



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

Kestävä kehitys ja materiaalien uusiokäyttö 3D -tu- lostuksessa

Anssi Karkkulainen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2017
Kone- ja tuotantotekniikka
Älykkäät koneet



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka
Älykkäät koneet

KARKKULAINEN ANSSI:

Kestävä kehitys ja materiaalien uusiokäyttö 3D -tulostuksessa

Opinnäytetyö 36 sivua
Toukokuu 2017

Tämä opinnäytetyö on tehty osana 3D Boosti -hanketta, jossa tavoitteena on organisoida alueallisesti alan tutkimus-, kehitys-, koulutus- ja innovaatio toiminta tehokkaaseen yhteistyöhön siten, että 3D -tekniikan laajempi käyttöönotto nopeutuu teollisuudessa. Lisäksi tavoitteena on luoda korkeinta osaamista ja välittää syntyvää osaamista yrityksiin, sekä edistää osaamisen kaupallista hyödyntämistä niin, että Pirkanmaalle muodostuu huomattava osaamiskeskittymä.

Opinnäytetyössä selvitettiin, kuinka kestävän kehityksen eri osa-alueita voidaan hyödyntää 3D -tulostuksessa. Siinä perehdyttiin kestävään kehitykseen aikaisempien artikkeleiden ja tutkimusten pohjalta. Lisäksi tarkasteltiin myös eri tulostusmateriaalien uusiokäytön mahdollisuuksia ja niiden olemassa olevia sovelluksia. Näistä kerättiin tietoa, joiden pohjalta suoritettiin koe, jossa kierrätettiin sekä tulostettuja että tulostamattomia muoveja uudeksi tulostusmateriaaliksi.

Kokeeseen valikoitui käytettävissä olleen budjetin johdosta testi, jossa testattiin lankaa pursottavien laitteiden materiaalien kierrättämistä uudeksi käyttökelpoiseksi materiaaliksi. Testattaviksi materiaaleiksi valittiin PLA ja PET. PLA muovia käytetään todella paljon työpöytätulostimissa, ja tästä johtuen myös hävikin määrä on suuri verrattuna muihin muoveihin. PET valittiin testattavaksi sen hyvä kierrätettävyyden takia. Testissä lajiteltiin, murskattiin ja kierrätettiin edellä mainitun laisia muoveja. Tulokseksi saatiin, että uuden PLA muovin seassa voidaan kierrättää 1 % tulostettua, jotta se ei vaikuta filamentin tulostusominaisuuksiin. Lisäksi havaittiin, että maksimissaan 20 % tulostettua PLA muovia kierrättäminen uuden PLA muovin seassa tuottaa tulostettavissa olevaa filamenttia.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Mechanical and Production Engineering
Intelligent Machines

KARKKULAINEN ANSSI:
Sustainability and Material Recycling in 3D Printing

Bachelor's thesis 36 pages
May 2017

This thesis was part of a 3d Boosti project, which aims to regionally organize research, development, education and innovation action to an effective co-operation so that adoption of 3D -printing will be accelerated in the industry. In addition, the aim is to create the highest level of know-how and convey that to the businesses and to promote the exploitation of commercial benefits by having a considerable concentration of expertise in Pirkanmaa.

The thesis analyzed the potential impacts of 3D printing on the various aspects of sustainable development, as well as the possibilities and applications for printing material recycling. It gathered information about sustainable development from different articles and studies. In addition, the possibilities of reusing different printing materials and their existing applications were also examined.

The study of recycling filament was selected based on the available budget. The study deals 8 different mixtures of recycled and unused plastic granulates, which were extruded to filament form. The tested plastics were selected as PLA and PET. PLA was selected because of the heavy use in desktop printing and PET was selected for testing due its good recyclability. This study confirms that it is possible to recycle 1 % of printed PLA with the virgin PLA, so that it does not affect its printing properties. In addition, the study shows that recycling 20 % of printed PLA with the virgin PLA, can provide printable filament.

Key words: research, sustainability, project, 3d -printing, filament

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	MATERIAALIA LISÄÄVÄT MENETELMÄT.....	7
	2.1 Jauhepetimenetelmät.....	8
	2.2 Langanpursotusmenetelmät	10
	2.3 Laminointimenetelmät	11
	2.4 Valokovetusmenetelmät.....	12
3	KESTÄVÄ KEHITYS	14
	3.1 Ekologinen kestävyys	14
	3.2 Taloudellinen kestävyys	17
	3.3 Sosiaalinen kestävyys	18
4	MATERIAALIEN UUSIOKÄYTTÖ	19
	4.1 Jauhepetimenetelmät.....	19
	4.2 Valokovetusmenetelmät.....	23
	4.3 Langanpursotusmenetelmät	25
	4.3.1 Biomuovit.....	25
	4.3.2 Kierrätys.....	26
5	YHTEENVETO	33
	LÄHTEET.....	34

LYHENTEET JA TERMIT

SLM	Selective Laser Melting, tulostusmenetelmä
DMLS	Direct Metal Laser Sintering, tulostusmenetelmä
SLS	Selective Laser Sintering, tulostusmenetelmä
FDM	Fused Deposition Modeling, tulostusmenetelmä
FFF	Fused Filament Fabrication, tulostusmenetelmä
G - Koodi	Komentokieli jolla ohjataan mm. 3D -tulostimia
SLA	Stereolitografia, tulostusmenetelmä
DLP	Digital Light Processing, tulostusmenetelmä
LOM	Laminated Object Manufacturing, tulostusmenetelmä
PLA	Polylaktidi, biohajoava muovi
PHA	Polyhydroksialkonaatti, biohajoava muovi
ABS	Akrylinitriilibutadieenistyreeni, kestävä muovi
PET	Polyetyleenitereftalaatti, hyvin kierrätettävä muovi
PETG	Glykolilla seostettu PET

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on lisätä tietoutta kestävästä kehityksestä ja siitä miten se voidaan huomioida 3D -tulostuksessa. Tutkimuksessa perehdytään olemassa oleviin tuloksiin kestävästä kehityksestä eri osa-alueiden vaikutuksesta 3D -tulostuksessa, sekä tulostusmateriaalien uusiokäyttömahdollisuuksista ja -sovelluksista, ja tehdään kokeita niistä osan todentamiseksi ja tutkimiseksi. Opinnäytetyössä ei oteta kantaa kuitenkaan kaikkeen aiheeseen liittyvään.

Tutkimus on toteutettu osana 3D Boosti -hanketta. Hankkeen tavoitteena on organisoida alueallisesti alan tutkimus-, kehitys-, koulutus- ja innovaatiotoiminta tehokkaaseen yhteistyöhön siten, että 3D -tekniikan laajempi käyttöönotto nopeutuu teollisuudessa. Lisäksi tavoitteena on luoda korkeinta osaamista ja välittää syntyvää osaamista yrityksiin, sekä edistää osaamisen kaupallista hyödyntämistä niin, että Pirkanmaalle muodostuu huomattava osaamiskeskittymä.

Tämän opinnäytetyön tuloksena saadaan tietoutta 3D -tulostuksessa käytettävien materiaalien uusiokäyttömahdollisuuksista ja kestävästä kehityksestä osa-alueiden huomioinnista kappaleiden suunnittelussa ja 3D -tulostuksessa. Tuloksena saadaan myös tietoa 3D -tulostuksen vaikutuksesta energia ja raaka-aineiden kulutukseen, sekä CO₂ -päästöihin.

2 MATERIAALIA LISÄÄVÄT MENETELMÄT

Wohler kuvasi vuoden 2007 julkaisussa materiaalia lisäävän valmistuksen osuvasti.

”Toisin kuin työstöprosessit, jotka perustuvat materiaalin poistamiseen, materiaalia lisäävät menetelmät yhdistävät nestettä, jauhetta, tai levymateriaaleja muodostaakseen kappaleita. Kappaleet, jotka voivat olla haastavia, tai jopa mahdottomia valmistaa perinteisin menetelmin, voidaan valmistaa materiaalia lisäävällä menetelmällä. Perustuen 3D tietokonehallin ohuisiin poikkileikkauksiin, ne tuottavat muovi, metalli, keraami tai komposiitti kappaleita, kerros kerrokselta.” (Wohler, 2007)

Niin kuin Wohler kuvaa materiaalia lisäävää valmistusta myös 3D -tulostamalla tarkoitetaan laajalti monenlaista eri tapaa valmistaa kappaleita, mutta kaikille tulostusmenetelmille yhteistä on 3D -malliin perustavan kappaleen kerroksittainen rakentaminen.

Erilaisten tulostusmenetelmien ymmärtämiseksi tulostimet voidaan jakaa kahteen eri luokkaan. Ensimmäinen luokka sisältää tulostimet, joiden toiminta perustuu kappaleen kerroksittaiseen kasaamiseen raaka-aineista. Ne joko, ruiskuttavat, puristavat, tai suihkuttavat raaka-aineen suuttimen läpi. Tulostusmateriaaleina käytetään nestemäisiä, tahna-
maisia, jauhemaisia tai lankamaisia raaka-aineita (Guo and Leu, 2013).

Toisen luokan tulostimet, joko sitovat, tai kovettavat tulostusmateriaalia. Tulostusmateriaaleina näissä käytetään, joko jauhemaisia (esimerkiksi metalli- tai polymeerijauheita), tai nestemäisiä (fotopolymeerit) aineita. Materiaalia kovetetaan lämmön tai UV -valon avulla kerros kerrokselta kiinteäksi kappaleeksi. Yleensä laserilla tai jollain kiinnityksineellä. (Lipson & Kurman 2013., custompartnet, 2017., Additive manufacturing, 2017.)

2.1 Jauhepetimenetelmät

Jauhepetimenetelmillä tarkoitetaan materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmiä jotka perustuvat jauhemaisen materiaalin sulattamiseen ja kovettamiseen, joko sintraus hehkuttamalla, tai laserilla. (Iboro, 2017., Savonia, 2017.) Tässä kappaleessa käsitellään SLM, DMLS ja SLS menetelmiä, jotka kaikki perustuvat laserin käyttöön (Iboro, 2017.).

SLM kehitettiin ja patentoitiin Fraunhofer Instituutissa Saksassa vuonna 1995 ja pohjautuu DMLS-menetelmään liittyvään tutkimukseen. Vuodesta 2011 lähtien SLM-valmistusmenetelmään perustuvia laitteita on valmistanut ja myynyt SLM Solutions GmbH. (deadmanwebedition, s.25) Nykyään samaan tekniikkaan perustuvien laitteiden valmistajia löytyy jo useampia.

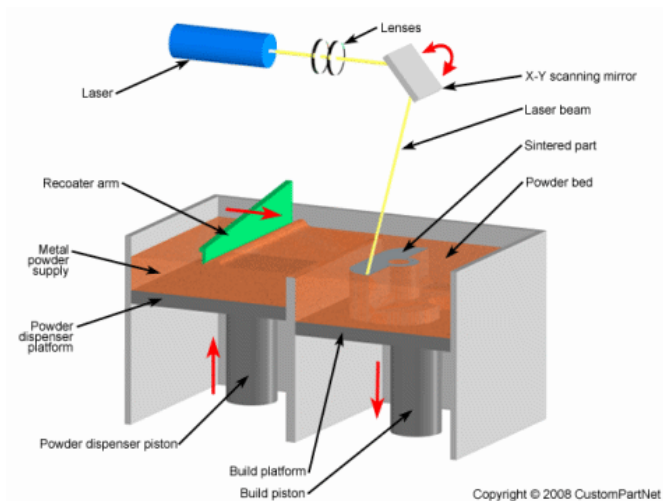
SLM tekniikassa sulatetaan metallijauhetta, joko laserilla, tai elektronisäteellä. Menetelmä käsitteenä sisältää monta alalajia, mutta kaikilla yleinen toimintaperiaate on sama, kerroksittainen metallijauheen sulattaminen. (Loughborough University 2017.)

Tulostusmateriaaleja löytyy laajalti monenlaisia, esimerkiksi teräs, ruostumaton teräs, alumiini ja titaani.

Kaikissa metallijauhetta tulostusmateriaalina käytävissä jauhepetimenetelmissä tulostus tapahtuu tulostuskammiossa, joka täytetään suojakaasulla. Eri materiaalit asettavat suojakaasulle eri vaatimuksia. Titaanin tulostamisessa suojakaasu on argon, kun taas teräksen tulostuksessa käytetään yleensä typpeä. (deadmanwebedition, s.21)

Tulostusprosessissa tulostusalustalle levitetään rullalla ohut kerros metallijauhetta, joka sulatetaan tai kovetetaan 3D -mallin poikkileikkauksen rajapintojen mukaisesti. Tämän jälkeen alusta lasketaan kerrospaksuuden verran, ja sinne levitetään uusi kerros jauhetta. Tämä prosessi toistetaan, kunnes kappale on valmis. (Sculpteo, 2017.) Kuvassa 1 esitetynä DMLS laitteen eri komponentit.

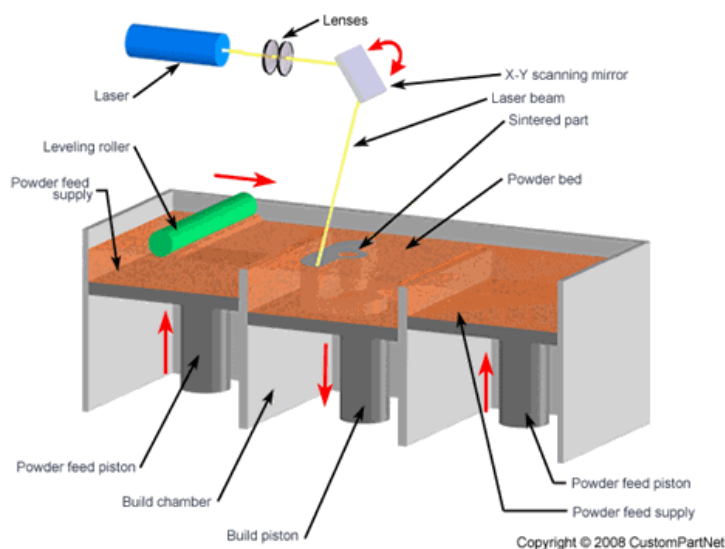
Kappaletta ympäröivä jauhe toimii samalla jokaiselle kerrokselle tukimateriaalina, joten monimutkaisempiinkin tulosteisiin ei tarvita erillistä tukimateriaalia. (Sculpteo, 2017)



KUVA 1. DMLS -laitteen komponentit (custompartnet)

SLS tekniikassa tulostusmateriaalina käytetään lämpömuovattavia jauheita, kuten polymeeri- ja keraamijauheita, jotka joko sintraus hehkutetaan, tai sulatetaan laserilla muodostaen halutun kappaleen kerros kerrokselta. (Additive manufacturing, 2017) Kuvassa 2 on esitettyä SLS -tulostimen toimintaan liittyvät komponentit.

Verrattuna esimerkiksi langanpursotusmenetelmällä toimiviin tulostimiin, jauhepetimiseen perustuvat tulostimet ovat hintavia ja melko suuria kooltaan. Täten ne soveltuvat yleisesti paremmin teolliseen tulostamiseen, kuin kotikäyttöön. (Additive manufacturing, 2017., Sculpteo, 2017.)



KUVA 2. SLS laitteen komponentit (custompartnet)

2.2 Langanpursotusmenetelmät

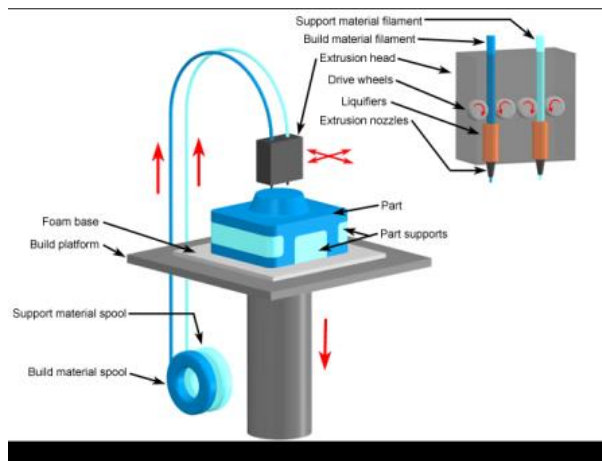
Langanpursotus menetelmässä tulostusmateriaaleina toimivat lämpömuovattavista materiaaleista, kuten muovista tai vahasta valmistetut 1,75 mm tai 3 mm paksuiset langat. Tekniikka perustuu suulakepuristukseen, jossa lankamaista materiaalia puristetaan kuumen suuttimen läpi tulostusalustalle kerros kerrokselta, kunnes kappale on 3D – mallin mukainen. (Additive manufacturing 2017.)

Tekniikan kehitti jo 1980 -luvulla Scott Crump. Nykyään se on yleisin käytetty tulostusmenetelmä, ensimmäiseksi siksi, että menetelmää koskevat alkuperäiset patentit ovat rauenneet ja toisaalta Dr Adrian Bowyerin, Bathin yliopistossa tekemän työn ansiosta. (Hoskins 2013, 44.) Kuvassa 3 esitettynä menetelmään perustuvan laitteen komponentit ja toimintaa.

Menetelmässä tulostimen toiminnot määräytyvät 3D -mallista käyttöohjelman laskeman G -koodi tiedoston mukaan. G -koodi pitää sisällään ainakin kappaleen muodostamiseen liittyvät liikeradat, raaka-aineen määrän, sekä suuttimien ja tulostusalustan lämpötilat. Ensimmäiseksi laite tulostaa kappaleen ulkopinnan rajat, jotka se täyttää määritellyllä tavalla. Kerroksen ollessa valmis laite joko laskee tulostusalustaa kerrospaksuuden verran, tai nostaa tulostuspäätä kerrospaksuuden verran. Tämä prosessi toistetaan, kunnes kappale on halutun 3D -mallin mukainen. (Sculpteo, 2017., Reprapwiki, 2017)

Menetelmän etuina ovat matalammat hinnat ja laaja materiaalivalikoima, verrattuna muihin menetelmiin. Yleisimmin käytettyjä materiaaleja ovat PLA ja ABS -muovit, mutta periaatteessa, mikä tahansa suulakepuristukseen soveltuva materiaali soveltuu tulostusmateriaaliksi. (Hoskins 2013, 37–38; Lipson & Kurman 2013, 68–70.)

Laitevalmistajia löytyy maailmalta jo ainakin toista sataa ja 3D -tulostusalaan liitettäviä yrityksiä useampia satoja. (Venturescanner, 2017.)



KUVA 3. FDM laitteen komponentit ja toiminta (3dparts)

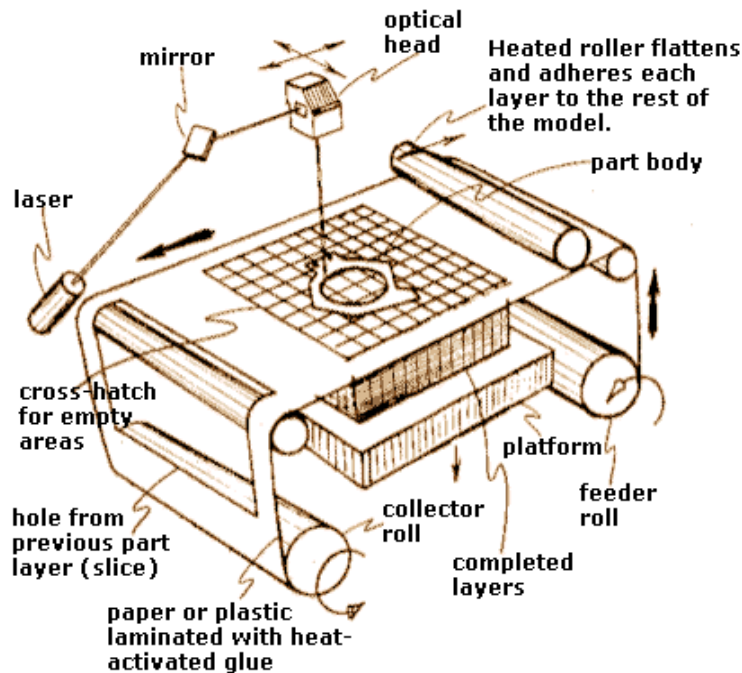
2.3 Laminointimenetelmät

Laminointimenetelmissä kappaleet valmistetaan laminoimalla yhteen laserilla leikattuja kerroksia. Yleisimmin materiaaleina käytetään termoplastisia muoveja, paperia, tai erilaisia komposiitteja, mutta myös jokseenkin metalleja ja keraameja. Materiaaleiksi soveltuu periaatteessa mikä tahansa levyn muodossa oleva aine, jotka voidaan kiinnittää toisiinsa, joko liima-aineilla tai hitsaamalla, ja leikata mekaanisesti tai laserilla. (Deadmanwebedition s.33., Custompartnet, 2017.) Kuvassa 4 esitettynä laminointitekniikkaan perustuvan laitteen komponentit.

Laminointi tekniikka voidaan jakaa kahteen eri menetelmään, perustuen prosessin työjärjestykseen. Ensimmäisessä Bond-Then-Form -prosessissa laminoitava levy tuodaan tulostusalustalle, ja liitetään edelliseen alla olevaan levyyn. Tämän jälkeen levystä leikataan, joko laserilla, tai mekaanisella leikkurilla kappaleen poikkileikkauksen mukaisesti haluttua rajapintaa pitkin. Usein myös reunoille yli jäävä materiaali leikataan esimerkiksi lohkoihin, jotta se on helpompaa poistaa tulostuksen jälkeen. (Gibson, Rosen & Stucker 2015, 222-223.)

Toista Form-Then-Bond -prosessia käytetään yleisemmin metalliteollisuudessa. Tässä menetelmässä levyt leikataan ennen toisiinsa liittämistä. Toisin kuin Bond-Then-Form -tekniikassa, Form-Then-Bond -prosessissa on mahdollista muokata myös kappaleen sisäpuolta, sekä aikaisempien leikkuupintojen mahdollinen vahingoittuminen poistuu. (Loughborough University 2017.)

Myös laminointi tekniikassa ylimääräinen materiaali toimii tukimateriaalina tulostustyön aikana, mutta tulostettavasta kappaleesta riippuen, menee sitä usein melko paljon hukkaan. (Custompartnet, 2017.)



KUVA 4. LOM menetelmä (efunda)

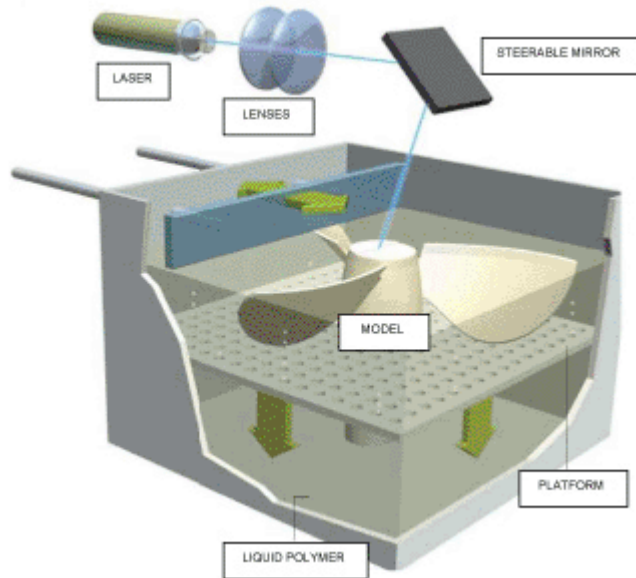
2.4 Valokovetusmenetelmät

Stereolitografia on yksi ensimmäisiä ja yleisimmin käytettyjä kaupallisia 3D -tulostamisen muotoja. Toiminta perustuu fotopolymeeriliuoksen kovettamiseen UV -laserilla.

Prosessissa tulostustaso upotetaan fotopolymeeriliuoksen pinnan alapuolelle, ja tasoitus levyllä tasoitetaan kerros haluttuun paksuuteen. Kerros kovetetaan UV -laserilla määritellyyn muotoon. Taso upotetaan liuokseen kappaleen kerrospaksuuden verran ja kovetetaan taas laserilla. Tämä prosessi toistetaan, kunnes kappale on 3D -mallin mukainen. (Additive Manufacturing, 2017)

Etuna esimerkiksi FDM -tulostimiin verrattuna on laserin tarkkuus, ja nopeus käytettäessä useampia lasereita samanaikaisesti. Yleisimmät kestopuovut ovat kuitenkin fotopolymeerejä kestävämpiä ja yhtenä haittatekijänä tässä tekniikassa on fotopolymeerien myrkyllisyys.

DLP tekniikan toimintaperiaate on sama mutta laserin sijaan kovettamiseen käytetään projektoria joka heijastaa kappaleen poikkileikkauksen mukaisen kuvion nesteeseen ja kovettaa sen. Kuva 5 esittää SLA -tekniikkaa käyttävän laitteen komponentit.



KUVA 5. Stereolitografia (intech-ind)

3 KESTÄVÄ KEHITYS

Kestävän kehityksen tavoite on luoda olosuhteet, joissa luonto ja ihmiset voivat olla olemassa tuottavasti, mutta tasapainossa. Samalla ylläpitää olosuhteita, jotta ne täyttävät sosiaaliset ja ekonomiset vaatimukset nyt ja tulevaisuudessa. (Almeida, H.A., Correia, M.S., 2016.)

Tuotteen suunnittelussa kestävän kehityksen huomioiminen on etsiä uusi ympäristölle haitalliset vaikutukset minivoivia mahdollisuuksia suunnitella tuotteita. Suunnittelijan tulee pyrkiä kehittämään ympäristöllisesti, yhteiskunnallisesti ja ekonomisesti kannattavia tuotteita. Kestävä kehitys termiä tutkittaessa saatetaan törmätä valtavaan määrään epäselviä ja ristiriitaisia määritteitä. (Diegel, O., Kristav, P., Motte, D., Kianian, B., 2016.)

Tätä ongelmaa yritysten toimintaa ja tuotesuunnittelua helpottamaan Waage (2007) esitti artikkelissaan neljä huomiotavaa tuotteensuunnitteluprosessiin liittyvää seikkaa. Ensimmäinen vaihe on ymmärtää kyseessä olevan tuotteen yleinen kestävän kehityksen konteksti. Toisessa vaiheessa tutkitaan tuotteen olennaisia kestävän kehityksen ongelmia. Kolmannessa vaiheessa tarkastellaan toisen vaiheen tutkimuksessa käsiteltyjä ongelma-kohtia, jotka määritellään, jalostetaan ja hiotaan parhaiden ratkaisuiden saavuttamiseksi. Viimeisessä vaiheessa tarkastellaan tuotteen toteutusta esimerkiksi asiakaspalautteiden avulla, ja tuotteen vaikutusta pidemmällä aikavälillä. (Waage, 2007)

3.1 Ekologinen kestävyys

Ekologinen kestävyys on yksi kestävän kehityksen näkökulmista. Sillä tarkoitetaan luonnon monimuotoisuuden ja ekosysteemien toiminnan varmistamista sekä ihmisten toiminnan sopeuttamista siihen niin, että luonnon kestokyky ei ylitä saastutuksen tai luonnonvarojen liikakäytön takia. (Lahti & Rönkä, *Biologia: Ympäristöekologia*, WSOY oppimateriaalit, 2006.) Ekologisen kestävyuden toteutuminen edellyttää ihmiskunnan toiminnan asettamista luonnon kantokyvyn rajoihin siten, ettei toiminta vaaranna luonnon monimuotoisuutta tai ekosysteemien toimivuutta. (Goodland, R., & Daly, H., 1996)

Ekologinen tuotanto pohjautuu, sekä uusiutuvien materiaalien käyttöön, että päästöjen ja uusiutumattomien luonnonvarojen käytön vähentymiseen. Ekologisen kestävyuden tavoite on siirtyä vähemmän energiaa kuluttaviin, sekä ympäristöystävällisempiin tuotanto- ja kulutustottumuksiin. (Goodland, R., & Daly, H., 1996)

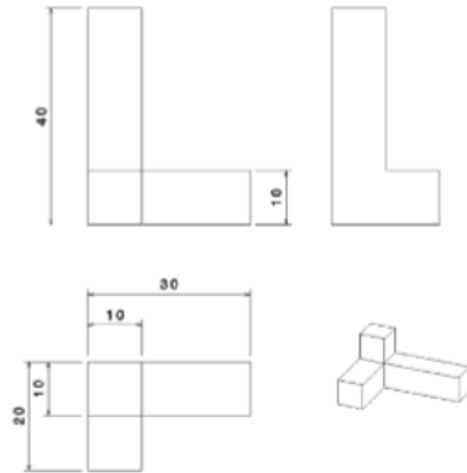
Toteuttamisen helpottamiseksi Datschefski (2004) ehdottaa viittä tuotteen suunnittelussa, valmistuksessa, sekä käytössä huomioitavaa seikkaa, jotka ovat kehitetty implementoimalla luonnosta kasvien ja eläinten ekosysteemejä. Tavoite on pyrkiä maksimoimaan käytettävissä olevien rajallisten raaka-aineiden käyttö samalla maksimoiden ihmisten onnellisuus ja potentiaali. (Datschefski, 2004.) Alla esitettynä Datschefskin ehdotamat viisi seikkaa:

- Tuotteen tulee olla valmistettu orgaanisista materiaaleista, sekä olla kierrätettävissä ja kompostoitavissa.
- Tuotteen valmistukseen, sekä tuotteen käyttöön tulee käyttää aurinkoenergiaa tai muita uusiutuvan energian muotoja
- Valmistus, käyttö ja hävittäminen tulee olla myrkytöntä, eikä ne saa sekoittaa tai häiritä ekosysteemejä.
- Tuotteen valmistukseen ja käyttöön tulee käyttää 90 % vähemmän materiaalia, energiaa ja vettä verrattuna 90-luvun vastaavaan.
- Tuotteen valmistaminen tai käyttö ei saa vaikuttaa ihmisten perusoikeuksiin.

3D tulostuksella on potentiaalia vähentää tuotteiden elinkierron energian kulutusta ja co2 päästöjä (Reeves, 2012), sekä raaka-aine tarpeita (Baumers, 2012; Campbell et al., 2011; Petrovic et al., 2011; Keiger and Pearce, 2013). Valmistukseen liittyvää energian kulutusta saadaan vähennettyä lyhyemmillä prosesseilla, sekä suuremmalla valmistuksella. (Gebler, Schoot Uiterkamp & Visser, 2014.)

Esimerkiksi 2012 vuoden tutkimuksessaan Reeves esitti tapauksen lentokoneen osasta, jonka valmistukseen liittyvä energian kulutus, sekä co2 päästöt voidaan laskea jopa 75 % alkuperäisestä (Reeves, 2012). Tämä johtuu osittain 3D tulostuksen tuomasta mahdollisuudesta suunnitella kevyt rakenteisempia kappaleita (Gebler, Schoot Uiterkamp & Visser, 2014.).

Mognol ym. tekemässä tutkimuksessa koskien AM -teknologian energian kulutusta, jossa tutkimuksen laatijat tutkivat, sekä muovien 3D -tulostamisen, että DMLS tekniikkaan perustuvan materiaalia lisäävän valmistuksen sähkön kulutusta (Baumers, 2012). Tutkimukseen liittyvissä tulostustöissä käytettiin kuvassa 6 näkyvää standardoitua kappaletta jokaisella tutkimuksessa käytetyllä laitteella. (Mognol ym., 2006)



KUVA 6. Standardoitu energiankulutusmittauksissa käytetty kappale. (Mognol ym. 2006)

Taulukko 1 osoittaa tutkimuksessa käytettyjen menetelmien keskimääräiset sähkön kulutukset käynnissä ollessaan, tulostyön aikana, sekä energian kulutuksen per tulostettu kappale (Mognol ym., 2006). Osatekijöinä DMLS laitteen suurempaan sähkön ja energian kulutukseen on menetelmään tarvittavat komponentit esimerkiksi laser.

Taulukko 1 – Keskimääräinen virran – ja energian kulutus (Mognol et al., 2006)

	3D -tulostus	FDM	DMLS
Joutokäynnin keskimääräinen virran kulutus (kW)	0.69	0.53	2.00
Tulostustyön keskimääräinen virran kulutus (kW)	0.88	0.57	4.00
Energian kulutus per tulostettu kappale (kWh)	2.1 - 3.8	0.5 - 1.25	32.0 - 56.0

3.2 Taloudellinen kestävyys

Taloudellisella kestävyydellä ei tarkoiteta henkisten ja materiaalisten voimavarojen tuhaamista (Wikipedia). Se on elinkeinoelämän tasapainoa luonnon kanssa, jolla tarkoitetaan ”talouden tasapainoista kasvua ilman velkaantumista ja pääomavarantojen kuluttamista”, siten ettei luonto ylikuormitu (YKliitto, 2017.). Talouden ollessa kestävällä pohjalla tuottaa ja turvata ihmisten hyvinvointi, myös tulevat sukupolvet huomioiden. Samalla se auttaa yhteiskuntaa selviytymään vastaan tulevista haasteista, kuten esimerkiksi väestön ikääntymisestä aiheutuvista menoista. (YKliitto, 2017)

Kestävän talouden perustana tulisi olla mahdollisimman tehokas raaka-aineiden kulutus ja tasaisesti jakautuva hyvinvointi. (YKliitto, 2017.) Kestämättömän talouden kehityksen yhtenä esimerkkinä pidetään ilmastonmuutosta. Taas esimerkki kestävästä talouden kehityksestä voi olla, joko autolle, tai laitteelle myönnetty pitkä takuu-aika. (Wikipedia) Taloudelliseen kestävyYTEEN sisältyy myös tietty ekologinen ja sosiaalinen vastuu. Talouden ollessa vakaa ja kestävä, toimii se ”perustana koko muulle kestäväälle kehitykselle.” (YKliitto, 2017.)

3D tulostuksella voidaan vähentää tuotteen elinkaaren kuluja, sen tuomalla mahdollisuudella valmistaa monimutkaisempia ja kevyt rakenteisempia kappaleita verrattuna perinteisiin valmistus menetelmiin (Petrovic ym., 2011; Reeves, 2012). Esimerkiksi ilmailussa jokaista poistettua materiaalikiloa kohden säästetään 3000 US\$ vuosittain (Reeves, 2012).

Kappaleiden elinkaari analyyseistä selviää, että 3D tuloksen hyödyntäminen valmistuksessa tuo merkittäviä säästöjä kokonaiskustannuksiin. On arvioitu, että vuoteen 2025 mennessä materiaaleista, niiden käsittelystä, sekä lyhyemmistä tuotantoketjuista syntyvät säästöt ovat 113 – 370 miljardia dollaria. (Gebler et al., 2014)

3.3 Sosiaalinen kestävyys

Sosiaalisen kestävyuden tavoitteena on pyrkiä takaamaan ihmisten hyvinvointi poistamalla ihmisten välinen eriarvoisuus ja taata jokaiselle mahdollisuus asianmukaiseen terveydenhuoltoon, kouluttautumiseen, riittävään toimeentuloon, sekä pyrkiä turvaamaan jokaisen perusoikeuksien toteutumisen. (YK -liitto, 2017)

Sosiaalisesti kestävä yhteiskunnan pyrkimys on, ettei ihmisille aiheudu jatkuvia terveydellisiä haittoja, kuten toistuva altistuminen sosiaalisille olosuhteille, jotka heikentävät mahdollisuuksia välttää sekä fyysiset, että henkiset loukkaantumiset ja sairastumiset. Esimerkiksi vaaralliset työolosuhteet tai riittämättömät palkat. (Diegel ym, 2016.) Toisena kriteerinä on vaikuttaminen, jolla tarkoitetaan järjestelmällisen vapaan sanan tukahduttamisen, sekä mielipiteiden laiminlyönnin poistamista. Ihmisille on myös annettava mahdollisuus oppia ja kehittyä, sekä henkilökohtaisella tasolla, että yhteisöllisesti. Yhtenä sosiaalisen kestävyuden tavoitteena on myös pyrkiä eroon syrjinnästä ja taata oikeudenmukaisuus esimerkiksi valinnoissa työtehtäviin, eikä altistaa jatkuvasti vääristyneille olosuhteille. Kestämättömäksi sosiaalisesti kehitykseksi voidaan mainita kulttuuristen ilmaisuiden tukahduttaminen tai yhteisten olosuhteiden kehittämisen estäminen. (Diegel, O., Kristav, P., Motte, D., Kianian, B., 2016.)

3D -tulostus saattaa tuoda terveydellisiä hyötyjä perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. Työntekijät voivat esimerkiksi välttää mahdollisia pitkä aikaisia altistumisia vaarallisille työoloille. Työturvallisuutta voidaan myös parantaa tuottamalla kevyempiä osia, joita on kevyempi nostella, eivätkä ne pudotessaan aiheuta niin suurta vahinkoa. Työntekijöiden ei myöskään tarvitse olla yhtä paljon tekemisissä raskaiden koneiden kanssa, koska osa näistä prosesseista voidaan automatisoida. Toisaalta, 3D tulostus tuo uuden riskin altistua myrkyllisille kaasuille ja aineille. Esimerkiksi ABS voi tuottaa karsinogeeni kaasuja kuumennettuna. Työpöytä tulostimiin perustuvassa tutkimuksessa löydettiin myrkkukaasuja tulostimen läheltä, jos alue ei ollut hyvin ilmastoitu. (BSR, 2015. s.12)

4 MATERIAALIEN UUSIOKÄYTTÖ

Yleisesti tulostuksesta tuntuu jäävän enemmän hävikkiä, kun on mahdollista kierrättää (Gibson, Rosen, Stucker, 2010.). Siksi kestäväen kehityksen ajattelulla, kannattaa suosia kierrätettäviä materiaaleja mahdollisimman paljon, jotta hävikki saataisiin mahdollisimman hyvin hyödynnettyä. Toiseksi tulostuksessa käytettävät metallijauheet voivat olla hyvinkin kalliita, joten jo tästä syystä tulisi pyrkiä mahdollisimman suureen käyttösuhteeseen (Grainger, Renishaw Blogpost, 2016).

4.1 Jauhepetimenetelmät

Jauhepeti menetelmissä tulostettavaa kappaletta ympäröivän jauheen partikkelit voivat sulatuksesta johtuvan korkean lämmön takia kiinnittyä toisiinsa. Lisäksi korkeissa lämpötiloissa myös jauheen partikkelien kemialliset ominaisuudet saattavat muuttua, erityisesti jos ne ovat kosketuksissa ilman kanssa. Yhdessä nämä muutokset saavat aikaan monien jauheiden, erityisesti polymeerien, ominaisuuksien muuttumisen kierrätettäessä tai uudelleen käytettäessä. (Gibson, Rosen, Stucker, 2010.)

Joillakin materiaaleilla muutokset ovat hyvin pieniä, esimerkkeinä useimmat metallit. Näitä materiaaleja pidetään erityisen kierrätettävinä. 3D tulostuksessa käytettävien metallijauheiden arvioitu kierrätettävyyden on 95 – 98 %. (Petrovic ym., 2011)

Kun taas jotkut materiaalit muuttuvat dramaattisesti. Täten näiden materiaalien kierrättäminen on tarkempaa, jotta tulostus ominaisuudet saadaan pysymään tasalaatuisina (Gibson, Rosen, Stucker., 2010). Esimerkiksi nylonin, joka on laajalti käytetty materiaali jauhepeti menetelmissä, molemmat, sekä molekyyllipaino, sekä partikkelien koko muuttuvat tulostusprosessin aikana. (Gibson, Rosen, Stucker, 2010.).

Yksinkertaisin kierrätysmetodi on sekoittaa tietty osa käytettyä jauhetta käyttämättömän kanssa. Esimerkiksi 1/3 käyttämätöntä jauhetta, 1/3 syöttöön yli jäänyttä jauhetta ja 1/3 tulostusalustalta talteen otettua jauhetta. Tulostusalustalta yli jäävä jauhe on altistunut korkeammille lämpötiloille, kuin syöttösäiliössä ollut, joten sen ominaisuudet muuttuvat huomattavasti enemmän. Syötöstä talteen otetun jauheen ominaisuudet muuttuvat vain vähän tulostusprosessissa. (Gibson, Rosen, Stucker, 2010.)

Tulostusalustalta talteen otettu jauhe on prosessoitava partikkelien erotus menetelmällä ennen kun, se sekoitetaan toisiin jauheisiin. Jauhe käsitellään yleensä, joko tärinään perustuvalla siivilöintilaitteella, tai ilmaluokittimella. (Gibson, Rosen, Stucker, 2010.)

Kierrätyksessä on tärkeää sekoittaa jauheet hyvin, jotta tulostettujen kappaleiden pysyisivät tasalaatuisina. Tulostusalustalta yli jääneellä jauheella on erilainen terminen historia riippuen tulostettujen kappaleiden muodoista ja asennoista. (Gibson, Rosen, Stucker, 2010.)

Toinen monimutkaisempi kierrätysmenetelmä perustuu jauheen sulaindeksiin (MFI, melt flow index). Sulaindeksillä tarkoitetaan määrettä, joka ilmaisee sulan termoplastisen materiaalin virtausta suutinlaitteen läpi määrättyissä olosuhteissa. Sulaindeksin määrittämiseen tarkoitettuja ASTM ja ISO standardeja seuraamalla taataan toistettavuus. Menetelmässä käyttäjä määrittää tavoitellun sulaindeksin käyttämättömän jauheen perusteella, jonka jälkeen kierrätetyt jauheet sekoitetaan keskenään. Molemmat, sekä kierrätettyjen jauheiden seos, että käyttämätön jauhe testataan. Kierrätetty ja käyttämätön jauhe sekoitetaan käytettäväksi seokseksi, jota testataan iteratiivisesti määrätyn sulaindeksin saavuttamiseksi. (Gibson, Rosen, Stucker, 2010.)

Mitä lähemmäksi määrättyä sulaindeksiä päästään, sitä tulostettu kappale on ominaisuuksiltaan puhtaasti käyttämättömästä materiaalista tulostettua kappaletta. Sulaindeksiin perustavalla metodilla saavutetaan jauheelle tehokkaimmin tasalaatuiset tulosominaisuudet. Yleisesti käyttäjät kokevat voivansa kierrättää huomattavasti vähemmän tulostusalustalta yli jäävää materiaalia, kun sitä syntyy. Lisäksi liiallinen toistuva jauheen kierrätys saattaa muuttaa sen käyttökelvottomaksi. Täten suuri osa ylijääneestä jauheesta on jätettä. (Gibson, Rosen, Stucker, 2010.)

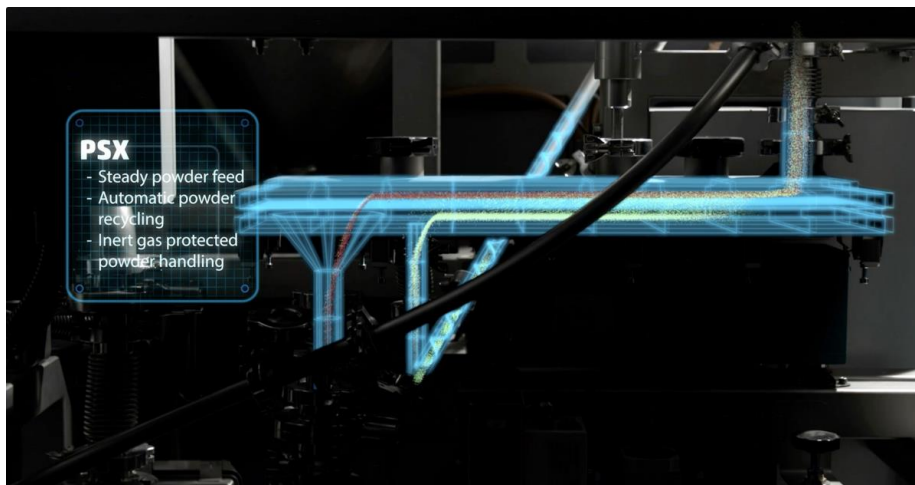
Osa metallinjauheen tulostuksessa käytetyistä laitteista sisältävät jo itsessään kierrätysjärjestelmän tai niihin on liitettävissä sellainen, joten hävikkiä materiaalin suhteen ei juurikaan tule. Esimerkki tällaisesta laitteesta on SLM -solutions valmistajan 500 HL mallimerkinnälliset tulostimet, jotka sisältävät tulostimen lisäksi, PSX mallisen jauheensyöttö järjestelmän, sekä PRS mallisen kappaleen irroitusjärjestelmän. (SLM-solutions, 2017) Kuvassa 7 vasemmalla tavallinen SLM500 laite ja oikealla SLM500HL mallia kooltaan vastaava kokonaisuus.



KUVA 7. SLM500 ja SLM500HL mallia kooltaan vastaava kokonaisuus (SLM solutions, 2017)

PSX jauheensyöttöjärjestelmä toimii täysin automaattisesti ja sen tarkoitus on suodattaa, kuljettaa ja kierrättää tulostusjärjestelmässä käytettävää metallijauhetta. Kaikki järjestelmän sisällä tapahtuvat toiminnot ovat suojattu inertillä kaasulla. (SLM -solutions, 2017)

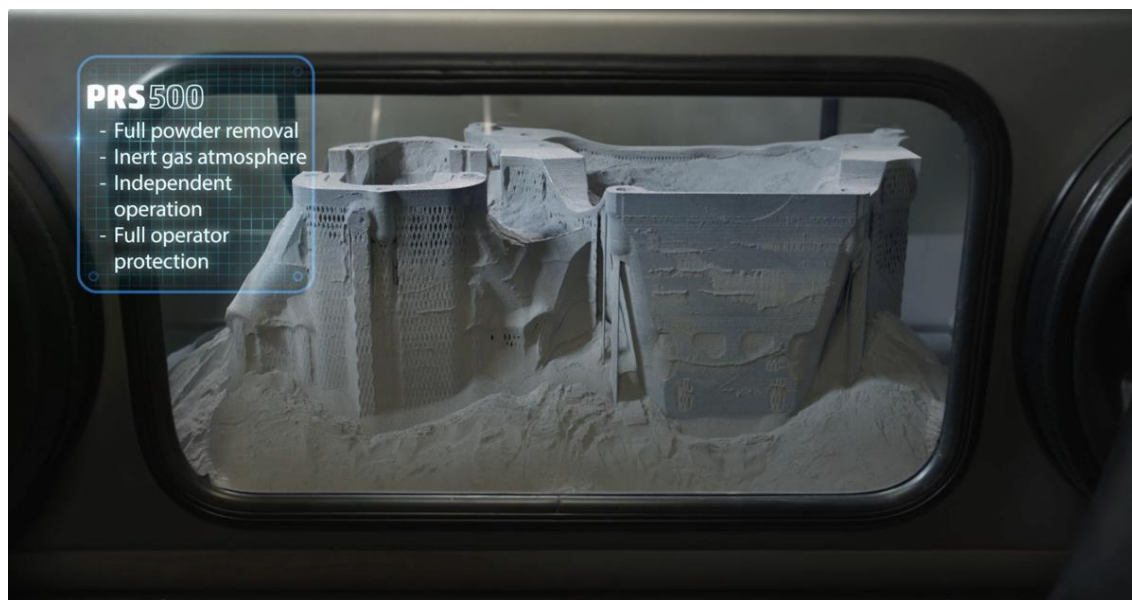
Jauheen siivilöintiprosessi alkaa, kun ylijäämä materiaali kuljetetaan tulostimesta laitteen tärinäsiivilöintiin, jossa liian karkeat partikkelit siivilöityvät, jonka jälkeen kuljetetaan hävikkisäiliöön. Uusiokäyttöön soveltuva jauhe siirretään 90 litran suuruiseen tulostusmateriaalisäiliöön, josta se voidaan käyttää heti uudelleen. Jauhe kiertää järjestelmässä kuvan 8 esittämällä tavalla, jossa sininen väri kuvaa suojaavaa kaasua ja järjestelmää, keltainen uusiokäytettävää ja punainen liian karkeaa jauhetta. (SLM solutions, 2017)



KUVA 8. PSX jauheensyöttöjärjestelmän toiminta. (SLM -solutions, 2017)

PRS kappaleen irroitusjärjestelmä on SLM500 laitekokonaisuuden peruskomponentti. Sitä käytetään ylimääräisen jauheen poistamiseen tulostussylinteristä, sekä tulostetuista kappaleista. Sen käytöllä saavutetaan ylijäämäjauheen ergonominen poistaminen, sekä

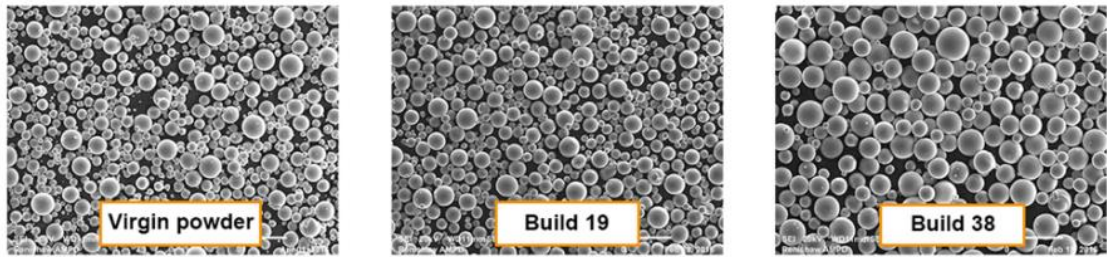
vältytään ärsyttämästä ihoa. Laitteessa on integroidut ilmatiiviit hanskat, joilla jauheen poistaminen on erittäin helppoa, eikä käyttäjä näin ollen altistu metallipölylle. Poistettava ylimääräinen jauhe putoaa sivuilla oleviin säiliöihin, josta se kuljetetaan PRS laitteelle, jossa se siivilöidään ja kierrätetään aikaisemmin mainitulla tavalla. Kuvasta 9 on havaittavissa tulostettu kappale ja sitä ympäröivä jauhe. (SLM -solutions, 2017)



KUVA 9. PRS500 (SLM -solutions, 2017)

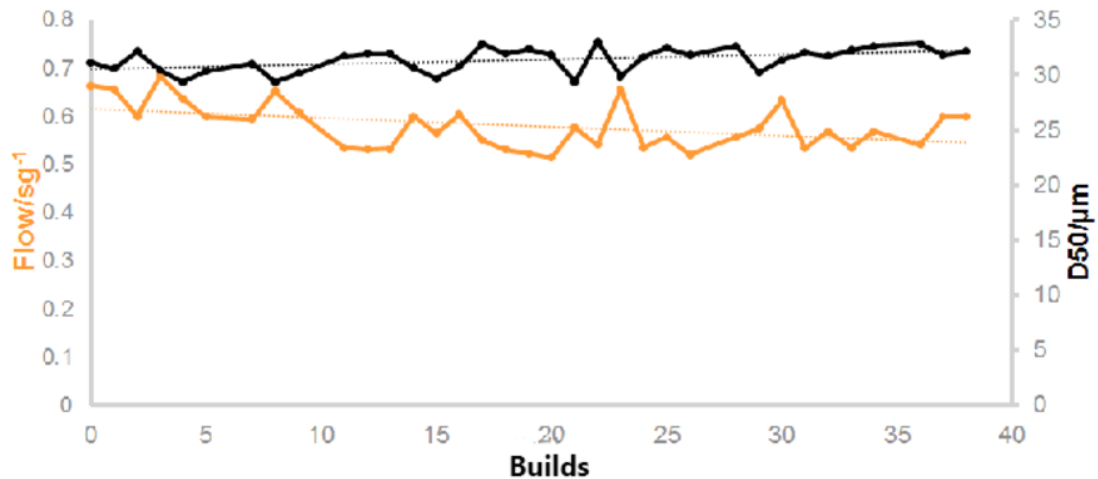
2016 Grainger kirjoitti tutkimuksesta, jossa tutkittiin Ti6Al4V titaani jauheiden kierräystä, sen suuren hinnan, sekä ilmastonvaikutuksille herkkyyden vuoksi. Tutkimuksessa tulostettiin kappaleita, ja poistettiin ylijäänyt jauhe, joka siivilöitiin, sekä uusiokäytettiin tulostuksissa kierrätysjärjestelmistä poiketen lisäämättä uutta jauhetta sekaan. Tulostuskertoja tutkimuksessa oli yhteensä 38. (Grainger, 2016)

Tutkimuksessa havaittiin SEM (Scanning electron microscope) analyysillä kuvassa 10 näkyvällä tavalla pienempien partikkelien vähenemisen jauhetta uusiokäytettäessä. Toisaalta kuvasta 10 näkyy myös morfologian pysyvän lähes samana koko tutkimuksen ajan. Pienempien partikkelien vähentymiseen on osaltaan saattanut vaikuttaa tulostuksesta johtuvan lämmön vaikutuksesta aiheutuva kiinnittyminen, joka toisaalta aiheuttaa mahdollisia liian suuria partikkeleita jauheeseen, jotka taas siivilöidään ennen kuin ne syötetään takaisin järjestelmään. (Grainger, 2016)



KUVA 10. Partikkelien koko (Grainger, Renishaw, 2017.)

Partikkelien koolla huomattiin olevan vaikutusta massavirtaan. Alla olevassa kuvaajassa 1 Grainger on esittänyt partikkelien koon (D50), sekä massavirran (Flow) yhteyden. Kuvaajasta havaitaan massavirran hitaan kasvun olevan yhteydessä partikkelien koon kasvuun. (Grainger, 2016.)



KUVAAJA 1. Partikkelin koon ja virtausnopeuden välinen korrelaatio (Grainger, Renishaw, 2016)

Tutkimuksessa käytetyn titaaniin ominaisuuksiin kierrätyksellä ei havaittu suuria haitallisia vaikutuksia. Muilla käytetyillä metalleilla vaikutukset voivat olla hyvinkin erilaisia verrattuna tutkimuksessa käytettyyn titaaniin. (Grainger, 2016.)

4.2 Valokovetusmenetelmät

SLA menetelmässä tulostuksen jäljiltä tulostusnestesäiliöön jäänyt ylijäämä voidaan käyttää uudelleen. Ylijäänyt neste säilytetään tulostusnestesäiliössä, jotta mahdollisia

kontaminaatioita uuden nesteen kanssa ei pääse syntymään. Esimerkiksi eräs SLA tulostinvalmistaja käyttää laitteissaan oranssia akrylikupua UV suojana (Formlabs, 2017.). Alkuperäisissä säiliöissä tai pulloissa olevat tulostusnesteet voidaan sekoittaa, se tulee tehdä kuitenkin niin, että nesteet eivät pääse kosketuksiin UV säteiden kanssa. Nesteteitä sekoitettaessa on huomioitava, että sekoitettavat nesteet ovat samaa tavaraa (Formlabs, 2017.).

Puhdistettuja kappaleita tai kovettunutta nestettä ei voida kierrättää, mutta ne voidaan hävittää säädösten mukaisesti jätteenä. Tulostusneste voidaan hävittää kahdella tavalla. Neste pakataan säiliöön, merkitään huolella ja hävitetään jätteidenkäsittelylaitoksen ohjeiden mukaisesti. Esimerkiksi pesussa alkoholilla laimennutta nestettä hävitettäessä tulee käyttää edellä mainittua tapaa (Formlabs, 2017.). Puhdas tulostusneste voidaan myös hävittää kovettuna, jolloin se, joko altistetaan auringon valolle tai kovetaan UV lampulla. Esimerkiksi neste kovetetaan laittamalla se kirkkaaseen muovipussiin, joka jätetään auringon valoon, kunnes se on kovettunut (Formlabs, Makerjuice). Kuvassa 11 muovipussiin on kaadettu tulostusnestettä, joka kovetetaan auringon valossa, jonka jälkeen se on hävitettävissä hartsin tavoin paikallisten säännösten mukaisesti.



KUVA 11. Tulostusnestettä kirkkaassa muovipussissa

Nesteen kovettumiseen saattaa mennä yhdestä kymmeneen päivää, riippuen auringon valon määrästä, sekä nesteestä (Formlabs, 2017.). Nesteen kovettuminen saadaan aikaan tunnissa, kun se altistetaan 180 °C (Makerjuice, 2017)

Tyhjät nestepakkaukset voidaan hävittää altistamalla ne ensin auringon valolle, jonka jälkeen ne voidaan hävittää paikallisten säädösten mukaisesti (Formlabs, 2017.).

4.3 Langanpursotusmenetelmät

Voidaan sanoa, että on olemassa kolme vaihtoehtoista tapaa huomioida materiaalien uusiokäyttö lankapursotusmenetelmään perustuvien 3D -tulostimien käytössä. Materiaalien uusiokäytöllä voidaan tarkoittaa kierrätystä uusien materiaalien valmistuksessa, muusta kierrätetystä materiaalista valmistettua materiaalia. (Pinshape, 2017) Tässä osuudessa käsitellään biomuoveja ja niiden kompostoitavuutta, sekä tulostetun muovin uusiokäyttöä materiaalien valmistuksessa neitseelliseen muoviin seostettuna.

4.3.1 Biomuovit

Muoveja ei valmisteta ainoastaan fossiilisista raaka-aineista, sillä niin sanottuja biomuoveja valmistetaan käyttäen raaka-aineena esimerkiksi sokeria, maissia, selluloosaa tai risiiniöljyä. Kaikki biomuovit eivät kuitenkaan ole biohajoavia, ja osa vastaa ominaisuuksiltaan hyvin paljon öljypohjaisia muoveja. Esimerkkeinä biohajoamattomista biomuoveista mainittakoon polyeteeni, joka valmistetaan käyttäen sokeriruokoja ja polyamidi, jonka valmistuksessa käytetään risiiniöljyä. (Uusiomuovi)

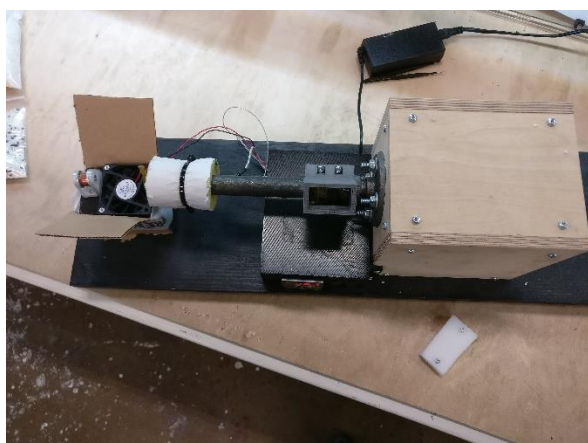
Biohajoavilla muoveilla tarkoitetaan muoveja jotka hajoavat määrättyissä olosuhteissa hiilidioksidiksi tai metaaniksi, vedeksi ja biomassaksi. (Uusiomuovi) Biohajoavan muovin määritelmään on olemassa standardit, joiden perusteella muovin maatumiskykyä testataan. Standardin tarkoituksena on määrittää standardit muovi tuotteille ja materiaaleille, jotka kompostoituvat hallituissa kompostointi laitoksissa, joissa tyypilliset kompostointi olosuhteet voidaan saavuttaa säännöllisesti (pitkä termofiilinen vaihe, aerobiset olosuhteet, riittävä vesipitoisuus, sopiva hiili/typpi suhde jne.). 90 % muovin sisältämästä hiilestä täytyy muuttua hiilidioksidiksi 180 päivän testijakson aikana. (ISO 17088 : 2008)

Langanpursotus menetelmäsissä tulostimissa käytetään paljon biohajoavia muoveja tulostusmateriaaleina, kuten PLA (polylaktidit) ja PHA (Polyhydroxyalkanoaatit). Nykyään vaihtoehtoisia biohajoavia muoveja löytyy jo useampia. Esimerkiksi Ligniini, selluloosa asetaatti, sekä tärkkelys pohjaisia polymeerejä. PLA on valmistettu uusiutuvista luonnonmateriaaleista, ja se on biohajoavaa, niin sen maatumisen vaatii kuitenkin teollisen kompostoinnin. PHA:ta mainostetaan 100 % biohajoavaksi, ja se maatukin paremmin, kuin PLA, mutta PHA:ta käytetään yleensä PLA materiaalien seassa jäykisteenä. (Bionomicfuel, 2017.)

4.3.2 Kierrätys

Markkinoilta löytyy jo laajalti vaihtoehtoja laitteista, joilla voi valmistaa FDM tulostimissa käytettävää lankamaista materiaalia. Nämä laitteet mahdollistavat periaatteessa pilalle menneiden, tai muuten jätteenä jääneiden muovien uudelleen käytön tulostusmateriaaleina. (Grunewald, 2017.) Tutkimuksessa käytettiin kuvassa 12 näkyvää modifioitua Filastruder nimistä tulostusmateriaalinvalmistukseen tarkoitettua laitteen versiota 1.6. Nykyisen version hinta on 300 dollaria (filastruder), joten laite on suhteellisen halpa, sekä yksinkertainen tapa aloittaa tulostusmateriaalien kierrätys.

Valmistaja ilmoittaa laitteen kykenevän pursottamaan kilon valmistusmateriaalia 5 – 8 tunnissa riippuen muovilaadusta ja pursotettavasta paksuudesta. Tämä vastaa noin 25 – 90 cm minuutissa. Laitteelle ilmoitetulla sähkön kulutuksella yhden kilon tulostusmateriaalia tuottamiseen menee joitakin senttejä sähköä. (filastruder)



KUVA 12. Modifioitu Filastruder v1.6.

Tässä uusiokäyttö menetelmässä tulostettuja kappaleita silputaan tai käyttämättömät langan pätkät katkotaan pieniksi noin millin partikkeleiksi ja syötetään uudelleen kiertoon neitsyen muovin mukana. Kuvassa 13 kahden eri valmistajan neitseellistä granulaattia, sekä kierrätetyn muovin kanssa seostettuna.



KUVA 13. Neitseellistä granulaattia ja seostettuna kierrätetyn kanssa

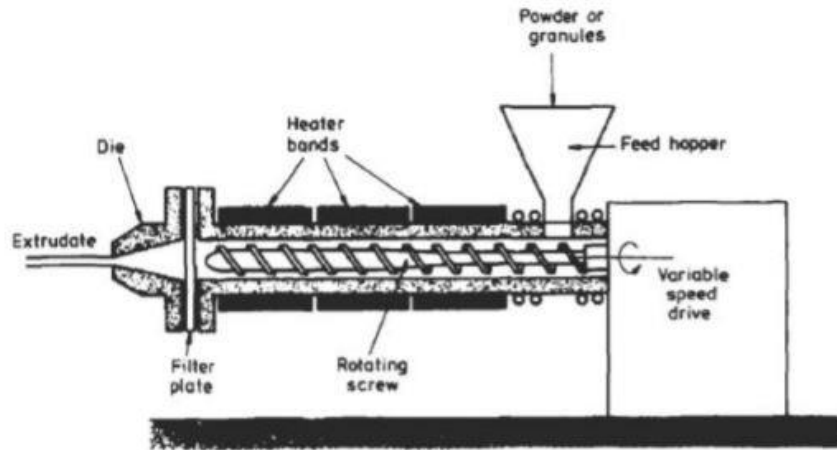
Langan valmistus perustuu suulakepuristusmenetelmään, jossa muovi granulaatteja sulatetaan ja puristetaan tietyn kokoisen suulakkeen läpi. (Valmistustekniikka, 2005, s. 51) Muovigranulaatit syötetään kuvassa 14 esitetyllä tavalla hopperin kautta sylinteriin, jonka sisällä oleva ruuvi kuljettaa muovia sekoittaen samalla.



KUVA 14. Granulaatteja hopperissa

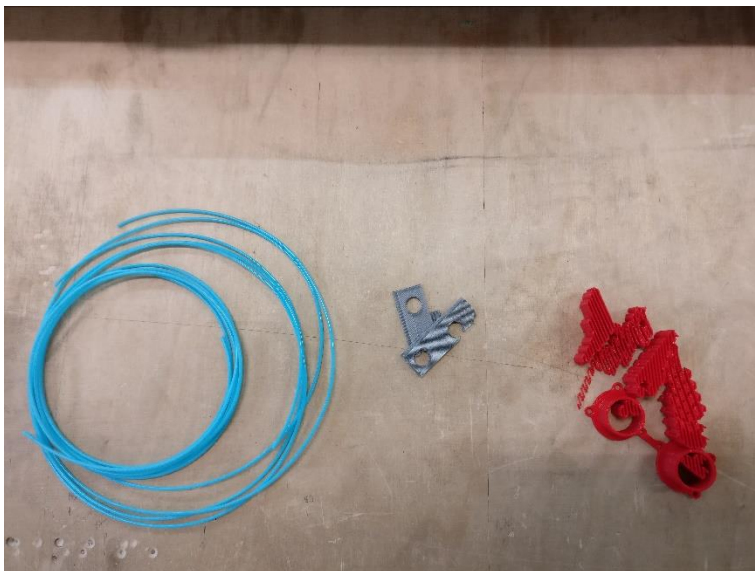
Useimmissa suulakepuristus järjestelmissä muovi kuumennetaan ja sulatetaan sylinterin ympärillä olevilla sähkövastuspannoilla, usein myös suulakkeessa on lämmitys. (Valmistustekniikka, 2005, s. 51) Sula muovi kulkee suulakkeelle suodattimen läpi, joka

poistaa kaikki suurimmat roskat muovin seasta. Sylinteriin saadaan tarvittava paine aikaiseksi ruuvin geometrialla, sekä sen pyörimisnopeudella. Kuvassa 15 on esitettyä esimerkki suulakepuristusjärjestelmästä.



KUVA 15 – Extruder (Crawford, R, 1988. Plastics Engineering. 3rd ed.)

Tulostusmateriaalien kierrätysprosessi alkaa kierrätettävien muovien lajittelulla. Tutkimukseen käytettiin kahden valmistajan PLA -muoveja, sekä tulostettuna, että tulostamattomana. Kuvassa 16 näkyvissä esimerkkejä käytetyistä muoveista.



KUVA 16. Kierrätettävää PLA:ta

Lajitellut kierrätettävät muovit murskataan sopivan kokoisiksi paloiksi murskaimella, tai, kuten tässä tapauksessa murskaimen puutteen vuoksi sivuleikkureilla. Murskattu kierrätettävä muovi seostettiin taulukossa 2 esitettynä oleviksi seoksiksi.

Taulukko 2. Seokset

Testi	Valmistaja	Kierrätetty muovi	Kierrätetty (g)	Uusi (g)	Kokonais määrä (g)	Kierrätettyä (%)
1	1	Tulostettu PLA	5	45	50	10
2	1	Tulostettu PLA	10	40	50	20
3	1	Tulostettu PLA	2	48	50	4
4	2	Tulostettu PLA	5	40	50	10
5	2	Tulostettu PLA	2	198	200	1
6	1	Tulostamaton PLA	5	40	50	10
7	1 ja 2	Tulostettu PLA	15	15	30	50
8	3	PETG ja PET	5 (Pullo)	15 (Tulostettu)	20	25

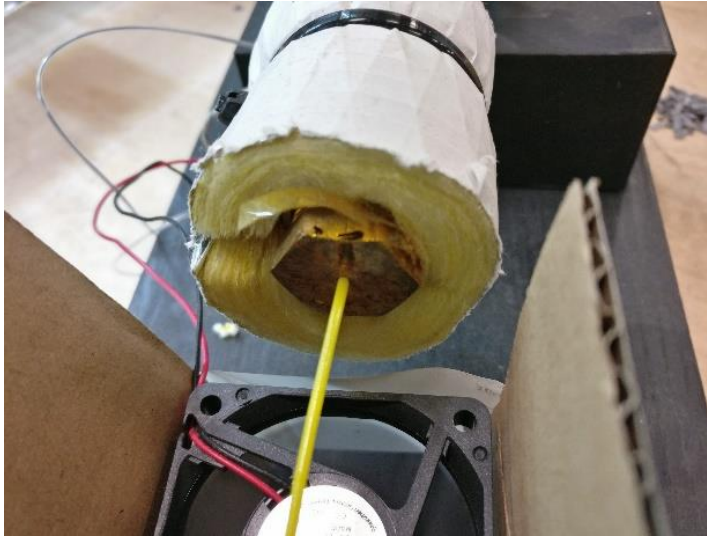
Seosten kokonaismassaksi valittiin 50 g, joka vastaa noin 15 metriä valmista lankaa. Seosten punnitsemiseen käytettiin König nimisen valmistajan HC-KS12 mallista vaakaa, jolla muovit saatiin punnittua 1 g tarkkuudella. Vaa'an tarkkuudesta johtuen 1 % kierrätettyä muovia sisältävän seoksen valmistukseen käytettiin suurempaa kokonaismassaa, punnitsemisen helpottamiseksi. Kuvassa 17 punnitaan 10 % seokseen käytetty 5 g kierrätettyä muovia.



KUVA 17. Paloiteltua kierrätettyä PLA:ta vaa'alla

Yksi tulostuslangan pyöreyyteen vaikuttava tekijä on sen jäädytys, johon monet suosivat vesialtaita tasaisemman ja helpommin hallittavan jäädytyksen saavuttamiseksi.

Halvempi ja helpommin toteutettava vaihtoehto on kuvassa 18 näkyvällä tavalla jäähdyttää suulakkeesta ulos työntyvä filamentti ilmavirran avulla.



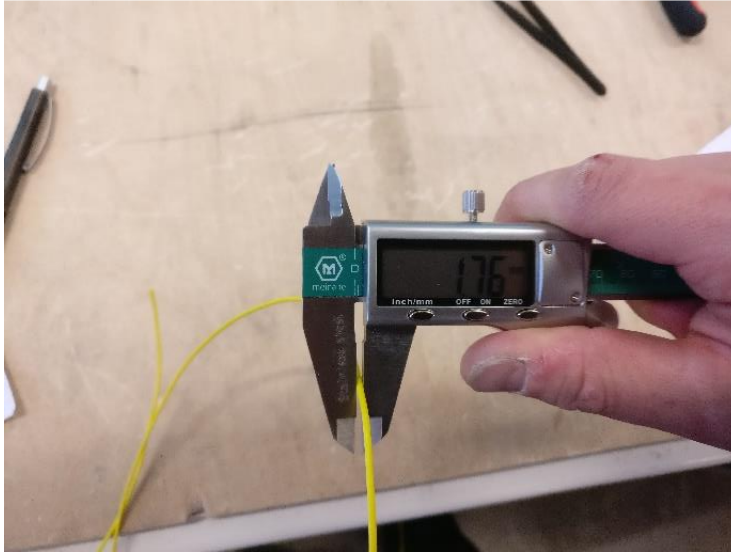
KUVA 18. Langan pursotus

Myös laitteen asetukset vaikuttavat pursotettavan tulostuslangan laatuun. Tutkimuksessa käytetylle Filastruderille löydettiin sopivat asetukset testaamalla suulakkeen eri lämpötiloja taulukon 3 esittämällä tavalla.

Taulukko 3. Lämpötilat

Lämpötila (*C)	Paksuus (mm)
185	1,71/1,68
183	1,70/1,69
181	1,76/1,74
182	1,73/1,74
181 *	1,76/1,76
180	1,75/1,76
200	1,80/1.79
* Testattu uudelleen pidemmällä ajalla	

Ensimmäiseksi testilämpötilaksi valittiin laitevalmistajan sivuilta löytyvien käyttäjäkokemusten perusteella 185°C. Tuloksena saatiin liian ohut, sekä hieman soikea tulostuslanka. Lämpötilaa muutettiin muutama aste kerrallaan, kunnes pursotetun tulostuslangan paksuus saatiin vakiinnutettua lähelle haluttua 1.75mm paksuutta. Sopivaksi lämpötilaksi tutkimuksessa vallinneissa olosuhteissa löytyi 180°C. Kuvassa 19 180°C asteessa pursotetun tulostuslangan paksuuden mittaaminen.



KUVA 19. Langan paksuuden mittaus

Tutkimuksessa havaittiin 1 % kierrätettyä muovia sisältävän seoksen vastaavan tulostusominaisuuksiltaan hyvin paljon uutena valmistettua materiaalia. Voidaan todeta ns. 1 % -säännön pitävän paikkansa.

Kolmen 10 % kierrätettyä materiaalia sisältävän seoksen kohdalla ei keskenään havaittu tutkimuksessa suuria eroja. Hyvin pieniä eroja havaittiin langan koostumuksessa eri värien välillä. Erot johtuivat suurimmaksi osaksi eri värien välillä niihin seostetuista filleleistä/täyteaineista. Selkeämpi ero havaittiin verrattaessa 10 % seoksia 1 % seokseen.

4 % kierrätettyä muovia ja 1 % kierrätettyä sisältävän seoksen välillä ei tutkimuksessa tehdyissä testeissä havaittu juurikaan eroavaisuuksia. Tarkemmin suurennettuna lankojen pinnanlaatu oli 1 % seoksessa sileämpää. Suurempia määriä kierrätettyä muovia sisältävät (20 % ja 50 %) seokset olivat selkeästi hauraampia kuin pienempiä määriä sisältävät seokset. 20 % kierrätettyä sisältävä seos oli vielä tulostettavissa, mutta 50/50 seostettu oli liian haurasta ja epätasaista tulostettavaksi.

PETGn ja PET -pullosta valmistetun seoksesta ei onnistuttu tuottamaan toimivaa tulostuslankaa. Ongelmaksi muodostui laitteen suulakkeen lämpötila, jota laite ei kyennyt säilyttämään tarpeeksi korkeana langan pursottamiseen. Kuvassa 20 esitettynä pilalle mennyttä lankaa.



KUVA 20. Epäonnistunutta PET filamenttia

Tutkimuksessa havaittiin, että mitä enemmän seoksessa on kierrätettyä jo tulostettua muovia, sitä karheampaa sen pinta on ja sitä hauraampaa rakenteeltaan. Pienempien määrien välillä ei tässä tutkimuksessa ollut tulostuksen kannalta eroja, mutta suurempiin kierrätysmääriin mentäessä alkaa langan hauraus vaikuttaa tulostukseen ja tulostusjälkeen. Kuitenkin suurin vaikuttaja tulostuksen onnistumiseen pienien erojen välillä on langan paksuus ja pyöreys. Epätasainen lanka aiheuttaa syöttöhäiriöitä, joten tulostin saattaa ylipursottaa tai alipurstottaa, jolloin kappaleesta tulee epätasainen.

Tutkimuksessa käytetty valmistajan 1 neitseellinen PLA granulaatti, ei ilmoituksesta huolimatta ollut PLA -muovia vaan matalamman tulostuslämmön omaavaa toista muovilaatua, joka sulii jo hopperiin tehdyn massasta epämääräistä venyvää liisterin kaltaista seosta. Tästä johtuen seokset 3, 2 ja 6 jouduttiin valmistamaan uudelleen toisen valmistajan granulaateista.

Tutkimuksessa havaittiin laitteen olevan melko äänekäs kotioloihin. Laitteen valmistaja ilmoittaa 52 dBA noin metrin etäisyydeltä mitattuna. (Filastruder, 2017.) Toisaalta prosessi on myös hidas suurempien määrien valmistamiseksi.

On myös otettava huomioon, että tutkimuksesta saadut tulokset ja tutkimuksen aikana tehdyt huomiot voivat olla yksittäisiä kyseissä tapauksessa ilmenneitä asioita, jotka eivät välttämättä vastaa vastaavissa tutkimuksissa saatuja tai saatavia tuloksia tai huomioita. Tutkimuksen aikana vaikuttaneet olosuhteet saattoivat vaikuttaa tuloksiin eri tavalla, kuin erilaisissa olosuhteissa tehdyissä tutkimuksissa.

5 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli lisätä tietoutta kestävän kehityksen ajattelusta, ja siitä miten se voidaan huomioida 3D -tulostuksessa. Tutkimuksessa perehdyttiin olemassa oleviin tuloksiin kestävän kehityksen eri osa-alueiden vaikutuksesta 3D -tulostuksessa, sekä tulostusmateriaalien uusiokäyttömahdollisuuksista, sekä sovelluksista, ja tehtiin kokeita niistä osan todentamiseksi ja tutkimiseksi. Opinnäytetyössä ei otettu kantaa kuitenkaan kaikkeen aiheeseen liittyvään ajan ja saatavilla olleen lähdemateriaalin johdosta.

Tutkimuksessa selvisi kestävän kehityksen olevan todella laaja käsite, eikä sitä saatu tässä tutkimuksessa yhdistettyä tavoitellulla tavalla 3D -tulostukseen. Tutkimuksessa kuitenkin saatiin kerättyä tuotteiden kestävään sunniteeluun avustavia road-mappeja ja kerättiin tietoutta olemassa olevista tulostusjauheiden kierrätysmahdollisuuksista ja tavoista, sekä muiden yleisimpien 3D -tulostusmenetelmien tulostusmateriaalien uusiokäytöstä. Tulevissa materiaalien uusiokäyttöä käsittelevissä tutkimuksissa, tulisi keskittyä enemmän jauhemaisten materiaalien uusiokäyttöön käytännössä ja tuoda esille mahdollisesti nestemäisiä materiaaleja enemmän, koska markkinoilta löytyy myös monenlaisia nestemäisiä materiaaleja. Tulevaisuudessa myös tarkempi vertailu menetelmien välillä voisi olla hyödyllistä. Lisäksi ”on selvää, että 3D -tulostuksen sosiaalista kestävyyttä tulisi tutkia tulevaisuudessa enemmän, tukemaan edellisiä aiheeseen perehtyneitä tutkimuksia” (Huang et al., 2013; Kohtala, 2015).

Tulevaisuudessa 3D -tulostuslaitokset tulevat varmasti lisääntymään, joten opinnäytetyössäkkin mainittu tulostusjauheiden kierrätysjärjestelmä tullaan liittämään osaksi useamman tulostimen kokonaisuutta. Tiedossa on maailmalla olevista edellä mainituista laitoksista ja sovelluksista, mutta luotettavaa lähdettä ei tähän löytynyt.

Joillakin valmistajilla on tarjolla myös kierrätyspalveluita omille tulostusmateriaaleilleen. Esimerkiksi *Stratasys recycling and returns program*, joka tarjoaa asiakkailleen mahdollisuuden palauttaa käytetyt pakkaukset, säiliöt ja kelat helposti ja ilmaiseksi. Yrityksen internet sivuilla täytetään tiedot ohjeiden mukaan, jonka jälkeen kierrätettävät tuotteet tullaan noutamaan. (stratasys, 2017)

LÄHTEET

3dparts, 2017, luettu 16.3.2017

<http://www.3dparts.co.uk/how-it-works/>

Additivemanufacturing, 2017, luettu 1.4.2017

<http://additivemanufacturing.com/basics/>

Almeida, H.A. & Correia, M.S., 2016., Sustainable Impact Evaluation of Support Structures in the Production of Extrusion-Based Parts

Baumers, M., 2012., Economic Aspects of Additive Manufacturing: Benefits, Costs and Energy Consumption

BSR, 2017, luettu 1.3.2017

BSR-Report-3D-Printing-Sustainability-Opportunities-Challenges-2015

Crawford, R, 1988. *Plastics Engineering*. 3rd ed. Oxford: Butterworth – Heinemann s. 246

Custompartnet, 2017, luettu 12.4.2017

<http://www.custompartnet.com/>

Datschefski, E, 1997-2004. *BioThinking for Product Design*.

Datschefski, E., 2001. *The Total Beauty of Sustainable Products*. England: Rotovision

O. Diegel, P. Kristav, D. Motte and B. Kianian., 2016., Additive Manufacturing and its Effect on Sustainable Design

Efunda, 2017, luettu 3.5.2017

http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/lom.cfm

Formlabs, 2017, luettu 11.4.2017

<https://formlabs.com/>

Gebler, Schoot Uiterkamp & Visser, 2014., A global sustainability perspective on 3D printing technologies

Gibson, I., Rosen & Stucker., Additive manufacturing technologies, Powder Recycling

Goodland, R., & Daly, H., 1996, Environmental sustainability: universal and non-negotiable. *Ecological Applications*, s. 1002-1017

Grainger, 2016, luettu 9.4.2017

<http://www.renishaw.com/en/blog-post-how-much-can-you-recycle-metal-additive-manufacturing-powder--38882>

Grunewald, luettu 1.4.2017

<https://3dprint.com/56759/diy-filastruder-instructables>

Guo, N., Leu, M.C., 2013, Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Front. Mech. Eng.* 8(3), s. 215 – 243

Hoskins, S., 2013. *3D Printing For Artists, Designers and Makers.*

Iboro, 2017, luettu 1.5.2017

<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>

Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M. & Sihvonen, P. 2005. 11. muuttumaton painos. *Valmistustekniikka.*

Intech, 2017, luettu 1.5.2017

<http://intech-ind.com/sla-machines-in-rapid-prototyping/>

Lahti, K. & Rönkä, A., 2006., *Biologia: Ympäristöekologia.* Helsinki: WSOY oppimateriaalit

Lipson, H. & Kurman, M. 2013. *Fabricated – The New World of 3D Printing.* Indianapolis: John Wiley & Sons,

Makerjuice, 2017, luettu 4.4.2017

<https://makerjuice.com/>

Mognol, P., Lopicart, D., Perry, N., 2006., *Rapid Prototyping: energy and environment in the spotlight,* s. 26-34

Petrovic, V., Gonzalez, J.V.H., Ferrando, O.J., Puchades, J.R.B., Grinan, L.P., 2011. *Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies.*

Plastics, 2017, luettu 8.5.2017

http://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit_ja_ymparisto/biomuovit

Pinshape, 2017, luettu 21.4.2017

<https://pinshape.com/blog/guide-green-3d-printing/>

Reprapwiki, 2017, luettu 21.4.2017
http://reprap.org/wiki/Fused_filament_fabrication

Savonia, 2017, luettu 12.5.2017
<http://alvo.savonia.fi/tietopankki/menetelmat/47-jauhepetimenetelmat>

Sculpteo, 2017, luettu 22.4.2017
<https://www.sculpteo.com/en/glossary/fdm-fused-deposition-modeling-definition/>

SLM solutions, 2017, luettu 22.4.2017
<https://slm-solutions.com/products/machines/selective-laser-melting-machine-slm-500>

Stratasys, 2017, luettu 21.4.2017
http://www.stratasys.com/customer-support/customer-resource-center/recycling-center/eu?country_code=FI

Uusiomuovit, 2017, luettu 2.4.2017
http://www.uusiomuovi.fi/fin/muovi_kiertaa/biomuovit/

Venturescanner, 2017, luettu 28.4.2017
<https://www.venturescanner.com/3d-printing>

YKliitto, 2017, luettu 25.3.2017
<http://www.ykliitto.fi/yk70v/>

Waage, S.A., 2007., Re – considering product design: a practical road – map for integration of sustainability., *Journal of Cleaner Production* 15(7)., s. 638 – 649

Wohler, 2007, luettu 8.3.2017
Wohlers Report, 2007, s.11