



**SAVONIA**

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# 3D-MUOVITULOISTUS JA PINNOITUS

TEKIJÄ: Sandor Nagy



|  |          |                    |    |
|--|----------|--------------------|----|
| Koulutusala<br>Tekniikan ja liikenteen ala   |          |                    |    |
| Koulutusohjelma<br>Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  |          |                    |    |
| Työn tekijä(t)<br>Sandor Nagy  |          |                    |    |
| Työn nimi<br>3D-muovitulostus ja pinnoitus   |          |                    |    |
| Päiväys  | 6.5.2014 | Sivumäärä/Liitteet | 35 |
| Ohjaaja(t)<br>Lehtori Mika Mäkinen ja lehtori Eeva Jauhiainen  |          |                    |    |
| Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t)<br>Savonia Ammattikorkeakoulu  |          |                    |    |
| <p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli toimia pohjatutkimuksena tulevissa 3D-muovitulostuksiin liittyvissä töissä, joissa käytössä on FDM-tekniikalla toimiva 3D-tulostin. Tavoitteena oli selvittää onnistuuko ABS-muovitulosteiden metallipinnoitus, sekä tutkia yleisimmillä muoveilla 3D-tulostettujen kappaleiden mekaanisia ominaisuuksia. 3D-muovitulostusta ja sen yhdistämistä pinnoitukseen ei ole tutkittu paljoa.</p> <p>Kappaleissa, joissa pinnoitus onnistui hyvin, pinnoitteen kiinnipysyvyys ja kulutuskestävyys oli hyvä. Kulutuskestävyyttä testattiin Pin On Disk -kokeilla. Tulostetuille kappaleille tehtiin vetokokeet ja tuloksista saatiin havainnollistava vertailutaulukko. Tutkimuksen mekaanisten ominaisuuksien tuloksia tukee Michiganin teknisessä korkeakoulussa keväällä 2014 julkaistu tutkimustyö. Kappaleet tulostettiin käyttäen FDM-tekniikkaa eli muovin pursotusta ja pinnoituksessa käytössä oli Natural ABS-muovi. ABS-muovitulosteiden pinnoitukset suoritettiin Oraksen tehtaalla Raumalla. Oraksella on Raumalla muovin metallipinnoitusta varten oma linjasto, missä pinnoitetaan hana- ja suihkutuotteita.</p> <p>Työ antaa uutta tietoa materiaaleista ja niiden kestävydestä todenmukaisissa kuormitustilanteissa. Tämä tutkimus tuo esille seikkoja, jotka tulee ottaa huomioon muovikappaleiden metallipinnoituksessa. Kappaleiden pinnoitus onnistui vaihtelevasti tulostuksen epätasaisuuden vuoksi. Jatkotutkimuksia voisi toteuttaa erilaisilla pinnoitusmenetelmillä ja lisäämällä pinnoitteen paksuutta lujuusominaisuuksien kasvattamiseksi. Lisäksi tulostetuille kappaleille voisi tehdä taivutus- ja iskutestikokeita sekä tarkastella täyttökuvioiden merkitystä tuloksiin. Pinnoituksen onnistuessa on mahdollista löytää uusia sovelluskohteita 3D-muovitulostetuille kappaleille hyvin erilaisiin, haastaviinkin olosuhteisiin.</p> |          |                    |    |
| Avainsanat<br>3D-tulostus, muovin pinnoitus, pikavalmistus, ainettalisäävä valmistus, RP, FDM, asetonikäsittely.   |          |                    |    |
| Julkinen   |          |                    |    |

|  |             |                  |    |
|--|-------------|------------------|----|
| Field of Study<br>Technology, Communication and Transport  |             |                  |    |
| Degree Programme<br>Degree Programme in Mechanical Engineering   |             |                  |    |
| Author(s)<br>Sandor Nagy   |             |                  |    |
| Title of Thesis<br>3D Printing and Plating   |             |                  |    |
| Date   | May 6, 2014 | Pages/Appendices | 35 |
| Supervisor(s)<br>Mr. Mika Mäkinen, Senior Lecturer and Mrs. Eeva Jauhiainen, Senior Lecturer   |             |                  |    |
| Client Organisation /Partners<br>Savonia University of Applied Sciences  |             |                  |    |
| <p>Abstract</p> <p>The combination of 3D printing and metal plating on plastic parts has not yet been widely studied. In this thesis the aim was to study mechanical properties of 3D printed plastic parts and to test the possibility of metal coating in parts printed in natural ABS. The aim of this thesis was also to function as guidance for future works related in 3D printing with plastics using FDM technology.</p> <p>The parts that were properly plated, showed great resistance to wear. The durability of the coating was tested by using Pin On Disk-test. The mechanical properties of printed parts were examined with tensile tests and the results were presented in a comparison chart. The parts were printed using FDM (Fused Deposition Modeling) technique. The plating of the ABS parts was conducted at Oras factory in Rauma. There is a metal plating line for faucet- and shower products.</p> <p>The work gives a basic understanding about durability of different printing materials used in this project. The tensile strength tests conducted in Michigan Technological University in spring 2014 show that the results for printed parts are similar to the results of this thesis. This work contains useful information about factors to be taken into account when planning metal plating of 3D printed plastic parts. Plating of the 3D printed parts did not succeed as expected, because the printer did not produce completely solid parts. Future research could be done by trying out different plating methods and plating additional metal to get more strength. As for the parts different tests like bending and impact strength tests could be conducted. Various infill patterns and the influence of strength could be tested as well. 3D printed parts that are successfully plated can be used in various ways and in more demanding conditions.</p> |             |                  |    |
| Keywords<br>3D printing, plating, rapid prototyping, additive manufacturing, plating on plastics, FDM, acetone smoothing.  |             |                  |    |
| Public   |             |                  |    |

## ESIPUHE

Haluaisin kiittää opinnäytetyöni ohjaajia, lehtori Mika Mäkistä ja lehtori Eeva Jauhiaista tuesta ja opinnäytetyön ohjauksesta sekä projekti-insinööri Pekka Nuutista, jonka avulla muovitulosteiden pinnoitus sai alkunsa. Kiitoksen ansaitsee Savonia-ammattikorkeakoulun laboratorion henkilökunta, joka oli auttamassa työn toteutuksessa.

Suuri kiitos myös Oraksen henkilökunnalle, ilman heidän avointa ja innovatiivista yhteistyötään tämä työ tässä laajuudessaan ei olisi ollut mahdollinen.

Kuopiossa 15.5.2014

---

Sandor Nagy

## SISÄLTÖ

|  |    |
|--|----|
| KÄSITTEET .....  | 8  |
| 1 JOHDANTO.....  | 9  |
| 2 3D-TULOSTAMINEN.....   | 10 |
| 2.1 Ainettalisäävä valmistus.....  | 10 |
| 2.2 Ainettalisäävän valmistuksen kehitys .....                               | 10 |
| 2.3 FDM (Fused Deposition Modeling) ja FFF (Fused Filament Fabrication)..... | 12 |
| 2.4 3D-tulostamisen mahdollisuudet ja käyttökohteet .....                    | 13 |
| 3 3D-MUOVITULOSTEIDEN MEKAANISET OMINAISUUDET.....                           | 16 |
| 3.1 Testikappaleiden valmistus .....   | 16 |
| 3.2 Laitteisto .....   | 17 |
| 3.2.1 3D-tulostin.....   | 17 |
| 3.2.2 Aineenkoetuslaite .....  | 18 |
| 3.3 Materiaalit .....  | 18 |
| 3.4 Vetokokeet.....  | 19 |
| 3.5 Vetokokeiden tulokset.....   | 19 |
| 4 MUOVIN PINNOITUKSEN TEORIAA.....   | 21 |
| 4.1 Muovin metallipinnoitus.....   | 21 |
| 4.2 Prosessi.....  | 21 |
| 4.2.1 Puhdistus .....  | 21 |
| 4.2.2 Syövytys .....   | 22 |
| 4.2.3 Neutralointi.....  | 22 |
| 4.2.4 Aktivointi .....   | 22 |
| 4.2.5 Kiihdytys .....  | 22 |
| 4.2.6 Kemiallinen nikkeli .....  | 23 |
| 5 PINNOITUKSET ORAKSELLA .....   | 24 |
| 5.1 Pinnoituksen esivalmistelut .....  | 24 |
| 5.2 Testikappaleiden pinnoitukset.....                                       | 25 |
| 5.3 Asetonikäsiteltyjen kappaleiden pinnoitus.....                           | 25 |
| 6 PINNOITTEEN KIINNIPYSYVYYDEN TODENTAMINEN.....                             | 27 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 6.1   | Pin On Disk – kulutuskoee .....             | 27 |
| 6.2   | Pinnoitetun levyn testaus .....             | 27 |
| 6.3   | Sylinterinmuotoisen kappaleen testaus ..... | 28 |
| 6.4   | Tulosten analysointi .....                  | 28 |
| 6.4.1 | Levyn kulutus .....                         | 28 |
| 6.4.2 | Sylinterin kulutus .....                    | 32 |
| 6.5   | Silmämääräinen tarkastelu .....             | 32 |
| 7     | YHTEENVETO .....                            | 33 |
|       | LÄHTEET .....                               | 34 |

## KÄSITTEET

|           |   |
|-----------|---|
| STL       | STL-tiedostomuoto on yksinkertainen geometriatiedon esitystapa.   |
| 3D        | Kolmiulotteinen.  |
| CAD       | Tietokoneavusteinen suunnittelu.  |
| Polymeeri | Molekyyli, jossa monomeerit ovat liittyneet toisiinsa. Polymeerit voidaan jakaa synteettisiin ja luonnossa esiintyviin.                               |
| ABS       | ABS eli akrylinitriilibutadieenistyreeni on kestävä muovilaatu. ABS-muovin koostuu akrylinitriili, butadieeni ja styreeni monomeereistä.              |
| PLA       | Maissitärkkelyksestä tehty biomuovi.  |
| Kolloidi  | Nesteeseen tai kaasuun hienojakoisena sekoittunut aine.   |
| FDM       | Fused Deposition Modeling on ainettalisäävä tekniikka, jossa muovia pursotetaan kerros kerrokselta suuttimen läpi fyysisen kappaleen valmistamiseksi. |
| FFF       | Fused Filament Fabrication on toinen nimitys FDM tekniikalle.   |



## 1 JOHDANTO

3D-tulostaminen eli ainettalisäävä valmistus on noussut suureen suosioon, ja markkinoille on tullut paljon edullisia pursottavia tulostimia. 3D-tulostus itsessään on ollut markkinoilla pitkään, mutta viimeaikaisten patenttien raukeamisen myötä harrastelijalaitteet ovat yleistyneet ja 3D-tulostus on levinnyt. Muovitulostamisen ja pinnoitusteknologian yhdistämisestä ei juurikaan maailmalta löydy tieteellisiä julkaisuja.

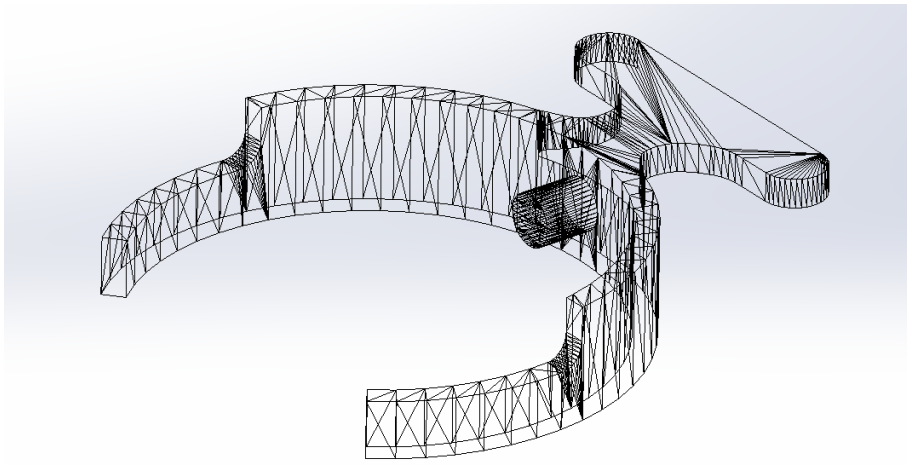
Tässä opinnäytetyössä tutkitaan FDM-tekniikalla tulostettujen muovikappaleiden yleisiä mekaanisia ominaisuuksia ja selvitetään niiden pinnoitettavuutta. Teoriaosuudessa käsitellään 3D-tulostamista, sen historiaa sekä muovin metallipinnoitusta. Kappaleiden tulostamiseen on käytössä Solidoodle-niminen 3D-tulostin. Paremman tulostusjäljen saamiseksi 3D-tulostinta on jälkeempään modifioitu. Työssä käytettävät muovit ovat biohajoava PLA, ABS ja saksalainen uutuus BendLay. Testien tarkoituksena on saada yleiskuva siitä, mitä nämä materiaalit kestävät todenmukaisessa kuormitustilanteessa.

Tulostetut koekappaleet pinnoitetaan Oraksen Rauman tehtaalla, missä muovinpinnoitusta varten on oma linjasto. Oras Oy on 1945 Raumalla perustettu hana- ja suihkutuotteita valmistava suomalainen yritys. Mekaaniset testit toteutetaan Savonia-ammattikorkeakoulun laboratoriotiloissa, jossa suoritetaan vetokokeet muoveille. Pinnoituslaboratoriossa testataan pinnoituksen kiinnipysyvyyttä Pin On Disk -kokeella sekä tutkitaan kappaleiden pintaa mikroskoopilla.

## 2 3D-TULOSTAMINEN

### 2.1 Ainettalisäävä valmistus

Pikavalmistuksessa eli 3D-tulostuksessa on kyse ainettalisäävästä valmistusteknologiasta. Prosessi alkaa virtuaalimallin valinnalla. Tällainen voi olla esimerkiksi tietokoneella suunniteltu kappale. Tulostin lukee CAD-mallin ja tekee siitä viipalemallin, jonka mukaan tulostin kerros kerrokselta valmistaa kappaleen valolähteellä nestettä kovettamalla, pulveria kondensetun lämpöenergian avulla sulattamalla tai tulostuslankaa pursottamalla. Nämä tasot, jotka vastaavat virtuaalimallia, on automaattisesti yhdistetty toisiinsa muodostaen lopullisen muotonsa. (Stratasys 2013.)



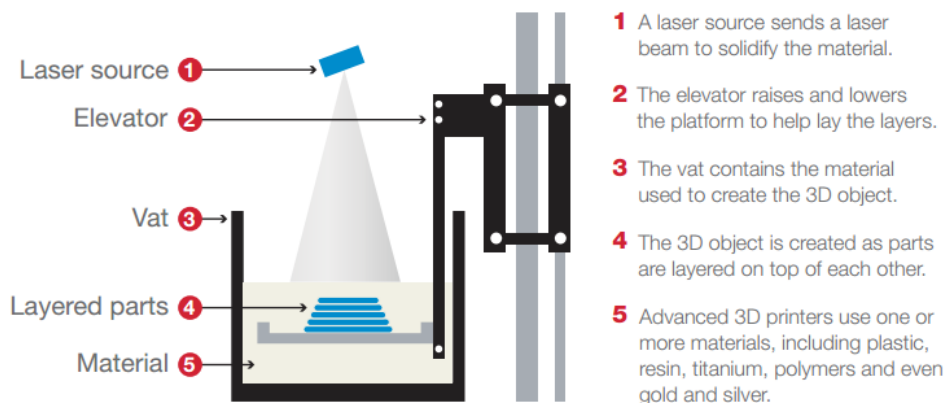
KUVA 1. CAD-malli esitetty kolmioina (Valokuva Sandor Nagy 2014.)

Pikavalmistuksessa käytetään standardin mukaista tiedostomuotoa STL. Tämä tiedostomuoto muodostetaan CAD-ohjelman ja 3D-tulostimen välille, jotta CAD-mallista saadaan viipalemalli, jonka tulostin ymmärtää (kuva 1). STL-malli kuvaa kappaleen tai kokoonpanon muotoja kolmioina. (Stratasys 2013.)

### 2.2 Ainettalisäävän valmistuksen kehitys

3D-tulostaminen on saanut alkunsa jo vuonna 1976, jolloin mustesuihkutulostin keksittiin. Vuonna 1984 mustesuihkutulostinten kehitys mahdollisti 2D-tulostamisen edistymisen materiaalilla tulostamiseen. Näin syntyi 3D-tulostus (kuva 2). Vuosikymmenien aikana uusia sovelluskohteita on kehitetty eri teollisuusaloilla. (Price 2011.)

3D printers work like inkjet printers. Instead of ink, 3D printers deposit the desired material in successive layers to create a physical object from a digital file.



Kuva 2. Ainettalisäävä valmistuksen periaate (Price 2011.)

Ainettalisäävän valmistuksen edistyminen on ollut tiukasti kytköksissä tietotekniikan kehityksen kanssa. Tietokoneiden hintojen laskeminen, etenkin yksityisessä käytössä, on muuttanut tehtaiden toimintaa. Tietokoneiden käytön lisääntyminen on vauhdittanut tietokoneavusteisen suunnittelun (CAD), tietokoneohjatun valmistuksen (CAM) sekä tietokoneistettua numeerisen ohjauksen (CNC) kehitystä. Nämä ovat olleet edellytyksiä ainettalisäävälle valmistukselle. Nykyisiä ainettalisääviä laitteita tarkastellessa voidaan todeta, että koneistuskeskukset sekä materiaalien kehitys ovat myös olleet tärkeitä kehityksessä. (Chua, Leong & Lim 2003, 7.)

Ensimmäinen kaupallinen 3D-tulostin tuli markkinoille vuonna 1992, kun 3D Systemsin perustaja Charles Hull toi markkinoille laitteen, joka toimi kovettamalla fotopolymeeriä UV-valolla. Menetelmää kutsutaan nimellä stereolithography (SLA). (Price 2011.)

Vuonna 1999 kehitys jatkui lääketieteen puolella, kun ensimmäinen elin tulostettiin ihmiselle. Wake Forest Institute for Regenerative Medicinen kehittämässä tekniikassa virtsarakko päällystettiin ihmisen omilla soluilla, ettei elimistö hylkisi sitä. Vuonna 2002 samat tiedemiehetä tulostivat ensimmäisen toimivan maksan. (Price 2011.)

Vuonna 2005 alkoi avoimeen lähdekoodiin perustuva RepRap-tulostinprojekti. Tavoitteena oli rakentaa kone, joka pystyi tulostamaan suurimman osan itseensä tarvittavista osista. 3D-tulostimen rakennusohjeita jaettiin vapaasti ja laitteet kehittyivät valtavasti. Vuonna 2008 RepRap-projekti oli siinä vaiheessa, että pystyttiin valmistamaan kone, joka kykeni tulostamaan yli puolet omista osistaan ja mahdollisti koneiden leviämisen vielä laajemmalle harrastelijaryhmälle (Price 2011.) Nämä tulostimet käyttivät FDM-tekniikkaa, joka on edullista verrattuna muihin ainettalisääviin menetelmiin. Tästä syystä suurin osa harrastelijalait-

teista käyttää kyseistä menetelmää. Tulosteilla on hyvät mekaaniset ominaisuudet, joten kappaleita voi käyttää koneiden rakentamisessa.

Vuonna 2006 tulivat markkinoille ensimmäiset lasersintrauslaitteistot. Tulostin käyttää laseria sulattamaan materiaalin kerros kerrokselta yhteen muodostaen lopullisen tuotteen. Tekniikkaa on sovellettu paljon niin teollisuudessa kuin lääketieteen puolella proteeseissa. Laitteilla pystytään sulattamaan sekä metallipulveria että erilaisia polymeerejä. (Price 2011.)

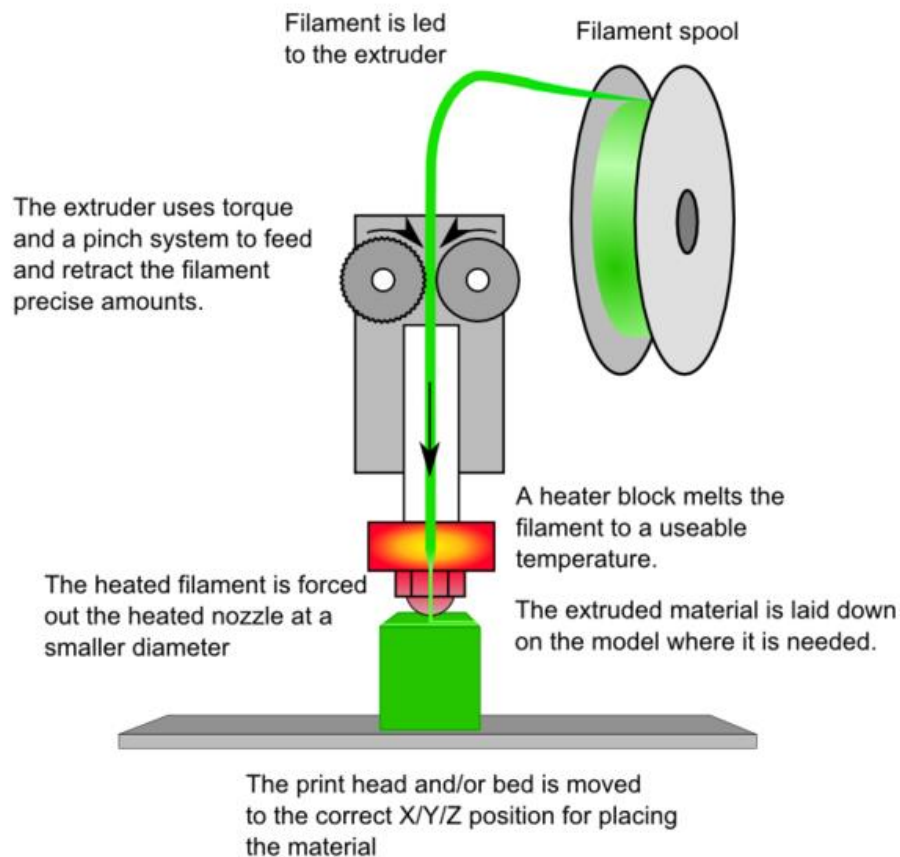
Vuonna 2009 MakerBot toi markkinoille vapaaseen lähdekoodiin perustuvan tee-se-itse 3D-tulostuspaketin, jonka pystyi kokoamaan helposti edulliseen hintaan. Tämä tulostin käyttää FDM-tekniikkaa. Samana vuonna bioprinttauksen innovaattori Organovo, jonka toiminta perustui Dr. Gábor Forgásin tekniikkaan, tulosti bio3D-tulostimella ensimmäisen verisuonen. (Price 2011.)

Vuonna 2011 i.Materialise-niminen 3D-tulostuspalvelu alkoi tarjota asiakkailleen kulta- ja hopeatulosteita. Tämä mahdollisti korusuunnittelijoille vapaammat kädet muotoiluun sekä halvemmän hinnan verrattuna käsivalmistettuihin koruihin. (Price 2011.)

Vuonna 2012 lääkärit ja insinöörit tulostivat 3D-tulostetun proteesin, jonka he siirsivät onnistuneesti potilaaseen. 3D-tulostettujen proteesien käyttöä tutkitaan uuden luukudoksen kasvun edistämiseksi. (Price 2011.)

### 2.3 FDM (Fused Deposition Modeling) ja FFF (Fused Filament Fabrication)

Tässä työssä käytetään FDM-menetelmää. Tekniikasta on käytössä kaksi samaa tarkoittavaa termiä: FDM (Fused Deposition Modeling) ja FFF (Fused Filament Fabrication). Kuten kuvasta 3 nähdään, tekniikka perustuu muovilangan (Filament) syöttämiseen kuumenninyksikön (Thermoplastic extruder) läpi. Kuumenninyksikköä ohjataan tietokoneen muodostaman kulkureitin mukaan kerros kerrokselta. Tulostettaessa tietokoneohjelma määrittää tarvittaessa kappaleille, esimerkiksi erilaisille ylimenokohdille, tukirakenteen. Näitä tukirakenteita on mahdollista tulostaa veteen liukenevasta materiaalista ja näin ollen se on helppo poistaa tulostuksen jälkeen. Vastaavasti useammalla kuumenninyksiköllä varustetuilla tulostimilla on helppo tehdä monivärisiä tulosteita. Tämän tekniikan etuja ovat hyvät toistettavuus ja tulostinten yksinkertainen tekniikka sekä edullinen hinta. Heikkouksina voidaan pitää karheaa pintaa ja muovituotteiden heikkoja lujuusominaisuuksia. Menetelmä on levinnyt laajalti harrastelijoiden keskuudessa.



KUVA 3. Fused Deposition Modeling (FDM) ja Fused Filament Fabrication (FFF) (RepRap wiki 2012.)

## 2.4 3D-tulostamisen mahdollisuudet ja käyttökohteet

3D-tulostaminen mahdollistaa täysin uudenlaisten tuotteiden valmistuksen. Käyttäjän ei enää tarvitse miettiä kappaleen valmistettavuutta sen mukaan, miten kappale pitää pystyä koneistamaan. Tämä tarkoittaa sitä, että materiaalia ei tarvitse poistaa valmistuksessa. Kappaleet voidaan optimoida siten, että materiaalia lisätään vain tarvittaviin kohtiin. Siksi 3D-tulostus mahdollistaa lähes vapaan muotoilun.

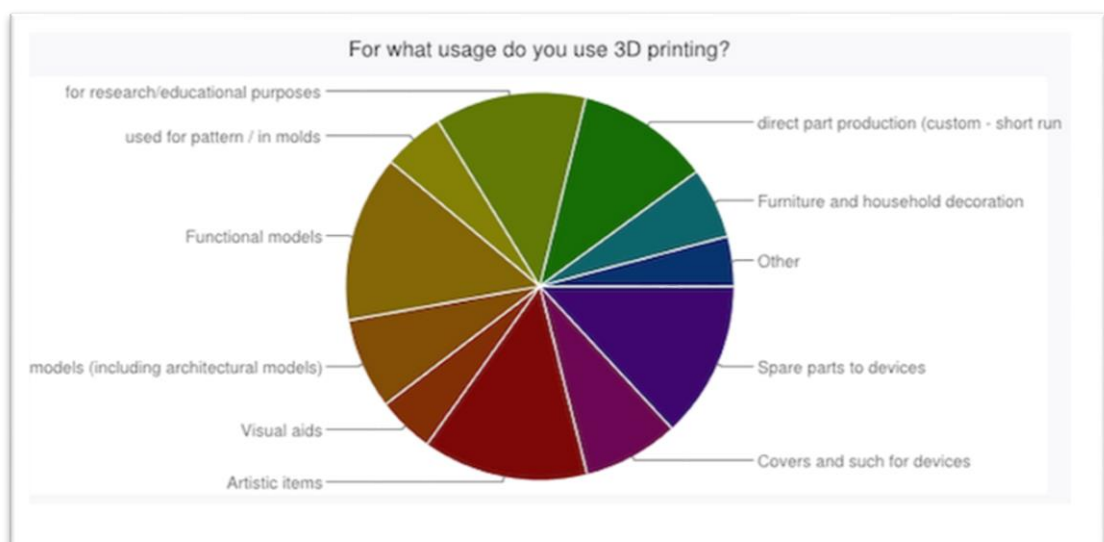
Lentokoneteollisuudessa 3D-tulostaminen on otettu käyttöön, koska sen avulla on saatu parannettua hyötysuhdetta (kuva 4). Airbusin metallitulosteet, jotka on valmistettu 3D-tulostamalla, painavat 30 – 50 prosenttia vähemmän kuin perinteisin menetelmin valmistetut. Samalla raaka-aineen käyttö voi vähentyä jopa 90 prosenttia. Tämä teknologia vähentää kokonaisenergian tarvetta 90 prosenttia, tavanomaisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. (Sanders, 2014.)



KUVA 4. Vasemmalla perinteisin menetelmin, oikealla 3D-tulostamalla samaan käyttötarkoitukseen valmistettu kappale (Canard-Design 2012.)

Kuten Airbusin esimerkistä nähdään, pienten erien ja erikoisosien valmistus on jo nyt kannattavaa. Kappaleiden räätälöinti onnistuu asiakkaan tarpeiden mukaan ja tuotteet voidaan usean eri vaiheen sijaan valmistaa yhdessä vaiheessa. Teollisuudessa tulee kuitenkin ottaa huomioon kustannusten optimointi, valmistuserän koon kasvaessa 3D-tulostaminen ei ole niin kannattavaa kuin perinteisemmät valmistusmenetelmät. Massatuotannossa kannattaa esimerkiksi enemmän käyttää muottivalua.

Suunnittelussa on mahdollista tehdä prototyyppejä, joilla on helppo havainnollistaa laitteen toimivuutta sekä mahdollisia virheitä. Kappaleet voivat olla kulutustavaroita, arkkitehtuurisia malleja tai mekaanisia osia. Perinteisiin menetelmiin verrattuna, joissa kappaleesta pitää ensin valmistaa valumuotti tai koneistaa se, on 3D-tulostus nopeampaa ja edullisempaa. Tuotteeseen on helppo tehdä muutoksia ja näin suunnittelun läpimenoaika lyhenee.



KUVIO 1. Ainettalisäävän valmistuksen käyttökohteita (Peer Production Survey 2012.)

Peer Productionin järjestämän kyselyn perusteella huomataan, miten 3D-tulostuksen käyttötarkoitukset ovat jakautuneet (kuvio 1). Kuten kuviosta ilmenee, 3D-tulostusta hyödynne-

tään eniten funktionaalisissa malleissa, opetuksessa, tutkimuksissa sekä taide-esineiden valmistuksessa. (Peer Production Survey, 2012.)

Kuluttajamarkkinoille on lähivuosina tullut paljon uusia tulostusmateriaaleja. Näitä ovat esimerkiksi: puuta vastaava LAYWOOD, hiekkakiveä vastaava LAYBRICK, kuumuutta kestävä PLA ja hiilikuituvahvisteinen ABS. Uudet materiaalit avaavat mahdollisuuden luoda täysin uudenlaisia sovelluskohteita.

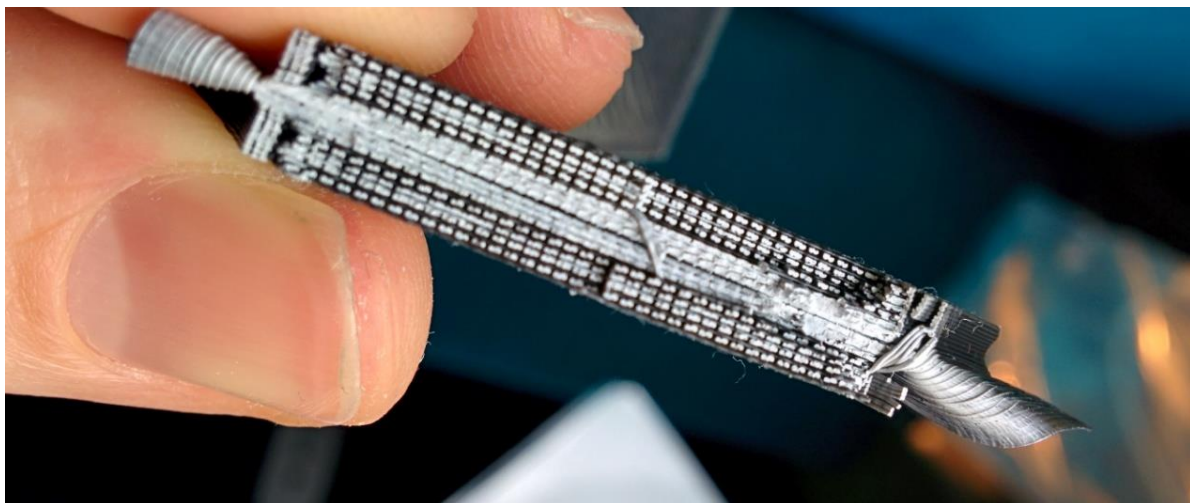
### 3 3D-MUOVITULOSTEIDEN MEKAANISET OMINAISUUDET

Tämän kokeen päämääränä oli antaa yleiskuva muoviapursottavalla koneella valmistettujen kappaleiden kestävydestä ja vertailla yleisimpien muovien yhtäläisyyksiä ja eroja. Nämä testit mahdollistavat uusien sovelluskohteiden löytämisen.

#### 3.1 Testikappaleiden valmistus

Jotta testi olisi vertauskelpoinen, kaikki kappaleet tulostettiin samalla täyttökuviolla, mikä oli pitkittäin  $+45^\circ$  ja  $-45^\circ$  vaihdellen joka tason välillä. Kerrosvahvuutena käytössä oli 0,3 mm. Täyttöprosentiksi asetin 110 %, jotta aine olisi tasalaatuisesti sulanut yhteen. Tulee kuitenkin huomioida, että vaikka laitteiston asetukset olisivat samat kappaleille, pelkästään värin vaihtuminen aiheuttaa muutoksia tulostuksessa.

Yleisesti tiedossa oleva ongelma on, että muoveissa on paljon vaihtelua (Kuva 5). Tulostuslangan halkaisija ja muoviin lisättävien väriaineiden vaihtelun vuoksi tulostusparametrejä tulee jatkuvasti säätää. Muoveilla on myös eri suosituslämpötilat tulostukselle. Tämä on tärkeää kerrosten väliselle sulamiselle, jotta kappaleet olisivat mahdollisimman kestäviä ja tasalaatuisia.



KUVA 5. Poikkileikkaus, missä langat eivät ole sulaneet yhteen (Valokuva Sandor Nagy 2014.)



## 3.2 Laitteisto

### 3.2.1 3D-tulostin

Kappaleiden tulostamisessa käytin Solidoodlen valmistamaa 3D-tulostinta (kuva 6). Kyseinen laite on kolmas versio suosituksi tulleesta harrastelijalaitteesta, joka toimii FFF/FDM-tekniikalla. Laitteella pystyy tulostamaan ABS- ja PLA-muoveja. Siinä on lämmitetty alusta kappaleiden kiinnipysyvyyden takaamiseksi.

#### **Laitteen ominaisuuksia:**

- Kappaleen maksimi koko 200 mm x 200 mm x 200 mm.
- Käyttää 1,75 mm muovilankaa
- Kerrospaksuus säädettävissä 0,1-0,4 mm
- Lämmitetty alusta
- Metallirunko
- Ohjainohjelmisto Repetier-Host
- Ohjelmiston tuetut tiedostomuodot STL ja DXF

(Solidoodle 2013.)



KUVA 6. Solidoodle 3 (Solidoodle 2013.)

### 3.2.2 Aineenkoetuslaite

Aineenkoetuskokeet tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun materiaalintestauslaboratoriossa, jossa on käytössä Matertestin FMT-MEC 100 kN –aineenkoetuslaitteisto (kuva 7). Tällä laitteistolla on mahdollista mitata eri aineiden veto-, puristus- ja taivutuslujuuksia.



KUVA 7. Vetosauva testilaitteistossa (Valokuva Sandor Nagy 2014.)

### 3.3 Materiaalit

Työssä testaan yleisimpiä muovilaatuja, jotka on tilattu eurooppalaiselta jälleenmyyjältä Formfuturalta. Testeissä käytettävät muovit ovat BendLay, Premium PLA Natural, Premium PLA White, Premium ABS Strong Black, Premium ABS Frosty White (Kuva 8) ja SmartABS Natural. Kaikki edellä mainitut langat ovat paksuudeltaan 1,75 mm. Kappaleiden tulostamiseen kului aikaa 0,5 – 2,0 tuntia kappaleen koosta ja muodosta riippuen.

BendLay on kovaan käyttöön sopiva tulostusmuovi, jonka ominaisuuksiin kuuluu hyvä joustavuus ja se voi venyä jopa 175 prosenttia ilman että siihen jää pysyvää jälkeä. BendLay päästää jopa 91 prosenttia valoa läpi ja on yhtä kirkasta kuin polykarbonaatti. (Formfutura 2014.)



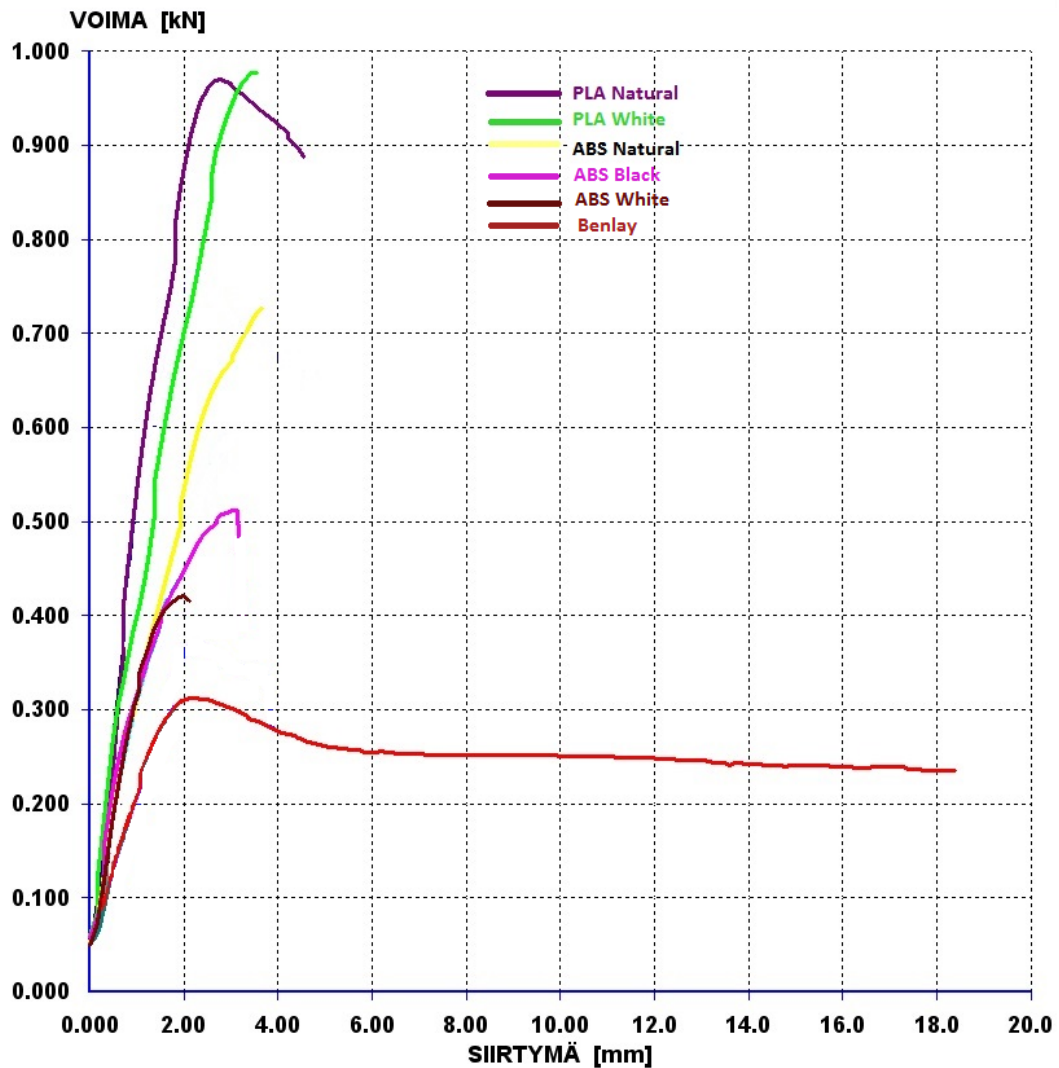
KUVA 8. Vetosauva Frosty White (Valokuva Sandor Nagy 2014.)

### 3.4 Vetokokeet

3D-tulostetuille kappaleille ei ole olemassa standardoitua testausmenetelmää, joten kokeet tehtiin standardin SFS-ISO 1184 Muovit: Kalvojen vetolujuusominaisuuksien määrittämisen mukaan. Standardissa käytetään alle 1 mm:n paksuisia vetosauvoja. Jotta koulun aineen-koetuslaitteistolla saataisiin luotettavampia tuloksia, tulostettiin 22 3 mm:n paksuista koe-kappaletta. Muuten kappaleet oli valmistettu standardin SFS-ISO 1184 mukaisesti. Kokeis-sa vetonopeus oli 1 mm/s. Koekappaleet asetettiin tiukasti kiinni vetolaitteen leukoihin ja varmistettiin, että kappaleet ovat suorassa.

### 3.5 Vetokokeiden tulokset

Vetokokeista tuloksista muodostettiin samaan mittasuhteeseen parhaiten onnistuneet testit. Kuten kuviosta 2 huomataan, PLA on lujin muovi. Se myös sulaa erittäin hyvin yhteen eri tasojen välillä, ja kappaleet ovat tasalaatuisia. Vaikka PLA-muovi onkin kestävä, tulee huomioida, että vaativiin olosuhteisiin se ei sovellu. Tämän biohajoavan muovin vetolujuu-den maksimiarvon vaihteluväli oli 45 - 55 MPa. PLA-muovi ei kestä vaihtelevia olosuhteita. Jos PLA-muovi altistuu esimerkiksi auringon valolle, se alkaa haurastua.



KUVIO 2. Vetokokeen tulokset (Sandor Nagy 2014.)

ABS-muovi kestää paremmin olosuhteiden muutoksia sekä kovempia lämpötiloja ennen kuin muodonmuutosta alkaa tapahtua. Testissä ABS-muovi kesti 20 - 40 MPa:n voiman. Erivärisissä ABS-muoveissa esiintyy vaihtelua. Puhdas natural ABS on muoveista kovinta ja kestäväintä. Se kesti jopa 40 MPa vetolujuuden. Värikkäiset ABS-muovit taas joustavat enemmän. Niiden vetolujuus vaihteli 20 - 30 MPa. Joidenkin kappaleiden vetokokeet epäonnistuivat, sillä koekappale pääsi luistamaan laitteen leuoissa.

BendLay sopii hyvin paikkoihin, joissa PLA tai ABS on liian jäykkää ja esimerkiksi joustavalla PLA:lla ei ole vaadittavia lujuusominaisuuksia. Kuten kuviosta 2 nähdään, BendLay on todella joustavaa ja se kestää suuren muodonmuutoksen ennen kuin katkeaa. BendLayn vetolujuus vaihteli välillä 13 – 18 MPa.

Testit vastaavat hyvin Michiganin teknillisen korkeakoulun tekemää tutkimusta, jossa ABS ja PLA -muoveille suoritettiin vastaavia kokeita ASTM D638-standardin mukaan. ABS-muovin vetolujuudeksi saatiin keskimäärin 28,5 MPa ja PLA-muovin 56,6 MPa. (Tymrak, Kreiger ja Pearce 2014.)

## 4 MUOVIN PINNOITUKSEN TEORIAA

### 4.1 Muovin metallipinnoitus

Sähköä johtamattomien kappaleiden pinnoitus tehtiin aluksi, käyttäen sähköjohtavaa maalia tai kemiallisesti pelkistettyä hopeaa. Pinnat oli karhennettu mekaanisesti tai syövyttämällä, nämä menetelmät eivät kuitenkaan taanneet tarvittavaa kiinnipysyvyyttä. 1960-luvun puolivälissä kehitettiin kromihappoon perustuvia syövytysratkaisuja, joita käytettiin onnistuneesti ABS-muoviin, korvaamaan aiempaa menetelmää. Näiden liuottimien käyttö sai aikaan halutun butadieenien syöpymisen resiinistä antaen kappaleelle mikrosyövytetyn pinnan parempaa kiinnipysyvyyttä varten. (Mandich & Krulik 2003, 68.)

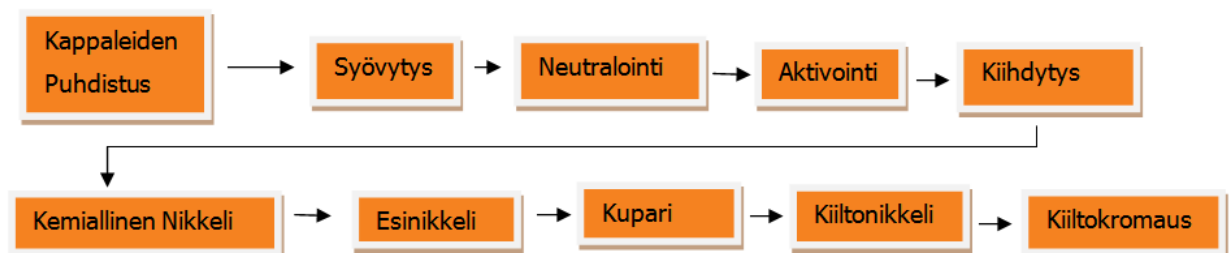
Useat teolliset alat ovat ottaneet käyttöön muovin pinnoituksen seuraavista syistä:

- Muottien avulla saadaan suuria määriä kappaleita edullisesti.
- Muoteista riippuen on mahdollista valmistaa isoja ja monimutkaisia kappaleita.
- Kappaleet ovat keveitä verrattuna teräksestä valmistettuihin kappaleisiin.
- Kappaleet ovat pinnanlaadultaan niin hyviä, ettei kappaleita tarvitse jälkikäsitellä.

(Kuzmik 1990, 377.)

### 4.2 Prosessi

Kuviosta 3 nähdään, että muovikappaleet käyvät läpi monta vaihetta ennen kuin saadaan kappaleeseen sähköjohtava kerros metallipinnoitusta varten.



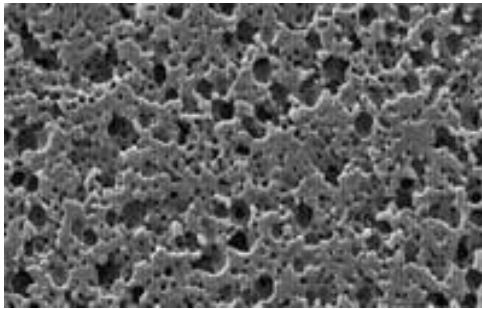
KUVIO 3. Muovin pinnoituksen prosessi (Sandor Nagy.)

#### 4.2.1 Puhdistus

Puhdistuksen tarkoituksena on poistaa kappaleista ylimääräiset tahrat, kuten sormenjäljet ja muut roskat. Puhdistusaineet ovat yleensä laimeita alkalisia liuoksia tai laimeaa kromihappo liuosta. Puhdistusta ennen syövytystä ei ole välttämätöntä tehdä, jos kappaleet ovat valmiiksi riittävän puhtaita. (Kuzmik 1990, 382.)

#### 4.2.2 Syövytys

Syövytystä varten käytetään yleensä väkevää hapettavaa liuotinta, joka syövyttää muovin pinnan. Tarkoituksena kasvattaa kappaleen pinta-alaa ja näin pinta muuttuu hydrofobisesta hydrofiiliseksi. Lisäksi mikroskooppiset kolot muovin pinnassa takaavat kiinnipysyvyyden pinnoitteelle. Esimerkiksi ABS-muovia syövytettäessä, butadieenien osa syöpyy pois ja näin ollen siihen jää pieniä tartuntakohtia. (Kuzmik 1990, 383.)



KUVA 9. Syövytyksen jälkeen ABS-pinta on huokoinen. (Königshofen & Griffith 2005.)

#### 4.2.3 Neutralointi

Syövytyksen jälkeen kappaleet huuhdellaan vedessä ja siirretään neutralointialtaaseen. Aineet, kuten natriumvetysulfiitti, on suunniteltu poistamaan syövytyksessä kappaleeseen jääneet epäpuhtaudet sekä ylimääräisen hapon kappaleista ja telineistä. Kuusiarvoinen kromi aiheuttaa helposti ongelmia seuraavissa vaiheissa, vaikka huuhtelu olisi ollut hyvä. Happoa saattaa jäädä rakoihin, jos kappaletta ei ole huuhdeltu huolellisesti tai pelkistetty kolmiarvoiseksi kromiksi. Happo voi johtaa pinnoituksen epäonnistumiseen myöhemmissä vaiheissa. (Kuzmik 1990, 385.)

#### 4.2.4 Aktivointi

Pinnoituksessa käytettävät aktivaattorit ovat materiaaleja, jotka usein sisältävät arvokkaita metalleja, kuten palladiumia, platinaa tai kultaa. Näiden aineiden tarkoituksena on luoda tartuntakohtia muovin pintaan (Kuzmik 1990, 386). Palladium-tinakloridikolloidi, jossa kolloidinen molekyyli kiinnittyy ja peittää mikrosyövytetyn pinnan, on sähköjohtamattoman pinnoituksen perusta. (Hart 1996, 265 – 267.)

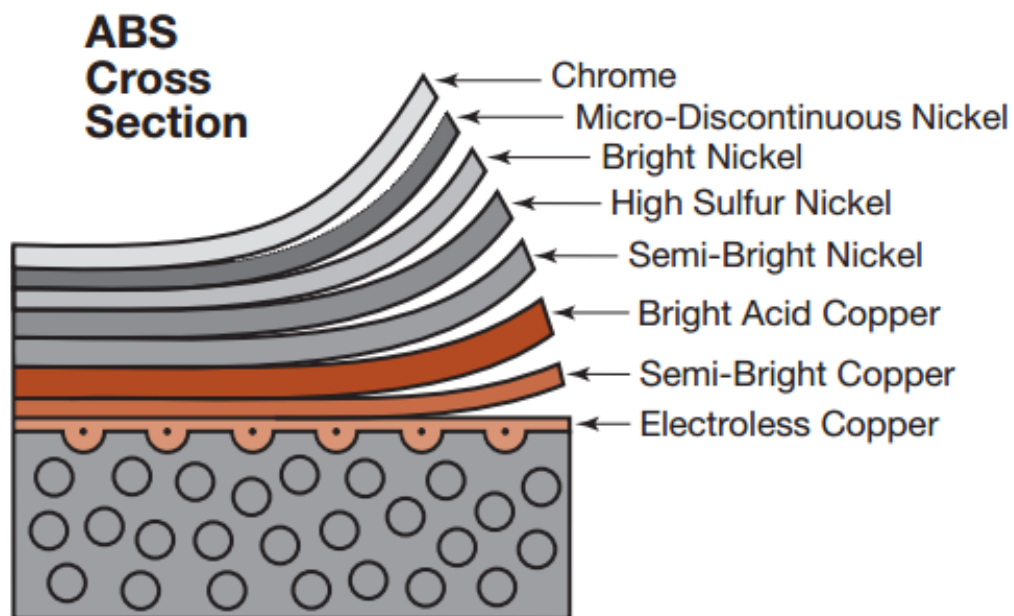
#### 4.2.5 Kiihdytys

Aktivoinnin jälkeen kappaleen pinnassa on palladium-tinakloridikolloidin ympäröimänä. Tinakloridikolloidi tulee poistaa, ennen kuin palladium voi toimia katalyyttinä. Yksinkertaistet-

tuna kiihdytyksen tarkoituksena on poistaa ylimääräinen tina kappaleesta samalla, kun siihen jää palladiumia kemiallista nikkeli kylpyä varten. (Kuzmik 1990, 388.)

#### 4.2.6 Kemiallinen nikkeli

Välihuuhtelun jälkeen kappaleet ovat valmiita esipinnoituksen viimeiseen vaiheeseen, kemiallista nikkeli kylpyä varten, jossa tarkoituksena on saada kappaleeseen ohut metallikerros. Yleensä metallikerroksen materiaalina on kupari tai nikkeli, joka saadaan kemiallisesti pelkistämällä. Useimmille sovelluskohteille kemiallinen nikkeli on sopiva, koska sen päätarkoitus on saada pinta sähköäjohtavaksi. (Kuzmik 1990, 390.) Kuten kuvioista 4 nähdään, MPC Plating käyttää Quad-Nickel™ kromipinnoitteessaan useampaa metallikerrosta hyvän pinnoitteen takaamiseksi.



KUVIO 4. Yksi esimerkki pinnoituksen eri kerroksista (MPC Plating 2008.)

Pinnoitteen paksuudet vaihtelevat hieman eri valmistajilla. Kuvio 4 ja Multinal Groupin viitteelliset pinnoitteen paksuudet eivät suoraan viittaa toisiinsa, mutta antavat yleiskuvan eri pinnoitekerrosten paksuudesta.

Pinnoitekerrosten paksuudet:

- Kemiallinen nikkeli : 0,1 - 0,5  $\mu\text{m}$
- Strike nikkeli : 0,5 - 2,0  $\mu\text{m}$
- Kupari : 15 -25  $\mu\text{m}$
- Nikkeli : 8 - 15  $\mu\text{m}$
- Kromi : 0,1 - 0,6  $\mu\text{m}$

(Multinal Group 2014.)

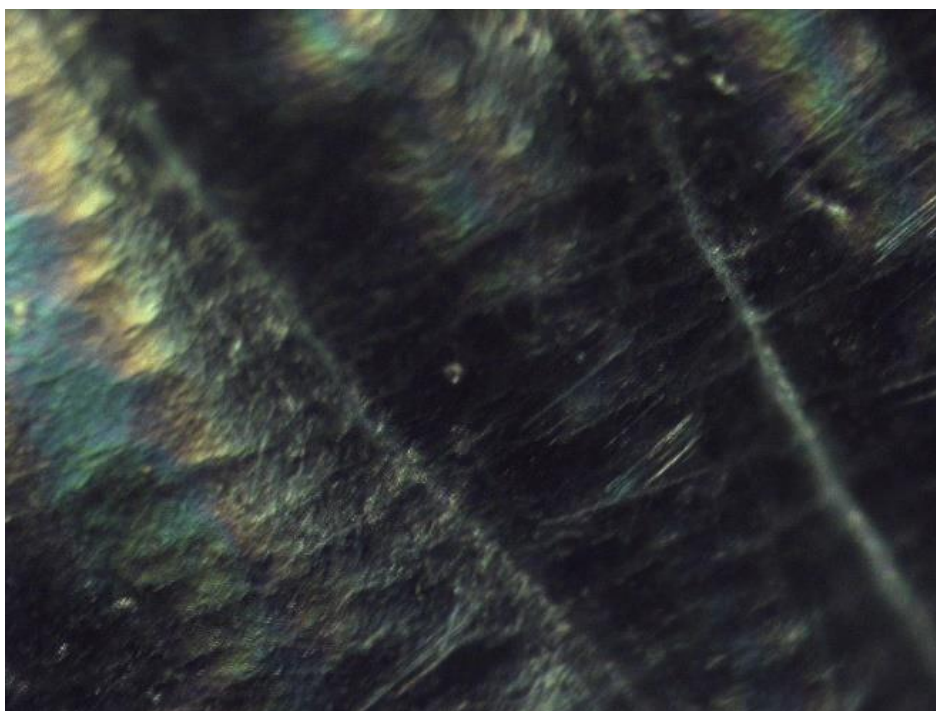
## 5 PINNOITUKSET ORAKSELLA

### 5.1 Pinnoituksen esivalmistelut

ABS-muovitulosteiden pinnoitukset suoritettiin Oraksen tehtaalla Raumalla. Oraksella on muovin pinnoitusta varten oma linjasto, mikä on hana- ja suihkuotteita varten. Ennen pinnoitusta tulostetut kappaleet tarkistettiin ja niihin tehtiin tarvittavat reiät.

3D-tulostusta varten ei testien aikaan ollut kehitetty pinnoitukseen sopivaa tulostuslankaa, joten käytössä oli Solidoodlen Natural ABS-muovi. Se oli parhaiten pinnoitukseen sopivaa, sillä siinä ei ole ylimääräisiä aineita. Jos pinnassa on esimerkiksi väriaineita, pinnoitus ei välttämättä onnistu. Tämä johtuu siitä, että pinnoitukseen tarvittavia butadieenejä ei pinnassa ole. Väriillisissä muoveissa käytetään erilaisia väriaineita, jotka saattavat estää pinnoittumisen.

Tulostustekniikan epätasaisuudesta johtuen tehtiin lisäksi koekappaleita, joiden pinta sulatettiin asetonilla. Kappaletta käytettiin astiassa, jossa on höyrystettyä asetonia. Asetonikäsitellyllä pinnan pitäisi sulaa niin tasaiseksi, ettei pinnoitusta haittaavia rakoja jää kappaleen pintaan. Etukäteen ei ollut varmuutta onnistuuko asetonikäsiteltyjen kappaleiden pinnoitus pinnan koostumuksen mahdollisesti muuttuessa.



KUVA 13. Mikroskooppikuva (100x) asetonikäsitellystä pinnasta (Valokuva Sandor Nagy 2014.)



## 5.2 Testikappaleiden pinnoitukset

Kappaleet kävivät pinnoituksessa läpi kappaleessa 4 esitettyjä vaiheita. Kappaleiden kuljetusta pinnoitusprosessin läpi, suurin osa kappaleista oli vain osittain pinnoittunut. Joukossa oli kuitenkin myös kappaleita, jotka olivat täysin pinnoittuneet. Voidaan päätellä, että 3D-tulostamiseen käytetty muovi, sopi pinnoitusta varten, vaikka ei ole suoranaisesti siihen tarkoitettu. Pinnoituksen ongelmaksi jäi tulostustekniikasta johtuva epätasaisuus ja siitä aiheutuneet ajoittaiset pienet raot. Näihin rakoihin jäi kromihappoa, mikä esti pinnoitteen kiinnipysyvyyden. Pinnoituksen jälkeen paksuissa kappaleissa oli huomattavissa lisääntyntä jäykkyyttä ja pinnoitteen muodostamaa pintakovuutta.



KUVA 10. Kappaleet ennen pinnoitusta ja pinnoituksen jälkeen (Valokuva Sandor Nagy 2014.)

## 5.3 Asetonikäsiteltyjen kappaleiden pinnoitus

Asetonikäsiteltyjen kappaleiden pinnoitus onnistui vaihtelevasti. Kuten kuvasta 11 nähdään, valkeiden kappaleiden pinnoitukset epäonnistuivat täysin kromihapon jäädessä kappaleiden huokosiin huuhtelun jälkeen. Natural ABS toimi paremmin, asetonisulatettu pinta mahdollisesti tasaisemman pinnoitteen käsittelemättömiin kappaleisiin verrattuna (kuva 12).

Hanojen tulostaminen laitteella oli kuitenkin todella haasteellista vaikeista muodoista johtuen, eikä jälki ollut enää tasalaatuista joka puolella. Tämä vaikutti osaltaan pinnoituksiin.



KUVA 11. Tulostetut ja asetonikäsitellyt kappaleet pinnoituksen jälkeen (Tomi Villilä 2014.)

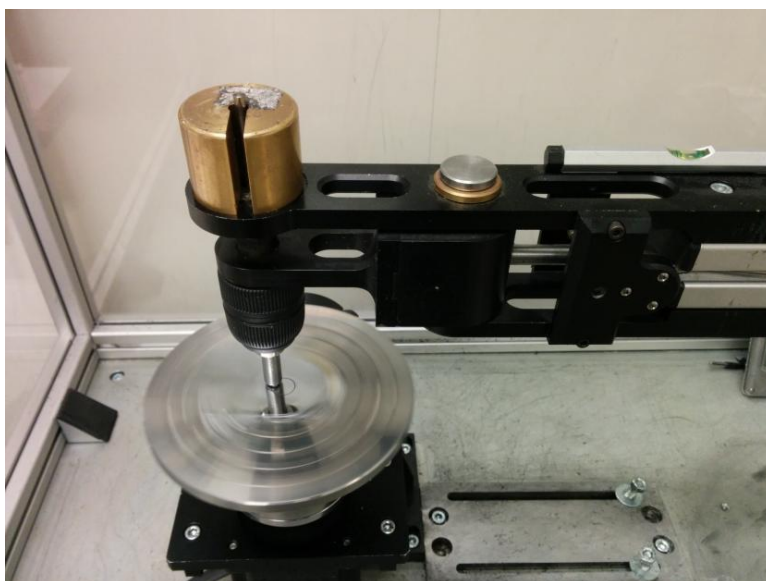


KUVA 12. 3D-tulostettu hana ennen ja jälkeen pinnoituksen (Sandor Nagy 2014.)

## 6 PINNOITTEEN KIINNIPYSYVYYDEN TODENTAMINEN

### 6.1 Pin On Disk – kulutuskoe

Pin On Disk – kulutuskokeen tarkoituksena oli tutkia pinnoitteen kiinnipysyvyyttä ja kulumiskestävyyttä koekappaleissa. Kulutuskokeessa käytettiin alumiinioksidikuulaa, joka toimi vastinparina kappaleille kokeen aikana. Testikappaleena käytössä oli hyvin pinnoittunut levy, johon ajettiin useampi ura (kuva 13). Tappikulutuskokeeseen valittiin sopiva, sylinterinmuotoinen kappale.



KUVA 13. Kappale Pin on disk - kulutuskokeessa (Valokuva Sandor Nagy 2014.)

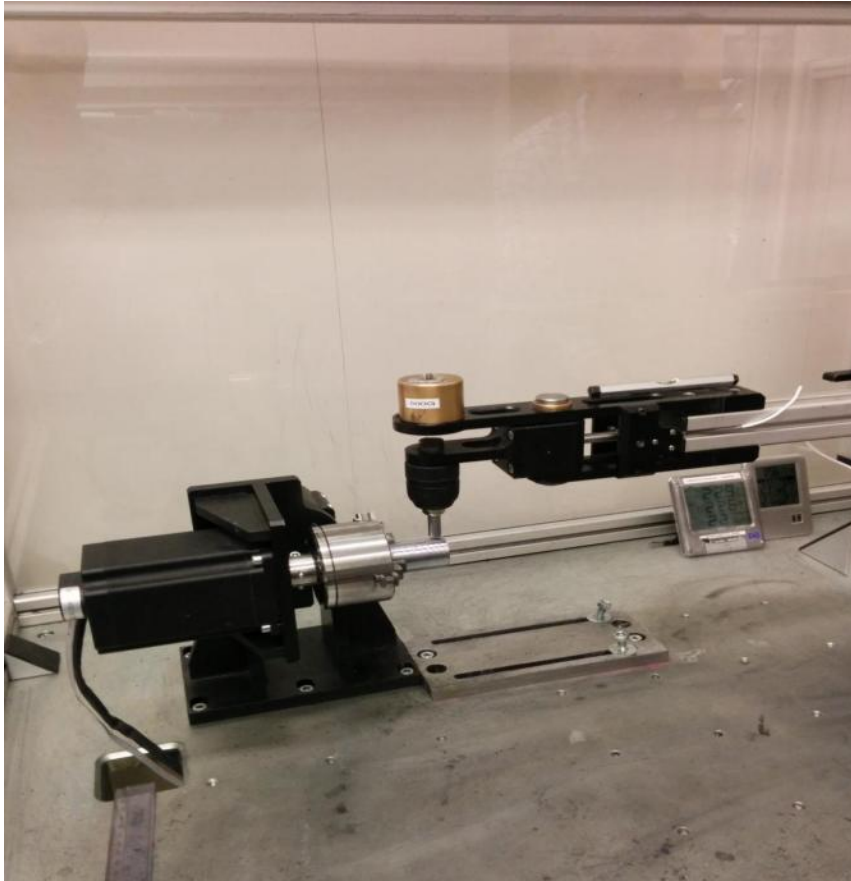
Testit aloitettiin tekemällä kappaleille sopivat pidikkeet testipenkkiin, jonka jälkeen asetettiin vastapaino niin että laitteisto oli tasapainossa. Vastinparit puhdistettiin alkoholilla, jotteivät epäpuhtaudet vaikuttaisi kitkaan. Ohjelmistoon valittiin haluttu nopeuden ja asetettiin käytettävä paino. Ohjelma tallensi testitulokset, joista ilmenee testausaika, käytetty paino sekä kierrosnopeus. Lisäksi ohjelma tallensi kuvaajan, mistä ilmeni kitkavoima ja kitkakertoimen määrä sekunnin välein, sekä näiden keskiarvo. Tuloksissa pystyasteikko edustaa vertailuarvoa kitkasta.

### 6.2 Pinnoitetun levyn testaus

Levyyn tehtiin kaksi testiä. Ensimmäiseen testiin valittiin painoksi 500g ja kierrosnopeudeksi 300 kierrosta minuutissa. Tätä testiä ajettiin 30 minuuttia, jonka jälkeen arvioitiin mikroskoopilla kulutuksen vaikutusta kappaleeseen. Tarkoituksena oli selvittää, kuinka syväle ura kappaleessa kului. Toista testiä varten siirrettiin kulutusuran uuteen kohtaan ja valittiin painoksi 2000 g ja kierrosnopeudeksi 200 kierrosta minuutissa.

### 6.3 Sylinterinmuotoisen kappaleen testaus

Seuraavaksi testipenkkiin asennettiin sylinterinmuotoinen kappale (kuva 14). Testilaitteisto säädettiin tasapainoon, punnukseksi valittiin 500 g ja kierrosnopeudeksi 300 kierrosta minuutissa. Kappaleen pinnan ollessa epätasainen, kohdistui siihen voimakkaampia iskuja kuin tasaiselle pinnalle. Pinnoitteen kiinnipysyvyyden testaamiseksi tämä oli hyvä.

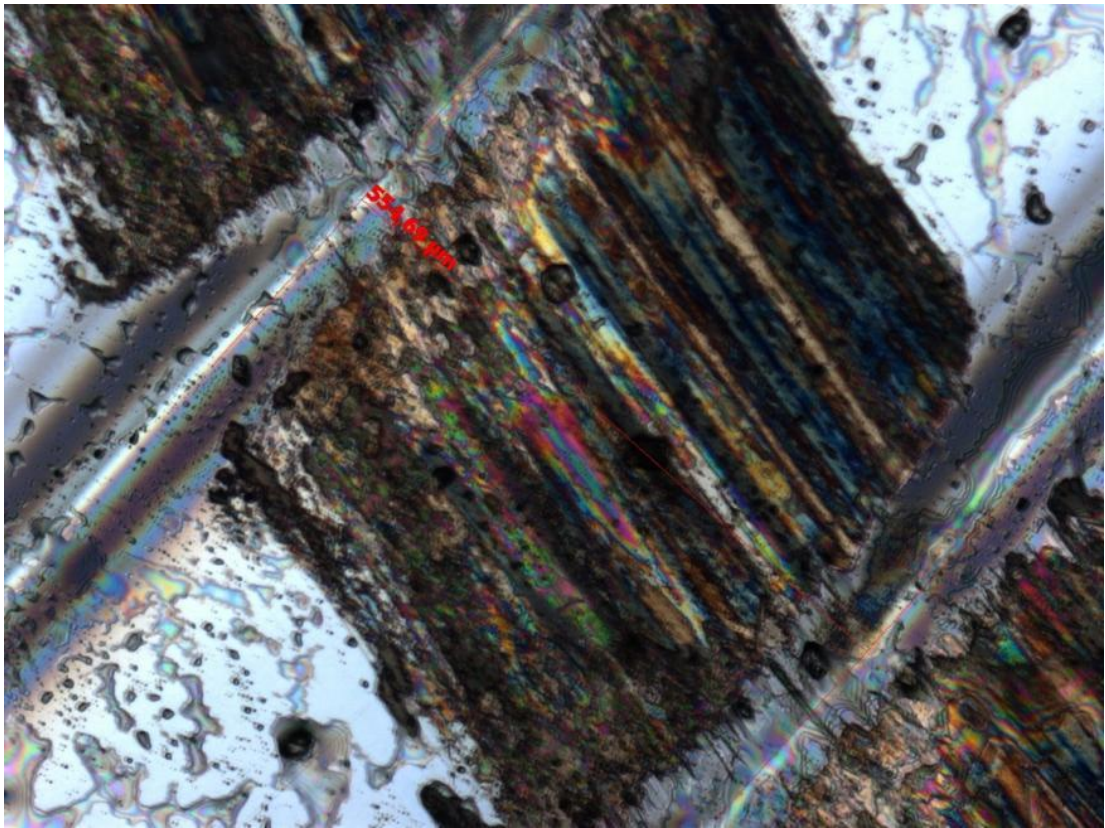


KUVA 14. Sylinterinmuotoinen kappale kiinni testipenkissä (Valokuva Sandor Nagy 2014.)

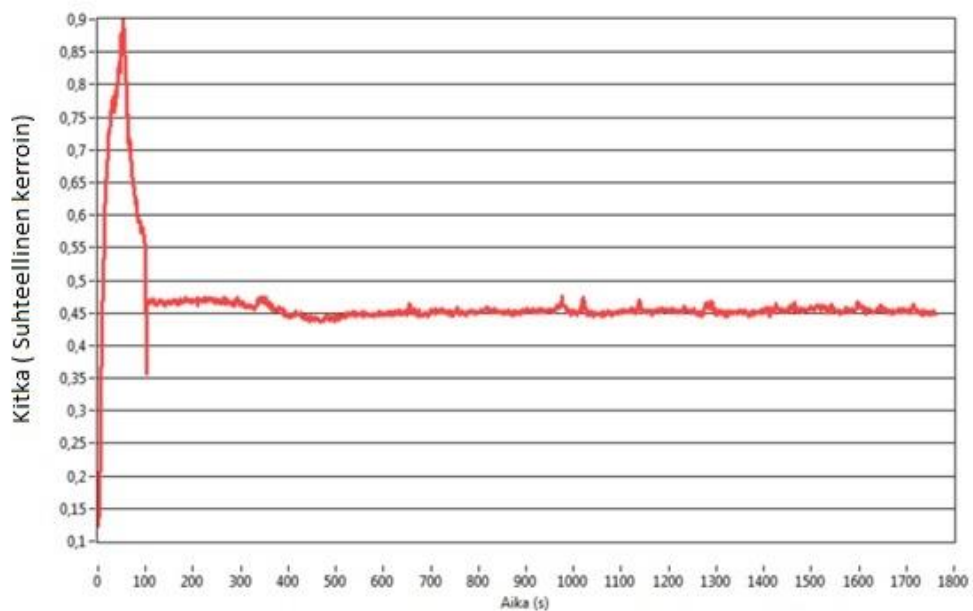
### 6.4 Tulosten analysointi

#### 6.4.1 Levyn kulutus

Kuten kuvasta 13 voidaan huomata, levy on lähtötilanteessa hyvin pinnoittunut. Puolen tunnin testiajon jälkeen pinnoite oli kulunut osittain kupariin (kuva 15). Kuvio 5 osoittaa, että kuluminen oli tasaista ja kitkakerroin pysyi vakiona koko testin ajan. Pinnoite oli hyvin kiinni ja pinnoitteen kulutuskestävyys oli hyvä.



KUVA 15. Mikroskooppikuva (100x) levyn pinnasta 30 minuutin testiajon jälkeen (Valokuva Sandor Nagy 2014.)



KUVIO 5. Kitkakulutuskokeen tulokset (Sandor Nagy 2014.)

Seuraavan testin tarkoituksena oli testata pinnoitteen kiinnipysyvyyttä muovissa. Tähän valittiin painoksi 2000 g ja kierrosnopeudeksi 200 kierrosta minuutissa, koska haluttiin saada selvälle, missä vaiheessa pinnoite rikkoutuu. Tällaiset niin sanotut ääriarvot nopeuttivat ha-

lutun lopputuloksen saavuttamista. Valitut arvot olisivat olleet kovemmillekin pinnoitteille vaativia. Tätä testiä jatkettiin niin pitkään, että pinnoite kului muoviin saakka. Testi rikkoi pinnoitteen rikki osittain jo noin 3 minuutissa (kuvio 6).

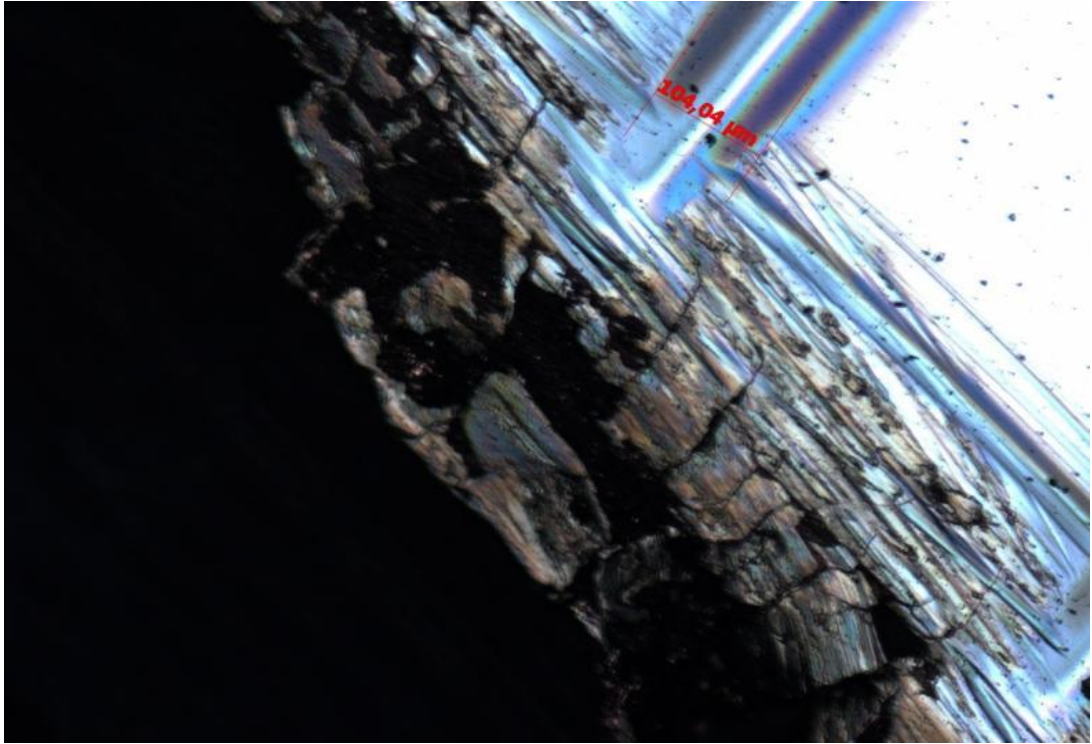


**SAVONIA**  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

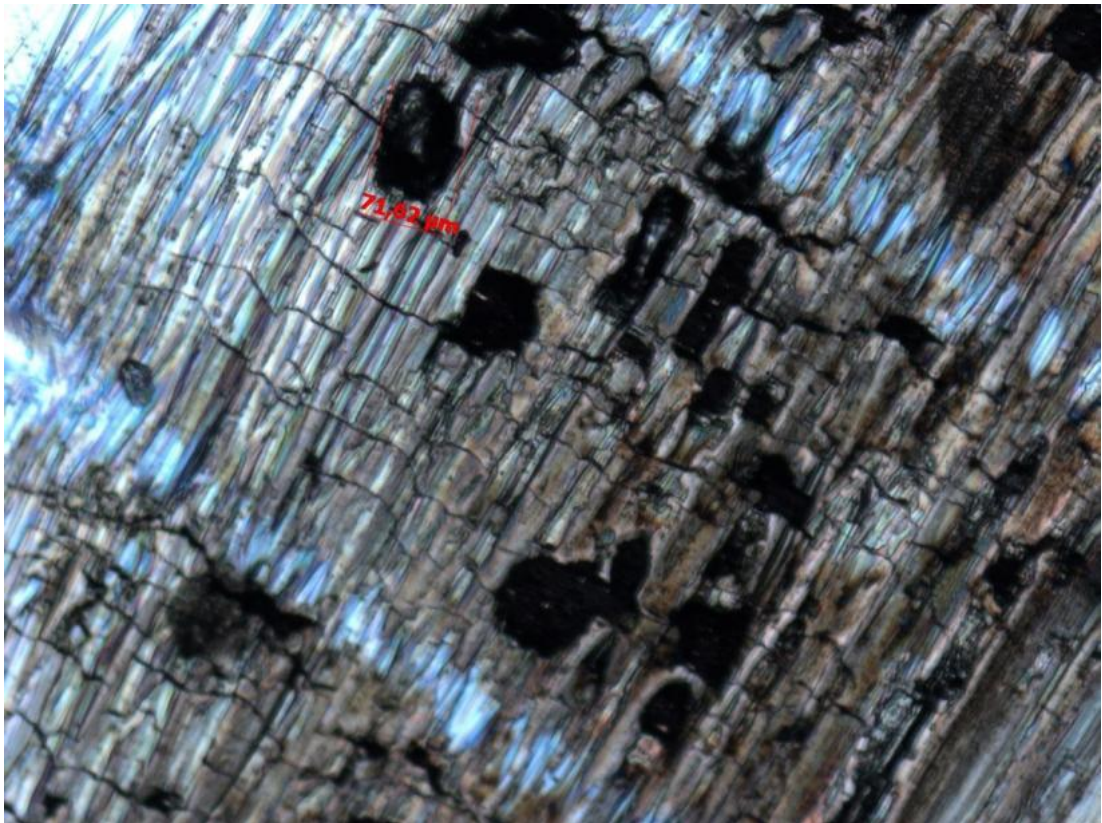


KUVIO 6. Kitkakulutuskokeen tulokset 2 kg:n painolla (Sandor Nagy 2014.)

Mikroskooppikuvista (kuvat 16 ja 17) satakertaisella suurennoksella ilmenee kuitenkin, että vaikka pinnoite on osittain uran kohdalta irronnut, kiinnipysyvyys on muuten hyvä. Kulutusuran läpimenneen alueen kohdalla pinnoite ei ole lähtenyt lohkeilemaan irti, vaan se on edelleen kiinni.



KUVA 16. Lämpökulunut pinnoite reunalta (Valokuva Sandor Nagy 2014.)



KUVA 17. Pinnoite lohkeilee ja osittain kiinni (Valokuva Sandor Nagy 2014.)

### 6.4.2 Sylinterin kulutus

Epätasaisuuden vuoksi kuula hyppi ajoittain, minkä takia testistä ei saanut kunnollista käyrää. Epätasaisuus ei ollut ongelma, sillä haluttiin selvittää pinnoitteen kiinnipysyvyyttä vaikeissa olosuhteissa. Testin jälkeen pinnoitteen huomattiin, että reunaan osunut isku sai pinnoitteen halkeamaan, mutta pysyi kiinni (kuva 18).



KUVA 18. Halkeama muovin ja pinnoitteen välissä (Valokuva Sandor Nagy 2014.)

### 6.5 Silmämääräinen tarkastelu

Kappaleen silmämääräinen tarkastelu osoitti, kuinka paljon pinnoite jäykistää kappaleita. Pinnoitetuille kappaleille ei saanut suoritettua vetokokeita, koska yksikään vetosauva ei ollut täysin pinnoittunut. Tulee kuitenkin huomioida, että ohuemmat pinnoitetut kappaleet eivät kestä taivutusta, sillä pinnoite halkeaa helposti. Paksummat kappaleet ovat valmiiksi jäykkiä, joten pinnoite ei pääse halkeamaan, vaan jäykistää kappaletta.



## 7 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli toimia pohjatutkimuksena tuleville muovia pursottavilla koneilla eli FDM-tekniikalla tehtäville projekteille. Tutkimus tuo uutta tietoa pinnoituksen mahdollisuuksista ja rajoituksista 3D-tulostetuille kappaleille. Työssä esille tulleet tulokset auttavat 3D-muovitulostimen käyttäjiä tekemään oikeita materiaalivalintoja. Kappaleiden lujuus sekä kulutuskestävyys paranee pinnoittamalla

Kappaleiden tulostus onnistui hyvin. Käyttämäni laite asetti haasteita tutkimukselle, mutta työn jälki oli riittävä onnistumisen kannalta. Tuloksien luotettavuutta lisää koekappaleiden suuri lukumäärä. Merkittävää on, että vetokokeiden tulokset vastasivat hyvin vasta muutama kuukausi sitten Michiganin teknillisessä korkeakoulussa tehtyjä tutkimuksia, joissa ASTM-standardin mukaan tehdyistä vetosauvoista saatiin omaa tutkimustani vastaavia tuloksia.

Kappaleiden pinnoitukset osoittautuivat haasteellisimmiksi. Suurin ongelma oli huuhteluvaihe. Tulostuksen epätasaisuus jätti kappaleisiin onkaloita, joihin huuhtelusta huolimatta jäi kromihappoa. Muovitulostetut kappaleet olisivat vaatineet käsihuuhtelun. Oraksen pinnoituslinjaston huuhtelu oli optimoitu suihkutuotteita varten. Onnistuneet kappaleet olivat kuitenkin kulutuskestävyydeltään hyviä. Pinnoituksella sellaisten kappaleiden virumisominaisuudet paranevat, jotka ovat jatkuvassa rasituksessa. Mahdollisissa jatkotutkimuksissa tulee ehkäistä onkaloiden syntyminen pursottamalla kappaleisiin reilusti muovia tulostuksen aikana. Lisäksi on syytä huolehtia riittävästä huuhtelusta.

Tämä työ antoi paljon uusia mahdollisuuksia jatkotutkimuksille. Mielenkiintoista olisi tutkia kappaleiden pinnoitusta eri menetelmillä, kuten tyhjiömetalloinnilla. Tätä opinnäytetyötä voisi jatkaa taivutus- ja iskutitkeys-kokeilla, joissa verrataan eri muovilaatua sekä täyttökuvioita. Kokeissa voisi tutkia esimerkiksi hunajakennorakenteen lujuusominaisuuksia verrattuna muihin rakenteisiin. Pinnoitusta voisi jatkaa myös niin, että tutkisi useamman millimetrin paksuisella metallikerroksella pinnoitettujen kappaleiden lujuusominaisuuksia. 3D-tulostettujen kappaleiden valmistuessa ainettalisäävästi olisi mielenkiintoista tutkia, miten FEM-laskennat vastaavat simuloinneissa perinteisin menetelmin valmistettuja kappaleita.

Tulevaisuudessa tulisi keskittyä ainettalisäävien laitteiden kehitykseen ja tehdä tutkimuksia, joilla voidaan löytää uusia sovelluksia (esim. lääketieteessä). Lisäksi Tulostusmateriaaleja pitäisi kehittää kuhunkin tarkoitukseen parhaiten sopivaksi. Tällöin voi puhua todellisesta valmistustekniikan vallankumouksesta.

## LÄHTEET

CHEE Kai Chua, KAH Fai Leong, C.S, LIM 2003. Rapid Prototyping: Principles and applications. 1. Painos. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

CANARD-DESIGN. 2012. Brave new world for 3D printing technology. Verkkosivu. [Viitattu 2014-3-27]. Saatavissa: <http://www.canard-design.co.uk/product-design/brave-new-world-for-3d-printing-technology/>

FORMFUTURA, 2014. 1.75mm BendLay [Verkkosivu]. Yrityksen www-sivu. [Viitattu 2014-4-12]. Saatavissa: <http://www.formfutura.com/175mm-bendlay.html>

HART, A. 1996. Electroplating of Plastics. Materials World, 4.

KUZMIK, J. 1990. Electroless plating: fundamentals and applications. Chapter 14: Plating on Plastics. USA: Noyes Publications/William Andrew Publishing LLC.

MANDICH, N. V., KRULIK G. A., 1993. On the Mechanisms of Plating on Plastics, Plating and Surface Finishing. Orlando: American Electroplaters and Surface Finishers Society.

PEERPRODUCTION, 2012. Manufacturing in motion: First survey on 3D-printing community. Verkkosivu. [Viitattu 2014-4-15]. Saatavissa: <http://surveys.peerproduction.net/2012/05/manufacturing-in-motion/3/>

SANDERS Peter, 2014. Airbus Expands 3D Printing Use. Verkkosivu. [Viitattu 2014-4-12]. Saatavissa: <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/7187/Airbus-Expands-3D-Printing-Use.aspx>

SFS-EN ISO 1184, 1987. Muovit. Kalvojen vetolujuusominaisuuksien määrittäminen. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS

SOLIDOODLE, 2013. Solidoodle 3D Printer, 3<sup>rd</sup> Generation. [Verkkosivu] Yrityksen www-sivu [Viitattu 2014-4-17]. Saatavissa: [http://store.solidoodle.com/index.php?route=product/product&product\\_id=79](http://store.solidoodle.com/index.php?route=product/product&product_id=79)

STRATASYS, 2013. What is Rapid Prototyping? [Verkkosivu] Yrityksen www-sivu [Viitattu 2014-3-12]. Saatavissa: <http://www.stratasys.com/resources/rapid-prototyping>

PRICE T. Rowe, 2011. A Brief History of 3D Printing [verkkoaineisto]. [Viitattu 2014-3-12]. Saatavissa: [http://individual.troweprice.com/staticFiles/Retail/Shared/PDFs/3D\\_Printing\\_Infographic\\_FINAL.pdf](http://individual.troweprice.com/staticFiles/Retail/Shared/PDFs/3D_Printing_Infographic_FINAL.pdf)

TYMRAK, B.M., KREIGER, M., PEARCE, J. M. 2014. Mechanical Properties of Components Fabricated with Open-Source 3-D Printers Under Realistic Environmental Conditions. [Viitattu 2014-4-22]. Saatavissa: [https://www.academia.edu/6209168/Mechanical\\_properties\\_of\\_components\\_fabricated\\_with\\_open-source\\_3-D\\_printers\\_under\\_realistic\\_environmental\\_conditions](https://www.academia.edu/6209168/Mechanical_properties_of_components_fabricated_with_open-source_3-D_printers_under_realistic_environmental_conditions)

## KUVALÄHTEET

KÖNIGSHOFEN Andreas & GRIFFITH Brian, Enthone GmbH 2005. Yrityksen www-sivu. [Viitattu 2014-3-14]. Saatavissa: <http://www.pfonline.com/articles/palladium-free-direct-plate-technology-for-plating-on-plastics>

MULTINAL GROUP 2014. [Viitattu 2014-3-17]. Saatavissa: <http://www.multinal.com/metallizing-of-abs-synthethics-products-sparesparts-chrome-nickel-plating.html>

MPC PLATING 2008, Yrityksen www-sivu. [Viitattu 2014-4-12]. Saatavissa: <http://www.mffinishersdirectory.com/profiles/companydata/pdfs/MPC-Plating-Quad-Nickel%20Brochure.pdf>

SHAWN, RepRap wiki 2012-08-30. Fused Filament Fabrication (FFF) [PNG]. [Viitattu 2014-3-10]. Saatavissa: <http://reprap.org/wiki/File:FFF.png>.

SOLIDOODLE 2013. Solidoodle 3<sup>rd</sup> Generation. [Viitattu 2014-3-2]. Saatavissa: [http://store.solidoodle.com/index.php?route=product/product&product\\_id=79](http://store.solidoodle.com/index.php?route=product/product&product_id=79)

PRICE T. Rowe, 2011. A Brief History of 3D Printing [Viitattu 2014-3-24]. Saatavissa: [http://individual.troweprice.com/staticFiles/Retail/Shared/PDFs/3D\\_Printing\\_Infographic\\_FINAL.pdf](http://individual.troweprice.com/staticFiles/Retail/Shared/PDFs/3D_Printing_Infographic_FINAL.pdf)