

# 3D-tulostuksen parametrien vaikutus kappaleen mittapysyvyyteen ja pinnanlaatuun

LAHDEN  
AMMATTIKORKEAKOULU  
Tekniikan ala  
Materiaalitekniikka  
Muovitekniikka  
Opinnäytetyö  
Syksy 2017  
Riitta Tapaninen

Lahden ammattikorkeakoulu  
Koulutusohjelma

TAPANINEN, RIITTA:

3D-tulostuksen parametrien vaikutus  
kappaleen mittapysyvyyteen ja  
pinnanlaatuun

Muovitekniikan opinnäytetyö, 52 sivua, 7 liitesivua

Syksy 2017

TIIVISTELMÄ

---

Opinnäytetyössä tutkittiin parametrien vaikutusta 3D-tulostettujen kappaleiden mittapysyvyyteen ja pinnanlaatuun kolmessa eri tulostussuunnassa. Työ tehtiin Lahden ammattikorkeakoulun tekniikan laitokselle, koska vastaavaa tutkimusta ei ole aiemmin tehty.

Opinnäytetyön kokeiden suunnittelussa käytettiin erästä ortogonaalimatriisia. Ortogonaalimatriisit ovat olennainen osa japanilaisen tohtori Genichi Taguchin kehittämää tuote- ja prosessisuunnittelun laadun optimointimenetelmää.

Opinnäytetyössä tutkittiin samanaikaisesti parametrien vaikutusta yhdeksään ominaisuuteen yhden sijasta, minkä vuoksi tulokset tulkittiin ja johtopäätökset muodostettiin opinnäytetyön tekijän tulkinnan pohjalta laskennallisia keinoja apuna käyttäen. Jokaisessa kolmessa eri tulostussuunnassa päädyttiin siihen, että merkityksellisimmät parametrit ovat kerrospaksuus ja tulostuspedin lämpötila.

Asiasanat: 3D-tulostus, PLA, Taguchi, parametri, ortogonaalimatriisi

Lahti University of Applied Sciences  
Degree Programme in Plastics Engineering

TAPANINEN, RIITTA:

The effect of parameters of 3D  
printing on the dimensional stability  
and surface quality of an article

Bachelor's Thesis in Plastics Engineering, 52 pages, 7 pages of  
appendices

Autumn 2017

ABSTRACT

---

The purpose of this Bachelor's Thesis was to examine how parameters affect dimensional stability and surface quality in 3 D printing. The thesis was commissioned by the Faculty of Technology of Lahti University of Applied Sciences. The thesis was done because a similar study has not been done previously.

An orthogonal matrix was employed in the test planning of this study. The orthogonal matrixes are an essential part of the optimization method of product and process design. The method was developed by Genichi Taguchi, a Japanese Doctor.

In this thesis, the effect of parameters on nine properties instead of one was studied. Therefore, the examination results were interpreted and the conclusions were created with calculation methods by the researcher. In the results of the thesis, it is demonstrated that the layer thickness and the temperature of a printing bed are the most relevant parameters in 3D printing.

Key words: 3D printing, polylactid acid, Taguchi, parameter, orthogonal matrix

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	3D-TULOSTUS	2
2.1	Työvaiheet	2
2.2	Tulostusmateriaaleja ja niiden käyttökohteita	3
2.3	3D-tulostusteknologiat	4
2.3.1	Fused Deposition Modeling (FDM)	4
2.3.2	Fused Filament Fabrication (FFF)	5
2.3.3	PolyJet Printing	6
2.3.4	MultiJet Printing (MJP)	8
2.3.5	ColorJet Printing (CJP)	9
2.3.6	Plastic Jet Printing (PJP)	10
2.3.7	Laminated Object Manufacturing (LOM)	11
2.3.8	Stereolitografia (SL, SLA)	12
2.3.9	Selective Laser Sintering (LS, SLS)	13
3	TUTKIMUKSESSA KÄYTETTÄVÄ MATERIAALI JA 3D-TULOSTIN	14
3.1	Valmistusmateriaali polylaktidi eli PLA	14
3.2	3D-tulostin	16
4	TAGUCHI-MENETELMÄ	18
4.1	Systeemisuunnittelu	18
4.2	Parametrisuunnittelu	18
4.3	Toleranssisuunnittelu	19
5	KOEKAPPALEIDEN VALMISTUS	20
5.1	Koekappaleen 3D-mallinus	20
5.2	Parametrit ja ortogonaalimatriisi	20
5.3	Koekappaleiden tulostaminen	21
6	TULOKSET	24
6.1	Tulostussuunta XYZ-1	26
6.1.1	Kuution leveys	26
6.1.2	Kuution syvyys	27
6.1.3	Kuution korkeus	28
6.1.4	Kulmat	29

6.1.5	Läpireikä	30
6.1.6	Nuolenkärki	31
6.1.7	Pinnanlaatu (yläpinta)	32
6.1.8	Pinnanlaatu (alapinta)	33
6.1.9	Pinnanlaatu (kylki)	34
6.1.10	Päätelmät tulostussuunnassa XYZ-1	34
6.1.11	Parametrien optimiarvot ja testaus	35
6.2	Tulostussunnta XYZ-2	36
6.2.1	Kuution leveys	36
6.2.2	Kuution syvyys	37
6.2.3	Kuution korkeus	38
6.2.4	Kulmat	39
6.2.5	Läpireikä	40
6.2.6	Nuolenkärki	41
6.2.7	Pinnanlaatu	41
6.2.8	Päätelmät tulostussuunnassa XYZ-2	42
6.2.9	Parametrien optimiarvojen yhteenveto	42
6.3	Tulostussuunta XYZ-3	44
6.3.1	Kuution leveys	44
6.3.2	Kuution syvyys	45
6.3.3	Kuution korkeus	46
6.3.4	Kulmat	47
6.3.5	Läpireikä	48
6.3.6	Nuolenkärki	48
6.3.7	Pinnanlaatu	49
6.3.8	Päätelmät tulostussuunnassa XYZ-3	49
6.3.9	Parametrien optimiarvojen yhteenveto	50
7	YHTEENVETO	52
	LÄHTEET	53
	LIITTEET	57

## SANASTO

ABS	Akryylinitriilibutadieenistyreeni on iskunkestävän polystyreenin ja akryylinitriilin kopolymeeri.
Alifaattinen yhdiste	Alifaattinen yhdiste on avoketjuinen orgaaninen yhdiste (ei sisällä hiilirenkaita).
Anisotrooppinen	Materiaalia sanotaan anisotrooppiseksi, jos sen ominaisuudet ovat eri suunnista erilaiset.
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu
Filamentti	Jatkuva kuitu
HDPE	Korkeatiheyksinen polyeteeni
Kopolymeeri	Kopolymeerissä on vähintään kaksi eri monomeeriä, jotka ovat polymeroituneet yhteen polymeeriksi.
Nailon	Polyamideihin lukeutuva tekninen muovi
PA	Polyamidi
PC	Polykarbonaatti
PCL	Polykaprolaktoni
PLA	Polylaktidi
Polymeeri	Polymeeri on orgaaninen, toistuvien rakenneyksiköiden eli monomeerien muodostama makromolekyyl.
PPSU	Polyfenyylisulfoni
PS	Polystyreeni
STL-tiedosto	STL-tiedostossa määritetään 3D-mallin geometria.
Tekninen muovi	Teknisillä muoveilla on valtamuoveja paremmat tekniset ominaisuudet.
Valtamuovit	Valtamuovit ovat muoveja, joita käytetään eniten muovituotteiden valmistuksessa.

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä on tarkoitus selvittää parametrien vaikutusta 3D-tulostamalla valmistettujen kappaleiden ominaisuuksiin. Kappaleet tulostetaan kolmessa eri tulostussuunnassa. Tavoitteena on valmistaa laadultaan optimaalisia kappaleita. Kappaleet tulostetaan Fused Deposition Modeling -menetelmällä. Työn toimeksiantaja on Lahden ammattikorkeakoulun tekniikan laitos, jossa vastaavaa tutkimusta ei ole aiemmin tehty.

Tutkimuksessa tehtävät kokeet suunnitellaan erästä ortogonaalimatriisia hyväksi käyttäen. Ortogonaalimatriisit ovat osa Taguchi-menetelmää, joka on tuote- ja prosessisuunnitteluun kehitetty laadun optimointimenetelmä. Menetelmän on kehittänyt japanilainen Tohtori Genichi Taguchi.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa käsitellään 3D-tulostusta ja erilaisia tulostusmenetelmiä. Lisäksi esitellään työssä käytettävä materiaali ja 3D-tulostin sekä Taguchi-menetelmään liittyvä tuotteen suunnittelu.

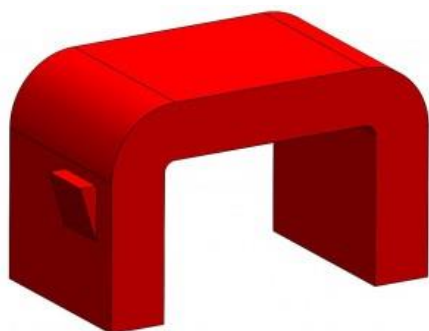
Kokeellisessa osuudessa kappaleiden ominaisuuksia tarkastellaan joko mittaamalla tai silmämääräisesti arvioimalla. Tuloksista laaditaan vastetaulukot ja niiden kuvaajat. Loppupäätelmät tuloksista laaditaan laskennallisesti.

## 2 3D-TULOSTUS

3D-tulostus eli kolmiulotteinen tulostus on digitaalisten mallien tuotteistamista fyysisiksi esineiksi (Helsingin kaupunki 2017; Wikimedia Foundation Inc. 2017a). Esineiden valmistaminen tapahtuu lisäämällä tulostusmateriaalia, kuten muovia, metallia tai lasia, kerros kerrokselta erilaisin menetelmin. Kerroksia lisätään, kunnes kappale on valmis. 3D-tulostimilla voidaan valmistaa muun muassa pienoismalleja, prototyypppejä ja valumuotteja. (Mattila 2015.)

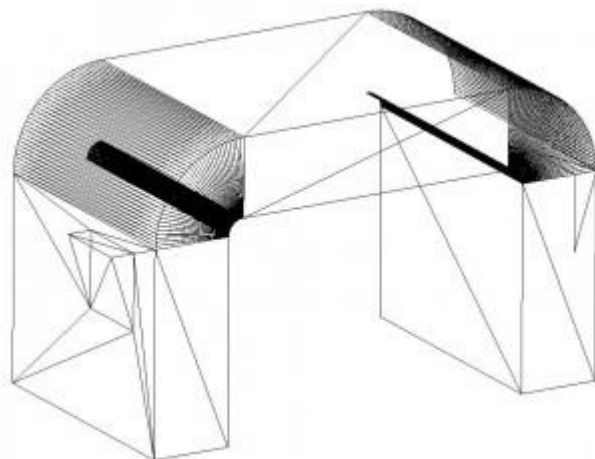
### 2.1 Työvaiheet

Haluttu esine mallinnetaan CAD- tai 3D-mallinnusohjelmalla, kuten SolidWorkssillä (kuvio 1) tai 3D-skannerilla tietokoneelle skannattuna tiedostona, jota voidaan vielä muokata tietokoneella (Mattila 2015; Helsingin kaupunki 2017). Lopullisen 3D-mallin toimivuus voidaan tarkistaa Netfabb-ohjelmalla. Tämän jälkeen STL-tiedosto siirretään tulostusohjelmaan, joka tekee STL-tiedostosta G-liikkeenhallintakoodia tulostimen ohjaamiseksi. Tulostettava esine viipaloidaan tulostusohjelmassa kymmeneen tai jopa satoihin viipaleisiin (kuvio 2), joiden pohjalta tulostusohjelma ohjaa tulostinta kerros kerrokselta, kunnes syntyy valmis kappale. Kappaleen jäähtyttyä poistetaan mahdolliset tukirakenteet ja tarvittaessa pinta viimeistellään. (Mattila 2015.)



KUVIO 1. 3D-malli SolidWork:ssä (AIPWorks 2016)





KUVIO 2. STL-malli (AIPWorks 2016)

## 2.2 Tulostusmateriaaleja ja niiden käyttökohteita

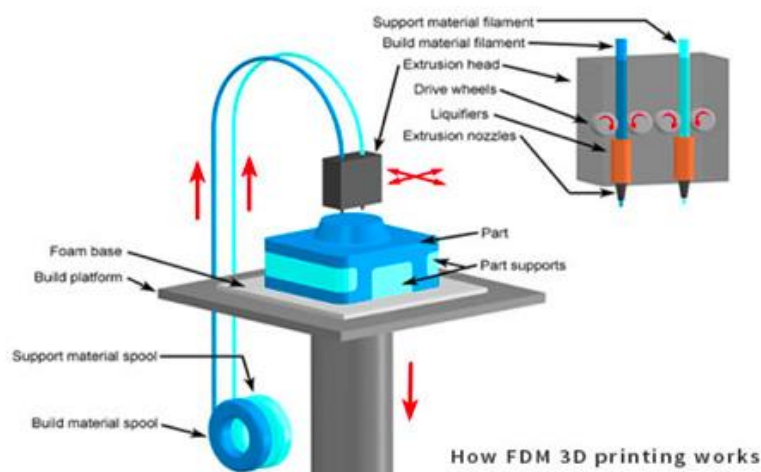
3D-tulostuksessa voidaan materiaalina käyttää muun muassa muovia, metallia, puukuitua, keraamia, lasia tai jopa elävää kudosta (Keski-Suomen Liitto 2017; Wikimedia Foundation Inc. 2017a). Metalleista voidaan 3D-tulostusta hyödyntämällä valmistaa muun muassa työkaluja ja varaosia esimerkiksi tuotantolinjojen laitteistoihin. Edistyksellistä 3D-tulostuksessa on muun muassa se, että sillä voidaan tulostaa metallista kappaleita, joita on kallista tai jopa mahdotonta valmistaa perinteisillä tavoilla. Mahdottomasta voidaan mainita esimerkkinä ontto- tai verkkomainen rakenne umpinaisen kappaleen sisärakenteena, mikä alentaa kappaleen painoa ratkaisevasti ja säästää materiaalia muista ominaisuuksista tinkimättä. (Eurometalli 2015, 28.) Sulan lasin tulostaminen asettaa 3D-tulostimelle haasteen, sillä sen lämpötilan täytyy olla selvästi yli tuhat astetta, muutoin lasin raaka-aine ei pysy sulana ja työstettävänä. Lasista on tulostettu erilaisia vaaseja ja kulhoja. (Paukku 2015.) Elävästä kudoksesta voidaan tulostaa esimerkiksi korva tai leukaluun osa, joka voidaan istuttaa ihmisvartaloon. Keinotekoinen osa kasvaa ajan myötä luonnolliseksi osaksi ihmisruumista, ja rakenteen biohajoava muovi häviää asteittain uudesta ruumiinosasta. (Alma Media Oyj 2016.)

## 2.3 3D-tulostusteknologiat

3D-tulostuksessa eri teknologiat pohjautuvat samaan peruseriaatteeseen: esine rakennetaan lisäämällä ainetta kerros kerrokselta. Eri menetelmien nopeudet, tarkkuudet, materiaalit ja hinnat vaihtelevat, ja jokaisella menetelmällä on omat vahvuutensa. (Smith 2017.)

### 2.3.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

FDM-tekniikka (kuvio 3) on Stratasysin perustajan Scott Crumpin 1980-luvulla kehittämä 3D-tulostusmenetelmä, jolla voidaan valmistaa erilaisia komponentteja ja malleja termoplastisista muoveista (kestomuovit) sekä konseptimalleja, toiminnallisia prototyyppejä ja loppukäyttöön soveltuvia osia teknisistä termoplastisista muoveista kuten ABS, PC, PPSU ja niin edelleen (Hoskins 2013, 45; NC-Tuote Oy 2016a; Wikimedia Foundation Inc. 2016b). FDM on yleisin 3D-tulostusmenetelmä osittain siksi, että alkuperäiset patentit ovat nyt rauenneet ja osittain RepRapin kehittäjän tohtori Adrian Bowyerin Bathin yliopistossa tekemän työn ansiosta (Hoskins 2013, 44).



KUVIO 3. Fused Deposition Modelingin periaate (Aniwaa Pte. Ltd. 2016)

FDM-tekniikkaa käyttävät 3D-tulostimet valmistavat mallin tai osan tulostuspäässä sulatettavasta kestopuovilangasta pursottamalla sitä kerros kerrokselta (kerrospaksuus 0,1-0,33mm) STL-mallin geometriaa seuraten. Tulostuspää liikkuu XY-tasossa ja tulostimen pöytä Z-suunnassa. (RP-Case 2014; NC-Tuote Oy 2016b.) STL-tiedostossa mallin pinnat esitetään tasokolmioiden avulla, joten tasopinnoista tulee ehdottoman tarkat. Kaarevat pinnat tulee jakaa tarpeeksi pieniin kolmioihin, jotta STL-geometriasta saadaan tarpeeksi tarkka. (AIPworks 2016.)

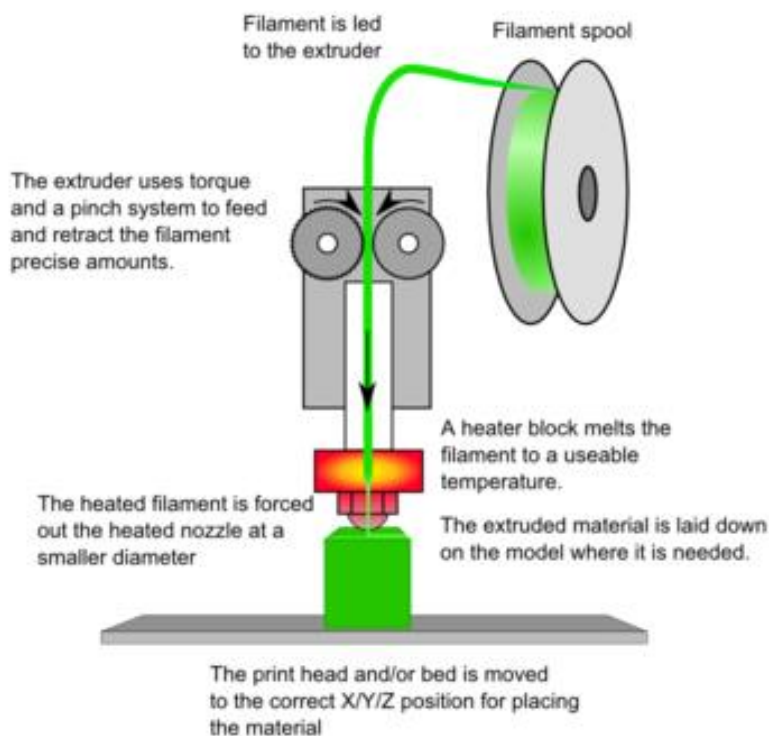
Tulostusprosessissa käytetään kahta materiaalia, malli- ja tukimateriaalia. Mallimateriaalista muodostuu varsinainen kappale ja tukimateriaali toimii mallin tukena tulostuksen aikana. Tukimateriaali poistetaan valmiista mallista joko mekaanisesti tai käyttämällä tehtävään tarkoitettua pesukonetta, pesuainetta ja vettä. (NC-Tuote Oy 2016b.)

FDM-valmistustekniikkaa käyttävät tulostimet soveltuvat hyvin koti- ja toimistokäyttöön, koska valmistusprosessi on siistiä ja koneet ovat helppokäyttöisiä. Muiden 3D-tulostusmenetelmien sijaan FDM-tekniikalla voidaan valmistaa vaikeamuotoisia malleja ja kappaleita. Parhaimmillaan tekniikka on valmistettaessa suuria kappaleita, joissa pinnanlaatu ei ole oleellisin asia. Materiaaleina käytettävistä termoplastisista muoveista valmistetut kappaleet kestävät lämpöä, kemikaaleja, kosteutta, käyttöä kuivissa ja kylmissä olosuhteissa sekä kovaa mekaanista rasitusta. FDM - tekniikan huonoja puolia ovat sen hitaus, joten se ei sovellu suursarjatuotantoon, ja valmiiden kappaleiden anisotrooppisuus. (RP-Case 2014; NC-Tuote Oy 2016b.)

### 2.3.2 Fused Filament Fabrication (FFF)

FFF-tekniikka (kuvio 4) vastaa FDM-tekniikkaa. Koska termi Fused Deposition Modeling ja sen lyhenne FDM ovat Stratasysin tavaramerkkejä, keksivät RepRap-projektin jäsenet tekniikalle nimeksi kuvaavan fraasin, jolle ei ollut laillista estettä. FFF-tekniikalla tulostettaessa suosituimmat

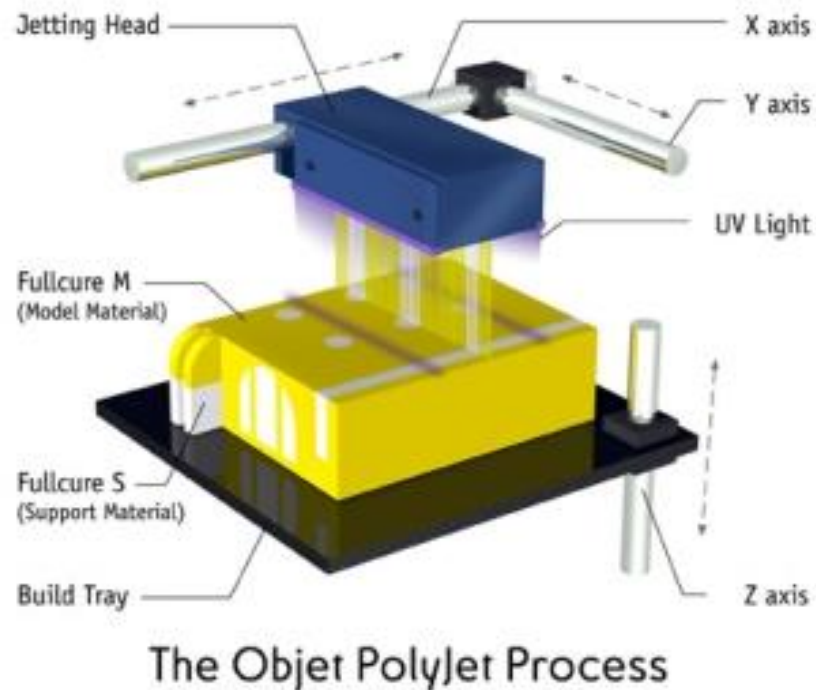
materiaalit ovat PLA ja ABS, voidaan käyttää myös muun muassa nailonia (PA), HDPE ja PCL. (RepRap 2016.)



KUVIO 4. Fused Filament Fabricationin periaate (RepRap.org 2016)

### 2.3.3 PolyJet Printing

PolyJet-tekniikassa (kuvio 5) akryylipohjaista fotopolymeeriä suihkutetaan alustalle erittäin ohuiksi kerroksiksi (0,03 - 0,016 mm). Jokainen kerros kovetetaan välittömästi ultraviolettivalolla, minkä vuoksi kappale on käsiteltävissä ja käytettävissä heti valmistuttuaan, ilman jälkikovuusta. Geolimäinen tukimateriaali, joka on erityisesti suunniteltu tukemaan monimutkaisia muotoja, poistetaan painepesulla ja viimeinen kovettumaton fotopolymeerikerros joko mekaanisesti tai lipeäpesulla. (RP-Case 2014; Materialise NV 2016.)



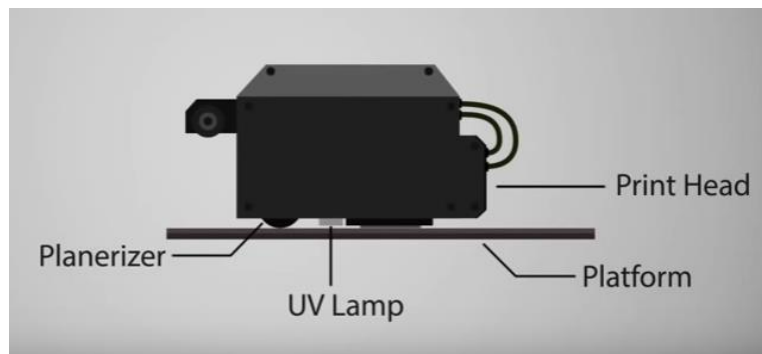
KUVIO 5. PolyJetin periaate (Engatech 2017)

PolyJet-tekniikka mahdollistaa niin sanottujen digitaalisten materiaalien käytön. Digitaaliset materiaalit ovat kahden tai kolmen fotopolymeerin erisuhteisia yhdistelmämaterialleja. Sekoittamalla eri materiaaleja keskenään saavutetaan kappaleissa haluttuja kovuusasteita. Muun muassa pehmeää ja kovaa materiaalia sekoittamalla mahdollistetaan eri elastomeerikovuuksien tulostaminen. (RP-Case 2014; Grano 2016; Stratasys Ltd. 2016.)

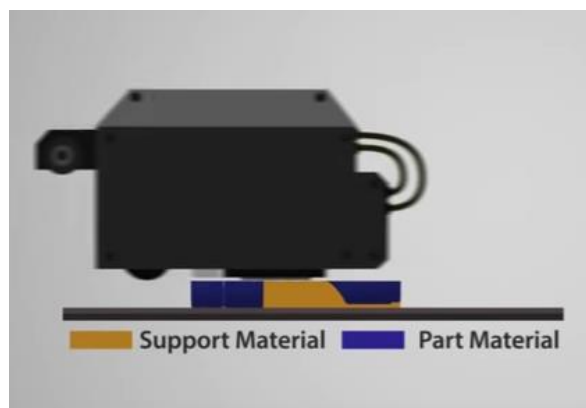
PolyJet-tekniikalla valmistetut kappaleet ovat parhaimmillaan elastomeeri- ja kaksikomponenttikappaleissa. Tekniikka ei mahdollista kovin pieniä ja tarkkoja yksityiskohtia ja tukimateriaalin poistotapa aiheuttaa rajoitteita kappaleen muodolle. (RP-Case 2014.)

### 2.3.4 MultiJet Printing (MJP)

MJP-tekniikassa (kuvio 6) suihkutetaan tasaiselle alustalle lämmitettyä, nestemäistä, akryylipohjaista fotopolymeeriä kerros kerrokselta erittäin ohuina (0,03 - 0,016 mm) kerroksina. Jokainen kerros kovetetaan ultravioletivalolla. Kappaleen tyhjiin kohtiin suihkutetaan tukimateriaalina toimivaa steariinin kaltaista vahaa, joka sekkin kovetetaan ultravioletivalolla (kuvio 7). Tukimateriaali poistetaan sulattamalla 65-asteisessa uunissa. Tekniikka mahdollistaa myös monimateriaalikappaleiden ja elastomeerien tulostamisen. Valmiit MJP-kappaleet voidaan pintakäsitellä muun muassa maalaamalla ja kromaamalla. (RP-Case 2014; 3D Systems Inc. 2016b.)



KUVIO 6. MultiJet Printerin osat (YouTube 2015)

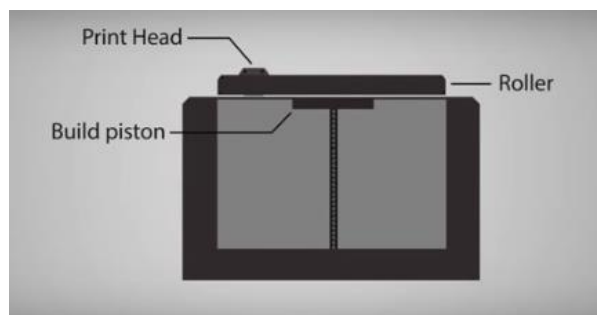


KUVIO 7. MultiJet Printingin periaate (YouTube 2015)

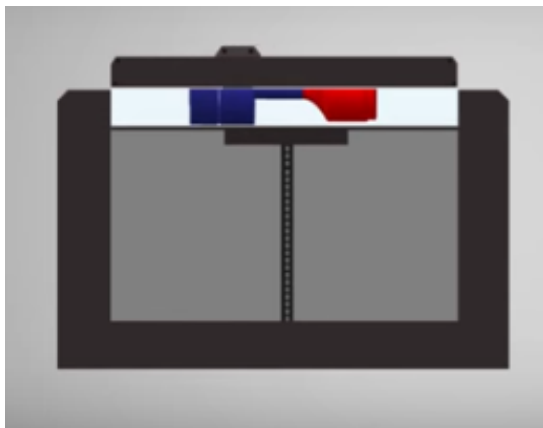
Tekniikalla saadaan aikaiseksi nopeasti sileitä, korkearesoluutisia, lujia ja muodoiltaan monimutkaisia kappaleita. Sileän pintansa, poikkeuksellisen tarkkojen yksityiskohtiensa ja mekaanisten ominaisuuksiensa vuoksi MJP-tekniikalla tulostetut kappaleet soveltuvat muun muassa luonnosmalleiksi ja muodontestausmalleiksi. (3D Systems Inc. 2016b.)

### 2.3.5 ColorJet Printing (CJP)

CJP-tekniikassa (kuvio 8) kappale valmistetaan kahdesta pääkomponentista, jauhemaisesta ydinaineesta ja nestemäisestä sidosaineesta. Ydinaine levitetään telalla ohuina kerroksina (0,1 mm) rakennusalustalle. Jokaisen ydinainekerroksen jälkeen mustesuihkukirjoituspää, jossa halutut värit ja sidosaine on sekoitettu, suihkuttaa sidosainekerroksen, joka saa ydinainekerroksen jäähmettymään. (RP-Case 2014; 3D Systems Inc. 2016a). Ennen jokaista seuraavaa ydinainekerrosta rakennusalusta laskeutuu alaspäin kunnes kolmiulotteinen, läpivärjätty kappale on valmis (3D Systems Inc. 2016a) (kuvio 9). CJP-tekniikalla valmistettu kappale on melko hauras, joten se kovetetaan suolaliuoksella, epoksilla tai laimennetulla pikaliimalla. Markkinoilla on jo ainakin yksi tulostinmalli, jonka ydinaine on muovia, eikä kovettamista tarvita. (RP-Case 2014.) Tulostetaan kappale sitten valkoisena tai värillisenä, voidaan pinta viimeistellä kirkkaalla lakalla kovaksi, sileäksi pinnaksi tai vahalla tasaiseksi (3D Systems Inc. 2016a).



KUVIO 8. ColorJet Printerin osat (YouTube 2013)



KUVIO 9. ColorJet Printingin periaate (YouTube 2013)

CJP on nopea ja edullinen tulostustekniikka. Materiaalihukka on erittäin pieni, koska tukimateriaalina toimii sama jauhe, josta kappale rakentuu ja joka on kokonaisuudessaan uudelleenkäytettävissä. CJP:llä tuotetut mallit soveltuvat erinomaisesti muun muassa hahmomalleiksi, arkkitehtimalleiksi sekä myynnin ja markkinoinnin tueksi. (RP-Case 2014.)

### 2.3.6 Plastic Jet Printing (PJP)

PJP-tekniikassa rakennusmateriaalina käytettävä termoplastinen muovi kuten ABS tai PC sulatetaan ja puristetaan erityisesti suunnitellun suulakkeen läpi alustalle. Materiaali jähmettyy nopeasti, ja alusta laskeutuu ennen seuraavaa puristettavaa materiaalikerrosta. Työvaiheet toistuvat, kunnes kappale on valmis. Sen jälkeen kappale poistetaan rakennuskammioista ja puhdistetaan. (3D Systems Inc. 2016c.)

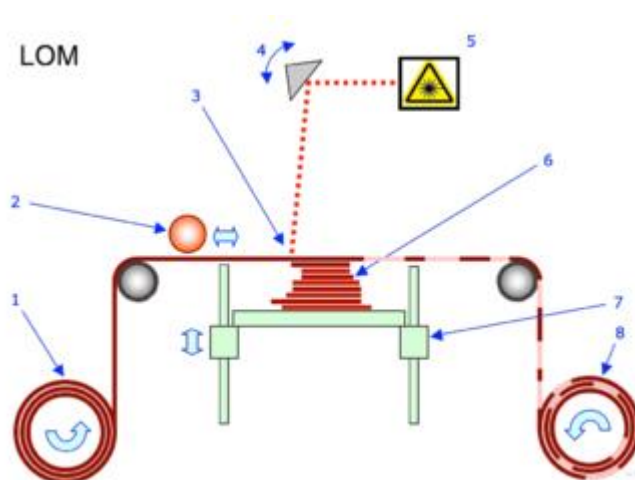
PJP on nopea menetelmä tehdä geometrialtaan monimutkaisia kappaleita, joiden valmistaminen perinteisin valmistusmenetelmin kuten CNC-koneilla olisi vaikeaa, hitaampaa ja epätaloudellisempaa. Tekniikka mahdollistaa useille teollisuudenaloille nopeilla toimituksilla mittatarkkoja toiminnallisia prototyyppisiä ja pienissä sarjoissa osia, jotka kestävät korkeita lämpötiloja ja mekaanista rasitusta. (3D Systems Inc. 2016c.)



### 2.3.7 Laminated Object Manufacturing (LOM)

LOM on pikamallintamiseen kehitetty menetelmä, jonka tulostimet käyttävät materiaalina muovin tai paperin katkeamatonta arkkia (Purch 2017; Wikimedia Foundation Inc. 2017b). Tulostimet laminoivat materiaalikerroksia toisiinsa lämmön ja paineen avulla, ja sen jälkeen tietokoneohjattu laser tai terä leikkaa sen haluttuun muotoon (kuvio 10) (Purch 2017; Wikimedia Foundation Inc. 2017b).

Vaikka LOM ei nykyään ole suosituin 3D-tulostusmenetelmä, se on yhä yksi nopeimmista ja edullisimmista tavoista luoda 3D-prototyyppettä. LOM mahdollistaa suurten mallien valmistamisen, koska prosessi ei sisällä kemiallisia reaktioita, minkä vuoksi ei tarvita suljettua kammiota. Menetelmällä ei kuitenkaan voi valmistaa geometriltaan monimutkaisia eikä onttoja kappaleita. (Purch 2017.)

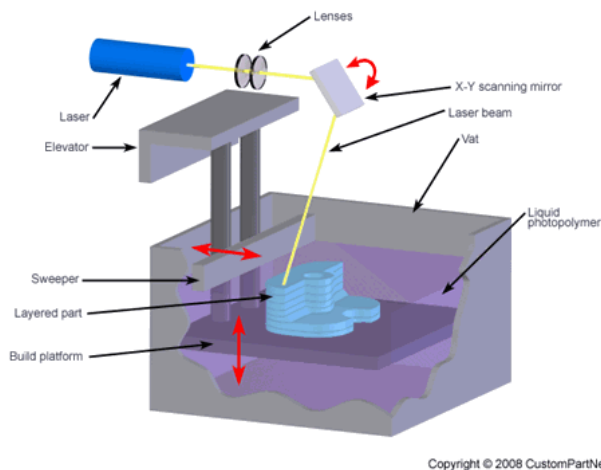


1 Foil supply. 2 Heated roller. 3 Laser beam. 4. Scanning prism. 5 Laser unit. 6 Layers. 7 Moving platform. 8 Waste.

KUVIO 10. Laminated Object Manufacturingin periaate (Wikimedia Foundation Inc. 2017)

### 2.3.8 Stereolitografia (SL, SLA)

SLA-prosessin (kuvio 11) alussa rakennusalusta asemoidaan aivan epoksipohjaisen fotopolymeeriemulsion pinnan alapuolelle (RP-Case 2014; Hoskins 2013, 44). Esineen fotopolymeeriemulsioon piirretty ensimmäinen kerros kovetetaan lasersäteellä, minkä jälkeen rakennusalustaa lasketaan kerroksen verran. Sama prosessi toistetaan kerros kerrokselta, kunnes esine on täysin valmis. Lopuksi rakennusalusta nostetaan alkuasentoon ja kappale poistetaan tulostimesta pestäväksi ja jälkikovetettavaksi UV-kaapissa. SLA-tekniikka edellyttää tukirakenteiden käyttöä tukemaan rakennetta, estämään kappaleen kaatumisen kumoon tai vääristymien syntymisen. Tukirakenteet, jotka poistetaan mekaanisesti, rakentuvat samasta materiaalista kuin itse esine. (RP-Case 2014; Hoskins 2013, 44.) SLA-tekniikalla valmistetut kappaleet ovat tarvittaessa pintakäsiteltävissä (RP-Case 2014).

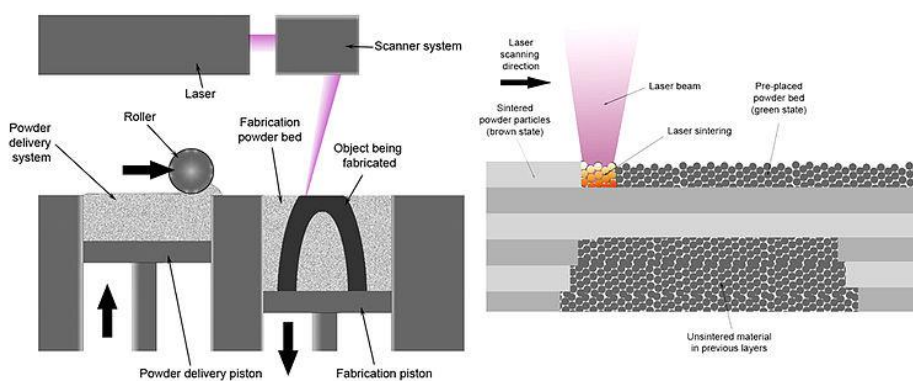


KUVIO 11. Stereolitografian periaate (CustomPartNet 2017)

SLA-tekniikalle on nykyisin tunnusomaista nopeus ja erinomainen XY-resoluutio. Sillä valmistetaan muun muassa master-malleja muottien tekoon, toiminnallisia prototyyppjä ja jonkin verran piensarjoja. (RP-Case 2014.)

### 2.3.9 Selective Laser Sintering (LS, SLS)

SLS-tekniikassa (kuvio 12) käytetään suuritehoista laseria sulattamaan jauhemainen materiaali, joka voi olla muovia, metallia, keraamia tai lasia. Muoveista yleisimmin käytettyjä ovat PA johdannaisineen ja PS. Polyamideja käytetään myös erilaisilla täyteaineilla kuten lasi ja alumiini. (RP-Case 2014; Wikimedia Foundation Inc. 2016a.)



KUVIO 12. Selective Laser Sinteringin periaate (Wikimedia Foundation Inc. 2017)

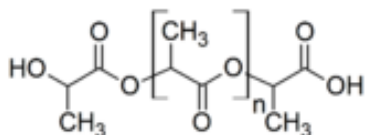
SLS:ssä voimakas laser sulattaa materiaalikerroksen, jonka jälkeen jauhepetiä lasketaan yhden kerrospaksuuden verran alaspäin ja päälle levitetään uusi jauhekerros sulatettavaksi. Prosessi toistetaan kunnes kappale on valmis. (RP-Case 2014; Wikimedia Foundation Inc. 2016a.) Valmis kappale on kokonaan niin sanotun materiaalikakun sisällä, joten erillistä tukimateriaalia ei tarvita. Kakku avataan käsin ja kappale puhdistetaan mekaanisesti. (RP-Case 2014.)

SLS-tekniikka on laajassa käytössä ympäri maailmaa, koska sillä voidaan helposti tehdä kappaleita, joilla on monimutkaisia geometrioita. Onttoja kappaleita sillä ei kuitenkaan voida valmistaa, koska sintraamatonta jauhetta ei saada pois kappaleen sisältä. SLS:llä valmistetaan prototyyppisiä, piensarjaisia lopputuotteita ja nopeasti kasvavassa määrin taidetta. (Wikimedia Foundation Inc. 2016a.)

### 3 TUTKIMUKSESSA KÄYTETTÄVÄ MATERIAALI JA 3D-TULOSTIN

#### 3.1 Valmistusmateriaali polylaktidi eli PLA

Polylaktidi (alifaattinen polyesteri) (kuvio 13) on maitohaposta, maissitärkkelyksestä tai sokeriruo'osta valmistettu kestumuovi. Tällainen biologisista lähteistä valmistettu kestumuovi on biohajoavaa oikeissa olosuhteissa kuten aktiivisessa kompostissa, kun läsnä on tarpeeksi happea, minkä vuoksi sen ympäristövaikutukset ovat paljon pienemmät kuin fossiilisista polttoaineista valmistettujen muovien. Polylaktidi on materiaalina melko kovaa ja sitkeää sekä hyvin kulutusta kestävä. Se vastaa monilta ominaisuuksiltaan perinteisiä muoveja. PLA:ta voidaan työstää samoilla menetelmillä kuin perinteisiä muoveja, kunhan huolehditaan sen huolellisesta kuivauksesta varastoinnin ja valmistuksen eri vaiheissa, sillä PLA hajoaa kosteuden ja lämmön vaikutuksesta. (Edumo Oy 2017; Muovien kierrätys 2017; Mynewsdesk 2017.)



KUVIO 13. Polylaktidin rakennekaava (Wikimedia Foundation Inc. 2017)

Polylaktidille (laadusta riippuen) suositeltu tulostuslämpötila on 180°C - 225°C (Prenta Oy 2017). Tulostuslämpötilan valintaan vaikuttavat muun muassa tulostusnopeus, 3D-tulostimen suuttimen läpimitta, tulosteen muoto ja kerrospaksuus (Edumo Oy 2017; Mynewsdesk 2017). Koska PLA:lla on ABS:ään verrattuna vähemmän taipumusta kieroutua, sillä voidaan tulostaa myös ilman lämmitettyä tulostusalustaa (Mynewsdesk 2017). Jos kuitenkin käytetään lämmitettyä tulostusalustaa, on suositeltu lämpötila 0 / 40°C - 80°C (Mynewsdesk 2017; Prenta Oy 2017). 3D-

tulostuksessa parhaan tuloksen saavuttamiseksi on ensimmäisen kerroksen tarttuvuus erittäin tärkeää. PLA-tulosteen tarttuvuutta voidaan parantaa muun muassa erikoisvahvalla hiuslakalla tai laittamalla tulostusalustaan peitenauhaa. (Mynewsdesk 2017.)

Koska polylaktidi sulaa hyvin ja sen kutistuminen on vähäistä, niin sillä tulostetut kappaleet ovat tasalaatuisia. Polylaktidista valmistetut kappaleet eivät sovellu materiaalin hauraudesta johtuen käytettäväksi vaativissa tai vaihtelevissa olosuhteissa kuten ulkona (UV-valo). PLA:n pehmenemislämpötila on 60°C, jolloin kappaleet alkavat taipua tai sortua kasaan. Materiaalin iskunkestävyyttä voidaan parantaa lisäaineilla. (Edumo Oy 2017.)

Monien muiden muovien tavoin PLA on hydroskooppinen eli imee itseensä kosteutta, joka ei haihdu materiaalista helposti. 3D-tulostettaessa filamenttilangan liiallinen kosteus voi lämmön ja kosteuden höyrystymisen vaikutuksesta aiheuttaa muun muassa epämuodostumia kappaleeseen. Valmiissa kappaleissa kostuminen ei aiheuta suuria ongelmia, koska polylaktidi on veteenliukenematon aine. PLA:n taipumuksesta hajota nopeasti kosteuden ja lämmön vaikutuksesta, tulee filamenttilankaa tuotettaessa tai varastoitaessa huolehtia riittävästä kuivauksesta. Hajonnut huonolaatuinen lanka vaikuttaa suoraan tulostuksen onnistumiseen ja tulosteiden käyttöikään. (Edumo Oy 2017.)

Opinnäytetyössä käytettiin Polymakerin PolyMax PLA:ta (kuva 1), jonka paksuus on 1,75 mm. Sen suositeltu tulostuslämpötila on välillä 190°C - 220°C ja tulostusnopeus 40mm/s – 90mm/s.



KUVA 1. Tulostusmateriaali

### 3.2 3D-tulostin

Opinnäytetyön kokeellisessa osuudessa käytettiin latvialaisen Mass Portalin, joka suunnittelee ja valmistaa 3D-tulostimia koti-, koulu- sekä toimistokäyttöön, Pharaoh ED 3D-tulostinta (kuva 2). Delta robottitekniikkaa hyödyntävät Pharaoh 3D-tulostimet ovat nopeita, hiljaisia ja erittäin tarkkoja. (Mass Portal 2017; 3d-tulostus.fi 2017.) Tulostimen lisätiedot on mainittu taulukossa 1.



KUVA 2. Pharaoh ED 3D-tulostin

## TAULUKKO 1. Mass Portal Paraoh ED -tulostimen lisätiedot (3d-tulostus.fi)

### Tuotteen lisätiedot

Koko (mm)	Leveys: 32 cm Syvyys: 31 cm korkeus: 63 cm
Lämmitetty tulostusalusta	kyllä
Materiaalin paksuus	1,75mm
Paino	16kg
Suuttimen koko	0.4-1mm
Tulostusalue (mm)	20cm tulostusalueen kehän halkaisija. 18,6cm ulkokehän tulostusalueen korkeus. Tulostusalueen keskellä tulostuskorkeus 20,5cm
Tulostusnopeus	30-300mm/s
Tulostuspään nopeus	30-400mm/s
Tulostuslämpötila	Jopa 300° C
Virrankulutus	110-240V / 50 - 60 HZ Max 305W nom. 115W standby 15W
Tulostusmateriaali	Suosittelut materiaali PLA Voi tulostaa myös: ABS, PET, PVA, HIPS

## 4 TAGUCHI-MENETELMÄ

Japanilaisen tohtori Genichi Taguchin kehittämä Taguchi-menetelmä on tuote- ja prosessisuunnitteluun kehitetty laadun optimointimenetelmä, jolla on samanaikaisesti laatua nostava ja kustannuksia alentava vaikutus (Karjalainen 1999, 3). Genichi Taguchin laadun määritelmä: ”Tuotteen laatu on (minimi)kokonaishävikki, jonka tuote aiheuttaa yhteisölle sen jälkeen, kun se on lähtenyt tuotantolaitoksesta” (Karjalainen 1999, 10).

Taguchi-menetelmä sisältää kolme perusvaihetta: systeemi-, parametri- ja toleranssisuunnittelu, ja nämä yhteen sitovan Taguchi-laatufilosofian, joka voidaan tiivistää neljään kohtaan:

- Tuotteen ominaisuuksien vaihtelua pienentämällä mahdollistetaan samanaikaisesti laadun parantaminen ja kustannusten alentaminen.
- Tuotteesta saadaan parempi ja halvempi, kun hyödynnetään halpojen ja suuritoleranssisten materiaalien ja osien ominaisuuksia (parametrejä).
- Häiriötekijöiden vaikutukset pyritään minimoimaan hyödyntämällä eri parametrien keskinäisiä vaikutuksia.
- Asiakkaalle laatua on vain paras arvo (tavoitearvo). (Karjalainen 1999, 7 – 8.)

### 4.1 Systeemisuunnittelu

Systeemisuunnittelu on asiakkaan tarpeista lähtevää tuotteen suunnittelua. Se pitää sisällään luovan ajattelun ja tiedon viimeisimmästä teknologiasta sekä tieteen että insinööritekniikan alalta.

Systeemisuunnittelussa valitaan valmistusmateriaalit, käytettävät komponentit ja alustavat tuoteparametrit. (Karjalainen 1999, 41 – 42.)

### 4.2 Parametrisuunnittelu

Parametrisuunnittelu on olennaisin osa Taguchi-menetelmää. Sen päämääränä on spesifioida suunnittelijan valittavissa ja ohjattavissa



olevien tekijöiden kuten materiaalien ja asetusarvojen ominaisarvot niin, että saadaan minimoitua kustannukset ja häiriötekijät sekä saavutetaan maksimaalinen suoritusarvo. (Karjalainen 1999, 45.)

Parametrisuunnittelun kokeellisessa suunnittelussa käytetään olemassa olevia ortogonaalimatriiseja. Niiden avulla kyetään käsittelemään suuri määrä muuttujia pienellä määrällä kokeita. Saadut tulokset ovat luotettavia ja toistettavia. (Karjalainen 1999, 55.)

#### 4.3 Toleranssisuunnittelu

Toleranssisuunnittelussa on tavoitteena käyttää

- mahdollisimman laajoja toleransseja
- halpoja materiaaleja ja komponentteja
- kokeellisella suunnittelulla valituista parametreistä parasta mahdollista yhdistelmää. (Karjalainen 1999, 75.)

Jos tuotteen tai prosessin laatuominaisuuksien kokonaisvaihtelu ei pysy asetetuissa rajoissa edellä mainituilla ehdoilla, vähennetään vaihtelua valitsemalla ratkaiseville valmistusmateriaaleille tai komponenteille joko tiukemmat toleranssit tai paremmat vaihtoehdot (Karjalainen 1999, 75).

## 5 KOEKAPPALEIDEN VALMISTUS

### 5.1 Koekappaleen 3D-mallinus

Koekappale mallinnettiin parametrisella 3D-mekaniikkasuunnitteluohjelmisto SolidWorksillä. Opinnäytetyössä haluttiin tutkia eri tulostusparametrien vaikutusta kappaleen pinnanlaatuun ja mittapysyvyyteen, joten kuution muotoiseen (30x30x30 mm) kappaleeseen suunniteltiin yhdeltä sivulta vastakkaiselle läpikulkeva pyöreä reikä ( $\varnothing$  4 mm) ja yhdestä kuution särmästä keskelle päin kapeneva kolmion muotoinen syväne (pituus 10 mm, leveimmältä kohdalta 4 mm, syvyys 2 mm).

### 5.2 Parametrit ja ortogonaalimatriisi

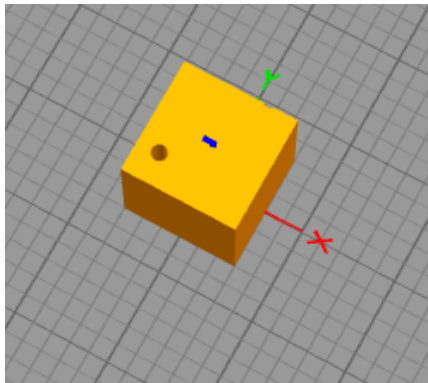
Opinnäytetyössä haluttiin tutkia kerrospaksuuden, täyttöprosentin ja tulostussuuttimen sekä tulostuspedin lämpötilan vaikutusta mittapysyvyyteen ja pinnanlaatuun. Jokaiselle parametrille valittiin kaksi tasoa joko PLA:n valmistajan tai yleisesti käytettävien raja-arvojen sisältä. Neljällä parametrilla ja niiden kahdella tasolla (punaisella pohjalla) ortogonaalimatriisiksi valikoitui  $L8(2^7)$  (taulukko 2), josta jätettiin huomioimatta pystysarakkeet (parametrit) 5 – 7.

TAULUKKO 2.  $L8(2^7)$  -ortogonaalimatriisi

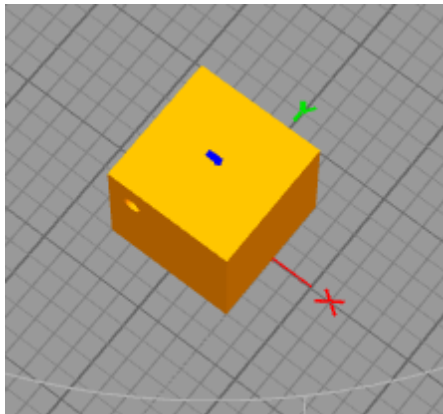
L8(2 <sup>7</sup> )							
KOE/PARAMETRI	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

### 5.3 Koekappaleiden tulostaminen

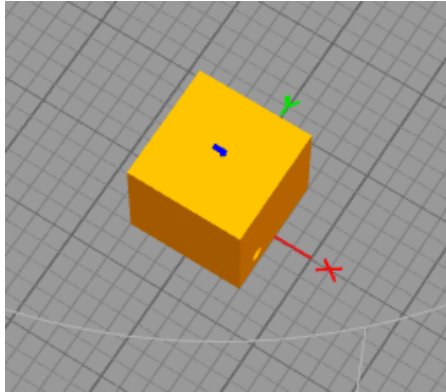
Koska työssä haluttiin tutkia parametrien vaikutusta mittapysyvyyteen ja pinnanlaatuun kappaleen ollessa kolmessa eri XYZ-suunnassa (kuviot 14 – 16), täytyi koekappaleita tulostaa 24 kappaletta, kahdeksan jokaista koetta kohden.



KUVIO 14. Koekappale XYZ-1



KUVIO 15. Koekappale XYZ-2



KUVIO 16. Koekappale XYZ-3

Tulostettaessa koekappaleita käytettiin parametreilla taulukon 3 mukaisia tasoarvoja, jotka muodostivat taulukon 4 mukaisen ortogonaalimatriisin. Parametreissa tulostussuuttimen lämpötilan ensimmäinen arvo kuvaa lämpötilaa tulostettaessa ensimmäistä kerrosta, jonka jälkeen lämpötilaa alennettiin jälkimmäisen arvon tasolle.

TAULUKKO 3. Parametrien arvot tasoilla 1 ja 2

Parametrit	Taso 1	Taso 2	
Kerrospaksuus	0,200	0,250	[mm]
Täyttöprosentti	20	25	[%]
Tulostussuuttimen lämpötila	210/190	210/200	[°C]
Tulostuspedin lämpötila	70	68	[°C]

TAULUKKO 4. Ortogonaalimatriisin mukainen koejärjestely

koe/parametri	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
1	0,20	20	210/190	70
2	0,20	20	210/190	68
3	0,20	25	210/200	70
4	0,20	25	210/200	68
5	0,25	20	210/200	70
6	0,25	20	210/200	68
7	0,25	25	210/190	70
8	0,25	25	210/190	68

## 6 TULOKSET

Kokeiden tulokset kirjattiin taulukon 5 mukaisesti. Jokaisen kahdeksan (sarake 1) kokeen jälkeen tutkittava ominaisuus joko mitattiin (mikrometri / pinnan karheus mittari) tai arvioitiin silmämääräisesti arvoasteikolla 0 – 3 ja tulos kirjattiin taulukon sarakkeeseen kaksi. Taulukon kolmanteen sarakkeeseen kirjattiin tavoitearvon ja saadun tuloksen erotus.

TAULUKKO 5. Esimerkki mittaustuloksista

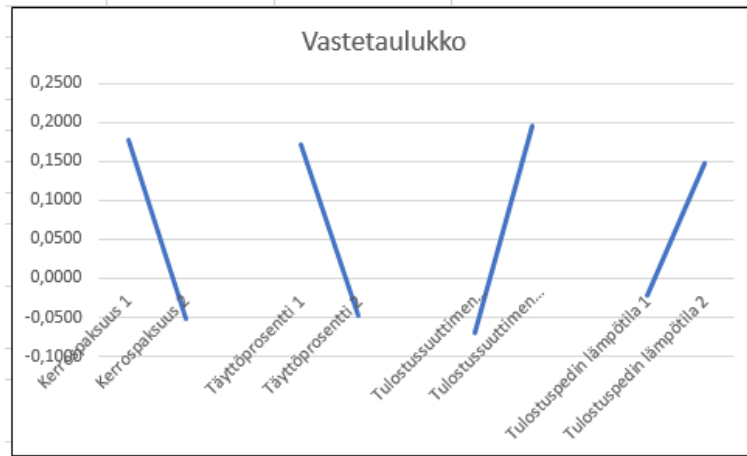
1	30,1900	0,1900
2	30,1200	0,1200
3	30,1900	0,1900
4	30,2100	0,2100
5	30,1600	0,1600
6	30,2200	0,2200
7	29,3700	-0,6300
8	30,0400	0,0400

Vastetaulukkoon (taulukko 6) laskettiin jokaisen parametrin osalta erotusten (neljä arvoa) keskiarvo tasoilta 1 ja 2. Parametrien optimiarvoiksi valittiin nollassa vähemmän poikkeava arvo.

TAULUKKO 6. Esimerkki vastetaulukosta

taso/parametri	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	0,1775	0,1725	-0,0700	-0,0225
Taso 2	-0,0525	-0,0475	0,1950	0,1475
Järjestys	2	2	1	1
Valinta	Kerrospaksuus 2	Täyttöprosentti 2	Tulostussuuttimen lämpötila 1	Tulostuspedin lämpötila 1
ero	0,2300	0,2200	0,2650	0,1700

Vastetaulukosta laadittiin kuvaaja (kuvio 17).



KUVIO 17. Esimerkki vastetaulukon kuvaajasta

Normaalisti Taguchi-menetelmää käytetään ratkaisemaan yhdelle ominaisuudelle parametrien optimiarvot. Työssä haluttiin normaalista poiketen tutkia samanaikaisesti parametrien vaikutusta yhdeksään ominaisuuteen, joten optimiarvoista laadittiin koostetaulukko (taulukko 7) jokaisesta tulostussuunnasta erikseen. Optimiarvoksi (tulos) kunkin parametrin osalta valittiin se arvo, jota taulukossa esiintyy määrällisesti enemmän.

TAULUKKO 7. Esimerkki koostetaulukosta

XYZ-1	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Kuution mitta1	2	2	1	1
Kuution mitta2	2	2	1	1
Kuution mitta3	1	1	2	2
Kulmat	2	1	2	2
Läpireikä	1	1	2	1
Nuolenkärki	1	2	1	1
Pinnanlaatu (yläpinta)	1	1	2	1
Pinnanlaatu (alapinta)	1	2	1	2
Pinnanlaatu (kylki)	1	1	2	2
Tulos	1	2	2	2

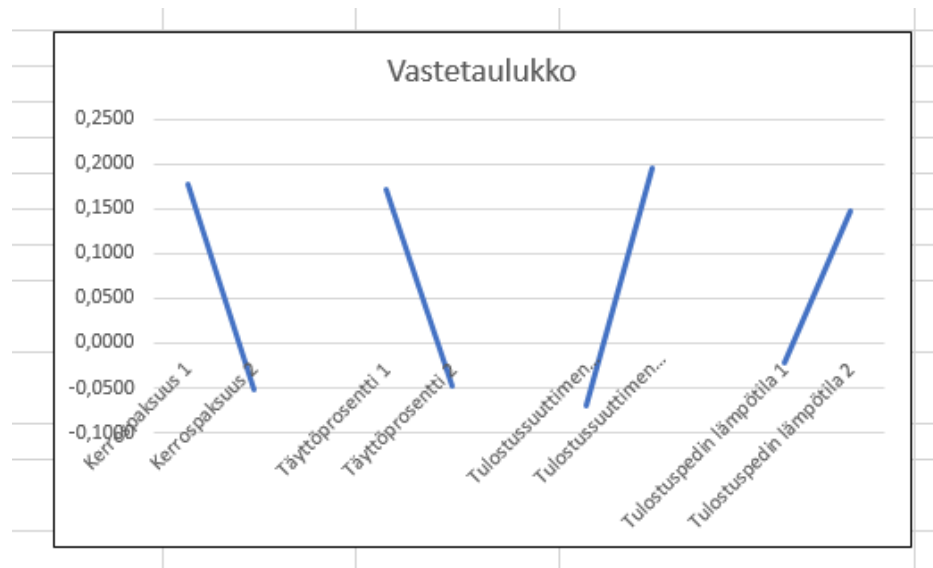
## 6.1 Tulostussuunta XYZ-1

Mittaustulokset ja silmämääräisen arvioinnin arvot löytyvät liitteestä 1.

### 6.1.1 Kuution leveys

#### TAULUKKO 8. Leveyden vastetaulukko

Vastetaulukko/kuution mitta 1				
taso/parametri	Kerospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	0,1775	0,1725	-0,0700	-0,0225
Taso 2	-0,0525	-0,0475	0,1950	0,1475
Järjestys	2	2	1	1
Valinta	Kerospaksuus 2	Täyttöprosentti 2	Tulostussuuttimen lämpötila 1	Tulostuspedin lämpötila 1
ero	0,2300	0,2200	0,2650	0,1700



KUVIO 18. Leveyden vastetalukon kuvaaja



## 6.1.2 Kuution syvyys

TAULUKKO 9. Syvyyden vastetaulukko

Vastetaulukko/kuution mitta 2				
taso/parametri	Kerros-paksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	0,1000	0,1600	-0,1200	-0,0625
Taso 2	-0,0550	-0,1150	0,1650	0,1075
Järjestys	2	2	1	1
Valinta	Kerros-paksuus 2	Täyttöprosentti 2	Tulostussuuttimen lämpötila 1	Tulostusperin lämpötila 1
ero	0,1550	0,2750	0,2850	0,1700



KUVIO 19. Syvyyden vastetaulukon kuvaaja

## 6.1.3 Kuution korkeus

TAULUKKO 10. Korkeuden vastetaulukko

Vastetaulukko/kuution mitta 3				
taso/parametri	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	-0,5975	-0,6350	-0,6525	-0,6450
Taso 2	-0,6775	-0,6400	-0,6225	-0,6300
Järjestys	1	1	2	2
Valinta	Kerrospaksuus 1	Täyttöprosentti 1	Tulostussuuttimen lämpötila 2	Tulostuspedin lämpötila 2
ero	0,0800	0,0050	0,0300	0,0150



KUVIO 20. Korkeuden vastetaulukon kuvaaja

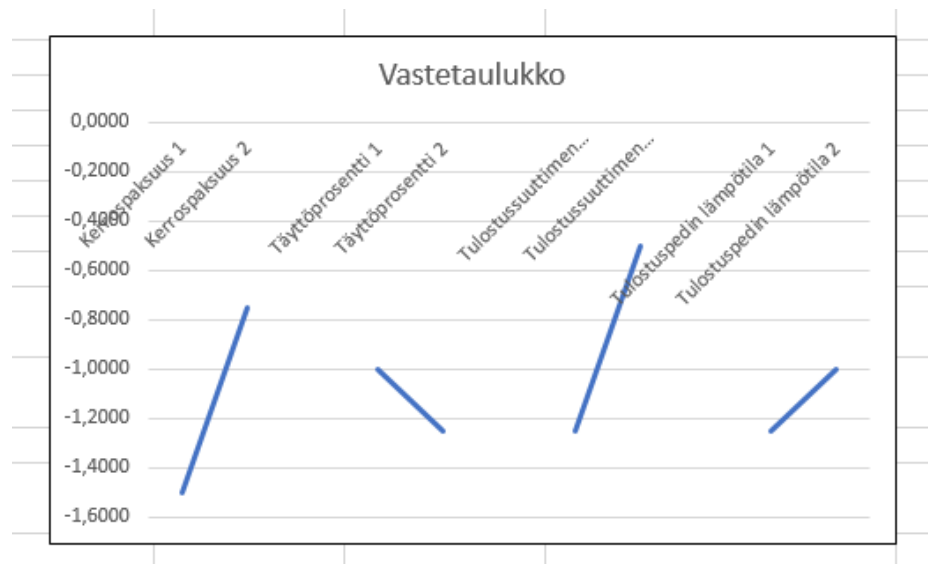
### 6.1.4 Kulmat

Kulmien osalta noudatettiin arvoasteikkoa 0 – 3 siten, että arvoksi tuli

- 3, jos kaikki kahdeksan kulmaa olivat suoria
- 2, jos 5 – 7 kulmaa oli suoria
- 1, jos 1 – 4 kulmaa oli suoria
- 0, jos kuutiossa ei ollut yhtään suoraa kulmaa.

### TAULUKKO 11. Kulmien vastetaulukko

Vastetaulukko/kulmat				
taso/parametri	Kerros-paksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	-1,5000	-1,0000	-1,2500	-1,2500
Taso 2	-0,7500	-1,2500	-0,5000	-1,0000
Järjestys	2	1	2	2
Valinta	Kerros-paksuus 2	Täyttöprosentti 1	Tulostussuuttimen lämpötila 2	Tulostuspedin lämpötila 2
ero	0,7500	0,2500	0,7500	0,2500



KUVIO 21. Kulmien vastetaulukon kuvaaja

## 6.1.5 Läpireikä

TAULUKKO 12. Läpirei'än vastetaulukko

Vastetaulukko/läpireikä				
taso/parametri	Kerros-paksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	-0,7500	-0,8750	-1,2500	-0,8750
Taso 2	-1,1250	-1,0000	-0,6250	-1,0000
Järjestys	1	1	2	1
Valinta	Kerros-paksuus 1	Täyttöprosentti 1	Tulostussuuttimen lämpötila 2	Tulostuspedin lämpötila 1
ero	0,3750	0,1250	0,6250	0,1250

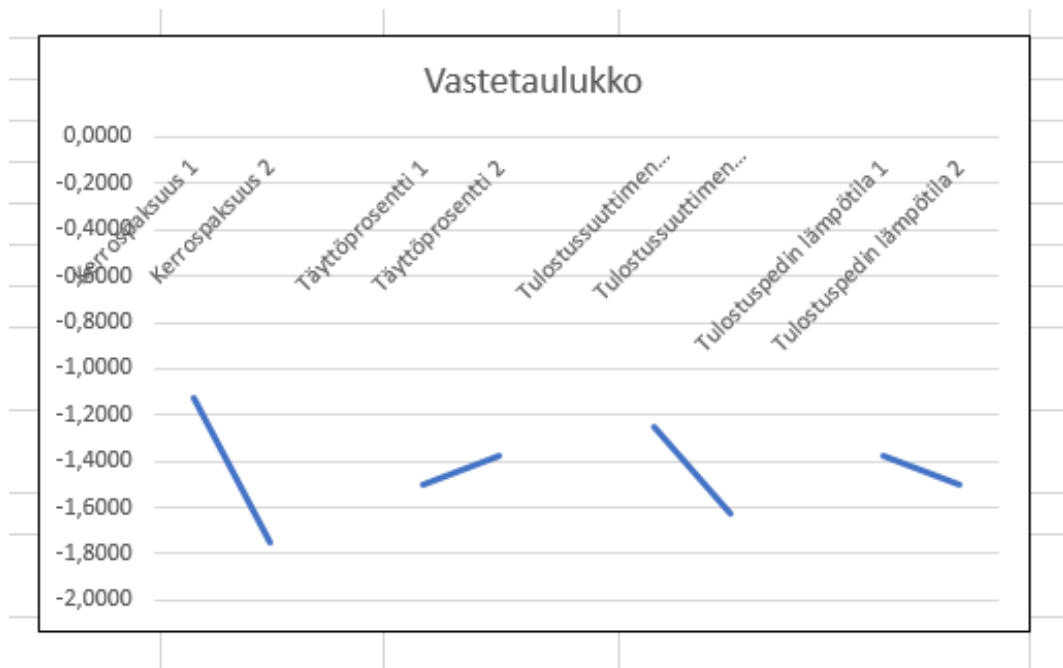


KUVIO 22. Läpirei'än vastetaulukon kuvaaja

## 6.1.6 Nuolenkärki

TAULUKKO 13. Nuolenkärjen vastetaulukko

Vastetaulukko/nuolenkärki				
taso/parametri	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	-1,1250	-1,5000	-1,2500	-1,3750
Taso 2	-1,7500	-1,3750	-1,6250	-1,5000
Järjestys	1	2	1	1
Valinta	Kerrospaksuus 1	Täyttöprosentti 2	Tulostussuuttimen lämpötila 1	Tulostuspedin lämpötila 1
ero	0,6250	0,1250	0,3750	0,1250

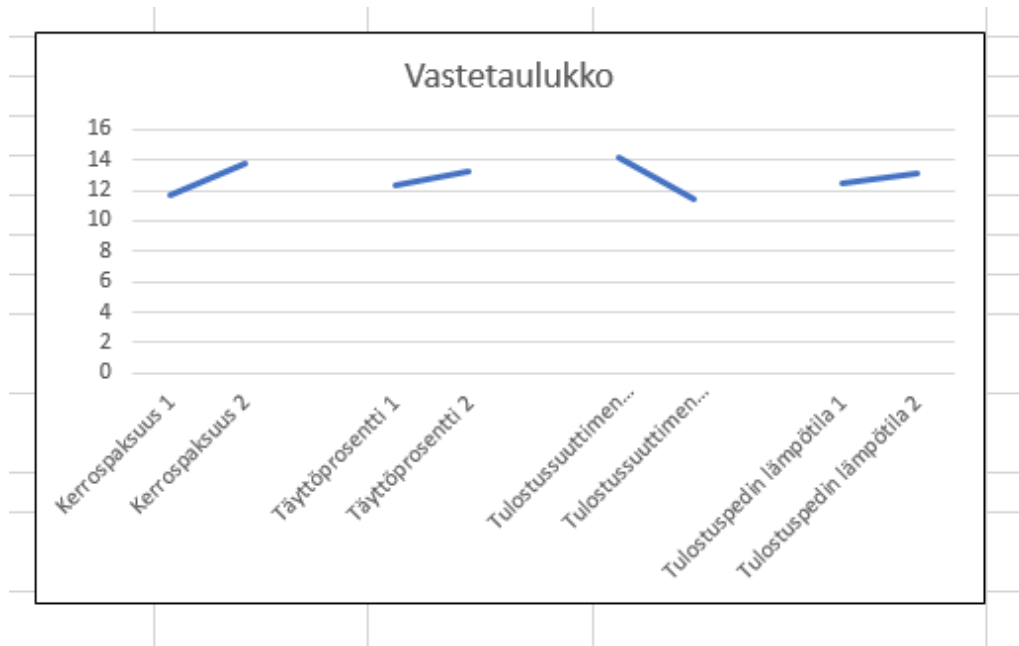


KUVIO 23. Nuolenkärjen vastetaulukon kuvaaja

## 6.1.7 Pinnanlaatu (yläpinta)

TAULUKKO 14. Pinnanlaadun (yläpinta) vastetaulukko

Vastetaulukko/pinnanlaatu (yläpinta)				
taso/parametri	Kerros-paksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	11,7548	12,3263	14,1755	12,5020
Taso 2	13,8378	13,2663	11,4170	13,0905
Järjestys	1	1	2	1
Valinta	Kerros-paksuus 1	Täyttöprosentti 1	Tulostussuuttimen lämpötila 2	Tulostuspedin lämpötila 1
ero	2,0830	0,9400	2,7585	0,5885

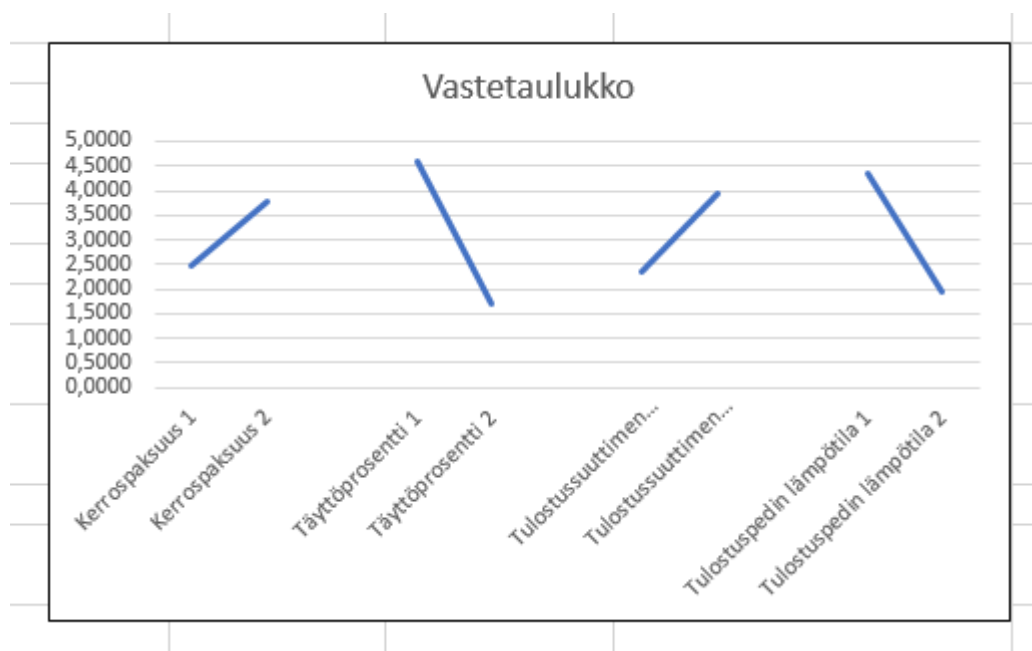


KUVIO 24. Pinnanlaadun (yläpinta) vastetaulukon kuvaaja

## 6.1.8 Pinnanlaatu (alapinta)

TAULUKKO 15. Pinnanlaadun (alapinta) vastetaulukko

Vastetaulukko/pinnanlaatu (alapinta)				
taso/parametri	Kerros-paksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	2,4898	4,5818	2,3350	4,3305
Taso 2	3,7768	1,6848	3,9315	1,9360
Järjestys	1	2	1	2
Valinta	Kerros-paksuus 1	Täyttöprosentti 2	Tulostussuuttimen lämpötila 1	Tulostuspedin lämpötila 2
ero	1,2870	2,8970	1,5965	2,3945

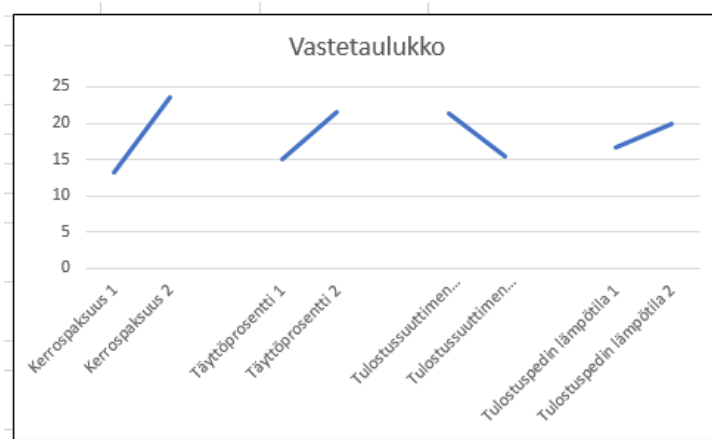


KUVIO 25. Pinnanlaadun (alapinta) vastetaulukon kuvaaja

## 6.1.9 Pinnanlaatu (kylki)

TAULUKKO 16. Pinnanlaadun (kylki) vastetaulukko

Vastetaulukko/pinnanlaatu (kylki)				
taso/parametri	Kerros-paksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	13,1435	15,1018	21,2605	16,7310
Taso 2	23,5673	21,6090	15,4503	19,9798
Järjestys	1	1	2	1
Valinta	Kerros-paksuus 1	Täyttöprosentti 1	Tulostussuuttimen lämpötila 2	Tulostuspedin lämpötila 1
ero	10,4238	6,5073	5,8103	3,2488



KUVIO 26. Pinnanlaadun (kylki) vastetaulukon kuvaaja

## 6.1.10 Päätelmät tulostussuunnassa XYZ-1

Saatujen tulosten perusteella voidaan päätellä, että suurin merkitys on kerros-paksuudella. Sen ollessa pienempi on mittatarkkuus ja pinnanlaatu monelta osin parempi.

Tulostuspedin lämpötilalla ei näyttäisi olevan vaikutusta muuhun kuin kappaleen alapinnan laatuun, joka on parempi alhaisemmalla lämpötilalla. Se johtunee kuitenkin siitä, että ensimmäiset kerrokset sulavat, mistä



syystä taas kuution alanurkat käpristyvät. Ongelman ratkaisemiseksi voisi kokeilla lämmittämätöntä tulostusalustaa.

Tulostussuuttimen lämpötilasta ja täyttöprosentista on vaikea tehdä yksiselitteistä johtopäätöstä, koska molempien osalta tasot 1 ja 2 vaikuttivat johonkin ominaisuuteen parantavasti ja taas toiseen heikentävästi.

#### 6.1.11 Parametrien optimiarvot ja testaus

Tulostussuunnan XYZ-1 parametrien koostetaulukosta (taulukko 17) saadun tuloksen pohjalta tulostettiin 3D-kappale, jonka mittaustulokset ja silmämääräisellä arvioinnilla annetut arvot ovat taulukossa 18. Taulukosta 18 nähdään, että useimmat ominaisuuksien arvot ovat lähellä optimiarvoa.

TAULUKKO 17. Parametrien optimiarvojen koostetaulukko

XYZ-1	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Kuution mitta1	2	2	1	1
Kuution mitta2	2	2	1	1
Kuution mitta3	1	1	2	2
Kulmat	2	1	2	2
Läpireikä	1	1	2	1
Nuolenkärki	1	2	1	1
Pinnanlaatu (yläpinta)	1	1	2	1
Pinnanlaatu (alapinta)	1	2	1	2
Pinnanlaatu (kylki)	1	1	2	2
Tulos	1	2	2	2

TAULUKKO 18. Optimiarvoilla tulostettu kappale

Optimikappale	
Kuution mitta1	29,52
Kuution mitta2	29,93
Kuution mitta3	29,62
Kulmat	1
Läpireikä	2,75
Nuolenkärki	2,5
Pinnanlaatu (yläpinta)	2,423
Pinnanlaatu (alapinta)	0,279
Pinnanlaatu (kylki)	10,298

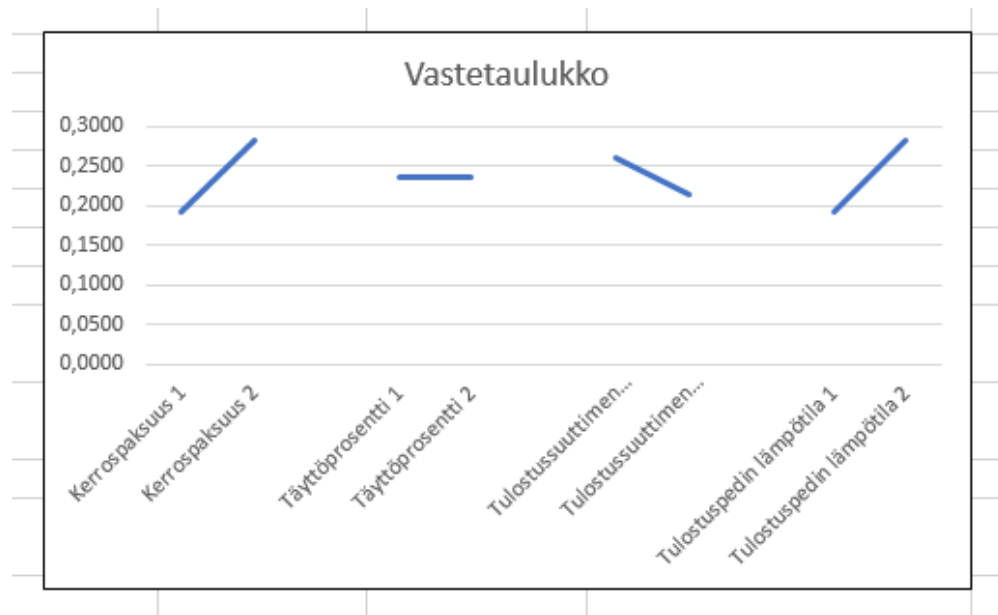
## 6.2 Tulostussunnta XYZ-2

Mittaustulokset ja silmämääräisen arvioinnin arvot löytyvät liitteestä 2.

### 6.2.1 Kuution leveys

TAULUKKO 19. Leveyden vastetaulukko

Vastetaulukko/kuution mitta 1				
taso/parametri	Kerros-paksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	0,1925	0,2375	0,2600	0,1925
Taso 2	0,2825	0,2375	0,2150	0,2825
Järjestys	1		2	1
Valinta	Kerros-paksuus 1	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila 2	Tulostuspedin lämpötila 1
ero	0,090	0,000	0,045	0,090

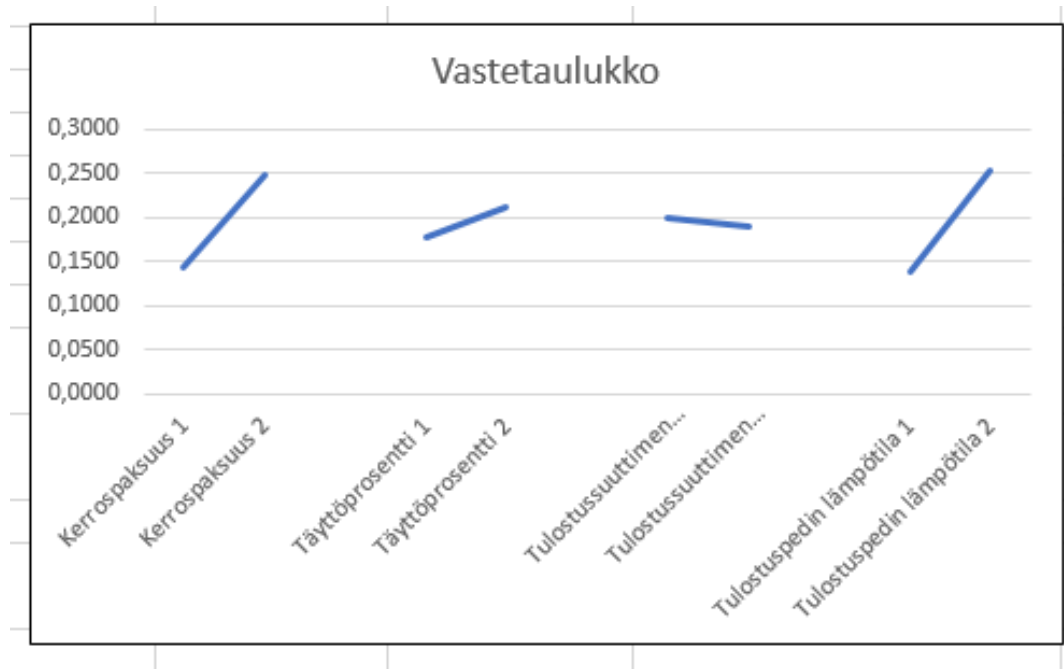


KUVIO 27. Leveyden vastetaulukon kuvaaja

## 6.2.2 Kuution syvyys

### TAULUKKO 20. Syvyyden vastetaulukko

Vastetaulukko/kuution mitta 2				
Taso/tekijä	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	0,1425	0,1775	0,2000	0,1375
Taso 2	0,2475	0,2125	0,1900	0,2525
Järjestys	1	1	2	1
Valinta	Kerrospaksuus 1	Täyttöprosentti 1	Tulostussuuttimen lämpötila 2	Tulostuspedin lämpötila 1
ero	0,1050	0,0350	0,0100	0,1150



KUVIO 28. Syvyyden vastetaulukon kuvaaja

### 6.2.3 Kuution korkeus

#### TAULUKKO 21. Korkeuden vastetaulukko

Vastetaulukko/kuution mitta 3				
Taso/tekijä	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	-0,3575	-0,6125	-0,3400	-0,5825
Taso 2	-0,3675	-0,1125	-0,3850	-0,1425
Järjestys	1	2	1	2
Valinta	Kerrospaksuus 1	Täyttöprosentti 2	Tulostussuuttimen lämpötila 1	Tulostuspedin lämpötila 2
ero	0,0100	0,5000	0,0450	0,4400



KUVIO 29. Korkeuden vastetaulukon kuvaaja

#### 6.2.4 Kulmat

TAULUKKO 22. Kulmien vastetaulukko

Vastetaulukko/kulmat				
Taso/tekijä	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	-1,5000	-1,0000	-1,5000	-1,2500
Taso 2	-1,0000	-1,5000	-1,0000	-1,2500
Järjestys	2	1	2	
Valinta	Kerrospaksuus 2	Täyttöprosentti 1	Tulostussuuttimen lämpötila 2	Tulostuspedin lämpötila
ero	0,5000	0,5000	0,5000	0,0000



KUVIO 30. Kulmien vastetaulukon kuvaaja

### 6.2.5 Läpireikä

TAULUKKO 23. Läpirei'än vastetaulukko

Vastetaulukko/läpireikä				
Taso/tekijä	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	-2,5000	-2,5000	-2,5000	-2,5000
Taso 2	-2,5000	-2,5000	-2,5000	-2,5000
Järjestys				
Valinta	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
ero	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

## 6.2.6 Nuolenkärki

TAULUKKO 24. Nuolenkärjen vastetaulukko

Vastetaulukko/nuolenkärki				
Taso/tekijä	Kerros-paksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	-2,7500	-3,0000	-2,7500	-2,7500
Taso 2	-2,7500	-2,5000	-2,7500	-2,7500
Järjestys		2		
Valinta	Kerros-paksuus	Täyttöprosentti 2	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
ero	0,0000	0,5000	0,0000	0,0000



KUVIO 31. Nuolenkärjen vastetaulukon kuvaaja

## 6.2.7 Pinnanlaatu

Tulostussuunta XYZ-2:ssa saadut pinnanlaadun tulokset vastasivat tulostussuunta XYZ-1:n ylä- ja alapinnan sekä kyljen arvoja, joten vastetaulukot ja niiden kuvaajat löytyvät kohdista 6.1.7, 6.1.8 ja 6.1.9.

### 6.2.8 Päätelmät tulostussuunnassa XYZ-2

Saatujen tulosten perusteella voidaan päätellä, että tulostussuunnassa XYZ-2 kerrospaksuuden ollessa pienempi on mittatarkkuus ja pinnanlaatu monelta osin parempi, mutta vaakatasossa olevat geometriset muodot tulostuvat epätarkasti. Geometrinen muotojen tarkentamiseksi ei näyttäisi millään parametrilla olevan merkitystä käyttääkö tasoa 1 vai 2. Kuution alapinnalla oleva nuolenkärki saattaisi parantua, jos käytettäisiin lämmittämätöntä tulostusalustaa. Ongelman voisi yrittää ratkaista määrittämällä kaikille parametreille uudet arvot tasoille 1 ja 2.

Samoin kuin tulostussuunta XYZ-1:ssä niin tulostussuunta XYZ-2:ssa tulostuspedin lämpötilalla ei näyttäisi olevan vaikutusta muuhun kuin kappaleen alapinnan laatuun, joka on parempi alhaisemmalla lämpötilalla. Se johtunee kuitenkin siitä, että ensimmäiset kerrokset sulavat, mistä syystä taas kuution alanurkat käpristyvät. Ongelman ratkaisemiseksi voisi kokeilla lämmittämätöntä tulostusalustaa.

Tulostussuuttimen lämpötilalla ja täyttöprosentilla ei näyttäisi olevan ratkaisevaa merkitystä millekään ominaisuudelle.

### 6.2.9 Parametrien optimiarvojen yhteenveto

Tulostussuunnan XYZ-2 parametrien koostetaulukosta (taulukko 25) saadun tuloksen pohjalta tulostettiin 3D-kappale, jonka mittaustulokset ja silmämääräisellä arvioinnilla annetut arvot ovat taulukossa 26. Taulukosta 26 nähdään, että useat ominaisuuksien arvot ovat lähellä optimiarvoa.



TAULUKKO 25. Parametrien optimiarvojen koostetaulukko

XYZ-2	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Kuution mitta1	1	0	2	1
Kuution mitta2	1	1	2	1
Kuution mitta3	1	2	1	2
Kulmat	2	1	2	0
Läpireikä	0	0	0	0
Nuolenkärki	0	2	0	0
Pinnanlaatu (yläpinta)	1	1	2	1
Pinnanlaatu (alapinta)	1	2	1	2
Pinnanlaatu (kylki)	1	1	2	2
Tulos	1	2	2	2

TAULUKKO 26. Optimiarvoilla tulostettu kappale

Optimikappale	
Kuution mitta1	29,42
Kuution mitta2	30,05
Kuution mitta3	29,58
Kulmat	1
Läpireikä	2,5
Nuolenkärki	0,5
Pinnanlaatu (yläpinta)	3,926
Pinnanlaatu (alapinta)	0,536
Pinnanlaatu (kylki)	10,082

### 6.3 Tulostussuunta XYZ-3

Mittaustulokset ja silmämääräisen arvioinnin arvot löytyvät liitteestä 3.

#### 6.3.1 Kuution leveys

TAULUKKO 27. Leveyden vastetaulukko

Vastetaulukko/kuution mitta 1				
Taso/tekijä	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	0,1950	0,1600	-0,2300	-0,0275
Taso 2	-0,2250	-0,1900	0,2000	-0,0025
Järjestys	1	1	2	2
Valinta	Kerrospaksuus 1	Täyttöprosentti 1	Tulostussuuttimen lämpötila 2	Tulostuspedin lämpötila 2



KUVIO 32. Leveyden vastetaulukon kuvaaja

## 6.3.2 Kuution syvyys

TAULUKKO 28. Syvyyden vastetaulukko

Vastetaulukko/kuution mitta 2				
Taso/tekijä	Kerros-paksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	0,2475	0,2275	-0,1875	0,0925
Taso 2	-0,1650	-0,1450	0,2700	-0,0100
Järjestys	2	2	1	2
Valinta	Kerros-paksuus 2	Täyttöprosentti 2	Tulostussuuttimen lämpötila 1	Tulostuspedin lämpötila 2
ero	0,4125	0,3725	0,4575	0,1025

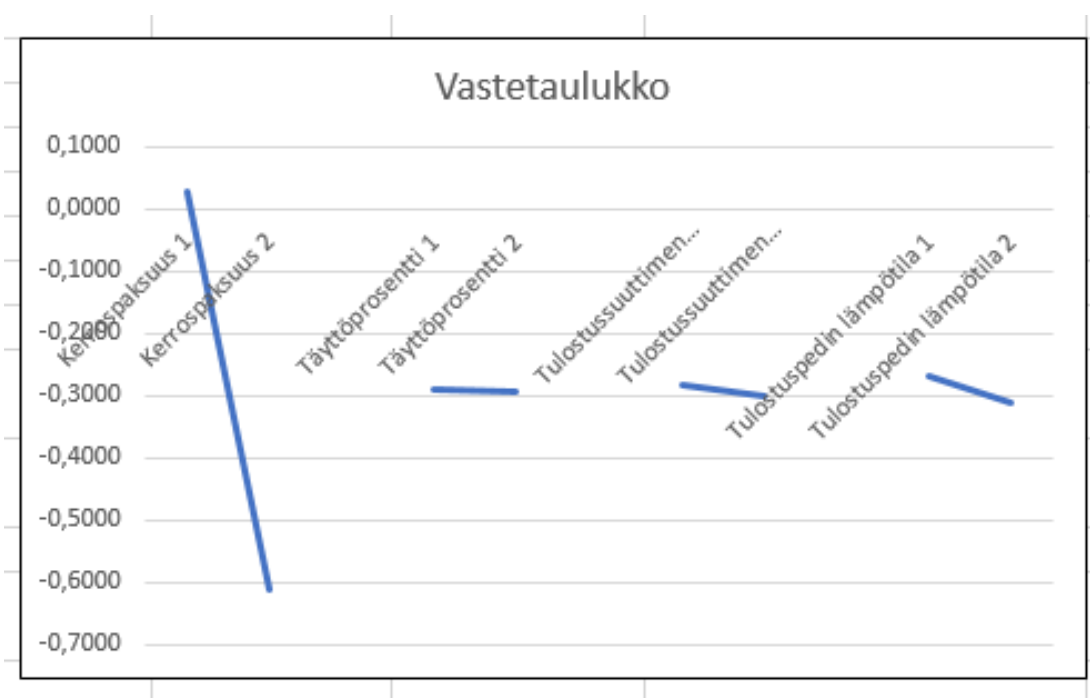


KUVIO 33. Syvyyden vastetaulukon kuvaaja

## 6.3.3 Kuution korkeus

TAULUKKO 29. Korkeuden vastetaulukko

Vastetaulukko/kuution mitta 3				
Taso/tekijä	Kerrosrakisuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	0,0300	-0,2900	-0,2825	-0,2700
Taso 2	-0,6125	-0,2925	-0,3000	-0,3125
Järjestys	1	1	1	1
Valinta	Kerrosrakisuus 1	Täyttöprosentti 1	Tulostussuuttimen lämpötila 1	Tulostuspedin lämpötila 1
ero	0,6425	0,0025	0,0175	0,0425



KUVIO 34. Korkeuden vastetaulukon kuvaaja

## 6.3.4 Kulmat

TAULUKKO 30. Kulmien vastetaulukko

Vastetaulukko/kulmat				
Taso/tekijä	Kerros-paksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	-1,750	-1,750	-1,750	-1,750
Taso 2	-1,500	-1,500	-1,500	-1,500
Järjestys	2	2	2	2
Valinta	Kerros-paksuus 2	Täyttöprosentti 2	Tulostussuuttimen lämpötila 2	Tulostuspedin lämpötila 2
ero	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500



KUVIO 35. Kulmien vastetaulukon kuvaaja

## 6.3.5 Läpireikä

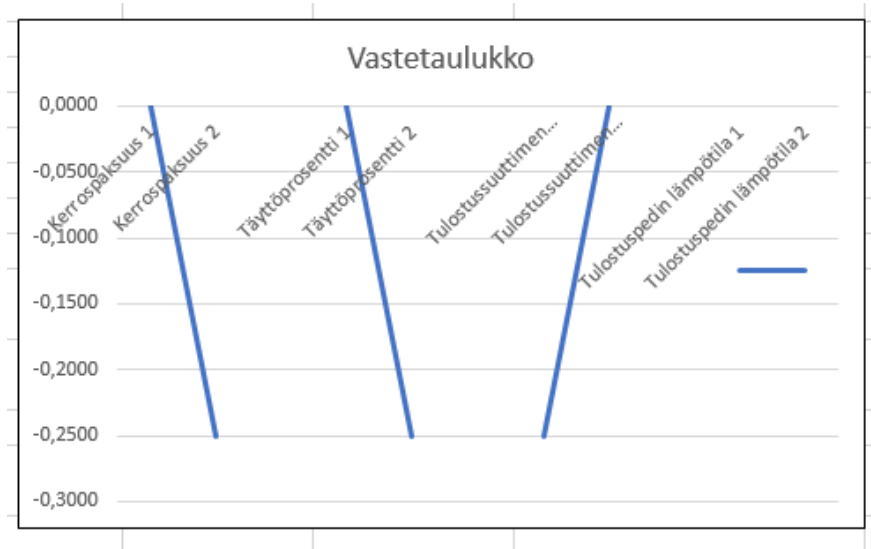
TAULUKKO 31. Läpireiän vastetaulukko

Vastetaulukko/läpireikä				
Taso/tekijä	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	-2,500	-2,500	-2,500	-2,500
Taso 2	-2,500	-2,500	-2,500	-2,500
Järjestys				
Valinta	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
ero	0	0	0	0

## 6.3.6 Nuolenkärki

TAULUKKO 32. Nuolenkärjen vastetaulukko

Vastetaulukko/nuolenkärki				
Taso/tekijä	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Taso 1	0,0000	0,0000	-0,2500	-0,1250
Taso 2	-0,2500	-0,2500	0,0000	-0,1250
Järjestys	1	1	2	
Valinta	Kerrospaksuus 1	Täyttöprosentti 1	Tulostussuuttimen lämpötila 2	Tulostuspedin lämpötila
ero	0,2500	0,2500	0,2500	0,0000



KUVIO 36. Nuolenkärjen vastetaulukon kuvaaja

### 6.3.7 Pinnanlaatu

Tulostussuunta XYZ-3:ssa saadut pinnanlaadun tulokset vastasivat tulostussuuntien XYZ-1 ja XYZ-2 ylä- ja alapinnan sekä kyljen arvoja, joten vastetaulukot ja niiden kuvaajat löytyvät kohdista 6.1.7, 6.1.8 ja 6.1.9.

### 6.3.8 Päätelemät tulostussuunnassa XYZ-3

Saatujen tulosten perusteella voidaan päätellä, että tulostussuunnassa XYZ-3 merkittävimmät parametrit ovat kerrospaksuus, täyttöprosentti ja tulostussuuttimen lämpötila. Kerrospaksuuden ja täyttöprosentin ollessa tasolla 1 sekä tulostussuuttimen ollessa tasolla 2 ovat vaakatasossa olevat nuolenkärjet erinomaiset. Lisäksi pienemmällä kerrospaksuudella mittatarkkuus ja pinnanlaatu ovat monilta osin paremmat.

Tulostussuunta XYZ-3:n vaakatasossa oleva läpireikä oli kaikissa tulostetuissa kappaleissa erittäin huono. Ongelman voisi yrittää ratkaista määrittämällä kaikille parametreille uudet arvot tasoille 1 ja 2.

Samoin kuin tulostussuunta XYZ-1:ssä ja XYZ-2:ssa niin tulostussuunta XYZ-3:ssa tulostuspedin lämpötilalla ei näyttäisi olevan vaikutusta muuhun kuin kappaleen alapinnan laatuun, joka on parempi alhaisemmalla

lämpötilalla. Se johtunee kuitenkin siitä, että ensimmäiset kerrokset sulavat, mistä syystä taas kuution alanurkat käpristyvät. Ongelman ratkaisemiseksi voisi kokeilla lämmittämätöntä tulostusalustaa.

### 6.3.9 Parametrien optimiarvojen yhteenveto

Tulostussuunnan XYZ-3 parametrien koostetaulukosta (taulukko 33) saadun tuloksen pohjalta tulostettiin 3D-kappale, jonka mittaustulokset ja silmämääräisellä arvioinnilla annetut arvot ovat taulukossa 34. Taulukosta 34 nähdään, että noin puolet ominaisuuksien arvoista ovat lähellä optimiarvoa.

TAULUKKO 33. Parametrien optimiarvojen koostetaulukko

XYZ-3	Kerrospaksuus	Täyttöprosentti	Tulostussuuttimen lämpötila	Tulostuspedin lämpötila
Kuution mitta1	1	1	2	2
Kuution mitta2	2	2	1	2
Kuution mitta3	1	1	1	1
Kulmat	2	2	2	2
Läpireikä	0	0	0	0
Nuolenkärki	1	1	2	0
Pinnanlaatu (yläpinta)	1	1	2	1
Pinnanlaatu (alapinta)	1	2	1	2
Pinnanlaatu (kylki)	1	1	2	2
Tulos	1	1	2	2



TAULUKKO 34. Optimiarvoilla tulostettu kappale

Optimikappale	
Kuution mitta1	29,38
Kuution mitta2	29,4
Kuution mitta3	29,32
Kulmat	1
Läpireikä	2,25
Nuolenkärki	1
Pinnanlaatu (yläpinta)	2,345
Pinnanlaatu (alapinta)	0,226
Pinnanlaatu (kylki)	9,848

## 7 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä selvitettiin parametrien vaikutusta 3D-tulostamalla valmistettujen kappaleiden ominaisuuksiin. Kappaleet valmistettiin FDM-menetelmällä, jossa muovilankaa pursotetaan kuuman suutinpään lävitse ja kappale valmistuu kerros kerrokselta. Työssä käytettiin materiaalina valmista PLA-lankaa.

Tutkimuksessa tehdyt kokeet suunniteltiin Taguchi-menetelmään olennaisesti liittyvällä ortogonaalimatriisilla. Kokeissa valmistettujen kappaleiden tutkittavat ominaisuudet joko mitattiin tai arvioitiin silmämääräisesti. Kuutioista, jotka tulostettiin kolmessa eri XYZ-suunnassa, tutkittiin samanaikaisesti yhdeksää eri ominaisuutta. Jokaisesta XYZ-suunnasta laadittiin omat vastetaulukot ja niiden kuvaajat jokaisen ominaisuuden osalta. Lopulliset tulokset laadittiin laskennallisesti. Saatujen tulosten tulkinta ja niistä tehtävät johtopäätökset tuottivat ongelmia, koska tutkittavana oli yhdeksän ominaisuutta yhden sijaan. Tuloksista voitiin kuitenkin päätellä, että kokeissa käytetyistä parametreista kaikissa kolmessa tulostussuunnassa merkittävimmät olivat kerrospaksuus ja tulostuspedin lämpötila. Muiden parametrien osalta ei voitu tehdä yhteisiä johtopäätöksiä, koska ne vaikuttivat kappaleiden laatuun vaihtelevasti.

Opinnäytetyölle asetettu tavoite saavutettiin kohtalaisen hyvin, koska parametrien optimiarvojen koostetaulukoiden tulosten pohjalta tulostettujen kappaleiden ominaisuuksien arvot olivat suuremmalta osin lähellä tavoitearvoja.

## LÄHTEET

### PAINETUT LÄHTEET

Eurometalli. 2015. Asiakkaita autetaan ottamaan uuden teknologian edut käyttöön. VTT 3D-tulostaa metallia. Metalli- ja konepajateollisuuden erikoislehti 5-6/2015, 28.

Hoskins, S. 2013. 3D Printing for Artists, Designers And Makers. Kiina.

Karjalainen, E. 1999. Tuotteen ja prosessin optimointi koesuunnittelulla. Taguchi-menetelmä. 2. painos. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.

### ELEKTRONISET LÄHTEET

AIPworks. 2016. AIPworks. 3D-tulostus. Tietoa. STL-formaatti [viitattu 16.9.2016]. Saatavissa: <http://aipworks.fi/3d-tulostus/tietoa/stl-formaatti/>

Alma Media Oyj. 2016. Iltalehti. 3D-tulostin tulostaa elävää kudosta - sylkee ulos vaikka ihmisen korvan [viitattu 16.8.2017]. Saatavissa: [http://www.iltalehti.fi/digi/2016021621127965\\_du.shtml](http://www.iltalehti.fi/digi/2016021621127965_du.shtml)

Edumo Oy. 2017. Ajankohtaista. 3D-tulosteen mallinnuksesta/3D-tulosteen käyttökohde ja tulostusmateriaalit. Osa 3: 3D-tulosteen käyttökohde ja tulostusmateriaalit. Tulostusmateriaalit [viitattu 4.8.2017]. Saatavissa: <http://edumo.fi/2016/08/17/3d-tulosteen-mallinnuksesta3d-tulosteen-kayttokohde-ja-tulostusmateriaalit/>

Grano. 2016. Palvelut. 3D-tulostaminen. 3D-tulostuspalvelu. Joustavat ja monimateriaalikappaleet [viitattu 20.9.2016]. Saatavissa: <http://www.grano.fi/3d-tulostus/joustavat-kumimaiset-ja-monimateriaalikappaleet-polyjet>

Helsingin kaupunki. 2017. Kirjaston kaupunkiverstas. Laitteet. 3D-tulostin. Lue lisää 3D-tulostimesta [viitattu 11.5.2017]. Saatavissa: <http://www.kaupunkiverstas.fi/3d-tulostus/>

Keski-Suomen liitto. 2017. Digitalous. Uusi teknologia muuttaa tuotantoa. Muuttuva tuotantoteknologia [viitattu 6.8.2017]. Saatavissa: <http://www.keskisuomi2040.fi/digitalous/muuttuva-tuotantoteknologia/>

Materialise NV. 2016. Technologies & Materials. Polyjet [viitattu 20.9.2016]. Saatavissa: <http://manufacturing.materialise.com/polyjet>

Mattila, P. 2015. 3D-tulostus. Blogi [viitattu 11.5.2017]. Saatavissa: <https://penttijuhani.wordpress.com/2015/08/19/3d-tulostus/>

Mass Portal. 2017. Facebook.com [viitattu 5.8.2017]. Saatavissa: [https://www.facebook.com/pg/MassPortal/about/?ref=page\\_internal](https://www.facebook.com/pg/MassPortal/about/?ref=page_internal)

Muovien kierrätys. 2017. Biohajoavat muovit [viitattu 4.8.2017]. Saatavissa: <https://muovienkierratys.wordpress.com/biohajoavat-muovit/>

Mynewsdesk. 2017. Uutiset. 3d-tulostusmateriaaleista tietoa [viitattu 4.8.2017]. Saatavissa: <http://www.mynewsdesk.com/fi/news/3d-tulostusmateriaaleista-tietoa-80005>

NC-Tuote Oy. 2016a. NC-Tuote Oy. FDM-koneet. Esitteet. FDM-esitteet [viitattu 16.9.2016]. Saatavissa: <http://www.nc-tuote.fi/fi/fdm-tulostimet/fdm-esitteet/>.

NC-Tuote Oy. 2016b. NC-Tuote Oy. FDM-tulostimet [viitattu 9.7.2016]. Saatavissa: <http://www.nc-tuote.fi/fi/fdm-tulostimet/>.

Paukku, T. 2015. Helsingin Sanomat. 3d:llä voi tulostaa myös sulaa lasia [viitattu 16.8.2017]. Saatavissa: <http://www.hs.fi/tiede/art-2000002848055.html>

Prenta Oy. 2017. Verkkokauppa. Filamentit [viitattu 4.8.2017]. Saatavissa: <http://www.prenta.fi/shop/esun-pla-175mm/330-esun-plaplus-silver-175mm-1kg.html>

Purch. 2017. Live Science. Tech. References. What is Laminated Object Manufacturing? [viitattu 12.5.2017]. Saatavissa:

<http://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>

RepRap. 2016. Glossary. FFF [viitattu 17.9.2016]. Saatavissa:

[http://reprap.org/wiki/Fused\\_filament\\_fabrication](http://reprap.org/wiki/Fused_filament_fabrication)

RP-Case. 2014. Multiprint 3D. 3D-tulostimet. Tietoa eri tekniikoista [viitattu 16.9.2016]. Saatavissa: <http://www.rpcase.fi/Sovellukset/Tietoa-eri-tekniikoista>

Smith, R. 2017. National Geographic Suomi. Tulosta mitä haluat [viitattu 17.8.2017]. Saatavissa: [https://white-](https://white-album.s3.amazonaws.com/files/bonnier-ngm-bp_restricted_download_files-ngm_fi_1412_200743-12_3d_printer_web.pdf)

[album.s3.amazonaws.com/files/bonnier-ngm-](https://white-album.s3.amazonaws.com/files/bonnier-ngm-bp_restricted_download_files-ngm_fi_1412_200743-12_3d_printer_web.pdf)

[bp\\_restricted\\_download\\_files-ngm\\_fi\\_1412\\_200743-](https://white-album.s3.amazonaws.com/files/bonnier-ngm-bp_restricted_download_files-ngm_fi_1412_200743-12_3d_printer_web.pdf)

[12\\_3d\\_printer\\_web.pdf](https://white-album.s3.amazonaws.com/files/bonnier-ngm-bp_restricted_download_files-ngm_fi_1412_200743-12_3d_printer_web.pdf)

Stratasys Ltd. 2016. Materials. Digital Materials [viitattu 20.9.2016].

Saatavissa: <http://www.stratasys.com/materials/polyjet/digital-materials>

Wikimedia Foundation Inc. 2016a. Wikipedia - The Free Encyclopedia.

Selective laser sintering [viitattu 29.9.2016]. Saatavissa:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Selective\\_laser\\_sintering](https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering)

Wikimedia Foundation Inc. 2016b. Wikipedia - The Free Encyclopedia. S.

Scott Crump [viitattu 16.9.2016]. Saatavissa:

[https://en.wikipedia.org/wiki/S.\\_Scott\\_Crump](https://en.wikipedia.org/wiki/S._Scott_Crump).

Wikimedia Foundation Inc. 2017a. Wikipedia- The Free Encyclopedia.

Kolmiulotteinen tulostus [viitattu 11.5.2017]. Saatavissa:

[https://fi.wikipedia.org/wiki/Kolmiulotteinen\\_tulostus](https://fi.wikipedia.org/wiki/Kolmiulotteinen_tulostus)

Wikimedia Foundation Inc. 2017b. Wikipedia- The Free Encyclopedia.

Laminated object manufacturing [viitattu 12.5.2017]. Saatavissa:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Laminated\\_object\\_manufacturing](https://en.wikipedia.org/wiki/Laminated_object_manufacturing)

3D Systems Inc. 2016a. On Demand Parts. Prototyping. ColorJet Printing (CJP) [viitattu 26.9.2016]. Saatavissa:

<http://www.3dsystems.com/quickparts/prototyping-pre-production/colorjet-printing-cjp>

3D Systems Inc. 2016b. On Demand Parts. Prototyping. MultiJet Printing (MJP) [viitattu 21.9.2016]. Saatavissa:

<http://www.3dsystems.com/fr/quickparts/prototyping-pre-production/multijet-printing-mjp>

3D Systems Inc. 2016c. On Demand Parts. Prototyping. PlasticJet Printing [viitattu 27.9.2016]. Saatavissa:

<http://www.3dsystems.com/quickparts/prototyping-pre-production/plastic-jet-printing-pjp>

3d-tulostus.fi. 2017. 3D-tulostimet [viitattu 5.8.2017]. Saatavissa:

<https://www.3d-tulostus.fi/massportal-pharaoh-ed>

## LIITTEET

## LIITE 1. Tulostussuunta XYZ-1:n mittaustulokset

	Kuution mitat/1	Erotus
1	30,1900	0,1900
2	30,1200	0,1200
3	30,1900	0,1900
4	30,2100	0,2100
5	30,1600	0,1600
6	30,2200	0,2200
7	29,3700	-0,6300
8	30,0400	0,0400

	Kuution mitat/2	Ero
1	30,1300	0,1300
2	30,0600	0,0600
3	30,1000	0,1000
4	30,1100	0,1100
5	30,2300	0,2300
6	30,2200	0,2200
7	29,2900	-0,7100
8	30,0400	0,0400

	Kuution mitat/3	Ero
1	29,3700	-0,6300
2	29,4100	-0,5900
3	29,3600	-0,6400
4	29,4700	-0,5300
5	29,3700	-0,6300
6	29,3100	-0,6900
7	29,3200	-0,6800
8	29,2900	-0,7100

	Silmämääräisesti suorat kulmat	Ero
1	1,00	-2,00
2	1,00	-2,00
3	2,00	-1,00
4	2,00	-1,00
5	3,00	0,00
6	3,00	0,00
7	1,00	-2,00
8	2,00	-1,00

	Läpireikä	Ero
1	2,00	-1,00
2	2,00	-1,00
3	2,50	-0,50
4	2,50	-0,50
5	2,50	-0,50
6	2,00	-1,00
7	1,50	-1,50
8	1,50	-1,50

	Nuolenkärki	Ero
1	2,00	-1,00
2	2,00	-1,00
3	2,00	-1,00
4	1,50	-1,50
5	1,00	-2,00
6	1,00	-2,00
7	1,50	-1,50
8	1,50	-1,50



Pinnanlaatu/yläpinta	
1	12,66
2	12,67
3	10,13
4	11,56
5	11,68
6	12,29
7	15,54
8	15,84

Pinnanlaatu/alapinta	
1	2,89
2	3,39
3	2,40
4	1,28
5	10,64
6	1,41
7	1,40
8	1,66

Pinnanlaatu/kylki	
1	12,76
2	12,83
3	13,69
4	13,29
5	17,49
6	17,33
7	22,98
8	36,47

## LIITE 2. Tulostussuunta XYZ-2:n mittaustulokset

	Kuution mitat/1	Ero
1	30,23	0,23
2	30,20	0,20
3	30,12	0,12
4	30,22	0,22
5	30,17	0,17
6	30,35	0,35
7	30,25	0,25
8	30,36	0,36

	Kuution mitat/2	Ero
1	30,13	0,13
2	30,13	0,13
3	30,08	0,08
4	30,23	0,23
5	30,15	0,15
6	30,30	0,30
7	30,19	0,19
8	30,35	0,35

	Kuution mitat/3	Ero
1	29,41	-0,59
2	29,42	-0,58
3	29,39	-0,61
4	30,35	0,35
5	29,40	-0,60
6	29,32	-0,68
7	29,47	-0,53
8	30,34	0,34

	Silmämääräisesti suorat kulmat	Ero
1	1,0	-2,0
2	2,0	-1,0
3	1,0	-2,0
4	2,0	-1,0
5	3,0	0,0
6	2,0	-1,0
7	2,0	-1,0
8	1,0	-2,0

	Läpireikä	Ero
1	0,5	-2,5
2	0,5	-2,5
3	0,5	-2,5
4	0,5	-2,5
5	0,5	-2,5
6	0,5	-2,5
7	0,5	-2,5
8	0,5	-2,5

	Nuolenkärki	Ero
1	0	-3,00
2	0	-3,00
3	0,5	-2,50
4	0,5	-2,50
5	0	-3,00
6	0	-3,00
7	0,5	-2,50
8	0,5	-2,50

## LIITE 3. Tulostussuunta XYZ-3:n mittaustulokset

	Kuution mitat/1	Ero
1	30,13	0,13
2	30,18	0,18
3	30,22	0,22
4	30,25	0,25
5	30,19	0,19
6	30,14	0,14
7	29,35	-0,65
8	29,42	-0,58

	Kuution mitat/2	Ero
1	30,17	0,17
2	30,24	0,24
3	30,31	0,31
4	30,27	0,27
5	30,34	0,34
6	30,16	0,16
7	29,55	-0,45
8	29,29	-0,71

	Kuution mitat/3	Ero
1	30,06	0,06
2	30,02	0,02
3	30,04	0,04
4	30,00	0,00
5	29,43	-0,57
6	29,33	-0,67
7	29,39	-0,61
8	29,40	-0,60

	Silmämääräisesti suorat kulmat	Ero
1	1,0	-2,0
2	1,0	-2,0
3	2,0	-1,0
4	1,0	-2,0
5	1,0	-2,0
6	2,0	-1,0
7	1,0	-2,0
8	2,0	-1,0

	Läpireikä	Ero
1	0,5	-2,5
2	0,5	-2,5
3	0,5	-2,5
4	0,5	-2,5
5	0,5	-2,5
6	0,5	-2,5
7	0,5	-2,5
8	0,5	-2,5

	Nuolenkärki	Ero
1	3,0	0,00
2	3,0	0,00
3	3,0	0,00
4	3,0	0,00
5	3,0	0,00
6	3,0	0,00
7	2,5	-0,50
8	2,5	-0,50