Tampereen yliopisto

Ossi Mäntyniemi

AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS OSANA KESTÄVÄÄ VALMISTUSTA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tammikuu 2025

TIIVISTELMÄ

Ossi Mäntyniemi: Ainetta lisäävä valmistus osana kestävää valmistusta
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaattiohjelma
Tammikuu 2025

Ainetta lisäävä valmistus (engl. additive manufacturing, AM) mahdollistaa monimutkaisten geometrioiden valmistamisen tehokkaasti ja pienemmällä materiaalihukalla. Tämän työn tarkoitus on tutkia ainetta lisäävän valmistuksen ekologista kestävyyttä. Lisäksi tutkitaan sitä, miten se edistää kestävän valmistuksen sekä kiertotalouden periaatteita. Työssä tutkitaan ainetta lisäävää valmistusta ja kestävää tuotantoa ja sitä, miten ne yhdistyvät toisiinsa. Tämän työn tutkimuskysymykset ovat seuraavat: ”Miten AM-menetelmät edistävät kestävää valmistusta?”, ”Miten AM edistää kiertotalouden periaatteita?” ja ”Miten AM-menetelmien ekologista kestävyyttä voidaan kehittää”?

Menetelmänä työssä on käytetty kuvailevaa kirjallisuuskatsausta. Aineistohaku suoritettiin pääosin Andor-, Google Scholar - sekä Scopus-palveluilla. Aineistoina on käytetty vuodesta 2016 eteenpäin julkaistuja lähteitä. Suurin osa lähteistä on julkaistu vuodesta 2020 eteenpäin.

AM:n ekologiset vaikutukset voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: hukkamateriaalin määrä, energiankulutus ja ilmansaasteet. Näistä vaikutuksista AM on parempi vaihtoehto kuin perinteiset valmistusmenetelmät, kuten sorvaus, hukkamateriaalin määrällä ja energiankulutuksella mitattuna. AM:n energiatehokkuus kuitenkin heikkenee tuotantomäärien kasvaessa ja riittävän suurilla määrillä perinteiset menetelmät voittavat sen. Kiertotalouden periaatteet voidaan jakaa kolmeen osaan tuotteen elinkaaren perusteella: suunnittelu-, käyttö- ja loppuvaihe. Ainetta lisäävä valmistus mahdollistaa kiertotalouden edistämisen näissä vaiheissa. Tärkeimmät keinot siihen ovat valmistusmenetelmän mukautettavuus sekä kierrätettyjen materiaalien käyttö. AM:n ekologisuudessa on vielä kehittämisen varaa. Ekologisuutta voidaan kehittää lisäämällä kierrätettyjen materiaalien käyttöä, tehostamalla kierrätysprosesseja sekä optimoimalla varsinaista tulostusprosessia.

Kestävyyden ja ekologisuuden tarkastelu osoittautui vaikeaksi. Tässä tutkimuksessa saatiin jonkinlainen yleiskuva aikaiseksi, mutta tuloksia on vaikea yleistää kaikkiin AM-menetelmiin ja materiaaleihin. Ekologisuuden kannalta valmistusmenetelmä tulee aina valita sovelluskohteen ja materiaalin perusteella, jos haluaa päästä parhaisiin tuloksiin.

Ainetta lisäävästä valmistuksesta löytyi paljon aineistoja ja tutkimuksia. Isossa osassa näitä aineistoja muodostui ongelmaksi se, että AM:n ekologisuutta pidetään itsestäänselvyytenä, eikä siihen syvennytä enempää. AM:n ekologisuutta tulisi siis tutkia lisää. Erityisesti AM-menetelmien ja perinteisten valmistusmenetelmien ekologisuuden vertautuvuudesta pitäisi saada lisää tietoa.

Avainsanat: Ainetta lisäävä valmistus, Kestävä valmistus, 3D-tulostus, Kiertotalous

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

☒ Ei
☐ Kyllä

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS 3
3. KESTÄVÄ VALMISTUS 5
4. AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS KESTÄVÄSSÄ TUOTANNOSSA 9
4.1 Ainetta lisäävän valmistuksen ekologiset vaikutukset 9
4.2 Ainetta lisäävän valmistuksen ekologisen kestävyyden kehittäminen .. 11
5. POHDINTA 14
6. YHTEENVETO 17
LÄHTEET 19

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AM	engl. Additive Manufacturing, ainetta lisäävä valmistus
SLA	engl. Stereolithography, stereolitografia
FDM	engl. Fused Deposition Modeling, pursotusmenetelmä
SLS	engl. Selective Laser Sintering, lasersintraus
I4.0	engl. Industry 4.0, neljäs teollinen vallankumous
LCA	engl. Life-cycle assesment, elinkaariarviointi
10R	engl. 10 R Strategies for Circular Economy, 10R-viitekehys
PET	polyetyleenitereftalaatti
HDPE	korkeatiheyksinen polyeteeni
PP	polypropeeni
PLA	polylaktidi
ABS	akryylibutadieenistyreeni
LDPE	matalatiheyksinen polyeteeni
PS	polystyreeni

1. JOHDANTO

Ainetta lisäävä valmistus on ollut suuressa nousussa viime vuosikymmenen ajan. Nämä valmistusmenetelmät pystyvät vastamaan moniin perinteisten valmistuskeinojen haasteisiin. Se vähentää hukkamateriaalia, yksinkertaistaa valmistusprosessia ja sillä on mahdollista luoda monimutkaisia sekä tarkkoja geometrioita. Se on digitaalisen valmistuksen menetelmä, jossa osat valmistetaan 3D-mallin pohjalta. (Attaran 2017) Ainetta lisäävä valmistus tunnetaan myös nimellä 3D-tulostus sekä englannin kielestä tulevalla lyhenteellä AM (engl. Additive Manufacturing). Tässä työssä näitä termejä käytetään synonyymeinä ja ne tarkoittavat kaikki samaa asiaa.

Kestävä valmistus on tärkeä osa tulevaisuuden teollisuutta. Kestävän valmistuksen tarkoituksena on tehdä sekä valmistusprosesseista, että valmistetuista tuotteista ekologisesti kestävämpiä. Työn tarkoituksena on selvittää, millä tavalla AM-menetelmiä voidaan hyödyntää kestävän valmistuksen sekä kiertotalouden edistämisessä. Tavoitteena on myös pohtia, miten AM-menetelmien kestävyyttä voitaisiin parantaa. Työn tutkimuskysymykset ovatkin siis seuraavat:

K1. Miten AM-menetelmät edistävät kestävää valmistusta?

K2. Miten AM edistää kiertotalouden periaatteita?

K3. Miten AM-menetelmien ekologista kestävyyttä voidaan kehittää?

Työn tutkimusmenetelmänä on kuvaileva kirjallisuuskatsaus. Kuvaileva kirjallisuuskatsaus on yleiskatsaus aiheeseen, jossa aineistovalintoja eivät rajaa metodiset säännöt. Aihetta kuitenkin pyritään kuvaamaan laaja-alaisesti. (Salminen 2023) Tutkimusaineisto on haettu pääasiallisesti Andor-palvelusta. Tutkimusaineistona on käytetty vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleita sekä kansainvälisiä standardeja. Aineistoja on haettu vuosilta 2020–2024, mutta osa aineistoista on saatu löydettyjen aineistojen lähteistä ja ovat näin ollen vanhempia. Hakuja on tehty myös Google Scholarista sekä Scopuksesta. Tässä työssä ainetta lisäävä valmistusta ei ole rajattu eri menetelmien tai materiaalien mukaan, vaan työssä on yritetty selvittää yleiskuvaa AM-menetelmistä.

Työn seuraavassa luvussa esitellään ainetta lisäävä valmistusta, siinä käytettäviä materiaaleja ja sen sovelluskohteita. Työn kolmannessa luvussa esitellään kestävän valmistuksen käsitettä, sen tavoitteita sekä haasteita. Lisäksi esitellään kiertotaloutta ja sen

periaatteita, sekä niiden osuus kestävässä valmistuksessa. Kestävää valmistusta käsitellään erityisesti valmistavan teollisuuden näkökulmasta.

Työn neljännessä luvussa käsitellään ja yhdistetään kahden edellisen luvun aiheet. Luvussa pohditaan, miten AM-menetelmillä voidaan edistää kestävän valmistuksen tavoitteita. Lisäksi luvussa esitellään keinoja, joilla AM-menetelmiä voidaan tehostaa kestävän valmistuksen näkökulmasta. Luvussa käsitellään myös, miten kiertotalouden keinoja voidaan käyttää edistämään edellä mainittuja tavoitteita.

Työn viidennessä luvussa kootaan yhteen edellisten lukujen tuloksia. Tavoitteena on kerätä yhteen ja pohtia löydettyjä keinoja edistää kestävää valmistusta AM-menetelmillä. Näihin kuuluu sekä keinot, joilla AM-menetelmät edistävät kestävää valmistusta, että keinot, joilla AM-menetelmiä voidaan tehostaa kestävän valmistuksen näkökulmasta. Luvussa pyritään yhdistelemään työssä käsiteltyjä eri osa-alueita ja tekemään johtopäätöksiä näistä. Tavoitteena on myös selvittää minkä osa-alueiden tutkimuksissa on aukkoja ja mitä osa-alueita olisi kannattavaa tutkia jatkossa enemmän. Viimeisenä lukuna työssä on yhteenveto, jossa kerrataan työn vaiheet, saadut tulokset sekä näistä tehdyt johtopäätökset.

2. AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS

Ainetta lisäävä valmistus on digitaalisen valmistuksen menetelmä, jonka avulla voidaan tuottaa monipuolisia muotoja ja kokoonpanoja digitaalisen 3D-mallin pohjalta. Siinä tuote valmistetaan lisäämällä materiaalikerroksia päällekkäin, muodostaen näin kolmiulotteisen kappaleen. AM-menetelmät ovat kuitenkin vain kattotermi lukuisille erilaisille valmistustavoille. (Praveena et al. 2022)

Perinteisillä ainetta poistavilla menetelmillä, kuten sorvaamalla tai jyrsimällä kappale valmistetaan poistamalla materiaalia suuremmasta aihiosta. Tällaisesta työstöstä syntyy paljon hukkamateriaalia. Sitä vastoin AM-menetelmät käyttävät vain kappaleeseen tarvittavan materiaalin, eikä hukkamateriaalia aina synny. Jos kuitenkin kappaleessa on ulkonevia osia, tarvitaan niiden valmistukseen tukirakenteita. Näitä tukirakenteita voidaan pitää hukkamateriaalina. (Prashar et al. 2023)

Ainetta lisäävillä menetelmillä on mahdollista työstää monipuolisesti erilaisia materiaaleja. Näihin kuuluu erilaiset polymeerit, metallit, keraamit sekä komposiitit. Kaikkia materiaaleja ei voida kuitenkaan työstä samoilla menetelmillä. Valmistuslaitteet ovat yleensä suunniteltu vain yhden luokan materiaaleille. Yksittäisellä laiteella voidaan usein työstää esimerkiksi erilaisia polymeerejä, mutta silloin se ei sovellu metalleille. (Kumar & Sathiya 2021)

AM-menetelmiä voidaan luokitella lähtöaineen muodon mukaan. Nestemäisiä lähtöaineita käytetään photopolymerisaatiossa (SLA) ja materiaalina käytetään erilaisia hartseja. SLA:ssa nestemäinen hartsi kovetetaan UV-valon avulla tarvittavaan muotoon. Filamenttimuotoista lähtöainetta käytetään materiaaliekstruusiossa (FDM). FDM:n kanssa käytetään kestomuoveja eli termoplastisia polymeereja sekä keraameja. Termoplastinen polymeerifilamentti pehmitetään nostamalla lämpötilaa ja pursotetaan suuttimen läpi tarvittavaan muotoon. Jauhemenetelmissä (esim. SLS) lähtöaine on jauhemuodossa, joka kovetetaan haluttuun muotoon laserin tai elektronisuihkun avulla. Jauhemenetelmiä on metalleille, polymeereille sekä keraameille. (Kumar & Sathiya 2021)

Ainetta lisäävälle valmistukselle on useita teollisia sovelluskohteita. Prasharin et al. (2023) kirjallisuuskatsaus kertoo ainetta lisäävää valmistusta käytettävän muun muassa seuraavilla aloilla: lääketieteelliset implantit, ilmailutekniikka, ajoneuvotekniikka ja rakennustekniikka. Ilmailutekniikan alalla AM-menetelmiä käytetään moottorin osiin, varaosiin sekä kunnostukseen ja huoltoon. AM mahdollistaa näiden osien valmistamisen kevyem-

pinä sekä pienemmillä elinkaaren kustannuksilla perinteisiin menetelmiin verrattuna. Ajoneuvotekniikassa AM-menetelmiä on pitkään käytetty prototypointiin. 3D-tulostusta hyödynnetään suunnittelun iteroinnissa sekä mukautettujen työstöosien valmistuksessa. Rakennustekniikassa ainetta lisäävää valmistusta käytetään pääosin suunnittelussa, mutta myös joskus rakentamisessa. Edellä mainituilla aloilla on huomattu monia etuja ainetta lisäävän valmistuksen käytöstä. Verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin AM mahdollistaa monimutkaisempia rakenteita ja geometrioita, tehostaa tuotantoa sekä tukee paremmin mukautettuja rakenteita. (Prashar et al. 2023)

AM-menetelmillä on paljon etuja verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin, mutta on tärkeää tarkastella niiden haittoja ja haasteita. Osa AM:n haasteista on teknisiä. Toistaiseksi AM ei sovellu kaikille materiaaleilla ja tulevaisuudessa onkin tärkeää kehittää AM:n materiaaleja sekä erilaisia hybridimenetelmiä. Hybridimenetelmillä tarkoitetaan prosesseja, joissa yhdistetään perinteisiä valmistusmenetelmiä ainetta lisäävän valmistuksen kanssa. AM on usein kalliimpaa ja menetelmät eivät ole yhtä vakaita eikä niiden jälki ole yhtä hyvää. Vaikka AM:lla kappale valmistuukin yhdellä valmistusvaiheella, kappaleet vaativat usein jälkikäsittelyä. Hinnan puolesta AM on kallista erityisesti suurtuotannolla. Toistaiseksi ongelmana on myös osaavan henkilöstön puute. Tämä tarve koskee sekä suunnittelu- että valmistusvaihetta. (Prashar et al. 2023)

3. KESTÄVÄ VALMISTUS

Teollinen tuotanto ja tuotteiden valmistus kuluttavat luonnonvaroja. Kestävän valmistuksen tarkoitus on tehostaa luonnonvarojen käyttöä, sekä rajoittaa näiden resurssien ylikulutusta. Kestävä valmistus tarkoittaa kokoelmaa keinoja, joilla voidaan vähentää haitallisia ympäristövaikutuksia, säästää energiaa ja luonnonvaroja sekä edistää sidosryhmien hyvinvointia ja turvallisuutta. Kestävän valmistuksen käsite kattaa koko tuotteen elinkaaren suunnittelusta poistoon. Jotta kestävä valmistus on toimivaa, täytyy sen myös olla taloudellisesti kannattavaa. (Ching et al. 2022) Kestävän valmistuksen yhteydessä puhutaan usein myös I4.0:sta (engl. Industry 4.0) eli neljännestä teollisesta vallankumouksesta. I4.0 teknologiat tarjoavat digitaalisia ratkaisuja valmistuksen automatisointiin. Näitä teknologioita voidaan käyttää jakamaan dataa toimittajien välillä, automatisoimaan tärkeitä toimenpiteitä valmistuksessa ja keräämään reaaliaikaista dataa sekä näin lisäämään näkyvyyttä ja minimoimaan riskejä. AM-menetelmät ovat yksi esimerkki I4.0 teknologioista. (Bag et al. 2021)

Velevan ja Ellenbeckerin (2001) mukaan kestävä valmistus voidaan jakaa kuuteen pääosa-alueeseen: energian ja materiaalien käyttö, ympäristö, oikeudenmukaisuus ja yhteisön kehittäminen, taloudellinen kannattavuus, työntekijät sekä tuotteet. Kestävyyden parantamiseksi on tärkeää edistää kaikkia näitä osa-alueita, eikä kehittää vain yhtä muiden kustannuksella. Samassa tutkimuksessa kehitetään 22 mittaria, joiden avulla kestävää valmistusta on mahdollista vertailla eri tahojen välillä. Kyseiset mittarit kuvaavat yleisiä tuotantolaitosten ongelmia kuten kemikaalipäästöjä, energian käyttöä, veden kulutusta sekä jätteen määrää. Nämä mittarit ovat kvantitatiivisia ja siksi ne helpottavat kestävyyden vertailua. Kuitenkin niiden soveltuvuutta eri menetelmiin on tärkeä pohtia tilanteen mukaan. (Veleva & Ellenbecker 2001)

Tuotteen tai prosessin kestävyyttä ja ekologisia vaikutuksia voidaan tutkia elinkaariarvion (engl. Life Cycle Assessment, LCA) avulla. Standardissa (SFS 14044 2006) määritelty LCA arvioi tuotteen tai prosessin ympäristövaikutuksia koko sen elinkaaren ajalta raaka-aineen hankinnasta jätteiden loppusijoitukseen. Elinkaariarvion vaiheet on määritelty ja ne ovat seuraavat: tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, inventaarioanalyysi, vaikutusarviointi ja tulosten tulkinta. (SFS 14044 2006)

Velevan ja Ellenbeckerin (2001) artikkelissa määritellään myös kestävän valmistuksen periaatteet:

1. Tuotteet ja pakkaukset tulee suunnitella turvallisiksi ja ekologisesti kestäviksi läpi niiden elinkaaren.
2. Jätettä ja ekologisesti yhteensopimattomia sivutuotteita tulee vähentää sekä kierrättää.
3. Energiaa ja materiaaleja tulee säästää, ja energiamuotojen sekä materiaalien tulee sopia tavoitteeseen.
4. Työkäytäntöjä, teknologioita ja kemikaaleja, jotka haittaavat ihmisten tai ympäristön terveyttä tulee vähentää.
5. Työpaikat tulee suunnitella vähentämään fyysisiä, kemikaalisia, biologisia ja ergonomisia haittoja.
6. Johdon tulee olla sitoutunut jatkuvaan ja avoimeen arviointiin ja kehitykseen.
7. Työn tulee kehittää työntekijöiden tehokkuutta ja luovuutta.
8. Työntekijöiden turvallisuus ja hyvinvointi ovat prioriteetti, kuin myös heidän osaamisensa kehittyminen.
9. Työpaikkojen yhteisöjen tulee kehittyä taloudellisesti, sosiaalisesti, kulttuurillisesti sekä fyysisesti; tasa-arvoa ja oikeudenmukaisuutta tulee edistää.

Näitä periaatteita seuraamalla on mahdollista edistää kestävää valmistusta, ja ne pitkälti edistävät myös yritysten omia tavoitteita. (Veleva & Ellenbecker 2001) Kestävän valmistuksen periaatteiden omaksuminen ei kuitenkaan ole täysin suoraviivaista. Erityisesti pienet ja keskisuuret yritykset kohtaavat tässä paljon haasteita. Näitä haasteita ovat esimerkiksi rahoituksen puute, suuret alkuinvestoinnit, kuluttajien tiedon puute, kestävyydessä koulutetun työvoiman puute sekä huono yhteistyö ja viestintä eri toimijoiden välillä. (Kumar et al. 2020) Zwiech (2023) kuitenkin huomauttaa artikkelissaan, että nämä edellä määritellyt periaatteet käsittelevät lineaaritaloutta eivätkä ota huomioon kiertotalouden periaatteita.

Yksi tapa edistää kestävää valmistusta on omaksua kiertotalouden ja kiertotuotannon periaatteita. Kiertotalous on talousjärjestelmä, jossa materiaalit ja tuotteet pyritään pitämään jatkuvassa kierrossa säilyttäen niiden arvon. (Sauerwein et al. 2019) Kiertotalouden määritelmä ei kuitenkaan ole aivan yksiselitteinen. Kirchherrin et al. (2017) artikkeli tutkii ja analysoi kiertotalouden eri määritelmiä kirjallisuudessa. Tutkimus varoittaa asian käsittelyn vaikeudesta, jos kaikilla on eri määritelmä termille. Tutkijoilla on eri näkemyksiä siitä, mitä kaikkea kiertotalous pitää sisällään. (Kirchherr et al. 2017)

Kiertotalouden astetta on mahdollista arvioida. Yksinkertaistettuna korkeampi kiertotalouden aste tarkoittaa, että luonnonvarojen kulutus ja ympäristölle aiheutuva haitta ovat pienempiä. Tällä arviointitavalla voidaan vertailla sekä kiertotalouden periaatteita, että käytännön toimenpiteitä keskenään. (Psihoyos et al. 2022; Potting et al. 2017)

Kiertotaloutta voidaan edistää toteuttamalla 10R-periaatteita. Nämä periaatteet ovat seuraavat.

1. Kieltäytyminen (engl. refuse).
2. Uudelleenajattelu (engl. rethink)
3. Vähentäminen (engl. reduce)
4. Uudelleen käyttö (engl. reuse)
5. Korjaaminen (engl. repair)
6. Kunnostaminen (engl. refurbish)
7. Uudelleenvalmistaminen (engl. remanufacture)
8. Käyttötarkoituksen muuttaminen (engl. repurpose)
9. Kierrättäminen (engl. recycle)
10. Jätteiden hyödyntäminen (engl. recover) (Bag et al. 2021)

Periaatteet 1–3 liittyvät tuotteen suunnitteluun ja valmistukseen. Kieltäytyminen tarkoittaa, että turhat tuotteet poistetaan käytöstä tai niiden tarkoitus korvataan, jollain erilaisella tuotteella. Uudelleenajattelu tarkoittaa, että tuotteen suunnittelua ja käyttötapoja tulee uudelleenarvioida ja etsiä keinoja, joilla näitä voitaisiin tehostaa. Vähentäminen tarkoittaa tuotteen valmistuksen tehostamista. Tämä voi tapahtua vähentämällä energian kulutusta ja valmistukseen tarvittavaa raakamateriaalia. (Kirchherr et al. 2017)

Periaatteet 4–8 liittyvät tuotteen ja sen osien elinkaaren pidentämiseen. Uudelleenkäyttö tarkoittaa sitä, että muiden hylkäämiä tuotteita tulee käyttää uudelleen, jos ne ovat hyväkuntoisia ja täyttävät niiden alkuperäisen tarkoituksen. Korjaaminen tarkoittaa tuotteen korjausta ja huoltoa sen elinkaari pidentämiseksi ja sitä voidaan käyttää sen alkuperäisessä käyttötarkoituksessa. Kunnostaminen tarkoittaa vanhan tuotteen ajantasaistamista ja päivittämistä. Uudelleenvalmistaminen tarkoittaa hylätyn tuotteen osien käyttämistä alkuperäisessä käyttötarkoituksessa uuden tuotteen valmistamisessa. Käyttötarkoituksen muuttaminen tarkoittaa hylätyn tuotteen osien käyttöä uudessa käyttötarkoituksessa uuden tuotteen valmistamisessa. (Kirchherr et al. 2017)

Periaatteet 9 ja 10 liittyvät tuotteen elinkaaren loppuun ja hylättyjen tuotteiden materiaalien hyödyntämiseen. Kierrättäminen tarkoittaa hylätyn tuotteen materiaalin uusiokäyttöä. Tuotteen materiaali on mahdollista prosessoida ja siitä voidaan saada uutta materiaalia, joka on samanlaatuista tai heikomman laatuista kuin alkuperäinen materiaali. Jätteiden hyödyntäminen tarkoittaa energian talteenottoa, kun tuotetta ei voida enää käyttää, korjata tai kierrättää. Energiaa voidaan saada talteen esimerkiksi polttamalla materiaali. (Kirchherr et al. 2017)

Edellä mainitut periaatteet kattavat koko tuotteen elinkaaren. Niiden tarkoitus on minimoida ja tehostaa energian ja luonnonvarojen käyttöä koko elinkaaren osalta. 10R ovat työkaluja, joita voidaan käyttää siirryttäessä lineaarisesta talousmallista kiertotalouden malleihin.

4. AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS KESTÄVÄSSÄ TUOTANNOSSA

AM-menetelmien ekologisen kestävyyden tutkiminen on hyvin ajankohtaista. Agnusdein ja Del Preten (2022) mukaan vuodesta 2000 eteenpäin aiheesta tehtyjen tutkimusten määrä on kasvanut lähes eksponentiaalisesti vuosi vuodelta. Tämä osoittaa, että aihetta pidetään tärkeänä ja siihen pyritään panostamaan.

AM-menetelmillä valmistetun tuotteen elinkaari voidaan jakaa karkeasti seuraaviin vaiheisiin. Ensimmäinen vaihe on alkuperäisen materiaalin valmistus, joka voi olla esimerkiksi metallien jalostus malmista. Seuraavana vaiheena on tämän materiaalin muuttaminen AM-menetelmien käyttämäksi materiaaliksi, joka voi olla esimerkiksi metallien työstäminen jauheeksi. Kolmas vaihe on varsinainen valmistus, jossa tuote muutetaan materiaalista tuotteeksi. Monissa 3D-tulostetuissa tuotteissa tarvitaan myös tuotteen jälkikäsittelyä, kuten pinnan hiomista. Tämän jälkeinen vaihe on tuotteen käyttö. Elinkaaren lopussa tuote voidaan 10R:n mukaisesti uudelleenkäyttää, kierrättää, kunnostaa tai materiaalia voidaan käyttää uudelleenvalmistuksessa. Jokainen näistä vaiheista kuluttaa resursseja, kuten raakamateriaaleja ja energiaa (Kokare et al. 2023)

Fordin ja Despeissen (2016) tutkimuksessa on koottu eri yritysten tunnistamia AM:n tuomia kestävyyden edistyksiä eri elinkaaren vaiheissa. Eri yrityksissä kestävyyden parantumista tunnistettiin ainakin tuotteen suunnittelussa, raaka-aineiden prosessoinnissa, valmistuksessa, käytössä, huollossa ja kierrätyksessä. Suurin osa hyödyistä huomattiin valmistuksessa. Tärkeimpinä etuina tuotteen valmistuksessa huomattiin pienentynyt energiankulutus, vähentynyt jätteen määrä, parannettu resurssitehokkuus sekä vähentynyt materiaalin käyttö. (Ford & Despeisse 2016 s. 1577)

4.1 Ainetta lisäävän valmistuksen ekologiset vaikutukset

Khosravanin ja Reinicken (2020) mukaan AM-menetelmien ekologisia vaikutuksia ovat hukkamateriaali, energiankulutus sekä ilmansaasteet. Suurilla tuotantomäärillä AM-menetelmät kuluttavat enemmän energiaa, kuin ruiskuvalu, materiaalimäärää kohden. 3D-tulostus on kuitenkin tehokkaampaa prototypointiin tai mallikappaleiden valmistukseen. Tuloksista huomataan myös, että erityisesti SLA:n ja FDM:n kanssa uudemmat laitteet ovat merkittävästi energiatehokkaampia kuin vanhat laitteet. 3D-tulostuksen jätteenhallinta voidaan jakaa kahteen osaan: kierrätettyjen materiaalien käyttöön 3D-tulostuksessa

ja valmistuksessa muodostuneen hukkamateriaalin kierrätykseen. AM-menetelmien vaikutusta ilmansaasteisiin on vaikea mitoittaa. Tilanteen mukaan AM voi tuottaa enemmän tai vähemmän ilmansaasteita perinteisiin valmistusmenetelmiin riippuen. (Khosravani & Reinicke 2020)

Yleisesti AM-menetelmiä pidetään ekologisesti kestävämpinä kuin perinteisiä valmistusmenetelmiä. Tämä pohjautuu erityisesti niiden materiaalitehokkuuteen. AM-menetelmiä ei voida kuitenkaan yksiselitteisesti pitää parempina ekologisuuden kannalta, sillä on tilanteita, joissa perinteiset menetelmät ovat tehokkaampia. Esimerkiksi suurilla tuotantomäärillä AM-menetelmät kuluttavat enemmän energiaa ja ovat yleensä hitaampia, kuin perinteiset menetelmät. Menetelmien kestävyys riippuukin siis useasta tekijästä, kuten osien geometriasta, käytetystä materiaalista, tuotannon asteesta sekä valmistuserän koosta. (Kokare et al. 2023)

Perinteisiin valmistustekniikoihin verrattuna, AM-menetelmät tuottavat vähemmän hukkamateriaalia. Tämä on mahdollista, koska AM-menetelmissä jokaiseen valmistuskerrokseen käytetään vain tarvittava materiaali. Prosessissa tarvitaan kuitenkin valmistuksen aikaisia tukirakenteita, joiden materiaali lasketaan hukkamateriaaliksi. Eri materiaaleille on mahdollista määrittää materiaalin anti, joka on lopputuotteen materiaali jaettuna käytetyttä materiaalilla. PET:lle (polyetyleenitereftalaatti) se on 84,7 %, HDPE:lle (korkeatiheyksen polyeteeni) se on 84,1 % ja PP:lle (polypropeeni) se on 87,5 %. Ainetta poistavilla menetelmillä tämä aste on usein paljon pienempi. (Roxanne et al. 2019, Wu et al. 2022, s. 6 mukaan)

Wun et al. (2022, s. 6) mukaan AM-menetelmien energiankulutukselle ei ole mahdollista saada yksiselitteistä tulosta, sillä se riippuu materiaaleista, laitteista, menetelmistä sekä valmistusmääristä. Kuitenkin ruiskupuristukseen verrattuna AM-menetelmillä on suurempi energiankulutus lähes kaikilla menetelmillä sekä polymeerimateriaaleilla. AM-menetelmät eivät ole tehokkain tapa vähentää energiankulutusta. (Wu et al. 2022) Roxannen et al. (2019) mukaan käyttämällä kierrätettyä muovia, tilanne voidaan kääntää. Kierrätetyllä muovilla koko elinkaaren aikana voidaan säästää jopa 88 % energiasta. (Katso Wu et al. 2022).

Suuri määrä teollisuuden laitteista ja komponenteista joudutaan jatkuvasti vaihtamaan kulumisen, vahingoittumisen ja hajoamisen seurauksina. Kiertotalouden periaatteiden mukaisesti näitä elinkaaren päätöksissä olevia osia pitäisi yrittää kunnostaa, korjata tai uudelleen valmistaa. AM tarjoaa tähän hyviä mahdollisuuksia. Varaosia ja korjauksia on mahdollistaa toteuttaa tarpeen mukaan erilaisille tuotteille ja erilaisille vahingoille. Lisää-

vään valmistukseen pohjautuvaa uudelleenvalmistusta käytetään esimerkiksi lento-, ajoneuvo- sekä meriteollisuudessa. Käytettyjä sovelluskohteita on muun muassa vahingoittuneiden turbiinien terien, kampiakselien sekä hammasrattaiden korjaaminen. (Kanishka & Acherjee 2023) Korjaamisen lisäksi tuotteelle on mahdollista antaa uusia toiminnallisuuksia sitä korjatessa. Joustavat korjausmahdollisuudet voivat antaa lisäarvoa tuotteelle ja pidentää sen elinikää. (Sauerwein et al. 2019)

Ainetta lisäävä valmistus edistää kiertotaloutta myös sen mukautettavuuden avulla. Tämä liittyy erityisesti tuotteen suunnitteluvaiheeseen. Tuote on mahdollista suunnitella mukautettavaksi, jolloin se voidaan valmistaa juuri sopivaksi asiakkaalle. Kun tuote on sopivampi, käytetään sitä todennäköisemmin myös pidempään eli sen käyttöikä pitenee. (Sauerwein et al. 2019)

4.2 Ainetta lisäävän valmistuksen ekologisen kestävyyden kehittäminen

Yksi tapa hyödyntää ainetta lisäävää valmistusta kiertotalouden periaatteiden täyttämiseksi on polymeerijätteen kierrätys ja uudelleenkäyttö. Kierrätettyjä polymeerejä käytetään AM-menetelmissä ja niitä hyödynnetään erityisesti materiaalia pursottavissa menetelmissä, joihin esimerkiksi FDM kuuluu. Mahdollisia hyödynnettäviä materiaaleja ovat polylaktidi (PLA), akryylibutadieenistyreeni (ABS), polypropeeni (PP), polyetyleenitereftalaatti (PET), polyeteenit (HDPE ja LDPE), polystyreenit (PS), nylon-6 sekä polyamidi-12. (Al Rashid & Koç 2023)

Isoimpana haasteena kierrätetyn muovin käytössä pidetään materiaalin mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä (Al Rashid & Koç 2023). Sanchez et al. (2017) tutki polymeerien mekaanisten ominaisuuksien muutosta eri kierrätyskierroksilla. Tutkimus tehtiin FDM-tulostimella käyttäen PLA:ta materiaalina. Tutkimuksessa käytettiin PLA:ta, koska samaa materiaalia on mahdollista käyttää esimerkiksi ruiskuvalussa ja näin ollen sen käyttöä ja ominaisuuksia on helppo verrata. Tuloksista nähtiin materiaalin kimmokertoimen eli materiaalin jäykkyyden pysyvän vakiona, tai jopa vähän kasvavan, kierrätyskierrosten lisääntyessä. Tämä saattaa johtua materiaalin viskositeetin pienenemisestä, joka voi aiheuttaa materiaalin sisäisten virheiden vähentymistä. Kuitenkin materiaalin myötölujuus, murtolujuus ja venymä pienenivät. (Sanchez et al. 2017) Käytännössä siis AM-menetelmissä polymeerien mekaaniset ominaisuudet heikkenevät, kun niitä kierrätetään.

Diegon et al. (2022) tutkimuksessa tarkasteltiin kierrätettyjen polymeerien rakenteellisia ominaisuuksia. Materiaalina tutkimuksessa käytettiin Polyamidi 6.6:sta. Tulokset olivat

samankaltaisia kuin Sanchezin et al. (2017) tutkimuksessa saadut. Kun materiaalia kierrätettiin useamman kerran sen murtolujuus ja venymä pienentyivät. Murtolujuus heikentyi lähes lineaarisesti kierrätyskierrosten lisääntyessä. Toisin kuin Sanchezin et al. (2017) tutkimuksessa, myös kimmokerroin pienentyi. (Diego et al. 2022)

Yksi tapa vähentää AM-menetelmien ekologista kuormitusta on optimoida valmistettavien kappaleiden orientaatiota. Melen ja Campanan (2020) tutkimuksessa algoritmien avulla pyrittiin optimoimaan kappaleiden tulostusasentoa ekologisten mittareiden perusteella. Uudelleen orientoitujen ja tulostettujen kappaleiden hintaa verrattiin alkuperäisessä asennossa tulostettujen kappaleiden hintaan. Koe suoritettiin SLA-, FDM-, sekä Polyjet-menetelmille. SLA- sekä Polyjet-menetelmillä optimoinnilla saavutettiin merkittäviä vähennyksiä kappaleen hintaan. Myös FDM:llä optimointi vähensi kappaleen hintaa, mutta vain vähäisesti. Kappaleen asennon optimointi tehosti kaikissa tapauksissa valmistusaikaa. Kappaleen hinnan vähennys sekä valmistusajan lyheneminen parantavat molemmat ekologista sekä taloudellista kestävyyttä. (Mele & Campana 2020)

Vidakiksen et al. (2023) tekemässä tutkimuksessa tutkittiin eri tulostusparametrien vaikutusta FDM:n energiankulutukseen. Tutkimuksen kuusi tutkittavaa parametria olivat täyttötiheys (engl. infill density), syöttämiskulma (engl. raster deposition angle), suuttimen lämpötila, tulostusnopeus, kerrospaksuus ja pohjalevyn lämpötila. Materiaalina tutkimuksessa käytettiin ABS-muovia. Täyttötiheyden ja syöttämiskulman vaikutus energiankulutukseen oli pieni, mutta ne vaikuttivat kappaleen massaan ja näin ollen sen mekaanisiin ominaisuuksiin merkittävästi. Nämä ominaisuudet kannattaa siis optimoida vastaamaan kappaleen vaatimuksia. Suuttimen sekä pohjalevyn lämpötila ei käytännössä vaikuttanut tulostuksen energiatehokkuuteen. Tulostusnopeuden kasvattaminen vähensi merkittävästi energiankulutusta. Myös kerrospaksuuden kasvattaminen vähensi merkittävästi energiankulutusta. Tämä kuitenkin heikentää myös kappaleen mekaanisia ominaisuuksia. Tutkimuksessa kuitenkin huomautetaan, että joillakin materiaaleilla suurempi kerrospaksuus voi parantaa mekaanisia ominaisuuksia. (Vidakis et al. 2023)

Alex et al. (2025) artikkelissa vertailtiin PLA:n käyttöä materiaaliekstruusion ja ruiskuvalun välillä. Optimoidulla tulostusprosessilla sekä jälkikäsittelemällä materiaali kuumentamalla PLA:n murtolujuudeksi saatiin 55 MPa. Vertailuarvoksi samassa tutkimuksessa ruiskuvalun PLA:n murtolujuudeksi saatiin 35 MPa. Tämä tarkoittaa, että optimitilanteessa materiaaliekstruusiolla voidaan saavuttaa kappaleelle paremmat mekaaniset ominaisuudet, kuin ruiskuvalulla. Samassa tutkimuksessa vertailtiin myös PLA:n kestävyyttä materiaaliekstruusion ja ruiskuvalun välillä hyödyntäen elinkaarianalyysia. Tulos-

ten perusteella ruiskuvalu on lähes kaikilla mittareilla ekologisesti kestävämpää kuin materiaaliekstruusio. Huomattavana tekijänä FDM muodostaa enemmän erilaisia ilmansaasteita kuin ruiskuvalu. (Alex et al. 2025)

5. POHDINTA

Tämän työn tavoitteiksi määriteltiin selvittää miten AM-menetelmät edistävät kestävää valmistusta. Tässä luvussa käsitellään, kuinka hyvin työn tavoitteet saavutettiin sekä miten tutkimuskysymyksiin saatiin vastattua. Lisäksi käsitellään aiempien lukujen kirjallisuuslähteiden esiin tuomia tapoja kehittää AM-menetelmien kestävyyttä, sekä pohdintaa eri kestävyyteen vaikuttavista tekijöistä.

Ainetta lisäävän valmistuksen ekologiset vaikutukset voidaan jakaa kolmeen. Ne ovat hukkamateriaalin määrä, energiankulutus ja ilmansaasteet. AM:n energiankulutus materiaalia kohden pysyy lähes samana tuotannon kasvaessa. Kuitenkin muilla menetelmillä energiankulutus usein pienenee tuotannon kasvaessa, joten energiankulutuksen kannalta. (Khosravani & Reinicke 2020)

AM-menetelmät ovat erittäin hyviä pienille tuotantomäärille ja eräkoille. Tilanteet, joissa tuotetta tulee kustomoida nopealla aikataululla, saavat eniten etua ainetta lisäävän valmistuksen hyödyistä. Perinteisillä valmistustekniikoilla tulisi yleensä tuotteen muuttuessa muuttaa valmistuslaitteiden osia tai kokoonpanoa. Ainetta lisäävillä menetelmillä voidaan kuitenkin usein poistaa nämä vaiheet ja syöttää vain uuden kappaleen 3D-malli laitteelle. AM-menetelmät eivät ole ekologisuuden kannalta parhaita suurin tuotantomääriin. AM kuluttaa usein enemmän energiaa ja on hitaampi kuin perinteiset menetelmät, jos tuotetaan monta samanlaista kappaletta tai tuotetta.

Ensimmäinen tutkimuskysymys on ”Miten AM-menetelmät edistävät kestävää valmistusta”? AM-menetelmien etuja ekologisen kestävyyden kannalta ovat hukkamateriaalin vähentäminen ja tuotannon mukautettavuus. Ainetta lisäävä valmistus käyttää merkittävästi vähemmän materiaalia, kuin saman tuotteen valmistus ainetta poistavilla menetelmillä. (Roxanne et al. 2019, Wu et al. 2022, s. 6 mukaan; Kokare et al. 2023) Tilanteissa, joissa on tarve tehdä vain pieni määrä kappaleita, ovat AM-menetelmät tehokkaampia. Tämä pätee sekä valmistusnopeuteen, että energiankulutukseen. (Wu et al. 2022) Lisäksi AM-menetelmät mahdollistavat kierrätettyjen materiaalien käytön. Mahdollisia kierrätettäviä materiaaleja ovat metallit sekä osa polymeereistä. Vastaus ensimmäiseen tutkimuskysymykseen on siis: AM edistää kestävää valmistusta vähentämällä hukkamateriaalia, mahdollistamalla kierrätettyjen materiaalien käytön ja tehostamalla yksittäiskappaleiden valmistusta. (Sanchez et al. 2017; Diego et al. 2022; Al Rashid & Koç 2023)

Toinen tutkimuskysymys on ”Miten AM edistää kiertotalouden periaatteita”? AM-menetelmillä voidaan edistää kiertotaloutta kaikissa tuotteen elinkaaren vaiheissa. Suunnitteluvaiheessa tuote voidaan alusta alkaen suunnitella mukautettavaksi, jolloin se voidaan valmistaa sopivaksi asiakkaalle. Tämä todennäköisesti pidentää tuotteen käyttöikää. Käyttövaiheessa ainetta lisäävää valmistusta voidaan hyödyntää tuotteen huoltoon ja korjaamiseen. Vara-osat ja korjaukset on mahdollista tehdä tarpeen mukaan jokaiselle erilaiselle vauriolle. Joissain tilanteissa näillä korjaustoimilla voidaan myös lisätä toiminnallisuutta ja lisäarvoa tuotteelle. Elinkaaren loppuvaiheessa ainetta lisäävää valmistusta voidaan hyödyntää kierrättämällä valmistettujen tuotteiden materiaaleja ja valmistamalla uusia tuotteita näistä materiaaleista. Vastaus toiseen tutkimuskysymykseen: AM mahdollistaa kiertotalouden periaatteiden seuraamisen kaikissa elinkaaren vaiheissa. Tärkeimmät keinot siihen ovat mukautettavuus sekä kierrätettyjen materiaalien käyttö. (Sauerwein et al. 2019; Kanishka & Acherjee 2023)

Kolmas tutkimuskysymys on ”Miten AM-menetelmien ekologista kestävyyttä voidaan kehittää”? Kestävyyden kehittämisen apuna voidaan käyttää 10R:ää sekä kiertotalouden periaatteita. On tärkeää pyrkiä toteuttamaan kaikkia näitä periaatteita. Optimointi kattaa kappaleen suunnitteluvaiheen, käyttövaiheen sekä poistovaiheen. Suunnitteluvaiheessa optimointiin kuuluu kappaleen käyttötarkoituksen määrittäminen. Kappaletta ei tulisi suunnitella, niin että se muuttuu turhaksi liian nopeasti. Suunnittelu- ja valmistusvaiheessa kappaleen topologiaa sekä orientaatiota voidaan optimoida. AM-valmistukselle paras kappaleen muoto sekä asento ei ole sama kuin perinteisille valmistustekniikoille. (Mele & Campana 2020; Vidakis et al. 2023; Alex et al. 2025) Elinkaaren lopussa käytettyä tuotetta voidaan uudelleenkäyttää tai siihen käytetty materiaali voidaan kierrättää ja siitä voidaan tehdä uusi tuote. AM-menetelmien kestävyyttä voidaan parantaa myös lisäämällä kierrätettyjen materiaalien käyttöä. Käyttämällä samoja materiaaleja useasti vähennetään raakamateriaalin käyttöä. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin kierrätetyn materiaalin laadun ja mekaanisten ominaisuuksien heikkeneminen. Kun materiaalia kierrätetään useita kertoja sen murtolujuus ja venymä heikkenevät (Sanchez et al. 2017; Diego et al. 2022). Vastaus kolmanteen tutkimuskysymykseen on: AM menetelmien ekologista kestävyyttä voidaan parantaa lisäämällä kierrätettyjen materiaalien käyttöä, kehittämällä kierrätysprosesseja sekä optimoimalla varsinaista tulostusprosessia.

Kestävyyden tarkastelu osoittautui haastavaksi. Kestävyys on moniulotteista ja se kattaa monia osa-alueita. AM-menetelmät kehittyvät nopeasti ja tutkimusta tulee päivittää useasti. Monet tutkimuksien tulokset ovat vanhentuneita, eivätkä ne päde uusille laitteille ja menetelmille. Jo viisi vuotta vanha tutkimustieto voi olla täysin hyödytöntä, jos sitä ei

voida soveltaa uusiin laitteisiin. 3D-tulostuksesta on tehty paljon tutkimuksia. Usein kuitenkin näiden menetelmien ekologisuutta pidetään itsestäänselvyytenä tai sitä vain sivutaan lyhyesti, eikä siihen syvennytä tarkemmin (Attaran 2017; Kumar et al. 2021; Prashar et al. 2022). AM-menetelmiä tulee tutkia lisää erityisesti sen ekologisuuden kannalta. Jatkotutkimusten olisi myös tärkeä olla paremmin verrattavissa samankaltaisten tuotteiden valmistukseen perinteisillä valmistusmenetelmillä.

Tässä työssä saatuja tuloksia on vaikea yleistää, koska ainetta lisäävä valmistus on hyvin laaja käsite. Se kattaa lukuisia eri valmistustekniikoita sekä materiaaleja. AM:n ekologisuudesta on vaikea tehdä yhtä johtopäätöstä. AM:n ekologiset vaikutukset riippuvat kaikki valmistuksen menetelmästä, materiaalista, geometriasta, toiminta-asteesta sekä valmistuserän koosta. Valmistustekniikkaa valittaessa ekologisuuden kannalta, tulee se aina miettiä sen käyttökohteen mukaisesti. Mikään ainetta lisäävän valmistuksen teknologia ei ole paras vaihtoehto kaikkiin tilanteisiin. Tulosten luotettavuus on myös hieman epävakaa, juuri aiheen moninaisuuden takia. Käytetyissä aineistoissa tehdyt tutkimukset olivat usein hyvin spesifejä, esimerkiksi jollekin tietylle menetelmälle tai käyttökohteelle, joten niitä on vaikea verrata keskenään.

6. YHTEENVETO

Tässä kuvailevassa kirjallisuuskatsauksessa syvennyttiin ainetta lisäävän valmistukseen ja sen ekologisiin vaikutuksiin. Työn tavoitteena oli selvittää ainetta lisäävän valmistuksen mahdollisuuksia kestävän tuotannon edistämiseksi. AM:n ekologisuutta tutkittiin erilaisten artikkelien ja tutkimusten avulla. Ainetta lisäävä valmistus kattaa useita eri valmistusmenetelmiä ja materiaaleja. Tässä työssä pyrittiin selvittämään yleiskuva AM:n ekologisista vaikutuksista ja sen kehityskohteista. Työssä esiteltiin ainetta lisäävää valmistusta, kestävää valmistusta sekä kiertotalouden periaatteita. Tämän jälkeen syvennyttiin aineistohauilla löydettyihin tutkimuksiin ja esiteltiin niissä saatuja tuloksia.

Tämän työn tutkimuskysymykset olivat ”Miten AM-menetelmät edistävät kestävää valmistusta?”, ”Miten AM edistää kiertotalouden periaatteita?” ja ”Miten AM-menetelmien ekologista kestävyyttä voidaan kehittää”? Tässä työssä ei ole rajattu eri ainetta lisäävän valmistuksen menetelmiä eikä materiaaleja, vaan työssä on yritetty selvittää yleistilannetta. Työn aineistoja pyrittiin rajaamaan nykyaikaisiin lähteisiin ja suurin osa on vuosilta 2020–2024. Ainetta lisäävän valmistuksen ekologisia vaikutuksia selvitettiin vertailemalla eri tutkimusten tuloksia.

Tärkeimmät AM:n ekologiset vaikutukset voidaan jakaa kolmeen: hukkamateriaalin määrä, energiankulutus ja ilmansaasteet. AM vähentää syntynyttä hukkamateriaalia, verrattuna ainetta poistaviin valmistusmenetelmiin. Energiankulutusta mitattaessa AM on energiatehokkaampaa pienillä valmistusmäärillä. Eräkokojen kasvaessa AM:n energiatehokkuus kuitenkin heikkenee. Löydettyjen aineistojen perusteella AM näyttäisi tuottavan hieman enemmän ilmansaasteita, kuin perinteiset menetelmät. Aihetta tulisi kuitenkin tutkia lisää, jotta ilmansaasteiden määrästä saataisiin tehtyä selkeä johtopäätös. Lisäksi nämä kaikki ekologiset vaikutukset ovat riippuvaisia valitusta valmistusmenetelmästä, materiaalista, geometriasta sekä valmistuserän koosta. AM edistää siis kestävää valmistusta vähentämällä hukkamateriaalia, mahdollistamalla kierrätettyjen materiaalien käytön ja tehostamalla yksittäiskappaleiden valmistusta.

Kiertotalouden periaatteet jakautuvat kolmeen tuotteen elinkaaren vaiheeseen: suunnittelu-, käyttö- ja loppuvaihe. Ainetta lisäävällä valmistuksella voidaan edistää näitä periaatteita kaikissa tuotteen elinkaaren vaiheissa. Suunnitteluvaiheessa kappale voidaan optimoida käyttäjälle sopivaksi, jolloin sen käyttöikä pitenee. Käyttövaiheessa ainetta lisäävällä valmistuksella voidaan huoltaa ja tuottaa varaosia tarpeen mukaan jokaiselle

yksilölliselle vauriolle. Elinkaaren loppuvaiheessa valmistettuja tuotteita voidaan kierrättää. Näistä syntyneitä materiaaleja voidaan käyttää uudelleen ainetta lisäävässä valmistuksessa. AM mahdollistaa siis kiertotalouden periaatteiden seuraamisen jollain tavalla kaikissa elinkaaren vaiheissa. Tärkeimpinä keinoina siihen ovat valmistusmenetelmän mukautettavuus sekä kierrätettyjen materiaalien käyttö

AM:n ekologisuuden kehittämismahdollisuuksia selvitettiin erilaisten optimointitutkimusten tulosten perusteella. Ekologisuutta voidaan kehittää optimoimalla kappaleen tulostusparametreja, kuten kappaleen orientaatiota sekä täyttötiheyttä. Kuitenkin näiden parametrien muuttaminen vaikuttaa myös tulostetun kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin, joten aina ekologisuuden priorisointi ei ole mahdollista. Ekologisuutta voidaan parantaa myös lisäämällä kierrätettyjen materiaalien käyttöä, sekä tehostamalla näitä kierrätysprosesseja. Keinoja AM-menetelmien ekologisen kestävyyden parantamiseen ovat siis kierrätettyjen materiaalien käytön lisääminen, kierrätysprosessien kehittäminen sekä varsinaisen tulostusprosessin optimoiminen.

Tätä kirjallisuuskatsausta tehdessä huomattiin, että ainetta lisäävä valmistus on hehkutettu ja ajankohtainen aihe. Aiheesta on paljon tutkimusta ja kirjallisuutta. AM-menetelmien ekologisuutta pidetään kuitenkin itsestäänselvyytenä. Lähes kaikissa lähteissä se mainitaan, mutta asiaan ei syvennytä tarkemmin. Aihetta tulee tutkia lisää ja suorittaa enemmän vertailuja AM-menetelmien ja perinteisten valmistusmenetelmien välillä.

LÄHTEET

Agnusdei, L. & Del Prete, A., (2022) Additive manufacturing for sustainability: A systematic literature review, Sustainable Futures Vol.4 9 p. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2022.100098

Al Rashid, A. & Koç, M., (2023) Additive manufacturing for sustainability and circular economy: needs, challenges, and opportunities for 3D printing of recycled polymeric waste, Materials Today Sustainability, Vol.24 https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100529

Alex, Y., Divakaran, N., C., Pattanayak, I., Lakshyajit, B., Ajay, P., V. & Mohanty, S., (2025), Comprehensive study of PLA material extrusion 3D printing optimization and its comparison with PLA injection molding through life cycle assessment, Sustainable Materials and Technologies, Vol43. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01222

Attaran, M., (2017) The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing, Business Horizons, Vol.60(5) pp. 677–688 https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011

Bag, S., Gupta, S. & Kumar, S. (2021) Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development, International Journal of Production Economics, Vol.231 https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107844

Ching, N., T., Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Maroufkhani, P. & Asadi, S., (2022), Industry 4.0 applications for sustainable manufacturing: A systematic literature review and a roadmap to sustainable development, Journal of Cleaner Production, Vol.334 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130133

Diego, S., Casado, J., Carrascal, I., Sainz-Aja, J. & Ferreño, D., (2022) Mechanical Performance of Recycled Reinforced Polyamide from Rejected Railway Fastenings Flanged Plates, Polymers, Vol.14(22) https://doi.org/10.3390/polym14224940

Ford, S. & Despeisse, M. (2016) Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, Journal of cleaner production Vol.137 pp. 1573–1587 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150

Kanishka, K. & Acherjee, B., (2023) A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration, Journal of Manufacturing Processes, Vol.89 https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.034

Khosravani, M., R. & Reinicke, T., (2020) On the environmental impacts of 3D printing technology, Applied Materials Today, Vol.20, https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100689

Kirchherr, J., Reike, D. & Hekkert, M., (2017) Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions, Recources, Conservation & Recycling Vol.127 pp. 221–232 http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005

Kokare, S., Oliveira, J., P. & Godina, R. (2023) Life cycle assessment of manufacturing processes: A review, Journal of Manufacturing Systems, Vol.68, pp. 536–559, https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.05.007

Kumar, M., B. & Sathiya., P., (2021) Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges, Thin-Walled structures, Vol.159 https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107228

Kumar, R., Singh, R. & Dwivedi, Y., (2020) Application of industry 4.0 technologies in SMEs for ethical and sustainable operations: Analysis of challenges, Journal of Cleaner Production Vol.275 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124063

Mele, M. & Campana, G, (2020) Sustainability-driven multi-objective evolutionary orienting in additive manufacturing, Sustainable Production and Consumption, Vol.23 pp. 138–147 https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.05.004

Potting, J., Hekkert, M., P., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). Circular economy: measuring innovation in the product chain. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.

Prashar, G., Vasudev, H. & Bhuddhi, D. (2023), Additive manufacturing: expanding 3D printing horizon in industry 4.0, International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), Vol.17(5), pp. 2221–2235. https://doi.org/10.1007/s12008-022-00956-4

Praveena, B., A., Lokseh, N., Abdulrajak, B., Santhosh., Praveena, B., L. & Vignesh, R. ,(2022) A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential Materials Today: Proceedings, Vol.52(3), pp. 1309–1313, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.059

Psihoyos, H., O., Mouzakitis, Y., Adamides, E., D. & Lampeas, G., N. (2022) Assessing 3D printing processes as enables of circular economy, IOP Conference Series. Earth and Environmental science, Vol1123(1) doi:10.1088/1755-1315/1123/1/012004

Salminen, A., (2023), Mikä kirjallisuuskatsaus? Johdatus kirjallisuuskatsauksen tyyppeihin ja joihinkin hallintotieteellisiin sovelluksiin. Vaasan yliopisto.

Sauerwein, M., Doubrovski, E., Balkenende, R. & Bakker, C., (2019) Exploring the potential of additive manufacturing for product design in a circular economy, Journal of Cleaner Production, Vol.226, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.108

SFS-EN ISO 14044 (2006). Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja. Suomen standardisoimisliitto, Helsinki

Veleva, V. & Ellenbecker, M. (2001) Indicators of sustainable production: framework and methodology, Journal of Cleaner Production Vol.9(6) pp. 519–549 https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00010-5

Vidakis, N., Kechagias, J., D., Petousis, M., Vakouftsi F. & Mountakis N., (2023) The effects of FFF 3D printing parameters on energy consumption, Materials and Manufacturing Processes, Vol.38(8), pp. 915–932, https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2105882

Wu, H., Mehrabi, H., Karagiannidis, P. & Naveed, N. (2022). Additive manufacturing of recycled plastics: Strategies towards a more sustainable future, Journal of Cleaner Production, Vol.335 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130236

Zwiech, Patrycja (2023) Sustainable production, Organizing Sustainable Development pp. 120–132, http://dx.doi.org/10.4324/9781003379409-12