



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# ABS-OPTIMOITU 3D-TULOSTIN

Käytettävien materiaalien testaus

Jani Liimatta

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2016  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Tuotekehitys



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Tuotekehitys

LIIMATTA, JANI:  
ABS-optimoitu 3D-tulostin  
Käytettävien materiaalien testaus

Opinnäytetyö 43 sivua, joista liitteitä 16 sivua  
Toukokuu 2016

---

Tämän opinnäytetyö on osa tuotekehitysprojektia, jossa olemassa olevasta 3D-tulostimesta optimoitiin ABS-muovia paremmin työstävä laite. ABS on yksi yleisimpiä 3D-tulostukseen käytetyistä filamenteista, mutta se on tulostettavuudeltaan hankala, koska se on herkkä lämpötilojen vaihteluille. Uuden laitteen tuli siis olla umpinainen, jotta lämpötila pysyisi vakiona. Osa tulostetuista komponenteista ei kuitenkaan kestänyt niin korkeita lämpötiloja filamentinvalmistajan tuotetiedoista huolimatta.

Opinnäytetyössä selvitetään, mitä muovissa tapahtuu korkeiden lämpötilojen vaikutuksen alaisena ja miksi tulostetut osat reagoivat lämpöön. Työssä myös perehdyttiin muovin kemiallisiin ja fyysisiin ominaisuuksiin sekä teoriaan. Tätä tietoa pyrittiin soveltamaan 3D-tulostusfilamentteihin, joiden valikoima on laaja ja jatkuvasti kasvava. Lisäksi suoritettiin koe, jossa tulostettuja koekappaleita lämpökuormitettiin ja näin yritettiin löytää kestävä materiaali käytettäväksi tuotekehitysprojektissa.

Kokeeseen valituista filamenteista löytyi kaksi projektiin soveltuvaa materiaalia, mutta kriittisimmät osat tullaan valmistamaan varmuuden vuoksi alumiinista. Muovit lämpölaajenevat enemmän kuin metallit, ja pelkästään jo tämä aiheuttaa ongelmia 3D-tulostimen kaltaisessa hienomekaanisessa laitteessa. Muoveja on monen erilaisia ja pienetkin seikat vaikuttavat niiden toimintaan lämmölle altistettuina ja kävi myös ilmi, että valmistajan arvioihin on suhtauduttava varauksella. Tästä syystä on hyvä että tämä opinnäytetyö teorioineen ja ohjeineen, yhdessä testipenkin kanssa, jäävät yritykselle ja he voivat näillä jatkossakin testata eri filamentteja ja todentaa niiden lämmönkestävyyttä.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Mechanical and Production Engineering  
Product Development

LIIMATTA, JANI:  
ABS Optimized 3D-Printer  
The Testing of Usable Materials

Bachelor's thesis 43 pages, appendices 16 pages  
May 2016

---

The thesis was part of their product development project in which they optimized one of their existing models to perform better with ABS-plastic. ABS is one of the most commonly used 3D-printing filament but it is not very user-friendly because it is sensitive to temperature fluctuations and it warps easily. Hence the new printer must have closed structure to keep the temperature constant. Some printed parts did not withstand such high temperatures even though filament manufacturer had stated so in their product details.

The purpose of this thesis was to find out what happens in plastics at higher temperatures and why they react to heat in the way they do. Chemical and structural properties were studied along with the theory of thermoplastics. This information was applied to 3D-printing filaments which have wide range of selection that is constantly growing. An experiment was also conducted in which printed test pieces were exposed to thermal loads. This was done to determine which material to use in development project.

Two of the selected materials passed the test but the company chose aluminum for the most critical parts just in case. Plastics do exhibit lots of thermal expansion which alone causes problems in as precise devices as 3D-printer. Plastics have wide variety of small factors that influence their thermal behavior making them a bit hard to predict. The literature from the field even pointed out that one should treat with caution what manufacturer has stated for their products. The results of this thesis and test bench it created are good tools for the company to use in the future to test variety of different filaments to determine their heat resistance.

---

Key words: 3d-printer, abs, pla, plastic, filament, product development, test

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	YRITYSESITTELY .....	7
3	ABS-OPTIMOITU 3D-TULOSTIN .....	8
4	MUOVIN LÄMMÖNKESTÄVYYDEN TEORIA.....	12
5	FILAMENTIT .....	14
	5.1 PLA .....	14
	5.2 ABS.....	15
	5.3 Erikoisfilamentit .....	15
6	FILAMENTTIEN TESTAUS .....	16
	6.1 Kokeen menetelmä ja välineet.....	16
	6.2 Kokeen kulku.....	19
	6.3 Kokeen tulokset ja virhetarkastelu.....	23
	6.4 Tulosten käsittely.....	24
7	POHDINTA.....	26
	LÄHTEET.....	27
	LIITTEET .....	28
	Liite 1. Prenta DUO XL –tekniset tiedot.....	28
	Liite 2. Testikappaleen tekninenpiirustus.....	29
	Liite 3. Mittauspöytäkirja .....	30
	Liite 4. Mitotuyo Crystal Apexin mittaustarkkuustiedot.....	43

**LYHENTEET JA TERMIT**

FDM	termoplastisen muovin pursotus (fused deposition modeling)
ABS	akrylonitriilibutadienistyreeni (Acrylonitrile butadiene styrene)
PLA	polylaktidi (Polylactic acid)
$T_g$	lasittumislämpötila
$T_m$	sulamislämpötila

## 1 JOHDANTO

ABS on yksi yleisimmistä 3D-tulostuksessa käytettävistä materiaaleista, kun puhutaan FDM-tekniikasta eli menetelmästä, jossa termoplastista muovia pursotetaan kerros kerrokselta. ABS ei kuitenkaan ole käyttäjäystävällisin materiaali ja sen tulostettavuuteen liittyy monia seikkoja, joita huomioida. Tämä opinnäytetyö liittyy Prenta Oy:n tuotekehitysprojektiin, jossa heidän olemassa olevasta, fyysisesti avonaisesta tulostimesta, optimoitiin suljettu tulostin korkeampaa lämpötilaa vaativalle ABS-muoville. Lämpötilojen vaihtelun on yleisesti tiedetty vaikuttavan tulostettavuuteen ja etenkin ABS-muovissa tapahtuu suuriakin muodonmuutoksia sen jäähtyessä, joten uuden laitteen tuli olla kauttaaltaan suljettu, toisin kuin heidän nykyiset, avonaiset tulostimensa.

Korkea lämpötila vaikuttaa myös laitteen osiin, joten tulisi kartoittaa, mitä materiaaleja olisi parasta käyttää. Siksi tässä päättötyössä tutkitaan 3D-tulostuksessa, ja erityisesti tässä projektissa, käytettävien filamenttien lämmönkestävyyttä. Selvitetään, mitä muovissa tapahtuu lämpötilan kohotessa ja mitä valmistaja tarkoittaa lupauksillaan korkeista lämmönkestävyyksistä. Filamenttien valmistajat eivät kerro tarkasti, mistä heidän tuotteensa on valmistettu, mutta ominaisuuksia verrattiin muoviteollisuuden kirjallisuuteen. Selittääkö alan kirjallisuus myös ABS:n hankalan tulostettavuuden ja miksi tulostimen tulisi olla suljettu? Työn yhteydessä suoritettiin myös yritystä ja tuotekehitysprojektia hyödyttävä rasisuskoe, jossa eri erikoismateriaaleja pidettiin korkeille lämpötiloille altistettuna, toiveena selvittää mitä materiaalia käyttää ABS-laitteen rakentamisessa.

## 2 YRITYSESITTELY

Kangasalainen Prenta Oy on suomalaisten 3D-tulostinten laitevalmistaja. Se työllistää vakituisesti kaksi henkilöä, jotka aloittivat yritystoiminnan yhdessä vuonna 2014. Tulostimet, joita yritys valmistaa, ovat fdm-tulostimia (fused deposition modeling), eli toimintatapa on termoplastisen muovin pursotus.

Laitevalmistuksen lisäksi yritys tarjoaa koulutusta, tulostuspalvelua, huolto- ja korjauspalveluita. Heillä on myös oma verkkokauppa, jossa tulostinten lisäksi saatavilla laaja valikoima erilaisia filamentteja, eli tulostusmateriaaleja, varaosia sekä oheistarvikkeita, kuten esimerkiksi pintakäsittelytarvikkeita.

Toiminta keskittyy pääasiassa Suomeen, mutta alkuvuodesta 2016 heidän laitteitaan lisättiin alankomaalaisen ReprapWorldin verkkokauppaan, joka palvelee Euroopan laajuisesti.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään Prenta Duo XL-laitteeseen, jonka tekniset tiedot ovat liitteenä (liite 1).

### 3 ABS-OPTIMOITU 3D-TULOSTIN

Seuraavassa kappaleessa esitellään tarkemmin ABS, eli akryylinitriilibutadieenistyreeni, ja sen ominaisuudet. Siinä käy myös tarkemmin ilmi, miksi ABS vaatii erikoisemman tulostusympäristön kuin vaikka PLA ja mitkä tekijät vaikuttavat sen parempaan tulostettavuuteen. Tiivistäen, ABS on herkkä lämpötilanvaihteluille, joten Prenta tuotekehittää heidän Duo XL-tulostimesta ABS -optimoidun mallin. Kuvassa 1 voi nähdä Prenta DUO XL-tulostimen.



KUVA 1. Prenta Duo XL. [www.prenta.fi](http://www.prenta.fi) -sivulta.

Kuten kuvasta 1 näkyy, DUO XL on avonainen rakenteeltaan, eli tuloste altistuu helposti lämpötilojen vaihteluille. Jotta lämpötilanvaihteluita voitaisiin estää, on tulostimen oltava umpinainen ja sen on pidettävä lämpötila tasaisena. Kuvassa 2 on nähtävissä ABS -optimoitu tulostin. ABS vaatii lämmitetyn tulostusalustan, joka yrityksen tulostimissa kuuluu vakiovarusteisiin. Aluksi määritettiin materiaalit, joista laite rakentuu, sillä kaikki DUO XL:n osat eivät kestä lämpötiloja, jotka umpinaisen laitteen sisälle syntyvät. Edellä mainitussa XL -tulostimessa on Prentan itse tulostamalla valmistamia PLA -osia, jotka eivät kestä hyvin korkeita lämpötiloja. Alihankkijan tiedon mukaan myöskään XL:ssä käytetyt akryylit eivät kestä suurta lämpötilaa, joten runko tehtiin iBond alumiini-PE-komposiitilevystä, jonka ulkopinnat ovat alumiinia ja sisus polyeteeniä.





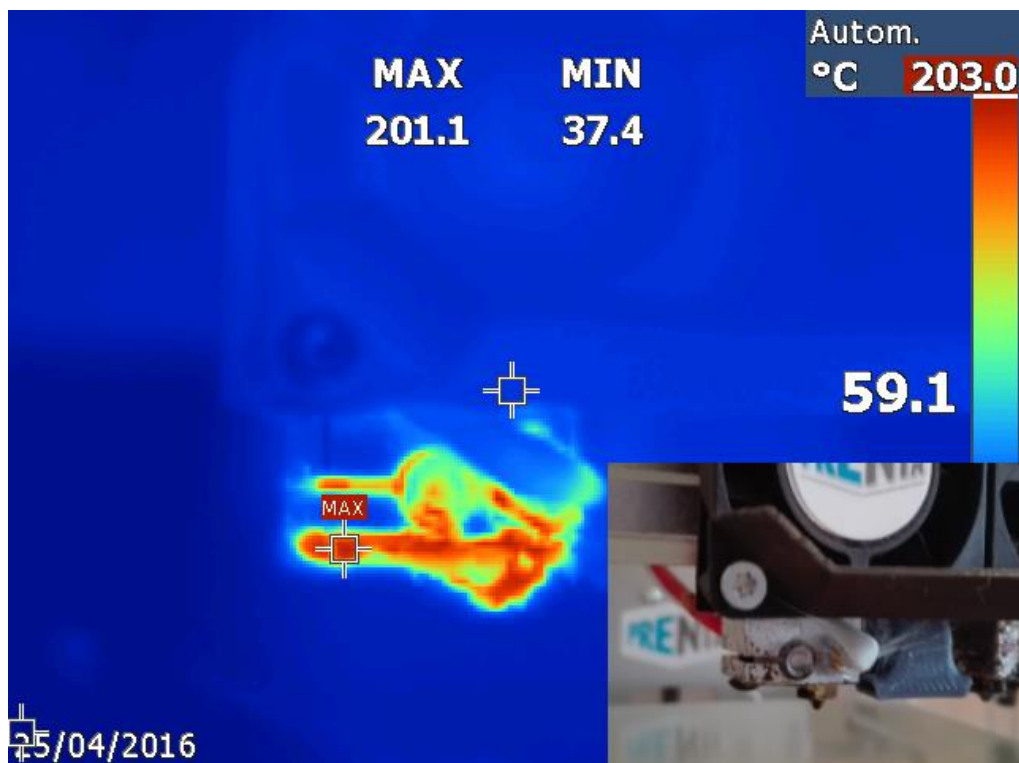
KUVA 2. ABS-optimoitu 3D-tulostin. Kansi ja katto ovat kirkasta akryyliä.

Kuvassa 2 näkyy tuotekehitysprojektin tuloksena syntynyt tulostin. Katto ja etukansi ovat akryylistä (kuvassa etukansi puuttuu), mutta ne eivät ole kantavia tai kriittisiä rakenteita, joten akryyli käyttö näissä osissa on mahdollista.

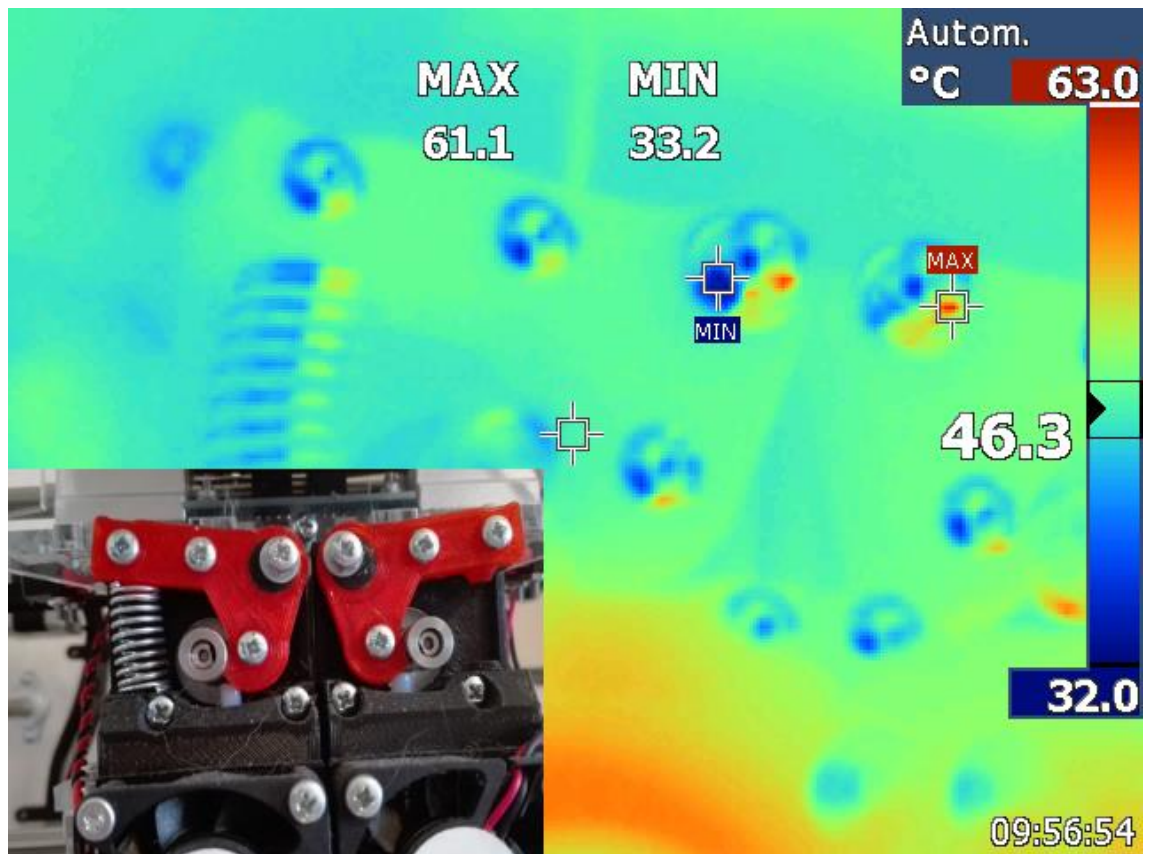
Koska tulostimen sisälämpötila on muoville niin kriittinen, se mitattiin kuvan 3 mukaisesti lämpömittarilla ja kuvassa 4 on Fluke Ti25 lämpökameralla otettu kuva. Laite oli lämpötilanmittaus hetkellä käynyt yli tunnin, joten lämpötila oli tasautunut lukemaan 54.2 °C. Kuvassa 4 on laitteen suutin, joka oli asetettu lämpötilaan 210 °C. Lämpökameraan täytyy ennen kuvan ottamista säätää kuvattavan kohteen emissiivisyys, eli arvo, paljonko kappale lähettää säteilyä. Kuva onnistui siis hyvin, koska siinä näkyvä korkein lämpötila on lähellä tulostimelle annettua arvoa. Kuva otettiin, koska oletettiin noin korkean lämpötilan vaikuttavan suuttimen yläpuolella oleviin muovisiin osiin, jotka osin pidättelevät myös suutinta ja ovat näin ollen erittäin kriittisiä laitteen toiminnan kannalta. Kuvassa 5 kuitenkin näkyy, ettei niiden lämpötila kohonnut yli 60 Celsius asteen. Kuvassa maksimi arvo sijoittuu metalliseen ruuviin. Kuvan keskellä oleva neliö osoittaa, että lämpötila siinä on kuvan oikeassa laidassa näkyvän palkin arvo 46,3 °C, joka on merkitty nuolella.



KUVA 3. Tulostimen sisälämpötilan mittaamisen tulos.



KUVA 4. Lämpökameran kuva tulostimen suuttimesta.



KUVA 5. Lämpökameran kuva tulostimen suutinpakan muoviosista.

Seuraavissa kappaleissa selviää, ettei laitteeseen filamentiksi valittu, lämpöä kestävämpi versio PLA:sta (PolyPlus) valmistajan tiedoista huolimatta kestänyt lämpötiloja, joten oli testattava eri materiaalivaihtoehtoja.

## 4 MUOVIN LÄMMÖNKESTÄVYYDEN TEORIA

Muoveilla on monia erilaisia luokkia. 3D-tulostuksessa käytettävät filamentit ja niiden ominaisuudet ja seokset ovat usein vain itse valmistajan tiedossa. Tässä luvussa kerrotaan yleisesti muovin lämmönkestävyydestä, mutta paino on amorfisilla muoveilla, sillä ABS kuuluu tähän luokkaan. Amorfiset muovit ovat yksi kestumuovien luokka ja niiden sisäinen rakenne on järjestäytymätön, eli polymeerin molekyyliketjut ovat sekoittuneet toisiinsa ilman järjestystä. (Elias 2003, 66-67.)

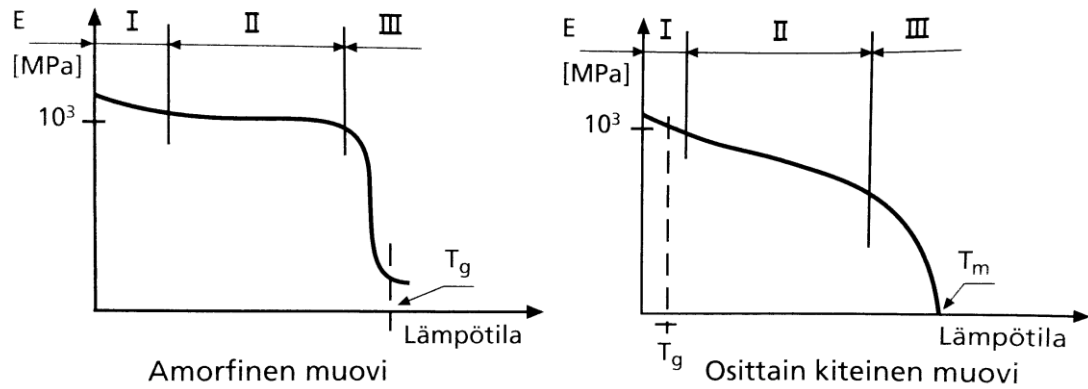
Lämpötilan noustessa muovit pehmenevät lopulta sulaan olotilaan saakka. Pitkäkestoinen lämpökuormitus vanhentaa muoveja kellastaen ja haurastaen niitä. Tällöin puhutaan muovin hitaasta palamisesta, eli muovimolekyylien yhtymisestä happeen. (Metalliteollisuuden Keskusliiton Raaka-ainekäsikirja 4 2001, 11-13.)

Kurri ym. (2008, 61) huomauttavat myös, että mitä kauemmin muovi on korkeassa lämpötilassa, sen suurempia ovat muutokset niin fysikaalisessa rakenteessa, kuin mahdollisesti kemiallisessa koostumuksessa. Suurimmissa sallituissa käyttölämpötiloissa, muovien mekaaniset ominaisuudet, kuten lujuus ja jäykkyys, putoavat noin viidesosaan.

Siirtymä, eli transitio tarkoittaa muutosta materiassa lämmön tai paineen vaikutuksen alaisena. Kaksi päälämpötransitiota ovat lasitransitio, eli lasittumislämpötila ja sulaminen ja niiden sen hetkistä lämpötilaa merkitään  $T_g$  ja  $T_m$ . (Chanda & Roy 2009, 31.)

Amorfisilla muoveilla on lasittumislämpötila  $T_g$ , jossa se pehmenee ja muuttuu kovasta ja jäykästä lasimaisesta tilastaan kumimaiseksi ja löysäksi materiaaliksi. Tämä lasittumislämpötila on näiden amorfisten kestumuovien korkein käyttölämpötila, sillä siinä tapahtuu materiaalin jäykkyydessä suuri pieneneminen. Tämä johtuu polymeeriketjujen vapaammasta liikkuvuudesta. (Metalliteollisuuden Keskusliiton Raaka-ainekäsikirja 4 2001, 85; Elias 2003, 107.)

Kuvassa 6 on nähtävissä lämpökuormituksen eri vaiheet, tietyn rasituksen yhteydessä. Kuvassa näkyy myös sulamislämpötila  $T_m$ , joka esiintyy vain kiteisillä polymeereillä, kuten PE, PP ja POM. Seppälä (2005, 58) täsmentää, että siinä lämpötilassa kristalliitit hajoavat ilman, että molekyylit katkeilevat ja tämä on havaittavissa sulamisena.



Kuva 52. Kestomuovien kimmomoduulin (kuvaa jäykkyyttä) muuttumisen lämpötilan funktiona. Kuvioden yläpuolella käytettyjen alueiden merkinnät ovat seuraavat:

- |     |                                    |                                       |
|-----|------------------------------------|---------------------------------------|
| I   | Hauras                             |                                       |
| II  | Kova ja luja, käyttölämpötila-alue | $T_g = \text{Lasittumislämpötila ja}$ |
| III | Pehmeä                             | $T_m = \text{Sulamislämpötila}$       |

KUVA 6. Kurrin ym. (2008, 61) kirjasta havainnollistava kuvaaja amorfisten kesto-  
muovien lasittumislämpötilasta.

Lämpötila aiheuttaa tietysti myös lämpölaajenemista. Muovien lämpölaajeneminen on noin viisi kertaa suurempaa kuin metallien (Kurri ym. (2008, 197)). Tämä on varmaankin osasyllinen ABS:n hankalaan tulostettavuuteen ja hurjiin muodonmuutoksiin. Mikäli näin on, niin ratkaisu tehdä uudesta tulostimesta umpinainen, pitäisi parantaa tulostettavuutta, kun lämpötilojen äkillisiltä vaihteluilta vältytään. Lämpölaajeneminen on myös hyvin tärkeä asia ottaa huomioon hienoliikkeistä laitetta, kuten 3D-tulostimissa, joissa voi olla paljon tulostettuja osia. Mikäli niiden koot muuttuvat lämmön johdosta niin tarkkuus heikkenee.

Kurri ym. (2008, 61) huomauttavat, että muovien lämmönkestoista annettuihin tietoihin on suhtauduttava varauksellisesti, sillä lujuusominaisuuksien säilymisestä korkeissa lämpötiloissa ei aina ole riittävästi tietoa. Myöskään muovituotteiden valmistuksen aiheuttamien sisäisten jännitysten, kemikaalien, kaasujen ja kosteuden yhteisvaikutusta näiden muovien lämmönkestoan ei aina tunneta.

Chanda ja Roy (2009, 36) luettelevat lasittumislämpötilaan  $T_g$  vaikuttaviksi tekijöiksi polymeeriketjujen joustavuuden, molekyyliarakenteen, sen painon sekä haarautumisen ja ristilinkittymisen. Vain valmistaja voi vaikuttaa näihin, mutta nämä saattavat olla suuri vaikuttaja filamenttien ominaisuuksien erilaisuuteen ja ennalta-arvaamattomuuteen.

## 5 FILAMENTIT

FMD-tulostuksessa materiaalina käytetään ohueksi langaksi ekstruusio, eli suulakepuristettua ja kerälle kerittyä muovifilamenttia. Käytetyimpiä langanvahvuuksia ovat 1,75 mm ja 3,00 mm ja kerä painaa yleensä yhden kilon. Filamenteja on paljon erilaisia ja tarjonta on jatkuvasti kasvava. Yleisimpiä materiaaleja ovat ABS, PLA, PVA, mutta näiden lisäksi on paljon erikoisempia materiaaleja. Valmistajasta riippuen materiaalit voivat olla hyvinkin erilaisia. Kahden eri valmistajan PLA voi hyvinkin erota toisistaan tulostettavuudeltaan ja muilta ominaisuuksiltaan. Valmistajat eivät kerro tarkemmin tuotteidensa koostumuksista ja samalta valmistajalta voi olla esimerkiksi PLA:sta useampaa erilaista versiota, kuten lämpö- tai iskua kestävämmät mallit. Tästä syystä suorien kemiallisten ominaisuuksien vertaaminen taulukoihin ja lähdekirjallisuuteen ei ole täysin mahdollista, mutta niitä voi käyttää viitekehyksenä. Sama pätee valmistajan antamiin tietoihin sulamislämpötilasta, joka on jokaiselle eri tuotteelle heidän itse havaitsemansa, joten se eroaa lähdekirjallisuuden tiedoista, jotka yleensä keskittyvät yleensä valumuoveihin ja muihin valmistusmuotoihin.

### 5.1 PLA

PLA, eli polylaktidi on biopolymeeripohjainen, osakiteinen muovi, joka valmistetaan uusiutuvista raaka-aineista, kuten maissitärkkelyksestä tai sokeriruo'osta. PLA:n raaka-aineet ovat siis uusiutuvia luonnonvaroja ja se on täten myös biohajoavaa. (Hans-Georg Elias 2003, 281-284). Sitä voidaan käyttää yhdessä elintarvikkeiden kanssa ja siitä on tehty teepusseja, vaippoja sekä kertakäyttöastioita. Lämmönkestävyydeltään se on heikko, ja siinä tapahtuu muodonmuutoksia jo auringonpaisteessakin eikä kestä myöskään esimerkiksi tiskipesua. Tulostettavuudeltaan se on erittäin käyttäjäystävällinen ja sopii myös tulostimiin, joissa ei ole lämmitettyä alustaa. PLA sopii myös kotikäyttöön, sillä se on hajuton tulostettaessa.

Eräs materiaalivalmistaja antaa omalle PLA-tuotteelleen sulamislämmöksi 150 – 160 °C ja lasittumislämpötilaksi 60 – 65 °C. He suosittelevat suuttimenlämpötilaksi käytettävän 215 °C (Makerbot 2016).

## 5.2 ABS

ABS, eli akryylnitriilibutadienistyreeni on kovaa sekä kestävä ja se on pitkäikäinen. Sillä on PLA:ta korkeampi sulamispiste, joten siitä tulostetut kappaleet kestävät mm. auringonpaistetta ja tiskipesua. Ollessaan öljypohjainen, se ei ole ympäristöystävällistä kuin PLA. Lisäksi se vaatii ilmastoinnin tulostettaessa, koska lämmitettäessä sulavaksi, erittää kitkerää höyryä. Tulostettavuus ei ole aivan yhtä helppoa kuin PLA:n kanssa vaan vaatii lämmitetyn alustan ja siitä huolimatta tulosteissa esiintyy helposti vääntymää ja lämpötilaerojen aiheuttamia muodonmuutoksia.

Materiaalin valmistaja antaa omalle ABS-tuotteelleen lasittumislämpötilaksi 105 °C. He suosittelevat suuttimenlämpötilaksi käytettävän 230 °C (Makerbot 2016). ABS on amorfinen, joten sillä ei niinkään ole sulamislämpötilaa. Lasittumislämpötilassa se muuttuu pehmeäksi ja kumimaiseksi. Seuraavassa muutoslämpötilassa amorfinen kestopuovi muuttuu jopa juoksevaksi. Lasittumislämpötila on tämän muovityypin korkein käyttölämpötila, sillä siinä tapahtuu jäykkyydessä huomattava pieneneminen. (Kurri, Malén, Sandell & Virtanen 2008, 61.)

## 5.3 Erikoisfilamentit

Filamenttien valmistajia on monia ja monilla valmistajilla on omia erikoisempia tuotteita. Yleisimpiä ja käytetyimpiä ovat sulavat tukimateriaalit, eli filamentit, joista osa sulaa jopa veteen. Suosittuja ovat myös erilaiset seostetut filamentit, joissa on mukana metallijauhetta tai puu- tai hiilikuitua. Markkinoilla on myös muutamia todella taipuisia, kumimaisia tuotteita, joista voidaan tulostaa esimerkiksi pehmeitä kengänpohjallisia.

Tuotteet kehittyvät jatkuvasti ja valmistajat lanseeraavat uusia ja paranneltuja versioita niin lämpö- kuin iskunkestäviäkkin. Näistä ei useinkaan ole kovin tarkkoja tuotetietoja saatavilla, joten kuluttajan on kokeiltava niitä tarkoituksiinsa itse tai hakea apua tulostusyhteisöltä.

## 6 FILAMENTTIEN TESTAUS

ABS-optimoituun tulostimeen valittiin aluksi valmistajan lupaamana paremmin lämpöä kestävä Polymakerin PolyPlus PLA. Heidän tuoteselostuksessaan kerrotaan: ”Tuloksena, meidän PolyPlus™ PLA-filamenttimme omaa korkean pehmenemislämpötilan, joka on korkeampi kuin 140 °C. Tämä on yli 80 astetta korkeampi kuin kaikki muut PLA-filamentit markkinoilla tänä päivänä” (Polymaker 2016).

Tuotekehittävää tulostinta testikäyttäessä kyseinen tuote kuitenkin antoi periksi ja alkoi muuttaa muotoaan jo noin 60 °C lämmössä. Tämä aiheutti tulostukseen vakavaa epätarkkuutta, kun suutinpakka oli valunut vähän alaspäin.

Ei ole täyttä varmuutta, mitä valmistaja tarkoittaa pehmenemislämpötilalla, mutta muovien pehmenemispistettä mitataan standardin ISO 306 mukaisen Vicat B-pehmenemispisteen määrittämissä kokeilla. Siinä neliömillimetrin kokoista neulan kärkeä painetaan nesteeseen upotettuun koekappaleeseen 50 Newtonin voimalla samalla, kun nesteen lämpötilaa nostetaan 50 °C tunnissa. Vicat B-piste on se lämpötila, jossa neula on tunkeutunut kappaleeseen millimetrin syvyyteen. (Metalliteollisuuden Keskusliiton Raaka-ainekäsikirja 4 2001, 85.)

### 6.1 Kokeen menetelmä ja välineet

Lämmön aiheuttamia muodonmuutoksia kokeneet tulostimen osat olivat, joko niistä kiinni olevan massan, tai jousen takia jatkuvan kuormituksen alaisia. Tästä syystä simuloidaan tilannetta kuvan 7 mukaisella testikappaleella, jonka väliin viritetään jousi antamaan jatkuvaa rasiitusta.





KUVA 7. 3D-tulostettu testikappale.

Testikappaleet tulostettiin Prenta Duo XL-tulostimilla. Tulosteet on printattu solideiksi, eli niissä on 100% täyttö ja näin ollen yli kuusi metriä filamenttilankaa. Kappaleita on yhteensä seitsemän, joista kaksi on PLA:ta, kaksi tulostettu ABS:stä, kaksi PETG:stä ja yksi on tulostettu erikoisemmasta MoldLay:stä, joka otettiin testiin verokiksi. Useimpia filamentteja tulostettiin kaksi kappaletta, jotta kokeen tuloksiin saadaan toistuvuutta. Testikappaleiden tarkemmat mitat ovat luettavissa liitteenä olevasta teknisestäpiirustuksesta (liite 2).

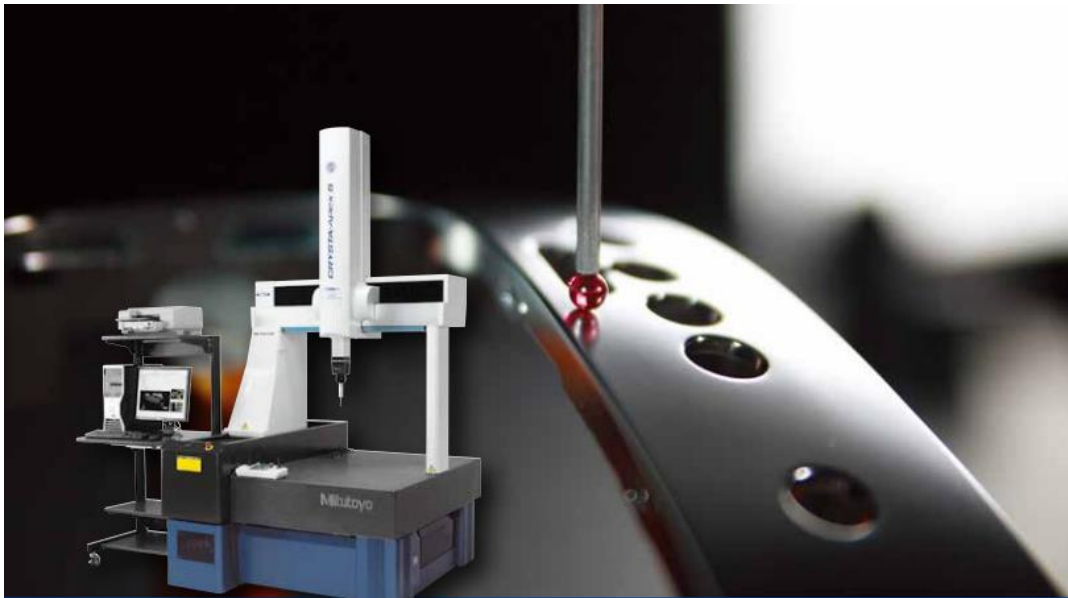
ABS ja PLA käsiteltiin luvussa 4. PETG (valmistajana ESUN), eli polyeteenitereftalaatti on erityisesti pakkausteollisuudessa käytetty muovi ja filamentin valmistaja antaa tulostuslämpötilaksi 230 - 250 °C, joka on lähes sama, mitä ABS:lle suositellaan. MoldLay (valmistajana Kai Parthy) on erikoismateriaali, joka on vahamainen filamentti, suunniteltu erityisesti valumuottien tulostamiseen. Tälle annetaan tulostuslämpötilasuositukseksi 170 - 180 °C.

Testikappaleet altistettiin kokeessa tasaiselle lämmölle itsetehdyssä lämmityskammiossa, jonka lämpölähteenä toimi 3D-tulostimen lämmitettävä, vastuksella varustettu, lämpötilasäädettävä alusta. Tämä rakennettiin Prentan tiloissa heidän osistaan. Pöydän vastukseen kytkettiin tulostimissa käytetyt elektroniikkakomponentit ja piirilevyt, jotta lämmönsäätely saatiin toteutettua tietokoneelta ja näin ollen on myös mahdollista monitoroida lämpötilaa. Lämpö suljettiin kammion sisään päälle asetettavalla metalliastialla. (kuva 8)



KUVA 8. Lämpökammio.

Jokaisen testikappaleen mitat kirjattiin mittauspöytäkirjaan (liite 3) ennen lämmitystä. Mittaustyökaluna käytettiin kuvan 9 mukaista TAMKin Mitotuyo Crystal APex 574 koodinaatin mittauslaitteella. Mittauslaitteella on mahdollista mitata monenlaisia ominaisuuksia, kuten etäisyyksiä, suoruksia ja tasomaisuutta. Tässä työssä käytetyn testikappaleen kohdalla keskitytään kappaleen päämittoihin, joten mittaustapa on koskettava tai ”tökkäävä”. Laitteen mittaustarkkuus on keskimäärin 0,001 mm, joten kokeen aiheuttamat muutokset tullaan huomaamaan hyvin tarkasti.

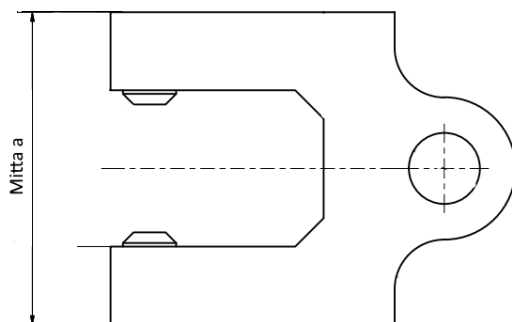


KUVA 9. Mitutoyo Crystal APex

Koordinaatin mittauslaitteelle täytyi ennen mittausta säätää asetukset. Tähän tarvittiin kappaleen mallista .STEP –tiedosto.

## 6.2 Kokeen kulku

Testikappaleet mitattiin ennen testiä edellä mainitulla mittalaitteella. Jousi asetettiin kappaleisiin mittauksen ajaksi, jotta sen pienikin vaikutus jo tässä vaiheessa tulisi huomioon. Kaikki mitatut mitat löytyvät mittauspöytäkirjasta, mutta alla olevassa taulukossa 1 on lueteltu testin osalta kriittisin mitta, eli leukojen ulkomitta (kuva 10), joka mallinnettiin olemaan 44 mm.



KUVA 10. Kriittisin mitta kappaleessa, mitta a.

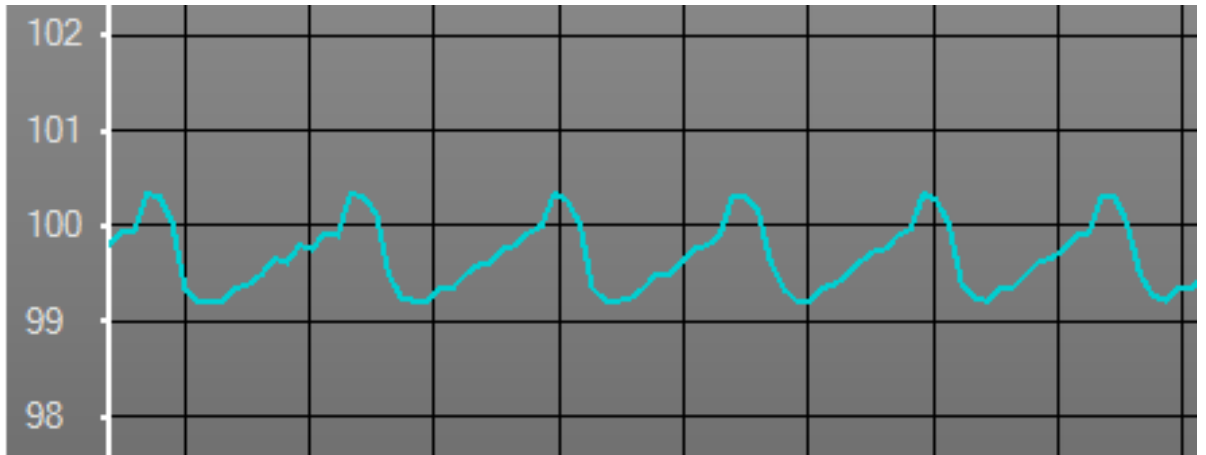
TAULUKKO 1. Kriittisimmän mitan arvot testikappaleissa ennen rasiustestiä.

Testi- kappale	Mitta a (mm)
ABS I	43,579
ABS II	43,527
PLA I	44,216
PLA II	44,263
PETG I	43,381
PETG II	43,795
MoldLay	43,632

Esimitauksen jälkeen testi suoritettiin Prentan tiloissa, edellä mainittua lämpökammiota käyttäen. Testikappaleet ripustettiin niistä olevasta reiästä samaan tankoon roikkumaan kuvan 11 mukaisesti. Kappaleissa on testin ajan jouset paikallaan. Kammio suljettiin, kun alusta saavutti lämpötilan 100 °C ja lämpötila kammiossa mitattiin vaihtelevan lukemissa 49-51 °C. Kuva 12 osoittaa, että lämpöalusta tuotti jatkuvaa, tasaista lämpöä. Lämpökuormitustesti kappaleille kesti tasan kaksi tuntia, jonka jälkeen ne poistettiin kammioista, mutta jouset jätettiin vielä paikoilleen. Kuva 13 esittää testikappaleita testin jälkeen.



KUVA 11. Testikappaleiden asettelu tankoon.



KUVA 12. Lämpötilan seuranta tietokoneelta. Vaaka-akselilla on aika ja lämpötila on pystyakselilla.

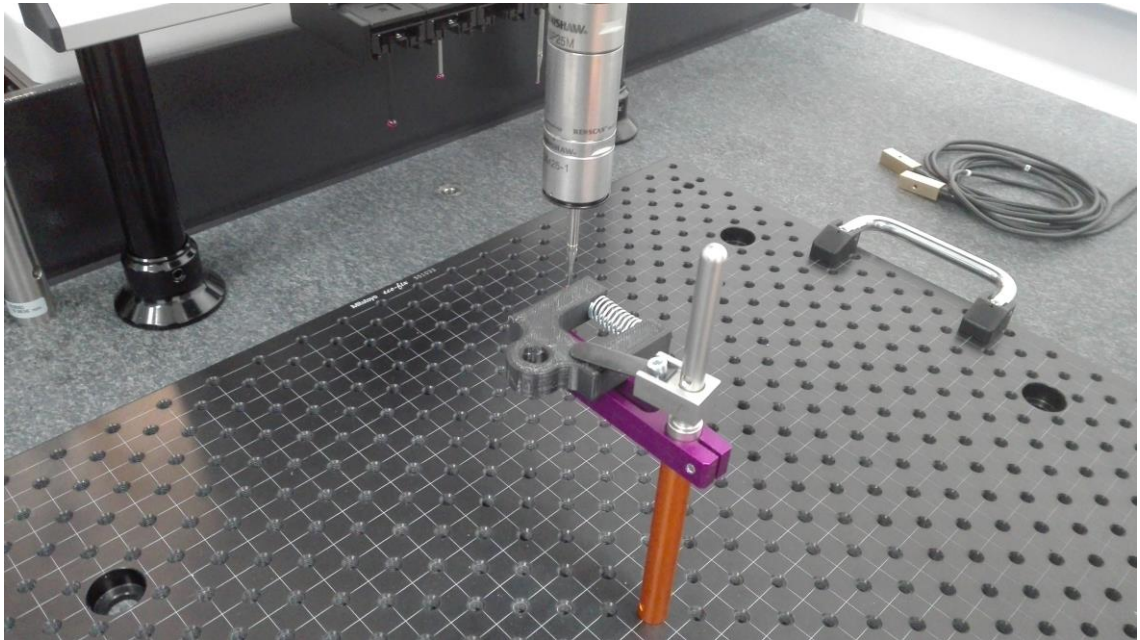


KUVA 13. Testikappaleet lämpörasituksen jälkeen.

Kuvassa 13 testikappaleet vasemmalta oikealle ovat MoldLay, PLA:t, PETG:t ja ABS:t. Kahdessa ensimmäisessä filamentissa näkyy silmin havaittavia muodonmuutoksia ja MoldLaytä ei enää edes mitoitettu koordinaatin mittauslaitteella.

Uusi mittaus suoritettiin taas koordinaatin mittauslaitteella (kuva 14) ja tulokset tästäkin ovat tarkemmin luettavissa liitteenä olevasta mittauspöytäkirjasta ja taulukkoon 2 koottiin mitan a tulokset:





KUVA 14. Koordinaatin mittauslaitteen käyttöä.

TAULUKKO 2. Kriittisimmän mitan arvot testikappaleissa rasitustestin jälkeen.

Testi- kappale	Mitta a (mm)
ABS I	43,675
ABS II	43,585
PLA I	48,143
PLA II	49,802
PETG I	43,562
PETG II	43,902

### 6.3 Kokeen tulokset ja virhetarkastelu

Taulukossa 3 on rinnakkain mitan  $a$  arvot ennen ja jälkeen testin. MoldLay jätettiin kokonaan laskematta, koska siinä esiintyneet muodonmuutokset olivat niin rajuja.

TAULUKKO 3. Mitat ennen ja jälkeen testin sekä niiden erotukset.

Testikappale	Mitta $a$ ennen (mm)	Mitta $a$ jälkeen (mm)	Mittojen erotus (mm)
ABS I	43,579	43,675	0,096
ABS II	43,527	43,585	0,058
PLA I	44,216	48,143	3,927
PLA II	44,263	49,802	5,539
PETG I	43,381	43,562	0,181
PETG II	43,795	43,902	0,143

Koordinaatin mittauslaitteen mittatarkkuudet ovat liitteenä 4. Kuvassa 15 näkyy liitteestä otettu tarkempi osa, joka näyttää käytetyn, SP25M, environment 2, mittaustavan tarkkuuden.

CRYSTA-Apex S 500 Series Accuracy		unit: $\mu\text{m}$
Probe used	Maximum permissible error ( $E_{0,MPE}$ ) ISO 10360-2:2009	Maximum permissible probing error ( $P_{T0,MPE}$ ) ISO 10360-5:2010
SP25M (Stylus: $\varnothing 4 \times 50\text{mm}$ )	1.7+3 l/1000 (temperature environment 1) 1.7+4 l/1000 (temperature environment 2)	1.7

KUVA 15. Käytetyn mittaustavan ja –ympäristön tarkkuus.

Mittatavan ollessa koskettava, mittausrvirhe on kaavan (1) mukaan,

$$0,0017 \text{ mm} \cdot 0,004 \text{ mm} \cdot \frac{x}{1000} \quad (1)$$

jossa  $x$  on mitatta etäisyys tai halkaisija. Näin ollen mitan  $a$  mittausrvirhe kaavalla (1) on:

$$0,0017 \text{ mm} \cdot 0,004 \text{ mm} \cdot \frac{44 \text{ mm}}{1000} = 0,0001876 \text{ mm}$$

eli noin 1.9 mikrometriä. Mittavirhe mitattavan kappaleen kohdalla niin pieni, että mittausrvirheen mittavirhetoleranssimerkintää ( $\pm$ ) ei tulosten esittelyyn ole otettu mukaan.

## 6.4 Tulosten käsittely

Taulukkoon 4 on koottu testikappaleet prosentuaalisen muutoksen mukaiseen järjestykseen, suurimmasta muutoksesta pienimpään. Prosenttilasku on laskettu kaavan (2) tavalla,

$$\left(\frac{T_j \cdot 100}{T_a}\right) - 100 \quad (2)$$

jossa  $T_j$  on testin jälkeinen mittaustulos ja  $T_a$  on testiä aiempi mittaustulos. Tämä ilmaisee, kuinka monta prosenttia koekappale on levinnyt rasitustestissä.

TAULUKKO 4. Kriittisimmän mitan muodonmuutos prosentteina.

Testikap- pale	Mitan a muutos (%)
PLA II	12,5
PLA I	8,9
PETG I	0,4
PETG II	0,3
ABS I	0,2
ABS II	0,1

Prentan laitteiden osat on yleensä tulostettu PLA:sta, mutta tähän projektiin se ei rasituskokeen mukaan sovellu. Tuloksista selvisi, että ABS ja PETG selviävät hyvin kahden tunnin altistuksesta korkeaan lämpötilaan. Jatkotestit olisi tarpeellisia selvittämään, miten materiaalit kestävät toistuvia testejä ja pidempiä altistusaikoja.

Useimpia materiaaleja tulostettiin kaksi tieteellisen menetelmän mukaisen toiston toivossa. Mitä useampi toisto, sen luotettavampi tulos, mutta testipenkin koosta johtuen luku jäi kahdeksi. Jatkossa testipenkkiin voi laittaa vaikka yhtä materiaalia tuon seitsemän kappaletta, jolloin toistoa saadaan tätä enemmän. Joka tapauksessa, jokainen testikappale



oli käyttäytynyt kuten parinsa, joten testin tulos oli luotettavampi, kuin vain yhdellä testikappaleella mitattuna.

Kappaleet olivat solideiksi tulostettuja, eli täydellä täytöllä ilman onttoa tukirakennetta, sillä jousen puristava voima arvioitiin liian suureksi ontolle testikappaleelle. Seuraava testi voisi olla testata ABS- ja PETG filamentteja 50 % täytöllä, koska yleensä tulostetut osat ovat hieman onttoja, joten tämä on hyvä ottaa huomioon, mikäli yritys jatkaa testejä tämän opinnäytetyön pohjalta. Myös kappaleen koolla ja erilaisen jousen valinnalla voidaan optimoida testiä.

## 7 POHDINTA

Opinnäytetyön piti aluksi käsittää koko ABS:lle optimoidun tulostimen tuotekehitysprojektiä ja lopuksi testikäyttää sitä ja verrata tulosteita aiemman Prenta DUO XL 3D-tulostimen jälkeen. Ongelma tässä oli keksiä jokin keino mitata ja numerollisesti arvioida tulosteita, tulostettavuutta ja tulostinten jälkeä. Lopulta, kun filamentinvalmistajan lupaukset tuotteen lämmönkestoista osoittautuivat paikkansapitämättömiksi ja testikäyttö viivästyi, opinnäytetyö otti uuden suunnan. Nyt tutkittiin muovissa tapahtuvia muutoksia lämmön vaikutuksen alaisena sekä kehitettiin testipenkki uusien, erikoisempien materiaalien testaamiseen. Lisäksi päätettiin tehdä yleisimmille materiaaleille testi.

Selvisi, että muovin käyttäytyminen lämmön vaikutuksen alaisena on monimutkainen prosessi, johon vaikuttaa hyvin monta asiaa. Tämän lisäksi eri muoveissa tapahtuu eri asioita riippuen muovilajin kemiallisista sekä fyysisistä rakenteista ja muoveja on monia erilaisia. 3D-tulostusfilamentit ovat vieläpä varsin uusi asia verrattuna vaikkapa valumuoveihin ja niistä tehty tutkimus ja kirjoitettu tieto on vielä vähäistä, eli epävarmuuskijöitä on useita.

Tutkituista filamenteista ABS ja PETG voisivat sopia projektin laitteeseen, mutta varmuus saavutettaisiin lisätesteillä, joita toistettaisiin samoille kappaleille useita, pitkiä kertoja peräkkäin. Yritys ryhtyi selvittämään mahdollisuutta valmistaa kriittisimmät osat ABS-tulostimeen alumiinista, mutta käyttää ABS-filamenttia vähemmän kriittisiin osiin. 3D-tulostin on hienomekaaninen laite, joka reagoi erittäin herkästi pieniinkin muutoksiin ja jo muovin lämpölaajeneminen vaikuttaa tulostettavuuteen. Mikäli muovi vielä pääsee lämmön johdosta muuttamaan muotoaan ja sitten taas jähmettymään siihen muotoon, on tulostimen asetukset auttamatta pielessä. Alumiini kriittisimpiin kohtiin on siis tähän laitteeseen toimiva ratkaisu ennen kuin voidaan olla varmoja lämpötilojen toistuvista ja pitkäaikaisista vaikutuksista muoviin.

Lämpökammio ja tässä työssä selostetut menetit jäävät yrityksen käyttöön, ja opinnäytetyö pyrkii olemaan yritykselle selvitys muovin käyttäytymisestä lämmön vaikutuksen alaisuudessa, sekä työkalu ja ohje, jolla testata eri materiaaleja jatkossakin. Työn alussa asetetut tavoitteet täyttyivät ja kysymyksiin saatiin vastaukset.

## LÄHTEET

Elias, H-G. 2003. An Introduction to Plastics. 2. painos. Hoppenheim, Saksa: WILEY VCH.

Muovit ja kumit. 2001. 2. painos. Raaka-ainekäsikirja 4. Metalliteollisuuden Keskusliitto. Tampere: Tammer-paino Oy.

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

Chanda, M & Roy, S. 2009. Plastics Fundamentals, Properties and Testing. 1. painos. Yhdysvallat. Taylor & Francis Group.

Seppälä, J. 2005. Polymeeritekniikan perusteet. 5. painos. Helsinki: Hakapaino Oy.

Makerbot Industries. Tuotetiedot. Luettu 19.4.2016. <http://store.makerbot.com/filament>

Polymaker. Tuotetiedot. Luettu 3.4.2016. <http://www.polymaker.com/shop/polyplus-true-colour/>

## LIITTEET

### Liite 1. Prenta DUO XL –tekniset tiedot

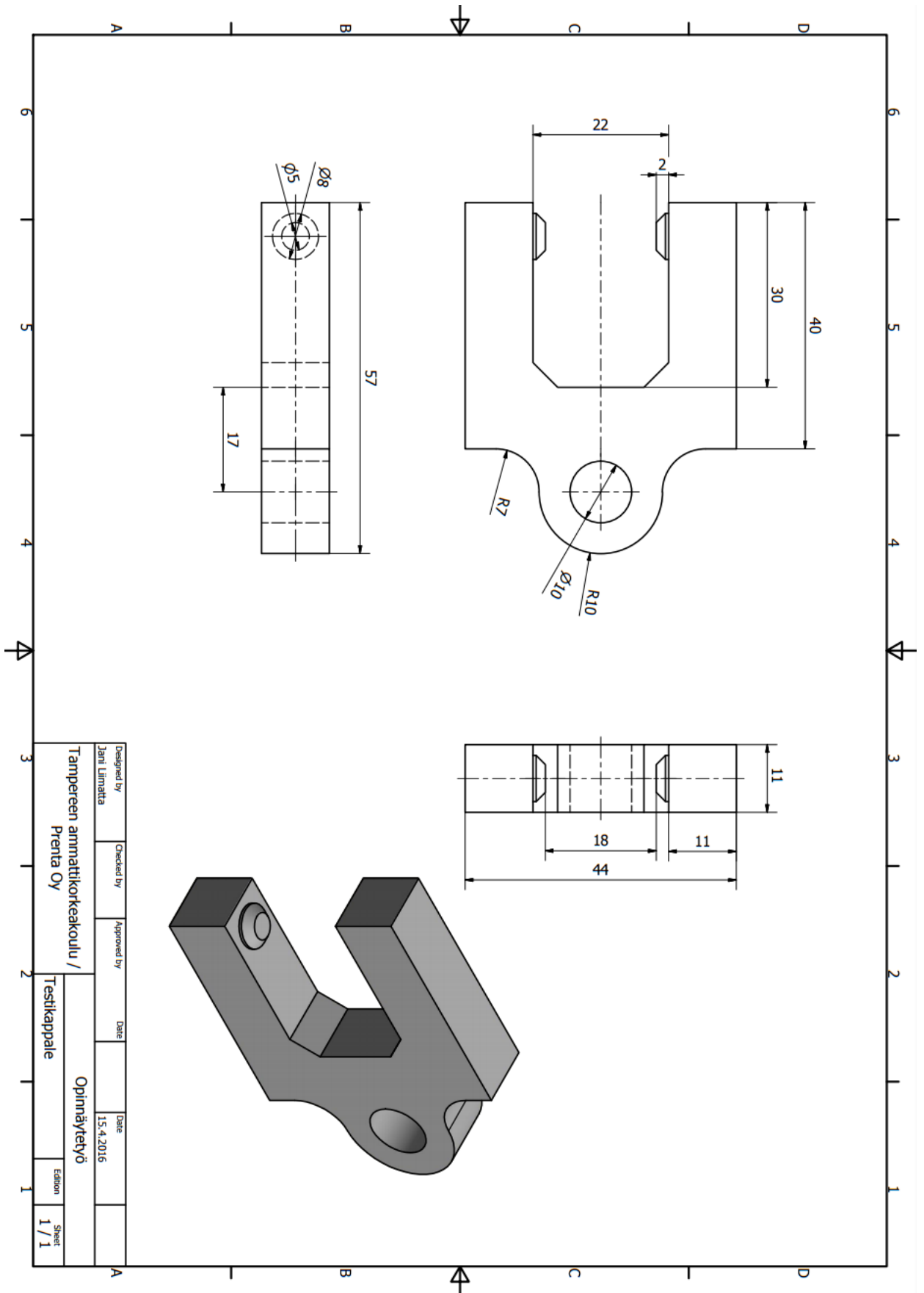
Prenta Duo XL on akryylirunkoinen, läpinäkyvä ja valaistu 3D-tulostin, jonka tulostusala on n.40 x 20 x 20 cm. Laitteessa on vakiona kaksi E3D-suutinta, kooltaan 1.75/4 mm sekä lämmitettävä, lasinen tulostusalusta. Tulostimeen kuuluu myös kappaleenjähdytin, mikä ennestään parantaa tulostettavuutta. Käytettävyyttä helpottaa myös vakiona tuleva näyttöpaneeli, jossa muistikortinlukija.

Duo XL:n ulkomitat ovat 71,5 x 42,5 x 38,0 cm ja sen paino on n. 20 kg. Laiteohjelmistona on avoimen lähdekoodin Repetier-Firmware Arduino Mega2560-alustalla. Virtalähteenä on ATX-virtalähde.

Tulostimella on mahdollista käyttää perinteisten, eli PLA, ABS ja PLA –filamenttien lisäksi myös joustavia, kumimaisia ja pehmeitä materiaaleja, sillä tämän mahdollistaa langansyöttö, joka vetävä, eikä työntävä, kuten useissa laitteissa, eli langansyöttömoottori on sijoitettu lähelle suutinta. Erikoisempia, laitteella tulostettavia muoviseosfilamentteja ovat Petg, Flex-filamentit, Puukuitufilamentit, Metalliseosfilamentit, hiilikuituseokset, Grafeenifilamentit.

Tulostettava kerrosvahvuus on käyttäjän säädettävissä, ja testatut kerrosvahvuudet ovat 0,05-0,4 mm. Tulostusnopeuteen liittyy hyvin moni tekijä. Usein nopeutta nostettaessa laatu heikkenee, mutta tulostimella on ajettu jopa yli 250 mm/s nopeudella. Tavallinen tulostusnopeus on kuitenkin 60-160 mm/s.

Liite 2. Testikappaleen tekninen piirustus



## Liite 3. Mittauspöytäkirja

ABS I ensimmäinen mittaus

1(13)

Part name  
 Liimatta - Oppari  
 25.04.2016 09:10

1	2	3	4				
El. No.	Line No	Element	Pnt. X-Coord. X-Angle Ref. Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance mm
1	39	Kärjenleveys_ulko Distance XY	44.000	0.500	43.579	-0.421	
							*****
2	57	Kärjenpaksuus_vas Distance ZX	11.000	0.500	9.903	-1.097	-0.597
							<<---+---
3	59	Kärjenpaksuus_oik Distance ZX	11.000	0.500	9.833	-1.167	-0.667
							<<---+---
4	71	Kärjenpituus_vas Distance YZ	47.000	0.500	46.321	-0.679	-0.179
							<<---+---
5	73	Kärjenpituus_oik Distance YZ	47.000	0.500	46.382	-0.618	-0.118
							<<---+---

Part name

Liimatta - Oppari

25.04.2016 09:14

1	2	3	4					
El. No.	Line No	Element	Pnt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance mm
1	39	Kärjenleveys_ulko Distance XY		44.000	0.500	43.527	-0.473	*****_----
							-0.500	
2	57	Kärjenpaksuus_vas Distance ZX		11.000	0.500	10.526	-0.474	*****_----
							-0.500	
3	59	Kärjenpaksuus_oik Distance ZX		11.000	0.500	10.437	-0.563	-0.063 <<---+-----
							-0.500	
4	71	Kärjenpituus_vas Distance YZ		47.000	0.500	46.287	-0.713	-0.213 <<---+-----
							-0.500	
5	73	Kärjenpituus_oik Distance YZ		47.000	0.500	46.398	-0.602	-0.102 <<---+-----
							-0.500	

## PLA I ensimmäinen mittaus

3(13)

Part name  
Liimatta - Oppari  
25.04.2016 09:04

1	2	3	4				
El. No	Line No	Element	Pnt. X-Coord. X-Angle	Y-Coord. Y-Angle	Z-Coord. Z-Angle	Diameter Dist./Ang.	Variance mm
		Tolerance	Ref. Nominal	Up/Lo	Actual	Dev./Error	
1	39	Kärjenleveys_ulko Distance XY	44.000	0.500	44.216	0.216	----***--
2	57	Kärjenpaksuus_vas Distance ZX	11.000	0.500	10.883	-0.117	----**----
3	59	Kärjenpaksuus_oik Distance ZX	11.000	0.500	10.901	-0.099	----**----
4	71	Kärjenpituus_vas Distance YZ	47.000	0.500	47.023	0.023	----*-----
5	73	Kärjenpituus_oik Distance YZ	47.000	0.500	47.129	0.129	----**----



Part name  
Liimatta - Oppari  
25.04.2016 09:08

1		2		3		4		
El. No.	Line No	Element	Pnt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance mm
1	39	Kärjenleveys_ulko		44.000	0.500	44.263	0.263	
		Distance XY			-0.500			-----
2	57	Kärjenpaksuus_vas		11.000	0.500	11.027	0.027	
		Distance ZX			-0.500			-----
3	59	Kärjenpaksuus_oik		11.000	0.500	10.993	-0.007	
		Distance ZX			-0.500			-----
4	71	Kärjenpituus_vas		47.000	0.500	47.057	0.057	
		Distance YZ			-0.500			-----
5	73	Kärjenpituus_oik		47.000	0.500	47.167	0.167	
		Distance YZ			-0.500			-----

## PETG I ensimmäinen mittaus

5(13)

Part name  
Liimatta - Oppari  
25.04.2016 09:17

1	2	3	4					
El. No.	Line No	Element	Pnt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Up/Lo	Z-Coord. Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance mm
1	39	Kärjenleveys_ulko		44.000	0.500	43.381	-0.619	-0.119
		Distance XY			-0.500			<<---+-----
2	57	Kärjenpaksuus_vas		11.000	0.500	10.745	-0.255	
		Distance ZX			-0.500			---****-----
3	59	Kärjenpaksuus_oik		11.000	0.500	10.677	-0.323	
		Distance ZX			-0.500			---****-----
4	71	Kärjenpituus_vas		47.000	0.500	46.346	-0.654	-0.154
		Distance YZ			-0.500			<<---+-----
5	73	Kärjenpituus_oik		47.000	0.500	46.478	-0.522	-0.022
		Distance YZ			-0.500			<<---+-----

## PETG II ensimmäinen mittaus

6(13)

Part name  
Liimatta - Oppari  
25.04.2016 09:20

1	2	3	4					
El. No.	Line No	Element	Pnt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance mm
1	39	Kärjenleveys_ulko Distance XY		44.000	0.500	43.795	-0.205	---***-----
2	57	Kärjenpaksuus_vas Distance ZX		11.000	0.500	10.687	-0.313	---****-----
3	59	Kärjenpaksuus_oik Distance ZX		11.000	0.500	10.635	-0.365	---****-----
4	71	Kärjenpituus_vas Distance YZ		47.000	0.500	46.298	-0.702	<<---+-----
5	73	Kärjenpituus_oik Distance YZ		47.000	0.500	46.463	-0.537	<<---+-----

Part name

Liimatta - Oppari

25.04.2016 09:22

1	2	3	4					
El. No	Line No	Element	Pnt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance mm
1	39	Kärjenleveys_ulko		44.000	0.500	43.632	-0.368	
		Distance XY			-0.500			-.****_----
2	57	Kärjenpaksuus_vas		11.000	0.500	10.843	-0.157	
		Distance ZX			-0.500			---**_----
3	59	Kärjenpaksuus_oik		11.000	0.500	10.873	-0.127	
		Distance ZX			-0.500			----**_----
4	71	Kärjenpituus_vas		47.000	0.500	46.153	-0.847	-0.347
		Distance YZ			-0.500			<<----+-----
5	73	Kärjenpituus_oik		47.000	0.500	46.145	-0.855	-0.355
		Distance YZ			-0.500			<<----+-----

Part name  
Liimatta - Oppari  
25.04.2016 13:32

1	2	3	4					
El. No.	Line No	Element	Pnt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance mm
1	39	Kärjenleveys_ulko Distance XY		44.000	0.500	43.675	-0.325	..****_----
					-0.500			
2	57	Kärjenpaksuus_vas Distance ZX		11.000	0.500	9.907	-1.093	-0.593 <<---+---
					-0.500			
3	59	Kärjenpaksuus_oik Distance ZX		11.000	0.500	9.835	-1.165	-0.665 <<---+---
					-0.500			
4	71	Kärjenpituus_vas Distance YZ		47.000	0.500	46.235	-0.765	-0.265 <<---+---
					-0.500			
5	73	Kärjenpituus_oik Distance YZ		47.000	0.500	46.386	-0.614	-0.114 <<---+---
					-0.500			

Part name  
Liimatta - Oppari  
25.04.2016 13:35

1		2		3		4		
El. No.	Line No	Element	Pnt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance mm
1	39	Kärjenleveys_ulko		44.000	0.500	43.585	-0.415	
		Distance XY			-0.500			*****----
2	57	Kärjenpaksuus_vas		11.000	0.500	10.529	-0.471	
		Distance ZX			-0.500			*****----
3	59	Kärjenpaksuus_oik		11.000	0.500	10.443	-0.557	-0.057
		Distance ZX			-0.500			<<----+-----
4	71	Kärjenpituus_vas		47.000	0.500	46.279	-0.721	-0.221
		Distance YZ			-0.500			<<----+-----
5	73	Kärjenpituus_oik		47.000	0.500	46.368	-0.632	-0.132
		Distance YZ			-0.500			<<----+-----

Part name

Liimatta - Oppari

25.04.2016 13:46

1	2	3	4					
El. No.	Line No	Element	Pnt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance mm
1	40	Kärjenleveys_ulko		44.000	0.500	48.143	4.143	3.643
		Distance XY			-0.500			----->>>
2	59	Kärjenpaksuus_vas		11.000	0.500	11.199	0.199	
		Distance ZX			-0.500			-----***---
3	61	Kärjenpaksuus_oik		11.000	0.500	10.911	-0.089	
		Distance ZX			-0.500			-----**-----
4	73	Kärjenpituus_vas		47.000	0.500	46.546	-0.454	
		Distance YZ			-0.500			-----*****-----
5	75	Kärjenpituus_oik		47.000	0.500	47.015	0.015	
		Distance YZ			-0.500			-----*-----

Part name

Liimatta - Oppari

25.04.2016 13:42

1	2	3	4					
El. No	Line No	Element	Pnt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance mm
1	40	Kärjenleveys_ulko		44.000	0.500	49.802	5.802	5.302
		Distance XY			-0.500			----->>>
2	59	Kärjenpaksuus_vas		11.000	0.500	11.013	0.013	
		Distance ZX			-0.500			-----*
3	61	Kärjenpaksuus_oik		11.000	0.500	11.299	0.299	
		Distance ZX			-0.500			-----*****
4	73	Kärjenpituus_vas		47.000	0.500	47.003	0.003	
		Distance YZ			-0.500			-----*
5	75	Kärjenpituus_oik		47.000	0.500	46.750	-0.250	
		Distance YZ			-0.500			-----*****



Part name

Liimatta - Oppari

25.04.2016 13:30

1	2	3	4					
El. No.	Line No	Element	Pnt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance mm
1	39	Kärjenleveys_ulko		44.000	0.500	43.562	-0.438	
		Distance XY			-0.500			-.****----
2	57	Kärjenpaksuus_vas		11.000	0.500	10.752	-0.248	
		Distance ZX			-0.500			---***----
3	59	Kärjenpaksuus_oik		11.000	0.500	10.672	-0.328	
		Distance ZX			-0.500			-.****----
4	71	Kärjenpituus_vas		47.000	0.500	46.302	-0.698	-0.198
		Distance YZ			-0.500			<<---+----
5	73	Kärjenpituus_oik		47.000	0.500	46.449	-0.551	-0.051
		Distance YZ			-0.500			<<---+----

Part name  
Liimatta - Oppari  
25.04.2016 13:28

1	2	3	4					
El. No.	Line No	Element	Pnt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance mm
1	39	Kärjenleveys_ulko		44.000	0.500	43.902	-0.098	
		Distance XY			-0.500			----**----
2	57	Kärjenpaksuus_vas		11.000	0.500	10.687	-0.313	
		Distance ZX			-0.500			--****----
3	59	Kärjenpaksuus_oik		11.000	0.500	10.641	-0.359	
		Distance ZX			-0.500			..****----
4	71	Kärjenpituus_vas		47.000	0.500	46.316	-0.684	-0.184
		Distance YZ			-0.500			<<----+-----
5	73	Kärjenpituus_oik		47.000	0.500	46.445	-0.555	-0.055
		Distance YZ			-0.500			<<----+-----

## Liite 4. Mitotuyo Crystal Apexin mittaustarkkuustiedot

Model No.		CRYSTA-Apex S 544	CRYSTA-Apex S 574
Measuring range	X axis	19.68" (500mm)	
	Y axis	15.74" (400mm)	27.55" (700mm)
	Z axis	15.75" (400mm)	
Resolution		0.000004" (0.0001mm)	
Guide method		Air bearings on each axis	
Drive speed		8-300mm/s (CNC mode), max. speed: 519mm/s 0 - 80mm/s (J/S Mode: High Speed) 0 - 3mm/s (J/S Mode: Low Speed) 0.05mm/s (J/S Mode: Fine Speed)	
Max. measuring speed		8mm/s	
Max. drive acceleration		2,309 mm/s <sup>2</sup> (3D)	
Workpiece	Maximum height	21.45" (545mm)	
	Maximum mass	396.8lb(180kg)	
Mass (including the control device and installation platform)		1,135lbs.(515kg)	1,377lbs.(625kg)
Air supply	Pressure	58 PSI (0.4MPa)	
	Consumption	1.76CFM (50L/min) under normal conditions	
	Air source	3.53CFM (100L/min)	

**CRYSTA-Apex S 500 Series Accuracy**unit:  $\mu\text{m}$ 

Probe used	Maximum permissible error ( $E_{0,MPE}$ ) ISO 10360-2:2009	Maximum permissible probing error ( $P_{FTU,MPE}$ ) ISO 10360-5:2010
SP25M (Stylus: $\varnothing 4 \times 50\text{mm}$ )	1.7+3 L/1000 (temperature environment 1) 1.7+4 L/1000 (temperature environment 2)	1.7
TP200 (Stylus: $\varnothing 4 \times 10\text{mm}$ )	1.9+3 L/1000 (temperature environment 1) 1.9+4 L/1000 (temperature environment 2)	1.9
TP20 (Stylus: $\varnothing 4 \times 10\text{mm}$ )	2.2+3 L/1000 (temperature environment 1) 2.2+4 L/1000 (temperature environment 2)	2.2

\* L = Selected measuring length (in mm). Table on opposite page describes temperature environments 1 and 2.

**CRYSTA-Apex S 500 Series Accuracy ISO 10360-4**unit:  $\mu\text{m}$ 

Probe used	Max. permissible scanning error ( $MPE_{THP}$ )
SP25M (Stylus: $\varnothing 4 \times 50 \text{ mm}$ )	2.3 $\mu\text{m}$ (50s)

**CRYSTA-Apex S 500 Series Installation Temperature**

		Temperature environment 1	Temperature environment 2
Limits within which accuracy is guaranteed	Temperature Range	20 $\pm$ 2 °C (64.4-71.6 °F)	16 - 26 °C (60.8-78.8 °F)
	Rate of change	1 °C per hour or less 2 °C in 24 hours or less	1 °C per hour or less 5 °C in 24 hours or less
	Gradient	1 °C or less per meter	1 °C or less per meter