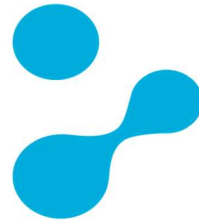




samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

MARKO HAKANPÄÄ

Teollisten SLS-3D-tulosteiden pintastruktuurien muokkaus auto- maatiojärjestelmällä

SÄHKÖ- JA AUTOMAATIOTEKNIIKAN
TUTKINTOOHJELMA
2022

Tekijä(t) Hakanpää, Marko	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä huhtikuu 2022
	Sivumäärä 44	Julkaisun kieli Suomi
Julkaisun nimi Teollisten SLS-3D-tulosteiden pintastruktuurien muokkaus automaatiojärjestelmällä		
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikka, Robotiikka Akatemia		
<p>Opinnäytetyö tehtiin toiminnallisena toimeksiantona Ajatec Protoyping Oy:lle. Turkulainen, Ruskolla toimiva yritys tarjoaa asiakkailleen erilaisia prototyypipalveluja ja piensarjatuotantoa. Työn tavoitteena oli tutkia SLS-tekniikalla 3D-tulostettavien polyamiditulosteiden jälkikäsittelyä automaatiolaitteiden avulla.</p> <p>Yrityksellä on käytössään Dye Mansion GMBH:n valmistamat 3D-tulosteille suunnatut PowerShot C- ja S-jälkikäsittelylaitteet. Laitteiden avulla voidaan automatisoida polyamiditulosteiden jälkikäsittelyä. Laitteet vähentävät käsityön määrää ja parantavat tulosteiden laatua. Laitteiden tehokkuus tässä käyttötarkoituksessa oli käytännön tasolla jo todistettu. Tulosteiden laadun paranemista ei ole aiemmin kuitenkaan tutkittu tarkasti.</p> <p>SLS eli suomeksi selektiivinen lasersintraus on ainetta lisäävä valmistustekniikka, joka käyttää suuritehoista laseria sintraamaan pieniä polymeerijauhehiukkasia kiinteäksi rakenteeksi 3D-mallin perusteella. Työtä varten luotiin testigeometria, jonka pinnankarheuden muutoksia tutkittiin. Geometria tulostettiin osana yrityksen normaalia tuotantoprosessia. Geometria ajettiin kolmessa eri rakennusasennossa. Osat nimettiin yksilöidysti.</p> <p>Kaikkien osien pinnankarheus mitattiin kolmesta eri kohdasta eri suuntiin. Mittauslaitteistona toimi Mitutoyo:n SJ-500-pinnankarheuslaite. Mittaustulokset käytiin osakohtaisesti läpi ja mittaustulokset analysoitiin.</p> <p>Tulokset vahvistivat kiistattomasti osien pinnankarheusarvojen paranemisen. Tulokset osoittivat automatiikan lisäävät jälkikäsittelyprosessin tehokkuutta ja parantavan tulosteiden laatua.</p>		
<p><u>Asiasanat</u> 3D-tulostus, selektiivinen lasersintraus, jälkikäsittely, pinnankarheus</p>		

Author(s) Hakanpää, Marko	Type of Publication Bachelor's thesis	Date Arpil, 2022
	Number of pages 44	Language of publication: Finnish
Title of publication Industrial SLS-3D prints modification of surface structures by an automation system		
Degree program Electrical and Automation Engineering, Robotics Academy		
<p>This thesis was done as an operational assignment for Ajatec Protoyping Oy. Turku-based company operating in Rusko offers its customers various prototype services and small series production. The aim of this work was to study the post-processing of polyamide prints printed with SLS technology using automation equipment. Company uses PowerShot C and S equipment manufactured by Dyemansion GMBH for post-processing 3D prints. These devices can be used to automate the post-processing of polyamide prints. The equipment reduce the amount of manual work and improves the quality of 3D prints. Efficiency of the devices in this application had already been proven on a practical level. However, the improvement in print quality has not been studied in detail by measurements.</p> <p>SLS, or selective laser sintering, is one of the additive manufacturing techniques. SLS uses a high-power laser to sinter small polymer powder particles into a solid structure based on a 3D model. For the thesis, a test geometry was created, the changes in surface roughness were studied. Test geometry was printed as part of the company's normal production process. Test geometry was printed in three different construction positions.</p> <p>Test geometry was printed as part of the company's normal production process and geometries were printed in three different construction positions. The parts were identified with different names.</p> <p>Surface roughness of all parts was measured from three different points in different directions. The surface roughness value of each part was measured with a Mitutoyo SJ-500 surface roughness device. Results of measurements unequivocally confirmed the improvement in the surface roughness values of the parts. From the measurement results it could be concluded that post-processing increases efficiency and improves the quality of prints.</p>		
<u>Key words</u> 3D-printing, selective laser sintering, post processing, surface roughness		

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	6
1.1 Toimeksiantaja	6
2 3D-TULOSTUS	8
2.1 Historia	8
2.2 Selektiivisen lasersintrauksen historia	8
2.3 SLS-tekniikka.....	9
3 TULOSTUSPROSESSI	10
3.1 Toimintaperiaate	10
3.2 Tulostimen esilämmitys ja tulostus.....	11
3.3 Tulosteiden jäähdytys tulostamisen jälkeen.....	12
3.4 Tulosteiden manuaalinen esipuhdistus.....	12
3.5 Tulosteiden automaattinen puhdistus.....	13
3.6 Tulosteiden pinnanlaadun parantaminen.....	15
4 SLS-TULOSTIMEN RAKENNE.....	17
4.1 Yleistä SLS-tulostimista.....	17
4.2 Tulostuskammio	17
4.3 Materiaalin syöttö.....	18
4.4 Rakennusalusta.....	19
4.5 Laser ja tulostuskammio	19
4.6 Ylivuotosäiliöt.....	19
5 TESTIGEOMETRIA JA ASEMOINTI.....	20
5.1 Johdanto	20
5.2 Testigeometria.....	20
5.3 Ajoasennot ja aseointi	21
5.4 Geometrian asemoinnin vaikutus.....	22
6 PINNANKARHEUDEN MITTAUS	24
6.1 Pinnanlaatu muovituotteissa.....	24
6.2 Mittaustapa ja laitteisto	25
6.3 Mittausprofiili ISO1997	25
6.4 Mittausasennot	26
6.5 Tarkasteltavat mittausarvot	26
7 MITTAUSTULOKSET	28
7.1 X-PA- ja X-PA-S-kappaleet ja mittaustulokset	28
7.2 Yhteenveto horisontaalisesti sijoitetuista osista.....	31
7.3 45-PA- ja 45-PA-S-kappaleet ja mittaustulokset	32

7.4 Yhteenveto 45 asteen kulmaan tulostetuista osista	36
7.5 Y-PA- ja Y-PA-S-kappaleet ja mittaustulokset	36
7.6 Yhteenveto 90 asteen kulmaan sijoitetuista osista	40
8 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	41
8.1 Tulostimen optimointi.....	41
8.2 Pinnanlaadun jälkiprosessoinnin johtopäätökset.....	41
8.3 Tutkitut jälkikäsittelylaitteet	41
8.3.1 Dye Mansion PowerShot C osana tulosteiden puhdistuksen automatisointia	42
8.3.2 Dye Mansion PowerShot S osana tulosteiden pinnanlaadun parantamisen automatisointia	42
8.4 Jatkokehitys ja tuotanto-osat	42
8.5 Pohdinta.....	43

LÄHTEET

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä selvitetään automaation keinoja 3D-tulosteiden jälkikäsittelyyn. Työssä keskitytään selektiivisellä laserisintauksella valmistettuihin eli SLS-tulostettuihin (Selective Laser Sintering) osiin.

Opinnäytetyö tehdään tutkimuksellisenä toimeksiantona Ajatec Prototyping Oy:lle perehtyen yrityksen käytössä oleviin tulostus- ja jälkikäsittelylaitteistoon. Tutkimuksessa tulostetaan useita samanlaisia geometrioita erilaisissa tulostusasunnoissa. Testiosat sijoitetaan yrityksen normaaliin prosessiajoon asiakkaille tulostettavien osien sekaan. Testiosat jälkikäsittellään Dye Mansion Powershot C- ja S-laitteilla. Osien pinnankarheus mitataan ja pinnankarheusmittauksen tuloksia vertaillaan kahden erilaisen käsittelyn erojen todistamiseksi.

1.1 Toimeksiantaja

Ajatec Prototyping Oy on turkulainen Ruskolla toimiva yritys, joka tarjoaa asiakkailleen erilaisia 3D-tulosteita sekä vakuumivalettavien muovi- ja silikoniosien valmistusta. Lisäksi yrityksen kautta voi hankkia erilaisia palveluita CNC-koneistuksesta ruiskuvaluosiin. Yrityksessä on osaamista muovituotteiden ja prototyyppien valmistamisesta viideltä vuosikymmeneltä. Asiakkailla on käytössä suomen kattavin 3D-tulostusmenetelmien valikoima: SLA, DLP, SLS, MJF, FDM.

Elomatic perusti 1970-luvun lopussa protopajan Turkuun. Yksikön ensimmäiset työt olivat pienoismalleja laiva- ja konehuoneista Turun telakalle. Electrolux liitti yrityksen osaksi konserniaan 1980-luvulla, yrityksen henkilökunta kasvoi ja toimintaa fokusoi- tiin. Pentti Jännti, silloinen toimitusjohtaja, lähti kehittämään yritystä tarkoituksena hyödyntää viimeisintä teknologiaa prototyyppien valmistamisessa.

Yrityksestä kehitettiin kansainvälinen tuotekehityspalveluiden tukiyksikkö. Insinöörejä palkattiin ja investointeja suunnattiin valmistusteknologiaan sekä suunnitteluosaamiseen. Yritys oli edelläkävijä CAM-suunnittelussa, sillä suuri osa töistä suunniteltiin CATIA-työasemilla. Tämä tapahtui aikana, jolloin pääsääntöisesti tuotekehitys tehtiin vielä piirustuspöydällä paperin ja kynän avulla. Toimintamalli kehittyi 90-luvulla ja loi pohjaa nykyiselle.

Vuosituhanen vaihteessa 3D-tulostuksen vakiintuessa normaaliksi vaiheeksi tuotekehitysprosessia, saksalainen Alphaform-konserni osti osan yrityksestä. Tällöin yhdistyivät 3D-tulostus, ruiskupuristus ja CNC-koneistus. Suomessa keskityttiin muoviosien tulostukseen ja valuun. 2015 ProtoLabs Oy osti Alphaform-konsernin. Digitaalista valmistusta kehitettiin.

Huhtikuussa 2018 Ajatec Prototyping Oy osti koko osakekannan takaisin suomalaisen omistukseen toiminnan jatkuen Suomessa. Tulosteiden automaattista jälkikäsitelyä on kehitetty 2020-luvulla. Digitaalinen tehdas ja Internet 4.0 ovat yrityksessä arkipäivää. (Ajatec Prototyping Oy 2021.)

2 3D-TULOSTUS

3D-tulostus on konkreettisten esineiden valmistamista digitaalisesta mallista. Toisin kuin perinteisissä valmistustekniikoissa, joissa kappaleesta poistetaan materiaalia halutun lopputuloksen saavuttamiseksi, 3D-tulostus perustuu materiaalin lisäämiseen. Perinteisiä valmistustekniikoita ovat esimerkiksi koneistus ja kuvanvanveisto. 3D-tulostuksessa esineet valmistetaan lisäämällä tulostusmateriaalia useissa ohuissa kerroksissa päällekkäin. Tätä toistamalla saadaan aikaiseksi valitusta materiaalista koostuva esine, joka vastaa erittäin tarkasti digitaalista mallia. (Muurinen, 2013.)

2.1 Historia

3D-tulostuksen historia alkaa vuodesta 1983 jolloin Charles W. Hull (Chuck Hull) keksi stereolitografian. Samana vuonna hän rakensi maailman ensimmäisen 3D-tulostimen. Hull keksi termin stereolitografia ja patentoi keksintönsä 8. elokuuta 1984. Hänelle myönnettiin patentti 11. maaliskuuta 1986 nimellä ”Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography” patentti: US4575330A. Vuonna 1986 hän perusti 3D Systems -yrityksen, joka julkisti ensimmäisen SLA-tulostimen vuonna 1987. Tulostaminen sai alkunsa ja nykyiset SLA-tulostimet perustuvat edelleen aivan samaan toimintaperiaatteeseen. SLA-tulostimessa oleva hartsi kovetaan lasersäteellä pistemäisesti. SLA-tulostimet vaativat tukia pitämään tulosteen paikoillaan. (Norman, 2021.)

2.2 Selektiivisen lasersintrauksen historia

Selektiivisestä lasersintrausprosessista on tullut suosituin 3D-tulostustekniikka, jota käytetään eri teollisuudenaloilla malleissa ja loppukäyttöosissa. Tässä opinnäytetyössä keskitytään tähän tekniikkaan.

Selektiivinen lasersintraus oli yksi ensimmäisistä ainetta lisäävistä valmistustekniikoista, jonka kehittivät 1980-luvun puolivälissä tohtori Carl Deckard ja tohtori Joe Beaman Texasin yliopistossa, Austinissa. Menetelmää on sittemmin mukautettu toimimaan useiden materiaalien kanssa, mukaan lukien muovit, metallit, lasi, keramiikka

ja erilaiset komposiittimateriaalijauheet. Nykyään nämä tekniikat luokitellaan kollektiivisesti jauhepetisitraamiseksi ainetta lisäävien (AM = Additive Manufacturing) valmistusprosessien joukossa. Jauhepetisitraamisessa lämpöenergia sulattaa selektiivisesti jauhepedin alueita. Kaksi yleisintä jauhepetisitraustekniikka nykyään ovat muovipohjaiset, joita kutsutaan yleisesti SLS:ksi, ja metallipohjaiset, jotka tunnetaan nimellä DMLS (Direct Metal Laser Sintering) ja SLM (Selective Laser Melting). Viime aikoihin asti sekä muovi- että metallijauhepetisulatusjärjestelmät ovat olleet kohtuuttoman kalliita ja monimutkaisia, mikä on rajoittanut niiden käytön pieniin määriin arvokkaita tai mukautettuja osia, kuten ilmailu- ja avaruuskomponentteja tai lääkinällisiä laitteita. (Formlabs, 2021.)

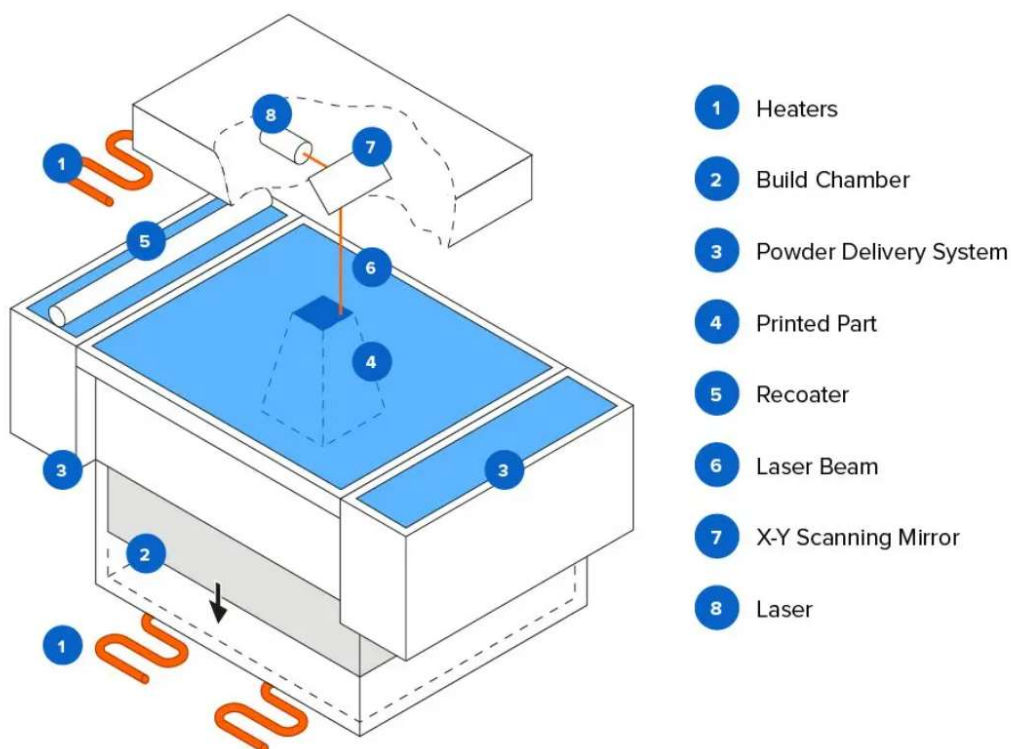
2.3 SLS-tekniikka

SLS eli suomeksi selektiivinen lasersintraus on ainetta lisäävä valmistustekniikka, joka käyttää suuritehoista laseria sintraamaan pieniä polymeerijauhehiukkasia kiinteäksi rakenteeksi 3D-mallin perusteella. SLS-3D-tulostus on ollut insinöörien ja valmistajien suosittu valinta vuosikymmeniä. Alhaiset osakustannukset, korkea tuottavuus ja vakiintuneet materiaalit tekevät tekniikasta ihanteellisen monenlaisiin soveluksiin nopeasta prototyyppien valmistuksesta pieniin eriin tai räätälöityyn valmistukseen. (Formlabs, 2021.)

3 TULOSTUSPROSESSI

3.1 Toimintaperiaate

SLS-3D-tulostuksessa käytetään suuritehoista CO₂-laseria polymeerijauheen sulattamiseksi eli sintraamiseksi kiinteäksi rakenteeksi 3D-mallin perusteella (Kuva 1). Tulostinlaite lämmitetään tulostuslämpötilaan ennen tulostamisen aloittamista. Tulostus tapahtuu korkeassa n. 120° C asteen lämpötilassa tulostimen rakennuskammiossa. Laitteissa käytetään typpigeneraattoria ja typpikaasua. Näiden avulla saadaan tulostimen sisälle inertti tila hapettumisen estämiseksi. Tulostusprosessissa kappaleet rakennetaan kerros kerrokselta. Laser sulattaa jauhetta kerroksittain toivottuun muotoon. Jokaisen tulostuskerroksen valmistuttua jauheenlevitin levittää uuden kerroksen jauhetta sulattavaksi rakennusalustalle. Tulostettavien kappaleiden ympärille oleva ylimääräinen sulamaton jauhe tukee tulostettavia kappaleita tulostusprosessin aikana. Tulostuksen päätteeksi rakennusalustaan syntyy ”jauhekakku” (Kuva 2), jonka sisällä tulostetut kappaleet sijaitsevat. (Materflow, 2021.)



Kuva 1. Kaavio selektiivisestä lasersintrausprosessista (Formlabs, 2021)



Kuva 2. Jäähtynyt rakennusalusta eli ”jauhekakku”

3.2 Tulostimen esilämmitys ja tulostus

SLS-tulostaminen alkaa tulostimen esilämmityksellä. Tämä kestää n. 2-3 tuntia laitteesta riippuen. Typpigeneraattori syöttää rakennuskammioon typpeä inertin ilmekseen luomiseksi. Kun 120 Celsius-asteen tavoitelämpötila saavutetaan, voidaan varsinainen tulostaminen aloittaa. Jauheenlevittimen avulla jauhetta levitetään rakennusalustalle. Laser sulattaa kerroksesta tulostettavan geometrian osan, uusi kerros jauhetta levitetään ja prosessi toistuu, kunnes tulostusajo on valmis. (Materflow, 2021.)

3.3 Tulosteiden jäähdytys tulostamisen jälkeen

Tulostuksen valmistuttua rakennusalustaan syntynyt jauhekakku jäähdytetään hitaasti (Kuva 2). Liian nopea tulostusajon purkaminen aiheuttaa tulosteisiin muotovääristymiä. Hallittu jäähdyttäminen on siis tärkeää. Jos halutaan vaihtaa tulostus uuteen tulostusajoon nopeasti, voidaan rakennusalustaa vaihtaa ja jäähdyttää jo valmistunut ajo uunissa hallitusti. (Reijonen, 2022.)

3.4 Tulosteiden manuaalinen esipuhdistus

Rakennusalustan jäähdyttyä tulosteet voidaan purkaa. Ylimääräinen jauhe puhdistetaan sitä varten suunnitellussa käsittelyhuoneessa (Kuva 3). Tulostuksessa sulattamalla kovetetut osat otetaan jauheen seasta. Harjaamalla tai muulla vastaavalla tavalla puhdistetaan suurin ylimääräinen sulamaton pulveri. Ylimääräinen tulostinjauhe tarttuu lämmenteisiin osiin. Manuaalisessa puhalluskaapissa (Kuva 4) puhdistamista voidaan jatkaa rikkomatta osia. (Reijonen, 2022.)



Kuva 3. Ajatec Prototyping Oy:n tulosteiden jälkikäsittelyhuone



Kuva 4. Ajatec Prototyping Oy, manuaalinen puhalluskaappi

3.5 Tulosteiden automaattinen puhdistus

Karkean puhdistuksen (Kuva 5) jälkeen tulosteet laitetaan puhdistumaan Dye Mansion Power-Shot C -laitteeseen (Kuva 6), jossa osat pyörivät laitteen sisällä olevassa rumussa (Kuva 7). Laite puhalttaa osia pienillä lasikuulilla, paineilmalla sekä ionisoi tulosteita. Valmistajan mukaan osia ei tarvitse puhdistaa tulostamisen jälkeen, vaan ne voidaan suoraan laittaa tulostimesta puhdistumaan. Käyttökokemukset ovat kuitenkin osoittaneet karkean puhdistuksen tarpeellisuuden. Irtoavan jauheen määrää voidaan vähentää huomattavasti karkealla esipuhdistuksella. Laitteessa voidaan säätää ilmanpainetta sekä puhdistuksen kestoa. Ionisointi on tärkeää, koska tulosteiden hankauksessa muodostuu staattista sähköä ja osista irtoava jauhe jää kiinni osiin ilman ionisointia. (Reijonen, 2022.)



Kuva 5. Tulostettuja osia karkean puhdistuksen jälkeen



Kuva 6. Dye Mansion PowerShot C -automaattinen puhdistuslaite



Kuva 7. Dye Mansion PowerShot C:n rumpu, johon osoittavista keskimmäisistä suuttimista puhalletaan paineilmaa ja lasikuulia, ylhäällä ja alhaalla ionisaattorit

3.6 Tulosteiden pinnanlaadun parantaminen

Dye Mansion PowerShot C -käsittelyn jälkeen osat ovat käyttövalmiita, mutta pinnanlaatu on lasikuulapuhalluksen jäljiltä vielä karhea. Pinnanlaatua voidaan parantaa Dye Mansion PowerShot S -laitteella (Kuva 8). Laitteessa käytetään yhtiön kehittämiä muovikuulia, jotka soveltuvat erityisesti polyamiditulosteisiin. Toimintaperiaate on hyvin samankaltainen kuin Dye Mansion PowerShot C -laitteessakin. Tulosteita puhalletaan muovikuulilla, jotka hajoavat tulosteen pintaan. Käsittelyn tarkoituksena on parantaa tulosteiden pinnanlaatua (Kuva 9). Tässä opinnäytetyössä pyritään todentamaan prosessin toimivuus pinnankarheusmittauksien avulla.



Kuva 8. Dye Mansion S -laite



Kuva 9. Dye Mansion yrityksen jakama testikappale, jossa osan vasen puoli PowerShot C -käsitelty ja oikea puoli PowerShot C- ja S-käsitelty

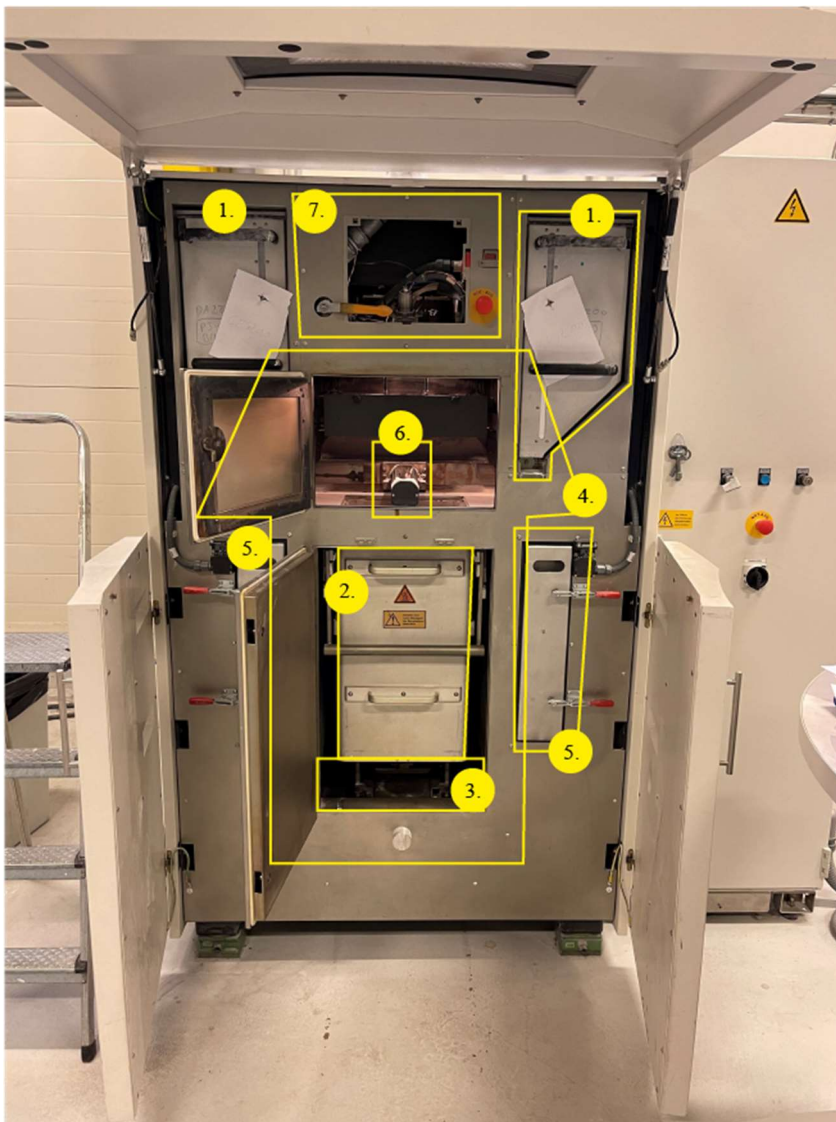
4 SLS-TULOSTIMEN RAKENNE

4.1 Yleistä SLS-tulostimista

Teollisuustason SLS-tulostimilla voidaan tulostaa erittäin tarkkoja osia. Kerrosvahvuudet ovat 60-120 um tai vielä pienimpiäkin tarvittaessa. Pienimmillä kerrosvahvuuksilla tulostusnopeutta täytyy hidastaa. Tulostinlaitteet ovat kestäviä ja pitkäikäisiä. Tulostinlaitteiden modulaarinen rakenne mahdollistaa päivittämisen ja helpottaa huoltamista. (Materflow, 2021.)

4.2 Tulostuskammio

Tulostuskammiossa on tulostuksen aikana inertti tila, laite sisältää typpigeneraattorin, jolla pidetään matala happitaso oksidoitumisen estämiseksi. (Kuva 10.4). Tulostuskammion sivussa ja takana on lämmityselementit, jotka lämmittävät rakennusalustaa (Kuva 10.2). Tulostettavien kappaleiden optimointi rakennusalustalle tulostusta varten tehdään erillisellä ohjelmalla. Yhteen tulostusajoon mahtuvien kappaleiden määrä riippuu siitä, miten tiiviisti ne saadaan optimoitua. Tuotanto-osia valmistettaessa kaikissa osissa on sama geometria, jolloin täyttöastetta voidaan nostaa. Tulostimien valmistajat suosittelevat n. 5 -12 % täyttöastetta tulostusajoihin, joissa on erilaisia geometrioita. Rakennusalustan päälle levitetään jauhetta ja sen alapuolella oleva rakennusalustan kara (Kuva 10.3) säätää rakennusalustan pohjan korkeutta tulostuksen aikana. (Reijonen, 2022.)



Kuva 10. SLS EOS395 -tulostimen rakennekuva: 1. Tulostinjauhesäiliöt
 2. Rakennusalusta 3. Rakennusalustan korkeutta säätelevä kara
 4. Tulostuskammio 5. Tulostinjauheen ylivuotosäiliöt 6. Jauheenlevitin
 7. Laser ja peilit

4.3 Materiaalin syöttö

Materiaali syötetään jauhesäiliöistä, joiden alaosassa on annostelija (Kuva 10.1). Näin jauheenlevittimeen (Kuva 10.6) saadaan tarvittava määrä tulostusjauhetta. Jauheenlevitin levittää uuden kerroksen edellisen valmistuttua. (Reijonen, 2022.)

4.4 Rakennusalusta

Tulostettavat kappaleet tulostuvat rakennusalustaan (Kuva 10.2). Rakennusalusta on eristetyn kammion sisällä, jossa lämpötila on n. 120–130 celsius-astetta tulostusprosessin aikana. (Kuva 10.4). Eristetty kammio estää kappaleiden muotovääristymiä. Eristetyn kammion avulla saavutetaan myös tasainen rakennusalustan jäähtyminen tulostusajon päätyttyä. Rakennusalusta on oma itsenäinen yksikkönsä, jonka saa nopeasti vaihdettua, jos tulostusta halutaan jatkaa uudella rakennusalustalla. Alusta liikkuu tulostuskammiossa lineaarijohteiden (Kuva 10.6) ja pohjassa olevan karan avulla (Kuva 10.3). Jauheenlevittimen (Kuva 10.6) avulla levitetään uusi kerros jauhetta ja prosessi toistuu. (Reijonen, 2022.)

4.5 Laser ja tulostuskammio

Rakennuskammion yläpuolella on 50-100 W CO₂-laser (Kuva 10.7), joka sulattaa tulostettavat kappaleet jauheesta kerroksittain. Lasersädettä ohjaava kahden peilin yhdistelmä kohdistaa lasersäteen tarkasti. Lasersäteen tehoa ja nopeutta säädetään optimaalisen lopputuloksen saamiseksi tulostusmateriaalin mukaan. Tulostuskammiosta löytyy lisäksi lämmityselementit, pyrometri ja jauheenlevitysterä (Kuva 10.4). (Reijonen, 2022.)

4.6 Ylivuotosäiliöt

Ylimääräinen materiaali, mitä ei käytetä jauheen levityksessä, kerätään ylivuotosäiliöihin. Ylimääräinen jauhe voidaan teoriassa käyttää sellaisenaan seuraavassa ajossa, sillä se ei altistu koville lämpötiloille. Käytännössä ylivuototilaan kertynyt pulveri kuitenkin käytetään uuden tulostusjauhe-erän sekoituksessa. Polyamidijauheen sekoitusuhde on 50 % puhdasta käyttämätöntä jauhetta ja 50 % tulostusprosessissa käytettyä jauhetta. (Reijonen, 2022.)

5 TESTIGEOMETRIA JA ASEMOINTI

5.1 Johdanto

Pinnanlaadun tutkimista varten tulostettiin testikappaleet. Tulostimena toimi EOS Formiga 100 -tulostin.

5.2 Testigeometria

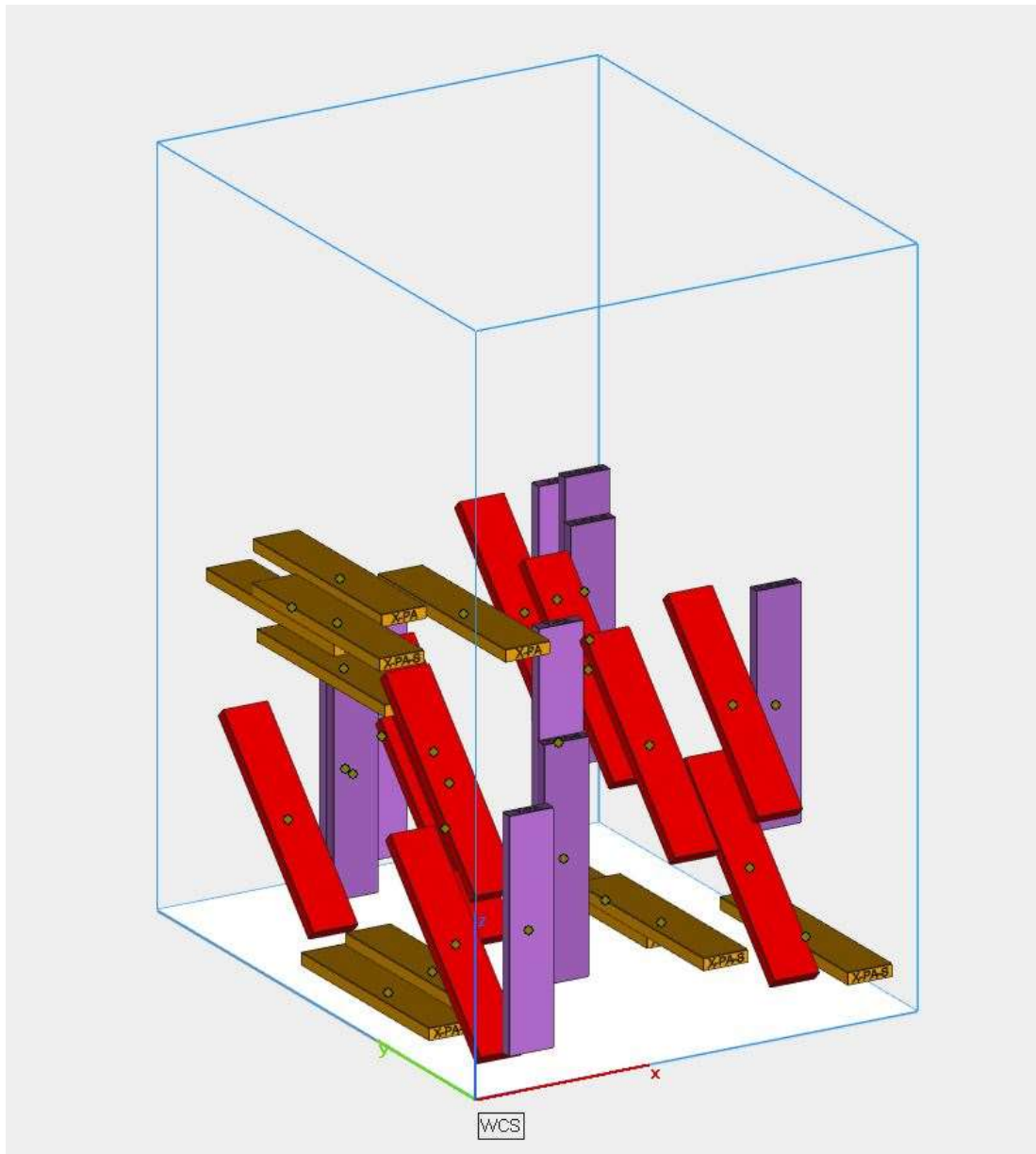
Testigeometria on mallinnettiin varsin yksikertaiseksi. Suorakaiteen mallinen kappale, jonka toiseen päähän kirjoitettiin teksti kappaleen yksilöimiseksi sekä oikean pinnan mittaamiseksi. Tutkittava pinta oli tekstin yläpuolinen pinta. Kuvassa 11 vasemmalla olevat osat X-PA, 45-PA ja Y-PA on jälkikäsitelty Dye Mansion C -laitteessa ja oikealla olevat osat X-PA-S, 45-PA-S ja Y-PA-S on jälkikäsitelty Dye Mansion C -laitteessa ja sen jälkeen Dye Mansion S -laitteessa.



Kuva 11. Testigeometria tulostettuna polyamidista PA12

5.3 Ajoasennot ja asemointi

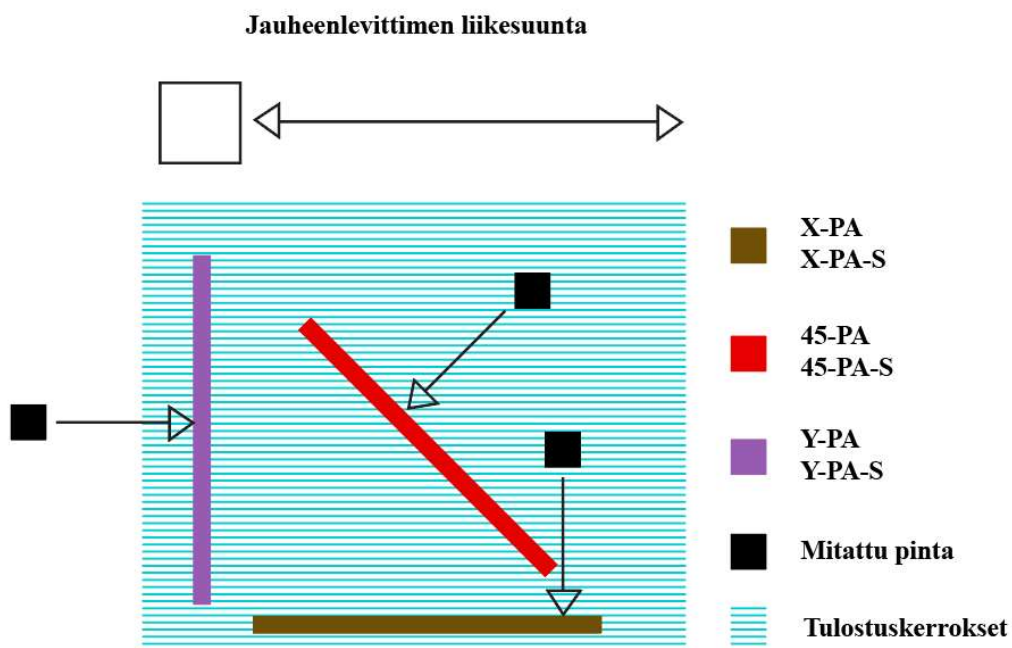
Kappaleet sijoitettiin normaalin tulostusajoon, asiakkaille tulostettavien kappaleiden sekaan. Toimeksiantaja halusi tutkia tulosteiden pinnanlaatua osana normaalia tuotantoprosessia (Kuva 12). Kuvan ajossa oli mukana muitakin tulosteita, jotka eivät näy kuvassa.



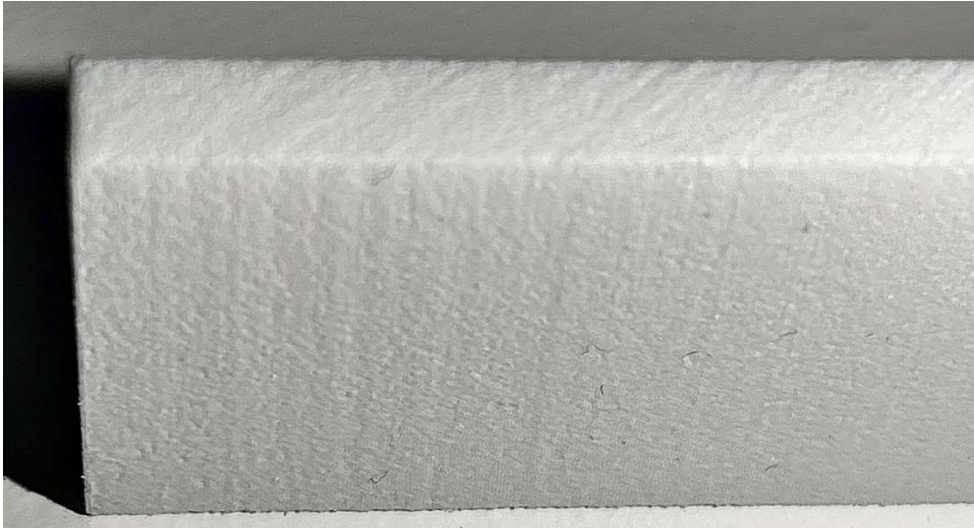
Kuva 12. Testikappaleet tulostuksen optimointiohjelmassa: X-kappale sijoitettiin horisontaalisesti suoraan ajoasentoon (Kuva 12, ruskeat osat), 45-kappale sijoitettiin 45 asteen kulmaan (Kuva 12, punaiset osat) ja Y-kappale sijoitettiin pystysuoraan asentoon (Kuva 12, Violetit osat)

5.4 Geometrian asemoinnin vaikutus

Yleisesti geometrian tulostusasennolla ei ole suurta merkitystä. Tässä opinnäytetyössä mitataan tarkasti pinnankarheutta, joten tulostusasento paljastuu mittaustuloksista. Tulostimen jauheenlevittimen tekemät kerrokset jäävät tulosteisiin näkyviin. Tulostuksessa jauheenlevitin levittää n. 60 -120 um korkeita kerroksia jauhetta. Levitettyyn kerrokseen valotetaan tulostettavat osat. Jauheenlevittimen liikkeen mukaisesti asetussa osassa kerrosrakenne ei ole mitattavissa (X-PA ja X-PA-S). Vinoon ja pystysuoraan jauheenlevittimeen nähden sijoitettuihin osiin tulostui eri tulostuskerroksia. (45-PA, 45-PA-S, Y-PA ja Y-PA-S) (Kuva 13). Tulostuskerrokset ovat havaittavissa näissä kappaleissa (Kuva 14).



Kuva 13. Kerrosrakenteet ja mitatut pinnat

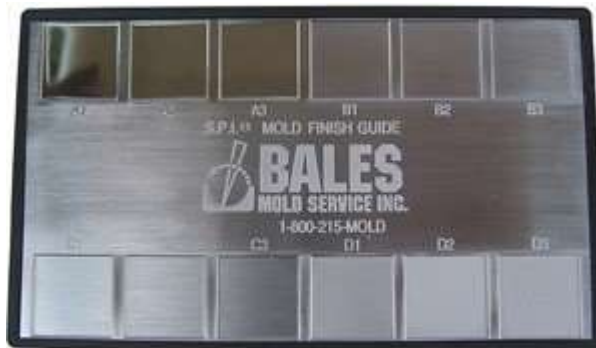


Kuva 14. 45-PA-kappaleessa näkyvä kerrosrakente suurennettuna

6 PINNANKARHEUDEN MITTAUS

6.1 Pinnanlaatu muovituotteissa

3D-tulostetun muovin mittaamiseksi ei ole olemassa mitään standardia. Alalla käytetään erilaisia arvoja hyvinkin kirjavasti. Muoviosia suunnitellessa pinnanlaadulle voidaan määrittää lopputuotteeseen erilaiset kiillotus- tai matta-asteet. Ruiskuvalettavissa osissa käytetään SPI-taulukon arvoja. Kiillotusasteeltaan korkein luokitus on SPA1. (Kuva 15). Kiillotusasteen lisäksi toinen määriteltävä pinnanlaatu on tuotteen kipinöintiaste. Kipinöinnin avulla saadaan säännöllinen epätasainen pinta VDI 3400 -standardin mukaisesti (Kuva 16). VDI-taulukko on määritelty alun perin metallituotteisiin, mutta sitä simuloidaan monesti myös muovituotteissa sekä prototyypeissä. Hieno kipinöinti on arvoltaan ref 12 (matta) ja ref 45 on karkea kipinöinti (näkyvä pinnankarheus). Kipinöinnin avulla saavutetaan standardiulkonäkö suunnittelijan ja asiakkaan välillä. (Conseptas, 2021.)



Kuva 15. SPI-kiillotusastetaulukko



Kuva 16. VDI 3400 -kipinäpintataulukko

Tämän opinnäytetyön on tarkoitus hakea eroavaisuuksia käsiteltyjen pintojen väliltä mittaamalla. Siihen tarkoitukseen SPI- tai VDI-standardit eivät sovi, koska tarkempia mittaustuloksia saadaan mittaamalla pinnat pinnakarheusmittarilla (Mitutoyo Scandinavia AB Finnish Branch, 2021).

6.2 Mittaustapa ja laitteisto

Mittauslaitteistona toimi Mitutoyo:n SJ-500-pinnankarheuslaite. Mittaukset suoritti Petteri Guttorn, Mitutoyo yrityksen Suomen myyntikonttorilla. Toimintamallilla pyrittiin mahdollisimman puolueettomaan mittaustulokseen. Kaikkia kappaleita tulostettiin 3 kpl samanlaisia, joista valittiin täysin sattumanvaraisesti mittaukseen lähetettävät tulosteet. Mittausprofiilina käytettiin ISO1997-standardin mukaista R_ISO-profiilia (Taulukko 1). Mittaus perustuu EN ISO 4287- ja EN ISO 16610-21 -standardeihin. (Mitutoyo Scandinavia AB Finnish Branch, 2021.)

6.3 Mittausprofiili ISO1997

Mittaus suoritettiin EN ISO 4287- ja EN ISO 16610-21 -standardien mukaisesti. Pinnankarheusprofiilin mittausmatka oli 2,5 mm ja mittauskertoja oli standardin mukaisesti viisi mittauskertaa (Taulukko 1).

Taulukko 1. Pinnankarheusprofiili mittauksissa

Standardi	ISO1997
Profiili	R ISO
Mittausmatka	2,5 mm
Mittauskerrat	5
Lc Aaltomaisuusprofiili	2,5 mm
Ls raja-arvo-aallonpituus	0,008 mm
Suodin	Gaussian
Näytteenottomatka	12,5 mm
Esiliike	1,25 mm
Jälkiliike	1,25 mm

6.4 Mittausasennot

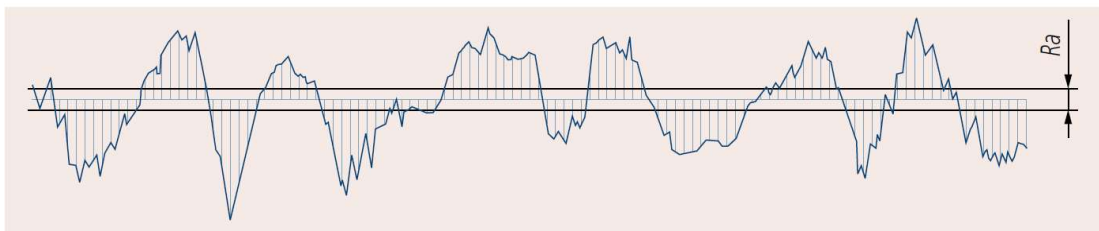
Kappaleista mitattiin kolmessa eri asennossa kolme arvoa, joiden mukaan pinnankarheuden muutosta tarkasteltiin. Erilaisten mittausasentojen tarkoituksena on saada mitaustuloksille standardin mukainen tarkkuus (Kuva 17). Tulosteessa on mahdollista, että se ei ole tasalaatuinen eri suunnista.



Kuva 17. Pinnankarheuden mittausasennot

6.5 Tarkasteltavat mittausarvot

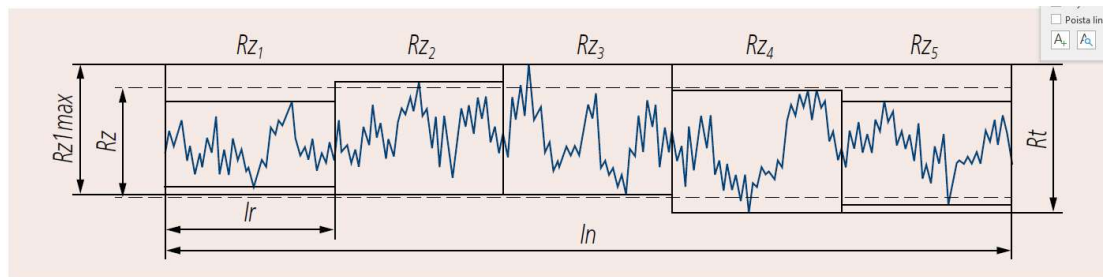
Ra – aritmeettinen keskimääräinen pinnankarheusarvo eli profiilipoikkeamien absoluuttisten arvojen aritmeettinen keskiarvo karheusprofiilin keskiviivasta. Ra:n ongelma on, että se ei kerro pinnan vuorien ja laaksojen muotoa, eli terävyyttä, sahalaitaa tai aaltomaisuutta. Pinnankarheusmerkinnöissä Ra kertoo pinnan "vuorien ja laaksojen" välisen keskiarvon (Kuva 18).



Kuva 18. Ra-arvon mittausprofiili pystysuunta vaakas suunnan funktiona

Karheusprofiilin kokonaiskorkeus on Rz1Max. Karheuden keskimääräinen syvyys on Rz. Rz kertoo vuorien ja laaksojen korkeuden erotuksen ja arvo jaetaan standardissa viiteen mittauskertaan. Rt-pinnankarheuden arvo perustuu mittausalueella olevien

huippujen ja laaksojen maksimietäisyyksiin. Viidestä mittausarvosta l_r muodostuu koko mitattu matka l_n , jokainen osio nimetään omaksi osakseen Rz_1 (Kuva 19).



Kuva 19. Mittausprofiilikuvaus

7 MITTAUSTULOKSET

7.1 X-PA- ja X-PA-S-kappaleet ja mittaustulokset

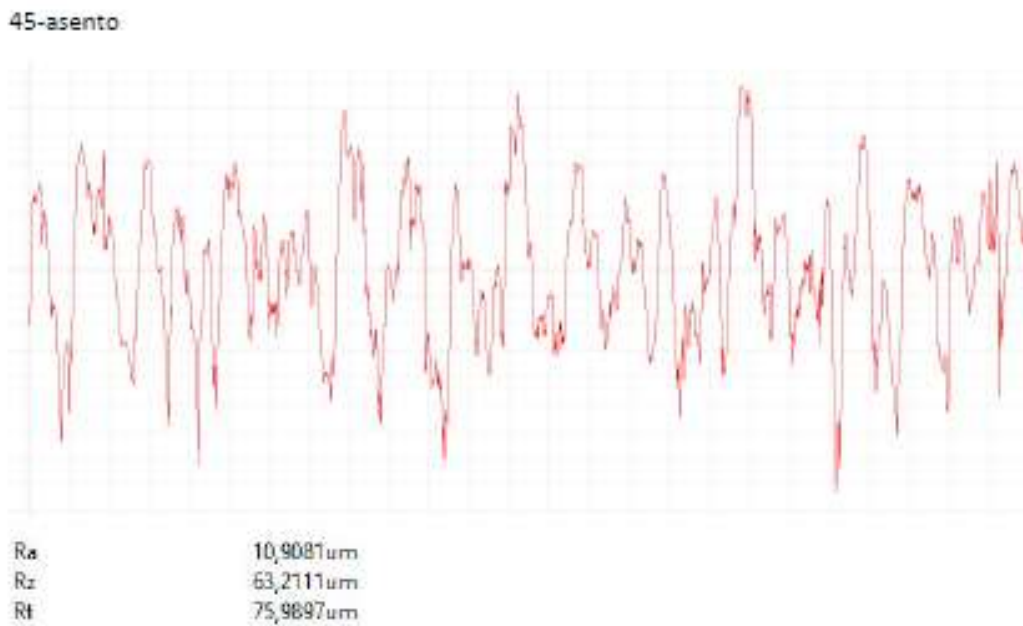
X-PA-kappale (Kuva 20, Kuva 22, Kuva 24) eli horisontaalisesti rakennusalustaan sijoitettu kappale toimii vertailukappaleena X-PA-S-kappaleelle (Kuva 21, Kuva 23, Kuva 25). Kappaleessa tulostuskerrokset ovat tulostuneet mittauspinnan mukaisesti.



Kuva 20. Dye Mansion PowerShot C -käsitelty X-PA-kappale: mittaustulokset, 0-mittaussasento



Kuva 21. Dye Mansion PowerShot C- ja S-käsitelty X-PA-kappale: mittaustulokset, 0-mittaussasento



Kuva 22. Dye Mansion PowerShot C -käsitelty X-PA-kappale: mittaustulokset, 45-mittaussasento



Kuva 23. Dye Mansion PowerShot C- ja S-käsitelty X-PA-kappale: mittaustulokset, 45-mittaussasento



Kuva 24. Dye Mansion PowerShot C -käsitelty X-PA-kappale: mittaustulokset, 90-mittaussasento



Kuva 25. Dye Mansion PowerShot C- ja S-käsitelty X-PA-kappale: mittaustulokset, 45-mittaussasento

7.2 Yhteenveto horisontaalisesti sijoitetuista osista

Taulukkoon 2 on koottu horisontaalisesti rakennusalustaan sijoitettujen osien mittaustiedot. Sarakkeessa X-PA on mittaustulos Dye Mansion PowerShot C -käsitellyille osille. Sarakkeessa X-PA-S on mittaustulos Dye Mansion PowerShot C- ja S-käsitellyille osille. Prosenttiosarakkeesta voidaan lukea pinnan pinnankarheuden parantuminen prosentteina. Etuliite on positiivinen, jos pinnankarheus on parantunut. Etuliite on negatiivinen, jos pinnankarheus on heikentynyt.

Taulukko 2. Yhteenveto horisontaalisesti tulosteituista osista

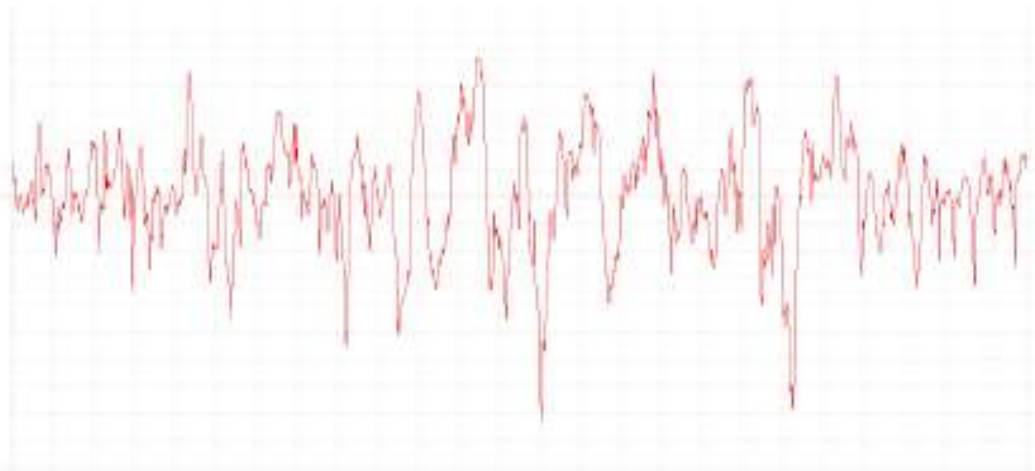
	X-PA [μm]	X-PA-S [μm]	Prosenttiero
0-asento, Ra	8,74	6,96	+ 20,34 %
0-asento, Rz	56,34	37,53	+ 33,39 %
0-asento, Rt	72,63	42,36	+ 41,67 %
45-asento, Ra	10,91	5,60	+ 48,69 %
45-asento, Rz	63,21	37,52	+ 40,65 %
45-asento, Rt	75,99	51,04	+ 32,83 %
90-asento, Ra	9,78	6,94	+29,04 %
90-asento, Rz	56,26	42,81	+23,90 %
90-asento, Rt	72,27	51,04	+24,42 %

7.3 45-PA- ja 45-PA-S-kappaleet ja mittaustulokset

45-PA-kappale (Kuva 26, Kuva 28, Kuva 30) eli 45 asteen kulmassa rakennusalustaan nähden sijoitettu kappale toimii vertailukappaleena 45-PA-S-kappaleelle (Kuva 27, Kuva 29, Kuva 31). Kappaleessa tulostuserrokset ovat tulostuneet 45 asteen kulmassa mittauspintaan nähden.

45-PA

0-asento

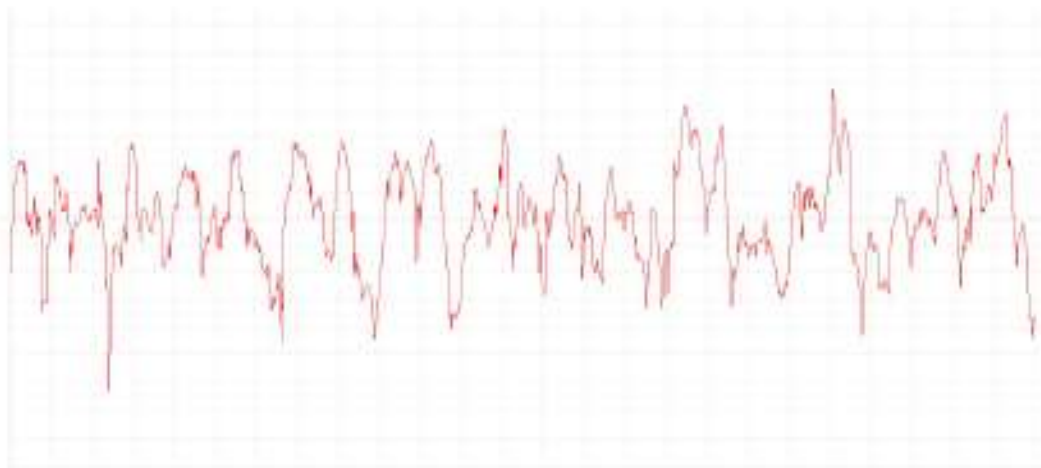


Ra	7,3268um
Rz	50,9226um
Rt	67,2561um

Kuva 26. Dye Mansion PowerShot C -käsitelty 45-PA-kappale: mittaustulokset, 0-mittausasento

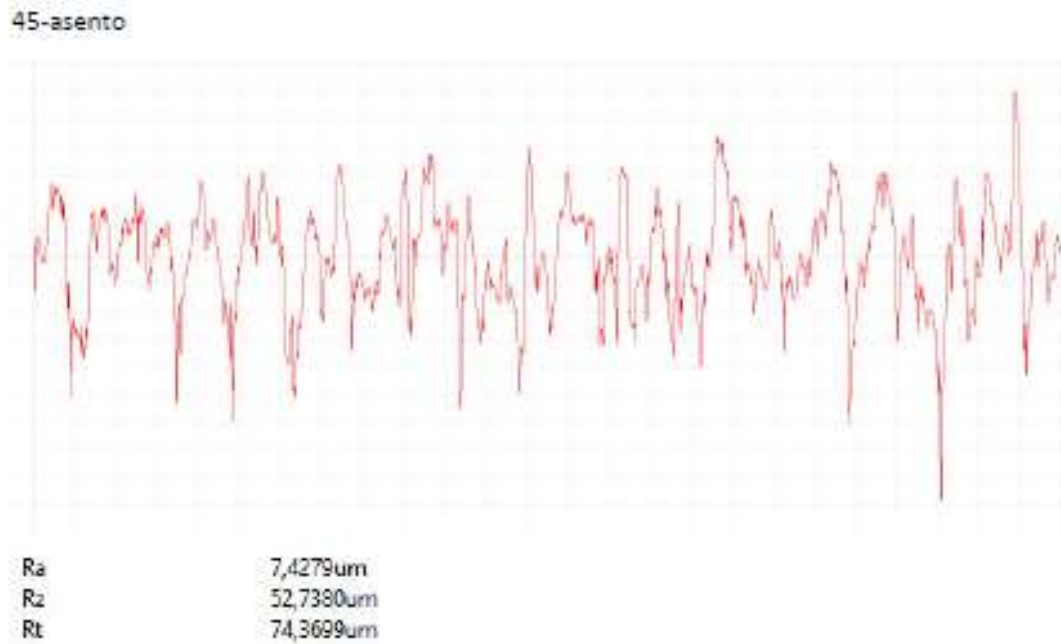
45-PA-S

0-asento



Ra	6,6453um
Rz	40,3491um
Rt	55,2274um

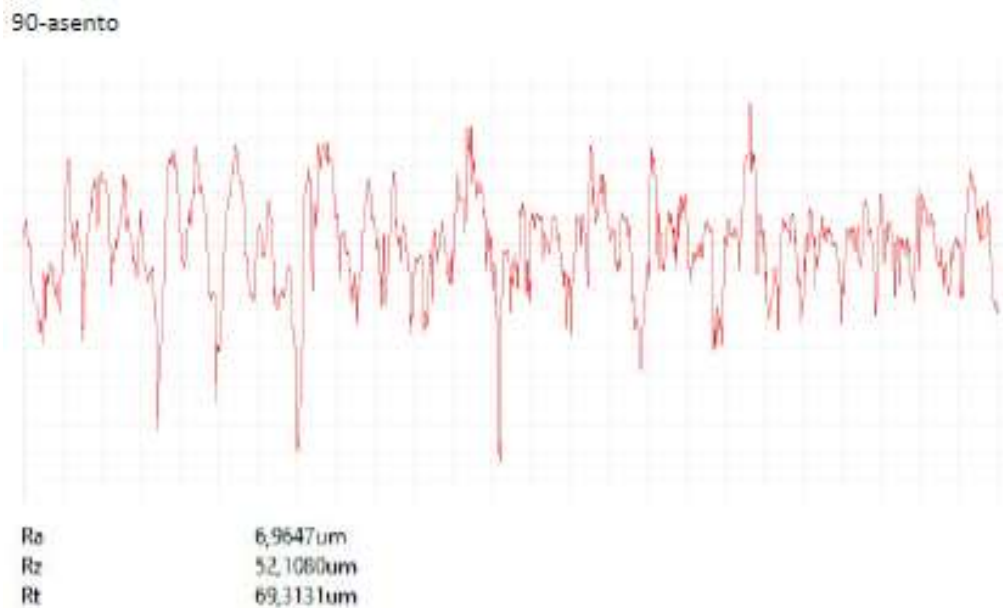
Kuva 27. Dye Mansion PowerShot C- ja S-käsitelty 45-PA-S -kappale: mittaustulokset, 0-mittausasento



Kuva 28. Dye Mansion PowerShot C -käsitelty 45-PA-kappale: mittaustulokset, 45-mittausasento



Kuva 29. Dye Mansion PowerShot C- ja S-käsitelty 45-PA-S -kappale: mittaustulokset, 45-mittausasento



Kuva 30. Dye Mansion PowerShot C -käsitelty 45-PA-kappale: mittaustulokset, 90-mittausasento



Kuva 31. Dye Mansion PowerShot C- ja S-käsitelty 45-PA-S -kappale: mittaustulokset, 90-mittausasento

7.4 Yhteenveto 45 asteen kulmaan tulostetuista osista

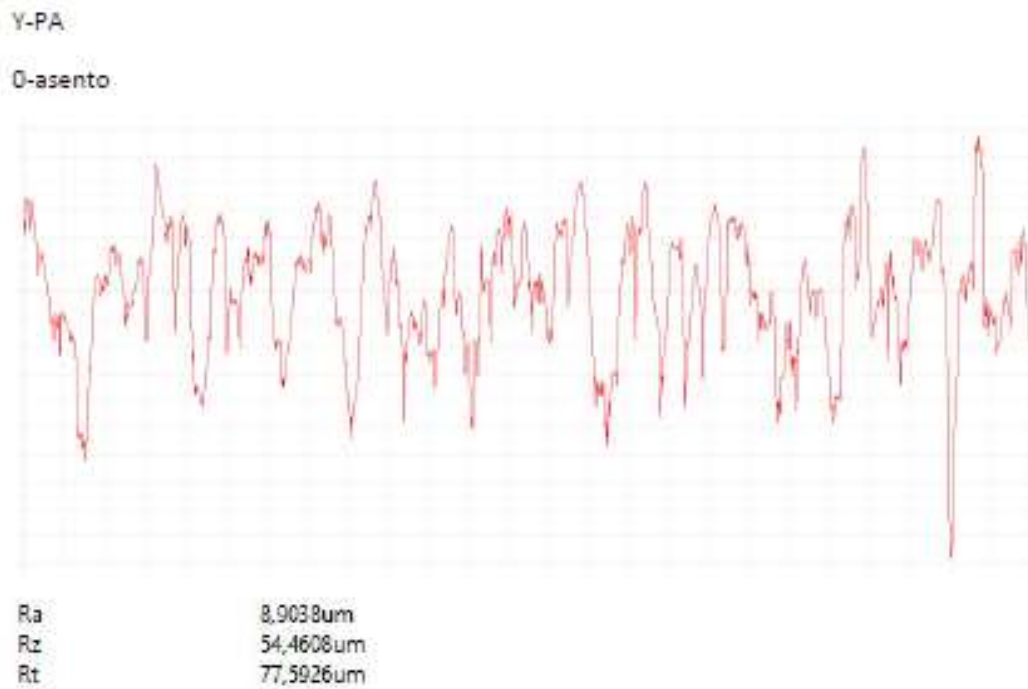
Taulukkoon 3 on koottu 45 asteen kulmassa rakennusalustaan sijoitettujen osien mittausinformaatio. Sarakkeessa 45-PA on mittausarvo Dye Mansion PowerShot C -käsitellyille osille. Sarakkeessa 45-PA-S on mittausarvo Dye Mansion PowerShot C- ja S-käsitellyille osille. Prosenttiosarakkeesta voidaan lukea pinnan pinnankarheuden parantuminen prosentteina. Etuliite on positiivinen, jos pinnankarheus on parantunut. Etuliite on negatiivinen, jos pinnankarheus on heikentynyt.

Taulukko 3. Yhteenveto 45 asteen kulmassa olleista osista

	45-PA [um]	45-PA-S [um]	Prosenttiero
0-asento Ra	7,33	6,65	+ 9,30 %
0-asento Rz	50,92	40,35	+ 20,76 %
0-asento Rt	67,26	55,23	+ 17,88 %
45-asento Ra	7,43	6,77	+ 8,80 %
45-asento Rz	52,74	48,80	+ 7,46 %
45-asento Rt	74,37	66,28	+ 10,88 %
90 -asento Ra	6,96	6,03	+ 13,37 %
90 -asento Rz	52,11	39,94	+ 23,35 %
90 -asento Rt	69,31	59,56	+ 14,07 %

7.5 Y-PA- ja Y-PA-S-kappaleet ja mittau tulokset

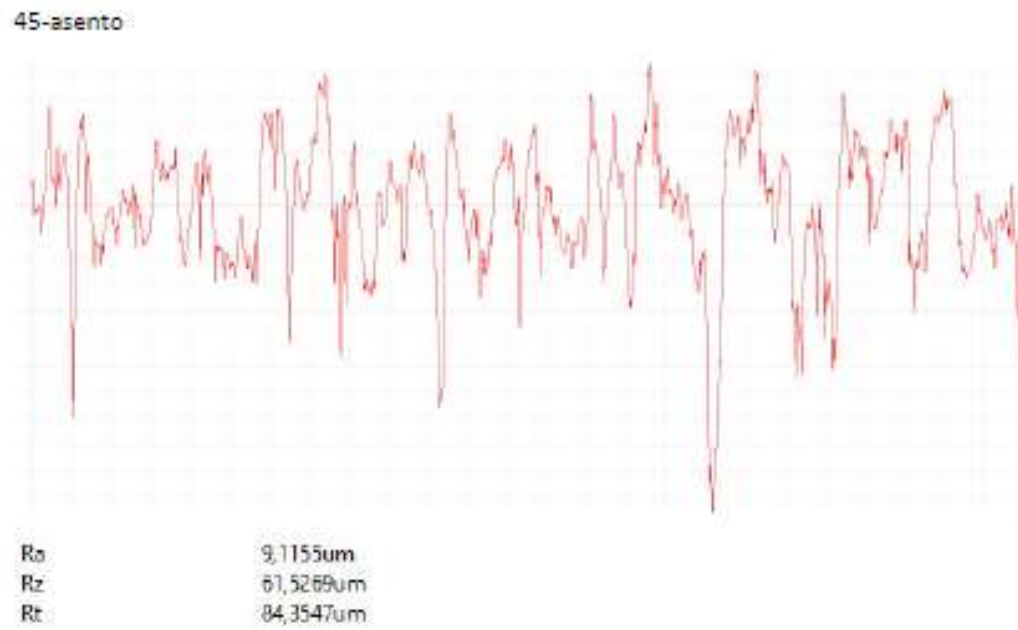
Y-PA-kappale (Kuva 32, Kuva 34, Kuva 36) eli pystysuoraan rakennusalustaan sijoitettu kappale toimii vertailukappaleena Y-PA-S-kappaleelle (Kuva 33, Kuva 35, Kuva 37). Kappaleessa tulostuskerrokset ovat tulostuneet 90 asteen kulmassa mittauspintaan nähden.



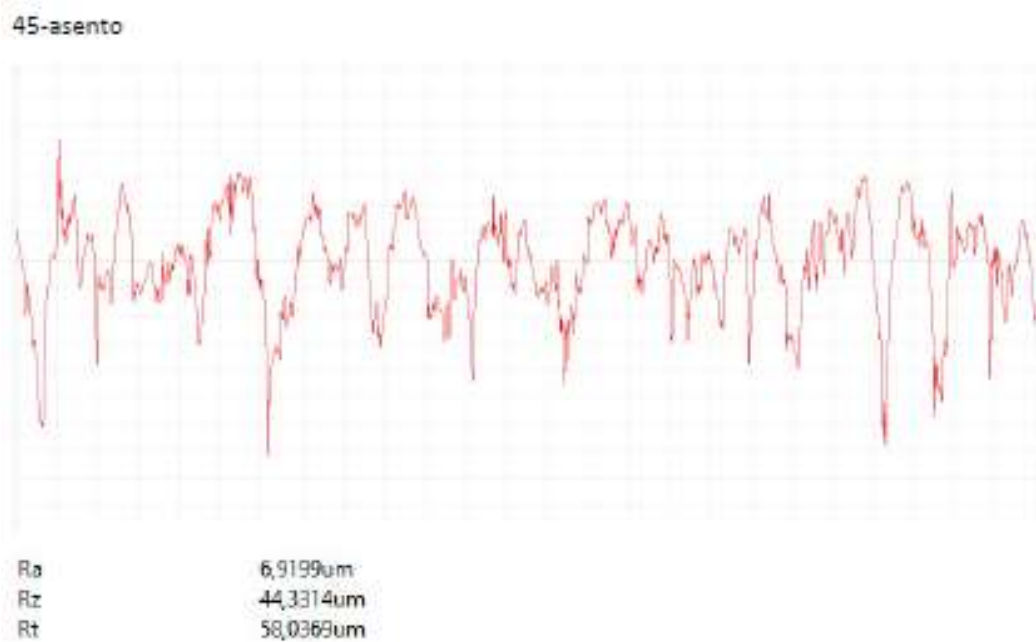
Kuva 32. Dye Mansion PowerShot C -käsitelty Y-PA-kappale: mittaustulokset, 0-mittausasento



Kuva 33. Dye Mansion PowerShot C- ja S-käsitelty Y-PA-S -kappale: mittaustulokset, 0-mittausasento

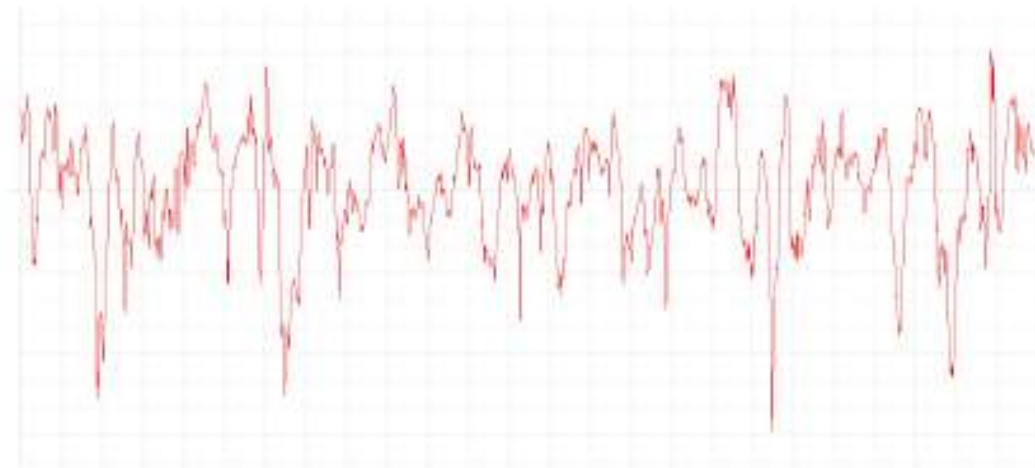


Kuva 34. Dye Mansion PowerShot C -käsitelty Y-PA-kappale: mittaustulokset, 45-mittaussasento



Kuva 35. Dye Mansion PowerShot C- ja S-käsitelty Y-PA-S -kappale: mittaustulokset, 45-mittaussasento

90-asento



Ra	8,0713um
Rz	56,3550um
Rt	69,8854um

Kuva 36. Dye Mansion PowerShot C -käsitelty kappale: mittaustulokset, 90-asento

90-asento



Ra	6,3853um
Rz	41,5441um
Rt	52,7730um

Kuva 37. Dye Mansion PowerShot C- ja S-käsitelty Y-PA-S -kappale: mittaustulokset, 90-mittaasento

7.6 Yhteenveto 90 asteen kulmaan sijoitetuista osista

Taulukkoon 4 on koottu 90 asteen kulmassa rakennusaluistaan sijoitettujen osien mitausinformaatio. Sarakkeessa Y-PA on mittausarvo Dye Mansion PowerShot C -käsitellyille osille. Sarakkeessa Y-PA-S on mittausarvo Dye Mansion PowerShot C- ja S-käsitellyille osille. Prosenttiosarakkeesta voidaan lukea pinnankarheuden parantuminen prosentteina. Etuliite on positiivinen, jos pinnankarheus on parantunut. Etuliite on negatiivinen, jos pinnankarheus on heikentynyt.

Taulukko 4. Yhteenveto 90 asteen kulmassa tulostetuista osista

	Y-PA [μm]	Y-PA-S [μm]	Prosenttiero
0-asento Ra	8,90	6,66	+ 25,13 %
0-asento Rz	54,46	42,50	+ 21,96 %
0-asento Rt	77,59	56,16	+ 27,63 %
45-asento Ra	9,12	6,91	+ 24,09 %
45-asento Rz	61,53	44,33	+ 31,20 %
45-asento Rt	84,35	58,04	+ 31,20 %
90 -asento Ra	8,07	6,39	+ 20,89 %
90 -asento Rz	56,36	41,54	+ 26,28 %
90 -asento Rt	69,88	52,77	+ 24,49 %

8 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

8.1 Tulostimen optimointi

SLS-valmistettujen osien pinnankarheus riippuu eri prosessiparametreista. Tulostimen tulostusparametrit ja itse laitteen ominaisuudet vaikuttavat mitä suurimmassa määrin tulosteen laatuun. Optimaalisin tilanne olisi ollut tutkimuksen tekemiseksi, että tulostimen lämpötila, laserteho, skannausnopeus, skannausväli ja skannauspituus olisi optimoitu. Laite on kuitenkin tuotantokäytössä, joten laitetta ei ollut mahdollista optimoida tutkimuskäyttöön. Tulokset siis kuvaavat yhden tulostusajon tuloksia.

8.2 Pinnanlaadun jälkiprosessoinnin johtopäätökset

Mittaustulokset vahvistavat jälkikäsitteilylaitteen valmistajan lupaukset. Jokaisessa ajoasennossa tulosteen pinnankarheusmittaustulos parani. Pelkät Dye Mansion C -käsitellyt osat olivat tuloksiltaan huonompia kuin Dye Mansion C- ja S-käsitellyt osat. Hajonta mittaustuloksissa voi johtua monista eri syistä. Kappaleiden erilaisiin asentoihin sijoittamisen avulla voidaan kuitenkin selittää suurin osa mittaustulosten hajonnasta.

8.3 Tutkitut jälkikäsitteilylaitteet

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin DyeMansion PowerShot C- ja S-jälkikäsitteilylaitteita. PowerShot C on suunniteltu puhdistamaan tulosteet ylimääräisestä tulostinjauheesta. PowerShot S on suunniteltu parantamaan tulosteiden pinnanlaatua. Tähän käyttötarkoitukseen laitteet tarjoavat selkeän parannuksen manuaaliseen työskentelyyn verrattuna.

8.3.1 Dye Mansion PowerShot C osana tulosteiden puhdistuksen automatisointia

Automaatioprosessin tarkoituksena on vähentää yksitoikkoista käsityötä sekä tehostaa tulosteiden jälkikäsitteilyprosessia. Manuaalisessa puhdistuksessa jokainen osa puhalletaan puhalluskaapissa esiin ylimääräisen tulostuspulverin seasta. Pienien, monimutkaisten tai tuotanto-osien kanssa työ muuttuu ihmissilmin vähintäänkin haastavaksi ja työaika hukataan. Dye Mansion PowerShot C -laitteella voidaan käsitellä suuriakin määriä tulosteita kerralla. Laitte käynnistetään ja tarvittaessa toistetaan käsittely. Laitteen avulla tehostetaan tulosteiden puhdistusta valmistajan mukaan jopa nelinkertaisesti verrattuna manuaaliseen puhdistuskaappiin. Tulostettujen osien kannalta puhdistusprosessin toistettavuus toteutuu paremmin kuin manuaalisesti toimimalla.

8.3.2 Dye Mansion PowerShot S osana tulosteiden pinnanlaadun parantamisen automatisointia

Pinnanlaadun parantamisessa Dye Mansion PowerShot S tarjoaa lisäarvoa tulosteesseen. Tässä opinnäytetyössä mitatun pinnanlaadun parantumisen lisäksi kappaleiden huokuisuus vähenee. Osat ovat helpommin maalattavissa tai pinnoitettavissa. Jälkikäsitteily tehostuu, koska aikaa viimeistelyyn kuluu vähemmän.

8.4 Jatkokehitys ja tuotanto-osat

Jälkikäsitteilyprosessia voidaan kehittää standardoimalla oikeat prosessiasetukset. Varsinkin tuotanto-osissa jokainen jälkikäsitelty erä ja siinä käytetyt asetukset, eli laitteessa käytetty aika ja puhalluspaineet tulee kirjata tuotannonohjausjärjestelmään niin, että eräasetukset ovat tarvittaessa palautettavissa, jos ongelmia ilmenee. Tulostamalla tehdään jo nyt tuotanto-osia piensarjoina ja tulevaisuudessa trendi tuskin vähenee. Tulosteiden pinnanlaadun tulee siis pysyä jälkikäsitteilynkin osalta loppuasiakkaille samanlaisena.

DyeMansion on kehittänyt DM60 värjäyslaitteen, toivottavasti pääsen tutustumaan siihen. Laitteen käyttö edellyttää PowerShot C- ja S -käsittelyä värjättäville tulosteille.

8.5 Pohdinta

Opinnäytetyöprosessi on ollut erittäin opettavainen ja uskon tämän työn selittävän yleisellä tasolla, mitä tarkoitetaan jauhepetijärjestelmän 3D-tulosteella. Automaation yhdistäminen tälläkin alalla tarkoittaa yksitoikkoisten työvaiheiden vähenemistä. Pinnanlaadusta käytetään usein subjektiivisia adjektiiveja kuten sileä tai kiiltävä, tämän opinnäytetyön kirjoittamisen jälkeen, en itse enää käytä näin subjektiivisia ilmaisuja tulosteista.

3D-tulosteet ovat nykyään niin arkipäiväisiä, että toivon näkeväni jonkinlaisen standardin määrittelyn myös muovitulosteille. Pidän onnistuneena valintana mitata tulosteiden pinnanlaatua pinnankarheuden mittauslaitteiden avulla.

Tulostettujen osien pinnanlaadun tutkiminen ja siihen vaikuttavien muuttujien ymmärtäminen on ollut hieno matka teollisen tulostamisen maailmaan. Työskentelyn ja opinnäytetyön yhdistäminen oli haastavaa ja kiitän ymmärryksestä työn tilaajaa ja nykyistä työnantajaani Ajatec Prototyping Oy:tä.

Automaatio-opintoni saivat mielestäni sopivan lisäarvon, sillä pääsin tämän opinnäytetyön teon aikana suorittamaan DyeMansion PowerShot S -laitteen asennusprotokollan mukaisen käyttöönoton valmistajan kanssa ja sain sertifikaatin laitteen käyttöönotosta.

Satakunnan Ammattikorkeakoulun Robotiikka Akatemia -projekteista saadun kokemuksen ovat erittäin arvokkaita. Ajatec Prototyping Oy:n asiakkaiden monet projektit tehdään yritysten tuotekehitysosastojen kanssa. Koulusta saatu jatkuvan oppimisen ja tiedonhankinta taito on jokapäiväisessä käytössä.

LÄHTEET

Ajatec Oy. (n.d.). Ajatec Prototyping Oy. Haettu 14.12.2021 osoitteesta <https://ajatec.fi/>

CONSEPTAS OY. (n.d.). Mekaniikkasuunnittelu ja aiheeseen liittyvät keskustelut. Haettu 24.11.2021 osoitteesta <https://mekaniikkasuunnittelu.com/mekaniikkasuunnittelu-ruiskuvaletuissa-muovituotteissa/>

Formlabs. (2021). Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing. Haettu 24.11.2021 osoitteesta <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>

Materflow. (n.d.). SLS- Selective Laser Sintering (SLS). Haettu 14.12.2021 osoitteesta <https://www.materflow.com/sls-selective-laser-sintering/>

Mitutoyo Scandinavia AB Finnish Branch. (2021). PIKAOPAS PINNANKARHEUDEN MITTAUKSEEN Opas laboratorio- ja konepajakäyttöön SUOMIPAINOS. Mitutoyo Scandinavia AB Finnish Branch, 1(1), 1–8.

Muurinen, K. (2013). 3D-tulostus – digitaalisesta mallista esineeksi.

Norman, J. (2021). Chuck Hull Invents Stereolithography or 3D Printing and Produces the First Commercial 3D Printer: History of Information. Haettu 14.12.2021 osoitteesta <https://historyofinformation.com/detail.php?id=3864>

Reijonen, Jorma. (10.1.2022). Ajatec Prototyping Oy 3D-operaattorin haastattelu.