* (ekstruuder), pakuvad uut lähenemisviisi polümeeride taastöötlemiseks. Seade, mis muudab lõpp-tarbija plasti filamendiks, nimetatakse *Recyclebotks* ja see valmistab ette *RepRap* toorme lõpp-tarbija majapidamis plastist [19].

### 4.3. Filabot

Uurijad Michigani Tehnoloogia Ülikoolist on loonud ekstruuderi, mida nimetatakse *Filabotiks* (vt Joonis 18), mis on valminud *RecycleBot* projekti raames. Seade muudab vana plastmassi kasutatavaks 3D printeri filamendiks.

Enne sulatamist ja ekstrudeerimist tuleb suuremad plasti osad tõmmata ribadeks või lõhkuda väiksemateks osadeks. Masin töötab termoplastidega nagu ABS, HDPE, LDPE, aga ei kasuta PVC'd selle toksiliste omaduste tõttu [24].

Filabot suudab teha uut 3D printeri filamenti 3,0 või 1,75 mm diameetriga, kasutades peaaegu ükskõik millist majapidamisplastmassi, alates PET'st ja polüpropüleenist kuni polüamiidini. Filabot saab samuti taastöödelda ebaõnnestunud, katkiseid või vananenud 3D printitud osi, tehes prototüübi arenduse palju vähem kulukaks [25].

Ülikooli uurijad kalkuleerisid, et masin vajab ainult murdosa töötlemise energiat taaskasutamaks plasti filamendiks. Kui 20 tühja piimakanistrit annab umbes kilogramm plasti, siis võib seda laadi taaskasutus langetada 3D printeri kasutamise hinda. Muidu maksaks selline kogus HDPE materjali 23- 36 eurot.

See on selge, et need 3D printimise filamenti valmistava ekstruuderi tüübid, kus kasutatakse taaskasutatud plasti, võib olla tõsine lahendus globaalsele reostusele [24].



Joonis 18 Filabot [25].

## 5. EKSPERIMENTAALNE OSA

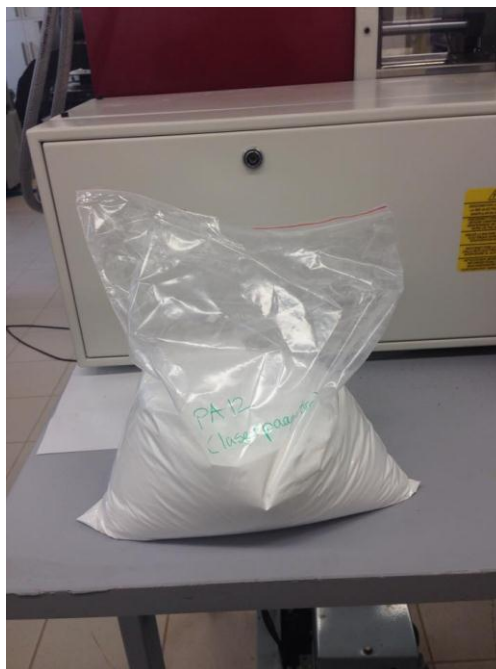
Eksperimendi eesmärk oli teada saada, kas ümbertöödeldud PA 12 on FDM prinditav.

Eksperimendi järjestus:

1. PA kuivatamine 4 tundi 105 °C juures.
2. BRABENDER PLASTICORDER PLE 651 ekstruuderis maksimaalselt 3,05 mm paksusega filamendi valmistamine.
3. 3D printimiseks sobiliku prinditava detaili disaini valimine.
4. 3D printimine Velleman K8200-ga.

### 5.1. Materjalid

Tallinna Tehnikaülikooli mehhatroonikainstituudis laserpaagutuse jäägina tekib suurtes kogustes polüamiid 12 (PA 12) pulbrit (vt Joonis 19). Enne kasutamist tuli pulbrit ahjus kuivatada 4 tundi 105 °C juures, et saada pulbrist välja võimalikult palju niiskust.



Joonis 19 PA 12 pulber



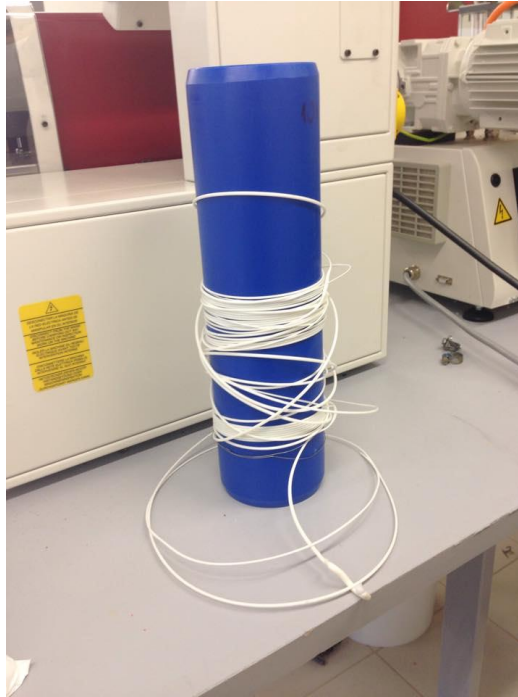
## 5.2. Seadmed/ tehnoloogiad

Jääkide ekstrusioon filamendiks toimus BRABENDER PLASTICORDER PLE 651 tüüp kaheteolise kompauderiga (vt Joonis 20). Kompauderi abil toimus kompaundimise juhtimine (temperatuuri ja teo kiiruse valik). Filamendi jahutus toimus ventilaatorite poolt tekitatud õhuvoolu abil. Saadud filamenti kerisin käsitsi ümber trumli (vt Joonis 21). Filamendi kogupikkuseks tuli kokku ligikaudu 10 m.

Kuna PA12 sulamistemperatuuri vahemik jääb 190 °C- 210 °C vahele, siis vastavalt sellele valisin kompauderi temperatuuri profiiliks: 175 °C (toitsetsoon) -190 °C (survetsoon)- 200 °C (doseerimistsoon) -210 °C (suulis).



Joonis 20 BRABENDER PLASTICORDER PLE 651 kompauder.



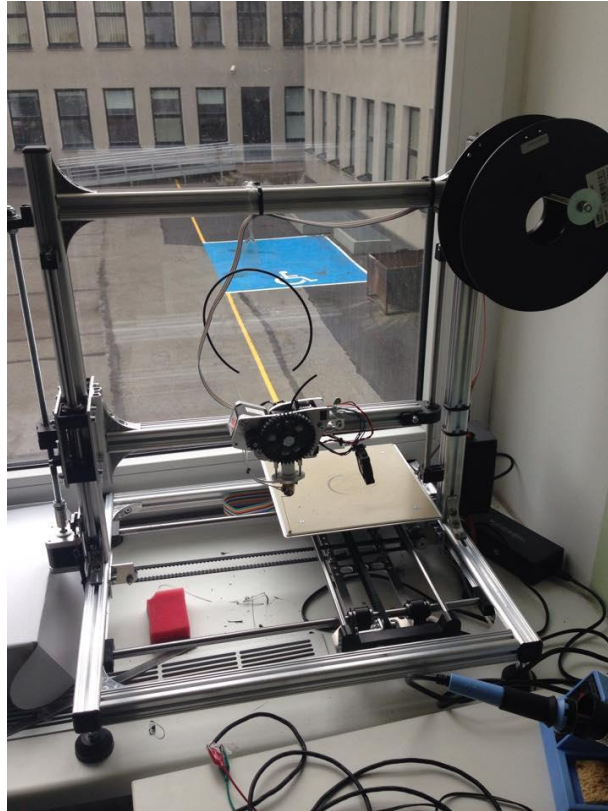
Joonis 21 Ekstrudeerimisel saadud filament.

Filament prinditi FDM meetodil TTÜ K8200 Velleman printeriga (vt Joonis 22), mille printeri spetsifikatsioon ja tunnused on esitatud Tabelis 4 [26].

**Tabel 4**

**K8300 Velleman 3D printeri spetsifikatsioon [26].**

Tehnoloogia	PLA ja ABS ühendatud filament
Prinditav ala	20 x 20 x 20 cm
Tüüpiline printimise kiirus	120 mm/s
Maksimaalne printeri kiirus	150-300 mm/s (oleneb prinditava objekti suurusest)
Ekstrusiooni düüs	0,5 mm
Filamendi diameeter	2,95- 3,05 mm



Joonis 22 TTÜ K8200 Velleman 3D printer.

### 5.3. Tulemuste analüüs

Ekstrudeerimisel PLASTICORDER PLE 651'ga osutus PA 12 pulber aeganõudvaks, kuna pöörlemiskiirus tuli hoida madalal, vahel lausa miinimumi peal (5-20 1/min), sest väändemoment oli pidevalt maksimaalselt kõrgel (max 100 Nm). Filamendi paksus sõltub pulbri söötmise ja kogumise kiirusest. Kuna laboris puudus pulbri automaatne dosaator, tuli filamendi paksus ebahühtlane ja oli üks peamisi segavaid faktoreid 3D printimisel. Lisaks raskendas filamendi diameetri kontrollimist sulaplastile iseloomulik paisumine suulisest väljumisel. Valitud FDM printimise mudeliks osutus lillekuju. Kuna filamendi paksus oli ebahühtlane, jäi see 3D printeri prindipeasse kinni ja tänu sellele oli printimine katkendlik (printerisse viiva varda paksus võis varieeruda 2,95-3,05 mm vahel). Meie filamendi paksus oli vahepeal üle 3,05 mm. Lisaks esines probleeme materjali kinnitumisega printimise aluspinnale ning detaili ääred kaardusid üles PA 12 suure soojuspaisumise tõttu.

Sellest hoolimata mudeli printimine õnnestus (vt Joonis 23), mis näitab, et PA12 saab taaskasutada 3D printeri filamendina. Edasised uuringud on vajalikud, et arendada materjali, mis võimaldaks printida objekte ilma defektideta. Printimise protsess kestis kokku 2 tundi.



Joonis 23 PA 12 3D prinditud lillemudel.

## KOKKUVÕTE

3D printimine on arvutis olevast 3D-mudelist reaalse objekti loomine käegakatsutavaks esemeks, mis saavutatakse õhukeste kihtide lisamisega üksteise peale. 3D prinditud objekte saab kasutada prototüüpimisel, arhitektuuris ja ka hariduses. Tänu sellele tehnoloogiale on lõpp-tarbijal võimalik rohkem ise tootmises osaleda. Kolm kõige enam levinud 3D printimise tehnoloogiat hetkel on FDM, stereolitograafia ja laserpaagutamine.

FDM tehnoloogia võimaldab printimiseks kasutada erinevaid termoplaste, peamiselt ABS ja PLA plasti. SL printerid kasutavad detaili loomiseks vedelaid, kiirguse toimel kõvenevaid vaike, mis laseriga töödeldes kõvendatakse vastavalt soovitud mudelile. Laserpaagutuse seadmed kasutavad termoplastse materjali pulbreid, mille pulbrikihi pinda sulatatakse CO<sub>2</sub> laseri abil.

Tallinna Tehnikaülikooli mehhatroonikainstituudis tekib laserpaagutuse protsessis jäägina suurtes kogustes PA 12 pulbrit. Mitte paagutatud PA 12 pulber on siiski läbinud kuumutuse, mis kahjustab pulbrit ja vähendab selle kasutuskõlblikkust. Seepärast ei saagi seda kasutada järgmises laserpaagutuse protsessis ja kuuluks ära viskamisele.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli leida taaskasutust kahjustunud PA 12 pulbrile 3D printimise (FDM) filamendi baasil. Projekti raames kasutasin PA 12 pulbri taaskasutuseks ekstrusioonipõhiseid süsteeme, muutes jäägid ekstrusiooni teel filamendiks. Sellele järgnes filamendi 3D printimise katsetus FDM meetodil.

Hetkel on taaskasutus 3D printimisel küllaltki arenev valdkond. Plastijäätmete ümbertöötlemisel on vaja teha jäägid väiksemateks osadeks, mida annaks ekstrudeerimise teel katsetada ja muuta filamendiks. Tänapäeval on välja töötatud selleks ka sobivad ekstruderid. Õigete parameetrite valimise ja õnnestumise korral saadakse sobiv 3D printimise filament, mille printivust ja potentsiaali saab katsetada FDM meetodil.

Projekti tulemusena selgus, et ümbertöödeldud PA 12 printimine on aeganõudev, küll aga prinditav s.t katse tulemus osutus õnnestunuks. Esineva segava faktori lahendamiseks tuleks filamendi paksust reguleerida automaatse dosaatoriga või kasutada hoopis mõnda teist masinat, mis moodustaks sobiva diameetriga filamendi. Materjali arendamiseks edasised uuringud on vajalikud, et võimaldada defektideta printimist.

## **SUMMARY**

3D printing or additive manufacturing is a process of making three dimensional solid objects from a digital file. The most popular technologies are fused deposition modeling (FDM), stereolithography and laser sintering.

Due to the fastly gained popularity, there is a wide selection of materials to choose from. In the future environmentally friendly is the term to define manufacturing. Why not to bind economizing and 3D printing areas together and put more effort in researching 3D printing materials from plastic waste.

Tallinn University of Technology mechatronics institution is manufacturing with laser sintering large quantities of production waste called PA 12 powder, which otherwise would be thrown away. The un-sintered PA 12 powder is subjected to temperature close to melting point for a long period of time which damages the powder and reduces its usability. This is why it is used in small amounts and mixed together with the virgin material in the next laser sintering process.

The aim of this Bachelor's thesis is to reuse PA 12 powder as 3D printing filament. The idea is to produce filament that could be use in another 3D printing production based on FDM technology. I used extrusion based system to make PA 12 filament and tested it on FDM technology 3D printer.

As a result of our project, I found that PA 12 powder can be recycled as 3D printing filament, but it is time-consuming. The diameter of filament was irregular, therefore printing process was intermittent. Further researches are necessary to provide printing without defects.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Hod Lipson, Melba Kurman, „Fabricated: The New World of 3D Printing“, Wiley; 1 edition 2013, 280 lk.
- [2] Rein Mesila, MAT loengute abimaterjalid, „Tootmistehnoloogia“, 2006
- [3] I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker, „Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing“, Springer New York Heidelberg Dordrecht London 2010, 459 lk.
- [4] Kenneth J.A Brookes, „3D printing materials in Maastricht“, 2015, 11 lk.
- [5] [WWW] <http://arileht.delfi.ee/news/uudised/eesti-esimese-3d-printeri-maaletoojad?id=71323275> (16.05.2015)
- [6] [WWW] <http://tartu.postimees.ee/3061373/kodumaine-3d-printer-peibutab-garantiiga> (16.05.2015)
- [7] [WWW] [www.eesti2.ee](http://www.eesti2.ee) (17.05.2015)
- [8] Chee Kai Chua, Kah Fai Leong, „3D Printing and Additive Manufacturing; principles and applications“, World Scientific 2015, 518 lk.
- [9] Krassimir Dotchen, Wan Yusoff, „Recycling of polyamide 12 based powders in the laser sintering process“, 2009, 12 lk.
- [10] [WWW] <http://3dprintingfromscratch.com/common/3d-printer-filament-types-overview/> (3.06.2015).
- [11] [WWW] [www.absmaterial.com](http://www.absmaterial.com) (29.03.2015)
- [12] [WWW] <https://www.botfeeder.ca/abs-vs-pla/> (3.06.2015)
- [13] [WWW] <http://www.3dkoda.ee/3d-printimise-materjalid> (02.03.2015)
- [14] [WWW] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x/full> (02.03.2015)
- [15] N/A, „ANTEC 2007 Plastics: Annual Technical Conference Proceedings“, Society of Plastics Engineers, 2007, 3181 lk.
- [16] [WWW] [http://www.design-meetspolymers.com/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/VESTOSINT/en/brochures/VESTOSINT\\_polyamide\\_12\\_coating\\_powders.pdf](http://www.design-meetspolymers.com/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/VESTOSINT/en/brochures/VESTOSINT_polyamide_12_coating_powders.pdf) (05.03.2015)
- [17] [WWW] <http://www.cableorganizer.com/articles/materials-nylon12.html> (05.03.2015)



- [18] Emily J. Hunt, Chenlong Zhang, Nick Anzalone, Joshua M, Pearce, „Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3D printers“, 2014, 7lk.
- [19] M.A. Kreiger, M.L. Mulder, A.G. Glover, J.M. Pearce, „Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3D printing filament“, 2014, 7 lk.
- [20] [WWW] <http://www.perpetualplasticproject.com/blog/2014/5/30/plastics-recycled-for-3dprinting> (15.03.2015)
- [21] Bill Drury, „ The Control Tehniques Drives and Controls Handbook“, The Institution of Electronical Engineers 2001, 365 lk.
- [22] Kristo Karjust, Jaan Kers, Inrek Kiolein jt, „Uuenduslik tootmine“, Tallinna Tehnikaülikoolis Kirjastus 2011, 446 lk.
- [23] [WWW] <http://www.ineer.org/events/icee1997/proceedings/paper233.htm> (28.05.2015)
- [24] [WWW] <http://www.absplastic.eu/3d-printers-that-use-recycled-plastic/> (15.03.2015)
- [25] [WWW] <http://www.gizmag.com/filabot-plastic-recycling/25848/> (02.04.2015)
- [26] [WWW] [www.k8200.eu](http://www.k8200.eu) (14.04.2015)