



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Atte Grönfors

Lisäävän valmistuksen hyödyntäminen varaosien digitalisoinnissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

19.4.2021

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Atte Grönfors Lisäävän valmistuksen hyödyntäminen varaosien digitalisoinnissa 34 sivua 19.4.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine	kemian prosessitekniikka
Ohjaajat	kunnossapitoinsinööri Tarja Saarenaho lehtori Juha Kotamies
<p>Insinööriyössä tutkittiin lisäävän valmistuksen tarjoamia mahdollisuuksia digitaalisen varaosakannan luontiin elintarviketeollisuuden yrityksessä. Lisäksi projektin tavoitteena oli saada lisätietoa 3D-metallitulostimella valmistetun varaosan laadusta sekä käyttömahdollisuuksista elintarviketuotannossa. Työn toimeksiantajana oli HKScan Finland Oy.</p> <p>Työssä perehdyttiin tekniikan nykytilaan ja tulevaisuuteen tieteellisten julkaisujen, standardien sekä 3D-tulostusalan asiantuntijoiden haastatteluiden avulla. Työtä varten tutkittiin myös erilaisia tulostustyyppisiä ja käytettävissä olevia materiaaleja, jotka soveltuvat parhaiten metallisten varaosien tulostukseen. Lisäksi varaosavaraston hallinnan ongelmakohtia selvitettiin haastattelemalla kunnossapidon ammattilaisia sekä perehtymällä alan kirjallisuuteen. Saatujen tietojen pohjalta luotiin yleiskuva lisäävän valmistuksen tarjoamista mahdollisuuksista varaosavaraston hallinnan kehittämiseen.</p> <p>Ongelmana nykymallisessa varaosakannanhallinnassa on tyypillisesti riittävän kapasiteetin ylläpito ja korkeat varaosien hankintakustannukset. Lisäksi varaosissa käytetyt materiaalit eivät välttämättä ole loppukäyttäjän tiedossa. Lisäävällä valmistuksella pystytään itse määrittelemään kappaleessa käytetty materiaali, jolloin varaosista pystytään tekemään entistä kestävämpiä. Toisaalta tulostus voidaan toteuttaa myös halvemmalla materiaalilla, jos kappaleen käyttötarkoitus sen mahdollistaa. Lisäävän valmistuksen avulla varaosien tulostaminen voidaan toteuttaa paikallisesti tuotantolaitoksessa. Tällöin pystytään laskemaan kappaleen valmistuskustannuksia sekä vähentämään toimituksiin kuluva aikaa ja aiheutuvaa hiilijalanjälkeä.</p> <p>Työssä tutkittiin ensisijaisesti tulostetun kappaleen pintarakenteen laatua sekä tulostukseen kulunutta aikaa. Tuloste valmistui kahden vuorokauden aikana, ja laatu osoittautui erinomaiseksi. Ainoiksi ongelmakohtiksi osoittautuivat noin 0,5 millimetrin epätarkkuudet tulosteen pohja- ja sisähalkaisijoissa, mitkä olivat seurausta mittausvirheistä. Kaiken kaikkiaan työ tarjosi kuitenkin arvokasta tietoa lisäävän valmistuksen hyödyntämisestä varaosien valmistuksessa sekä lähtökohdat selvitystyön jatkamiselle tekniikan käyttöönotosta.</p>	
Avainsanat	lisäävä valmistus, jauhepetimenetelmä, digitaaliset varaosat

Author Title Number of Pages Date	Atte Grönfors Utilization of Additive Manufacturing in the Digitalization of Spare Parts 34 pages 19 April 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Biotechnology and Chemical Engineering
Professional Major	Chemical Engineering
Instructors	Tarja Saarenaho, Maintenance Engineer Juha Kotamies, Senior Lecturer
<p>This thesis studies the possibilities offered by additive manufacturing for the execution of a digital spare part database in a food industry company. In addition, the aim of the project was to obtain more information about the quality of the spare part produced by a 3D metal printer and its accessibility in food production. The principal of the project was HKScan Finland Oy.</p> <p>The current state and the future of the technology was investigated by means of scientific articles, standards and interviews with experts in the field of 3D printing. Different methods of additive manufacturing and the most applicable metal materials for spare parts were also studied. Additionally, interviews were conducted with the professionals in the field of maintenance to research the challenges faced by spare part inventory management. Based on the information obtained, an overview was created of the opportunities offered by additive manufacturing to develop spare parts inventory management.</p> <p>Maintaining a sufficient inventory capacity and high original costs of spare parts are the main challenges concerning the present-day spare part inventory management. Moreover, the end user may not be aware of the materials used in spare parts. Additive manufacturing enables to determine the material used in the part yourself, which makes it possible to produce more durable spare parts. On the other hand, printing can also be performed with cheaper material, if the intended use of the part allows it. By means of additive manufacturing, the production of the part can be performed locally in the production plant. In this case, it is possible to decrease the manufacturing costs of the part as well as reduce the time required for deliveries and the resulting carbon footprint.</p> <p>The quality of the surface structure of the printed part and the time spent on printing were primarily studied. The printout was completed in two days and the quality was found excellent. The only problem seemed to be an inaccuracy of 0,5 millimeters in the bottom and inside diameters of the part, which was a result of measurement errors. Overall, however, the project provided valuable information on the utilization of additive manufacturing in the production of spare parts, as well as the basis for continuing the study on the introduction of the technology.</p>	
Keywords	additive manufacturing, powder bed fusion, digital spare parts

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	HKScan Oyj	2
3	Tuotanto-omaisuuden hallinta prosessiteollisuudessa	2
3.1	Kunnossapidon talous ja kustannustyytit	2
3.2	Varaston hallinta ja varaosien digitalisointi	3
4	Lisäävä valmistus	4
4.1	Tekniikan periaatteet	4
4.2	Tulostusmenetelmät	6
4.3	Elintarviketeollisuuteen soveltuvia metalleja	8
4.4	Materiaalien mekaaniset ominaisuudet	10
4.5	Muovisten osien ominaisuudet	12
4.6	Tekniikan energiankulutus	14
4.7	Taloudellinen kestävyys	17
5	3D-skannaaminen ja takaisinmallinnus	18
6	Testiosan valmistaminen	20
6.1	Kappaleen valinta ja mallintaminen	20
6.2	Kappaleen valmistuksesta saadut tulokset	24
7	Lisäävän valmistuksen ongelmakohdat ja tulevaisuus	26
8	Yhteenveto	27
	Lähteet	29

Lyhenteet

ABS	Akryylinitriilibutadieenistyreeni. Muovien valmistuksessa käytetty polymeeri.
AISI	American Iron and Steel Institute. Yhdysvaltalaisia AISI-standardeja kehittävä järjestö.
AM	Lisäävä valmistus (Additive Manufacturing). Kappaleiden teolliseen valmistukseen suunniteltu 3D-tulostamisen menetelmä.
ASTM	American Society for Testing and Materials. Yhdysvaltalaisia ASTM-standardeja kehittävä järjestö.
Buy-to-fly	Hankitun materiaalin ja siitä valmistuneen kappaleen massojen välinen suhdeluku.
CEN	European Committee for Standardization. Eurooppalaisia EN-standardeja kehittävä järjestö.
ISO	International Organization for Standardization. Kansainvälisiä ISO-standardeja kehittävä järjestö.
LSO	Lounais-Suomen Osuusteurastamo.
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development. Eurooppalaisen taloudelliseen yhteistyöhön perustettu järjestö.
PET	Polyetyleenitereftalaatti. Muovien valmistuksessa käytetty polymeeri.
PETG	Polyetyleenitereftalaattiglykoli. Muovien valmistuksessa käytetty polymeeri.
Pistepilvi	Datapisteistä muodostuva kolmiulotteinen malli xyz-koordinaatistossa.
PLA	Polylaktidi (polylactic acid). Muovien valmistuksessa käytetty polymeeri.

SLM	Selective Laser Melting. Lasersädettä hyödyntävä jauhepetimenetelmän tekniikka.
SLS	Selective Laser Sintering. Lasersädettä hyödyntävä jauhepetimenetelmän tekniikka.

1 Johdanto

Tuotantoprosessi on määritelty tiettyjen toimintojen sarjaksi, jonka tuloksena asiakkaalle saadaan toimitettua yrityksen tarjoama tuote tai palvelu. Jokaisen yrityksen on huolehdittava tuotantoprosessiensa jatkuvatoimivuudesta, jotta tuotteiden toimituskyky asiakkaille pystytään turvaamaan. Laiterikoista johtuvat suunnittele mattomat työseisakit hidastavat tuotantoa ja heikentävät yrityksen toimituskykyä. [1, s. 83–84.] Yritykselle voi olla myös vaikeaa hahmottaa konerikkojen aiheuttamia kustannuksia. Usein aliarvioidaan suunnittele mattoman työseisakin kuluttamat resurssit ja arvioiden mukaan jopa yli 80 % yrityksistä eivät pysty laskemaan seisakista aiheutuvia todellisia kustannuksia. Tämän vuoksi yritykselle on ensisijaisen tärkeää pystyä minimoimaan konerikkojen aiheuttamaa tuotannon tehottomuutta. [2.]

Varaosavaraston hyödyntäminen on nopea ratkaisu laiterikon aiheuttamaan tuotannon pysähtymiseen. Yrityksen on usein myös kannattavampaa ylläpitää suurta varaosavaraostoa kuin pitkittää laitteen korjausta ja sen seurauksena heikentää tuotannon tehokkuutta. Pitkäaikaisella tuotannon pysähdyksellä on yritykselle sekä suoria että epäsuoria taloudellisia vaikutuksia, kuten menetety n tuotannon rahallinen arvo sekä huonosta toimituskyvystä johtuva yrityskuvan heikkeneminen. Toisaalta varaston suunnittelu perustuu usein aiempien kokemusten osoittamaan tarpeeseen, joka ei välttämättä puolestaan korreloi tulevaisuuden tarpeiden kanssa. Lisäksi varaosien kysyntä on tyypillisesti epä säännöllistä, mikä tekee tarpeiden ennustamisesta entistä vaikeampaa. Kehittämällä varaosakannastaan paremmin mukautuvan kysynnän vaihteluun yritykset kykenisivät vähentämään työseisakkien kestoa ja tehostamaan tuotantoaan. [3, s. 122.]

Tämän insinööriyön tavoitteena oli tutkia lisäävän valmistuksen tarjoamia mahdollisuuksia varaosavaraston hallinnan kehittämiseen elintarviketeollisuuden yrityksessä. Työ toteutettiin HKScan Finland Oy:lle osana kokonaisvaltaista tuotantoprosessien kehittämistä. Työssä tutustuttiin varaosien 3D-tulostukseen liittyvään alan kirjallisuuteen ja tutkittiin tekniikan tulevaisuuden näkymiä. Kirjallisuuskatsauksen lisäksi mallinnettiin ja tulostettiin testikappale. Tulosten laadun ja hinnan perusteella arviotiin mahdollisuuksia luoda nykyisen varaosavaraston rinnalle digitaalisista varaosista muodostettu tietokanta.

2 HKScan Oyj

HKScan Oyj on Helsingin pörssissä listattu elintarviketeollisuusyhtiö, joka myy, markkinoi ja valmistaa vastuullisesti tuotettua sian-, naudan-, siipikarjan- ja lampaanlihaa. Yrityksen liiketoiminta sai alkunsa vuonna 1913, kun Lounais-Suomen Osuusteurastamo (LSO) perustettiin. Vuonna 1997 LSO Foods Oy -nimi muutettiin HK Ruokataloksi. Kymmenen vuotta myöhemmin yhtiön nimeksi tuli HKScan Oyj, kun HK Ruokatalo Group osti ruotsalaisen elintarviketeollisuusyrityksen Scan AB:n osakkeet. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Turussa ja vuoden 2020 liikevaihto oli 1,8 miljardia euroa. [4.]

HKScan Oyj:n tytäryhtiö HKScan Finland Oy työllistää Suomessa lähes 2 800 henkilöä. Tunnetuimpia tuotemerkkejä ovat HK[®], Kariniemen[®], Via[®], Kivikylän[®] ja Tamminen[®]. Yritykselle tärkeitä asiakkaita ovat vähittäiskauppa, food service -kanava sekä muu ruokateollisuus. HKScan Finland Oy:llä on tuotantolaitoksia Vantaalla, Raumalla, Forssassa, Mikkelissä, Outokummussa ja Paimiossa. Kaiken kaikkiaan HKScanilla on 16 tuotantolaitosta kuudessa eri maassa. [5, s. 22–23, 30.]

Yhtiön lanseeraamalla Zero Carbon -ilmastosuunnitelmalla pyritään hiilineutraaliin teolliseen tuotantoon vuoden 2025 loppuun mennessä ja maataloilta alkavan toimitusketjun hiilineutraaliuteen vuoden 2040 loppuun mennessä. Vuonna 2019 yhtiön päästöt olivat 2,4 megatonnia hiilidioksidiekvivalenttia, joista vain 5 % oli peräisin omasta tuotannosta. Päästöistä 95 % aiheutuivat arvoketjun muilta osa-alueilta, kuten alkutuotannosta, logistiikasta ja jätteistä. Yhtiön linjauksen mukaan ilmastovaikutukset tullaan huomioimaan kaikissa investointipäätöksissä. [6.]

3 Tuotanto-omaisuuden hallinta prosessiteollisuudessa

3.1 Kunnossapidon talous ja kustannustyypit

Suoritteiden tuottamiseen yritys tarvitsee tuotanto-omaisuutta eli resursseja. Tuotanto-omaisuutta ovat muun muassa yrityksen kiinteistöt sekä koneet ja niiden osat. Yrityksen tekemät investoinnit vaikuttavat tuotanto-omaisuuden tehokkuuteen ja edelleen valmistuneiden tuotteiden määrään. Kunnossapidon on toiminnassaan pyrittävä laitteiston luotettavuuteen ja vikaantumisen välttämiseen, jotta tuotannosta saadaan tehokasta.

Toisaalta on huomioitavaa, että kunnossapitoon kuuluvat myös normaalit liiketoiminnan toimintamallit. Liiketoiminnan ehtojen näkökulmasta keskeisintä on, että toiminta on järkevää. Näin ollen kunnossapidon, kuten koko tuotantolaitoksen, tulee valmistaa hyödykkeitä mahdollisimman tuottavasti ja karsia turhia kustannuksia. [7, s. 11–12.]

Usein kunnossapito on pääoma- ja raaka-ainekustannusten jälkeen yrityksen suurin kustannus. Kunnossapidosta yritykselle aiheutuvat kustannukset ovat epäsuoria, mutta vaikutusmekanismien ymmärtäminen on yrityksen liiketoiminnan kannalta välttämätöntä. Kunnossapidon kustannukset jaetaan yleisesti välittömiin ja välillisiin kustannuksiin. Välittömiin kustannuksiin kuuluvat muun muassa työ-, hankinta- ja varastointikustannukset sekä varaosat ja niiden materiaalit. Välillisiin kustannuksiin kuuluvat puolestaan esimerkiksi epäkäytettävyyuskustannukset, ylisuuret puskurivarastot sekä hallitsematon resursien käyttö. Kustannusten konkreettisuuden vuoksi välittömät kustannukset on yleensä helpompi mitata kuin välilliset. Toisaalta välilliset kustannukset muodostavat valtaosan kunnossapidon kokonaiskustannuksista, joten kustannussäästöjä etsittäessä tulisi keskittyä erityisesti välillisiin kustannuksiin. Rajanveto välittömien ja välillisten kustannusten välillä ei ole kuitenkaan aina täysin selkeä. Korkea varastotaso aiheuttaa kunnossapidolle välittöminä kustannuksina korkeat varastointikustannukset. Korkea varastotaso on kuitenkin keino vähentää koneen epäkäytettävyydestä aiheutuvia välillisiä kustannuksia. Näin ollen kunnossapidon tulee jatkuvasti arvioida, mitkä kustannukset tulevat yritykselle edullisimmaksi. [7, s. 24, 160–161.]

3.2 Varaston hallinta ja varaosien digitalisointi

Varaston hallinta on yrityksen taloudellisen tehokkuuden kannalta tärkeää. Liian suuri varasto sitoo yrityksen käyttöpääomaa, kun taas liian pienen varaston vaarana on materiaalin loppuminen ennen aikaisesti. Näin ollen varaston hallinta on merkittävässä asemassa yrityksen toiminnassa. Kunnossapidon logistiikassa pyritään toteuttamaan muun muassa varaosien, materiaalien ja laitteiden toimitusta sekä varastointia mahdollisimman kustannustehokkaasti. Yrityksen tulee arvioida, onko sille edullisempaa tuotannon keskeytyminen ja siitä aiheutuvat epäkäytettävyyuskustannukset vai ylläpidetäänkö varaston valmiustasoa korkeana, mistä seuraa varastointikustannusten kasvu. Tuotannon keskeytyminen tulee kuitenkin yritykselle todella kalliiksi, joten korkean varastotason ylläpito on usein kannattavampaa. [8, s. 3867–3868.]

Teollisuuden yritysten mielenkiinto digitaalisia varaosia kohtaan on lisääntynyt viime vuosina. Kunnossapito on merkittävä osa teollisuusyrityksen toimintaa, ja varaosat sitovat paljon yrityksen pääomaa. Koneiden ikääntymisen seurauksena alkuperäisiä osia ei välttämättä ole enää saatavilla. Uusien laitehankintojen sijasta korjaaminen on kuitenkin yritykselle taloudellisesti ja ympäristön kannalta järkevä vaihtoehto. Lisäävä valmistus mahdollistaa yksilöityjen osien valmistuksen tai pienen sarjatuotannon nopeasti ja kustannustehokkaasti. Lisäksi digitaalisten varaosien varastointi ei vie hyllytilaa ja osien valmistus voidaan tehdä yrityksen tarpeiden mukaan. Logistiikkaan liittyvät epävarmuudet saadaan minimoitua, kun osat voidaan valmistaa paikallisesti. Tekniikkaan soveltuvan kappaleen ominaisuuksien määrittäminen on kuitenkin osoittautunut toistaiseksi suurimmaksi hidasteeksi tekniikan yleistymiseen varaosakannan hallinnassa. On arvioitu, että jo noin 10 prosentin digitalisoitumisaste yrityksen varaosista olisi taloudellisesti kannattavaa. Toimiva digitaalisten varaosien tietokanta pystyisi kuitenkin sisältämään jopa 200 000 nimikettä. Toinen tekniikan hyödyntämistä hidastava seikka on oikean materiaalin löytäminen tiettyyn käyttötarkoitukseen. Lisäävään valmistukseen saatavilla oleva materiaalivalikoima on selkeästi kapeampi kuin perinteisissä valmistusmenetelmissä. Myös materiaalien ominaisuudet eroavat hieman lisäävässä ja perinteisessä valmistusmenetelmässä. [9.]

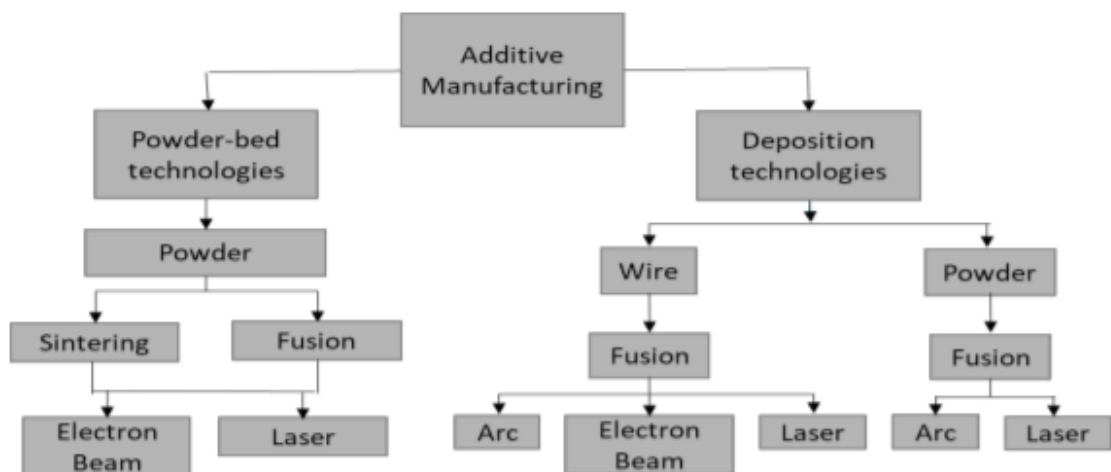
4 Lisäävä valmistus

4.1 Tekniikan periaatteet

Erilaisia sovelluksia kappaleiden kerroksittaiseen valmistukseen on tehty 1900-luvun alusta alkaen, mutta ensimmäinen kaupallistettu 3D-tekniikkaa hyödyntävä tulostuskone katsotaan valmistuneen vuonna 1987. Kehitys on ollut 2000-luvulla jatkuvasti kiihtyvää, kun tulostustekniikat ovat parantuneet ja käytössä oleva materiaalivalikoima monipuolistunut. [10, s. 1, 3.] Nykyisin kirjallisuudessa on vakinaistunut käytäntö, jossa termillä 3D-tulostus viitataan nimenomaan kuluttajatulostukseen. Lisäävällä valmistuksella (AM) tarkoitetaan puolestaan teollista muovien ja metallien valmistusta, johon tässä työssä pääosin keskitytään. [11.] AM-menetelmässä mallinnetaan suunnitteluohjelmalla 3D-tietokone-malli, joka jaetaan tavoiteltua kerrospaksuutta vastaaviin kerroksiin. Kerroksen paksuus vaikuttavaa kappaleen muotojen tarkkuuteen. Tulostusvaiheessa kappaletta rakennetaan lisäämällä materiaalia kerros kerrokselta. Riippuen materiaalista ja

valmistusmenetelmästä, kappale saattaa vaatia jälkikäsittelyä muotojen ja pinnan viimeistelemiseksi. [12.] Menetelmää käytetään jo esimerkiksi osien valmistukseen avaruus- ja lentokonetekniikassa, joten se mahdollistaa todistetusti teknisesti luotettavien osien tuottamisen [13; 14].

Metallisten kappaleiden 3D-tulostus on teknisesti hieman monimutkaisempaa kuin polymeerejä hyödyntävien tulostusmenetelmien. Suurin ongelma metallisten osien lisäävässä valmistuksessa on siihen liittyvät turvallisuusriskit sekä jälkikäsittelyn tarve tulostetulle kappaleelle. Yksi turvallisuusriski on esimerkiksi hengitystieoireet, joita jauhe- maisten metallien käsittely saattaa aiheuttaa [15, s. 462]. Tämän vuoksi tulostinta käyttävän henkilöstön tulee olla osaavaa sekä tietoinen laitteen käyttöön liittyvistä turvallisuusmääräyksistä. Epäsuorissa menetelmissä, joissa ei pystytä tulostamaan sellaise- naan käyttökelpoisia lopputuotteita, joudutaan jälkikäsittämään kappaletta esimerkiksi hiomalla. Lisäksi kappaleita voidaan käsitellä korkeassa lämpötilassa ja paineessa, jol- loin saadaan parannettua kappaleen lujuusominaisuuksia. [10, s. 18–19.] Tulostusme- netelmät jaetaan karkeasti jauhepeti- ja pinnoittamismenetelmiin (kuva 1). Jauhepetime- netelmässä materiaalia lisätään kerroksittain sulattamalla tai sintraamalla jauhetta. Sintrauksella tarkoitetaan materiaalin kovettamista kuumuuden tai paineen avulla. Pin- noitusmenetelmissä sulatetaan metallijauhetta tai -lankaa valmistetun kerroksen päälle. Tyypillisimmät energialähteet tulostustekniikoissa ovat laser tai elektronisuihku. [16, s. 140.]



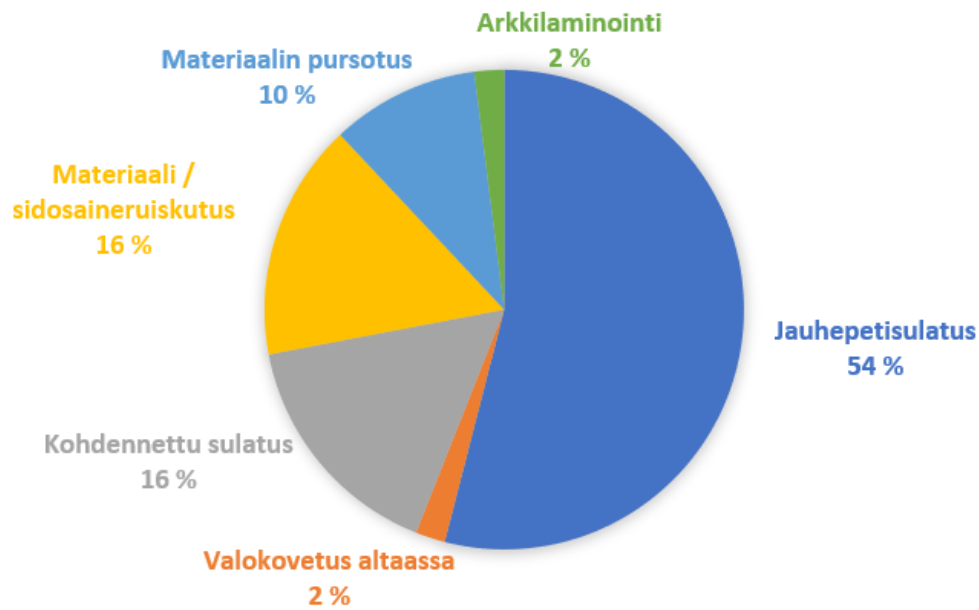
Kuva 1. Tyypilliset lisäävän valmistuksen tulostusmekanismit [16, s. 140].

4.2 Tulostusmenetelmät

Alan käsitteiden vakinaistamiseen suunniteltu standardi ISO/ASTM 52900:2015 määrittelee seitsemän eri tekniikkaa, joita käytetään lisäävässä valmistuksessa [17]. Tulostustekniikat ovat

- jauhepetisulatus
- kohdennettu sulatus
- materiaallinen pursottaminen
- materiaalin ruiskuttaminen
- valokovetus altaassa
- sidosaineruiskutus
- arkkilaminointi.

Jauhepetimenetelmät ovat tällä hetkellä eniten käytetty tekniikka metallisten kappaleiden 3D-tulostukseen. Vuonna 2019 markkinoilla olleista 3D-metallitulostimista 54 % oli jauhepetimenetelmään perustuvia (kuva 2). [18.] Eri jauhepetimenetelmiä on useita, mutta kaikkia prosesseja yhdistää samat pääperiaatteet. Tekniikassa levitetään jauhetta alustalle, joka laskeutuu prosessin aikana jokaisen valmistuneen kerroksen korkeuden verran alaspäin. Kerroskorkeus on metallin tulostuksessa tyypillisesti muutamista kymmenistä mikrometreistä aina sataan mikrometriin asti. Jauhetta kovetetaan mallin mukaan lasersäteellä tai elektronisuihkulla. Useista vaihtoehdoista huolimatta jauhepetiin perustuvassa tulostuksessa käytetään tyypillisesti kahta eri menetelmää. Selective Laser Sintering -menetelmässä (SLS) jauhe ei täysin sula lasersäteen seurauksena, vaan se saavuttaa riittävän lämpötilan, jossa jauhepartikkelit liittyvät toisiinsa muodostaen huokoista kerrosta. [10, s. 18, 21–22.] Toisessa yleisesti käytetyssä tekniikassa, Selective Laser Melting -menetelmässä (SLM), jauhepartikkelit sen sijaan sulavat täysin muodostaen vahvoja sidoksia keskenään [19].



Kuva 2. Vuonna 2019 teollisessa käytössä olleet tulostustekniikat [18].

Jauhepetimenetelmällä valmistetun kappaleen tulostusaika vaihtelee muutamista kymmenistä minuuteista useisiin päiviin. Eniten tulostusaikaan vaikuttavat tekijät ovat tulostettavan kappaleen tilavuus ja korkeus. Tulostuksen valmistuttua tulostusalustaa nostetaan ja samalla poistetaan jauhepartikkeleita kappaleen päältä. Irtojauhe pystytään uusiokäyttämään toiseen kappaleeseen, jos se puhdistetaan asianmukaisesti kontaminoituneista partikkeleista. Tulostusmenetelmän luonteen vuoksi kappale voi hitsaantua tulostusalustaan kiinni, joten irrottamiseen saatetaan tarvita työkaluja. Myös kappaleen lämpökäsittely irrottamisen helpottamiseksi saattaa olla tarpeellista. Mahdolliset tukirakenteet saadaan poistettua helpoimmassa tapauksessa käsin, mutta optimaalisen pintarakenteen säilyttämiseksi voi myös olla tarpeen käyttää lämpökäsittelyä ja työkaluja. [10, s. 41–42.]

Toinen metallien tulostamiseen käytetty menetelmä on kohdennettu sulatus. Materiaalia ja lämpöenergiaa kohdistetaan rakennusalaan, jolloin jauhemainen rakennusaine sulaa edellisen kerroksen päälle. Lämpöenergiana käytetään jauhepetimenetelmän tapaan tyypillisesti laseria tai elektronisuihkua. Menetelmä eroaa jauhepetimenetelmästä sillä, että jauhetta suihkutetaan kohteeseen lämpöenergian samalla sulattaessa sitä. Kohdennettu sulatus on toiseksi yleisin metallitulosteiden valmistusmenetelmä, mutta on silti selvästi vähemmän käytetty jauhepetimenetelmään verrattuna. [10, s. 23–24; 18.]

Materiaalin pursottaminen on yleisesti käytetty menetelmä erityisesti kuluttajatulostimissa. Siinä materiaalia pursotetaan yhdestä tai useammasta suuttimesta. Pursottamisella valmistetaan kappaleita tyypillisesti kestopuoveista tai komposiiteista. Muovilan-kaa sulatetaan liikkuvan suuttimen kammiossa ja pursotetaan tietokoneohjatusti vaakatasossa. Sulanut muovi jähmettyy kerroksittain muodostuvan kappaleen päälle, eikä kappale tyypillisesti vaadi jälkikäsitteilyä. Toisessa vastaavassa menetelmässä, materiaalin ruiskutuksessa, materiaalipisaroita suihkutetaan kerroksittain päällekkäin. Tekniikka edellyttää varsinaisen materiaalin rinnalla suihkutettavaksi tukimateriaalia. Jokaisen valmiin kerroksen jälkeen materiaali kovetetaan vielä ultraviolettivalolla. [20.]

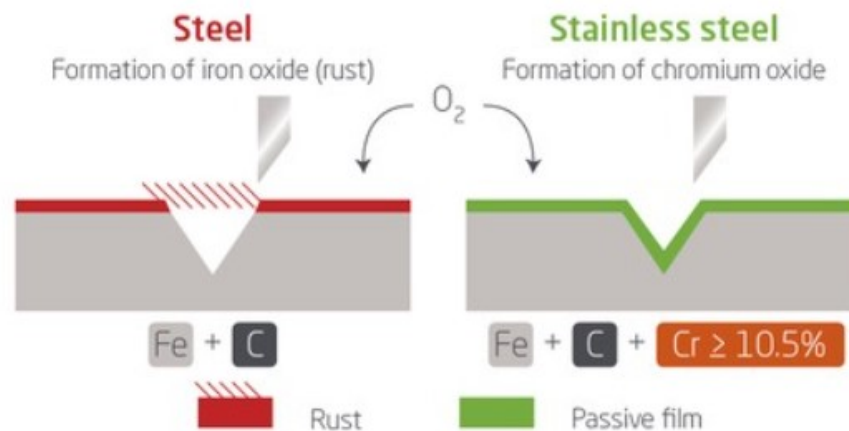
Muita menetelmiä ovat valokovetus, sidosaineruiskutus ja arkkilaminointi. Valokovetuksessa kappale valmistetaan altaassa nestemäisestä fotopolymeeristä. Neste kovetetaan kerros kerrokselta yhden tai useamman laserin avulla tietokonemallin mukaiseksi kappaleeksi. Useimmiten kappaletta joudutaan jälkikäsittelemään vielä uunissa ultraviolettivalon avulla, jolla parannetaan kappaleen lujuusominaisuuksia. [21.] Sidosaineenruiskutuksen tulostusalustana ja rakennusmateriaalina käytetään jauhepetiä. Tulostustekniikassa ruiskutetaan liimaa selektiivisesti rakennusmateriaalin liittämiseksi yhteen. Valmistusmenetelmän etuna on, että erillisiä tukirakenteita ei tarvita, sillä itse rakennusmateriaali toimii alustana. [22.] Arkkilaminointitekniikassa liimataan ohuita kalvoja päällekkäin ja lasersäde leikkaa jokaisen kerroksen tavoiteltuun muotoonsa. Kerrokset saadaan puristumaan toisiinsa lämmitetyn valssin avulla. [23.]

4.3 Elintarviketeollisuuden soveltuvia metalleja

Elintarviketeollisuudessa käytettävien koneiden materiaalivalinnoissa tulee olla huolellinen, jotta elintarviketurvallisuus toteutuu koko prosessin ajan. Materiaaleilla tulee olla hyvät lujuus- ja korroosionkesto-ominaisuudet sekä helposti puhdistettavat pinnat. Materiaalivalinnassa tulee myös huomioida tuotannossa käytettävät ainesosat. Esimerkiksi tuotantoprosessissa käytetty suola saattaa aiheuttaa ruostetta metallityypeissä, joiden korroosionsietokyky ei ole riittävä. [24.]

Teräs on raudan ja hiilen muodostama seos. Ruostumattomaan teräkseen on lisätty kromia vähintään 10,5 massaprosenttia seoksesta, joka parantaa korroosionkestoa muodostamalla materiaaliin suojaavan pinnan (kuva 3). [25.] Lisäksi parempien

lujuusominaisuuksien saavuttamiseksi osa ruostumattomista teräksistä sisältävät vaihtelevia määriä nikkeliä ja molybdeenia. Mikrorakenteen perusteella ruostumattomat teräkset jaotellaan austeniittisiin, ferriittisiin, martensiittisiin ja duplex-teräksiin. Suurin osa ruostumattoman teräksen laaduista ovat austeniittisiä. Niillä on erinomainen korroosionkestokyky sekä niitä on helppo muokata ja hitsata. Austeniittisilla teräksillä on myös hyvä iskunkestävyys matalissa lämpötiloissa. Teräslaaduista austeniittiset teräkset ovat ainoa ryhmä, jolla ei ole magneettisia ominaisuuksia. Ferriittisissä teräksissä on nikkeliä tyypillisesti hyvin vähän tai ei lainkaan. Nikkeli on muihin teräksen seosmateriaaleihin verrattuna kallista ja sen hinta on suhteellisen epävakaa. Näin ollen ferriittisten terästen hinta on verraten edullinen ja vakaa. Matalan nikkeliolosuuden ferriittisiä teräksiä käytetään erityisesti rikkipitoisissa ympäristöissä, sillä nikkeli reagoi herkästi rikin kanssa. Martensiittiset teräkset ovat pienin ruostumattomien terästen ryhmä. Nikkeli- ja molybdeeniosuudet ovat matalia, joten lujuusominaisuuksien parantamiseksi niihin tyypillisesti lisätään hiiltä ja joskus myös typpeä. Duplex-teräksissä on sekä ferriittisten että austeniittisten terästen ominaisuuksia. Tyypillistä duplex-teräksille on korkea kromi- ja matala nikkeli- ja molybdeeni- pitoisuus. Lujuusominaisuuksien parantamiseksi duplexeihin saatetaan lisätä myös molybdeenia. [26.]



Kuva 3. Teräksen ja ruostumattoman teräksen korroosionkesto-ominaisuudet [25].

European Committee for Standardization (CEN) on eurooppalainen standardisointijärjestö, joka tarjoaa toiminta-alustan yhtenäistetyille eurooppalaisille EN-standardeille. Yleisimpiä metallirakenteissa käytettyjä ruostumattomia teräksiä ovat EN-1.4404 ja EN-1.4307 [27, s. 2]. Valmistajat ilmoittavat kuitenkin 3D-tulostimissaan saatavilla olevat metallimateriaalit tyypillisesti yhdysvaltalaisen American Iron and Steel Institute -

standardisointijärjestön (AISI) omissa merkintätyyleissä. Näin ollen tässä työssä käytetään selkeyden vuoksi AISI-standardien mukaisia merkintöjä. AISI-standardin mukainen merkintä EN-1.4401:lle on 316 ja EN-1.4404:lle vastaava merkintä on 316L. Molemmat teräkset ovat alkuainekoostumukseltaan pääosin samaa, mutta 316L-teräksellä on matalampi hiilipitoisuus. 316L sisältää muiden teräslaatuja tapaan suurelta osin rautaa, mutta silti se on rakenteeltaan austeniittista eli sillä ei ole magneettisia ominaisuuksia. Kappaleen magneettisuudesta on elintarviketeollisuudessa kuitenkin hyötyä, sillä se helpottaa materiaalin tunnistamista elintarviketurvallisuuden vaarantaneissa tilanteissa. Magneetin avulla pystytään helpommin tunnistamaan lopputuotteen sekaan joutuneet tietyt rautaa sisältävät materiaalit. Lisäksi 316L-teräkselle tyypillinen ominaisuus on korkea lämmönsietokyky. Yksi yleinen elintarviketeollisuudessa käytetty teräsmateriaali on EN-1.4307 eli AISI-304L, jossa ei kuitenkaan ole lainkaan molybdeeniä ja lisäksi nikkelin osuus on matalampi kuin 316L-teräksessä. Näin ollen 304L-teräksen korroosionkesto on huonompi kuin 316L-teräksellä. Toisaalta matalamman nikkelpitoisuuden vuoksi, materiaali on myös edullisempaa. Kolmas elintarviketeollisuudelle tärkeä teräslaatu on 430L. Sen merkittävä etu on korkea sietokyky nitriittiä ja orgaanisia happoja, kuten askorbiinihappoa, kohtaan. [24; 28.] Lisäävällä valmistuksella tulostettuihin kappaleisiin käytetään ruostumattoman teräksen lisäksi myös niin sanottuja superseoksia. Superseoksiksi kutsutaan pääosin nikkelistä, koboltista tai raudasta valmistettuja korkealaatuisia metalliseoksia. Eräitä superseoksia ovat muun muassa Monel, Incoloy, Inconel ja Hastelloy. Seoksilla, joissa käytetään pääasiallisesti nikkeliä, on hyvät lujuus- ja korroosionkest ominaisuudet sekä ne kestävät korkeita lämpötiloja. [29.]

Muita elintarviketeollisuudessa käytettyjä metalleja ovat muun muassa alumiini ja kupari. Alumiinin etuja ovat sen hyvä korroosion kestävyys, materiaalin keveys sekä suhteellisen edullinen hinta. Alumiinin lujuusominaisuudet ovat kuitenkin huonot verrattuna teräkseen, mikä vaikuttaa merkittävästi sen käyttömahdollisuuksiin. Kuparin ongelmakohdaksi on sen heikko vastustuskyky happoja kohtaan. Näin ollen kuparia ei suositella olevan kosketuksissa elintarvikkeisiin, joilla on luonnostaan matala pH-arvo. [24.]

4.4 Materiaalien mekaaniset ominaisuudet

Materiaalin mikrorakenne määrittelee suoraan tulostetun kappaleen mekaanisia ominaisuuksia. Ymmärrys mikrorakenteen merkityksestä kappaleen ominaisuuksille kasvaa,

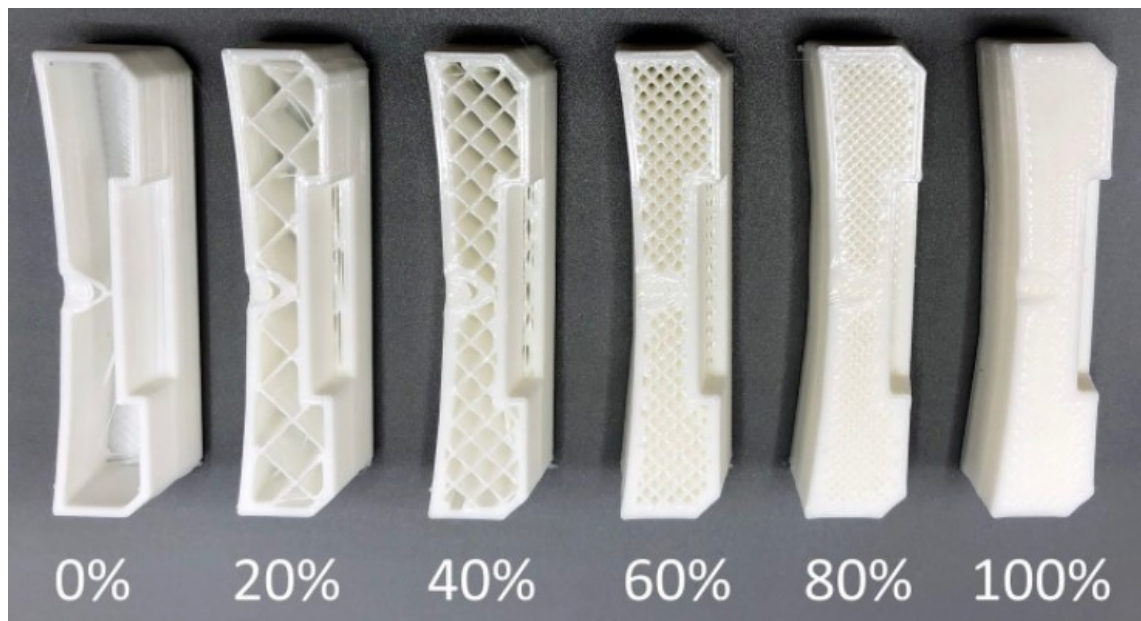
kun lisäävän valmistuksen myötä yritys pystyy itse määrittelemään tuotantolaitoksen varaosissa käytettävän materiaalin. Tärkeitä kappaleen lujuuteen vaikuttavia ominaisuuksia ovat kimmokerroin sekä murtolujuus. Kimmokerroin eli Youngin moduuli kuvastaa kappaleen jäykkyyttä kimmoisella eli palautuvan muutoksen alueella, kun kappaleeseen kohdistuu ulkoinen voima. Mitä suurempi on kimmokertoimen arvo, sitä pienempi kappaleen muodonmuutos on. Murtolujuus puolestaan kuvaa pinta-alayksikköön kohdistuvaa suurinta voimaa, jonka kappale kestää murtumatta. [30.] Taulukossa 1 on esitettyä tyypillisiä metalliseoksia, joita voidaan käyttää lisäävässä valmistuksessa. Taulukosta voidaan todeta, että metallien kimmokerroin ominaisuudet ovat melko lähellä toisiaan. Sen sijaan materiaalien murtolujuuksissa on hieman eroa, minkä voi havaita esimerkiksi verrattaessa ruostumattoman teräksen 316L- ja 17-4PH-seoksia keskenään. 17-4PH-teräksen nimellä viitataan seoksen nikkeli- (noin 17 %) ja kromipitoisuuksiin (noin 4 %). Sen lujuuskestävyys ja muut mekaaniset ominaisuudet tekevät siitä suosittua materiaalia teollisuuden käyttökohteissa. 316L-teräksen murtolujuus on heikompi kuin 17-4PH:lla, mutta hyvä korroosionkesto tekee siitä käytetyn materiaalin teollisuudessa. [31.] Eräs lujimmista tulostemateriaaleista on superseokseksi luokiteltu Inconel. Se on yhdysvaltalaisen Special Metals Corporationin tuotemerkki ja materiaalille on tyypillistä korkea nikkelpitoisuus. Inconel 718:ssa on nikkeliä jopa 50–55 %, kromia 17–21 % sekä pieniä määriä niobiumia, tantaalia ja molybdeenia. Loppuosa materiaalista on pääosin rautaa. [32.] Lisäksi Inconel 718 on korroosionkestävämpää materiaalia kuin esimerkiksi 316L-teräs [33].

Taulukko 1. Tulostettavien metallien lujuusominaisuuksia [10, s. 84].

Metalli	Kimmokerroin [GPa]	Murtolujuus [MPa]
Ti6Al4V	110–120	930–1020
CP-Ti	–	570
316L ruostumaton teräs	184–185	633–640
Maraging teräs	160	1110
17-4PH ruostumaton teräs	160–170	850–1300
Co-Cr-Mo	191–200	960–1100
IN625	170–182	827–961
IN718	166–170	994–1241
AlSi10Mg	60–78	240–361

4.5 Muovisten osien ominaisuudet

Metallisten osien lisäksi teollisuudessa käytetään jonkin verran myös muovisia osia. Lisäksi voi olla osia, kuten tuotantokoneiden jarrupalat, joissa käytetään sekä metallia että muovia. Tyypillisimpiä 3D-tekniikassa käytettyjä muovimateriaaleja ovat muun muassa polyetyleenitereftalaattiglykoli (PETG), polylaktidi (PLA) ja akrylinitriilibutadienistyreeni (ABS). Edellä mainituista materiaaleista PETG:llä on parhaimmat lujuusominaisuudet. Se on kestävä materiaalia ja sillä on hyvä lämmönkestävyys. Näin ollen PETG soveltuu hyvin käytettäväksi mekaanisissa osissa. Myös PLA:lla on hyvä lämmönkestävyys, jos materiaalia lämpökäsitellään. ABS on puolestaan yksi käytetyimmistä muovimateriaaleista, mutta sen tulostaminen on vaikeampaa kuin PETG:n tai PLA:n. ABS:n tulostuksesta vapautuu myrkyllistä höyryä, minkä vuoksi kappaleen valmistuksessa käytetään tyypillisesti tulostuskammiota. Tulostus pystytään toteuttamaan myös ilman kammiota asianmukaisesti ilmastoidussa tilassa. ABS on huomattavasti herkempi lämpötilanvaihtelulle tulostusvaiheessa kuin PETG tai PLA. Liian nopea viilentyminen vaikuttaa ABS-kappaleen rakenteelliseen kestävyYTEEN merkittävämmiin kuin edellä mainituilla muoveilla. [34; 35.] 3D-tulostustekniikalla pystytään myös määrittämään kappaleen täyttöaste eli kuinka tiheästi kappaleen sisällä on materiaalia. Usein jo 60–70 prosentin täyttöaste takaa riittävät lujuusominaisuudet kappaleelle (kuva 4). Erityisesti suurempia muovitulosteita valmistettaessa korkealla täyttöasteella on vaikutusta sekä kappaleen hintaan että valmistusaikaan. [36.]



Kuva 4. Muovisia kappaleita eri täyttöasteilla [36].

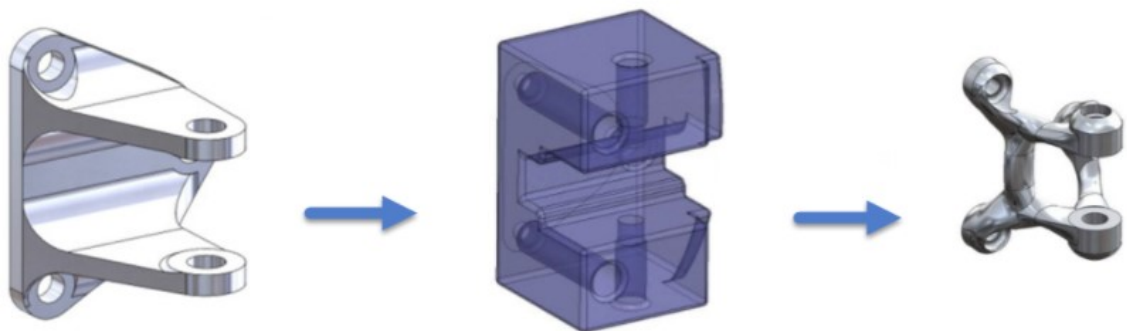
PET eli polyetyleenitereftalaatti on vahvaa ja kevyttä materiaalia, jota käytetään erityisesti elintarvikepakkauksissa. Terveysviranomaiset ympäri maailman ovat todenneet PET:n olevan elintarviketurvallinen materiaali. Sen hyvät lujuus- ja kosteuden hylkimisominaisuudet takaavat laajat käyttömahdollisuudet elintarviketeollisuudessa. Lisäksi materiaalilla on korkea sietokyky erilaisia happoja kohtaan. Materiaaliominaisuuksiltaan PET on pääosin vastaavaa verrattuna PETG:hen. 3D-tulostuksessa käytettävä PETG on polyetyleenitereftalaattia, johon on lisätty glykolia tulostamisen helpottamiseksi ja materiaalin vahvistamiseksi entisestään. [34; 37.] PETG:n murtolujuus on tyypillisesti 60–66 MPa [38].

ABS on amorfinen polymeeri, jolla on hyvä iskunkestävyys sekä sietokyky kemikaaleja ja lämmönvaihteluja kohtaan. Lisäksi ABS on edullisuutensa vuoksi suosittu materiaali teollisuudessa. Elintarviketeollisuuden lisäksi materiaalia käytetään tyypillisesti autoteollisuudessa. ABS on myös laajasti käytetty materiaali muoviputkien valmistuksessa. ABS:n 3D-tulostettavuus ja lujuusominaisuudet ovat kuitenkin heikompia verrattuna PETG:hen, joten materiaali on vähemmällä käytöllä lisäävässä valmistuksessa kuin esimerkiksi PETG. Toisaalta ABS kestää jopa 100 celsius-asteen, kun PETG:n lämmönkesto ylittää vain noin 80 celsius-asteeseen. [39; 40.] PLA on termoplastinen polymeeri, jota pystytään valmistamaan erilaisista hiilihydraattiyhdisteistä sisältävistä lähteistä, kuten maissintähkystä. Materiaalia hyödynnetään jo esimerkiksi lääketieteen sovelluksissa

sekä elintarvikepakkauksissa. Viime vuosina on myös kyseenalaistettu PLA:n ympäristövastavuutta, vaikka materiaali valmistetaan luonnonmukaisista raaka-aineista. Luontoon jätetyn PLA-materiaalin biohajoaminen voi kestää jopa 80 vuotta, joten materiaali vaatii teollisen kompostoinnin. [41.]

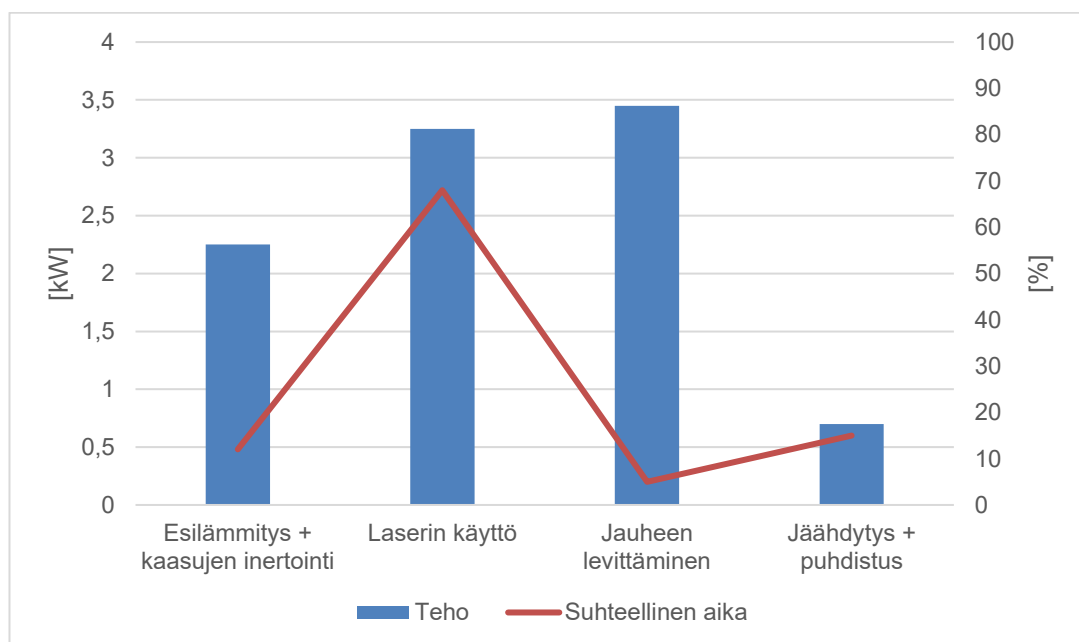
4.6 Tekniikan energiankulutus

Lisäävän valmistuksen nopean kehittymisen rinnalla on alettu tuoda esiin myös tekniikan ympäristöhyötyjä. Verhoef ym. esittivät tutkimuksessaan, että tekniikalla voitaisiin vähentää energiankäyttökustannuksia 5–25 % vuoteen 2050 mennessä. Tulokset perustuivat ilmailu- ja rakennusalaan tehtyihin tutkimuksiin, jotka ekstrapoloitiin vastaamaan kaikkien toimialojen yhteiskulutusta. [42, s. 349.] Tekniikka tarjoaa vaihtoehdoisen ratkaisun laskea raaka-aineen, tuotteen valmistuksen ja logistiikan synnyttämää hiilijalanjälkeä. Jo ennen kuin kappaletta on päästy tekemään, niin itse materiaaliin on kulunut myös energiaa. Näin ollen kappaleiden valmistuksessa tullaan huomioimaan jatkossa materiaalin entistä tehokkaampi hyödyntäminen. Topologian optimoinnilla pystytään myös laskemaan tunnetun kuormituksen avulla kappaleeseen tarvittavan materiaalin määrä (kuva 5). Tällöin voidaan määrittää tietyt mitat sekä ulkoinen voima, joka kappaleen tulee kestää. Ohjelma laskee annetuilla parametreilla kappaleelle kohdat, jotka voidaan jättää alkuperäisestä osasta tulostamatta. Lisäksi 3D-tekniikka pystyy madaltamaan kappaleeseen sisällynyttä energiaa korvaamalla sen toisella materiaalilla. Esimerkiksi osa laitteen metallisista osista voisi korvata komposiitilla, jolloin materiaaliin sisältyvä energiamäärä on alhaisempi. [43.]



Kuva 5. Kappaleen uudelleenmallinnus topologian optimoinnilla [44].

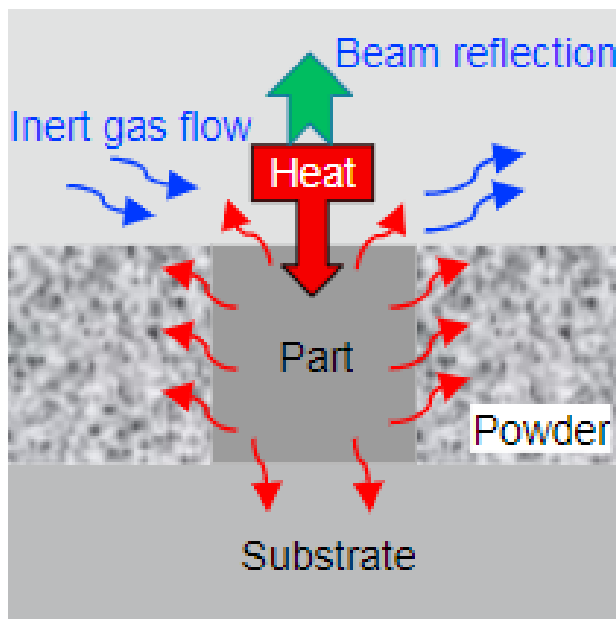
Kappaleen tulostukseen kohdistuvaa energiankulutusta tutkitaan yleisesti laite- ja prosessitasolla. Liu ym. tutkivat jauhepetimenetelmällä valmistetun metallikappaleen kuluttamaa tehoa. Laitteen tehonkulutus muodostuu pääosin laitteen esilämmityksestä ja kaasujen inertoinnista, laserin käytöstä, jauheen levittämisestä sekä jäähdytys- ja puhdistusvaiheesta. Inertoinnilla tarkoitetaan ilmassa olevien kaasujen muuttamista epäreaktiiviseen muotoon. Kuvasta 6 voidaan todeta, että selvästi suurin tehonkulutus kohdistuu laserin käyttöön sekä jauheen levittämiseen. Laserin suurta energiankulutusta korostaa ennen kaikkea se, kuinka paljon aikaa kuluu laserin käyttöön suhteessa materiaalin levittämiseen. Tutkimuksessa koko valmistusprosessiin kului aikaa noin neljä tuntia, josta yli 60 % kului laserin käyttöön ja vain noin 5 % jauheen levittämiseen. [45, s. 835–836.]



Kuva 6. Jauhepetisulatuksen eri vaiheiden vertailu [45, s. 836].

Samassa tutkimuksessa perehdyttiin myös jauhepetisulatuksen aiheuttamiin lämpöhäviöihin prosessitasolla (kuva 7). Jauhepetisulatus voidaan toteuttaa lasersäteen tai elektronisuihkun avulla. Tutkijoiden mukaan kaikkien metallisia osia valmistavien menetelmien suurimman lämpöhäviön aiheuttaa kappaleen tulostusalusta. Kappale rakennetaan kiinteään aineen päälle, joka sitoo lämpöä tehokkaammin kuin kappaletta ympäröivä jauhe tai ilmassa olevat kaasut. Tutkimuksessa todettiin, että erityisesti elektronisuihkumenetelmän ongelmakohtana on liiallinen jauhepedin esilämmitys. Tällöin

rakennettavasta kappaleesta johtuu lämpöä ympäröivään jauheeseen entistä enemmän. Lisäksi molempiin menetelmiin vaikuttivat energianlähteenä olevan säteen osittainen heijastuminen kappaleesta sekä inertin kaasuvirran aiheuttama lämmön karkaaminen. Kaasuvirralla on kuitenkin prosessin kannalta merkittävä rooli, sillä epäreaktiivisen ympäristön mahdollistamisen lisäksi se poistaa höyrystyviä jauhepartikkeleita kappaleen pinnalta. Höyrystyminen lisää valmistusvirheitä ja heikentää näin ollen kappaleen laatua. [45, s. 837–838.]



Kuva 7. Jauhepetisulatuksen hukkalämpö [45, s. 838].

Energiankulutuksen kannalta mahdollisesti tärkein 3D-tekniikan mahdollistama kehityskäsi on logistiikan aiheuttaman hiilijalanjäljen laskeminen merkittävästi, sillä koko toimitusketju muuttuu. Tekniikan avulla on mahdollista minimoida rahtikuljetuksen kustannukset, ilmastopäästöt sekä toimitukseen liittyvät aikataulusongelmat. Kestävä kehitys tulee olemaan tulevaisuudessa entistä merkittävämpi yritysimagolle. Yrityksen oman tuotannon aiheuttamien päästöjen lisäksi myös toimitusketjujen aiheuttamat päästöt tulee huomioida. [46, s. 189–190.] OECD-maiden tekemän arvion mukaan toimitusketjuista on tullut entistä pitempiä ja monimutkaisempia, kun rahtikuljetusverkot kattavat yli valtamerten ja maanosien. Rahtikuljetuksen kilpailutilanne on lisännyt entisestään painetta nopeille, tiheään aikavälin toimituksille. Tämä puolestaan on saanut aikaan rahtikuljetukset liikkumaan pienemmällä kapasiteetilla, mihin olisi mahdollisuus. Seurauksena on luonnollisesti lisääntyvä rahtiliikenne, jotta kaikki tilaukset saadaan toimitettua perille. Oli

kyseessä sitten rahtiliikenne meri-, maa- tai ilmaitse, niin toimitukset kuluttavat runsaasti fossiilisia polttoaineita ja vapauttaa ilmakehään hiilidioksidipäästöjä. OECD-maiden International Transport Forumin arvion mukaan Atlantin ylittävän rahtiliikenteen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt tulevat lähes kolminkertaistumaan vuosina 2010–2050. Samalla aikavälillä Aasian sisäisen rahtiliikenteen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen arvioidaan yli nelinkertaistuvan. Uusituvia polttoaineita kehitetään jatkuvasti, jotta päästöjä saataisiin vähennettyä. Tästä huolimatta tulee kuitenkin kehittää myös ratkaisuja, joilla saadaan kehitettyä rahtiliikenteen kapasiteetin tehokkuutta. [47.]

4.7 Taloudellinen kestävyys

Niaki ym. tutkivat lisäävän valmistuksen tarjoamia taloudellisen kestävyuden kehitysmahdollisuuksia yrityksille. Tutkijoiden mukaan 3D-tulostustekniikka mahdollistaisi matalammat kustannukset erityisesti kokonaan uusien osien luomisessa sekä tuotantomäärien ollessa pieniä. Tutkijat arvioivat, että tietyn osan kertavalmistusmäärän ylittäessä 200 kappaletta alkaisi perinteinen valmistusmenetelmä olla kustannustehokkaampi vaihtoehto. Tällöin tuotantomäärän kasvu saa aikaan kappaleen yksikkökustannusten laskun, johon 3D-tekniikka valmistusmenetelmänä ei kykene vastaamaan. Tutkijoiden mukaan kustannustehokas kertavalmistusmäärä lisäävällä valmistuksella tehdyille osille on alle 40 kappaletta. Toisaalta 3D-tekniikka mahdollistaa kustannustehokkaan valmistuksen yksilöidylle ja kompleksille kappaleelle. Valmistuksessa ei tarvita työkaluja tai muotteja, joten se vähentää kustannuksia toistuvista apuvälineistä vaativista valmistusprosesseista. Tutkijoiden mukaan yrityksen koko ja kokemus 3D-tekniikasta ovat merkittäviä tekijöitä siihen, miten tekniikkaa pystytään hyödyntämään. Muovisten osien valmistaminen 3D-tekniikalla on luonnollisesti edullisempaa kuin metallisten osien. Lisäävällä valmistuksella tehtyjen muovisten osien voittomarginaali jää kuitenkin pieneksi, sillä myös muoviosien ostokustannukset ovat yritykselle pienet. Näin ollen metallisten osien valmistuksella yritys saa suuremman taloudellisen hyödyn kuin muovisilla osilla. Pääosin teollisuudenalan yritykset tarvitsevat nimenomaan metallisia varaosia. [48, s. 355, 361–362.]

5 3D-skannaaminen ja takaisinmallinnus

Pyörivällä alustalla oleva kappale voidaan mallintaa tietokoneohjelmalle telineeseen asennetulla skannerilla, jolloin prosessia pystytään automatisoimaan. Toinen vaihtoehto on skannata kappale kannettavalla skannerilla, jolloin itse skannattava kohde pysyy paikallaan. Lasersäteet tunnistavat kappaleen muotoja ja muodostavat datasta pistepilven tai kolmioista muodostuvan verkon. Pistepilvi muodostuu valtavasta määrästä datapisteitä kolmiulotteisessa xyz-koordinaatistossa. [49.] Ennen skannausta asetetaan mitausresoluutio, jolla määritetään, kuinka tiheästi kappaleesta mitataan mittapisteitä. Lisäksi kiiltävät ja mattapintaiset materiaalit heijastavat valoa eri tavoin, mikä vaikeuttaa kappaleen skannausta. Valotusaikaa säätämällä skanneri pystyy kuitenkin tunnistamaan myös erivärisiä ja -laatuisia pintoja. Käytettävä mallinnusohjelma visualisoi reaaliaikaisesti, kuinka suuri osuus kappaleesta on skannattuna. Skannauksen jälkeen ohjelmisto viimeistelee mallia, jolloin siitä poistetaan muun muassa skannauksen aikana tulleita mittapistevirheitä. Skannauksen lopputuloksena muodostuu datapisteet, joita pystytään hyödyntämään mallinuksessa. [50.]

Tietyissä harvoissa tilanteissa pystytään suoraan tulostamaan datapisteistä valmis kappale, mutta useimmiten mallia joudutaan käsittelemään manuaalisesti takaisinmallinnuksen avulla. Takaisinmallinnus tarkoittaa prosessia, jossa kappale puretaan komponentteihin, jotta sen sisältämä suunnitteluinformaatio saadaan määritettyä. Takaisinmallinnusta hyödynnetään muun muassa silloin, kun alkuperäistä osaa ei ole enää saatavilla, muttei myöskään haluta tilata kokonaan uutta laitetta. Suunnittelija tarvitsee takaisinmallinukseen alkuperäisen osan, josta voi määrittää sen ominaisuuksia ja geometriaa. Kappaleen mittojen avulla saadaan piirrettyä mallinnusohjelmalla 2D-piirros, josta on helppo luoda tulostukseen tarvittu 3D-malli. [51.]

Metallista valmistettujen tulosteiden laatuun ja hintaan voidaan vaikuttaa huolellisella suunnittelutyöllä. Valmistusmenetelmä mahdollistaa materiaalin käytön kappaleeseen tarpeen mukaan, mutta suunnittelijan tulee tietää myös tulostustekniikan sisältämät rajoitteet. Metallikappaleita tulostettaessa suositellaan seinämän paksuudeksi minimissään 0,5 mm. Tulostin pystyy tyypillisesti valmistamaan halkaisijaltaan 0,5 millimetrin reikiä. Toisaalta halkaisijaltaan yli 3 millimetrin kokoiset reiät saattavat tarvita tukimateriaalia, kun kappaletta tulostetaan halkaisijan suuntaisesti ylöspäin. Poikkeuksena jauhepetimenetelmä, jossa tukimateriaalia ei tarvita missään olosuhteissa. Lisäksi pinnat,

jotka ovat 0–45 asteen kulmassa rakennusalustaan nähden, tarvitsevat tukia. Yli 55 asteen kulmien tulostus pystytään tyypillisesti toteuttamaan ilman tukia. Kappaleisiin tehtävien kaiverrusten minimisyvyudeksi on tyypillisesti ohjeistettu 0,5 mm. [52.]

Topologian optimoinnilla viitataan suunnitteluvaiheessa määritettävään materiaalin määrään kappaleessa. Ilman optimointia kappaleessa saattaa olla käytettynä tarpeeton määrä materiaalia, joka puolestaan aiheuttaa yritykselle ylimääräisiä kustannuksia. Suunniteltaessa uutta kappaletta topologian optimoinnin avulla pystytään määrittämään kappaleeseen kohdistuva kuormitus ja suunnitteluohjelma laskee varaosalle optimaalisen muodon. Suunnitteluohjelmistoja on useita, ja niillä voidaan mallintaa kappaleelle ideaaliset mitat käyttötarkoituksiin nähden. Esimerkiksi Autodesk Inventor -mallinnusohjelman Shape Generator -toiminnolla pystytään määrittelemään kappaleen topologiaa. Ohjelmalla voidaan määrittää muun muassa kappaleeseen kohdistuvien tuentojen sijainnit, kuormituksen suuruus ja sijainti sekä tavoiteltava vähennettävän materiaalin tilavuus. Suunnitteluohjelma laskee annetuilla parametreilla kappaleelle optimaaliset muodot. Ohjelman generoima malli voi olla rakenteeltaan monimutkainen, joten suunnittelijan tulee vielä käsitellä muotoja. [53.]

Lisäävän valmistuksen etuna on alhainen buy-to-fly-suhde, jolla kuvataan hankitun materiaalin ja lopullisen kappaleen massojen välistä suhdetta [54, s. 1560; 55, s. 65]. Liu ym. tutkimuksessa määritettiin lentokoneissa käytettävälle kannatinosalle buy-to-fly-suhdeluku sekä perinteisellä valmistusmenetelmällä että lisäävällä valmistuksella. Perinteisellä menetelmällä saatiin 8,72 kilogrammasta materiaalia valmistettua 1,09 kilogramman lopputuote. Lisäävällä valmistuksella tehtiin vastaavaan käyttötarkoitukseen topologiaaltaan optimoitu 0,38 kilogramman lopputuote käyttäen ainoastaan 0,57 kilogrammaa materiaalia valmistukseen. Näin ollen perinteisen valmistusmenetelmän suhdeluku oli 8:1 ja lisäävän valmistuksen 1,5:1. Jauhepetimenetelmällä pystytään näin ollen säästämään merkittävästi materiaalihankintakustannuksissa, sillä tutkimuksessa perinteiseen menetelmään hankitulla materiaalmäärällä olisi pystytty valmistamaan 3D-tekniikalla 15 vastaavaan käyttötarkoitukseen suunniteltua osaa. [45, s. 843.]

6 Testiosan valmistaminen

6.1 Kappaleen valinta ja mallintaminen

Kokeelliseen osioon pyrittiin valitsemaan ominaisuuksiltaan ja käyttötarkoituksiltaan ideaalisin kappale tulostustekniikan testaamiseen. Mallinnettaviksi kappaleeksi valikoitui Handtmann VF100 -tuotantokoneen paineentasausmäntä (kuva 8). Paineentasausmäntä on kooltaan pieni, joten sen todettiin olevan ideaalinen testikappale valitun tulostusmenetelmän laadun ja tarkkuuden määrittämiseen. Valintaan vaikutti myös sen symmetrinen ja selkeä geometria. Kappale on valmistettu ruostumattomasta teräksestä, mutta tarkemmista kemiallisista ominaisuuksista ei ollut saatavilla tietoa. Alkuainepitoisuudet päätettiin kuitenkin selvittää XRF-analysaattorin avulla ja tulokset ovat esitettyinä luvussa 6.2 yhdessä tulostetun kappaleen alkuaineosuuksien kanssa. Lisäksi päädyttiin ratkaisuun, että paineentasausmännän mittojen määrittämiseen ei käytetä 3D-skanneria, vaan avainmitat määritetään käsin mittaamalla.

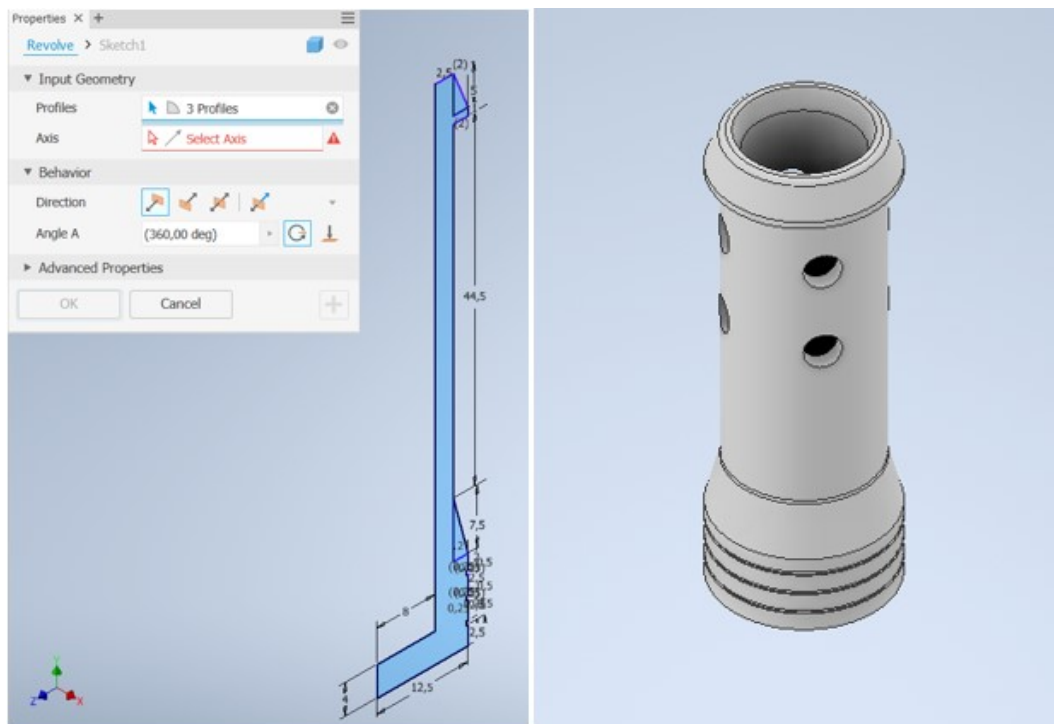


Kuva 8. Alkuperäinen paineentasausmäntä.

Ennen mallinnuksen ja tulostamisen aloittamista tehtiin arvio varaosien mallinukseen liittyvistä ongelmakohtista. Paineentasausmännän alaosassa on kolme uraa, joiden

syvyydeksi arvioitiin 0,25 mm. Yleisesti suositellaan, että tulostettavassa metallisessa kappaleessa olevan uran syvyys olisi minimissään 0,5 mm [52]. Toisaalta urien vaikutus itse männän toimintaan on lähes olematon, joten niitä voidaan tarvittaessa muokata. Toinen ongelmakohta on paineentasausmännän seinämän paksuuden vaikea mittaaminen. Ongelma ratkaistiin arvioimalla seinämän reikien kohdalta paksuudeksi 2,5 mm. Lisäksi silmänmääräinen arviointi varmistettiin vielä mittaamalla kappaleen ympärysmitta. Vertaamalla kappaleen sisähalkaisijaa ja ympärysmittan avulla ratkaistua ulkokehän halkaisijaa todettiin, että alkuperäinen arvio oli riittävän tarkka.

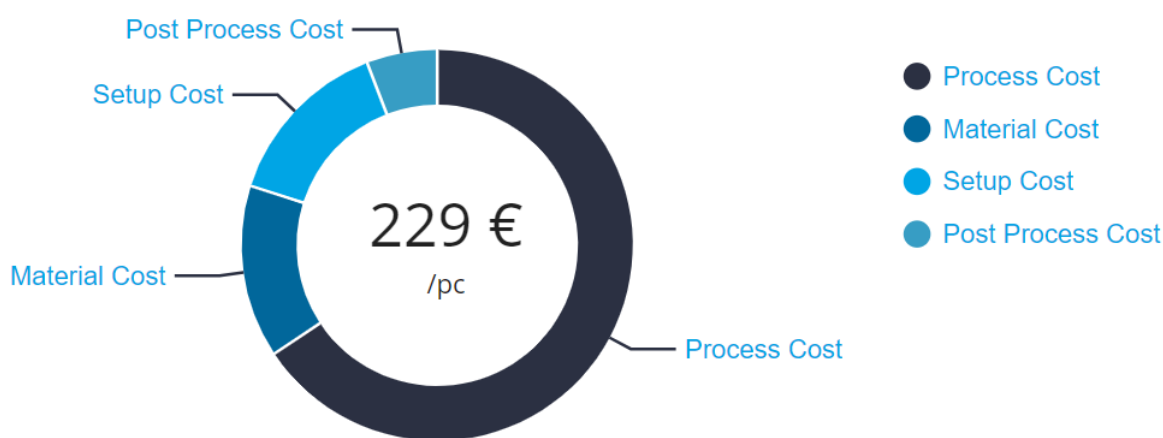
Koneiden varaosille on tyypillistä, että kappaleen muodot ja avainmitat ovat helposti mitattavissa. Tämä mahdollistaa usein varaosan mallinnuksen ilman 3D-skannaamista. [33.] Paineentasausmännän mitat määritettiin näin ollen käsin ilman kappaleen skannaamista. Varaosan korkeudeksi mitattiin 69 mm ja pohjasta mitattuna 65 mm. Pohjan halkaisija oli 25 mm ja sisäpohjan halkaisijaksi mitattiin 16 mm. Lisäksi kappaleen yläosaan sisäreunaan tehtiin viiste, jolla yläosan sisähalkaisija kasvoi 2 mm alaosan sisähalkaisijaan verrattuna. Kappaletta mallinnettaessa oli huomioitavaa sen symmetrisen pyöreä muoto. Näin ollen mallintaminen päädyttiin toteuttamaan piirtämällä pohjapiirroskuva kappaleen säteen poikkileikkauksesta Autodesk Inventorilla (kuva 9). Revolve-komennolla saatiin pyöräytettyä piirretty 2D-piirros valitun akselin ympäri ja näin tehtyä mallin muodot. Mallia työstettiin vielä tekemällä yhteensä kahdeksan reikää alkuperäisen kappaleen mukaisille paikoille sekä pieniä pyöristyksiä kulmiin. Mallinnuksen päätteeksi tiedosto muutettiin STL-muotoon, jonka jälkeen kappale oli valmis 3D-tulostettavaksi.



Kuva 9. 2D-piirros sekä lopullinen mallinnus paineentasausmännästä.

Ennen tulostamisen aloittamista arvioitiin vielä valmistusprosessin kustannuksia. Lisä-
vän valmistuksen kustannuslaskentaan on tarjolla useita eri ohjelmia, mutta tässä pro-
jektissa käytettiin suunnittelutoimisto Etteplanin pilvipohjaista AMOTool-kustannuslas-
kentaohjelmaa. AMOToolia käytettäessä ei tarvita valmista 3D-mallia, vaan kustannus-
ten arviointiin käytetään tulostuksen kannalta tärkeimpiä parametrejä. Näitä ovat muun
muassa kappaleen korkeus, tilavuus, käytetty materiaali sekä arvio vuosittaisesta tulos-
tustarpeesta kappaleelle. Ohjelman vahvuus on ennen kaikkea siinä, että sitä voidaan
käyttää jo suunnitteluprosessin alussa, jolloin ei välttämättä ole vielä saatavilla mallin-
nettua kappaletta. Mallinnetun kappaleen pohjalta määritettiin tarvittavat parametrit, joi-
den avulla ohjelma laski arvion kappaleen valmistuskustannuksista. Ohjelma erittelee
kustannukset prosessi-, materiaali-, asennus- ja jälkikäsitteilykustannuksiin. Prosessi-
kustannukset ovat suurin yksittäinen kustannuserä kappaleen valmistuksessa. Siihen si-
sältyvät laitteen käyttökustannukset sekä tekniikan asiantuntijuudesta laskuttaminen. Li-
säksi materiaalikustannuksiin vaikuttavat todellisuudessa myös hankintamäärät, sillä
suurempien tilauserien seurauksena saadaan materiaalin hankintakustannuksia mata-
lammaksi. [56.]

Tulostuksen kustannusarvioksi ohjelma laski 229 euroa, josta prosessikustannukset ovat 66 %, materiaalikustannukset 14 %, asennuskustannukset 14 % ja jälkikäsittelykustannukset 6 % (kuva 10). Tavoitehinta kappaleelle on lähempänä sataa euroa, joten tulosteen tilaamisen ulkopuoliselta palveluntarjoajalta voidaan todeta olevan liian kallista. Useampien kappaleiden samanaikainen valmistus luonnollisesti laskee yksikköhintaa. Huomioitavaa on kuitenkin, että prosessikustannukset muodostuvat pääosin 3D-tulosteen valmistavan yrityksen laitteen käytön laskuttamisesta. Toisin sanoen yritykselle, joka pystyy käyttämään omaa 3D-tulostinta osien valmistukseen, valmistuskustannuksia aiheuttaa pääosin vain materiaalikustannukset. Laitteen hankintaan liittyvät kustannukset ovat toki korkeat.



Kuva 10. AMOTool-ohjelman laskemat kustannukset paineentasausmännän tulostamiselle.

Paineentasausmäntä päädyttiin tulostamaan jauhepetimenetelmällä käyttäen materiaalina Inconel 718 -jauhetta. Inconelia käytetään muun muassa lentokoneiden moottoreissa ja turbiineissa, joissa materiaalilta vaaditaan sietokykyä suurille paineenvaihteille. Lisäksi kyseinen materiaali sietää korkeita suolapitoisuuksia eri lämpötiloissa. [29.] Materiaali on näin ollen lujuus- ja korroosionkesto-ominaisuuksiltaan parempi kuin esimerkiksi ruostumattoman teräksen 316L-seos [33]. Nimenomaan korroosionkesto on elintarviketeollisuuden laitteistoissa tärkeää. Lopuksi tulostusohjelmalla arvioitaessa kappaleen tulostettavuutta jouduttiin männän alaosaan olleita uurteita hieman vielä muokkaamaan. Valmistajan toiveesta jokaisen uran yläosaan tehtiin pieni pyöristys, jotta tulostus onnistuu paremmin.

6.2 Kappaleen valmistuksesta saadut tulokset

Projektin kannalta tärkein informaatio koski kappaleen laatua sekä tulostusnopeutta. Ennen kaikkea tutkimuksissa kiinnosti, kuinka selkeästi tulostekerrokset ovat aistinvaraisesti havaittavissa. Elintarvikkeiden kanssa kosketuksissa oleville varaosille on olennaista, ettei pinnassa ole tulostuksen aiheuttamia uurteita, joihin voisi jäädä elintarvikkejäämiä. Tulostusmuotona käytetylle jauhepetimenetelmälle on tyypillistä, että kappaleesta muodostuu mattapintainen. Kappaleen yläosasta hiottiin pintaa hieman pois, jotta metallin tulostusrakenne saatiin paremmin näkyville (kuva 11). Rakenne osoittautui korkealaatuiseksi, ja selkeää eroa alkuperäisen kappaleen pintarakenteeseen ei ollut havaittavissa. Paineentasausmännän tulostukseen, lämpökäsittelyyn ja jäähtymiseen kului aikaa kaiken kaikkiaan noin kaksi vuorokautta. Tulostimia on tehokkuudeltaan erilaisia, ja näin ollen myös korkeampi tulostusnopeus on mahdollista. Nopeampi tulostusprosessi vaikuttaa luonnollisesti myös tulostimen hintaan. Männän alaosassa olleiden urien tulostaminen osoittautui vaikeaksi, kuten oletettiin. Urien alkuperäinen syvyys oli 0,25 mm, joka on puolet suositellusta minimisyvyydestä. Uria päädyttiin jyrsimään koneellisesti esiin, vaikka niiden merkitys kappaleen toiminnan kannalta on vähäinen. Lisäksi lämpökäsittelyllä parannettiin kappaleen lujuusominaisuuksia ja varmistettiin, ettei käytön yhteydessä pinnasta irtoa materiaalia. [33.]



Kuva 11. Vasemmalla alkuperäinen ja oikealla 3D-tulostettu kappale kahdesta eri kuvakulmasta.

Tulostuksen kokonaiskustannuksiksi tuli 190 euroa, joten AMOTool-laskentaohjelma arvioi kustannuksia kohtuullisen hyvin. Kappaleen toiminnallisuutta arvioitaessa kiinnitettiin ensin huomiota tulosteen sisähalkaisijaan. Se osoittautui noin 0,5 mm liian kapeaksi joustavasta varten, joka asetetaan tuotantokoneen kasausvaiheessa männän sisään. Jousi mahtui sisään, mutta hankaa hieman männän sisäreunaa. Ongelma on korjattavissa hiomalla männän sisäreunaa, mutta 3D-mallin kehittämisen kannalta parempi ratkaisu on korjata kappaleen pohjapiirroksen mittoja tarvittavista kohdista. Sekä männän alaosan halkaisijan että yläosan siivekkeiden kärkivälin mitattiin myös olevan noin 0,5 mm lyhyemmät kuin alkuperäisessä osassa. Valmistuneen tulosteen perusteella tehtiin johtopäätös, että kappaleet on syytä mallintaa jatkossa skannaamalla. Varaosissa jo 0,5 millimetrin ero kappaleen mitoissa on merkityksellistä, sillä liian pieni varaosa heiluu koneen sisällä ja saattaa vahingoittaa sen rakenteita.

Sekä alkuperäisen että tulostetun osan alkuaineosuuksia mitattiin XRF-analysaattorin avulla. Taulukossa 2 on esitettyä alkuperäisen paineentasausmännän suurimmat alkuainepitoisuudet. Analyysilaitteen mukaan lähimpänä tutkitun kappaleen alkuaineominaisuuksia oli ruostumattoman teräksen 434-seos, jonka alkuaineosuudet ovat esitettyä myös taulukossa 2. AISI-standardin mukaista 434-terästä vastaava seos EN-standardeissa on 1.4113. Analysoituun kappaleeseen verrattuna 434-teräksestä löytyy vastaavat osuudet rautaa, kromia, molybdeeniä, nikkeliä ja myös hieman kuparia. Kappaleen analysointi osoitti myös pieniä määriä kaliumia, jota ei yleisesti kuitenkaan 434-teräksessä ole. [57.]

Taulukko 2. Alkuperäisen osan alkuaineosuuksien vertailu 434:n kirjallisuusarvoihin [57].

	Alkuperäisen osan alkuainepitoisuudet (%)	434:n alkuainepitoisuuksien kirjallisuusarvot (%)
Rauta	80,1	Loppuosaa
Kromi	18,1	16,0-18,0
Molybdeeni	0,9	0,75-1,25
Nikkeli	0,4	maks. 0,5
Kalium	0,2	-
Kupari	0,1	maks. 0,1

Tulostetun kappaleen materiaalin tiedettiin jo ennen analysointia olevan Inconel 718. Analysoinnin avulla saatiin kuitenkin asiaan varmuus, sillä tulokset osoittautuivat odotetun kaltaisiksi. Tutkitusta kappaleesta löytyi kaikkia materiaalille tyypillisiä alkuaineita ja pääosin kaikki pitoisuudet osuivat myös raja-arvojen sisälle (taulukko 3).

Taulukko 3. 3D-tulostetun osan alkuaineosuuksien ja Inconel 718:n kirjallisuusarvojen vertailu [32].

	3D-tulostetun osan alkuainepitoisuudet (%)	Inconel 718:n alkuainepitoisuuksien kirjallisuusarvot (%)
Nikkeli	52,0	50,0-55,0
Kromi	19,4	17,0-21,0
Rauta	18,5	Loppuosa
Niobium	4,7	4,75-5,5
Molybdeeni	2,8	2,8-3,3
Titaani	1,2	0,65-1,15

Alkuperäisestä paineentasausmännästä tehdyn alkuaineanalyysin perusteella todennäköisin kappaleessa käytetty materiaali on siis ruostumattoman teräksen 434-seos. Ruostumattoman 434-teräksen murtolujuus on noin 450 MPa, kun taas Inconel 718:n lämpökäsittelyllä voidaan saavuttaa noin 1240 MPa:n murtolujuus. Lisäksi lujuutta ja korroosionkestoa parantavaa molybdeenia on tulostetussa kappaleessa korkeampi pitoisuus kuin 434:ssä vertailumateriaaleista. Korkea nikkelpitoisuus tekee Inconel-materiaalista luonnollisesti kalliin. Sijoittamalla omaan metallitulostimeen maksettavaksi yritykselle jää kuitenkin ainoastaan materiaalikustannukset. Näin ollen lisäävällä valmistuksella tulostettu Inconel-varaosa olisi todennäköisesti edullisempi ratkaisu kuin perinteisin menetelmin 434-teräksestä valmistetun varaosan hankinta. [32; 57.]

7 Lisäävän valmistuksen ongelmakohdat ja tulevaisuus

Suurin yksittäinen tulostustekniikkaan liittyvä kustannus on itse tulostin. Metallitulostimiin liittyvät kustannukset ovat vuosien aikana vähitellen laskeneet, mutta hinnat ovat edelleen alkaen useista tuhansista jopa satoihin tuhansiin euroihin. Yrityksen tulee tehdä mahdollisimman tarkat laskelmat, kuinka suuri osa varaosakannasta tulisi pystyä digitalisoimaan, jotta tekniikan hyödyntäminen on kannattavaa. Laskelmissa on huomioitavaa, että yritykselle ei todennäköisesti ole kannattavaa digitalisoida koko varaosavarastoa. Osalla varaosista vaihtuvuus on niin suurta, että perinteiset valmistusmenetelmät tulevat

edullisemmaksi. Lisäksi tiettyjen varaosien muodot voivat olla vaikea toteuttaa 3D-tulostimella. [18.]

Toinen tekniikan hyödyntämiseen tarvittu resurssi on osaava henkilöstö. Laitteen käyttäjällä tulee olla osaamista tulostustekniikan vaatimuksista kappaleen geometriaan liittyen. Riippumatta siitä, mallinnetaanko kappaleen muodot skannaamalla tai mittaamalla avainmitat käsin, tulee kappaletta käsitellä myös 3D-mallinnusohjelmalla. Tulostettua kappaletta tulee mahdollisesti vielä käsitellä, esimerkiksi hiomalla tai kuumakäsittelyllä. Näin ollen yrityksen tulee rekrytoida tai kouluttaa uudelleen henkilöstöä, jolla on osaamista suunnitteluohjelmistoista, 3D-tulostimista ja kappaleiden jälkikäsittelystä. Yritys voi toki ostaa ohjelmisto- ja tulostinosaamisen yhteistyöyrityksen kautta, mutta tämä lisää kustannuksia ja kappaleen valmistumiseen kuluvaan aikaa. Toisaalta, kun varaosasta on kerran mallinnettu digitaalinen kappale, sitä pystytään hyödyntämään loputtomasti ja tarvittaessa päivittämään mallia vastaamaan paremmin käyttötarpeita. [58.]

Jiangin ym. tutkimuksessa arvioitiin teknologian kehityksen lisäävän teollisen 3D-tulostuksen asemaa entisestään vuoteen 2030 mennessä. Tutkijat arvioivat, että tulevaisuudessa tulee lisääntymään laitteiden toimittajien palvelu, jossa laitteiden ohella myydään koneessa käytettävistä varaosista tehtyä digitaalista tietokantaa. Näin asiakasyritys pystyy tulostamaan paikallisesti tietyille koneelle suunnitellut osat. Myös materiaalivalikoiman laajeneminen ja ongelmat pitkissä rahtikuljetusmatkoissa lisäävät tekniikan hyödyntämisen suosiota paikallisesti yrityksen tiloissa. Kuitenkin massavalmistusta edellyttävien kappaleiden tuotanto toteutetaan todennäköisesti edelleen perinteisin menetelmin, sillä suurien tuotantomäärien kohdalla ei uskota tulostustekniikan olevan kannattavaa ainakaan vielä lähitulevaisuudessa. [59, s. 95–96.]

8 Yhteenveto

Projektissa toteutettiin katsaus lisäävän valmistuksen tarjoamista mahdollisuuksista varaosakannan hallintaan. Metallitulostimella valmistetulla koekappaleella testattiin tulostusmenetelmän nopeutta sekä kappaleen laatua ja lujuusominaisuuksia. Kirjallisuudesta saatujen lähtötietojen sekä työssä toteutetun kokeellisen osion perusteella tekniikan todettiin olevan potentiaalinen vaihtoehto yrityksen varastokannan kehitykseen.

Kokeellisessa osiossa valmistetun paineentasausmännän ominaisuuksista arviotiin ennen kaikkea materiaalin pinnanlaatua sekä lujuusominaisuuksia. Jauhepetimenetelmällä valmistettu kappale on mattapintainen, mikä ei kuitenkaan vaikuttanut sen toimintamekanismiin. Tulosteen pinta oli tasainen, eikä kerroksittainen valmistusmenetelmä aiheuttanut kappaleeseen aistinvaraisesti havaittavia uurteita. Alkuperäisen ja tulostetun kappaleen alkuainepitoisuuksien perusteella saatiin selvitettyä niiden lujuusominaisuuksia. Männän tulostaminen osoitti, että 3D-tekniikka mahdollistaa varaosan valmistuksen edullisemmin ja lujemmasta materiaalista kuin perinteisin keinoin valmistetussa kappaleessa.

HKScan tavoittelee hiilineutraaliutta koko toimitusketjultaan vuoden 2040 loppuun mennessä. Valtaosa yhtiön päästöistä tulee muualta kuin omasta tuotannosta, kuten esimerkiksi alkutuotannosta ja logistiikasta. Valmistamalla erityisesti kiireelliset varaosat paikallisesti tehtaalla saadaan vähennettyä logistiikan aiheuttamia päästöjä sekä kiireellisille rahtikuljetuksille tyypillistä vajaalla kuormakapasiteetilla ajamista. Tekniikan hyödyntäminen tarjoaisi yritykselle siis mahdollisuuden vähentää logistiikan aiheuttamia ympäristöpäästöjä ja näin omalta osaltaan olla mukana viemässä yhteiskuntaa kohti hiilineutraalia tulevaisuutta.

Lisäävä valmistus tarjoaa käyttäjälleen mahdollisuuden tulostaa varaosia valitsemastaan materiaalista ja haluamallaan aikataululla. Näin ollen yritys pystyy säästämään valtaosan perinteisin menetelmin valmistettujen varaosien hankintakustannuksista, sillä tulostustekniikkaa hyödynnettäessä jää maksettavaksi ainoastaan materiaalikustannukset. Pitkälle automatisoitu tulostusprosessi mahdollistaa myös työkustannusten minimoinnin. Hyödyntämällä lisäävää valmistusta yrityksille tarjoutuu mahdollisuus luoda digitaalisista varaosista rakennettu tietokanta sekä sen avulla tehostaa omaa kunnossapitoaan ja parantaa kilpailukykyään.

Lähteet

- 1 Ruzbarsky, Juraj. 2018. Breakdown Cause and Effect Analysis: Case Study. Management Systems in Production Engineering. Vol. 61, NO. 2, s. 83–87.
- 2 Immerman, Graham. 2018. The Real Cost of Downtime in Manufacturing. Verkkoaineisto. Machinemetrics. <<https://www.machinemetrics.com/blog/the-real-cost-of-downtime-in-manufacturing>>. 8.5.2018. Luettu 13.1.2021.
- 3 Weng, Sung-Shun; Chen, Kai-Ying & Li, Chih-Yuan. 2020. A Geometric Mean-based DEMATEL Model for Evaluating the Critical Challenges of Spare Parts Planning. Journal of Internet Technology. Vol. 21, NO. 1, s. 121–133.
- 4 HKScanin historia. Verkkoaineisto. HKScan Oyj. <<https://www.hkscan.com/fi/tieto-meista/historia/>>. Luettu 19.2.2021.
- 5 Markkina-alue Suomi. 2019. Verkkoaineisto. HKScan Vuosikertomus. <<https://www.hkscan.com/globalassets/hkscan.com/annual-report-2019/pdf/hkscanvuosikertomus2019.pdf>>. 5.2.2020. Luettu 19.2.2021.
- 6 Tavoitteena hiilineutraali ruoantuotanto 2040. Verkkoaineisto. HKScan Oyj. <<https://www.hkscan.com/fi/vastuullisuus/ymparisto-2020/zero-carbon/>>. Luettu 19.2.2021.
- 7 Järviö, Jorma & Lehtiö, Taina. 2017. Tuotanto-omaisuuden hoitaminen. 6., täydennetty painos. Helsinki: Kunnossapitoyhdistys Promaint ry.
- 8 Singh, Deepesh & Verma, Ajay. 2018. Inventory Management in Supply Chain. Materials Today: Proceedings. Vol. 5, NO.2, s. 3867–3872.
- 9 Puukko, Pasi & Metsä-Kortelainen, Sini. 2020. Digitalising and 3D printing spare parts enables manufacturing anywhere and anytime. Verkkoaineisto. Teknologian tutkimuskeskus VTT. <<https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/digitalising-and-3d-printing-spare-parts-enables-manufacturing-anywhere-and-anytime>>. 4.11.2020. Luettu 27.1.2021.
- 10 Yang, Li; Hsu, Keng; Baughman, Brian; Godfrey, Donald; Medina, Francisco; Menon, Mamballykalathil & Wiener, Soeren. 2017. Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production. 1st ed. Cham: Springer Nature.
- 11 Additive Manufacturing vs. 3D Printing. Verkkoaineisto. GE Additive. <<https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/information/3d-printing>>. Luettu 4.3.2021.

- 12 What Is Additive Manufacturing. Verkkoaineisto. Optomec. <<https://optomec.com/additive-manufacturing/>>. Luettu 13.1.2021.
- 13 Zelinski, Peter. 2019. What Is the Role for Additive Manufacturing in Aircraft Structural Components? Verkkoaineisto. Additive Manufacturing. <<https://www.additivemanufacturing.media/articles/what-is-the-role-for-additive-manufacturing-in-aircraft-structural-components>>. 13.5.2019. Luettu 28.1.2021.
- 14 How Can Additive Manufacturing Help the Aerospace Sector? Verkkoaineisto. Farinia Group. <<https://www.farinia.com/additive-manufacturing/industrial-3d/can-additive-manufacturing-save-the-aerospace-sector>>. Luettu 28.1.2021.
- 15 Nagarajan, Hari; Panicker, Suraj; Mokhtarian, Hossein; Coatanea, Eric & Haapala, Karl. 2020. Improving worker health and safety in wire arc additive manufacturing: A graph-based approach. Procedia CIRP. Vol. 90, s. 461–466.
- 16 Fredriksson, Claes. 2019. Sustainability of metal powder additive manufacturing. Procedia Manufacturing. Vol. 33, s. 139–144.
- 17 ISO/ASTM 52900:2015. Additive manufacturing – General principles – Terminology. 2015. Geneve: International Organization for Standardization.
- 18 Cherdo, Ludivine. 2021. Metal 3D Printers in 2021: a comprehensive guide. Verkkoaineisto. Aniwaa. <<https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/best-metal-3d-printer/>>. 11.1.2021. Luettu 15.2.2021.
- 19 SLM (Selective Laser Melting): 3D Printing Metal. Verkkoaineisto. Sculpteo. <<https://www.sculpteo.com/en/glossary/selective-laser-melting-definition/>>. Luettu 28.1.2021.
- 20 Comparing 3D Printing Processes. Verkkoaineisto. Xometry. <<https://www.xometry.com/blog/3d-printing-processes/>>. Luettu 5.3.2021.
- 21 VAT Photopolymerisation. Verkkoaineisto. Loughborough University. <<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>>. Luettu 5.3.2021.
- 22 Binder Jetting. Verkkoaineisto. Loughborough University. <<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>>. Luettu 5.3.2021.
- 23 Sheet Lamination. Verkkoaineisto. Loughborough University. <<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>>. Luettu 5.3.2021.

- 24 The Best Food-Safe Metals for Food Manufacturing Applications. 2019. Verkkoaineisto. Marlin Steel. <<https://www.marlinwire.com/blog/food-safe-metals-for-sheet-metal-wire-forms>>. 19.11.2019. Luettu 30.1.2021.
- 25 What is Stainless Steel? Verkkoaineisto. Aperam. <<https://www.aperam.com/stainless/what-is-stainless-steel/>>. Luettu 30.1.2021.
- 26 Seitovirta, Mika (toim.). 2013. Handbook of Stainless Steel. Espoo: Outokumpu Oyj.
- 27 Afshan, Sheida; Arrayago, Itsaso; Gardner, Leroy; Gedge, Graham; Jandera, Michal; Real, Esther; Rossi, Barbara; Stranghöner, Natalie & Zhao, Ou. Käsikirja – Ruostumattomien terästen käyttö kantavissa rakenteissa. 2017. 4., uudistettu painos. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.
- 28 Is 316 Stainless Steel Worth the Extra Cost over 304. 2020. Verkkoaineisto. Marlin Steel. <<https://www.marlinwire.com/blog/is-316-stainless-steel-worth-the-extra-cost-over-304>>. 27.2.2020. Luettu 30.1.2021.
- 29 Forrest, Kelly. 2018. 5 Types of Superalloys. Verkkoaineisto. Brennan Inc. <<https://blog.brennaninc.com/5-types-of-superalloys>>. 10.10.2018. Luettu 18.2.2021.
- 30 Young's Modulus and Tensile Strength: All you need to know. Verkkoaineisto. Sculpteo. <<https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/3d-printing-materials-guide/youngs-modulus-and-tensile-strength-3d-printing/>>. Luettu 16.2.2021.
- 31 Gillespie, Matt. 2017. What is the difference between 17-4 and 316L stainless steel? Verkkoaineisto. Setra. <<https://www.setra.com/blog/what-is-the-difference-between-17-4-and-316l-stainless-steel>>. 20.3.2017. Luettu 16.2.2021.
- 32 Data sheets for Special Metals Welding Inconel. 2021. Inconel Filler Metal 718. Special Metals Corporation.
- 33 Lehtomäki, Jouko. 2021. Toimitusjohtaja, Suomen 3D-ratkaisut Oy, Espoo. Keskustelu 4.3.2021.
- 34 Prusament PETG. 2021. Verkkoaineisto. Prusament. <<https://prusament.com/materials/prusament-petg/>>. Luettu 17.2.2021.
- 35 Toivanen, Aleks. 2021. Insinööriharjoittelija, Helsinki. Keskustelu 12.3.2021.
- 36 Optimizing 3D Printed Parts for Strength. 2019. Verkkoaineisto. 3DPros. <<https://www.3d-pros.com/optimizing-strength-of-3d-printed-parts>>. Luettu 17.2.2021.

- 37 High Performance Engineering Plastics for the Food Processing Industry. Verkkoaineisto. Modern Plastics. <<https://modernplastics.com/industries/food-processing-plastics/>>. Luettu 18.2.2021.
- 38 PETG. 2020. Verkkoaineisto. Dielectric Manufacturing. <<https://dielectricmfg.com/knowledge-base/petg/>>. Päivitetty 24.3.2020. Luettu 14.3.2021.
- 39 ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene). 2020. Verkkoaineisto. Dielectric Manufacturing. <<https://dielectricmfg.com/knowledge-base/abs/>>. Päivitetty 24.3.2020. Luettu 18.2.2021.
- 40 Kondo, Hironori. 2019. PETG vs ABS: The Differences. Verkkoaineisto. All3DP. <<https://all3dp.com/2/petg-vs-abs-3d-printing-filaments-compared/>>. 2.2.2019. Luettu 18.2021.
- 41 Carlota, V. 2019. All you need to know about PLA for 3D printing. Verkkoaineisto. 3Dnatives. <<https://www.3dnatives.com/en/pla-3d-printing-guide-190820194/#!>>. 19.8.2019. Luettu 19.2.2021.
- 42 Verhoef, Leendert A; Budde, Bart W; Chockalingam, Cindhuja; Garcia Nodar, Brais & van Wijk, Ad J. K. 2018. The effect of additive manufacturing on global energy demand: An assessment using a bottom-up approach. Energy Policy. Vol. 112, s. 349–360.
- 43 Weitekamp, Raymond. 2019. Why 3D Printing Is a Critical Part of the Battle Against Climate Change. Verkkoaineisto. PolySpectra Wavefront. <<https://medium.com/polyspectra-wavefront/why-3d-printing-is-a-critical-part-of-the-battle-against-climate-change-726e493a3f58>>. 9.1.2019. Luettu 18.1.2021.
- 44 Sithambaram, Sasi. 2018. Best Setups for Manufacturing Controls in Topology Study. Verkkoaineisto. Dassault Systemes. <<https://blogs.solidworks.com/tech/2018/12/best-setups-for-manufacturing-controls-in-topology-study.html>>. 21.12.2018. Luettu 20.1.2021.
- 45 Liu, Z. Y; Li, C; Fang, X. Y. & Guo, Y. B; 2018. Energy Consumption in Additive Manufacturing of Metal Parts. Procedia Manufacturing. Vol. 26, s. 834–845.
- 46 Attaran, Mohsen. 2017. Additive Manufacturing: The Most Promising Technology to After the Supply Chain and Logistics. Journal of Service Science and Management. Vol. 10, NO. 3, s. 189–205.
- 47 The Carbon Footprint of Global Trade. 2015. Verkkoaineisto. International Transport Forum. <<https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/cop-pdf-06.pdf>>. Luettu 17.2.2021.

- 48 Niaki, Mojtaba K; Nonino, Fabio; Palombi, Giulia & Torabi S. Ali; 2019. Economic sustainability of additive manufacturing: Contextual factors driving its performance in rapid prototyping. Emerald Insight. Vol. 30, NO. 2, s. 353–365.
- 49 Mäkeläinen, Ville. What is the Difference Between a Point Cloud and a 3D Model? Verkkoaineisto. VRT Finland Oy. <<https://www.gisgro.com/the-difference-between-a-point-cloud-and-a-3d-model/>>. Luettu 25.1.2021.
- 50 3D Scanning Technology. Verkkoaineisto. Laserdesign. <<https://www.laserdesign.com/what-is-3d-scanning/>>. Luettu. 25.1.2021.
- 51 Hess, Brian. 2019. What Is Reverse Engineering and How Does It Work? Verkkoaineisto. Astro Machine Works. <<https://astromachineworks.com/what-is-reverse-engineering/>>. 11.9.2019. Luettu 25.1.2021.
- 52 Metallitulostuksen suunnitteluohjeet. Verkkoaineisto. Materflow. <<https://www.materflow.com/metallitulostuksen-suunnitteluohjeet/>>. Luettu 8.2.2021.
- 53 Wong, Kenneth. 2015. Shape Generator Makes its Debut in the Latest Autodesk Inventor Update. Verkkoaineisto. Digital Engineering. <<https://www.digitalengineering247.com/article/generative-design-makes-its-debut-in-the-latest-autodesk-inventor-update>>. 16.10.2015. Luettu 8.2.2021.
- 54 Huang, Runze; Riddle, Matthew; Graziano, Diane; Warren, Joshua; Das, Sujit; Nimbalkar, Sachin; Cresko, Joe & Masanet, Eric. 2016. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. Journal of Cleaner Production. Vol. 135, s. 1559–1570.
- 55 Portole, L; Jorda, O; Jorda, L; Uriondo, A; Esperon-Miguez, M. & Perinpanayagam, S. 2016. A qualification procedure to manufacture and repair aerospace parts with electron beam melting. Journal of Manufacturing Systems. Vol. 41, s. 65–75.
- 56 Etteplan AMOTool 3D-tulostuksen kustannuslaskentaa. Verkkoaineisto. Etteplan. <<https://www.etteplan.com/fi/palvelumme/suunnittelupalvelut/3d-tulostus/etteplan-amotool-3d-tulostuksen-kustannuslaskentaan>>. Luettu 8.3.2021.
- 57 434 Stainless Steel UNS S43400. 2015. Verkkoaineisto. Ulrich Stainless Steels & Special Metals, Inc. <<https://www.ulrich.com/alloys/434-stainless-steel-uns-s43400/>>. 6.1.2015. Luettu 10.3.2021.
- 58 Demarco, Matthew. Additive Manufacturing as the Next Disrupter: Can Your Skilled Workforce Compete? Verkkoaineisto. Staff Management. <<https://www.staffmanagement.com/blog-additive-manufacturing-disrupter/>>. Luettu 10.3.2021.

- 59 Jiang, Ruth; Kleer, Robin & Piller, Frank T. 2017. Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030. *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 117, s. 84–97.