



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Eemeli Yli-Leppälä

# LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN KAPPALEEN SUUNNITTELUOHJE

Tekniikka  
2022

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Eemeli Yli-Leppälä
Opinnäytetyön nimi	Lisäävän valmistuksen kappaleen suunnitteluohje
Vuosi	2022
Kieli	suomi
Sivumäärä	31
Ohjaaja	Osku Hirvonen

---

Opinnäytetyö on toteutettu Danfoss Oyj:n kanssa ja sen tarkoituksena on olla ohjeena lisäävän valmistuksen kappaleiden suunnitteluun. Danfoss Oyj on kansainvälinen yritys, jonka liiketoimintasegmenttejä on Danfoss climate solutions, Danfoss drives ja Danfoss power solutions. Lisäävä valmistus on yleistynyt tuotantotapa ja sen myötä tarve ohjeelle suunnittelijoiden avuksi on suuri.

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää lisäävän valmistuksen tuotantomenetelmien rajoitteita ja miten niiden mukaan suunnitella tulostettavaa kappaletta. Ohjetta tehdessä pyrin esittämään ratkaisuja, joita on mahdollista soveltaa jokaiseen 3D-tulostuksen valmistusmenetelmään. Ohjeessa on lisäksi tarvittaessa eritelty tuotantomenetelmien rajoitteiden merkittävimmät poikkeukset. Tutkimuksen aineistoina erilaiset artikkelit ja Danfossin aineistot.

Opinnäytetyön keskeinen havainto on, että tukimateriaalien mahdollisimman vähäinen käyttö ja materiaalin oikeanlainen sijoittelu vaatii paljon aiheeseen perehtymistä. Oikeanlaisen kappaleen suunnittelu on tulostusvaiheessa nopeaa ja jälkikäsittely helppoa. Ohjeen avulla suunnittelija voi mallintaa tulostettavan kappaleen, joka soveltuu valitulle valmistusmenetelmälle tulostettavaksi. Tässä tulee huomioida se, että ohjeen ratkaisuja ei välttämättä pystytä suoraan käyttämään, vaan niitä joudutaan soveltamaan käyttökohteiden mukaan.

---

Avainsanat                      Lisäävä valmistus, 3D-mallinnus, 3D-tulostus, tuotekehitys, suunnitteluohjeet

## ABSTRACT

Author	Eemeli Yli-Leppälä
Title	Design Instruction for an Additive Manufacturing Part
Year	2022
Language	Finnish
Pages	31
Name of Supervisor	Osku Hirvonen

---

The thesis was carried out with Danfoss and aims to serve as a guide for the design of additive manufacturing parts. Danfoss Corporation is an international company with business segments Danfoss climate solutions, Danfoss drives and Danfoss power solutions. Additive manufacturing is a growing production method, and instructions to help designers are needed.

The purpose of the study was to find out the limitations of the production methods of an Additive Manufacturing and how to design a printable part according to these. Making this instruction, solutions were presented that can be applied to any 3D printing manufacturing method. In addition, the guideline specifies the most significant exceptions to the restrictions on production methods. The research material to this study consisted of scientific articles and material provided by Danfoss.

The central observation of the thesis is that the minimal use of support materials and the correct placement of the material requires a lot of familiarity with the topic. Designing the right kind of part is quick at the printing stage and after-processing is easy. This instruction allows the designer to model a printable part that is suitable for printing for the selected manufacturing method. It should be noted that the solutions in the instruction may not be directly applicable but must be applied according to the use.

---

Keywords                    Additive manufacturing, three-dimensional design, 3D printing, product development, designing instructions

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	7
2	LISÄÄVÄ VALMISTUS.....	8
	2.1 Miksi valmistaa 3D-tulostamalla.....	8
	2.2 Merkittävät 3D-tulostustavat .....	9
	2.3 Lisäävän valmistuksen materiaalit.....	13
3	TUOTEKEHITYS.....	15
	3.1 Lisäävä valmistus prototyypeissä.....	15
	3.2 Topologiaoptimoinnin käyttö tuotekehityksessä .....	16
	3.2.1 Tukirakenteet .....	16
	3.2.2 Kappaleen hila- ja ristikkorakenteet .....	19
	3.3 Lisäävän valmistuksen geometriavaatimukset .....	22
4	TUOTANNON KEHITYS .....	23
	4.1 Tuotantovaatimukset.....	23
	4.2 Laatuvaatimukset.....	23
	4.3 Tulosteiden tasalaatuisuus .....	26
	4.4 ESD 27	
5	YHTEENVETO .....	28
	LÄHTEET .....	29

## KUVA- JA KUVIOLUETTELO

<b>Kuva 1.</b> FDM tulostustavan kuvitus. (Cignoni a, 2017.)	9
<b>Kuva 2.</b> SLA tulostustavan kuvaus. (Cignoni b, 2017.)	10
<b>Kuva 3.</b> SLS-menetelmän kuvaus. (Gringer 2018.)	11
<b>Kuva 4.</b> MJF menetelmän toiminnan kuvaus. (Cader & Kiński 2020.)	12
<b>Kuva 5.</b> Lisäävän valmistuksen keskeiset materiaalikategoriat.	13
<b>Kuva 6.</b> Tukimateriaalien tarve rei'issä. (Yang 2020.)	17
<b>Kuva 7.</b> Puunmallinen tukirakenne. (Guessasma, Zhang & Zhu 2019.)	18
<b>Kuva 8.</b> Kappaleen vähittäispituuden rajoitus. (Zhu, Zhou, Wang, Yuan & Zhang 2021.)	18
<b>Kuva 9.</b> Ristikkopohjainen hilasolu (a) ja pintapohjainen hilasolu (b) (Zhu ym. 2021.)	20
<b>Kuva 10.</b> Mallinnettu nuppi.	20
<b>Kuva 11.</b> Ristikoitu nuppi. (Voronator.)	20
<b>Kuva 12.</b> RDM- ja LRDM-ristikkomenetelmät. (Song, Jing & Zhao 2018.)	21
<b>Kuva 13.</b> thingiverse. (Majda107 2017.)	24
<b>Kuva 14.</b> 3Dbenchy. (3Dbenchy.)	25
<b>Kuva 15.</b> Kokoelma testikappaleista. (Make 2018.)	25
<b>Kuva 16.</b> Test Your 3D printer. (CtrlV 2016.)	26

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AM	-	Additive manufacturing
FEM	-	Finite element mesh
LRDM	-	Local relative density mapping
RDM	-	Relative density mapping
FDM	-	Fused deposition modeling
SLS	-	Selective laser sintering
ESD	-	Electrostatic discharge
MJF	-	Multi jet fusion
SLA	-	Stereolithography

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena on edistää Danfoss Oyj tietoa lisäävän valmistuksen mahdollisuuksista. Danfoss on perustettu vuonna 1933 ja sillä oli elokuussa 2021 työntekijöitä 37 000 ympäri maailmaa. (Danfoss 2022.)

Lisäävä valmistus on teollisuudessa ollut nouseva valmistustapa jo pitkään ja sen osuus kasvaa tulevaisuudessakin. Lisäävän valmistuksen edut ovat yksittäisten kappaleiden valmistuksen edullisuus ja kappaleiden monipuolisten geometriset mahdollisuudet.

Tutkimuksessa käydään läpi suunnittelijan näkökulmasta mahdollisia ongelmia ja tapoja niiden ratkaisemiseksi. Tuotekehityksen osiossa käydään läpi kolmeulotteisen kappaleen suunnittelun haasteita ja niiden mahdollisia ratkaisumenetelmiä. Tulostettavan kappaleen suunnittelun haasteet koostuvat pääosin geometrisestä muotoilusta ja tukirakenteiden välttelemiseen ja sijoitteluun.

Tuotannon kehityksen osiossa käydään läpi tulostusvaiheen ongelmia tulostimien teknisten rajoitteiden läpikäymiseen ja tulostimien asetuksien tarkastamiseen. Lisäksi tulostusympäristön vaikutuksia tulostuksen laatuun ja niiden vähentämiseen. Viimeisenä tulostustapahtuman ESD-suojauksesta käyttäjän, että tulostimen kannalta.

## 2 LISÄÄVÄ VALMISTUS

Lisäävä valmistus on yksinkertaisuudessaan halutun kappaleen valmistaminen valitusta materiaalista, jota lisätään kolmeulotteisen digitaalisen mallin mukaan kerroksittain alustalle, johon kappale valmistuu (Huld 2019.) Yleisesti käytetään myös termejä 3D-tulostus ja AM (Bruder 2016.)

### 2.1 Miksi valmistaa 3D-tulostamalla

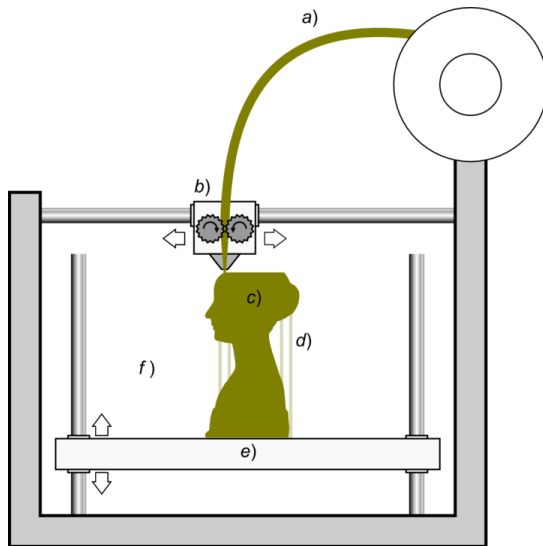
Nimensä mukaan lisäävä valmistus tarkoittaa kappaleen valmistamista materiaalia lisäämällä, toisin kuin perinteiset menetelmät, joita ovat esimerkiksi jyrsintä ja sorvaus. Tämän takia lisäävä valmistus antaa paljon uusia mahdollisuuksia etenkin kappaleiden geometrian suunnittelussa. Tulostamisen etuna on myös itse tulostimen monipuolisuus tuotannossa, koska sillä voi tulostaa erilaisia kappaleita samaan aikaan tai peräkkäin ilman erikoisia muutoksia. (Muñiz 2020.)

3D-tulostamisen edullisuus perustuu materiaalin mahdollisimman vähäiseen käyttöön, sillä tulostuksessa materiaalia käytetään tukien lisäksi vain itse kappaleeseen. Alhaisen hukkamateriaalin määrä tarkoittaa myös raaka-aineen vastuullista käyttöä, jolloin hiilijalanjälki on valmiissa kappaleessa pienempi. Yksittäisen kappaleen tuotannon aloitus lisäävässä valmistuksessa on nopeaa ja valmis kappale on kustannustehokas verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin.

Lisäävän valmistuksen kappaleen suunnittelussa täytyy laittaa ensisijalle mitä kappaleelta vaaditaan. Tulostamisessa valmistuksen rajoitteet ovat pieniä, joten mahdollisimman monimutkaisen osan tulostaminen saattaa vaikuttaa oudolta, mutta se voi olla kustannuksiltaan ja toimivuudeltaan paras. Mitä monimutkaisempia ja haastavampia kappaleita suunnittelee, sitä kannattavampaa se on 3D-tulostamalla valmistaa.

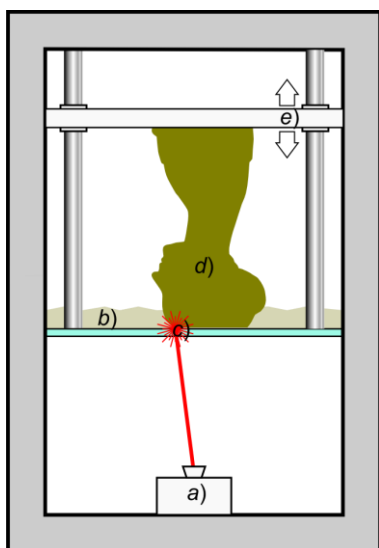


## 2.2 Merkittävät 3D-tulostustavat



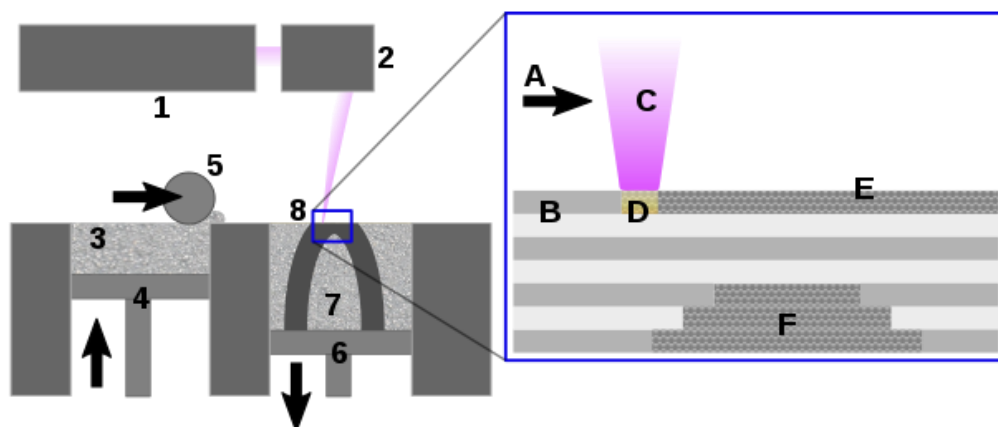
**Kuva 1.** FDM tulostustavan kuvitus. (Cignoni a, 2017.)

Tulostustavoista esittelen ensimmäisenä FDM eli Fused deposition modeling. FDM on materiaalin pursotus, jossa tarvittava materiaali sulatetaan suuttimen avulla tasoittain pinnalle. Tulostustavan resoluutio on noin 100–150  $\mu\text{m}$  ja materiaalit ovat kiinteitä muoveja. Materiaaleina tulostetaan esimerkiksi PLA, ABS, PC ja HIPS. Helppoa ja edullista tulostaa, mutta pinnanlaatu on karhea tulostamisen jälkeen. (Ligon, Liska, Stampfl, Gurr & Mülhaupt 2017.)



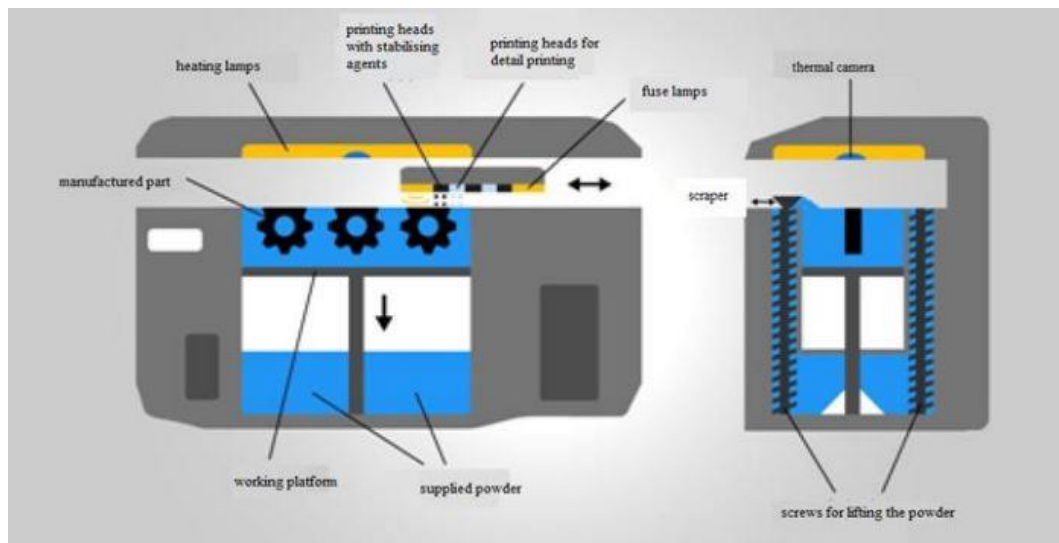
**Kuva 2.** SLA tulostustavan kuvaus. (Cignoni b, 2017.)

Toinen merkittävä tulostustapa on Stereolithography eli SLA. Materiaaleina SLA-menetelmä käyttää nestemäisiä photopolymeerejä, joka kovetetaan kiinteäksi UV-laserin avulla (Lohilahti 2018). Tulostuksen resoluutio on noin 25–100  $\mu\text{m}$  (Liggon ym. 2017). Etuina SLA-tekniikalla on hyvä pinnanlaatu ja haittapuolina pidetään tukimateriaalien tarvetta ja monimutkaista jälkikäsittelyä (Lohilahti 2018).



**Kuva 3.** SLS-menetelmän kuvaus. (Gringer 2018.)

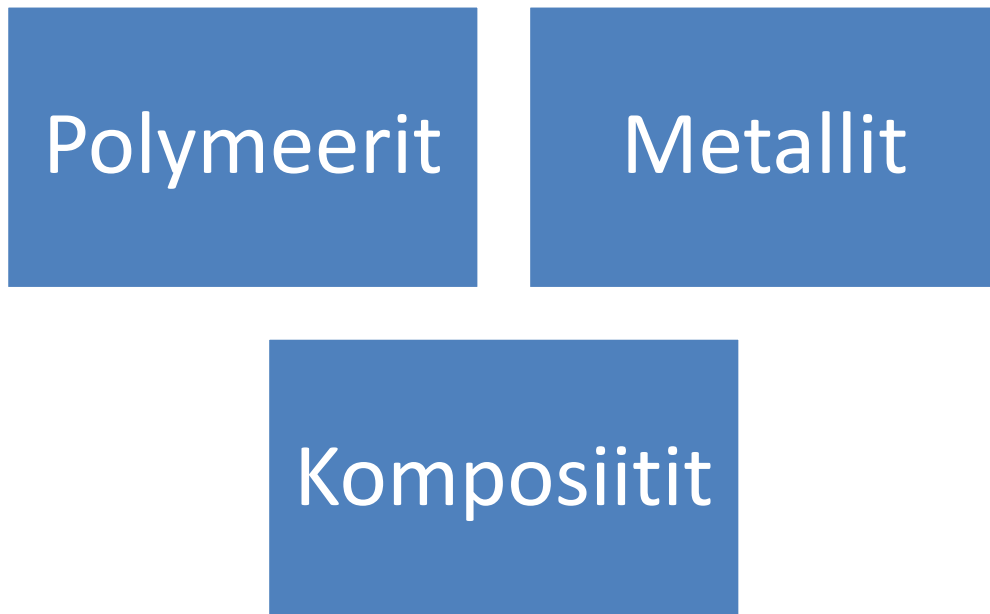
Selective laser sintering eli SLS-menetelmässä alustalle levitetään kerroksittain jauhetta, jota sulatetaan laservalolla tarkasti kerroksittain (Lohilahti 2018). tulostuksen resoluutio on 50–100  $\mu\text{m}$ . SLS-menetelmän yleisimmät materiaalit ovat PA12 ja PEEK. Etuina menetelmässä on tulostetun kappaleen mekaaniset ominaisuudet. Huonona pinnan laatu on karhea ja kaikkea sulamatonta jauhetta ei voi käyttää uudestaan. (Ligon ym. 2017.)



**Kuva 4.** MJF menetelmän toiminnan kuvaus. (Cader & Kiński 2020.)

Viimeisenä MJF eli Multi Jet Fusion, joka on jauhepetiteknikka, jossa jauhe kove-  
tetaan lisäaineiden ja lämmön avulla kerroksittain. Tulostusmateriaalina PA12.  
Etuna tarkkuus, kappaleen mekaaniset ominaisuudet ja hyvä pinnanlaatu. Huo-  
mattavana etuna on tulostustavan tukimateriaalien tarpeettomuus (Cader &  
Kiński 2020). Huonoa on vähäiset materiaalien vaihtoehdot. Tulostuksen kerrok-  
sen pienin paksuus 80  $\mu\text{m}$  ja leveys 0.5 mm. (Protolabs.)

### 2.3 Lisäävän valmistuksen materiaalit



**Kuva 5.** Lisäävän valmistuksen keskeiset materiaalikategoriat.

Kuvassa 5 yleiset materiaalien kategoriat. Ensimmäisenä Polymeerit, jotka ovat käytetyimpiä materiaaleja lisäävässä valmistuksessa koska ne ovat edullisia ja helppoja tulostettavia. Kiinteiden polymeerien suhteellisen alhaisien sulamislämpötilojen takia niiden tulostimet ovat myös edullisia. Polymeerejä on esimerkiksi PLA, ABS, PE ja PEEK. (Shahrubudin, Lee & Ramlan 2019.)

Metallit ovat tulostettavina monipuolisia ominaisuuksiltaan ja niitä käytetään vaativissa olosuhteissa. Sulamislämpötilat metalleilla on jopa 1 200 °C, joten tulostus on lisäävän valmistuksen tavoista kalleimmasta päästä. Tulostettavia metalleja on esimerkiksi titaani ja alumiini. (Shahrubudin ym. 2019.)

Komposiitit ovat kevyitä ja hyviä ominaisuuksia sisältäviä materiaaleja. Komposiittimateriaalit lisäävässä valmistuksessa ovat sekoituksia polymeerien ja komposiittimateriaalista. Esimerkiksi hiilikuidut polymeerissä parantavat materiaalin mekaa-

nisia ominaisuuksia. (Shahrubudin ym. 2019.) Huomiona FDM-tulostuksessa komposiittimateriaalit vaativat kulutusta kestävän ja hieman isomman suuttimen (Johansson 2020.)

### 3 TUOTEKEHITYS

Lisäävän valmistuksen kappaleiden suunnittelulla on suurimmat vaikutukset lopullisen kappaleen ominaisuuksiin, joten siihen panostaminen on erityisen tärkeää. Perinteisten valmistusmenetelmien tuomat rajoitukset eivät tulostamisessa päde, joten jo suunnittelussa avautuu niin monta erilaista lähtökohtaa mihin erityisesti pitäisi panostaa, esimerkiksi materiaalimäärän, virtauksen tai jäykkyyden osalta. (3dformtech 2022 a.)

Suunniteltavien tulostettavien kappaleiden materiaali ja tulostustapa pitää valita ensin, koska erilaisten materiaalien käyttäytyminen tulostustilanteessa vaihtelee todella paljon, joten ne on huomioitava jo suunnitteluvaiheessa. Esimerkiksi tulostettavien kappaleiden reikien minimikoko ja tukimateriaalien tarve vaihtelee materiaalin ja tulostustavan mukaan.

#### 3.1 Lisäävä valmistus prototyypeissä

Tuotekehityksen yksi välttämättömistä peruspilareista on prototyyppien tekeminen. Prototyypin valmistus tulostamalla auttaa hahmottamaan kappaleen todellista muotoa ja toimivuutta testausvaiheessa edullisesti ja nopeasti. (3dformtech 2022 b.) Kun valmistetaan yksittäisiä monimutkaisia kappaleita, tuotantokustannukset ovat alhaisimmat lisäävässä valmistuksessa. Siksi kannattaa suunnitella mahdollisimman monien erilaisten muotojen ja rakenteiden variaatioita, jotta löydetään paras osa tulostettavaksi.

Lisäävä valmistus mahdollistaa myös erilaisten materiaalien käytön prototyypeissä vaivattomasti. Jos kappaleeseen ei kohdisteta todellisia voimia testausvaiheessa niin esimerkiksi heikommalla ja halvemmalla materiaalilla voidaan kokeilla, miten prototyyppi onnistuu käytettävässä kohteessa.

## 3.2 Topologiaoptimoinnin käyttö tuotekehityksessä

Topologiaoptimointi on suunnittelumenetelmä, jossa pyritään kappaleen optimaaliseen muotoiluun kuormitusten, suorituskyvyn ja rajoitusten suhteen. Topologiaoptimointi täten on hyvinkin suotuisaa, jotta kappaleen valmistuskustannuksia saadaan matalalle ja ominaisuuksia monipuolisemmaksi. Topologiaoptimointi ja lisäävä valmistus yhdessä mahdollistavat käytettäväksi molempien parhaimmat ominaisuudet. Valmiit optimoidut kappaleet ovat useasti hyvin haastavan muotoisia valmistettavaksi perinteisin menetelmin, joten sen käyttö rajoittuu oikeastaan vain tulostettuihin kappaleisiin. (Zhu, Zhou, Wang, Yuan & Zhang 2021.)

Topologiaoptimoinnissa pitää ottaa tulostamisen rajoitteita huomioon, jotta tulostus ja jälkikäsittely olisi helpompaa. Tiedetään että monella tulostustavalla joutuu käyttämään tukimateriaaleja ja näiden poistaminen jälkikäsittelyssä on haastavaa ja aikaa vievää. Joten niiden välttäminen on kannattavaa, jos se on mahdollista. (Jiang, Xu & Stringer 2018.) Topologiaoptimointi on hyvä työkalu suunnitteluprosessissa mutta se vaatii silti paljon huolellisuutta ja luovia ratkaisuja suunnittelijalta, koska jokainen kappale ja vaatimukset ovat erilaisia.

### 3.2.1 Tukirakenteet

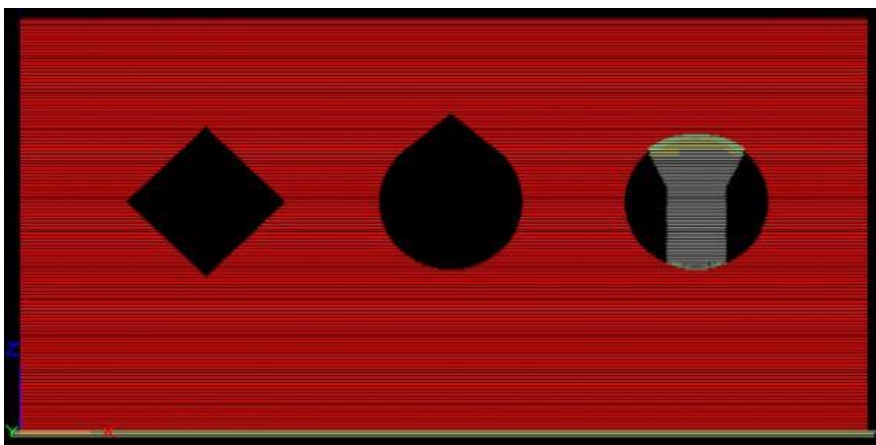
Tukirakenteiden tärkeimmät ominaisuudet ovat lämmön johtaminen, tulostettavuuden parantaminen ja kappaleen tasapainotus. Tukimateriaalien tarve riippuu tulostustavasta ja käytettävästä materiaalista. Esimerkiksi SLS ei yleensä tarvitse tukimateriaaleja kappaleen rakenteen ylläpitämiseksi, mutta riippuen materiaalista se voi tarvita tukimateriaaleja lämmönjohtamiseen. (Jiang ym. 2018.)

Tulostettavan kappaleen orientaatiota muuttamalla tulostusalustalla on vaikutuksia tukimateriaalin määrään ja tulostusaikaan. Tukien määrä koostuu kappaleen tuettavan pinnan pinta-alasta tulostussuunnasta katsottuna, joten orientaatiota



muuttamalla tukimateriaalien tarvetta voidaan vähentää. Pitää kuitenkin muistaa tulostussuuntaa muuttaessa, että kerroksien välinen vetolujuus on heikompi kuin kerroksen myötäinen vetolujuus. Jos huomataan että tulostaminen voidaan tehdä ilman tukirakenteita mutta kappale tarvitsee tukea vain pysyäkseen paikoillaan, voidaan tulostaa tukipilareita, jotka ovat helposti poistettavissa. (Jiang ym. 2018.)

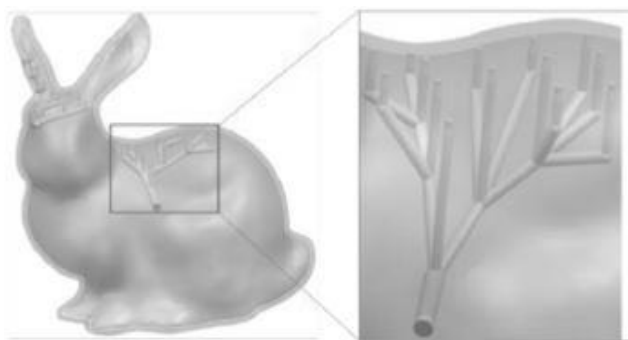
Itsekantavalla rakenteella tarkoitetaan muotoilua, jossa rakenteiden alaosa on mahdollisimman pystyasennossa. Riippuen materiaalista ja tulostustavasta, turvallinen astemäärä tulostukselle ilman tukirakenteita on noin 45 astetta. Astemäärä voi olla myös isompi ja jopa pitkien siltojen teko on mahdollista ilman tukirakenteita mutta tulostimen asetukset pitää olla kunnossa. Esimerkiksi kuvassa (kuva6) kappaleen reiät, jotka ovat kerroksien suuntaisia voivat olla neliön tai pi-saran mallisia, jolloin tukimateriaalia ei tarvita. (Yang 2020.)



**Kuva 6.** Tukimateriaalien tarve rei'issä. (Yang 2020.)

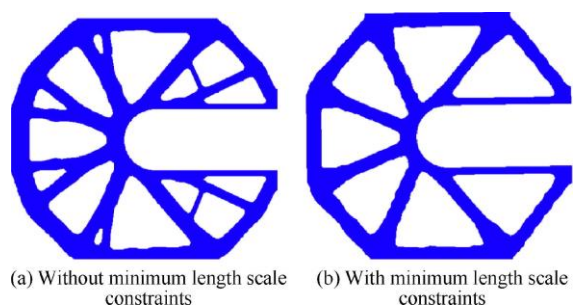
Tarvittavat tukirakenteet voidaan myös muotoilla puun malliseksi eli kappaleen tuettavan pinnan lähetyvillä tuki moninkertaistuu ja tällöin kiinnittyy kappaleeseen. Tuet kannattaa myös lähteä tekemään mahdollisimman läheltä tuettavaa kappaletta, eikä aina suoraa alhaalta päin tulostusalustasta. Kappaleesta riippuen

tukimateriaalia tarvitaan vähemmän ja erityisesti sen etuna on tukien poistamisen helpotus. Kuten esimerkiksi kuvasta (kuva7) näkyy tukimateriaalien määrä ja helppo sijainti niiden pois ottoon. (Guessasma, Zhang & Zhu 2019.)



**Kuva 7.** Puunmallinen tukirakenne. (Guessasma, Zhang & Zhu 2019.)

Tukimateriaalien poistaminen on myös helpompaa, kun kappale on mahdollisimman yksinkertainen eikä siinä ole pieniä tukiseiniä. Tällöin kappaleen rakenteen palkkien vähittäispituus kannattaa rajata, jolloin kappaleesta tulee yksinkertaisempi muodoiltaan. Esimerkkinä kuvassa (Kuva8) kuinka kappaleen muoto yksinkertaistuu huomattavasti. (Zhu ym. 2021.)



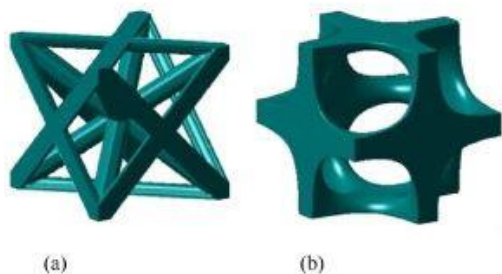
**Kuva 8.** Kappaleen vähittäispituuden rajoitus. (Zhu, Zhou, Wang, Yuan & Zhang 2021.)

Tukimateriaalit voidaan tulostaa myös liukoisista tai halvemmista materiaaleista. Kahdella materiaalilla tulostaminen vaatii kuitenkin tulostimen, jolla on mahdollista tulostaa kahta erilaista materiaalia. Uhriutuvan materiaalin liuottaminen voidaan tehdä esimerkiksi, jos kappale tulostetaan ABS-materiaalista ja tukirakenteet PLA:sta, jolloin liuotinaaineena käytetään isopropyylialkoholia ja kaliumhydroksidia (Jiang ym. 2018). Tukimateriaalin tulostaminen halvemmasta materiaalista on edullisempää mutta kahdella materiaalilla tulostaminen saattaa olla haastavaa.

### **3.2.2 Kappaleen hila- ja ristikkorakenteet**

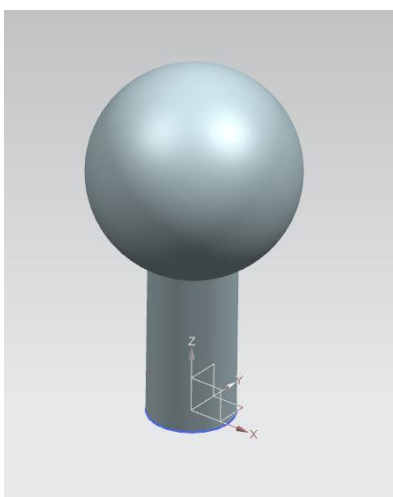
Kun kappaleen rakenteiden ei haluta olevan tiiviitä ne voidaan mallintaa täysin on-toiksi tai mallintaa ristikkorakenteet sisälle. Niiden tarkoitus on vähentää materiaalia tulostuksessa, mutta pitää rakenne myös kestävä. Ristikkorakenteilla on monipuoliset ominaisuudet lisäävässä valmistuksessa esimerkiksi kappaleen vahvistuksessa, värähtelyiden vähentämiseksi, melun vaimentamiseksi ja lämmön johtamisessa. (Guessasma ym. 2019.)

Yleisesti FDM-tulostustavassa käytetty hunajakennorakenne on loistava tapa säästää materiaalia ja pitää rakenne kestävä. Kuitenkin sen käyttö ei sovellu kaikkiin tulostustapoihin. Tulostettaessa menetelmällä, jossa materiaalin ympärille rakennetaan kappaletta, on huomioitava, että käyttämätön materiaali pitää saada pois valmiista kappaleesta. Rakenteiden pitää olla täten avonaisia, että ylimääräinen materiaali pääsee helposti valumaan pois. Esimerkiksi kuvassa (Kuva 9) on ristikkorakenteiden soluja, jotka ovat erinomaisia vaihtoehtoja kyseisiä kohteita varten. (Zhu ym. 2021.)

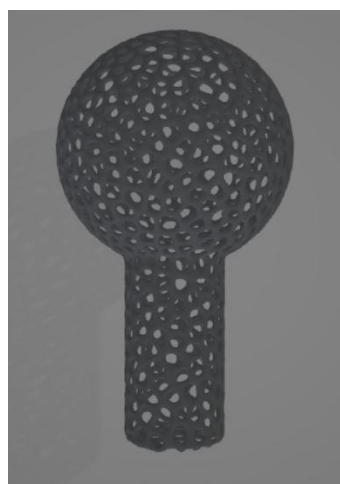


**Kuva 9.** Ristikkopohjainen hilasolu (a) ja pintapohjainen hilasolu (b) (Zhu ym. 2021.)

Tulostettavassa kappaleessa, jossa ei ole tai on vähäiset mekaaniset vaatimukset ja halutaan geometria pitää tietynlaisena, voidaan kappale tehdä mahdollisimman vähäisellä materiaalilla ristikkorakenteiden avulla. Esimerkiksi suunniteltu kappale voidaan muuntaa netissä Voronator -sivustolla (Voronator 2022) ilmavaksi erityisen verkotuksen avulla. Kuvassa (kuva10) on normaalisti mallinnettu ovenkahva ja kuvassa (kuva11) pintaverkotettu versio.



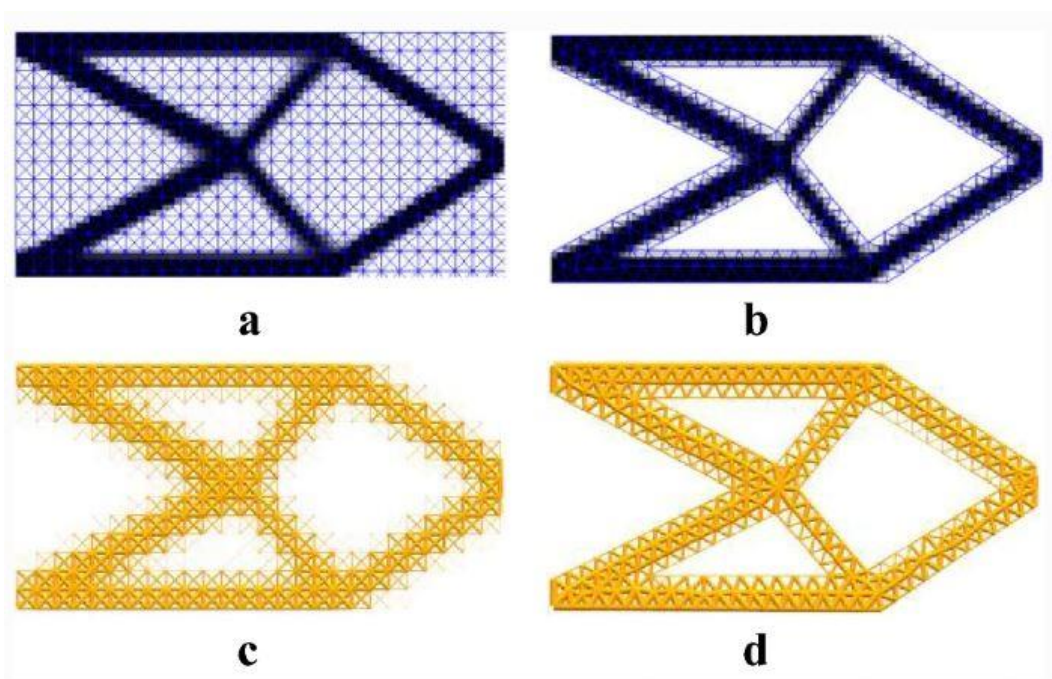
**Kuva 10.** Mallinnettu nuppi.



**Kuva 11.** Ristikoitu nuppi. (Voronator.)

Ristikkorakenne voidaan tehdä topologiaoptimoidusta kappaleesta, jolloin yksittäisten ristikkoelementtien ominaisuudet määritellään. Ristikkorakenteen luomisessa voi tulla ongelmaksi niiden isot laskentaprosessit ja tähän on ratkaisuna kehitetty LRDM-menetelmä, jolla voidaan laskea paikallisesti FEM:in ja tiheyslementtien avulla ristikkoelementtien tarvittavat tiedot. LRDM-menetelmää voidaan myös soveltaa kokonaiseen kappaleeseen mutta sen tarkkuus on RDM-menetelmää huonompi. (Song, Jing & Zhao 2018.)

Kappaleen luominen kokonaan LRDM-menetelmän ristikkorakenteella on kannattavaa, jos kappale valmistetaan hyvin arvokkaasta materiaalista eikä tulostuksen kestolla ole merkitystä. Topologiaoptimoituun osaan verrattuna LRDM-menetelmällä suunniteltu ristikkorakenteisen kappaleen valmistuksessa voidaan säästää materiaalia noin 9,8 %. (Song ym. 2018.)



**Kuva 12.** RDM- ja LRDM-ristikkomenetelmät. (Song, Jing & Zhao 2018.)

Kuvasta (kuva12) nähdään kappaleet missä (12a) on RDM-menetelmän verkotusprosessi ja (12b) on LRDM-verkotus. Valmiiden RDM (12c)- ja LRDM (12d)- ristikoiden erot, joista huomataan LRDM-menetelmän yksinkertaisemman ristikon muodostus. (Song ym. 2018.)

### **3.3 Lisäävän valmistuksen geometriavaatimukset**

Jokaisella materiaalilla ja tulostustavalla on omat geometriset rajoitteet, joiden mukaan täytyy suunnitella kappale ja tulostamisprosessi. Näitä ovat esimerkiksi pinnanlaatu, pinnan paksuus, reikien minimi halkaisija ja siltojen maksimi pituus. Tulostusmenetelmissä, joissa kappale valmistuu materiaalin ympärille esimerkiksi jauhepetimenetelmässä. Täytyy huomioida suunnittelussa, että ylimääräinen materiaali pääsee pois onteloista ja muista kappaleen osista.

Tulostettaessa kappaleita monissa valmistusmenetelmissä kerrokset ovat nähtävissä valmiissa kappaleessa ja ellei niitä jälkikäsittelyssä tasoiteta, kappaleen pinta jää hyvinkin epätasaiseksi. On otettava myös huomioon kappaleiden mekaaniset kestävyudet, jotka ovat myös erilaiset pysty- ja vaakatasojen suhteen, sillä tasoittain materiaalin lisäys ei tuota niin vahvaa ainetta kerroksien väliin kuin kerroksen myötäisesti. Täten tulostettavan kappaleen aineelliset ominaisuudet eivät ole aina samat kuin puhtaan raaka-aineen ominaisuudet. (Zhu ym. 2021.)

## 4 TUOTANNON KEHITYS

### 4.1 Tuotantovaatimukset

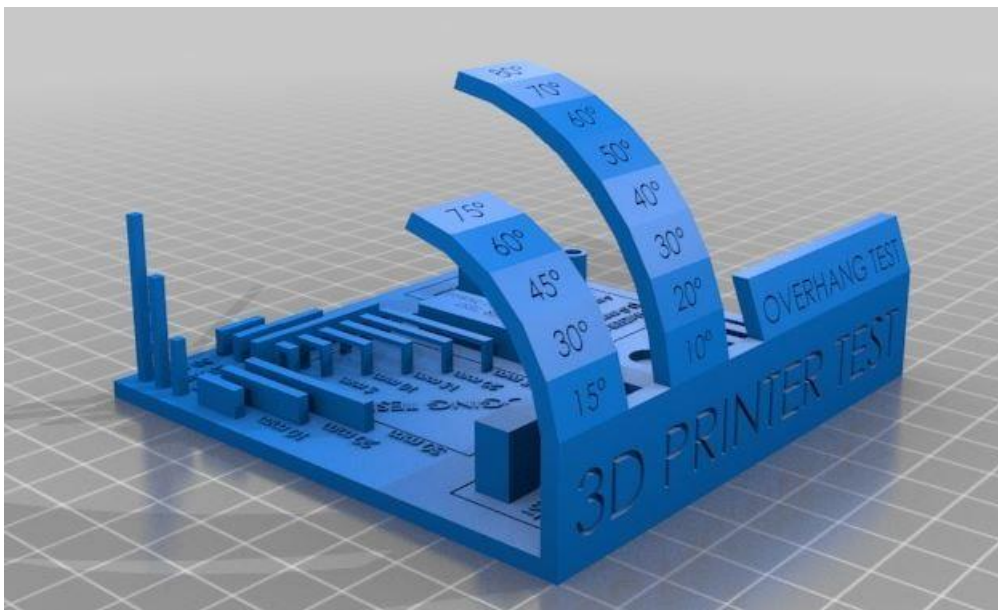
Kappaleen tulostuksessa sen valmistusaika on verrannollinen materiaalin määrään, joten mitä vähemmän materiaalia kappaleeseen käytetään, sen nopeampaa ja edullisempaa sen tulostaminen on. FDM:n tulostusaikaa voidaan myös nopeuttaa itse tulostimen teknisten ominaisuuksien rajoissa. Nopeutta rajoittavat tekijät ovat tulostuspään nopeus, materiaalin sulatuksen tehokkuus tulostuspäässä, materiaalin jäähtyminen ja materiaalin syötön voimakkuus tulostuspäähän. (Gesrepair 2022.)

Jotta tulostus olisi mahdollisimman tehokasta, kannattaa tulostaa mahdollisimman paljon kappaleita samalla kertaa. Nestaukseksi kutsuttu kappaleiden järjestely tulostusalustalle on tehokas tapa käyttää konetta ja materiaalia tehokkaasti. Varsinkin SLS-valmistustavassa nestaus on suositeltavaa, jotta mahdollisimman paljon tulostusalan materiaalista tulisi käytettyä. (Lohilahti 2018.)

### 4.2 Laatuvaatimukset

Tulostettaessa 3D-kappaletta laatuun vaikuttaa tulostimen oikeat asetukset ja komponenttien kunto. Koska jokainen tulostus on erilainen, on hyvä valmistaa vertailukappale, jossa on kaikki mahdolliset rajoitteiden tuomat poikkeavaisuudet, ennen varsinaista tulostusta. (Rupal, Ahmad & Qureshi 2018.) Tähän hyvä ratkaisu on tulostaa pieni kappale, joka on nopea valmistaa ja sisältää erilaisia tulostimelle haastavia muotoja. Valmiista testikappaleesta voi tarkistaa mittojen tarkkuuden ja yleisesti tulostuksen laadun. Erilaisilla 3D-tulostusfoorumeilla näitä on paljon, joten listaan muutaman hyvän, joista saa tärkeimmät tulostuksen haasteet koetukselle.

Esimerkiksi ”all in one 3d printer test” on testikappale (kuva13), jossa on hyvin monia haasteita erilaisten reikien ja sylinterien, että siltojen pituustesteihin (Majda107 2017). Testin monipuolisuus on hyvä, mutta kappaleen suhteellisen iso koko tuo ongelmaksi pitkän valmistusajan.



**Kuva 13.** thingiverse. (Majda107 2017.)

Creative tools on suunnitellut kappaleen nimeltä ”3dbenchy” (kuva14), joka on pieni laiva, jossa on kaikki tulostimille haastavat ominaisuudet ja sille luvataan alle 2 tunnin tulostusaikaa. Kappaleelle on tiedossa tarkat mitat jokaiselle yksityiskohdalle, joista pystyy mittaamaan lopullisen tuotteen tarkkuuden. (3Dbenchy.)





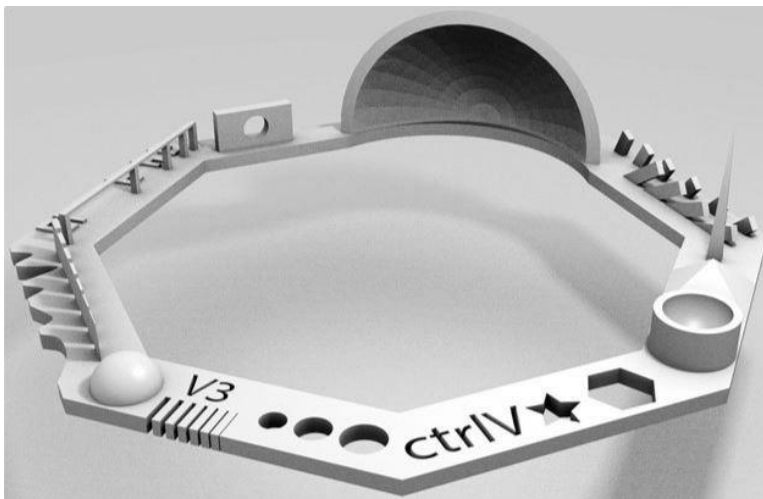
**Kuva 14.** 3Dbenchy. (3Dbenchy.)

Yksittäisten ominaisuuksien testaamiseen käy hyvin kuvan (Kuva15) kappaleet, jotka ovat erillisiä hyvin yksinkertaisia testikappaleita. Hyvä puoli pienissä kappaleissa on niiden nopea tulostus ja tietyn ongelman selkeä luettavuus.



**Kuva 15.** Kokoelma testikappaleista. (Make 2018.)

Yksi vielä monipuolinen testi on ”Test Your 3D printer! V3” (kuva16), joka tarjoaa haastetta terävistä kulmista pieniin rakoihin.



**Kuva 16.** Test Your 3D printer. (CtrlV 2016.)

### 4.3 Tulosteiden tasalaatuisuus

Tulostuslaadun takaamiseksi on tärkeää huomioida materiaalien oikeanlainen säilytys. Esimerkiksi niille tarkoitetuissa laatikoissa. FDM-tulostimien filamenteista osa on hygroskooppisia eli ne imevät kosteutta ilmasta. Tämä on FDM-tulostimien kohdalla haasteellista, sillä materiaalin tulostusvaiheessa kosteus aiheuttaa muutoksia sen ominaisuuksissa, jolloin tulostuslaatu kärsii. (Rice & Carolo 2021.)

Tulostimen ympäristö tulisi olla suojattu ja tähän paras on koteloitu tulostin. Sillä tulostustilanteen lämmönvaihtelut, ilmankosteus ja pöly vaikuttavat enemmän tai vähemmän lopputulokseen.

#### 4.4 ESD

Staattinen sähkö on sähkövaraus, jossa usein eristävissä materiaalissa on elektronien epätasapainotila. Staattista sähköä voi muodostua monella tavalla esimerkiksi kahden materiaalin hankausta, jota kutsutaan hankaussähköksi. ESD tarkoittaa staattisen sähkövarauksen purkautumista. (Wikipedia 2021.)

Varsinkin FDM-tulostamisessa yksi tavoista, jolla syntyy hankaussähköä, on filamentin hankautuminen tulostinta vasten. Tulostimen komponentit, jotka eivät ole maadoitettuja ja hankautuvat filamentin kanssa varautuvat sähköisesti ja saattavat purkautuessaan vaurioittaa tulostimen elektronisia komponentteja. Maadoittamalla komponentit ja filamentti esimerkiksi hiiliharjalla saadaan varaus turvallisesti purettua. (Ed Nisley's Blog 2011.)

Helpoiten staattisen sähkövarauksen ehkäisy onnistuu tulostamalla ESD-turvallisista materiaaleista. ESD-materiaalilla tulostetun kappaleen pinnan resistanssi on  $10^6$  ja  $10^9$  ohm/cm<sup>2</sup> välissä. Tulee myös huomioida, että tulostuksessa pursotuksen lämpötilaa kasvattamalla resistanssi pienenee. ESD-materiaalit ovat osittain komposiittifilamentteja, joten olisi hyvä käyttää FDM-tulostamisessa kulutuksen kestävä suutinta. (Johansson 2020.)

Tulostimen operaattorin altistuminen staattiselle sähkövaraukselle on todennäköistä, joten olisi hyvä käyttää ESD-hyväksytyjä turvavarusteita työskennellessä tulostimen kanssa. Työskentelytason ja alusmaton olisi hyvä olla maadoitettu, jotta varauksien kehittyminen estettäisiin. (Wikipedia 2021.)

## 5 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli käydä läpi lisäävän valmistustavan haasteita suunnittelijan osalta ja etsiä niihin ratkaisuja. Ongelmana ohjeen tekemisessä oli valmistustapojen erilaisuus, jonka myötä tarkkojen suunnitteluohjeiden tekeminen oli mahdotonta. Ohjetta tehdessä pyrinkin siihen, että ratkaisuja voidaan käyttää mahdollisimman monessa tuotantotavassa. Suunnittelijan vastuulla on selvittää materiaalin ja tulostustavan valinnan jälkeen niiden mahdolliset rajoitteet, joiden mukaan tulostettavaa kappaletta voi suunnitella.

Suunnitellessa kappaletta ensin täytyy tietää mitä ominaisuuksia siltä vaaditaan, jonka jälkeen lähdetään selvittämään missä ja kuinka paljon materiaalia kappaleessa tarvitaan. Topologiaoptimoinnin avulla kappaleen muodon saa optimoitua käyttökohteen mukaan. Myös kappale on mahdollista muodostaa osittain tai kokonaan ristikkorakenteista. Ennen tulostusvaihetta on tarkastettava tukimateriaalien tarve ja niiden sijoittelu, että jälkikäsitteily on nopeaa ja helppoa. Lisäksi on huomioitava kappaleen pienien yksityiskohtien tulostettavuus. 3D-tulostettavaa kappaletta suunnitellessa on otettava paljon lopputulokseen vaikuttavia asioita huomioon mutta ennen kaikkea suunnitellessa täytyy olla luova ja muodostaa mahdollisimman erilaisia kappaleita, joista valita paras mahdollinen.

## LÄHTEET

3Dbenchy. Viitattu 25.2.2022 <https://www.3dbenchy.com/about/>

3dformtech. 2022 a. 3D-tulostuksen vaiheet suunnitelmasta valmiiksi tuotteeksi. Viitattu 17.1.2022. <https://3dformtech.fi/3d-tulostuksen-vaiheet-suunnitelmasta-valmiiksi-tuotteeksi/>

3dformtech. 2022 b. 3D-tulostetut prototyypit tekevät tuotekehityksestä nopeampaa ja edullisempaa. Viitattu 17.1.2022. <https://3dformtech.fi/3d-tulostetut-prototyypit-tekevät-tuotekehityksesta-nopeampaa-ja-edullisempaa/>

Bruder, U. 2016. Osa 21. Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät. Viitattu 10.1.2022. <https://www.muoviyhdistys.fi/2016/07/23/osa-21-ainetta-lisaaivat-valmistusmenetelmat-additive-manufacturing/>

Cader, M. Kiński, W. 2020. Effect of Changing the Parameters of the Multi Jet Fusion (MJF) Process on the Spatial Objects Produced. Problems of Mechatronics Armament Aviation Safety Engineering. 11. 61-72. 10.5604/01.3001.0014.5644. Viitattu 29.3.2022. [https://www.researchgate.net/figure/The-principles-of-MJF-method-3\\_fig1\\_348007822](https://www.researchgate.net/figure/The-principles-of-MJF-method-3_fig1_348007822)

Cignoni, P. 2017 a. Schematic representation of Fused Filament Fabrication. Viitattu 29.3.2022. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57953642>

Cignoni, P. 2017 b. Schematic representation of Stereolithography. Viitattu 29.3.2022. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57953646>

CtrlV. 2016. Test Your 3D printer! V3. Viitattu 25.2.2022. <https://www.thingiverse.com/thing:1363023>

Danfoss. 2022. Historia. Viitattu 20.3.2022. <https://www.danfoss.com/fi-fi/about-danfoss/company/history/>

Ed Nisley's Blog. 2011. Thing-O-Matic / MK5 Extruder: Static Control. Viitattu 2.3.2022. <https://softsolder.com/2011/01/09/thing-o-matic-mk5-extruder-static-control/>

Gesrepair. Speeding up production time with additive manufacturing. Viitattu 22.2.2022. <https://gesrepair.com/speeding-production-time-additive-manufacturing/>

Gringer. 2018. SLS schematic. Viitattu 29.3.2022. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=73615521>

Guessasma, S. Zhang, W. Zhu, J. 2019. Topology optimisation in additive manufacturing. Viitattu 22.2.2022 <https://www.ezproxy.puv.fi/login?url=https://ebookcentral.proquest.com/lib/vamklibrary-ebooks/detail.action?docID=5992508>

Huld. 2019. Materiaalia lisäävä valmistus. Viitattu 10.1.2022 <https://huld.io/fi/blogi/materiaalia-lisaava-valmistus-am/>

Jiang, J. Xu, X. Stringer, J. 2018. Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. J. Manuf. Mater. Process. 2, 64. Viitattu 8.2.2022. <https://doi.org/10.3390/jmmp2040064>

Johansson, K. 2020. Materiaaliesittelyssä 3DXTech 3DXSTAT ESD-PLA. Viitattu 15.3.2022. <https://www.3d-tulostus.fi/uutiset/Materiaaliesittelyssa-3DXTech-3DXSTAT-ESD-PLA>

Ligon, C. Liska, R. Stampfl, J. Gurr, M. Mülhaupt, R. 2017 Chemical reviews 2017. 117 (15), 10212–10290. Polymers for 3D Printing and customized additive manufacturing. Viitattu 20.3.2022. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.chemrev.7b00074#>

Lohilahti, J. 2018. Vertailussa FDM-, SLA- ja SLS-teknologiat. Viitattu 3.3.2022. <https://www.3d-tulostus.fi/uutiset/Vertailussa-FDM-SLA-ja-SLS-teknologiat>

Majda107. 2017. All in one 3d printer test. Viitattu 25.2.2022. <https://www.thingiverse.com/thing:2656594>

Make. 2018. 2017 3D printer test file. Viitattu 25.2.2022. <https://www.thingiverse.com/thing:2755063>

Muñiz, E. 2020. Additive manufacturing in FP7 and Horizon. Report from the EC workshop on additive manufacturing. Brussels, 18 June 2014. Viitattu 10.1.2022. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6aeec19c-265f-11e7-ab65-01aa75ed71a1>

Protolabs. 2022. How to use multi jet fusion for functional 3D-printed parts. Viitattu 20.3.2022. <https://www.protolabs.com/resources/design-tips/how-to-use-multi-jet-fusion-for-functional-3d-printed-parts/>

Rice, H. Carolo, L. 2021. 3D printer filament storage: 12 ways to store filament. Viitattu 25.2.2022. <https://all3dp.com/2/filament-storage-3d-printer/>

Rupal, B. Rafiq Ahmad, R. Qureshi, A. 2018. Feature-Based Methodology for Design of Geometric Benchmark Test Artifacts for Additive Manufacturing Processes. Department of Mechanical Engineering, University of Alberta, Edmonton, painos 70, sivut 84–89. T6G 1H9, Canada. Viitattu 11.2.2022. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.02.012>

Shahrubudin, N. Lee, T. Ramlan, R. 2019. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. Viitattu 1.3.2022. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>

Song, GH. Jing, SK. Zhao, FL. 2018. Design of Lattice Structures Using Local Relative Density Mapping Method. Chin. J. Mech. Eng. 31, 89. Viitattu 3.3.2022. <https://doi.org/10.1186/s10033-018-0289-3>

Voronator. 2022. Viitattu 8.3.2022. <https://www.voronator.com/>

Wikipedia. 2021. Staattinen sähkö. Viitattu 1.3.2022 [https://fi.wikipedia.org/wiki/Staattinen\\_s%C3%A4hk%C3%B6](https://fi.wikipedia.org/wiki/Staattinen_s%C3%A4hk%C3%B6)

Yang, J. 2020. Strategies for increasing the throughput of your 3D printing operation. Viitattu 22.2.2022. <https://www.javelin-tech.com/blog/2020/04/strategies-for-increasing-the-throughput-of-your-3d-printing-operation/>

Zhu, J. Zhou, H. Wang, L. Yuan, S. Zhang, W. 2021. A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. Chinese journal of aeronautics. 91–110. Viitattu. 17.1.2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936120304520>