

SIVUVIRTOJEN HYÖDYNTÄMINEN MUOVITEOLLISUUDESSA

Räty Timo

Opinnäytetyö

Konetekniikka
Insinööri (AMK)

2023

Konetekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Timo Rätty	Vuosi	2023
Ohjaaja(t)	TkT Ari Pikkarainen		
Toimeksiantaja	Ravelast Oy Matias Laurila		
Työn nimi	Sivuvirtojen hyödyntäminen muoviteollisuudessa		
Sivumäärä	72 + 19		

Opinnäytetyössä tutkittiin mahdollisuutta kierrättää Ravelast Oy:n tuotannon sivuvirtana muodostunutta PA66-polymeerijätettä. Tutkimuksessa käytetty sivuvirtajäte syntyy muottivalujen ruiskutuskanavista. Ravelast Oy ei ole löytänyt tälle sivuvirtajätteelle käyttöä ja halusi teettää tutkimuksen, voidaanko tätä sivuvirtajätettä hyödyntää jatkojalostamalla sitä omassa tuotannossaan.

Sivuvirtana syntyneestä PA66-polymeerijätteestä valmistettiin 3D-tulostusfilamenttia eri seossuhteilla 3devon valmistamalla ja Lapin ammattikorkeakoulun hankkimilla laitteistoilla. Sivuvirtajäte murskattiin ja kuivattiin ennen pursotustestejä. Tutkimuksessa tuotettua PA66 3D-tulostusfilamenttia yritettiin myös 3D-tulostaa, vaihtelevalla menestyksellä.

Työ eteni pääsääntöisesti tavoitteiden mukaisesti, mutta tutkimuksen alussa tapahtui odottamattomia ongelmia, kuten pursotettavan PA66-polymeerin termistä hajoamista, laiterikkoja sekä materiaalisyötön loppumista pursotusruuvilta. Näistä ongelmista tehtiin kattava liiteosio, jossa esimerkiksi laitteiston korjaamista tarkastellaan. Lisäksi PA66-polymeeri osoittautui erittäin haastavaksi materiaaliksi, tuottaa siitä toimivaa 3D-tulostusfilamenttia.

Tutkimuksen tuloksena saatiin valmistettua kohtalaisesti toimiva PA66 3D-tulostusfilamentti eri seossuhteilla. 3D-tulostaminen jäi laiterajoitusten vuoksi vähäiseksi. Tutkimuksesta voidaan todeta, että PA66-sivuvirtapolymeerin kierrättäminen tekemällä siitä 3D-tulostusfilamenttia, on lisälaitteiden avulla mahdollista. Saadulle tulostusfilamentille jäi jatkokehitysmahdollisuuksia esimerkiksi komposiitti muodossa, jonka avulla voitaisiin parantaa sen tulostettavuutta. Pelkkä seostamaton PA66 on erittäin hankalaa 3D-tulostaa, ja sen onnistuminen vaatii tulostimelta paljon. Tutkimus sisältää liikesalattavaa tietoa testien lopputuloksista ja käytetystä PA66-laadusta.

Avainsanat

3D-tulostus, ekstruusio, nailon, polyamidi, polymeerit

Mechanical Engineering
Bachelor of engineering

Author	Timo Rätty	Year	2023
Supervisor(s)	Ari Pikkarainen, D.Sc. (tech.)		
Commissioned by	Ravelast Oy Matias Laurila		
Title	Utilization of Side Streams in the Plastics Industry		
Number of pages	72 + 19		

This thesis investigated the possibility of recycling PA66-polymer waste generated as a side stream of Ravelast Oy production, which is generated from the injection channels of mold castings. Ravelast Oy has not found a use for this side stream waste, so company wanted to commission research, to see if this side stream waste can be utilized by further processing it in its own production.

3D printing filament was made from PA66 side-flow polymer waste with different mixing ratios using equipment manufactured by 3devo and acquired by Lapland University of Applied Sciences. The side stream waste was crushed and dried before the extrusion tests. Attempts were also made to 3D print the PA66 filament obtained in the tests. 3D printing was successful with varying degrees of success.

As a rule, the work progressed in accordance with the objectives, but unexpected problems occurred at the beginning of the study, such as thermal decomposition of the extruded PA66 polymer, equipment breakdowns and the ending of material feed from the extrusion screw. A comprehensive appendix section was made of these problems, which examines, for example, hardware repair. In addition, PA66 polymer proved to be a particularly challenging material to produce a functional 3D printing filament.

As a result of the research, a moderately functional PA66 3D printing filament was created with different mixing ratios. Due to device limitations, 3D printing remained minimal. From the research can be concluded that the recycling of PA66 side-flow polymer into 3D printing filament is possible, with help of additional equipment. The 3D printing filament produced in the research has further development possibilities, for example in a composite form, which could improve its 3D printability. Pure unmixed PA66 is exceedingly difficult to 3D-print and requires a lot from the printer to succeed. The research contains confidential information about the results of the tests, and the grade of PA66 used in the study.

Keywords 3D printing, extrusion, nylon, polyamide, polymers

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
1.1	Tavoitteet	8
1.2	Rajaus.....	9
1.3	Tutkimuksen vaiheet.....	10
2	RAVELAST OY	11
3	POLYAMIDI 66 (PA66)	12
3.1	Tekniset ominaisuudet	12
3.2	MFI.....	13
4	MUOVITUOTTEIDEN- JA JÄTTEIDEN KIERRÄTYS	16
4.1	Kierrätyksen merkitys.....	16
4.2	Muovien kierrätys EU-suomessa	17
5	TUTKIMUSYMPÄRISTÖ	19
6	TUTKIMUKSESSA KÄYTETTÄVÄ LAITTEISTO	20
6.1	3devo SHR3D IT	20
6.2	Airid Polymer Dryer.....	21
6.3	Composer 450 Filament Maker.....	22
6.4	Devovision	23
6.5	Materiaalinsekoittaja	24
7	PA66-FILAMENTIN VALMISTUSVAIHEET	25
7.1	3D-tulostusfilamentti	25
7.2	PA66-sivuvirtapolymeerin murskaus.....	25
7.3	PA66-polymeerin kuivaus	27
7.4	Pursotus.....	30
8	PURSOTUSTESTIT	33
8.1	Testien vaiheet	33
8.2	Testi 1	34
8.2.1	Testin 1 tulos.....	35
8.2.2	Testin 1 analysointi.....	36
8.3	Testi 2.....	37

8.3.1	Testin 2 tulos.....	37
8.3.2	Testin 2 analysointi.....	38
8.4	Testi 3.....	39
8.4.1	Testin 3 tulos.....	41
8.4.2	Testin 3 analysointi.....	41
8.5	Testi 4.....	42
8.5.1	Testin 4 tulos.....	43
8.5.2	Testin 4 analysointi.....	43
8.6	Testi 5.....	44
8.6.1	Testin 5 tulos.....	45
8.6.2	Testin 5 analysointi.....	45
9	3D-TULOSTUSTESTIT	47
9.1	PA-filamentit 3D-tulostuksessa.....	47
9.2	3D-tulostustestit Prusa i3 MK3s-tulostimella.....	48
9.3	Testi 1.....	49
9.3.1	Testin 1 tulos.....	51
9.3.2	Testin 1 analysointi.....	52
9.4	3D-tulostustestit Raise 3D E2-tulostimella	55
9.5	Testi 2.....	55
9.5.1	Testin 2 tulos.....	56
9.5.2	Testin 2 analysointi.....	56
10	PARANNUSEHDOTUKSET	58
10.1	Composer 450-laitteiston materiaaliseuranta	58
10.2	3devo SHR3D IT-murskaimen materiaaliseuranta	58
10.3	Prusa i3 MK3s-tulostimen kotelointi.....	59
10.4	Lisälaite Composer 450-laitteiston tuulettimille.....	60
10.5	Polymeerin kosteuden mittaaminen.....	61
11	POHDINTA	62
11.1	PA66-filamentin valmistamisen johtopäätökset	62
11.2	3D-tulostamisen johtopäätökset	64
11.3	Jatkokehitysaiheet.....	64
11.4	Tutkimuksen luotettavuus sekä hyödynnettävyys.....	65

LÄHTEET	66
LIITTEET	72

ALKUSANAT

Aivan ensimmäiseksi haluan kiittää Ari Pikkaraista, hänen ohjauksestaan ja avustaan saattaa opinnäytetyö valmiiksi. Ravelast Oy:tä ja heidän edustajaansa Matias Laurilaa kiitän mahdollisuudesta tehdä opinnäytetyö mielenkiintoisesta aiheesta. 3devon materiaaliasiantuntijat auttoivat tutkimuksen etenemisessä erittäin paljon, ja ilman heidän ohjeistustaan työ olisi ollut mahdoton toteuttaa. Kiitän heitä avusta.

Oulussa 4.4.2023

Timo Rätty

1 JOHDANTO

1.1 Tavoitteet

Muovien kierrätys on noussut maailmalla tärkeäksi teemaksi muovijätteen lisääntyessä hälyttävissä määrin joka vuosi. Ritchie & Roser (2022) ovat todenneet Meijer, van Emmerik, van der Ent, Schmidt, & Lebretonin (2021) tutkimukseen viitaten, että merien suurimmat muovisaastuttajat löytyvät lähinnä Aasian maista jopa 81 %:n osuudella merien muovijätteistä. Tästä huolimatta EU-maissaakin on pyrittävä edistämään kierrätystä, jotta voitaisiin vähentää yhteisen elinympäristön muovijätetuormaa. Muovit itsessään ovat erinomainen kierrätyskohde. Kierrättämisen ongelmana on lähinnä se, että kierrätettäväksi tarkoitetun muovin laatu voi vaihdella suuresti, mikä voi tehdä sen kierrättämisestä kannattamatonta (Euroopan parlamentti 2021). Luonnon kannalta kierrättäminen on aina hyödyksi, ja tästä näkökulmasta sitä olisi edistettävä kaikilla mahdollisilla keinoilla, vaikka se ei aina olisikaan taloudellisesti kannattavaa.

3D-tulostamisesta syntyy sivuvirtamuovijätettä joko epäonnistuneista 3D-tulosteista tai tulostamisen aikana vaadittavista tukirakenteista. Nämä ovat yleensä aina käyttökeltotonta sivuvirtajätettä. Lähinnä 3D-tulostamisesta syntyvän sivuvirtajätteen kierrättämiseen on kehitetty laitteistoja, joilla tätä sivuvirtajätettä voitaisiin hyödyntää. Tässä tutkimuksessa käytetään 3devon valmistamia muovinkierrätyslaitteistoja (3devo 2022i), jotka on hankittu Lapin ammattikorkeakoulun 3D-tulostuslaboratorioon EU:n tuella. Laitteilla voidaan kierrättää lähes kaikkia muovilaatuja, eikä tämä rajoitu pelkästään 3D-tulosteiden kierrättämiseen. 3devon laitteistoilla on kierrätetty menestyksekkäästi esimerkiksi muovisia juomapulloja (100 % Recycled PET bottles 2020). Rajoituksena kierrätykseen on lähinnä vain se, voidaanko laitteistolla tuotettua filamenttia 3D-tulostaa ja näin uusiokäyttää.

Kumi, muovi ja polyuretaanituotteita valmistava pohjoispohjanmaalainen yritys Ravelast Oy on kiinnostunut kierrättämään tuotannon sivuvirtana syntynyttä PA66-polymeeriä. Yrityksen erityisalaa ovat telapinnoitukset sekä muottituotteet. Tutkimuksessa käytettävä PA66-sivuvirtapolymeeri syntyy muottivaluaihoiden

ruiskutuskanavista, joiden kautta ruiskuvalumuotti täytetään. Lisäksi polymeerijätettä syntyy ylitäytöstä, joka varmistaa ruiskuvalumuotin täydellisen täytön. Tässä opinnäytetyössä pyritään kierrättämään tätä ruiskutuskanavista syntyvää PA66-polymeerijätettä Lapin ammattikorkeakoulun 3D-tulostuslaboratorion filamentinvalmistuslaitteistolla. Tutkimuksessa pyritään vastaamaan kysymykseen, voidaanko sivuvirtana syntyvästä polymeerijätteestä jatkojalostaa toimivaa 3D-tulostusfilamenttia. Lisäksi haetaan vastausta sille, onnistuuko tutkimuksessa valmistetun filamentin 3D-tulostaminen.

Sivuvirtajätteenä syntynyt PA66-polymeeri murskataan riittävän pieneksi murskeeksi Composer 450-filamentinvalmistuslaitteiston vaatimuksien mukaisesti. Murskattua materiaalia kuivataan vaadittava aika luokassa sijaitsevalla polymeerikuivaimella, ettei kosteus tuottaisi ongelmia filamentin valmistuksessa. Tämän jälkeen murskeesta pyritään valmistamaan 3D-tulostusfilamenttia Composer 450-laitteistolla. Muovin pursottamisesta suuttimen läpi käytetään yleisesti nimitystä suulakepuristus eli ekstruusio, mutta selkeyden vuoksi tässä opinnäytetyössä käytetään termiä pursotus.

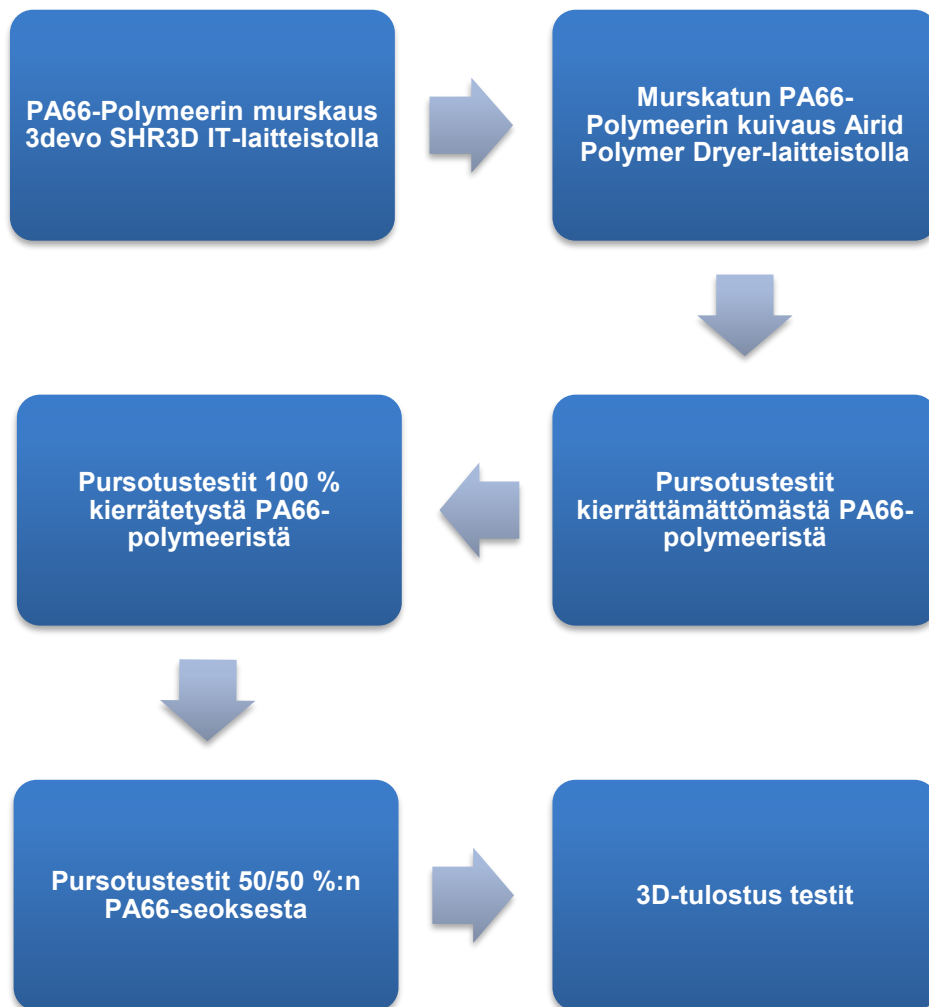
1.2 Rajaus

Tutkimuksen pursotus- ja 3D-tulostustestit rajataan PA66-polymeeriin sekä siitä tehtävään seossuhteeseen. Seossuhde on päätetty Ravelast Oy:n edustajan kanssa olevan 50 % kierrätettyä ja 50 % kierrättämätöntä PA66-polymeeriä. Lisäksi filamenttia valmistetaan kierrättämättömästä ja 100 % kierrätetystä PA66-polymeeristä.

Pursotuksen onnistuessa kaikista seossuhteista tehdään 3D-tulostustestejä Lapin ammattikorkeakoulun laboratorion 3D-tulostimilla. Onnistuneesta 3D-tulostusfilamentin pursotuksesta saadut Devovision-ohjelmiston lokitiedot sekä koneparametrit luovutetaan Ravelast Oy:n käyttöön. 3D-tulostuksen onnistuessa siitä saatavat ja hyväksi havaitut parametrit luovutetaan Ravelast Oy:n käyttöön. Kaikki tutkimuksessa saadut tulokset, laitteistojen käyttö sekä huolto raportoidaan mahdollisimman tarkasti.

1.3 Tutkimuksen vaiheet

Tutkimuksella on työjärjestys, jota mahdollisuuksien mukaisesti toteutetaan olettaen, että tutkimuksen aikana ei tule konerikkoja tai muita viivästyksiä toimittaa täydellinen tutkimustulos Ravelast Oy:lle. Työjärjestys kierrättämättömän ja 100 % kierrätetyn PA66-polymeerin osalta saattaa muuttua. Tämä riippuu materiaalin saatavuudesta sekä siitä, miten materiaalia on kuivattuna. Kuvio 1 esittelee tutkimuksen alustavan työjärjestyksen.



Kuvio 1. Tutkimuksen työjärjestys

2 RAVELAST OY

Tutkimuksen toimeksiantaja on kumi, muovi ja polyuretaanituotteisiin erikoistunut Ravelast Oy, joka aloitti toimintansa Oulun Taskilan kaupunginosassa vuonna 1985. Ensimmäisiä tilauksia yritys sai Suomen puolustusvoimilta tarpeeseen uudelleen pinnoittaa BV206-miehistökuljetusajoneuvon renkaita. (Ravelast Polymers 2022b.)

Yritys siirtyi vuonna 1990 Oulun Haukiputaalle suurempiin tiloihin. Puolessavälissä 1990-lukua konehankintana tehtiin 10 metrin kärkivälillä oleva sorvi, jolla voitiin aloittaa paperiteollisuuden telapinnoitukset. Vuonna 2000 tehdas laajeni jälleen, ja tuotantotilojen koko oli nyt 1200 m². Vuonna 2010 yritys laajensi toimintaansa kumituotteisiin ostamalla Vantaan Kumitekniikka Oy:n toiminnan. Kumitelapinnoitus aloitettiin vuonna 2012 ostamalla Finroll Oy:n ja Euroroll Ab:n liiketoiminnat. Euroroll Oy ja Ravelast Oy fuusioitiin vuonna 2013. Vuosina 2016–2018 yritystä laajennettiin jälleen yritysostoilla. Vuonna 2016 tehtiin yrityskauppa, jossa ostettiin SOKAB yrityksen toiminta Ruotsin Kiirunasta. Kaupalla voitiin laajentaa Ravelast Oy:n polyuretaanipuolen toimintoja. Vuonna 2018 Ravelast Oy teki yritysoston, jossa hankittiin Polymer Component Finland Oy:n toiminta. Kaupalla laajennettiin Ravelast Oy:n osaamista muotissa valetuista kumituotteista sekä ruiskuvaletuista muovituotteista. (Ravelast Polymers 2022b.)

Ravelast Oy:n palveluihin kuuluu sopimusvalmistusta sekä huoltamista, kuten teilojen uudelleen pinnoittamista. Ravelast Oy on erikoistunut valu ja muottituotteisiin, telapinnoituksiin, kulutus- ja korroosionsuojaukseen, kumista ja PU:sta valmistettaviin erikoistuotteisiin, silikonituotteisiin sekä kumi- ja silikonisekoituksiin. (Ravelast Polymers 2022a.) Ravelast Oy:llä on toimipisteet Oulussa, Hyvinkäällä, Nokiolla sekä Ruotsin Kiirunassa (Ravelast Polymers 2022c).

3 POLYAMIDI 66 (PA66)

3.1 Tekniset ominaisuudet

Polyamidi, joka tunnetaan hyvin myös nimeltä nylon, kuuluu teknisiin muoveihin. Samalla se on osakiteinen kestonuovi. (Bruder 2016.) Suomenkielinen nimitys polyamidille on nailon. Kestomuoveja voidaan muovata ja sulattaa useasti uudelleen, ilman että tapahtuu kemiallista hajoamista (Järvinen 2008, 18). Sandell, Malén, Virtanen, Kurri, & Pohjapelto (2002, 21–22) ovat todenneet kestonuovien uudelleen muokkauksen perustuvan siihen, että lämmittäessä niiden molekyyliketjuissa olevat poikittaiset sidokset katkeilevat ja näin mahdollistavat muovin jatkuvan uudelleen muokkaamisen. Kertamuoveissa näitä poikittaissidoksia ei lämmön avulla voida irrottaa toisistaan, ja tämän vuoksi niitä ei voi muokata uudelleen.

Ensimmäisenä nailonpolymeerinä vuonna 1935 kehitetyn PA66-polymeerin lisäksi on kehitetty useita variaatioita. Eniten käytetyt PA-polymeerit ovat PA6 sekä PA66. (Järvinen 2008, 84–85.) Variaatioiden kehityksellä on haettu erilaisia lämpöominaisuuksia sekä veden absorboitumisen vähentämistä (Bruder 2016), mikä on polyamidin suurin heikkous tietyissä käyttökohteissa. Tuotekehityksellä on kehitetty PA-laatuja, kuten esimerkiksi PA11, joka absorboi kosteutta ilmasta enää noin 1 %:n verran sekä veteen upotettuna noin 2 % painostaan (Seppälä 2005, 214). PA-merkinnän jälkeinen numerosarja kuvastaa hiiliatomien määrää monomeerin molekyyliessä. PA66-polymeerin monomeerissä on 2 molekyyliä, joissa molemmissa on 6 hiiliatomia. (Bruder 2016.) Monomeeri tarkoittaa molekyyliä, joka voi sitoutua toiseen molekyyliin muodostaen molekyyliketjuja, josta saadaan polymeeriä. Prosessi tunnetaan nimeltään polymerointireaktio. (Sandell ym. 2002, 25, 35.) PA66-polymeerin valmistukseen käytetään kahta kemiallista ainetta Hexamethylenediamine ja Adipic acid (Hexamethylenediamine 2018). PA66-polymeerin lasittumispiste on 65 °C ja sulamispiste 263 °C (Thomas & Visakh 2012, 3.3).

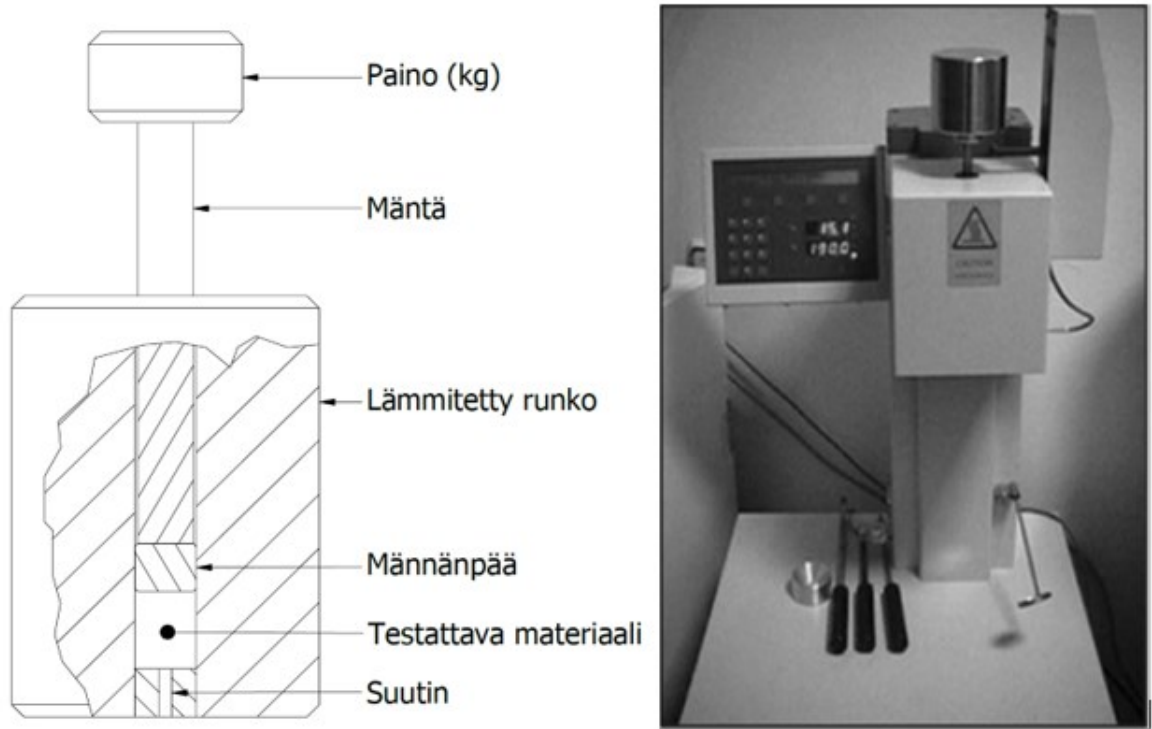
PA66-polymeerin hyvä ominaisuus on sen iskunkestävyys. Lisäksi PA66 kestää hyvin kulutusta, kemikaaleja sekä suhteellisen korkeita lämpötiloja. PA66-poly-

meerin heikkous on sen kosteuden absorbointi. Kosteus PA66-polymeerissä vaikuttaa oleellisesti sen mekaanisiin ominaisuuksiin. Veteen upotettuna PA66-polymeeri absorboi kosteutta 8–12 % painostaan, ja vastaavasti ilmasta PA66 ottaa kosteutta noin 2–3 %:iin asti. Kosteus PA-polymeerissä muuttaa sen iskulujuutta sekä jäykkyyttä. Kosteus saattaa vaikuttaa myös PA-polymeeristä valmistetun kappaleen mittoihin. (Seppälä 2005, 214; Järvinen 2008, 85.) PA66-polymeerin kosteuden noustessa 2,5 %:iin (23 °C 50 % RH) jäykkyys vähenee 65 % ja veto-
lujuus 35 %, mutta myötövenymä voi kasvaa jopa 5-kertaiseksi (Bruder 2016). Nailoneita käytetään yleisesti kalastussiimoissa, ja tämä ominaisuus voidaan tässä tapauksessa lukea eduksi. Käyttökohteissa, kuten filamentinpursotus, muottivalu sekä 3D-tulostus voidaan kosteuden imeytymistä pitää suurena heikkoutena. Seppälä (2005, 214) toteaa Polymeeriteknologian perusteet kirjassaan, että muutaman prosentin kosteudella on pehmentävä vaikutus, ja täysin kuivana PA66 on kova sekä hauras. PA66 absorboi kosteutta huoneilmasta arviolta noin 0,37 % (23 °C 50 % RH) 24 tunnin aikana (Toray 2019).

3.2 MFI

Filamentinpursotuksen ja 3D-tulostuksen kannalta tärkeimpiä ominaisuuksia on tietää polymeerin MFI-luku (sulamassavirta). MFI testillä on tarkoitus osoittaa testattavan polymeerin sulavirtauksen helppoutta. Muovien MFI (Melt Flow Index) määritetään testillä, jossa mitataan, paljonko 10 minuutin aikana sulaa materiaalia grammoina (g/10 min) virtaa määrätyn kokoisen suuttimen läpi (Shenoy & Saini 1986, 2). MFI-luku tunnetaan myös uudemmalla nimityksellään MFR (Melt Mass-Flow Rate). Lisäksi yleisesti käytetään MVR-arvoa (Melt Volume-Flow rate [cm³/10 min]). (SFS-EN 1133-1:2022, 6.) Polymeerin MFI-luku vaikuttaa oleellisesti siihen, miten hyvin sitä voidaan pursottaa tai 3D-tulostaa. Mitä korkeampi MFI-luku on, sitä alhaisempi on materiaalin viskositeetti. Tämä perustuu siihen, että mitä alhaisempi viskositeetti on, sitä enemmän materiaalia virtaa suuttimen läpi, mikä samalla kasvattaa MFI-lukua. Mitä alhaisempi materiaalin viskositeetti on, sitä hankalampi sen sulamuotoa on hallita niin, jotta siitä voitaisiin valmistaa toimivaa 3D-tulostusfilamenttia. Pursotukseen on suositeltavaa valita laatu, jonka MFI-arvo on alhainen, ja samalla sillä on korkea viskositeetti.

MFI-testi tehdään laitteella, jossa sylinterin päässä olevan painon avulla sulaa polymeerimassaa pursotetaan 2,095 mm:n tai joillakin materiaaleilla 1,050 mm:n halkaisijalla olevan suuttimen läpi (SFS-EN 1133-1:2022, 7). Testeissä käytettävien painojen määrät sekä tekniikka toimenpiteelle voidaan todeta standardista SFS-EN 1133-1:2022. Kuva 1 esittelee MFI-laitteiston toimintaperiaatetta.

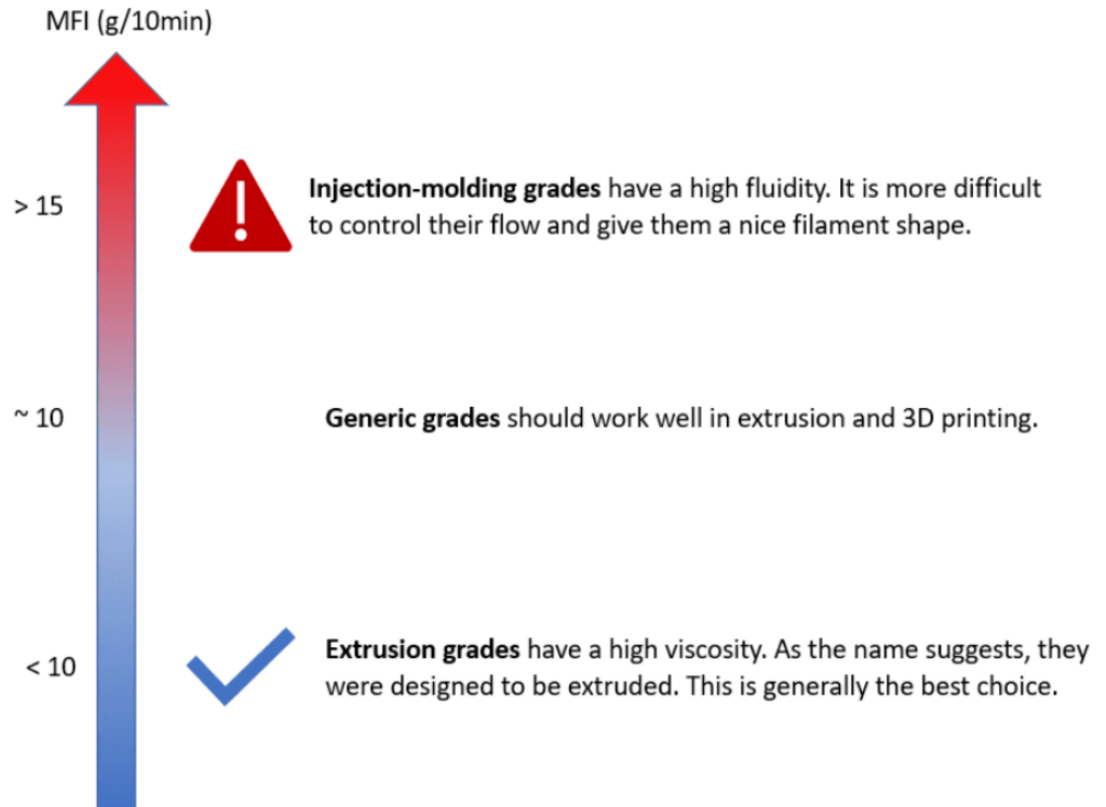


Kuva 1. MFI-sulamassavirtauksen mittauslaitteisto (mukaillen Güldaş, Zeyveli, Kaya, & Altuğ 2018, 76)

3D-tulostukseen tarkoitetun PLA-filamentin tyypillinen MFI/MFR-arvo on noin 6 g/10 min (Technical data sheet PLA 2017). Tästä syystä PLA on erittäin helppo 3D-tulostaa, sekä pursottaa siitä 3D-tulostusfilamenttia Composer 450-laitteistolla. Vertailun vuoksi tutkimuksessa käytetyn PA66-polymeerin MFI-arvo on yli 50 g/10 min (10 kg) 275 °C:ssa, eli tutkimuksen PA66-polymeeri on erittäin juoksevaa, eikä se sovellu hyvin filamentin valmistukseen tai 3D-tulostamiseen. Sulanmuodon hallinta näin korkealla MFI-arvolla on erittäin haastavaa. 3devon materiaaliasiantuntijoiden kanssa käytyjen keskusteluiden pohjalta voi se olla jopa mahdotonta (3devo support 2022a). Tämä saattaa olla syynä sille, että PA66 3D-tulostusfilamentteja on yleisesti vähän saatavilla. Seokset, kuten PA6/PA66 ja puhdas PA6 ovat yleisesti saatavilla olevia filamentteja. Korkeaa MFI-arvoa ruis-kumuottivalussa tarvitaan, jotta voidaan varmistaa valumuotin täydellinen täyttö,

kun taas matalaa MFI-arvoa filamentin valmistuksessa ja 3D-tulostamisessa tarvitaan polymeerin sulanmuodon hallintaan sekä riittävään paineeseen pursotusruuville. 3devo sivuston mukaisesti on suositeltavaa valita pursotukseen ja 3D-tulostamiseen materiaali, jonka MFI-arvo on alle 10 g/10 min. Kuva 2 esittelee suosituksen mukaisia MFI-arvoja pursotukseen ja 3D-tulostamiseen.

5. How to choose the right grade based on the MFI ?



Kuva 2. Pursotukseen suositeltavat MFI-arvot (3devo 2022o)

4 MUOVITUOTTEIDEN- JA JÄTTEIDEN KIERRÄTYS

4.1 Kierrätyksen merkitys

Luonnonvarojen ehtyessä ja ihmisten määrän jatkuvasti kasvaessa on kierrättäminen noussut yhdeksi tärkeimmistä teemoista ihmisten päivittäisessä elämässä sekä yritysten liiketoiminnassa. Kierrättämällä yrityksen sivuvirtoja voidaan säästää liikevoittoa materiaalihukan vähetessä. Jatkuva kulutus ilman kierrätystä ei voi toimia loputtomasti, ja sen kaltainen elintapa on tullut tiensä päähän. Tähän ovat heränneet myös maailman päättäjät, ja lähes jokaisessa päätöksessä otetaan huomioon myös luonto, uusiokäyttö sekä kierrättäminen. Tarve kierrättää muoveja on suuri, sillä muovit ovat yksi suurimmista luonnon sekä merien saastuttajista. Tämän lisäksi muovit hajoavat erittäin hitaasti luontoon ja vesistöön. (Parker 2018.) Tuotteena muovi on yksi parhaita kohteita kierrätykselle, koska lähes kaikkia muovilaatuja voidaan kierrättää (Plastics For Change 2021).

Jambeck ym. (2015) ovat tutkimuksessaan havainneet, että vuonna 2010 valtameriin päätyi noin 4,8–12,7 miljoonaa tonnia kierrätyskelpoista muovia. The Pew Charitable Trusts ja SYSTEM IQ ovat teettäneet samasta aiheesta tutkimuksen nimeltään *Breaking the Plastic Wave* (2020, 17), jossa on ennustettu jätteen määrän lisääntyvän 29 miljoonaan tonniin vuoteen 2040 mennessä, jos tähän kehitykseen ei puututa. Tämä vastaa 50 kiloa muovijätettä mereen joka metrille maailman rannikoista.

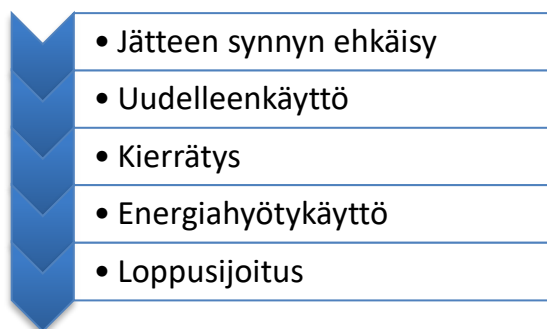
Geyer, Jambeck & Law (2017) ovat todenneet, että maailman muovituotanto on lisääntynyt 1950-luvun noin 2 miljoonasta tonnista 2015-luvulle saapuessa noin 380 miljoonaan tonniin eli lähes 200-kertaisesti. Tutkimuksen muovituotannon määrät on todettu *Plastics Europe*n julkaisuista (*The Compelling Facts About Plastics* 2008) ja (*Plastics – the Facts* 2016). Ritchie & Roser (2022) ovat tehneet koosteen Geyerin ym. (2017) tekemästä tutkimuksesta ja toteavat, että vuonna 2015 tuotetusta muovista kierrätettiin 19,5 %, poltettiin 25,5 % ja 55 % jätettiin luontoon tai vietiin kaatopaikalle. Geyer ym. (2017) ovat ennustaneet, että maailman muovituotannon kierrätysaste olisi vuonna 2050 noin 44 %. Luontoon päätyisi enää 6 % ja loput 50 % poltettaisiin. Tämä perustuu tutkimuksessa havait-

tuun vuodesta 1990 lähtien jatkuneeseen trendiin muovin kierrätyksen vuosittaisesta 0,7 %:n kasvusta. Voidaan ehkä myös olettaa, että muovijätteen keräyksen ja kierrätyksen tekniikat kehittyvät kiihtyvällä vauhdilla niin, että vuonna 2050 voitaisiin kierrättää jo suurin osa maailman muovijätteestä.

4.2 Muovien kierrätys EU-suomessa

Suomessa jätehuoltoa ohjaa EU:sta tulevat jätedirektiivit. Euroopan unioni pyrkii olemaan edelläkävijä kierrättämisessä sekä jätteiden käsittelyssä. Euroopan unionilla on tavoite, että muovia ei päätyisi enää ollenkaan kaatopaikoille tai luontoon, vaan se pystyttäisiin hyödyntämään täysin uudelleen (Järvinen & Saarinen 2016, 16). Vuoteen 2030 mennessä tavoitteena on kierrättää täysin EU:n alueella syntyvä pakkausjäte (European Commission and Directorate-General for Environment 2018). EU-alueella muovista päätyy kaatopaikalle noin 25 %. Jätteenmuovin polttaminen energiaksi on suosituin tapa hävittää muovijätettä. Kun jätettä poltetaan eikä kierrätetä, aiheuttaa se kasvihuonepäästöjä, jota vuonna 2019 pääsi ilmakehään 850 miljoonaa tonnia. Kierrättämisen vähyys johtuu pääasiassa sen kalleudesta verrattuna siihen, että muovi valmistettaisiin täysin uudelleen. Kierrätysmuovin laatu vaihtelee niin paljon, että sen käsittely on kallista. (Euroopan parlamentti 2021.) Tähän olisikin syytä kehittää uusia menetelmiä, joilla muovi pystyttäisiin erottelemaan kannattavalla tavalla, jotta voitaisiin edistää kierrättämistä ja uudelleenkäyttöä.

Jätehuollolle on asetettu EU:n direktiivissä niin kutsuttu etusijajärjestys. Etusijajärjestyksellä pyritään siihen, jotta jätettä syntyisi mahdollisimman vähän. Kuvio 2 esittelee etusijajärjestyksen viisi kohtaa.



Kuvio 2. Jätehuollon etusijajärjestys EU:ssa (mukaillen Järvinen & Saarinen 2016, 16)

Kun jätettä syntyy, olisi se pystyttävä uusiokäyttämään sekä kierrättämään. Jos kierrätys ei onnistu, olisi muovijäte pyrittävä valjastamaan energiatuotantoon. Viimeisenä keinona olisi vasta jätteen loppusijoittaminen kaatopaikalle. (Järvinen & Saarinen 2016, 17.) Jätteen syntymistä voidaan ehkäistä suunnittelemalla sekä valmistamalla tuotteet niin, jotta ne voidaan käyttää uudelleen mahdollisimman tehokkaasti. Jo tuotteen suunnittelussa on otettava huomioon se, miten tuotetta voitaisiin käyttää uudelleen mahdollisimman useasti pelkästään huoltamalla, ja kierrättää se vasta elinkaarensa lopussa.

Pääasiallisesti muovipakkausten kierrätystä Suomessa hoitaa Suomen Uusiomuovi Oy. Se on 42 pakkausalan yrityksen yhteenliittymä ja hoitaa yli 2000 yrityksen muovijätteen tuottajavastuun. (Järvinen & Saarinen 2016, 46.) Tuottajavastuuta Suomessa valvoo ELY-keskus, joka raportoi vuosittain EU:lle, miten tavoitteita on saavutettu. Tuottajavastuu tarkoittaa sitä, että tiettyjen tuotteiden valmistajat ja pakkaajat ovat vastuussa omien tuotteidensa kierrättämisestä. (Järvinen & Saarinen 2016, 44; ELY-keskus 2022.) Yritykset voivat tämän tuottajavastuun siirtää Suomen Uusiomuovi Oy:lle. Uusiomuovi Oy:llä on Suomessa yli 60 paikkakuntaterminaalia, joiden kautta yritykset voivat kierrättää muovijätteensä. (Järvinen & Saarinen 2016, 46.)

Vuoden 2016 alusta kotitalouksien muovijätteen sijoittamista kaatopaikoille on rajoitettu voimakkaasti, ja jäte pyritään ensisijaisesti käyttämään energiaksi jätevoimaloissa. Muovijätteen viemiseksi kaatopaikalle tarvitaan nykyisin poikkeuslupa aluehallintovirastolta. Tämän kaatopaikka-asetuksen on arvioitu laskevan kaatopaikalle vietävän muovin määrän vuoteen 2020 mennessä noin 2 %:iin. (Järvinen & Saarinen 2016, 27.) Muovipakkausalan tuottajayhteisö Suomen Uusiomuovi Oy on aloittanut keräyspisteiden rakentamisen ympäri Suomea, missä kuluttajat voivat kierrättää muovijätteensä (Järvinen & Saarinen 2016, 48). Kuluttajien muovinkierrätys on Suomessa laahannut perässä, mutta edistymistä on saatu lähivuosina voimakkaasti.

5 TUTKIMUSYMPÄRISTÖ

Tutkimuksen toimintaympäristönä toimii Lapin ammattikorkeakoulun 3D-tulostuslaboratorio (Kuva 3). Laboratoriossa on 3D-tulostimia, joiden toimintaperiaate on SLS, SLA ja FDM. Kuvan vasemmassa reunassa sijaitsevat FDM-tulostimet, jotka ovat koteloituja asianmukaisella tavalla. FDM-tulostimia luokassa on yhteensä 9 kpl. 3D-tulostimet ovat Original iPrusaMK3 (4kpl), Creality Ender-3 Pro (2kpl), Creality CR10 Max (1 kpl) sekä Ultimaker S5+Material Station (2kpl). (Pikkarainen, Piili & Salminen 2020, 97–98.)



Kuva 3. Lapin Ammattikorkeakoulun 3D-tulostuslaboratorio

SLS-tulostukseen on oma suljettu työympäristönsä huoneen päädyssä, mikä on myös ilmastoitu. Tilassa sijaitsee SLS-tulostin tyypiltään Sinterit LISA Pro. Lisäksi 3D-tulostukseen on käytössä SLA-tulostin FormLabs FORM 3, joka on toteutettu LFS-tekniikalla (Low Force Stereolithography). SLA-tulostimen lisänä ovat FormWash- ja FormCure-laitteistot, joilla voidaan tehdä jälkikäsittelyä SLA-tulosteille. (Pikkarainen, Piili & Salminen 2020, 97–98.)

Laboratoriossa voidaan tehdä laserleikkausta Flux Beamo-laitteistolla sekä 3D-skannausta ARTEC Leo-skannerilla (VCSEL). Uusimmat hankinnat liittyvät 3D-filamentin valmistukseen, mihin kuuluvat laitteistot: Composer 450 Filament Maker, Airid Polymer Dryer ja 3devo SHR3D IT. (Pikkarainen, Piili & Salminen 2020, 97–98.) Laboratorion laitteisto on nykyaikaista sekä laadukasta.

6 TUTKIMUKSESSA KÄYTETTÄVÄ LAITTEISTO

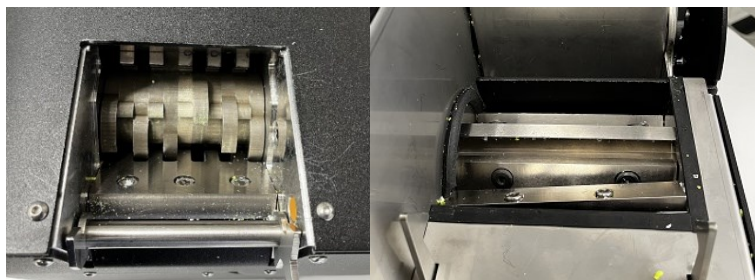
6.1 3devo SHR3D IT

PA66-sivuvirtapolymeerin murskaukseen käytetään 3devon kehittämää SHR3D IT-murskainta (Kuva 4). SHR3D IT-murskaimella voidaan murskata muovijätettä 5,1 kg tunnissa. Laitteen mitat ovat 585 x 310 mm, sekä sen korkeus on 620 mm. (SHR3D IT 2017, 16.) Murskattavaksi tarkoitettu kierrätysmateriaali syötetään siiloon (1). Murskausterät (2) murskaavat muovin, jonka jälkeen se voidaan kerätä granulaattikeräimestä (3).



Kuva 4. 3devo SHR3D IT (mukaillen 3d-tulostus.fi 2021b)

Laitteistossa on kaksi murskausterää. Ylempi murskausterä, joka sijaitsee siilon (1) alapuolella (Kuva 5 vasen), murskaa isommat kierrätysmateriaalin palaset sellaiseen kokoon, jotta ne ovat riittävän pieniä alemman terän hienomurskaukseen. Kuva 5 oikealla esittelee hienomurskausterät. Alempi terä murskaa kierrätettävän materiaalin niin pieneksi, jotta murske sopii granulaattikeräimen (3) yläpuolella olevan siivilän läpi. Siivilällä varmistetaan se, että murske ei ole liian isoa tai epätasaista. Siivilän reikäkokoa voi tarvittaessa vaihtaa.



Kuva 5. Ylemmät murskausterät (vasen) ja alemmat hienomurskausterät (oikea)

Laitteen käytön aikana on syytä käyttää kuulosuojaimia sekä suojalaseja. Laite tuottaa huomattavan meluhaitan (105dB) muovia murskatessa. Liite 6 käsittelee laitteiston huoltamista.

6.2 Airid Polymer Dryer

Tutkimuksessa sivuvirtapolymeerin kuivaamiseen käytetään 3devo Airid Polymer Dryer-kuivainta (Kuva 6). Kuivaimen säiliön koko on 5 litraa. 1 kilon kuivaamiseen laitteella kestää noin 3 tuntia. Suositeltava maksimimäärä muovin kuivaamiseen on 1–3 kg kerrallaan. Airid Polymer Dryer-laitteen maksimilämpötila on 160 °C. Laitteen mitat ovat 425 x 220 mm, sekä sen korkeus on 720 mm. (Multistation 2020.) Laite puhaltaa kuumaa ilmaa kuivattavaan materiaaliin sekoittaen sitä jatkuvasti, jotta voidaan välttää muovimurskeen paakkuuntuminen. Kun halutaan kuivata granulaatteja tai murskattua muovia, kaadetaan se materiaalisuppiloon (1). Ohjauspaneelista (2) voidaan valita materiaalin kuivausasetukset laitteistossa valmiina olevista parametreista, tai muokata sellaiset itse. Laitteesta löytyy esiasetuksena kuivaukseen parametrit seuraaville materiaaleille: PA6, PA66, PLA sekä TPU. Liite 5 käsittelee laitteiston huoltamista.



Kuva 6. Airid Polymer Dryer (mukaillen 3devo 2022a)

6.3 Composer 450 Filament Maker

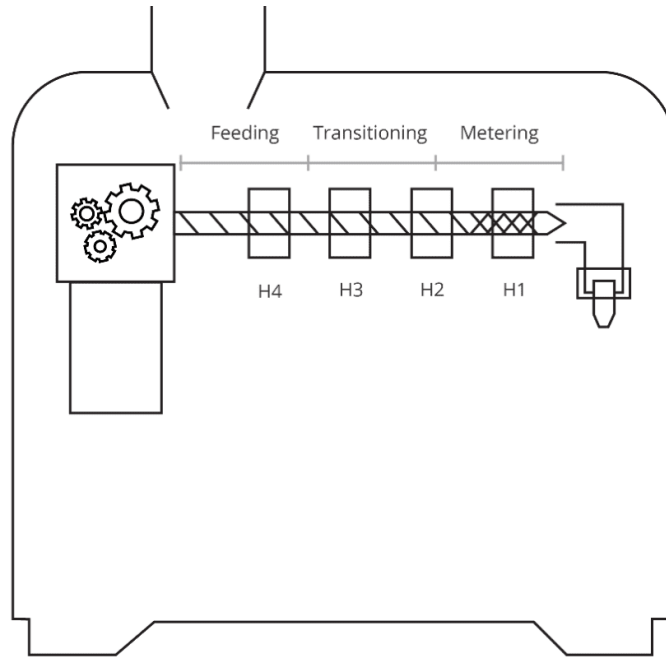
PA66-polymeerin pursotukseen tutkimuksessa käytetään 3devon valmistamaa Composer 450 Filament Maker-laitteistoa (Kuva 7). 3devo valmistaa kahta pursotinmallia, joita ovat Precision 350/450 ja Composer 350/450. Numerot tarkoittavat laitteistojen maksimilämpötiloja. Precision mallissa on tarkkuuspursotusruuvi, joka tuottaa tasaisempaa filamenttia kuin Composer mallin sekoitusruuvi. Tarkkuusruuvien avulla saadaan tuotettua tasalaatuista filamenttia suuremmilla nopeuksilla. (3devo 2022q.) Composer 450-Laitteen mitat ovat 506 x 216 mm, sekä sen korkeus on 448 mm. Laitteessa on esiasetusparametrit ABS, PA12, PC, PEEK, PLA ja PS materiaaleille.



Kuva 7. 3devo Composer 450-filamenttilaite (3d-tulostus.fi 2021a)

Composer 350/450-mallisto on tarkoitettu komposiittimateriaalien pursottamiseen ja materiaaliseoksiin. Se on varustettu sekoitusruuvilla, joka sekoittaa tehokkaasti kahta tai useampaa materiaalia keskenään. Jos tarkoituksena on tuottaa vain tasalaatuista filamenttia, niin silloin oikea valinta on Precision-mallisto. Jos taas halutaan tehdä seoksia, komposiitteja tai testata mitä tahansa muovinpursotukseen liittyvää, on syytä valita Composer-laitteisto. (3devo 2022q.)

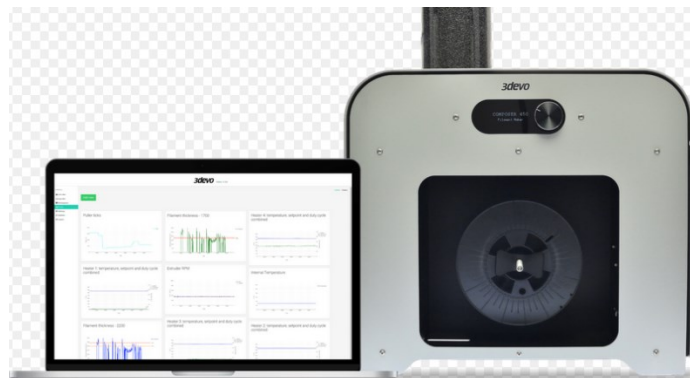
Composer 450-laitteen pursotusruuvilla on neljä (H4-H1) lämmitysvastusta (Kuva 8), jotka lämmittävät materiaalin tarvittavaan lämpötilaan koko pursotusruuvien matkalta. Jokaista vastusta voidaan säätää erikseen. Laitteen käyttöä käsitellään luvussa 7.4. Liite 3 käsittelee laitteiston puhdistamista.



Kuva 8. Composer 450-laitteiston lämpövastukset H4-H1 (3devo 2022w)

6.4 Devovision

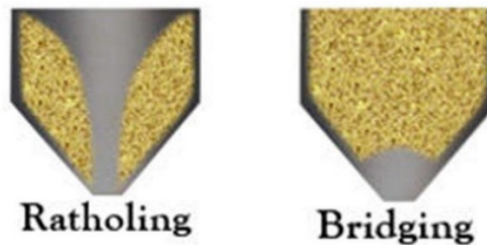
Devovision-ohjelmistolla (Kuva 9) voidaan seurata reaaliaikaisesti mitä pursotuksen aikana tapahtuu. Composer 450-laitteen taakse kytketään USB-kaapelilla tietokone, johon on asennettuna Devovision-ohjelmisto. Ohjelmistolla otetaan yhteys Composer 450-laitteeseen, minkä jälkeen voidaan aloittaa lokitallennus. Devovision-ohjelmalla voidaan seurata pursotusruuvien nopeutta, filamentin vetorullien nopeuksia, jokaisen lämpövastuksen lämpötiloja, pursotusruuvien virrankulutusta, filamentin halkaisijamittaa sekä monia muita tarpeellisia tietoja pursotuksesta. Ilman Devovision-ohjelmistoa on käytännössä mahdotonta tietää, mitä Composer 450-laitteiston sisällä tapahtuu. (3devo 2022c.)



Kuva 9. Devovision-ohjelmisto (3devo 2022c)

6.5 Materiaalinsekoittaja

Tasainen materiaalinsyöttö on oleellinen osa onnistunutta filamentinpursotusta. Jos materiaalisuppilossa ei ole tarpeeksi materiaalia luomassa riittävää painetta pursotusruuville, voi tämän myötä filamentin halkaisijamitta aloittaa heittelyn (3devo 2022m). Kun kierrätysmateriaali murskataan SHR3D IT-murskaimella, tulee siitä karkeapintaista eikä muoto ei ole homogeeninen. Tämä aiheuttaa syöttöongelmia, koska murskattu materiaali pyrkii tekemään materiaalisuppiloon niin kutsuttuja rotankoloja tai siltoja karkean murskeen tarttuessa toisiinsa (Kuva 10).



Kuva 10. Syöttöongelmat materiaalisuppilossa (3devo 2022r)

Materiaalinsyöttöongelmia varten 3devo on kehittänyt materiaalinsekoittajan (Kuva 11). Laite tärähtelee tietyin väliajoin pyrkien estämään sen, ettei murskattu materiaali tekisi rotankoloja tai siltoja, jotka voisivat estää materiaalin tasaisen syötön. Materiaalinsekoittajaa on syytä käyttää aina, kun kierrätetystä ja murskattua materiaalista tehdään 3D-tulostusfilamenttia. (3devo 2022n.)



Kuva 11. Materiaalinsekoittaja Composer 450-laitteiston materiaalisuppilossa

7 PA66-FILAMENTIN VALMISTUSVAIHEET

7.1 3D-tulostusfilamentti

Filamentti on 3D-tulostimissa kaupallisesti saatavilla olevaa eri muovimateriaaleista valmistettua tulostuslankaa, jonka yleisimmät halkaisijat ovat 1,75 mm ja 2,85 mm (Kuva 12). Yleisin 3D-tulostusfilamenttimateriaali on PLA (Polylaktidi). Syyt tälle ovat PLA:n 3D-tulostamisen helppous sekä sen matalat tulostuslämpötilat, jolloin esiintyy vähäisesti Warp-ilmiötä. Warp-ilmiö on tulosteen vääntymistä 3D-tulostamisen aikana, mikä samalla aiheuttaa tulosteen irtoamista tulostusalustaltaan.



Kuva 12. MagicPLA Deep Space (3DJAKE 2022b)

Tutkimuksessa käytetään materiaalina nailonia, jonka tulostaminen voi olla haastavaa johtuen sen korkeista tulostuslämpötiloista. Tästä syystä se on altis vääntymisille sekä irtoamiseen tulostusalustasta. Nailon vaatii yleensä erikoistoimia 3D-tulostamisen onnistumiseen. Näitä voivat esimerkiksi olla tulostimen kotelointi, liima-aineiden käyttöä tulostuspöydässä sekä 3D-tulostimen tuulettimien sammuttamista lämpötilaerojen tasaamiseksi. Asiaa käsitellään luvussa 9.

7.2 PA66-sivuvirtapolymerin murskaus

Kierrätykseen tarkoitettu polymeeri on murskattava tarpeeksi pieneksi murseeksi, jotta sitä voidaan pursottaa Composer 450-laitteistolla. Murskaaminen tapahtuu SHR3D IT-murskaimella (Kuva 4). Composer 450-laitteistossa murskeen maksimikoon suositellaan olevan noin 4 mm (3devo 2022w). Lisäksi pursotettavan materiaalin olisi hyvä olla homogeeninen, jotta pursotuksen aikana suuttimesta ei tulisi ulos sulamattomia materiaalipartikkeleita. Mahdollisimman ho-

mogeenisen materiaalin saavuttamiseksi on tarpeellista murskata kierrätysmateriaali vähintään 2–3 kertaa. Tutkimuksessa käytettävä kierrätysmateriaali syntyy valumuottien ruiskutuskanavista muodostuvista jätetikuista (Kuva 13).



Kuva 13. Ruiskutuskanavasta syntyvä jätetikku

Ruiskutuskanavista syntyvien tikkujen (Kuva 13) murskaamisessa SHR3D IT-murskaimen terä siirtyi paikoiltaan. Liite 6 käsittelee SHR3D IT-laitteiston huoltamista. Koska tikkujen murskauksessa laite rikkoutui, lyhennettiin kaikki tikut kolmeen pienempään osaan estämään sen, ettei täysimittainen tikku putoaisi poikittain alemman terän väliin (Kuva 14). Tämän pääteltiin olevan syynä laitteen rikkoutumiselle. Tikut pääsivät vapaasti putoamaan ylemmän terän välistä alemmalle terälle, ilman että tikkua olisi murskattu. Tikkujen lyhentämisen jälkeen murskaaminen onnistui rikkomatta konetta.



Kuva 14. 3-osaan pilkottua ruiskutuskanavatikkua

PA66-sivuvirtapolymeeriä murskatessa havaittiin, että puhtaan murskeen tuottaminen on käytännössä mahdotonta. Laitteen puhdistukseen käytettiin erittäin paljon aikaa, mutta silti murskeen sekaan tuli vierasmateriaalia mahdollisesti kovan tärinän seurauksena (Kuva 15 vasen). Tarpeeksi pitkään murskatessa laite todennäköisesti puhdistuu niin, että vierasmateriaalin tulo loppuu.

Vierasmateriaali oli kuitenkin helppo havaita, ja se voitiin poistaa pinsettejä käyttäen. Kuva 15 oikealla esittää murskeen puhdistamista. Tämä ei kierrätyksen lähtökohdista ole tietenkään kannattavaa, mutta tutkimuksen etenemisen kannalta näin oli tehtävä. Olisi käytännön kannalta parasta, että murskainta käytettäisiin vain yhden materiaalilaadun murskaamiseen, jos on välttämättömyys saada täysin puhdasta materiaalia.



Kuva 15. Vierasmateriaali PA66-murskeessa (vasen) ja murskeen puhdistamista (oikea)

7.3 PA66-polymerin kuivaus

3D-tulostuksessa käytetyt materiaalit ovat yleensä hygroskooppisia eli imevät kosteutta. Kosteus aiheuttaa ongelmia niin 3D-tulostamisessa kuin filamentin valmistuksessaakin. Filamentin valmistuksessa kosteus voi kemiallisesti heikentää hygroskooppista polymeeriä. Ilmiö on nimeltään hydrolyysi, joka katkaisee kovalenttisia sidoksia polymeeriketjuista. Tämä alentaa viskositeettiä sekä mekaanista lujuutta samalla heikentäen filamentin laatua. (3devo 2022v.)

Nailon materiaaleille paras kuivausmenetelmä on vakuumikuivaus. PA66-polymerillä on tapana hapettua, jos sitä kuivataan perinteisillä keinoilla ilman vakuu-

mia. (Toray 2019.) Tässä tutkimuksessa ei ole käytössä vakuumikuivaimia. Hapettumista voi tapahtua yli 80 °C:n kuivauslämpötiloilla tai yli 4 tunnin kuivausaajoilla. PA66-polymeerin hapettuminen tuo värimuutoksia tuotteeseen, mutta ei vaikuta suuresti sen mekaanisiin ominaisuuksiin. (Toray 2019; Polymerik Oy 2022.) Airid Polymer Dryer-kuivaimessa on esiasetuksena PA66-polymeerin kuivausasetukset, johon kuivauslämpötila on asetettu 85 °C:seen. Lisäksi 3devon tekninen tuki ohjeisti käyttämään 80–85 °C:n lämpötilaa PA66-polymeerin kuivaamiseen (3devo support 2022b; 3devo support 2022e). Tässä tutkimuksessa PA66-polymeerin kuivaamiseen käytettiin 85 °C:n lämpötilaa. Käytetty lämpötila ja kuivausaika värjäsi granulaatteja keltaiseksi, kuten Kuva 16 osoittaa. Tämä osoittaa sen, että 85 °C:n lämpötilaa voidaan pitää liian korkeana PA66-polymeerin kuivaamiseen. Mahdollisissa jatkotutkimuksissa lämpötila kannattaa laskea 80 °C:seen.



Kuva 16. Värjäytyneet PA66-granulaatit kuvassa oikealla

PA66-polymeerin pursotuksen sallittu maksimikosteus on 0,2 % (Omnexus SpecialChem 2022). Näin tarkkoja mittareita tutkimukseen ei ole käytettävissä. Koska PA66-murskeen kosteutta ei voitu tarpeeksi tarkasti mitata, kuivattiin kaikkia materiaaleja suosituksen mukaisesti 12 h. Suositus saatiin sähköpostikeskusteluista 3devon materiaaliasiantuntijoiden kanssa (3devo support 2022b). Koska 12 tunnin yhtäjaksoisia kuivausaikoja ei voitu toteuttaa, eikä Airid Polymer Dryer-laitetta voi kuivauksen aikana jättää valvomatta, toteutettiin kuivaaminen lyhyemmissä jaksoissa. Kuivaamisen välissä murskeen säilytys tapahtui lasipurkeissa (Kuva

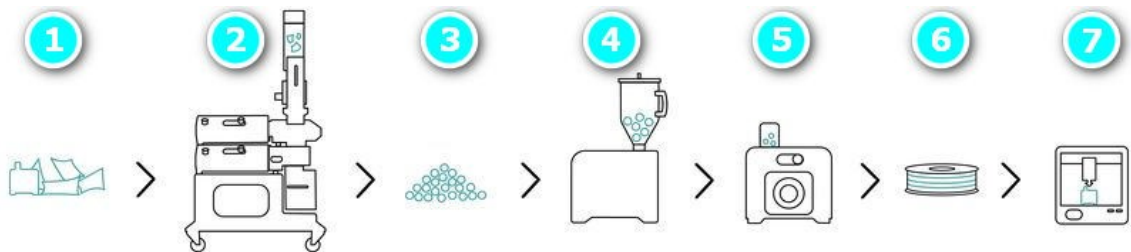
17 vasen), joiden kanteen asennettiin silikageeli pusseja (Kuva 17 oikea) varmistamaan murskeen kuivuus. Lisäksi purkit kiedottiin tuorekelmuun varmistamaan se, että murske ei ole kosketuksissa huoneilmaan, josta se voisi imeä kosteutta. Purkin kansi ei välttämättä ole ilmatiivis, joten tuorekelmun käyttö katsottiin aiheelliseksi. Kuivaus ajoitettiin niin, että juuri ennen pursotusta mursketta kuivattiin vielä 2 h, jotta voitiin varmistaa murskeen olevan mahdollisimman kuivaa.



Kuva 17. P66-murskeen säilytyspurkki (vasen) ja silikageeli pussit purkin kannessa (oikea)

7.4 Pursotus

Tässä luvussa käsitellään toimenpiteet sille, että materiaalinpursotus voidaan aloittaa. Filamenttia voidaan valmistaa valmiista granulaateista tai kierrätysmuovista, jolloin prosessi tarvitsee lisätoimintoja (Kuvio 3). Jätemuovi (1) murskataan SHR3D IT-murskaimella (2) riittävän homogeeniseksi murskeeksi (3). Murske kuivataan Airid Polymer Dryer-laitteella (4), minkä jälkeen siitä voidaan valmistaa filamenttia Composer 450-laitteella (5). Tämän jälkeen valmis filamentti (6) voidaan 3D-tulostaa (7).



Kuvio 3. Filamentin valmistusvaiheet (mukaillen 3devo 2022p)

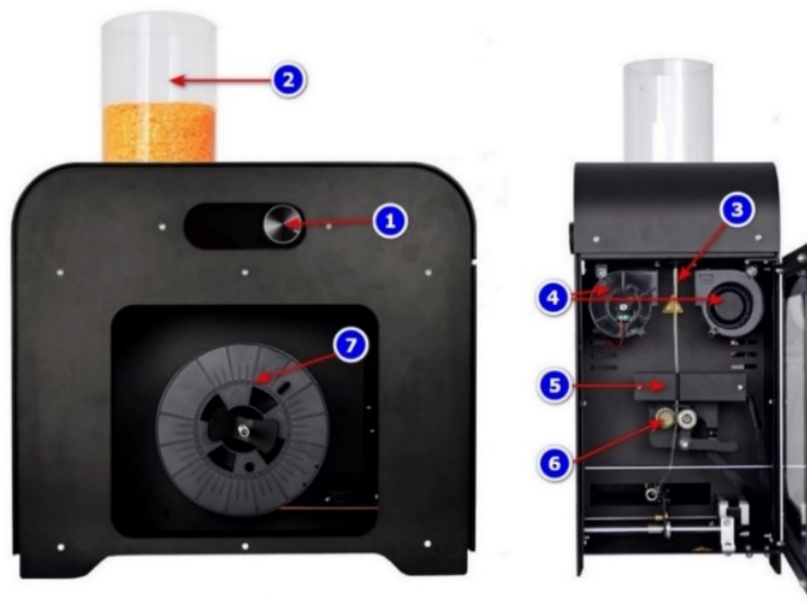
Pursotuksen aloituksen ensimmäisenä toimenpiteenä täytyy tarkistaa, onko pursotettavalle materiaalille tehtävä materiaalsiirtymä. Materiaalsiirtymä on oleellinen osa laitteen toimintaa, ja se pitää tehdä aina kun materiaalien lämpötilat poikkeavat suuresti toisistaan (3devo 2022j). Liite 2 käsittelee materiaalsiirtymän tekniikkaa. Laitteen ensimmäisen pursotuksen jälkeen pursotusruuvi ei ole enää koskaan tyhjä, vaan sinne jää aina materiaalia. Virrankatkaisun jälkeen pursotusruuville saa jäädä ainoastaan PLA tai HDPE- ja Mid-Temperature-puhdistusmateriaalit. Liite 1 käsittelee puhdistusmateriaaleja.

Pursotuksen alussa vastuksien lämpötilojen suositellaan olevan 10–20 % yli materiaalin sulamispisteen. Tällä varmistetaan se, että suuttimesta ei tule ulos sulamattomia partikkeleita. (3devo 2022j.) Sulamattomat partikkelit voivat aiheuttaa ongelmia Composer 450-laitteen pursotusruuvien virtapiikkeinä, jotka tarpeeksi korkealle noustessaan sammuttavat koko laitteen suojatakse sen komponentteja (3devo 2022e). On myös mahdollista, että pursotusruuvi ja suutin tukkeutuvat, jos materiaali ei ole riittävän sulassa muodossa.

Composer 450-filamentinvalmistuslaitteen (Kuva 18) virrankytken jälkeen on ensimmäisenä syytä kytkeä Devovision (6.4) ohjelmistolla varustettu tietokone

Composer 450-laitteen USB-porttiin. Devovision on hyvä laittaa toimintaan ensimmäisenä, koska Composer 450 käynnistää itsensä uudelleen Devovisionin kytkennässä. Uudelleenkäynnistys ei ole toivottavaa etenkin keskellä pursotusta.

Tuuletin kannattaa laittaa päälle ennen filamentin kiertämistä rullalle. Tuuletuksen laittaminen päälle kesken pursotuksen voi tuottaa ongelmia, koska koneen on opeteltava lämpötilat ja vetorullien nopeudet uudelleen. Nopeusvaihteluiden vuoksi myös filamentin halkaisijamitta heittelee. Lämpötiloja säädetään PID-säätimen avulla, joka on algoritmi, jonka avulla voidaan ohjata lämmitysvastuksia Composer 450-laitteessa. PID-säädin pyrkii saavuttamaan tasapainon lämpövastuksille, jotta Composer 450 voisi tuottaa tasalaatuista filamenttia. (3devo 2021.)

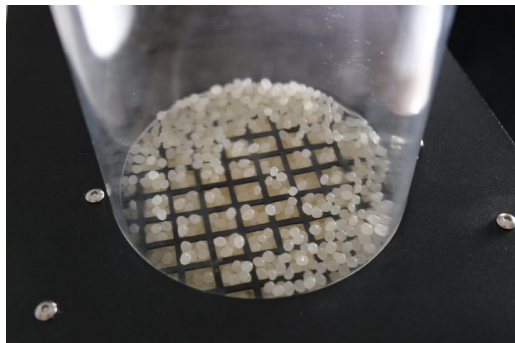


Kuva 18. Composer 450-filamentinvalmistuslaite (mukaillen 3devo 2022i)

Seuraavaksi asetetaan lämpötilaparametrit Composer 450-filamentinvalmistuslaitteen (Kuva 18) ohjauspaneeliin (1). Materiaali lisätään Composer 450-laitteen katolla olevaan materiaalisuppiloon (2). Pursotus kannattaa aloittaa (Automatic) käskyllä, jolloin Composer 450 aloittaa pursotuksen heti kun lämpövastukset ovat oikeassa lämpötilassa. Materiaalisulavirtaa (3) säädetään tarvittaessa tuulettimilla (4), pursotusruuvin kierroksilla sekä vastuksien lämpötiloilla, jotta saadaan pursotettava materiaali jähmettymään tarpeeksi ennen halkaisija-anturia (5). Kun

saavutetaan tarpeeksi kiinteä materiaalivirta, voidaan filamentti asettaa vetorullien väliin (6), minkä jälkeen voidaan aloittaa testit tasaisenlaatuisten filamentin tuottamiseksi. Tässä vaiheessa testataan lämpötiloja, pursotusruuvin kierroslukuja sekä tuulettimien pyörimisnopeuksia niin, että filamentin halkaisijamitta on tasainen. Testaaminen vie aikaa, ja jokaista muutosta voi joutua odottamaan pitkäänkin. Varsinkin lämpötilamuutokset ovat erittäin hitaita, ja niitä voi joutua odottamaan jopa kymmeniä minutteja. Kun on saavutettu tasainen ja oikean halkaisijan filamentti, voidaan aloittaa sen kiertäminen rullalle (7). 3devo on käsitellyt filamentin rullalle kiertämistä sivustollaan yksityiskohtaisesti (3devo 2022m).

Materiaalisuppilossa (2) on tärkeää pitää materiaalia vähintään reunan tasolla (Kuva 19), jotta voidaan tuottaa riittävää painetta pursotusruuville. Materiaalisuppilossa on anturi, joka tunnistaa liian alhaisen materiaalimäärän. Jos materiaalin määrä alittaa sensorin, muuttaa se laitteen valaistuksen punaiseksi. Pursotusruuvi tarvitsee jatkuvaa painetta pitääkseen materiaalivirtauksen tasaisena. (3devo 2022m.)



Kuva 19. Composer 450-laitteiston materiaalisuppilossa materiaalia reunan tasossa (3devo 2022m)

Composer 450-laitteen lämpövastuksista H3 ja H4 (Kuva 8) ovat vastukset, jotka vaikuttavat paljon siihen, miten tasainen materiaalinsyöttö saadaan. On tärkeää, että pursotusruuvin alussa (suppilon puolella) muodostetaan painetta suuremmalla viskositeetilla. Tämä saavutetaan alentamalla H3 ja H4 lämpövastuksien lämpötiloja. Yleensä lämpövastuksista H4 asetetaan alhaisimmalle lämpötilalle ja vastus H1 korkeimmalle, eli nousevalla lämpötilaprofiililla. (3devo 2022w.) Kun pursotus lopetetaan, on pursotusruuvi lähes aina puhdistettava. Liite 3 käsittelee laitteiston puhdistamista.

8 PURSOTUSTESTIT

8.1 Testien vaiheet

Testit tehdään siinä järjestyksessä, kun on saatavilla 12 h kuivattua materiaalia. Järjestykseen vaikuttaa myös testausmateriaalien riittävyys. Seossuhteita voidaan lähteä testaamaan, kun on saatu kierrättämätön (Kuva 20 vasen) ja 100 % kierrätetty (Kuva 20 keskellä) PA66-filamentti onnistuneesti pursotettua. Seossuhteen on päätetty olevan 50 % kierrättämätöntä ja 50 % kierrätettyä sivuvirta PA66-polymeeriä. Kuva 20 oikealla esittää 50/50 %:sen seoksen.



Kuva 20. Kierrättämätön PA66-polymeeri (vasen), 100 % kierrätetty PA66-polymeeri murskattuna (keskellä) ja 50/50 %:n seos (oikea)

Testeihin haettiin aloituslämpötiloja keskustelemalla 3devon materiaaliasiantuntijoiden kanssa. 3devolla on laajaa kokemusta polymeerien pursottamisesta. 3devon kanssa käytyjen keskusteluiden pohjalta lähdettiin testissä 1 PA66-polymeeriä pursottamaan säätämällä kaikki neljä lämmitysvastusta 280 °C:n lämpötilaan (3devo support 2022c). Lämpötilat nostetaan pursotuksen aloituksessa korkeammalle, jotta pursotusruuvin lähtiessä pyörimään on polymeeri varmasti sulassa muodossa.

Tutkimuksessa voi olla haastavaa, että PA66-polymeerin sulamispiste ja pehmeneminen tapahtuvat lähellä toisiaan, joten testien lämpötila-alue on kapea. Sepälä (2005, 213) on todennut, että polyamidit pysyvät lujina lähelle sulamispistettä. Liao ym. (2022, 194) totesivat tutkimuksessaan PA66-polymeerin 3D-tulostamisesta, että PA66-polymeeri aloittaa sulamisen 258 °C:n lämpötilassa. Samassa tutkimuksessa huomattiin myös se, että yli 300 °C:n lämpötiloja ei kannata

käyttää. Tämän toteaa myös muovien maahantuontiyritys Polymerik Oy (Polymerik Oy 2022).

Testejä tehtiin kaiken kaikkiaan 10 kappaletta, mutta tässä raportissa raportoidaan vain 5 testiä. Pois jätetyillä testeillä ei ole merkitystä tuloksen kannalta, eivätkä ne tuo lisätietoa raporttiin. 100-prosenttinen kierrätysaste tarkoittaa täysin kierrätettyä sivuvirtana saatavaa PA66-polymeeriä. 0-prosenttinen kierrätysaste on kaupallisesti saatavaa seostamatonta PA66-polymeeriä. H4-H1 ovat Composer 450-laitteiston lämpövastuksien lämpötiloja. Kuva 8 esittelee vastuksien järjestyksen pursotusruvilla. Laitteistossa on suutin, jonka läpi sulamassavirta tulee ulos. Tämän suuttimen kokoa voidaan tarpeen vaatiessa vaihtaa, jolloin saadaan uusia ominaisuuksia sulamassavirran hallintaan. Ensimmäisissä pursotus yrityksissä tapahtui odottamattomia ongelmia, kuten polymeerin termistä hajoamista ja materiaalisuuttimen loppumista. Näitä epäonnistuneita testejä käsitellään liitteissä: (Liite 1) ja (Liite 7). Tapahtumien jälkeen laitteisto puhdistettiin perusteellisesti, sekä tehtiin laitteen laatutarkastus. Liite 4 käsittelee laitteistolle tehtävää laatutarkastamista. Taulukko 1 esittelee testien järjestystä.

Taulukko 1. Testien järjestys

Testit	Kierrätysaste (%)	Suutin \varnothing
Testi 1	100 %	4
Testi 2	0 %	2
Testi 3	100 %	2
Testi 4	0 %	2
Testi 5	50 %	2

8.2 Testi 1

Testi 1 tehtiin 100 % kierrätetystä PA66-sivuvirtapolymeeristä. Devoclean Mid-Temperature-puhdistusmateriaali ajettiin pursotusruvilta pois HDPE-puhdistusmateriaalin avulla 3devon ohjeiden mukaisesti (3devo support 2022c). Testi aloitettiin 260 °C:n lämpötilassa, ja pursotusruvulle lisättiin HDPE-puhdistusmateriaali. Liite 1 tarkastelee HDPE-puhdistusmateriaalia. Materiaalinsiirto aloitettiin 260 °C:n lämpötilassa, koska HDPE-puhdistusmateriaali muuttuu erittäin juoksevaksi 280 °C:n lämpötilassa, eikä se näin ollen välttämättä jaksa työntää Mid-Temperature-puhdistusmateriaalia suuttimesta ulos. Kun oli varmaa, että suuttimesta tulee pelkästään HDPE-puhdistusmateriaalia, lämpötilat nostettiin testin 1

aloituslämpötiloihin 280 °C:seen. Näin toimiessa pursotusruuvilla on paljon matalammalla viskositeetillä olevaa materiaalia kuin Devoclean Mid-Temperature. Syy tämän tekemiseen on se, että testattavaa materiaalia menisi mahdollisimman vähän sen työntäessä puhdistusmateriaalia pois pursotusruuilta. Taulukko 2 esittää testin 1 aloitusparametrit.

Taulukko 2. Testin 1. aloitusparametrit

Suutin ∅	Kierrätysaste (%)	H4 (°C)	H3 (°C)	H2 (°C)	H1 (°C)	Tuulettimen nopeus (%)	Syöttöruuvien nopeus (r/m)	Kuivaus- aika (h)
4	100	280	280	280	280	55	3.5	12

Ennen testiä 1 tapahtuneen polymeerin termisen hajoamisen vuoksi testin 1 aloituslämpötilat ovat suhteellisen alhaiset 280 °C. Tämä syystä, että termisen hajoamisen lopullista syytä ei varmuudella saatu selville. Terminen hajoaminen tapahtui kaikkien lämpövastuksien ollessa 290 °C:ssa. Liite 1 käsittelee myöskin termistä hajoamista.

8.2.1 Testin 1 tulos

Testissä 1 filamentin pinta on erittäin karheaa, ja sen halkaisijamitta heittelee paljon (Kuva 21). Laatu oli riittävä kuitenkin siihen, että filamentti voitiin asettaa vetopyörien väliin ja aloittaa testit laadun parantamiseksi.



Kuva 21. Testin 1 3D-tulostusfilamenttia erittäin karhealla pinnalla

8.2.2 Testin 1 analysointi

H3 sekä H4 vastuksien lämpötiloja laskettiin jopa 40 °C, jotta saataisiin painetta pursotusruuville ja sen myötä tasaisempaa materiaalisyyttöä. Tämä perustuu siihen, että kiinteämpi materiaali työntäisi juoksevampaa materiaalia kehittäen painetta pursotusruuville. Syöttöruuvien nopeuksia nostettiin lähtöarvosta 0,5 r/m:n korotuksilla samalla tehden havaintoja, kuinka materiaali käyttäytyy. Testin aikana huomattiin, että syöttöruuvien nopeutta nostamalla saatiin jatkuvasti tasalaatuisempaa filamenttia. Pursotusruuvien nopeutta nostettiin tasaisesti, kunnes päätettiin 6,0 r/m:n arvoon.

Pursotetussa filamentissa on erittäin karhea ja epätasainen pinta. Tämä ei ole tyypillistä PA-filamenteille, vaan PA66-filamentissa on yleensä kirkas ja tasainen pinta (3devo support 2022d). Voi olla mahdollista, että tutkimuksessa käytettyä PA66-polymeeriä ei saa pursotettua sileäpintaiseksi sen ominaisuuksien vuoksi. Tutkimuksessa käytetty PA66-laatu on tarkoitettu ruiskuvalumuotteihin, ja pursotuslaadut ovat erikseen. Pinnankarheutta pyrittiin vähentämään nostamalla H1 lämpövastuksen lämpötilaa 295 °C:seen. Pinnankarheuden oletettiin johtuvan siitä, ettei materiaali sula tarpeeksi, ja vetopyörästä vetää jo jäähtynyttä materiaalia samalla repien sen pintaa. Lämpötilan nosto ei vaikuttanut pinnankarheuteen. Karheus olisi hyvä saada vähemmäksi, koska se voi oletettavasti kuluttaa Composer 450-laitteiston vetopyörästä kumipinnoitusta. Pinnankarheuteen voi vaikuttaa myös suuttimen koko. Joillakin materiaaleilla on eduksi, että suuttimen halkaisija on suunnilleen sama kuin pursotettavan materiaalin halkaisija. Nailon materiaali on 3devon asiantuntijoiden mukaan sellainen materiaali, joka voisi saada etua siitä, että sen halkaisijaa ei vedetä vetorullilla 4 mm:n suuttimesta 1,75 mm:n halkaisijalle. Suuttimen vaihdolla filamentti olisi jo lähes oikeassa halkaisijassa suuttimesta ulos tullessaan. (3devo support 2022d.)

Composer laitteisto pyrkii saamaan pursotusruuvien ja vetopyörästä nopeuden synkronoitua sellaiseksi, jotta voidaan tuottaa tasalaatuisia filamentteja. Jos pursotusruuvi ei syötä materiaalia tasaisesti johtuen esimerkiksi materiaalin alhaisesta viskositeetista, voi vetopyörästä olla vaikeuksia pitää filamentin halkaisijamittaa tasaisena. Tämä voi mahdollisesti aiheuttaa karheutta. Ongelmana voi myös olla suuttimen likaisuus sekä vetopyörän pinnan viallisuus (3devo 2022u).

Tuulettimien pyörimisnopeuksia ei kyetty testaamaan kuivatun materiaalin loputtua kesken. Syöttöruuvien nopeuden nosto, ja tämän myötä filamentin laadun paraneminen voisi osoittaa sen, että PA66-polymeerin pursotuksessa on pidettävä kiirettä.

8.3 Testi 2

Testiin 2 vaihdettiin 4 mm:n suutin 2 mm:n suuttimeen. Testi 2 tehtiin kierrättämättömästä PA66-polymeeristä. HDPE-puhdistusmateriaali ajettiin pursotusruuville ennen varsinaista testimateriaalia laskemaan viskositeettia.

Tuulettimien pyörimisnopeustestit aloitettiin 0 %:sta, koska suutin on vaihdettu pienempään. Suuttimen vaihdon jälkeen muuttuu tuulettimien sekä pursotusruuvin parametrit. Testiin 2 lähdettiin korkeammilla lämpötiloilla kuin testissä 1. Tällä pyrittiin varmistamaan se, että polymeerin seassa ei ole sulamattomia partikkeleita, sillä sulamattomat partikkelit saattavat tukkia 2 mm:n suuttimen helpommin kuin 4 mm:n suuttimen. Taulukko 3 esittää testin 2 aloitusparametrit.

Taulukko 3. Testin 2. aloitusparametrit

Suutin ∅	Kierrätysaste (%)	H4 (°C)	H3 (°C)	H2 (°C)	H1 (°C)	Tuulettimen nopeus (%)	Syöttöruuvien nopeus (r/m)	Kuivaus- aika (h)
2	0	280	285	290	290	0	6.5	12

8.3.1 Testin 2 tulos

Testissä 2 parannettiin filamentin pinnanlaatua huomattavasti, sekä saavutettiin suhteellisen tasainen filamentin halkaisijamitta (Kuva 22). Langassa on havaittavissa karheutta, mutta se on paljon vähäisempää kuin testin 1 tuloksessa. Filamenttilangan halkaisija pysyi noin 1,7–1,9 mm:n sisällä.



Kuva 22. Testissä 2 pursotettua kierrättämätöntä 3D-tulostusfilamenttia

8.3.2 Testin 2 analysointi

Ongelmaksi muodostui filamentin halkaisijamitan mitta-anturi, joka ajoittain jätti halkaisijan mittaamatta. Kun anturi ei jatkuvasti mittaa halkaisijaa, ei myöskään Devovision tee totuudenmukaista lokitiedostoa. Tässä tapauksessa filamentin halkaisijamitta ei välttämättä pysy kohdillaan, koska vetopyörästä ei tiedä sen hetkistä filamentin mitta. (3devo 2022b.)

Tuuletinnopeuksia testattiin 0, 15 ja 30 %:n nopeuksilla. 30-prosentin tuulettimien pyörimisnopeus värisytti jo filamenttia (Kuva 23), mikä todennäköisesti aiheutti mitta-anturin ongelmat lukea halkaisijaa. Ongelma havaittiin vasta kun filamenttilankaa oli aloitettu kiertämään rullalle, ja tästä syystä tuulettimia ei kannattanut enää säätää. Filamentti oli lisäksi soikeaa.

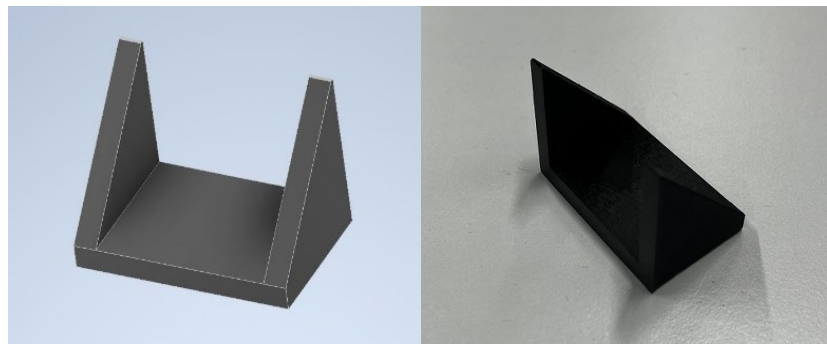


Kuva 23. Filamentin värinä tuulettimien takia

Filamentin värinän aiheuttaa todennäköisesti se, että filamenttilanka on tuulettimien kohdalla jo 2 mm:n halkaisijassa. Tämän lisäksi tutkimuksessa käytettävällä PA66-laadulla on korkea MFI-arvo. Vaikka 2 mm:n suutin toi parannuksia filamentin halkaisijamittaan sekä pinnanlaatuun, toi se uusia ongelmia filamentin epätasaisena kulkuna vetorullille. Pursotusruuvien kierrosnopeus, lämpötilat sekä tuulettimien pyörimisnopeudet ovat sidoksissa toisiinsa siinä, miten sulassa muodossa filamentti on vetorullille ja mentäessä. Jos tuulettimien pyörimisnopeutta laskee, voi silloin joutua laskemaan myös pursotusruuvien nopeutta. Lisäksi voi joutua alentamaan ensimmäisen lämpövastuksen (H1) lämpötiloja, jotta filamentti ei ole liian sulassa muodossa vielä vetorullilla. Pursotusruuvien nopeuden alentaminen voi taas tuottaa ongelmia filamentin laadussa, kun pursotusruuvien paine laskee liian alas. On löydettävä paras keskitie parhaalle laadulle. Tuulettimien asentoja säätämällä voisi myös saada filamentin värähtelyä vähennettyä.

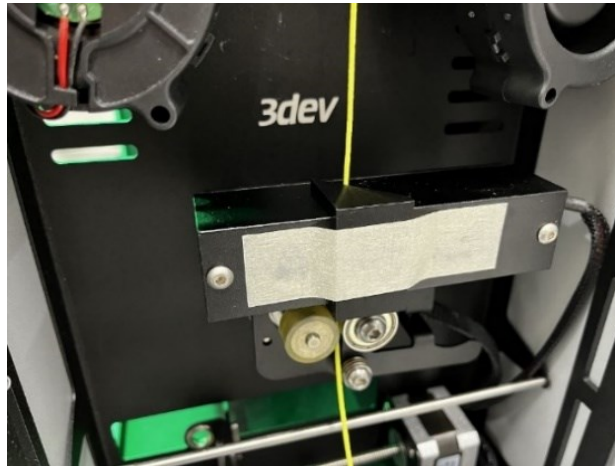
8.4 Testi 3

Testi 3 tehtiin 100 % kierrätetystä PA66-polymeeristä. Testissä 2 huomattu filamentin värähtely pyrittiin saamaan hallintaa 3devon verkkosivustolta ladatulla CAD-tiedostolla, josta voitiin 3D-tulostaa filamentinohjain (Kuva 24 vasen). Ohjain tulostettiin PLA-materiaalista (Kuva 24 oikea).



Kuva 24. Filamentinohjain Inventor CAD ohjelmistossa (vasen) ja valmis filamentinohjain (oikea)

Filamentinohjaimella pyritään siihen, että filamentin värähtely mitta-anturille mentäessä saataisiin hallintaan. Ohjain asennetaan mittausanturikotelon päälle ja kiinnitetään esimerkiksi teipillä (Kuva 25). Filamentinohjain voidaan myös 3D-tulostaa niin tiukalla sovitteella mitta-anturikoteloon, ettei kiinnitysteippiä tarvitse.



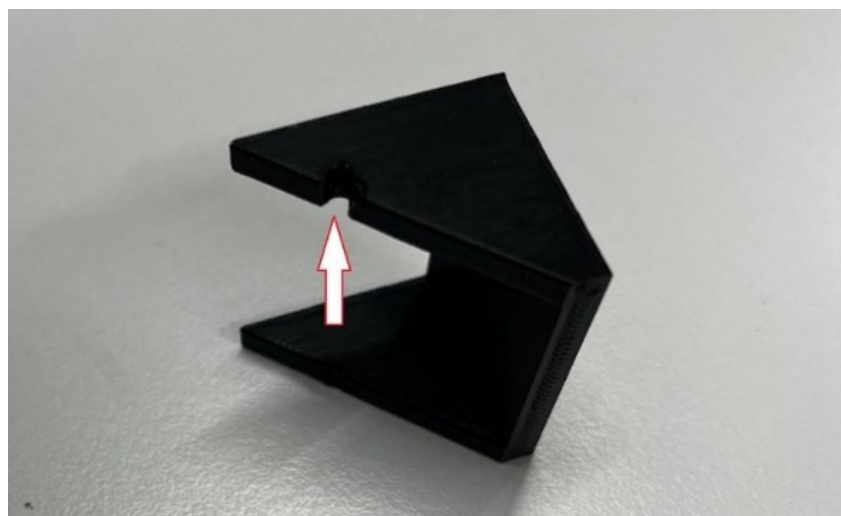
Kuva 25. Filamentti ohjain asennettuna mittausturikotelon päälle, teipin avustuksella

Testissä 3 HDPE-puhdistusmateriaali ajettiin pursotusruuville ennen varsinaista testimateriaalia laskemaan viskositeettia. Tämän jälkeen lämpötilat nostettiin pursotuksen aloituslämpötiloihin. Taulukko 4 esittää testin 3 aloitusparametrit.

Taulukko 4. Testin 3. aloitusparametrit

Suutin ∅	Kierrätysaste (%)	H4 (°C)	H3 (°C)	H2 (°C)	H1 (°C)	Tuulettimen nopeus (%)	Syöttöruuvien nopeus (r/m)	Kuivaus- aika (h)
2	100	280	285	290	290	30	7.3	12

Pursotusruuvin nopeutta nostettiin noin 1 r/m korotuksilla täyteen 15 r/m:n vauhtiin asti, ja samalla tehtiin havaintoja filamentin laadussa. Laadussa ei havaittu parannuksia. Filamentti ohjaimen reuna suli 30 %:n tuulettimien pyörimisnopeudella sekä suurilla pursotusruuvin nopeuksilla (Kuva 26).



Kuva 26. Sulanut filamentti ohjain

Pursotusnopeutta laskettiin, ja tuulettimien pyörimisnopeuksia lisättiin, jotta säävutettaisiin pyöreää filamenttia. Samalla voitaisiin mahdollisesti estää filamentinohjaimen sulaminen. Tuulettimien pyörimisnopeuksia voitiin nostaa, koska filamentinohjain rauhoitti filamentin heiluntaa mitta-anturilla.

8.4.1 Testin 3 tulos

Testissä 3 tuotettiin hyvälaatuista 100 % kierrätettyä PA66-filamenttia (Kuva 27). Filamentissa on pientä karheutta, mutta se on vähäisempää kuin testin 2 tuloksesta.

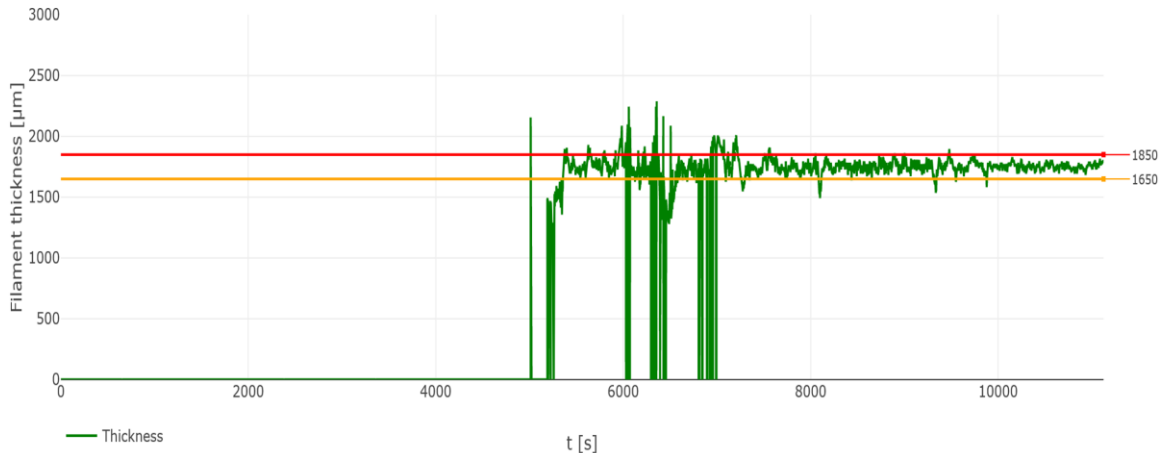


Kuva 27. 100 % Kierrätettyä PA66-filamenttia

Filamentin halkaisijamitta pysyi tasaisena, mutta oli 0,15 mm alimittaista. Standardi halkaisija on 1,75 mm. Filamentin pinnanlaatu on silti erinomainen verrattuna edellisiin testituloksiin.

8.4.2 Testin 3 analysointi

Devovisionin mukaisesti filamentti pysyi keskimäärin 1,75 mm:n halkaisijassa (Kuvio 4), mutta lopullinen tuote oli noin 1,6 mm:n halkaisijalla. Syy tälle voi olla esimerkiksi mitta-anturin likaisuudessa (3devo 2022b). Ongelma voi olla myös se, että filamentinohjain työnsi filamenttilankaa ohi mitta-anturin lukupään aiheuttaen samalla alimittaista filamenttia.



Kuvio 4. Devovision lokitietoa testin 3 aikana

Todennäköisesti alimittainen filamentti ei vaikuta 3D-tulostamisen onnistumiseen, koska 3D-tulostimen viipalointiohjelmissa voi filamentin halkaisijamittaa säätää. Ainoat ongelmat voisivat tulla siinä, että tulostimen tulostuspään vetopyörästä ei yltäisi puristamaan ohuempaa filamenttia. Ohuemman langan tulostamista testattiin Original iPrusaMK3 3D-tulostimella, ja pienempi halkaisija ei tuottanut tulostimelle ongelmia langansyötön kanssa. Filamentinohjain rauhoitti filamentin heiluntaa, mutta todennäköisesti aiheutti samalla alimittaista filamenttia.

8.5 Testi 4

Testi 4 tehtiin kierrättämättömästä PA66-polymeeristä. Testissä lähdettiin testaamaan, voisiko ensimmäisen lämmitysvastuksen (H1) lämpötiloja laskea, jotta voitaisiin estää filamentinohjaimen sulaminen. Samalla voitaisiin mahdollisesti säästää pyöreää filamenttia. Filamentin mennessä vetorullille liian kuumana saatetaan se mennä soikeaksi vetorullien painaessa sitä kasaan. HDPE-puhdistusmateriaali ajettiin pursotusruuville ennen varsinaista testimateriaalia laskemaan viskositeettia. Taulukko 5 esittää testin 4 aloitusparametrit.

Taulukko 5. Testin 4. aloitusparametrit

Suutin ∅	Kierrätysaste (%)	H4 (°C)	H3 (°C)	H2 (°C)	H1 (°C)	Tuulettimen nopeus (%)	Syöttöruuvien nopeus (r/m)	Kuivaus- aika (h)
2	0	280	280	290	280	30	8	13

8.5.1 Testin 4 tulos

Testissä 4 saavutettiin 3D-tulostuskelpoista kierrättämätöntä PA66-filamenttia (Kuva 28). Pinnassa on edelleen havaittavissa karheutta, mutta se on hyvin vähäistä. Filamentti pysyi noin $1,75 \pm 0,1$ mm:n halkaisijassa.



Kuva 28. Testissä 4 pursotettua kierrättämätöntä 3D-tulostusfilamenttia

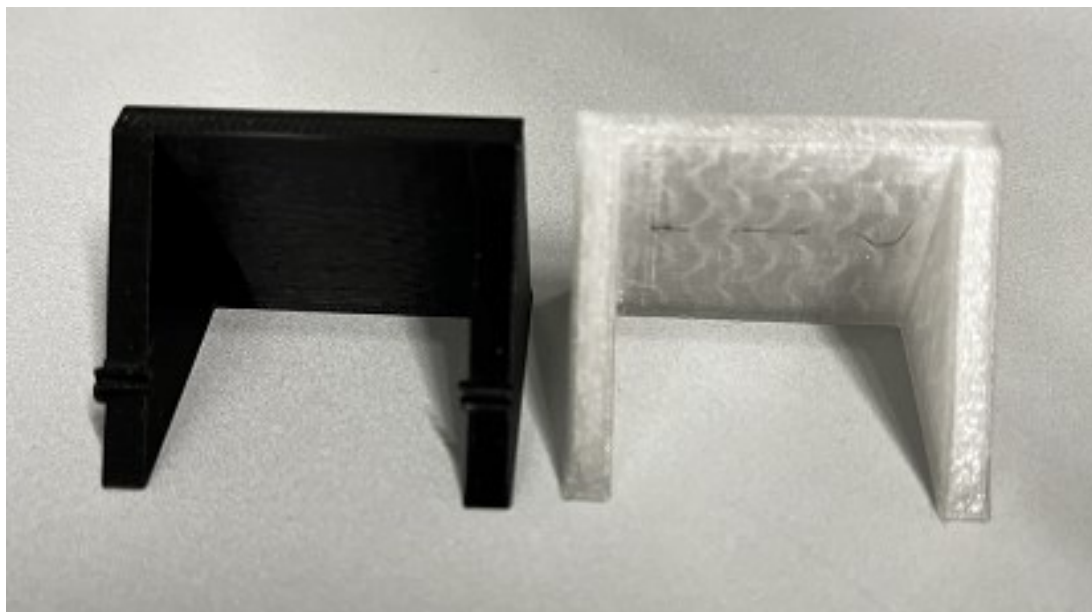
8.5.2 Testin 4 analysointi

Koska H1 vastuksen lämpötilaa laskettiin, alennettiin hieman myös pursotusruuvien kierroksia testin aloitusparametreista, jotta lämpövastuksilla on tarpeeksi aikaa sulattaa materiaalia. Testissä 4 pyrittiin siihen, että filamentti olisi täysin pyöreää ja oikeassa halkaisijassa. Tuulettimien pyörimisnopeus täytyi lopulta nostaa 100 %:iin, jotta filamentti pysyisi pyöreänä.

Filamentin mitta-anturi mittasi edelleen väärää halkaisijaa, ja valmis filamentti oli testausvaiheessa noin 0,15 mm alimittainen. Mitta-anturin toimivuus testattiin laittamalla anturin mittausalueelle poranterä, jonka halkaisija tiedettiin. Mitta-anturi mittasi poranterän halkaisijan oikein. Tästä pääteltiin todennäköisen syyn alimittaiselle filamentille löytyvän siitä, että filamentinohjain työntää filamenttia ohi mitta-anturin samalla tuottaen virheellistä dataa Devovision-ohjelmistolle. Ongelma ohitettiin sillä, että Composer 450-laitteelle asetettiin filamentille halkaisijaparametri arvoon 1,90 mm. Näin toimiessa tuotettu filamentti oli oikeassa 1,75 mm:n halkaisijassa. Kuivausaika on poikkeavasti 13 h, koska ennen pursotusta granulaatteja kuivattiin vielä 2 h, jotta voitiin varmistaa niiden kuivuus.

8.6 Testi 5

Testi 5 tehtiin 50/50 %:n seossuhteella. Testiin 5 valmistettiin uusi filamentinohjain (Kuva 29). Uusi ohjain valmistettiin läpinäkyvästä ja kierrätetystä rPETG-filamentista. rPETG kestää korkeampia lämpötiloja kuin PLA, joka oli edellisen ohjaimen valmistusmateriaali (Filamentive 2021).



Kuva 29. rPETG-materiaalista valmistettu filamentinohjain kuvassa oikealla

Seossuhteen valmistuksessa punnittiin molempia materiaaleja 200 g, minkä jälkeen seos sekoitettiin lasipurkissa. Seossuhdetta kuivatettiin Airid Polymer Dryer-kuivaimessa ennen pursotusta 3 tuntia, jotta voitiin varmistaa seoksen kuivuus. HDPE-puhdistusmateriaali ajettiin pursotusruuville ennen varsinaista testimateriaalia laskemaan viskositeettia. Tämän jälkeen lämpötilat nostettiin pursotuksen aloituslämpötiloihin. Taulukko 6 esittää testin 5 aloitusparametrit.

Taulukko 6. Testin 5. aloitusparametrit

Suutin ∅	Kierrätysaste (%)	H4 (°C)	H3 (°C)	H2 (°C)	H1 (°C)	Tuulettimen nopeus (%)	Syöttöruuvien nopeus (r/m)	Kuivaus- aika (h)
2	50	280	280	290	280	55	7	15/16

8.6.1 Testin 5 tulos

Testissä 5 tuotettiin 50/50 %:n seossuhteella olevaa 3D-tulostuskelpoista filamenttia (Kuva 30), jonka halkaisijatoleranssi on noin $1,75 \pm 0,1$ mm. Pääosin filamentti on standardi 1,75 mm:n halkaisijassa.



Kuva 30. 50 % kierrätettyä PA66-filamenttia

8.6.2 Testin 5 analysointi

Testissä 5 ei tarvinnut Composer 450-laitteelle asettaa filamentin halkaisijamitta-parametria suuremmaksi, jotta voitiin tuottaa oikean halkaisijan filamenttia. Luvussa (8.4.2) mahdolliseksi syyksi halkaisijan heittelylle pääteltiin olevan se, että filamentinohjain työntää filamenttia ohi mitta-anturin. Mahdollisesti syynä voisi myös olla se, että edellinen mustasta PLA:sta (Kuva 24) valmistettu filamentinohjain häiritsi anturin mittausta, kun taas läpinäkyvästä rPETG-materiaalista valmistettu ohjain ei tätä tehnyt. rPETG-materiaalista valmistettu ohjain kesti kulumatta koko testin ajan. Huomattiin myös se, että jos laitteiston oven aukaisee kesken pursotuksen, voi se aiheuttaa halkaisijamittan heittelyä johtuen sen aiheuttamasta muutoksesta tuulettimien toimintaan. Kuvio 5 esittelee testin 5 aikaista Devovisionin lokitallennusta.



Kuvio 5. Testin 5 Devovision lokitiedostoa

Testissä havainnoitiin myös se, että materiaali oli mattapintainen jo ennen kuin sitä oli asetettu vetopyörille. Pinnanlaadun mattapintaisuus ei siis johdu siitä, että vetopyörät vetäisivät osittain sulanutta materiaalia samalla repien sen pintaa. Tuulettimien pyörimisnopeus täytyi testissä 5 nostaa 100 %:iin, jotta voitiin sää-
vuttaa pyöreää filamenttia. Tuulettimien pyörimisnopeus olisi hyvä saada noin 50 %:iin, jotta niiden pyörimisnopeudessa olisi säätömahdollisuutta. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi vähentämällä pursotusruuvin pyörimisnopeutta, jotta su-
lassa olomuodossa olevalla filamentilla on enemmän aikaa jäähtyä ennen veto-
rullia. Tämä voi taas johtaa siihen, että pursotusruuvin lämpötiloja on laskettava, jotta saadaan riittävä paine materiaalisyötölle. Lisäksi 3devon verkkosivuilta voi-
daan ladata STL-tiedosto, josta voidaan 3D-tulostaa apulaite, jolla tuuletus voi-
daan kohdistaa ympäri filamenttilankaa. Laite esitellään luvussa 10.4.

9 3D-TULOSTUSTESTIT

9.1 PA-filamentit 3D-tulostuksessa

Seostamatonta PA66-filamenttia käytetään vähän 3D-tulostamisessa. Kuitenkin PA6/PA66:n kaltaiset seokset ovat yleisesti käytössä olevia tulostusfilamentteja (3D Prima 2022). Yleisimpiä PA-filamentteja ovat PA6, PA12 sekä komposiitit lasikuidulla ja hiilikuidulla. Yleensä PA-filamentteihin on lisätty jotain lisäaineita, joilla voidaan pyrkiä vähentämään esimerkiksi Warp ongelmia 3D-tulostamisessa (Dubert 2020).

Novamid® ID1070 PA-filamentin myyntisivustolla kerrotaan sen olevan puhdasta PA6-filamenttia (Formfutura 3D Printing Materials 2021). Novamid® ID1070 PA-filamentin viipalointiohjelmiston asetuksia voisi verrata tutkimuksessa tulostettavaan PA66-polymeeriin, jota ei myöskään ole seostettu millään tavalla. 100 % kierrätettyyn PA66-polymeeriin on lisätty ainoastaan väriainetta. Koska PA66-filamentille ei ole valmiita asetuksia viipalointiohjelmistossa, on jostain haettava perusasetuksia, joista voitaisiin lähteä 3D-tulostamista testaamaan. On silti otettava myös huomioon PA66-polymeerin noin 40 °C korkeampi sulamispiste.

Novamid® filamentin tulostuslämpötilaksi on suositeltu 245–285 °C, tulostustason lämpötilaksi 100–120 °C sekä tuulettimien voimakkuudeksi 0 %. Taulukko 7 esittelee Novamid® ID1070 PA6-filamentin tulostusparametrejä.

Taulukko 7. PA6 Novamid®-filamentin suositeltavat parametrit (mukailten Formfutura 3D Printing Materials 2021)

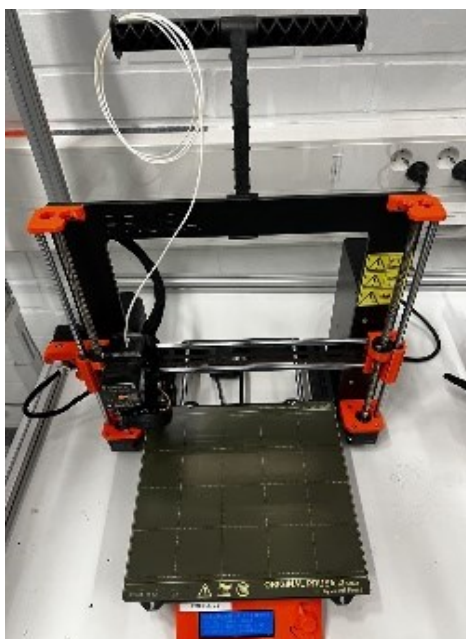
Suuttimen koko: ≥ 0.4 mm	Kerrospaksuus: ≥ 0.1mm
Tulostuslämpötila: $\pm 245\text{--}285^\circ\text{C}$	Tulostusnopeus: Medium / High
Tulostinpeti lämpötila: $\pm 100\text{--}120^\circ\text{C}$	Tuulettimien pyörimisnopeus: 0 %
Kotelointi: Kyllä	Lämmitetty kotelo: Kyllä
Materiaalinsyöttönopeus: ± 100 %	Tulostusalusta: PEI Sheet / DimaFix

Novamid® PA6-filamentin 3D-tulostamisessa suositellaan lämmitettävää tulostimen kotelointia. Prusa i3 MK3s-tulostimet Lapin ammattikorkeakoulun 3D-tulostuslaboratoriossa eivät ole koteloituja. Laboratorion 3D-tulostimet ovat suljetussa tilassa, mutta se ei ole tarpeeksi tiivis tuottamaan kotelolle lämpötilaa, jota tarvitaan PA66-filamentin 3D-tulostamisessa. Olisi tärkeää saada mahdollisimman vähäiset lämpötilavaihtelut 3D-tulostamisen aikana. Ilman tiivistä kotelointia tämä ei ole mahdollista.

Nailonfilamenteille suositellaan yleisesti, että filamenttirullaa kuivataan ennen 3D-tulostamista 4 tuntia tai enemmän, jos filamenttirulla on ollut kosketuksissa ilmankosteuden kanssa (Formfutura 3D Printing Materials 2021). Aina kun nailonfilamenttia tulostetaan, on filamenttirulla kosketuksissa ilman kanssa, joten kosteuden poisto voi olla suositeltavaa tehdä ennen jokaista tulostamista. Syy tälle on se, että vähäinenkin kosteus PA-filamentissa aiheuttaa ongelmia 3D-tulosteen laadussa.

9.2 3D-tulostustestit Prusa i3 MK3s-tulostimella

Tutkimuksen yhtenä tavoitteena on tehdä 3D-tulostustestejä PA66-kierrätyspolymeeristä. Tämä toteutetaan Lapin ammattikorkeakoulun 3D-tulostuslaboratoriossa olevalla Prusa i3 MK3s tulostimella (Kuva 31).

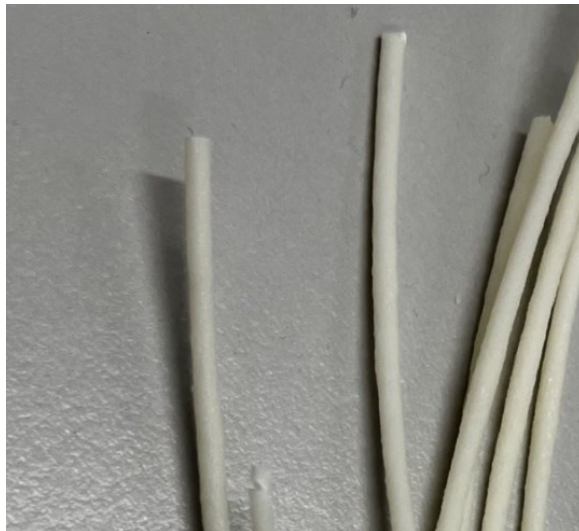


Kuva 31. Prusa i3 MK3s 3D-tulostin

Prusa i3 MK3s tulostimen suuttimen maksimilämpötila on ilmoitettu olevan 300 °C (Suomen 3D-ratkaisut 2021). Tämä on korkein lämpötila, johon yksikään tulostin kykenee Lapin ammattikorkeakoulun 3D-tulostuslaboratoriossa. Käytännössä lämpötila saattaa olla hieman alempi, koska tulostuslämpötila nousee myös tulostuspöydän lämpötilojen takia. Tämä oletettavasti vaikuttaa lämpötilantureihin, jotka mittaavat, että tulostin ei ylikuumene. Prusa i3 MK3s 3D-tulostin käy tähän tutkimukseen hyvin, koska se pystyy tulostamaan filamenttilankaa, jonka halkaisija saattaa heitellä lämpötilatestien vuoksi paljon.

9.3 Testi 1

3D-tulostustestit aloitettiin kierrättämättömästä PA66-filamentista. Filamentissa on karhea pinta, sekä sen halkaisija vaihtelee noin 0,1–0,3 mm (Kuva 32). Karhea pinta ei vaikuta 3D-tulostamisen onnistumiseen, mutta halkaisijaheitot voi tietyissä 3D-tulostimissa olla ongelmallisia. Filamenttia otettiin rullasta testiin vain tarvittava määrä ja loput sijoitettiin kuivakaappiin. Toimenpiteellä pyrittiin siihen, että filamenttirullaan ei imeytyisi kosteutta tulostamisen aikana. Tarvittavan filamentin määrän näkee yleensä viipalointiohjelmistosta.

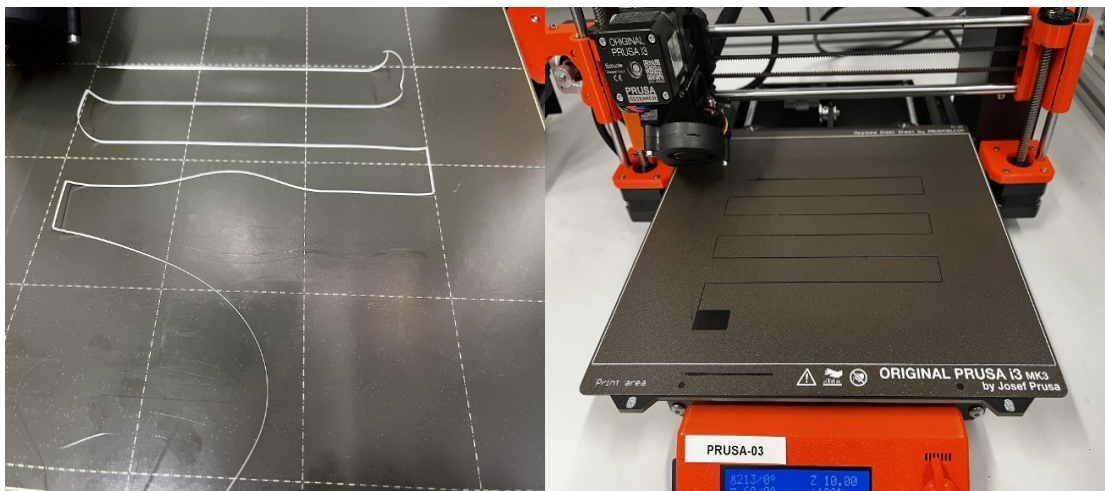


Kuva 32. kierrättämätöntä PA66-filamenttilangan pätkiä

PA66-filamentin 3D-tulostamiseen PrusaSlicer-viipalointiohjelmassa ei ole valmiita asetuksia, joten lämpötilat on vain testattava. Koska edellä mainitun Novamid®-filamentin tulostuslämpötilaksi on suositeltu 245–285 °C ja PA6-polymeerin sulamislämpötila on noin 223 °C (Omnexus SpecialChem 2022), voidaan PA66-

filamentin tulostamista (263 °C) lähteä testaamaan noin 280–300 °C:n lämpötiloissa. Yli 300 °C:n lämpötiloihin ei kannata mennä, koska se voi aiheuttaa värimuutoksia ja termistä hajoamista (Polymerik Oy 2022).

Testit aloitettiin kalibroimalla suuttimen korkeus tulostinpöydästä. Toimenpiteellä pyritään saamaan PA66-filamentille paras tarttuvuus tulostuspöytään. Kun suuttimella on oikea korkeus tulostinpöydästä, on filamentilla yleensä silloin myös paras tarttuvuus pöytään. Prusa i3 MK3s tulostimessa on toiminto, jossa tulostinpäätä ajetaan edestakaisin tulostinpöydällä samalla nostaen tai laskien tulostinpäätä manuaalisesti korkeuteen, jossa filamentti tarttuu parhaiten kiinni pöytään. Tätä tarttuvuutta voi testata vetämällä sormella tulostetun testinauhan päältä ja todeta, missä suuttimen korkeudessa tarttuvuus tulostuspöytään on parhainta (Kuva 33 vasen). Menetelmä on suhteellisen yksinkertainen ja toimiva keino löytää ensimmäisen kerroksen paras tarttuvuus. Esimerkiksi PLA-filamentilla tarttuvuus löytyy yleensä melko nopeasti. Kuva 33 oikealla esittelee PLA-filamentin korkeustestejä.



Kuva 33. PA66-filamentti korkeustestissä (vasen) ja PLA-filamentin korkeustesti (oikea)

PA66-filamentti tarttui huonosti tulostuspöytään huolimatta siitä, mitä lämpötiloja tai tulostinpään korkeutta tarttumisen edistämiseksi testattiin. Tarttuvuustestit aloitettiin 270 °C:n lämpötiloista ja lopetettiin 290 °C:n lämpötilassa. Ensimmäinen kerros on saatava tarttumaan tulostuspöytään, jotta 3D-tulostus on ylipääntään mahdollista.

Nailon materiaaleille suositellaan käytettäväksi liimakynää ensimmäisen kerroksen tarttuvuuden takaamiseksi (Simplify3D 2022). Tutkimuksessa otettiin käyttöön liimakynä, joka on merkiltään DimaFix (Kuva 34). DimaFix liimakynää suositellaan käytettäväksi myös Novamid® ID1070 PA6-filamentin tulostuksessa (Taulukko 7). Kynän toiminta perustuu lämpötiloihin, ja se kiinnittää tulostettavan kappaleen tulostinpöytään sitä lujemmin, mitä korkeampi lämpötila pöydällä on. Paras tarttuvuus saavutetaan yli 95 °C:n lämpötiloissa.



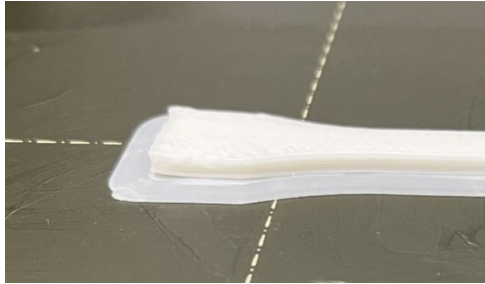
Kuva 34. Dimafix liimakynä tulostettavan kappaleen kiinnityksen parantamiseksi tulostuspöytään (3DJAKE 2022a)

Tarttuvuuden parantamiseksi vähennettiin myös ensimmäisen kerroksen tulostusnopeutta, sekä lisättiin filamentinsyöttöä, jotta pursotettu muovi painautuisi paremmin alustaa vasten. Kun ensimmäinen kerros saatiin kohtalaisesti tarttumaan tulostuspöytään, voitiin tulostustestit aloittaa. Testitulosteeksi valittiin koevetosauva 1BA standardista DIN EN ISO 527-2:2012.

9.3.1 Testin 1 tulos

Ensimmäisessä 3D-tulostustestissä ongelmaksi muodostui nailon materiaaleille tyypillinen ongelma, jota yleisesti kutsutaan nimityksellä ”Warp” eli nurkkien irtoa-

minen tulostusalustasta (Kuva 35). Ongelmaa esiintyy eniten korkeissa tulostuslämpötiloissa. Yleensä ilmiö on havaittavissa tulostettavan kappaleen reunoilla, jotka nousevat ylös tulostuspöydästä.



Kuva 35. Warp-ilmiö kierrättämättömän PA66-polymeerin testitulostamisessa

PA66-filamentin 3D-tulostuksessa ongelmaksi muodostui myös kerroksien tarttumattomuus toisiinsa (Kuva 36). Todennäköisesti ongelman aiheuttaa liian alhaiset 3D-tulostuslämpötilat tai liian suuret lämpötilavaihtelut tulostamisen aikana.



Kuva 36. Kerroksien tarttumattomuus toisiinsa

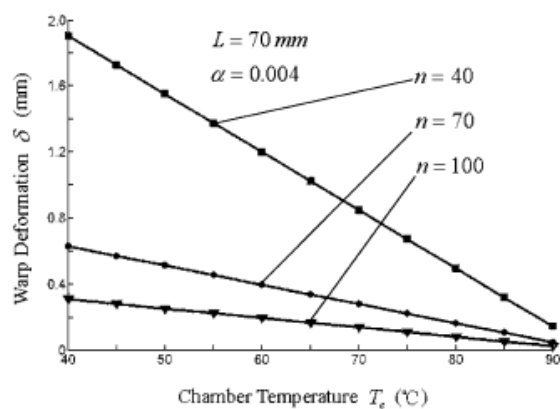
Testit aloitettiin 270 °C:n lämpötilasta. Lämpötiloja nostettiin tasaisesti, ja pyrittiin saamaan kerrokset tarttumaan toisiinsa, kunnes Prusa i3 MK3s lämpötila-anturit antoivat hälytyksen. Ylilämpötilahälytys tapahtui suuttimen lämpötilan ollessa 290 °C. Tulostinpöydän lämpötila oli hälytyksen sattuessa 115 °C.

9.3.2 Testin 1 analysointi

Nailon materiaalit ovat erittäin herkkiä Warp-ilmiölle, ja on toimenpiteitä, joilla voidaan tätä ilmiötä yrittää vähentää. Ongelmaa voidaan jossain määrin vähentää suljetulla kotelolla. Paras vaihtoehto olisi lämmitettävä tulostuskammio, joka varmistaisi tasaisen lämpötilan tulostuksen aikana (Simplify3D 2022). Esimerkiksi The MiniFactory Ultra 3D printer-tulostimessa on tulostuskammio, joka voidaan lämmittää 250 °C:n lämpötilaan asti (MiniFactory 2022). Tällaiset tulostimet ovat

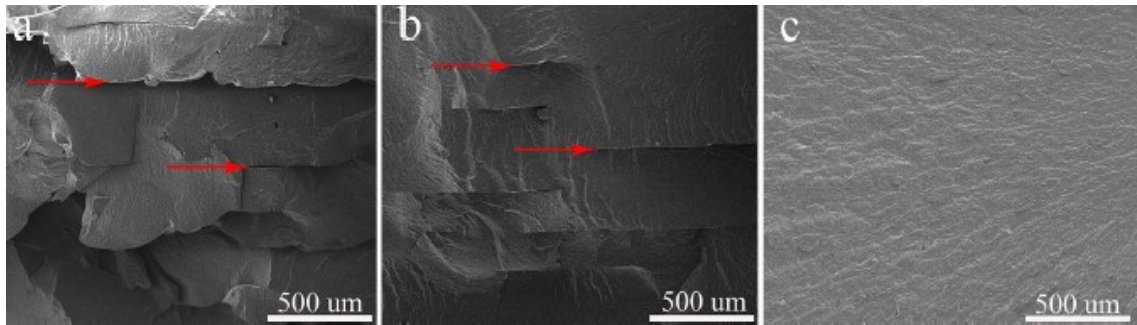
erittäin kalliita, joten vaihtoehtona voisi myös olla rakentaa lämmityksellä varustettu kotelo itse. Tätä asiaa käsitellään luvussa 10.3.

Wang, Xi, & Jin (2007, 1088–1089) ovat tutkimuksessaan FDM-tulosteiden muodonmuutoksista todenneet, että Warp-ilmio johtuu tulostamisen aikana syntyvistä liian suurista lämpötilavaihteluista. Ongelma syntyy filamentin jäähtyessä lasittumislämpötilasta tulostinkotelon lämpötilaan. Voitaisiin näin ollen olettaa, että Warp-ilmio vähenisi tasoittamalla lämpötilaeroja 3D-tulostamisen aikana. Tutkimuksessa käytettiin ABS P400-materiaalia, mutta Warp-ongelma johtuu samasta syystä myös PA66-polymeerillä, joten heidän tutkimuksensa tuloksia voidaan verrata tässä tutkimuksessa käytettävään materiaaliin. Edellä mainittuun tutkimukseen on viitattu myös tuoreemmassa vuonna 2021 tehdyssä ja vertaisarvioidussa tutkimuksessa ABS-muovin vääntymisestä 3D-tulostamisen aikana (Ramian, Ramian & Dziob 2021, 3), joten tiedon voidaan näin ollen olettaa olevan edelleen ajankohtaista. Wang ym. (2007, 1093) tekemässä tutkimuksessa käytettiin lämmitettävää 3D-tulostinkoteloja ja havaittiin se, että vääntyminen vähenee sitä mukaa, mitä korkeampi lämpötila kotelolla on. Tämä voidaan todeta koordinaatistosta (Kuva 37), jossa on nähtävissä kotelon lämpötilan vaikutukset kappaleen muodonmuutoksiin eri kerrospaksuuksilla. Kun kotelon lämpötila on tulostettavan muovin lasittumislämpötilassa, ei tutkimuksen mukaan muodonmuutosta enää synny. Tutkimuksessa kuitenkin todetaan myös, että jokaiselle materiaalille on etsittävä tapauskohtaisesti paras kotelonlämpötila (Wang ym. 2007, 1093).



Kuva 37. Tulostuskotelon lämpötilan vaikutus kappaleen taipumiseen (Wang ym. 2007, 1094)

Kerroksien tarttuvuutta (Kuva 36) voidaan myös yrittää parantaa alentamalla tulostusnopeutta sekä lisäämällä suuttimen lämpötilaa ja materiaalin syöttönopeutta (O'Connell 2022). Liao ym. (2022, 196) ovat havainneet, että PA66-polymerin 3D-tulostamisessa paras vetolujuus saavutetaan 290 °C:n suuttimen lämpötilalla ja 225 °C:lla tulostuspöydällä. Nostettaessa suuttimen lämpötilaa 270 °C:sta 290 °C:seen saavutettiin lähes 30 %:n parannus vetolujuudessa. Tämän korkeammalle lämpötiloissa ei kannattanut mennä, koska murtovenymä kärsi huomattavasti yli 300 °C:n lämpötilassa. Lisäksi huomattiin, että 290/225 °C:n parametreilla kappaleessa ei ollut havaittavia kerrosvälejä. Tämä tukee tietoa siitä, että tässä lämpötilassa voitiin saavuttaa paras vetolujuus. Kuva 38 esittelee tulostinpöydän lämpötilojen vaikutusta kerroskiinnittymiseen.



Kuva 38. PA66 3D-Tulosteen kerroksien kiinnittyminen tulostinpöydän lämpötiloissa (a) 205°C, (b) 215°C ja (c) 225°C (Liao ym. 2022, 195)

Liao ym. (2022) käyttämä menetelmä, jossa tulostuspöydän lämpötila nostetaan erittäin korkealle 225 °C:seen, toimii todennäköisesti vain matalilla kappaleilla. Päätely tähän on se, että tulostustason lämpötila ei välttämättä riitä kovin korkealle, jossa se edelleen vaikuttaisi kerroksien tarttuvuuteen. Näin ollen paras vaihtoehto taipumisen vähentämiseen sekä kerrostarttuvuuden parantamiseen voisi olla lämmitettävä kotelointi. Samassa tutkimuksessa havaittiin myös se, että alle 200 °C:n tulostinpöydän lämpötiloilla kappaleilla oli taipumusta Warp-ilmiöön. Tämä oli syynä siihen, että kyseisessä tutkimuksessa käytettiin erittäin korkeita tulostinpöydän lämpötiloja. (Liao ym. 2022, 194.) Tulostinpöydän lämpötilaa voisi todennäköisesti laskea lämmitettävällä koteloinnilla, millä saataisiin koko kappale pysymään tasalämpöisenä. Lisäksi taipumisilmiötä voidaan yrittää vähentää pyöristämällä kappaleen reunoja tai lisäämällä lisäaineita, kuten hiilikuitua. Kappaleen reunojen pyöristäminen perustuu siihen, että yleisin paikka taipumiselle on kappaleen terävät nurkat. (Markforged 2022.) Hiilikuitu auttaa 3D-tulostamisessa

vähentämään kappaleiden Warp-ilmiötä tasoittamalla tulostamisen aikaisia lämpötiloja. Tämä syystä, että hiilikuitu ei sula tulostettavan polymeerin mukana. (Juan 2021.)

9.4 3D-tulostustestit Raise 3D E2-tulostimella

Tulostustestejä jatkettiin Raise 3D E2-tulostimella (Kuva 39), jossa on tiivis kotelointi ilman kotelolämmitystä. Tulostinpään maksimilämpötila on 300 °C ja tulostinpyödyksen 110 °C (3D Cadsolutions 2022).



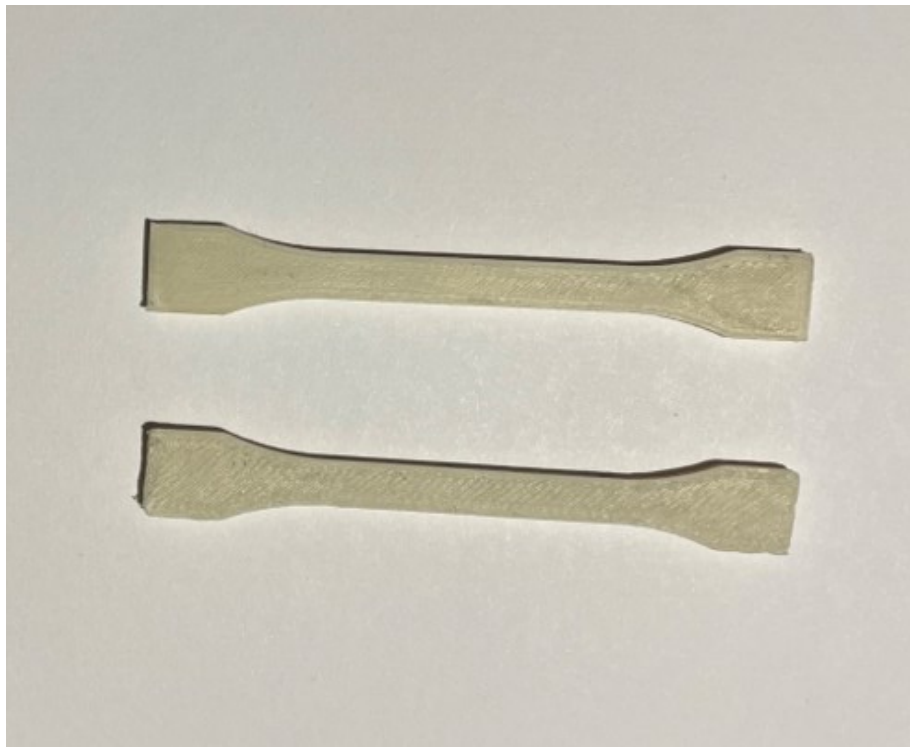
Kuva 39. Raise 3D E2 3D-tulostin (3D Cadsolutions 2022)

9.5 Testi 2

Kotelon tulostuslämpötilan suositellaan nailon materiaaleille olevan noin 45 °C (Simplify3D 2022). Tämä ei kuitenkaan todennäköisesti käsittele PA66-polymeeriä vaan muita yleisesti saatavilla olevia nailon 3D-tulostusfilamenttejä. Taipumisen minimoimiseksi tulostintaso lämmitettiin 110 °C:seen ja annettiin olla tässä lämpötilassa noin 10 minuuttia, jotta kotelon sisälämpötila nousisi tasoittamaan tulostamisen aikaisia lämpötiloja. Kotelon sisälämpötilaa ei voitu mitata. Tulostustestissä käytettiin DimaFix liimakynää (Kuva 34) tulosteen kiinnittämisen varmistamiseksi.

9.5.1 Testin 2 tulos

Raise 3D E2-tulostimella testisauvojen 3D-tulostaminen onnistui (Kuva 40). Tulosteet pysyivät kiinni tulostuspöydässä, sekä samalla saavutettiin parempi kerroksien tarttuvuus. Kotelointi auttoi selvästi 3D-tulostamisen onnistumiseen. Raise 3D E2-tulostimessa on kotelotuuletus, jota ei voi kytkeä irti muutoin kuin irrottamalla tuulettimen johdon. Tuuletuksen pois kytkentä voisi auttaa siihen, että kotelon lämpötila pysyisi tasaisempänä.



Kuva 40. Onnistuneet testisauvat Raise 3D E2-tulostimella

9.5.2 Testin 2 analysointi

Tulostettavat kappaleen ovat vain 2 mm korkeita, joten ei voida olla varmoja siitä, miten tulostaminen onnistuisi korkeammilla kappaleilla. Tulostin sijaitsee asuinhuoneistossa, eikä siinä ole kohdepoistoa. Vaikka tulostin on koteloitu, ei nailon materiaalia kannata 3D-tulostaa ilman hyvää kohdepoistoa tiloissa, jossa oleskellaan säännöllisesti. Testejä ei tästä syystä jatkettu Raise 3D E2-tulostimella. Testissä saavutettiin kuitenkin se, että voitiin todeta 3D-tulostamisen olevan mahdollista PA66-polymeerillä. Tulosteissa on selvästi havaittavaa vähäistä värimuu-

tosta (Kuva 40), joka johtuu todennäköisesti 295 °C:n tulostuslämpötilasta. Lämpötilaa voitaisiin mahdollisesti pudottaa lämmitettävällä kotelolla noin 5–10 °C ja silti saavuttaa hyvä kerrostarttuvuus. Kappaleet ovat odottamattomasti erittäin taipuisia, joten niitä voi taivuttaa suuressa määrin ilman näkyvää vaurioita (Kuva 41). Kappaleet lisäksi palautuvat taivutuksen jälkeen entiselleen, joten niiden on täytynyt imeä kosteutta jo 2 %:n verran, että ovat saaneet taipumisominaisuuden. Seppälä (2005, 214) on todennut PA66-polymeerin olevan kuivana haurasta. Asiaa on käsitelty luvussa 3.1.



Kuva 41. Tulostettu PA66-polymeeri on erittäin taipuisaa

10 PARANNUSEHDOTUKSET

10.1 Composer 450-laitteiston materiaaliseuranta

Testien alussa tapahtunut Composer 450-laitteen pursotusruuville olleen polymeerin terminen hajoaminen toi ajatuksia materiaaliseurannan lisäämiseksi laitteen jokapäiväiseen käyttöön. Vaikka laitteen pursotusruuville ei virrankatkaisun jälkeen saa jäädä kuin PLA, HDPE- tai Devoclean Mid-Temperature-puhdistusmateriaali, olisi silti hyvä tietää, mitä materiaalia laitteen sisälle on jätetty. Näillä kaikilla kolmella materiaalilla on erilaiset viskositeetti- ja lämpötilaominaisuudet. Parannusehdotuksena voisi olla lista siitä, mitä koneella on viimeksi pursotettu. Tällä voitaisiin välttää tilanne, että pursotusruuville termisesti hajoaisi polymeeriä liian korkeista pursotuslämpötiloista. Samalla säästettäisiin puhdistusmateriaaleja. Kuva 42 esittelee ehdotusta Composer 450-laitteiston materiaaliseurantalistaksi.

Päivämäärä:	Materiaali Composer 450 pursotusruuville:
6.5.2022	PLA
7.8.2022	Devoclean Mid-Temperature
13.9.2022	HDPE
17.9.2022	Devoclean Mid-Temperature

**HUOM! PURSOTUSRUVILLE SAA VIRRANKATKAISUN
JÄLKEEN JÄÄDÄ VAIN SEURAAVAT MATERIAALIT:**
PLA
Devoclean Mid-Temperature
HDPE

Kuva 42. Ehdotus Composer 450-laitteiston materiaaliseurantaan

10.2 3devo SHR3D IT-murskaimen materiaaliseuranta

Murskattaessa PA66-sivuvirtapolymeeriä huomattiin, että puhdasta mursketta oli käytännössä mahdotonta saavuttaa, vaikka laitetta puhdistettiin erittäin huolellisesti. Jos esimerkiksi murskataan PLA-polymeeriä, ja edellinen murskaus on tapahtunut PA66-polymeerillä, syntyy tästä ongelma siinä vaiheessa, kun PLA-murskeen sekaan tippuu PA66 epäpuhtauksia murskaimen tärinän vuoksi. Nämä epäpuhtaudet eivät sulaa PLA:n pursotuslämpötiloissa ja potentiaalisesti tukkivat

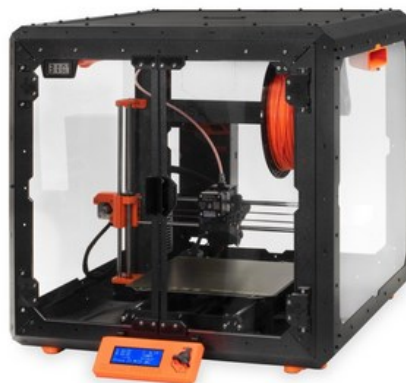
Composer 450-laitteen suuttimen, koska sulan joukossa on nyt sulamattomia muovipartikkeleita. Jos murskatut materiaalit ovat saman värisiä, ei näitä epäpuhtauksia voida edes havainnoida ja poistaa. Olisi tärkeää tietää edellisen murskatun materiaalin sulamislämpötilat. Edellä mainitussa tilanteessa laitteisto olisi saatava erittäin puhtaaksi. Olisi varmistettava se, että vierasmateriaalia ei ole lainkaan PLA-murskeen seassa. Taulukko 8 esittelee ehdotusta 3devo SHR3D IT-murskaimen materiaalin seurantaan.

Taulukko 8. Ehdotus SHR3D IT-murskaimen materiaalin seurantaan

Päivämäärä:	Viimeksi murskattu materiaali:	Sulamispiste °C:
6.5.2022	PLA	145–160
7.8.2022	PA66	263
13.9.2022	ABS	225–245

10.3 Prusa i3 MK3s-tulostimen kotelointi

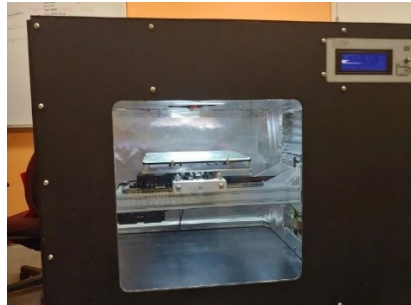
Tulostustestit epäonnistuivat Prusa i3 MK3s-tulostimella johtuen PA66-materiaalin korkeista tulostuslämpötiloista. Korkeat tulostuslämpötilat tekevät liian suuret lämpötilaerot tulostettavan kappaleen ja suuttimesta ulos tulevan materiaalin välille. Parannusehdotuksena tähän olisi yhden luokassa olevan Prusa i3 MK3s tulostimen kotelointi, joka tasoittaisi tulostamisen aikaisia lämpötilojen ääripäitä. Prusa i3 MK3s tulostimeen on kaupallisesti saatavilla suljettuja kotelointia (Kuva 43).



Kuva 43. Prusa i3 MK3s 3D-tulostimen kotelointi (Prusa Research 2022)

Olisi myös mahdollista tehdä suljettu kotelo lämmityksellä DIY-projektina, kuten esimerkiksi oppilastyönä. Lämmityksellä varustettu kotelo olisi paras vaihtoehto

muoveille, joiden tulostaminen vaatii korkeita lämpötiloja. On syytä muistaa, että tulostimen elektroniikka ei välttämättä kestä korkeita kotelonlämpötiloja. Kuva 44 esittelee itsevalmistetun 3D-tulostimen, jossa elektroniikka on sijoitettu kotelon ulkopuolelle. (Nardi 2020.)

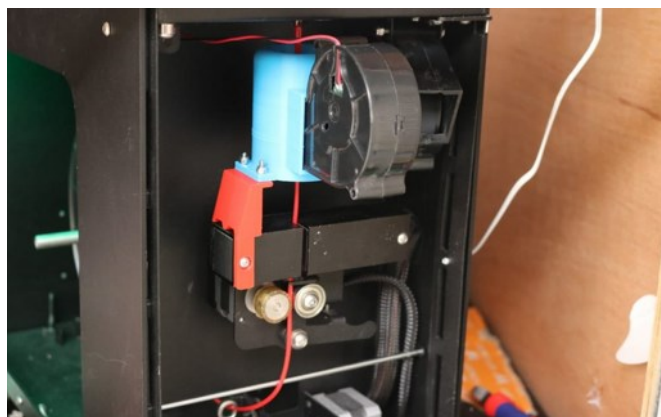


Kuva 44. Itsevalmistettu tulostinkotelo lämmityksellä (Nardi 2020)

10.4 Lisälaitte Composer 450-laitteiston tuulettimille

Tutkimuksen edetessä vaihdettiin Composer 450-laitteeseen pienempi 2 mm:n suutin. Suuttimen vaihto toi uusia ongelmia, kuten filamenttilangan värähtelyä tuulettimien takia. Kun suutin vaihdettiin, on filamenttilanka tuulettimien kohdalla entisen 4 mm:n sijaan 2 mm:n halkaisijalla, jolloin langan värähtely saattaa aiheuttaa ongelmia mittausanturille lukea oikeaa halkaisijaa.

Ratkaisu ongelmaan voisi olla 3devon verkkosivuilta ladattu STL-tiedosto, josta 3D-tulostamalla voidaan tehdä apulaite kohdistamaan tuuletus ympäri filamenttilankaa. Tässä tutkimuksessa laitetta ei keretty testaamaan. Kuva 45 esittelee tuuletuksen ohjaukseen valmistettua lisälaitetta asennettuna Composer 450-laitteistoon.



Kuva 45. 3D-tulostettu apulaite jäähdytyksen parantamiseksi (3devo 2022s)

10.5 Polymeerin kosteuden mittaaminen

Nailon materiaalissa ei saa olla kosteutta enempää kuin 0–0,2 % painostaan, kun sitä käytetään ruiskuvalumuoteissa (Omnexus SpecialChem 2022). Sama pätee myös nailonin pursotukseen ja 3D-tulostamiseen. Tutkimuksen edetessä kävi nopeasti selväksi, että näin tarkkojen kosteusarvojen mittaukseen tarvitaan erikoislaitteita. Esimerkiksi Mettler Toledo valmistaa tähän tarkoitukseen muovinkosteusmittareita. HX204 Moisture Analyzer (Kuva 46) kykenee erottelemaan 0,01 %:n kosteisarvoja muoveista. (Mettler Toledo 2022.) Kosteusmittari voisi olla käytännöllinen lisälaitte muovien pursotuksessa, jolloin voitaisiin mitata granulaattien kosteutta sekä kuivaamisen tarvetta.



Kuva 46. HX204 Kosteusmittari (Mettler Toledo 2022)

Koska PA66-materiaalia täytyi suositusten mukaisesti kuivattaa noin 12 h, olisi nykyisen kierrättämisen sekä energiasäästämisen aikakautena ollut järkevää, jos PA66-polymeerin kosteus olisi voitu mitata ilman 12 tunnin kuivausjaksoja. Tässä tapauksessa ylimääräistä kuivaamista ei olisi tehty vain annettujen suositusten mukaisesti, vaan kuivaamisen määrä olisi perustunut mitattuun tietoon. Kuivaus vie aina energiaa, ja jos mahdollisimman vähällä kuivausajalla saadaan onnistunutta tulostusfilamenttia, on se energiatehokasta ja järkevää.

11 POHDINTA

11.1 PA66-filamentin valmistamisen johtopäätökset

Opinnäytetyön tavoitteena oli kierrättää Ravelast Oy:n tuotannon sivuvirtana syntynyttä PA66-polymeerijätettä tekemällä siitä 3D-tulostusfilamenttia. Tuotetusta filamentista tehtäisiin myös 3D-tulostustestejä. Opinnäytetyössä saavutettiin tutkimukselle asetetut tavoitteet filamentinpursotuksen osalta hyvin, ja tutkimuksessa saatiin tuotettua 3D-tulostusfilamenttia eri seossuhteilla. Tuotetun filamentin 3D-tulostus osoittautui haasteelliseksi. 3D-tulostustestejä tehtiin lopulta vain kierrättämättömästä PA66-filamentista laiterajoituksien vuoksi. Laiterajoituksia oli esimerkiksi koteloinnin ja kotelolämmityksen puute sekä liian alhaiset 3D-tulostimen tulostuslämpötilat.

Tutkimus alkoi ongelmallisesti polymeerin termisellä hajoamisella, laiterikoilla sekä materiaalisyötön loppumisena pursotusruuvilta. Ongelmiin ja niihin löydettiin ratkaisuihin perehdytään laajasti liitteissä: (Liite 1), (Liite 6) ja (Liite 7). PA66-materiaali on erittäin lujaa kiinteässä muodossaan, joten sivuvirtana muotivalun ruiskutuskanavista syntyvät tikut väänsivät tutkimuksessa käytetyn murskaimen terät paikoiltaan. Laitteiston korjaaminen tuli tutuksi, ja sen myötä raporttiin saatiin ohjeita tuleville murskaajille. Tämän jälkeen kaikki jätetikut paloitetiin 3 osaan, jolla pyrittiin välttämään se, että täysimittainen tikku putoaisi alemman terän väliin. Laitteen hajoamisen jälkeen täysimittaisten tikkujen murskaamista ei enää testattu, vaan tikut paloitetiin aina kolmeen osaan. Tutkimuksessa saadun tiedon pohjalta SHR3D IT-murskain jaksaa murskata valukanavista syntyviä tikkuja, jos ne on paloitetu pienemmäksi.

PA66-polymeeri osoittautui erittäin haastavaksi polymeeriksi valmistaa siitä toimivaa 3D-tulostusfilamenttia. Iso ongelma PA66-polymeerin filamentin valmistuksessa on sen syöttöongelmat pursotusruuvilla. Kun ei ole tasaista painetta eikä näin ollen tasaista syöttöä, on käytännössä mahdotonta tuottaa tasalaatuista filamenttia. Composer 450-laitteiston vakiosuuttimella (4 mm) filamentin valmistus ei onnistunut lainkaan. Tuotetussa filamentissa oli erittäin epätasainen pinta, sekä sen halkaisija heitteli paljon (Kuva 21). Syy tälle todennäköisesti on se, että tutkimuksessa käytetyllä PA66-polymeerillä on korkea MFI-arvo ja näin ollen sillä

on myös matala sulamuodon viskositeetti. Suuttimen vaihto pienemmäksi 2 millimetriin toi uudet ongelmat, kuten materiaalin värinän mitta-anturilla tuulettimien ilmavirran vaikutuksesta, jolloin vetopyörästä ei saanut oikeaa mittalukemaa. Tästä seurasi se, että filamenttilangan halkaisija aloitti heittelyn. Suuttimen vaihto ohensi filamenttilangan paksuuden lähes puoleen kohdassa, jossa tuulettimet jäädyttävät filamenttilankaa. Tähän löydettiin lopulta ratkaisu tulostettavasta filamentinohjaimesta (Kuva 24), joka rauhoitti langan heiluntaa tiettyyn pisteeseen asti. Kun tuulettimien pyörimisnopeus nostettiin 100 %:iin testeissä 4 ja 5, ei ohjainkaan pitänyt filamenttilangan värinää enää hallinnassa, minkä vuoksi mitta-anturi lopetti halkaisijan mittaamisen satunnaisesti. Ongelmana oli myös filamentin karheus, soikeus sekä halkaisijaheittelyt. Tutkimuksessa ei löydetty karheuden lopullista syytä. Karheuden itsessään ei huomattu olevan ongelma 3D-tulostamisessa, joten se ei estä PA66-polymeerin käyttöä filamenttina. Tutkimuksessa havaittiin, että materiaali on jo suuttimesta ulos tullessaan karheaa, eikä karheutta voida todennäköisesti saada pois.

PA66 vaati pitkiä kuivausaikoja, mikä oli aikaa vievin osuus koko tutkimuksessa. Kaikkia tutkimuksen materiaalia piti kuivattaa vähintään 12 tuntia, ja kuivatuslaitteistoa täytyi valvoa jatkuvasti kuivaamisen aikana. Tutkimuksen PA66-mursketta kuivattiin 85 °C:ssa, joka teki pientä värimuutosta sekä hapettumista tuotteeseen, joten suositeltava lämpötila jatkotutkimuksissa olisi 80 °C. Tutkimuksessa ei vähennetty kuivauslämpötiloja kesken testien, jotta voitiin varmistaa tuloksien yhdenmukaisuus.

Tutkimuksessa saavutettiin 3D-tulostuskelpoista PA66-filamenttia edellä mainittujen toimintojen ja lisälaitteiden avulla. Näin ollen, jos tuotetulle 3D-filamentille löytyy jatkokäyttöä, ja sen 3D-tulostaminen onnistuu, niin tutkimuksen lopputuloksena voidaan suositella PA66-sivuvirtapolymerin kierrättämistä tekemällä siitä 3D-tulostusfilamenttia. Tutkimusta olisi voinut jatkaa pidemmälle, mutta raportti olisi tässä tapauksessa kasvanut ylittämiseksi. Lämpötiloissa ja syöttöruuvien nopeuksissa on varmasti vielä parannettavaa. Testejä tehtiin enemmän kuin raportissa on nähtävissä, mutta näillä ei ole merkitystä esitettyyn lopputulokseen.

11.2 3D-tulostamisen johtopäätökset

PA66-polymeerin 3D-tulostaminen osoittautui erittäin ongelmalliseksi. Ensimmäiset ongelmat syntyivät jo siinä, että ensimmäinen tulostuskerros ei tarttunut tulostuspöytään. Lämpötiloja testattiin laajasti, ja mikään ei auttanut parantamaan tartuntaan. Ainoa keino saada tuloste tarttumaan tulostuspöytään oli liimakynän käyttö (Kuva 34). Tulostinpöydän toimivista lämpötiloista ei tutkimuksen perusteella voida antaa varmaa tietoa. Tutkimuksen 3D-tulostimilla tulostinpöytien maksimilämpötilat olivat 110–115 °C, ja lopulta tarttuminen tässä lämpötilassa varmistettiin liimalla.

Lisäksi 3D-tulostetun kappaleen kerrokset irtosivat toisistaan, mikä osoitti sen, että tulostuslämpötilat ovat todennäköisesti liian alhaiset, tai kappale jäähtyy liian nopeasti (O'Connell 2022). Lämpötiloja nostettiin jokaisella testillä ylöspäin ja lopulta Prusa 3D-tulostimessa tuli lämpötilarajat vastaan. Lisätutkimuksia tehtiin, jolloin selvisi, että nailon materiaalit olisi hyvä tulostaa kotelossa, joka parhaassa tapauksessa olisi myös lämmitettävä. Tämän jälkeen testeissä siirryttiin koteloi- tuun Raise 3D E2-tulostimeen. Raise 3D E2-tulostimella testisauvojen 3D-tulos- taminen lopulta onnistui. Testisauvat olivat vain 2 mm korkeita, joten ei voida lo- pulta tietää, miten PA66-polymeeri olisi käyttäytynyt koteloidussa tulostimessa korkeammalla kappaleella. Tästä johtopäätöksenä on se, että PA66-polymeerin 3D-tulostamisen onnistumista korkeammilla kappaleilla kuin 2 mm, ei tämän tut- kimuksen perusteella voida luvata. Lisäksi PA66-polymeerin 3D-tulostamista ei voi suositella kuin tulostimella, jossa on lämmityksellä varustettu kotelointi (Simp- lify3D 2022).

11.3 Jatkokehityksaiheet

Jatkokehitysmahdollisuuksia PA66 pursotukseen voisi olla komposiittimateriaa- lien testaus. Esimerkiksi hiilikuitu, lasikuitu ja ehkä jopa kevlar. Seossuhteita kan- nattaisi testata nostamalla seoksen prosenttisuhdetta vähitellen. Seossuhdetta kannattaisi kokeilla nostaa samoihin arvoihin, kun kaupallisissa hiilikuitukompo- siiteissa on. Esimerkiksi NylonX-filamentissa hiilikuidun osuus on jopa 20 % (Mat- terhackers 2023). Yhtenä jatkokehitys mahdollisuutena on myös PA6- ja PA66-

polymeerin seos. Tällaisia filamentteja on kaupallisesti saatavilla (3D Prima 2022).

3D-tulostamisen jatkokehityksenä voidaan ehdottaa PA66-polymeerin tulostamista 3D-tulostimella, jonka suuttimen maksimilämpötila on vähintään 300 °C sekä se on varustettu lämmitettävällä koteloinnilla. Koteloinnin lämpötilan täytyisi yltää vähintään PA66-polymeerin lasittumislämpötilaan, jolloin voitaisiin olettaa, että Warp-ilmiötä ei tapahdu, tai se on vähäistä. Tutkimuksessa silti todettiin myös se, että jokaiselle materiaalille on etsittävä paras kotelon lämpötila testien perusteella. (Wang ym. 2007, 1093.) Lisäksi 3D-tulostamisen onnistumista PA66-polymeerillä voidaan todennäköisesti edistää seoksilla, kuten hiilikuitukomposiitit sekä PA6/PA66 seokset.

11.4 Tutkimuksen luotettavuus sekä hyödynnettävyys

Kaikki tutkimuksessa tehdyt toimenpiteet kirjattiin tarkasti ylös, sekä Devovisionin lokitiedostot tallennettiin Ravelast Oy:n omiin jatkotutkimuksiin. Mitään tutkimuksen aikaisia parametrejä ei muunneltu tai vääristelty raporttiin. Tuloksia tarkasteltiin erittäin useaan kertaan. Tutkimustuloksen inhimillisiä virheitä ei voida täysin sulkea pois raportin ollessa erittäin laaja, mutta näissä rajoissa tutkimusta voidaan pitää luotettavana. Ravelast Oy:lle tuotettiin tutkimuksen lopputuloksena 3D-tulostusfilamenttia, jolla voi olla jatkokehitys mahdollisuuksia. Lisäksi saatiin 3D-tulostamiseen teoriatietoa, jolla voidaan jatkokehittää PA66-polymeerin 3D-tulostamista. Tutkimuksen lopputulos on näin ollen hyvin hyödynnettävissä.

LÄHTEET

100 % Recycled PET bottles 2020. Shredding & Extrusion Walkthrough. Viitattu 27.12.2022 <https://4595257.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/4595257/Knowledge%20Base%20Import/Recycled-PET-Material-Report.pdf>.

3D Cadsolutions 2022. Verkkokauppa. Viitattu 6.11.2022 <https://www.an-cadsolutions.fi/tuote/raise3d-e2-3d-tulostin/>.

3D Prima 2022. Prima Select Nylon Power PA 6/66–1.75mm - 500g – Black. Viitattu 30.7.2022 <https://www.3dprima.com/filament-resin/filament/nylon/primaselect-nylonpower-pa-6-66-1-75mm-500g-black/a-26581>.

3devo 2019. Getting Started with a Material Test | 3devo. Viitattu 10.9.2022 <https://www.youtube.com/watch?v=uxp2iuypDAo>.

3devo 2020a. How to clean the Filament Maker - Part 1, Introduction. Viitattu 5.6.2022 https://www.youtube.com/watch?v=hiXJ6l5n5mo&ab_channel=3devo.

3devo 2020b. How to clean the Filament Maker - Part 2, High temperature purge. Viitattu 6.11.2022 https://www.youtube.com/watch?v=wXIYf8GhHzY&t=384s&ab_channel=3devo.

3devo 2020c. How to clean the Filament Maker - Part 3, Transitioning to a new material. Viitattu 19.7.2022 https://www.youtube.com/watch?time_continue=323&v=26IR-p5XUh4&feature=emb_title.

3devo 2021. How to make PEEK Filament - Part 1, preparing and transitioning. Viitattu 9.7.2022 <https://www.youtube.com/watch?v=ViULdBEBUAg>.

3devo 2022a. Airid Polymer Dryer. Viitattu 6.6.2022 <https://www.3devo.com/dryer>.

3devo 2022b. Devovision shows wrong values. Viitattu 11.9.2022

3devo 2022c. Devovision. Viitattu 14.7.2022 <https://www.3devo.com/devovision>.

3devo 2022d. Error Messages. Viitattu 10.9.2022 <https://support.3devo.com/error-messages>.

3devo 2022e. Extruder screw is NOT rotating. Viitattu 5.6.2022 <https://support.3devo.com/extruder-screw-is-not-rotating/>.

3devo 2022f. Extruder screw is rotating, but NO output. Viitattu 11.9.2022 <https://support.3devo.com/extruder-screw-is-rotating-but-no-output>.

3devo 2022g. Filament Maker maintenance guide. Viitattu 5.6.2022 <https://support.3devo.com/filament-maker-maintenance-guide/>.

3devo 2022h. Filament Maker Quality Check. Viitattu 19.7.2022
<https://support.3devo.com/filament-maker-quality-check/>.

3devo 2022i. Filament Makers the Composer and Precision Series. Viitattu 10.9.2022 <https://www.3devo.com/filament-makers>.

3devo 2022j. Getting started with extruding your material. Viitattu 5.6.2022
<https://support.3devo.com/how-to-start-the-extrusion/>.

3devo 2022k. Guide: purging your Filament Maker. Viitattu 11.9.2022
<https://support.3devo.com/purging-your-filament-maker>.

3devo 2022l. Guide: purging/cleaning the Filament Maker – Full version. Viitattu 9.7.2022 <https://support.3devo.com/cleaning-next/>.

3devo 2022m. How to make a perfect spool of PLA. Viitattu 5.6.2022
<https://support.3devo.com/how-to-make-a-perfect-spool-of-pla/>.

3devo 2022n. How to set up The Feeder. Viitattu 8.9.2022
<https://support.3devo.com/how-to-setup-the-feeder/>.

3devo 2022o. Material selection - Choosing the right polymer. Viitattu 25.12.2022 <https://support.3devo.com/guide-material-selection>.

3devo 2022p. Materials Made Simple. Viitattu 10.9.2022
<https://www.3devo.com/>.

3devo 2022q. Meet Composer and Precision Series. Viitattu 9.7.2022
<https://www.3devo.com/shop>.

3devo 2022r. Output too low or thin. Viitattu 19.7.2022
<https://support.3devo.com/output-too-low-or-tin/>.

3devo 2022s. Oval or flat filament. Viitattu 25.12.2022
<https://support.3devo.com/oval-flat-shaped-filament>.

3devo 2022t. Roadmap to extrusion success. Viitattu 5.6.2022
<https://support.3devo.com/roadmap-to-extrusion-success-5-1652104158182>.

3devo 2022u. Rough filament surface. Viitattu 11.9.2022
<https://support.3devo.com/1-lines-streaks-filament>.

3devo 2022v. Troubleshooting: Air bubbles or holes in filament. Viitattu 5.6.2022 <https://support.3devo.com/holes-bubbles-filament/>.

3devo 2022w. Troubleshooting: filament thickness deviation (inconsistent diameter). Viitattu 5.6.2022 <https://support.3devo.com/filament-thickness-deviation-inconsistent-diameter/>.

3devo support 2022a. MFI. Yksityinen sähköpostiviesti 17.8.2022. Viestin saaja: Timo Rätty. Tulostettu 10.9.2022.

3devo support 2022b. PA66 bad quality. Yksityinen sähköpostiviesti 31.5.2022. Viestin saaja: Timo Rätty. Tulostettu 10.9.2022.

3devo support 2022c. PA66 bad quality. Yksityinen sähköpostiviesti 10.6.2022. Viestin saaja: Timo Rätty. Tulostettu 10.9.2022.

3devo support 2022d. PA66 bad quality. Yksityinen sähköpostiviesti 13.7.2022. Viestin saaja: Timo Rätty. Tulostettu 10.9.2022.

3devo support 2022e. PA66. Yksityinen sähköpostiviesti 2.5.2022. Viestin saaja: Timo Rätty. Tulostettu 10.9.2022.

3DJAKE 2022a. DimaFix Adhesive Pen. Viitattu 30.7.2022
<https://www.3djake.com/dimafix/adhesive-pen>.

3DJAKE 2022b. magicPLA Deep Space. Viitattu 10.9.2022
<https://www.3djake.fi/3djake/magicpla-deep-space?sai=11626>.

3d-tulostus.fi 2021a. 3devo Composer 450 filamenttikone. Viitattu 5.6.2022
<https://www.3d-tulostus.fi/3devo-Composer-450-filamenttikone>.

3d-tulostus.fi 2021b. 3devo SHR3D IT. Viitattu 5.6.2022 <https://www.3d-tulostus.fi/3devo-SHR3D-IT/en>.

Airid-Dryer-Manual 2019. Version 1.0 June 2019. Viitattu 6.11.2022

Breaking the Plastic Wave 2020. A comprehensive assessment of pathways towards stopping ocean plastic pollution. Viitattu 30.7.2022
https://www.pewtrusts.org/-/media/assets/2020/07/breakingtheplasticwave_summary.pdf.

Bruder, U. 2016. Osa 4 – tekniset muovit. Muoviyhdistyksen julkaisuja 2016:4. Viitattu 22.8.2022 <https://www.muoviyhdistys.fi/2016/07/15/osa-4-tekniset-muovit/>.

CAMPUS Datasheet 2022. ALTECH ABS A 1000/587 – ABS MOCOM Compounds GmbH & Co. KG. Viitattu 11.3.2023
<https://www.campusplastics.com/material/pdf/175819/ALTECHABSA1000-587?sLg=en>

Dubert, P. 2020. 5 filaments for 3D printing based on PA6. 3D Printing Center 2.7.2020. Viitattu 11.9.2022 <https://3dprintingcenter.net/5-filaments-for-3d-printing-based-on-pa6/>.

Easycomposites 2022. Milled Carbon Fibre Powder. Viitattu 8.1.2023
<https://www.easycomposites.co.uk/milled-carbon-fibre-powder>.

ELY-keskus 2022. Tuottajavastuu. Viitattu 30.7.2022 <https://www.ely-keskus.fi/web/tuottajavastuu>.

Euroopan parlamentti 2021. Muovijäte ja kierrätys EU:ssa. Viitattu 7.9.2022
<https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/priorities/kiertotalous/20181212STO21610/muovijate-ja-kierratys-eu-ssa>.

European Commission and Directorate-General for Environment 2018. Changing the way, we use plastics. Publications Office of the European Union julkaisuja 2018. Viitattu 7.9.2022 <https://data.europa.eu/doi/10.2779/235182>.

Filamentive 2021. Transparent PETG 3D Printer Filament. Viitattu 11.9.2022 <https://www.filamentive.com/product/recycled-petg-rpetg-1kg-transparent/>.

Formfutura 3D Printing Materials 2021. Novamid® ID1070 (PA6). Viitattu 30.7.2022 <https://www.formfutura.com/shop/product/novamid-id1070-pa6-2825?category=455>.

Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, Vol 3 No. 7 (2017). Viitattu 4.9.2022 <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.

Güldaş, A., Zeyveli, M., Kaya, S. & Altuğ, M. 2018. Investigation of rheological and mechanical properties of wood flour reinforced polypropylene: Untersuchung der rheologischen und mechanischen Eigenschaften von holzmehlverstärktem Polypropylen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Volume 49 Nro 1 (2018), 73-88. Viitattu 25.12.2022 <https://doi.org/10.1002/mawe.201600714>.

Hexamethylenediamine 2018. Molecule of the Week Archive. ACS Chemistry for life julkaisuja 2018:42. Viitattu 30.12.2022 <https://www.acs.org/molecule-of-the-week/archive/h/hexamethylenediamine.html>.

Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R. & Lavender Law, K. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, Vol 347 Nro 6223 (2015), 768-771. Viitattu 6.9.2022 <https://doi.org/10.1126/science.1260352>.

Juan, J. 2021. Warping - What is it, why does it happen, how to avoid it? *hta3d* 14.9.2021. Viitattu 8.1.2023 <https://www.hta3d.com/en/blog/warping-what-is-it-why-does-it-happen-how-to-avoid-it>.

Järvinen, P. 2008. Uusi muovitieto. Söderkulla: Muovifakta.

Järvinen, P. & Saarinen, E. 2016. Muovien kierrätys ja hyötykäyttö Suomessa. Söderkulla: Muovifakta Oy.

Liao, G., Li, Z., Luan, C., Wang, Z., Yao, X. & Fu, J. 2022. Additive Manufacturing of Polyamide 66: Effect of Process Parameters on Crystallinity and Mechanical Properties. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol 31 Nro 1 (2022), 191–200. Viitattu 11.9.2022 <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06149-6>.

Markforged 2022. Designing for Printing Part 2: Why 3D Printed Parts Warp and How to Stop It. Viitattu 13.9.2022 <https://markforged.com/resources/blog/3d-printed-part-warping>.

Material data sheet PEEK natural 2019. Viitattu 1.1.2023 <https://whm.net/wp-content/uploads/2021/04/peek-natural.pdf>.

Matterhackers 2023. NylonX Carbon Fiber Filament - 1.75mm (0.5kg). Viitattu 8.1.2023 <https://www.matterhackers.com/store//nylonx-carbon-fiber-nylon-filament-1.75mm/sk/MD5LDGS7>.

Mettler Toledo 2022. Plastic Moisture Analyzer. Reliable Moisture Content Determination of Plastic Pellets on the Production Floor. Viitattu 14.7.2022 [https://www.mt.com/vn/en/home/products/Laboratory_Weighing_Solutions/moisture-analyzer/plastic-moisture-analyzer.html?filter\[industry\]=Plastics](https://www.mt.com/vn/en/home/products/Laboratory_Weighing_Solutions/moisture-analyzer/plastic-moisture-analyzer.html?filter[industry]=Plastics).

MiniFactory 2022. Introduction to heated chamber 3D printer. Viitattu 12.9.2022 <https://minifactory.fi/technology/heated-chamber/>.

Multistation 2020. 3D Printers 3DEVO – AIRID Polymer dryer. Viitattu 12.3.2023 <https://www.multistation.com/en/product/3devo-airid-polymer-dryer/>.

Nardi, T. 2020. Bringing High Temperature 3D Printing to The Masses. HACKADAY 28.10.2020. Viitattu 12.9.2022 <https://hackaday.com/2020/10/28/bringing-high-temperature-3d-printing-to-the-masses/>.

O'Connell, J. 2022. 3D Print Layer Separation: 8 Tips to Avoid Delamination. All3DP 18.6.2022. Viitattu 13.9.2022 <https://all3dp.com/2/3d-print-delamination-tips-tricks-to-avoid-layer-separation/>.

Omnexus SpecialChem 2022. Polyamide (PA) or Nylon: Complete Guide (PA6, PA66, PA11, PA12...). Viitattu 22.8.2022 <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyamide-pa-nylon>.

Parker, L. 2018. We Made Plastic. We Depend on It. Now We're Drowning in It. Viitattu 29.3.2023 <https://www.nationalgeographic.com/magazine/article/plastic-planet-waste-pollution-trash-crisis>.

Pikkarainen, A., Piili, H. & Salminen, A. 2020. The design process of an occupationally safe and functional 3d printing learning environment for engineering education. European Journal of Education Studies, Vol 7, Nro 12 (2020). Viitattu 7.9.2022 <http://dx.doi.org/10.46827/ejes.v7i12.3400>.

Plastics For Change 2021. Which Plastic Can Be Recycled? Viitattu 4.9.2022 <https://www.plasticsforchange.org/blog/which-plastic-can-be-recycled>.

Polymerik Oy 2022. Polyamidi 66 (PA 66). Viitattu 13.5.2022 <https://polymerik.fi/polyamidi-66/>.

Prusa Research 2022. Original Prusa Enclosure. Viitattu 12.9.2022 <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-enclosure-3/>.

Ramian, J., Ramian, J. & Dziob, D. 2021. Thermal Deformations of Thermoplast during 3D Printing: Warping in the Case of ABS. Materials, Vol 14 Nro 22 (2021), 7070. Viitattu 11.9.2022 <https://doi.org/10.3390/ma14227070>.

Ravelast Polymers 2022a. Olemme toimialamme monipuolisimpia toimittajia. Viitattu 5.6.2022 <https://www.ravelast.com/tuotteemme-2.html>.

Ravelast Polymers 2022b. Strategiamme on kasvaa kannattavasti ja kehittyä kestävästi. Viitattu 5.6.2022 <https://www.ravelast.com/konserni/historia.html>.

Ravelast Polymers 2022c. Suojaamme kestävästi asiakkaiden prosessit. Viitattu 5.6.2022 <https://www.ravelast.com/konserni/konserni.html>.

Ritchie, H. & Roser, M. 2022. Plastic Pollution. Our World in Data 1.4.2020 Viitattu 30.7.2022 <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>.

Sandell, R., Malén, T., Virtanen, M., Kurri, V. & Pohjapelto, K. 2002. Muovitekniikan perusteet. 3. tark. p. Helsinki: Opetushallitus.

Seppälä, J. 2005. Polymeeritekniikan perusteet. 5. tark. ja korj. p. Helsinki: Otatieto.

SFS-EN 1133-1:2022. Plastics. Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics. Part 1: Standard method. 2. painos. Suomen Standardoimisliitto SFS.

Shenoy, A.V. & Saini, D.R. 1986. Melt Flow Index: More Than Just a Quality Control Rheological Parameter. Part I. Advances in Polymer Technology. Vol 6 Nro 1 (1986), 1–58. Viitattu 25.12.2022 <https://doi.org/10.1002/adv.1986.060060101>.

SHR3D IT 2017. SHR3D IT Version 1.0 November 2017. Viitattu 16.7.2022 <https://www.3d-tulostus.fi/WebRoot/vilkas04/Shops/20131018-11092-264846-1/5D6E/1BAE/18A8/5554/4CD0/0A28/1017/0513/SHR3D-IT-Manual-1.0.pdf>.

Simplify3D 2022. Nylon. Viitattu 30.7.2022 <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/nylon/>.

Suomen 3D-ratkaisut 2021. Prusa i3 MK3S+ 3D-tulostin. Viitattu 16.7.2022 <https://www.suomen3d.fi/tuotteet/prusa-mk3/>.

Technical data sheet PLA 2017. Ultimaker. Viitattu 26.12.2022 <https://www.farnell.com/datasheets/2310522.pdf>.

Thomas, S. & Visakh P.M. 2012. Handbook of Engineering and Specialty Thermoplastics, Vol 4: Nylons. Hoboken: John Wiley & Sons, Incorporated.

Toray 2019. Before you injection-mold nylon. Viitattu 10.9.2022 https://www.toray.eu/eu/plastics/amilan/technical/tec_007.html.

Wang, T.M., Xi, J.T. & Jin, Y. 2007. Model research for prototype warp deformation in the FDM process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 33 Nro 11 (2007), 1087–1096. Viitattu 11.9.2022 <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0556-9>.

LIITTEET

Liite 1. Polymeerin terminen hajoaminen ja puhdistusmateriaalit

Liite 2. Materiaalisiirtymät

Liite 3. Composer 450-laitteiston puhdistaminen

Liite 4. Laatutarkastus

Liite 5. AIRID Polymer Dryer-laitteiston huolto

Liite 6. 3devo SHR3D IT-laitteiston huolto

Liite 7. Materiaalintulo loppuu suuttimesta

Liite 1. 1(6) **Polymeerin terminen hajoaminen ja puhdistusmateriaalit**

Tutkimuksen alun pursotustesteissä tapahtui pursotusruuville olevan materiaalin terminen hajoaminen (Kuva 47). Tämän tapahtuessa on aloitettava välittömästi laitteen pursotusruuvin puhdistaminen.



Kuva 47. Termisesti hajonnut materiaali pursotusruuville

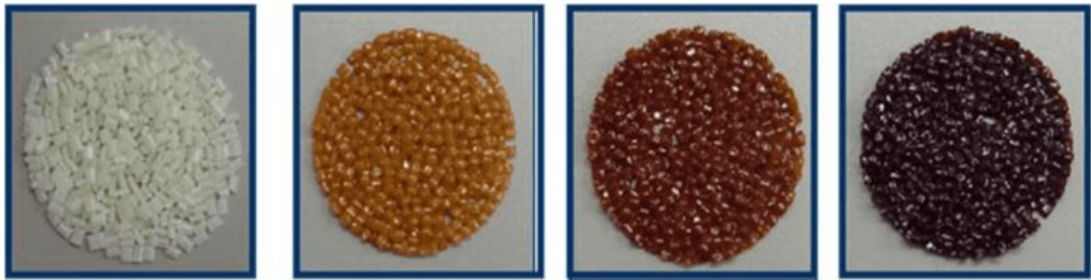
PA66-polymeeri ei termisesti hajoa vielä 290 °C:n lämpötiloissa, jota käytettiin testin aloituslämpötilana. PA66-polymeeri kestää noin 300–310 °C:n lämpötiloja, ennen kuin siinä alkaa tapahtumaan suuria värimuutoksia lämpötilan takia. (Om-nexus SpecialChem 2022; Polymerik Oy 2022.)

Koska pursotettavan materiaalin täytyy olla saman väristä kuin syötetty aine (3devo 2020c), voidaan tästä päätellä, että pursotuksessa on jotain pielessä. Todennäköisesti Composer 450-laitteen pursotusruuville on edellisissä pursotuksissa jäänyt jotain materiaalia, joka ei ole poistunut puhdistuksessa. Voi myös olla, että edellisen pursotuksen jälkeistä puhdistusta ei ole tehty ollenkaan. Tämä pursotusruuville jäänyt materiaali ei poistunut Devoclean Mid-Temperature puhdistuksessa, joka tehtiin ennen testien aloitusta. Todennäköisesti puhdistus tehtiin liian alhaisessa lämpötilassa, jolloin pursotusruuville ollut materiaali ei sulanut. Voidaan myös olettaa, että edellinen materiaali ei ole ollut PLA:ta ja sillä on ollut suurempi sulamispiste kuin 190 °C, jota käytettiin pursotusruuvin puhdistuksessa. Kun pursotusruuville on tapahtunut terminen hajoaminen, täytyy Composer 450-laitteisto puhdistaa Devoclean High-Temperature puhdistuksella, joka on paras keino poistamaan palanutta materiaalia pursotusruuville (3devo 2020a).

Liite 1. 2(6) **Polymeerin terminen hajoaminen ja puhdistusmateriaalit**

Composer 450-filamentinvalmistuslaite tarvitsee säännöllistä puhdistamista toimiakseen moitteettomasti. Puhdistaminen täytyy tehdä aina, jos pursotettava materiaali on ollut jotain muuta kuin PLA-polymeeriä. Lisäksi puhdistus tehdään aina, jos on tapahtunut jotain yllättävää pursotuksen aikana, kuten polymeerin termistä hajoamista.

Muovien seisoessa pursotusruuvilla ovat ne alttiina polymeerin hajoamiseen ja hartsin kerääntymiseen pursotusruuville. Esimerkiksi ABS-muovi aloittaa värimuutoksen noin 30 minuutissa (Kuva 48), jos sen jättää pursotusruuville seisomaan. (3devo 2022l.)



Kuva 48. ABS-muovin terminen hajoaminen (3devo 2022l)

Vanha palanut muovi pursotusruuvilla aiheuttaa ongelmia laadukkaan filamentin tuottamiseen. Palanut muovi jarruttaa sulanmuovin tasaista virtausta pursotusruuvilla samalla tehden ongelmia tuottaa hyvälaatuista filamenttia. Kun palanut ja kovettunut hartsi hidastaa materiaalin virtausta, aiheuttaa se pursotuksen aikana myös polymeerin hajoamista, koska pursotettava materiaali viipyy liian kauan pursotusruuvilla. (3devo 2022l.)

3devon laitteisto puhdistetaan mekaanisesti puhdistusmateriaaleilla, jotka ajetaan pursotusruuvin läpi. Puhdistusaineen hyviä ominaisuuksia on korkea viskositeetti, siinä on hankaavia materiaaleja sekä laaja lämpötila-alue. (3devo 2020a.)

Liite 1. 3(6) **Polymeerin terminen hajoaminen ja puhdistusmateriaalit**

3devo toimittaa laitteistonsa puhdistamiseen kolmea puhdistusmateriaalia.

- HDPE (180–280 °C) Level 1 – Light purging
- Devoclean Mid-Temperature (180–320 °C) Level 2 – Standard purging
- Devoclean High-Temperature (290–420 °C) Level 3 – Heavy purging. (3devo 2022l.)

On syytä muistaa, että Composer 450:n pursotusruuville saa virrankatkaisun jälkeen jäädä ainoastaan PLA (Virgin), Devoclean Mid-Temperature- tai HDPE-puhdistusmateriaalit. pursotusruuvin pysäyttämistä ei suositella kuin edellä mainituilla materiaaleilla. (3devo 2022k.)

HDPE (High Density Polyethylene)

HDPE (Kuva 49) toimii hyvänä siirtymämateriaalina. Sillä on heikot puhdistusominaisuudet verrattuna Mid- ja High-Temperature-puhdistusmateriaaleihin, koska siitä puuttuu täysin puhdistavat lisäaineet, ja se on puhdasta HDPE-polymeeriä. (3devo 2022l.) Granulaattina HDPE on valkoinen sekä kirkas (Kuva 49 oikea).



Kuva 49. HDPE-puhdistusmateriaali sulassa muodossa (vasen) ja HDPE-puhdistusmateriaali granulaattina (oikea)

HDPE-puhdistusmateriaalin viskositeettia kannattaa käyttää hyväksi materiaali-siirtymissä. HDPE-puhdistusmateriaalia kannattaa käyttää Devoclean Mid-Temperature-puhdistusmateriaalin poistamiseen Composer 450 pursotusruuville, ennen kuin pursotus aloitetaan (3devo support 2022c). Koska Mid-Temperature-puhdistusmateriaalilla on erittäin suuri viskositeetti, voi tässä siirtymässä kulua

Liite 1. 4(6) **Polymeerin terminen hajoaminen ja puhdistusmateriaalit**

pitkä aika. On silti parempi tehdä tämä siirtymä halvalla puhdistusaineella, kuin juuri murskatulla kierrätysmuovilla. Käytännössä HDPE-puhdistusmateriaali olisi siis hyvä olla materiaali, joka on pursotusruuvilla ennen varsinaisesti pursotettavaa filamenttia, jos pursotuslämpötila näin sallii. HDPE-puhdistusmateriaali on halpa käyttää ja tuottaa vähemmän ikäviä kaasuja sekä hajuja, mitä muut puhdistusmateriaalit tuottavat (3devo 2022I). Tästä syystä on hyvä käyttää HDPE-puhdistusmateriaalia aina kun on mahdollista.

HDPE-puhdistusmateriaalia voi käyttää puhdistukseen, jos lämpötila-alue on 180–280 °C. HDPE muuttuu erittäin juoksevaksi 280 °C:n jälkeen, jolloin sen puhdistusominaisuudet katoavat. HDPE aloittaa termisen hajoamisen 320 °C:ssa. (3devo 2022I.) Kuvio 6 esittää materiaaleja, joissa Level 1 HDPE-puhdistusta voi käyttää (jos pursotuksen aikana ei ole tapahtunut polymeerin termistä hajoamista):

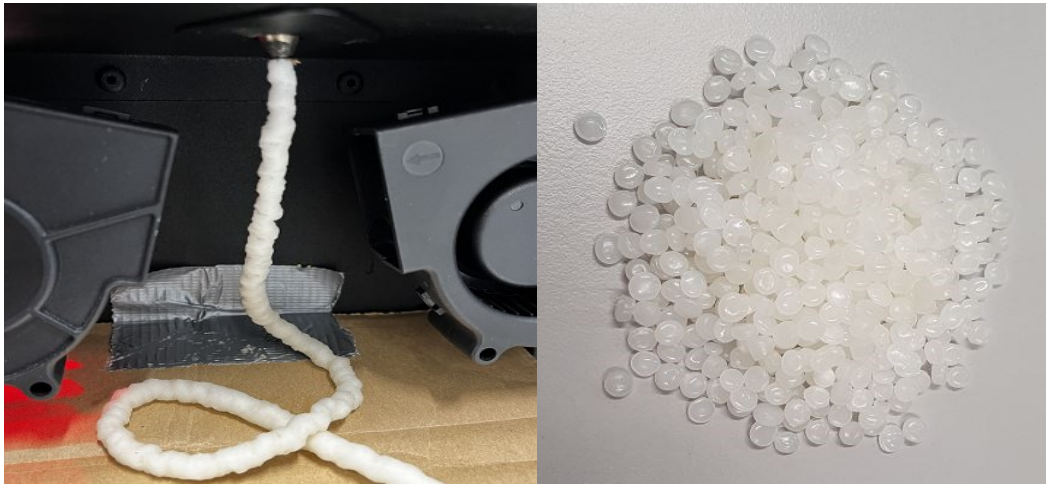
PLA	POM	TPU	PET
PET-G	ABS	TPE	PB
PC/ABS (Ei pelkkä PC)	PS	PPS	PE (LDPE tai HDPE)
PP	PA12	Devoclean	Polyester alloy

Kuvio 6. Sallitut materiaalit Level 1 puhdistukseen (mukaillen 3devo 2022I)

Liite 1. 5(6) Polymeerin terminen hajoaminen ja puhdistusmateriaalit

Devoclean Mid-Temperature

Devoclean Mid-Temperature perustuu HDPE-puhdistusmateriaaliin, joten sen käyttölämpötila (180–320 °C) on samankaltainen HDPE-puhdistusmateriaalin kanssa (3devo 2022I). On myös syytä huomata Mid-Temperature-granulaattien (Kuva 50 oikea) samankaltainen ulkonäkö HDPE-granulaattien (Kuva 49 oikea) kanssa. Kun materiaalit ovat sulaneet, ei näiden kahden materiaalin ulkonäöstä voi erehtyä. HDPE on sulaneena läpinäkyvää ja kirkasta (Kuva 49 vasen), Devoclean Mid-Temperature sen sijaan on huokoinen ja täysin valkoisen värinen (Kuva 50 vasen).



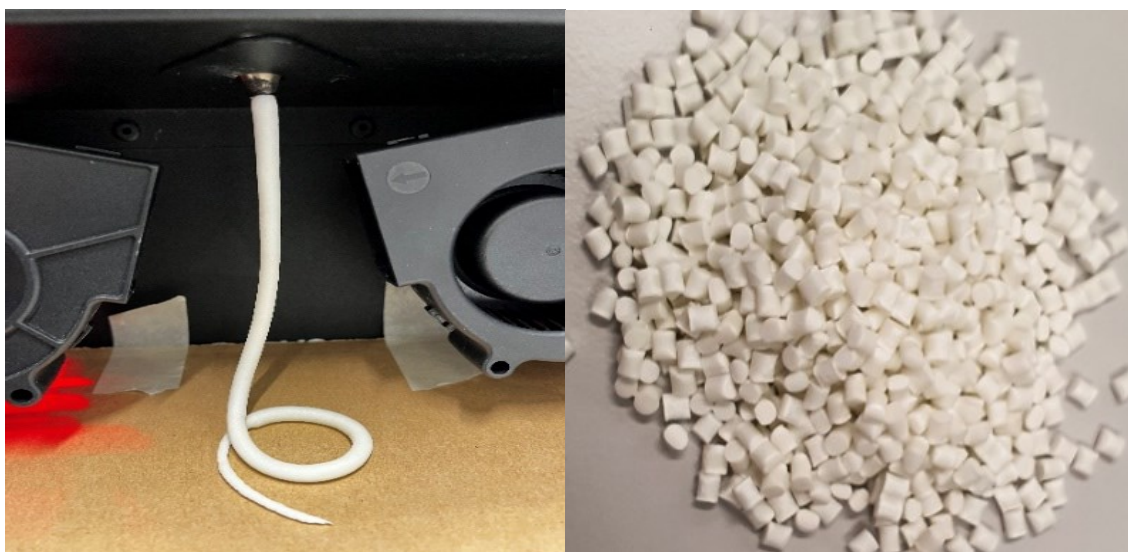
Kuva 50. Sulanutta Mid-Temperature-puhdistusmateriaali (vasen) ja Mid-Temperature-puhdistusmateriaali granulaattina (oikea)

Mid-Temperature-puhdistusainetta voi käyttää kaikissa tilanteissa, joissa lämpötila on 180–320 °C. Mid-Temperature-puhdistusaineeseen on lisätty aineita, jotka lisäävät sen lämpötilankestoa viskositeetinmuutoksille samalla parantaen sen puhdistavaa vaikutusta. Haittapuolena voidaan pitää sitä, että korkean viskositeetin takia se on hidas poistaa pursotusruuville. Kun on pursotettu komposiitteja tai teknisiä muoveja, on Composer 450 puhdistettava vähintään Devoclean Mid-Temperature-puhdistusmateriaalilla. Devoclean Mid-Temperature-puhdistusmateriaali suositellaan jätettäväksi pursotusruuville laitteen sammuttamisen jälkeen. Kun Mid-Temperature seisoo pursotusruuville, tarttuu siihen samalla epäpuhtauksia, jotka poistuvat koneen pursotusruuville käynnistämisen jälkeen. (3devo 2022I.)

Liite 1. 6(6) Polymeerin terminen hajoaminen ja puhdistusmateriaalit

Devoclean High-Temperature

Devoclean High-Temperature on Composer 450-laitteen tehokkain pursotusruihin puhdistusmateriaali, ja sen käyttölämpötila on 290–420 °C. High-Temperature-puhdistusmateriaali on sulassa muodossaan valkoisen värinen sekä tasainen pinnaltaan (Kuva 51 vasen), tästä syystä se on helppo erottaa muista puhdistusaineista. Myöskään granulaatti muodossa sitä ei voi sekoittaa muihin puhdistusaineisiin (Kuva 51 oikea).



Kuva 51. High-Temperature-puhdistusmateriaalia sulassa muodossa (vasen) ja High-Temperature-puhdistusmateriaalia granulaattina (oikea)

Devoclean High-Temperature poistaa tehokkaasti palaneen materiaalin pursotusruihulta. Puhdistusteho perustuu siihen, että siihen on lisätty hiovaksi aineeksi lasikuitua. Devoclean High-Temperature-puhdistusmateriaalin huonoiksi puoliksi voi lukea sen, että sitä ei saa missään nimessä jättää pursotusruihulle laitteen sammuttamisen jälkeen. Sitä ei myöskään saa seisottaa pursotusruihulla 30 min pidempään. High-Temperature muuttuu jäähtyessä kivikovaksi eikä välttämättä pehmene enää niin, jotta pursotusruihi saataisiin uudelleen pyörimään. (3devo 2022l.)

Liite 2. 1(5) **Materiaalisiirtymät**

Composer 450-laitteen käyttöön oleellisesti kuuluu hallita materiaalisiirtymät. Ennen pursotuksen aloittamista joudutaan yleensä tekemään materiaalisiirtymä, riippuen siitä mitä materiaalia on pursotusruuville. Materiaalisiirtymä on tehtävä, jos pursotusruuville olevan materiaalin sulamispiste on oleellisesti eri kuin pursotettavaksi tarkoitettun materiaalin.

Siirtymämateriaalina toimivat Composer 450-filamentinvalmistuslaitteen puhdistusmateriaalit. Siirtymämateriaalit ovat HDPE, Devoclean Mid-Temperature sekä Devoclean High-Temperature. (3devo 2022j.) HDPE- ja Devoclean Mid-Temperature-siirtymämateriaaleilla on samankaltaiset toimintalämpötilat mutta erilaiset viskositeettiominaisuudet varsinkin korkeissa yli 280 °C:n lämpötiloissa (3devo 2022l). HDPE muuttuu korkeissa lämpötiloissa erittäin juoksevaksi, ja tätä ominaisuutta voidaan käyttää hyväksi joissakin tapauksissa. Esimerkiksi tapauksissa, jossa pursotettavalla materiaalilla on matala viskositeetti, ja sillä täytyisi työntää pursotusruuville oleva puhdistusmateriaali ulos ennen pursotusta.

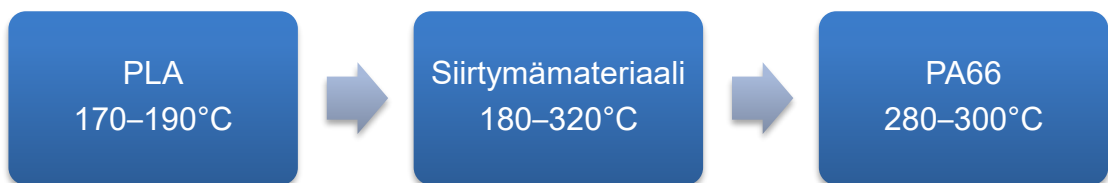
Composer 450-laitteiston pursotusruuvi ei ole koskaan tyhjä. Siellä on aina jotain materiaalia johtuen siitä, että jos ruuville ei syötetä jatkuvasti uutta materiaalia, loppuu ruuvilta paine työntää tuoretta materiaalia ulos. Pieni osa muovia jää näin ollen aina pursotusruuville. (3devo 2019.)

Esimerkiksi jos Composer 450 pursotusruuville on jätetty PLA-polymeeri sulamispisteellä 145–160 °C (Technical data sheet PLA 2017), jonka jälkeen aloitetaan 263 °C:n sulamispisteellä (Thomas & Visakh 2012, 3.3) olevan PA66-polymerin pursotus ilman materiaalisiirtymää, hajoaa PLA-polymeeri termisesti pursotusruuville. Kun palanut materiaali tarttuu pursotusruuville, ei tämän jälkeen ole enää mahdollista tuottaa laadukasta filamenttia ilman koneen perusteellista puhdistamista. Jos pursotusruuville on palanutta materiaalia, täytyy Composer 450-laitteelle tehdä täydellinen puhdistus Devoclean High-Temperature menetelmällä. Tämän jälkeen on syytä tehdä Composer 450-laitteelle myös laatutarkastus. (3devo 2022h.) Liite 4 käsittelee laitteiston laatutarkastusta.

Liite 2. 2(5) **Materiaalisiirtymät**

Composer 450-laitteen pursotusruuvilla olevan materiaalin ja siirtymämateriaalin sulamislämpötilojen täytyy mennä sen verran päällekkäin, jotta siirtyminen uuteen materiaaliin on mahdollista. Molempien materiaalien on oltava sulassa muodossa siirtymän aikana. (3devo 2022j.) Voi käydä myös niin, että siirtymämateriaaleja joutuu käyttämään useita, jotta päästään äärimmäisiin lämpötilaeroihin kahden materiaalin välillä. Jos esimerkiksi siirrytään PLA-polymeeristä PEEK-polymeeriin, jonka sulamispiste on noin 341 °C (Material data sheet PEEK natural 2019), täytyy käyttää kahta siirtymämateriaalia. PLA-polymeeri pursotetaan pois Devoclean Mid-Temperature-puhdistusmateriaalia (180–320 °C) käyttäen. Tämän jälkeen Mid-Temperature pursotetaan pois Devoclean High-Temperature-puhdistusmateriaalin avulla (290–420 °C). Vaiheiden jälkeen lämpötila voidaan turvallisesti nostaa PEEK-materiaalin sulamispisteen yli. (3devo 2021.)

Esimerkkitapauksena PLA-PA66 materiaalisiirtymä, jossa PA66-polymerin sulamispiste on noin 100 °C korkeampi kuin PLA-polymerin. Tässä tapauksessa täytyy tehdä materiaalisiirtymä, jotta pursotusta voidaan jatkaa PA66-materiaalilla. Lämpötilat ovat noin 10–20 % yli materiaalien sulamispisteen. Kuvio 7 esittelee PLA-PA66 materiaalisiirtymän.



Kuvio 7. Materiaalisiirtymä PLA-PA66

1. Composer 450-laitteen kaikki neljä lämpövastusta lämmitetään PLA:n sulamispisteen yli noin 10–20 %. Lämpötilan on oltava vähintään 180 °C, jotta siirtymämateriaali toimisi oikein.
2. Composer 450 pursotusruuville syötetään HDPE- (180–280 °C) tai Mid-Temperature-puhdistusmateriaali (180–320°C). Tässä tapauksessa suositus on HDPE, koska PA66-polymeeri on erittäin alhaisella viskositeetillä.

Liite 2. 3(5) Materiaalisiirtymät

3. Puhdistusmateriaaleja kannattaa syöttää vähäisissä määrin kerrallaan. Materiaalisiilon tyhjentäminen voi olla haastavaa niin, ettei tule materiaalihukkaa.
4. Pursotusta jatketaan niin kauan, että suuttimesta tulee pelkästään puhdistusmateriaalia. Tässä vaiheessa on oltava tarkkana, että PLA-materiaali on poistunut täysin pursotusruuvilta.
5. Lämpötila nostetaan PA66-materiaalin pursotuslämpötilaan. Lämpötilan kannattaa antaa olla pursotuslämpötilassa hetken aikaa ennen PA66-materiaalin lisäämistä, jotta pursotusruuvi kykenee varmasti sulattamaan kyseisen materiaalin.
6. Lämpötilan noston aikana pursotusruuvien nopeuden voi laskea alas minimiarvoonsa, kun on varma, että pursotusruuvilla on pelkästään puhdistusmateriaalia.
7. Odotetaan, että materiaalisuppilo on täysin tyhjä puhdistusmateriaalista ennen PA66-materiaalin lisäämistä. Näin toimiessa saadaan tarkka ja nopea materiaalisiirtymä. On myös mahdollista käyttää imuria poistamaan ylimääräiset puhdistusgranulaatit materiaalisuppilosta.
8. Lisätään PA66-materiaali pursotusruuville.
9. Pursotusta voidaan jatkaa uudella materiaalilla. (Thomas & Visakh 2012, 3.3; Technical data sheet PLA 2017; 3devo 2020c; 3devo 2022j.)

Materiaalisiirtymä on tehtävä myös toiseen suuntaan, kun siirrytään materiaaliin, jolla on alhaisempi sulamispiste. Lämpötilat ovat noin 10–20 % yli materiaalien sulamispisteen. Kuvio 8 esittelee ABS-PLA materiaalisiirtymän.



Kuvio 8. Materiaalisiirtymä ABS-PLA

Liite 2. 4(5) Materiaalisiirtymät

1. Lämpötilan annetaan olla samassa, missä ABS-muovin pursotus tapahtui (240–260°C).
2. Composer 450 pursotusruuville syötetään HDPE- (180–280 °C) tai Mid-Temperature-puhdistusmateriaali (180–320°C). Suosituksena HDPE, jotta pursotettavaa PLA-materiaalia kuluisi siirtymässä mahdollisimman vähän.
3. Pursotusta jatketaan niin kauan, että pursotussuuttimesta tulee ulos pelkästään puhdistusmateriaalia. Tässä vaiheessa on oltava tarkkana, että ABS-materiaali on täysin poistunut pursotusruuilta.
4. Lämpötila lasketaan PLA-materiaalin pursotuslämpötilaan.
5. Lämpötilan laskun aikana pursotusruuvien nopeuden voi laskea alas minimiarvoonsa, kun on varma, että pursotusruuilla on pelkästään puhdistusmateriaalia.
6. Odotetaan, että materiaalisuppilo on täysin tyhjä puhdistusmateriaalista ennen PLA-materiaalin lisäämistä. Näin toimiessa saadaan tarkka ja nopea materiaalisiirtymä. On myös mahdollista käyttää imuria poistamaan ylimääräiset puhdistusgranulaatit materiaalisuppilosta.
7. Lisätään PLA-materiaali pursotusruuville.
8. Pursotusta voidaan jatkaa uudella materiaalilla. (Technical data sheet PLA 2017; 3devo 2020c; 3devo 2022j; CAMPUS Datasheet 2022.)

Aina kun on mahdollista, kannattaa siirtymissä käyttää HDPE-puhdistusmateriaalia. HDPE on paras siirtymämateriaali, jos vain lämpötilat kohtaavat toisensa. Lisäksi siirtymä pursotettavaan materiaaliin HDPE-puhdistusmateriaalin avulla on nopeinta sen viskositeetin takia. (3devo 2020b.) Tämän lisäksi on aina otettava huomioon pursotettavan materiaalin viskositeetti, koska matalan viskositeetin omaavalla materiaalilla voi olla haastavaa työntää pursotusruuilta ulos suuri-viskositeettista materiaalia.

Liite 2. 5(5) Materiaalsiirtymät

Materiaalisuppilon kannattaa antaa tyhjetä kokonaan ennen seuraavan materiaalin lisäämistä (3devo 2022t), muutoin materiaalinsekoittaja ja pursotusruuvi sekoittavat materiaalit keskenään, jolloin iso osa pursotettavaa materiaalia menee hukkaan. On hyvä tapa imuroida pursotusruuvi täysin tyhjäksi edellisestä materiaalista ennen uuden lisäämistä.

Liite 3. 1(2) Composer 450-laitteiston puhdistaminen

Composer 450-laite täytyy puhdistaa jokaisen käytön jälkeen, jos pursotettava materiaali on ollut jotain muuta kuin PLA:ta. Composer 450-laitteen puhdistaminen on yksinkertaista. Valitaan puhdistusaine lämpötila-alueen, pursotettavan materiaalin tai sen perusteella onko pursotusruuville tarttunut palanutta materiaalia. Puhdistaminen tapahtuu siinä lämpötilassa, jossa edellinen pursotus on tapahtunut. Lämpötiloja ei saa laskea. Kun puhdistusainetta rupeaa tulemaan suuttimesta, asetetaan pahvi suojaamaan mitta-anturia (Kuva 52) ja tuulettimet sammutetaan kokonaan. (3devo 2022l.)



Kuva 52. Pahvi suojaamassa mitta-anturia puhdistuksen aikana

Puhdistusmateriaalia kannattaa laittaa materiaalsiiloon pieninä annoksina, sillä puhdistusmateriaalin poistaminen siilosta voi olla haastavaa. Puhdistusta jatketaan niin kauan, että suuttimesta ulos tuleva aine on varmuudella pelkästään puhdistusmateriaalia. Tässä kannattaa olla tarkkana, jos pursotettava materiaali on ollut valkoista. Puhdistusmateriaalit ovat jäähtyessään kaikki valkoisen värisiä.

Liite 3. 2(2) **Composer 450-laitteiston puhdistaminen**

Jos puhdistus tehdään Devoclean High-Temperature-puhdistusmateriaalilla, on se vielä ajettava pursotusruuville pois Devoclean Mid-Temperature-puhdistusmateriaalilla. Puhdistamisessa kannattaa käyttää niin kutsuttua Disco purging-menetelmää, jossa pursotusruuvien nopeutta vaihdellaan minuutin välein. Esimerkiksi 3 → 12 → 8 → 3 → 15 → 5 (r/m). Kierrosluvuilla ei ole niin suurta merkitystä, mutta tarkoitus on käyttää kierrokset korkealla ja sen jälkeen laskea alas, jotta puhdistusmateriaali ”kerää” likaa pursotusruuville. Tätä menetelmää jatketaan niin kauan, että pursotusruuvi on varmasti puhdas. (3devo 2022l.) Suuttimesta ulos tulevan puhdistusaineen täytyy olla täysin valkoista sekä puhdasta. Tässä kannattaa ottaa huomioon, että suuttimen suulle kerääntyy aina palanutta muovia, joka irtoaa mustina täplinä puhdistusmateriaalin mukaan. Tämä voi antaa väärää signaalia siitä, että kone ei ole vielä puhdas. Suuttimen kärki kannattaakin puhdistaa ennen toimenpidettä niin, ettei siitä tartu palanutta muovia puhdistusaineeseen. Tarkat ohjeet puhdistamiseen löytyy 3devon sivustolta, joita on syytä noudattaa (3devo 2022l).

Liite 4. **Laatutarkastus**

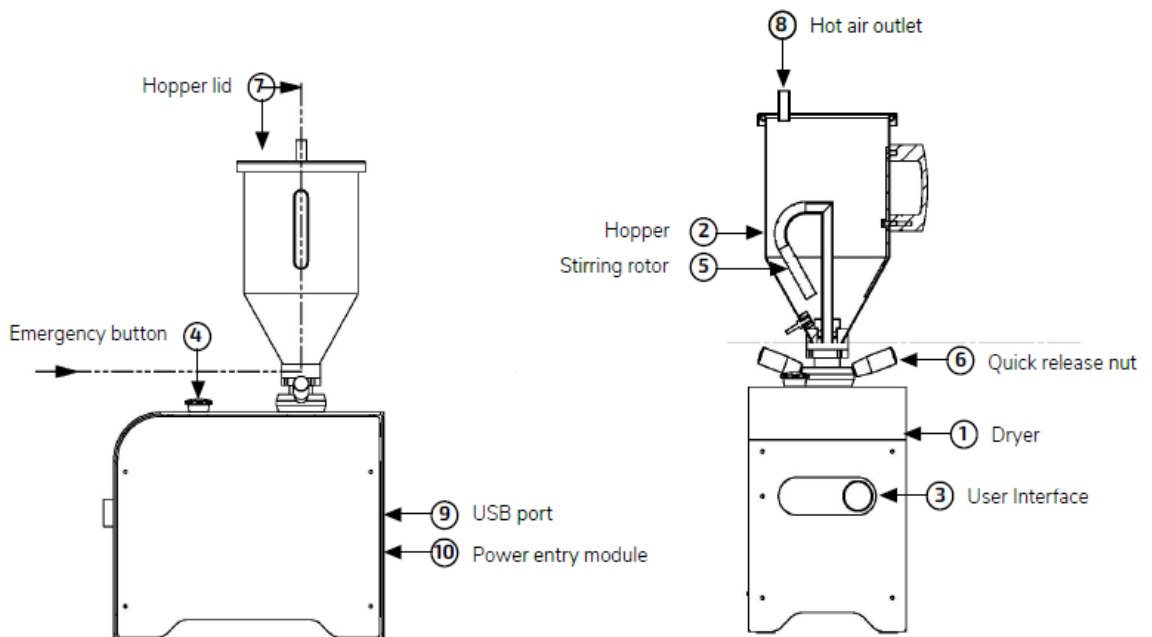
Laatutarkastus on Composer 450-laitteelle toimenpide, jolla voidaan todeta laitteen moitteeton toiminta. Jos filamentin pursotuksessa on tapahtunut materiaalin termistä hajoamista, on tarpeellista tarkistaa Composer 450-laite laatutarkastuksen avulla, millä voidaan todeta pursotusruuvin olevan puhdas. Jos laitetta käytetään paljon, on tässä tapauksessa kehoitettu testaamaan laitteen toiminta kuu-kausittain laatutarkastus toimenpiteellä (3devo 2022g). Ennen laitteen laatutarkastusta on syytä tehdä Devoclean High-Temperature puhdistus, koska se on menetelmä, joka poistaa palaneen materiaalin parhaiten pursotusruuvilta.

Kun laite on puhdistettu perusteellisesti Devoclean High-Temperature-puhdistusmateriaalilla niin, että suuttimesta ei tule lainkaan palanutta materiaalia, voidaan laatutarkastus aloittaa. Laatutarkastus toimenpide on selostettu seikkaperäisesti 3devon verkkosivustolla (3devo 2022h). Pääpiirteittäin toimenpiteessä testataan, voidaanko tuottaa hyvälaatuista PLA-filamenttia. PLA on erittäin helppo materiaali pursottaa, joten jos ei kyetä tuottamaan hyvälaatuista PLA-filamenttia, voidaan olettaa Composer 450-laitteessa olevan jotain vialla. Laatutarkastuksessa tuotettu PLA-tulostusfilamentti voidaan käyttää hyödyksi 3D-tulostuksessa, joten sen tekemistä ei kannata vältellä materiaalihukan vuoksi.

Tutkimuksessa tehtiin laitteiston laatutarkastus, koska testien alussa tapahtui polymeerin terminen hajoaminen. Kone puhdistettiin perusteellisesti Devoclean High-Temperature-puhdistusmateriaalilla, ja puhdistamisen jälkeen laatutarkastus toimenpidettä jatkettiin 3devon verkkosivuilla olevien ohjeiden mukaisesti. Toimenpiteen aikana seurataan Devovisionin avulla filamentin halkaisijamittaa, pursotusruuvinnopeutta sekä moottorinvirtaa. Filamentin halkaisijamitan on pysyttävä 0,05 mm:n sisällä kohdehalkaisijasta. Pursotusruuvin pyörimisen on oltava +/- 0,1 r/m:n sisällä, ja moottorinvirran on pysyttävä noin 2000 mA:ssa ilman suuria virtapiikkejä. (3devo 2022h.) Laatutarkastuksen avulla voitiin todeta, että Composer 450-laitteisto toimii moitteetta. On myös syytä seurata 3devon sivuilta löytyvää laitteen huolto-ohjetta, ja huoltaa laitetta sen mukaisesti (3devo 2022g).

Liite 5. AIRID Polymer Dryer-laitteiston huolto

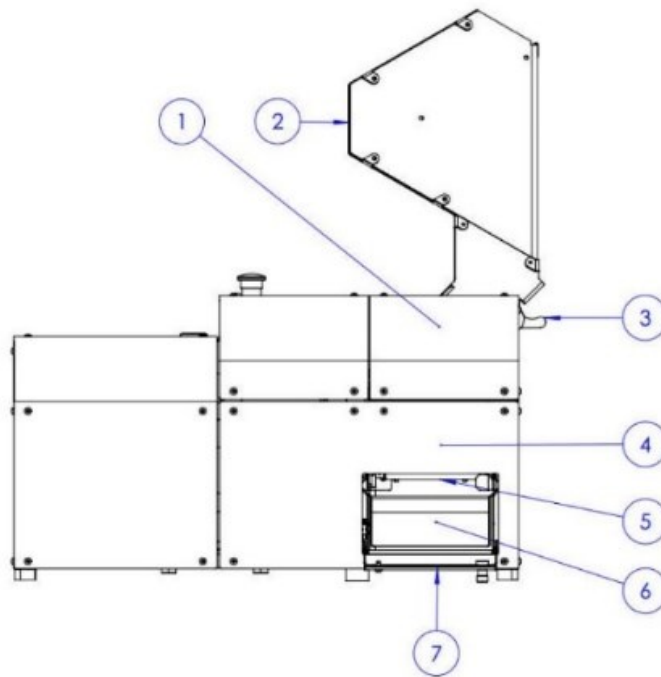
AIRID Polymer Dryerin (Kuva 53) käytössä on vähäisesti tarvittavia huoltotoimia. Murskattu muovi saattaa liian kuumalla ilmalla puhaltaessa sulaa yhteen ja jopa jumittaa koko laitteen. Tästä syystä on syytä seurata materiaalisuppiloa (2) kuivaamisen aikana, että tapahtuuko paakkuuntumista. Tätä ilmiötä tapahtuu lähinnä SHR3D IT-laitteella murskatuissa materiaaleissa eikä niinkään granulaatti muodossa olevilla materiaaleilla. Kuvassa 53 näkyvä Stiring rotor (5) putken reikä tulee pitää puhtaana. Jos se täyttyy muovilla, voi siitä päästä muovia käytön aikana koneen sisälle reiästä, josta puhalletaan materiaalisuppiloon (2) kuumaa ilmaa. Tämä voi tukkia ilma-aukon, ja sen vuoksi saattaa syntyä vaaratilanne. (Airid-Dryer-Manual 2019, 10.)



Kuva 53. Polymeerien kuivauslaitteisto. (Airid-Dryer-Manual 2019, 5)

Liite 6. 1(2) 3devo SHR3D IT-laitteiston huolto

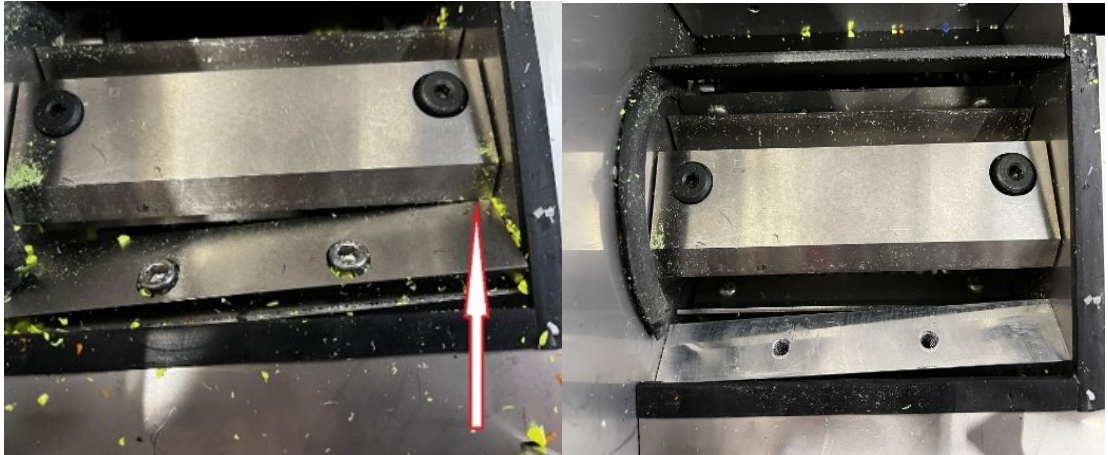
SHR3D IT-laitteessa (Kuva 54) on antureita, jotka estävät laitteen pyörimisen huollon tai tyhjentämisen aikana. Antureita on kannessa (1), materiaalisiilon sulkuvivussa (3), murskeen suodattimessa (5) sekä luukussa (7). Jos laitteella on käynnistysongelmia, on nämä paikat hyvä tarkistaa ja puhdistaa. Laitteen puhdistus vaatii tehokkaan imurin. Laite on muuten huoltovapaa, mutta terien kuntoa on seurattava jatkuvasti.



Kuva 54. SHR3D IT-murskain (SHR3D IT 2017, 8)

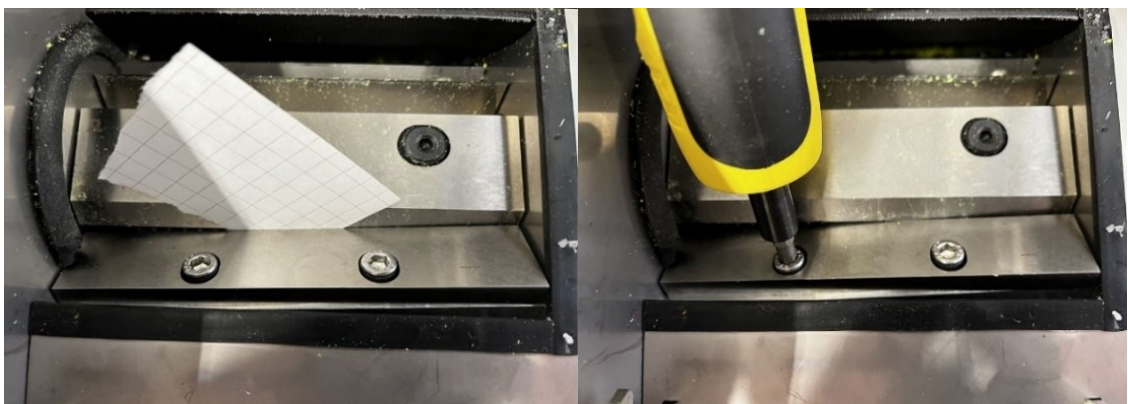
Koska tutkimuksessa SHR3D IT-laite rikkoontui PA66-sivuvirtapolymeerin murskauksessa, käsitellään tässä liitteessä laitteen korjaustoimenpide. Laitteen rikkoontumisen syy on mahdollisesti se, että sivuvirtana saatava muottivaluaihoiden ruiskutuskanavista syntyvä tikku (Kuva 13) todennäköisesti putosi ylemmän karkeamurskausterän (Kuva 5) läpi sellaisenaan ja meni alemman terän väliin poikittain. Tämä mahdollisesti irrotti murskausterän paikoiltaan. Voi myös olla, että liitoksessa tapahtui väsymistä, jolloin kiinnitys petti murskauksen aikana. Kuva 55 vasemmalla esittää siirtynyttä vastaterää, joka estää moottorin vapaan pyörimisen. On muistettava, että ennen korjaustoimenpiteitä täytyy irrottaa virtajohto. Kun tämä oli tehty, voitiin terä irrottaa (Kuva 55 oikealla).

Liite 6. 2(2) 3devo SHR3D IT-laitteiston huolto



Kuva 55. Siirtynyt vastaterä (vasen) ja vastaterä irrotettu (oikea)

Kiinnityspultit puhdistettiin samalla vanhasta ruuvilukitteesta. Terä laitettiin uudelleen paikoilleen, ja pultteihin asennettiin Locklite 243 ruuvilukitetta laitteen käyttöohjeen mukaisesti (SHR3D IT 2017, 26–28). Pultit kiinnitettiin niin, että terä liikkui vielä kohtuullista voimaa käyttämällä. Terien väliin laitettiin paperinpalanen, ja terät kohdistettiin niin, että koko terän leveydeltä välys oli tarkalleen paperin vahvuinen (Kuva 56 vasen). Tämä voitiin todeta pyörittämällä terää ja tunnistelemalla koko terän pituudelta, että terä ja vastaterä koskettavat paperia terien kohtaamiskohdalla. Oikea välys täytyi todeta kaikilla kolmella terällä. Tämän jälkeen pultit kiristettiin käyttöohjeessa annettuun momenttiin (30Nm) momenttiavaimella (Kuva 56 oikea). Pyörittämällä terää ja tarkistamalla asennus paperin avulla, voitiin todeta, että asennus onnistui.



Kuva 56. Välyksen tarkistaminen paperilla (vasen) ja momenttiin kiristäminen (oikea)

Liite 7. 1(2) **Materiaalintulo loppuu suuttimesta**

Pursotustestien alussa PA66-testimateriaalin syöttö loppui kokonaan. Jos materiaalin tulo loppuu, tarkoittaa se sitä, että polymeeri seisoo paikoillaan pursotusruuvilla. Varsinkaan PA66-polymeeri ei kestä olla kuin hetken sulassa muodossa lämpövastuksia vasten, ennen kuin tapahtuu terminen hajoaminen.

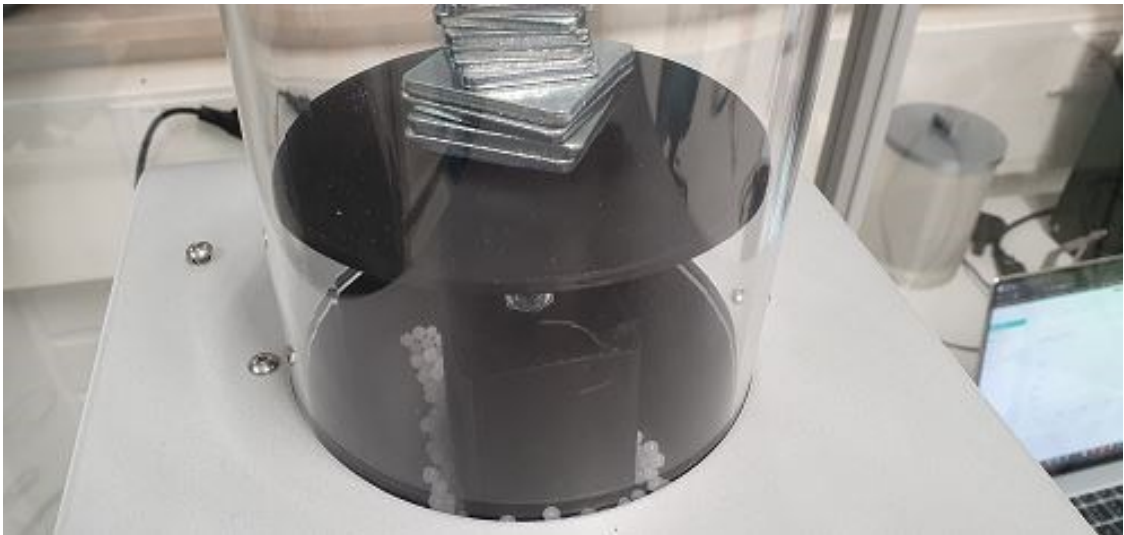
Materiaalinsyötön loppuminen johtui todennäköisesti siitä, että Composer 450-laitteen sisällä oli Devoclean Mid-Temperature-puhdistusmateriaali ennen PA66-murskeen lisäämistä. Devoclean Mid-Temperature-puhdistusmateriaalilla on erittäin suuri viskositeetti, ja sulassa tilassa alhaisella viskositeetilla oleva PA66-materiaali ei jaksanut työntää Devoclean Mid-Temperature-puhdistusmateriaalia suuttimesta ulos (3devo support 2022c). Lisäksi murskatussa muodossa oleva materiaali tarvitsee ehdottomasti materiaalinsekoittajan (Kuva 11), jotta materiaalinsyöttö olisi tasaista. Aloituslämpötilan laskeminen pursotuslämpötilaan voi kestää pitkään, ja tämän aikana materiaalin syöttö voi olla heikkoa, koska pursotusruuvin perällä ei ole korkeamman viskositeetin materiaalia alemmalla lämpötilalla. Testien syöttöongelmat voivat johtua osittain myös tästä.

Syynä materiaalin tulemisen loppumiseen voi myös olla se, että syöttöruuvi on pyörinyt liian kauan tyhjänä. Jos Composer 450-laitteesta on sammutettu materiaalisiilon täyttömäärän varoitussensori, on suositeltavaa seurata suppilossa olevan materiaalin määrää, ettei se mene liian vähäiseksi. Alhainen materiaalinpaine vaikuttaa materiaalisyöttöön paljon. Laitteistossa on anturi, joka seuraa materiaalin määrää suppilossa. Laitteisto sammuttaa itsensä materiaalin määrän ollessa liian alhainen yli 10 minuuttia. Ei ole suositeltavaa, että syöttöruuvi pyörii 1 minuuttia pidempään tyhjänä. (3devo 2022d.) Tyhjä tila voi pysäyttää materiaalin tulemisen suuttimelta, ja samalla voi tapahtua syöttöruuvilla olevan muovin terminen hajoaminen. Lisäksi syynä voi olla se, että materiaalisuppilon puoleisten vastuksien lämpötilat ovat liian suuret, ja näin ollen ei saada kiinteämpää materiaalia työntämään sulaa massaa suuttimesta ulos.

Materiaalin riittämätöntä syöttöä voidaan seurata Devovision-ohjelmistolla. Jos pursotusruuvin virrankulutus tippuu noin 1500mA lukemiin, on materiaalin syöttö monissa tapauksissa riittämätöntä. Pursotuksen toimiessa oikein on pursotusruuvin virrankulutus lukemat noin 2000-2500mA. (3devo 2022f.)

Liite 7. 2(2) Materiaalintulo loppuu suuttimesta

Jos materiaalinsyöttö loppuu suuttimesta huolimatta siitä, että pursotusruuvi pyörii esteettä, on syöttö saatava pikaisesti takaisin. Ensimmäiseksi poistetaan ylimääräinen testimateriaali suppilosta. Se voidaan toteuttaa esimerkiksi imurilla. (3devo 2020c.) Seuraavaksi suppiloon lisätään Devoclean Mid-Temperature- tai Devoclean High-Temperature-puhdistusmateriaali, riippuen mitä lämpötilaa pursotuksessa on käytetty. Pääasia on, että pursotusruuville lisätään puhdistusainetta, jolla on suuri viskositeetti, ja se jaksaa työntää testimateriaalin ulos. Lisäksi materiaalisiiloon voi kohdistaa painetta painamalla siellä olevaa puhdistusmateriaalia pursotusruuvia vasten. Granulaatteja voi painaa kohtuullista käsivoimaa käyttäen. (3devo 2020c.) Tutkimuksen alussa materiaalin tulo loppui täysin, ja tätä varten suunniteltiin laite, jolla tarvittaessa voidaan muodostaa painetta pursotusruuville (Kuva 57). Laitteen voi jättää hetkeksi suppiloon, ja lisätä siihen tarvittaessa teräspainoja. Materiaalisyötön pitäisi palautua edellä kuvattujen toimintojen avulla. Tutkimuksen testeissä materiaalinsyöttö saatiin takaisin kohdistamalla painetta pelkkään PA66 testimateriaaliin lisäämättä ohjeen mukaisesti puhdistusmateriaalia. Tämä ei välttämättä toimi kaikilla materiaalilaaduilla.



Kuva 57. Laite tuottamassa painetta pursotusruuville, että materiaalin syöttö saataisiin takaisin