



LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Lahti University of Applied Sciences

Kuitulujitetun 3D-tulostinmateriaalin kehittäminen

LAHDEN
AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Muovitekniikka
Opinnäytetyö
Kevät 2015
Joonas Heinonen

Lahden ammattikorkeakoulu
Muovitekniikan koulutusohjelma

HEINONEN, JOONAS:

Kuitulujuitetun 3D-tulostinmateriaalin
kehittäminen

Muovitekniikan opinnäytetyö, 29 sivua, 3 liitesivua

Kevät 2015

TIIVISTELMÄ

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin 3D-tulostamiseen käytettävän komposiittimateriaalin valmistusta ekstruuderin avulla ja sen toimimista 3D-tulostusmateriaalina. Työ suoritettiin Lahden ammattikorkeakoulun Tekniikan laitokselle.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa käydään läpi 3D-tulostuksen historiaa, sekä eri 3D-tulostustekniikoita. Materiaaliosuudessa kerrotaan käytettävät materiaalit (Polyesteri ja PS) ja niiden ominaisuuksista, sekä käydään läpi käytettyjen laitteiden toimintaperiaate.

Kokeellisessa osuudessa kerrotaan työn raaka-aineseoksen valmistamisesta, tulostuslangan ekstruuderoinnista ja tulostimen konfiguroimisesta ja itse 3D-tulostamisesta valmistetuilla 3D-langoilla.

Tulos osuudessa vertaillaan tulostettujen kappaleiden eli puhtaan polystyreenikappaleen, sekä komposiittikappaleen mekaanisia ominaisuuksia. Mekaanisissa testeissä selvisi, että komposiittikappaleet ovat heikompia kuin puhtaasta polystyreenistä tehdyt kappaleet.

Asiasanat: 3D-tulostaminen, ekstruuderit, komposiittimateriaali

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in plastics engineering

HEINONEN, JOONAS:

Developing a fibre-reinforced 3D
printing material

Bachelor's Thesis in plastics engineering, 29 pages, 3 pages of appendices

Spring 2015

ABSTRACT

The purpose of this Bachelor's thesis was to examine the making of composite 3D printing material using an extruder and to study how it would work in a 3D printer as printing material.

The theoretical part deals with the history of 3D printers, different 3D printing methods, materials used (polystyrene and polyester), the properties of the materials, testing devices and tools and their working methods.

The practical part describes how granulate polystyrene and polyester textile are made into composite wire that can be used in a 3D printer and how that wire works in a printer.

The results part compares the mechanical properties of objects made of pure polystyrene and objects made of composite material. The mechanical properties of composite materials were little bit weaker than pure materials properties.

Key words: 3D printing, extrusion, composite material

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	3D-TULOSTUS	2
2.1	Tulostimen toimintaperiaate	2
2.1.1	Fused deposition modeling	2
2.1.2	Polyjet	3
2.1.3	Laser engineered net shaping	4
2.1.4	Laminated object manufacturing	4
2.1.5	Stereolithography	5
2.1.6	Laser sintering	6
2.1.7	Three Dimensional Printing	6
2.2	Käytettävä tulostin	7
3	MATERIAALIT JA VÄLINEET	9
3.1	Polystyreeni	9
3.2	Polyesterikuidut	10
3.3	Rouhija	11
3.4	Ekstruuderit	12
3.5	DSC	13
3.6	Iskukoe (Izod)	14
3.7	Vetokoe	14
3.8	Mikroskopia	16
4	KUITULUJITETTU MUOVI	17
4.1	Lujitekuidut	17
4.2	Matriisi	18
5	3D-TULOSTUSLANGAN VALMISTUS	19
5.1	Ensimmäinen rouhinta	19
5.2	Ekstruuderit	20
5.3	Toinen rouhinta	21
5.4	Valmistus komposiittirouheesta	21
6	KOESAUVAT	22
6.1	3D-piirrustukset	22
6.2	Valmistus	23
7	TULOKSET	26

7.1	Iskukoe	26
7.2	Vetokoe	26
7.3	Mikroskopia	27
8	YHTEENVETO	29
	LÄHTEET	30
	LIITEET	34

1 JOHDANTO

3D-tulostus on noussut suosioon valmistettaessa tarkkoja tuotteita nopeasti. Suosion nousuun on myös vaikuttanut tulostimien hinnan romahdusmainen putoaminen jo niin alas, että melkein kuka tahansa voi ostaa tulostimen kotiinsa ja tulostaa haluamansa tuotteen. 3D-tulostus on mennyt jo niin pitkälle, että sillä pystyy valmistamaan jopa kokonaisia taloja tai autoja.

Kuitulujitettu muovi on muovia, johon on sekoitettu kuitua, kuten tekstiilikuitua tai lasikuitua, tietty prosenttiosuus. Kuitulujitetun muovin etuja ovat vahvuus, korroosionkestävyys ja joustavuus. Vahvuus-verrattuna-painoon suhde nousee radikaalisti verrattuna kuitulujittamattomaan materiaaliin.

Käytännön työnä tässä opinnäytetyössä on mahdollistaa kuitulujitetun muovin tulostaminen Lahden ammattikorkeakoulun Tekniikan alan 3D-tulostimen avulla sekä suunnitella ja valmistaa kuitulujitetusta materiaalista 255mm x 205mm x 235mm dimensioihin sopiva kappale.

Teoriaosuudessa mietitään, miten tämä kaikki pystytään suorittamaan saaduilla resursseilla. Teoriaosuus käy myös läpi käytettävän laitteiston ja materiaalit.

2 3D-TULOSTUS

3D-tulostus tai kolmiulotteinen tulostus on 1980-luvulla kehitetty tekniikka, jolla pystytään tulostamaan teknisesti tarkkoja piirrustuksia fyysisiksi kappaleiksi. (3dprintingindustry 2015). Tulostin suihkuttaa tulostuspäästään ohuita kerroksia sulanutta tulostusmateriaalia, joka kovettuu tulostusalustalle. Materiaalina voidaan käyttää metallia, muovia, keraamia tai lasia.

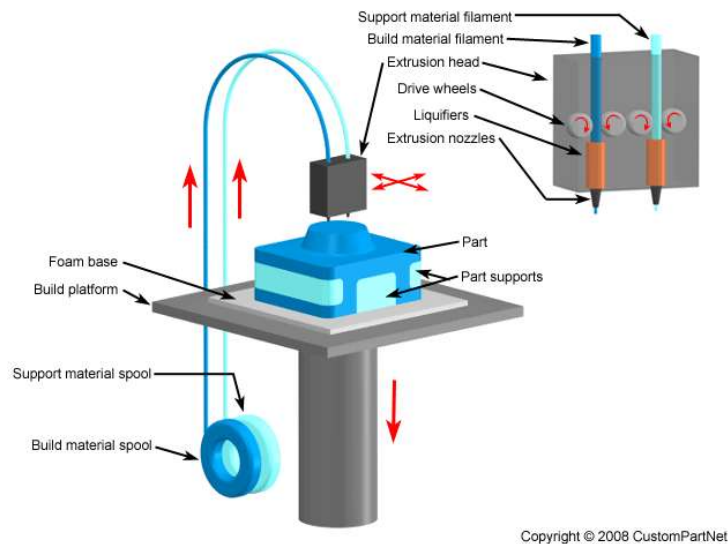
Ensimmäinen toimiva tulostin rakennettiin 3D System Corp:ssa, Charles W. Hullin toimesta vuonna 1982 (Redorbit 2014). Aluksi tulostimet olivat todella suuria ja kalliita, mutta nykyään tulostimet ovat jo kompaktin kokoisia ja niitä voidaan käyttää myös kotona. Vuonna 2010 tulostinten hinnat olivat 20 000 \$, ja vain kolmessa vuodessa ne tippuivat alle tuhanteen dollariin vuonna 2013 (Redorbit 2014).

2.1 Tulostimen toimintaperiaate

3D-tulostin toimii käyttäen materiaalinaan joko jauhetta tai lankaa. Materiaalin sulatuksen jälkeen tulostuspää alkaa ruiskuttaa sulaamateriaalia 3D-mallin muotojen mukaan kerroksittain tulostuspinnalle. 3D-tulostimet luokitellaan jompaakumpaa kahdesta perheestä tekniikan perusteella. Ensimmäiseen perheeseen kuuluvat tulostimet, jotka ruiskuttavat materiaalia suuttimen läpi, ja ovat kotikäyttöisiä. Ensimmäiseen perheeseen kuuluu: FDM, Polyjet, LENS, sekä LOM –tekniikat. Toiseen perheeseen kuuluvat tulostimet, jotka yhdistävät materiaaleja toisiinsa valon tai lämmön avulla. Tällaisia on: SL, LS, ja 3DP.

2.1.1 Fused deposition modeling

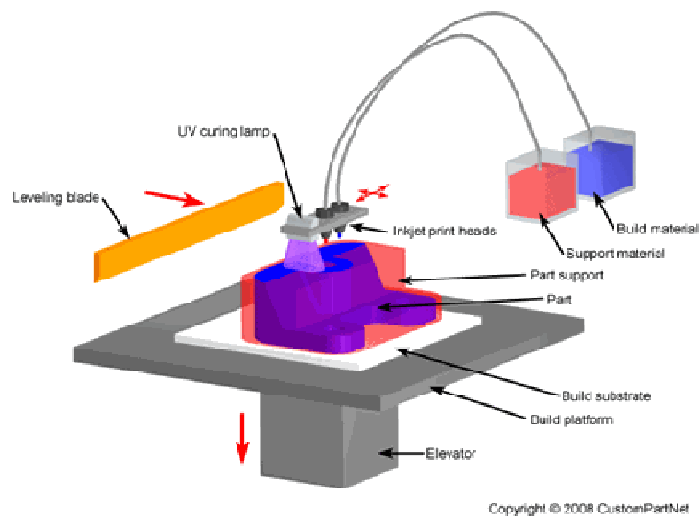
FDM eli fused deposition modeling (Kuvio 1.) on 1980 –luvulla kehitetty printtityyppi, joka ruiskuttaa sulaa ainetta pedille ja kuivumisen jälkeen tuote on valmis. Nykyaikaiset kuluttajille suunnatut 3D-tulostimet ovat yleisesti malliltaan FDM-tulostimia. FDM-tulostimissa on mukana oma tulostinohjelma, jonka avulla tulostinta ohjataan. Tulostinohjelman avulla rakennetaan tulostinrata etukäteen suunnitellulle 3D-mallille, jonka tulostin piirtää. (Lipson & Kurman 2013, 68–69.)



Kuvio 1. FDM:n periaate (FDM. 2015)

2.1.2 Polyjet

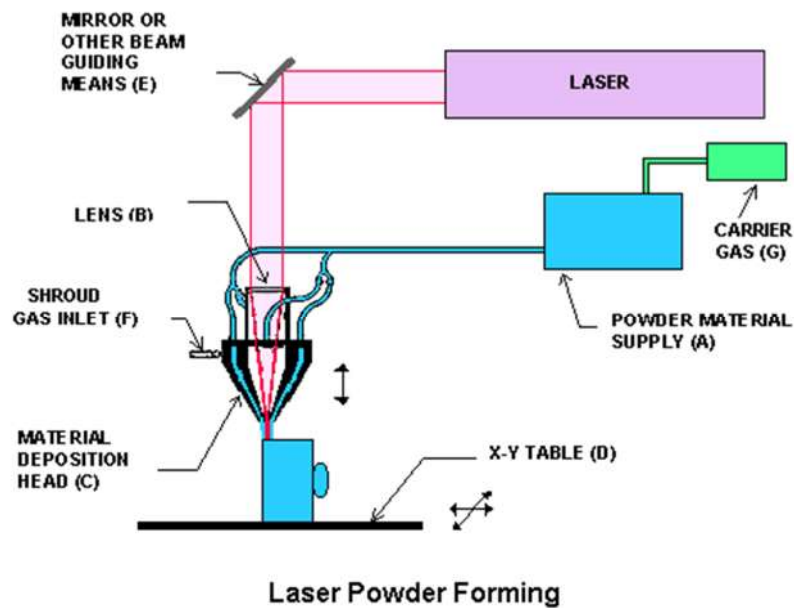
Polyjet (Kuvio 2.) on uusin tulokas ensimmäisen perheen tulostimiin. Se kehitettiin vuonna 2000 Israelissa Objet Geometeries yhtiön toimesta. Polyjet tekniikka yhdistelee muita 3D-tulostustekniikoita. Sen tulostuspää ruiskuttaa nestemäistä fotopolymeeriä UV-lampun avulla ohuiksi kerroksiksi. Polyjet-tekniikan suurin etu on siinä, että se on todella tarkka, se pystyy jopa 16 mikrometrin tarkkuuteen. Materiaalivalikoiman suppeus on ongelma polyjet-tekniikassa. (Lipson & Kurman 2013, 70.)



Kuvio 2. Polyjetin periaate (Blog.nus 2015.)

2.1.3 Laser engineered net shaping

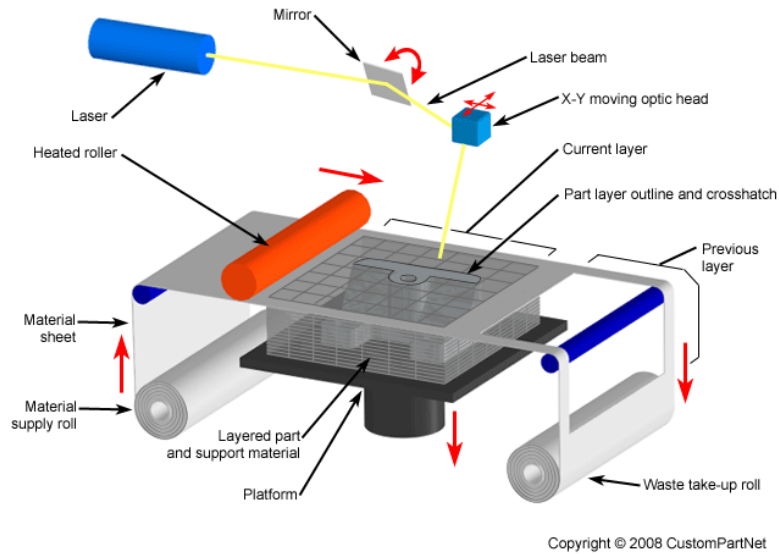
LENS eli Laser engineered net shaping (Kuvio 3.) käyttää materiaalinaan jauhetta, jota se suihkuttaa tarkasti lasersäteen avulla kovalla voimalla pedille. Osa jauheesta ei osu säteeseen ja tippuu pedille. Tällä tekniikalla voidaan tulostaa kovia materiaaleja kuten titaania tai ruostumatonta terästä. Tekniikassa voidaan käyttää myös kahta suutinta, jolloin kahden eri materiaalin seoksia voidaan käyttää. (Lipson & Kurman 2013, 71-72.)



Kuvio 3. LENS:n periaate (Additive3d 2015)

2.1.4 Laminated object manufacturing

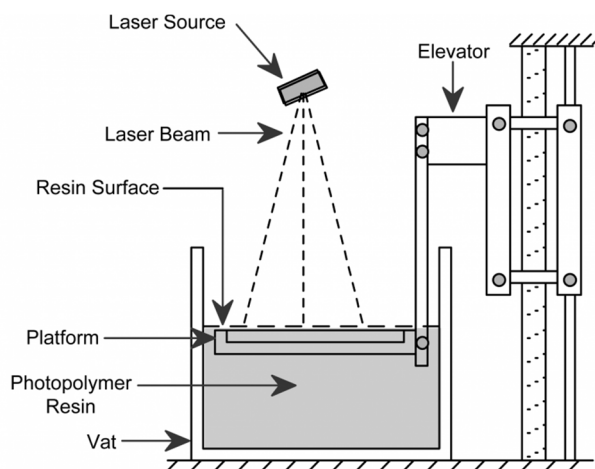
LOM eli laminated object manufacturing (Kuvio 4.), kertoo jo nimensä perusteella, että laminoi ohuita kerroksia yhtenäiseksi kappaleeksi. Suuttimen sijasta käytetään laseria tai veistä. Leikkattuaan pieniä kerroksia 3D-mallista kone osaa liittää kerrokset toisiinsa. 3D-tulostukseen voidaan käyttää paperia, muovia tai metallia. (Lipson & Kurman 2013, 72-73.)



Kuvio 4. LOM:n periaate (LOM 2015)

2.1.5 Stereolithography

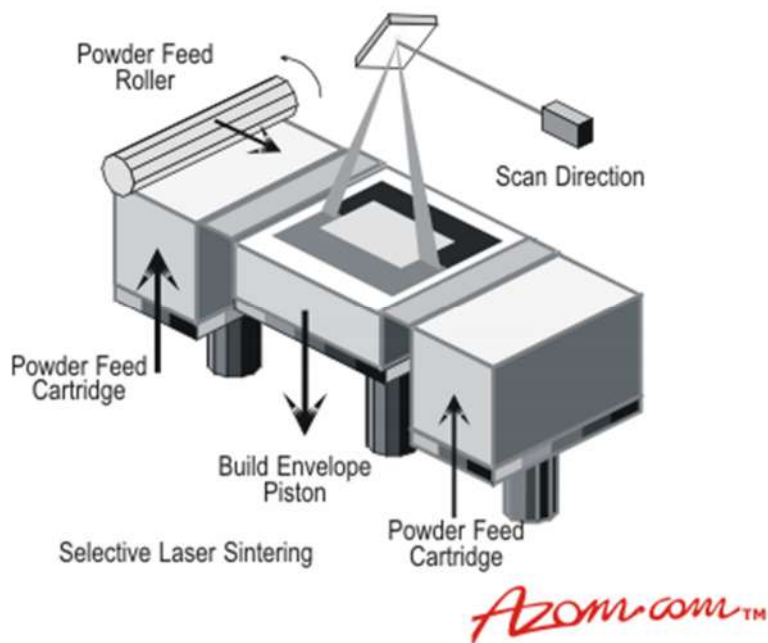
Stereolithography eli lyhyemmin SL (Kuvio 5.) on ensimmäisiä kaupallisia 3D-tulostusmenetelmiä, jossa huoneen kokoisen jääkaapin sisällä on pieni ammeellinen nestemäistä fotopolymeeriä, jonka päältä laser pyyhkäisee halutulta alueelta, jolloin muovi kovettuu ja haluttu kappale muotoutuu. Kun kappale on tulostettu, se puhdistetaan ja ehkä joudutaan hiekkapuhaltamaan ja laittamaan UV-uuniin kovettumaan. Laser on tarkka ja nopea, mutta fotopolymeerin päästämät kaasut voivat olla myrkyllisiä, eivätkä fotopolymeerit ole kovinkaan vahvoja. (Lipson & Kurman 2013, 73-74.)



Kuvio 5. Stereolithographyn periaate (SolidSmack 2015)

2.1.6 Laser sintering

Laser sintering eli LS (Kuvio 6.) on keksitty 1980-luvulla Texasin yliopistolla. Se on hyvin samankaltainen kuin Sterolithography, mutta nestepolymeerin sijasta käytetään jauhetta. Lasersäde ammutaan kohti jauhetta, ja jauhe alkaa sulamaan. Sulatetun jauheen päälle rulla pyörittää lisää jauhetta, ja näin kerrokset syntyvät laserin sulattaen lisää haluttuja kerroksia. Hyviä puolia verrattuna nestepolymeeriin on, että jauhe on kestävämpää eikä kappale todennäköisesti hajoa tulostuksen aikana. Huonoja puolia taas on, että kappaleesta ei tule kovinkaan sileä ja jauhe saattaa räjähtää, koska se sisältää typpeä. (Lipson & Kurman 2013, 75.)

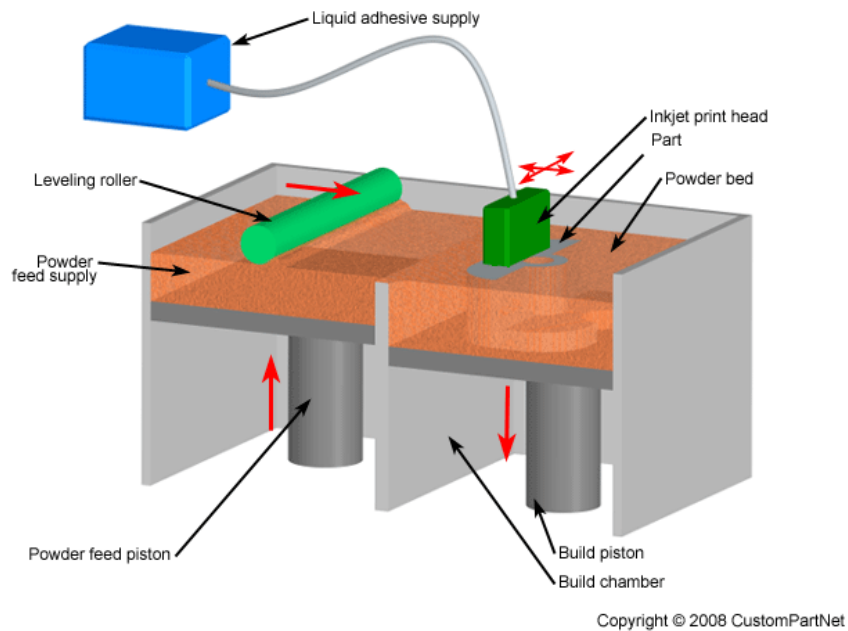


Kuvio 6. LS:n periaate (Azom 2015.)

2.1.7 Three Dimensional Printing

Three Dimensional Printing eli 3DP (Kuvio 7.) on MIT:n oppilaan Paul Williamsin ja professori Eli Sachsin kehittämä kaupallinen 3D-tulostusmenetelmä, jonka suurin valtti on sen yksinkertaisuus. Tekniikka liimaa kerroksia yhteen saavuttaen kappaleen muodon. Tekniikan suurin valtti on sen

mahdollisuus tehdä värillisiä kappaleita lisäämällä väriainetta suoraan kappaleeseen. (Lipson & Kurman 2013, 76-77.)



Kuvio 7. 3DP:n periaate (Custompartnet 2015.)

2.2 Käytettävä tulostin

Lahden ammattikorkeakoulun ja tämän opinnäytetyön tulostimena toimii Felix 3.0 mallinen 3D-tulostin (Kuvio 8.), joka on alankomaalaisen Felixprintersin elokuussa 2014 julkaisema 3D-tulostin. Kyseinen tulostin on FDM – tulostintekniikkaa hyödyntävä tulostin. Felix 3.0 on kehitetty Felix 2.0:n seuraava versio, jota saa kaksi tai yksi pesäisenä versioina. 3DHubsin käyttäjäarvioiden mukaan Felix 3.0 on saanut arvosteluissa 8,1/10, kehuja on tullut muun muassa tarkkuudesta ja tulostuslaadusta (3dhubs 2015). Taulukosta 1. huomataan maksimi piirustuskooksi 255 x 206 x 235 millimetriä ja pedin lämmityksen maksimiarvon olevan 95 °C astetta.

Taulukko 1. Felix 3.0 ominaisuudet (Felixprinters. 2015)

Power	max 220W
Voltage	110-240V, automatically adjusting powersupply
Nozzle diameter	0.35mm

Build volume (x, y, z)	(255, 205, 235) mm, When printing where dual extrusion is required, the buildvolume reduces to 240mm. But when printing with a dual head and only using one of the two nozzles the x range is 255
Layer height	50 micron to 300 micron
Heated bed temperature range	0 - 95 degC, When isolating bottom temp can go upto 115 degC. Ultra light aluminum sandwich plate.
Nozzle temperature range	0- 275degC
Axes positioning resolution (x, y, z)	(50,50,10) micron
Display unit	20x4 character display, for assembled printer this is standard included.
Stand alone printing	MicroSD card reader integrated into electronics board. So stand-alone printing is possible even without the display unit

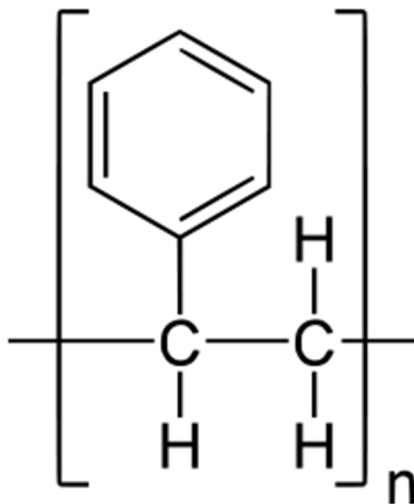


KUVIO 8. Felix 3.0 3D-tulostin. (Igo3d, 2014)

3 MATERIAALIT JA VÄLINEET

3.1 Polystyreeni

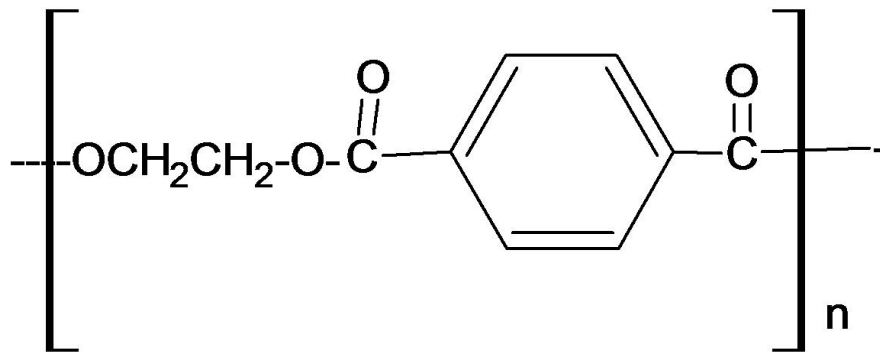
PS eli polystyreeni on kestopuovi, jonka tiheys on $1,04 \text{ g/cm}^3$ ja joka alkaa pehmenemään $85\text{-}90 \text{ }^\circ\text{C}$ asteessa. Matala pehmenemislämpötila tarkoittaa, että työstettävyys on mahdollista alhaisella lämpötilalla ja PET-kuidut pysyvät sulamattomina niiden korkean sulamislämpötilan vuoksi, koska PET:n sulamislämpötila on $260 \text{ }^\circ\text{C}$ astetta. Polystyreeni on amorfinen muovi ja se valmistetaan styreenimonomeeristä. Polystyreeniä käytetään pakkausteollisuudessa ja myös teknisissä sovelluksissa (Airasmaa, Kokko, Komppa, Saarela. 1991, 17-18.). Eduard Simon löysi polystyreeni vuonna 1839 tietämättään kuitenkin sitä itse. (Trinseo 2015). Yleisesti polystyreeni tunnetaan EPS (expanded polystyrene) –levyistä tuotenimikeeltään, joka on Styrox. EPS:ää käytetään rakennusteollisuudessa, mutta normaalia polystyreeniä käytetään ruiskuvalussa, tyhjiömuovauksessa sekä ekstruuderoinnissa (Seppälä 2008, 193-194). Polystyreenin hyviä ominaisuuksia ovat kovuus, jäykkyys, alhainen kutistuma sekä edullinen hinta. Huonoja ominaisuuksia ovat hauraus, heikko liuottimien kestävyys sekä alhainen maksimikäyttölämpötila (Muovimuotoilu 2015). Työssä käytetty polystyreeni granulaatti on väriltään valkoista ja merkiltään Lacqrene polystyrene grade 148. Kuvio 9. esittää polystyreenin kemiallisen kaavan.



Kuvio 9. Polystyreenin kemiallinen kaava. (Polystyrene. 2015)

3.2 Polyesterikuidut

Polyesterikuidut kuuluvat synteettisiin eli keinotekoisiiin kuituihin, jotka valmistetaan yleisimmin polyeteenitereftalaatti eli PET-muovista. PET on yleisesti tunnetuin pullo applikaatiostaan, mutta sitä voidaan myös lujittaa lasikuidun avulla. (Airasmaa, Kokko, Komppa, Saarela. 1991, 57-59.). PET:in sulamislämpötila on 260 °C ja tiheys on 1,4g/cm³ (Seppälä 2008, 208). Polyesteri on käytetyin tekstiilikuitu, ja sen osuus käytettävistä kuduista on noin 70 % kaikista kuduista. Polyesterin kemiallinen kestävyys ja hyvä käyttöolosuhteiden kesto tekevät siitä hyvin monipuolisen materiaalin eri käyttötarkoituksiin (Virtuaalinen AMK 2015). Käytimme materiaalin valmistukseen harmaata fleceekangasta (Kuvio 11.), joka on 100 % polyesteriä. Kuvio 10. esittää PET:n kemiallisen kaavan.



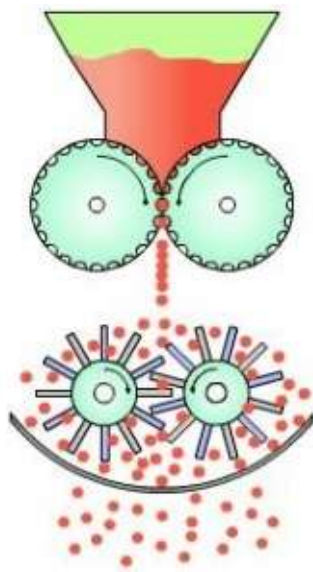
Kuvio 10. Polyeteenitereftalaatin kemiallinen kaava. (Intechopen 2015)



KUVIO 11. Työhön käytetty fleceekangas

3.3 Rouhija

Rouhijana käytettiin ruotsalaisen Rapid Granulator AB:n valmistamaa kuivarouhijaa. Rouhimisessa on kaksi eri tekniikkaa kuiva sekä märkärouhinta. Työssä käytettiin kuivarouhijaa, jonka toimintaperiaatteena ovat sen sisälle pyörivät terät jotka silpovat tuotteen pieniksi palasiksi ilman lisättyä nestettä. Rouhimeen siis tiputetaan haluttava rouhittava aine yläkautta syöttöluukusta, kappale tippuu terien väliin jotka silppuavat kappaleen ja rouhittu rouhe tippuu säleikön läpi alaosassa sijaitsevaan laattikkoon. Kuviossa 12 nähdään rouhijan peruseriaate.



Kuvio 12. Kuivarouhijan periaate. (Dry granulator 2015)



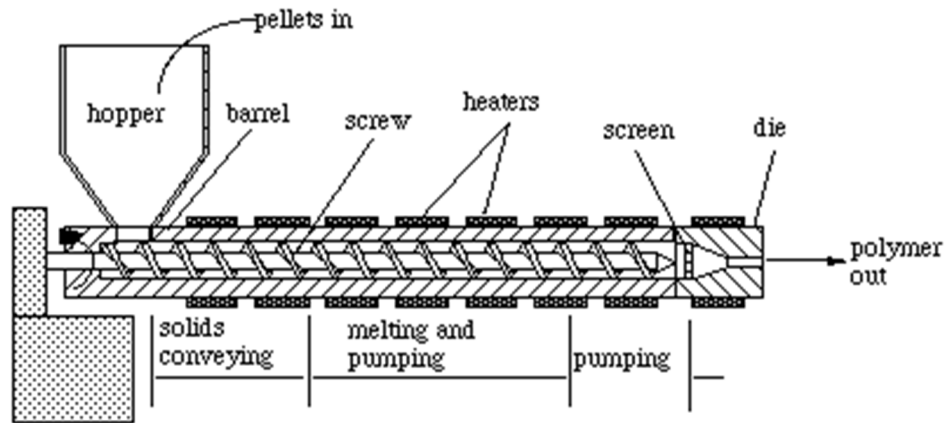
KUVIO 13. Työssä käytetty rouhija.

3.4 Ekstruuderit

Ekstruuderit eli suulakepuristus on muovintyöstökone, joka sulattaa muovin ja puristaa sen suulakkeen läpi halutun muotoiseksi kappaleeksi tai profiiliksi. Ekstruusio on ylivoimaisesti suosituin muovien työstömenetelmä, ja monet muut työstömenetelmät perustuvat ekstruusion periaatteeseen. Ekstruuderilla voidaan valmistaa muun muassa putkia, kalvoja ja profiileja. Työssä käytettiin saksalaisen Brabenderin valmistamaa ekstruuderia.

Ekstruuderin osat, suluissa kuvion 14. nimet:

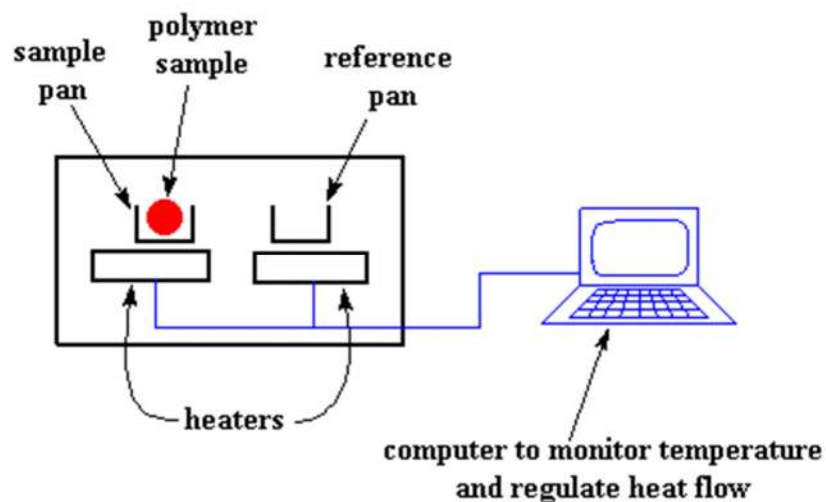
- syöttö (Hopper)
- ruuvi (Screw)
- lämmittäjät (Heaters)
- suulake (Die)



KUVIO 14. Ekstruuderin osat. (Brianbenchoff, 2015)

3.5 DSC

DSC eli differentiaalinen pyyhkäisykalorimetri on aineiden tutkimiseen käytettävä laite. Yleisimpiä tutkittavia ominaisuuksia ovat sulamislämpötila, kiteisyys, koostumus, lasittumislämpötila ja hapettumisilmiöt. DSC:llä tutkitaan eniten polymeerejä, mutta sillä voidaan myös tutkia muita aineita kuten maaleja, liimoja tai lääkkeitä. Materiaalin lämmityksen tai jäähtymisen aikana tapahtuvat lämpövirran muutokset kone tunnistaa välittömästi, ja ne näkyvät piirityvällä kuvaajalla. (Tiala 2011, 6-7)



Kuvio 15. DSC-laitteen periaate. (PSLC. 2015)

3.6 Iskukoe (Izod)

Iskukoe mittaa kappaleen murtumisenergiaa äkillisen iskun tapahtuessa. Izod-testissä (ISO 180:1993) koepala asetetaan pystysuoraan, ja iskuri tiputetaan kohti koepalaa ja rikkoessaan kappaleen iskuri liikuttaa mittariston näyttämään, kuinka paljon energiaa rikkomiseen tarvittiin. Samalla periaatteella toimivassa Charpy-iskukokeessa kappale laitetaan poikittain (Seppälä 2008 78-79.). Iskukoe voidaan suorittaa lovetetulle tai lovettamattomalle kappaleelle.

Iskulujuus saadaan laskemalla iskuun käytetty energia jaettuna poikkipinta-ala:

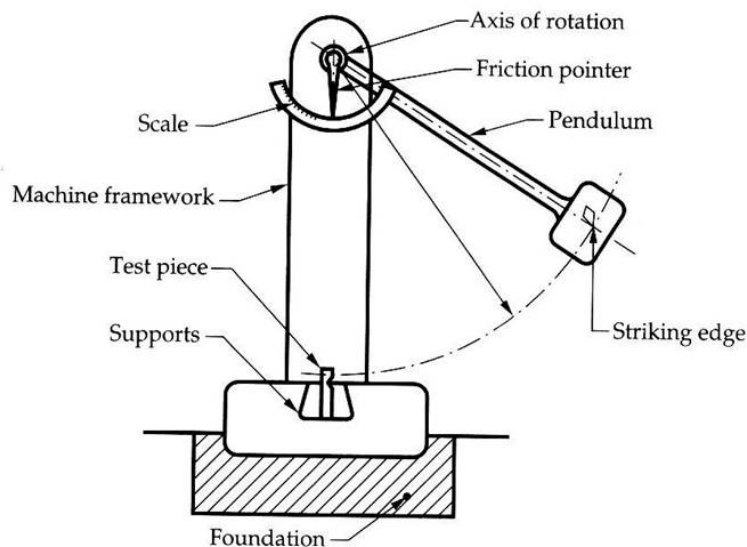
Iskulujuuden kaava:

$E =$ Energia (J)

$b =$ Kappaleen leveys (mm)

$$\frac{E}{(bh)} = \left[\frac{J}{mm^2} \right]$$

$h =$ Kappaleen paksuus (mm)



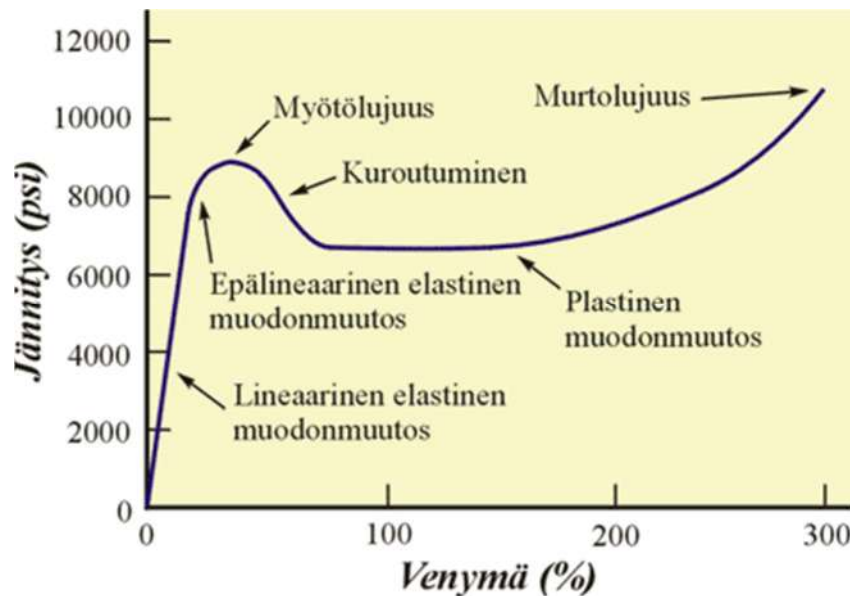
Kuvio 16. Iskukoelaite (Impact test. 2015)

3.7 Vetokoe

Vetokoe on mekaaninen testi (ISO 527-1:1933 – ISO 527-5:1997), joka testaa koekappaleen mekaanisia ominaisuuksia, kuten murtolujuuden ja murtovenymän

(Seppälä 2008 69.). Vetokone on yleensä yhdistetty tietokoneeseen, jonka avulla vetokonetta ohjataan ja tulokset voidaan lukea tietokoneelta. Vetokokeessa käytetään yleensä sauvamaista päistä paksuuntuvaa vetosauvaa. Sauvan päät ovat paksummat paremman pidon aikaan saamiseksi kokeen aikana. Vetokokeessa koesauva asetetaan vetokoneen molempien vetopidikkeiden väliin, jonka jälkeen tietokoneella ohjataan kone vetämään kappaletta niin kauan, että se hajoaa. Tietokone tulkitsee vetoajan ja hajoamisen perusteella esim. murtolujuuden arvon.

Kokeessa käytettiin koulun Lloyd Instrumentsin LRX vetokonetta, johon oli yhdistetty tietokone kuten kuviossa 18. Nykyajan vetokoe-ohjelmat kommunikoivat itse vetokoneen kanssa niin, että tietokonesovellus osaa piirtää kuvion 17. mallisen kuvaajan vetokokeen tiedoista.



Kuvio 17. Jännitys-venymä-käyrä (Ims. 2015)



Kuvio 18. Vetokone, joka on yhdistetty tietokoneeseen (Lipec 2015)

3.8 Mikroskopia

Mikroskooppi on hiukkasten ja muiden ihmissilmälle näkymättömien asioiden tarkasteluun käytettävä laite. Mikroskoopissa on yleensä eri tarkkuudelle suurentavia linsejä, joita voidaan vaihtaa kesken kappaleen tarkastelemisen, kuten kuviossa 9:n pyörittämällä voidaan vaihtaa linssiä ja eri linssin tarkkuus tarkoittaa, kuinka suurta tarkkuutta käytetään. Mikroskooppi voidaan liittää tietokoneeseen, jonka avulla voidaan mikroskoopin kuvaa katsoa tietokoneen näytöltä ja myös tallentaa kuvia suoraan tietokoneelle. Tarkasteltava kappale laitetaan mikroskoopin linssin alle, jolloin sitä voidaan tutkia.



Kuvio 19. Mikroskooppi (Villenkello 2015)

4 KUITULUJITETTU MUOVI

Kuitulujitemuovi on komposiittimateriaali, johon on sekoitettu muovia sekä lujitekuitua, ja nämä sidotaan yhteen matriisiaineen avulla. 1900-luvun alussa kehitettiin ensimmäiset fenolimuovikomposiitit, jonka katsotaan aloittaneen muovikomposiittien käytön (Airasmaa, Kokko, Komppa, Saarela. 1991, 13.). Lasikuitu kehitettiin 1935, ja se aloitti lasikuituteollisuuden. Lasikuitua käytettiin toisen maailmansodassa hyödyksi esimerkiksi 1940-luvun sota lentokoneissa, ja tästä huomattiin, että lasikuitu on tämän ajan tutkille havaitsematonta materiaalia. Aramidi- ja hiilikuitu kehitettiin 1970-luvulla, ja näillä kuiduilla vahvistettut materiaalit ovat alkaneet siitä lähtien korvata metallia (Composite. 2015).

4.1 Lujitekuidut

Lujitekuituja on monenlaisia, mutta suosituimpia ovat lasikuidut, jonka markkinaosuus on n. 95 % kaikista käytetyistä lujitekuiduista. Lujitekuidut ovat ohuita lankamaisia eri aineista valmistettuja lujiteaineita, joita sekoitetaan lisäämään muoviin mekaanisia ominaisuuksia, kuten sitkeyttä tai kovuutta.



Kuvio 20. Polyesterikuitua. (Tradingbiz. 2015)

4.2 Matriisi

Matriisilla tarkoitetaan kahden tai useamman aineen toisiinsa sitovaa ainetta. Matriisi pystyy sitomaan yhteen partikkeileita ja kuituja. Yleisesti muovi toimii matriisina muovikomposiiteissa. Muovi, joka toimii matriisina voi olla myös muoviseos. (Airasmaa, Kokko, Komppa, Saarela. 1991, 17-18.)

Kertamuovit käytetään muovikomposiittien matriisina, yleisimpiä kertamuoveja ovat epoksit, polyesterit ja vinyyliesterit. Kertamuoveja lujitetaan kuiduilla tai täyteaineilla, koska niiden mekaaniset ominaisuudet eivät ole riittävät.

Kertamuoveja pystytään muovaamaan vain kerran, joten niillä ei ole kierrätysmahdollisuuksia kuten kestopuoveilla. (Saarela, Airasmaa, Kokko, Skrifvars & Komppa 2007, 35-36.)

Kestomuovit ovat muoveja, joita voidaan lämpömuovata uudelleen rakenteen muuttumaatta. Matriisimuovina yleisimpiä kestopuoveja ovat polypropeeni ja polyamidi. Näitä edellämainittuja muovien lisäksi käytetään erikoismuoveja kuten polyeetteri-imidiä ja polyeetteriketonia. Kestomuoveja lujitetaan lyhyillä kuiduilla ruiskuvalu sovelluksissa. (Saarela ym. 2007, 53.)

5 3D-TULOSTUSLANGAN VALMISTUS

Lanka valmistettiin rouhimalla fleeekekangasta, minkä jälkeen siitä tehtiin komposiittiseos, jossa on kymmenen prosenttia polyesteriä, seostuksen jälkeen rouhe ajettiin ekstruuderin läpi. Ekstruuderoinnin jälkeen komposiittimuovi rouhittiin uudelleen ajettavaksi rouheeksi, joka tällä kertaa ajettiin langantekoon soveltuvan suuttimen läpi. Samalla kertaa tehtiin myös vertailua varten puhtaasta polystyreenistä tulostuslankaa.

5.1 Ensimmäinen rouhinta

Langan valmistus aloitettiin rouhimalla ensin polyuretaani kangasta, mutta rouhiminen ei onnistunut niin, että kangas olisin murentunut kuitukokoon, vaan siitä jäi liian isoja kangaspaloja jäljelle, monen uudelleen rouhintakerran jälkeenkin, joten kyseisellä rouhijalla ei pystytty tekemään tarpeeksi hienoa rouhintaa. Kuitumateriaaliksi vaihtui polyesteristä tehty harmaa fleeekekangas, joka rouhiintui selkeästi paremmin ja muutaman rouhintakerran jälkeen materiaali alkoi olla valmista käytettäväksi.



Kuvio 22. Rouhittu fleeekekangas

5.2 Ekstruuderit

Ekstruudointi aloitettiin tekemällä sekoitus polystyreenistä ja kuidusta. 270 grammaa muovia ja 30 grammaa kuitua, mistä saatiin aikaan kymmenen prosentin komposiittiseos. Ekstruuderit lämmitettiin ensimmäisellä kerralla seuraaviin arvoihin. Lämpötilat ovat lämmitysalueiden lämpötiloja alkaen syöttösuunnasta lähtien ensimmäisestä neljanteen.

1. Alue 153 °C
2. Alue 153 °C
3. Alue 157 °C
4. Alue 169 °C

Näillä arvoilla ajettuna massan lämpötila oli vain 164 °C astetta, joten massa ei sulanut kunnolla, ja kuidun pakkautui isoiksi palloiksi keskelle ruuvia eikä liikkunut eteenpäin ekstruuderissa, joten lämpöjä nostettiin seuraaviin arvoihin, jolloin tukkeutumisia ei tullut. Massan lämpötila nousi näillä arvoilla 177 °C asteeseen.

1. Alue 153 °C
2. Alue 152 °C
3. Alue 180 °C
4. Alue 170 °C



Kuvio 21. Polyesterikuitulujitettua polystyreeniä.

5.3 Toinen rouhinta

Kuvion 21. komposiittipalat rouhittiin uudelleen, jotta muovi ja kuitupalat sekoittuisivat paremmin. Palat syötettiin rouhijaan, ja jo yhden rouhintakerran jälkeen palat olivat sopivan kokoisia syötettäväksi ekstruuderiin ja 3D-tulostuslankaa voitiin valmistaa.

5.4 Valmistus komposiittirouheesta

Ekstruuderiin lisättiin tulostuslankaa varten sorvattu suutin, ja ekstruuderin jatkeeksi lisättiin liukuhihna. Ekstruuderin lämpötilat pysyivät samana kuin edellisellä kerralla. Ensimmäisenä ajettiin puhdasta polystyreenilankaa vertailukappaleiden tulostamista varten. Langan tavoite paksuus oli 1,75 - 1,65 mm, ja se saavutettiin puhtaan polystyreenin osalta synkronoimalla ekstruuderin pyörimisnopeus ja liukuhihnan vetonopeus. Polystyreenilangan paksuus oli 1,68 mm, joka ajettiin rullaksi. Komposiittilangan ajo aloitettiin samoilla ekstruuderin ja liukuhihna-asetuksilla, mutta komposiittimateriaali ei käyttäytynyt puhtaan materiaalin tavoin. Komposiittilanka tulleessaan suuttimen läpi alkoi käyristyä eikä pysynyt muodossaan, mutta nostamalla ekstruuderin kierrosnopeuksia ja liukuhihnan vetonopeutta saatiin lankaa suoristettua, mutta siinä esiintyi silti paikoittain vääntymiä. Vaikka tavoitepaksuus oli 1,75 – 1,65 mm, siihen ei päästy, koska mitä paksumpi lanka oli, sitä enemmän siihen tuli kierteitä eikä lanka pysynyt suorassa. Lankaa ei saatu kokonaan suoraksi, vaan siihen jäi välillä kierteitä tai se katkesi yllättäen kesken ekstruuderoinnin.



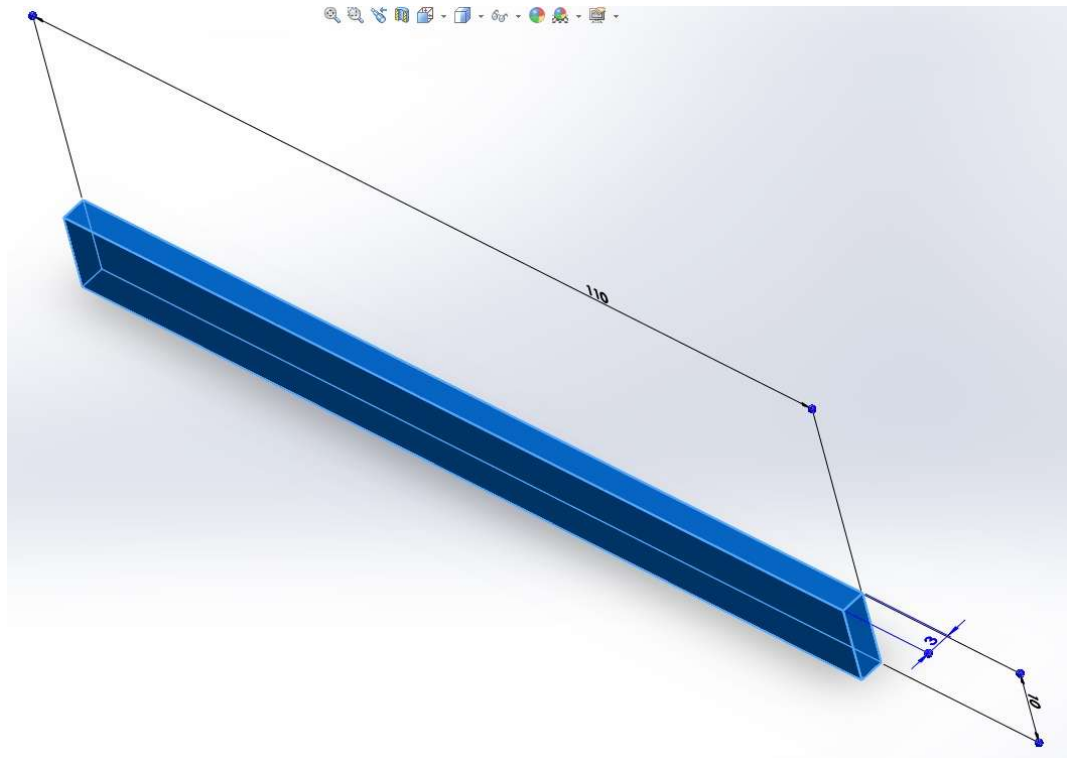
Kuvio 22. Komposiittilanka.

6 KOESAU VAT

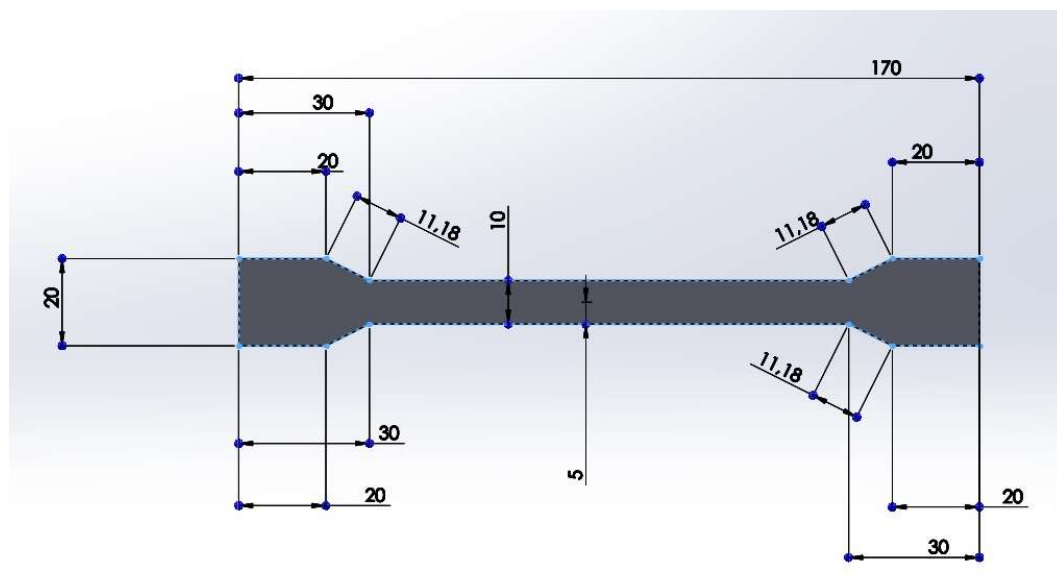
Koesauvat valmistettiin Felix 3.0 3d-tulostimella SolidWorksilla piirretyistä koesauvoista. Vetokoetta varten valmistettiin ja suunniteltiin kokonainen koesauva (kuvio 24), ja iskukoetta varten sauvasta jätettiin vetopinnat pois (kuvio 23).

6.1 3D-piirrustukset

3D-mallinnus tehtiin SolidWorks 3d-mallinnusohjelmalla. Kappaleet piirrettiin ohjelmassa etupinalle, jotta kappaleita ei tarvitsisi käänellä 3D-tulostimen ohjausohjelmassa. Sauvojen paksuus oli tarkoitus olla neljä millimetriä, mutta 3D-tulostuspedin lämmitys ei riittänyt pitämään sauvaa paikallaan, minkä vuoksi paksuus muutettiin kolmeen millimetriin. Sauvat tuli tallettaa muotoon. STL eli Standard Tessellation Language, joka on universaali 3D-mallinnusformaatti. Sauvojen mitat näkyvät kuvioista 23 ja 24.



Kuvio 23. Iskukoetsauva.



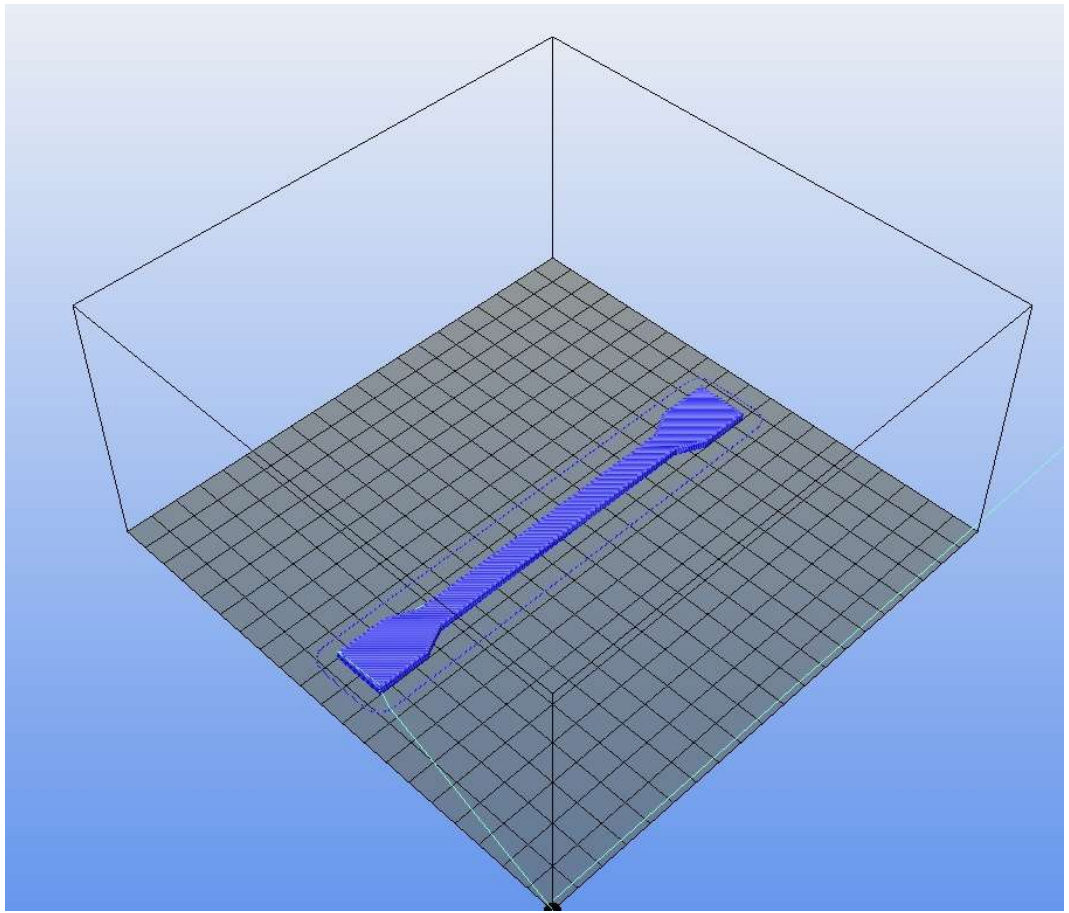
Kuvio 24. Vetosauva

6.2 Valmistus

Sauvojen valmistus aloitettiin 3D-tulostusohjelman Repetier-Hostin avaamisen jälkeen lataamalla tulostettava kappale ohjelmaan. Kappaleen lataamisen jälkeen käynnistettiin itse 3D-tulostin ja yhdistettiin tulostin, sekä tulostimen tietokonesovellus toisiinsa. Seuraavaksi vuorossa oli tulostusasetusten asettaminen, jossa säädettiin tulostimen suutinkooksi 0,3 mm, langan paksuudeksi 1,75mm sekä täyttötyyliksi hunajakkenno, jonka täyttöprosentti 90 on prosenttia. Hunajakennon täyttömalli tarkoittaa, että tulostin piirtää hunajakkenojen mallisella rakentaalla kappaleen, ja kennot täytetään 90 prosenttisesti. Lämpötiloiksi asetettiin massan lämpötilaksi 205 °C ja tulostuspedin lämpötilaksi 70 °C. Lämpötilojen asettamisen jälkeen Repetier-Host ohjelman Slic3r-lisäosa suunnitteli tulostusradat kappaleelle, kuten kuviossa 15. nähdään, joten vaalean sininen viiva kuvastaa suuttimen reittiä.

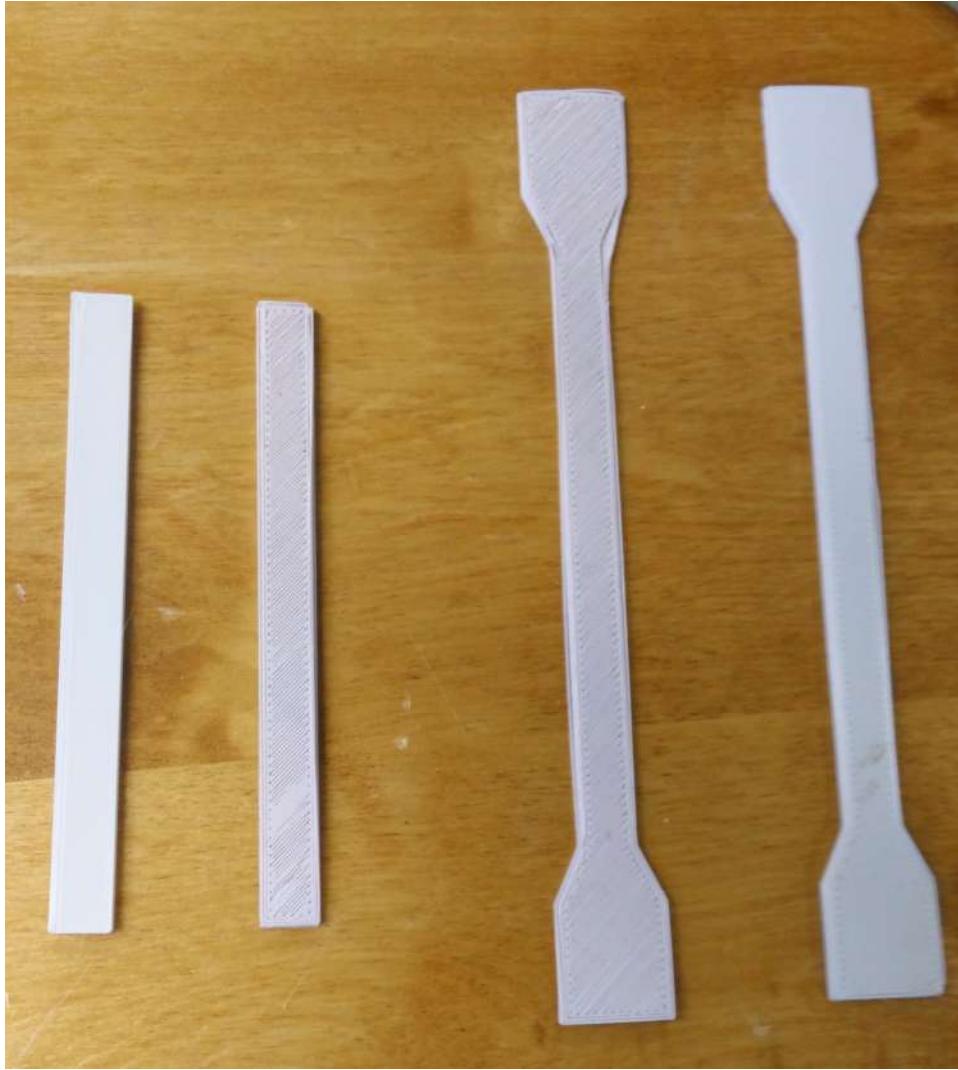
Ensimmäisen ajon aikana kävi selväksi, että tulostuspedin lämpötila ei riitä, sauva irtosi kesken tulostuksen ja tulostus epäonnistui, minkä jälkeen pedin lämpötila nostettiin 80 °C asteeseen, mutta haluttua tulosta ei saatu tälläkään lämpötilalla ja tulostuskappale irtosi vieläkin pediltä. Lämpötilaksi nostettiin seuraavaksi 85 °C astetta, jolloin kappaleet pysyivät paikallaan valmistuksen ajan,

ja kaikki kappaleet saatiin näillä arvoilla pysymään kiinni pedissä, vaikkakin tulostuksen loppuvaiheilla kappaleet alkoivat käpristyä päistään.



Kuvio 25. Vetosauva repetier-hostin ruudulla

Yhden kokonaisen vetosauvan tulostukseen kului noin 30 minuuttia ja iskukoesauvan tulostukseen 15 minuuttia. Puhtaita polystyreenivetosauvoja valmistettiin kolme kappaletta ja iskukoesauvoja myös kolme kappaletta. Komposiittisauvoissa ongelmana oli materiaalin huono laatu, joka tukki 3D-tulostimen suuttimen, minkä vuoksi vain yksi päätön koesauva saatiin kokonaisena valmiiksi. Kokonaisen komposiittivetosauvan valmistus ei onnistunut tukkeutumisongelmien takia, ja sauvan paksuudeksi jäi 1,7 millimetriä. Kuviossa 25. nähdään valmistuneet kappaleet, jossa reunoilla on polystyreenisauvat ja keskellä komposiittisauvat.



Kuvio 26. Iskukoesauvat ja vetosauvat

7 TULOKSET

7.1 Iskukoe

Tuloksista huomataan, että iskulujuus puhtaissa polystyreenisauvoissa on yli kaksikertaa suurempi kuin komposiittilangasta valmistetussa kappaleessa. Koska otoskoko oli huomattavan pieni, ei tuloksia voida pitää absoluuttisen todenmukaisina.

Taulukko 2. Loveamattomien kappaleiden iskukokeiden tulokset.

Kappale	E [J]	b [mm]	h [mm]	Iskulujuus [kJ/m ²]
1. PS	0,55	10	3	18,3
2. PS	0,56	10	3	18,7
3. PS	0,59	10	3	19,7
Ka.	0,567	10	3	18,9
Kh.	0,017	0	0	0,59
PS+PET	0,25	10	3	8,3

7.2 Vetokoe

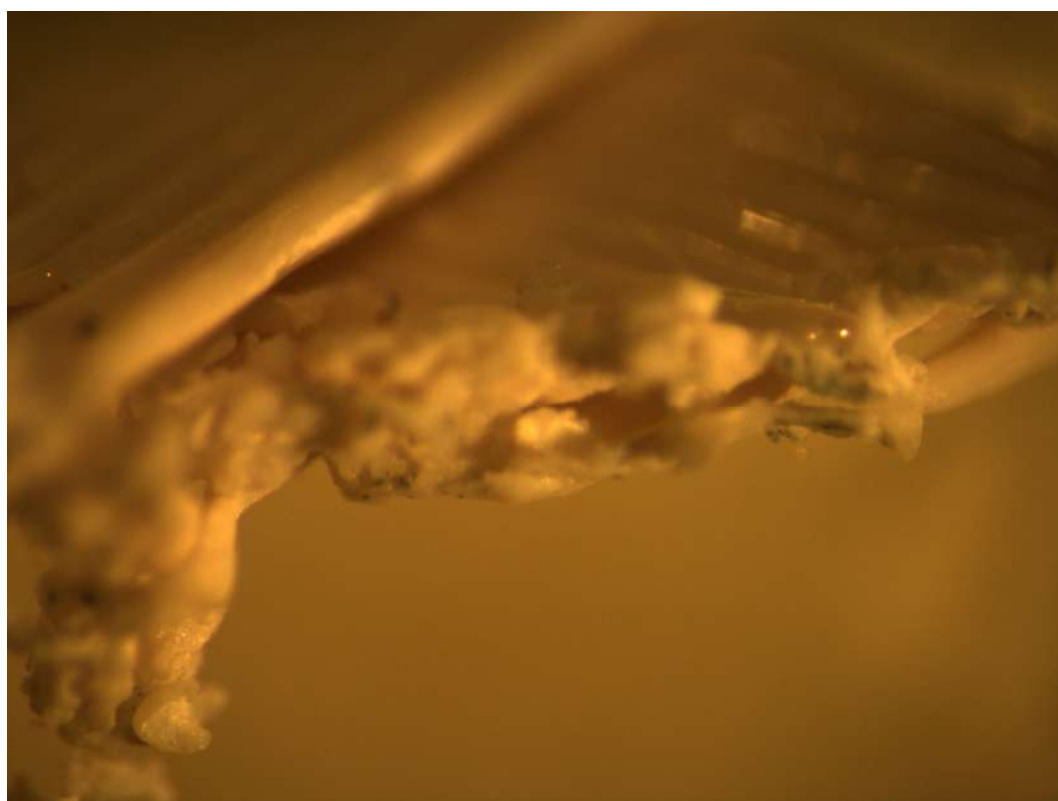
Taulukko 3:n tulokset ovat liitteestä 3. Polystyreenisauvat olivat 1,3 millimetriä paksumpia. Koska polystyreenisauvat ovat 1,76 kertaa paksumpia kuin komposiittisauvat voidaan kertomalla tulokset 1,76:lla. Tuloksista nähdään siis, että kaikki kaavion kuormat ovat heikommät komposiittisauvalla kuin puhtaalla polyesterisauvalla. Lloyd Instruments LRX vetokoneella tehdyistä kokeista ei ollut mahdollista saada jännitys-venymä –kuvaajaa.

Taulukko 3. Vetokokeen tulokset

Materiaali	Kimmokerroin (MPa)	Maksimikuorma (MPa)	Maksimikuorman venymä (%)	Murtolujuus (MPa)	Murtovenymä (%)
1. PS	910,1	20,3	3	17,6	5,2
2. PS	915,5	20,5	3,2	18	5,2
3. PS	847,6	20,2	3	19,1	3,5
Ka.	891,1	20,3	3,1	18,2	4,6
Kh.	30,8	0,12	0,1	0,6	0,8
PS + PET	484,8	7,4	2	7,4	2,2
x1,76	853,2	13,0	3,5	13,0	3,9

7.3 Mikroskopia

Mikroskooppiset testit suoritettiin käyttäen saksalaisen Zeissin valmistamaa Axiolab-mikroskooppia käyttäen, ja siihen oli liitetty Zeissin AxioCam MRc 5-kamera, joka oli liitetty tietokoneeseen. Ensimmäiset mikroskooppiset kuvat otettiin iskukoesauvan murtopinnasta, eli kohdasta, josta vetokone on murtanut kappaleen. Murtuneesta kohdasta sahattiin kahden senttimetrin kokoinen pala ja sitä tutkittiin mikroskoopin avulla. Kuvioista 27 nähdään, että kuitupalat ovat paakuuntuneet eivätkä levineet tasaisesti ympäri kappaletta. Kuitujen epätasaisuus on todennäköinen syy, miksi mekaaniset ominaisuudet ovat heikentyneet verrattuna puhtaaseen polystyreeniin.



Kuvio 27. Komposiittisauvan murtokohdan mikroskooppikuva

Seuraavaksi mikroskoopilla kuvattiin mikrotomilla leikattuja leikkeitä komposiittilangasta. Mikrotomi on laite, jolla voidaan leikata ohuita näytepaloja, joita halutaan tutkia. Kappale kiinnitetään mikrotomiin, ja pyörää pyörittäen liikutetaan kohti mikrotomin terää, joka viipaloi ohuita leikkeitä. Kuvat otettiin samalla mikroskoopilla kuin murtokohta kuvat. Kokeessa käytettiin Leican

valmistamaa RM2145-mikrotomia. Kuviossa 28 nähdään ympyröitynä kuidun säikeitä, joka todistaa sen, että PET-kuidut selviävät käytetyn lämpötilan.



Kuvio 28. Mikrotomikuva komposiittilangasta

8 YHTEENVETO

3D-tulostusmateriaalin kehityksen teoriaosuudessa käydään läpi käytettävät materiaalit sekä valmistus- ja testauslaitteet ja niiden toimintaperiaatteet sekä perehdytään syvällisemmin eri 3D-tulostustekniikoihin ja historiaan. Lisäksi käydään läpi kuitulujitteita ja lujitemuoveja.

Työnvalmistuksessa kerrotaan, kuinka fleeekekangas rouhittiin pieniksi paloiksi ja sekoittamalla se polystyreenin kanssa saatiin aikaan polystyreeni-polyeteenitereftalaati-seos, jossa on kymmenen prosenttia polyeteenitereftalaattikuitua. Fleecekuidusta sekä polystyreenistä otettiin DSC-näytteet. Seos ajettiin ekstruuderin avulla yhtenäiseksi massaksi, joka rouhittiin uudelleen. Uudelleenrouhinnan jälkeen seos ekstruuderoitiin käyttäen 3D-langan valmistusta varten valmistettua suutinta. Ensin lankaa valmistettiin puhtaasta polystyreenistä vertailu kappaleita varten. Komposiittilangan valmistus ei onnistunut suunnitelmien mukaan, ja siitä seurasi langan epämuodostumia.

3D-tulostusvaiheessa tulostimen lämmitysongelmat tekivät työn hankalaksi, ja mallisauvojen paksuutta jouduttiin kaventamaan. Kaventamisen jälkeen polystyreenikappaleet onnistuivat moitteettomasti, mutta komposiittikappaleiden valmistuksessa langan huono laatu esti kokonaisen vetosauvan valmistamisen, ja sen paksuus jäi noin puoleen.

Tuloksissa selviää, että komposiittikappaleen iskulujuus on pienentynyt yli kaksikertainen määrä verrattuna puhtaaseen polystyreenisauvaan. Myös vetokokeen tuloksista huomataan, että arvot ovat pienentyneet mutta eivät yhtä radikaalisti kuin iskukokeessa.

Huonon sekoittuvuuden vuoksi tulokset eivät olleet parempia materiaaliominaisuuksiltaan kuin puhdas tuote, vaikka näin voisi olettaa. Jos seoksen ajaisi useamman kerran rouhijan läpi ja ekstruuderoisi jokaisen kerran jälkeen, voitaisiin saada parempia tuloksia ja esimerkiksi langassa ei näkyisi niin selviä pakkuuntumisia. Myös 3d-tulostimen suuttimen vaihtaminen läpimitaltaan suurempaan voisi auttaa, vaikka lanka olisikin epämuodostunut. Lujitekuidut säilyivät ehjinä langassa, joten PET-kuiduilla lujitetun PS:n käyttö 3D-tulostuksessa on todistettu mahdolliseksi.

LÄHTEET

PAINETUT LÄHTEET

Airasmaa, I., Kokko, J., Komppa, V., Saarela, O. 1991. Muovikomposiitit. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy

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

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa V. 2007. Komposiittirakenteet. Helsinki: Muoviyhdistys ry

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

ELEKTRONISET LÄHTEET

3dhubs. 2015. [viitattu 10.3.2015]. Saatavissa:
<https://www.3dhubs.com/3d-printers/felix-30>

3dprinting. 2015 [viitattu 16.4.2015]. Saatavissa:
<http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>

3dprintingindustry. 2015 [viitattu 8.4.2015]. Saatavissa:
<http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/>

Additive3d. 2015 [viitattu 16.4.2015]. Saatavissa:
<http://www.additive3d.com/lens.htm>

Azom. 2015 [viitattu 16.4.2015]. Saatavissa:
<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1648>

Blog.nus. 2015 [viitattu 16.4.2015]. Saatavissa:
<http://blog.nus.edu.sg/u0804594/common-rp-techniques/e-polyjet/>

Brianbenchhoff. 2015. [viitattu 16.1.2015]. Saatavissa:
<https://brianbenchhoff.wordpress.com/2012/04/21/reprap-filament-home-extruder/>

Composite. 2015 [viitattu 11.3.2015]. Saatavissa:

<http://composite.about.com/od/aboutcompositesplastics/a/HistoryofComposites.htm>

Dry granulators. 2015 [viitattu 8.4.2015]. Saatavissa:

http://solidswiki.com/index.php?title=Dry_Granulators

FDM. 2015 [viitattu 16.4.2015]. Saatavissa:

<http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>

Felixprinters. 2015. [viitattu 16.1.2015]. Saatavissa:

<http://shop.felixprinters.com/3d-printer-felix-3-0-assembled.html>

Igo3d. 2014. [viitattu 30.9.2014]. Saatavissa:

<https://www.igo3d.com/en/felix-3-0-3d-drucker-bausatz.html>

Impact test. 2015 [viitattu 23.3.2015]. Saatavissa:

<http://me.aut.ac.ir/staff/solidmechanics/alizadeh/Impact%20Test.htm>

Ims. 2015 [viitattu 23.3.2015]. Saatavissa:

http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_4_4_2.php

Intechopen. 2015 [viitattu 9.3.2015]. Saatavissa:

<http://www.intechopen.com/books/polyester/degradation-and-recyclability-of-poly-ethylene-terephthalate->

Izod. 2015 [viitattu 23.3.2015]. Saatavissa:

http://en.wikipedia.org/wiki/Izod_impact_strength_test

Lipec. 2015 [viitattu 23.3.2015]. Saatavissa:

<http://www.lipec.info/img/photo10.jpg>

LOM. 2015 [viitattu 16.4.2015]. Saatavissa:

<http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>

Muovimuotoilu. 2015 [viitattu 11.3.2015]. Saatavissa:

<http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/32/63/>

Polyesteri. 2015 [viitattu 9.3.2015]. Saatavissa:

<http://fi.wikipedia.org/wiki/Polyesteri>

Polystyreeni. 2015 [viitattu 9.3.2015]. Saatavissa:

<http://fi.wikipedia.org/wiki/Polystyreeni>

Polystyrene. 2015 [viitattu 9.3.2015]. Saatavissa:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene>

PSLC. 2015 [viitattu 9.3.2015]. Saatavissa:

<http://www.pslc.ws/macrog/dsc.htm>

Redorbit. 2014. [viitattu 26.9.2014]. Saatavissa:

http://www.redorbit.com/education/reference_library/general-2/history-of/1112953506/the-history-of-3d-printing/

Solidsmack. 2015 [viitattu 16.4.2015]. Saatavissa:

<http://www.solidsmack.com/fabrication/stereolithography-110-micron-old-world-laboratories-nano-3d-printer/>

Tech3dprinting. 2015 [viitattu 23.3.2015]. Saatavissa:

<http://www.tech3dprinting.com/what-are-the-different-types-of-3d-printers-available-in-the-market>

Tiala, J. 2011. Differentiaalinen pyyhkäisykalorimetri. Opinnäytetyö. Tampere: Tampereen Ammattikorkekoulu. Kemiantekniikan koulutusohjelma.

Tradingbiz. 2015 [viitattu 16.3.2015]. Saatavissa:

http://www.tradingbiz.com/product_images/5835/polyester-fiber-FP-117730.jpg

Trinseo. 2015 [viitattu 23.3.2015]. Saatavissa:

<http://www.trinseo.com/company/history/polystyrene.htm>

Villenkello. 2015 [viitattu 23.3.2015]. Saatavissa:

<http://www.villenkello.fi/shop/kauppa4/products.php?action=show&id=3980&show=all>

Virtuaalinen AMK. 2015 [viitattu 9.3.2015]. Saatavissa:

<http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojaksot/030507/1086702266491/1086705141427/1149670512798/1149670553764.html>

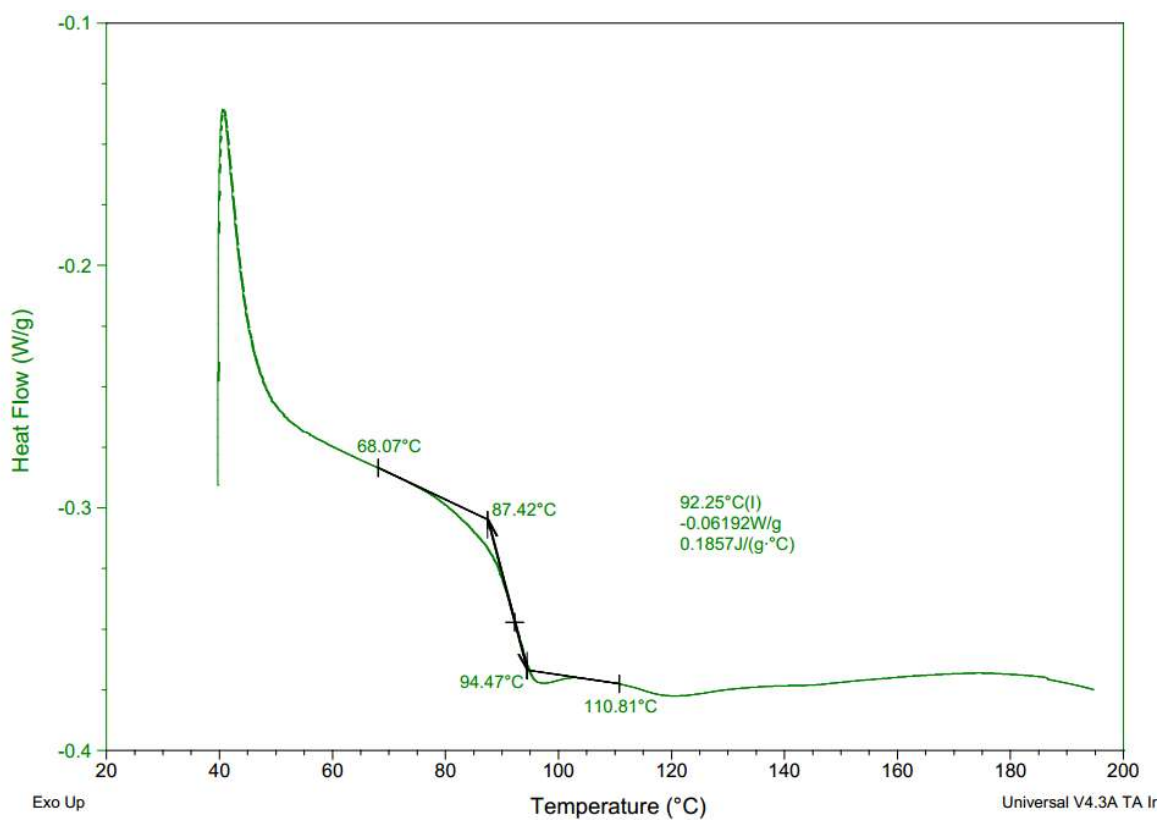
LIITEET

LIITE 1. DSC FLEECE

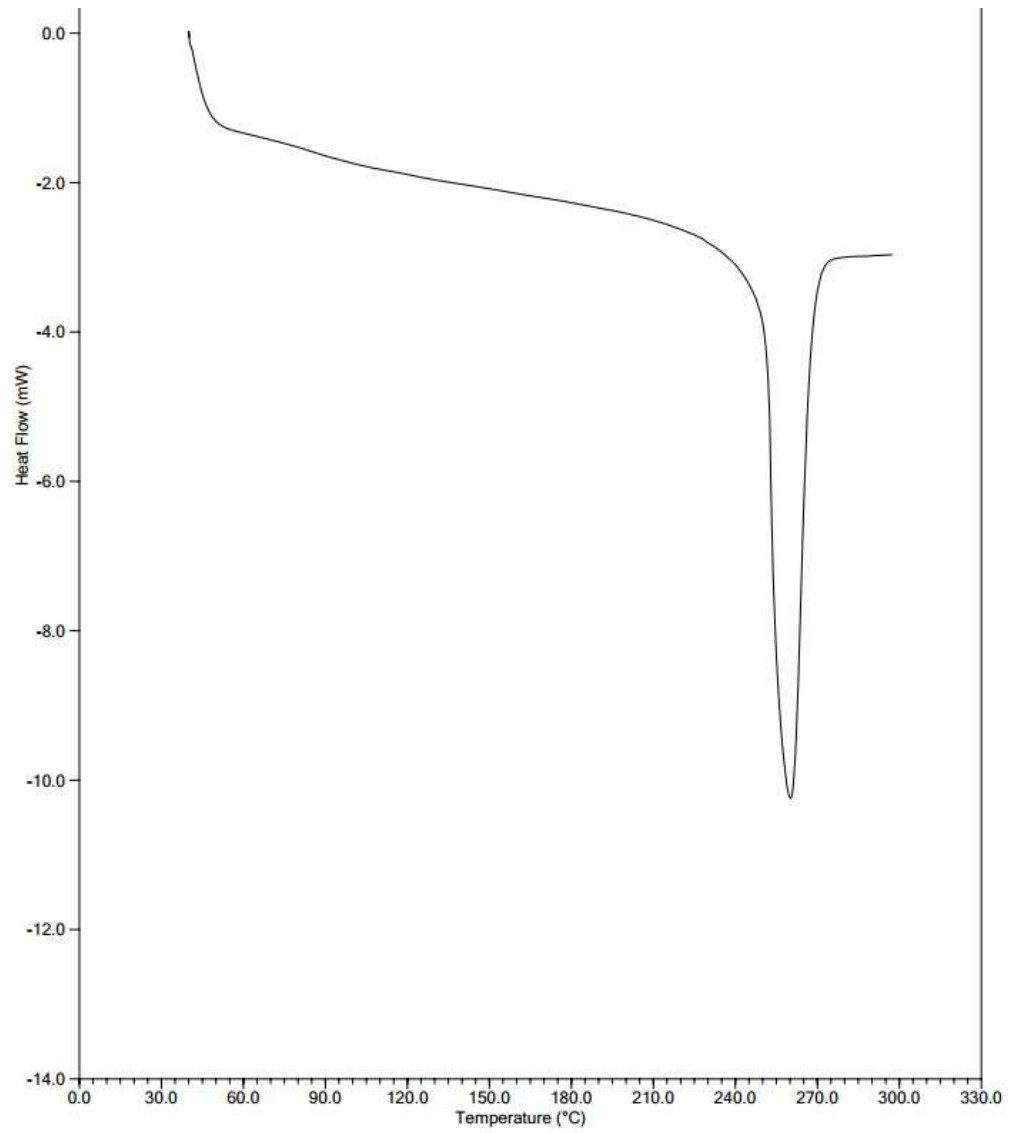
LIITE 2. DSC PS

LIITE 3. VETOKOE TULOKSET

LIITE 1. DSC PS



LIITE 2. DSC FLEECE



LIITE 3. VETOKOE TULOKSET

Date	Time	pcpr	Sample...	TPE	Gauge Length	Width	Breadth	Area
13.3.2015	11:11:50	pulttest...	True	ProBase	80.000 mm	10.000 ...	3.0000 ...	30.000 ...
13.3.2015	11:17:32	pulttest...	True	ProBase	80.000 mm	10.000 ...	3.0000 ...	30.000 ...
13.3.2015	11:18:51	pulttest...	True	ProBase	80.000 mm	10.000 ...	3.0000 ...	30.000 ...
13.3.2015	11:21:33	pulttest...	True	ProBase	80.000 mm	10.000 ...	1.7000 ...	17.000 ...

i	Speed	Preload	Maximum Load	Deflection at Maximum Load	Stress at Maximum Load	
3	1	50.000 ...	False	0.60766 kN	2.3601 mm	20.255 MPa
4	1	50.000 ...	False	0.61457 kN	2.5792 mm	20.486 MPa
5	1	50.000 ...	False	0.60663 kN	2.3706 mm	20.221 MPa
6	1	50.000 ...	False	0.12652 kN	1.7467 mm	7.4423 MPa

	Percentage Strain at Maximum Load	Work to Maximum Load	Stiffness	Young's Modulus	Load at Break
3	2.9502	0.73356 J	341580 ...	910.87 MPa	526.64 N
4	3.2240	0.86423 J	343300 ...	915.45 MPa	539.01 N
5	2.9633	0.78335 J	317840 ...	847.58 MPa	572.68 N
6	2.1834	0.12157 J	103020 ...	484.79 MPa	126.52 N

	Deflection at Break	Stress at Break	Percentage Strain at Break	Work to Break	Comments
3	4.1925 mm	17.555 MPa	5.2406	1.7532 J	4853267_...
4	4.1458 mm	17.967 MPa	5.1823	1.7519 J	4853267_...
5	2.8308 mm	19.089 MPa	3.5384	1.0553 J	4853267_...
6	1.7467 mm	7.4423 MPa	2.1834	0.12157 J	4853267_...