



3D-TULOSTUSPALVELUN KESTÄVÄ TUOTANTO

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan diplomityö

2025

Tommi Kuutsa

Tarkastajat: Dosentti Harri Eskelinen

Dosentti Ilkka Poutiainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Konetekniikka

Tommi Kuutsa

3D-tulostuspalvelun kestävä tuotanto

Konetekniikan diplomityö

2025

66 sivua, 37 kuvaa, 18 taulukkoa ja 6 liitettä

Tarkastajat: Dosentti Harri Eskelinen ja Dosentti Ilkka Poutiainen

Avainsanat: Lisäävä valmistus, AM, 3D-tulostus, DfMA, elinkaariarviointi, LCA, hiilijalanjälki

Tässä diplomityössä tarkastellaan 3D-tulostuspalvelun kestävää tuotantoa ja vertaillaan eri lisäävän valmistuksen (AM) valmistusmenetelmiä ympäristövaikutusten näkökulmasta. Työssä keskitytään erityisesti Design for Additive Manufacturing (DfAM) -periaatteen soveltamiseen sekä AM-tekniikoiden, kuten Material Extruding (MEX), VAT Photopolymerization (VPP) ja Powder Bed Fusion (PBF) välisiin eroihin.

Työ sai alkunsa Maker3D Oy:n asiakastyöstä, jossa analysoidaan DfMA:n vaikutusta henkilöhisseissä käytettävän vaijeriohjaimen uudelleensuunnitteluun ja sen vaikutuksia tuotantohostamiseen sekä hiilijalanjälkeen. Hiilijalanjälki vaijeriohjaimelle on suoritettu elinkaariarviointi (LCA)-menetelmää hyödyntäen cradle-to-gate tarkastelujakson aikana. Arvioinnin aikana huomioitiin tarkastelujaksossa syntyneet hiilipäästöt materiaalin valmistuksesta valmiiseen vaijeriohjaimeen asti.

Tulokset osoittavat DfAM:n mukaisen uudelleensuunnittelun mahdollistavan materiaalinkulutuksen ja tuotantotehokkuuden parantamisen. Valmistusmenetelmien välillä havaittiin eroja prosessien laitteiden energiankulutuksissa sekä cradle- to-gate tarkastelujakson aikaisissa hiilipäästöissä.

Vaikka työn tuloksia ei voida suoraan käyttää muille komponenteille, osoittavat tulokset kuitenkin sen, että DfMA:ta on syytä hyödyntää kestävämpien tuotantoratkaisuiden saavuttamiseksi. Lisäksi hiilijalanjälkilaskenta voidaan integroida prosessiin mukaan tarkempien kestävyysvaikutusten arvioimiseksi. Työn jatkotutkimuksessa voitaisiin selvittää alkuperäisen vaijeriohjaimen hiilijalanjälki eri sarjamäärillä ruiskupuristusmenetelmällä ja verrata sen tuloksia lisäävän valmistuksen menetelmiin. Lisäksi vaijeriohjaimelle voitaisiin hyödyntää DfMA:ta laajemmin sekä suorittaa tarkempi elinkaariarviointi.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Tommi Kuutsa

Sustainable production of 3D printing service

Master's thesis

2025

66 pages, 37 figures, 18 tables and 6 appendices

Examiners: Docent Harri Eskelinen and Docent Ilkka Poutiainen

Keywords: Additive manufacturing, AM, 3D-printing, DfMA, life-cycle assessment, LCA, carbon footprint

This thesis examines the sustainable production of a 3D printing service and compares different additive manufacturing (AM) methods from an environmental impact perspective. It focuses on the application of the Design for Additive Manufacturing (DfAM) principle and the differences between AM techniques such as Material Extrusion (MEX), VAT Photopolymerization (VPP) and Powder Bed Fusion (PBF).

The work was inspired by a customer project at Maker3D Oy to analyse the impact of DfMA on the redesign of a wire rope guide used in body lifts and its effects on production efficiency and carbon footprint. The carbon footprint of the wire rope guide was carried out using a life cycle assessment (LCA) methodology over the cradle-to-gate review period. The assessment considered the carbon emissions generated during the period from material manufacturing to the finished wire rope guide.

The results show that redesigning according to DfAM can lead to improvements in material consumption and production efficiency. Differences were found between the manufacturing methods in the energy consumption of the process equipment and in the cradle-to-gate carbon emissions during the study period.

Although the results of this work cannot directly be applied to other components, the results show that DfMA can be used to achieve more sustainable production solutions. In addition, carbon footprint calculations can be integrated into the process for a more accurate assessment of sustainability impacts. Further research could be carried out to determine the carbon footprint of the original wire rope guide with different batch sizes using the injection moulding method and compare its results with those of additive manufacturing.

LYHENNELUETTELO

AM	Lisäävä valmistus (Additive Manufacturing)
CAD	Tietokone avusteinen suunnittelu (Computer-Aided Design)
DfMA	Lisäävän valmistuksen suunnittelumenetelmällä (Design for Additive Manufacturing)
DLP	Digitaalinen valonkäsittelytekniikka (Digital Light Processing)
FDM	Sulatetun kerrostuksen mallinnus (Fused Deposition Modelling)
LCA	Elinkaariarviointi (Life Cycle Assessment)
MEX	Materiaalin suulakepuristus (Material Extruding)
MSLA	Valomaski stereolitografiaa (Masked Stereolithography)
OMM	Avoin materiaalitila (Open Material Mode)
PA	Polyamidi (Polyamide)
PBF	Jauhepeti sulatus (Powder Bed Fusion)
PLA	Polymaitohappo (Poly Lactic Acid)
RM	Pikavalmistus (Rapid Manufacturing)
RP	Nopea prototyypiteknikka (Rapid Prototyping)
RT	Nopea työkalujen valmistus (Rapid Tooling)
SLA	Stereolitografia (Stereolithography)
SLS	Laser sintraus (Selective Laser Sintering)
STL	Stereolitografia (Stereolithography)
TPU	Termoplastinen polyuretaani (Thermoplastic Polyurethane)
VPP	Nesteen fotopolymerisointi (VAT Photopolymerization)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	7
1.1	Tutkimusongelma ja -kysymykset.....	8
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja rakenne.....	9
1.3	Tutkimus menetit.....	10
1.4	Työn rajaus ja rajoitteet.....	10
2	Kirjallisuuskatsaus.....	12
2.1	AM-teknologiat.....	15
2.1.1	MEX.....	16
2.1.2	VPP.....	17
2.1.3	PBF.....	19
2.2	Design for Additive Manufacturing (DfAM).....	21
2.3	AM:n ympäristövaikutukset ja elinkaariarviointi.....	21
3	DfAM:n toteutus vaijeriohjaimelle.....	26
3.1	Lähtötiedot (Vaihe 1).....	26
3.2	Uudelleensuunnittelu (vaihe 2).....	27
3.3	Valmistus (vaihe 3).....	28
4	Hiilijalanjälkilaskenta vaijeriohjaimelle.....	32
4.1	Tavoitteet ja rajaukset (Goal & Scope).....	32
4.2	Inventaarioanalyysi.....	33
4.2.1	Valmistusprosessien materiaalit ja apumateriaalit.....	33
4.2.2	Kuljetukset.....	35
4.2.3	Valmistusprosessit.....	35
4.2.4	Hukka/jäte.....	45
5	Tulokset.....	46
5.1	DfAM:n tulokset.....	46
5.2	Hiilipäästöjen tulokset.....	50

5.2.1	VPP	50
5.2.2	PBF	51
5.2.3	MEX.....	52
6	Tulosten analysointi.....	54
6.1	DfAM:n tulosten analysointi	54
6.2	Hiilipäästöjen tulosten analysointi ja valmistusmenetelmien vertailu.....	55
7	Johtopäätökset ja pohdinta	60
7.1	Yhteenveto	60
7.2	Työn luotettavuus ja rajoitteet	61
7.3	Tulosten merkitys ja sovellettavuus.....	61
7.4	Jatkotutkimusaiheet	62
	Lähteet	63

Liitteet

Liite 1. Alkuperäisen vaijeriohjaimen hiilijalanjälkilaskuri (VPP)

Liite 2. DfMA:n avulla uudelleen suunnitellun osan hiilijalanjälkilaskuri (VPP)

Liite 3. Alkuperäisen vaijeriohjaimen hiilijalanjälkilaskuri (PBF)

Liite 4. DfMA:n avulla uudelleen suunnitellun osan hiilijalanjälkilaskuri (PBF)

Liite 5. Alkuperäisen vaijeriohjaimen hiilijalanjälkilaskuri (MEX)

Liite 6. DfMA:n avulla uudelleen suunnitellun osan hiilijalanjälkilaskuri (MEX)

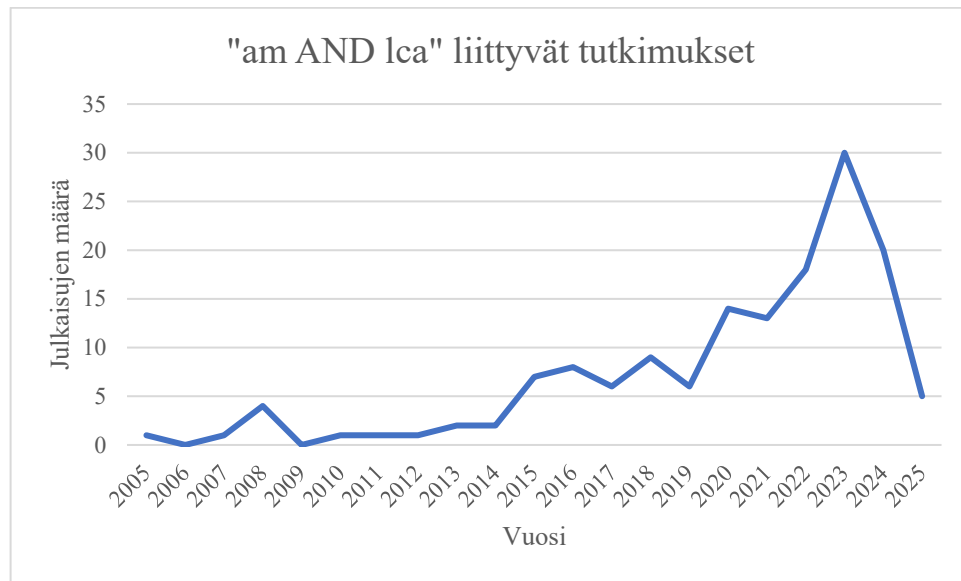
1 Johdanto

Lisäävä valmistus eli Additive Manufacturing (AM) on kehittynyt viime vuosikymmenien aikana prototyypivalmistuksesta tuotantoteknologiaksi, jota hyödynnetään monilla teollisuuden aloilla (Vaneker, Bernard, Moroni, Gibson & Zhang 2020, s. 578.). AM, joka tunnetaan yleisesti nimellä 3D-tulostus, on innovatiivinen teknologia, joka on herättänyt vahvaa kiinnostusta sen potentiaalisten ympäristöhyötyjen vuoksi. AM-teknologia mahdollistaa myös yksilöllisen tarpeen mukaan tuotteiden valmistuksen paikallisesti ja tarpeen mukaan. (Jung, Kara, Nie, Simpson & Whitefoot 2023, s. 6373–6375.)

Lisäävän valmistuksen suunnittelumenetelmällä eli Design for Additive Manufacturing (DfAM) avulla tuote voidaan optimoida lisäävän valmistuksen prosesseille. DfAM on osoittautunut tärkeäksi työkaluksi lisäävän valmistuksen ympäristövaikutusten minimoimisessa. DfAM:n avulla voidaan suunnitella ja valmistaa tuotteita, jotka olisivat perinteisillä valmistusmenetelmillä mahdottomia tai taloudellisesti kannattamattomia toteuttaa. (Vaneker et al. 2020, s. 579.)

AM:n avulla voidaan luoda myös kiertotalouden mukaisia ratkaisuja modulaarisella suunnittelulla, optimoimalla rakenteita kevyemmiksi ja kestävämmiksi. Myös biopohjaisten ja kierrätettävien materiaalien hyödyntäminen tuotteiden valmistuksessa tukee kestävän kehityksen mukaisia ratkaisuja. Edellä mainitut tekijät vaikuttavat erityisesti materiaalintarpeen, päästöjen ja energiankulutuksen vähenemiseen. Lisäksi paikallisen valmistuksen sekä digitaalisen varaosakirjaston avulla on mahdollista pienentää kuljetuksista aiheutuvia päästöjä ja varastointitarpeita. (Sauerwein, Doubrovski, Balkenende & Bakker 2019, s. 1139–1148.)

Elinkaariarviointi eli Life Cycle Assessment (LCA) on menetelmä, jonka avulla voidaan arvioida tuotteen tai prosessin ympäristövaikutuksia sen elinkaaren eri vaiheissa. LCA on standardoitu menetelmä ja sen avulla voidaan tehdä päätöksiä siitä, miten AM-prosesseja voidaan kehittää ympäristöystävällisemmiksi ja taloudellisesti kannattavammiksi (Kokare, Oliveira & Godina 2023, s. 540–548.) Alla olevassa kuvassa 1 esitetään Scopus-tietokannasta löytyvät tieteelliset julkaisut. Hakusanoina on käytetty ”am AND lca” eli lisäävävalmistus ja elinkaariarviointi. Hakusanaa on hyödynnetty hakemaan tieteellisiä julkaisuja, joiden otsikossa, avainsanoissa tai tiivistelmissä on mainittu vastaavat lyhenteet.



Kuva 1. Lisäävän valmistukseen ja elinkaariarviointiin liittyvät julkaisut Scopus-tietokannasta vuosilta 2005–2025.

1.1 Tutkimusongelma ja -kysymykset

Tämän diplomityön aihe on saanut alkunsa Maker3D Oy yrityksen asiakasprojektista, jossa asiakkaalla oli tarve löytää ratkaisu henkilöihissin vaijeriohjaimen uudelleentulomäärä varten. Vaijeriohjainta valmistettiin aikaisemmin polyoksimetyyli materiaalista ruiskupuristus menetelmällä, mutta vanhaa ruiskupuristemuottia ei ollut enää saatavilla. Lisäksi vaijeriohjaimen vuotuiset tuotantomäärät ovat pienet, minkä takia ruiskupuristusmenetelmä ei ole kustannustehokkain ratkaisu ohjaimen uudelleentulomäärä varten.

Tässä tutkimuksessa keskitytään erityisesti ruiskupuristetun vaijeriohjaimen uudelleentulomäärä varten DfAM-menetelmän mukaisesti sekä käytössä olevien valmistustekniikoiden Material Extruding (MEX), Vat Photopolymerization (VPP) ja Powder Bed Fusion (PBF) -menetelmien vertailuun. Tulosten avulla on tarkoitus tuottaa tietoa lisäävän valmistuksen eri valmistusmenetelmien ympäristövaikutuksista ja niiden välisistä eroista. Edellä mainittujen tutkimusongelmien perusteella, tässä työssä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Miten DfAM:n mukainen tuotteen uudelleensuunnittelu vaikuttaa tuotannontehostumiseen sekä ympäristövaikutuksiin verrattuna alkuperäiseen tuotteeseen?
2. Miten työssä käytettävät valmistusmenetelmät eroavat ympäristövaikutuksiltaan erityisesti tuotteen hiilijalanjälkeä tarkastellessa?
3. Miten valmistusmenetelmien hiilijalanjälki skaalautuu eri sarjakokoja tarkastellessa?

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rakenne

Työn tavoitteena on analysoida 3D-tulostuspalvelun tuotannon kestävyysnäkökulmia vertailemalla eri valmistusmenetelmiä keskenään. Työn keskeisimmät aiheet ovat ruiskupuristusmenetelmällä valmistetun tuotteen uudelleensuunnittelu DfAM:ta hyväksi käyttäen sekä sen vaikutuksien vertailu alkuperäiseen tuotteeseen ympäristövaikutusten kannalta eri valmistusmenetelmillä. Lisäksi työssä vertaillaan uudelleensuunnitellun osan hiilipäästöjä eri valmistusmenetelmien välillä. Työn rakenne on seuraavanlainen:

1. Tiedon keruu lisäävästä valmistuksesta, käytettävistä valmistusmenetelmistä, DfAM:stä ja AM:n kestävyysnäkökulmista sekä hiilipäästöjen laskennasta.
2. Tuotteen uudelleensuunnittelu DfAM mukaisesti.
3. Hiilijalanjälkilaskenta LCA-menetelmää hyödyntäen cradle-to-gate eli kehdosta portille -rajauksen mukaisesti eri valmistusmenetelmille.
4. Alkuperäisen tuotteen ja DfAM:n vertailutulosten esittäminen cradle-to-gate tarkastelujakson aikana ympäristönäkökulmien ja tuotannontehostumisen kannalta eri valmistusmenetelmillä.
5. Uudelleensuunnittelun osan hiilipäästöjen vertailutulokset cradle-to-gate tarkastelujakson aikana eri valmistusmenetelmien välillä ja sarjamäärien vaikutuksesta.
6. Tulosten analysointi ja alkuperäisen tuotteen vertailu uudelleensuunnitellun tuotteen välillä sekä eri valmistusmenetelmien välinen vertailu.
7. Työn toteutuksen arviointi sekä jatkotutkimusaiheet.

1.3 Tutkimus metodit

Työn toteuttamiseksi käytetään kvantitatiivista tutkimusmenetelmää yhdistäen kokeellisen testauksen ja laskennallisen analyysin. Ruiskupuristusta varten suunniteltu tuote uudelleensuunnitellaan DfAM:n mukaisesti, minkä jälkeen se valmistetaan työssä käytettävillä lisäävän valmistuksen valmistusmenetelmillä (MEX, VPP ja PBF). Hiilijalanjätkilaskenta suoritetaan cradle-to-gate-tarkastelujakson mukaisesti. Hiilijalanjälki tuotteelle lasketaan Excel-ohjelmistossa käyttäen aikaisemmista tutkimuksista saatavia tietoja ja eri tietokantoja. Tuloksissa analysoidaan eri valmistusmenetelmien välisiä eroja ympäristövaikutuksissa sekä kuinka DfAM-periaatteen avulla voidaan pienentää tuotteen valmistuksen ympäristövaikutuksia. Taulukossa 1 on listattuna yhteenveto eri tutkimusmetodeista.

Taulukko 1. Yhteenveto eri tutkimusmetodeista.

Vaihe	Menetelmä	Työkalu ja aineisto
DfAM	Uudelleensuunnittelu ja valmistuksen optimointi	3D-skanneri, CAD-ohjelmisto
LCA	Elinkaariarviointi (Cradle-to-gate)	Ilmaiset tietokannat, aikaisemmat tutkimukset
Vertailu (DfAM)	DfAM:n vaikutus tuotannon tehokseen, materiaalin käyttöön ja hiilipäätöihin	Tilastollinen tarkastelu
Vertailu (LCA)	Tuotteen hiilipäästöjen analysointi ja sarjamäärän vaikutus	tilastollinen tarkastelu

1.4 Työn rajaus ja rajoitteet

Työ on rajattu siten, että tarkasteltavia valmistusmenetelmiä ovat saatavilla olevat kolme eri lisäävän valmistuksen valmistusmenetelmää. Hiilijalanjätkilaskenta on rajattu cradle-to-gate-tarkastelujakson mukaisesti, minkä vuoksi työssä ei oteta huomioon valmiin tuotteen toimitusta asiakkaalle, käyttöikää eikä sen loppusijoitusta elinkaaren päässä. Lisäksi hiilijalanjätkilaskennassa keskitytään ainoastaan tuotteen hiilipäästöjen arviointiin sekä miten ne skaalautuvat eri sarjamäärissä (30, 100, 250, 500 ja 1000), vertaillen alkuperäistä osaa uudelleensuunnitellun osan välillä sekä eri valmistusmenetelmiä keskenään.

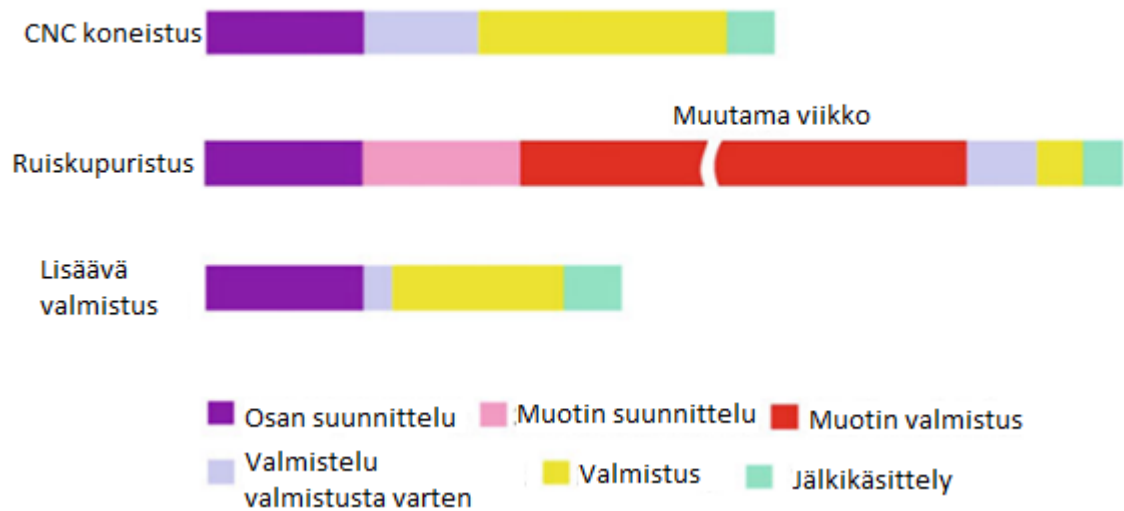
Tutkimuksen rajoitteisiin kuuluvat eri tietokantojen ja aikaisempien tutkimuksien väliset erot materiaalien valmistuksen, kuljetusten, ja sähköntuotannon arvoista kilogrammoina hiilidioksidiekvivalenteina (kgCO_2e). DfAM:n vaikutusarviointi suoritetaan vain yhdelle tuotteelle, joten tuloksia ei voida käyttää suoraan muille komponenteille. Lisäksi suunnitteluohjelmien toiminnallisten puutteiden takia DfAM:ta ei ole voitu käyttää täydessä potentiaalisuudessaan. Nämä rajaukset ja rajoitteet tulee huomioida tulosten tulkinnan aikana.

2 Kirjallisuuskatsaus

Lisäävää valmistusta on kutsuttu aikaisemmin pikamallinnukseksi ja nykypäivänä kansanomaaisesti 3D-tulostukseksi. Nopea prototyypitekniikka eli Rapid prototyping (RP) -menetelmää käytetään teollisuudessa yleisesti kuvaamaan prosessia, jossa pyritään luomaan järjestelmää tai tuotetta esittävä malli ennen sen lopullista julkaisemista. Tarkoituksena on siis saada mahdollisimman nopeasti valmistettua osasta prototyyppi tai perusmalli, jota voidaan hyödyntää lopullisen mallin tai tuotteen kehittämiseen. Prototyyppejä voidaan valmistaa suoraan digitaalisten mallien avulla, mutta myös lopullisia tuotteita. Tämän takia pikamallinnus terminä on nykypäivänä riittämätön kuvaamaan lisäävän valmistuksen eri teknologioiden uusimpia sovelluksia. (Gibson, Rosen & Stucker 2015, s. 1–3.)

Yleisesti lisäävä valmistus lyhennetään AM:ksi (Additive Manufacturing). AM-tekniikan perusperiaate on se, että valmistettava malli on luotu kolmiulotteisella tietokoneavusteisella suunnittelulla eli Computer-aided design (CAD). Tekniikka helpottaa monimutkaisten kappaleiden valmistuksen CAD-datasta, toisin kuin muut valmistusprosessit tarvitsevat tarkat tiedot valmistuksen eri vaiheista. Esimerkiksi missä järjestyksessä kappaleen piirteet valmistetaan, mitä työkaluja prosessin aikana käytetään sekä tarvitseeko kappaleen valmistusprosessin aikana lisäkiinnikkeitä. AM-tekniikka vaatii valmistusta varten vain käyttäjältään CAD-datan, käyttökokemuksen AM-koneista sekä tietoa koneiden käyttämisestä materiaaleista. (Gibson et al. 2015, s. 1–3.)

Nopeus on kuitenkin ymmärrettävä tässä käsitteessä ehdollisena. AM-tekniikkaa hyödyntäessä tuotantoajat voivat vaihdella muutamasta minuutista päiviin tuotteen koon sekä valmistuksessa määritetyn kerrospaksuuden takia. Prototyyppien valmistaminen on kuitenkin huomattavasti nopeampaa kuin perinteisiä valmistusmenetelmiä hyödyntäessä (Gibson et al. 2015, s. 1–3.). Alla oleva kuva 2 esittää eri valmistusmenetelmien valmistusnopeuksia ja -vaiheita.



Kuva 2. Valmistusmenetelmien vaiheet sekä niihin kuluvat ajat kuvattuna (Muok. Godec, Ginzalez-Gutierrez, Nordin, Pei & Urena Alcazar 2022, s. 2).

AM-menetelmien seuraava sovelluskohde on ollut nopea työkalujen valmistus eli Rapid Tooling (RT). RT:tä soveltamalla voidaan valmistaa erilaisia työkaluja ja muotteja polymeereistä, keramiikasta ja metallista. Kerros kerrokselta-valmistus mahdollistaa myös tässä sovelluksessa tuotantoaikojen merkittävän lyhentämisen sekä geometrisesti vaativien muottien ja työkalujen valmistuksen. Materiaalien kehittyessä AM-teknologiaa on voitu käyttää suoraan yksittäisten tuotteiden tai pienten tuotesarjojen valmistukseen. Tätä kutsutaan pikavalmistukseksi eli Rapid Manufacturing (RM), ja se on yleensä ainoa järkevä tapa toteuttaa edellä mainitut tuotantomäärät. Vuonna 2009 RP-, RT- ja RM-prosesseja varten perustettiin kansainvälinen komitea ASTM International Committee F42. Toimikunnan tehtävänä oli määrittellä menetelmät, jotka johtivat kattotermin AM määrittelyyn. (Godec et al. 2022, s. 1–2.)

Teollisuudessa AM:ää käytetään yleisesti pienten tuotantoerien valmistukseen, esimerkiksi auto-, ilmailu- ja avaruusteollisuudessa, minkä osuus AM-markkinoista on yli kaksikymmentä prosenttia. Taulukossa 2 luetellaan AM:ää käyttäviä teollisuudenaloja, niiden sovelluksia ja hyötyjä. (Attran 2017, s. 8.)

Taulukko 2. AM-teknologiaa hyödyntäviä teollisuuden aloja, niiden sovelluskohteita ja hyötyjä (Muok. Attaran 2017, s. 9).

Teollisuuden ala	Sovelluskohteet	Hyödyt
Ilmailuteollisuus	<ul style="list-style-type: none"> • Prototyyppien valmistus • Osien valmistus • Massan pienentäminen lopputuotteissa 	<ul style="list-style-type: none"> • Valmistettavien monimutkaisten komponenttien alhaiset kustannukset • Komponentit voidaan valmistaa paikalla, koska toimitusrajoituksia ei ole • Lopputuotteiden laatua voidaan parantaa
Autoteollisuus	<ul style="list-style-type: none"> • Prototyyppien valmistus • Osien valmistus • Massan pienentäminen lopputuotteissa • Jäähdytysjärjestelmien valmistus erityisesti kilpa-autoissa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modularisointi vähentää ylimääräisten osien käyttöä • Tuotekehityskustannukset pienenevät • Varastoja voidaan pienentää • Korjauskustannukset pienenevät
Terveydenhuolto ja lääketiede	<ul style="list-style-type: none"> • Robottikädet. • Ihmisen elinten valmistus. • Rääätälöityjen implanttien valmistus. • Kehon osien jälleenrakentaminen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Vähentää leikkaukseen kuluvaan aikaan ja kustannuksiin • Leikkauksen jälkeisten komplikaatioiden riski vähenee • Lämpimenoaika lyhenee
Hammaslääketiede ja hammasteknologia	<ul style="list-style-type: none"> • Hammaslääketieteelliset ja ortodontiset laitteet • Rääätälöidyt hampaat ja hammaskruunut • Prototyyppien valmistus • Hammashoito 	<ul style="list-style-type: none"> • Suuri potentiaali käyttää uusia sopivia materiaaleja • Prosessien läpimenoaika lyhenee • Proteesit voidaan valmistaa nopeasti

AM-teknologiaa voidaan hyödyntää edellä mainittujen toimialojen lisäksi esimerkiksi rakennusteollisuudessa pienoismallien tai kokonaisten talojen valmistuksessa, suoraan kuluttajalle räätälöidyissä tuotteissa kuten silmälasissa sekä elintarviketeollisuudessa. (Attaran 2017, s. 8.)

2.1 AM-teknologiat

Perusperiaate suurimmalla osalla AM-tekniikoista on samanlainen. Osan valmistus AM-tekniologiaa hyödyntäen etenee seuraavanlaisesti: (Kumar 2020, s. 4–5.)

1. 3D-malli luodaan CAD-ohjelmassa.
2. 3D-mallin tiedostomuoto käännetään CAD-ohjelmassa Stereolitografia eli Stereolithography (STL) -tiedostoksi, jotta malli voidaan viipaloida.
3. STL-tiedosto ladataan viipalointiohjelmaan ja se viipaloidaan vaakasuunnassa. Näin saadaan kerättyä tarpeellista tietoa mallista eri pisteiden välillä. Vaakasuoran leikatun mallin kahden peräkkäisen pisteen väli määrittää valmistettavan mallin kerrospaksuuden.
4. Viipalointiohjelmassa voidaan määrittää kerrospaksuuden lisäksi myös valmistettavan mallin materiaali ja muuttaa eri tulostusparametreja.
5. Käytettävää AM-konetta varten STL-tiedosto muutetaan G-koodiksi, jotta laitteen työkalu voi määrittää kulkureitin valmistuksen aikana.
6. Työkalun avulla virtuaaliset kerrokset voidaan muuttaa fyysisiksi kerroksiksi. Kerrokset tehdään aina edellisen kerroksen päälle, kunnes valmistettava malli on valmis.
7. Kun malli on valmis, voidaan sitä käyttää lopputuotteena tai tarvittaessa jälkikäsitellä.

Kuvassa 3 on esitetty, miten 3D-malli viipaloidaan kerroksiksi ja valmistuksessa tarvittava vaiheiden järjestys.



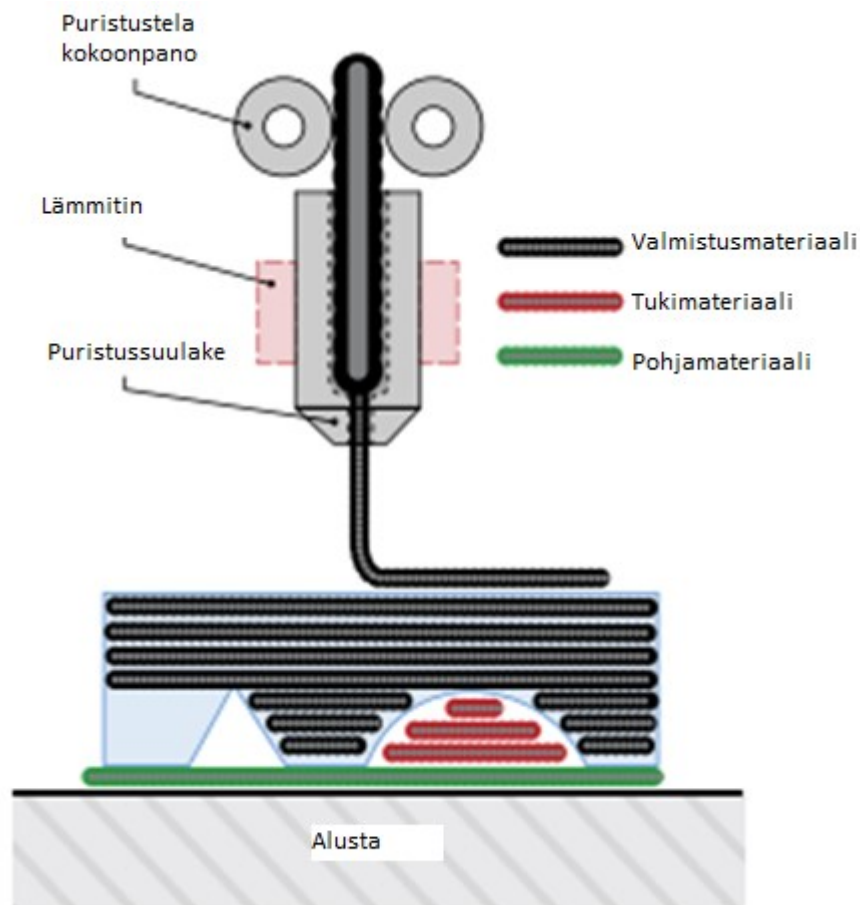
Kuva 3. AM-tekniikoiden prosessin kuvaus (Muok. Gibson et al. 2015, s. 5).

2.1.1 MEX

Materiaalin suulakepuristus eli Material Extruding (MEX) on ASTM-standardien mukainen valmistusteknologia. Scott Crump keksi ja patentoi Sulatetun kerrostuksen mallinnus eli Fused Deposition Modelling (FDM) -menetelmän, mikä mullisti valmistusteollisuuden ja Stratasys Ltd. yrityksen perustamiseen. Myöhemmin teknologia demokratisoitiin 3D-tulostimien kehittämiseksi ja MEX-teknologia on ollut saatavilla harrastelijoille, tutkijoille ja pienyrityksille. Nykypäivänä teknologia sisältää suuria ja edistyneitä teollisia järjestelmiä sekä laajan harrastajayhteisön. (Leary 2020, s. 223.)

MEX-prosessi käyttää materiaalina termoplastisia filamentteja, jotka sulatetaan kontrolloidusti. Sulanut materiaali puristetaan suuttimen läpi tulostusalustalle ja kerrostetaan aikaisemman kerroksen päälle. Suutinta ja alustaa liikutetaan XYZ-suunnissa valmistuksen aikana. Suuttimen läpi puristettu materiaali jäähtyy ja kovettuu tulostusalustalla valmistettavan tuotteen mukaiseksi. Prosessia ohjataan ohjelmoidun työpolun avulla, joka luodaan 3D-mallin pohjalta. Prosessin avulla on mahdollista luoda monimutkaisia geometrioita sekä

integroida useita materiaaleja tuotteen valmistamiseksi. Innovaatioiden avulla prosessin kehitystä on saatu parannettua erityisesti joustavuuden ja soveltuvuuden kannalta. Kuvassa 4 on esitetty MEX-prosessin toimintaperiaate. (Leary 2020, s. 234–235.)



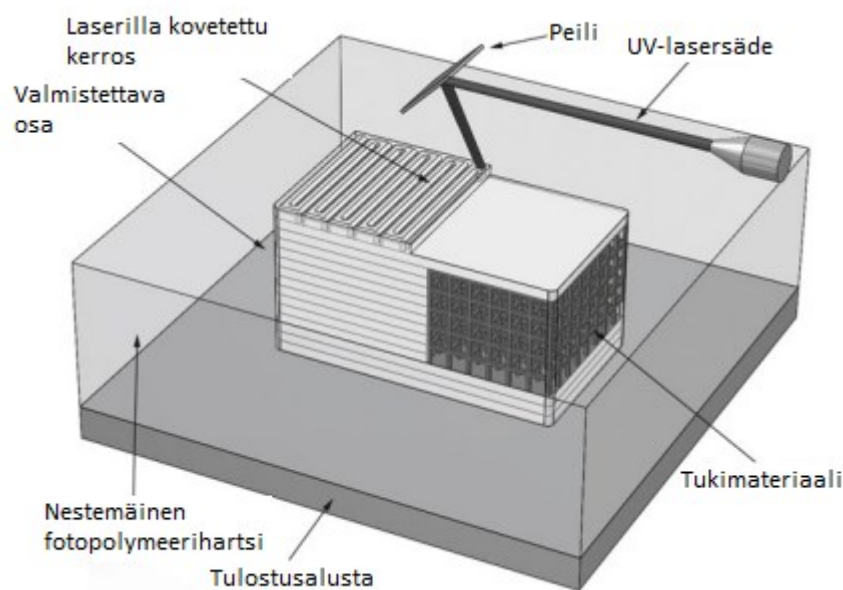
Kuva 4. MEX-prosessin toiminta kuvattuna ja prosessin eri komponentit (Muok. Leary 2020, s. 235).

2.1.2 VPP

Nesteen fotopolymerisointi eli Vat Polymerization (VPP) on yksi ASTM-luokitelluista AM-teknologioista. Teknologiassa nestemäinen fotopolymeerihartsit kovetetaan valonlähteen

avulla. VPP soveltuu erityisesti monimutkaisille muodoille ja hienorakenteisille geometrioille, sen tarjoaman korkean resoluution vuoksi. VPP-tekniikan sisältää eri sovellusmuotoja, joista yleisin on stereolitografia eli Stereolithography (SLA). SLA:ssa käytettävä fotopolymeerihartsia kovetetaan laserin avulla kontrolloidusti valmistuksen aikana. Toinen yleisesti käytetty sovellusmuoto on digitaalinen valonkäsittelytekniikka eli Digital Light Processing (DLP). DLP:ssä kokonainen kerros kovetetaan kerralla käyttämällä hyödyksi digitaalista projektoria. Digitaalisen projektorin hyödyntäminen nopeuttaa prosessia, mutta saattaa vaikuttaa valmistuksen aikana resoluutioon. (Leary 2020, s. 283–284.)

VPP-prosessissa valmistus alkaa täyttämällä laitteen säiliö tai hartsiallas nestemäisellä fotopolymeerihartsilla. Valonlähde, eli aikaisemmin mainitut laser tai digitaalinen projektori, kohdistavat valoa valmistuksen aikana haluttuihin kohtiin. Tämä aiheuttaa fotopolymeerihartsin polymerisoitumisen, eli kovettumisen valmistettavan mallin mukaisesti. Kovettunut materiaali muodostaa prosessin aikana ensimmäisen kerroksen, jonka jälkeen tulostusalustaa liikuttamalla prosessia toistetaan kunnes malli on valmis. Valmistettu kappale poistetaan laitteesta ja pinnalle sekä onkaloihin jäänyt nestemäinen hartsi poistetaan. Kappaleen kovuus ja mekaaniset ominaisuudet voidaan varmistaa kovettamalla sitä ultraviolettia (UV) -kammiassa. (Leary 2020, s. 283.) Kuvassa 5 on esitetty VPP:n toimintaprosessi sekä eri komponentit.



Kuva 5. VPP-prosessi ja sen eri komponentit (Muok. Diegel, Nordin & Motte 2020, s. 31).

2.1.3 PBF

Jauhepetisulatus eli Powder Bed Fusion (PBF) -prosessit olivat ensimmäisiä kaupallistettuja lisäävän valmistuksen prosesseja. Kaikilla PBF-prosesseilla on yhteiset perusominaisuudet, jotka ovat: (Gibson et al. 2015, s. 107.)

- Yksi tai useampi lämmönlähde jauhepartikkelin fuusion saavuttamiseksi.
- Menetelmä, jolla jauhefuusion alue saadaan määriteltyä jokaisella kerroksella.
- Mekanismi jauhekerroksen lisäämiseksi.
- Mekanismi jauhekerroksen tasoittamiseksi.

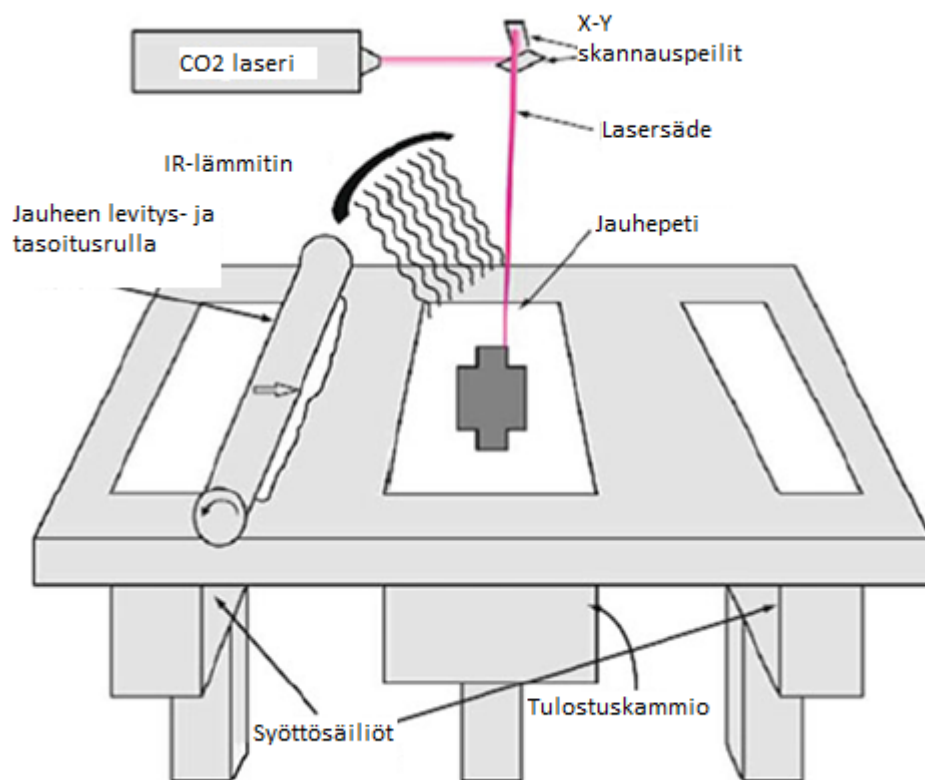
Hyvin yleisesti lämmönlähde PBF-prosessissa on laser, jota hyödyntäviä koneita kutsutaan lasersintraus eli Selective Saser Sintering (SLS)-koneiksi. SLS-prosessi on aluksi suunniteltu hyödynnettäväksi muoviprototyyppien valmistuksessa pisteittäin etenevällä laserskan-naustekniikalla. Samaa prosessia on hyödynnetty tämän jälkeen metalli- ja keraamijauheisiin. PBF-prosesseja käytetään maailmanlaajuisesti laajan materiaalivalikoiman takia. PBF-prosessilla valmistettavat osat sopivat hyvin lopputuotteiksi, sillä materiaaliominaisuudet vastaavat monia teknisiä polymeerejä, metalleja ja keraameja. (Gibson et al. 2015, s. 107.)

SLS-prosessissa fuusioidaan ohuita jauhekerroksia, jotka levitetään tulostusalueelle vastapäivään pyörivän tasoitusrullan avulla. Suljettuun kammio täytetään tyellä jauhemateriaalin hapettumisen ja hajoamisen minimoimiseksi. Tulostusalueella oleva jauhe pidetään kohotetussa lämpötilassa juuri sen sulamispisteen- ja/tai lasittumispisteen alapuolella. Infrapunalämmittimien tehtävä tulostusalueen yläpuolella on esilämmittää levitetty jauhemateriaali. Jauheen esilämmitys ja kammion tasaisen kohotetun lämpötilan ylläpito ovat hyvin olennaiset osat prosessia. Esilämmityksen takia fuusioon vaadittavan laserenergian tarve on pienempi ja tasainen kohotettu lämpötila pienentää lämpölaajenemisen sekä -supistumisen tuottamaa osan vääntymisen riskiä. (Gibson et al. 2015, s. 107.)

Kun sopiva jauhekerros on muodostettu tulostusalustalle ja esilämmitys on suoritettu, foku-soitu CO₂-lasersäde suunnataan tulostusalustalle levitetylle jauhepedille galvanometrien avulla. Liikuttamalla galvanometrejä voidaan sulattaa jauhemateriaali valmistettavan osan pohjaleikkauksen mukaisesti. Sulatettua jauhetta ympäröivä jauhe jää irtonaiseksi, ja se toimii samalla tukena seuraavia kerroksia sulattaessa. Kun kerros on sulatettu,

tulostuskammion alustaa lasketaan kerros alaspäin ja uusi kerros levitetään sekä tasoitetaan vastapäivään pyörivän rullan avulla. Tämän jälkeen lasersäde sulattaa seuraava kerroksen. Sama prosessi toistetaan siihen saakka, kunnes valmistettava osa on valmis. (Gibson et al. 2015, s. 108.)

Ennen osan mahdollista jälkikäsittelyä, tulostuskammion annetaan jäähtyä sopivaan lämpötilaan. Ennenaikainen osien puhdistus ja jälkikäsittely aiheuttavat valmistettaviin osiin vääntymiä epätasaisen lämpölaajenemisen vuoksi. Kun lämpötila tulostuskammiossa on sopiva, osat voidaan puhdistaa irtonaisesta tulostusmateriaalista. Kuvassa 6 on esitetty PBF-prosessi ja sen komponentit. (Gibson et al. 2015, s. 108.)



Kuva 6. PBF-prosessi kuvattuna sekä prosessin eri komponentit (Muok. Gibson et al. 2015, s. 108).

2.2 Design for Additive Manufacturing (DfAM)

Suunnittelu lisäävää valmistusta varten eli DfAM (Design for Additive Manufacturing) eroaa muista suunnittelussa käytetyistä prosesseista siten, että se keskittyy vain AM-prosesseihin. DFAM käsittelee monia eri prosessivariantteja ja sitä hyödyntäessä on otettava huomioon koko prosessiketju. Koska AM tarjoaa erilaisia mahdollisuuksia ja rajoitteita tuotteen valmistukseen verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin, vaati se myös erilaisia lähestymistapoja tuotteiden suunnittelussa. Menestyksekkään suunnitteluprosessin kannalta DfAM:ssä kannattaa ottaa huomioon kaikki merkitykselliset näkökohdat. Alla on listattuna runko, jonka kolme vaihetta yhdistävät eri osa-alueet suunnitteluprosessin toteuttamiseksi: (Vanecker, et al. 2020, s. 581.)

1. Ensimmäisessä vaiheessa tehdään taustatyötä ja harkittuja päätöksiä siitä, soveltuuko kyseinen tuote valmistettavaksi AM-prosesseilla. Samalla pyritään löytämään sopiva teknologia tuotteiden valmistukseen. Valmistettavuuden ongelmat tulee huomata jo tässä kohtaan.
2. Toisessa vaiheessa huomioidaan vaatimusten määrittelemät säännöt ja rajoitukset ottaen huomioon eri aspekteja. Ennen tätä tulee tehdä päätös osien toiminnallisen hajottamisen ja integroinnin suhteen. Tämän avulla saadaan määriteltyä osat ja käynnistää yksittäisten osien määrittely järjestelmässä. Samalla jokaisella osalla määritetään valmistuksessa käytettävä materiaali ja valmistusmenetelmä.
3. Kolmannessa vaiheessa käydään läpi prosessin lopullinen tarkastelu. Samassa optimoidaan eri AM-prosessien ominaisuudet suhteessa valmistettavan osan ominaisuuksiin. Esimerkiksi osien suuntaus, valmistettavien osien määrä ja tukirakenteet.

2.3 AM:n ympäristövaikutukset ja elinkaariarviointi

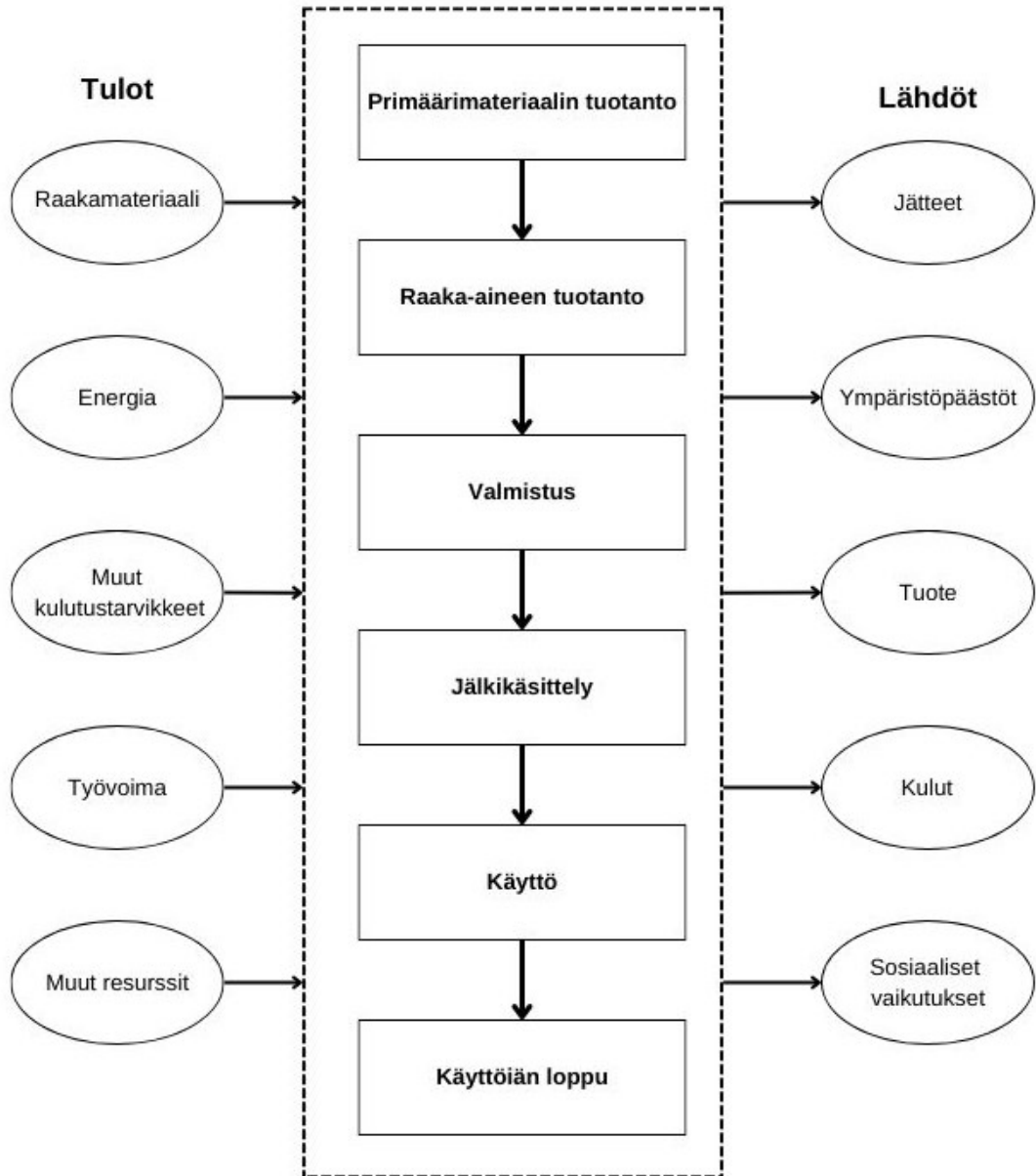
AM:n ympäristövaikutuksia tarkastellaan yleensä kvalitatiivisesti ja sen oletetaan tukevan tuotesitoutumisen, resurssitehokkuuden, korjattavuuden ja hajautetun valmistuksen kautta. Tuotesitoutumisessa kyse siitä, miten suunnittelija on jatkuvalla optimoinnilla ja hienosäädöllä sidoksissa tuotteeseen, jolla pyritään kasvattamaan tuotteen elinikää. Tuotteen

räätälöinti ja personointi tiettyyn käyttötarkoitukseen tai tietylle käyttäjälle luo vahvemman suhteen niiden välille. AM:n avulla on mahdollista toteuttaa yksilölliset ja pienet tuotesarjat kustannustehokkaasti ja kestävästi. Resurssitehokkuus on saavutettavissa esimerkiksi monimutkaisten geometrioiden avulla. Sen avulla on mahdollista pienentää tuotteen materiaalin-kulutusta, yhdistää tuotteen eri osia ja pienentää tuotteen valmistuksen energiankulutusta. Korjattavuudessa digitaalinen tuotanto tukee resurssitehokkuutta, sillä rikkiäiset osat voidaan jäljitellä ja valmistaa uudelleen. Digitaalinen tuotantoprosessi mahdollistaa myös varaosien säilyttämisen digitaalisessa muodossa ja tarpeen mukaan valmistamisen. Tällä pystytään pienentämään fyysisiä varastoja ja tekemään korjaustöistä helpommin saavutettavia. Hajautetulla valmistuksella tarkoitetaan paikallisten tuotantolaitosten verkostoa, jotka vastaavat tietyn alueen tai yhteisön tuotannosta. AM tukee tätä, sillä tuote voidaan lähettää digitaalisessa muodossa paikallisesti tulostettavaksi. Tämä konsepti nähdään kestäväna vaihtoehtona keskitetyille massatuotannoille lyhyempien toimitusketjujen, vähentyneen kuljetustarpeen, kysyntään perustuvan tuotannon ja paikallisen korjauksen sekä kierrätyksen ansiosta. (Sauerwein, et al. 2019, s. 1138–1140.)

Vaikka AM:n hyötyihin liittyy materiaalihukan vähentäminen, voivat eri prosessien hyödyt kuitenkin olla harhaanjohtavia kestävyuden näkökulmasta, eivätkä välttämättä sovi sen arvioimiseksi AM-prosesseissa. Ympäristön kestävyuden kattava tarkastelu vaatii kaikkien tarvittavien sisään tulevien syötteiden ja niistä syntyvien tuotosten huomioimista eri elinkaaren vaiheissa. AM-tekniikalla valmistetun osan elinkaari voidaan rajaa karkeasti alla oleviin vaiheisiin havainnollistavan kuvan 7 avulla: (Kokare et al. 2023 s. 536–538.)

1. Ensisijainen materiaalityöntuotanto, joka sisältää perusraaka-aineen tuotannon. Esimerkiksi raaka-aineen louhinta ja jalostus perusmateriaalien valmistusta varten.
2. Käyttömateriaalin tuotanto, missä ensisijainen materiaali muutetaan AM-prosessissa käytettäväksi materiaaliksi.
3. Tuotanto, jossa 3D-malli luodaan ja valmistetaan eri valmistusprosessien mukaisesti.
4. Jälkikäsittely, jossa suoritettavat toiminnot yleensä ovat tukirakenteiden poisto, puhdistus sekä osien viimeistely ja tarkastelu.
5. Käytön aikana AM-prosessilla valmistettu tuote jaetaan, ostetaan ja asennetaan kuluttajien toimesta. Tuotetta käytetään ja huolletaan säännöllisesti.

6. Käytöstä poisto on tuotteen elinkaaren viimeinen vaihe, jossa se joko hävitetään, uudelleen käytetään, kierrätetään, kunnostetaan tai valmistetaan uudelleen.

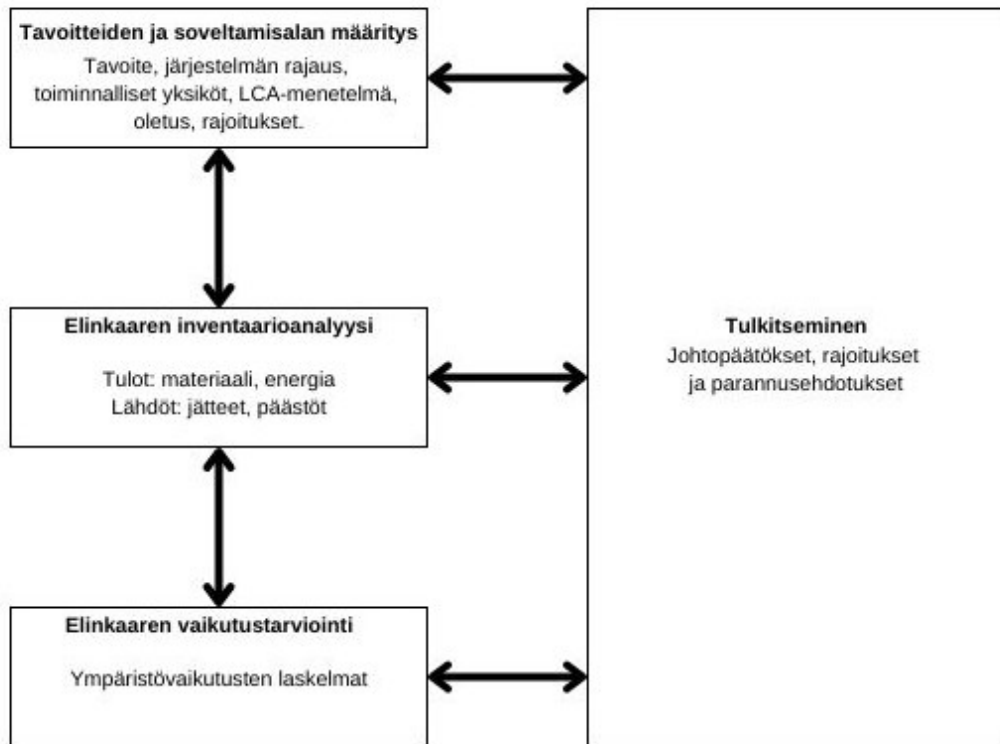


Kuva 7. AM-tekniikalla valmistetun tuotteen elinkaari (Muok. Kokare et al. 2023. s. 537).

Elinkaarianalyysi eli LCA (Life Cycle Assessment) on tunnettu ja standardoitu menetelmä eri tuotteiden ja prosessien ympäristöpäästöjen laskemiseksi niiden eri elinkaaren vaiheissa.

ISO 14044:2006-standardissa on määritelty LCA-menetelmän runko ja se suoritetaan alla listattujen ja kuvassa 8 esitettyjen vaiheiden mukaisesti: (Kokare et al. 2023, s. 539–540.)

- **Tavoitteiden ja vaikutusalueiden määrittely:** Määritellään tutkimuksen tavoite, järjestelmän rajat eli vaiheet, joita analysoidaan elinkaaren aikana, Funktionaalinen vertailuyksikkö, johon lähtötiedot ja tulokset kohdistetaan, sekä oletukset siitä mihin tuloksiin tutkimuksessa päästään.
- **Elinkaaren inventaarioanalyysi:** Kvantifioidaan jokaiset prosessiin liittyvät inventaarion sisään tulevat syötteet ja niistä seuraavat tuotokset määritetyllä tutkimuksen alueella. Syötteet viittaavat raaka-aineisiin, käytettyyn energian määrään ja muihin kunkin vaiheen kuluttamiin resursseihin. Tuotokset viittaavat kunkin vaiheen jätteisiin ja päästöihin. Inventaario analyysin aikana käytetyt tiedot kerätään kokeiden, olemassa olevien tietokantojen ja tieteellisen kirjallisuuden perusteella.
- **Elinkaaren vaikutusten arviointi:** Inventaarioanalyysin aikana kerättyjen tietojen perusteella lasketaan ympäristövaikutukset eri kategorioissa, kuten ilmastonmuutos, happamoituminen ja otsonikato.
- **Tulkinta:** Analysoidaan vaikutusarvion tulokset sekä määritetään eri inventaarioiden ja elinkaarivaiheiden osuudet. Tunnistetaan ympäristön kannalta kriittiset kohdat, joista johdetaan rajoitukset sekä parannusmahdollisuudet. Niiden pohjalta ehdotetaan toimenpiteitä ympäristövaikutusten minimointiin vaikutusarvioinnin tulosten perusteella.



Kuva 8. ISO 14044:2006-standardissa määritelty LCA:n runko (Muok. Kokare, et al. 2023. s. 540).

3 DfAM:n toteutus vaijeriohjaimelle

Tässä kappaleessa toteutetaan kirjallisuuskatsauksessa mainitun DfAM:n eri vaiheiden mukaisesti vaijeriohjaimen uudelleensuunnittelu. Kappale käsittelee kolmea eri DfAM:n vaihetta. Ensimmäinen vaihe käsittelee alkuperäisen vaijeriohjaimen lähtötiedoista ja sen uudelleensuunnittelun aloittamisesta 3D-skannauksen avulla sekä AM-tekniologian soveltuvuuden tarkastelemisella kappaleen valmistusta varten. Toinen vaihe käsittelee uudelleensuunnittelun toteutusta ja ohjaimen fyysisiä muutoksia. Kolmannessa vaiheessa käsitellään valmistuksessa huomioon otettavia aiheita eri valmistustekniikoilla.

3.1 Lähtötiedot (Vaihe 1)

Vaijeriohjaimen uudelleensuunnittelu DfAM:n mukaisesti aloitetaan keräämällä tietoa alkuperäisestä tuotteesta ja arvioimalla tuotteen soveltuvuutta AM-tekniologialla valmistettavaksi. Tiedot ovat kerättyinä ja näkyvissä alla olevassa taulukossa 3.

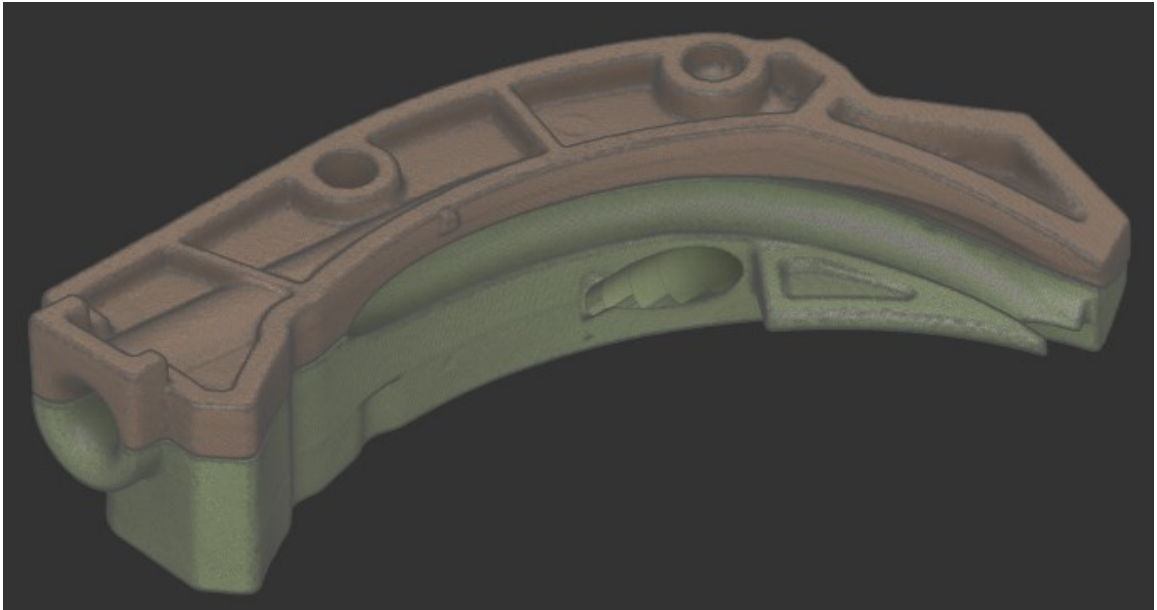
Taulukko 3. Lähtötiedot alkuperäisestä vaijeriohjaimesta.

Tiedot	Alkuperäinen vaijeriohjain
Valmistustekniikka	Ruiskupuristus
Vaatimukset	Kulutuksen kesto
Materiaali	Polyoksimetyyli
Osien määrä	2 kpl

Yllä olevasta taulukosta voidaan huomata, että AM-tekniologia soveltuu uudelleensuunniteltavan tuotteen valmistusmenetelmäksi erityisesti vaijeriohjaimen osien minimoimiseksi geometrian vapauden takia. AM-tekniologian avulla myös materiaalivaihtoehtoja on laajasti tarjolla. Tekniologian soveltuvuus prototyyppien valmistukseen antaa mahdollisuuden eri materiaalivaihtoehtojen soveltuvuuden testaamiseen.

Kun valmistettavasta tuotteesta ei ole olemassa 3D-mallia tai valmistuspiirustuksia, saadaan 3D-skannaamalla taltioitua mittatarkkoja osia analysoimalla ja keräämällä mittadataa

kohteesta reaali maailmassa. 3D-skannaus soveltuu myös erityisesti haastavien geometrioiden taltioimiseen, kuten esimerkiksi vaijeriohjaimen vaijerikouru. Tässä työssä käytetty 3D-skanneri on Shining 3D EinScan HX. Kuvassa 9. on EinScan 3D-skannerilla skannatut vaijeriohjaimen osat STL-tiedostomuodossa.



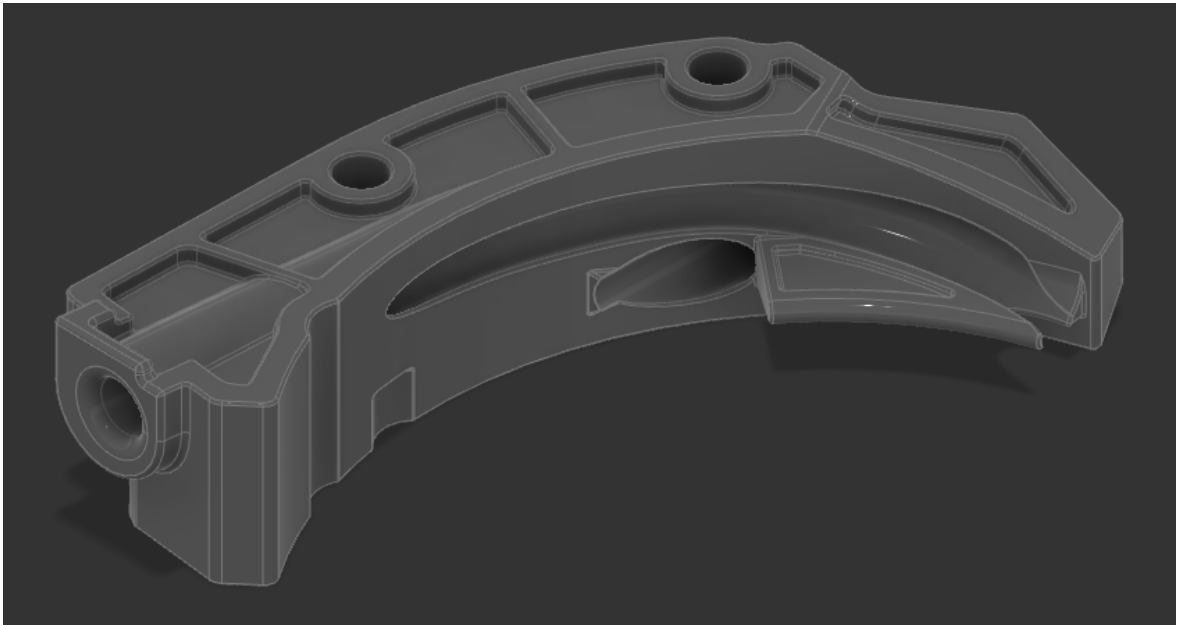
Kuva 9. Vaijeriohjaimen osat (2 kpl) Fusion 360-ohjelmassa. 1. Vaijeriohjain osa 1 (Oranssi) 2. Vaijeriohjain Osa 2 (Vihreä).

3.2 Uudelleensuunnittelu (vaihe 2)

Vaiheen 1 kohdalla huomattiin, että hyödyntämällä AM-teknologiaa valmistuksessa, voidaan vaijeriohjaimen osien määrä pienentää kahdesta osasta yhteen. Alla on listattuna osien integroimisen hyödyt uudelleensuunnittelussa vaijeriohjaimessa. Kuvassa 10 on nähtävillä uudelleensuunniteltu ohjain.

1. Liikkuvien ja kasattavien osien määrän pienentäminen asennuksen aikana.
2. Valmistettavien osien määrän pienentyessä vaijeriohjaimia on mahdollista valmistaa suurempia määriä kerralla, niiden mahtuessa paremmin tulostusalustalle tai -kammiin.

3. Tuote on suunniteltu vain AM-teknologiaa valmistusmenetelmänä hyödyntäen uudelleensuunnitellun vaijeriohjaimen geometrian vuoksi. Ruiskupuristeena ohjaimen valmistus yhtenä kappaleena on mahdotonta ohjainkourun takia.



Kuva 10. Uudelleensuunniteltu vaijeriohjain Fusion 360-ohjelmassa.

3.3 Valmistus (vaihe 3)

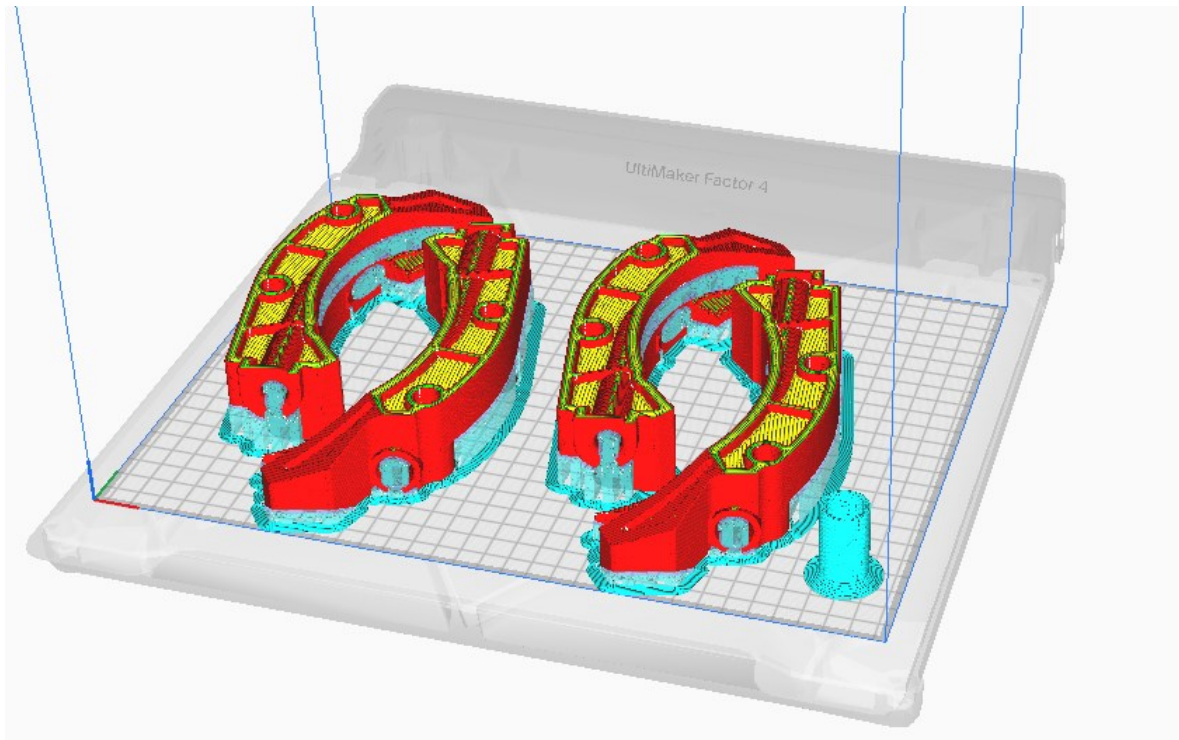
Vaiheessa 3 tarkastellaan valmistukseen vaikuttavia asioita. Kappaleessa 2.1 on aikaisemmin mainittu käytettävät AM-teknologiat, jotka ovat VPP, PBF ja MEX. Valmistustekniikoilla on eroavaisuuksia keskenään, jotka vaikuttavat esimerkiksi valmistettavan kappaleen ominaisuuksiin. Alla on listattu huomioonotettavia asioita kunkin AM-teknologian kohdalla, jotta paras mahdollinen laatu voidaan varmistaa. Lisäksi kuvissa 11, 12 ja 13 on esitettyä uudelleensuunnitellun vaijeriohjaimen ajotiedostot kutakin AM-teknologiaa varten.

MEX: (Ultimaker 2019)

- MEX-teknikassa tulosteet ovat heikoimpia kerrosten välissä, koska ne eivät sulaudu täysin yhteen. Vaijeriohjain valmistetaan siten, että vaijerikourussa kulkevan vaijerin aiheuttama kulutus suuntautuu kerrosten myötäisesti eikä niitä vastaan.

- Toisin kuin esimerkiksi PBF ja VPP-tekniikoissa kappaleen tarttuvuus on parempi, kun suurempi pinta-ala on kohtisuoraan tulostusalustaa vasten. Näin voidaan parantaa tulostuslaatua ja estää kappaleen irtoamista valmistuksen aikana.
- Suuttimen koolla on vaikutusta tulostustarkkuuteen, nopeuteen ja seinämänpaksuuteen.
- Tukimateriaalia on suositeltava käyttää alle 45 asteen kulmissa suhteessa alustaan.

Alla olevassa kuvassa 11 on esitetty uudelleensuunnitellun vaijeriohjaimen sijoittelu tulostusalustalla Ultimakerin Cura-ohjelmistossa.



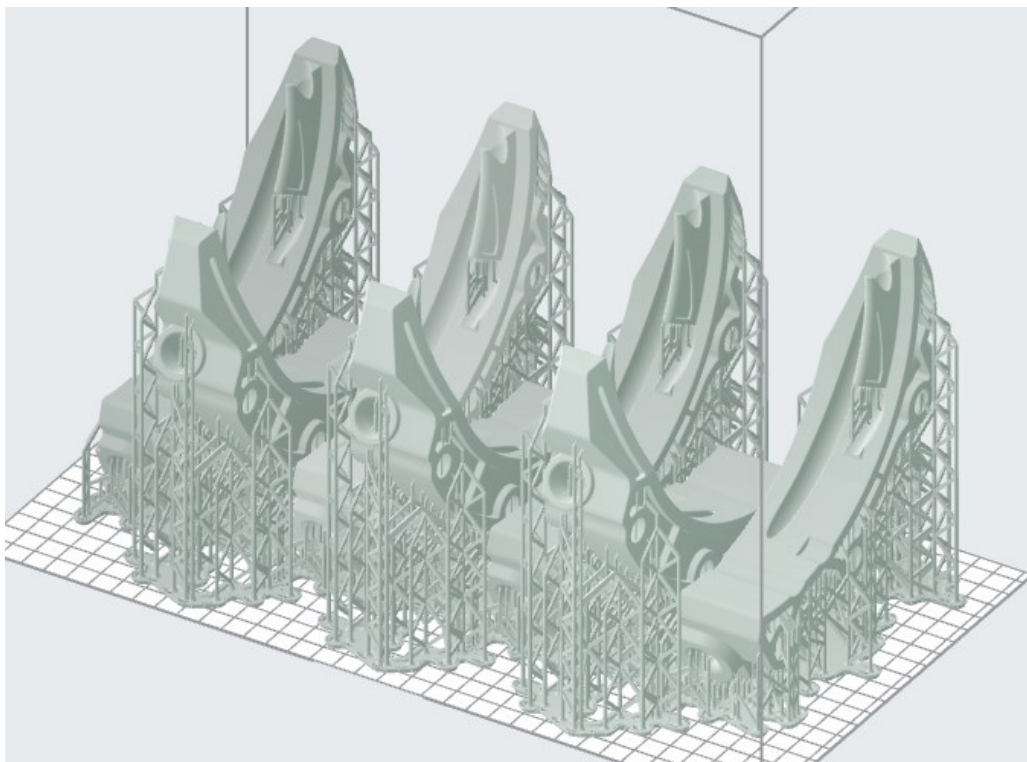
Kuva 11. Vaijeriohjaimien sijoittelu tulostusalustalla MEX-prosessissa.

VPP: (Formlabs 2024a)

- Tasaisten pintojen asettamista vaakasuoraan tulostusalustaa vasten tulisi välttää, vaan kappale tulisi kallistaa 10–15 asteen kulmaan. Tämän avulla voidaan vähentää virheitä valmistettävien kappaleiden pinnassa ja parantaa tulostuslaatua.

- Riittävä tukien määrä estää valmistuksen aikana tapahtuvia muodonmuutoksia kappaleessa ja niiden avulla voidaan varmistaa onnistunut valmistus.
- Oikeiden asetusten käyttäminen valitulle materiaaleille sekä tarkkuuden optimointi määrittämällä tarvittava kerrospaksuus valmistuksen aikana.

Alla olevassa kuvassa 12 on esitetty uudelleensuunnitellun vaijeriohjaimen sijoittelu tulostusalustalla Formlabsin PreForm-ohjelmistossa.

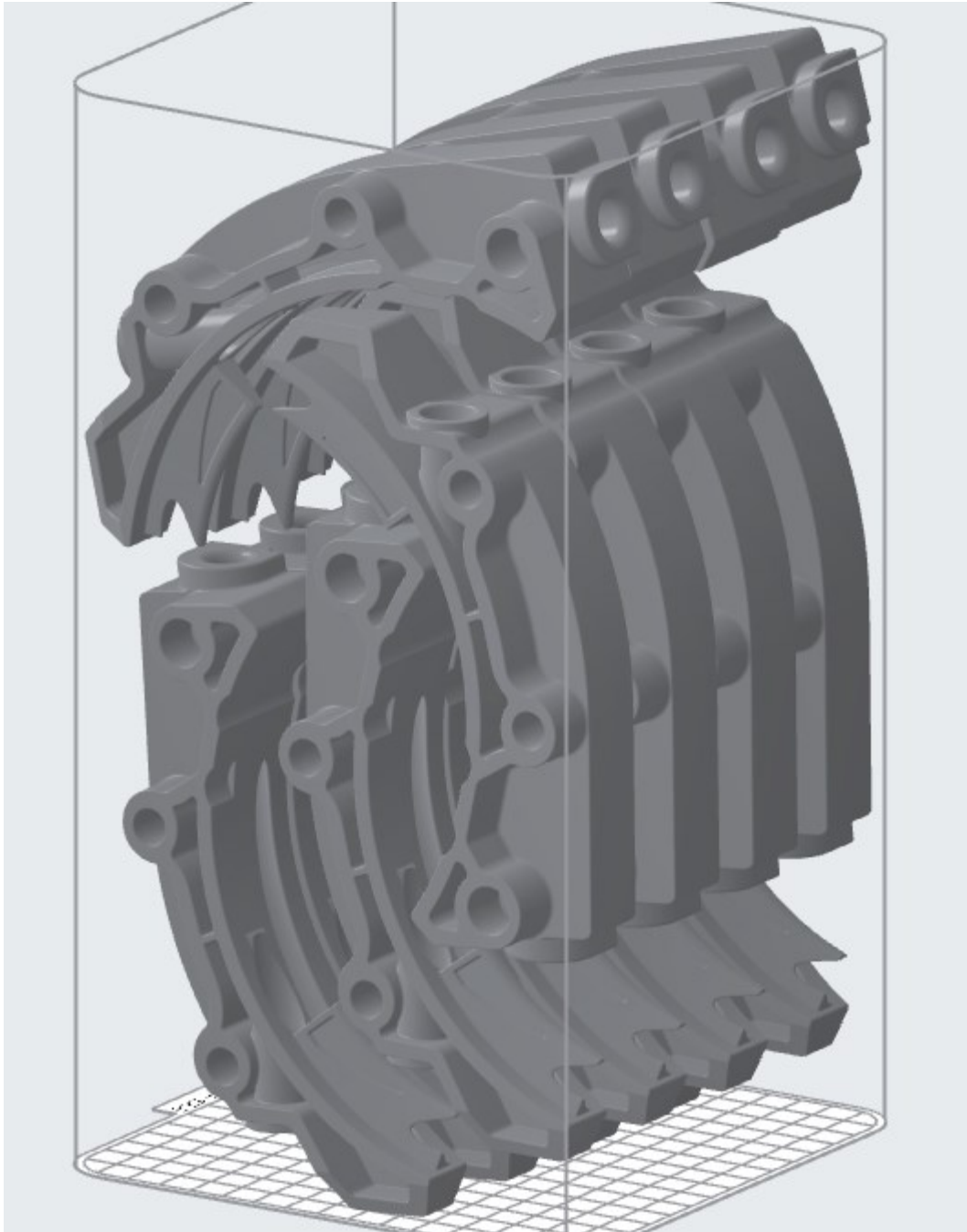


Kuva 12. Vaijeriohjaimien sijoittelu tulostusalustalla VPP-prosessissa.

PBF: (Formlabs 2024b)

- Valmistettavien osien seinämnpaksuus tulee olla vähintään 0,3–0,6 mm, riippuen suuntauksesta.
- Reikien vähimmäishalkaisija tulee olla vähintään 1 mm.
- Osien välinen etäisyys tulostuskammiossa tulee olla minimissään 1 mm. Pienempi välyys saattaa aiheuttaa ”hitsautumista” viereiseen kappaleeseen.

Alla olevassa kuvassa 13 on esitetty uudelleensuunnitellun vaijeriohjaimen sijoittelu tulostuskammiossa Formlabsin PreForm-ohjelmistossa.



Kuva 13. Vaijeriohjaimien sijoittelu tulostuskammiossa PBF-prosessissa.

4 Hiilijalanjälkilaskenta vaijeriohjaimelle

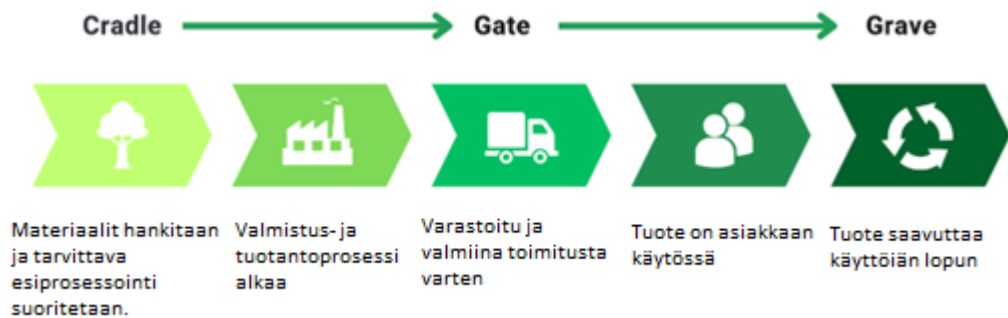
Tässä kappaleessa käsitellään kolmen eri valmistusprosessin hiilijalanjälkilaskentaa perustuen tarkastelujaksojen aikaisiin hiilipäästöihin. Tarkastelu on toteutettu kirjallisuuskatsauksen LCA-laskennan mukaisesti. Laskenta alkaa tavoitteiden ja rajausten asettamisella. Toisessa vaiheessa suoritetaan inventaario valmistusmenetelmien hiilipäästöistä tarkastelujakson aikana. Inventaarion tuottamat tulokset raportoidaan tämän jälkeen Tulokset-kappaleessa ja niiden syvempi analysointi suoritetaan Tulosten analysointi-kappaleessa.

4.1 Tavoitteet ja rajaukset (Goal & Scope)

Tässä diplomityössä elinkaarianalyysin tavoitteena on selvittää eri lisäävän valmistuksen valmistusmenetelmien ympäristövaikutukset keskittyen erityisesti uudelleensuunnitelluiden vaijeriohjainten hiilijalanjälkeen. Analyysiä hyödyntämällä voimme tarkastella miten eri valmistusmenetelmät kyseisen tuotteen osalta eroavat toisistaan ekologisesta näkökulmasta ja millainen vaikutus sarjakoolla on tuloksiin. Tulosten avulla voidaan tukea kestävämpiä valmistusvalintoja erityisesti 3D-tulostuspalveluissa. Hiilipäästöjen laskeminen voitaisiin mahdollisesti integroida kaikkien valmistettavien tuotteiden tuotantoprosesseihin mukaan, minkä avulla olisi mahdollista tarkastella valmistettavien osien tuotannon aikaista hiilipäästöjä. Tällä tavalla yritys voi parantaa myös toimintansa läpinäkyvyyttä esimerkiksi toimittamalla arvioinnin tulokset valmistuksen tilaajille tai julkisten tiedotteiden sekä asiakastarinoiden kautta.

Ympäristövaikutusten tarkastelujakso työssä on rajattu kehdosta portille eli cradle-to-gate prosessin mukaisesti kattaen materiaalintuotannon, kuljetuksen ja valmistusvaiheen sisältäen jälkikäsitelyn. Kuvassa 14 on esitettyinä cradle-to-gate tarkastelujakson eri vaiheet sekä vertailun vuoksi laajempi kehdosta hautaan eli cradle-to-grave tarkastelujakso. Arvioinnin toteuttamiseksi on käytetty eri tietokantoja ja aikaisempia tutkimuksia, ja laskenta on toteutettu Excel-ohjelmistolla. Sähkönkulutuksen arviointi perustuu omiin prosessien aikaisiin mittauksiin sekä valmistajien ilmoittamiin keskimääräisiin kulutusarvoihin. Analyysissä keskitytään ainoastaan 3D-tulostusmenetelmien vertailuun, eikä alkuperäistä valmistusmenetelmää oteta huomioon puutteellisten tietojen takia. Kuitenkin työssä tarkastellaan

uudelleensuunnitellun vajeriohjaimen mahdolliset ympäristövaikutukset ja tuotannontehoksumista alkuperäisen vajeriohjaimen kesken.



Kuva 14. cradle-to-gate ja cradle-to-grave tarkastelujaksojen eroavaisuudet (Muok. Goldie 2023).

4.2 Inventaarioanalyysi

Inventaarioanalyysin aikana selvitetään kunkin valmistusprosessin cradle-to-gate tarkastelujakson aikana syntyvät hiilipäästöt. Hiilipäästöt on esitetty taulukoin eri valmistusprosessien materiaaleille, apumateriaaleille, materiaalin kuljetuksille, prosessin energiankulutukselle sekä prosessista syntyvän hukun/jätteen käsittelylle. Työssä käytettyjen laitteiden keskimääräinen sähkönkulutus on selvitetty joko energiankulutusmittarin avulla tai laitevalmistajien tukipalveluiden kautta. Inventaarioanalyysin avulla voidaan toteuttaa laskenta valmistusmenetelmien tarkastelujaksojen aikaisten hiilipäästöjen arviointia varten.

4.2.1 Valmistusprosessien materiaalit ja apumateriaalit

Materiaalit sekä materiaalintuotanto vaihtelevat eri prosessien välillä. PBF-prosessissa käytettävä Nylonpulverin valmistuksen aikaiset hiilipäästöt ovat 7 kgCO₂e (Materialise 2021; London 2020. s. 21). Koska PBF-prosessissa voidaan hyödyntää kierrätettyä pulveria tuoreen pulverin seassa, on kierrätetyn pulverin hiilipäästöt noin 50 prosenttia tuoretta pulveria pienemmät (He, Kim, De Kleine, Soo, Kiziltas, Compston & Doolan 2022, s.1383).

MEX-prosessissa valmistuksen aikana käytetään kahta eri materiaalia. Nylonfilamenttia käytetään vajeriohjaimen valmistusmateriaalina, ja tukimateriaalina siihen käyttöön tarkoitettua Support-materiaalia. Nylonfilamentin valmistuksen aikaisen hiilipäästöissä huomioidaan granulaatin sekä filamentin valmistus. Oletetaan, että valmistus tapahtuu samassa tuotantotilassa, jolloin prosessin välissä olevia kuljetuksia ei tarvitse huomioida. Tuoreen nylongranulaatin valmistuksen hiilipäästöt ovat 6,52 kgCO₂e sekä filamentin valmistuksen aikaiset 1,72 kgCO₂e (Fishy Filaments 2020). Support-materiaali on materiaaliseos, joka koostuu termoplastisesta polyuretaanista (Thermoplastic polyurethane, TPU) sekä polymaitohaposta (Poly lactic acid, PLA) (Ultimaker 2017). Koska seoksen valmistuksen aikaisista päästöistä ei löydy tarkkaa tietoa, käytetään PLA-filamentin tuotannon aikaisia päästöjä. PLA:n valmistuksessa hiilipäästöt ovat noin 3 kgCO₂e (Mosomi et al. 2024, s. 3), ja filamentin valmistuksen aikaiset hiilipäästöt ovat samat kuin nylonfilamentissa.

3D-tulostettavan hartsin valmistuksen päästöistä ei suoraan löydy tarkkoja arvoja. Kuitenkin fossiilipohjaisen nylonhartsin valmistuksella on 80 prosenttia suuremmat päästöt kuin biopohjaisella nylon hartsilla. Tällöin valmistuksen hiilipäästöt olisivat 6,5 kgCO₂e. (Arkema 2024.)

Apumateriaaleja valmistusprosessien aikana käytetään jälkikäsittelyvaiheessa. VPP-prosessissa apumateriaalina käytetään isopropanolia (IPA), jonka hiilipäästö on 3,29 kgCO₂e sekä PBF-prosessissa lasikuula, jonka hiilipäästö on 2,53 kgCO₂e (Riihi 2023). MEX-prosessi ei vaadi tässä työssä apumateriaalia jälkikäsittelyvaiheessa.

Alla taulukossa 4 on jokaisen valmistusprosessin käyttämän materiaalin ja apumateriaalin valmistuksen aikaiset hiilipäästöt.

Taulukko 4. Materiaalien ja apumateriaalien valmistuksessa syntyvät hiilipäästöt kiloa kohden.

Menetelmä	Materiaali	Yksikkö	kgCO ₂ e
PBF	PA12 (Tuore)	kg	7
	PA12 (Kierrätetty)	kg	3,5
	Lasikuula	kg	2,53
MEX	Nylon (Filamentti)	kg	8,24
	Support (Filamentti)	kg	4,72
VPP	Nylon (Tulostushartsi)	kg	6,5
	Isopropanol	kg	3,29

4.2.2 Kuljetukset

Inventaarioanalyysin aikana myös materiaalien kuljetukset materiaalin valmistajalta tuotteiden valmistajalle tulee myös huomioida. Kuljetuksien aikaiset hiilipäästöt ovat esitettyinä taulukossa 5. Tässä työssä valmistajat toimittavat materiaalit Hollannista maa- sekä meriteitse. Maantierahdin päästöt per tonnikipometri (tkm) jakelukuorma-autolla (6 t) ovat 0,180 kgCO₂e ja merirahdin päästöt Ropax (21 solmua) rahtia ja matkustajia kuljettavalle alukselle per tkm ovat 0,101 kgCO₂e (Riihi 2023). Lisäksi jälkikäsittelyvaiheessa apumateriaalit vaativat oman kuljetuksen. Toimitus suoritetaan pakettiautolla maanteitse Suomesta ja niiden päästöt per tkm ovat 0,328 kgCO₂e (Riihi 2023). Reitin pituus meri- ja maanteitse Helsingissä sijaitsevaan tuotantotilaan on arvioitu käyttämällä Google Maps -karttapalvelua.

Taulukko 5. Kuljetusmenetelmien hiilipäästöt tkm kohden.

Materiaali	Kuljetusmenetelmä	Matka (km)	Yksikkö	kgCO ₂ e	Huom.	
PA12 (Tuore)	Merirahti	1500	tkm	0,101	Päämateriaali tuotantoon	
	Maantierahti	500	tkm	0,18		
Nylon (Filamentti)	Merirahti	1500	tkm	0,101		
	Maantierahti	500	tkm	0,18		
Support (Filamentti)	Merirahti	1500	tkm	0,101		
	Maantierahti	500	tkm	0,18		
Nylon hartsi	Merirahti	1500	tkm	0,101		
	Maantierahti	500	tkm	0,18		
Lasikuula	Maantierahti	50	tkm	0,328		Apumateriaali jälkikäsittelyyn
Isopropanoli	Maantierahti	50	tkm	0,328		

4.2.3 Valmistusprosessit

Valmistusprosessien aikaisten päästöjen arvioinnissa on hyödynnetty tuotannon aikaisia energiankulutusmittauksia sekä laitevalmistajalta saatuja tietoja. Seuraavaksi käsitellään kunkin työssä käytettävän valmistusmenetelmän ja niiden eri prosessivaiheissa energiankulutuksesta syntyviä hiilipäästöjä. Energiakulutuksen päästöjen laskennassa käytetään kaikissa tulostusmenetelmissä sähkön tuotannon valtakunnallista keskiarvoa, joka on 0,089 kgCO₂e jokaista kilowattituntia (kWh) kohden (Riihi 2023).

1. MEX-prosessi

MEX-prosessissa käytettävä laite on Ultimaker Factor 4, joka on kaupalliselta termiltään Fused Deposition Modeling, eli FDM-tulostin. Factor 4 on teollisuuteen tarkoitettu 3D-tulostin, joka tukee teknisiä materiaaleja, mahdollistaa suoran ekstruusion kahdella suuttimella sekä luo raportteja tulostusprosessista. (Ultimaker. n.d.) Taulukossa 6 on lueteltuna Factor 4 -laitteen teknisiä tietoja ja käytettävät materiaalit sekä kuvassa 15 kuva Factor 4 -laitteesta.

Taulukko 6. Ultimaker Factor 4 tekniset tiedot (Ultimaker. n.d.).

Tekniset tiedot	Ultimaker Factor 4
Rakennustilavuus	330 x 240 x 300 mm
Laitteen mitat	695 x 605 x 1287 mm
Tulostustekniikka	FDM
Filamentin halkaisija	2,85 mm
Paino	120 kg
Maksimiteho	600 W



Kuva 15. Ultimaker Factor 4 (Ultimaker n.d.).

Ultimakerin laitteita käyttäessä viipalointiohjelmana käytetään Ultimaker Cura -ohjelmistoa. Suuttimen koko tulostusmateriaalilla on 0,8 mm ja tukimateriaalilla 0,4 mm. Valmistuksessa käytettävä sisätäyttöprosentti on 50 %. Kun tarvittavat asetukset on määritelty, voidaan ajo-tiedosto ”pilkkoa” viipalointiohjelmassa. Laskennan jälkeen Cura:sta saadaan tietoon valmistukseen kuluva aika sekä käytettävän materiaalin määrä. Taulukossa 7 on listattu yhden ajokierroksen suorittamiseksi vaadittava materiaalmäärä ja valmistukseen kuluva aika.

Taulukko 7. Cura-ohjelmistosta saadut tiedot ennen valmistusta.

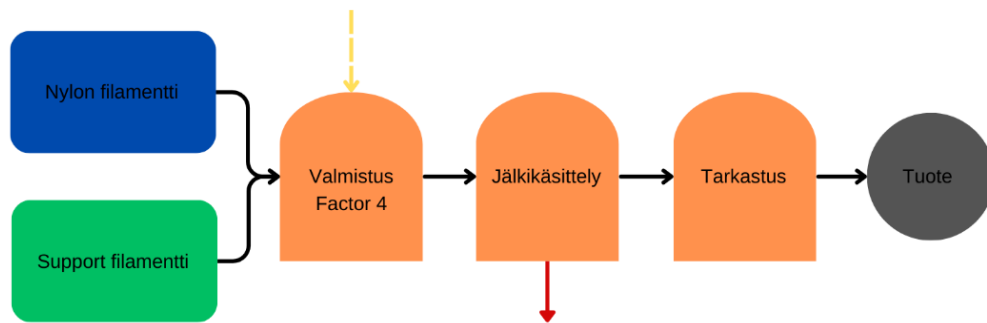
Valmistettavan osan nimi:	Vaijeriohjain	
Valmistusmäärä (kpl/ajo):	4	
Tulostusmateriaali:	Ultimaker Nylon	
Tukimateriaali:	Ultimaker Breakaway	
Sisätäyttö (%):	50 %	
Materiaali (yht.):	0,569	kg
Tulostusmateriaali:	0,470	kg
Tukimateriaali:	0,099	kg
Ajoaika:	33.51.00	hh:mm:ss

Ultimaker Factor 4-laitteen keskimääräinen teho valmistusprosessin aikana on 200–300 wattia (W) ja tulostusytimien lämmityksen aikana tehon tarve voi nousta 500 W asti (Ultimaker Support Team 2025). Energiankulutuksessa huomioidaan vain keskimääräinen teho ja laskennassa käytetty arvo on 250 W.

Kun ajo on valmis, valmistetut vaijeriohjaimet voidaan irrottaa taivuttamalla tulostusalustaa. Ohjaimesta poistetaan tukimateriaalit käsin tai työkaluja käyttäen, sekä se siistitään mahdollisista tulostuksen aikana syntyvistä roskista. Kun valmistetun tuotteen lopputarkastelu on tehty, tuote on valmis toimitettavaksi. Taulukossa 8 on esitetty edellä mainitut tiedot ja valmistusprosessin aikainen energiankulutus. Kuvassa 16 on kuvattuna prosessi kaikkineen materiaali-, energia- ja jäte-/hukkavirtoineen.

Taulukko 8. MEX-prosessin laitteen keskimääräinen sähkönkulutus, ajan käyttö prosessin eri vaiheissa sekä vaiheiden aikainen energiankulutus.

Energiamuoto	kgCO ₂ e	
Sähkö (valtakunnallinen KA)	0,074	
Laitteet	Sähkönkulutus KA (W)	
Ultimaker Factor 4	250	
Valmistusprosessin vaihe	Aika (hh.mm.ss)	Energiankulutus (kWh)
Valmistus (Factor 4)	33.51.00	8,463
Jälkikäsittely	0.15.00	0
Tarkastus	0.05.00	0



Kuva 16. MEX-prosessin valmistuksen eri vaiheet kuvattuna.

2. VPP-prosessi

VPP-prosessissa käytettävä laite on Formlabs Form 4L, joka käyttää Masked stereolithography eli valomaski stereolitografiaa (MSLA) tekniikkaa yhdessä Formlabsin kehittämän Low Force Display™ tulostusmoottorin kanssa. Form 4L on nopea tulostin, jolla suuria kappaleita voidaan tulostaa jopa 6 tunnissa ja tulostusalue on huomattavasti suurempi kuin pienemmässä Form 4-mallissa. Form 4L tukee laajan valikoiman Formlabsin materiaaleja, lisäksi se tarjoaa myös Open Material Moden eli avoimen materiaalitilan (OMM) kolmannen osapuolen materiaaleille. (Formlabs n.d.a.) Taulukossa 9 on listattuna Form 4L-laitteen teknisiä tietoja ja kuvassa 17 kuva Form 4L-laitteesta

Taulukko 9. Formlabs Form 4L tekniset tiedot (Formlabs n.d.a).

Tekniset tiedot	Formlabs Form 4L
Rakennustilavuus	353 x 196 x 350 mm
Laitteen mitat	664 x 528 x 794 mm
Tulostustekniikka	MSLA
Paino	58,5 kg
Maksimiteho	900 W



Kuva 17. Formlabs Form 4L (Formlabs n.d.a).

Formlabsin laitteissa viipalointiohjelmana käytetään Formlabsin PreForm -ohjelmistoa. PreFormista valitetaan käytettävä laite ja määritellään oikea materiaali. Lisäksi määritetään tulostustarkkuus Z-suunnassa 0,1 mm. Toisin kuin MEX-prosessissa, VPP-prosessissa sisätyttö on 100 %. Kun tarvittavat asetukset on säädetty ja tukien paikat tulostusalustalle asetetuille osille määritelty, voidaan ajotiedosto ”pilkkoa”. Laskennan jälkeen PreForm ilmoittaa valmistukseen kuluvan ajan sekä käytettävän materiaalin määrän. Koska materiaalien määrät tulee olla esitettyinä LCA-laskennan takia kilogrammoina, voidaan PreFormin ilmoittamat litramäärät muuttaa materiaalin tiheydellä 1,07 g/cm³ kilogrammoiksi (Formlabs 2022). Taulukossa 10 on listattuna edellä mainitut tiedot, ajoaika sekä materiaalin määrä kilogrammoina.

Taulukko 10. PreForm-ohjelmistosta saadut tiedot ennen valmistusta.

Valmistettavan osan nimi:	Vaijeriohjain			
Valmistusmäärä (kpl/ajo):	7			
Tulostusmateriaali:	Formlabs Durable V2.1			
Tiheys g/cm³:	1,07			
Materiaali (yht.):	1,158	1	1,239	kg
Tulostusmateriaali:	0,887	1	0,949	kg
Tukimateriaali:	0,270	1	0,289	kg
Apumateriaali:	1	kg		
Ajoaika:	7.46.00	hh:mm:ss		

Form 4L-laitteen keskimääräinen valmistuksen aikana käyttämä teho on 240 W, jota käytetään laskennassa energiankulutusta varten. Tehontarve on määritelty energianmittauslaitteella testiajon aikana.

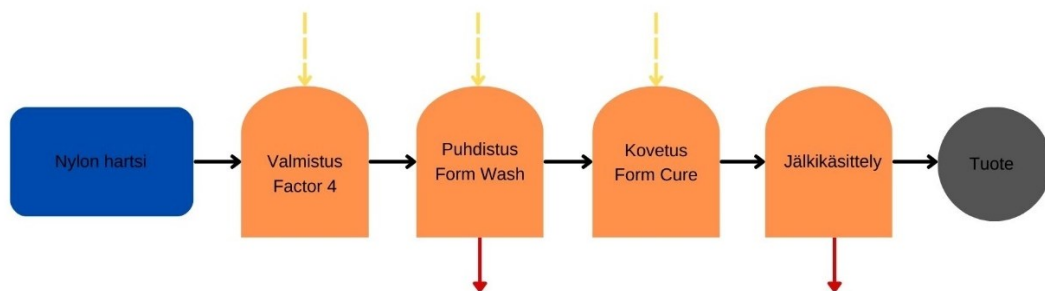
Kun ajo on valmis, voidaan vaijeriohjaimet irrottaa tulostusalustasta ja siirtää ne Form Wash L (Gen. 2) -pesuysikköön. Pesuri on täytetty prosessissa käytettävällä apumateriaalilla eli IPA:lla, jonka tarkoituksena on puhdistaa ja liuoittaa valmistetuista ohjaimista kovettumaton tulostushartsi niiden pinnoilta ja onkaloista. Pesun kesto on säädettävissä, mutta tässä työssä pesuaika on laitevalmistajan antama oletusarvo kyseiselle materiaalille eli 10 minuuttia. Pesurin keskimääräinen sähkönkulutus on 15 W.

Pesun jälkeen pesuri nostaa pesukorin automaattisesti ylös IPA:sta kuivausta varten. Tunnin ilmaukuivauksen jälkeen osat voidaan siirtää Form Cure L-kovetusyksikköön. Curesta valitaan kovetusprofiili valmistuksessa käytettävälle materiaalille ja kammion lämmitessä asetettuun lämpötilaan, kovettaa Cure kovetusprofiilin mukaisesti UV-valonlähteen avulla ohjaimia. Kovetusprofiili valmistuksessa käytettävälle materiaalille on 60 minuuttia 60 celsiusasteen lämpötilassa (Formlabs 2024c). Cure L:n keskimääräinen energiankulutus on 125 W.

Curetuksen jälkeen voidaan vaijeriohjaimista poistaa tuet käsin tai työkaluja käyttäen sekä siistiä ohjaimet tukien jättämistä roskista. Taulukossa 11 on esitetty edellä mainitut tiedot ja valmistusprosessin aikainen energiankulutus kaikkineen laitteineen Kuvassa 18 on kuvattuna prosessi kaikkineen materiaali-, energia- ja jäte/hukkavirtoineen.

Taulukko 11. VPP-prosessin laitteiden keskimääräinen sähkönkulutus, ajan käyttö prosessin eri vaiheissa sekä vaiheiden aikainen energiankulutus.

Energiamuoto	kgCO2e	
Sähkö (valtakunnallinen KA)	0,074	
Laitteet	Sähkönkulutus KA (W)	
Formlabs Form 4L	250	
Formlabs Form Wash L (2.gen.)	15	
Formlabs Cure L	125	
Valmistusprosessin vaihe	Aika (hh.mm.ss)	Energiankulutus (kWh)
Valmistus (Form 4L)	7.46.00	0,166
Pesu (Form Wash L)	0.10.00	0,000
Kovetus (Form Cure L)	1.00.00	0,011
Jälkikäsitely	0.20.00	0
Tarkastus	0.05.00	0



Kuva 18. VPP-prosessin valmistuksen eri vaiheet kuvattuna.

3. PBF-prosessi

PBF-prosessissa käytettävä laite on Formlabs Fuse 1+ 30W, joka on kompakti ja tehokas SLS-laite. Fuse 1+ -laitteelle on saatavilla laaja valikoima erilaisia lisäävän valmistuksen alan standardimateriaaleja. Lisäksi laitteessa on OMM, minkä ansiosta laitteella voidaan käyttää myös 1064 nanometrin kokoista kolmannen osapuolen materiaaleja. Fuse 1+ on osa Formlabsin tarjoamaa SLS-ekosysteemiä. (Formlabs n.d.b.) Taulukossa 12 on lueteltuna Fuse 1+ -laitteen teknisiä tietoja ja käytettävät materiaalit sekä kuvassa 19 kuva Fuse 1+ -laitteesta.

Taulukko 12. Formlabs Fuse 1+ 30W tekniset tiedot (Formlabs n.d.b).

Tekniset tiedot	Formlabs Fuse 1+ 30W
Rakennustilavuus	165 x 165 x 300 mm
Laitteen mitat	685 x 645x 1065 mm
Tulostustekniikka	SLS
Paino	120 kg
Maksimiteho	1725 W



Kuva 19. Formlabs Fuse 1+ 30W (Formlabs n.d.b).

Valmistusprosessi alkaa samalla tavalla kuin VPP-prosessissa. PreFormista valitaan käytettäväksi laitteeksi Fuse 1+ sekä käytettävä materiaali. Toisin kuin aikaisemmissa prosesseissa, Fuse 1+ käyttää valmistuksessa tulostuskammiota, jolloin vajeriohjaimia voidaan valmistaa koko kammion tilavuudeltaan. Lisäksi tukirakenteita ei tarvita valmistusprosessin aikana. Myös tässä prosessissa kappaleiden sisätäyttö on 100 %. Valmistusprosessin kokonaismateriaalin tarve koostuu 70 % kierrätetystä ja 30 % tuoreesta pulverista. Taulukossa 13 on esitetty edellä mainitut tiedot ja valmistukseen kuluva aika.

Taulukko 13. PreForm-ohjelmistosta saadut tiedot ennen valmistusta.

Valmistettavan osan nimi:	Vaijeriohjain	
Valmistusmäärä (kpl/ajo):	16	
Tulostusmateriaali:	Formlabs Nylon 12	
Materiaali (yht)	5,32	kg
Tuore materiaali	1,6	kg
Kierrätetty materiaali	3,72	kg
Apumateriaali	0,16	kg
Ajoaika	16.14.00	hh.mm.ss

Ennen valmistuksen aloittamista tuore ja kierrätetty materiaali sekoitetaan keskenään Fuse Sift-pulverinerotusyksikössä. Pulveria sekoitetaan edellä mainitulla suhteella 15 minuutin ajan jauhekasetissa. Keskimääräinen sähkönkulutus tämän prosessin aikana on 210 W.

Jauhekasetin sisältö kaadetaan Fuse 1+ 30W laitteen jauhesäiliöön. Kun materiaalia on tarpeeksi valmistuksen aloittamiseksi ja muut laitteen esivalmistelut ovat kuitattu, voidaan ajo käynnistää. Fuse1+ laitteen valmistuksen aikainen keskimääräinen sähkönkulutus on 700 W, jota käytetään energiankulutusta laskiessa.

Valmistuksen jälkeen, tulostuskammio nostetaan Fuse Sift-pulverinerotusyksikköön, jossa sen annetaan jäähtyä vähintään 40 asteen lämpötilaan. Lämpötilan laskeuduttua voidaan tulostuskammiossa oleva ”jauhekakku” nostaa ylös ja putsata vaijeriohjaimet sulamattomasta pulverista. Sulamaton pulveri suodatetaan sihdin läpi takaisin kiertoön seuraavaa ajoa varten. Kaikkea pulveria ei saada prosessista kerättyä takaisin kiertoön, minkä takia prosessissa syntyy hävikkiä. Tässä työssä pulverin poistoon käytetyn ajan on arvioitu olevan 15 minuuttia ja prosessin sähkönkulutuksen 165 W.

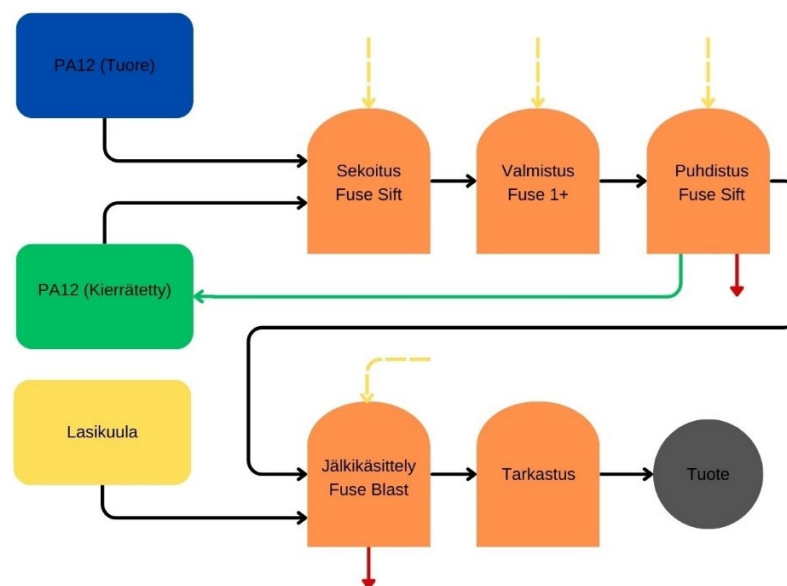
Kaikkea sulamatonta pulveria ei saada putsattua ohjaimista Siftissä, joten osat siirretään Fuse Blast-puhdistusyksikköön. Blast on automaattisesti toimiva lasikuulaa puhdistuksessa käyttävä laite. Ohjaimet sijoitetaan Blastin sisällä olevaan pyörivään rumpuun, valitaan haluttu puhdistusohjelma, eli tässä tapauksessa Long-ohjelma, ja laite suihkuttaa osiin noin 2,1 barin paineella lasikuulaa 20 minuutin ajan. Lasikuulan suihkuttamisen jälkeen laitteen sisältä huuhdellaan paineilmalla ylimääräisestä lasikuulasta 3 minuutin ajan noin 2,8 barin

paineella. Puhdistuksen kokonaiskesto on yhteensä 26 minuuttia (Formlabs 2024d). Keskimääräinen sähkönkulutus prosessin aikana on 300 W.

Vaijeriohjaimet päätyvät lopputarkastukseen Blastistä, jonka jälkeen ne ovat valmiita toimista varten. Taulukossa 14 on esitetty edellä mainitut tiedot ja valmistusprosessin aikainen energiankulutus kaikkineen laitteineen. Kuvassa 20 on kuvattuna prosessi kaikkineen materiaali-, energia- ja jäte/hukkavirtoineen.

Taulukko 14. PBF-prosessin laitteiden keskimääräinen sähkönkulutus, ajan käyttö eri prosessin eri vaiheissa sekä vaiheiden aikainen energiankulutus.

Energiamuoto	kgCO ₂ e	
Sähkö (valtakunnallinen KA)	0,074	
Laitteet	Sähkönkulutus KA (W)	
Formlabs Fuse Sift (sekoitus)	210	
Formlabs Fuse 1+ 30W	700	
Formlabs Fuse Sift (Puhdistus)	165	
Formlabs Fuse Balst	300	
Valmistusprosessin vaihe	Aika (hh.mm.ss)	Energiankulutus (kWh)
Sekoitus (Sift)	0.50.24	0,003
Valmistus (Fuse 1+)	8.43.12	1,011
Puhdistus (Sift)	0.59.24	0,004
Jälkikäsitteily (Blast)	3.07.12	0,012
Tarkastus	0.00.00	0



Kuva 20. PBF-prosessin toiminta kuvattuna.

4.2.4 Hukka/jäte

MEX-prosessissa käytetty tukimateriaali muodostaa kaiken prosessissa syntyvän jätteen ja se voidaan lajitella suoraan muovin kierrätykseen. Keräysmuovin kgCO₂e kiloa kohden on 0,369 (Riihi 2023).

VPP-prosessissa valmistuksen aikana syntyy jätettä, jotka ovat tukimateriaali sekä puhdistuksessa käytettävä IPA. Muovijäte voidaan lajitella samalla tavalla kuin MEX-prosessissa keräysmuovina, mutta IPA tulee lajitella vaarallisena jätteenä. IPA:n kgCO₂e kiloa kohden on 1,170 (Riihi 2023).

PBF-prosessissa Siftissä kaikkea jauhetta ei saada kerättyä kiertoon sekä Blastissä syntyy hukkaa osien pinnalla olevasta pulverista sekä lasikuulasta. Koska Blastistä syntyvä hukka on jauheen ja lasikuulan sekoitusta ja Siftistä syntyvä suurin hukka on ATEX-imuriin imuroitua pulveria, lajitellaan jätteet tässä tapauksessa energijätteenä. Energiapoltettavan jätteen kgCO₂e kilogramma kohden on 0,41 (Riihi 2023).

Taulukossa 15 on esitettyä kunkin valmistusprosessin syntyvän hukkan/jätteen määrä materiaaleista sekä apumateriaaleista.

Taulukko 15. Jätteenkäsittelystä syntyvät hiilipäästöt kiloa kohden sekä jätteen/hukan määrä eri valmistusmenetelmien prosessien aikana.

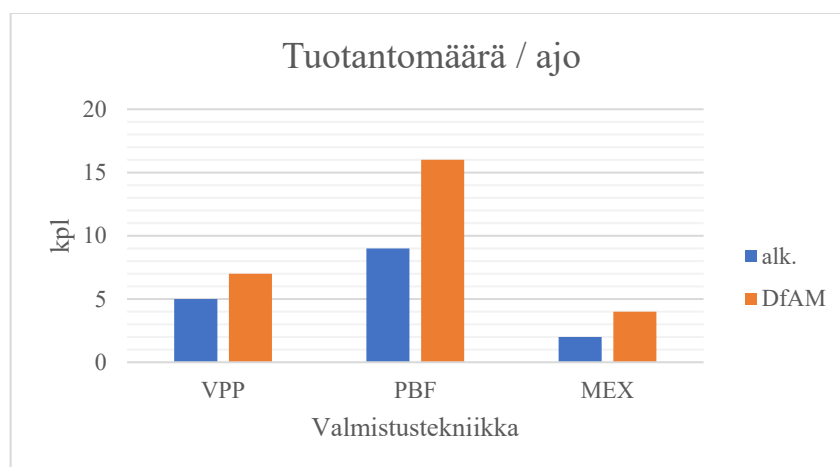
Jätteenkäsittely	Yksikkö	kgCO ₂ e
Keräysmuovi	kg	0,369
Energiapoltettava jäte	kg	0,41
Vaarallinen jäte	kg	1,17
Valmistusmenetelmä	Hukka/jäte	Määrä (kg)
MEX	Tukimateriaali	0,1
VPP	Tukimateriaali	0,29
	Apumateriaali	1
PBF	Tulostusmateriaali	0,22
	Apumateriaali	0,16

5 Tulokset

Tässä kappaleessa raportoidaan tutkimuksesta saadut tulokset. Tulokset käsittelevät DfAM:n hyödyntämisestä syntyviä muutoksia vaijeriohjaimeen, sen vaikutuksesta ohjaimien valmistukseen. Lisäksi kappaleessa käsitellään tulokset eri valmistusprosessien ympäristövaikutuksista cradle-to-gate tarkastelujakson aikana.

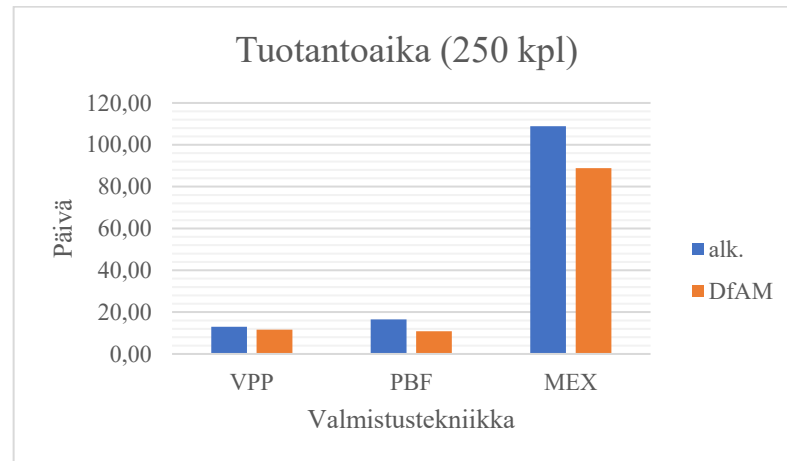
5.1 DfAM:n tulokset

Kuten, kappaleen 3.2 kuvasta 10 voidaan huomata, niin näkyvin muutos uudelleensuunnittelussa vaijeriohjaimesta on valmistettavien osien määrän pienentäminen kahdesta osasta yhteen. Lisäksi uudelleensuunnittelun ansiosta ohjaimen valmistus on mahdollista toteuttaa vain eri lisäävän valmistuksen valmistusmenetelmillä eikä alkuperäisellä ruiskupuristusmenetelmällä. Kappaleen minimoinnilla on myös vaikutuksia vaijeriohjaimen valmistuksen aikana. Koska valmistettavia osia yhtä vaijeriohjainta kohden on vähemmän, pystytään ohjaimia valmistamaan tiiviimmin tulostusalustoilla sekä -kammiossa. Kuva 21 visualisoi DfAM:n vaikutusta vaijeriohjaimen yhden valmistuskierroksen aikaista kappalemäärän kasvua.



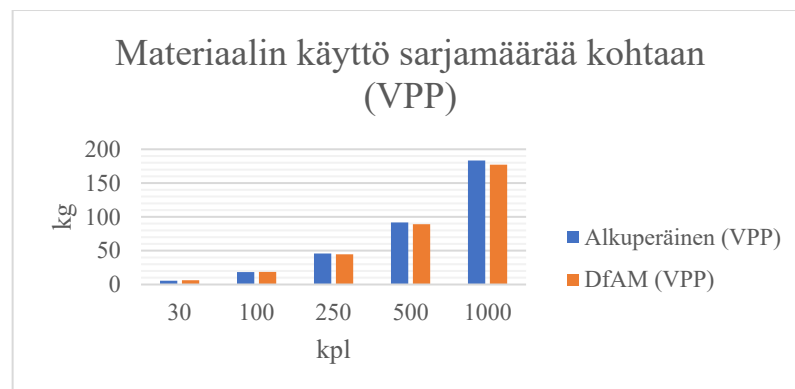
Kuva 21. DfMA:n vaikutus tuotantomääriin yhden ajokierroksen aikana verrattuna alkuperäiseen vaijeriohjaimeen eri valmistusmenetelmillä.

Kun vaijeriohjaimia voidaan valmistaa enemmän yhden ajon aikana, niin myös ajomäärät tuotettavaa määrää kohtaan laskevat, mikä näkyy suoraan tuotantoajoissa. Kuva 22 DfAM:n vaikutusta tuotantonopeuden laskuun 250 kappaleen sarjassa.

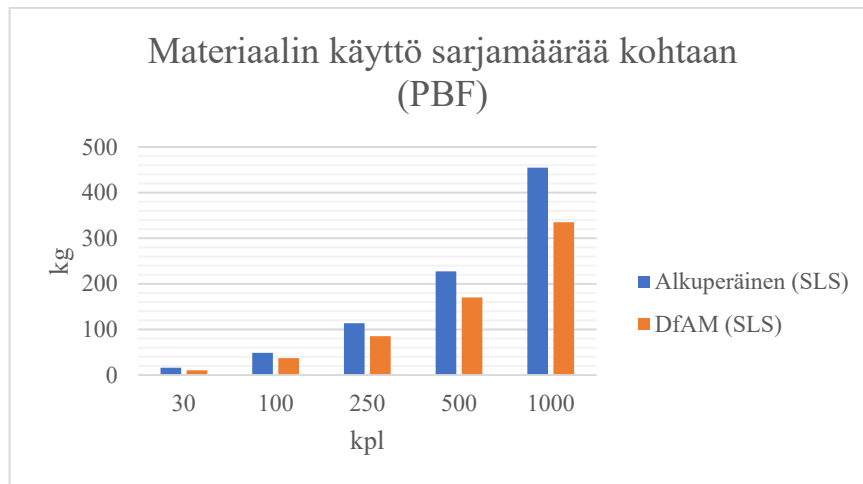


Kuva 22. DfMA:n vaikutus tuotantoaikaan verrattuna alkuperäiseen vaijeriohjaimeen eri valmistusmenetelmillä.

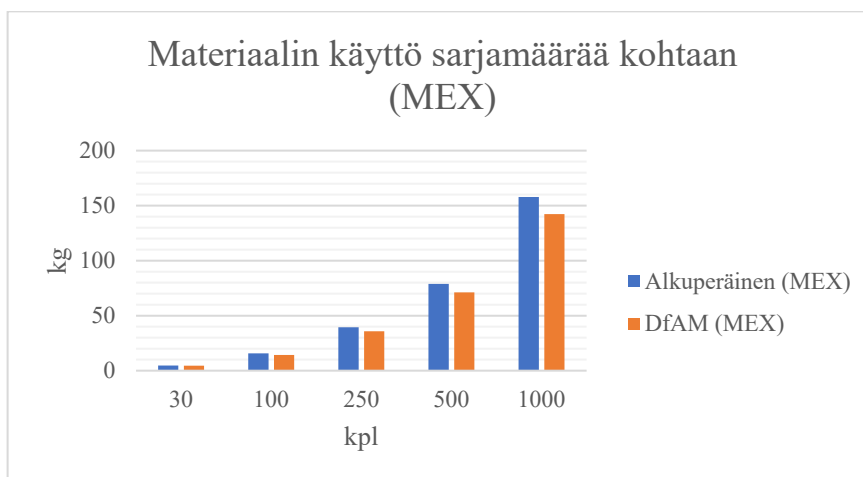
DfAM:n vaikutukset näkyvät myös materiaalintarpeessa valmistuksen aikana. Materiaalin tarve DfAM:n ansiosta on laskenut jokaisen valmistusmenetelmän kohdalla. Kuvat 23, 24 ja 25 esittävät materiaalin tarpeen laskua eri tuotantomäärissä, kunkin valmistusmenetelmän kohdalla.



Kuva 23. DfMA:n vaikutus materiaalin kulutukseen verrattuna alkuperäiseen vaijeriohjaimeen VPP-prosessilla.

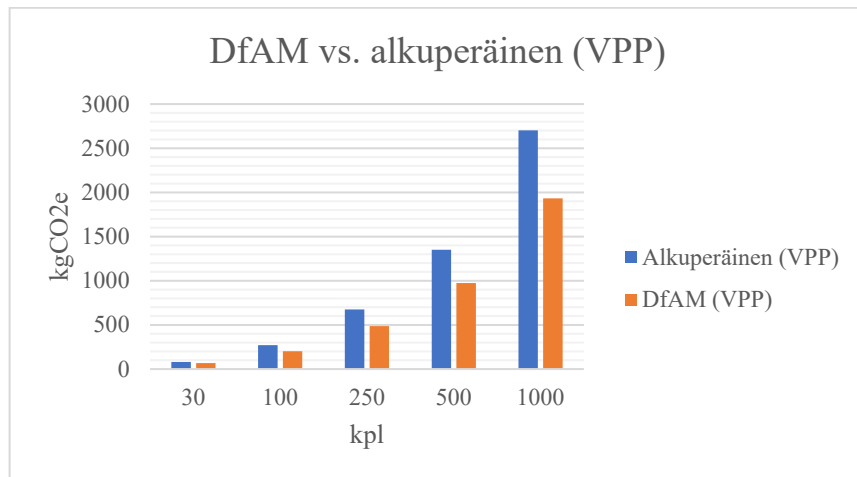


Kuva 24. DfMA:n vaikutus materiaalin kulutukseen verrattuna alkuperäiseen vaijerioh-
jaimeen PBF-prosessilla.

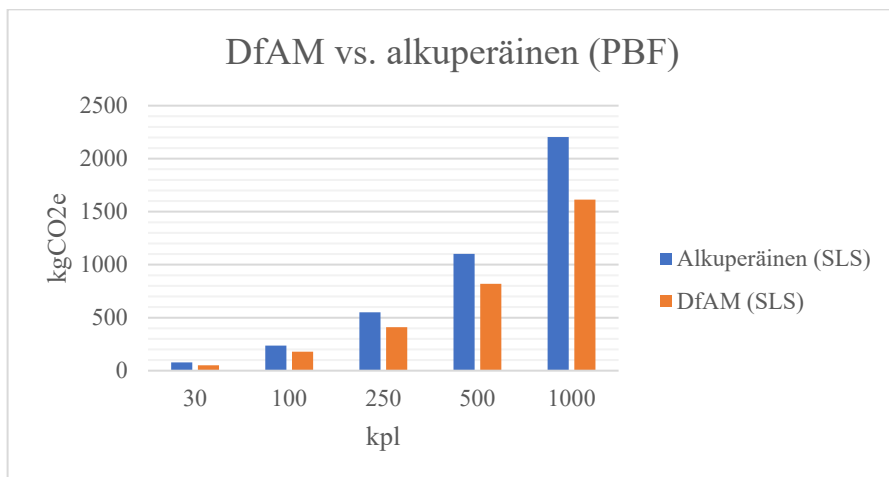


Kuva 25. DfMA:n vaikutus materiaalin kulutukseen verrattuna alkuperäiseen vaijerioh-
jaimeen MEX-prosessilla.

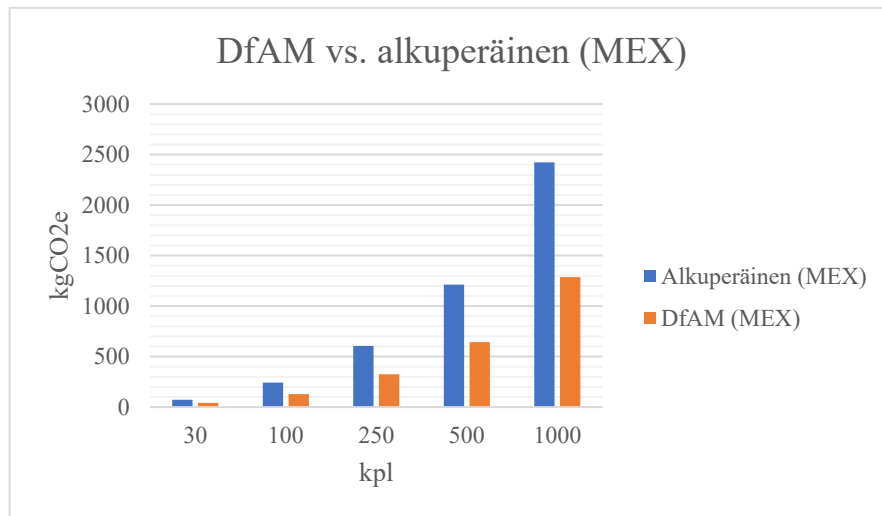
Edellä mainittujen asioiden vaikutuksesta myös tuotannon aikaiset hiilipäästöt laskevat. Alla olevat kuvat 26, 27 ja 28 esittävät hiilipäästöjen laskun eri tuotantomäärissä, kunkin valmistusmenetelmän kohdalla.



Kuva 26. DfAM:n vaikutus hiilipäästöihin verrattuna alkuperäiseen vaijeriohjaimeen VPP-prosessilla.



Kuva 27. DfAM:n vaikutus hiilipäästöihin verrattuna alkuperäiseen vaijeriohjaimeen PBF-prosessilla.



Kuva 28. DfAM:n vaikutus hiilipäästöihin verrattuna alkuperäiseen vaijeriohjaimeen MEX-prosessilla.

5.2 Hiilipäästöjen tulokset

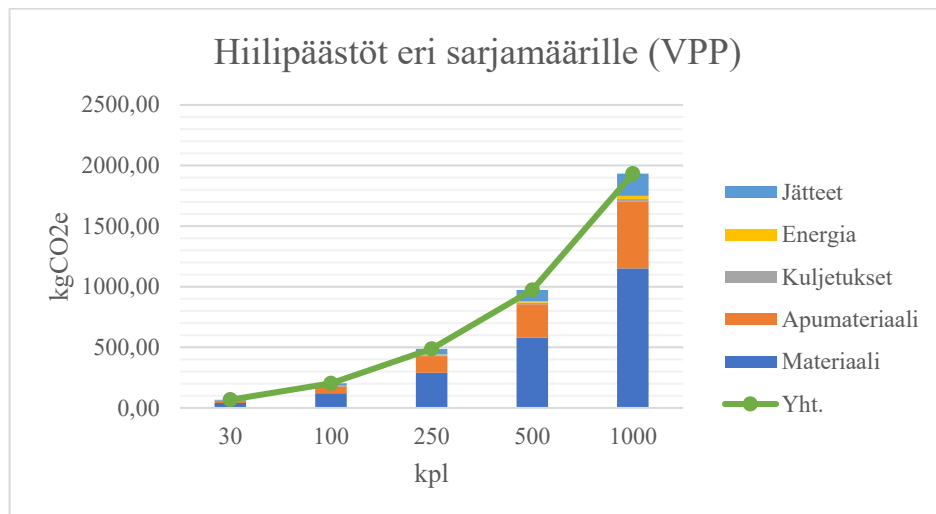
Tässä kappaleessa tarkastelemme tarkemmin DfAM:n avulla uudelleensuunnitellun vaijeriohjaimen hiilipäästöjä cradle-to-gate tarkastelujakson aikana. Tarkastelu suoritetaan jokaiselle valmistusmenetelmälle erikseen.

5.2.1 VPP

VPP-prosessissa suurimmat hiilipäästöt synnyttävät materiaalin sekä apumateriaan valmistus. Kuljetuksien ja energiankulutuksen aiheuttamat päästöt ovat VPP-prosessissa pienimmät. Alla oleva taulukko 16 esittää VPP-prosessin hiilipäästöt numeerisesti cradle-to-gate tarkastelujakson aikana eri sarjamäärille. Kuva 29 visualisoi taulukon 16 tietoja hiilipäästöjen osalta ja sarjamäärien vaikutusta päästöihin.

Taulukko 16. VPP-prosessin tarkastelujaksojen hiilipäästöt sekä ajokierrokset eri sarjamäärille.

Haluttu määrä osia	30	100	250	500	1000
Todellinen määrä osia	35	105	252	504	1001
Ajojen määrä	5	15	36	72	143
Päästöt sarjoittain	Yksikkö (kgCO₂e)				
Materiaali	40,25	120,76	289,83	579,66	1151,28
Apumateriaali	19,20	57,60	138,24	276,48	549,12
Kuljetukset	0,85	2,55	6,13	12,25	24,34
Energia	0,89	2,66	6,38	12,76	25,35
Jätteet	6,38	19,15	45,96	91,92	182,57
Yht.	67,58	202,73	486,54	973,08	1932,65



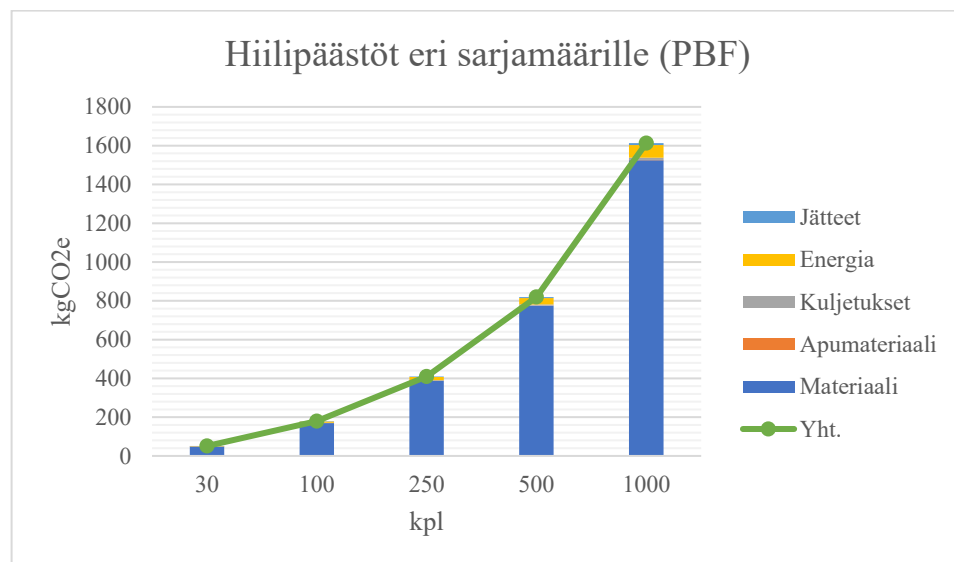
Kuva 29. VPP-prosessista syntyvät hiilipäästöt eri sarjamäärille.

5.2.2 PBF

PBF-prosessissa suurin hiilipäästöjen aiheuttaja on materiaalin valmistus. Pienimmät päästöt syntyvät apumateriaalin valmistuksesta, materiaalien kuljetuksesta sekä prosessista syntyvästä hukasta/jätteistä. Alla oleva taulukko 17 esittää PBF-prosessin hiilipäästöt numeerisesti cradle-to-gate tarkastelujakson aikana eri sarjamäärille. Kuva 30 visualisoi taulukon 17 tietoja hiilipäästöjen osalta ja sarjamäärien vaikutusta päästöihin.

Taulukko 17. PBF-prosessin tarkastelujaksojen hiilipäästöt sekä ajokierrokset eri sarjamäärille.

Haluttu määrä osia	30	100	250	500	1000
Todellinen määrä osia	32	112	256	512	1008
Ajojen määrä	2	7	16	32	63
Päästöt sarjoittain	Yksikkö (kgCO₂e)				
Materiaali	48,412	169,442	387,296	774,592	1524,978
Apumateriaali	0,0384444	0,134556	0,307556	0,615111	1,211
Kuljetukset	0,39148	1,37018	3,13184	6,26368	12,33162
Energia	2,0593858	7,20785	16,47509	32,95017	64,87065
Jätteet	0,305696	1,069936	2,445568	4,891136	9,629424
Yht.	51,207006	179,2245	409,6561	819,3121	1613,021



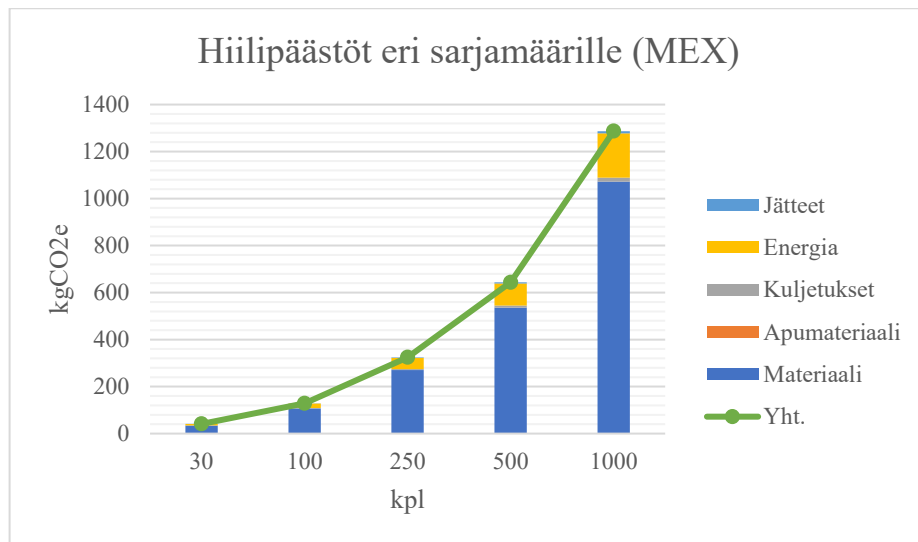
Kuva 30. PBF-prosessista syntyvät hiilipäästöt eri sarjamäärille.

5.2.3 MEX

Suurimmat hiilipäästöt syntyvät MEX-prosessissa materiaalin valmistuksesta sekä energiankulutuksesta. Kuljetusten ja hukan/jätteen osuus on hiilipäästöissä pienin. Valmistusprosessin aikana apumateriaalille ei ole tarvetta. Alla oleva taulukko 18 esittää MEX-prosessin hiilipäästöt numeerisesti cradle-to-gate tarkastelujakson aikana eri sarjamäärille. Kuva 31 visualisoi taulukon 18 tietoja hiilipäästöjen osalta ja sarjamäärien vaikutusta päästöihin.

Taulukko 18. MEX-prosessin tarkastelujaksojen hiilipäästöt sekä ajokierrokset eri sarjamäärille.

Haluttu määrä osia	30	100	250	500	1000
Todellinen määrä osia	32	100	252	500	1000
Ajojen määrä	8	25	63	125	250
Päästöt sarjoittain	Yksikkö (kgCO₂e)				
Materiaali	34,302336	107,1948	270,1309	535,974	1071,948
Apumateriaali	0	0	0	0	0
Kuljetukset	0,550792	1,721225	4,337487	8,606125	17,21225
Energia	6,0253	18,82906	47,44924	94,14531	188,2906
Jätteet	0,2928384	0,91512	2,306102	4,5756	9,1512
Yht.	41,171266	128,6602	324,2237	643,301	1286,602



Kuva 31. MEX-prosessista syntyvät hiilipäästöt eri sarjamäärille.

6 Tulosten analysointi

Tässä kappaleessa analysoidaan aikaisemman kappaleessa ilmoitetut tulokset. Kappaleet ovat jaettu samoin kuin Tulokset-kappaleessa. 6.1 tulee käsittelemään DfAM:n vaikutuksia tuotannon tehostamisessa, materiaalin tarpeesta sekä hiilipäästöjen vertailusta alkuperäiseen osaan kaikilla eri tuotantomenetelmillä. 6.2 kappaleessa tarkastellaan tarkemmin eri valmistusmenetelmien päästöjen syntyperiä sekä vertaillaan valmistusmenetelmiä keskenään.

6.1 DfAM:n tulosten analysointi

Aikaisemman kappaleen 5.1 tuloksista voidaan huomata DfAM:n vaikutuksesta syntyviä parauksia kaikilla vertailukohtilla. Vaijeriohjaimen osien pienentäminen kahdesta kappaleesta yhteen on vaikuttanut ohjaimien valmistamisen määrän kasvuun yhden ajon aikana kullakin valmistusmenetelmällä. Eniten vaikutuksesta ovat hyötäneet PBF- sekä MEX-prosessi, joiden tuotantomäärät yhden ajon aikana ovat jopa kaksinkertaistuneet. Tämän vaikutuksesta myös tuotantoaika on pienentynyt kuvassa 22 esitetyle 250 kappaleen sarjamäärälle kaikilla valmistusmenetelmillä. Osien integroiminen helpottaa myös vaijeriohjaimen asentamista sitä käyttävään henkilönostimeen huoltotiloissa tai paikan päällä sen käyttökohteessa.

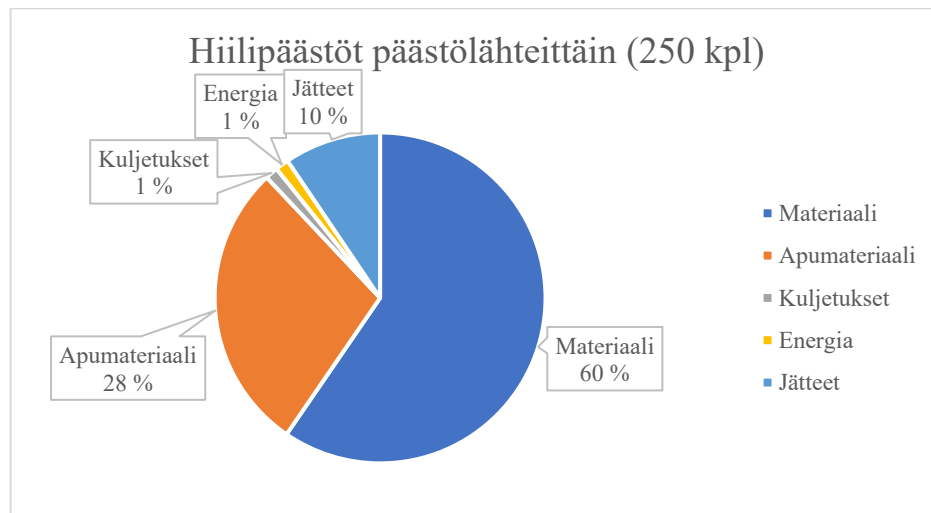
Materiaalin tarve valmistuksen aikana on pienentynyt myös DfAM:n vaikutuksesta. Materiaalin tarpeen lasku selittyy VPP- ja MEX-prosessien osalta tukirakenteiden tarpeen pienentymisellä. PBF-prosessissa materiaalin tarve on laskenut eniten. Tähän on vaikuttanut erityisesti se, että ohjaimia on voitu asettaa tiiviimmin koko tulostuskammion tilavuudelta. Tämä vaikuttaa täyttöasteen kasvuun, jolloin materiaalia on pystytty hyödyntämään tehokkaammin ohjaimien valmistuksessa.

Edellä mainittujen kohtien perusteella materiaalin tarpeen lasku vaikuttaa materiaalin valmistuksen hiilipäästöihin laskevasti. Samoin tapahtuu myös muissa eri tarkastelujakson vaiheissa, kuten kuljetuksessa ja hukassa/jätteissä. Lisäksi energiantarve laskee tuotannon aikana, kun tuotantoa saadaan tehostettua uudelleensuunnitellun mallin avulla sekä apumateriaalin tarve tuotannon aikaisten ajojen määrien laskiessa eri sarjamäärillä.

Kappaleen 5.1 kuvaajat tukevat suoraan päätelmiä siitä, että DfAM:n hyödyntäminen vaijeriohjaimen uudelleensuunnittelussa on vaikuttanut tuotannon tehostamiseen sekä hiilipäästöjen pienenemiseen kaikilla valmistusmenetelmillä.

6.2 Hiilipäästöjen tulosten analysointi ja valmistusmenetelmien vertailu

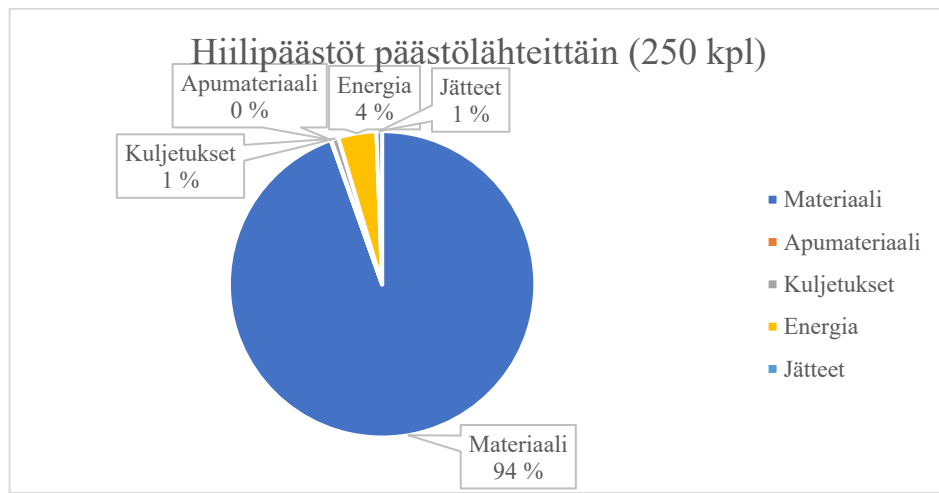
VPP-prosessissa suurimmat hiilipäästöt syntyvät erityisesti materiaalin sekä käytettävän apumateriaalin valmistuksesta. Tuotannon aikana jälkikäsittelyssä tarvittavan IPA:n määrä ja sen tuottamisen korkeat hiilipäästöt vaikuttavat tuotteen hiilijalanjäljen kasvuun. Myös IPA:n kierrätyksessä on huomattavasti suuremmat hiilipäästöt kuin esimerkiksi valmistuksessa käytetyillä tukirakenteilla. Tuotannossa käytettävät laitteet ovat kuitenkin alhaisia energiankulutukseltaan ja ohjaimia pystytään tuottamaan suhteellisen monta ohjainta ajallisesti lyhyen ajoajan aikana. Kuva 32 esittää VPP-prosessin päästölähteet prosentuaalisesti koko tarkastelujakson aikana.



Kuva 32. VPP-prosessissa hiilipäästöjen jakautuminen eri tarkastelujaksojen aikana prosentuaalisesti.

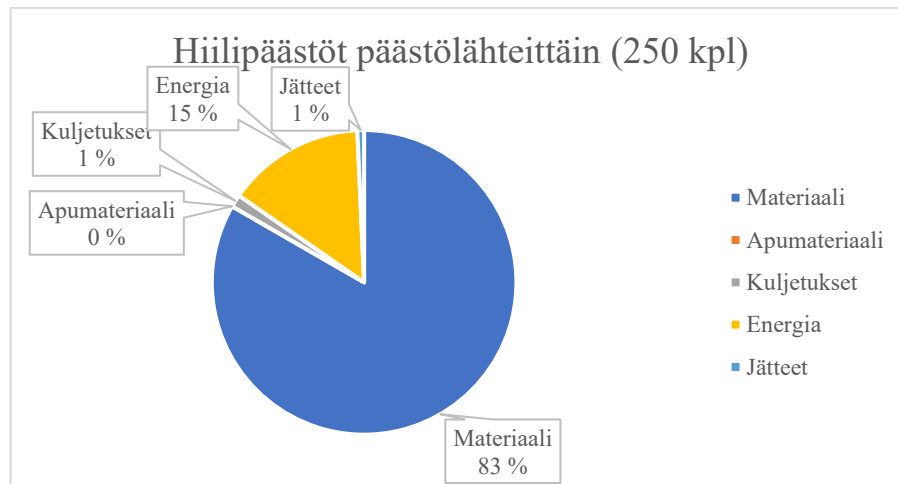
PBF-prosessissa ylivoimaisesti suurimmat hiilipäästöt syntyvät materiaalin valmistuksesta. Toisin kuin VPP-prosessissa, apumateriaalin tarve on huomattavasti pienempi. Lasikuulan valmistuksella on myös alhaisemmat hiilipäästöt verrattuna IPA:an. Valmistusprosessin

laitteet kuluttavat muihin valmistusprosesseihin verrattuna enemmän energiaa prosessin aikana, mutta suuren tuotantovolyymin ansiosta ajojen yhteismäärät sarjojen välillä ovat pienimmät. Tämän takia energiankulutuksella ei ole suuria hiilipäästövaikutuksia sarjatuotannossa. Kuva 33 esittää PBF-prosessin päästölähteet prosentuaalisesti koko tarkastelujakson aikana.



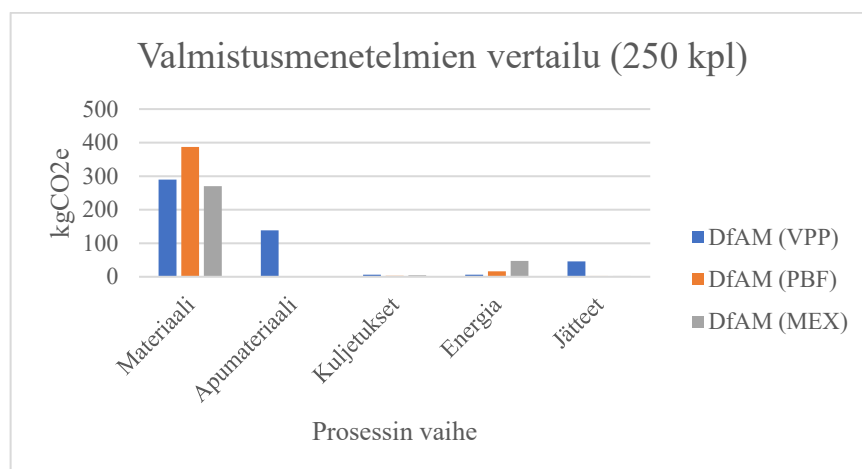
Kuva 33. PBF-prosessissa hiilipäästöjen jakautuminen eri tarkastelujaksojen aikana prosentuaalisesti.

MEX-prosessissa materiaalin valmistus sekä energiankulutus vaikuttavat hiilipäästöihin eniten. Energiankulutukseen vaikuttaa erityisesti heikoin tuotannon tehokkuus vertailtavista valmistusmenetelmistä. Valmiiden ohjainten määrä suhteessa yhden ajon kestoon on selvästi heikoin. Esimerkiksi PBF-prosessilla voidaan tuottaa vaijeriohjaimia lähes 9 kertainen määrä samassa ajassa kuin yhden ajokierroksen aikana MEX-prosessilla. Muihin valmistusmenetelmiin verrattuna materiaalin tarve on kuitenkin pienempi kuin muilla valmistusmenetelmillä 50 prosentin sisätäytön vuoksi. Kuitenkin hiilipäästöt valmistuksessa ovat hyvin lähellä muihin valmistusmenetelmiin verrattuna. Kuva 34 esittää MEX-prosessin päästölähteet prosentuaalisesti koko tarkastelujakson aikana.



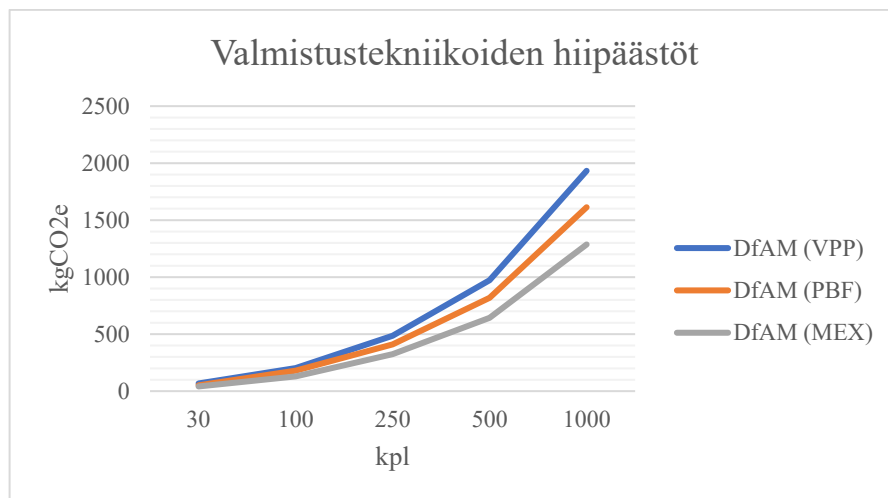
Kuva 34. MEX-prosessissa hiilipäästöjen jakautuminen eri tarkastelujaksojen aikana prosentuaalisesti.

Alla olevasta kuvasta 35 voidaan havaita selkeämmin päästölähteet tarkastelujakson aikana kunkin valmistusmenetelmän kohdalla. Kuvassa on myös vertailun vuoksi ilmoitettu tarkastelujakson eri vaiheiden hiilipäästöt kullekin valmistusmenetelmälle. Kuten edellä mainittiin, VPP-prosessissa selkeimmät erot muihin valmistusmenetelmiin ovat apumateriaalista sekä jätteistä/hukasta syntyvät hiilipäästöt. MEX-prosessilla on korkein energiankulutus sarjatuotannossa heikoimman tuotantotehokkuuden vuoksi. Kaikissa prosesseissa korkein hiilipäästölähde syntyy materiaalin valmistuksesta, jossa PBF-prosessilla se on korkein.

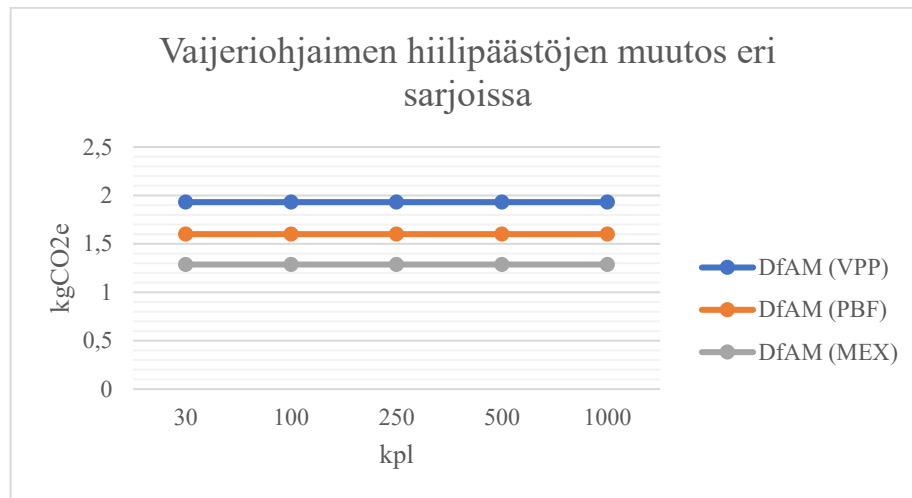


Kuva 35. Hiilipäästöjen määrä cradle-to-gate tarkastelujakson aikana eri valmistusmenetelmille.

Koska jokaista sarjamäärää kohtaan tarvitaan valmistusprosessia varten enemmän materiaalia sekä apumateriaalia, vaikuttaa se myös suoraan kuljetuksien hiilipäästöjen kasvuun. Kun tuotantoajojen määrä kasvaa jokaisella valmistusprosessilla, niin myös jälkikäsittelystä syntyvä hukka/jäte kasvaa. Alla oleva kuva 36 esittää hiilipäästöjen kasvun jokaisen valmistusprosessin kohdalla. Kuvaajasta voidaan havaita, että MEX-prosessin aikana syntyvät hiilipäästöt eri sarjamäärillä ovat pienimmät verrattuna muihin valmistusmenetelmiin. Kuitenkin, kuten tulokset kappaleen kohdassa 5.1 kuvassa 22 on esitetty, tuotannon tehokkuus PBF-prosessilla on huomattavasti parempi kuin MEX-prosessilla. VPP-prosessin hiilipäästöt tarkastelujakson aikana eri sarjamäärillä ovat suuremmat kuin muilla prosesseilla. Kuva 37 esittää yhden vaijeriohjaimen tuotannon synnyttämät hiilipäästöt koko tarkastelujakson aikana eri sarjamäärille. Kuvaajasta voidaan huomata, että riippuen tuotettavasta sarjamäärästä, vaijeriohjaimen hiilipäästöt pysyvät aina samana.



Kuva 36. Sarjakoon vaikutus hiilipäästöjen kasvuun eri valmistusmenetelmillä.



Kuva 37. Vaijeriohjaimen hiilijalanjälki eri valmistusmenetelmillä.

7 Johtopäätökset ja pohdinta

Tämä kappale sisältää diplomityön keskeiset tulokset sekä työn luotettavuuden ja rajoitteiden arviointia. Tulosten merkitys ja niiden sovellettavuus on tuotu myös esiin kappaleessa. Lisäksi kappaleessa käydään läpi jatkotutkimusaiheita ja työn lopullinen yhteenveto.

7.1 Yhteenveto

DfMA:n suorittamisella vaijeriohjaimen uudelleensuunnitteluun oli selkeitä hyötyjä tuotannon tehossuorituksessa ja materiaalin käytön sekä hiilipäästöjen vähentymisellä. Tuotannon tehossuoritus parani kaikilla eri valmistusmenetelmillä, mutta erityisesti PBF- ja MEX-prosesseilla, joiden vaijeriohjaimien tuotantomäärä kasvoi yhden ajokierroksen aikana lähes kaksinkertaiseksi. DfAM:n toteuttamisella ohjaimia pystyttiin asettelemaan tiiviimmin tulostusalustalle tai -kammioon. Vaikka ajokierroksen suorittamiseen kuluva aika kasvoi suurempien määrien valmistamisesta yhden ajokierroksen aikana, oli sillä vaikutusta kuitenkin tuotannon nopeuttamiseen eri sarjamääriä valmistaessa. Materiaalin käyttö tuotannon aikana pieneni myös tukien tarpeen vähentymisellä, sekä erityisesti PBF-prosessissa korkeampien täyttöasteiden ansiosta. Koska tuotannon aikainen materiaalin tarve sekä ajokierrosten määrä vähenee, on sillä suoraan vaikutusta myös materiaalin valmistuksessa syntyviin sekä energiankulutukseen vaikuttaviin hiilipäästöihin.

Valmistusprosessien keskinäisten hiilipäästöjen vertailuiden aikana saatiin tietoa tarkastelujakson aikaisista hiilipäästöistä. Tulosten perusteella selkeästi suurimmat hiilipäästöt syntyivät VPP-prosessista, johtuen erityisesti apumateriaali IPA:n korkeasta hiilipäästöstä sekä prosessista syntyvän jätteen/hukan loppusijoittamisesta. MEX-prosessissa hiilipäästöt olivat muita vertailtavia valmistusmenetelmiä pienempi. Prosessin materiaalin tuotannon aikaiset hiilipäästöt olivat muita prosesseja pienemmät. PBF-prosessissa materiaalin tuotanto oli selkeästi suuri hiilipäästöjen lähde. Vaikka prosessin laitteet olivat energiankulutukseltaan korkeimmat, niin tuotannon tehokkuuden ansiosta sen tuottamat hiilipäästöt olivat huomattavasti pienemmät kuin esimerkiksi MEX-prosessissa.

Lisäksi valmistettävien vaijeriohjaimien tuotantomäärien kasvaessa tarkastelujakson hiilipäästöt kasvoivat samassa suhteessa. Tämän takia vaijeriohjaimen hiilijalanjälki on sama sarjakoosta riippumatta. Vaikka MEX-prosessilla vaijeriohjaimen hiilijalanjälki on muihin valmistusmenetelmiin verrattuna pienin, niin on syytä huomioida PBF- sekä VPP-prosessin huomattavasti nopeammat tuotantoajat.

7.2 Työn luotettavuus ja rajoitteet

Työn luotettavuus on syytä huomioida tuloksia tarkastellessa. Hiilipäästöjen arvot ovat peräisin ilmaisista tietokannoista sekä aikaisemmista tutkimuksista. Inventaarioanalyysin aikana huomiota herätti erityisesti vaihtelevat luvut eri päästölähteiden välillä tarkastelujakson aikana. Lisäksi myös laitteiden sähkötehtarve on mitattu ja arvioitu itse. Työssä käytettyjen laitteiden laitevalmistajat eivät ole ilmoittaneet keskimääräistä tehontarvetta laitteiden turvallisuus- tai teknisissä tietolehdissä. Teknisen tuen kautta sain vastauksen vain yhden laitteen keskimääräisen tehontarpeeseen.

DfMA:n toteuttamisen rajoitteena oli asiakastyön tuoma aikataulupaine sekä käytettävät CAD-ohjelmisto uudelleensuunnittelun aikana. Jotta DfMA olisi voitu toteuttaa mahdollisesti vielä tehokkaammin, olisi se vaatinut lisäosien hankinnan CAD-ohjelmistolle.

7.3 Tulosten merkitys ja sovellettavuus

Työn tuloksista voidaan huomata DfMA:n merkitys tuotannon tehostamisessa sekä materiaalin käytön pienentämisessä, jotka vaikuttavat myös suoraan prosessien hiilipäästöihin. Vaikka tämän työn DfMA:n tuottamia tuloksia ei voi verrata suoraan muihin eri prosessien komponentteihin, on sen hyödyntämistä silti syytä harkita tulevaisuudessa vastaavanlaisissa tilanteissa. Lisäksi AM-tekniikan hyödyntäminen varaosatuotannossa pienentää varaston kokoa, kun varaosia voidaan säilyttää sähköisissä kirjastoissa ja tuottaa aina tarpeen mukaan.

Prosessien hiilipäästöjen raportointi ja sitä kautta tuotteen hiilijalanjäljen arvioiminen lisää toiminnan läpinäkyvyyttä esimerkiksi 3D-tulostuspalveluissa. Asiakkaalle tuotettavista osista voidaan toimittaa tilauksen yhteydessä raportti tuotteen hiilijalanjäljestä tai tiedottaa yrityksen omilla sivuilla asiakastarinoissa. Tämän toteuttaminen vaatii kuitenkin 3D-tulostuspalvelulle sisäisesti räätälöidyn hiilijalanjälkilaskentaan soveltuvan laskurin sekä

tietokannan hiilipäästöistä. Näin raporttien luominen olisi jouhevaa ja se pystyttäisiin helposti integroimaan tuotantoprosessiin mukaan.

7.4 Jatkotutkimusaiheet

Työn tutkimusosuutta voidaan kehittää jatkossa DfAM:n osalta vaijeriohjaimen uudelleensuunnittelun osalta esimerkiksi topologisen optimoinnin sekä sisärakenteiden mallintamisen osalta. Myös käyttöön soveltuvaa materiaalia voitaisiin tarkastella laajemmin sekä mahdollisesti käyttää hiilipäästöiltään pienempiä materiaalivaihtoehtoja.

Hiilijalanjätkilaskentaa voitaisiin kehittää ottamalla käyttöön erilaisia maksullisia tietokantoja sekä LCA-laskentaan tarkoitettuja ohjelmistoja, jolloin prosessin tarkastelu olisi huomattavasti tarkempaa. Lisäksi, jatkossa AM-tekniikalla valmistetun vaijeriohjaimen hiilijalanjälkeä voitaisiin vertailla alkuperäiseen ruiskupuristusmenetelmään ja tarkastella rajaa, millä sarjamäärällä ruiskupuristusmenetelmä olisi kannattavampaa hiilijalanjäljen ja esimerkiksi kustannuksien kannalta.

Lähteet

- Arkema. 2024. Arkema reaches a carbon footprint of 1.3 kg co2E/kg for the global production of its bio-based polyamide 11 chain, 80% lower than conventional fossil-based polyamides. [Arkeman [www-sivuilta](http://www.sivuilta)]. [Viitattu: 14.2.2025]. Saatavissa: <https://www.arkema.com/global/en/media/newslit/news/global/csr/2024/20241010-reduction-carbon-footprint-polyamide-11/>
- Attran, M. 2017. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business horizons*, Vol. 60: 5. S. 683–687.
- Diegel, O., Nordin, A. & Motte, D. 2019. *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. 1st ed. 2019. Springer Singapore. S. 31
- Fishy Filaments. 2020. *Button Book 2*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 14.2.2025]. Saatavissa: <https://fishyfilaments.com/wp-content/uploads/2020/05/Button-BOOK-2.pdf>
- Formlabs, 2022. *Safety Data Sheet: Durable V2/2.1*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 12.3.2025]. Saatavissa: <https://formlabs.com/materials/standard/?srsltid=AfmBOop3izOvE6yvWGDjXrkWBvEJvXdx1Qukgs7B2IhyER8POLui68Kn>
- Formlabs. 2024a. *Best practices for printing with Form 4 and Form 4L generation printers*. [Formlabsin [www-sivuilta](http://www.sivuilta)]. [Viitattu: 30.1.2025]. Saatavissa: https://support.formlabs.com/s/article/Best-practices-for-printing-with-Form-4-generation-printers?language=en_US
- Formlabs. 2024b. *Design specifications for 3D models (Fuse 1 generation)*. [Formlabsin [www-sivuilta](http://www.sivuilta)]. [Viitattu: 30.1.2025]. Saatavissa: https://support.formlabs.com/s/article/Design-specifications-for-3D-models-Fuse-1?language=en_US
- Formlabs. 2024c. *Form Cure L time and temperature settings*. [Formlabsin [www-sivuilta](http://www.sivuilta)]. [Viitattu: 5.3.2025]. Saatavissa: https://support.formlabs.com/s/article/Form-Cure-L-time-and-temperature-settings?language=en_US

Formlabs, 2024d. Selecting and configuring a blasting cycle (Fuse Blast). [Formlabsin [www-sivuilta](https://support.formlabs.com/s/article/Selecting-a-blasting-cycle-preset-Fuse-Blast?language=en_US)]. [Viitattu: 5.3.2025]. Saatavissa: https://support.formlabs.com/s/article/Selecting-a-blasting-cycle-preset-Fuse-Blast?language=en_US

Formlabs, n.d.a. Formlabs Stereolithography 3D Printers Tech Specs. [Formlabsin [www-sivuilta](https://formlabs.com/eu/3d-printers/resin/tech-specs/)]. [Viitattu: 5.3.2025]. Saatavissa: <https://formlabs.com/eu/3d-printers/resin/tech-specs/>

Formlabs, n.d.b. Fuse 1+ 30W. [Formlabsin [www-sivuilta](https://formlabs.com/3d-printers/fuse-1/)]. [Viitattu: 5.3.2025]. Saatavissa: <https://formlabs.com/3d-printers/fuse-1/>

Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. 2015. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd ed. 2015. Springer New York. S. 1-3, 107-108

Godec, D., Ginzalez-Gutierrez, J., Nordin, A., Pei, E & Urena Alcazar, J. 2022. A Guide to Additive Manufacturing. 1st ed. Springer International Publishing. S. 1-2

Goldie, L. 2023. Gradle to Grave. [Green Element Groupin [www-sivuilta](https://www.greenelement.co.uk/blog/a-short-guide-to-product-life-cycle-analyses/cradle-to-grave/)]. [Viitattu: 3.1.2025]. Saatavissa: <https://www.greenelement.co.uk/blog/a-short-guide-to-product-life-cycle-analyses/cradle-to-grave/>

He, D., Kim, H. C., De Kleine, R. Soo, V. K., Kiziltas, A. Compston, P. & Doolan, M. 2022. Life cycle energy and greenhouse gas emissions implications of polyamide 12 recycling from selective laser sintering for an injection-molded automotive component. *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 26: 4. S.1383

Jung, S., Kara, L. B., Nie, Z., Simpson, T. W. & Whitefoot, K. S. 2023. Is Additive Manufacturing an Environmentally and Economically Preferred Alternative for Mass Production? *Environmental Science & Technology*. Vol. 57: 16. S. 6373–6375

Kokare, S., Oliveira, J. & Godina, R. 2023. Life cycle assessment of additive manufacturing processes: A review. *Journal of Manufacturing Systems*. vol. 68. S. 536-548

Kumar, S. 2020. Additive Manufacturing Processes. 1st ed. Springer International Publishing. S. 4-5

Leary, M. 2020. Design for Additive Manufacturing. 1st ed. Elsevier. S. 223, 234-235, 283-284.

London, M. B. 2020. Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Multi-Jet Fusion 3D Master's Thesis, University of Michigan: Ann Arbor. S. 21.

Materialise. 2021. Materialise Introduces 3D Printing Service Using up to 100% Re-Used Powder. [Materialisen www-sivuilta]. [Viitattu: 14.2.2025]. Saatavissa: <https://www.materialise.com/en/news/press-releases/3d-printing-service-re-used-powder>

Mosomi, E. K., Olanrewaju & O. Adeosun, S. O. 2024. Pivotal role of polylactide in carbon emission reduction: A comprehensive review. 1st ed. Engineering reports. S. 3.

Riihi. 2023. Työkaluja toiminnan kehittämiseen: HITU, Tuotteen hiilijalanjälkilaskuri [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 19.2.2025]. Saatavissa: <https://www.eepeeriihi.fi/tietoa-ja-tyokaluja2/materiaalipankki/tyokaluja-toiminnan-kehittamiseen/#hitu>

Sauerwein, M., Doubrovski, E., Balkenende, R. & Bakker, C. 2018. Exploring the potential of additive manufacturing for product design in a circular economy, 1st ed. Journal of Cleaner Production. S. 1138-1148

Ultimaker. 2017. Käyttöturvallisuustiedote: Breakaway. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 14.2.2025]. Saatavissa: https://www.3d-tulostus.fi/WebRoot/vilkas04/Shops/20131018-11092-264846-1/5A2F/B2B4/31DD/22B7/1036/0A28/1012/1BF6/SDS_Breakaway-FIN.pdf

Ultimaker. 2019. How to design for FFF 3D printing. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 31.1.2025]. Saatavissa: <https://ultimaker.com/wp-content/uploads/2024/06/How-to-design-for-FFF-1.pdf>

Ultimaker. n.d. Ultimaker Factor 4. [Ultimakerin www-sivuilta]. [Viitattu: 20.2.2025]. Saatavissa: https://ultimaker.com/3d-printers/factor-series/ultimaker-factor-4/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAwtu9BhC8ARIsAI9JHallb1dI-YuXNJ__Wi-xhxj6i178gyPFQ8CyIJv8Ci3orwVdsXbg1idsaAsVIEALw_wcB

Ultimaker Support Team. 2025. RE: Power consumption of the Ultimaker Factor 4. [Yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: tommy.kuutsa@student.lut.fi. Lähetetty 5.3.2025 klo 13.02 (GMT +0200).

Vaneker, T., Bernard, A., Moroni, G., Gibson, I. & Zhang, Y. 2020. Design for additive manufacturing: Framework and methodology, 1st ed. CIRP Annals - Manufacturing Technology. S. 578-579,

Liite 1. Alkuperäisen vaijeriohjaimen hiilijalanjälkilaskuri (VPP)

Laitteiden sähkönkulutus					
Laitte	Sähkönkulutus (KA)	Yksikkö			
Form 4L	240 W				
Wash L	15 W				
Cure L	125 W				
Materiaalin valmistus / ajo					
Materiaali	kgCO2e	kg/yksikkö	yksikkö		
Tulostusharts	6,5		1 kg		
Materiaaliluokka	Materiaali	Määrä (kg)	Määrä(%)	kgCO2e	
Muovi	Tuote	0,67	73,64 %	4,39	
Muovi	Tuki	0,24	26,36 %	1,57	
Total		0,92		5,96	
Apumateriaalin valmistus / Ajo					
Materiaali	kgCO2e	kg/yksikkö	yksikkö		
Isopropanoli	3,84		1 kg		
Materiaaliluokka	Materiaali	Määrä (kg)	Määrä(%)	kgCO2e	
Alkoholi	Apumateriaali	1,00	100,00 %	3,84	
Total		1,00		3,84	
Materiaalin kuljetus / Ajo					
Kuljetustapa	kgCO2e	tkm/yksikkö	Yksikkö		
Laivarahti	0,042		1 tkm		
Merirahti	0,116		1 tkm		
Paku	0,328		1 tkm		
Materiaali	Kuljetustapa	Kuljetusmatka (km)	Kuljetusmatka (tkm)	kgCO2e	
Tulostusharts	Laivarahti	1500	1,37	0,058	
Tulostusharts	Merirahti	500	0,46	0,053	
Apumateriaali	Paku	50	0,05	0,015	
Total				0,126	
Valmistusprosessi / Ajo					
Energiamuoto	kgCO2e	kWh/yksikkö	Yksikkö		
Sähkö (valtakunnallinen KA)	0,089		1 kWh		
Valmistusprosessin vaihe	Aika(hh.mm.ss)	Aika (Laskentamuoto)	Energiankulutus (kWh)	kgCO2e	
Valmistus (Form 4L)	6.15.00	6,25	1,500	0,1335	
Pesu (Wash L)	0.10.00	0,17	0,003	0,0002	
Kovetus (Cure L)	1.00.00	1,00	0,125	0,0111	
Tukienpoisto	0.15.00	0,25	0,000	0,0000	
Tarkastus	0.05.00	0,08	0,000	0,0000	
Total			1,628	0,1448	
Jätteenkäsittely / ajo					
Jäte	kgCO2e	kg/yksikkö	Yksikkö		
Keräysmuovi	0,369		1 kg		
Vaarallinen jäte	1,17		1 kg		
Jäte/hukka	Hukan määrä (%)	Hukan määrä (kg)	kgCO2e		
Tulostusharts	26,36 %	0,24	0,089160511		
Isopropanoli	100,00 %	1,00	1,17		
Total			1,259160511		

Liite 2. DfMA:n avulla uudelleen suunnitellun osan hiilijalanjälkilaskuri (VPP)

Laitteiden sähkönkulutus				
Laitte	Sähkönkulutus (KA)	Yksikkö		
Form 4L	240 W			
Wash L	15 W			
Cure L	125 W			
Materiaalin valmistus / ajo				
Materiaali	kgCO2e	kg/yksikkö	yksikkö	
Tulostusharts	6,5		1 kg	
Materiaaliluokka	Materiaali	Määrä (kg)	Määrä (%)	kgCO2e
Muovi	Tuote	0,95	76,66 %	6,17
Muovi	Tuki	0,29	23,34 %	1,88
Total		1,24		8,05
Apumateriaalin valmistus / Ajo				
Materiaali	kgCO2e	kg/yksikkö	yksikkö	
Isopropanoli	3,84		1 kg	
Materiaaliluokka	Materiaali	Määrä (kg)	Määrä (%)	kgCO2e
Alkoholi	Apumateriaali	1,00	100,00 %	3,84
Total		1,00		3,84
Materiaalin kuljetus / Ajo				
Kuljetustapa	kgCO2e	tkm/yksikkö	Yksikkö	
Laivarahti	0,042		1 tkm	
Merirahti	0,116		1 tkm	
Paku	0,328		1 tkm	
Materiaali	Kuljetustapa	Kuljetusmatka (km)	Kuljetusmatka (tkm)	kgCO2e
Tulostusharts	Laivarahti	1500	1,86	0,078
Tulostusharts	Merirahti	500	0,62	0,072
Apumateriaali	Paku	50	0,06	0,020
Total				0,170
Valmistusprosessi / Ajo				
Energiamuoto	kgCO2e	kWh/yksikkö	Yksikkö	
Sähkö (valtakunnallinen KA)	0,089		1 kWh	
Valmistusprosessin vaihe	Aika(hh.mm.ss)	Aika (Laskentamuoto)	Energiankulutus (kWh)	kgCO2e
Valmistus (Form 4L)	7.46.00	7,77	1,864	0,1659
Pesu (Wash L)	0.10.00	0,17	0,003	0,0002
Kovetus (Cure L)	1.00.00	1,00	0,125	0,0111
Tukienpoisto	0.15.00	0,25	0,000	0,0000
Tarkastus	0.05.00	0,08	0,000	0,0000
Total			1,992	0,1772
Jätteenkäsittely / ajo				
Jäte	kgCO2e	kg/yksikkö	Yksikkö	
Keräysmuovi	0,369		1 kg	
Vaarallinen jäte	1,17		1 kg	
Jäte/hukka	Hukan määrä (%)	Hukan määrä (kg)	kgCO2e	
Tulostusharts	23,34 %	0,29	0,106694911	
Isopropanoli	100,00 %	1,00	1,17	
Total			1,276694911	

Liite 3. Alkuperäisen vajeriohjaimen hiilijalanjälkilaskuri (PBF)

Laitteiden sähkönkulutus				
Laitte	Sähkönkulutus (KA)	Yksikkö		
Fuse 1+	700 W			
Sift (puhdistus)	165 W			
Blast	300 W			
Sift (sekoitus)	210 W			
Materiaalin valmistus / ajo				
Materiaali	kgCO2e	kg/yksikkö	yksikkö	
Tulostusjauhe (Tuore)	7		1 kg	
Tulostusjauhe (Kierrätetty)	3,5			
Materiaaliluokka	Materiaali	Määrä (kg)	Määrä(%)	kgCO2e
Muovi	Tuore	1,22	30,00 %	8,53
Muovi	Kierrätetty	2,84	70,00 %	9,95
Total		4,06		18,47
Apumateriaalin valmistus / Ajo				
Materiaali	kgCO2e	kg/yksikkö	yksikkö	
Lasikuula	2.53		1 kg	
Materiaaliluokka	Materiaali	Määrä (kg)	Määrä(%)	kgCO2e
Raepuhdistus	Apumateriaali	0,16	100,00 %	0,02
Materiaalin kuljetus / Ajo				
Kuljetustapa	kgCO2e	tkm/yksikkö	Yksikkö	
Laivarahti	0,042		1 tkm	
Merirahti	0,116		1 tkm	
Paku	0,328		1 tkm	
Materiaali	Kuljetustapa	Kuljetusmatka (km)	Kuljetusmatka (tkm)	kgCO2e
Tulostusjauhe (Tuore)	Laivarahti	1500	1,83	0,077
Tulostusjauhe (Tuore)	Merirahti	500	0,61	0,071
Apumateriaali	Paku	50	0,01	0,003
Total				0,150
Valmistusprosessi / Ajo				
Energiamuoto	kgCO2e	kWh/yksikkö	Yksikkö	
Sähkö (valtakunnallinen KA)	0,089		1 kWh	
Valmistusprosessin vaihe	Aika(hh.mm.ss)	Aika (Laskentamuoto)	Energiankulutus (kWh)	kgCO2e
Sekoitus (Sift)	0.10.00	0,17	0,035	0,0031
Valmistus (Fuse 1+)	14.10.00	14,17	9,917	0,8826
Puhdistus (Sift)	0.15.00	0,25	0,041	0,0037
Jälkikäsitely (Blast)	0.26.00	0,43	0,130	0,0116
Tarkastus	0.05.00	0,08	0,000	0,0000
Total			10,123	0,9009
Jätteenkäsittely / ajo				
Jäte	kgCO2e	kg/yksikkö	Yksikkö	
Energiapoltettava jäte	0,41		1 kg	
Jäte/hukka	Hukan määrä (%)	Hukan määrä (kg)	kgCO2e	
Tulostusjauhe (Puhdistus)	2,00 %	0,08	0,033292	
Tulostusjauhe jälkikäsitely	2,00 %	0,08	0,033292	
Lasikuula	100,00 %	0,16	0,0656	
Total			0,132184	

Liite 4. DfMA:n avulla uudelleen suunnitellun osan hiilijalanjälkilaskuri (PBF)

Laitteiden sähkönkulutus				
Laitte	Sähkönkulutus (KA)	Yksikkö		
Fuse 1+	700 W			
Sift (puhdistus)	165 W			
Blast	300 W			
Sift (sekoitus)	210 W			
Materiaalin valmistus / ajo				
Materiaali	kgCO2e	kg/yksikkö	yksikkö	
Tulostusjauhe (Tuore)	7		1 kg	
Tulostusjauhe (Kierrätetty)	3,5			
Materiaaliluokka	Materiaali	Määrä (kg)	Määrä(%)	kgCO2e
Muovi	Tuore	1,60	30,00 %	11,17
Muovi	Kierrätetty	3,72	70,00 %	13,03
Total		5,32		24,21
Apumateriaalin valmistus / Ajo				
Materiaali	kgCO2e	kg/yksikkö	yksikkö	
Lasikuula	2.53		1 kg	
Materiaaliluokka	Materiaali	Määrä (kg)	Määrä(%)	kgCO2e
Raepuhdistus	Apumateriaali	0,16	100,00 %	0,02
Materiaalin kuljetus / Ajo				
Kuljetustapa	kgCO2e	tkm/yksikkö	Yksikkö	
Laivarahti	0,042		1 tkm	
Merirahti	0,116		1 tkm	
Paku	0,328		1 tkm	
Materiaali	Kuljetustapa	Kuljetusmatka (km)	Kuljetusmatka (tkm)	kgCO2e
Tulostusjauhe (Tuore)	Laivarahti	1500	2,39	0,101
Tulostusjauhe (Tuore)	Merirahti	500	0,80	0,093
Apumateriaali	Paku	50	0,01	0,003
Total				0,196
Valmistusprosessi / Ajo				
Energiamuoto	kgCO2e	kWh/yksikkö	Yksikkö	
Sähkö (valtakunnallinen KA)	0,089		1 kWh	
Valmistusprosessin vaihe	Aika(hh.mm.ss)	Aika (Laskentamuoto)	Energiankulutus (kWh)	kgCO2e
Sekoitus (Sift)	0.10.00	0,17	0,035	0,0031
Valmistus (Fuse 1+)	16.14.00	16,23	11,363	1,0113
Puhdistus (Sift)	0.15.00	0,25	0,041	0,0037
Jälkikäsitteily (Blast)	0.26.00	0,43	0,130	0,0116
Tarkastus	0.05.00	0,08	0,000	0,0000
Total			11,570	1,0297
Jätteenkäsittely / ajo				
Jäte	kgCO2e	kg/yksikkö	Yksikkö	
Energiapoltettava jäte	0,41		1 kg	
Jäte/hukka	Hukan määrä (%)	Hukan määrä (kg)	kgCO2e	
Tulostusjauhe (Puhdistus)	2,00 %	0,11	0,043624	
Tulostusjauhe jälkikäsitteily	2,00 %	0,11	0,043624	
Lasikuula	100,00 %	0,16	0,0656	
Total			0,152848	

Liite 5. Alkuperäisen vaijeriohjaimen hiilijalanjälkilaskuri (MEX)

Laitteiden sähkönkulutus				
Laitte	Sähkönkulutus (KA)	Yksikkö		
Factor 4	250 W			
Materiaalin valmistus / ajo				
Materiaali	kgCO2e	kg/yksikkö	yksikkö	
Tulostusmateriaali	8,24		1 kg	
Tukimateriaali	4,2		1 kg	
Materiaaliluokka	Materiaali	Määrä (kg)	Määrä(%)	kgCO2e
Muovi	Tulostusmateriaali	0,25	78,68 %	2,05
Muovi	Tukimateriaali	0,07	21,32 %	0,28
Total		0,32		2,33
Apumateriaalin valmistus / Ajo				
Materiaali	kgCO2e	kg/yksikkö	yksikkö	
-	0.00		1 kg	
Materiaaliluokka	Materiaali	Määrä (kg)	Määrä(%)	kgCO2e
-	Apumateriaali	-	#VALUE!	0,00
Materiaalin kuljetus / Ajo				
Kuljetustapa	kgCO2e	tkm/yksikkö	Yksikkö	
Laivarahti	0,042		1 tkm	
Merirahti	0,116		1 tkm	
Paku	0,328		1 tkm	
Materiaali	Kuljetustapa	Kuljetusmatka (km)	Kuljetusmatka (tkm)	kgCO2e
Tulostusjauhe (Tuore)	Laivarahti	1500	0,47	0,020
Tulostusjauhe (Tuore)	Merirahti	500	0,16	0,018
Apumateriaali	Paku	50	0,00	0,000
Total				0,038
Valmistusprosessi / Ajo				
Energiamuoto	kgCO2e	kWh/yksikkö	Yksikkö	
Sähkö (vattakunnallinen KA)	0,089		1 kWh	
Valmistusprosessin vaihe	Aika(hh.mm.ss)	Aika (Laskentamuoto)	Energiankulutus (kWh)	kgCO2e
Valmistus (Factor 4)	20.54.00	20,90	5,225	0,4650
Jätkikäsittely ja tarkastus	0.15.00	0,25	0,000	0,0000
Total			5,225	0,4650
Jätteenkäsittely / ajo				
Jäte	kgCO2e	kg/yksikkö	Yksikkö	
Keräysmuovi	0,369		1 kg	
Jäte/hukka	Hukan määrä (%)	Hukan määrä (kg)	kgCO2e	
Tukimateriaali (Jätkikäsittely)	21,32 %	0,07	0,0248337	
Total			0,0248337	

Liite 6. DfMA:n avulla uudelleen suunnitellun osan hiilijalanjälkilaskuri (MEX)

Laitteiden sähkönkulutus				
Laitte	Sähkönkulutus (KA)	Yksikkö		
Factor 4	250 W			
Materiaalin valmistus / ajo				
Materiaali	kgCO2e	kg/yksikkö	yksikkö	
Tulostusmateriaali	8,24	1 kg		
Tukimateriaali	4,2	1 kg		
Materiaaliluokka	Materiaali	Määrä (kg)	Määrä(%)	kgCO2e
Muovi	Tulostusmateriaali	0,47	82,57 %	3,87
Muovi	Tukimateriaali	0,10	17,43 %	0,42
Total		0,57		4,29
Apumateriaalin valmistus / Ajo				
Materiaali	kgCO2e	kg/yksikkö	yksikkö	
-	0.00	1 kg		
Materiaaliluokka	Materiaali	Määrä (kg)	Määrä(%)	kgCO2e
-	Apumateriaali	-	#VALUE!	0,00
Materiaalin kuljetus / Ajo				
Kuljetustapa	kgCO2e	tkm/yksikkö	Yksikkö	
Laivarahti	0,042	1 tkm		
Merirahti	0,116	1 tkm		
Paku	0,328	1 tkm		
Materiaali	Kuljetustapa	Kuljetusmatka (km)	Kuljetusmatka (tkm)	kgCO2e
Tulostusjauhe (Tuore)	Laivarahti	1500	0,85	0,036
Tulostusjauhe (Tuore)	Merirahti	500	0,28	0,033
Apumateriaali	Paku	50	0,00	0,000
Total				0,069
Valmistusprosessi / Ajo				
Energiamuoto	kgCO2e	kWh/yksikkö	Yksikkö	
Sähkö (valtakunnallinen KA)	0,089	1 kWh		
Valmistusprosessin vaihe	Aika(hh.mm.ss)	Aika (Laskentamuoto)	Energiankulutus (kWh)	kgCO2e
Valmistus (Factor 4)	33.51.00	33,85	8,463	0,7532
Jälkikäsittely ja tarkastus	0.15.00	0,25	0,000	0,0000
Total			8,463	0,7532
Jätteenkäsittely / ajo				
Jäte	kgCO2e	kg/yksikkö	Yksikkö	
Keräysmuovi	0,369	1 kg		
Jäte/hukka	Hukan määrä (%)	Hukan määrä (kg)	kgCO2e	
Tukimateriaali (Jälkikäsittely)	17,43 %	0,10	0,0366048	
Total			0,0366048	