



SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

SYMBOLILUETTELO

1	Taustaa	5
2	Metallien lisäävä valmistus	5
2.1	Lasersäteen käyttöön perustuva jauhepetiteknikka	6
2.2	Direct Energy Deposition-tekniikka	8
3	Gartnerin hypekäyrä	9
4	Toimitusketjujen muutos lisäävän valmistuksen myötä	11
4.1	Toimitusketjut perinteisessä valmistustekniikassa	11
4.2	Toimitusketjut lisäävässä valmistustekniikassa	13
5	Metallien lisäävän valmistuksen kustannuksista	14
5.1	Lisäävän valmistuksen kustannuslaskenta	16
5.2	Kustannuslaskentaesimerkki: Lentokoneen laskutelineen jarru.....	17
5.3	Kustannuslaskentaesimerkki: Hana	19
5.4	Kustannuslaskentaesimerkki: Putkiyhde	21
6	Lisäävän valmistuksen mahdollisuudet tulevaisuudessa.....	25
7	Metallien lisäävän valmistuksen tutkimus ja opetus Suomessa.....	27
8	Lähdeluettelo.....	29



TIIVISTELMÄ

Suurelle yleisölle lisäävä valmistustekniikka eli ns. 3D-tulostustekniikka näyttäytyy lehtien otsikoissa ja artikkeleissa esiin pulpahtavana ”muotiaiheena”, mutta sekä muovien 3D-tulostustekniikka että metallienkin vastaava valmistustekniikka on ollut olemassa maailmalla ja Suomessa 80-luvun puolivälistä alkaen. Yhdysvalloissa ja Saksassa tekniikkaa käytetään valmistavassa teollisuudessa toiminnallisten osien tuotannossa. Esimerkiksi lentokoneen suihkumoottorien osia ja lääketieteellisiä välineitä tehdään metallijauheesta lisäävän valmistuksen avulla. Itse asiassa eräs menetelmä metalliesineiden valmistamiseksi lasersäteen avulla keksittiin Suomessa ja sitä myös kehiteltiin täällä, mutta teollisuudenala lähti aikanaan nousuun Saksassa.

Lisäävä valmistus on tällä hetkellä maailmanlaajuisesti eräs kiinnostavista tuotantotekniikoista, jonka uskotaan muuttavan monia asioita tuotteiden suunnittelussa, toiminnoissa ja valmistuksessa. Tämä tekniikka ei kiinnosta pelkästään valmistavaa teollisuutta, vaan tietotekniikan, lääketieteen, koruvalmistuksen ja muotoilun osaajat sekä uusien liiketoimintamallien kehittäjät ja logistiikka operaattorit ovat teknologiasta kiinnostuneita. Suomelle 3D-tulostustekniikka on suuri mahdollisuus, sillä maassamme on vahva teollinen tieto- ja viestintätekniikkaosaaminen sekä lisäksi olemme maassamme erikoistuneet varsin vaativien teollisiin laitteiden valmistukseen.

Eräät suurimmista mahdollisuuksista tällä tekniikalla ovat toimitusketjuihin liittyvät muutokset. Uutta on, että pienetkin yritykset ja organisaatiot voivat soveltaa tätä tekniikkaa valmistuksessa ja jopa kehittää täysin uusia tuotteita. On myös arvioitu, että lisäävän valmistuksen merkitys valmistustapoihin ja toimitusketjuihin voi olla suurempi kuin koskaan aikaisemmin minkään teknologisen uudistuksen kohdalla. Lisäävästä valmistuksesta usein puhutaankin kolmantena teollisena vallankumouksena juuri tämän takia.

3D-tulostuksen kustannuksia tarkasteltaessa on tärkeätä huomata että vain sulatetun jauheen määrä ratkaisee, ei käytettävän geometrian monimutkaisuus. Tämä erottaa perinteisen ja lisäävän valmistuksen toisistaan. Perinteisesti kappaleen keventäminen on maksanut ”ylimääräistä”, kun taas lisäävässä valmistuksessa kappaleen keveys on jopa kustannusta alentava tekijä. Valmistettavan kappaleen korkeus on yksi kriittisimpiä kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä. Tämän vuoksi useamman kappaleen valmistus yhdellä kertaa parantaa kannattavuutta huomattavasti. Samalla kertaa voi ja itse asiassa kannattaakin valmistaa keskenään erilaisia kappaleita.

Perinteiset valmistustavat sen sijaan ovat nykyajan vaatimuksille liian hitaita; ne joustavat huonosti, kun kyseessä on pienet, asiakaslähtöiset erät. Trendi on globaalisti kohden yksilöllisiä asiakaslähtöisiä tuotteita, jolloin myös valmistustekniikoiden on oltava joustavia pysyäkseen näiden vaatimusten perässä. Lisäävä valmistus sopii erityisesti hyvin piensarjatuotantoon. Suuremmissa valmistuserissä kuitenkin perinteiset tekniikat ovat kustannustehokkaampia.



SYMBOLILUETTELO

C_{kone}	laitekustannus, €/h
C_m	materiaalin hinta, € / kg
C_E	energian hinta, € / J
C_{osa}	yhden osan kokonaiskustannus, €
$C_{osa K}$	yhden osan valmistuskustannukset (yleiskustannukset mukana), €
C_{osa}	yhden osan kustannus (yleiskustannukset mukana), €
C_{sivu}	valmistuksen sivukustannukset, €/h
$C_{valmistuserä}$	valmistuksen kustannus, €
$C_{valmistus}$	valmistuksen epäsuorat kustannukset, € / h
C_m	materiaalin hinta, € / kg
e	yleiskustannuskerroin.
E_{ve}	valmistuksen aikana kulutettu energia, J
$T_{valmistus}$	valmistusaika, h
m	kappaleen paino, kg
n	kerralla valmistettavien kappaleiden määrä, -
P_K	koneen käyttämä teho, W
$T_{valmistus}$	valmistusaika, h



1 Taustaa

Barack Obama lausui toisen kauden virkaanastujaispuheessaan 12.2.2013 ”3D-tulostus pelastaa Amerikan teollisuuden”. Yhtäläillä USA:n hallitus kuin Britannian ja Kiinan hallituksetkin ovat ottaneet strategiaohjelmiinsa kehitettäväksi yhden valmistustekniikan ylitse muiden: 3D-tulostuksen. (Anon., 2013). Tämä on ensimmäinen kerta valmistavan teollisuuden historiassa, että yksi yksittäinen valmistustekniikka nostetaan useamman maan hallitusten keskeisiin ohjelmiin. Erään maailman suurimman yhtiön, nimittäin General Electric:n pääjohtaja Jeffrey Immelt on todennut ”3D-tulostus on ajankäyttöni, huomioni, rahani ja panostukseni arvoinen”. (Thompson, 2013)

Alan tutkimusta on Suomessa tehty ja tehdään edelleen, mutta tekniikan hyödyntäminen yritystoiminnassa on vähäistä verrattaessa teollisten sovellusten määrää meillä tai Euroopassa. Esimerkiksi metalliesineiden valmistamiseen soveltuvia laitteita on Suomessa vain kaksi tutkimuslaitoksilla ja vain yksi teollisessa käytössä. Tässä luvussa ei ole mukana laitevalmistajalla Turussa olevat laitteet. Muovitulostimia löytyy useampia oppilaitosten lisäksi myös yrityksiltä: yhteensä teollisia muovi- ja metallilaitteita on maassamme noin 60. Tästä luvusta on jätetty kokonaan pois yksityisten henkilöiden omistamat ns. kuluttajatulostimet: näitä on arviolta maassamme satoja. (Anon., 2014a)

Teknologian mahdollisuudet ovat valtavat ja niitä on maailmalla hyödynnetty paljon: teollisen mittakaavan laitteita on myyty viimeisen viiden vuoden aikana keskimäärin noin 5 500 vuodessa ja koko laitekanta on maailmanlaajuisesti noin 50 000 laitetta. Laitevalmistajia on globaalisti yhteensä noin 50 eli lähes yhtä paljon kuin Suomen teollisen lisäävän valmistuksen laitekanta. (Wohlers, 2012)

Tekniikan hyödyntäminen on mahdollisuus myös suomalaisille ja suomalaiselle teollisuudelle. 3D-tulostus voi pelastaa myös suomalaisen teollisuuden. Yritysten pitäisi kuitenkin pystyä ennakkoluulottomasti testaamaan, paitsi tuotteidensa soveltuvuutta 3D-tulostukseen, myös miten paljon parempia tuotteista voidaan tehdä suunnittelemalla ne täysin uudella tavalla jotta uuden teknologian mahdollisuudet voidaan hyödyntää kaikin mahdollisin tavoin.

2 Metallien lisäävä valmistus

Metallien lisäävän valmistuksen tekniikoita on useita. Alan ensimmäisen standardin F2792-12a (ASTM) mukaan nämä voidaan jakaa seuraaviin tekniikoihin:

1. Sideaineen suihkutetus (binder jetting), lisäävän valmistuksen prosessi, jossa nestemäistä sideainetta suihkutetaan kerros kerrokselta, jotta jauhemainen materiaali sitoutuu näistä kohdin toisiinsa ja täten aikaansaadaan valmis, fyysinen kappale. Jauhe kaavataan kerros kerrokselta tässä valmistusmenetelmässä.
2. Kohdennettu sulatus (directed energy deposition), lisäävän valmistuksen prosessi, jossa lisättävää materiaalia sulatetaan suoraan kohdennetun lämpöenergian avulla kerros kerrokselta, jotta aikaansaadaan valmis, fyysinen kappale.
3. Materiaalin suihkutetus (material jetting), lisäävän valmistuksen prosessi, jossa materiaalia suihkutetaan pisaroina kerros kerrokselta, fyysisen kappaleen aikaansaamiseksi.
4. Jauhepetisulatus (powder bed fusion), lisäävän valmistuksen prosessi, jossa jauhemaista materiaalia, joka on levitetty jauhepediksi rakennus- ja alustalle, sulatetaan kerros kerrokselta kohdennetun lämpöenergian avulla, jotta aikaansaadaan valmis, fyysinen kappale.

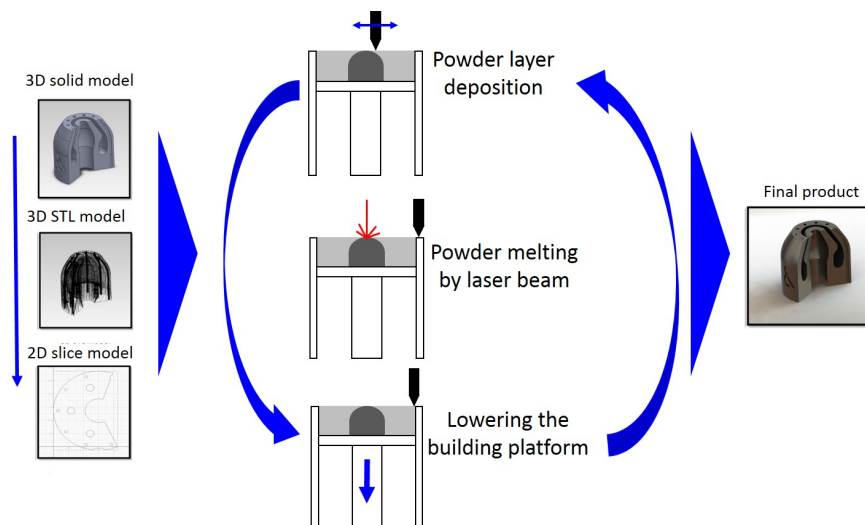


5. Arkkilaminointi (sheet lamination), lisäävän valmistuksen prosessi, jossa materiaaliarkkeja liitetään toisiinsa (esim. hitsaamalla) kerros kerrokselta muodostamaan valmiin, fyysisen kappaleen.

Seuraavassa on käsitelty kahta yleisintä tekniikkaa metallien lisäävässä valmistuksessa: lasersäteen käyttöön perustuvaa jauhepetiteknikkaa sekä ns. directed energy deposition eli ns. DED-tekniikkaa. Näitä prosesseja yhdistää kappaleen rakentaminen ns. viipaloidun datan perusteella. Tällöin kappaleen 3D-malli "hajotetaan" tietokoneohjelman avulla ennalta määrätyn paksuisiin osiin, eli viipaleisiin, joiden mukaan kappaleen kerrokset rakennetaan lisäämällä materiaalia.

2.1 Lasersäteen käyttöön perustuva jauhepetiteknikka

Perinteisellä tuotantotavalla metalliaihiosta tehdään haluttu kappale poistamalla kaikki ylimääräinen materiaali (ns. materiaalia poistava valmistustekniikka), esimerkiksi lastuavalla työstöllä. Toinen tyyppinen vaihtoehto on valmistaa tuote materiaalia liittäväällä valmistustekniikalla, kuten hitsauksella. Lisäävässä valmistustekniikassa puolestaan rakennetaan haluttu kappale kerros kerrokselta. Suunnitteluohjelmalla, kuten SolidWorksilla, tehty 3D-malli viipaloidaan sitä varten tehdyllä ohjelmistolla, minkä jälkeen viipaloitu data viedään tulostimelle, joka kerroksittain sulattaa metallijauheesta lasersäteen avulla kiinteän kappaleen. Sulan metallin lämpötila käy kyseisen materiaalin sulamislämpötilan yläpuolella. Sulatettu metalli jäähtyy ja muodostaa tämän jälkeen kiinteää metallia, jolla on 99 %:sti vastaavat ominaisuudet kuin millä tahansa "perinteisellä" tekniikalla valmistetulla tuotteella. Laserpohjaisen tekniikan tapauksessa viipaleiden paksuus eli rakennettava kerrospaksuus on 20-40 μm . Valmistettavien kappaleiden maksimimitat näillä tekniikoilla ovat tyyppisesti noin 250x250x250 mm tai jopa enemmän. Tätä periaatetta on havainnollistettu kuvassa 1. (Scotti et al., 2014)



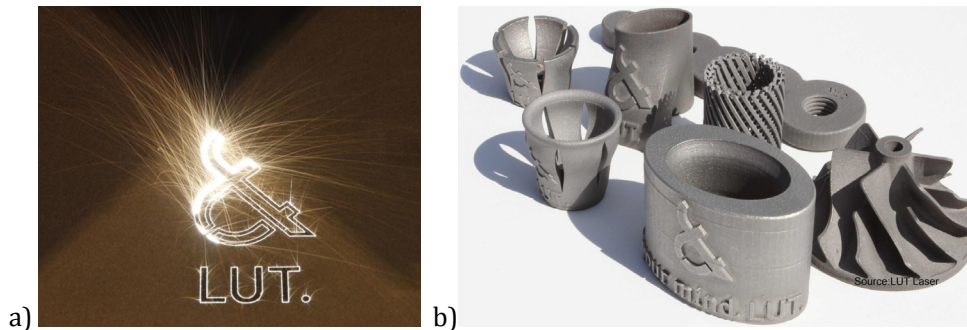
Kuva 1. Lisäävän valmistuksen periaate. (Scotti et al., 2014)



Lisäävän valmistustekniikan avulla on mahdollista esimerkiksi valmistaa kappaleen sisälle hyvin monimutkaisia rakenteita, kuten jäähdytys- tai sekoituskanavia. Tällaisia ei voi saada aikaan perinteisillä menetelmillä. Lisäksi kappaleiden mittojen optimointiin sekä kevennettyjen rakenteiden suunnitteluun on huomattavasti monipuolisemmat mahdollisuudet. Juuri tässä on tekniikan mahdollisuus: koko käsite tuotteen suunnittelu ja sen mahdollisuudet saavat aivan uuden ulottuvuuden.

Metallista valmistetut tuotteet eivät pääasiassa häviä lujuudessa ja väsymisominaisuuksissa perinteisillä menetelmillä valmistetuille tuotteille. Lisävässä valmistuksessa kappaleen rakenteen lujuus voidaan todeta perinteisin keinoin, ja tarvittaessa vetokoe-kappaleet voidaan valmistaa samanaikaisesti tuotteen kanssa. Teräksisten tuotteiden tiiveys on tutkimusten mukaan lähes 100 prosenttia. (Anon., 2014b)

Kuvassa 2 on esitetty kuva Lappeenrannan teknillisellä yliopistolla (LUT) tehtävästä metallien 3D-tulostusprosessista sekä 3D-tulostustekniikalla ruostumattomasta teräksestä tehtyjä osia.



Kuva 2. a) Kuva metallien 3D-tulostuksesta LUT:lla ja b) LUT:lla EOSINT M-laitteistolla tulostettuja metallikappaleita.

Aihetta on käsitelty laajasti sekä The Economist, Wall Street Journal ja Forbes -lehdissä ja teknologia on valittu USA:n, Iso-Britannian ja Kiinan kansallisiin teknologiastrategioihin. USA:n hallitus investoi yksistään 30 miljoonaa dollaria Ohioon perustettavaan tutkimuskeskukseen, Iso-Britannia aikoo panostaa 15 miljoonaa puntaa teknologian kehittämiseen ja Kiinassa on perustettu kymmenen 3D-tulostustutkimuskeskusta. 3D-tulostuksesta puhutaankin kolmantena teollisena vallankumouksena höyrykoneiden keksimisen (1700-luvun loppupuolella) ja Henry Fordin liukuhihnatekniikan (1920-luku) jälkeen. (Atzeni ja Salmi, 2012)

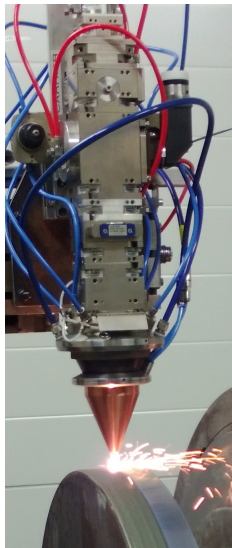
Tämä kolmas vallankumous on seurausta siitä, että kolme eri ilmiötä on saavuttanut riittävän kypsyyssasteen ja saatavuuden. 3D-tulostuslaitteet ovat kehittyneet varsin luotettaviksi ja niiden hinta on pudonnut. Toinen merkittävä kehitysaskel on tietotekniikan kapasiteetin saatavuus ja kasvaminen riittävän suureksi. Kolmas vaikuttava asia on tiedostojen, ohjelmistojen ja designien saatavuus ja jakelu internetin kautta.



2.2 Direct Energy Deposition-tekniikka

Metallien lisäävän valmistuksen tekniikoihin kuuluva Direct Energy Deposition-tekniikka (DED) (tai Direct Metal Deposition, DMD) on laserpinnoitukseen perustuva metallien lisäävän valmistuksen menetelmä. Koska menetelmä perustuu laserpinnoitukseen, niin se on joustava lisäävän valmistuksen menetelmä. Prosessin joustavuus perustuu dynaamiseen lisäaineen syöttöön ja prosessin robotisoituun ohjukseen. DED-prosessi on myös huomattavasti tuottavampi kuin muut metallien lisäävän valmistuksen menetelmät. (Gu et al., 2012)

Prosessin perusmekaniikka on suhteellisen yksinkertainen: lasersäde muodostaa sulan, johon lisäaine syötetään ja säteen liikkuessa lisäaineen syötön kanssa eteenpäin muodostuu palko (ks. kuva 3). Kun näitä palkoja rakennetaan vierekkäin ja päällekkäin saadaan rakennettua uusia muotoja. Kuitenkin vaikka teknologian perusperiaate on yksinkertainen, niin itse prosessiin liittyvä prosessimekaniikka on huomattavan monimutkainen ja tekee prosessin säädettävyyden haasteelliseksi. Tämä onkin yksi DED-prosessin suurimpia haasteita teollista käyttöä ajatellen tällä hetkellä. (Toyserkani et al., 2004) Kuitenkin teknologian kehitys tarjoaa mahdollisuuksia säätää sulan kokoa esim. skannaavalla optiikalla jolloin palon leveyttä ja korkeutta voidaan säätää tarpeen dynaamisesti. (Pekkarinen, 2014)



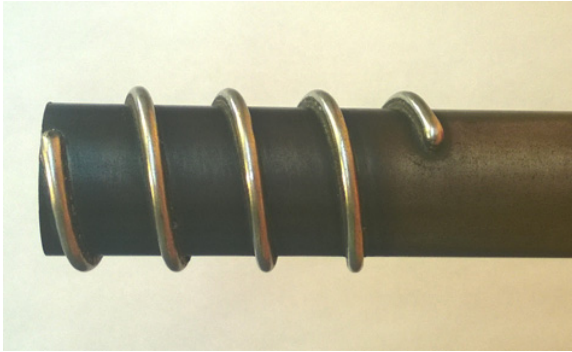
Dynaaminen lisäaineen syöttö mahdollistaa rakennusmateriaalin vaihdon kesken lisäävän valmistuksen. Tämä luo mahdollisuuden valmistaa funktionaalisia materiaali-alueita tai jopa muistimetalleja. Tällöin voidaan kappaleeseen tuottaa fysikaalisia toimintoja joiden tekeminen muuten olisi joko mahdotonta tai ainakin hankalaa. Toisaalta hyvin yleisesti käytetty tapa on lisätä kulutuskestävyyttä tai liukuominaisuuksia parantavia karbideja niihin osiin kappaleita joissa esiintyy abrasiivista kulutusta. Tämä ei ole tällä hetkellä mahdollista muilla metallien lisäävillä valmistusmenetelmillä. (Toyserkani et al., 2004; Gu et al., 2012)

Kuva 3. DED-tekniikka perustuu laserpinnoitusprosessiin.

Prosessi on aina robotisoidusti ohjattu ja tyypillisesti tähän on käytetty normaalia käsivarsi- tai portaalirobotia. Kun robotiohjaus ja dynaaminen lisäaineensyöttö yhdistetään, tulostusalueeksi saadaan useampaa kertaluokkaa suurempi kuin muilla metallien lisäävillä valmistusmenetelmillä. Valmistettavan kappaleen fyysisen koon rajoittaa pääasiassa robotin työstöala ja ns. lasersuojatun alan koko. Täten kappaleiden, joiden halkaisija on useampi metri, valmistaminen on mahdollista. Lisäksi robotisoitu prosessin ohjaus mahdollistaa muotojen rakentamisen jo olemassa olevan kappaleen pintaan (ks. kuva 4). Tämä mahdollistaa sen, ettei koko kappaletta tarvitse tehdä lisäävällä valmistuksella, vaan ainoastaan tarpeelliset muodot tulostetaan, mikä lyhentää tuotannon



läpimenoaikoja. DED-teknikkaa voidaan käyttää myös rikkoontuneiden kappaleiden korjaamiseen, kuten kulutuksen tai korroosion syömiä pintoja ja muotoja takaisin rakentamiseen. Korjaaminen onkin yksi tällä hetkellä käytetyimmistä DED-teknikan sovellutusaloista. (Toyserkani et al., 2004; Gu et al., 2012) Esimerkiksi turbiinien siipiä korjataan paljon käyttämällä DED-teknikkaa. (Shepaleva et al., 2000) Aivan oma sovellusalueensa tällä tekniikalla on erilaisten komponenttien uudistus uudelleenkäyttöä varten.



Kuva 4. DED-teknikalla ruostumattomasta teräksestä rakennettu kierre rakenneteräs akselin päälle.

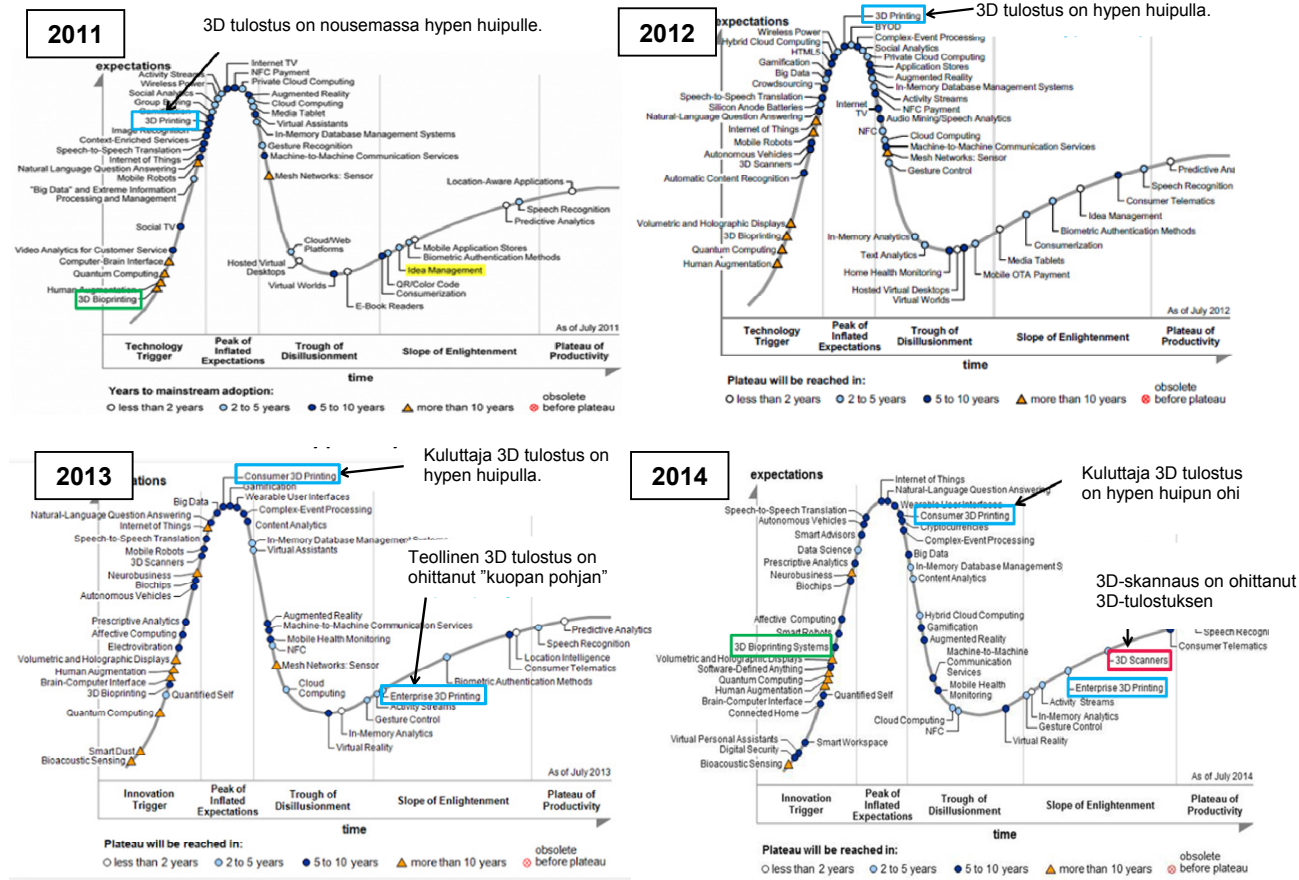
DED-prosessin yksi merkittävistä eduista on sen tuottavuus. Koska teknologia perustuu laserpinnoitukseen, voidaan prosessissa käyttää hyödyksi suuriakin lasertehoja. Suurempi laserteho mahdollistaa suuremman metallimäärän sulattamisen per aikayksikkö (kg/h), mikä puolestaan nostaa prosessin tuottavuutta. Kuitenkin prosessin tuottavuuden nostolla on omat haittapuolensa. Suuria tehoja käytettäessä sulan koko kasvaa ja sen hallittavuus huononee, joka puolestaan vaikuttaa tulostuksen laatuun. Toisin sanoen tulostuksen resoluutio heikkenee tuottavuuden kasvaessa. (Toyserkani et al., 2004; Gu et al., 2012) Kuitenkin DED-teknikalla on mahdollista rakentaa tarkkojakin muotoja, kun käytetään niin sanottuja "microcladding"-prosessipäitä. Tällöin kuitenkin tuottavuus laskee, kun valmistuksen resoluutio nousee. (Kloetzer et al., 2010)

DED-teknikka tarjoaa useita etuja suhteessa muihin metallien lisäävän valmistuksen tekniikoihin:

- Materiaalin muuttaminen kesken rakennuksen - oikea materiaali oikeassa paikassa.
- Monimutkaisten geometrioiden rakentaminen, myös olemassa olevan kappaleen pinnalle.
- Myös isojen kappaleiden rakentaminen mahdollista.
- Tuottava lisäävän valmistuksen menetelmä.
- Rikkoontuneiden osien korjaaminen on mahdollista.
- Tuotteiden uudelleenkäyttö

3 Gartnerin hypekäyrä

Lisäävä valmistus on tällä hetkellä erittäin suuren hypen kannattelema. Vuonna 2012 lisäävä valmistus (3D printing) nousi aivan ns. Gartnerin hypekäyrän harjalle (katso kuva 5). Teknologiaa pidetään uuden teollisen vallankumouksen mahdollistajana, ja se voi tehdä kannattavaksi suursarjavalmistuksen pienissä, asiakkaita lähellä olevissa tuotantoyksiköissä (kuva 5). (Riviera et al., 2013; Anon, 2014 c)



Kuva 5. 3D-tulostus Gartnerin hypekäyrällä 2011-2014. (Riviera et al., 2013; Anon, 2014c)

Kuvan 5 hypekäyrät esittävät eri tahojen nostamaa odotusta teknologioista ja niiden avaamista liiketoimintamahdollisuuksista. Hypekäyrän luonne on sellainen, että teknologioita nousee aallon harjalle ja putoaa sieltä pois hyvin nopeasti. Tyypillisesti putoaminen tapahtuu siinä vaiheessa, kun tajutaan, että hyödyntämisen edellyttämä teknologian taso ei olekaan kysynnän tasolla. Juuri näin on mm. lisäävän valmistuksen kohdalla. Tämä ero odotusten ja todellisuuden välillä saa aikaan kiinnostuksen putoamisen sekä sen tasaisen nousun uudestaan vasta, kun teknologia kehittyi. Toisaalta se antaa mahdollisuuden valmistautua tulevaan teknologian nousuun.

Mielenkiintoista kuvan 5 hypekäyrässä on se, kuinka 3D-tulostus vuonna 2013 jaettiin kuluttajapuolen 3D-tulostukseen ja teolliseen lisäävään valmistukseen. Tällöin kuluttajatulostus oli hypen huipulla, kun taas teollinen lisäävä valmistus oli jo pitkällä kypsien tekniikoiden kohdalla. Tämä ilmentää hyvin kuluttajatulostuksen (3D-tulostus) ja teollisen lisäävän valmistuksen eroja. Suurin osa teollisen lisäävän valmistuksen tekniikoista on keksitty 80-luvun puolivälissä ja tekniikoiden taso on pitkälle kehittyntä, ja hyvin lähellä omaa, todellista kypsyyttään.



4 Toimitusketjujen muutos lisäävän valmistuksen myötä

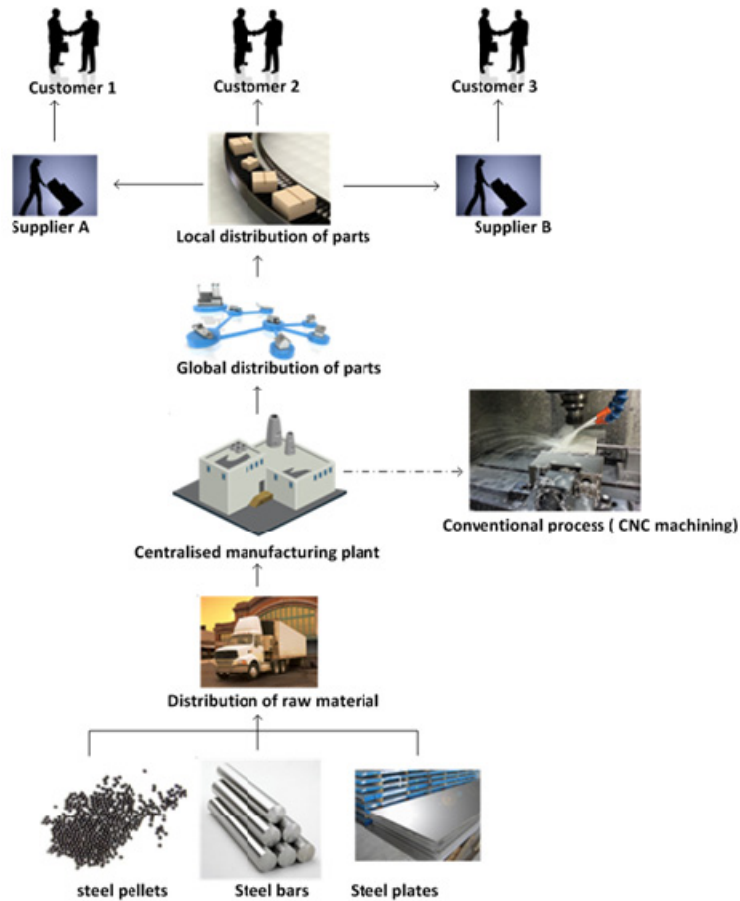
Lisäävän valmistuksen suurimmat mahdollisuudet valmistavan teollisuuden tuotantoon ja liiketoimintaan liittyvät toimitusketjuihin liittyviin muutoksiin ja suunnittelurajoitusten oleelliseen lieventymiseen. Utta on, että hyvinkin pienet yritykset ja organisaatiot voivat soveltaa tätä tekniikkaa valmistuksessa ja jopa kehittää täysin uusia tuotteita. (Wohlers 2014).

Perumal et al. (2006) havaitsivat, että erinomaisen toimitusketjun tärkeimmät tunnusmerkit ovat korkealaatuinen asiakkaan toiminnan huomioiminen ja siihen reagointi, panosten muuttaminen tuotoksiksi tehokkaasti sekä voimavarojen käytön parantaminen, esimerkiksi varastojen ja käyttöpääoman hyödyntäminen. Nämä osa-alueet vaikuttavat suuresti varaosien toimitusketjuun. Varaosien toimitusketjujen hallinta tulee keskittyä käyttökustannusten vähentämiseen muuttamatta asiakasten vaatimuksia ja toiveita huonompaan suuntaan. Tosin käytännössä saattaa olla haasteita, jotka vaikuttavat tämän tavoitteen saavuttamiseen; kuitenkin ratkaisut eivät ole kaukana käytännöstä. Yksi haaste, joka on säilynyt sinnikkäästi aikojen saatossa, on kysynnän arvaamattomuus. Eryityisesti uusien tuotteiden lanseerauksessa, missä ei ole saatavilla dataa osien vikaantumistaajuudesta, on usein viivästyksiä tuotteen toimituksissa. (Perumal, 2006)

Toinen nykyajan haaste yrityksillä on tarve tukea vanhoja ja uusia asiakkaita. Tämä saattaa helposti johtaa tilanteeseen, jossa on pidettävä suuria varastoja ennakkomyynti- ja jälkitakuukysynnän takia. Tämä taas vaatii enemmän vastuuta yritysjohtolta pystyä hoitamaan samanaikaisesti suurempi työntekijä-, varaosa- ja tuotantovälinemäärä. Kaikenkattava prosessi, joka voisi toimia tällaisen tilanteen ehkäisemiseksi, olisi kuin oljenkorsi yritysten toimitusketjujen epätasapainon suhteen. Lisäävä valmistus nähdäänkin eräänä ratkaisuna tähän problematiikkaan, ja alan asiantuntijat uskovat että lisäävä valmistus tulee täydellisesti muuttamaan valmistustekniikan toimitusketjuja. (Hessman, 2014)

4.1 Toimitusketjut perinteisessä valmistustekniikassa

Toimitusketjujen suorituskyvyn vertailua varten eri valmistustekniikoiden toimitusketjujen rakennetta on analysoitu tarkastelemalla ketjujen tärkeimpinä toimintoja. Kuvassa 6 esitetään hypoteettinen toimitusketju varaosien perinteisestä valmistuksesta. (Nyamekye, 2014)



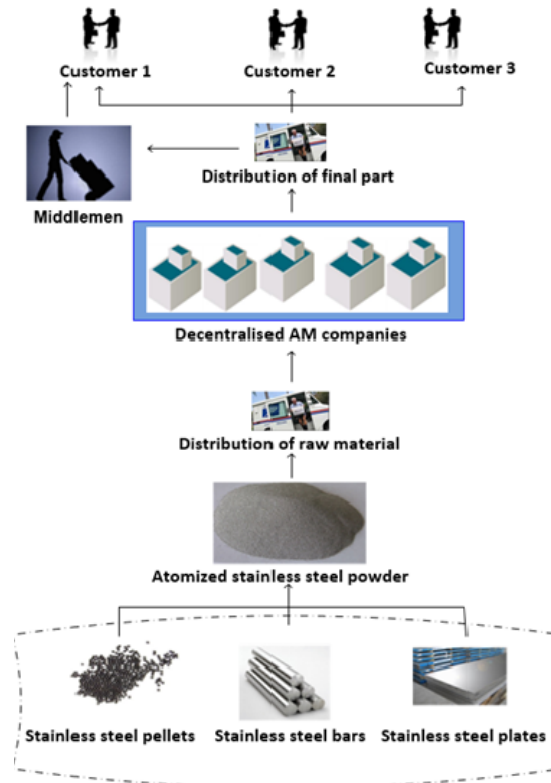
Kuva 6. Toimitusketju perinteisessä valmistustekniikassa. (Nyamekye, 2014)

Kuten kuvasta 6 nähdään, perinteisessä valmistustekniikassa hyödynnetään monia osavaiheita kappaleen valmistuksessa ja tämä laajentaa toimitusketjua huomattavasti, erityisesti kun mukaan lasketaan paikalliset osatoimittajat, jotka yrittävät reagoida nopeasti asiakkaan tilauksiin ja tilausaikoihin. Tämä myös tarkoittaa usein suuria teollisia kiinteistöjä, joissa lattiapinta-ala on suuri. Kuvassa 6 esitetty toimitusketjumalli perinteisille valmistustekniikoille kuluttaa valmistustaikaa, sillä useat eri osien valmistusta varten tehtävät työkalut ja niiden huolto edellyttävät omia työvaiheitaan. Esimerkiksi muovin valussa muotti, muovauksessa muovaustyökalu tai hitsauksessa hitsauskiinnitin edellyttävät suunnittelua ja valmistusta jotka ovat aikavieviä työvaiheita ja laskevat erityisesti yksittäistuote ja piensarjavalmistuksen kannattavuutta. Valmistuksen jälkeen tuotteiden varastointi valmistuspaikassa tarvitsee lattia-alaa, samoin tuotteiden väli- ja loppuvarastointi erilaisissa keskusvarastoissa kuljetuksen aikana ennen kuin tuote lopullisesti on asiakkaalla. Erilaiset varastointitarpeet edellyttävät myös työvoiman käyttöä ja tätä kautta epäsuorien kulujen osuus tuotteen hinnassa kohoaa. (Nyamekye, 2014)



4.2 Toimitusketjut lisäävässä valmistustekniikassa

Kuvassa 7 esitetään malli toimitusketjusta, kun lisäävällä valmistuksella tehdään osa ruostumattomasta teräksestä. (Nyamekye, 2014)



Kuva 7. Toimitusketju lisäävässä valmistustekniikassa. (Nyamekye, 2014)

Kuten kuvasta 7 nähdään, keskusvarastot voidaan tämän valmistustekniikan kohdalla korvatauseilla kuluttajaa lähellä olevilla pienillä valmistusyksiköillä, jotka eivät tarvitse mm. suuria teollisuushalleja. Myös työvaiheiden määrä on lisäävässä valmistuksessa pienempi, sillä valmistukseen tarvittavien työkalujen tekeminen ja niiden varastointi ja huolto jäävät kokonaan pois. Lisäävän valmistuksen yksi etu onkin se, että tuotteet voidaan valmistaa lähellä asiakasta tarpeen mukaan: toimitusketjut voivat olla dynaamisia, sillä yritykset voivat suoraan asiakastilausten määrän mukaan hallita paremmin valmistusta, tuotteiden varastointia ja tuotteiden toimitusta asiakkaille. Läpimenoaika on tätä kautta selvästi lyhyempi kuin kuvassa 7 esitetyssä mallissa ja kustannusten sekä riskien hallinta ennakoitavampi. Kuvassa esitetyssä toimintaketjussa kuljetuksen tarve on myös vähäisempi. (Nyamekye, 2014)

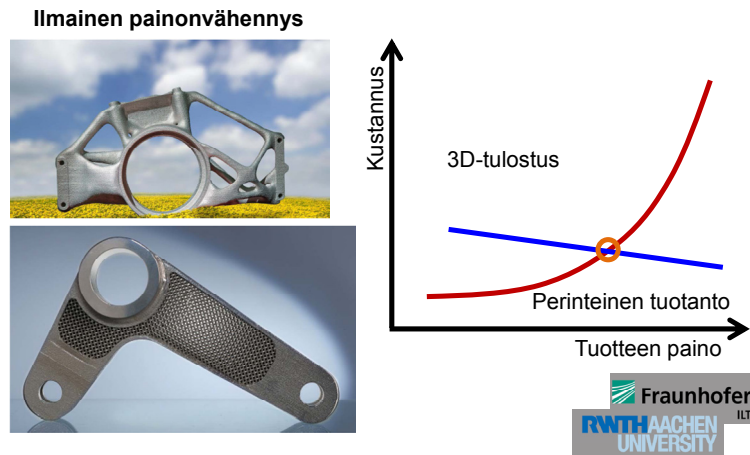


5 Metallien lisäävän valmistuksen kustannuksista

Lisäävää valmistusta käytettäessä saavutetut edut verrattaessa tätä tekniikkaa perinteisiin tekniikoihin voidaan jakaa kolmeen osaan (Schleifenbaum et al., 2010; Piili et al., 2013a; Anon., 2014d):

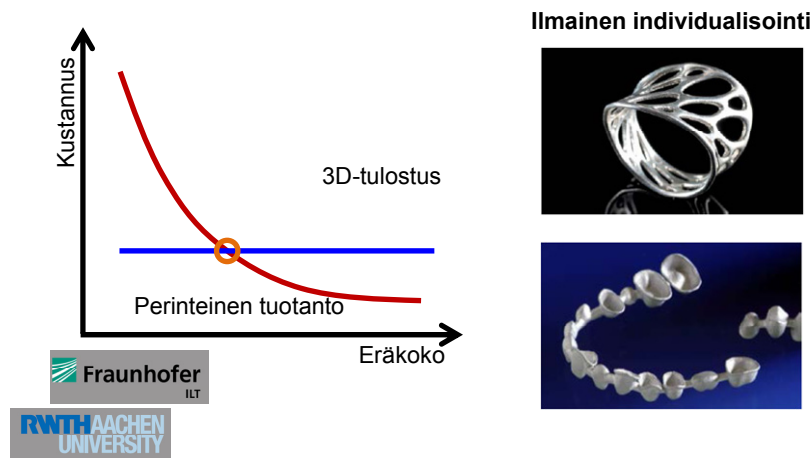
1. Kevennetyt rakenteet, suunnittelun vapaus
2. Massakustomointi
3. Lyhentynyt tuotantoketju ilman lisäkustannuksia

Lisäävässä valmistuksessa rakenteiden keventäminen pienentää osien tuotantokustannuksia, toisinkin lisäävässä valmistuksessa. Tämän mahdollistaa suunnittelun vapaus ja tekniikan perusajatus, jossa vain kappaleeseen lisätty materiaali ”maksaa”. Täten lisäävässä valmistuksessa valmistetut kappaleen paino on suoraan verrannollinen kappaleen kustannuksiin, kuten kuva 8 näyttää. (Schleifenbaum et al., 2010; Piili et al., 2013a; Anon., 2014d)



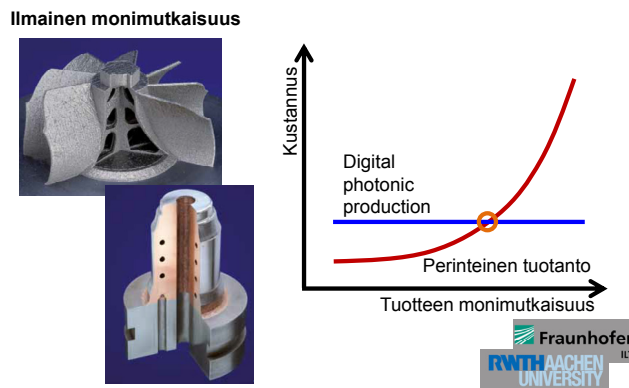
Kuva 8. 3D-tulostuksen mahdollisuudet: Kevennetyjen rakenteiden vaikutus valmistuksen kustannuksiin. (Schleifenbaum et al., 2010; Piili et al., 2013a; Anon., 2014d)

Perinteisessä valmistuksessa pienet eräkoot ovat yleensä suuria kustannuksiltaan. 3D-tulostus kuitenkin mahdollistaa piensarjojen valmistuksen samalla kustannuksella kuin suurempienkin sarjojen: eräkoolla ei enää ole kovin suurta merkitystä kustannuksiin, ja oikea massakustomointi on mahdollista. Kuva 9 näyttää kuinka 3D-tulostuksen avulla pienet eräkoot ovat kannattavia. (Schleifenbaum et al., 2010; Piili et al., 2013a; Anon., 2014d)



Kuva 9. 3D-tulostuksen mahdollisuudet: Eräkoon pienenemisen vaikutus valmistuskustannuksiin. (Schleifenbaum et al., 2010; Piili et al., 2013a; Anon., 2014d)

Yleensä kappaleen geometrian monimutkaistuessa myös valmistuskustannukset kasvavat. 3D-tulostus kuitenkin mahdollistaa monimutkaistenkin tuotteiden valmistuksen samalla kustannuksella kuin yksinkertaisten kappaleiden (katso kuva 10). (Schleifenbaum et al., 2010; Piili et al., 2013a; Anon., 2014d)



Kuva 10. 3D-tulostuksen mahdollisuudet: Tuotteen monimutkaisuuden vaikutus valmistuskustannuksiin. (Schleifenbaum et al., 2010; Piili et al., 2013a; Anon., 2014d)

Yleisesti ottaen 3D-tulostuksen kustannusten erityispiirteitä ovat (Schleifenbaum et al., 2010; Piili et al., 2013a; Anon., 2014d)

- Koneaika muodostaa valtaosan kustannuksista.
- Kappaleen monimutkaisuus ei vaikuta hintaan.
- Pitkillä sarjoilla yksikköhinta pysyy vakiona valmistusmäärästä riippumatta.
- Massakustomointi edullista, vain ohjelmointikustannukset muuttuvat



5.1 Lisäävän valmistuksen kustannuslaskenta

3D-tulostuksen kustannuksia tarkasteltaessa on tärkeätä huomata, että vain sulatetun jauhon määrä ratkaisee, ei käytettävän geometrian monimutkaisuus. Valmistuksessa suurin osa ajasta (ja tätä kautta myös valmistuksen kustannuksista) muodostuu uuden jauhekerroksen kaavauksesta. Tätä kautta kappaleen korkeus on yksi kriittisimpiä kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä. Yksinkertainen keino parantaa kannattavuutta huomattavasti onkin useamman kappaleen valmistus yhdellä kertaa. Samalla kertaa voi ja itse asiassa kannattaakin valmistaa keskenään erilaisia kappaleita. (Piili et al., 2013a)

Kustannuksia 3D-tulostuksessa voidaan laskea kahdella eri tavalla (Väistö et al., 2013):

1. Materiaalin kilohinnan mukaan
2. Koneajan mukaan.

Valmistetun kappaleen kilohinnan mukaan kustannuksia laskettaessa kilohinta arvioidaan kokemuspohjaisesti. Kappaleen korkeuden tai monen kappaleen yhtäikäisen valmistuksen vaikutusta voidaan vain arvioida. Tällä tavoin saadaan aikaan nopea, karkea arvio. (Väistö et al., 2013):

Koneajan mukaan kustannuksia laskettaessa koneaika määritetään simuloimalla haluttu kappale ja sen valmistukseen kuluva aika lisäävän valmistuksen laitteiston ohjelman avulla. Tämä laskentatapa huomioi korkeuden ja useamman kappaleen yhtäikäisen valmistamisen vaikutukset. Tämä tapa on hitaampi, mutta sillä saadaan aikaan tarkka laskelma. (Väistö et al., 2013)

Baumers et al. (2012) ovat tutkineet lisäävää valmistusta ja sen kustannuksia. Tutkimuksessaan he arvioivat vain itse valmistuksen kustannuksia, ja jättivät tuotteen vaatimat jälkikäsitellyt kokonaan pois tutkimuksestaan. Tämän tutkimuksen mukaan lisäävän valmistuksen kokonaiskustannukset voidaan laskea yhtälön 1 mukaan.

$$C_{\text{valmistuserä}} = m \cdot C_m + T_{\text{valmistus}} \cdot C_{\text{valmistus}} \quad (1)$$

missä	$C_{\text{valmistuserä}}$	valmistuksen kustannus, €
	m	materiaalin paino, kg (osan paino + tukirakenteen paino)
	C_m	materiaalin hinta, € / kg
	$T_{\text{valmistus}}$	valmistusaika, h
	$C_{\text{valmistus}}$	valmistuksen epäsuorat kustannukset, € / h.

Suoriin kustannuksiin tämän mukaan vaikuttaa tuotteen paino ja materiaalikustannukset. On huomattava, että valmistuksessa käytetyn materiaalin paino on eri kuin valmiin tuotteen paino. Paino, jota tässä laskennassa on käytetty, koostuu myös tukimateriaalien painosta. (Baumers et al., 2012) Valmistuskustannukset koostuvat valmistusajasta ja lisäävän valmistuksen kustannuksista.

Yhden osan kokonaiskustannukset saadaan jakamalla $C_{\text{valmistuserä}}$ valmistettavien osien määrällä yhtälön 2 mukaisesti. (Baumers et al., 2012)



$$C_{osa} = C_{valmistuserä}/n \quad (2)$$

missä C_{osa} yhden osan kokonaiskustannus, €
 n kerralla valmistettavien kappaleiden määrä.

Ympäristöasiat ja varsinkin energiakulutus ovat nykypäivänä tärkeitä aiheita ja tämän takia myös Baumer et al. (2012) tutkimuksessaan arvioivat myös näitä. Yhtälössä 3 otetaan huomioon eriteltyä myös valmistuksessa käytetyn energian kustannukset.

$$C_{valmistuserä} = C_{sivu} * T_{valmistus} + m * C_m + E_{ve} * C_E \quad (3)$$

missä C_{sivu} valmistuksen sivukustannukset, €/h
 $T_{valmistus}$ valmistusaika, h.
 m kappaleen paino, kg
 C_m materiaalin hinta, € / kg
 E_{ve} valmistuksen aikana kulutettu energia, J
 C_E energian hinta, € / J.

Yhtälössä 3 energiakustannukset on erotettu koneen sivukustannuksista eli käyttö- ja yleiskustannuksista. Tämä malli toimii hyvin tilanteissa, jossa yhdessä valmistuserässä valmistetaan useita erilaisia kappaleita. Tutkimuksessa mallin todettiin olevan hyvin tarkka ja sillä voidaan ± 10 %:n tarkkuudella arvioida kustannukset. (Baumers et al., 2011; Officer et al., 2013; Baumers et al., 2012; EOS GmbH 2012; Ruffo and Hague, 2007)

Kokonaiskustannusten laskenta voidaan esittää, kuten yhtälö 4 näyttää. (Baumers et al., 2012)

$$C_{valmistuserä} = C_{kone} * T_{valmistus} + m * C_m + T_{valmistus} * P_K * C_E \quad (4)$$

missä C_{kone} laitekustannus, €/h
 P_K koneen käyttämä teho, W

Jotta tämä laskelma ottaisi huomioon myös yleiskulut, yhtälön 5 mukaan voidaan laskea tämä. (Baumers et al., 2012)

$$C_{osaK} = C_{osa} * e \quad (5)$$

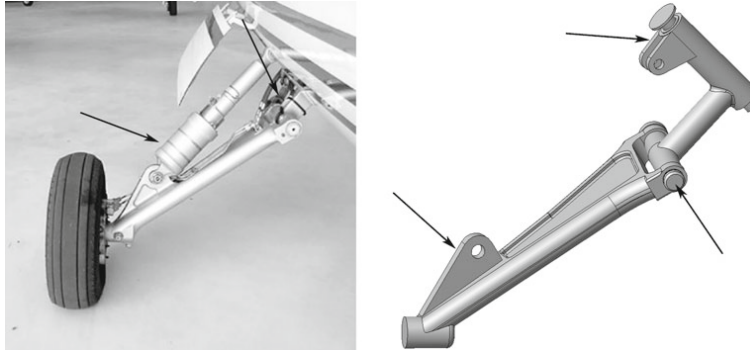
missä C_{osaK} yhden osan valmistuskustannukset (yleiskustannukset mukana), €
 C_{osa} yhden osan kustannus (yleiskustannukset mukana), €
 e yleiskustannuskerroin.

5.2 Kustannuslaskentaesimerkki: Lentokoneen laskutelineen jarru

Lisäävän valmistuksen kustannustehokkuus aukeaa parhaiten case-esimerkkien avulla. Tässä kappaleessa esitetyssä esimerkissä kustannukset eivät ole laskettu edellä kappaleessa 5.1 esitettyjen laskentakaavojen mukaan. Kuvassa 11 esitetään lentokoneen laskeutumistelineen jarru. Rakenne on



optimoitu siten, että sen valmistuksessa voidaan käyttää hyödyksi lisäävän valmistuksen tuomia etuja: esimerkiksi materiaalia tulostetaan vain sinne, missä sitä tarvitaan lujuusteknisistä syistä. Täten voidaan aikaansaada optimoitu, mutta aiempaa huomattavasti kevyempi rakenne. (Antzeni & Salmi, 2012)

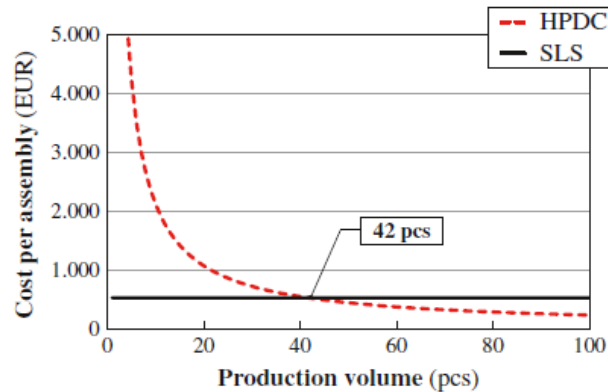


Kuva 11. Lentokoneen laskeutumistelineen jarru. (Antzeni & Salmi, 2012)

Osan valmistamisen kustannusmallissa vertailtiin kahta tuotantoteknologiaa: korkeapaine valua (high-pressure die-casting, HPDC) ja lisäävää valmistusta (selective laser melting, SLM). Kappaleen valmistuksessa käytettiin raaka-aineena alumiinia. Lisäävään valmistukseen tehty malli oli kevyempi kuin korkeapainevalua varten tehty. Kustannusarvio korkeapainevalusta perustui muotintekijältä saatuihin kustannustietoihin. (Antzeni & Salmi, 2012)

Lisäävän valmistuksen tarjoamaa suunnittelunvapautta käyttäen jarrusta saatiin uudelleensuunniteltua kappale, joka voitiin tehdä kertatulosteena ilman erillisiä kokoonpanovaiheita. Lisäksi oli mahdollista tehdä näitä tuotteita neljä samanaikaisesti. (Antzeni & Salmi, 2012)

Koska korkeapainevalun suurimmat kustannukset koostuivat itse muotin tekemisestä, tämä tekniikka sopii hyvin sarjatuotantoon. Korkeapainevalulla pienten, räätälöityjen sarjojen valmistus on hyvin kallista mutta sarjakoona kasvaessa osakustannus alenee. Tässä sovelluksessa lisäävä valmistus puolestaan sopi pienten sarjojen valmistukseen äärimmäisen hyvin (ks. kuva 12). (Antzeni & Salmi, 2012)



Kuva 12. Kriittinen piste, kun korkeapainevalua (HPDC) ja lisäävää valmistusta (SLS) verrattiin keskenään. (Antzeni & Salmi, 2012)

Kuvasta 12 voidaan havaita, että lisäävä valmistus sopii hyvin piensarja tuotantoon. Suuremmissa valmistuserissä korkeapainevalu on kuitenkin selkeästi kustannustehokkaampi. Kriittinen piste tälle kyseiselle kappaleelle on 42 kappaletta. (Antzeni & Salmi, 2012) Valmistuskustannuksen lisäksi on hyvä huomioda, että lisäävällä tekniikalla valmistetun osan asennus oli helpompaa, jolloin kustannukset alenevat lisäävän valmistustekniikan käytön avulla vielä enemmän. Tätä kustannussäästöä on vaikea todentaa, sillä se riippuu myös asennushenkilöstön pätevyydestä, mutta jos verrataan osan hintaa asennettuna, on kriittinen piste yleensä kuvan 12 osoittamaa kriittistä pistettä suuremmissa sarjassa.

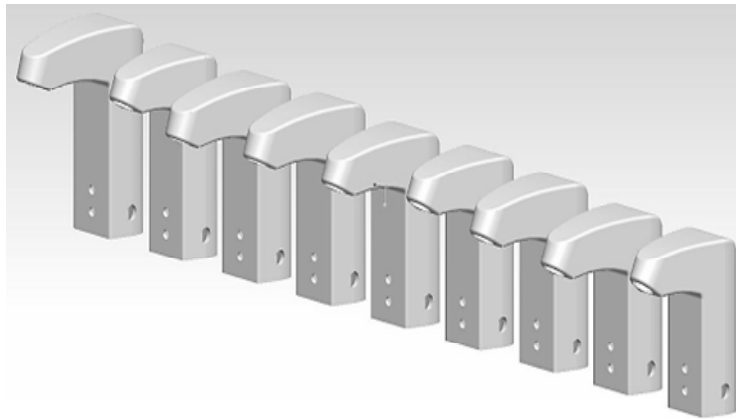
5.3 Kustannuslaskentaesimerkki: Hana

Tässä tutkimuksessa arvioitiin tuottavuuden näkökannasta digitaalista valmistusta verrattuna perinteiseen valmistukseen. Digitaalisena valmistustekniikkana käytettiin metallien lisäävää valmistustekniikkaa sekä perinteisenä valmistustekniikkana pikavalutekniikkaa. Näiden tekniikoiden käyttöä verrattiin valmistettaessa kylpyhuoneen hanaa. Haasteena oli saada mahtumaan elektroniset komponentit hanan uuden designin sisään (katso kuva 13). Tässä kappaleessa haasteena oli myös se, että jokaisen hanamallin ulkomuodon tuli olla sellainen, että se "ohjaa" käyttäjän laittamaan kädet sensorin eteen, jolloin veden virtaus käynnistyy (kuva 13). (Piili et al., 2012; Piili et al., 2013b; Widmaier et al., 2012)



Kuva 13. Kustannuslaskentaesimerkissä käytetty hana. (Piili et al., 2012; Piili et al., 2013b; Widmaier et al., 2012)

Tässä casessa tarkoituksena oli aikaansaada hanamalli, joka olisi skaalattavissa asiakkaan toiveen mukaisesti, kuten kuva 14 osoittaa. (Piili et al., 2012; Piili et al., 2013b; Widmaier et al., 2012)



Kuva 14. Kustannuslaskentaesimerkissä käytetty hana. (Piili et al., 2012; Piili et al., 2013b; Widmaier et al., 2012)

Kustannuslaskentaesimerkissä arvioitiin aikaa, jota käytettiin valettavan hanan suunnitteluun vs. aikaa, jota käytettiin lisäävällä valmistuksella tehtävän hanan suunnitteluun. Havaittiin, että lisäävällä valmistuksella kokonaisaika tuotteen suunnittelussa oli 46 % vähäisempi kuin valettavan kappaleen suunnittelussa, kuten taulukko 1 osoittaa. (Piili et al., 2012; Piili et al., 2013b; Widmaier et al., 2012)



Taulukko 1. Aika, kun hanaa suunniteltiin valua varten sekä kun hanaa suunniteltiin 3D-tulostusta varten. (Piili et al., 2012; Piili et al., 2013b; Widmaier et al., 2012)

Suunnitteluun liittyvät työvaiheet	Valumalli		Malli lisäävää valmistusta varten		Aika säästö LAM vs. valu
	h	% kok. ajasta	h	% kok. ajasta	
Keskustelut valmistusteknisen osaajan kanssa	11	24	7	28	9
Mallin rakenteen konfigurointi	21	45	14	56	15
Hanaperheen eri mallien konfigurointi	2	4	2	8	0
Työkalujen suunnittelu	7.5	16	0	0	16
Tiedostojen säätö	5	11	2	8	6
YHT.	46.5	100	25	100	46

Tutkimuksessa todettiin, että perinteiset valmistustavat ovat nykyajan vaatimuksille liian hitaita. Trendi on globaalisti kohden yksilöllisiä asiakaslähtöisiä tuotteita, jolloin myös valmistustekniikoiden on oltava joustavia pysyäkseen täyttämään nämä näiden vaatimukset. Tehdyn tutkimuksen mukaan valutekniikka sopii hyvin suuriin valmistuseriin. Lisäävä valmistus (eli ns. 3D-tulostus) puolestaan soveltuu pienien, yksilöllisten erien valmistukseen. Nykyiset 3D-suunnitteluohjelmat ovat tehokkaita työvälineitä monimutkaisten kappaleiden suunnittelussa. (Piili et al., 2012; Piili et al., 2013b; Widmaier et al., 2012)

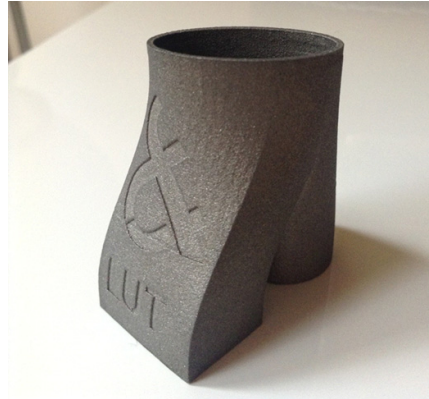
5.4 Kustannuslaskentaesimerkki: Putkiyhde

Tässä laskentaesimerkissä arvioitiin kustannuksia putkiyhteen valmistamisesta. Käytetty geometria näkyy kuvassa 15.



Putkiyhde:

- Korkeus 40 mm
Leveys 20 mm
Syvyys 39 mm
Paino 30,5 g
- Ohutseinämäinen
 - Liittää kolme erilaista putken poikkipintaa
 - Orgaaninen muoto
 - Otollinen rakenne lisäävällä valmistuksella tehtäväksi



Kuva 15. Kustannuslaskentaesimerkissä käytetty putkiyhde ja sen ominaisuudet.

Laskentaa varten tehtiin oletus, että koneen ostohinta jaetaan 8 vuodelle ja konetta käytetään 5000 tuntia vuodessa. Materiaalin hinta saatiin valmistajalta ja energian hinta lasketaan koneen keskimääräisen tehokäytön kautta, kuten taulukko 2 osoittaa.

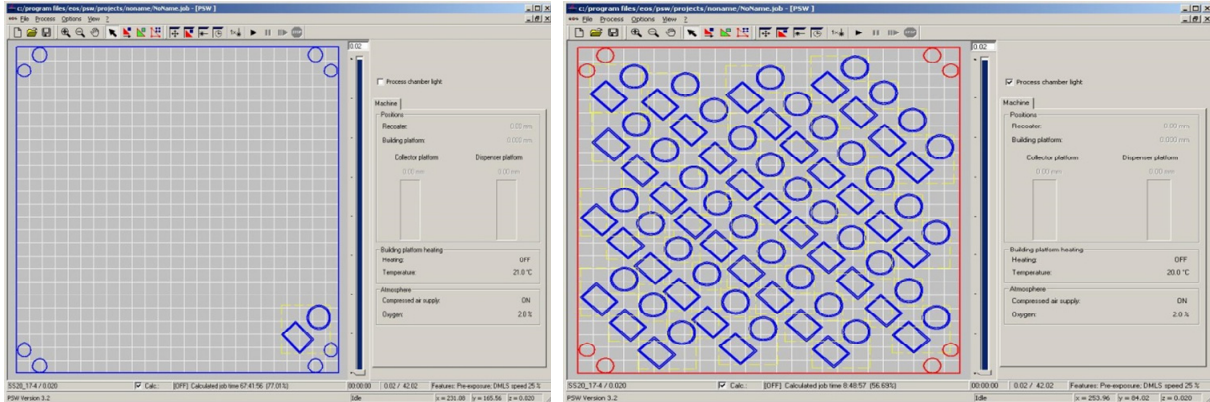
Taulukko 2. Oletuksia kustannuslaskenta-arviota varten.

Koneaika	17,45 € / h
Materiaalikustannus	80 € / kg
Energiakustannus	8,61 snt / kWh

Tässä arviossa lasketaan kaksi tapausta:

1. Valmistus yksi osa kerrallaan
2. Valmistus rakennusosalusta täytettynä samoilla osilla

Rakennusosalustalle mahtuu yhteensä 40 osaa. Kustannus per osa saadaan jakamalla kokonaiskustannus osien lukumäärällä (kuva 16).



Yhden osan valmistus

40 osan valmistus

Kuva 16. Kaksi eri laskennassa käytettyä tapausa.

Taulukko 3 näyttää kokonaisvalmistusajan, energiakulutuksen sekä materiaalikustannuksen kummallekin tapaukselle.

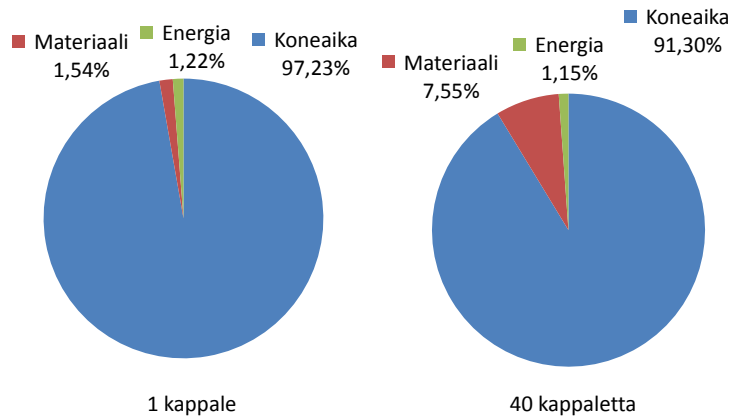
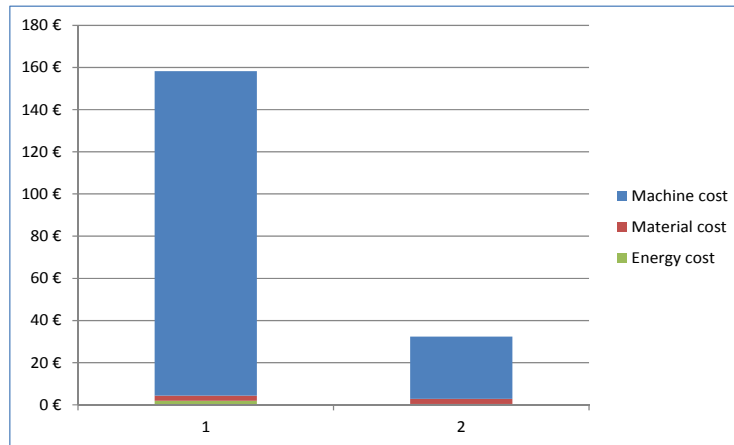
Taulukko 3. Kokonaisvalmistusaika, energian kulutus sekä materiaalikustannus kummallekin tapaukselle.

	1 kerrallaan	40 yhtäikaa
Kokonaisvalmistusaika	8 h 49 min	67 h 42 min
Per kappale	8 h 49 min	1 h 42 min
Energiankulutus	22,5 kWh	173 kWh
Per kappale	22,5 kWh	4,3 kWh
Materiaalikustannus / kple	2,44 €	2,44 €

Kuvassa 17 on esitetty lopulliset kustannuslaskennan tulokset.

Yhden kappaleen hinta:

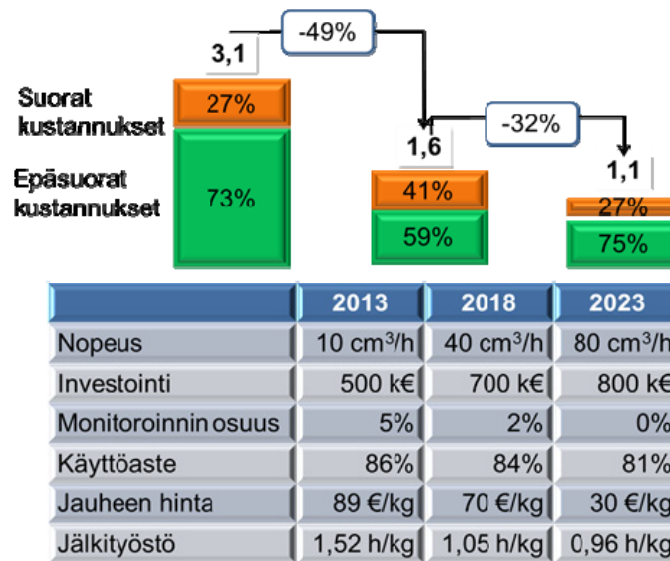
1 kerrallaan	40 yhtäikaa
158,23 €	32,35 €



Kuva 17. Kustannuslaskennan tulokset.

6 Lisäävän valmistuksen mahdollisuudet tulevaisuudessa

Kuvassa 18 esitetään lisäävän valmistuksen kustannuksien kehitys trenditulevaisuudessa. (Roland Berger, 2013)



Kuva 18. Lisäävän valmistuksen kustannusten kehitys tulevaisuudessa. (Roland Berger, 2013)

Kuten kuvasta 18 nähdään, arvioidaan seuraavan kymmenen vuoden kuluessa lisäävän valmistuksen valmistusnopeuden kahdeksankertaistuvan ja kokonaiskustannuksien tippuvan kolmasosaan nykyisestä. Laitteistojen hintojen arvioidaan pysyvän samoina, mutta raaka-ainekustannukset tulisivat tippumaan kolmanneksella. Samoin jälkityöstön hinnan oletetaan puolittuvan.

Yritykset etsivät tapoja ottaa tekniikka käyntiin. Yksi tapa on luokitella tuotteet eri kategorioihin esim. volyymin ja laatuvaatimusten mukaan. Tällöin voidaan aloittaa yksinkertaisemmista ja edetä vaativampiin sovelluksiin pikku hiljaa (ks. kuva 19). (Dusel, 2014) Kategorioissa voidaan huomioida esim. sellaiset asiat kuin volyymi, osan kannattavuus, osan kriittisyys liiketoiminnan kannalta, viranomais määräykset, osan monimutkaisuus, materiaalin saatavuus, prosessin hankaluus, tarvittava(mahdollinen) uudelleensuunnittelu ja sen monimutkaisuus.



Kuva 19. Lisäävän valmistuksen käyttöönoton kehitys tulevaisuudessa MTU:lla. (Dusel, 2014)

Lisäävän valmistuksen eri sovelluksien kypsyyssaste eli odotukset vs. teknologian toteutettavuus on esitetty kuvassa 20 aseteltuna aiemmin esitetylle (sivu 12, kuva 5) Gartnerin hypekäyrälle. (IDTechEx, 2014)

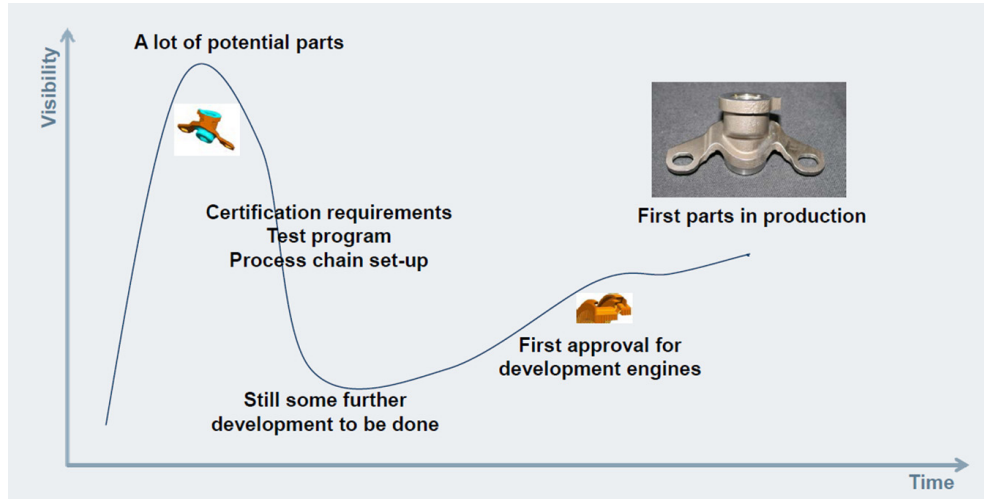


Kuva 20. Lisäävän valmistuksen sovellusten kypsyyssaste vuonna 2014. (IDTechEx, 2014)

Kuvan 20 tarkastelu ei pureudu eri teollisuudenalojen eri tuoteryhmien kypsytyteen. Esimerkiksi hammaslääketieteen sovelluksista purentavikojen korjaustyökalut ovat olleet sarjatuotannossa jo joitakin vuosia. Tuotekohtainen tarkastelu on tällä hetkellä hankalaa, sillä se edellyttäisi yrityskohtaisen tilanteen tarkkaa tuntemista.



Kuvassa 21 on esitetty MTU:n julkistama tarkempi tarkastelu ilmailuteollisuuden sovelluksista ja niiden sijainnista odotus/tekniikan kypsyyden koordinaatistossa. (Dusel, 2014)



Kuva 21. Lisäävän valmistuksen sovellusten teknologian kypsyyden verrattuna odotuksiin (Dusel, 2014)

7 Metallien lisäävän valmistuksen tutkimus ja opetus Suomessa

Lappeenrannan teknillisen yliopiston lasertyöstön laboratoriossa (LUT Laserilla) aloitettiin lisäävän valmistustekniikan tutkimus vuonna 2009. Tällöin keskiössä oli metallisten materiaalien työstönaikaisten ilmiöiden monitorointi. Laitteisto lisäävää valmistustekniikkaa varten saatiin toukokuussa 2011. Akateemisessa tutkimuksessa on nyttemmin keskitytty voimakkaasti lasersäde-materiaali-vuorovaikutuksen ymmärtämiseen. Tämän tarkoituksena on helpottaa uusien materiaalien käyttöönottoa, parantaa prosessin tuottavuutta ja laadunhallintaa ja vähentää kynnystä uusien sovelluskohteiden käyttöönotolle. Lisäksi yrityksille ja valmistavalle teollisuudelle tarjotaan soveltavaa tutkimusta, jotta valmistusteknisiin ongelmiin voidaan löytää ratkaisuja.

Metallien 3D-tulostuksen tutkimus on luonnollinen jatkumo LUT:ssa yli 25 jatkuneelle lasertyöstön tutkimukselle, tälle samalle tutkimusalalle. Lappeenrannassa on myös ensimmäisenä ja toistaiseksi ainoana yliopistona Suomessa käytössä metallimateriaaleihin tarkoitettu laitteisto, sekä Lappeenrannassa annetaan myös ensimmäisenä ja ainoana yliopistona Suomessa opetusta diplominsinööriopiskelijoille lisäävästä valmistustekniikasta sekä myös opetusta teollisuudelle.

Opetuksen rooli tällaisen uuden teknologian implementoinnissa on äärettömän tärkeä: kun työelämään tuleva ikäryhmä ja siellä jo oleva sukupolvi on tietoinen tekniikasta, aletaan vähitellen osata ajatella myös tuotesuunnittelua uudella tavalla, kun ollaan tietoisia tekniikan mahdollisuuksista mutta myös toisaalta sen reunaehdoista ja raja-arvoista.



Tekniikan hyödyntäminen on mahdollisuus myös suomalaisille ja suomalaiselle teollisuudelle. 3D-tulostus voi pelastaa myös suomalaisen teollisuuden. Suomelle 3D-tulostustekniikka on suuri mahdollisuus, sillä maassamme on vahva teollinen osaaminen ja hyvä ICT-osaaminen. (Lehti et al., 2012)

Yritysten pitäisi kuitenkin pystyä ennakkoluulottomasti testaamaan, paitsi tuotteidensa soveltuvuutta 3D-tulostukseen, myös miten paljon parempia tuotteista voidaan tehdä suunnittelemalla ne täysin uudella tavalla jotta uuden teknologian mahdollisuudet voidaan hyödyntää kaikin mahdollisin tavoin. Tässä kohtaa koulutuksen merkitys kohoaa keskeiseen rooliin; uusia työelämään saapuvia sukupolvia tulee kouluttaa tietämään tekniikasta, sen mahdollisuuksista ja raja-arvoista. Pitää myös voida kouluttaa olemassa olevaa teollisuutta, jotta tekniikan implementointi voisi edetä ennakkoluulottomasti Suomessa. Lisäksi koulutusta tarvitaan, että suomalainen teollisuus pysyisi kansainvälisessä kilpailussa mukana.



8 Lähdeluettelo

Anon., President Obama called 3D Printing: "the potential to revolutionize" in State of the Union Address, 3ders, viitattu: 29.8.2014, saatavilla: <http://www.3ders.org/articles/20130213-president-obama-called-3d-printing-the-potential-to-revolutionize-in-state-of-the-union-address.html>.

Anon., Suomessa olevia AM-laitteita, Firpa, viitattu: 3.9.2014, saatavilla: http://www.firpa.fi/AM_lista_viimeisin.pdf. (a)

Anon., EOS – Material data sheet (EOS StainlessSteel PH1 for EOSINT M 270), viitattu: 15.8.2014, saatavilla: <http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/03951b0205d9fef3/0a6771f5d279a19954cf972e655280b1/EOS-StainlessSteel-PH1.pdf>. (b)

Anon., Gartner Says Consumer 3D Printing Is More Than Five Years Away, viitattu: 7.10.2014, saatavilla: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2825417>. (c)

Anon., Digital Photonic Production, Fraunhofer Institute for Laser Technology, viitattu: 1.8.2014, saatavilla: http://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/product_and_services/Brochure_Digital_Photonic_Production.pdf (d)

Atzeni, E., Salmi, A. 2012. Economics of additive manufacturing for end-useable metal parts. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 62, s. 1147–1155.

Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., Hague, R., 2011. Energy Inputs to Additive Manufacturing: Does capacity Utilization Matter?, Proceedings of the Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium. The University of Texas at Austin.

Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., Rosamond, E., Hague, R., 2012. Combined Build-Time, Energy Consumption and Cost Estimation for Direct Metal Laser Sintering, Proceedings of the Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium. The University of Texas at Austin.

Karl-Heinz Dusel, MTU Aero Engines AG, May 2014

EOS GmbH, 2012. EOS StainlessSteel PH1 Material data sheet, [Web document] From: http://www.solidconcepts.com/content/pdfs/DMLS_Stainless_Steel_PH1_15-5_Material_Specifications.pdf [referred: 27.6.2012].

Gu, D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. 2012. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. International Materials Reviews, Iss. 3, pp. 133-164.

Hessman, T., The Impact of 3D printing on Supply Chains, Industry Week, viitattu: 29.9.2014, saatavilla: <http://www.industryweek.com/emerging-technologies/impact-3-d-printing-supply-chains-infographic>.



IDTechEX, 3D printing application hype curve, 2014

Kloetzer S., Erler M., Hartwig L., Ebert R., Steiger B., Exner H. 2010. Micro-Cladding Using a Pulsed Fiber Laser and Scanner. Proceedings of LPM2010 - the 11th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, June 7–10, 2010, Stuttgart, Germany. 5 pp.

Lehti, M., Rouvinen, P. & Ylä-Anttila, P. Suuri hämmennys - Työ ja tuotanto digitaalisessa murroksessa, Helsinki: Taloustieto Oy (ETLA), 2012, s. 34-36.

Liedes, J. Kädet ylös! Valmistamisen vallankumous – revolverista 3D-tulostukseen. Tieteessä tapahtuu, 2013, No. 4, s. 45-50.

Nyamekye, P., Sustainability of laser additive manufacturing of stainless steel, Lappeenranta University of Technology, 2014, 30 s.

Officer, L. H., Williamson, S.H., 2013. Measuring Worth, [Web document] From: <http://www.measuringworth.com/ukcompare/relativevalue.php> [referred: 05.02.2013].

Perumal, H., Improving the supply chain in your company, International Institute of Management, 2006, 3 sivua.

Pekkarinen, J., Laser cladding with scanning optics. Doctoral Thesis Lappeenranta University of Technology, 2014.

Piili, H., Widmaier, T., Happonen, A., Juhanko, J., Salminen, A., Kuosmanen, P. and Nyrhilä, O., Digital design process and additive manufacturing of a configurable product. Proc. Int. Conf. AMSE2012. Thailand, September 27-28, 2012. Singapore Society of Mechanical Engineers (SSME).

Piili, H., Purtonen, T., Väistö, T., Widmaier, T., Salminen, A., Nyrhilä, O., Additive manufacturing as resource-efficient fabrication technology in digital production, Forum of Euromold, 4.12.2013 (a)

Piili, H., Widmaier, T., Happonen, A., Juhanko, J., Salminen, A., Kuosmanen, P. and Nyrhilä, O., Digital design process and additive manufacturing of a configurable product, Advanced Science Letters, Volume 19, Number 3, March 2013, pp. 926-931(6). (b)

Riviera, J., Goasduff, L., Gartner Says Early Adopters of 3D Printing Technology Could Gain an Innovation Advantage Over Rivals, Gartner, 2013, viitattu: 25.9.2013, saatavilla:<http://www.gartner.com/newsroom/id/2388415>.

Ruffo, M.; Hague, R., 2007. Cost estimation for rapid manufacturing – simultaneous production of mixed components using laser sintering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 221, p. 1585-1591.

Ruffo, M.; Tuck, C.; Hague, R., 2006. Cost estimation for rapid manufacturing – laser sintering production for low to medium volumes, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 220, p. 1417-1427.



Schleifenbaum, H., Meiners, W., Wissenbach, K., Hinke, C. Individualized production by means of high power Selective Laser Melting, 2010, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Volume 2, Issue 3, Elsevier Ltd. ISSN: 1755-5817

Scotti, G., Matilainen, V., Kanninen, P., Piili, H., Salminen, A., Kallio, T., Franssila, S., Laser additive manufacturing of stainless steel micro fuel cells, Journal of Power Sources, Volume 272, 2014, s. 356-361.

Shepelevaa L., Medresa B., Kaplana W.D., Bambergera M., Weisheitb A., 2000. Laser cladding of turbine blades. Surface and Coatings Technology, Vol. 125, Iss. 1-3, pp. 45-48. Thompson, D., Is 3D Printing Overrated? Not at All, Says GE's Jeffrey Immelt, The Atlantic, viitattu: 2.9.2014, saatavilla: <http://www.theatlantic.com/business/archive/2013/02/is-3d-printing-overrated-not-at-all-says-ges-jeffrey-immelt/272965/>.

Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. F. 2004. Laser Cladding, CRC Press, Boca Raton, FL, USA. 280 pp.

Widmaier, T., Kontio, J., Juhanko, J. Piili, H., Kuosmanen, P. Salminen, A. Collaborative design process of a configurable product. Proceedings of the 8th International DAAAM Baltic Conference "Industrial engineering", 19-21 April 2012, Tallinn, Estonia, (2012) 110-115

Wohlers, T., Additive manufacturing and 3D printing – State of industry, Wohlers Associates Inc., 2012, USA, 285 sivua.

Wohlers, T., Wohlers Report, Wohlers Associates Inc., 2014, USA

Väistö, T., Matilainen, V., Piili, H., Salminen, A., Nyrhilä, O., Techno-economical benchmark study of laser additive manufacturing of stainless steel parts, Nolamp 14, August 26-28, 2013, Gothenburg. Sweden, 12 s.