



LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Lahti University of Applied Sciences

3D-TULOSTETTUJEN KAPPALEIDEN MEKAANISET OMINAISUUDET

LAHDEN
AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Muovitekniikka
Opinnäytetyö
Syksy 2014
Emmi Hakala

Lahden ammattikorkeakoulu
Muovitekniikan koulutusohjelma

HAKALA, EMMI:

3D-tulostettujen kappaleiden mekaaniset
ominaisuudet

Muovitekniikan opinnäytetyö, 42 sivua, 3 liitesivua

Syksy 2014

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyössä tutkittiin 3D-tulostamista yhtenä muovikappaleiden valmistumenetelmänä ja verrattiin sitä massavalmistuksen menetelmään eli ruiskuvaluun.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa käydään lyhyesti läpi 3D-tulostamisen eri muodot, kerrotaan tutkimuksessa käytettyjen materiaalien (PS-HI ja PLA) ominaisuuksista ja selostetaan ruiskuvalun sekä ekstruusion perusteet. Lisäksi opinnäytetyössä käytettyjen muovien testausmenetelmien teoriaa kerrataan.

Tämän opinnäytetyön pääpaino oli kokeellisessa osuudessa, jossa tehtiin koekappaleille ja valmistusmateriaaleille erilaisia yleisiä muovien testauskokeita, kuten vetokokeita ja iskulujuustestejä.

Saatuja tuloksia vertailtiin niin yleisiin kirjallisuuden arvoihin kuin vastikään julkaistuihin 3D-koekappaleihin tehtyihin tutkimustuloksiin. Tulokset osoittavat, että 3D-tulostetut kappaleet ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan vain hieman heikompia kuin ruiskuvaletut kappaleet.

Asiasanat: 3D-tulostaminen, ruiskuvalu

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in Plastics Engineering

HAKALA, EMMI:

Mechanical Properties of 3D Printed
Objects

Bachelor's Thesis in Plastics Engineering 42 pages, 3 pages of appendices

Autumn 2014

ABSTRACT

The purpose of this thesis was to explore the mechanical properties of 3D printed objects, made by fused deposition molding, and compare them with objects produced by mass production - in this case injection molding.

The thesis begins with a theoretical part, which has been divided into three main parts. The first part focuses on theory of mechanical tests and properties such as tensile strength and impact strength. In the first chapter there is also a description of the injection molding process. The second part deals with high impact polystyrene and polylactid acid – the materials used in the study. The last theory part concentrates on different methods of 3D printing.

The main focus of this thesis is in the empirical section, where the making of test specimens is described. The materials and 3D printed and injection molded test specimens were tested in the plastic laboratory of Lahti University of Applied Sciences.

The test results were compared to reference values from literature and other new studies in the field of fused deposition molding.

Key words: 3D printing, fused depostion molding, injection molding

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	TESTAUS- JA VALMISTUSMENETELMÄT	2
2.1	Iskulujuus (Izod)	2
2.2	Vetokoe	3
2.3	Kapillaarireometri	5
2.3.1	Viskositeetti	6
2.3.2	Viskoelastisuus	6
2.4	Tiheys	6
2.5	Kerrosten välinen adheesio	7
2.6	Ruiskuvalu	7
2.6.1	Ruiskuvalujakso ja sen vaiheet	8
2.6.2	Ruiskuvalukoneen keskeisimmät osat	10
2.7	Ekstruusio eli suulakepuristus	11
2.7.1	Ekstruuderin toiminta ja rakenne	12
2.7.2	Langan valmistaminen ekstruuderilla	12
3	VALMISTUSMATERIAALIT	14
3.1	Iskulujitettu polystyreeni eli SB tai PS-HI (HIPS)	14
3.1.1	Valmistus	14
3.1.2	PS-HI:n ominaisuudet	15
3.2	Polylaktidi eli PLA	16
3.2.1	Valmistus	16
3.2.2	Ominaisuudet	16
4	3D-TULOSTAMINEN	18
4.1	Erilaiset 3D-tulostimet	19
4.1.1	Ensimmäinen luokka – Fused Deposition Modeling (FDM)	19
4.1.2	PolyJet Printing	20
4.1.3	Laser Engineered Net Shaping (LENS)	20
4.1.4	Laminated (tai layered) Object Manufacturing (LOM)	21
4.1.5	Toinen luokka – Stereolitografia (SL, SLA)	21
4.1.6	Laser Sintering (LS, SLS)	22
4.1.7	Three Dimensional Printing (3DP)	23
4.2	Ideasta tulostamiseen	23

5	KOEKAPPALEIDEN VALMISTAMINEN JA TESTAAMINEN	24
5.1	Langan valmistaminen ekstruuderilla	24
5.2	Koekappaleen ruiskuvalaminen	24
5.3	Koekappaleiden tulostaminen	24
5.4	Vetokoe	29
5.5	Iskukoe	29
5.6	Kapillaarireometri	29
5.7	Tiheys	29
6	TULOKSET	30
6.1	Iskukoe	30
6.2	Vetokoe	32
6.2.1	Vetokoe PLA-langalle	32
6.2.2	Kerrosten välinen adheesio - vetokoe pystyyn tulostetulle kappaleelle	33
6.3	Kapillaarireometri	34
6.4	Tiheys	34
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO	36
	LÄHTEET	40
	LIITTEET	1

1 JOHDANTO

3D-tulostuksessa ei periaatteessa ole mitään uutta. Sitä ovat käyttäneet mallisuunnittelijat ja muotoilijat jo vuosien ajan (Paukku, 21). 3D-tulostinten yleistyessä ja hintojen alentuessa yhä useammalla on mahdollisuus oman, itse suunnitellun kappaleen tai ladatun mallinnoksen tulostamiseen tai vaikkapa 3D-tulostimen omistamiseen. Tulostettu kappale ei enää välttämättä ole malli- tai koekappale, vaan loppukäyttöön tarkoitettu esine.

3D-tulostamiselle on kasattu suuria odotuksia; rohkeimmat arvioivat, että uusi teollinen 21. vuosisadan vallankumous on jo ovella ja kohta jo kotiovella. Tulevaisuudentutkijat arvioivat, että 3D-tulostuksesta tulee 2020-luvulla tuotannon valtavirtaa, kun 3D:llä on mahdollista tuottaa uusia tuotteita markkinoille ja räätälöidä niitä kuluttajan tarpeisiin (Paukku 2013, 17,20).

Tämän opinnäytetyön teoriaosuudessa selvitetään mahdollisuuksien rajoissa 3D-tulostuksen alati muokkautuvaa terminologiaa ja käydään läpi tiivistetysti 3D-tulostuksen eri tekniikat. Teoriaosuudessa kerrotaan myös perusominaisuuksia vertailtavista materiaaleista. Pääpaino opinnäytetyössä on kuitenkin kokeellisessa osuudessa. Koska huomattava osa tulostetuista tuotteista suuntautuu loppukäyttöön, on aiheellista vertailla massatuotannon valmistusmenetelmällä, tässä tapauksessa ruiskuvalulla ja 3D-tulostamalla saatujen tuotteiden mekaanisia ominaisuuksia.

2 TESTAUS- JA VALMISTUSMENETELMÄT

Muovien mekaaniset ominaisuudet riippuvat sekä sisäisistä rakenneominaisuuksista että ulkoisista tekijöistä:

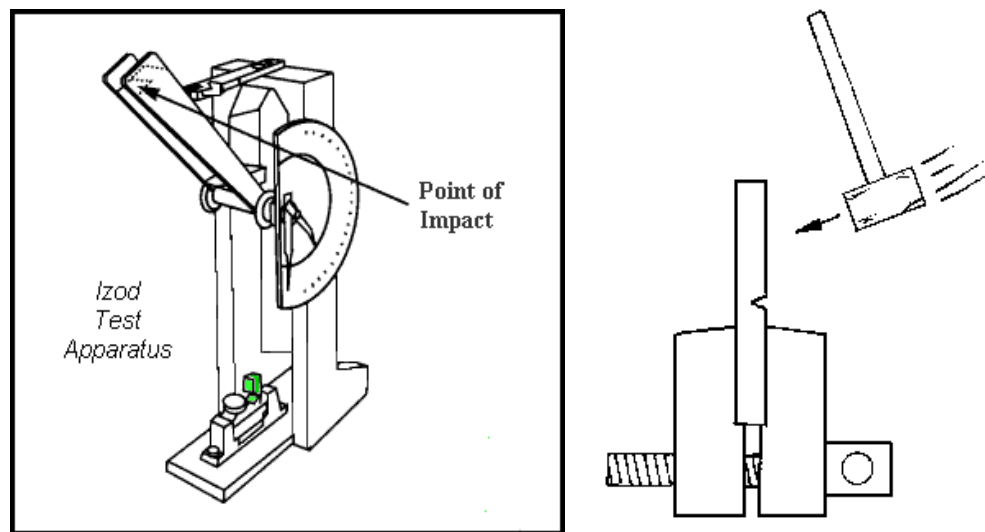
Sisäiset rakenneominaisuudet:	Ulkoiset tekijät:
- kemiallinen koostumus	- lämpötila
- moolimassajakauma	- lämpökäsittelyt
- ristosilloittaminen	- paine
- kiteisyysaste ja morfologia	- erilaiset kuormitukset
- orientaatio	- kuormituksen laajuus, frekvenssi ja
- molekulaariset liikkeet	nopeus
- lisäaineet.	- atmosfääri.

(Törmälä, Järvelä & Lindberg 1992, 196.)

2.1 Iskulujuus (Izod)

Iskukokeessa mitataan kappaleen murtumiseen tarvittavaa energiaa. Tulos ilmoitetaan energiana poikkipinta-alaa kohden, kJ/m^2 . Koetuloksia voidaan hyödyntää materiaalivertailua tehtäessä ja tutkittaessa kappaleen loveamisherkkyyttä. Itse koe on nopea ja helppo suorittaa, mutta epävarmuustekijöitä ilmenee paljon. Tämän vuoksi rinnakkaismittauksia tulisi tehdä useita ja tuloksiin pitää suhtautua tietyllä varauksella. On syytä muistaa, että huoneenlämpötilassa tehdyistä iskukokeista on lähes mahdotonta arvioida materiaalin käyttäytymistä muissa lämpötiloissa.

Standardi SFS-EN ISO 180 määrittää Izod-iskulujuuden suorittamisen ja koekappaleen. Kokeessa koekappale kiinnitetään heiluri-vasara-laitteiston tukien väliin pystysuoraan, kuten kuvioissa yksi ja kaksi on esitetty. Samassa standardissa on määriteltä myös iskukokeen neljä erilaista murtumatyyppiä: täydellinen murtuma, osittain murtuma, saranamurtuma ja ei murtumaa. Viimeisellä murtumatyyppillä tarkoitetaan taipumista. (Järvelä & Heikkinen 2005b; SFS-EN ISO 180:2005, 18–20.)



KUVIO 1. Izod-testilaite (Matweb 2014) KUVIO 2. Kappaleen oikeaoppinen kiinnitys (Dotmar 2014)

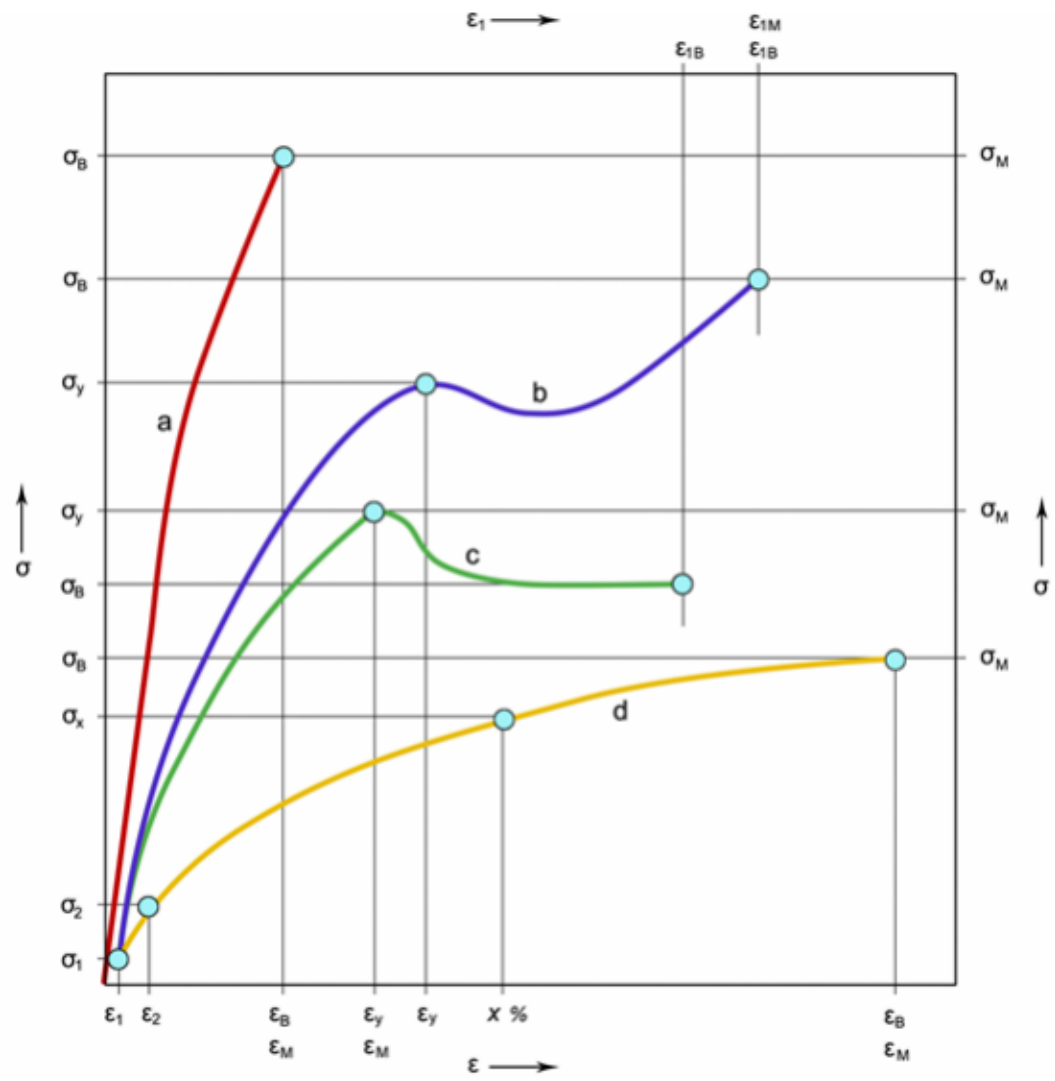
Iskukoe voidaan suorittaa loveamattomasti tai lovettona. ”Lovi-iskulujuutta testattaessa koekappale lovetaan ja lovi toimii jännityksen keskittäjänä. Muovien lovi-iskulujuus onkin huomattavasti pienempi kuin loveamattoman kappaleen iskulujuus.” (Vienamo & Nykänen 2014.)

2.2 Vetokoe

Vetokokeella voidaan määrittää eri muovimateriaalien vetokimmomoduuli, vetolujuus, myötöraja ja murtolujuus. Toisin sanoen kokeella saadaan tietoa muovien lujuus-, sitkeys- ja jäykkyysominaisuuksista. Testituloksia voidaan hyödyntää vaikkapa tuotannon laadunvarmistamisessa sekä materiaalien valinnassa. Vetokoe on yleisimmin käytetty mekaaninen testausmenetelmä, ja se on standardoitu. Tärkeimmät muovitutkimuksissa käytettävät standardit ovat ASTM, DIN ja ISO. Standardeissa SFS-EN ISO 527-1, 527-2, 527-3, 527-4 ja 527-5 esitetään testausmenetelmät ja –olosuhteet eri sovelluksille. (Järvelä & Heikkinen, 2005e; Kurri, Malén, Sandell & Virtanen 2008, 194.)

”Varsinaisessa vetokokeessa venytetään standardikoesauvaa pituussuunnassa vakionopeudella ja mitataan samalla venytystä vastustavaa voimaa. Testi tehdään

vähintään viidelle koekappaleelle, joista lasketaan keskiarvo.” (Kurri ym. 2008, 195.)



KUVIO 3. Jännitys-venymä-käyrät. (Tampereen teknillinen yliopisto)

Kuviossa 3 esiintyvät jännitys-venymäkäyrät ilmaisevat muovin mekaanisen tilan jännitys-venymä-kokeessa: (a) kova ja hauras; kertamuovit ja komposiittimateriaalit (b) ja (c) sitkeät muovit, joilla on myötöraja; kestumuovit (d) sitkeät polymeerimateriaalit, joilla ei ole selkeää myötörajaa; termoelastit. Kuvassa ϵ on venymä ja σ on jännitys. (Tampereen teknillinen yliopisto)

Muovit voidaan jakaa jännitys-venymä-käyttäytymisen perusteella kuvion 3 mukaisesti ryhmiin. Samalta jännitys-venymä-käyrältä voidaan määrittää jo edellä mainitut suureet: myötöjännitys σ_m , myötövenymä ϵ_m , vetomurtolujuus σ_B ja murtovenymä ϵ_B .

Jännitys-venymä-käyrän lineaariselta alkuosalta voidaan määrittää kimmomoduli (Youngin moduli) Kaavalla 1:

$$E = d\sigma / d\epsilon, \quad \text{KAAVA 1}$$

missä σ on jännitys:

$$\sigma = \frac{\text{voima } (F)}{\text{koesauvan poikkileikkausala } A}$$

ja ϵ on venymä:

$$\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}, \text{ missä } L_0 \text{ on kappaleen alkuperäinen ja } L \text{ venytyksen jälkeinen pituus (Törmälä ym. 1992, 196–197).}$$

Vetolujuus voidaan ilmoittaa voimana joko murtumisen tai myötörajan kohdalla. Hauraille muoveille eli alle 10 % venyville vetonopeus on 5 mm/min ja vetolujuus on tällöin ilmoitettu murtopisteessä. Sitkeille muoveille vetonopeus on 50 mm / min ja vetolujuus on ilmoitettu myötörajalla. Termoelasteille vetonopeus on usein vielä suurempi. (Järvinen 2000, 79.)

2.3 Kapillaarireometri

Kapillaarireometri on kone, jolla voidaan tutkia erilaisia muovin viskositeettisia ominaisuuksia. Kapillaariviskometrissa nestemäinen polymeeri pakotetaan männän tai paineen avulla varastosäiliöstä kapillaarin läpi (Törmälä ym. 1992, 77). Viskositeettiä voidaan mitata leikkausnopeuden, ajan ja lämpötilan funktiona. Samaisella laitteella voidaan tutkia myös sulapuristumista ja visko-elastista käyttäytymistä. (Järvelä & Heikkinen 2008.)

2.3.1 Viskositeetti

Viskositeetti kuvaa nesteen virtausvastusta. Se on nesteen ominaisuus, jota käytetään kuvaamaan esimerkiksi öljyjen ja hartsien laatua. Viskositeetin voidaan myös ajatella olevan kitkavoima, joka aiheutuu molekyylien suuntautuneesta liikkeestä toistensa ohi liuoksessa eli nesteen sisäistä kitkaa. (Jyväskylän yliopisto 2013.)

Jos viskositeettia mitataan vakiolämpötilassa, niin moolimassa on tärkein polymeerisulaan vaikuttava tekijä. Kun moolimassa kasvaa, niin viskositeettikin kasvaa, aina tiettyyn rajaan asti. Viskositeettia suurettavat myös paine ja täyteaineet. Vastaavasti viskositeettiä pienentäviä tekijöitä ovat lämpötilan kasvu, pehmittimet ja liuottimet. (Kurri ym. 2008, 58.)

Vanha yksikkö viskositeetille on poise (P). Veden viskositeetti on noin 0,01 P. Polymeerisulatteiden viskositeetit ovat tyypillisesti suuruusluokkaa 10^3 - 10^4 P. SI-järjestelmässä viskositeetin yksikkö on Pa * s. (Pa * s = 0,1 P) (Törmälä ym. 1992, 67.)

2.3.2 Viskoelastisuus

Karkeasti jaettuna kiinteiden materiaalien muodonmuutokset ovat viskoosiset, elastiset ja viskoelastiset muodonmuutokset. Viskoosinen muodonmuutos on hidasta, kimmotonta ja ennen kaikkea pysyvää. Elastinen muodonmuutos ei niinkään ole ajasta riippuva, ja se on palautuvaa. Toisin sanoen muodonmuutos tapahtuu välittömästi kuormituksen voiman vaikuttaessa materiaaliin. Kuten nimi antaa ymmärtää, viskoelastinen muodonmuutos on kahden yllä olevan muodonmuutoksen yhdistelmä. Se on ajasta riippuvainen, osittain palautumaton ja osittain palautuva. (Kurri ym. 2008, 58.)

2.4 Tiheys

Tiheys on muoveille ja polymeereille tärkeä ominaisuus. Tiheys $1\ 000\ \text{kg/m}^3$ vastaa veden ominaispainoa. Tiheyden mittaamiseksi on monenlaisia erialaisia menetelmiä. Tässä työssä käytettiin Arkhimedeen periaatetta. Muovien tiheyden

mittaamiseksi käytetään yleensä standardin ISO 1183 mainittujen mukaisia menetelmiä. (Järvelä & Heikkinen 2005d.)

Arkhimedeen periaatteessa mitattava kappale punnitaan sekä ilmassa että vedessä, sillä nesteeseen upotettuun kappaleeseen kohdistuu noste, joka vastaa kappaleen syrjäyttämää nesteen painoa (Järvelä & Heikkinen 2005d).

2.5 Kerrosten välinen adheesio

Adheesiolla tarkoitetaan molekyylien kykyä tarttua pintoihin kemiallisten vuorovaikutusten ansiosta. On olemassa useita teorioita, joilla selitetään tarttumisen mekanismeja. Mikään teorioista ei pysty selittämään täysin kattavasti kaikkia adheesioon vaikuttavia ja liittyviä tapahatumia.

Adheesioita selittäviä mekanismeja ova seuraavat:

- adsorptio ja kostutus
- diffuusio ja kemiallinen reaktio
- sähköstaattinen adheesio
- mekaaninen adheesio

(Fabrin & Vuorinen 2004, 9).

2.6 Ruiskuvalu

Ruiskuvalu on yleisin menetelmä kestopuovisten muotokappaleiden valmistamiseen. Se on menetelmä, joka on tarkoitettu suurille valmistussarjoille. Ruiskuvalun etuina on helppous, työstön nopeus ja edullisuus (suurissa sarjoissa). Suurimman kertahintaerän muodostavat koneet ja oheislaitteet sekä muotit, käytettävä raaka-aine, granulaatti, joka on muovien halvin muoto. (Järvelä & Heikkinen 2005c.)

Ruiskuvalutuotanto on yleensä pitkälle automatisoitu ja monimutkaisetkin kappaleet on mahdollista valmistaa ilman jälkikäsittelyn tarvetta. Valmistettävien

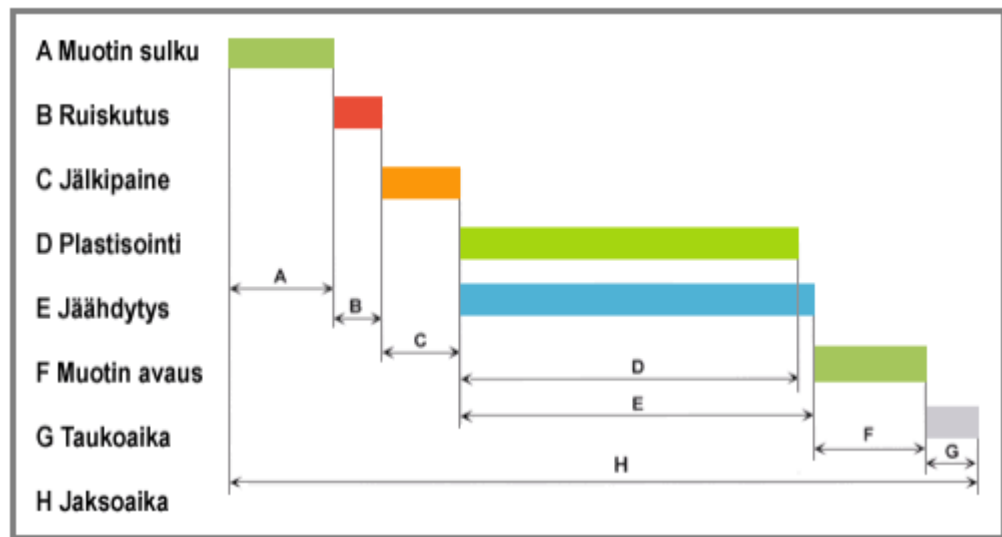
kappaleiden koon vaihtelu on laaja. Tuotteita, jotka painavat alle 0,001 grammaa, voidaan valaa mikroruiskuvalun avulla, kun toisaalta voidaan valmistaa myös noin 90 kg painavia esineitä.

Ruiskuvalutuotteen valmistusprosessissa muovi plastisoidaan mahdollisimman homogeeniseksi eli tasa-aineiseksi massaksi. Tämä tapahtuu sulasynterissä olevien sähkövastusten tuottaman lämmön sekä ruiskuvalukoneen ruuvin pyörimisestä aiheutuvan sisäisen kitkan avulla. Sulanut polymeeri ruiskutetaan suurella paineella ja nopeudella valmiiksi temperoituun muottiin. (Kurri ym. 2008, 74.)

2.6.1 Ruiskuvalujakso ja sen vaiheet

Ruiskuvaluprosessin hallinnalla on huomattava vaikutus ruiskuvalukappaleen laatuun. Prosessinhallinnalla voidaan vaikuttaa monipuolisesti laatusuhteisiin, kuten pinnanlaatuun, geometriseen muotoiluun sekä raaka-aineen ominaisuuksiin (mekaaninen ja kemiallinen kestävyys). Muotti, johon massa ruiskuvaluprosessissa valetaan, on hyvin tärkeä. Siksi muotin suunnitteluun ja valmistukseen kannattaa panostaa, sillä muottiin suunnittelu- ja valmistusvaiheessa tehtyjä virheitä ei voida enää prosessissa korjata tai jos voidaan, niin se on rahaa ja aikaa vievää. ”Hyvällä muotilla tehty kappale voidaan kuitenkin väärin tehdyllä prosessilla huonontaa tai suorastaan pilata.” (Järvelä 2000, 47.)

Ruiskuvalujakso voidaan jakaa useisiin vaiheisiin. Vaiheet ovat toisiaan seuraavia ja osittain limittäin tapahtuvia. Jaksoaika on aika, joka kuluu yhteen työkiertoon. Karkeasti jaettuna koko prosessi voidaan jakaa kolmeen jaksoon: muotin sulkemiseen, sen täyttämiseen ja muotin avaamiseen, jolloin kappaleen ulostyöntö tapahtuu. Yleensä kuitenkin ruiskuvalujaksotus jaetaan tarkemmin. Esimerkiksi kuviossa 4 ruiskuvalujakso on jaettu seitsemään osaan. (Järvelä 2000, 47; Kurri ym. 2008, 80.)



KUVIO 4. Ruiskuvalun jaksot (Järvelä 2000, 47)

A. Muotin sulkku: Muotin sulkemislake tulee tapahtua nopeasti ja joustavasti, mutta kuitenkin siten, että muottipuoliskot lukkiutuvat kolahtamatta ja pehmästi kiinni. Loppuvaiheessa voi olla hyvä, että muottisulun varmistuspainetta käytetään, jotta muotille ei aiheudu vahinkoa.

Ruiskutusyksikkö eteen: Ruiskutusyksikköä ei yleensä siirretä kuin ensimmäisellä työkierrolla. Ruiskutusyksikön suutin tulee ajaa muotin suuttimeen kiinni, koska polymeerisula pitää saada ruiskutuksen aikana virtaamaan muottisuuttimen kautta muottipesiin. Koska tähdätään lyhyeseen automaattiseen kiertonopeuteen, niin sylinterin suutin pidetään yleensä jatkuvasti kiinni muotissa. Näin voidaan myös välttää sylinterin ja muotin turhaa kulumista.

B. Ruiskutus: Kun kohdan A vaiheet on suoritettu, niin ruiskutus voidaan aloittaa. Tämän vaiheen neljä olennaisinta tekijää ovat ruiskutusnopeus ja -paine sekä jälkipaineen ajoitus ja sen suuruus. Ruiskutusvaiheen asetuksien merkitys kappaleen laadun muodostumiselle on merkittävä. Ruiskutus on ajallisesti nopea vaihe.

C. Jälkipaine eli pitopaine on ruiskutusjaksoa seuraava vaihe. Jälkipaineen idea on täyttää muottikutistuman aiheuttama tila muottipesässä. Tämän vaiheen aikana

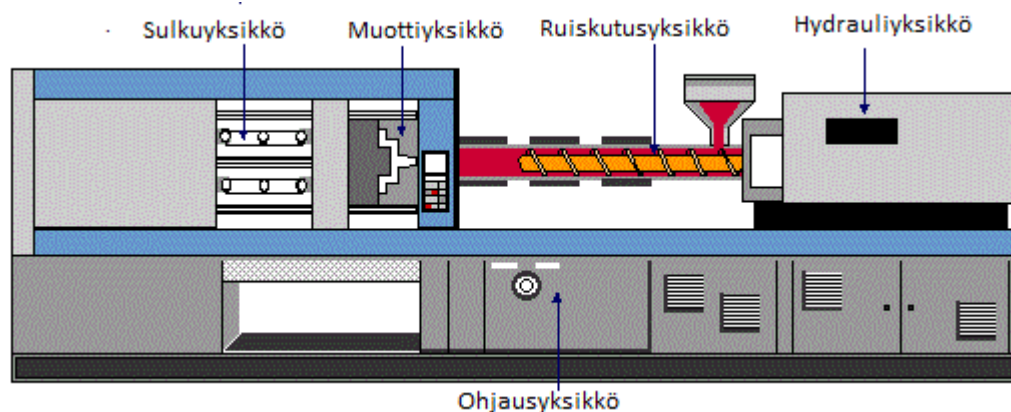
ruiskuvalukoneen ruuviin liike on hyvin hidas. Jälkipaineella on suuri vaikutus kappaleen mittatarkkuuteen, sisäisiin jännityksiin ja painoon.

- D. Annostus ja plastisointi: Tässä vaiheessa kone plastisoi uuden annoksen sylinteriin. Annostusvaiheessa ruuvi pyörii ja liikkuu taaksepäin ja samalla siirtyy uusi annos muovisulaa sylinterin etuosaan eli ruuvin eteen. Ideaalitulanteessa plastisointi päättyy vähän ennen jäähdytysaikaa.
- E. Jäähdytys: Vaihe, joka määrää koko ruiskutusvalojaksotuksen ajankulun. Jäähdytys alkaa, kun muovimassa kohtaa muotin pinnan, ja päättyy, kun valettu kappale on tarpeeksi jähmettynyt.
- F. Muotin avaus ja kappaleen ulostyöntö: Jäähdytysajan loputtua jähmettynyt kappale poistetaan joko jo muottipuoliskojen avauksen aikana tai avausliikkeen pysähtyttyä. Jos taukoa ei tarvita, niin seuraava ruiskuvalujakso voi alkaa.
- G. Tauko aika: Hyödyllinen esimerkiksi, jos kappale ei irtoa muotista vain yhdellä ulostyöntökerralla. Uusi työkierto voi alkaa taukoajan päätyttyä.

(Järvelä ym. 2000, 48; Kurri ym. 2008, 80–85.)

2.6.2 Ruiskuvalukoneen keskeisimmät osat

Ruiskuvalukoneet voidaan jakaa neljään tai viiteen toiminnalliseen yksikköön, kuten kuvion 5 ruiskuvalukone on jaettu.



KUVIO 5. Ruiskuvalukoneen yksiköt (Pmolds 2014)

Neljän toiminnallisen osan tehtävät:

- Sulkuyksikkö: On yleensä joko mekaaninen polvinivel- tai täyshydraulinen sulkuyksikkö. Yksikön tehtäviin kuuluvat muun muassa muotin liikkeiden säätely, muotin kiinnipitäminen ja kappaleen ulostyöntö.
- Ruiskutusyksikkö: Normaalisti vaakatasossa oleva puristin ja annosteluruuvi ja päässä sulkuventtiili. Tehtävinä raaka-aineen vastaanottaminen ja sen plastisointi, sekoitus sekä ruiskutus.
- Ohjausyksikkö on ruiskuvalukoneen aivot. Sen keskuksen muodostaa tietokone. Tämä tekee koneen säädön ja valvonnan mahdolliseksi
- Hydrauliyksikkö: Tämä yksikkö mahdollistaa koneen liikkeitä (lineaari). Muodostuu useista komponenteista. Sähkökäyttöisyys on yleistymässä.

(Järvinen 2000, 106–107; Kurri ym. 2008, 76–79.)

2.7 Ekstruusio eli suulakepuristus

Ekstruusio eli suulakepuristus on muovin sulatyöstömenetelmä, jossa muoviraaka-aine sulatetaan yhdessä siihen sekoitettujen mahdollisten lisä- ja väriaineiden kanssa, jonka jälkeen se puristetaan suulakkeen läpi. Suulakkeen profiili vaihtelee halutun ulostulon mukaan. Ekstruusio on tärkeä kestopuovien ja elastien työstömenetelmä. Tonnimäärällisesti mitattuna se on ylivoimaisesti suurin valmistusmenetelmä. Ekstruusiolla voidaan valmistaa muun muassa profiileita, putkia, kalvoja ja köysiä sekä päällystää esimerkiksi kartonkia ja kaapeleita.

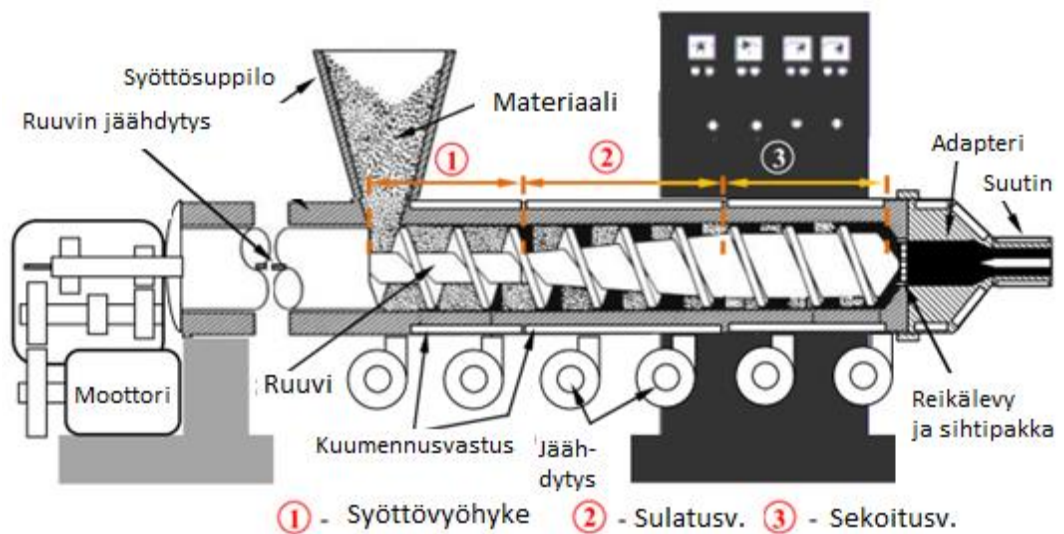
Myös monet muut menetelmät hyväksikäyttävät ekstruusion periaatetta ja useimmiten ekstruusio on osa isompaa kokonaisuutta. Suulakepuristimena eli ekstruuderina voidaan käyttää sekä yksi- että kaksiruuviekstruuderia.

Kaksiruuvipuristin on yleensä käytössä PVC:n ekstrudoinnissa, muulloin kestopuovien valmistamisessa suulakepuristamalla käytetään yksiruuvipuristinta.

(Järvelä & Heikkinen 2005a; Kurri ym. 2008, 100.)

2.7.1 Ekstruuderin toiminta ja rakenne

Ekstruuderi muodostuu sylinteristä ja sen sisällä pyörivästä ruuvista. Ruuvi on olennainen osa ekstruuderin toimintaa. Ruuvien geometrialla on mahdollista säädellä valmistusteknisiä ominaisuuksia ja ekstruuderit voidaan luokitella ruuvien mukaan. On olemassa esimerkiksi pitkärueviekstruudereita, jotka ovat yleisimpiä ja adiapaattisia ekstruudereita.



KUVIO 6. Ekstruuderin vyöhykkeet (Isac Group 2012)

Ekstruuderin rakenne voidaan jakaa kolmeen vyöhykkeeseen. Vyöhykkeet näkyvät hyvin myös kuviossa 6. Syöttövyöhykkeellä ruuvi siirtää raaka-ainetta syöttösuppilosta kohti suutinta. Raaka-aine sulaa matkan varrella joko kitkan tai kitkan ja sähkövastusten avulla – aivan kuten ruiskuvalussakin. Tätä vyöhykettä sanotaan sulatusvyöhykkeeksi. Sekoitusvyöhykkeellä aivan ruuvien loppuosassa sulanut muovi homogenisoidaan. Ennen suuttimelle menoa sula massa kulkee vielä sihtipakan lävitse. Sen tehtävänä on seuloa mahdolliset roskat pois ennen suutinta. Sihtipakka nostaa myös muovimassan painetta. (Kurri ym. 2008, 101–102.)

2.7.2 Langan valmistaminen ekstruuderilla

Erilaisia profiilituotteita valmistetaan yllä kuvatuun ekstruuderimenetelmän avulla. Yleensä profiilientuotantolinjassa muuttuvina osina ovat juurikin suulakkeet ja

tuotekohtaisina kalibrointilaitteet. Kalibrointilaite antaa muovilangalle tarkat ja lopulliset mitat. Vetokalibroinnin avulla oikea koko saadaan vetämällä profiilia nopeammin kuin se tulee ulos suulakkeesta. Suulakkeen on oltava isompi kuin tuote. Mahdollinen jäähdyttäminen voidaan toteuttaa vesisuihkulla ja/tai altailla. Vetokalibrointi soveltuu pääsääntöisesti umpiprofiilien valmistukseen. (Kurri ym. 2008, 115–117.)

3 VALMISTUSMATERIAALIT

3.1 Iskulujitettu polystyreeni eli SB tai PS-HI (HIPS)

Polystyreeni on aromaattinen polymeeri, jota valmistetaan aromaattisesta styreenimonomeerista (Nykänen 2009, 1). Polystyreeni on valtamuovi. Se on amorfinen ja lasimainen polymeeri; homopolymeerinä lasinkirkas ja hauras, mutta jäykkä. Iskunkestävää polystyreeniä valmistetaan lisäämällä kumia tai butadieeni kopolymeeriä. Näin saadaan kasvatettua polymeerin sitkeyttä ja iskulujuutta. ”Iskulujan polystyreenin lyhenteenä yleisesti sen kemiallista lyhennettä SB tai ominaisuuksiin viittaavaa lyhennettä PS-HI (myös HIPS), jossa kirjaimet HI merkitsevät englanniksi iskulujuus sanoja high impact” (Järvinen 2008, 57; Nykänen 2009,1).

3.1.1 Valmistus

Jo 1930-luvulla tekokumi butadieeni oli tunnettu. 1940-luvulla siitä ryhdyttiin valmistamaan sitkeämpää muovia.

PS-HI:tä voidaan valmistaa kemiallisesti kopolymeroimalla. Lisäämällä polybutadieeniä styreenin polymeroinnin aikana voidaan saada se sitoutumaan kemiallisesti styreeniin. Näin muodostuu oksaskopolymeeri, joka auttaa lopun polybutadieenin lisäämisessä. Näin aikaansaadaan iskunkestävää polystyreeniä.

Toinen PS-HI:n valmistuskeino on mekaanis-kemiallinen prosessi, jossa polystyreeniä ja polybutadieenikumia sekoitetaan sekoittimessa. Saatu materiaali on kuitenkin käyttökohteiltaan rajoittunut. Sen iskulujuus ja valonkestävyys on heikompaa kuin kemiallisesti valmistetun. (Nykänen 2009,1-2.)

Läpinäkyvää ja iskunkestävää polystyreeniä on mahdollista valmistaa butadieenifaasiohuutta säätämällä, mutta nämä laadut ovat kalliimpia kuin PS-HI:t ja kestävät huonosti lämpöä (Järvinen 2008, 58).

3.1.2 PS-HI:n ominaisuudet

Ominaisuudet riippuvat valmistusmenetelmästä.

”Kopolymeroimalla molekyyliketjuun butadieenikumia saadaan polystyreenin iskulujuus paremmaksi, mutta samalla muovi menettää läpinäkyvyytensä” (Järvinen 2000, 34). Läpinäkyvyyden lisäksi pinnan kovuus ja visuaalinen laatu heikkenevät verrattuna tavalliseen polystyreenin, myös lämmönkesto laskee. Kuitenkin voidaan sanoa, että PS-HI:llä on hyvä lämmönkesto.

PS-HI:n kemiallinen kestävyys ei ole kovin hyvä. Se liukenee aromaattisiin ja kloorattuihin hiilivetyihin, mutta kestää kuitenkin suoloja ja mineraaleja. Muilla styreenin kopolymeereillä, kuten ABS:lla, on parempi kemiallinen kestävyys. Bensiinin, ketonien ja etanolin vaikutuksen alaisena PS-HI:n fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet heikkenevät. (Järvinen 2008, 67; Nykänen 2009,3-6.)

3.1.3 PS-HI:n käyttökohteet, työstömenetelmät ja hinta

Polystyreeni on käytetyin muovi levyekstruusiossa. PS:stä tai PS-HI:stä valmistetut levyt jatkojalostetaan lämpömuovaamalla esimerkiksi jogurttipurkeiksi tai itsepalveluruokatiskien astioiksi. PS-HI:tä käytetään usein kohteissa, joissa ei tarvita mainittavasti lujutta vaan iskunkestävyyttä. Jääkaappien ja pakastimien seinät ovat PS-HI:tä. Iskunkestävää polystyreeniä voidaan prosesseida myös ruiskuvalamalla. Myös muu koneistaminen onnistuu, sillä työstettävyys ja jälkikäsittely ovat helppoa. Sulatyöstön lämpötilaväli on + 160 – 230 °C. (Järvinen 2008, 59; Nykänen 2009,6-7.)

Iskunkestävä polystyreeni on edullinen muovi. Kuitenkin polystyreenin hinta on ollut nousussa viime vuosina. Hinnan määrittää pääosin sen raaka-aine monostyreeni. Muoviteollisuuden lisäksi maaliteollisuus käyttää runsaasti styreeniä. Samean PS-HI:n hinta on 1,6 €/kg. Kirkkaan hinta on huomattavasti korkeampaa 2,5 €/kg. (Tampereen teknillinen yliopisto 2010.)

3.2 Polylaktidi eli PLA

Polylaktidi, PLA, on kestopuovi. Se on osakiteinen biopolymeeri, jonka perusraaka-aineena on tärkkelys, selluloosa tai sokeri. Polylaktidi hajoaa täydellisesti hiilidioksidiksi, vedeksi ja humusaineeksi luonnossa.

3.2.1 Valmistus

Tärkein synteettisten biohajoavien polymeerien ryhmä on biohajoavat polyesterit. Synteettiset, biohajoavat, polymeerit valmistetaan joko uusiutuvista raaka-aineista tai öljystä. PLA on tärkein uusiutuvista raaka-aineista valmistettu biohajoava polyesteri. Myös orgaaniset lisä- ja apuaineet ovat biohajoavia. Polylaktidin valmistus tapahtuu polymeroimalla maitohappoa eli laktidia, jota saadaan synteettisillä valmistusmenetelmillä tai käymisprosessin avulla tärkkelyksestä. (Järvinen 2008, 110–111; Kurri ym. 2008, 43.)

3.2.2 Ominaisuudet

Polylaktidi on kirkas ja osakiteinen polymeeri. Sen lasittumislämpötila on noin 60 °C. Lisäaineetonta PLA:ta voidaan verrata polystyreeniin ja PET:iin mekaanisten, öljyn- sekä rasvankestollisten ominaisuuksien osalta. Lääketieteellisissä sovelluksissa PLA:lta vaaditaan erityisominaisuuksia, kuten erinomaista hygieenisyyttä ja sopivia mekaanisia ominaisuuksia. Vaatimuksiin voidaan vastata käyttämällä PLA:n homo- ja stereokopolymeereja. (Järvinen 2000, 58; Kurri ym. 2008, 43.)

3.2.3 Käyttökohteet, työstömenetelmät ja hinta

PLA:n käyttökenttä on laaja ja monia erilaisia työstömenetelmiä voidaan käyttää. Sitä käytetään muun muassa pakkausteollisuudessa ja lääketieteellisissä sovellutuksissa. PLA:lla voidaan korvata pakkauksissa polystyreeniä tai polyeteenitereftalaattia. PLA:n hintavälinvaihtelu on huomattavaa eri sovelluskentillä. Yleinen PLA:n kilohinta on kuusi euroa, mutta lääketieteellisissä sovelluksissa kilohinta saattaa nousta, jopa kolmeentuhanteen euroon kiloa kohti.

(Tampereen teknillinen yliopisto 2010.) Edellä mainitut hinnat ovat granulaateille.
Yksi kilo tulostuslankaa maksaa noin 25–30 €/kg.

4 3D-TULOSTAMINEN

3D-tulostamisen synty ajoittuu 1980-luvulle, jolloin alkuvuosikymmenestä patentoitiin eri tekniikkoihin liittyviä menetelmiä ja kymmenyksen loppuvuosina julkaistiin ensimmäisiä kaupallisia koneita. Esimerkiksi vuonna 1987 Charles Hullin 3D Systems julkaisi ensimmäisen streolitografia koneensa nimeltä SLA1 ja vuoden tämän jälkeen Japanissa NTT Data CMET inc julkaisi oman versionsa.

Koska tekniikka on verrattain vielä nuorta, niin sen sanasto ei ole vielä yhtenevää ja vakiintunutta, ei suomenkielisessä tai englanninkielisessä sanastossa.

Pääasiallisesti englanninkielistä sanastoa käytetään.” 3D-tulostaminen”-käsitteen alaisuudessa on monia eri tekniikoita, ja niistä on omat alalukunsa. Myös käsitteitä, joilla tarkoitetaan 3D-tulostamista, on useita. Niitä avataan tässä luvussa.

Kaikki alkoi nykyään 3D-tulostamiseksi määritellystä stereolitografiasta. Aluksi sitä nimitettiin rapid prototypingksi eli nopeaksi koerakentamiseksi tai pikamallinnukseksi. Nimi oli silloin hyvin kuvaava, sillä stereolitografia oli nopeaa verrattuna vanhoihin mallinrakentamismenetelmiin. Rapid prototyping on ollut pitkään oikeanlainen termi kuvaamaan prosessia, mutta termistä on tullut viime aikoina vähemmän relevantti, koska tehdyt kappaleet ovat yhä useammin suunnattu loppukäyttöön kuin koemalliksi. Uusia termejä ovat: Solid Free Form Fabrication, Rapid Manufacture, Additive Layer Manufacture (ALM) ja 3D printing. Sekä ALM ja 3D printing ovat molemmat saaneet kannatusta, koska ne kuvaavat valmistusprosessia totuudenmukaisesti toisin kuin esimerkiksi rapid manufacture, sillä prosessi on välillä hyvin kaukana nopeasta. Varsinkin Yhdysvaltalaisessa kirjallisuudessa ja harrastuspiireissä ALM:ää tai pelkkää Additive manufacturea käytetään kuvaamaan, kun puhutaan ammattikäyttöön tarkoitetuista kalliista koneista, ja 3D printingiä, kun tarkoitetaan avoimen lähdekoodin tai muuten halvemmän hinnan kuluttajajille suunnattuja koneita. Muualla maailmassa vastaavaa jaottelua ei ole näkyvissä. (Hoskins 2013, 37–38; Lipson & Kurman 2013, 65.)

4.1 Erilaiset 3D-tulostimet

Tulostimien jakaminen kahteen luokkaan helpottaa erilaisten tulostusmenetelmien ymmärtämisessä. Ensimmäiseen luokkaan kuuluvat tulostimet, jotka kasaavat kerroksia raaka-aineesta. Nämä tulostimet ruiskuttavat, suihkuttavat tai puristavat raaka-aineen ruiskun tai suuttimen läpi. Raaka-aine voi olla nestemäisessä, tahnamaisessa tai jauhomaisessa muodossa. Tämän luokan koneet ovat usein koti- ja pientoimistokäytössä. Toiseen luokkaan kuuluvat koneet taas sitovat ja kovettavat raaka-aineet. Raaka-aine kovetetaan joko laserilla tai muulla kiinnitysaineella; lämmön tai valon avulla voidaan jauhomainen raaka-aine tai fotopolymeeri muuttaa kiinteäksi kappaleeksi. (Lipson & Kurman 2013, 68.)

4.1.1 Ensimmäinen luokka – Fused Deposition Modeling (FDM)

Löyhästi määriteltynä Fused Deposition Modeling (FDM) -tulostin on kone, joka puristaa jotain pehmeää raaka-ainetta tulostinpään läpi. Tämän tulostintyyppin kehitti Scott Crump 1980-luvulla. FDM on yleisin 3D-tulostusmenetelmä, osittain siksi että alkuperäiset patentit ovat nyt rauenneet ja osittain Dr Adrian Bowyer, RepRapin perustajan, Bathin yliopistossa tekemän työn asiasta (Hoskins 2013, 44.)

Tulostimen firmware laskee tulostuspäälle mekaanisen kulkureitin ja toiminnot. Tulostinpään pitää tietää muun muassa mihin tulostinsuuttimen tulee piirtää kappaleen rajat ja mikä niiden muoto on, kuinka paljon raaka-ainetta pitää laittaa. Tulostin tulostaa ensin kappaleen ulkorajat, minkä jälkeen se täyttää kappaleen halutulla tavalla. Ensimmäisen valmiin kerroksen jälkeen kone joko nostaa tulostuspäätä tai laskee tulostusalustaa (mallista riippuvaa) ja tulostaa seuraavan kerroksen rajat ja täyttää ne. Tämä jatkuu, kunnes kappale on valmis. Tulostettavasta kappaleesta riippuen aikaa voi mennä puolesta tunnista päivään.

Tämän tyyppin tulostimien hyvinä puolina ovat halvat hinnat ja laaja materiaalivalikoima. Periaatteessa mitä tahansa materiaalia, jota voi puristaa

suuttimen läpi, voi tulostaa. Ruokapuolella tulostettuja materiaaleja ovat muun muassa juusto, suklaa ja piparitaikina. Bio-tulostamisen tutkimusvaiheessa on ”elävän musteen käyttö” eli geelissä olevien elävien solujen tulostamista kehitellään. Useimmat FDM-tyypin tulostimet kuitenkin käyttävät vartavasti niille tehtyjä muoveja, jotka myydään nauhana. Huona puolena on tulostimen kyky tulostaa vain extrudoitavia eli pursotettavia materiaaleja. Esimerkiksi sulaa metallia tai lasia ei voida tällä laitteella tulostaa. FDM-koneita valmistaa HP, Stratasys, Makerbot, UP, Bits from Bytes ja A1 Technologies ja monet muut. (Hoskins 2013, 37–38; Lipson & Kurman 2013, 68–70.)

4.1.2 PolyJet Printing

Israelilainen yhtiö, Object Geometries, julkisti vuonna 2000 PolyJet-tulostimet. Niiden tekniikka yhdistää kummankin mainitun tulostusluokan. Tulostuspää suihkuttaa nestemäistä fotopolymeeriä erittäin ohuiksi kerroksiksi. Kiinnitys tapahtuu kirkkaalla UV-lampulla. Tulostimen hyviä puolia ovat nopeus ja tarkkuus. Kerroksen saa ohuimmillaan 16 mikronin vahvuiseksi. Tarkkuuden ansiosta laitteita hyödynnetään teollisuudessa ja lääketieteellisissä sovelluksissa, joissa äärimmäinen tarkkuus ja nopeus ovat avainasemassa. Tulostinpäitä voi olla useita, joten monen materiaalin tulostaminen samaan työhön on mahdollista. Huonona puolena voidaan pitää tulostimen käyttämän materiaalin rajoituksia. Fotopolymeerit ovat kalliita erikoismuoveja, jotka reagoivat UV-valoon. Ne ovat hauraita, mikä luonnollisesti rajoittaa käyttökohteiden määrää. (Lipson & Kurman 2013, 70.)

4.1.3 Laser Engineered Net Shaping (LENS)

Jauhomainen materiaali puhalletaan suuttimesta kohti voimakasta, ohjattua lasersädettä. Osa materiaalista ei kohtaa lasersädettä vaan putoaa sivuun, mutta lasersäteeseen osuvat sulavat kiinni jatkuvasti kasvavan kappaleen pintaan. Kappale kasvaa kerros kerrokselta. Tulostimen hyvänä puolena on, että sillä voidaan tulostaa kovia materiaaleja, kuten titaania ja ruostumatonta terästä. LENSin avulla voidaan tulostaa monimutkaisia kappaleita metallista. Tulostussuuttimia voi olla useita samaan aikaan käytössä. Eri metalleja samaan

aikaan puhaltamalla voidaan luoda käyttökohteelle haluttu metalliseos. Lentokone- ja autoteollisuus käyttävät LENS-tulostimia. (Lipson & Kurman 2013, 71–72.)

4.1.4 Laminated (tai layered) Object Manufacturing (LOM)

LOM on yksi varhaisimmista 3D-tulostamisen menetelmistä. Sen kehitti alun perin Helysis Inc. Yhdysvalloissa. Ensimmäinen tuotantokone valmistettiin 1991.

LOM-tulostimet eivät käytä tulostuspäätä kerrosten muodostamiseen vaan laminoivat nimensä mukaisesti ohuita kalvoja kiinteäksi kolmiulotteiseksi kappaleeksi. Tulostimen veitsi tai lasersäde leikkaa kappaleen muodon ohuesta paperista, muovista tai metallikalvosta. Kun kalvo on leikattu, LOM-tulostin siirtää ylimääräiset kalvojämmät sivuun ja asettaa uuden liimautuvan kalvon paikalleen ja leikkaa siitä seuraavat kerrokset. Kun kaikki kappaleen osat on leikattu, kone painaa ja laminoi ne yhteen. Jotkut LOM-tulostimet käyttävät ultraääntä alumiinikalvojen yhteenlaminoimiseen. (Hoskins 2013, 47; Lipson & Kurman 2013, 72–73.)

4.1.5 Toinen luokka – Stereolitografia (SL, SLA)

Stereolitografia on yksi aikaisimmista kaupallisista 3D-tulostamisen muodoista. Pienen jääkaapin kokoisen tulostimen sisällä on säiliö, jossa on nestemäistä fotopolymeeria. Fotopolymeerin yli pyyhkäisee lasersäde noudattaen kappaleen poikkileikkauksen rajoja. Laser kovettaa fotopolymeerin. Jokaisen laserpyyhkäisyn jälkeen kappale uppoaa määritellyn määrän verran alemmas fotopolymeeriin ja nestemäinen fotopolymeeri peittää sen pinnan. Tulostettu kappale pitää useimmiten puhdistaa, ja joskus kappaleen pintoja pitää hioa. Tuotteen tarkoituksiperästä riippuen UV-valouunnissa kovettaminen on mahdollista.

Menetelmän hyviä puolia on laserin nopeus ja tarkkuus. Useat laserit voivat työskennellä samaan aikaan, ja tarkkuus onkin parempaa kuin millään nykyisillä ekstruusiotyyppisen tulostuspään omaavilla 3D-tulostimilla. Fotopolymeeri-laatuja ja valikoiman laajentuessa laajenee myös tulostettavien kappaleiden

mahdollisuus. SL:n huonoina puolina on se, että tällä hetkellä vain yhtä materiaalia kerrallaan voidaan tulostaa. Yleisimmät kesto- muovit ovat yleensä fotopolymeerejä kestävämpiä. Myös fotopolymeerien myrkyllisyys on miinuspuoli. Useimmat SL-tulostimet ovat ylläpidoltaan monimutkaisia ja korkea hinta pitää ne tavallisten kuluttajien ulottumattomissa. Uutta, halvempaa, lasertekniikkaa hyödyntävä SL-tulostimet ovat tulossa markkinoille. (Hoskins 2013, 44; Lipson & Kurman 2013, 73–74.)

4.1.6 Laser Sintering (LS, SLS)

Myös LS on tekniikka, joka on kehitetty 1980-luvulla. Sen ideoivat Carl Deckard ja Joseph Beaman, Teksasin yliopiston tutkijat. Menetelmä on samantapainen kuin SL:ssä. LS:ssä nestemäinen fotopolymeeri korvataan jauheella. Lasersäde sulattaa jauhepedin pintaa halutulla tavalla ja jauhe sulaa säteen osumista kohdilta. Kone annostelee uuden kerroksen jauhetta päälle ja alentaa tulostusalustaa hivenen. Jauheella raaka-aineena on monia etuja verrattuna nestemäiseen materiaaliin. Jauhe voi esimerkiksi toimia tukimateriaalia tulostettavalle kappaleelle ja ylijäänyttä jauhetta voi mahdollisesti kierrättää. Suurin etu on materiaallinen laaja skaala. Monia materiaaleja voi työstää jauhemaisesta muodosta (nylon, teräs, pronssi...) Valitettavasti kuitenkin LS-tulostimet jättää kappaleen pinnan huokoiseksi. Myöskään useita jauheita ei voida tulostaa kerralla. Menetelmä ei välttämättä ole myöskään kaikkein nopein, sillä kappaleen tarvitsee jäähtyä, ennen kuin sen voi ottaa ulos koneesta. Kerrospaksuudesta riippuen jäähtymiseen saattaa kulua jopa päivä. Laitteet eivät sovellu vielä tavallisten kuluttajien käyttöön. (Lipson & Kurman 2013, 75–76.)

Metallin lasersintrauksesta voidaan joskus käyttää omaa lyhennettä DMLS – Direct metal laser sintering. Menetelmä ei eroa muuten muovin LS:stä kuin sillä, että metallin lasersintraukseen tarvitaan tukirakenteita pitämään kappale rakenteellisesti virheettömänä. Tämä luonnollisesti lisää jälkityöstämisen määrää. (Hoskins 2013, 51.)

4.1.7 Three Dimensional Printing (3DP)

MIT:n oppilas Paul Williams ja hänen ohjaajansa, Professori Eli Sach, kehittivät 1980-luvun lopussa 3DP:n. Menetelmä patentoitiin ja lisenssejä myytiin useille yrityksille. 3DP:n menetelmä on halpa, siinä kerrokset muodostetaan puristamalla liimaa raaka-aineeseen. Raaka-ainevalikoima on laaja ja värejä on mahdollista tulostaa laittamalla väriainetta liiman sekaan. Onnistuneesti on tulostettu muun muassa lasijauhetta, luujauhoa ja sahanpurua. Jotkut materiaalit tulee vielä kovettaa uunissa. Kuitenkin kerrosten ohuus jää melko paksuksi verrattuna laser 3D-tulostimien kerrospaksuuteen. Lopputulos saattaa olla hieman karkeapintainen. (Lipson & Kurman 2013, 76–77.)

4.2 Ideasta tulostamiseen

Tiivistetty suunnitteluprosessi ennen 3D-tulostuksen aloittamista: aluksi on jokin idea tulostettavasta kappaleesta mielessä. Ideaa aletaan työstämään ja jatkojalostamaan tietokoneen avulla; kappale mallinnetaan CAD-ohjelmalla. Tulostettava mallinnos muutetaan STL-muotoon ja kappale viipaloidaan kerroksiksi, jotka lähetetään tulostimelle. Tulostimen säädöt asetetaan materiaalia ja kappaleen haluttua pinnanlaatua vastaaviksi.

5 KOEKAPPALEIDEN VALMISTAMINEN JA TESTAAMINEN

5.1 Langan valmistaminen ekstruuderilla

PS-HI:n tulostuslanka valmistettiin muovilaboratoriossa Brabender-ekstruuderilla samoista Totalin Lacqrene granulaateista kuin ruiskuvaletut koekappaleetkin. Ekstruuderin kalibrointilaitetta korvasi vetolinja, ja sen nopeutta säätämällä ja ruuvien pyörimisnopeutta muuttamalla haettiin langalle oikea halkaisija. Tavoitehalkaisijan ollessa pieni, vain 1,75mm, ei jäähdystystä varsinaisesti kaivattu, vaan lanka jäähdyi huoneenlämmössä. Valmistettu lanka kelattiin käsin rullalle. Lankaa valmistettiin kaksi erää. Ensimmäisen erän langanpaksuus oli suurimmalta osin tasan 1,75 mm, mutta lankaan oli päätyntä paksumpia kohtia. 3D-tulostimen suutin ja sitä edeltävät hammaspyörät eivät kyenneet liikuttamaan ensimmäisen erän lankaa kuhmun kohdatessaan, vaan se veti koneen jumiin. Langan paksumpien kohtien poistoa varten porattiin metalliin 1,75 mm:n reikä, jonka avulla oli tarkoitus käydä lanka läpi ja kuoria kuhmut pois, mutta idea ei toiminut, ainoastaan lanka katkeili. Toisen erän lanka ekstrudoitiin tarkoituksella halkaisijaltaan 1,60–1,70 millimetriseksi.

5.2 Koekappaleen ruiskuvalaminen

PS-HI-koekappaleet valettiin muovilaboratorion Battenfeld CD 200-ruiskuvalukoneella. Ruuvien lämpötilat olivat ensimmäisestä vyöhykkeestä alkaen 210 °C, 210 °C, 200 °C ja 200 °C. Jäähdytysaika oli 15 s.

5.3 Koekappaleiden tulostaminen

Koekappaleiden tulostamiseen käytettiin FDM-tekniikkaa hyödyntävää 3D-tulostinta: Felix 3.0:sta. Tulostin hankittiin muovilaboratorioon kevään 2014 aikana ja näin ollen oli kappaleita valmistettaessa aivan uusi.



KUVIO 7. Felix 3.0 tulostin (Felix Printers 2014)

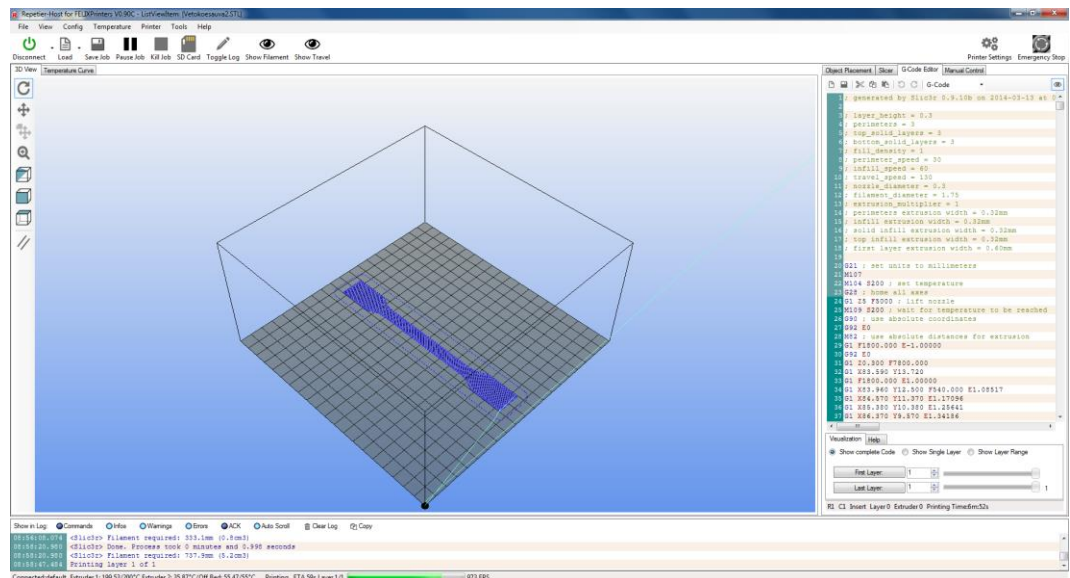
Tulostimen ominaisuudet taulukossa 1:

TAULUKKO 1 Felix 3.0 ominaisuudet (Felix Printers 2014)

Power	max 220W
Voltage	110-240V, automatically adjusting powersupply
Nozzle diameter <i>Suuttimen halk.</i>	0.35mm
Build volume (x, y, z) <i>Tulostusalue</i>	(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 <i>Kerrospaksuus</i>	50 micron to 300 micron
Heated bed temperature range <i>Tulostuspöydän lämpötila-alue</i>	0 - 95 degC, When isolating bottom temp can go upto 115 degC. Ultra light aluminum

	sandwich plate.
Nozzle temperature range <i>Suuttimen lämpötila-alue</i>	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

Koekappale mallinnettiin SolidWorksillä ja tallennettiin suoraan STL-tiedostoksi. Tallennettu tiedosto aukaistiin Felix-tulostimen mukana tulleella Repetier Host -ohjelmalla, (ks. KUVIO 8). Aluksi kappaleita tulostettiin vain yksi kerrallaan. Kappaleen sijaintia ja määrää pystyi muuttamaan virtuaalisella tulostusalustalla. Tarkempia tulostusasetuksia, kuten nopeutta ja täytön asetuksia, määriteltiin Slic3rillä. Kun asetukset oli tehty, siirryttiin kappaleen viipaloimiseen. Myös tämä suoritettiin Slic3rillä, joka muuttaa kappaleen tiedot g-koodiksi, jotka lähetetään tulostimelle. G-koodia on mahdollista muokata tulostuksen ajanakin. G-koodin rivit sijaitsevat kuvion vasemmassa laidassa.



KUVIO 8. Repetier Hostin näkymä

PLA-koesauvat tulostettiin 3D-tulostimen mukana tulleesta harmaasta PLA-nauhasta, jonka halkaisija on 1,75 mm. Kappaleen oikeiden tulostusasetusten

löytämiseen menee aikaa, jos haluaa mahdollisimman tiiviin kappaleen. Kerrosten paksuudeksi valittiin pienin mahdollinen, 0,3 mm. Täytön kuvioksi valittiin 45° suuntaavaa kuvionti, osittain siksi, että se oli nopein, osittain sen kokonaisvaltaisen täytön vuoksi. Olisi ollut mielenkiintoista verrata eri täyttöjen vaikutusta kappaleen kestävyteen, ja tehdä jokaisesta täyttökuvioista oma koesarjansa, mutta aikataulullisista syistä, joten kaikissa kappaleissa on sama kuvio. PLA tulostuu todella helposti jo alhaisissa lämpötiloissa. Nostamalla vähän sekä suuttimen että tulostuspedin lämpötilaa saadaan kappaleen ulkonäkö siistimmäksi. Kerrokset sulautuvat toisiinsa paremmin. PLA-rullan omat lämpötilaohjeet olivat suuntaa-antavia, isolla vaihteluasteikolla. Verrattavuuden vuoksi lämpötilat pidettiin samoina kaikissa koesauvoissa. Eri lämpötiloissa tulostettujen koesauvojen vertailu olisi saattanut myös tehdä pientä hajontaa tuloksiin. Yhden koesauvan tulostamiseen meni noin puoli tuntia aikaa.

PS-HI:n tulostaminen oli ongelmallisempaa kuin PLA:n, koska PS-HI:n T_g on korkeampi. Kappale lähti liukumaan tulostusalustalta aina kesken tulostuksen. Pysyvyysongelma ratkaistiin nostamalla tulostusalustan lämpötila ilman kotelointia saatavaan maksimiin. Tulostimen maksimilämpötila käytännössä oli 88 °C. Kappaleen alustassa pysyvyyttä tehostettiin vielä suihkuttamalla liimaa alustan teippipäälisen ylle. Edellä maintittujen pysyvyysongelmien lisäksi PS-HI:tä tulostettaessa oli järjestettävä hyvä tuuletus, sillä styreenimuovit ovat erittäin voimakkaan hajuisia lämmitessään. Useamman PS-HI-kappaleen tulostaminen samaan aikaan oli mahdollista. Mutta kuten kuvioista 9 nähdään, niin pidentynyt tulostusaika vaikutti ainakin pintakerrosten sulamiseen. Vertailukelpoisuuden vuoksi sauvat tulostettiin yksitellen. PS-HI:n ja PLA sauvojen tulostusnopeudet pidettiin samoina, joten tulostusaika ei muuttunut. Kuitenkin valmistautumisineen PS-HI:n tulostamisessa kesti kauemmin, sillä tulostuspöytä lämpeni hitaasti.



KUVIO 9. Kuvan kaksi ylemmää PS-HI-koekappaletta on tulostettu yhtä aikaa. Alempi koesauva on tulostettu yksinään.

5.3.1. Pystyintulostettu koekappale

3D-tulostuksen kerrosten välisen adheesion selvittämiseksi valmistettiin PLA:sta koekappale, jonka poikkileikkaus oli 4 mm x 10 mm. Koska tahdottiin pureutua juuri kerrosten väliseen adheesion, niin kappale tulostettiin pystyyn. Kerroksia kappaleella oli 133, ja tulostukseen meni aikaa 28 minuuttia. Poikkipinta-alan ollessa pieni kappaleen keskustaastaan muodostui täysin umpinainen muovisula ja sivuille kerrokset.

5.4 Vetokoe

Vetokoe suoritettiin koesauvoille koulun uudemmalla, Shimadzu, vetokoneella. Tekstiililaboratorion pienemmällä Lloyd LRX -vetokoneella vedettiin lankaa ja pienempiä koekappaleita kerrosten välisen adheesion selvittämiseksi.

5.5 Iskukoe

Koesauvojen iskulujuutta testattiin Izod-menetelmällä. Lovettu koekappale kiinnitettiin laboratorion heiluri-iskurin telineeseen pystyasentoon, minkä jälkeen heiluri päästettiin vapaaksi ja mittari näytti koekappaleen absorboiman iskuenergian.

5.6 Kapillaarireometri

MAT11-ryhmä tutki Muovitekniikan laboraatio -opintojaksolla keväällä 2014 eri muovien viskoelastisia ominaisuuksia. Yksi tutkittavista materiaaleista oli PS-HI, sama kuin koekappaleissa käytetty. Tutkimuksissa käytettiin laboratorion Rosandin RH7 Flowmaster-konetta.

5.7 Tiheys

Muovilaboratoriossa on rakennettu lisälaitte vaa'alle, mikä mahdollistaa Arkhimedeen menetelmän punnitsemisen. Koekappaleen palat punnittiin sekä ilmassa että vedessä. Tärkeää oli saada vedessä punnittaessa kaikki ilmakuplat pois kappaleesta.

6 TULOKSET

6.1 Iskukoe

Yksittäiset iskukoe-testistä saadut tulokset ovat listattuna taulukkoon, joka löytyy liitteestä 2. Merkittävä osa koekappaleiden murtumisista oli tyypiltään täydellisiä, vain muutamia nahkamaisia, saranamurtumia esiintyi PS-HI-koesauvojen kohdalla.

Tulosten laskemiseen käytettiin seuraavaa kaavaa (2):

Iskulujuus (Izod) [kJ/m^2] saadaan kaavalla:

$$\frac{W}{h*b} * 10^3$$

KAAVA 2

jossa W on koekappaleen absorboima iskuenergia [J]

h on koekappaleen paksuus [mm]

b on koekappaleen leveys (loven kohdalta) [mm]

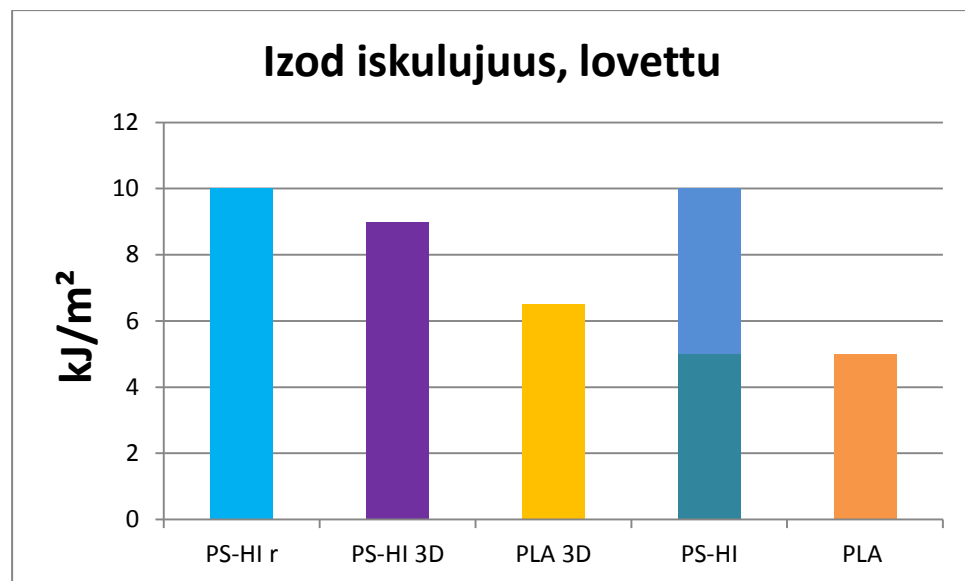
TAULUKKO 2. Iskulujuuden lasketut arvot

Materiaali	b [mm]	h tilastollinen keskiarvo [mm]	W (ka) [J]	Iskulujuus (Izod) [kJ/m^2]
PSHI r	8	4,2	0,33	9,82
PSHI 3D	8	4,2	0,30	8,93
PLA	8	4,2	0,22	6,55

Rinnakkaismittauksia ei ole tehty riittävästi koekappaleiden vähäisyyden vuoksi, joten tuloksiin ei voida laittaa paljoa painoarvoa. Tulokset ovat suuntaa-antavia. Kuten edellä on mainittu, mittaustilanteeseen liittyy epävarmuustekijöitä, joista

yksi on muun muassa loven syvyys ja sen määrittäminen. Loven mittaaminen tarkasti jokaisesta koekappaleesta oli mahdotonta.

PLA-nauhan myyjä tai valmistaja ei ilmoita mitään materiaalin teknisiä ominaisuuksia sivuillaan. PS-HI:stä löytyy huomattavasti enemmän tietoa. PLA:ta on markkinoilla nauhana eri ominaisuuksilla laajan kirjon verran ja tällä hetkellä trendi materiaalisuunnittelussa on kohti iskulujitettua polylaktidia (HIPLA) ja puukomposiittitulostustuotta. Alla olevaan kuvioon 10 on kerätty tämän tutkimuksen iskulujuuden yhdessä materiaalien yleisten iskulujuuskeskiarvojen kanssa. On kuitenkin hyvä pitää mielessä, että polymeerien ominaisuudet saattavat vaihdella jopa 50 %, vaikka kyseessä olisi samanniminen polymeeri eli materiaalien yleiset arvot ovat vain suuntaa viitoittamassa.



KUVIO 10. Iskulujuuksien vertailua kirjallisiin arvoihin

Ensinnäkin tuloksista voidaan huomata, että 3D-tulostetun PSHI:n iskulujuus ei ole kovin paljoa pienempi ruiskuvalettuun kappaleeseen verrattuna. Tulos on vain noin yhdeksän prosenttia huonompi. PS-HI:lle on annettu eri tilastoissa lovetun Izod iskulujuuden arvoksi 5 - 10 kJ/m², joten tulokset ovat myös yleisten tilastotietojen puitteissa normaalit. Tulostetun PLA-sauvan tulosta on hankalaa

verrata materiaalitietojen vähyiden vuoksi, kuitenkin tulosta voidaan pitää positiivisena yllätyksenä, sillä tulos on tilaston keskiarvoa parempi.

6.2 Vetokoe

Savonian ammattikorkeakoulussa on tehty keväällä 2014 lopputyö, jossa on tutkittu 3D-tulostettujen kappaleiden ja pinnoituksen yhdistämistä. Työssä tutkittiin myös kappaleiden mekaanisia ominaisuuksia muun muassa vetokoetestillä. Nagyn opinnäytetyössä hänen saamiaan tuloksia verrataan Michiganin teknillisessä korkeakoulussa saatuihin tuloksiin. B. M. Tymrakilla, M. Kreigerilla, J. M. Pearcellä sekä S. Nagynilla testattavina materiaaleina on ollut ABS:sta ja PLA:sta tulostetut koekappaleet. Nagyn saama PLA:n vetolujuuden maksimiarvon vaiteluväli oli 45–55 MPa:ta ja Joshua Pearcen tutkimusryhmineen sai PLA:n vetolujuudeksi 56,6 MPa.

Ruiskuvalettujen PS-HI-koekappaleiden tulosten keskiarvoksi tuli 25,8 MPa:ta, joka vastaa hyvin materiaalista aikaisemmin saatuja tuloksia. 3D-tulostettujen kappaleiden tulos on hieman alle seitsemän prosenttia huonompi ruiskuvalettuja kappaletta keskiarvon ollessa 24,1. PLA:n kohdalla tulos yllätti positiivisesti, sen keskiarvoksi muodostui 56,0 MPa.

6.2.1 Vetokoe PLA-langalle

TAULUKKO 3. PLA-Langan vetokokeen tulokset

1	45,493 MPa
2	51,907 MPa
3	54,259 MPa
4	53,096 MPa
5	52,312 MPa
Keskiarvo	51,4 MPa

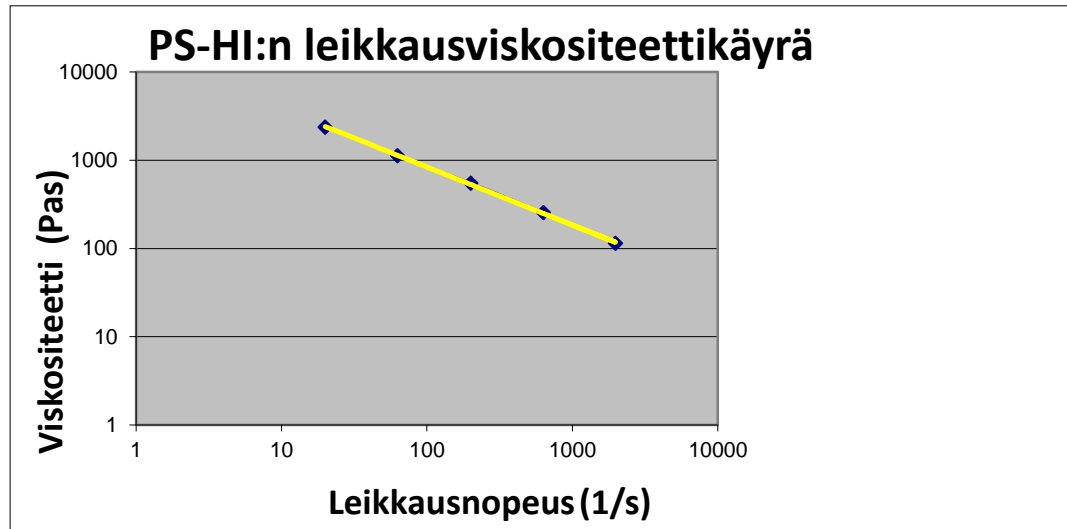
Yleensä valmistusmateriaalille tehdyt vetokokeet ovat tuloksiltaan parempia kuin kappaleen samasta testistä saamat arvot.

PLA:n kohdalla tilanne on hieman toinen, sillä koekappaleen tulokset ovat suuremmat kuin langasta saadut tulokset. Ero on pieni, mutta kuitenkin olemassa. Sitä voidaan selittää ainakin seuraavilla tekijöillä: esimerkiksi langan ensimmäinen mittaus on reilusti pienempi kuin muut tulokset. Se laskee keskiarvoa. Mittauksessa on voinut käydä virhe. 3D-tulostettujen koesauvojen poikkipinta-alassa on saattanut olla mittaheittoja. Jos kappale on ollut todellisuudessa suurempi kuin vetokoneelle ilmoitettu arvo, niin vetolujuudeksi muodostuu isompi lukema.

6.2.2 Kerrosten välinen adheesio - vetokoe pystyyn tulostetulle kappaleelle

Adheesio-koekappaleen ja varsinaisten koekappaleiden poikkipinta-ala oli tarkoituksella tehty samankokoisiksi. Kun varsinaiset PLA-koesauvat saivat testissä vetolujuuden keskiarvoksi 56,0 MPa:a, niin Pystyyntulostetun koekappaleen tulos jäi seitsemänkymmentä prosenttia huonommaksi, saaden arvon 16,9 MPa. Langan vetokokeen keskiarvo oli 51,4 MPa. Lukema kertoo, että tulostetun kappaleen kerrosten välinen tarttuvuus ei ole kovinkaan hyvä.

6.3 Kapillaarireometri



KUVIO 11. Kapillaarireometrilla mitattu PS-HI:n leikkausviskositeetikäyrä

Polymeerit ovat ei-newtoniaalisia nesteitä, tarkemmin luokiteltuna pseudoplastisia nesteitä, eli niiden viskositeetti pienenee niihin vaikuttavan leikkausvoiman suurentuessa. Muita viskositeettiin vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa lämpötila, polymeerin molekyylien koko ja rakenne. (Höök 2014) Tiivistetysti kerrattuna polymeerit ovat leikkausohenevia. Tämä on seikka, joka mahdollistaa sulatyöstön. Ruiskuvalun tyypillinen leikkausnopeusalue on > 1000 1/s. Profiilikstruusion leikkausnopeuden alue on matalampi (noin 10 - 100 1/s) kuin ruiskuvalun. Kuviossa 11 on tarkasteltu PS-HI:n leikkausnopeutta ja viskositeettia. Siinä näkyy viskositeetin pieneneminen. Mitatun materiaalin ominaisuudet sopivat leikkausnopeuden puolesta kaikkiin kolmeen käytettyyn työstömenetelmään.

6.4 Tiheys

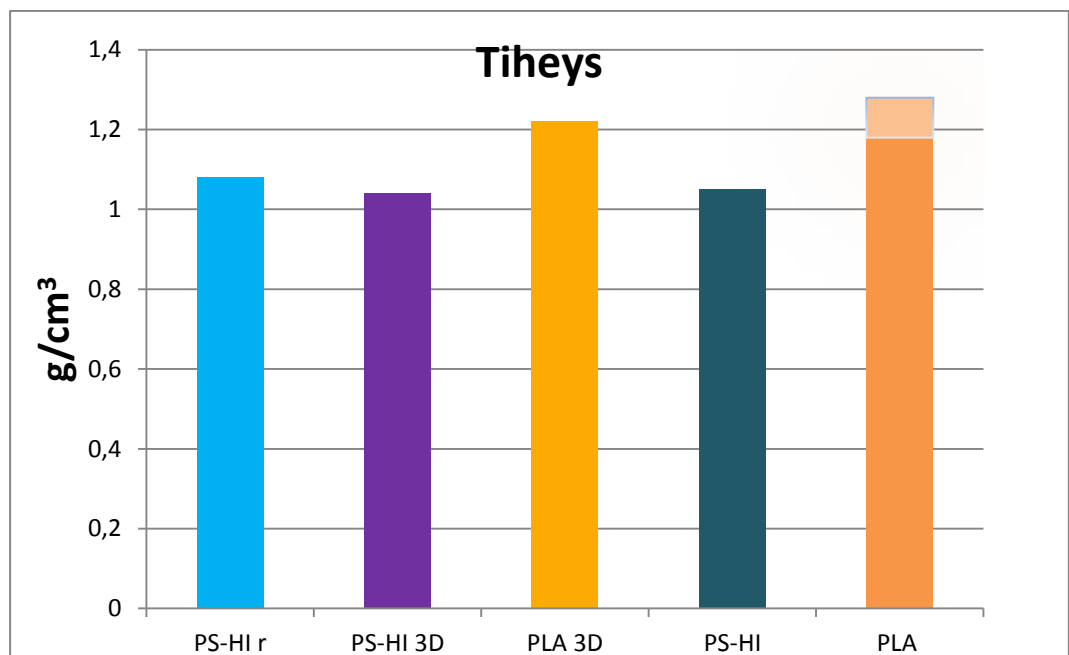
Tiheyden laskemiseksi käytettiin seuraavaa kaavaa (3):

$$\rho = \rho_{neste} \frac{m_{ilmassa}}{(m_{ilmassa} - m_{nesteessä})} \quad \text{KAAVA 3}$$

Punnituksen nesteenä oli vesi, ja sen tiheyden arvona käytettiin 1 g:aa/cm^3 .

TAULUKKO 4. Tiheydet Arkhimedeeseen periaatteella laskettuna

PS-HI r 1 (g/cm ³)	PS-HI 3D (g/cm ³)	PLA (g/cm ³)
1,0826	1,0375	1,2201



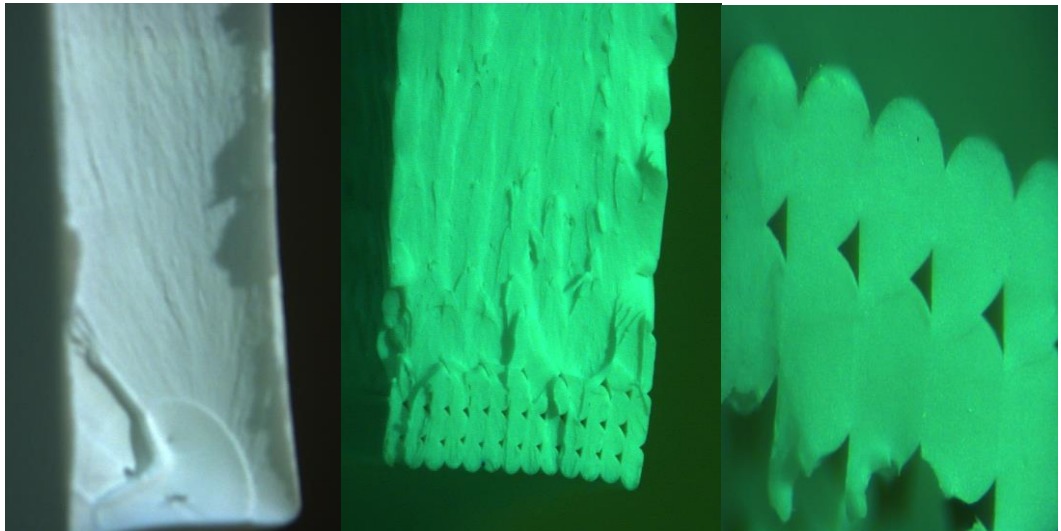
KUVIO 12. Tiheyksien vertailua kirjallisiin arvoihin

Koekappaleista mitatut tiheyden tulokset vastaavat hyvin materiaalien yleisiin tilastollisiin lukuarvoihin. Ennalta odotetusti ruiskuvalettu PS-HI-koesauva on tiheämpi, mutta vain neljä prosentin verran. On todennäköistä, että 3D-tulostettuja koeksuvoja olisi saatu vielä tiheämmiksi ajoarvoja säätämällä.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Ennen koekappaleiden tulostamista ja vielä tulostamisvaiheessa tutkimushypoteesina oli, että 3D-tulostetut kappaleet tulevat olemaan ratkaisevasti huonompia ruiskuvalettuihin koekappaleisiin verrattuna. Tämä aloitushypoteesi ei ollut ainoastaan omana ennako-odotuksena, vaan keskusteltaessa aiheesta ryhmäläisteni kanssa, samat odotukset nousivat esiin. Lopputulos ei kuitenkaan ollut hypoteesia vastaava. On totta, että 3D-tulostettu koekappale ei mekaanisissa koetuksissa ollut ruiskuvalettua parempi kummallakaan testimateriaalilla, mutta yllättävää oli se, kuinka vähän eroa loppujen lopuksi jäi. Mekaanisten erojen lisäksi valmistusmenetelmiä voidaan verrata esimerkiksi nopeudessa ja hinnassa.

Osa mekaanisista eroista selittynee kuvion 13 kuvilla. Ruiskuvalettu kappale on tiivis toisin kuin 3D-tulostettu kappale. 3D-tulostetusta kappaleesta on mahdollista laskea tulostimen reunoille jättämistä ääri viivoista kerrosten lukumäärä. Toisiinsa huonosti sulaneiden reunakerrosten kokonaispinta-ala poikkileikkauksessa on 7 mm^2 , joka on paljon koekappaleen poikkipinta-alasta (40 mm^2). Todennäköisesti olemassa olevaa eroa olisi ollut vielä mahdollista kuroa hieman kokeilemalla eri työstölämpötiloja ja täyttökuvioita.



KUVIO 13. Mikroskoopilla kuvatut poikkileikkaukset vetokokeella poikki vedetyistä kappaleista. Vasemmalla ruiskuvalettu PS-HI, keskellä 3D-tulostettu PS-HI ja oikealla suurennos 3D-tulostetun PS-HI:n reunoista.

PS-HI on amorfinen muovi, mikä tarkoittaa sitä, että sillä on melko tarkka lasittumislämpötila. Lasittumislämpötilaa merkitään tilastoissa kirjainyhdistelmällä T_g ja sillä tarkoitetaan aluetta ja/tai lämpötilaa, jossa lasittuminen tapahtuu. Lasittumisella tarkoitetaan amorfisen aineen palautuvaa muuttumista kumimaisesta tai sitkeästä olomuodosta kovaksi ja hauraaksi, eli amorfisten muovien korkeimmat sallitut käyttölämpötilat voidaan ilmaista T_g :n avulla. ”Lasittumislämpötilassa lineaaristen amorfisten polymeerien ominaisuuksissa, kuten tiheydessä ja pituuden lämpötilakertoimessa tapahtuu suuria muutoksia. Lasittumislämpötilan alapuolella polymeerin laajat lohkoittaiset liikkeet estyvät ja polymeeriketjut jähmettyvät paikoilleen.” Juuri tämä näkyy mm. tilavuuden pienenemisenä. (Kurri ym. 2008, 53.) ”Polymeerien lasisiirtymälle ei ole vielä pystytty esittämään täysin tyydyttävää teoriaa. Tulkinnalliset vaikeudet aiheutuvat ennen kaikkea siitä, että lasisiirtymään liittyy sekä termodynaamiset ominaisuudet että molekylaariset liikkeet. Luonnehdintaan kuitenkin pystytään kvantitatiivisesti. Tilastolliset käsittelyt auttavat ilmiön tulkintaa molekulaaristen prosessien avulla.” (Törmälä ym. 1992, 121.)

Koska PS-HI:n lasittumislämpötilan tilastollinen keskiarvo on 100 °C , niin se selittää, miksi kappale ei pysynyt kunnolla tulostuksen aikana alustassa. Alussa tulostetun muovisulan jähmettyttyä lasittumislämpötilan alle kappaleen ensimmäiset kerrokset alkavat kutistua ja samalla voimakkaasti kutistuttavat ja vetävät kappaleen ylempii kerroksia kaarelle. Tässä vaiheessa usein kappale on jo liikkunut pois tulostusasennostaan. Jos mahdollista, niin tilanteen voi korjata nostamalla tulostuspedin mahdollisimman lähelle T_g :tä, hätäapuna voi käyttää erinäisiä alustaan kiinniliimauttavia keinoja, jolloin pysyvyys ei ole varmaa.

Vastaavaa ongelmaa PLA:lla ei ollut, sillä PLA:n tilastollinen T_g on 60 °C . MAT11-ryhmä mittasi muovilabraotientien aikana eri materiaalien lasittumislämpötiloja, ja se sai tässä opinnäytetyössä käytetyn PLA-langan T_g :ksi 70 °C . Yhtenä johtopäätöksenä voidaan pitää, että tulostus on helpompaa muovien kohdalla, jonka T_g voidaan määrittää selkeästi.

FDM-tulostamisen ja ruiskuvalun kustannusten vertaaminen ei ole helppoa, sillä ne liikkuvat eri kategorioissa. Ruiskuvalu on massatuotantomenetelmä ja 3D-

tulostamisella valmistetaan räätälöityjä kappaleita, usein vain yksi kerrallaan. Jos verrataan raaka-ainehintoja ruiskuvalussa ja muovitulostuksessa, niin ruiskuvalun raaka-aineet ovat muovin halvimmassa muodossa ja ne ovat ainakin toistaiseksi merkittävästi halvemmat kuin tulostuslanka. 3D-tulostuksessa raaka-aineesta tulee helposti kallein osa 3D-tulostuksen kuluista.

Tuotteen valmistuskuluista menee yleensä 1/7 kuljetuksiin. 3D-tulostus säästää tuotteen valmistuskuluissa, sillä tuotteen voi siirtää digitaalisesti halutulle tulostuspaikalle lähelle tilauspaikkaa, eikä fyysistä siirtoa välttämättä tarvita (Paukku 2013, 20–21). 3D-tulostin kuluttaa kymmenen kertaa enemmän sähköä yhtä tuotettua kappale paunaa kohti kuin ruiskuvalu (Lipson & Kurma 2013, 201).

Kuten hinnan vertailussa, niin tuotteen valmistusajan vertailussa on omat haasteensa ja lopputulos riippuukiin siitä, mistä ajanotto aloitetaan. Kummassakin menetelmässä tuotteen suunnittelu alkaa tietokoneelta. 3D-tulostuksessa piirretään tulostettava kappale kolmiuotteiseksi, viipaloidaan se ja lähetetään tulostimelle, jolloin tulostimen lämmittyä tulostus voi alkaa. Aluksi tehdään kenties muutama koeversio ja muutetaan piirustusta sekä tulostussäätöjä ja tulostetaan kappale uudelleen, kunnes ollaan tyytyväisiä tuotteeseen. Myös ruiskuvalussa uuden tuotteen valmistusprosessissa mallinnetaan kappale kolmitulotteiseksi, minkä jälkeen suunnitellaan tarvittava muotti. Muotin valmistamiseen menee koosta riippuen pari viikkoa, puoli vuotta tai mitä tahansa siltä väliltä. Suurien muutoksien tekeminen muottiin on hidasta ja kallista, siksi kenties suunnitteluvaiheeseen käytetään enemmän aikaa kuin 3D-tulostamisessa. Uudelle muotille tapahtuvat koeajot ja asetustensäädöt voivat viedä päivän. Itse muotin asentaminen koneeseen vie aikaa. Sopivien asetusten löydyttyä ruiskuvalukone on usein päällä vuorokauden ympäri tilauksen määrän täyttymiseen päällä, kunnes muotti vaihdetaan toisen tilauksen tuotteeseen. Teoriassa kumpikin menetelmä toimii ilman jatkuvaa valvontaa koneen äärellä, niin kauan kuin raaka-ainetta riittää tai niin kauan aikaa kuin se on ohjemoitu toimimaan.

Yhden koekappaleen tulostamiseen meni PLA:lla ja PS-HI:lla 38 minuuttia. Ruiskuvalamalla saman kappaleen valmistamiseen menee noin minuutti ja tähän aikaan sisältyi valukanavan poistaminen pihdeillä. 3D-tulostus on kirkkasti

nopeampi, kun lähdetään valmistamaan uutta tuotetta tyhjältä pöydältä. Se ei ole yllätys. Ovathan menetelmän juuret juuri tuotteen pikamallinnuksessa. Jos verrataan koneen materiaalin työstämiseen käyttämää aikaa, niin siinä ruiskuvalu jäähtytysaikoineenkin on selkeästi nopeampi.

LÄHTEET

PAINETUT LÄHTEET

Fabrin, P. & Vuorinen, J. 2004 Luonnonkuitulujitteinen polypropeeni - Raportti / Tampereen teknillinen yliopisto, muovi- ja elastomeeritekniikka 10/04. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

Hoskins, S. 2013. 3D Printing For Artists, Designers and Makers. Lontoo: Bloomsbury.

Järvelä, P., Syrjälä, K. & Vastela, M. 2000. Ruiskuvalu. 3. p. Tampere: Plastdata Oy.

Järvinen, P. 2000. Muovin suomalainen käsikirja. Porvoo: WS Bookwell Oy.

Järvinen, P. 2008. Uusi Muovitiieto. Porvoo: WS Bookwell Oy.

Kurri, V., Malén, T., Sandell, R. & Virtanen, M. 2008. Muovitekniikan perusteet. 4. Tarkistettu painos. Helsinki: Hakapaino Oy.

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

Paukku, T. 2013. Kymmenen uutta ihmettä – Teknologiat, jotka muuttavat maailmaa. Tampere: Gaudeamus.

SFS-EN ISO 180. 2005. Muovit ja niiden testausmenetelmät - Izod-iskulujuuden määrittäminen. 3. painos. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.

Törmälä, P., Järvelä, P. & Lindberg, J. J. 1992. Polymeeritiede ja muovitekniikka osa II. 5. muuttumaton painos. Helsinki: Kyriiri Oy.

ELEKTRONISET LÄHTEET

Dotmar. 2014. Test Methods – 13 Impact Strength [viitattu 4.10.2014].
Saatavissa: <http://www.dotmar.co.nz/test-methods.html>

Felix Printers. 2013. Product Description [viitattu 13.6.2014]. Saatavissa:

<http://shop.felixprinters.com/printer-kits/3d-printer-felix-3-0-diy-kit.html#.VABJV7E59fY>

Höök, T. 2014. Polymeerimateriaalit [viitattu 27.10.2014]. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Saatavissa:

www.valuatlas.fi/tietomat/docs/mould_injmoulding_materials_FI.pdf

Isac Group. 2012. Intelligent Control Of Single Screw Polymer Extruder [viitattu 15.10.2014]. Saatavissa: <http://isac.wikidot.com/intelligent-control-of-single-screw-polymer-extruder>

Jyväskylän yliopisto. 2012–2013. Koppa: Yleistä viskositeetista [viitattu 16.6.2014] 1s. Saatavissa:

<https://koppa.jyu.fi/avoimet/kemia/kems448/suomeksi/ohjeet/liuokset/viskositeetti>

Matweb. 2014. Izod Impact Strength Testing of Plastics [viitattu 4.10.2014].

Saatavissa: <http://www.matweb.com/reference/izod-impact.aspx>

Nagy, S. 2014. 3D-muovitulostus ja pinnoitus [viitattu 13.6.2014]. Savonia ammattikorkeakoulu, tekniikan ja liikenteen ala. Kone- ja tuotantotekniikan opinnäytetyö. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201405168237>

Nykänen, S. 2009. Polystyreeni [viitattu 11.6.2014]. Tampereen teknillinen

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

Pmolds. 2014 A Guide To Plastic Molding Companies [viitattu 4.10.2014] A

Guide to Plastic Molding Companies / News Saatavissa:

www.pmolds.com/news/4/57/The-injection-molding-process/

Vienamo, T. & Nykänen, S. 2014. Iskulujuus [viitattu 10.6.2014]. Taideteollinen

korkeakoulu. Saatavissa: <http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/26/52/>

Tampereen teknillinen yliopisto, 2010. Ruiskuvalettavan tuotteen

mekaniikkasuunnittelu. [viitattu 30.9.2014]. Saatavissa:

https://www.tut.fi/ms/muo/polyko/materiaalit/PKAMK/PPDF/Polyko_PKAMK_Final.pdf

JULKAISEMATTOMAT LÄHTEET

Järvelä, P. & Heikkinen, R. 2005a. Laboraatio-ohje: ekstruusio.

Järvelä, P. & Heikkinen, R. 2005b. Laboraatio-ohje: iskukoe.

Järvelä, P. & Heikkinen, R. 2005c. Laboraatio-ohje: ruiskuvalu.

Järvelä, P. & Heikkinen, R. 2005d. Laboraatio-ohje: tiheyden määrittäminen.

Järvelä, P. & Heikkinen, R. 2005e. Laboraatio-ohje: vetokoe.

Järvelä, P. & Heikkinen, R. 2008. Laboraatio-ohje: kapillaarireometri.

LIITTEET

LIITE 1. Vetokokeen tulokset

LIITE 2. Iskukokeen tulokset

LIITE 3. Materiaalien painot tiheyttä varten

LIITE 1. Vetokokeen tulokset

VETOKOE						
NRO	PS-HI r Max Force (N)	PS-HI r Max Stress (MPa)	PS-HI 3D Max Force (N)	PS-HI 3D Max Stress (MPa)	PLA Max Force (N)	PLA Max Stress (MPa)
1	1003,13	25,08	931,25	23,28	2478,13	54,70
2	1050,10	26,25	1037,50	25,94	2503,13	55,26
3	1018,75	25,47	1006,25	25,16	2443,13	53,93
4	1034,38	25,86	987,50	24,69	2403,13	53,05
5	1050,00	26,25	1015,63	25,39	2853,13	62,98
6	1037,50	25,94	1090,63	24,82		
7	1021,88	25,55	987,50	23,09		
8	1081,75	25,47	975,0	22,75		
9	1034,38	25,86	990,0	23,35		
10	1040,63	26,02	959,0	22,94		

LIITE 2. Iskukokeen tulokset

Taulukko 1. Iskukokeesta saadut tulokset		
PSHI ruiskuvalettu	PSHI 3D-tulostettu	PLA 3D-tulostettu
W (ka) [J]	W (ka) [J]	W (ka) [J]
0,35	0,35	0,20
0,35	0,25	0,20
0,30	0,30	0,25

LIITE 3. Materiaalien painot tiheyttä varten

TAULUKKO Materiaalien painot ilmassa ja vedessä punnittuna					
PS-HI r		PS-HI 3D		PLA	
Ilmassa (g)	Vedessä (g)	Ilmassa (g)	Vedessä (g)	Ilmassa (g)	Vedessä (g)
1,18	0,09	1,66	0,06	1,94	0,35