

3D-TULOSETTUJEN KAPPALEIDEN OLOSUHTEIDEN KESTO

LAHDEN
AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Materiaalitekniikka
Muovitekniikka
Opinnäytetyö
Kevät 2017
Ilkka Niemi

Lahden ammattikorkeakoulu
Materiaalitekniikan koulutusohjelma

NIEMI, ILKKA:

3D-tulostettujen kappaleiden
olosuhteiden kesto

Muovitekniikan opinnäytetyö, 47 sivua, 12 liitesivua

Kevät 2016

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia polylaktidista ja iskunkestävästä polystyreenistä 3D-tulostettujen kappaleiden olosuhteiden kestoja. Opinnäytetyö tehtiin siksi, että 3D-tulostettujen kappaleiden olosuhteiden kestoja ei ole tutkittu aikaisemmin. Opinnäytetyö tehtiin Lahden ammattikorkeakoulun tekniikan laitokselle.

Työn teoriaosuudessa käsitellään 3D-tulostuksen periaatteita ja eri tulostustekniikoita. Osuudessa kerrotaan myös työn suorittamiseksi valikoitujen polylaktidin ja iskunkestävän polystyreenin ominaisuuksista. Lisäksi käsitellään ekstruusion periaatteet ja tuotteet. Olosuhdetesteistä kerrotaan niiden ominaisuuksista ja vaikutuksista työssä käytettäviin muoveihin.

Kokeellisessa osuudessa käydään läpi tulostuslangan valmistaminen ekstruusiolla ja tulostimen ajoarvojen määrittäminen materiaalille sopivaksi. Pääpaino on tulostettujen koesauvojen altistamisessa erilaisille olosuhteille. Tavoitteena oli selvittää, kuinka UV-valo, emäksinen pesuaine ja liuotin vaikuttavat kappaleisiin. Olosuhdetestien jälkeen kappaleille suoritettiin mekaanisista testeistä kovuuden mittausta ja vetokoe sekä tutkittiin mikroskooppilla kappaleiden pintoja.

Tulokset -osiossa selvitetään kovuus- ja vetokokeiden avulla ominaisuuksien muuttumista sekä syitä niiden synnylle. Tulokset osoittavat olosuhdetestien aiheuttaneen mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä molemmilla tutkittavissa materiaaleissa ja kellastumista iskunkestävän polystyreenin kohdalla.

Asiasanat: 3D-tulostus, PLA, HIPS, UV, olosuhdetestaus

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in Plastics Engineering

NIEMI, ILKKA:

Chemical weathering resistance of
3D-printed plastic parts

Bachelor's Thesis in Plastics Engineering, 47 pages, 12 pages of
appendices

Spring 2017

ABSTRACT

The objective of this thesis was to examine how 3D printed plastic parts can withstand chemical weathering and UV radiation. The thesis was done because the effect of UV radiation and chemicals on 3D printed plastic parts has not been studied previously. The thesis was commissioned by the Faculty of Technology of Lahti University of Applied Sciences.

The theory part of the thesis deals with the principles of 3D printing and different printing methods. It also presents the basics of polylactic acid and high impact polystyrene, which are used in the thesis. Extrusion of plastics is explained shortly. In addition, the properties of UV radiation and chemical weathering tests are described.

The experimental part of the thesis started by making 3D printer filament with extrusion and setting up a 3D printer with correct parameters for the plastics. The main focus of this part was to expose the plastic parts to different chemicals and UV radiation. The objective was to determine how UV radiation and chemicals affect the plastics parts. After the exposures, hardness and tensile tests were made and the surfaces of the parts were examined with a microscope.

The tensile and hardness tests revealed changes in properties and reasons for the changes were investigated. Exposures had a negative effect on the mechanical properties of both materials and UV radiation caused yellowing of high impact polystyrene.

Key words: 3D printing, polylactic acid, high impact polystyrene, chemical weathering

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	3D-TULOSTUS	2
2.1	3D-tulostuksen määritelmä	2
2.2	3D-tulostus valmistusmenetelmänä	2
2.3	3D-tulostuksen tulevaisuus	3
2.4	3D-tulostimet	3
2.4.1	FDM – Fused Deposition Modelling	4
2.4.2	PolyJet Printing	5
2.4.3	LENS – Laser engineered net shaping	6
2.4.4	LOM – Laminated Object Manufacturing	7
2.4.5	SL – Stereolithography	8
2.4.6	LS – Selective Laser Sintering	9
2.4.7	3DP – Three Dimensional Printing	11
2.5	Käytettävissä olevat materiaalit	12
3	VALMISTUSMATERIAALIT JA -VÄLINEET	13
3.1	Polystyreeni ja iskulujitettu polystyreeni	13
3.2	Polylaktidi eli PLA	14
3.3	Ekstruusio ja tuotteet	16
3.3.1	Ekstruuderit	16
3.4	3D-tulostin	17
4	KOEKAPPALEIDEN VALMISTUS	19
4.1	Tulostuslangat ja valmistaminen	19
4.2	Koekappaleen 3D-mallinnus	20
4.3	Koekappaleiden tulostaminen	21
4.3.1	PLA:n tulostaminen	22
4.3.2	HIPS:n tulostaminen	23
4.3.3	Tulostamisessa kohdatut ongelmat	23
5	OLOSUHDETESTIT– JA TESTAUSMENETELMÄT	26
5.1	UV- vanhennus	26
5.2	Asetonilla höyryttäminen	27
5.3	Emäksinen pesuaine	28
5.4	Kovuuskoe	29

5.5	Vetokoe	30
5.6	Optinen mikroskopia	31
6	TULOKSET	32
6.1	Massan- ja muodonmuutokset	32
6.2	Värimuutokset	35
6.3	Kovuuskoe	36
6.4	Vetokoe	38
6.5	Mikroskopia	41
7	YHTEENVETO	43
	LÄHTEET	45
	LIITTEET	48

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää 3D-tulostamalla valmistettujen kappaleiden olosuhteiden kestoa. Kappaleiden valmistamiseen käytetään Fused Deposition Modelling-tulostusmenetelmää, joka on laitteistonsa puolesta edullinen. Koska tällaista tutkimusta ei FDM-menetelmällä tulostetuille kappaleille ole vielä tehty, voi työn edetessä tulla esiin uusia kappaleiden valmistuksessa huomioitavia asioita.

3D-tulostaminen on tällä hetkellä nopeiten kehittyvä valmistusmenetelmä, ja tulostusmenetelmien kehityksen myötä se tulee lisääntymään entisestään. 3D-tulostus ei tällä hetkellä kilpaile perinteisten valmistusmenetelmien kanssa kappalemäärissä, mutta se on kustannustehokkaampaa yksittäisten kappaleiden, piensarjojen ja prototyyppien valmistuksessa.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa käsitellään 3D-tulostusta ja erilaisia tulostusmenetelmiä. Lisäksi esitellään työhön käytettävät materiaalit ja niiden ominaisuudet sekä ekstruusio, jolla tulostuslankaa voidaan valmistaa.

Kokeellisessa osuudessa koekappaleille tehdään olosuhdetestejä. Olosuhdetesteinä ovat altistaminen UV-säteilylle, emäksinen pesuaineliuos, asetonilla höyryttäminen ja niiden yhdistelmä. Olosuhdetestien jälkeen kappaleille suoritetaan kovuus- ja vetokokeet sekä tutkitaan kappaleita mikroskoopilla.

2 3D-TULOSTUS

2.1 3D-tulostuksen määritelmä

3D-tulostaminen on joukko valmistustekniikoita, joissa voidaan erilaisilla tavoilla luoda kappaleita kasvattamalla niitä kerros kerrokselta kolmiulotteisen tietokonemallin mukaisesti. 3D-tulostamista kutsutaankin lisääväksi valmistukseksi eli AM-tekniikaksi (Additive manufacturing). Nykyisessä muodossaan 3D-tulostamiseen kuuluu useita erilaisia tekniikoita kappaleiden valmistamiseksi, ja niistä kerrotaan lisää alaluvuissa. Ensimmäiset 3D-tulostimet on kehitetty jo 1980-luvulla. Tulostamisessa käytettävä tietokoneella tehdyn 3D-mallin tiedostomuotona käytettävä STL on johdettu sanasta stereolithography, joka tarkoittaa samalla myös SLA-tulostusmenetelmää. (Lipson & Kurman 2013, 65; Hausman & Horne 2014, 10, 24–25.)

2.2 3D-tulostus valmistusmenetelmänä

3D-tulostaminen on vielä tällä hetkellä hyvin hidasta verrattuna perinteisiin muovituotteiden valmistusmenetelmiin, ekstruusioon ja ruiskuvaluun. Ruiskuvalua käytetään suurien kappalemäärien tuotantomenetelmänä, ja sen etuna onkin nopeus valmistaa jopa kymmeniä kappaleita yhdellä, alle minuutin, työkierrolla. Tähän verrattuna 3D-tulostaminen on vielä hyvin hidasta, mutta toisaalta myös edullisempää. 3D-tulostaminen antaa mahdollisuuden muuttaa kappaleen muotoja tarpeen mukaan jo seuraavaan valmistettavaan kappaleeseen, kun taas ruiskuvalussa tällainen muutos vaatii muotin kalliin ja aikaa vievän muokkauksen tai jopa kokonaan uuden muotin valmistamisen. 3D-tulostamisessa tietokoneella piirrettyyn malliin voidaan etukäteen määrittää mahdolliset reikien paikat ja muut muodot, joita ruiskuvalulla ei voitaisi valmistaa ilman jälkityöstöä. Toki 3D-tulostetut kappaleet vaativat jossain tapauksissa jälkityöstöä, mutta se on huomattavasti vähäisempää. 3D-tulostaminen säästää myös materiaalia verrattuna mekaaniseen työstöön, sillä kappale tulostuu juuri mallin mukaisesti eikä mekaanisen työstön mukaista ylijäävää ja

sellaisenaan käyttökelvotonta materiaalia synny. (Lipson & Kurman 2013, 65; Hausman & Horne 2014, 10–15, 24–25.)

2.3 3D-tulostuksen tulevaisuus

Nykyään 3D-tulostuksella voidaan tulostaa kappaleita useista materiaaleista kuten muovista, lasista, titaanista, sementistä ja jopa elävistä soluista. Tulevaisuudessa jokaisella tulee olemaan mahdollisuus suunnitella omien mieltymysten mukaisia kappaleita tulostettavaksi. Kuluttaja voi tulevaisuudessa tulostaa esimerkiksi astianpesukoneeseen uuden varaosan rikkoutuneen tilalle. Tällainen varaosan tulostamisen mahdollisuus antaa myös laitteiden valmistajille keinon uudistaa toimintaansa, sillä varaosia ei tarvitse varastoida vaan niitä voidaan tulostaa tarpeen mukaan. Varaosia ei tarvitse enää toimittaa kalliisti perinteisillä kuljetusmenetelmillä vaan ne toimitetaan sähköisesti ja voidaan tulostaa siellä missä niitä tarvitaan. Elävästä kudoksesta tulostetaan jatkossa uusia elimiä toimimattomien tilalle, mikä mullistaa ihmisen terveydenhuollon. Materiaalien uskotaan kehittyvän suuntaan, jossa tulostimet luovat uusia materiaaleja uusien sekoitustapojen avulla. Materiaalit ja kehittyvät tulostusmenetelmät antavat mahdollisuuden tulostaa samanaikaisesti useista materiaaleista rakentuvia kokonaisuuksia sekä kustomoitavia välineitä, kuten omaan lyöntityyliin mukautuva tennismaila. Mahdollisuuksien mukaan voi tulostamisen suuntana olla passiivisten osien ja materiaalien sijaan aktiivisten systeemien tulostaminen. Nämä aktiiviset systeemit voisivat aistia ja reagoida sekä käyttäytyä. (Lipson & Kurman 2013, 124–128, 265–266; Hausman & Horne 2014, 16–20.)

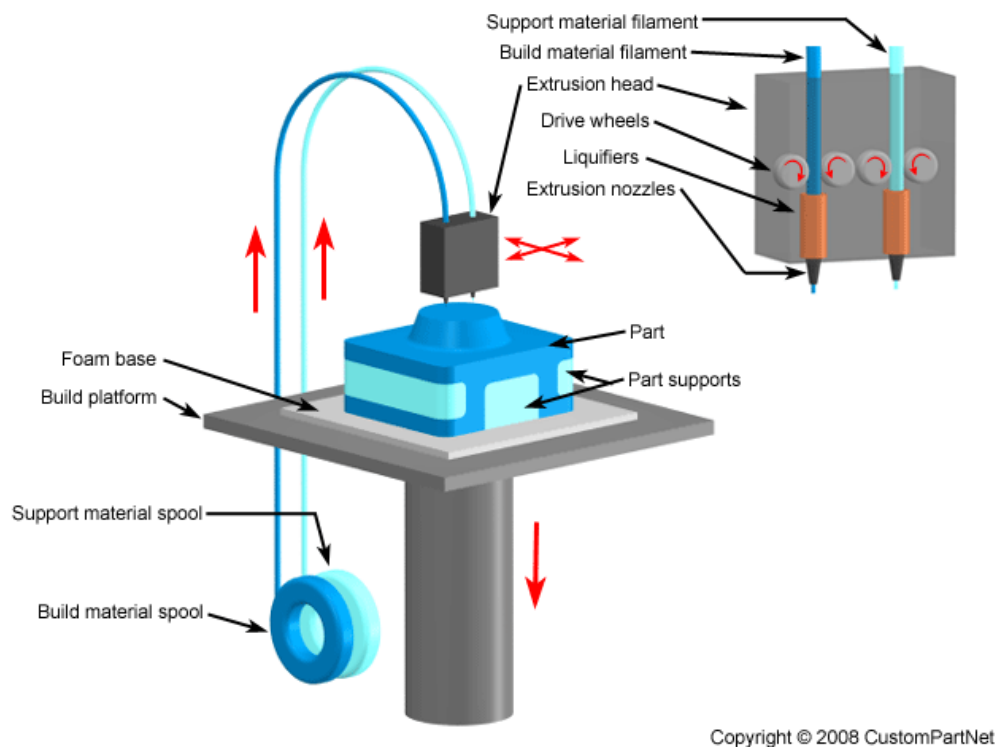
2.4 3D-tulostimet

3D-tulostimet voidaan jakaa kahteen luokkaan. Ensimmäisen luokan tulostimet muodostavat kerroksia erilaisista raaka-aineista käyttäen menetelmänä ruiskutusta, suihkutusta tai puristusta. Tämän luokan tulostimet voivat käyttää nestemäistä, tahnamaista tai jauhemaista

materiaalia riippuen tulostusmenetelmästä. Näitä tulostimia käytetään useasti kodeissa ja toimistoissa. Toiseen luokkaan kuuluvat tulostimet, jotka sitovat ja kovettavat raaka-aineita lämmön tai valon avulla. Näissä tulostimissa materiaalit ovat tulostusmenetelmän mukaan joko nestemäisiä fotopolymeerejä tai erilaisia jauheita. (Lipson & Kurman 2013, 68.)

2.4.1 FDM – Fused Deposition Modelling

FDM eli Fused Deposition Modelling (KUVIO 1) on 3D-tulostusmenetelmä, jossa jotain pehmeään olomuotoon saatettua raaka-ainetta puristetaan tulostimen suutinpäähän lävitse. FDM-menetelmän tulostintyyppiä kehitti Scott Crump 1980-luvulla perustaen samalla menetelmän pohjalta Stratasyn nimisen yrityksen. FDM on Stratasyn tavaramerkki, minkä takia menetelmästä käytetään esimerkiksi harrastajien yhteydessä myös lyhennettä FFF eli Fused Filament Fabrication. (Hausman & Horne 2014, 33.)



KUVIO 1. FDM-menetelmän toiminta (CustomPartNet 2008a)

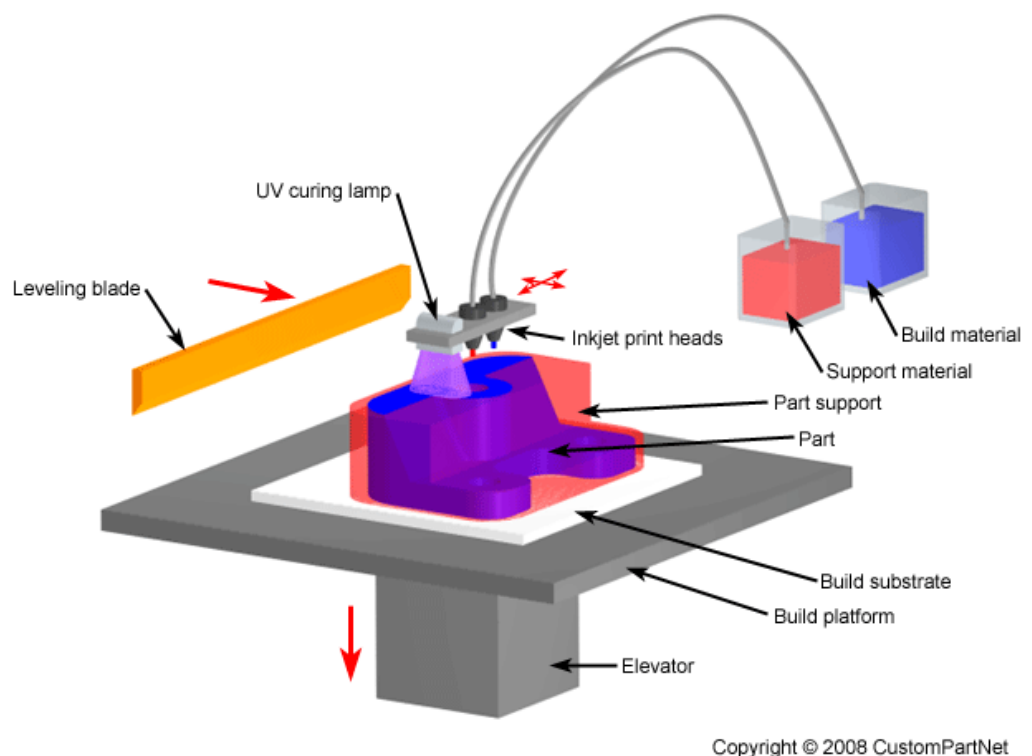
Tulostimen toiminta perustuu tulostettavan kappaleen muodon perusteella ennaltalasketun kulkureitin seuraamiseen ja mukana tulostettavaan materiaaliin. Tulostimen laiteohjelmisto huolehtii optimaalisen reitin muodostuksesta ja tulostimen liikeradoista. Tulostuspäälle, jossa suutin on kiinni, on määritettävä suuttimen sijainti ja toiminta. Määrittämisellä kerrotaan tulostimelle, kuinka paljon ja minne suutin pursottaa materiaalia. Tulostaminen aloitetaan tulostamalla kappaleen ulkoreunat, minkä jälkeen seinämät ja muodot täytetään määritetyllä tavalla. Ensimmäisen tulostetun kerroksen jälkeen suutinta nostetaan hieman, minkä jälkeen tulostin tulostaa seuraavan kerroksen kappaleen muotojen mukaisesti. Tulostaminen jatkuu tällä tavalla, kunnes kaikki kappaleen muodot on tulostettu. Joskus vaikeiden muotojen tulostamiseksi tarvitaan tukimateriaalia, joka voidaan tulostaa erillisellä tukimateriaalin suuttimella tai samalla kuin muukin kappaleesta. Kappaleen koosta ja muodoista riippuen tulostaminen voi kestää jopa päiviä. (Lipson & Kurman 2013, 68–70; Hausman & Horne 2014, 33–34.)

FDM-tulostamisessa käytettävät muovit ovat langan muodossa ja yleisesti tavallisia kestumuoveja, kuten ABS ja PLA, mutta myös teknisiä laatuja, kuten Polyamidi-6:ta (Nailon) käytetään. FDM-menetelmän haittana on kyky tulostaa vain pursotettavia materiaaleja, sillä esimerkiksi sulan lasin ja metallin tulostaminen ei ole mahdollista. (Lipson & Kurman 2013, 70; Hausman & Horne 2014, 34.)

2.4.2 PolyJet Printing

PolyJet Printing (KUVIO 2) on israelilaisen Object geometries -yhtiön vuonna 2000 kehittämä tulostusmenetelmä, joka yhdistää kaksi erityyppistä tulostusmenetelmää. PolyJet-tulostimissa käytetään tulostuspäätä suihkuttamaan nestemäistä fotopolymeeriä ohuina kerroksina alustalle. Jokaisen suihkutetun kerroksen jälkeen fotopolymeeri kovetetaan siihen kohdistettavan UV-valon vaikutuksella. Tulostimen ehdottomana vahvuutena on nopeus ja tarkkuus. Tulostusresoluutio eli

tarkkuus voi olla jopa 16 mikrometriä, minkä takia menetelmää voidaan hyödyntää suurta tarkkuutta ja nopeutta vaativissa sovelluksissa teollisuudessa ja lääketieteessä. Tulostimeen voidaan asentaa samanaikaisesti useita tulostuspäitä, mikä mahdollistaa useamman tulostusmateriaalin käyttämisen samaan kappaleeseen. Tulostimen heikkoutena on UV-valon kanssa reagoivien fotopolymeerien hinta sekä niiden hauraus. (Lipson & Kurman 2013, 70.)

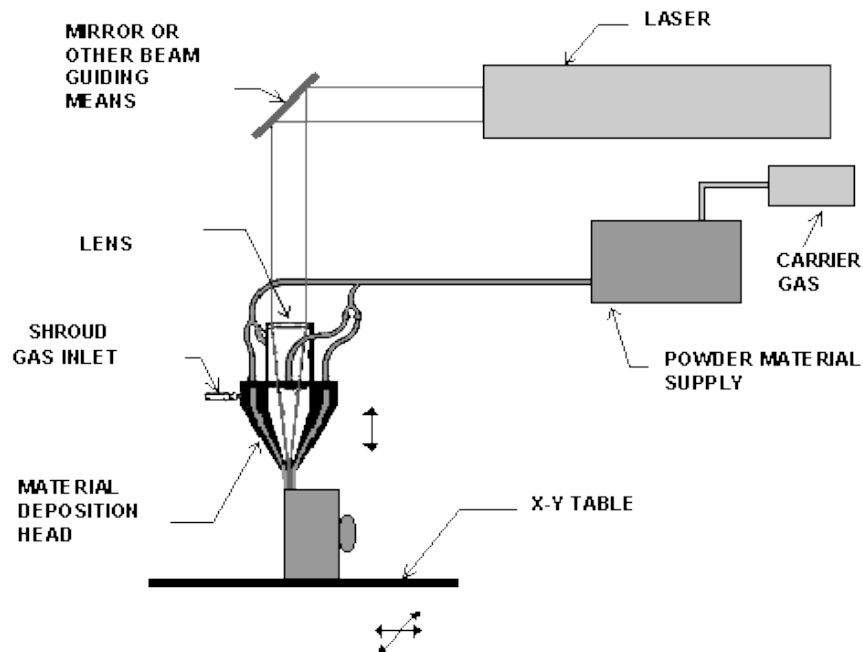


KUVIO 2. PolyJetin periaate (CustomPartNet 2008b)

2.4.3 LENS – Laser engineered net shaping

LENS eli Laser Engineered Net Shaping (KUVIO 3) perustuu jauhomaisen materiaalin puhaltamiseen lasersäteeseen. Kappaleen pintaan kohdistettuun lasersäteeseen osuessaan jauhe sulaa ja ohjautuu kappaleen pintaan. Lasersäde mukaillee kappaleen muotoja ja kasvattaa

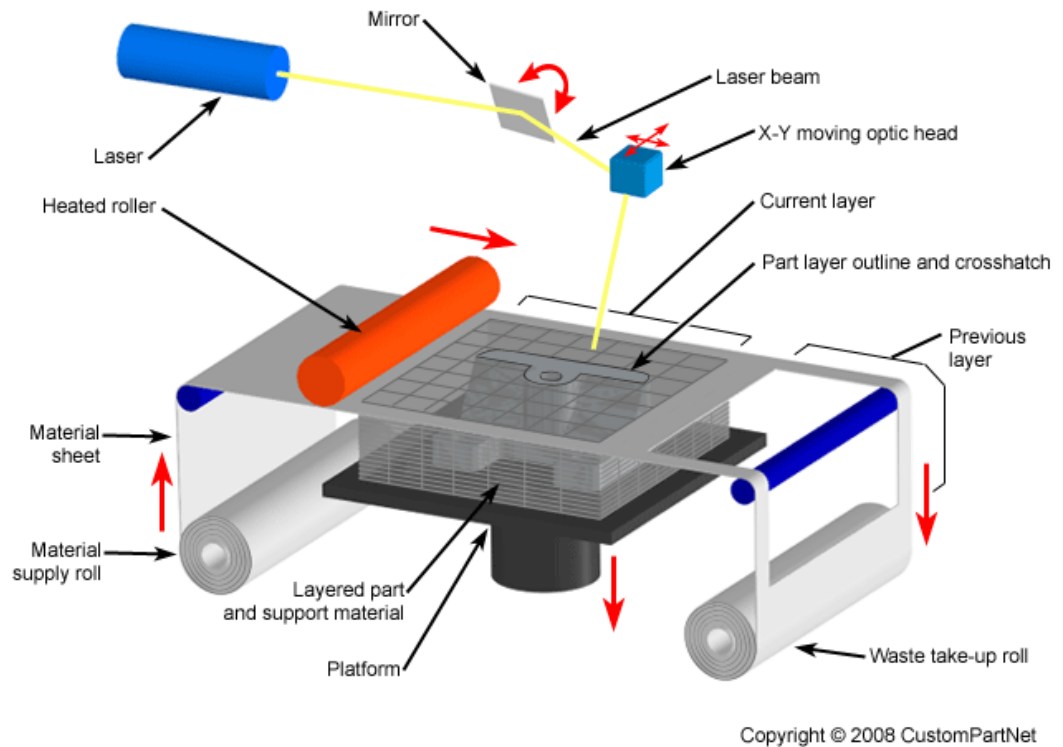
jauheen avulla kappaletta kerros kerrokselta. Aikaisemmin menetelmä sopi vain muoveille, mutta nykyään sen sopiessa myös metallien tulostamiseen, on auto- ja lentoteollisuuden kiinnostus lisääntynyt menetelmää kohtaan. Tulostimessa voidaan käyttää useita suuttimia puhaltamaan erilaisia raaka-aineita samanaikaisesti, jolloin on mahdollista tulostaa erilaisia seosmetalleja. (Lipson & Kurman 2013, 71–72.)



KUVIO 3. Laser Engineered Net Shaping -menetelmän periaate (3Dprinter.nu 2016)

2.4.4 LOM – Laminated Object Manufacturing

Laminated Object Manufacturing (KUVIO 4) käyttää tulostinpään sijasta ohuiden kalvojen laminointia. Ensin lasersäde tai veitsi leikkaa työstörädalle tuodusta ohuesta kalvosta kappaleen ensimmäisen kerroksen muodon mukaisen palan, minkä jälkeen kalvoa tuodaan uusi kerros ja leikataan seuraavan kerroksen muotoinen pala. Palat laminoidaan lämmön ja paineen avulla toisiinsa. Tämä prosessi toistuu, kunnes kappale on valmis. Menetelmää voidaan käyttää paperille, muoveille ja metalleille. (Lipson & Kurman 2013, 72–73.)



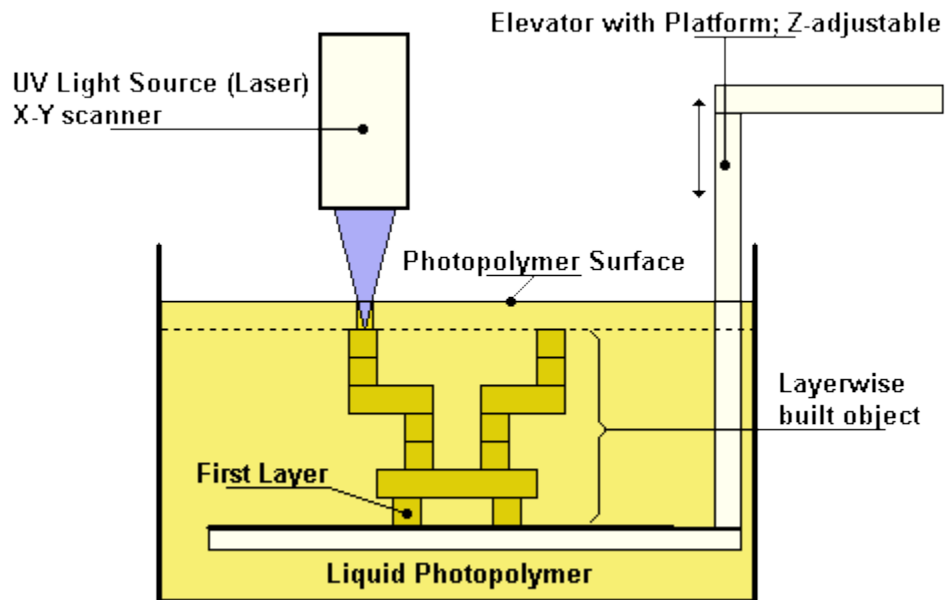
KUVIO 4. LOM -menetelmän periaate (CustomPartNet 2008c)

2.4.5 SL – Stereolithography

SL on yksi aikaisimmista kaupallisista 3D-tulostusmenetelmistä (Lipson & Kurman 2013, 73). 3D-tulostamisessa käytettävä STL-tiedosto on johdettu tämän menetelmän nimen, Stereolithography, mukaan. Menetelmästä käytetään myös lyhennettä SLA. (Lipson & Kurman 2013, 73; Hausman & Horne 2014, 25.)

SL-menetelmä (KUVIO 5) perustuu UV-laserin vaikutuksella kovettaviin nestemäisiin fotopolymeereihin. Kappaleen valmistamiseksi tulostimen sisällä säiliössä on fotopolymeeriä nestemäisenä. Laser-säde kovettaa kappaleen ensimmäisen kerroksen profiilin mukaisen osan fotopolymeeristä, minkä jälkeen säilötä lasketaan kerrospaksuuden verran. Tämän jälkeen laser kovettaa uuden kerroksen fotopolymeeriä edellisen päälle. Kierro jatkuu, kunnes kappale on valmis. Tulostamisen jälkeen

kappale on huuhdeltava puhtaaksi, pinnat mahdollisesti hiottava ja jälkikivetettävä UV-valouunissa. (Lipson & Kurman 2013, 73; Hausman & Horne 2014, 25.)



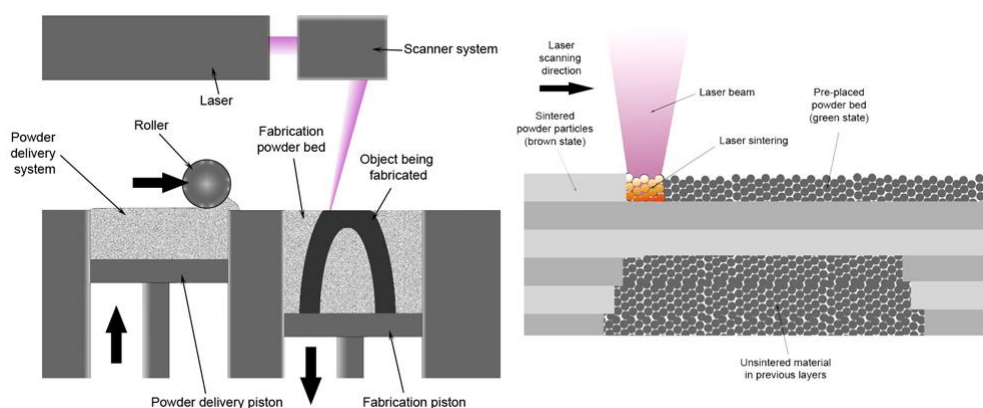
KUVIO 5. SL -menetelmän toimintaperiaate (Proform AG 2016)

SL-menetelmä antaa mahdollisuuden nopeaan ja tarkkuudeltaan erinomaisten kappaleiden tulostamiseen, sillä useampaa laseria voidaan käyttää samanaikaisesti tarkkuuden ollessa jopa 10 mikrometrin luokkaa. Fotopolymeerien rajoitettu mekaaninen kestävyys on yksi menetelmän heikkouksista suhteellisten kalliiden ja monimutkaisten laitteiden ohella. (Lipson & Kurman 2013, 73-74; Hausman & Horne 2014, 25–26.)

2.4.6 LS –Selective Laser Sintering

Selective Laser Sintering -menetelmästä (KUVIO 6) käytetään yleensä lyhennettä LS, mutta se tunnetaan myös kirjainyhdistelmällä SLS. Menetelmän keksivät 1980-luvulla Texasin yliopiston tutkijat Carl Deckard ja Joseph Beaman. LS on hyvin samankaltainen menetelmä kuin

Stereolithography (SL), sillä nestemäisten fotopolymeerien sijasta käytetään jauhetta. Jauhepedin yläpuolella on lasersäde, joka kohdistetaan jauhepedin pintaan. Lasersäde sintraa ohuen kerroksen jauhetta kappaleen profiilin mukaisesti. Sintratun kerroksen päälle tuodaan lisää jauhetta telojen avulla laskien samalla jauhepetiä alaspäin kerroksen paksuuden mukaisesti. Kerroksien telausta ja sintrausta jatketaan, kunnes kappale on valmistunut muodostuneeseen jauhepetiin. Kappaleen ympärille muodostunut sintraamaton jauhepeti voidaan käyttää edelleen toisen kappaleen tulostamiseen. Ympäröivä jauhepeti mahdollistaa vaikeiden ja ohuiden muotojen tulostamisen, sillä se tukee kappaletta valmistuksen aikana. (Lipson & Kurman 2013, 75; Hausman & Horne 2014, 30–31.)



KUVIO 6. LS-menetelmän periaate (Wikipedia 2016b)

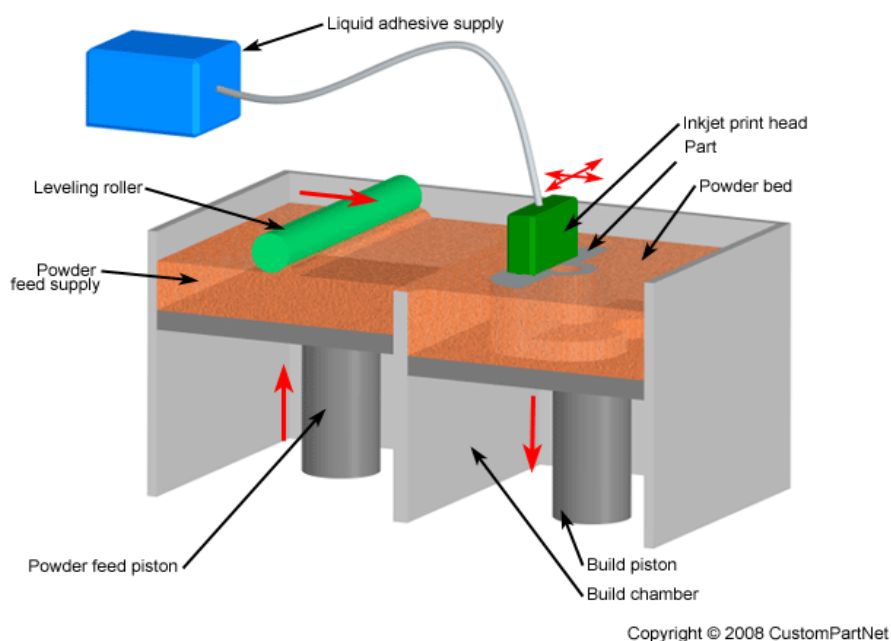
Yritys nimeltä Voxjet on kehittänyt menetelmää edelleen sarjatuotannon suuntaan lisäämällä prosessiin liukuhihnan. Kappale muodostuu jauheen lisäyksellä ja sitrauksella kulkien samalla vaakatasoisella liukuhihnalla hiljalleen eteenpäin (Hausman & Horne 2014, 31).

Tekniikan etuna on mahdollisuus käyttää useita jauheena saatavia materiaaleja, kuten nailonia, terästä, bronssia ja titaania (Lipson & Kurman 2013, 75). Menetelmän käyttöä rajoittaa mahdollisuus käyttää vain yhtä

materiaalia samanaikaisesti, mutta erilaisten seosmetallien käyttö on mahdollista esimerkiksi korujen valmistuksessa. Tulostetuiden kappaleiden pinta jää hukoiseksi. Prosessin kuumuuden takia kappaleet jäähtyvät jopa päivän kerrospaksuuksista riippuen. (Lipson & Kurman 2013, 75–76; Hausman & Horne 2014, 29.)

2.4.7 3DP – Three Dimensional Printing

Three Dimensional Printing (KUVIO 7) eli 3DP on tulostusmenetelmä, jonka MIT:n opiskelija Paul Williams ja professori Eli Sachs kehittivät 1980-luvun lopulla. Menetelmässä adheesiivaa eli jonkinlaista liimaa puristetaan jauhemaisessa muodossa olevaan raaka-aineeseen kerrosten muodostamiseksi. Menetelmän etuna voidaan pitää mahdollisuutta läpivärjätä kappaleita suoraan tulostuksen yhteydessä lisäämällä liimaan väriaineita. Koska menetelmässä ei käytetä laseria, on kappaleiden pinnanlaatu monesti suurempien kerrospaksuuksien takia huonompi. Toisaalta menetelmässä voidaan käyttää useita erilaisia raaka-aineita, kuten jauheena olevaa lasia ja metalleja. (Lipson & Kurman 2013, 76–77.)



KUVIO 7. 3DP-menetelmän periaate (CustomPartNet 2008d)

2.5 Käytävissä olevat materiaalit

3D-tulostamisessa käytettävät muovit voivat olla tulostusmenetelmästä riippuen kesto- tai kertamuoveja. Myös pehmeitä muoveja, elastomeerejä, voidaan tulostaa. Useimmissa kuluttajien käyttöön suunnatuissa tulostimissa käytetään kestumuoveja, kuten akrylinitriilibutadieenistyreeniä (ABS) ja polylaktidia (PLA). FDM-tulostusmenetelmässä voidaan käyttää edellä mainittujen lisäksi ainakin polykarbonaattia (PC), polyamidia (PA), polyvinyylialkoholia (PVA) ja iskunkestävää polystyreeniä (HIPS). Polyeteenin (PE) käyttö on vähäistä sen vaikeamman tulostettavuuden kannalta. (Lipson & Kurman 2013, 82–83; Hausman & Horne 2014, 64–69, 74.)

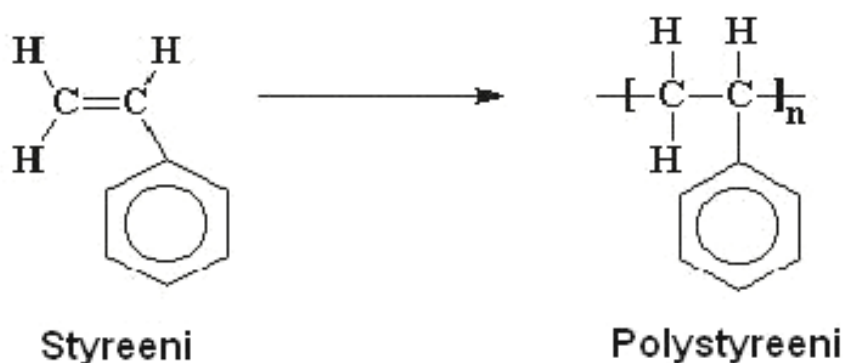
Käytettävän tulostuslangan laatu ja puhtaus vaikuttavat tuotteen valmistettavuuteen. Mahdolliset vaihtelut langan halkaisijassa vaikuttavat suuttimesta hetkellisesti tulevan muovin määrään, mikä näkyy lopputuotteessa mahdollisina pintavirheinä tai tulostumattomina kohtina rakenteessa. Huolimattomasti säilytetty lanka voi kuljettaa mukanaan likaa suuttimelle tukkien sen osittain tai jopa kokonaan. (Hausman & Horne 2014, 64.)

Useimmat SL-menetelmän tulostimet käyttävät valoherkkiä kertamuoveja, kun taas LS-tulostimissa käytetään lasersäteen tuoman lämmön avulla muokattavia, jauhemaisessa muodossa olevia, kestumuoveja. SL-menetelmän fotopolymeerit tulevat yleensä suoraan tulostimen valmistajalta yhteensopivuuden takaamiseksi, sillä fotopolymeerin herkkyys valon taajudelle vaikuttaa valmistettavuuteen. (Lipson & Kurman 2013, 82; Hausman & Horne 2014, 74.)

3 VALMISTUSMATERIAALIT JA -VÄLINEET

3.1 Polystyreeni ja iskulujitettu polystyreeni

Polystyreeni (PS) on styreenistä polymeroimalla (KUVIO 8) valmistettu kestävä muovi. Styreenin polymeroiminen voidaan suorittaa massa-, liuos-, emulsio- tai suspensiomenetelmällä. Polystyreeni on amorfinen muovi, minkä takia se on perustaltaan kovaa ja kiinteä sekä haurasta materiaalia. Polystyreenin amorfisuuden takia sillä ei ole suoranaista sulamispistettä vaan sen muovaaminen tapahtuu pehmenemispisteen, lasisiirtymälämpötilan (T_g), yläpuolella. Lasisiirtymälämpötila vaihtelee 83 ja 105 °C:n välillä. Perusmuodossaan polystyreeni on kirkasta ja läpinäkyvää muovia, jonka säänkestävyys ei ole erinomainen. Kemiallisesti polystyreeni kestää esimerkiksi happoja, emäksiä ja suolaliuoksia eikä se liukene alkoholeihin, mutta se ei kestä aromaattisia ja kloorattuja hiilivetyjä eikä estereitä. (Seppälä 2008, 193–194; Nykänen 2009, 1.)



KUVIO 8. Styreenin polymeroitumisreaktio (Nykänen 2009, 1)

Polystyreenistä on olemassa iskunkestävä variaatio, HIPS, jota käytetään tämän opinnäytetyön koekappaleiden valmistuksessa. Materiaalista käytetyt lyhenteet HIPS ja HI-PS tulevat englannin kielen sanoista High

Impact Polystyrene. Iskunkestävää polystyreeniä valmistetaan yhdistämällä kopolymerisaatiossa polystyreeniä ja polybutadieeniä, jossa polymerisaation aikana lisätty polybutadieeni sitoutuu kemiallisesti polystyreeniin. Kemiallisen menetelmän lisäksi voidaan käyttää mekaanisen ja kemiallisen menetelmän yhdistelmää, jossa polystyreeniä ja polybutadieenikumia yhdistetään sekoittimessa. Tällä tavalla aikaansaatu polystyreeni omaa heikomman iskulujuuden ja valonkeston. Iskunkestävän polystyreenin mekaaniset ominaisuudet ovat paremmat kuin normaalilla laadulla: korkeampi iskulujuus, ja -sitkeys, korkeampi lämmönkestävyys sekä hyvä jäykkyys ja kovuus. HIPS ei kestä normaalin laadun tavoin aromaattisia ja kloorattuja hiilivetyjä ja sen ominaisuudet heikkenevät bensiinin, ketonien ja etanolin vaikutuksesta. (Nykänen 2009, 1–5.)

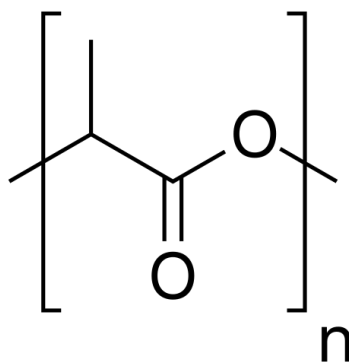
Iskunkestävää polystyreeniä voidaan käyttää ekstruusiassa ja ruiskuvalussa sekä sitä voidaan mekaanisesti työstää. Prosessointilämpötila vaihtelee 160 ja 230 °C:n välillä. HIPS:n käyttöä tukee sen hyvä mittapysyvyys ja mekaaniset ominaisuudet. Se on lisäksi edullista, helppoa työstää ja jälkikäsitellä. HIPS:ä käytetään paljon esimerkiksi rakennusteollisuuden tarvikkeissa sekä kuluttajien erilaisissa käyttötavaroissa, kuten urheiluvälineissä ja kotitaloustavaroissa. (Nykänen 2009, 5.)

3.2 Polylaktidi eli PLA

Polylaktidi (KUVIO 9) on luonnon raaka-aineisiin perustuva biopolymeeri, jonka valmistuksessa käytetään sokeria, selluloosaa tai tärkkelystä. Polylaktidi luokitellaan termoplastisiin polyestereihin, ja se on osittain kiteinen kestopuovi, joka hajoaa luonnossa hiilidioksidiksi, vedeksi ja humukseksi. (Kurri, Malén, Sandell, Virtanen, 2008, 43; Rogers 2015.)

PLA:n lasittumislämpötila (60 °C) on suhteellisen matala, minkä takia sen käyttö lämmönkesto vaativissa sovelluksissa on rajoitettu. Prosessointi tapahtuu sulamispisteen 150–160 °C:n yläpuolella. Polylaktidista voidaan tehdä tuotteita ainakin ruiskuvalulla, ekstruusiolla, lämpömuovauksella

sekä 3D-tulostamalla FDM-menetelmällä. PLA:n työstettävyys on kuitenkin muita muoveja vaikeempaa, sen kosteutta on osattava hallita niin valmistuksen kuin varastoinninkin aikana. Käytettävät lisä- ja apuaineet ovat orgaanisia ja biohajoavia, kaikki kemikaalit täyttävät elintarvikesovelluksille määrätyt kriteerit. Mekaanisten ominaisuuksien osalta PLA on ABS:ä hauraampaa ja jäykempää kuin nailon. (Kurri ym. 2008, 43; Hausman & Horne 2014, 65–66; Rogers 2015; Mäntyranta 2016.)



KUVIO 9. Polylaktidin kemiallinen kaava (Wikipedia 2016a)

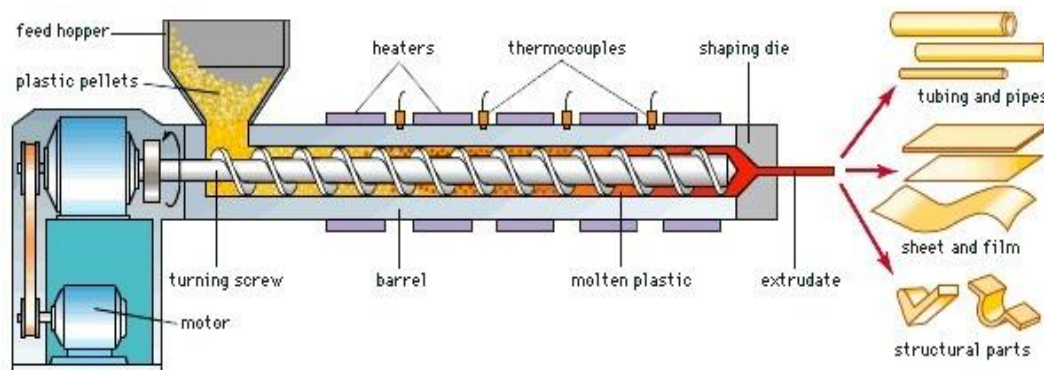
Tavallisimmat käyttökohteet PLA:lle löytyy erilaisista biohajoavista kalvoista ja elintarvikepakkauksista sekä kertakäyttöastioista. Polylaktidin kenties erikoisin käyttöalue löytyy lääketeestä, sillä siitä voidaan valmistaa esimerkiksi erilaisia tukimekanismeja murtuneita luita tukemaan. Erona perinteisiin tukiin ja kiinnikkeisiin, PLA:sta valmistetut hajoavat ajansaatossa itsekseen ilman uutta leikkausta. (Kurri ym. 2008, 43; Rogers 2015; Mäntyranta 2016; Tavani 2016.)

3.3 Ekstruusio ja tuotteet

Ekstruusio eli suulakepuristusta käytetään muovien sulatyöstössä erilaisten jatkuvien tuotteiden valmistamiseksi. Ekstruusioksi voidaan kutsua prosessia, jossa sulatettu muovi ja siihen yhdistettävät lisä- ja väriaineet pursotetaan halutun profiilin mukaisen suuttimen läpi. Ekstruusio toimii pääasiassa keskeytymättömänä prosessina, jonka lopputuotteena on tavallisesti erilaiset putket, letkut, tangot ja levyt. Ekstruusioilla valmistetaan lisäksi huomattavia määriä kalvoja erilaisiin käyttötarkoituksiin. Ekstruusion eri variaatioilla voidaan lisäksi valmistaa monikerroskalvoja, pusseja sekä päällystää kartonkia ja paperia. Ekstruusiossa käytettävät materiaalit ovat pääasiassa PVC, PE ja PP. menetelmän osuus kestumuovien työstöstä on noin 60 %. (Kurri ym. 2008, 100; Seppälä 2008, 261–262.)

3.3.1 Ekstruuderit

Ekstruuderin (KUVIO 10) toiminta perustuu ruuviin, joka pyörii sylinterin sisällä. Ruuvin on tarkoitus kuljettaa sylinterin sisälle syötettyä muovigranulaattia- tai jauhetta eteenpäin kohti suutinta. Ruuvin avustuksella liikkuva muovi sulaa matkalla kitkan tai kitkan ja sylinterin seinämää lämmittävien sähkövastusten avulla. Ruuvi voidaan jakaa kolmeen vyöhykkeeseen, joista ensimmäisessä, syöttövyöhykkeessä, ruuvin tehtävänä on siirtää muovia syöttösuppilosta seuraavalle vyöhykkeelle. Sulatusvyöhykkeellä muovi sulaa ennen siirtymistään sekoitusvyöhykkeeseen, jossa massa homogenisoidaan. Lopuksi muovi kulkee suuttimelle sihtipakan läpi, joka suodattaa pois mahdolliset suuttimen toimintaa häiritsevät roskat. (Kurri ym. 2008, 100–102; Seppälä 2008, 263–264.)



KUVIO 10. Ekstruuderin rakenne (Vegner Industrial Co Ltd. 2016)

3.4 3D-tulostin

Tämän opinnäytetyön kokeellisen osuuden koekappaleiden valmistamisessa käytetään latvialaisen Mass Portal SIA:n valmistamaa Pharaoh ED -tulostinta (KUVIO 11).



KUVIO 11. Pharaoh ED-tulostin (Maker3D 2016b)

Tulostin perustuu FDM-tekniikkaan, ja se on hankittu Lahden ammattikorkeakoululle keväällä 2016. Tulostimessa on mahdollisuus tulostaa samassa tulostusprosessissa kahta eri lankaa. Käytännössä kahden langan ero tulostamisessa rajoittuu saman materiaalin eri väreihin tai toisen materiaalin käyttämiseen tukiaineena varsinaisen kappaleen valmistuksessa. Tulostimesta on saatavilla kolme erilaisella tulostusalueella olevaa mallia: 20, 30 ja 40 (Mass Portal 2016). Koulun tulostin on mallia 20, jolloin tulostettavan kappaleen maksimi koko voi olla halkaisijaltaan 20 cm ja korkeudeltaan 18,6 cm. Tulostimen ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Paraoh ED ominaisuudet (Maker3D 2016a)

printer_size	Width: 32 cm Depth: 31 cm Height: 63 cm
heated_bed	yes
material_dia	1.75mm
printer_weight	16kg
nozzle_size	0.4-1mm
build_volume	Diameter: 20 cm Height: 18,6 cm — outer diameter, 20,5 cm — in the middle Square: 15 cm width x 15 cm depth x 18,6 cm height
print_speed	30-300mm/s
nozzle_speed	30-400mm/s
nozzle_temp	Up to 300° C
power_usage	Line: 110 – 240 V AC / 50 – 60 HZ Power: Max. 305 W; nom. 115 W; standby 15 W
material_type	Recommended material PLA Experimental: ABS, PET, PVA, HIPS

4 KOEKAPPALEIDEN VALMISTUS

4.1 Tulostuslangat ja valmistaminen

HIPS-koekappaleiden tulostamista varten tulostuslanka valmistettiin itse Lahden ammattikorkeakoulun muovilaboratoriossa. Ekstruuderina käytettiin Brabenderin Plastograph-sarjan ekstruuderia ja granulaatteina Totalin valmistamaa Lacqrene-nimistä iskunkestävää polystyreeniä.



KUVIO 12. Työhön käytetty ekstruuderia ja vetolinjaa

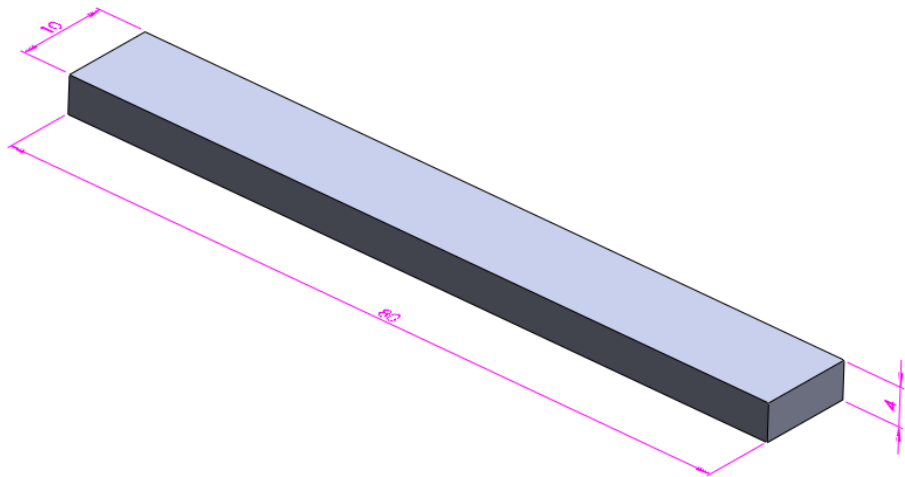
Ekstruuderin (KUVIO 12) sylinterille asetettiin nousujohtoinen, suutinta kohti kasvava, lämpötilaprofiili. Lämpötilat asetettiin arvoihin 130 °C, 150 °C, 180 °C ja 190 °C. Muovi pursotettiin suuttimesta suoraan Brabenderin valmistamalle vetolinjalle (KUVIO 12), jota käytettiin kalibrointiin ja jossa se jäähdytti. Ekstruuderin ruuvin pyörimisnopeuden asettamisen jälkeen vetolaitteiston pyörimisnopeutta säädettiin oikeanpaksuisen langan valmistamiseksi. Vetolaitteen vetonopeutta säätämällä voidaan vaikuttaa langan paksuuteen. Lanka oli tarkoitus saada 1,75 mm:n paksuuteen sallitun vaihteluvälillä ollessa 1,65–1,8 mm. Ekstruuderin suuttimen

halkaisija oli 1,8 mm, jolloin vetonopeuden oli oltava hieman suurempi kuin nopeus, jolla muovi tuli ulos suuttimesta. Lanka pyrittiin tekemään keskimäärin vaihteluvälin paksummalle puolelle, koska 3D-tulostimen suuttimelle lankaa syöttävä hammaspyörä ei olisi välttämättä tulostuksen yhteydessä saanut syötettyä hieman alimitoitettua lankaa. Lankaa valmistettiin kaksi erää samoja arvoja käyttäen, koska ensimmäinen ei riittänyt kaikkien koekappaleiden tulostukseen.

PLA koekappaleiden tulostamiseksi suoritettiin ensin koetulostuksia muutaman eri valmistajan tulostuslangoille. Lopulta koetulostusten suorittamisen jälkeen koekappaleiden tulostamiseen valikoitui Polymakerin valmistama Polymax-tulostuslanka. Polymax osoittautui tulostusjälkensä perusteella parhaimmaksi tasalaatuisuuden ja pinnanlaadun suhteen. Valmistaja lupaa langalle hyviä mekaanisia ominaisuuksia ja jo todettua hyvää tulostuslaatua. Polymaker lupaa myös, että Polymax on jopa yhdeksän kertaa iskulujempaa kuin tavallinen PLA. (Polymaker 2017.)

4.2 Koekappaleen 3D-mallinnus

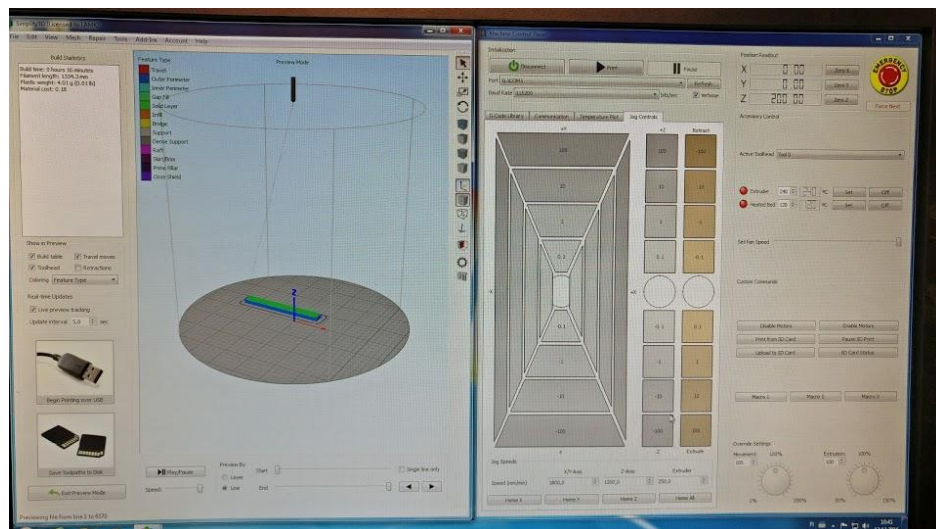
Koekappaleen mallinnus suoritettiin 3D-mallintamiseen suunnitellulla Solidworks-ohjelmalla. Koska tulostetuille kappaleille suoritetaan lopuksi vetokoe, oli alun perin suunnitelmana tulostaa ISO 3167-standardin mukaisia vetokoesauvoja (Seppälä 2008, 73). Kuitenkin tulostuksen hitaudesta johtuen koekappaleet mallinnettiin iskukoesauvan (KUVIO 13) mittoihin, mikä vastaa standardin mukaisen vetokoesauvan ohuinta osaa ilman päätyjen vetopintoja. Iskukoesauvan mitat ovat 80x10x4 mm. Standardin mukaisen vetokoesauvan tulostamiseen olisi kulunut noin 40 minuuttia kun iskukoesauva valmistui noin 20 minuutissa. Tulostamista varten koesauvan 3D-malli tallennettiin yleisesti käytössä olevaan ja tulostimelle sopivaan STL-tiedostomuotoon.



KUVIO 13. 3D-mallinnettu iskukoesauva

4.3 Koekappaleiden tulostaminen

Koekappaleiden tulostaminen aloitettiin tuomalla STL-tiedostomuotoon tallennettu 3D-malli tietokoneelle asennettuun tulostimen hallintaohjelmaan. Hallintaohjelmana oli käytössä tulostimen mukana tullut Simplify3D. Tulostimen hallintaohjelmalla hallitaan tulostimen toimintaa täysipainoisesti.



KUVIO 14. Simplify 3D-ohjelman tulostimen käyttöliittymä

Simplify3D-ohjelmaan määritettiin ensimmäiseksi tulostimen suuttimen halkaisijaksi 0,40 mm ja langan poikkipinnan halkaisijaksi 1,75 mm. Tulostettavan kerroksen paksuudeksi määritettiin 0,20 mm, mutta ensimmäinen kerros tulostettiin muista kerroksista poikkeavasti 150 % paksummaksi ja vain 25 %:n nopeudella määritetystä tulostusnopeudesta. Ensimmäisen kerroksen poikkeavat määrittelyt mahdollistavat muovin paremman tarttumisen tulostusalustaan. Tarttuminen alustaan on tärkeää, sillä jäähtyessään muovi kutistuu ja aiheuttaa tulostettavan kappaleen reunojen irtoamista tulostusalustan pinnalta. Muovin tarttumista lasiseen tulostusalustaan parannettiin kiinnittämällä siihen Kapton-teippiä. Koska koekappaleet oli saatava tulostettua mahdollisimman tiheäksi, tulostettavan kappaleen sisäosan täytöksi määritettiin ohjelman sallima maksimiarvo 100 %. Sisäosan ja ulkoreunojen limitykseksi asetettiin 50 %, jolla varmistettiin sisäosan tulostuksen tarttuminen ulkoreunaan. Sisäosan tulostus suunnattiin 45° x-akseliin nähden, jolloin joka toinen kerros suuntautui toiseensa nähden 90°-astetta. Tällä täyttötyylillä kappaleeseen ei tule täysin vetosuuntaan tai siihen nähden kohtisuoraan orientoituja kerroksia. Tulostusnopeudeksi asetettiin 3600 mm/min.

4.3.1 PLA:n tulostaminen

PLA:n tulostaminen on mahdollista jo 190 °C:ssa, mutta eri valmistajien lankojen tulostuksessa huomattiin, että paras tulostuslämpötila täytyy etsiä koetulostuksien avulla, sillä ne vaihtelevat valmistajasta ja lankarullasta riippuen. Tässä työssä käytetty PLA tulostui hyvin jo 200 °C:ssa, mutta ensimmäinen kerros tulostettiin korkeammassa 210 °C:n lämpötilassa. Valmistajan määrittämä tulostuslämpötila on 190 °C ja 220 °C:n välillä. (Polymaker 2017). Korkeamman tulostuslämpötilan ohella kappaleen tarttuvuutta alustaan parannettiin lämmittämällä tulostusalustaa ensimmäisen kerroksen kohdalla 70 °C:seen ja sitten laskemalla se 60 °C:seen. Nämä lämpötila-asetukset toimivat hyvin, joten niitä käytettiin kaikkien PLA-koesauvojen kohdalla.

4.3.2 HIPS:n tulostaminen

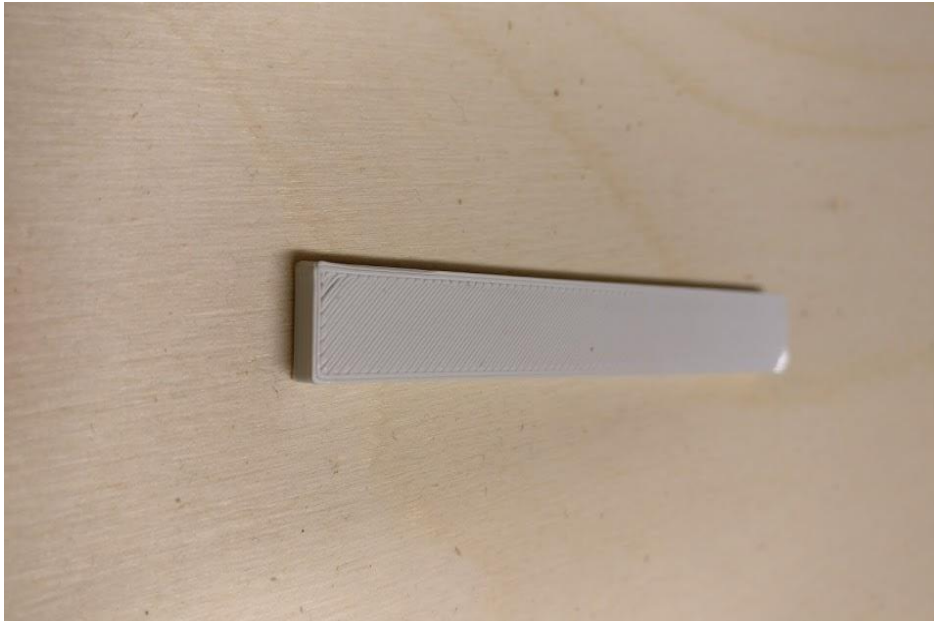
HIPS:n tulostaminen vaatii suurempia lämpötiloja kuin PLA:n, sillä sen lasittumislämpötila eli T_g on suurempi. Lasittumislämpötila on se lämpötila, jonka alapuolella polymeeri on kovaa ja lasimaista ja yläpuolella joustavaa (Seppälä 2008, 59). HIPS:ä tulostettaessa ei ollut käytössä valmistajan ennalta määrittämää tulostuslämpötilaa, vaan se haettiin myös koetulostuksien avulla. HIPS tulostui hyvin, kun ensimmäiselle kerrokselle suuttimen lämpötilaksi asetettiin 250 °C ja seuraaville 240 °C. Tulostusalustan lämpötilaksi piti asettaa 120 °C ensimmäisen kerroksen tulostamisen ajaksi, jonka jälkeen lämpötila laskettiin 110°C:seen. Lämmitetyn alustan lisäksi oli käytettävä Kapton-teippiä ensimmäisen kerroksen tarttuvuuden parantamiseksi.

4.3.3 Tulostamisessa kohdatut ongelmat

Sekä HIPS:n että PLA:n kohdalla koekappaleen varsinainen tulostusaika oli noin 20 minuuttia, jonka jälkeen kappale oli poistettava ja määritettävä tulostusohjelmasta uusi kappale tulostumaan. Tulostimen tehokkaan toiminnan parantamiseksi kokeiltiin mahdollisuutta jättää monta koesauvaa tulostumaan kerrallaan esimerkiksi yöksi. Kuitenkin tulostusohjelman säätömahdollisuuden rajallisuudesta johtuen sauvat tulostuivat yhtenä prosessina niin, että jokaiseen sauvaan tulostettiin aina yksi kerros, jonka jälkeen kierto alkoi taas alusta. Tämä aiheutti ongelmia edellisten kerrosten ehtiessä jäähtyä liikaa ennen seuraavan kerroksen tulostamista, jolloin kerrosten välinen adheesio ei ollut riittävä.

Useamman perättäisen kappaleen tulostamisen aikana kiinnitettiin huomiota siihen, että ensimmäisten kappaleiden tulostuksen kohdalla esiintynyt huono laatu (KUVIO 15) paranee vähitellen kappaleittain tulostuksen edetessä. Koska molempien tulostusmateriaalien kohdalla oli havaittavissa samanlainen muutos, suljettiin materiaalin sisäisen laadun vaihtelun aiheuttamat ongelmat pois. Tulostuksessa toinen tärkeä muuttuja on lämpötila, joten myös sen mahdollinen vaikutus tutkittiin

mittaamalla todellista tulostusalustan lämpötilaa pintalämpötilan mittaamiseen tarkoitetulla digitaalisella Testo 922-lämpömittarilla.



KUVIO 15. Huono tulostusjälki koesauvassa

Alustan lämpötilaa mitattiin viiden koesauvan tulostuksen aikana ja jokaisen sauvan kohdalla alustan lämpötila mitattiin kuutena eri ajankohtana. Ensimmäinen mittaus suoritettiin heti kun tulostin ilmoitti ohjelmalle lämpötilojen saavuttaneen määritetyt arvot. Seuraavat mittaukset tehtiin 1, 5, 10, 15 ja 19 minuuttia tulostuksen aloittamisesta. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 2. Mittaustuloksista voidaan huomata, että tulostusalustan todellinen lämpötila ei koskaan saavuta tulostimelle määritettyä lämpötilaa, vaan jää jopa 15 °C tavoitteesta. Ensimmäisen kappaleen kohdalla määritettyjen ja todellisten lämpötilojen erot ovat suurimillaan, mutta ne tasaantuvat seuraavien kappaleiden kohdalla tulostuksien edetessä. Toisena tulostetun kappaleen kohdalla lämpötilat ovat muuttuneet huomattavasti neljässä ensimmäisessä mittauspisteessä verrattuna ensimmäiseen. Lopuissa kappaleissa lämpötilojen nousu on hidasta, mutta nousee aina viidenteen kappaleeseen saakka muutamia mittauspisteitä luukunottamatta. Lämpötilan tasainen nousu johtuu todennäköisesti siitä, että lämmitettävä

lasialusta lämpiää hitaasti tulostuksien edetessä verrattuna anturin antamaan tietoon. Suuttimen todellista lämpötilaa ei koettu tarpeelliseksi mitata tulostuksen aikana, koska muovit tulivat suuttimesta hyvin ulos ja suuttimen lämpötila oli asetettu ainakin yli 10 °C minimilämpötilan yläpuolelle.

TAULUKKO 2. Tulostusalustan lämpötilamittaukset

Kpl1	Aika	Tod.lämpötila	Tulostimen ilm. lämpöt.	Ero
	Heti kun tulostin valmis	56,1	71	14,9
	1min tulost. aloituksesta	61,5	72	10,5
	5 min tulost. aloituksesta	52,6	60	7,4
	10 min tulost.aloituksesta	52,8	61	8,2
	15 min tulost.aloituksesta	55,2	62	6,8
	20 min tulost. aloituksesta	55,1	61	5,9
Kpl2	Aika	Tod.lämpötila	Tulostimen ilm. lämpöt.	Ero
	Heti kun tulostin valmis	61,4	71	9,6
	1min tulost. aloituksesta	64,1	70	5,9
	5 min tulost. aloituksesta	54,1	62	7,9
	10 min tulost.aloituksesta	54,2	62	7,8
	15 min tulost.aloituksesta	55,8	62	6,2
	20 min tulost. aloituksesta	56,2	61	4,8
Kpl3	Aika	Tod.lämpötila	Tulostimen ilm. lämpöt.	Ero
	Heti kun tulostin valmis	60,1	70	9,9
	1min tulost. aloituksesta	63,9	71	7,1
	5 min tulost. aloituksesta	56,2	62	5,8
	10 min tulost.aloituksesta	55,6	62	6,4
	15 min tulost.aloituksesta	55,9	62	6,1
	20 min tulost. aloituksesta	56,7	61	4,3
Kpl4	Aika	Tod.lämpötila	Tulostimen ilm. lämpöt.	Ero
	Heti kun tulostin valmis	61,6	70	8,4
	1min tulost. aloituksesta	64,2	71	6,8
	5 min tulost. aloituksesta	56,4	62	5,6
	10 min tulost.aloituksesta	55,6	62	6,4
	15 min tulost.aloituksesta	55,8	61	5,2
	20 min tulost. aloituksesta	57,2	61	3,8
Kpl5	Aika	Tod.lämpötila	Tulostimen ilm. lämpöt.	Ero
	Heti kun tulostin valmis	61,9	71	9,1
	1min tulost. aloituksesta	64,2	71	6,8
	5 min tulost. aloituksesta	56,3	62	5,7
	10 min tulost.aloituksesta	55,4	61	5,6
	15 min tulost.aloituksesta	55,7	61	5,3
	20 min tulost. aloituksesta	57,1	61	3,9

5 OLOSUHDETESTIT- JA TESTAUSMENETELMÄT

5.1 UV- vanhennus

Yleisesti tiedetään, että auringosta lähtöisin oleva ultraviolettisäteily on haitallista muoveille niiden altistuessa säteilylle pitkiä aikoja. Auringon maanpinnan saavuuttavien säteiden aallonpituudet vaihtelevat 295 ja 3000 nanometrin välillä. Jotkin erittäin herkät laitteet voivat havaita alle 295 nm:n säteilyä, mutta sen on määriteltävä olevan haitallisuudeltaan merkityksetöntä. Säteily luokitellaan aallonpituuden mukaan kolmeen luokkaan. Ensimmäiseen luokkaan kuuluu ultraviolettisäteily, jonka aallonpituus on välillä 295-400 nm. Toisen luokan 400-800 nanometriä pitkät säteet ovat silminnähtäviä. Yli 800 nm pitkät säteet aina 2450 nm:in saakka luokitellaan infrapunasäteilyksi. (Atlas Electric Devices Company 2001, 6–8.)

Ultraviolettisäteily on näistä säteilyistä haitallisin, koska aallonpituudeltaan lyhyet säteet sisältävät eniten energiaa. Säteiden sisältämä energia absorboituu materiaalin molekyyliin. Absorpoitun energian ylittäessä molekyylien sidosenergian polymeeriä kasassa pitävät sidokset katkeilevat, minkä seurauksena muovi alkaa vähitellen hajota. Ultraviolettisäteily aiheuttaa muoveissa myös värimuutoksia, jotka aiheutuvat niissä käytettävien väriaineiden absorpoimasta säteilystä. Värimuutokset tapahtuvat silminnähtävällä aallonpituudella, jolloin siitä ei voida suoraan päätellä polymeerin rakenteessa tapahtuneita muutoksia. Värimuutokset ovat kuitenkin käyttäjän silmin yksi olennainen ominaisuus arvioitaessa muovien kykyä suorittaa käyttökohteessa. (Atlas Electric Devices Company 2001, 12–14.)

Tässä työssä koekappaleet altistettiin ultraviolettisäteilylle kolmenkymmenen vuorokauden ajaksi, joka vastaa 720 tunnin yhtäjaksoista säteilyä. Koekappaleet asetettiin koekaappiin, jossa ultraviolettisäteily tuotettiin siihen tarkoitettujen 40 Watin UVA-351 loisteputkien avulla. Testin puolella välissä koekappaleet käännettiin, jotta vaikutus olisi tasainen molemmille puolille.

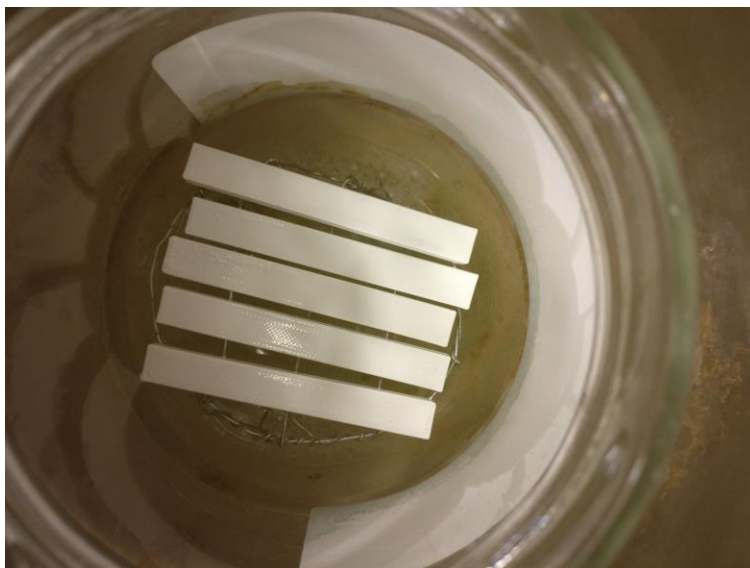
5.2 Asetonilla höyryttäminen

Asetoni valittiin käytettäväksi liuottimeksi, koska sitä käytetään yleisesti tulostettujen kappaleiden pinnanlaadun parantamiseen jälkityöstössä.

Asetoni on orgaaninen ketoniyhdiste. Asetonia käytetään kuluttajille suunnatuissa tuotteissa ja teollisuuden tarpeissa. Asetonia on esimerkiksi kynsilakanpoistoaineissa. Teollisuudessa asetonin käyttö on laajaa, sillä sitä käytetään erilaisten happojen ja räjähteiden valmistamiseen sekä liuottimena lakkoihin, öljyihin ja hartseihin. Asetoni on hyvin reaktiivinen, herkästi syttyvä, väritön ja kirkas neste. Asetonin leimahduspiste on alhainen -19 °C ja se kiehuu jo 56 °C :ssa. (Työterveyslaitos 2015.)

Työssä koesauvojen valmistamiseen käytettävän iskunkestävän polystyreenin altistaminen asetonille pitäisi aiheuttaa niissä fysikaalisten ja mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä (Nykänen 2009, 5). Asetonin vaikutuksesta polylaktidin ominaisuuksiin ei löytynyt selvää yksiselitteistä tietoa.

Kappaleiden altistamista varten suunniteltiin tarkoitukseen sopiva koejärjestely (KUVIO 16). Koska asetonin höyrystymislämpö on alle 60 °C ja se myös syttyy herkästi, päätettiin lämmittäminen suorittaa vesihauteessa. Vesihauteeseen asetettiin astia, jonka pohjalle kaadettiin asetonia. Astiaan asetettiin asetonin pinnan yläpuolelle ylettävä kehikko, jonka päälle koekappaleet laitettiin. Vesi lämmitettiin asetonin höyrystymislämmön yläpuolelle, jolloin kappaleet altistuivat höyrystyneelle asetonille. Kappaleet olivat asetonihöyryssä 10 minuuttia.



KUVIO 16. Koekappaleet asetonihöyryssä

5.3 Emäksinen pesuaine

Tulostimien määrän lisääntyessä myös kotikäytössä katsottiin koekappaleiden pesuaineelle altistamisen olevan tuotteen elinkaaren aikana kohtaama kemiallinen rasite. Konetiskipesuaineet ovat emäksisiä, jolloin niiden pH-arvo on 10-11. Esimerkiksi Sun Professional -konetiski-tabletin pH on 11 kymmenen prosentin laimennoksessa (Diversey Europe Operations BV 2016).

Iskunkestävä polystyreeni kestää hyvin erilaisia suoloja, joten pesuaineen vaikutus jää oletettavasti pieneksi. PLA on biohajoava luonnonpolymeeri, joka luokitellaan polyestereihin. Polylaktidin hajoamiseen vaikuttavat säteilyn lisäksi lämpö, hapettuminen ja hydrolyysi. Hydrolyysissä yhdiste hajoaa takaisin lähtöaineiksi siihen lisätyn veden vaikutuksesta. Hydrolyysi on yksi päätekijä polyestereiden hajoamisessa. Pesuaineen ja siihen yhdistetyn korkean lämpötilan voi olettaa aiheuttavan hajoamista polylaktidissa. (Seppälä 2008, 228–231; Nykänen 2009, 5; Kalsi 2015.)

Koekappaleiden altistamiseksi suoritettiin koejärjestely, jossa vesi lämmitettiin astiassa 60-70 °C:een ja lisättiin siihen pesuainetabletista

murskattua jauhetta. Liuoksen pH oli 11 ja se todettiin pH-arvon mittaamiseen tarkoitettujen liuskojen avulla. Kappaleet olivat liuoksessa 20 minuuttia.

5.4 Kovuuskoe

Kovuuskokeen tarkoituksena on määrittää materiaalin kovuus, eli sen kykyä vastustaa pysyviä muodonmuutoksia staattisessa kuormituksessa. Muovien ja kumien kovuuksia voidaan mitata muutamalla erilaisella testillä, jotka perustuvat standardoitujen painimien painamiseen tietyksi ajaksi ja määritetyllä voimalla kappaleen pintaan. Kovuus määritellään painauman koon tai syvyyden mittauksella. (Kurri ym. 2008, 197; Seppälä 2008, 82.)

Tavallisesti kovuuskokeista, Shore A-kovuus, suoritetaan pehmeille muoveille ja elastomeereille ja Shore D-kovuutta käytetään kovemille muoveille. Shore A-testin painin on katkaistun kartion mallinen ja Shore D-testissä pyörästetty kartio. Rockwell-kovuus on tavallisesti käytössä kestumuovien kovuuksien mittauksissa. Menetelmässä on painimena teräspallo. Painimen läpimitta ja kuormitus määräävät kovuusskaalan, joista kolme, L,M,R, ovat käytössä muovien kovuuskokeissa. Tässä opinnäytetyössä kovuuden mittaamiseen käytettiin Shore D -kovuutta (KUVIO 17). (Kurri ym. 2008, 197; Seppälä 2008, 82–84.)



KUVIO 17. Shore D -mittauslaitteisto

5.5 Vetokoe

Vetokoe on testi, jota käytetään esimerkiksi tuotannon apuvälineenä laadunvarmistamiseen. Vetokokeen avulla saadaan tietoon testattavan materiaalin vetokimmomoduuli, myötöraja sekä veto- ja murtolujuus. Vetokokeessa koesauva asetetaan kiinnitysleukojen väliin tarkasti vetosuuntaan kohden, sillä asennusvirheet voivat vaikuttaa mittaustuloksiin. Vetokoneeseen liitetyllä tietokoneella ohjataan vetokonetta vetämään koesauvaa tasaisesti vakionopeudella, kunnes sauvan murtolujuus ylitetään. Vetokokeen päätteksi tietokone piirtää koesauvalle yksilöllisen jännitys-venymäkäyrän. Vetokoe pyritään suorittamaan aina vähintään viidelle koesauvalle, ja määritetään niiden tuloksien keskiarvot. (Kurri ym. 2008,194–195; Seppälä 2008, 69–70.)

5.6 Optinen mikroskopia

Valo- eli optisen mikroskopian avulla voidaan selvittää esimerkiksi kappaleissa esiintyviä rakennevirheitä ja partikkeleiden jakaumaa. Optista mikroskopiaa käytetään yleisesti laadunvalvonassa, jossa virheitä voidaan tutkia joko kappaleen pinnalta tai ohuiden kappaleiden läpivalaisulla. Lämpivalaisumikroskopia on tärkein muovien kohdalla. (Seppälä 2008, 114–115.) Tässä opinnäytetyössä optista mikroskopiaa käytettiin koekappaleiden pintojen tarkasteluun ja vetokokeen jälkeisten murtopintojen tutkimiseen.

6 TULOKSET

6.1 Massan- ja muodonmuutokset

Emäksiselle pesuaineelle altistamisen yhteydessä mitattiin koesauvojen massat ennen ja jälkeen. PLA:n massat on esitetty taulukossa 3 ja HIPS:n taulukossa 4.

TAULUKKO 3. PLA:sta valmistettujen koesauvojen massat

PLA(aset+pes+UV)	Paino [g]		PLA (pesuaine)	Paino [g]	
	Ennen	Jälkeen		Ennen	Jälkeen
1	3,78	3,81	1	3,58	3,59
2	3,74	3,79	2	3,59	3,6
3	3,78	3,75	3	3,47	3,59
4	3,74	3,74	4	3,58	3,48
5	3,8	3,78	5	3,53	3,54
Keskiarvo	3,768	3,774	Keskiarvo	3,55	3,56

TAULUKKO 4. HIPS:stä valmistettujen koesauvojen massat

HIPS(aset+pes+UV)	Paino [g]		HIPS (pesuaine)	Paino [g]	
	Ennen	Jälkeen		Ennen	Jälkeen
1	2,88	2,9	1	2,90	2,9
2	2,88	2,88	2	2,89	2,9
3	2,87	2,87	3	2,92	2,92
4	2,93	2,89	4	2,86	2,87
5	2,90	2,93	5	2,85	2,85
Keskiarvo	2,89	2,894	Keskiarvo	2,88	2,89

Punnitusten perusteella koekappaleiden altistaminen kuumalle emäksiselle vedelle ei aiheuttaanut massoihin suuria muutoksia. Tuloksista voidaan kuitenkin nähdä koekappaleiden käyttäytyneet hydrofiilisesti eli ne ovat imeneet itseensä vettä. Veden määrät ovat kuitenkin merkityksettömän pieniä.

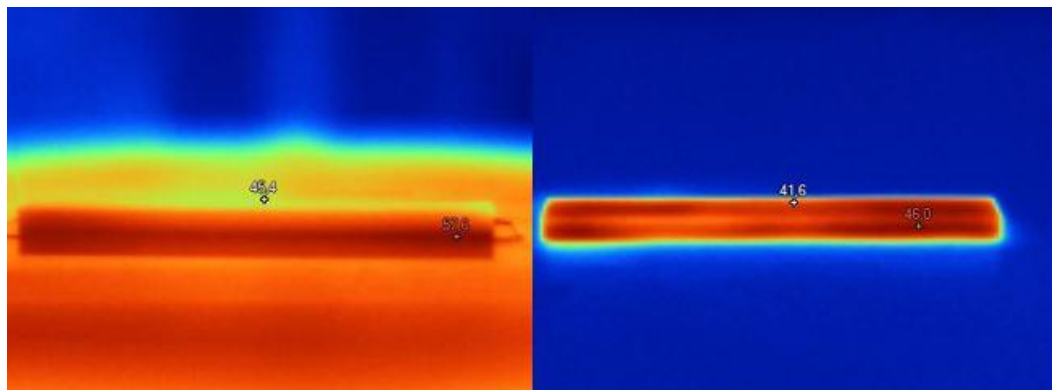
Pesuaineelle altistamisen aikana kuitenkin ilmeni kappaleissa tapahtuvaa muodonmuutosta. Polylaktidista valmistetuissa koesauvoissa tapahtui voimakasta pitkittäistä käyristymistä, jolloin päädyt ikään kuin nousivat vaakatasosta irti. Samankaltainen käyristyminen tapahtui myös PLA-koesauvojen asetonihöyrytyksessä, mutta ei niin voimakkaana. Asetonihöyrytyksestä aiheutunut käyristyminen palautui päivien kuluessa lähes huomaamattomaksi, mutta kappale oli selvästi lyhentynyt alkuperäiseen koesauvaan nähden. Kuviossa 18 vasemmanpuoleinen koesauva on altistettu kuumalle pesuaineliukselle ja oikeanpuoleinen asetonille.



KUVIO 18. PLA-koesauvojen käyristyminen

Todennäköisesti tämä muodonmuutos johtuu kappaleen sisäisten jännitysten purkaantumisesta. Kuuma pesuaineliuos ja lähes yhtä kuuma asetonihöyry vapauttavat jännityksiä kappaleissa. Koesauvat käyristyivät yläpinnan suuntaan eli kutistuminen on ollut siellä alapintaa suurempaa. Tämän suuntainen käyristyminen selittyy tulostamisen lämpötilaerojen takia syntyneillä jännityksillä, sillä alaosa kappaleesta jäähtyy huomattavasti hitaammin lämmitettyä tulostusalustaa vasten kuin yläpinta, joka jäähtyy heti huoneilman ja tulostimen suutinpäässä olevien tuulettimien aiheuttaman ilmavirran vaikutuksesta. Lämpötilaeroja päätettiin tutkia vielä erillisellä tulostus kerralla, jossa käytettiin hyväksi lämpökuvausta. Lämpökameran avulla todettiin kappaleen ala- ja yläpintojen lämpötilaerot juuri tulostuksen jälkeen sekä jäähtyminen kappaleessa tulostuksen loputtua. Kuvioista 19 ilmenee lämpökameralla

kuvatut kappaleen pinnan lämpötilaerot. Vasemmassa kuvassa tulostusalustaa vasten olevan pinnan ja juuri tulostetun yläpinnan lämpötilaero on noin 10 °C. Oikeassa kuvassa näkyy kappaleen epätasaisen jäähtymisen tulostuksen jälkeen.

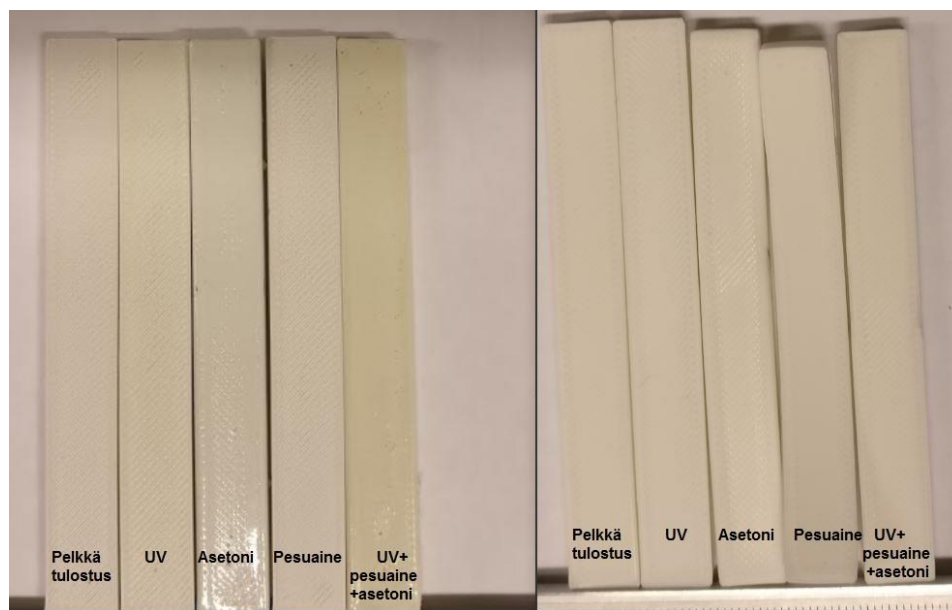


KUVIO 19. Lämpökuva tulostetuista koesauvoista

Asetonihöyrystyksen jälkeen kappaleiden tarkastelussa huomattiin, että HIPS-koesauvojen pinnanlaatu oli selvästi tasoittunut. Tasoittuminen oli oletettavaa, koska aseton liuottaa polystyreeniä. Pelkkä asetonihöyry ei aiheuttanut muita muutoksia kappaleissa, mutta asetonin, ultraviolettilon ja pesuainetestien yhteisvaikutuksella näytti olevan merkitystä. PLA-koesauvojen kohdalla asetonin todettiin aiheuttavan muutoksia kappaleen mittoihin, mikä voidaan todeta myös kaikki testit läpikäyneiden kappaleiden kohdalla. Siinä missä pesuaine aiheutti voimakasta muodonmuutosta käyrityksenä, asetonin, pesuaineen ja ultravioletisäteilyn yhteisvaikutuksesta kappaleen vääntyilyä ei havaittu vaan kappaleen näkyvin muutos ilmeni mittojen pienentymisenä. HIPS-koesauvojen kohdalla ei mittoihin tullut huomattavia muutoksia, mutta asetonille altistetut olivat hieman pienentyneet kauttaaltaan.

6.2 Värimuutokset

Ultravioletin aiheuttamia värimuutoksia on PLA-koesauvoista vaikeampi erottaa kuin HIPS-koesauvoista, joiden kohdalla ultravioletin valo on aiheuttanut selkeämpää kellastumista kappaleissa (KUVIO 20). PLA-koesauvojen pienempi väriero voisi selittyä sillä, että valmiina ostettuun tulostuslankaan on lisätty UV-stabilisaattoreita hillitsemään säteilyn vaikutusta. Pelkässä UV-testissä olleissa kappaleissa on havaittavissa lievää kellastumista, mutta kaikki testit läpikäyneiden HIPS-koesauvojen kellastuminen on huomattavaa. Kellastumista tapahtuu UV-valon aiheuttamasta polymeerin ketjujen pilkkoontumisesta, jonka seurauksena hapen läsnäollessa muodostuu vapaita radikaaleja. Vapaat radikaalit reagoivat edelleen aiheuttaen lisää hajoamista. (Haddad ym. 2013.) UV-altistuksen jälkeen kappaleet olivat asetonihöyryssä, jolloin asetonin sisältämä karbonyyli-ryhmä kiihdytti entisestään hajoamisreaktioita.



KUVIO 20. Rasitustestit läpikäyneitä HIPS- ja PLA-koesauvoja

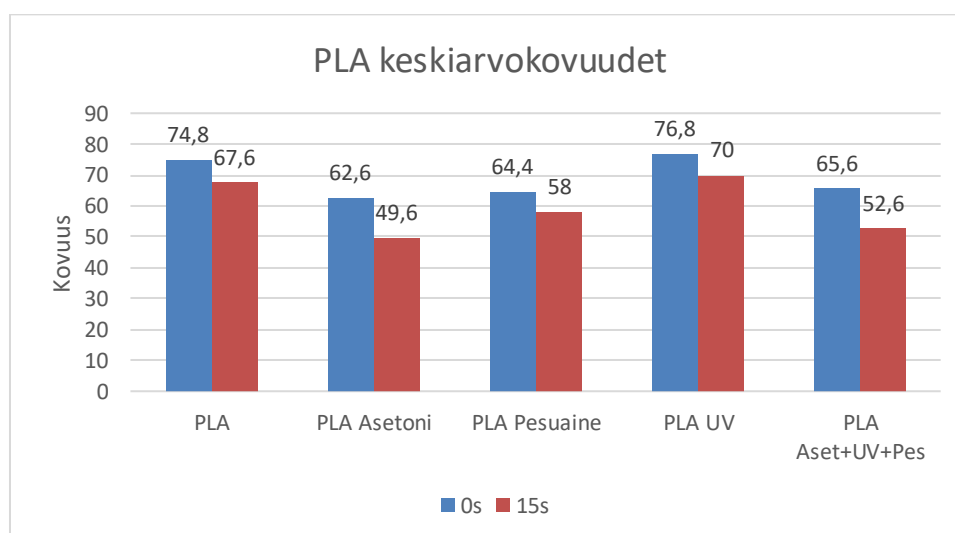
6.3 Kovuuskoe

Yhtenä keinona koekappaleissa tapahtuneiden muutosten todentamiseen käytettiin kovuuden määrittystä. Kovuuskokeiden avulla voidaan selvittää, onko koesauvoissa tapahtunut kovettumista tai pehmenemistä. PLA:n kovuuksien mittaustulokset on esitetty taulukoissa 3 ja 4 sekä HIPS:n taulukoissa 5 ja 6.

TAULUKKO 3. PLA Shore D -mittaustulokset

Koekappale	1		2		3		4		5	
	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15
PLA	74	68	74	67	75	68	76	67	75	68
PLA Asetoni	62	50	64	49	62	50	63	50	62	49
PLA UV	77	70	76	70	77	70	77	70	77	70
PLA Pesuaine	66	59	64	58	63	56	64	58	65	59
PLA Aset+Uv+Pes	65	53	65	52	67	53	65	52	66	53

TAULUKKO 4. PLA Shore D -keskiarvokovuudet

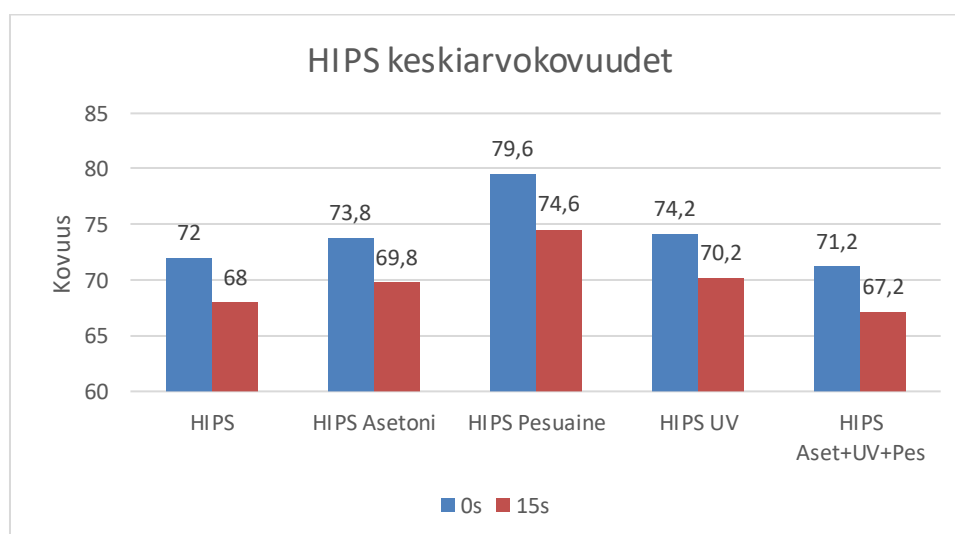


PLA-koesauvojen kohdalla nähdään UV-valon aiheuttaneen kovettumista kappaleen pinnalla. Asetonin annettiin haihtua kappaleista kolmen päivän ajan ennen mittaamista ja silti pehmeneminen niissä on ollut kaikkein suurinta. Pesuaineliuoksessa olleiden kappaleiden tulokset ovat saman suuntaisia kuin asetonille altistetuillakin. Kaikki testit läpikäyneiden koekappaleiden nähdään käyttäytyneen muiden tulosten mukaisesti. Koetuloksista voidaan tulkita UV-valon ensin kovettaneen kappaleita, jonka jälkeen asetoni- ja pesuaineliuos-altistukset ovat pehmentäneet niitä.

TAULUKKO 5. HIPS Shore D -mittaustulokset

Koekappale	1		2		3		4		5	
	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15
HIPS	72	68	72	68	72	68	72	68	72	68
HIPS Asetoni	75	70	72	68	74	70	73	69	75	72
HIPS UV	74	70	74	70	75	72	74	69	74	70
HIPS Pesuaine	80	74	80	75	79	74	80	75	79	75
HIPS Aset+Uv+Pes	71	68	72	67	71	67	71	67	71	67

TAULUKKO 6. HIPS Shore D -keskiarvokovuudet



HIPS-koesauvoissa on UV-valon altistuksessa käynyt samanlainen kovettumisilmiö kuin PLA-koesauvojenkin kohdalla. UV-valon vaikutus kovuuteen näiden kahden materiaalin kohdalla on ollut samaa suuruusluokkaa. Asetoni on vaikuttanut kappaleisiin myös kovettavasti. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että asetonin liuottavasta vaikutuksesta koeasauvojen pinnalla oleva tulostusjälki on sulautunut eli tullut tasaisemmaksi. Pesuaineliuoksessa olleiden kappaleiden kohdalla kovettuminen on ollut selkeintä. Kovettuminen on voinut tapahtua pesuaineliuoksen sisältämien suolojen, alkoholien ja lämmön yhteisvaikutuksesta. Kaikki testit läpikäyneiden koesauvojen kohdalla ei ole juuri eroa testaamattomiin koesauvoihin verrattuna.

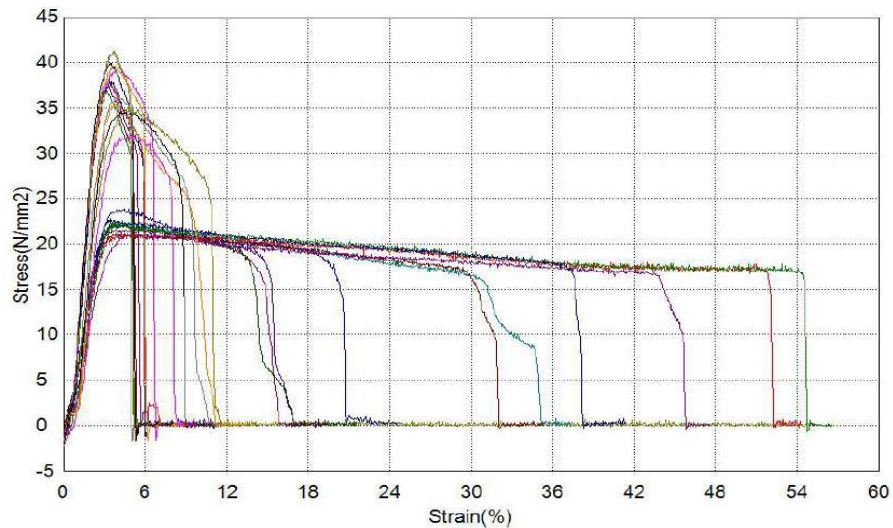
Mielestäni kovuuskokeiden tuloksia voi pitää kohtuullisen luotettavina, koska työn suorittamiseksi oli varattu viisi kappaletta jokaista testiä kohden. Keskiarvojen lisäksi laskettiin keskihajonnat ja variaatiokerroimet suoritetuille mittauksille. Korkein keskihajonta oli 1,33 ja variaatiokerroin 1,9 %, jotka kertovat mittaustulosten tasaisuudesta.

6.4 Vetokoe

Vetokoetta käytettiin apuna määrittämään kappaleissa tapahtuneita muutoksia. Vetokoetta varten jokaista rasiustestiä kohden oli viisi koesauvaa. Vetokoneena oli käytössä Shimadzu AG-IC. Koesauvoja vedettiin vakionopeudella 50 mm/min.

TAULUKKO 7. PLA:n vetokoetulokset

Materiaali	Maksimi-voima [N]	Veto-lujuus [MPa]	Myötö- raja [N]	Myötö- venymä [mm]	Myötö- venymä [%]	Kimmo- kerroin [MPa]
PLA	1501,25	37,53	1494,38	2,69	3,36	19
PLA_Aset.	905,63	22,64	-	3,70	4,63	10
PLA_Pesua.	1390,63	34,77	1386,25	3,51	4,39	18
PLA_UV	1608,13	40,20	1608,13	2,96	3,70	20
PLA_Aset+Pes+UV	869,38	21,73	-	3,38	4,23	10

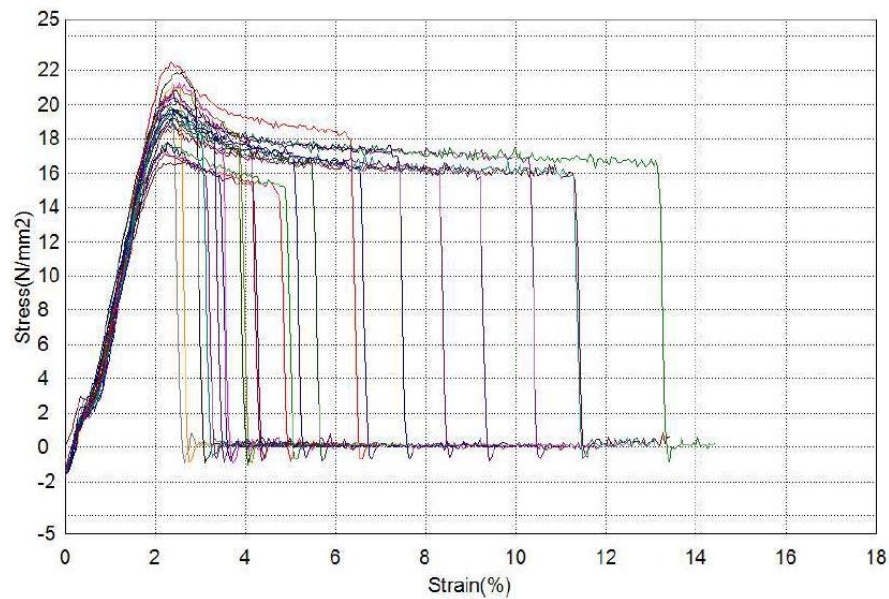


KUVIO 21. PLA:n jännitys-venymäkäyrät

PLA:n vetokoetuloksista (TAULUKKO 7) voidaan huomata, että UV-valolle altistetut kappaleet ovat kaikkein kovimpia ja hauraimpia. UV-valon vaikutus on ollut samansuuntainen kovuuskokeen tulosten kanssa. Pesuaineliuksen vaikutus on ollut hieman materiaalia pehmentävä ja sitkistävä. Asetoni on selvästi vaikuttanut PLA:n lujuusominaisuuksiin. PLA:n lujuus on laskenut ja siitä on tullut sitkeämpää. Kaikki testit läpikäyneiden koesauvojen kohdalla lujuus on laskenut edelleen asetonikäsitellyn saaneisiin verrattuna. Lisäksi UV-valon, asetonin ja pesuaineliuksen yhteisvaikutus on nostanut kappaleen sitkeyttä huomattavasti, mikä nähdään kuviossa 21 jopa 54 %:n venyvyytenä alkuperäiseen mittaan nähden. PLA:n jännitysvenymäkäyrät altistustesteittäin löytyvät liitteistä 6-10.

TAULUKKO 8. HIPS:n vetokoetulokset

Materiaali	Maksimi-voima [N]	Veto-lujuus [MPa]	Myötö- raja [N]	Myötö- venymä [mm]	Myötö- venymä [%]	Kimmo- kerroin [MPa]
HIPS	816,88	20,42	-	1,89	2,36	13
HIPS_Aset.	839,38	20,98	-	1,98	2,47	13
HIPS_Pesua.	772,50	19,31	-	1,92	2,40	12
HIPS_UV	801,25	20,03	-	1,93	2,42	14
HIPS_Aset+Pes+UV	694,38	17,36	-	1,86	2,33	12



KUVIO 22. HIPS:n jännitys-venymäkäyrät

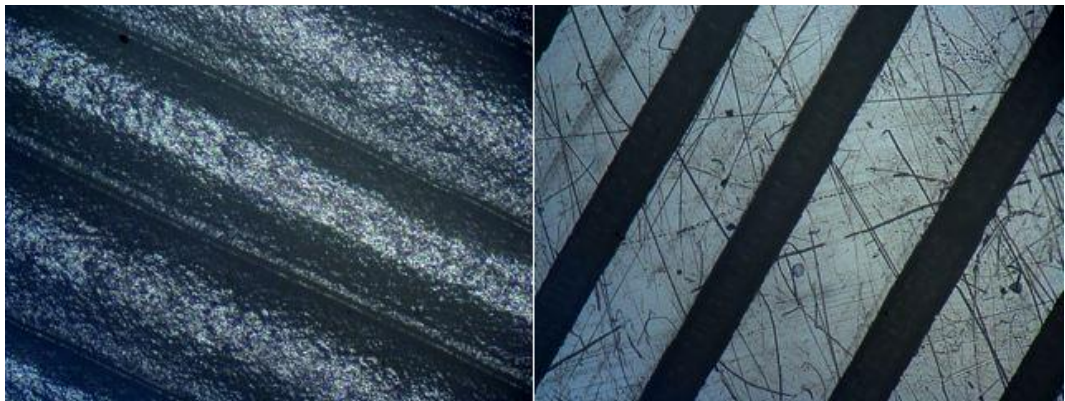
HIPS-koesauvojen vetokokeissa pelkästään tulostetun materiaalin vetolujuus on toiseksi suurin asetonikäsittelyn saaneiden jälkeen. Altistamattomat koesauvat venyvät eniten ennen murtumistaan. Asetoni on kovettanut ja haurastuttanut materiaalia ja ne murtuvat muita nopeammin myötörajan saavuttamisen jälkeen. UV-valo on hieman haurastuttanut materiaalia, mutta se on sitkeämpää kuin asetonihöyryssä ollut. Pesuaineliuoksessa ollut materiaali on menettänyt lujuuttaan, mutta sitkeys on laskenyt vähiten verrattuna muihin altistuksiin. Kaikki testit läpikäyneen materiaalin kohdalla lujuus on heikentynyt eniten. HIPS:n yksityiskohtaisemmat jännitysvenymäkäyrät altistustesteittäin löytyvät liitteistä 1-5.

Vetokokeissa ilmeni kohtuu suurta hajontaa materiaalin ja altistettujen kappaleiden sisällä. Esimerkiksi asetonikäsittelyssä olleiden HIPS-koesauvojen vetämiseen tarvittavan maksimivoiman keskihajonta oli 57,35 N ja variaatiokerroin 7 % (LIITE 11). Toisaalta taas pelkästään tulostettujen PLA-kappaleiden vetolujuuden keskihajonta oli 0,49 MPa ja

variaatiokerroin 1,3 % (LITE 12). Tuloksien sisäisistä vaihteluista huolimatta tietyssä altistuksessa olleet kappaleet noudattivat keskenään hyvin samanlaisia jännitys-venymäkäyriä. Vetokokeissa saatiin selville kuitenkin selviä altistumisten aiheuttamia eroja, mikä oli työn suorittamisen tarkoituksenakin.

6.5 Mikroskopia

Mikroskopiaa haluttiin käyttää pinnanlaatuojen eroavaisuuksien lähempään tarkasteluun sekä vetokokeessa murtuneiden kappaleiden murtopintojen tutkimiseen. Mikroskooppi oli yhdistetty tietokoneeseen, jossa tarkoitukseen sopivan ohjelman avulla siirrettiin mikroskoopin näkymä tietokoneen ruudulle.

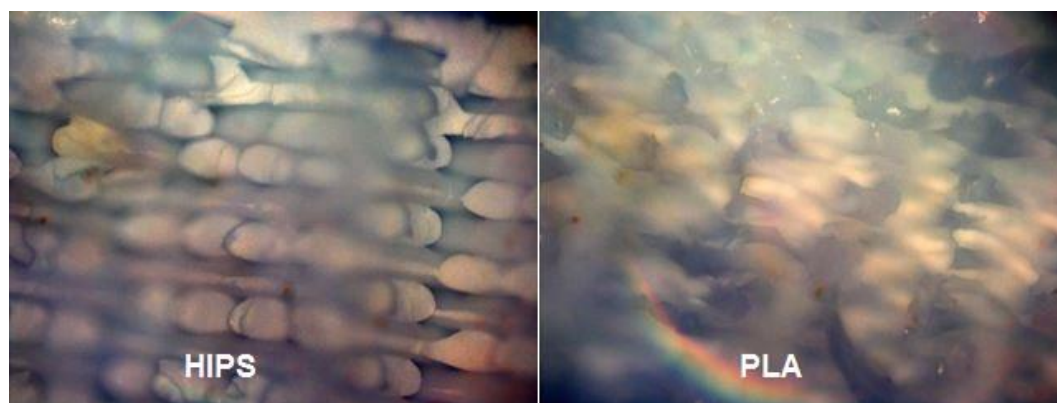


KUVIO 23. Yläpuolen hyvä pinnanlaatu ja huono pohjan pinnanlaatu

Koska tulostetuissa kappaleissa näkyi selvästi tulostamisen jälki ja tulostamisen aikana ilmeni muutamissa kappaleissa huonoa pinnanlaatua, päätettiin kappaleiden pinnalaatua tutkia hieman tarkemmin. Kuviossa 23 vasemmanpuoleinen kuva osoittaa tulostetun kappaleen hyvää pinnanlaatua. Hyvä pinnanlaatu FDM-menetelmässä tarkoittaa käytännössä yhteneviä, tasalevyisiä- ja korkuisia sekä poikkileikkaukseltaan puolipyöreää muistuttavia viivoja. Hyvän

pinnanlaadun kuvasta nähdään kuinka lanka on tulostunut siististi niin, että se on sulautunut viereiseen lankaan ilman ylimääräisiä rakoja.

Oikeanpuoleinen kuva osoittaa alapinnalla ilmennyttä huonoa pinnanlaatua, jossa tulostuslanka ei ole tulostunut viereiseen lankaan kiinni. Kuvassa mustat viivat ovat ilmarakoja lankojen välissä. Ilmarakojen synty kertoo siitä, että tulostamisen aikana lämpötila suuttimessa ja mahdollisesti myös alustassa ei ole ollut riittävän korkea. Kuvan vaaleita kohtia tarkastellessa voidaan kuitenkin huomata, että tulostusalustaa vasten pinnanlaatu on muuten tasaisempi kuin yläpinnalle tulostuva. Vaalealla pinnalla näkyvät mikronaarmut ovat peräisin tulostusalustasta.



KUVIO 24. Vetokoesauvojen murtopintoja

Koska kappale tulostui selkeästi periaatteella, jossa lanka tulostuu langan viereen, murtopinnan tutkiminen mikroskoopilla antaisi kuvan myös kappaleen rakenteesta. Kuviossa 24 on esitetty mikroskoopilla kuvatut murtopinnat HIPS ja PLA-koesauvoista. Kuvista näkyy selvästi kappaleen sisäinen rakenne, jossa nämä vierekkäin tulostetut langat ovat kerrostuneet. HIPS-koesauvan kohdalla murtopinnasta näkyy hyvin, kuinka jokainen lanka on mennyt siististi poikki materiaalin käyttäytyessä hauraanomaisesti. Kuvassa oikealla PLA-koesauvan murtopinnassa nähdään, kuinka lankojen päissä on tapahtunut venymistä ennen murtumista. Kuvista selviävät murtopintojen erot ovat linjassaan vetokokeista saatujen tulosten kanssa, sillä jo niissä huomattiin PLA:n käyttäytyvän hieman sitkeämmin kuin HIPS:n.

7 YHTEENVETO

Muovituotteiden perinteisten valmistusmenetelmien rinnalle on tullut uudenlainen mahdollisuus kappaleiden valmistamiseksi. 3D-tulostus on yksinkertaistettuna menetelmä, jossa materiaalia lisätään kerros kerrokselta valmiin tuotteen aikaansaamiseksi. 3D-tulostin mukailee tietokoneella piirrettyä mallia lisäten samalla materiaalia mallin ja määritysten mukaisesti. 3D-tulostamisen alle kuuluu useita erilaisia tekniikoita, joista jokaisella on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Tässä työssä käytettiin FDM-menetelmää, jossa lankamaiseen olomuotoon saatettua muovia puristetaan kuumen suutinpäähän lävitse. 3D-tulostaminen ei kilpaile vielä suurien määrien valmistuksessa perinteisiä menetelmiä vastaan, mutta sillä on selkeä etu halvempien valmistuskustannusten osalta yksittäiskappaleissa, piensarjoissa ja prototyyppien luomisessa.

Koska kehityksen mukana tulostimet halventuvat huomattavasti, lisääntyy tulostaminen teollisuudessa ja yksityisten ihmisten käytössä. Työn tarkoituksena oli tutkia 3D-tulostettujen kappaleiden ja materiaalien olosuhteiden kestoa. Materiaaleiksi valikoitui yksityisten ihmisten paljon käyttämä PLA ja tulostamiseen hyvin kelpaava HIPS. PLA oli hankittu valmiina lankarullana, mutta HIPS valmistettiin itse ekstruusiolla. Työssä pyrittiin selvittämään, onko piensarjojen ja kotikäyttöön tulostettavien kappaleiden kohdalla jotain sellaisia rajoittavia tekijöitä, jotka tulevat esiin vasta erilaisille olosuhteille altistamalla. Kappaleita altistettiin sellaisille arkipäiväisille rasituksille, kuten ultraviolettivalo ja kuuma vesi yhdistettynä pesuaineeseen. Lisäksi haluttiin tutkia, kuinka esimerkiksi polystyreeniä liuottava asetonin vaikuttaa kappaleisiin.

Rasitustestien aikana tuli ilmi mielenkiintoisia ilmiöitä, joiden syntyperään pyrittiin selvittämään. Varsinkin PLA:n kohdalla tapahtunut huomattava muodonmuutos pesuaineliuoksessa oli odottamatonta, mutta tulostimen lämpötiloja seuraamalla se oli selitettävissä. Tulostimen ilmoittamat lämpötilat eivät pitäneet paikkaansa ja lämpökuvauksella todettiin lämmitettävän tulostusalustan lisäävän lämpötilaeroja kappaleisiin. HIPS:n yllättävän suuri kellastuminen asetonissa verrattuna UV-altistuksen

läpikäyneisiin kappaleisiin oli mielenkiintoinen ja odottamaton asia, vaikka se selittyikin muovin hajoamiseen liittyvillä ilmiöillä. Koska PLA-lanka oli ostettu valmiina, ei tiedetä, mitä lisäaineita siihen on lisätty ja miten ne vaikuttivat kappaleen ominaisuuksiin. Toisaalta nämä tulokset palvelevat niitä, jotka ostavat lankaa valmiina, vaikka lankojen välillä on varmasti valmistajakohtaisia eroja.

Työssä saatiin selville muutamia sellaisia asioita, joita pitäisi ottaa huomioon jo tuotteiden suunnitteluvaiheessa, tulostamisessa ja käyttökohteessa. Kuten jo huomattiin, on kappaleiden jännitykset sellainen osa FDM-tulostamista, että ne täytyy ottaa huomioon. Altistukset aiheuttivat kappaleissa myös mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä, mikä on tavallista työssä käytetyille muoveille. Olennaista on ymmärtää työssä esiin tulleiden ilmiöiden perimmäiset syyt kappaleiden käyttäytymisessä, jotta menetelmää pystytään hyödyntämään parhaalla mahdollisella tavalla ja tuotteista tulisi käyttökohteeseen sopivia. Uskon, että tulevaisuudessa 3D-tulostaminen tulee lisääntymään huomattavasti laitekustannusten alenemisen myötä ja erilaisia tulostusmenetelmiä osataan jatkossa hyödyntää paremmin niiden vahvuuksien ja heikkouksien perusteella. Jatkotutkimuksena olisi mielekästä tutkia lämpökameraa hyväksi käyttäen eri mallisten kappaleiden lämpötilaa tulostuksen aikana, ja kuinka syntyneet jännitykset vaikuttavat kappaleiden käytettävyyteen.

LÄHTEET

PAINETUT LÄHTEET

Hausman, K. K & Horne, R. 2014. 3D Printing For Dummies. Hoboken: John Wiley & Sons Inc.

Kurri, V., Malén, T., Sandell, R. & Virtanen, M. 2008. Muovitekniikan perusteet. 4. tarkistettu painos. Helsinki: Edita Prima Oy.

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

Seppälä, J. 2008. Polymeeritekniikan perusteet. 6. painos. Helsinki: Otatieto.

ELEKTRONISET LÄHTEET

Atlas Electric Devices Company 2001. Weathering Testing Guidebook [viitattu 18.1.2017]. Saatavissa:

<http://www.strenometer.dk/Files/Downloads/Guidebook.pdf>

CustomPartNet 2008a. Fused Depositon Modelling (FDM) [viitattu 28.10.2016]. Saatavissa: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/fdm.png>

CustomPartNet 2008b. Jetted Photopolymer [viitattu 28.10.2016]. Saatavissa: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/jetted-photopolymer.png>

CustomPartNet 2008c. Laminated Object Manufacturing (LOM) [viitattu 28.10.2016]. Saatavissa: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/lom.png>

CustomPartNet 2008d. 3D Printing [viitattu 8.11.2016]. Saatavissa: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/3dp.png>

Diversey Europe Operations BV 2016. Sun Professional Tabletit. Pamark Oy [viitattu 18.1.2017]. Saatavissa:

<https://www.pamark.fi/downloads/dl/file/id/1622/7515207.pdf>

Haddad, R. & Yousif, E. 2013. Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review. SpringerOpen [viitattu 13.3.2017]. Saatavissa:

<http://springerplus.springeropen.com/articles/10.1186/2193-1801-2-398>

Kalsi, L. 2015. Hydrolyysireaktio. Otavan Opisto [viitattu 18.1.2017]. Saatavissa:

http://opinnot.internetix.fi/fi/muikku2materiaalit/lukio/ke/ke3/3_organisten_yhdisteiden_reaktiot/3.5_hydrolyysireaktio?C:D=1818889&m:selres=1818889

Maker3D Oy 2016a. Mass Portal Pharaoh ED [viitattu 8.11.2016].

Saatavissa: <http://www.3d-tulostus.fi/en/massportal-pharaoh-ed>

Maker3D Oy 2016b. Mass Portal Pharaoh ED [viitattu 8.11.2016].

Saatavissa: http://www.3d-tulostus.fi/WebRoot/vilkas04/Shops/20131018-11092-264846-1/55EA/8E48/5AD1/F984/D813/0A28/1010/336B/MPPharaohED_ml.png

Mass Portal SIA 2016. Pharaoh ED [viitattu 8.11.2016]. Saatavissa:

<http://massportal.com/en/products/pharaoh-ed>

Mäntyranta, K. 2016. Biopohjainen ja biohajoava PLA-muovi lisää suosiotaan. Mediaplanet [viitattu 9.11.2016]. Saatavissa:

<http://www.teknologiainfo.com/logistiikka/biopohjainen-ja-biohajoava-pla-muovi-lisaa-suosiotaan>

Nykänen, S. 2009. Polystyreeni. Tampereen teknillinen korkeakoulu [viitattu 9.11.2016]. Saatavissa:

http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PS_FI.pdf

Polymaker LLC 2017. Polymax [viitattu 2.1.2017]. Saatavissa:

<http://www.polymaker.com/shop/polymax/>

Proform AG 2016. Stereolithography [viitattu 29.10.2016]. Saatavissa:

<http://www.proform.ch/en/technologies/stereolithography.html>

Rogers, T. 2015 Everything You Need To Know About Polylactid Acid.

Creative Mechanisms [viitattu 9.11.2016]. Saatavissa:

<https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-polylactic-acid-pla-prototypes>

Tavani Oy 2016. Biohajoavat [viitattu 9.11.2016]. Saatavissa:

<http://www.tavani.fi/index.php/erikoismuovit/biohajoavat-pla>

Työterveyslaitos 2015. OVA-ohje: ASETONI. [viitattu 18.1.2017].

Saatavissa: <http://partner.ttl.fi/ova/asetoni.html>

Vegner Industrial Co.Ltd 2016. Single Screw Extruder [viitattu 9.11.2016].

Saatavissa: <http://www.screw->

[barrel.com/images/Extruder%20Screw%20and%20Barrel.jpg](http://www.screw-barrel.com/images/Extruder%20Screw%20and%20Barrel.jpg)

3Dprinter.nu 2016. Laser Powder Forming [viitattu 29.10.2016]. Saatavissa:

http://www.3dprinter.nu/fig/laser_engineered_net_shaping.gif

Wikipedia 2016a. Polylactic acid [viitattu 9.11.2016]. Saatavissa:

https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid#/media/File:Polylactid_skeletal.svg

Wikipedia 2016b. Selective laser sintering [viitattu 1.11.2016]. Saatavissa:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/33/Selective_laser_melting_system_schematic.jpg

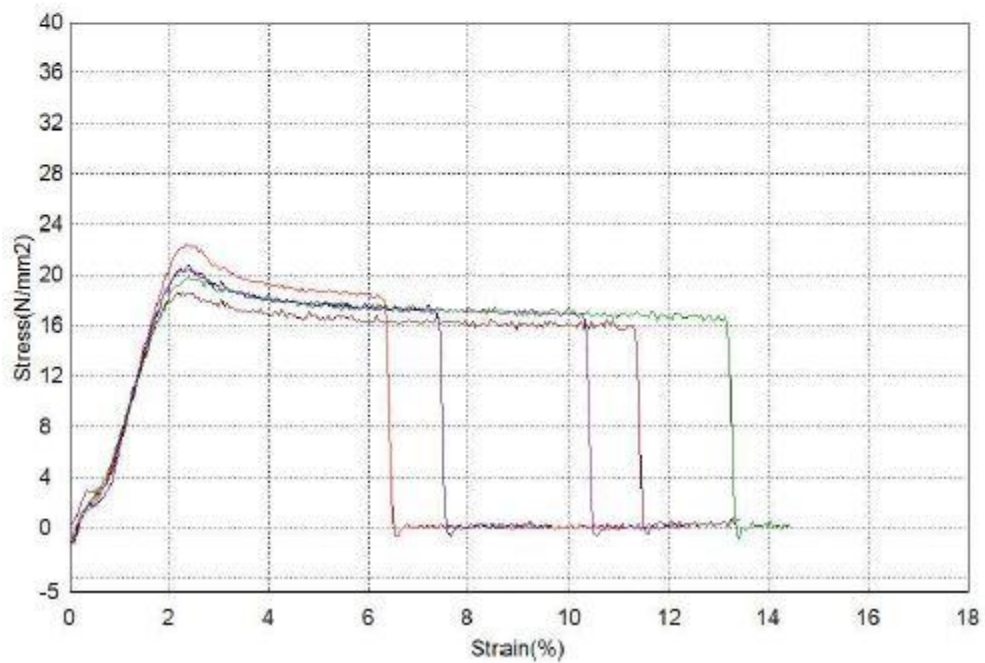
LIITTEET

LIITE 1. Vetokoe HIPS

Key Word		Product Name	
Test File Name	MUOVI_20170131_0844.xtai	Method File Name	MUOVI.xmai
Report Date	31.1.2017	Test Date	31.1.2017
Test Mode	Single	Test Type	Tensile
Speed	50mm/min	Shape	Plate
No of Batches:	10	Qty/Batch:	5

Name Parameters Unit	Max_Force Calc. at Entire Areas N	Max_Stress Calc. at Entire Areas N/mm ²	YP(Points)_Force 3 Points N	Max_Stroke Calc. at Entire Areas mm
7_1	900.000	22.5000	--	1.86500
7_2	743.750	18.5938	--	1.81600
7_3	818.750	20.4688	--	1.94000
7_4	790.625	19.7656	--	1.90700
7_5	831.250	20.7813	--	1.90700

Name Parameters Unit	Max_Strain Calc. at Entire Areas %
7_1	2.33125
7_2	2.27000
7_3	2.42500
7_4	2.38375
7_5	2.38375

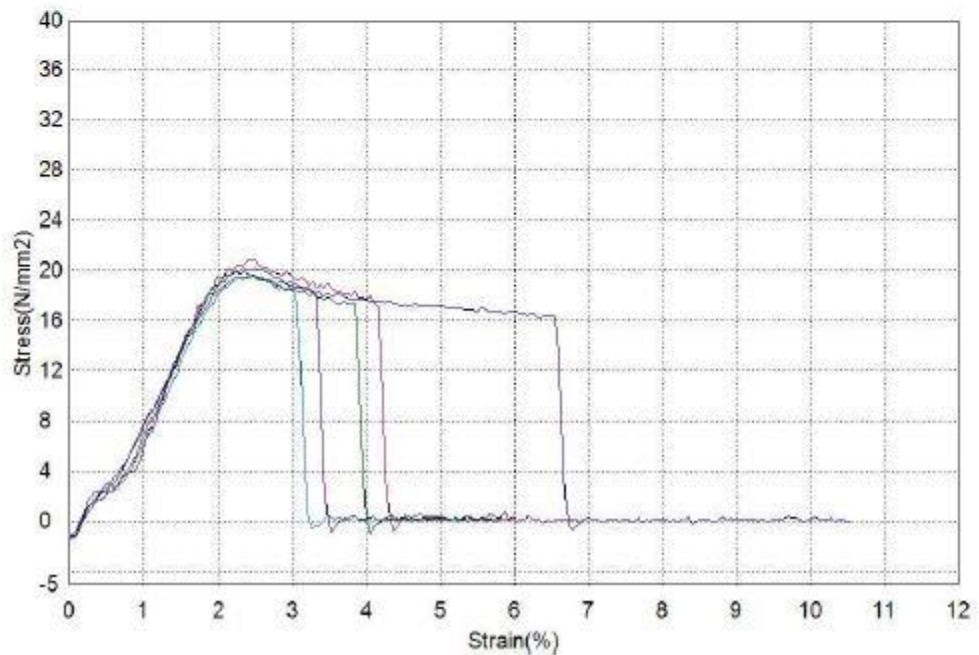


LIITE 2. Vetokoe HIPS UV

Key Word		Product Name	
Test File Name	MUOVI_20170131_0844.xtai	Method File Name	MUOVL.xmai
Report Date	31.1.2017	Test Date	31.1.2017
Test Mode	Single	Test Type	Tensile
Speed	50mm/min	Shape	Plate
No of Batches:	10	Qty/ Batch:	5

Name Parameters	Max_Force Calc. at Entire Areas Unit N	Max_Stress Calc. at Entire Areas Unit N/mm2	YP(Points)_Force 3 Points Unit N	Max_Stroke Calc. at Entire Areas Unit mm
6_1	784.375	19.6094	--	1.97600
6_2	831.250	20.7813	--	1.99000
6_3	806.250	20.1563	--	1.99000
6_4	796.875	19.9219	--	1.78200
6_5	787.500	19.6875	--	1.93500

Name Parameters	Max_Strain Calc. at Entire Areas Unit %
6_1	2.47000
6_2	2.48750
6_3	2.48750
6_4	2.22750
6_5	2.41875

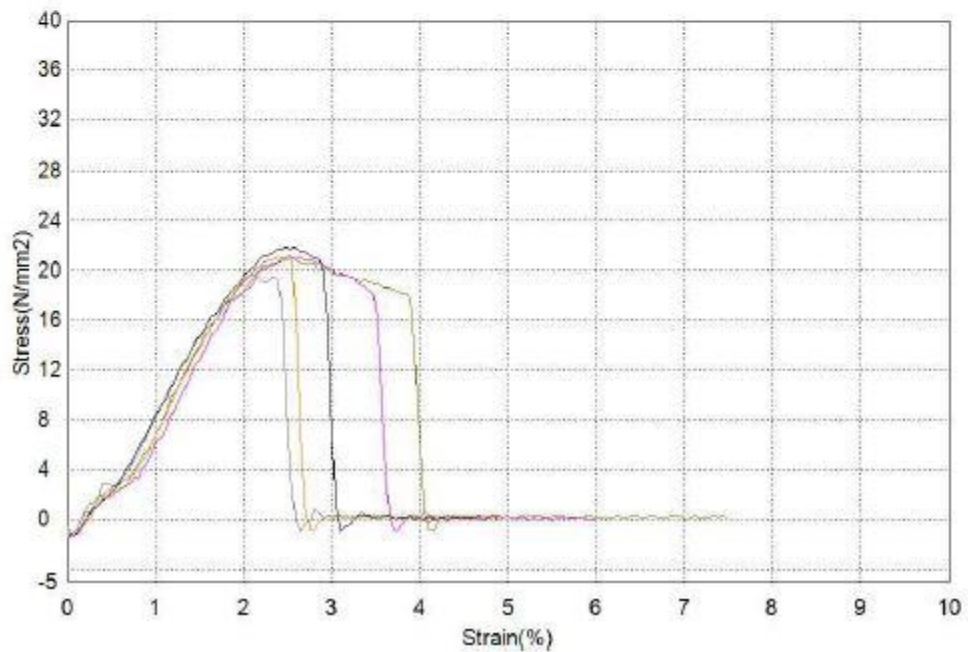


LIITE 3. Vetokoe HIPS asetoni

Key Word		Product Name	
Test File Name	MUOVI_20170131_0844.xtai	Method File Name	MUOVI.xmai
Report Date	31.1.2017	Test Date	31.1.2017
Test Mode	Single	Test Type	Tensile
Speed	50mm/min	Shape	Plate
No of Batches:	10	Qty/Batch:	5

Name Parameters Unit	Max_Force Calc. at Entire Areas N	Max_Stress Calc. at Entire Areas N/mm2	YP(Points)_Force 3 Points N	Max_Stroke Calc. at Entire Areas mm
8_1	843.750	21.0938	--	2.03100
8_2	850.000	21.2500	--	2.01900
8_3	781.250	19.5313	--	1.86500
8_4	846.875	21.1719	--	1.90600
8_5	875.000	21.8750	--	2.06100

Name Parameters Unit	Max_Strain Calc. at Entire Areas %
8_1	2.53875
8_2	2.52375
8_3	2.33125
8_4	2.38250
8_5	2.57625

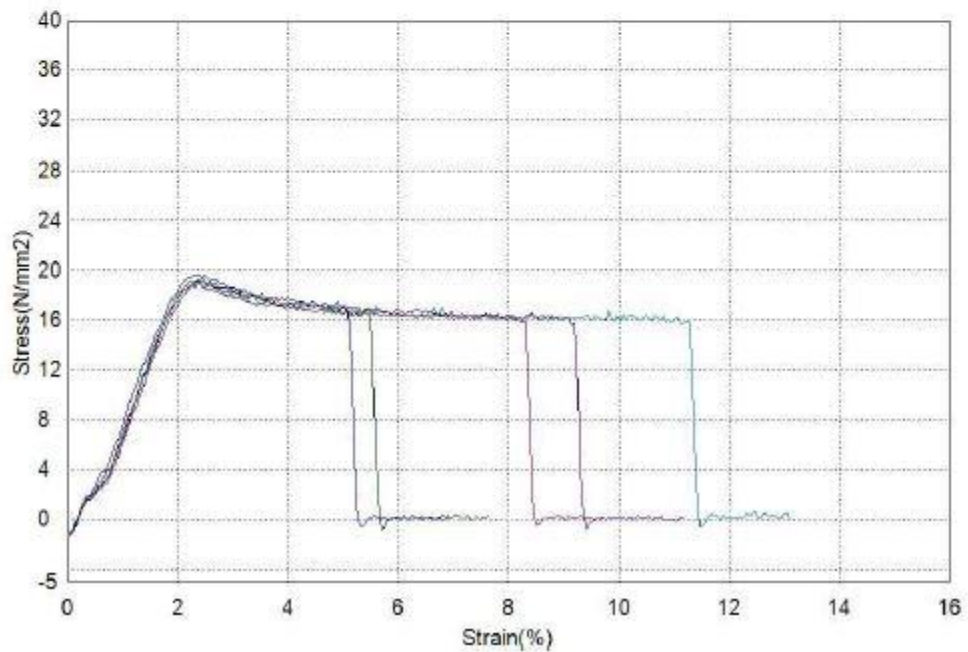


LIITE 4. Vetokoe HIPS pesuaine

Key Word		Product Name	
Test File Name	MUOVI_20170131_0844.xtai	Method File Name	MUOVI.xmai
Report Date	31.1.2017	Test Date	31.1.2017
Test Mode	Single	Test Type	Tensile
Speed	50mm/min	Shape	Plate
No of Batches:	10	Qty/Batch:	5

Name Parameters Unit	Max_Force Calc. at Entire Areas N	Max_Stress Calc. at Entire Areas N/mm2	YP(Points)_Force 3 Points N	Max_Stroke Calc. at Entire Areas mm
9_1	771.875	19.2969	--	1.89800
9_2	759.375	18.9844	--	1.81500
9_3	765.625	19.1406	--	1.94800
9_4	778.125	19.4531	--	1.93600
9_5	787.500	19.6875	--	1.99000

Name Parameters Unit	Max_Strain Calc. at Entire Areas %
9_1	2.37250
9_2	2.26875
9_3	2.43500
9_4	2.42000
9_5	2.48750

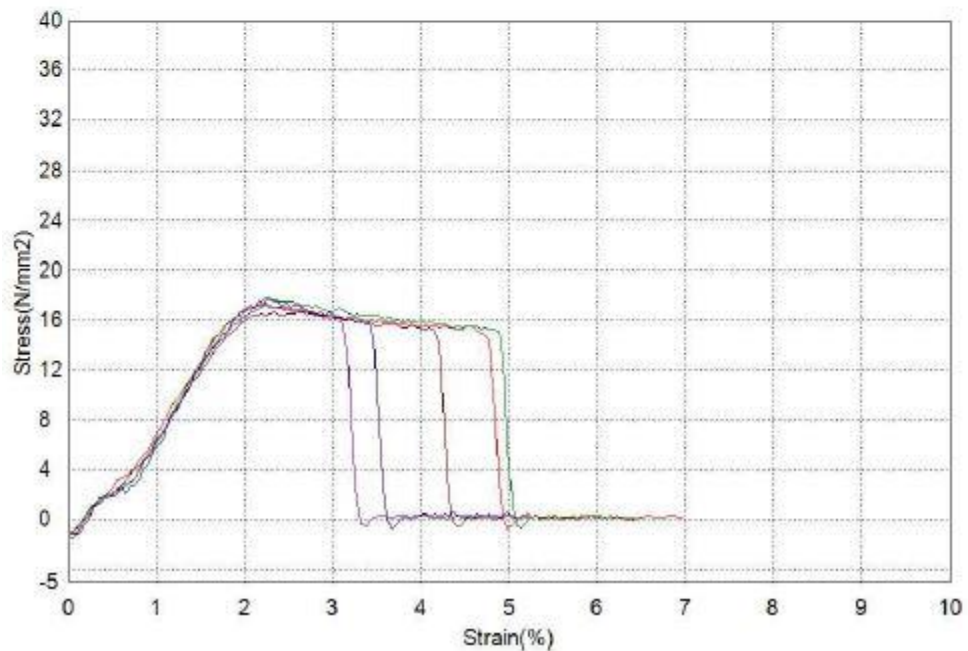


LIITE 5. Vetokoe HIPS asetoni+UV+pesuaine

Key Word		Product Name	
Test File Name	MUOVL_20170131_0844.xtai	Method File Name	MUOVL.xmai
Report Date	31.1.2017	Test Date	31.1.2017
Test Mode	Single	Test Type	Tensile
Speed	50mm/min	Shape	Plate
No of Batches:	10	Qty/Batch:	5

Name Parameters	Max_Force Calc. at Entire Areas	Max_Stress Calc. at Entire Areas	YP(Points)_Force 3 Points	Max_Stroke Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	N	mm
10_1	696.875	17.4219	--	1.78200
10_2	668.750	16.7188	--	2.15700
10_3	684.375	17.1094	--	1.78200
10_4	709.375	17.7344	--	1.78200
10_5	712.500	17.8125	--	1.81100

Name Parameters	Max_Strain Calc. at Entire Areas
Unit	%
10_1	2.22750
10_2	2.69625
10_3	2.22750
10_4	2.22750
10_5	2.26375

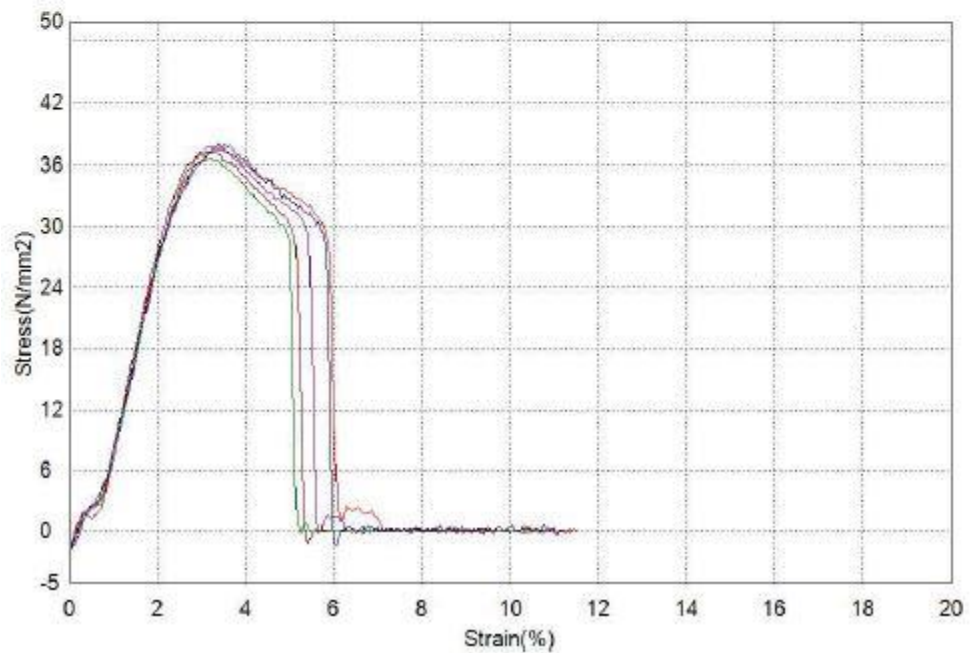


LIITE 6. Vetokoe PLA

Key Word		Product Name	
Test File Name	MUOVI_20170131_0844.xtai	Method File Name	MUOVL.xmai
Report Date	31.1.2017	Test Date	31.1.2017
Test Mode	Single	Test Type	Tensile
Speed	50mm/min	Shape	Plate
No of Batches:	10	Qty/Batch:	5

Name Parameters Unit	Max_Force Calc. at Entire Areas N	Max_Stress Calc. at Entire Areas N/mm2	YP(Points)_Force 3 Points N	Max_Stroke Calc. at Entire Areas mm
1_1	1521.88	38.0469	1503.13	2.69800
1_2	1496.88	37.4219	1496.88	2.61500
1_3	1500.00	37.5000	1500.00	2.72700
1_4	1471.88	36.7969	1459.38	2.57300
1_5	1515.63	37.8906	1512.50	2.81500

Name Parameters Unit	Max_Strain Calc. at Entire Areas %
1_1	3.37250
1_2	3.26875
1_3	3.40875
1_4	3.21625
1_5	3.51875

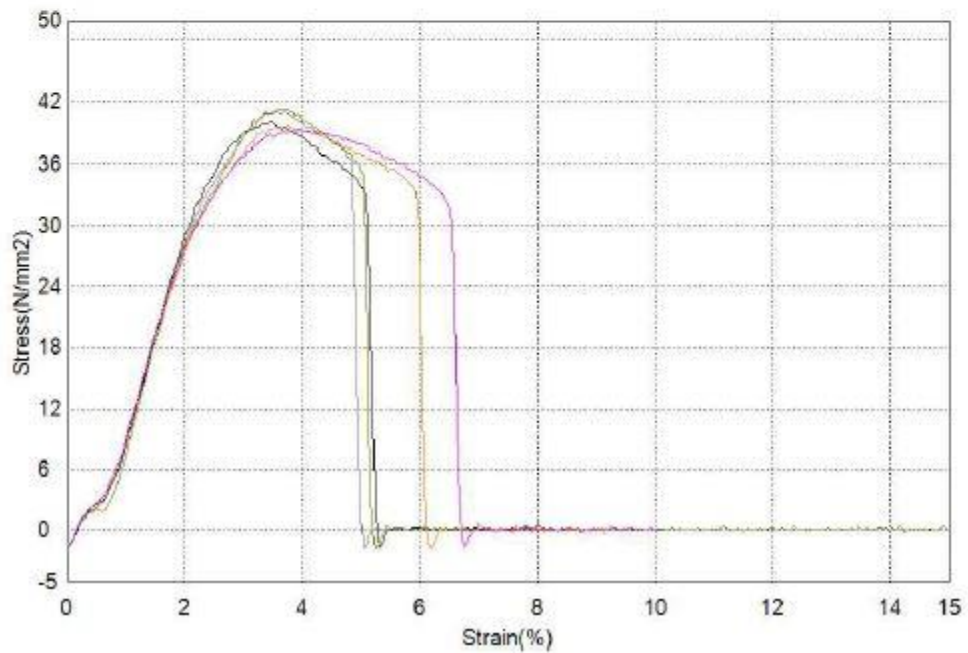


LIITE 7. Vetokoe PLA UV

Key Word		Product Name	
Test File Name	MUOVI_20170131_0844.xtai	Method File Name	MUOVI.xmai
Report Date	31.1.2017	Test Date	31.1.2017
Test Mode	Single	Test Type	Tensile
Speed	50mm/min	Shape	Plate
No of Batches:	10	Qty/Batch:	5

Name Parameters Unit	Max_Force Calc. at Entire Areas N	Max_Stress Calc. at Entire Areas N/mm2	YP(Points)_Force 3 Points N	Max_Stroke Calc. at Entire Areas mm
2_1	1650.00	41.2500	1650.00	2.93500
2_2	1568.75	39.2188	1568.75	3.15700
2_3	1640.63	41.0156	1640.63	2.94800
2_4	1584.38	39.6094	1584.38	2.99000
2_5	1596.88	39.9219	1596.88	2.78200

Name Parameters Unit	Max_Strain Calc. at Entire Areas %
2_1	3.66875
2_2	3.94625
2_3	3.68500
2_4	3.73750
2_5	3.47750

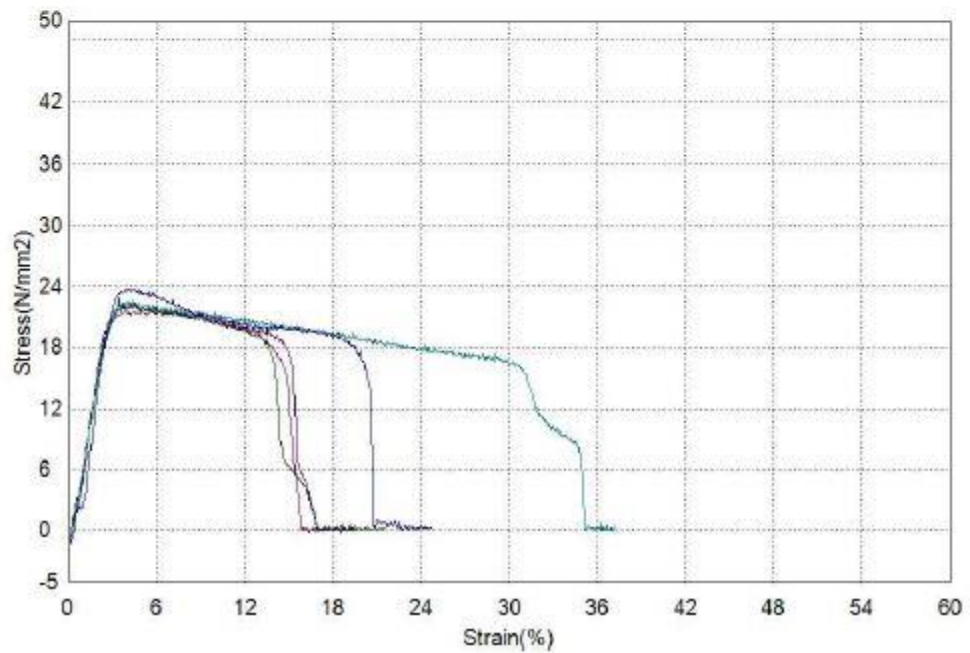


LIITE 8. Vetokoe PLA asetoni

Key Word		Product Name	
Test File Name	MUOVI_20170131_0844.xtai	Method File Name	MUOVL.xmai
Report Date	31.1.2017	Test Date	31.1.2017
Test Mode	Single	Test Type	Tensile
Speed	50mm/min	Shape	Plate
No of Batches:	10	Qty/Batch:	5

Name Parameters	Max_Force Calc. at Entire Areas	Max_Stress Calc. at Entire Areas	YP(Points)_Force 3 Points	Max_Stroke Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	N	mm
3_1	906.250	22.6563	--	3.44800
3_2	862.500	21.5625	--	4.90600
3_3	893.750	22.3438	--	3.61500
3_4	912.500	22.8125	--	2.73200
3_5	953.125	23.8281	--	3.82300

Name Parameters	Max_Strain Calc. at Entire Areas
Unit	%
3_1	4.31000
3_2	6.13250
3_3	4.51875
3_4	3.41500
3_5	4.77875

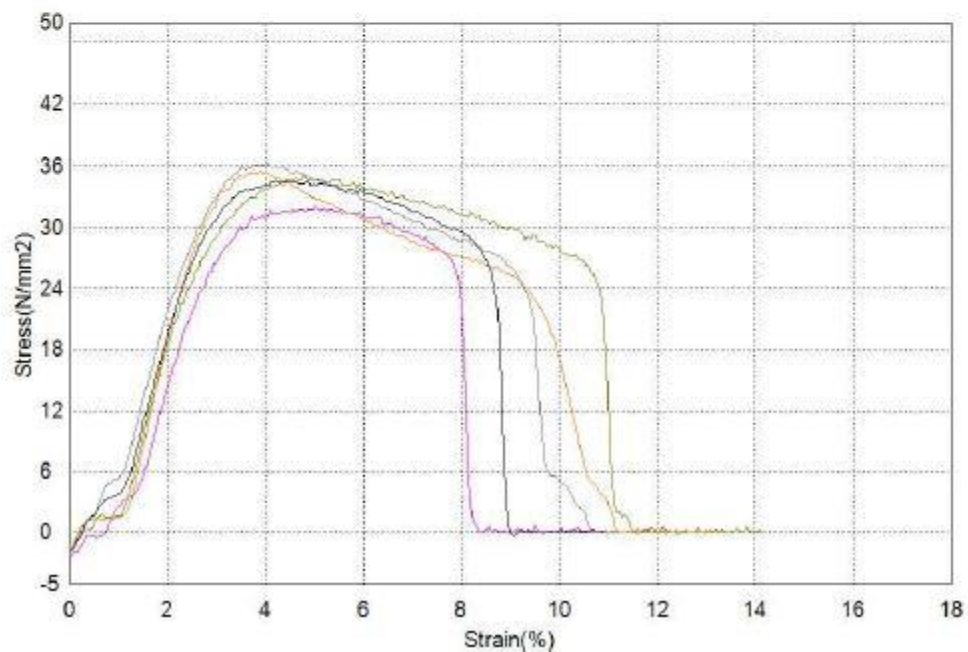


LIITE 9. Vetokoe PLA pesuaine

Key Word		Product Name	
Test File Name	MUOVL20170131_0844.xtai	Method File Name	MUOVL.xmai
Report Date	31.1.2017	Test Date	31.1.2017
Test Mode	Single	Test Type	Tensile
Speed	50mm/min	Shape	Plate
No of Batches:	10	Qty/Batch:	5

Name Parameters Unit	Max.Force Calc. at Entire Areas N	Max.Stress Calc. at Entire Areas N/mm2	YP(Points).Force 3 Points N	Max.Stroke Calc. at Entire Areas mm
5_1	1412.50	35.3125	1412.50	3.81400
5_2	1281.25	32.0313	1268.75	4.02300
5_3	1450.00	36.2500	1443.75	3.24000
5_4	1425.00	35.6250	1425.00	3.11500
5_5	1384.38	34.6094	1381.25	3.36500

Name Parameters Unit	Max.Strain Calc. at Entire Areas %
5_1	4.76750
5_2	5.02875
5_3	4.05000
5_4	3.89375
5_5	4.20625

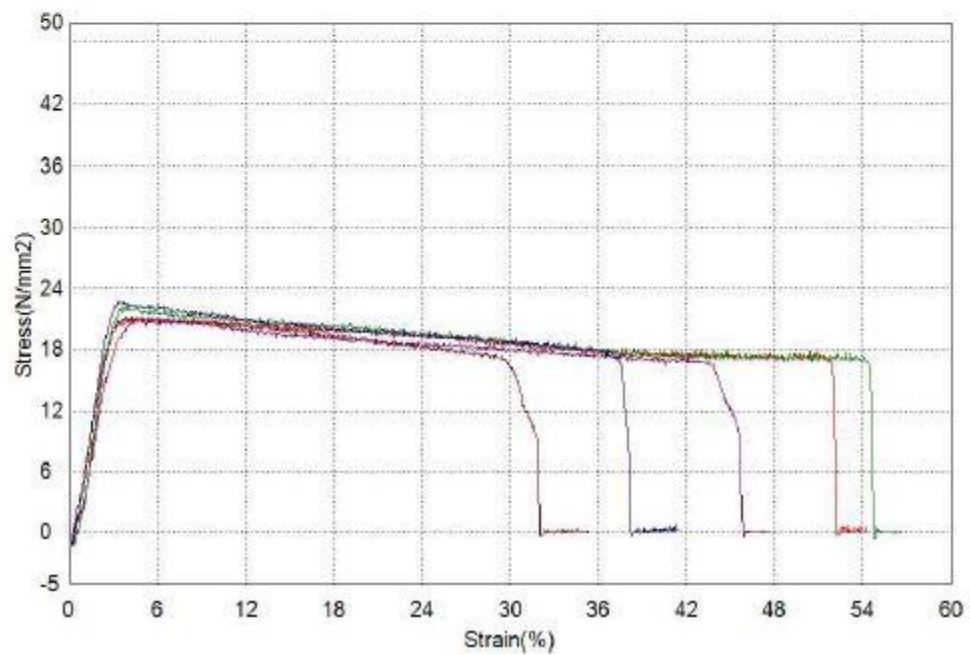


LIITE 10. Vetokoe PLA asetoni+UV+pesuaine

Key Word		Product Name	
Test File Name	MUOVI_20170131_0844.xtai	Method File Name	MUOVI.xmai
Report Date	31.1.2017	Test Date	31.1.2017
Test Mode	Single	Test Type	Tensile
Speed	50mm/min	Shape	Plate
No of Batches:	10	Qty/Batch:	5

Name Parameters Unit	Max_Force Calc. at Entire Areas N	Max_Stress Calc. at Entire Areas N/mm2	YP(Points)_Force 3 Points N	Max_Stroke Calc. at Entire Areas mm
4_1	846.875	21.1719	--	3.73100
4_2	850.000	21.2500	--	3.10200
4_3	846.875	21.1719	--	3.99000
4_4	896.875	22.4219	--	3.18600
4_5	906.250	22.6563	--	2.89400

Name Parameters Unit	Max_Strain Calc. at Entire Areas %
4_1	4.66375
4_2	3.87750
4_3	4.98750
4_4	3.98250
4_5	3.61750



LIITE 11. Vetokokeen tulokset HIPS

HIPS						
	Name	Max_Force	Max_Stress	YP(Point s)_Force	Max_Stroke	Max_Strain
		Calc. at Entire	Calc. at Entire		Calc. at Entire	Calc. at Entire
	Parameters	Areas	Areas	3 Points	Areas	Areas
	Unit	N	N/mm2	N	mm	%
UV	6_1	784,375	19,6094	--	1,976	2,47
	6_2	831,25	20,7813	--	1,99	2,4875
	6_3	806,25	20,1563	--	1,99	2,4875
	6_4	796,88	19,9219	--	1,782	2,2275
	6_5	787,50	19,6875	--	1,935	2,41875
KA		801,25	20,03	--	1,93	2,42
KH		18,83	0,47	--	0,09	0,11
Variaatiokerroin		2,3 %	2,3 %	--	4,6 %	4,6 %
MAKS		831,25	20,78	--	1,99	2,49
MIN		784,38	19,61	--	1,78	2,23
Pelkkä tulostus	7_1	900	22,5	--	1,865	2,33125
	7_2	743,75	18,5938	--	1,816	2,27
	7_3	818,75	20,4688	--	1,94	2,425
	7_4	790,625	19,7656	--	1,907	2,38375
	7_5	831,25	20,7813	--	1,907	2,38375
KA		816,88	20,42	--	1,89	2,36
KH		57,35	1,43	--	0,05	0,06
Variaatiokerroin		7,0 %	7,0 %	--	2,5 %	2,5 %
MAKS		900,00	22,50	--	1,94	2,43
MIN		743,75	18,59	--	1,82	2,27
Asetoni	8_1	843,75	21,0938	--	2,031	2,53875
	8_2	850	21,25	--	2,019	2,52375
	8_3	781,25	19,5313	--	1,865	2,33125
	8_4	846,875	21,1719	--	1,906	2,3825
	8_5	875	21,875	--	2,061	2,57625
KA		839,38	20,98	--	1,98	2,4705
KH		34,77	0,87	--	0,09	0,1070178
Variaatiokerroin		4,1 %	4,1 %	--	4,3 %	4,3 %
MAKS		875,00	21,88	--	2,06	2,57625
MIN		781,25	19,53	--	1,87	2,33125
Pesuvaine	9_1	771,875	19,2969	--	1,898	2,3725
	9_2	759,375	18,9844	--	1,815	2,26875
	9_3	765,625	19,1406	--	1,948	2,435
	9_4	778,125	19,4531	--	1,936	2,42
	9_5	787,5	19,6875	--	1,99	2,4875
KA		772,50	19,31	--	1,92	2,40
KH		10,92	0,27	--	0,07	0,08
Variaatiokerroin		1,4 %	1,4 %	--	3,4 %	3,4 %
MAKS		787,50	19,69	--	1,99	2,49
MIN		759,38	18,98	--	1,82	2,27
Aset+Pes+UV	10_1	696,875	17,4219	--	1,782	2,2275
	10_2	668,75	16,7188	--	2,157	2,69625
	10_3	684,375	17,1094	--	1,782	2,2275
	10_4	709,375	17,7344	--	1,782	2,2275
	10_5	712,5	17,8125	--	1,811	2,26375
KA		694,38	17,36	--	1,86	2,33
KH		18,14	0,45	--	0,16	0,21
Variaatiokerroin		2,6 %	2,6 %	--	8,9 %	8,9 %
MAKS		712,50	17,81	--	2,16	2,70
MIN		668,75	16,72	--	1,78	2,23

LIITE 12. Vetokokeen tulokset PLA

PLA						
	Name	Max_Force	Max_Stress	YP(Points)_Forc	Max_Stroke	Max_Strain
		Calc. at Entire	Calc. at Entire		Calc. at Entire	Calc. at Entire
	Parameters	Areas	Areas	3 Points	Areas	Areas
	Unit	N	N/mm2	N	mm	%
Pelkkä tulostus	1_1	1521,88	38,0469	1503,13	2,698	3,3725
	1_2	1496,88	37,4219	1496,88	2,615	3,26875
	1_3	1500	37,5	1500	2,727	3,40875
	1_4	1471,88	36,7969	1459,38	2,573	3,21625
	1_5	1515,63	37,8906	1512,5	2,815	3,51875
KA		1501,25	37,53	1494,38	2,69	3,36
KH		19,47	0,49	20,42	0,10	0,12
Variaatiokerroin		1,3 %	1,3 %	1,4 %	3,5 %	3,5 %
MAKS		1521,88	38,0469	1512,5	2,815	3,51875
MIN		1471,88	36,7969	1459,38	2,573	3,21625
UV	2_1	1650	41,25	1650	2,935	3,66875
	2_2	1568,75	39,2188	1568,75	3,157	3,94625
	2_3	1640,63	41,0156	1640,63	2,948	3,685
	2_4	1584,38	39,6094	1584,38	2,99	3,7375
	2_5	1596,88	39,9219	1596,88	2,782	3,4775
KA		1608,13	40,20	1608,13	2,96	3,70
KH		35,53	0,89	35,53	0,13	0,17
Variaatiokerroin		2,2 %	2,2 %	2,2 %	4,5 %	4,5 %
MAKS		1650	41,25	1650	3,157	3,94625
MIN		1568,75	39,2188	1568,75	2,782	3,4775
Asetoni	3_1	906,25	22,6563	--	3,448	4,31
	3_2	862,5	21,5625	--	4,906	6,1325
	3_3	893,75	22,3438	--	3,615	4,51875
	3_4	912,5	22,8125	--	2,732	3,415
	3_5	953,125	23,8281	--	3,823	4,77875
KA		905,63	22,64	--	3,70	4,63
KH		32,81	0,82	--	0,79	0,98
Variaatiokerroin		3,6 %	3,6 %	--	21,2 %	21,2 %
MAKS		953,125	23,8281	--	4,906	6,1325
MIN		862,5	21,5625	--	2,732	3,415
Ase+Pes+UV	4_1	846,875	21,1719	--	3,731	4,66375
	4_2	850	21,25	--	3,102	3,8775
	4_3	846,875	21,1719	--	3,99	4,9875
	4_4	896,875	22,4219	--	3,186	3,9825
	4_5	906,25	22,6563	--	2,894	3,6175
KA		869,38	21,73	--	3,38	4,23
KH		29,60	0,74	--	0,46	0,58
Variaatiokerroin		3,4 %	3,4 %	--	13,6 %	13,6 %
MAKS		906,25	22,6563	--	3,99	4,9875
MIN		846,875	21,1719	--	2,894	3,6175
Pesuaine	5_1	1412,5	35,3125	1412,5	3,814	4,7675
	5_2	1281,25	32,0313	1268,75	4,023	5,02875
	5_3	1450	36,25	1443,75	3,24	4,05
	5_4	1425	35,625	1425	3,115	3,89375
	5_5	1384,38	34,6094	1381,25	3,365	4,20625
KA		1390,63	34,77	1386,25	3,51	4,39
KH		65,55	1,64	69,51	0,39	0,49
Variaatiokerroin		4,7 %	4,7 %	5,0 %	11,1 %	11,1 %
MAKS		1450	36,25	1443,75	4,023	5,02875
MIN		1281,25	32,0313	1268,75	3,115	3,89375