

BASF ULTRAFUSE 316 L- METALLITULOOSTAMISEN TUTKIMINEN

Tiivistelmä

Koulutusala	
Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma	
Konetekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t)	
Joni Rouvanmäki	
Työn nimi	
BASF Ultrafuse 316L- metallitulostamisen tutkiminen	
Päiväys	Sivumäärä/Liitteet
17.3.2021	19+6
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t)	
Savonia ammattikorkeakoulu	
Tiivistelmä	
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia metallin FDM tulostamista yleisellä tasolla. Lisäksi tarkoituksena oli syventyä aiheeseen testitulosteiden ja materiaalitestien avulla, käyttäen BASF Ultrafuse 316L- filamenttia. Materiaalitestien avulla tavoitteena oli saada luotettavaa tutkittua tietoa siitä, millaisia ominaisuuksia testikappaleille on mahdollista saada itse säädetyillä tulostusparametreilla.</p> <p>Tutkimuksen alku koostui kirjallisuustutkimuksesta, jossa paneuduttiin jo tehtyihin tutkimuksiin ja niistä saatiin tuloksiin. Perehtymisen jälkeen aloitettiin testikappaleiden valmistus. Tulostusvaiheessa pyrittiin testikappaleista saamaan mahdollisimman korkealaatuisia. Tulosteet lähetettiin alihankkijalle sideaineen poistoon sekä sintraukseen. Valmiille teräskappaleille tehtiin vetokokeet ja kokeiden tuloksia verrattiin muihin valmistusmenetelmiin.</p> <p>Kirjallisuustutkimuksella saatiin opinnäytetyöhön koottua runsaasti tietoa metallin FDM tulostamisesta. Testikappaleiden valmistamisella saatiin opinnäytetyöhön kirjattua myös käytännöntason tietoa ja huomioita. Materiaalitesteillä ja testitulosten vertailulla päästiin havainnoimaan eri valmistusmenetelmien lujuuden eroja. Tuloksista oli pääteltävissä, että tämä valmistusmenetelmä kykenee kilpailemaan muotoilultaan ja ominaisuuksiltaan muita metallitulostustapoja kohtaan.</p>	
Avainsanat	
FDM- tulostaminen. FFF- tulostaminen, metallitulostus, BASF, Ultrafuse 316L	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering	
Author(s) Joni Rouvanmäki	
Title of Thesis Research on Metal Printing	
Date 18 March 2021	Pages/Appendices 19+6
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences	
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this study was to do reliable research on FDM metal printing on general level. The research included a literature research, test prints and material tests. Test prints and material test parts were manufactured by Basf Ultrafuse 316L filament. The goal of the material tests was to find out the ultimate tensile strength for self-printed Ultrafuse 316L parts. The study was commissioned by Savonia University of Applied Sciences.</p> <p>The research was started with literature research, aiming to find out the existing studies and results. When the high knowledge level was reached the production of test prints and material test parts was started. The produced parts were sent to subsuppliers for debinding and sintering process. The ultimate tensile tests were made for the final parts and the results were compared to other manufacturing methods.</p> <p>Literature research gave a lot of information about FDM metal printing. Practical information was gained through the production of test parts. The comparison of tensile strengths provided more information about the competitiveness between Ultrafuse 316L material and other similar materials. As a result it can be said that the researched material is a good competitor in the area of 3d metal printing.</p>	
<p>Keywords</p> <p>FDM printing, FFF printing, metal printing, Basf, Ultrafuse 316L</p>	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	5
2	METALLIN FDM TULOSTAMINEN.....	6
2.1	Tulostaminen.....	6
2.1.1	Tulostustyön haasteet	7
2.2	Ensimmäisen asteen sideaineenpoisto	8
2.2.1	Sideaineenpoiston aiheuttamat haasteet.....	8
2.3	Toisen asteen sideaineenpoisto ja sintraaminen	9
2.3.1	Sintrauksen aiheuttamat haasteet	10
3	SUUNNITTELU	11
3.1	Tasainen pinta	12
3.2	Korkeuden ja leveyden suhde	12
3.3	Materiaalipaksuus ja paksuuden vaihtelut	12
3.4	Ulkoneman kulma	14
3.5	Sintrausprosessin vääntyminen	14
4	VETOKOKEET	15
4.1	Vetokoekappaleiden valmistus	15
4.2	Vetokokeiden tulokset ja vertailu	16
5	POHDINTA.....	18
6	LÄHTEET	19
7	LIITTEET	20
7.1	Käytetyt tulostusparametrit	20
7.2	Vetokokeiden tulokset	21

1 JOHDANTO

Metallin 3d tulostaminen on ollut viimeisten vuosien aikana puhuttu aihe valmistusmenetelmistä keskusteltaessa. Metallitulosteiden valmistamiseksi on kehitetty useita erilaisia tapoja kuten esimerkiksi lasersintraus (engl. Selective Laser Sintering), sideaineen suihkutus (engl. Binder Jetting) ja FDM tulostaminen. Metallitulostaminen valmistusmenetelmänä voi olla hyvinkin merkittävä tulevaisuuden teollisuudessa. Tässä opinnäytetyössä tullaan perehtymään tarkemmin metallin FDM tulostamiseen BASF Ultrafuse 316L filamenttia käyttäen. BASF Ultrafuse 316L metallifilamentissa muovipohjaiseen sideaineeseen on sisällytetty runsaasti teräspartikkeleja. Tämä filamentti mahdollistaa sen, että itse tulostustyö on toteutettavissa perinteisillä muovitulostukseen tarkoitetuilla FDM-tulostimilla. Valmiin teräskappaleen aikaansaamiseksi täytyy tulosteelle suorittaa vielä sideaineenpoisto- ja sintrausprosessi. Opinnäytetyön laatijalla on hyvä tietämys muovitulostamiseen, Savonian kurssien sekä omien harrastuksien kautta. Muovia tulostettaessa FDM tulostimella, itse tulostustyön peruseräätteet ovat samat kuin metallia tulostettaessa. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Savonia.

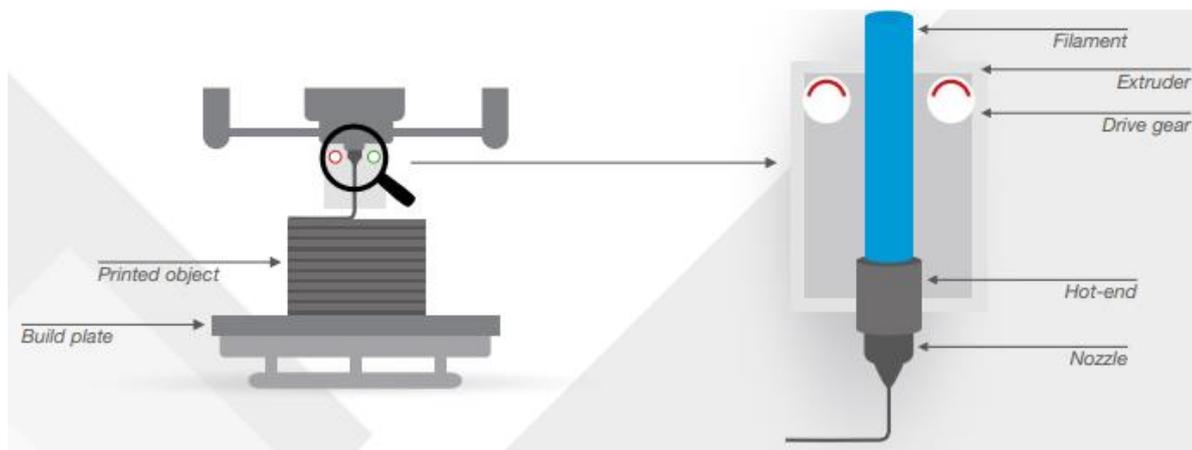
2 METALLIN FDM TULOSTAMINEN

Metallin FDM- tulostusmenetelmä (tunnetaan myös metallin FFF- tulostamisena) on melko uusi tapa valmistaa kappaleita. Valmistusprosessi pohjautuu metallin muottivalamiseen (engl. metal injection molding). Prosessi koostuu muottivalamisesta, sideaineen poistosta ja sintrauksesta. Metallin muottivalamista ja FDM- tulostamista verrattaessa keskenään voidaan todeta sideaineen poiston sekä sintrausprosessin olevan keskenään samanlaisia prosesseja. Näiden valmistusmenetelmien eroavaisuus on siinä, että valamisen sijaan kappaleelle annetaan muoto FDM- tulostamalla.

Tällä hetkellä alalla on kaksi tunnettua laitevalmistajaa Markforged ja Desktop metal. Nämä laitevalmistajat myyvät asiakkailleen tulostusmateriaaleja sekä laitekokonaisuuksia, joihin kuuluu tulostin, sideaineenpoisto- ja sintrauslaitteet. Näiden lisäksi samalla alalla kilpailee Saksalainen Basf. Tämä eroaa toisista kilpailijoista siten, että se tarjoaa asiakkailleen metallifilamenttia, sideaineenpoisto- ja sintrauspalveluita, mutta ei tulostustyöhön tarvittavia laitekokonaisuuksia. Basf metallifilamentin käyttö on suunniteltu toimivaksi tavanomaisilla FDM- muovitulostimilla. Tämän myötä metallitulosteiden valmistaminen on mahdollista yksityisten tulostinharrastajien keskuudessa. Metallitulosteiden tuottaminen ei tarvitse suurta alkupääomaa tulostinlaitteiston ostamiseen, vaan tulostustyöt voidaan hoitaa edullisilla kotikäyttöön tarkoitetuilla tulostimilla.

2.1 Tulostaminen

Tulostamisvaiheessa kappaleelle tuotetaan haluttu muoto FDM- tulostamisen perusperiaatteita käyttäen (Kuva 1). Tässä materiaalia ajetaan kuumennettua suutinta vasten. Materiaali sulaa ja pursottuu suuttimen läpi tulostusalustalle. Suutinta sekä tulostusalustaa ohjataan siten, että sula materiaali piirtää kuvion tulostusalustan päälle jähmettyen siihen. Jähmettynyt materiaali muodostaa tulosteen ensimmäisen kerroksen. Ensimmäisen kerroksen jälkeen suuttimen ja tulostusalustan välimatkaa kasvatetaan ja toinen kerros pursotetaan edeltävän kerroksen päälle. Jotta kappale onnistuu, vaaditaan tulostinlaitteistolta sekä sen numeeriselta ohjaukselta tarkkuutta. Lisäksi kappaleen suunnittelijan täytyy tietää tulostustyön rajoitteet kappaleen suunnittelun suhteen.



Kuva 1. Periaatekuva FDM- tulostamisesta. (BASF, Ultrafuse 316L: User Guidelines for 3D Printing Metal Parts)

Metallin FDM tulostamisessa käytetään tulostusmateriaalia, joka koostuu muovista ja metallista. Tulostinlaitteistosta ja valmistajasta riippuen, materiaali voi olla muodoltaan lan-kamaista tai tankomaista. Metallin osuus materiaalista on yli 80 % painosta (BASF, BASF Ultrafuse 316L Metal 3D Printing Filament, 2020). Muovin tehtävänä on pitää materiaali kasassa ennen tulostusta ja tulostamisen jälkeen. Tulostustyön jälkeen kappale kestää normaalin käsittelyn mutta sillä ei ole lujuuden suhteen teräksen ominaisuuksia. Kappaletta kutsutaan tässä vaiheessa termillä vihreä kappale (engl. green part). (Heaney, 2012, s. 66)

2.1.1 Tulostustyön haasteet

Metallin FDM tulostukseen pätevät samat säännöt kuin muovin FDM- tulostamiseen. Tulostustyön onnistuminen vaatii oikeiden tulostusparametrien käyttöä. Sopivien tulostusparametrien löytäminen voi vaatia useampien testitulosteiden tekoa ja parametrien hienosäätöä.

Isompien kappaleiden kohdalla voivat vääntyminen (engl. warping) ja kiertyminen (engl. twisting) aiheuttaa ongelmia. Vääntyminen voi aiheutua liiallisesta kappaleeseen kohdistu-neesta lämpöenergian määrästä. Lämpöenergian määrää voidaan vähentää suuttimen läm-pötilaa laskemalla tai tulostusnopeutta kasvattamalla. Lyhyemmässä tulostusajassa kappaleeseen kohdistuva lämpöenergian määrä on pienempi. (Pitts, 2020)

Myös kiertyminen voi aiheuttaa ongelmia korkeampia tulostustöitä tehdessä. Useat slicer-ohjelmistot oletusarvoisesti ohjaavat jokaisen kerroksen ulkokuoren tulostustyön kulkemaan samansuuntaisesti kerrosten välillä. Tulostussuuntaa käännettäessä jokaiselle kerrokselle, voidaan päästä kiertymisongelmasta. (Pitts, 2020)

Lopputuloksen lujuuden kannalta on tärkeää, että tulosteeseen ei jäisi suuria määriä huokoisuutta. Vaikka teräspartikkelit kuroutuvatkin sintrausprosessin aikana, voi liiallinen kappaleen huokoisuus jättää sintrattuun kappaleeseen huokoisuuskanavia. Kanavat vaikuttavat kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin heikentävästi. Eri kerrosten välisten tulostussuuntien tai tulostustyön infill- tyyppin ei katsota suoraan vaikuttavan mekaanisiin ominaisuuksiin mutta on todettu, että osa infill- tyypeistä jättää enemmän huokoisuutta kuin toiset. (Damon;Dietrich;Gorantla;Popp;& Okolo, 2019)

2.2 Ensimmäisen asteen sideaineenpoisto

Tulostetun kappaleen sideaine muodostuu kahdesta eri polymeeristä. Sideaineen poistossa tavoitteena on poistaa vihreän kappaleen polymeereistä toinen. Sintrausprosessin tapahtuessa korkeassa lämpötilassa, liiallinen sideaine voi haihtua kappaleesta liian nopeasti aiheuttaen kappaleeseen halkeamia ja muodonmuutoksia. Sideaineen poistoprosessi riippuu tulostinmateriaalissa käytetystä sideaineesta. Prosesseja ja eri sideaineita on kehitetty useita erilaisia. BASF Ultrafuse 316L- filamenttia käytettäessä, sideaineen poistoprosessina käytetään katalyyttistä sideaineen poistoa (engl. catalytic debinding). Tässä prosessissa toisena sideaineena käytetty polyoksimeteeni (POM) hajoaa formaldehydiksi typpihapon ja korotetun 100 – 140 °C asteen lämpötilan avulla. Käsittelyn jälkeen kappaleen teräspartikkelit pysyvät kaassa toisen sideaineen, polypropeenin, avulla. Kappale tulee huokoinen ja sitä kutsutaan nimellä ruskea kappale (engl. brown part). (Heaney, 2012, s. 140)

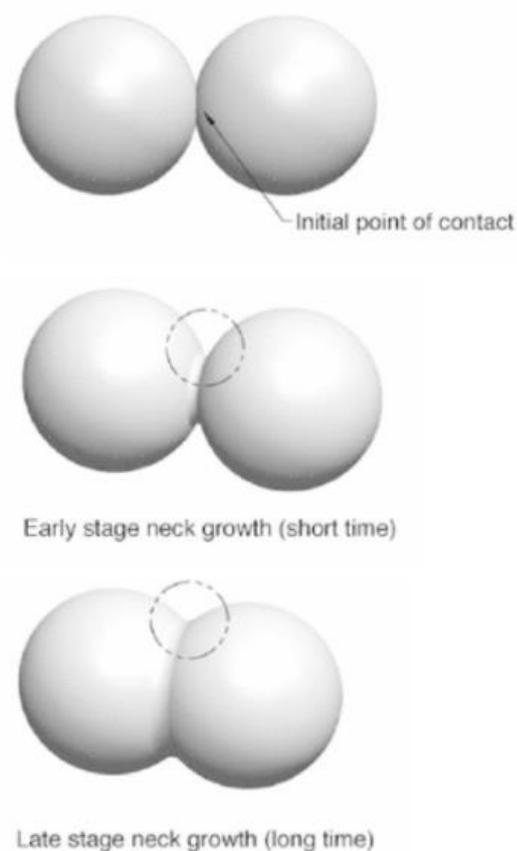
2.2.1 Sideaineenpoiston aiheuttamat haasteet

Ruskean kappaleen vähäisen sideainemäärän myötä, kappale on tässä vaiheessa valmistusprosessin hauraassa tilassa. Vääränlainen muotoilu voi romahduttaa kappaleen. Tästä syystä suunnittelussa kannattaa noudattaa laite- ja filamenttitoimittajan suunnitteluohjeita.

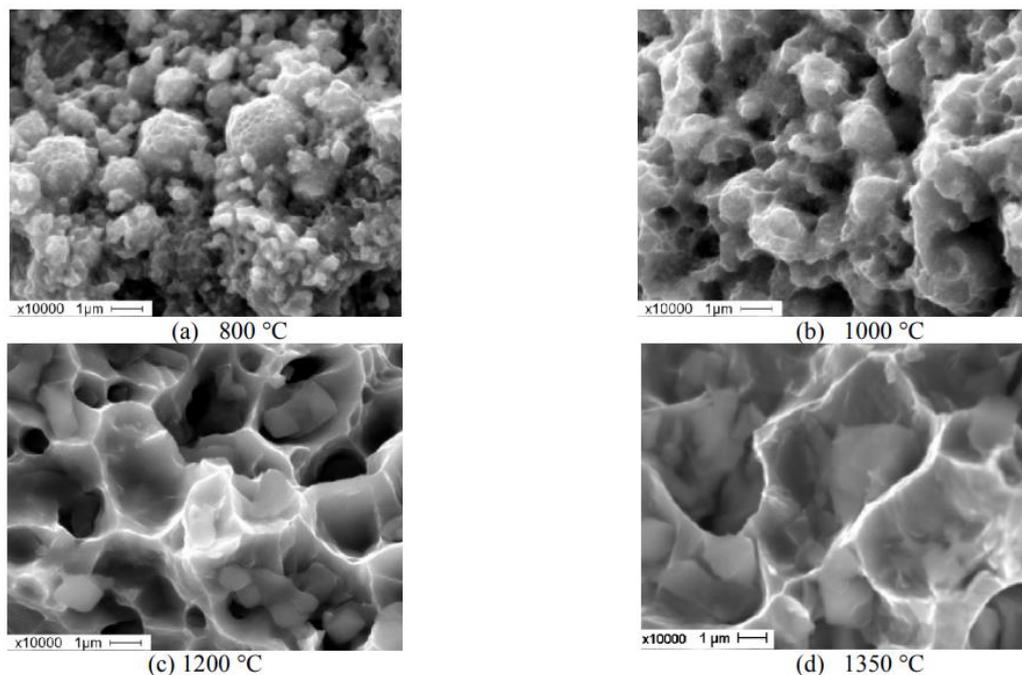
2.3 Toisen asteen sideaineenpoisto ja sintraaminen

Toisen vaiheen sideaineenpoisto tapahtuu uunissa, noin 450–500 °C lämpötilassa. Tässä prosessissa ruskean kappaleen polypropeeni haihtuu kappaleesta huokosten kautta. Sideaineen haihtumisen yhteydessä teräspartikkelit muodostavat pieniä diffuusiosidoksia toistensa välille, lisäten metallipartikkelien välistä kitkaa. Tämän avulla kappale pysyy annetussa muodossa toisen asteen sideaineenpoiston jälkeen. Tämän jälkeen lämpökäsittely jatkuu suoraan sintrausvaiheeseen. (Heaney, 2012, s. 144)

Sintrauksessa kappaleen lämpötila nostetaan sulamislämpötilan alle. Ruostumatonta 316L-terästä sintrattaessa käytetään noin 1350 °C lämpötilaa. Lämpötilan hiljalleen noustessa, partikkelit kuroutuvat toisiinsa (Kuva 2). Lämpökäsittelyajan pitkittyessä ja lämpötilan noustessa, partikkelit vetäytyvät lähemmäksi toisiinsa vahvistaen liitosta. Tämän myötä kappale kutistuu, tiheys kasvaa ja partikkelien välille muodostuu luja sidos. (Heaney, 2012, s. 150)



Kuva 2. Partikkelien kuroutuminen. (Heaney, 2012, s. 150)

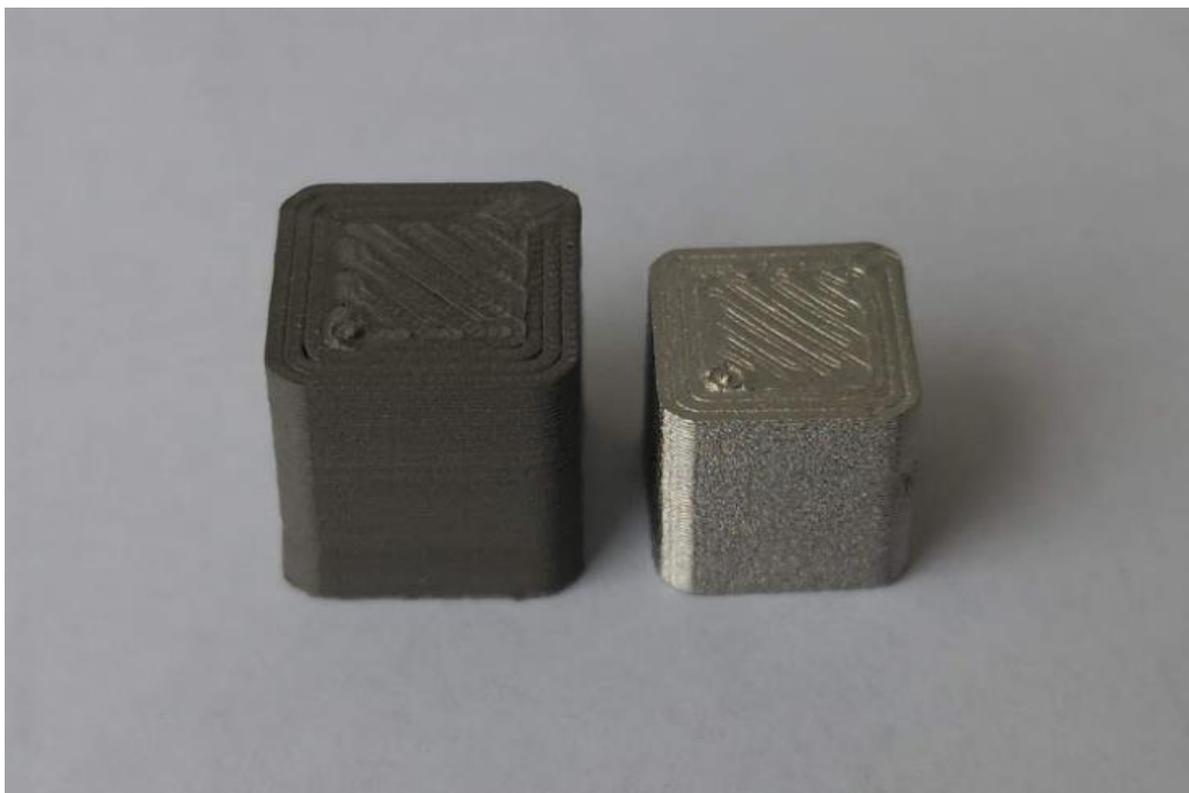


Kuva 3. 316L Mikroskooppikuvat sintrausvaiheessa.
(Rodkevich;Pervikov;Glazkova;Apkaryan;& Lerner, 2018)

Kuvan (Kuva 3) a-kohdasta on nähtävissä, kuinka ruostumattoman 316L teräksen partikkelien kuroutuminen alkaa noin 800 °C:ssa. Kohdasta b näkee, kuinka 1000 °C kohdalla pienimmät partikkelit ovat sulautuneet täysin isompiin partikkeleihin. Lämpötilan ollessa 1200 °C partikkelit ovat sintrautuneet toisiinsa mutta kappale on vielä huokoinen. Viimeisessä kohdassa on nähtävissä, kuinka kappaleessa ei ole enää juurikaan huokoisuutta ja sintraus on valmis. Kappaleen kutistuma tapahtuu sintrauksen aikana samaan tahtiin mitä huokoisuus pienenee. (Rodkevich;Pervikov;Glazkova;Apkaryan;& Lerner, 2018)

2.3.1 Sintrauksen aiheuttamat haasteet

Kappale kutistuu sintrauksen aikana noin 16–20 % (Kuva 4). Kutistuma on suurempi pysty-akselin suhteen kuin vaaka/pituusakselin suunnassa. Akselikohtainen ero johtuu gravitaation vaikutuksesta. Pystyakselin suhteen kutistuessa gravitaatio auttaa kappaletta painumaan. Kutistuman takia yli 100 mm pitkä kappale liikuu sintrauksen aikana jopa 11 mm alustaansa nähden. Liiallinen kitka tai alustaan tarttuminen voi aiheuttaa suurissa kappaleissa vääntymiä. (Heaney, 2012, s. 177)



Kuva 4. Vihreä kappale ja sintrattu kappale. (Tekijän oma arkisto)

Lisäksi sintrauksessa käytetty korkea lämpötila voi aiheuttaa kappaleeseen jännitekeskittymiä. Varsinkin tietynlaiset muodot, kuten suuret paksuusvaihtelut sekä terävät nurkat altistavat kappaleen jännitekeskittymille. Liialliset jännitekeskittymät voivat aiheuttaa myös halkeilua. (Heaney, 2012, s. 47)

3 SUUNNITTELU

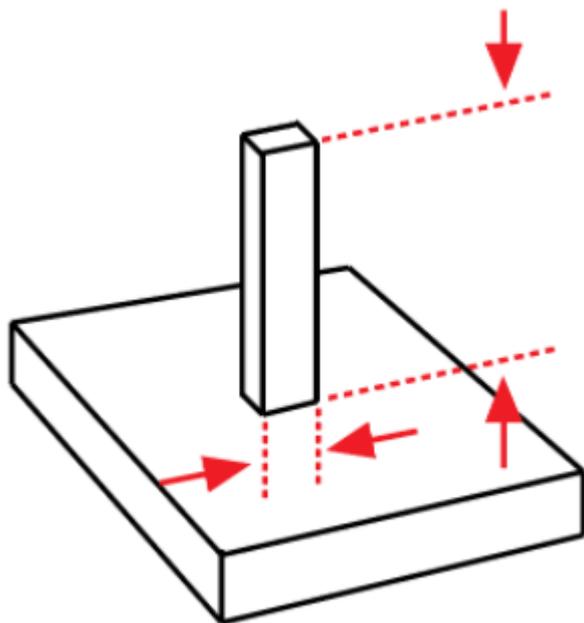
Kappaleen suunnittelussa täytyy ymmärtää valmistusprosessin eri vaiheiden aiheuttamat rajoittavat tekijät. Erityistä huomiota täytyy kiinnittää valmistettavan kappaleen kokoon ja muotoiluun. Kappaleen päämittoja rajoittavat tulostinlaitteiston kapasiteetti sekä sintrauskäsittelyn uunin koko. Suuremmilla kappaleilla on suurempi riski vääntymille tulostus ja sintrausprosessin aikana. Siitä syystä valmistettavien kappaleiden korkeus, leveys ja pituus suositellaan pitämään alle 100 mm:n (Heaney, 2012, s. 177). Muita suunnittelussa huomioon otettavia seikkoja ovat muun muassa paksuusvaihtelut, korkeuden ja leveyden suhde, tasaisen pinnan asettaminen, ulkoneman kulma (engl. overhang angle) ja sintrausprosessin vääntelyt.

3.1 Tasainen pinta

Kappaleen valmistuksen kannalta on suunnittelussa otettava huomioon tulostussuunta sekä se, että kappaleen alapinta, joka tulee tulostusalustaa vasten, olisi mahdollisimman tasainen ja laaja. Tasainen pohjarakenne tarttuu tulostusalustaan hyvin ja pinta-alaltaan laaja pohja vakauttaa kappaletta, eikä tulostusalustan heiluminen pääse huojuttamaan tulostettavaa rakennetta. Tasainen pohjarakenne on myös edellytys sintrausprosessin onnistumiselle (Heaney, 2012, s. 29).

3.2 Korkeuden ja leveyden suhde

Koska ruskea kappale on hauras rikkoutumisille, on suositeltavaa pitää korkeuden ja leveyden suhde (Kuva 5) pienempänä kuin 3:1 (BASF, Ultrafuse 316L: User Guidelines for 3D Printing Metal Parts). Kappaleet, joissa korkeuden ja leveyden suhde on suurempi, ovat myös mahdollista toteuttaa. Tällaisten kappaleiden valmistuksesta kannattaa keskustella sideaineenpoisto- ja sintrausprosessin toteuttajan kanssa (Pitts, 2020).

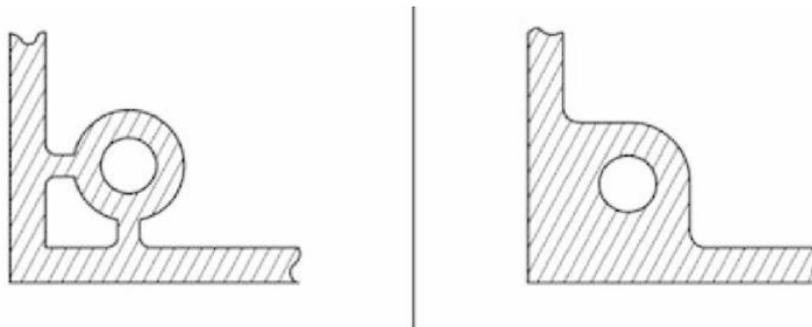


Kuva 5. Korkeuden ja leveyden suhde. (Redwood, 2021)

3.3 Materiaalipaksuus ja paksuuden vaihtelut

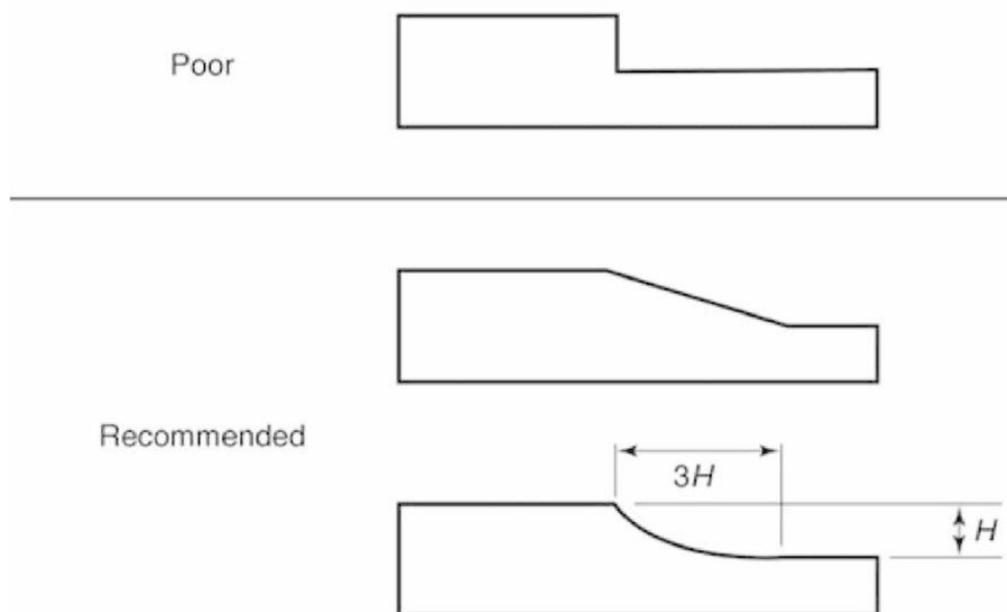
Suuret muutokset materiaalipaksuudessa altistavat jännitekeskittymille sintrausprosessin aikana. Lisäksi suuret paksuusvaihtelut altistavat kappaleen rikkoutumiselle sideaineenpoiston aikana. Valmistettavan kappaleen ohuissa kohdissa sideaineen poisto tapahtuu nopeammin

kuin paksummissa kohdissa. Tämän vuoksi kappaleen ohuet piirteet voivat menettää sideainetta liian paljon, kun taas kappaleen paksummat kohdat vaativat sideaineen poistoa ennen lämpökäsittelyyn siirtymistä. Sideaineen liiallinen poisto altistaa kappaleen romahtamiselle. Kappaleen suunnittelussa kannattaa pyrkiä käyttämään tasapaksuja rakenteita (Kuva 6. Vasemmalla on tasapaksu rakenne ja oikealla rakenteen paksuus vaihtelee), joiden paksuus pysyisi alle 15 mm. (Heaney, 2012, s. 41) Lisäksi materiaalipaksuus vaikuttaa suoraan kappaleen valmistusaikaan, niin sideaineen poistossa kuin tulostettaessa vihreää kappaletta. (Markforged)



Kuva 6. Vasemmalla on tasapaksu rakenne ja oikealla rakenteen paksuus vaihtelee (Heaney, 2012, s. 42)

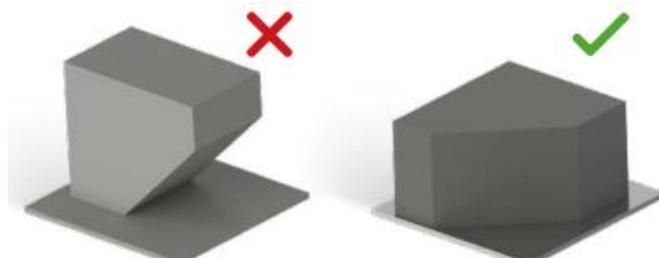
Mikäli kappaleen toiminnallisuus vaatii paksuuden vaihtelua, ei ole suositeltavaa suunnitella ohenemaa, jonka paksuus on alle 60%:n kappaleen normaalista paksuudesta. Lisäksi suositellaan, että ohenema toteutettaisi viistosti kuvan (Kuva 7. Paksuusvaihtelun suunnittelu.) mukaisesti. (Heaney, 2012, s. 41)



Kuva 7. Paksuusvaihtelun suunnittelu. (Heaney, 2012, s. 42)

3.4 Ulkoneman kulma

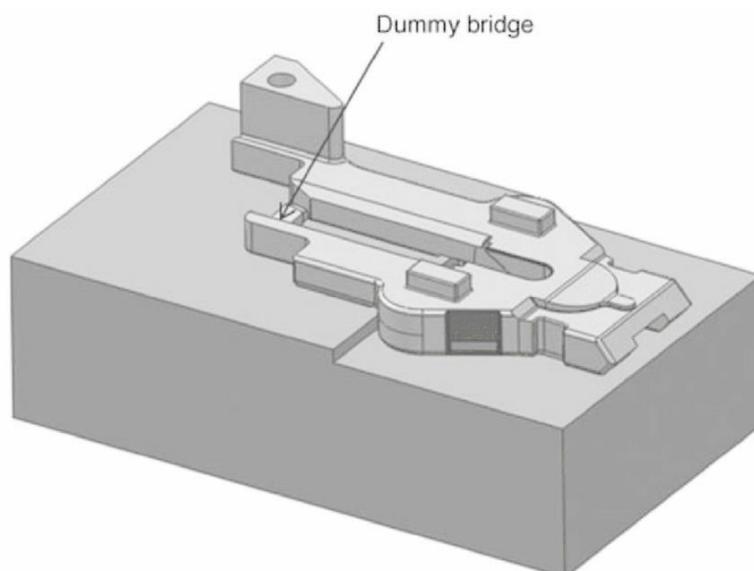
Ruskean kappaleen hauraus asettaa myös rajoitteita ulkonemien kulmasuuruuteen (engl. overhang angle). Ulkoneman kulman täytyy olla alle 45 astetta. Kappaleen toiminnallisuuden vaatiessa suurempaa kulmaa, on syytä tarkastella, olisiko kappaleen tulostussuunnan muuttaminen mahdollista (kuva 5). Jos tämä ei ole mahdollista, on tukimateriaalin käyttö suositeltavaa. (BASF, Ultrafuse 316L: User Guidelines for 3D Printing Metal Parts)



Kuva 8. Tulostussuunnan järjeistäminen. (BASF, Ultrafuse 316L: User Guidelines for 3D Printing Metal Parts)

3.5 Sintrausprosessin vääntyminen

Sintrausprosessin aiheuttamien jännitekeskittymien ja kutistumien myötä, myös rakenteen vääntymiset ovat mahdollisia. Erityisesti kapeat ja pitkät haaraumat ovat herkkiä vääntymille. Nämä voivat olla estettävissä kappaleen paremmalla suunnittelulla tai sintrausprosessin jälkeen poistettavilla tukirakenteilla. Yksi mahdollinen tukirakennemalli on niin sanottu tyhjä silta (engl. dummy bridge). Tällaisella ratkaisulla pitkä ja kapea haarauma on tuettu varsinaiseen runkorakenteeseen ohuella yhdysosalla (kuva 6). (Heaney, 2012, s. 251)



Kuva 9. Dummy bridge. (Heaney, 2012, s. 252)

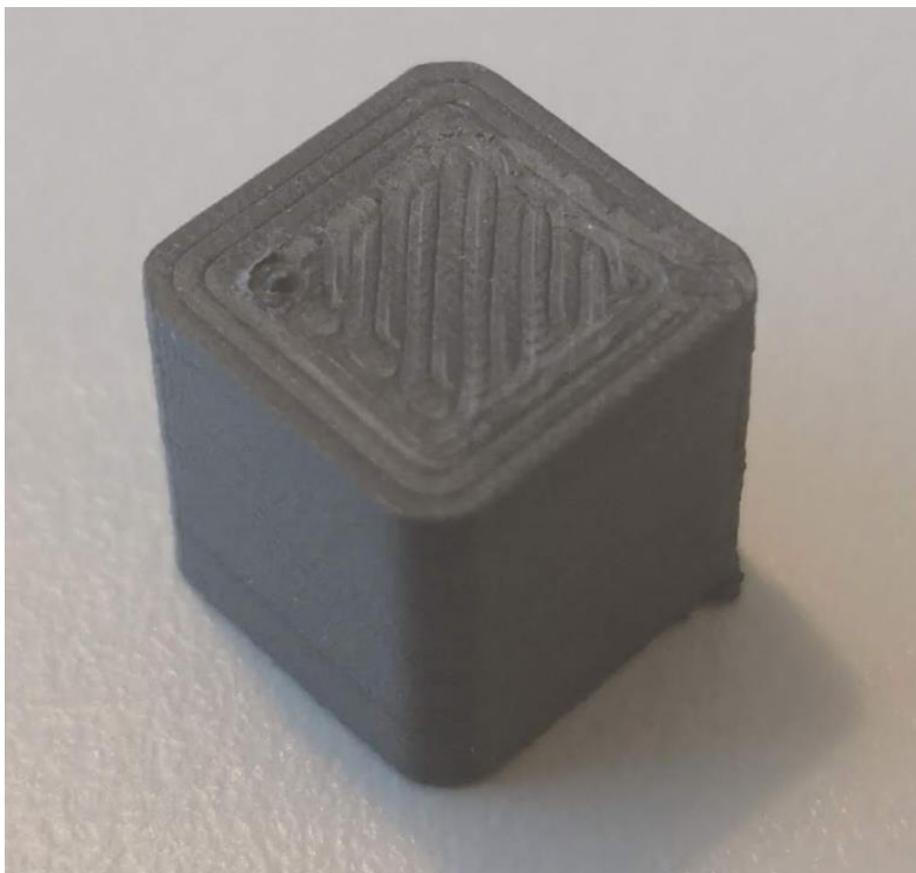
4 VETOKOKEET

Vetokokeiden tarkoituksena oli tarkastella, millaisiin lujuuksiin on mahdollista päästä harrastetason tulostimella ja itse säädetyillä tulosteparametreilla. Tuloksia verrattiin muihin valmistusmenetelmiin, joilla on mahdollista toteuttaa yhtä monimutkaista kappaleen muotoilua kuin tällä valmistusmenetelmällä.

4.1 Vetokoekappaleiden valmistus

Vetokoekappaleiden tulostustyöhön käytettiin Savonia ammattikorkeakoulun Ultimaker 3-tulostinta. Tulostin oli varustettu suojaesineillä, jotka tasaavat tulostusympäristön lämpötilaa ja ilmavirtauksia. Lisäksi tulostin oli varustettu 0.6 mm kovametallisuuhtimella.

Tulostusparametrien suhteen ei löytynyt valmiita asetuksia 0.6 mm suuttimelle, joten parametrit täytyi määrittellä itse. Määrittely pohjautui parametreihin, jotka olivat määritelty Ultrafuse 316L filamentille ja 0.4 mm suuttimelle. Asetusten löytämiseksi tehtiin lukuisia testitulosteita (Kuva 10) ja tulosteiden laatua arvioitiin silmämääräisesti. Tavoitteena oli saada tuloste mahdollisimman matalalla huokoisuudella ja mahdollisimman hyvällä pinnanlaadulla.



Kuva 10. Testitulosteena toiminut 10 mm x 10 mm x 10 mm kuutio.

Hyvien tulostusparametrien löydyttyä testitulosteista siirryttiin vetokoesauvojen tulostamiseen. Vetokoesauvat tulostettiin lasisen tulostusalustan päälle. Alustaan tarttumisen varmistamiseksi käytettiin alustassa puikkoliimaa (Elmer´s Washable School Glue Stick). Tulosteissa käytettiin infill- tyyppiä, jossa filamentin kulkusuunta oli 45 asteessa vetokoesauvan kohdistuvaan voimaan nähden. Kerrosten välillä kulkusuunta muuttui 90 astetta. Tarkemmat tulostusparametrit ovat nähtävissä liitteestä (Liite 7.1) nimellä "UM3_316L_115Flow_120Wall-Flow". Vetokoesauvoja tulostettiin viisi kappaletta. Sauvojen sideaineenpoiston ja sintrauksen toteutti Basf.

4.2 Vetokokeiden tulokset ja vertailu

Vetokokeet toteutettiin Savonialla standardin SFS-EN ISO 6892-1:2019 mukaisesti. Vetokokeiden tulokset ovat nähtävissä taulukossa (Taulukko 1). Vetokokeiden tuloksissa koekappaleiden välillä ei ollut merkittäviä eroavaisuuksia. Tuloksista oli havaittavissa, että venymisrajan ja murtovenymän suhteen kappaleissa on pientä vaihtelua, erityisesti verrattaessa vetokoesauvaa yksi muihin vetokoesauvoihin. Lujuuden suhteen kaikki kappaleet olivat kuitenkin hyvin lähellä toisiaan.

Taulukko 1. Vetokoesauvojen tulokset.

Koekappale	Lujuus (N/mm ²)	Venymisraja Rp0.2 (N/mm ²)	Murtovenymä (%)
1	508,1	299,7	58,0
2	504,6	238,6	73,2
3	514,3	263,6	70,4
4	517,0	266,0	70,0
5	516,6	250,4	68,8
Keskiarvo	512	264	68

Tuloksia verrattaessa muiden valmistusmenetelmien mekaanisiin ominaisuuksiin on havaittavissa, että FDM- metallitulostus Basf:n toimittamalla Ultrafuse 316L- filamentilla on varsin hyvä vaihtoehto monimutkaisia muotoja vaativien kappaleiden valmistamiseen. SLM- tulostamisella päästään paljon korkeampiin lujuuden arvoihin mitä tällä valmistusmenetelmällä, mutta SLM valmistusmenetelmässä tulostussuunnalla on suuri vaikutus mekaanisiin ominaisuuksiin (Salman, ym., 2019). FDM tulostamisella päästään tasalaatuisiin tuloksiin suunnasta riippumatta. (Damon;Dietrich;Gorantla;Popp;& Okolo, 2019) Lisäksi taulukosta on nähtävissä, kuinka Ultrafuse 316L- filamentista valmistetut vetokoesauvat pärjäsivät mekaanisilta ominaisuuksiltaan hyvin myös yleisimpiin rakenneteräksiin verrattaessa.

Taulukko 2. Vetokokeiden vertailua valmistusmenetelmien kesken.

Materiaali	Valmistusmenetelmä	Murtolujuus Rm (N/mm²)	Murto- venymä (%)	Venymisraja Rp0.2 (N/mm²)	Lähde
316L	FDM Printing	512	68	264	Tämän työn vetokokeet
316L	Binder Jetting	511	58	170	Mirzababaei;ym., 2019
316L	Metal Injection Molding	520	50	175	Mirzababaei;ym., 2019
316L	SpeedPulse WAAM	550		418	Wang;ym., 2019
316L	Selective Laser Melting	675-1016		439-550	Salman;ym., 2019
Materiaali	Valmistusmenetelmä	Murtolujuus Rm (N/mm²)	Murto- venymä (%)	Myötölujuus Re (N/mm²)	Lähde
S235JR	Kuumavalssattu teräs	340-510		235	GA Industri AB
S355 MC	Kuumavalssattu teräs	430-550		355	GA Industri AB

5 POHDINTA

Metallin 3d tulostamisen rooli valmistavassa teollisuudessa on vielä lapsen kengissä. Muotoilun vapaus, kappalevalmistuksen helppous ja materiaalihukan vähäisyys ovat kuitenkin ominaisuuksia, jotka herättävät paljon mielenkiintoa teollisuudessa 3d tulostamista kohtaan. Uskon, että tulevaisuudessa tämä valmistusmenetelmä tulee valtaamaan alaa varsinkin yksittäistuotannossa ja erätuotannossa.

On myös mahtavaa todeta muovitulostinharrastajana, että metallitulostaminen on pikkuhiljaa avautumassa myös yksityisten harrastajien ulottuville. Kalliiden metallitulostinlaitteistojen ostaminen ei ole enää välttämätöntä muovitulostimissa toimivien metallitätefilamenttien ansiosta. Sideaineenpoistoprosessin ja sintrausprosessin hinta kuiteinkin vielä jarruttelee harrastajien mukaan lähtöä, mutta tulevaisuudessa hinnat tulevat mahdollisesti laskemaan. Kokonaisuudessaan metallitulostamisen tulevaisuus näyttää mielestäni valoisaalta.

6 LÄHTEET

- BASF. (2020). *BASF Ultrafuse 316L Metal 3D Printing Filament*. Noudettu osoitteesta <https://www.matterhackers.com/store/l/basf-ultrafuse-316l-metal-composite-3d-printing-filament-175mm/sk/MRDKJRRS>
- BASF. (ei pvm). *Ultrafuse 316L: User Guidelines for 3D Printing Metal Parts*. Noudettu osoitteesta https://www.mholland.com/media/BASF_Ultrafuse_316L_User_Guidelines.pdf
- Damon, J.;Dietrich, S.;Gorantla, S.;Popp, U.;& Okolo, B. (2019). Process porosity and mechanical performance. Karlsruhe, Germany: Rapid Prototyping Journal.
- GA Industri AB. (2021). Kuumavalssattu teräs. Noudettu osoitteesta <http://gaoy.fi/tuotteet/kuumavalssattu/>
- Heaney, D. (2012). *Handbook of metal injection molding*. Philadelphia, USA: Woodhead Publishing.
- Markforged. (ei pvm). METAL X DESIGN GUIDE.
- Mirzababaei, S.;& Pasebani, S. (2019). A Review on Binder Jet Additive Manufacturing of. USA: Journal of Manufacturing and Materials Processing.
- Pitts, J. (7. 7 2020). Online haastattelu: Basf Ultrafuse 316L. Rouvanmäki, Joni.
- Redwood, B. (2021). 3D HUBS. *How to design parts for metal 3D printing*. Noudettu osoitteesta <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-metal-3d-printing/>
- Rodkevich, N.;Pervikov, A.;Glazkova, E.;Apkaryan, A.;& Lerner, M. (2018). Sintering of 316L stainless steel bimodal powder produced by electrical explosion of wires. Tomsk: Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Noudettu osoitteesta <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5084519>
- Salman, O. O.;Brenne, F.;Niendorf, T.;Eckert, J.;Prashanth, K. G.;He, T.;& Scudino, S. (2019). *Impact of the scanning strategy on the mechanical behavior of 316L steel*. Elsevier Ltd. Noudettu osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.010>
- Wang, L.;Xue, J.;& Wang, Q. (2019). Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties. China: Elsevier B.V.

7 LIITTEET

7.1 Käytetyt tulostusparametrit

Profile Name	BASF Ultrafuse 316L	UM3_316L_ 115Flow_ 120WallFlow
Values From	Cura Marketplace	Self-Adjusted
Used nozzle (mm)	0.4	0.6
Parameters used to print		Tensile strength bar
Quality		
Layer height (mm)	0.1	0.2
Initial Layer Height (mm)	0.27	0.2
Outer Wall Line Width (mm)	0.35	0.6
Inner Wall Line Width (mm)	0.3	0.6
Top/bottom Line Width (mm)	0.35	0.6
Infill Line Width (mm)	0.5	0.6
Skirt/Brim Line Width (mm)	0.35	0.6
Initial Layer Line Width (%)	120	100
Shell		
Wall Thickness (mm)	1.3	1.3
Outer Wall Wipe Distance (mm)	0.2	0.2
Skin Overlap Percentage (%)	15	15
Material		
Printing Temperature (°C)	245	235
Printing Temperature Initial Layer (°C)	250	235
Build Plate Temperature (°C)	100	100
Flow (%)	100	115
Wall Flow (%)	100	120
Outer Wall Flow (%)	100	120
Inner Wall Flow (%)	100	120
Infill Flow (%)	100	115

7.2 Vetokokeiden tulokset

**KOETULOKSET**

Vetokoeohjelma FMT-ProgSys 8.0 T/TCB

MATERTEST OY

Aineenkoetuslaitteet ja testaussynterijärjestelmät

Koekappaleryhmän yleiset tiedot**Vetokoe**

Opinnäytetyö

-

Tilaus Basf Ultrafuse 316L

Erä -

Koekappale 1

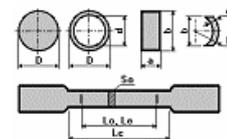
Huom

Koestuspäivä 2.12.2020

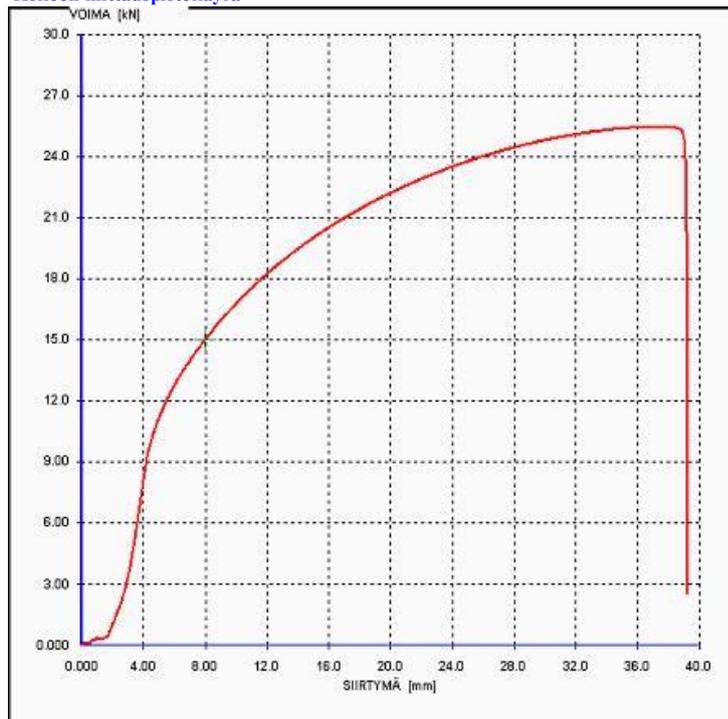
Koestaja Rouvanmäki Joni

Syöttötiedot

a	5,00	mm	Koepituus	Lc	50,00	mm
b	10,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	25,00	mm
D		mm	loppumittapituus	Lu	39,50	mm
d		mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm
Pinta-ala	So	50,00	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	mm

**Lopputulokset**

Suurin voima	Fm	25,404	kN	Kimmokerroin	E	10 ² N/mm ²
Lujuus	Rm	508,1	N/mm ²	Korrelaatio	0,92	
Alempi myötöraja	ReL		N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0 N/mm ²
	Rp0.2	299,7	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0 N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0 N/mm ²
		0,000000		Koeaika		195,9 s
		0,000000		Murtovenymä	A	58,0 %
				Murtokurouma	Z	0,0 %

Kokeen mittauspistekäyrä

**Koekappaleryhmän yleiset tiedot****Vetokoe**

Opinnäytetyö

-

Tilaus Basf Ultrafuse 316L

Erä -

Koekappale 2

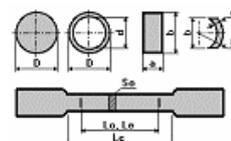
Huom

Koestuspäivä 2.12.2020

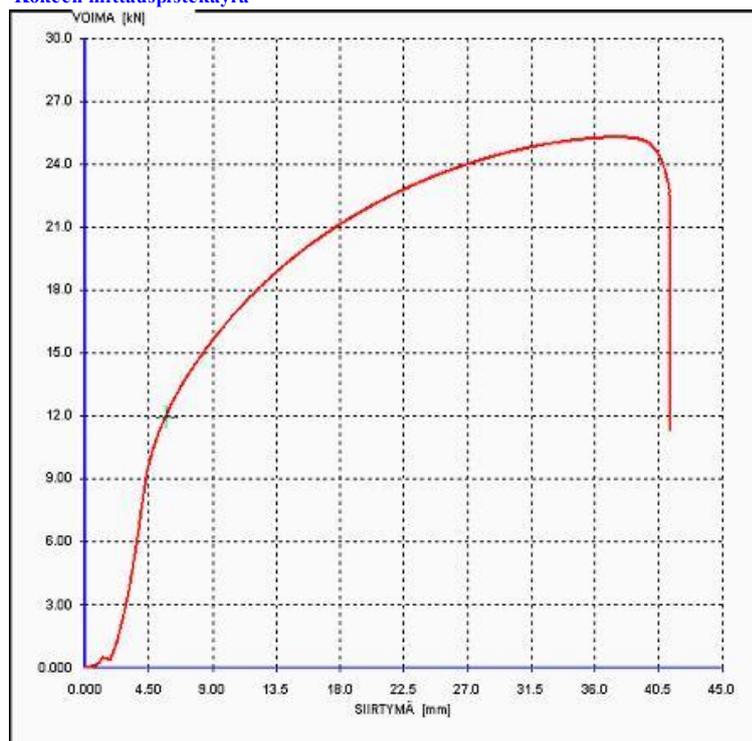
Koestaja Rouvamäki Joni

Syöttötiedot

a	5,00	mm	Koepituus	Lc	50,00	mm
b	10,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	25,00	mm
D	7,00	mm	loppumittapituus	Lu	43,30	mm
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm
Pinta-ala	So 50,00	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	mm

**Lopputulokset**

Suurin voima	Fm	25,228	kN	Kimmokerroin	E	1 721	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	504,6	N/mm ²	Korrelaatio		0,93	
Alempi myötöraja	ReL	0,6	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	238,6	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Koeaika		197,1	s
		0,000000		Murtovenymä	A	73,2	%
				Murtokurouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä

**Koekappaleryhmän yleiset tiedot****Vetokoe**

Opinnäytetyö

-

Tilaus Basf Ultrafuse 316L

Erä -

Koestuspäivä 2.12.2020

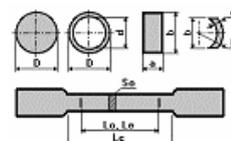
Koekappale 3

Koestaja Rouvanmäki Joni

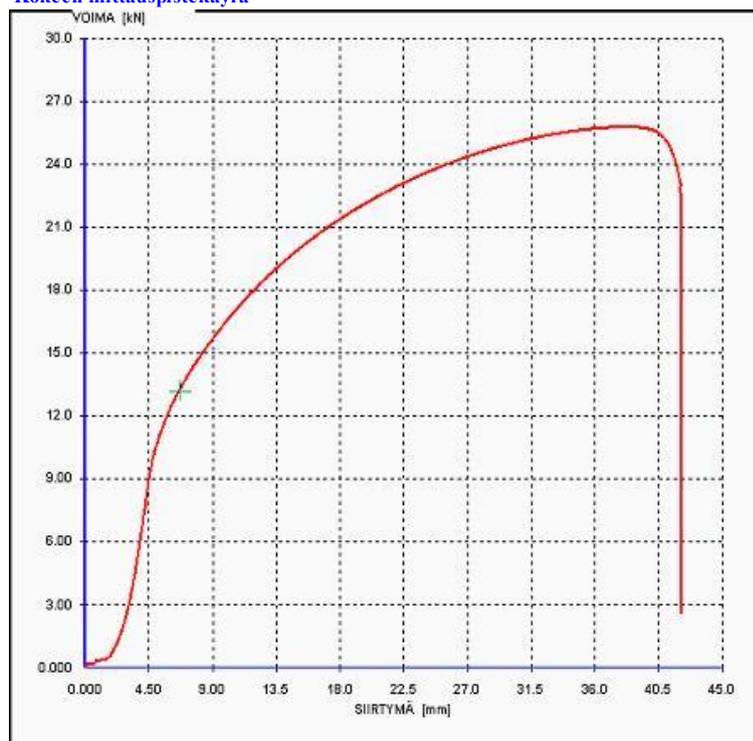
Huom

Syöttötiedot

a	5,00	mm	Koepituus	Lc	50,00	mm
b	10,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	25,00	mm
D	7,00	mm		loppumittapituus	Lu	42,60
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm
Pinta-ala	So 50,00	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	mm

**Lopputulokset**

Suurin voima	Fm	25,716	kN	Kimmokerroin	E	1 623	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	514,3	N/mm ²	Korrelaatio		0,92	
Alempi myötöraja	ReL	2,5	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	263,6	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Koeaika		200,9	s
		0,000000		Murtovenymä	A	70,4	%
				Murtokurouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä

**Koekappaleryhmän yleiset tiedot****Vetokoe**

Opinnäytetyö

-

Tilaus Basf Ultrafuse 316L

Erä -

Koekappale 4

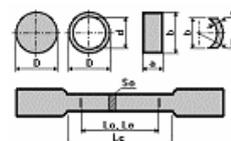
Huom

Koestuspäivä 2.12.2020

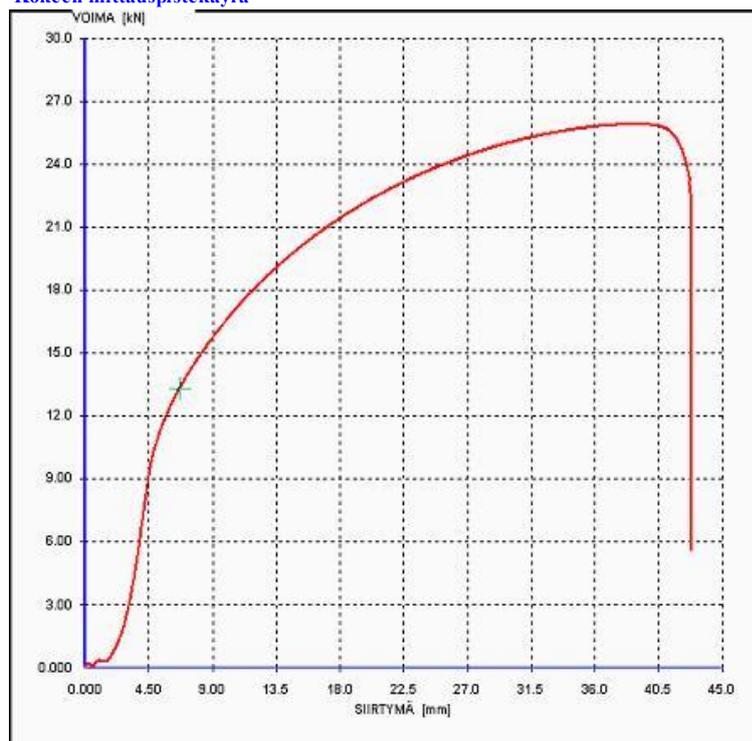
Koestaja Rouvamäki Joni

Syöttötiedot

a	5,00	mm	Koepituus	Lc	50,00	mm	
b	10,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	25,00	mm	
D	7,00	mm	loppumittapituus	Lu	42,50	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	50,00	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	mm

**Lopputulokset**

Suurin voima	Fm	25,852	kN	Kimmokerroin	E	1 688	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	517,0	N/mm ²	Korrelaatio		0,92	
Alempi myötöraja	ReL	1,8	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	266,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Koeaika		203,7	s
		0,000000		Murtovenymä	A	70,0	%
				Murtokurouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä

**Koekappaleryhmän yleiset tiedot****Vetokoe**

Opinnäytetyö

-

Tilaus Basf Ultrafuse 316L

Erä -

Koestuspäivä 2.12.2020

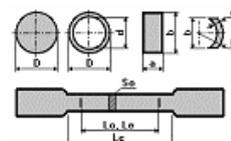
Koekappale 5

Koestaja Rouvanmäki Joni

Huom

Syöttötiedot

a	5,00	mm	Koepituus	Lc	50,00	mm
b	10,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	25,00	mm
D	7,00	mm	loppumittapituus	Lu	42,20	mm
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm
Pinta-ala	So 50,00	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	mm

**Lopputulokset**

Suurin voima	Fm	25,829	kN	Kimmokerroin	E	1 651	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	516,6	N/mm ²	Korrelaatio		0,91	
Alempi myötöraja	ReL	1,9	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	250,4	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Koeaika		197,6	s
		0,000000		Murtovenymä	A	68,8	%
				Murtokurouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä