

# MATERIAALIA LISÄÄVÄLLÄ VALMISTUKSELLA (3D-TULOSTUS) TEHDYT TILAPÄISVARAOSAT SOTILASKÄYTTÖÖN

Samu Rautio, Ilari Valtonen ja Jaakko Perälä

## TIIVISTELMÄ

In a military conflict, the need for spare parts is constant. Spare parts are typically obtained either from spare parts warehouses or cannibalized from other individuals in the same system. Due to the type of the crisis and the large number of systems typically used in it, it is difficult to prepare with the right kind and number of spare parts. The start of the production of critical spare parts is ensured with contractual relationships with suppliers. In this case, the supplier can be either the original equipment manufacturer or a licensed manufacturer. Own manufacturing using traditional methods has not been seen as profitable by the armed forces. 3D printing as a relatively new manufacturing method can enable the production of even singular spare parts. 3D printing is based on digital specification, where the information needed for manufacturing is digitally transmitted to the manufacturing equipment.

In the previous studies, we have investigated the 3D printed spare parts (Rautio & Valtonen 2022; Valtonen ym. 2022; Valtonen ym. 2022; Hokkanen & Rautio 2018). In this study, the starting point was the ability of additive manufacturing to produce temporary spare parts instead of original or original-quality spare parts. Temporary spare parts can be used to make the system operational either for the time required for the task or for the time until the original or equal-to-original spare part can be installed into the system. This study aimed to find out how different factors affect the 3D printing of temporary spare parts. The study surveyed thirty-seven people from twelve countries related to military 3D printing about the factors influencing the printing of temporary spare parts. Based on the answers to the survey and on the criteria devised by a group of experts, a ranking of the most influential factors towards 3D printing in military temporary spare parts was created. The most important factor identified by the respondents in the 3D printing was the shortened delivery time of temporary spare parts. This finding supports the data from the Ukraine crisis about 3D printing.

## JOHDANTO

*Varaosien puute on suurin ongelma, kun länsimaisia panssarivaunuja toimitetaan Ukrainan kriisiin. On sanomattakin selvää, että ilman varaosia panssarivaunujen korjaus on erittäin vaikeaa.* – Puolan puolustusministeri Mateusz Morawiecki. (Hasselbach 2023)

Sotilaalliset kriisit ovat osoittaneet, että konfliktissa kunnossapitojärjestelmän varaosien tarve on määrällisesti suurta ja ennalta arvaamatonta (Pinçe ym. 2021). Ukrainan kriisistä saatujen tietojen perusteella tehdyssä tutkimuksessa havaittiin, että järjestelmien toiminnan kannalta varaosien saanti kunnossapitojoukoille on kriittistä. Tämä edellyttää varaosatarpeen ennustamista ja varaosien saannin mahdollistamista. Varaosien saanti edellyttää hyvän tilannetietoisuuden lisäksi riittävää teknistä dokumentaatiota, hintatietoutta varaosista, niiden varastoinnista ja toimituksesta (Baranov ym. 2023). Ukrainan kriisissä on havaittu, että 3D-tulostamalla on pystytty tekemään osia, joiden saanti on estynyt tai joilla on pystytty

parantamaan joukon kykyä selviytyä tehtävästään. Esimerkkeinä näistä julkisuuteen ovat nousseet tulostetut kiristysiteen osat (Verma 2022), kranaatin pyrstöt (Harju 2022), sotilasvarusteiden osat sekä lennokkeihin tulostetut osat (Feldman 2022).

Varaosia voidaan saada joko niiden tuotantolinjalta, varastoista, tuottaa itse tai ottaa varaosia toisista yksilöistä. Varaosien määrä on kunnossapidon resurssien ohella ratkaiseva tekijä, tarkasteltaessa pystytäänkö järjestelmiä kunnossapitamaan ja kuinka paljon vikaantuneista järjestelmistä voidaan palauttaa takaisin taistelukentälle (Den Boer ym. 2020).

Tilanteessa, jossa varaosien toimitusvarmuus romahtaa, joudutaan käyttämään improvisoituja ratkaisuja. Aiemmissa tutkimuksissa on havaittu, että materiaalia lisäävä valmistus on parhaimmillaan silloin kun toimitusketjut eivät ehdi aktivoitua vastatakseen lisääntyvään kysyntään (Durach ym. 2017; Kunovjanek ym. 2022). Varaosien tuottaminen yksittäiskappalein suoraan käyttäjän tarpeisiin on aiemmin ollut pääsääntöisesti kannattamatonta ja aikaa vievää.

Materiaalia lisäävän valmistus, englanniksi Additive Manufacturing (AM), yleiskielessä ei teknisissä yhteyksissä ”3D-tulostus”, on suhteellisen uusi valmistusmenetelmä, jolla oikein valituissa tapauksissa voidaan tuottaa kappaleita taloudellisesti ja teknisesti soveltuen suoraan loppukäyttäjälle yksittäiskappalein. (Holmström ym. 2010; Khajavi ym. 2014; Heinen & Hoberg 2019; Costabile ym. 2017) Sen tarjoamat mahdollisuudet sotilaallisten varaosien tuottamiseen on viime vuosina ollut eri asevoimien kasvavan kiinnostuksen kohteena (Den Boer ym. 2020; Feldman 2022; González & Álvarez 2018; Department of Defence 2021).

Materiaalia lisäävän valmistuksen perustana toimii valmistettavan kappaleen digitaalinen määrittely (Tuomi 2003). Se mahdollistaa varaosatuoannon uudella tavalla, koska menetelmä mahdollistaa kappaleiden valmistuksen lähes ilman geometrisiä rajoitteita (Ituarte 2017). Digitaalisen määrittelyn ansiosta valmistettavan kappaleen tietoja voidaan hyödyntää useassa eri paikassa yhdenaikaisesti. Sen lisäksi kappaleen valmistustietoja voidaan muokata ja käsitellä digitaalisesti, mikä mahdollistaa valmistusdatan nopeat muutokset (Holmström ym. 2010). Itse valmistusvaiheessa 3D-tulostin ei tarvitse erillisiä työkaluja, vaan sama kone voi tuottaa kappaleen ilman erillisiä tulostuslaitteiston muokkauksia (Berman 2012).

Aiemmassa tutkimuksessa on osoitettu, että materiaalia lisäävällä valmistuksella pystytään valmistamaan alkuperäisen varaosan korvaavia varaosia sotilaallisiin kohteisiin (Rautio & Valtonen 2022; Khajavi ym. 2014). Valmistaminen edellyttää digitaalisen määrittelyn perustaksi riittävää tietoa valmistettavasta komponentista ja sitä ympäröivistä olosuhteista. Näiden tietojen perusteella voidaan valita myös käytettävissä oleva valmistustekniikka ja parhaiten käyttöön soveltuva tulostusmateriaali. Tyypillisesti materiaaleina käytetään polymeerejä, komposiitteja tai metalleja. (Gibson ym. 2014)

Kaikissa tilanteissa ei ole tarpeellista tai mahdollista tuottaa alkuperäisen varaosan kanssa yhtäläisillä ominaisuuksilla varustettuja varaosia. Tällöin vaihtoehdoksi voi tulla tuottaa tilapäisvaraosa. Tilapäisvaraosalla voidaan saada järjestelmä toimimaan sen aikaa, että järjestelmältä edellytettävä toiminto saadaan toteutettua. Tilapäisvaraosien käyttö voi mahdollistaa järjestelmän toiminnan sen aikaa, että alkuperäislaatuinen varaosa saadaan toimitettua järjestelmään. Tilapäisvaraosien tuottaminen materiaalia lisäävällä valmistuksella joko sotilaslogistiikan omavalmistuksena, sopimustoimittajien yhteistyöllä tai teollisuudessa voi muuttaa varaosalogistiikan toimintoja (Westerweel ym. 2020).

Valmista tutkimustietoa 3D-tulostettujen tilapäisvaraosien hyödyntämisestä sotilasoperaatioissa on hyvin niukasti. Materiaalia lisäävän valmistuksen käytön etuja ja rajoitteita sotilaallisissa operaatioissa on tutkittu (Den Boer ym. 2020), mutta havaintoja tai kokemuksia tulostetuista tilapäisvaraosista ei ole saatavilla. Aiempi tutkimus on keskittynyt pääsääntöisesti siihen, miten sotilaalliseen käyttöön tulevia varaosia voidaan valita ja luokitella siten, että ne olisivat valmistettavissa materiaalia lisäävällä valmistuksella (Busachi ym. 2018), miten ja mistä materiaalista osia voidaan tulostaa (Montero ym. 2018; Liu ym. 2017), miten materiaalia lisäävä valmistus voi kehittää toimitusketjua (Khajavi ym. 2014; Westerweel ym. 2020; Mecheter ym. 2022; Den Boer ym. 2020) ja miten hybridituotannolla voidaan kehittää osien saantia (Knofius ym. 2021). Tilapäisvaraosien valmistus materiaalia lisäävällä valmistuksella ja sen mahdollistama muutos sotilaslogistiikkaan toimii tämän tutkimuksen lähtökohtana.

3D-tulostettujen osien käyttämistä tilapäisvaraosina voidaan tarkastella keskeisten tuotantokriteerien avulla (Heikkilä & Ketokivi 2009). Kriteerejä tarkastelemalla ja painottamalla voidaan helpottaa päätöksentekoa tarkasteltaessa tilapäisvaraosien 3D-tulostuksen kannattavuutta. Yhdysvaltojen puolustusministeriön julkaisemassa materiaalia lisäävän valmistuksen strategiassa keskeisiksi mittareiksi on valittu valmius (readiness) ja kustannukset (cost) (Department of Defence 2021). Näiden lisäksi yleisemmiksi tekijöiksi voidaan tunnistaa hinta, suorituskyky ja toimitus (Naghshineh ym. 2023).

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, mitkä tekijät materiaalia lisäävän valmistuksen sotilaallisessa käytössä tulee huomioida valmistettaessa tilapäisiä varaosia. Tutkimuksen tavoitteena on myös selvittää, mitkä tekijät ovat oleellisimpia ja miten näitä tekijöitä tulisi huomioida tilapäisvaraosien toimitusketjuun liittyvässä päätöksenteossa.

Materiaalia lisäävän valmistuksen on ennustettu mullistavan valmistavan teollisuuden tapaa toimia. Sen vallankumouksellinen ennuste perustuu menetelmän tapaan toimia tavalla, joka ennen ei ole ollut mahdollista (Berman 2012). Digitaalinen suunnittelu, laskentatehon kasvaminen sekä komponenttien halventuminen ja samanaikainen 3D-tulostuslaitteistojen patenttien raukeaminen on mahdollistanut valmistuslaitteistojen kehittämisen tehokkaammiksi ja edullisemmiksi. (Gibson ym. 2014) Menetelmän kehittymisen on ennustettu parantavan sen käyttömahdollisuuksia entistä enemmän eri käyttökohteissa (Metsä-Kortelainen ym. 2020). Tutkimuksessa tutkittavien tekijöiden määrittämisellä voidaan kehittää materiaalia lisäävän valmistuksen käyttöä sotilaslogistiikassa, erityisesti kunnossapidossa. Materiaalia lisäävällä valmistuksella voidaan tuottaa varaosia silloin, kun niiden saanti on estynyt. Edellä kuvatun mukaisesti tutkimuksella voidaan tehdä ratkaisuja siitä, miten valmistuksen edellyttämien mallien mallinnus ja säilytys voidaan ratkaista, miten varaosien valinta ja luokittelu tulee tehdä, miten materiaalit tulee valita, millaisia teknisiä rajoitteita tilapäisvaraosien tulostuksessa on ja miten taloudelliset tekijät vaikuttavat tilapäisvaraosien 3D-tulostukseen.

Tutkimuksessa kartoitettiin 3D-tulostusteknologian mahdollisuudet ja rajoitteet kirjallisuudesta sekä tutkimalla varaosalogistiikan perusteita. Kirjallisuuden ja tutkijoiden tekemien aiempien tutkimusten perusteella kartoitettiin tilapäisvaraosien keskeisimpiä tuotantotekijöitä. Tuotantotekijöiden jäsentelyä ja kartoittamista varten järjestettiin Puolustusvoimien ja Aalto-yliopiston materiaalia lisäävän valmistuksen tutkijoiden työpaja. Työpajan jälkeen tutkimustietoa kerättiin osallistumalla Euroopan puolustusviraston (EDA) ja NATO MLCC yhdessä järjestämään AM Village 23 tapahtumaan, jossa 14 maata kokoontui viideksi päiväksi Hollantiin tekemään 3D-tulostettuja varaosia ja komponentteja sotilaallisiin kohteisiin. AM Village 23 tapahtumassa toteutettiin kyselytutkimus tilapäisvaraosiin liittyen.

# MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS

Materiaalia lisäävän valmistuksen tarkka määritelmä on: ”menetelmä tuottaa kappaleita 3D-mallitiedon pohjalta materiaaleja yhteen liittämällä, tyypillisesti kerros kerrokselta -periaatteella, vastakohtana materiaalia poistaviin ja materiaalia muovaaviin menetelmiin”. (SFS-EN ISO/ASTM 52900 2022). Standardin mukaan ”3D-tulostus” on kappaleen valmistusta käyttäen kirjoituspäätä, suutinta tai jotain muuta tulostusteknologiaa (SFS-EN ISO/ASTM 52900 2022). 3D-tulostus terminä on siis se hetki, kun valmistuslaite, 3D-tulostin, valmistaa kappaleen. Terminä sitä usein kuitenkin käytetään ei teknisissä yhteyksissä synonyymina materiaalia lisäävälle valmistukselle.

## Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmät

Materiaalia lisäävää valmistusta voidaan tarkastella eri näkökulmista luokittelemalla se eri tavoin. Yksi varhaisimmista menetelmän luokitteluista esiteltiin vuonna 1998, jolloin Pham ja Gault jakoivat menetelmän kaksiulotteisesti. Siinä toinen luokittelukriteeri on tulostusmateriaali ja toinen on se, kuinka monesta lähteestä itse tulostusta tehdään. Pham ja Gault käyttävät luokittelussaan neljää eri tulostusmateriaaliluokkaa: nestemäinen polymeeri, diskreetit partikkelit, sulatettavat materiaalit ja laminoitavat liuskat. Tulostusmenetelminä mallissa on tunnistettu: 1D kanava, 2x1D kanava, 1D linjakanava ja 2D linjakanava. (Pham & Gault 1998) On havaittu, että ihan kaikki nykyaikaiset materiaalit ja tulostusmenetelmät eivät mahdu Phamin ja Gaultin määritelmään. Sen vuoksi tyypillisemmin nykyisin menetelmän teknologioista käytetään Stucker & Janaki (2007) jakoa, joka on esitelty kirjassa Materials Processing Handbook (Stucker & Janaki 2007). Luokittelu perustuu eri tulostusprosesseihin, jotka käyttävät samoja koneen rakenteeseen perustuvia arkkitehtuureja. Tätä luokittelua käyttäen kaikki materiaalia lisäävän valmistuksen prosessit voidaan jaotella seitsemään eri menetelmäluokkaan. Tämä luokittelu on toiminut ASTM/ISO standardoinnin perustana. Materiaalia lisäävä valmistus voidaan luokitella myös sillä perusteella, käytetäänkö menetelmää yksi- vai monivaiheisesti. Yksivaiheisessa prosessissa sulatetaan samanlaisia materiaaleja, kun monivaiheisissa prosesseissa liitetään erilaisia materiaaleja toisiinsa. Monivaiheisissa prosesseissa valmiin tuotteen valmistus edellyttää pääsääntöisesti kappaleen jälkiprosessointia, joka on tyypillisesti sintrausta tai infiltrointia. (SFS-EN ISO/ASTM 52900 2022)

Edellä mainitun jaon mukaisesti materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmäluokat ovat:

### 1. Sideaineen suihkutus (binder jetting, BJ).

Sideaineen suihkutuksessa kappale tulostetaan suihkuttamalla sideainetta jauhekerrokseen. Siksi vain pieni osa kappaleeseen päätyvästä materiaalista tulostetaan tulostuspään läpi. Suurin osa materiaalista koostuu jauheesta, joka levitetään jauhepedille. Sideainepisarot muodostavat tyypillisesti sideaineneste- ja jauhepartikkelien pallomaisia agglomeraatteja ja muodostavat sidoksen aikaisemmin tulostettuun kerrokseen. Kun kerros on tulostettu, jauhekerros lasketaan ja uusi jauhekerros levitetään sen päälle. BJ tulostimen sidosainetta suihkuttavan pään sisällä on useita suuttimia. Tulostimessa on useita yhdensuuntaisia yksiulotteisia tapoja kuviointia varten. Prosessia voidaan skaalata lisäämällä tulostimen suuttimien lukumäärää. Menetelmän etuina verrattuna muihin menetelmiin on suuri tulostusnopeus suhteellisen alhaisilla kustannuksilla. Tulostusmenetelmässä jauhe tukee tulostettuja kappaleita, joten tukirakenteita ei tarvita. Tulostettavat osat voidaan sijoittaa yhdeksi kerrokseksi tai pinota jauhekerrokseen siten, että yhdellä kerralla tulostettavien osien lukumäärä voidaan moninkertaistaa. Menetelmällä voidaan tulostaa erilaisia tulostusmateriaaleja kuten hiekkaa (valumuotteja

varten), keraameja, polymeerejä ja metallia. Tyypillisesti kappaleet tarvitsevat monivaiheista jälkikäsittelyä tulostuksen jälkeen. (Gibson ym. 2014; Li ym. 2020; SFS-EN ISO/ASTM 52900 2022)

## 2. Suorakerrostus (direct energy deposition, DED).

Suoran energian kohdistuksen prosessit mahdollistavat osien valmistamisen sulamiseen perustuvalla prosessilla, jossa jauhe- tai lankamuotoista raaka-ainetta käytetään valmistusmateriaalina. DED -prosessit perustuvat kapean alueen säteenä (beam) kohdennettavaan energiaan, jolla kerrostettavaa materiaalia lämmitetään suoraan kappaleen pinnalle. DED -prosesseissa materiaalia ei ennalta levitetä sulatusalueelle, vaan raaka-ainetta syötetään valmistusprosessissa sitä mukaa kun prosessi etenee. DED-prosessit käyttävät lämmönlähteenä keskitettyä lämpölähdettä kuten laseria, elektronisuihkua tai plasmakaarta. Menetelmässä liikutetaan joko kappaletta tai tulostuspäätä ja jokainen kappaleen ja tulostuspään kohtaaminen tulostuspään kulku luo jäljen kiinteytyneestä materiaalista, ja näin materiaalirivit muodostavat tulostettavan kappaleen kerrokset. Monimutkainen kolmiulotteinen geometria vaatii joko tukimateriaalin valmistettavaan kappaleeseen tai moniakselisen tulostuspään. DED -prosessien tavoitteena on tuottaa täysin tiheitä funktionaalisia osia metalleista ja keraameista, eikä niitä ole tarkoitettu muoviosien valmistukseen. Mitä tahansa metallista tai keraamista jauhetta tai niiden seosta, joka on stabiili sulassa altaassa (melt pool), voidaan käyttää tulostamiseen. Yleensä metallia, jolla on korkea heijastuskyky ja lämmönjohtavuus, on vaikea prosessoida. Näitä materiaaleja ovat esimerkiksi kulta ja jotkin alumiini- ja kupariseokset. DED- menetelmällä tulostettujen osien mikrorakenne on verrattavissa valettujen kappaleiden mikrorakenteeseen. (Ahn 2021; Gibson ym. 2014; SFS-EN ISO/ASTM 52900 2022)

## 3. Pursotus (material extrusion).

Materiaalin pursotustekniikoita kuvailla samanlaisiksi, kuin minkä tahansa materiaalin jähmettyminen silloin, kun sitä pursotetaan ulos suuttimen läpi paineella. Jos paine suuttimessa pysyy vakiona, niin pursotettava materiaali virtaa vakionopeudella silloin, kun pursotuspään poikkileikkauksen halkaisija pysyy vakiona. Menetelmää käytettäessä pursotettavan materiaalin on oltava puolikiinteässä tilassa, kun se tulee ulos suuttimesta. Materiaalin tulee jähmettyä täysin, kun se pursotetaan muotoonsa. Lisäksi materiaalin täytyy sitoutua aiemmin pursotettuun materiaaliin. Materiaalia lisäävän laitteen on kyettävä liikuttamaan pursotuspäätä vaakatasossa ja käynnistämään ja pysäyttämään materiaalin syöttö liikuttamisen aikana. Kun valmistettava kerros on valmis, koneen on siirryttävä ylöspäin tai liikutettava osaa alaspäin, jotta uusi kerros voidaan tulostaa. Pursotusmenetelmää käytettäessä on kaksi keskeistä lähestymistapaa. Eniten käytetty tapa on käyttää lämpötilaa materiaalin tason hallintaan. Sula aine nesteytetään säiliön sisällä niin, että se voi valua ulos suuttimesta ja kiinnittyä edellisen materiaalin kanssa ennen jähmettymistä. Toinen lähestymistapa on käyttää kemiallista muutosta kiinteytymisen aikaansaamiseksi. Tässä menetelmässä kovetusaine reagoi ilman kanssa, jolloin kiinnittyminen tapahtuu. Pursotusmateriaaleina voidaan käyttää polymeerejä, keraameja, metallia tai komposiitteja. Tyypillisimmin pursottamalla tulostetaan polymeerejä tai komposiitteja. Metallin pursotus edellyttää kappaleelta usean jälkikäsittelyvaiheen, että siitä voidaan saada käyttövalmis komponentti. (Kristiawan ym. 2021; Gibson ym. 2014; SFS-EN ISO/ASTM 52900 2022)

## 4. Materiaalin suihkutus (material jetting, MJ).

Materiaalin suihkutusmenetelmän käyttö perustuu tulostusmateriaalin suihkutukseen suoraan suihkutuspäästä siten, että se muodostaa valmistettavan kappaleen. Tyypillisimmin materiaalin suihkutuksessa tulostustapana käytetään jatkuvaa suoratulostusta, jossa kaikki valmistettavan

kappaleen materiaali tulostetaan suoraan tulostuspäästä ilman välivaiheita. Tässä tulostustavassa tulostuspää syöttää pisaroidun tulostusmateriaalin kiihdyttäen pisarat siten, että ne törmäävät tulostuspinnalle. Tulostuspäässä voi olla erikseen sekä tulostus että tukimateriaali. Tässä tulostustavassa on erotettavissa kaksi erilaista tulostusprosessia, jatkuva materiaalin suihkutuspää tai pisarointi tarpeeseen. Jatkuvassa suihkutuksessa pisaroita tulee vakionopeudella ja kappale tehdään tulostuspään liikuttamisella digitaalisen tiedon perusteella suhteessa virtausnopeuteen. Tarpeen mukaan pisaroinnissa kone ohjaa suihkun ja tulostuspään nopeutta. Menetelmässä valmistettavan kappaleen tulostuslaatu riippuu siitä, millaisia pisaroita tulostin kykenee tuottamaan, millaisella nopeudella pisarat kerrostuvat ja millaiset materiaaliominaisuudet pisaroilla on. Ensimmäisen sukupolven MJ laitteet käyttivät materiaalinaan lämmitettyä vahamaista kestopuovia. Eri menetelmän sovellukset pystyivät käyttämään erilaisia tulostusmateriaaleja raaka-aineenaan, mukaan lukien fotopolymeerit. Tulostusmateriaaleina on pääosin polymeerit, joiden kestävyys ei vielä ole kestopuovien tasolla. Siksi niiden käyttö rajoittuu pääosin prototyyppiin, valumalleiksi ja käyttökohteisiin, jossa materiaalilta ei edellytetä niin hyviä lujuusominaisuuksia. (Elkaseer ym. 2022; Gibson ym. 2014; SFS-EN ISO/ASTM 52900 2022)

#### 5. Jauhepetisulatus (powder bed fusion, PBF).

Jauhepetisulatuksessa tulostusmateriaalina toimiva jauhe levitetään valmistusalustalle, jonka jälkeen yksi tai useampi lämmönlähde liikkuu kappaleen digitaalisen määrittelyn perusteella, saaden saadaan aikaan jauhepartikkelien yhteenliittymisen. Tulostimessa on lämmönlähteen lisäksi yksikkö, joka kontrolloi yhteenliittymistä kunkin valmistuskerroksen valmistettavassa osassa, sekä jauheen levitys- ja tasoitusjärjestelmä. Yleisimpiä PBF:ssä käytettäviä lämmönlähteitä ovat laserit. Menetelmiä, joissa lämmönlähteenä käytetään laseria, kutsutaan lasersintraukseksi (Laser Sintering, LS). Metallien ja polymeerien lasersintraus poikkeavat toisistaan, kuten myös laserilla ja ei laserilla toimivat järjestelmät. Lämmönlähteenä voidaan käyttää laserin sijasta elektronisuihkua tai agenttiaineen ja kohdistetun energian yhdistelmää. Alun perin lasersintraus kehitettiin muovien prototyyppien valmistukseen. Myöhemmin menetelmää on alettu käyttää myös metallien ja keraamien tulostukseen. Lähtökohtaisesti kaikkia materiaaleja, joita voidaan sulattaa ja uudelleen kiinteyttää, voidaan käyttää jauhepetisulatuksessa. Tyypillisesti jauhepetisulatuksen materiaalit jaetaan kolmeen eri pääluokkaan: polymeerit ja komposiitit, metallit ja komposiitit sekä keraamit ja keraamikomposiitit. (Chowdhury ym. 2022; Gibson ym. 2014; SFS-EN ISO/ASTM 52900 2022)

#### 6. Kerroslaminointi (sheet lamination).

Yksi ensimmäisistä (1991) markkinoille saatetuista materiaalia lisäävän valmistuksen tekniikoista oli Laminated Object Manufacturing (LOM). LOM sisälsi laserilla leikattujen paperiarkkien kerrostamisen, jossa jokainen arkki edustaa yhden CAD-mallin ristikkäiskerrosta. LOM:ssa paperiarkin osa viipaloidaan materiaalikuutioiksi käyttämällä leikkaamista. Tulostusperiaatteena on, että materiaalia kerrostetaan muodostaen niiden välille sidokset. Sidokset voidaan muodostaa käyttäen esimerkiksi liimaa, hartsia, liisteriä tai lämpöä. Lopuksi jälkeen digitaalisen määrittelyn perusteella kappaleen ulkoreunat leikataan käyttäen esimerkiksi terää tai laseria, erottaen valmistuva kappale ylimääräisestä materiaalista. Leikkaamisen ja pinoamisen järjestys voi vaihdella. Laminointiprosessit voidaan luokitella edelleen kerrosten välisen sidoksen muodostamismekanismin perusteella. Nämä menetelmät ovat a) liimaaminen tai sideaineella kiinnittäminen (gluing or adhesive bonding), b) lämpösidontamenetelmät (thermal bonding processes) c) kiinnitys (clamping) ja d) ultraäänihitsaus (ultrasonic welding). Menetelmällä voidaan laminoida muoveja, metalleja, keraameja ja paperia. (Gibson ym. 2014; SFS-EN ISO/ASTM 52900 2022; Yi ym. 2004)

7. Valokovetus altaassa (vat photopolymerization).

Valokovetus altaassa –prosessit käyttävät raaka-ainekseen nestettä, säteilemällä kovettuvaa resiiniä tai fotopolymeeriä ensisijaisena materiaalinaan. Suurin osa fotopolymeereistä reagoivat ultraviolettiaalto-alueella olevaan säteilyyn. On olemassa myös näkyvän valon alueella toimivia tulostusjärjestelmiä. Yhteistä näille menetelmille on, että tulostusprosessin aikana materiaalissa tapahtuu kemiallinen reaktio sen muuttamisessa kiinteäksi kappaleeksi. Kemiallisen reaktion saavuttamiseksi on kehitetty erilaisia tapoja kovettaa materiaalia. Kovettamisen aiheuttavia säteilylähteitä ovat muun muassa gamma, röntgen, elektronit, UV, ja näkyvä valo. Valokovetuksen toteuttamiseen on kehitetty kaksi erilaista menetelmää. Toinen on vektoriskannaus (Vector scan or point-wise) ja toinen on projektio (mask projection or layer wise). Vektoriskannauksessa voidaan skannata laserilla tai muulla fokusoidulla säteilylähteellä kappaleen muoto tarkasti, mutta yksi alue kerrallaan. Projektiossa voidaan projisoida laajempi alue kerralla, jolloin kappaleen pinnasta laajempi alue pystytään kovettamaan. Materiaaleina valokovetuksessa käytetään polymeeriä, vahaa, keraamia ja biomateriaaleja. (Rashid ym. 2021; Gibson ym. 2014; SFS-EN ISO/ASTM 52900 2022)

Materiaalia lisäävästä valmistuksesta voidaan menetelmästä riippumatta tunnistaa yhteispiirteisesti kaikille sen eri teknologioille yhteiset tuotantovaiheet. Nämä tuotantovaiheet ovat: 1. mallinnus, 2. mallin muuntaminen tulostettavaan muotoon, 3. tiedon siirtäminen valmistuslaitteistolle, 4. valmistuslaitteiston valmistelu 3D-tulostusta varten, 5. tulostus, 6. tulostetun osan poisto valmistuslaitteistosta, 7. osan jälkikäsittely ja 8. tulostetun kappaleen käyttöönotto ja mahdollinen jälkityöstö (Gibson ym. 2014). Osa näistä toiminnoista ovat fyysisiä ja osa digitaalisia. Eri vaiheissa menetelmän käyttöä tarvitaan ihmistä ja osa voidaan joko toteuttaa digitaalisesti tai automatisoida (Gupta ym. 2020). Eri teknologioilla nämä yhteispiirteiset tuotantovaiheet ja niiden edellyttämät toimenpiteet vaihtelevat. Oleellista on huomata, että materiaalia lisäävän valmistuksen perustana toimii valmistuksen digitaalinen määrittely (Tuomi 2003). Se erottaa menetelmän perinteisistä valmistusmenetelmistä.

## **Materiaalia lisäävän valmistuksen mahdollisuudet ja rajoitteet**

Materiaalia lisäävän valmistuksen etuina on tunnistettu sen mahdollisuudet tehostaa toimitusketjun hallintaa, koska sillä voidaan tuottaa tehokkaasti pieniä tuotantomääriä (Holmström ym. 2010), joustavoittaa varastojen toimintaa ja virtaviivaistaa komponenttien tuottamista ja toimitusta tarvitsijalle (Ituarte ym. 2017), valmistaa kappaleet ilman erillisiä työkaluja (Berman 2012; Khajavi ym. 2014), muokata nopeammin valmistettavan kappaleen valmistustietoja, (Holmström ym. 2010) sekä muokata kappaleiden toiminnallista suorituskykyä (Ituarte 2017).

Materiaalia lisäävä valmistus on lähtökohtaisesti yksittäiskappaleiden valmistusta. Sitä ei ole nykymuodossaan suunniteltu massatuotantoon, joka aiheuttaa sen, että materiaalia lisäävän valmistuksen kannalta ei ole järkevää eikä taloudellisesti kannattavaa valmistaa suuria osamääriä (Den Boer ym. 2020; Costabile ym. 2017). Sotilaallisten varaosien tulostuksen kannalta oleellisia rajoitteita on myös eri tulostusmenetelmien rajatut materiaaliveitohdot (Korpela ym. 2020), osien mekaanisten ominaisuuksien rajoitteet (Dilberoglu ym. 2017), 3D-tulostuslaitteiden rajoitettu tuotantokapasiteetti ja osakoko (Den Boer ym. 2020) sekä sertifiointi (Korpela ym. 2020).

Sotilaallisen 3D-tulostuksen yhtenä keskeisenä kiinnostuksen kohteena on ollut varaosien tulostus. Tutkimuksissa on selvitetty tekijöitä, jotka vaikuttavat 3D-tulostuksen käyttöön ja

tekijöihin, jotka vaikuttavat siihen voidaanko tulostusta käyttää osana sotilaslogistiikkaa, erityisesti kunnossapitoa. Tutkimuksissa on tulostettu sotilaallisia varaosia ja tutkittu, voisiko niitä käyttää suunnitellussa käyttökohteessaan. Keskeisenä tuloksena on ollut, että sotilaallisia varaosia voidaan 3D-tulostaa ja niitä voidaan käyttää korvaamaan alkuperäisellä valmistustavalla valmistettuja varaosia. Menetelmän käytön kannalta on havaittu, että suoraan tarpeeseen 3D-tulostettaessa metallista, menetelmän hitaus aiheuttaa viivettä varaosien saannille. (Khajavi ym. 2014; Rautio & Valtonen 2022; Valtonen ym. 2022)

Sotilaallisessa 3D-tulostuksessa on selvitetty mahdollisuutta käyttää valmistuslaitteistoja lähellä joukkoja. Tilapäisvaraosien tulostuksessa ei ole suoraan kyse siitä, voidaanko tuotanto viedä joukon luo, vaan siitä voidaanko ja saadaanko tulostamalla tehtyjä osia, joiden kestävyys ja ominaisuudet eivät välttämättä ole alkuperäisen osan kaltaiset, tulostaa ja käyttää sotilaallisissa järjestelmissä. Sen lisäksi että on epäselvää, saadaanko tällaisia osia käyttää ja kenen päätöksellä, on myös epäselvää mitkä tekijät 3D-tulostuskyvykkyyttä rakennettaessa tulee priorisoida. Nämä kysymykset ovat eri organisaatioissa edelleen tutkittavana.

## **VARAOSAT KUNNOSSAPIDOSSA**

Varaosien toimitusketjua optimoimalla on mahdollista kehittää kunnossapitokyvykkyyttä, lyhentää kunnossapidon läpimenoaikaa ja siten kehittää kaluston käytettävyyttä. Joukkoja tukeva kenttalogistiikka (kunnossapidon taso 1) perustuu vaihtolaitteiden tai varaosien vaihtamiseen ja asentamiseen lähellä joukkoja. Keskuskunnossapidossa (kunnossapidon taso 2) materiaalin käytettävyyttä kyetään palauttamaan käyttämällä kaikkia kunnossapidon lajeja, ml. korjaava kunnossapito (Puolustusvoimat 2003).

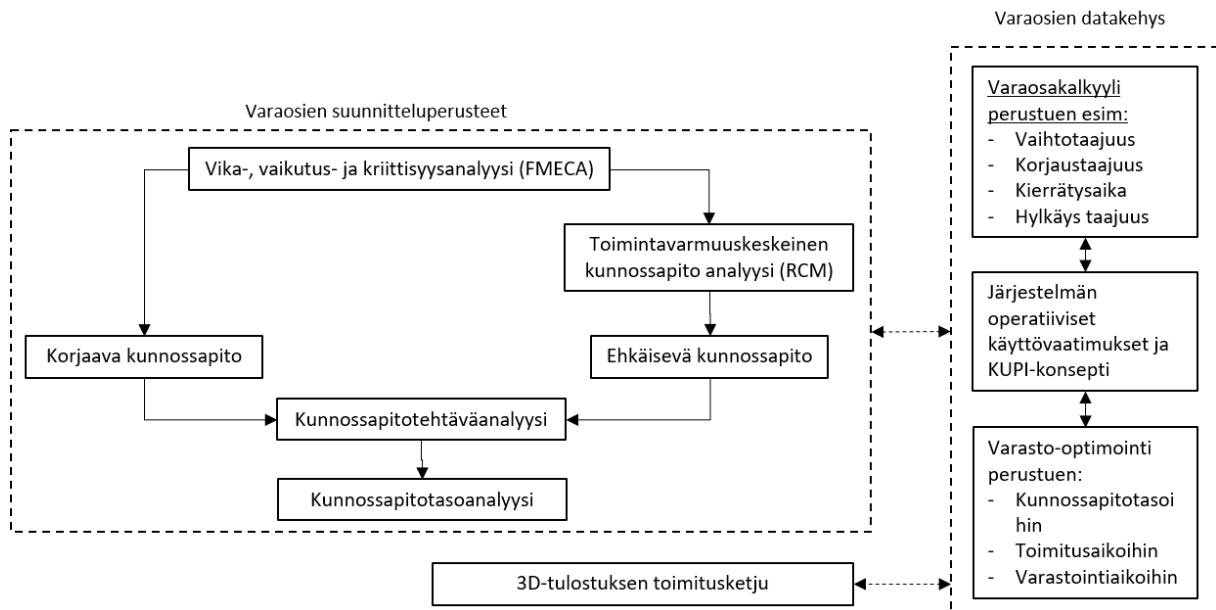
Kunnossapitotasojen porrastus (kunnossapidon porrastus) toimii pohjana kunnossapitojärjestelmälle. Kunnossapitotasomalleja on käytössä useita, kuten esim. 2, 3, 4 tai 5-tasoiset kunnossapitojärjestelmät (United States General Accounting Office 1996; Wilson & David 2018; Integrated Publishing 2023). Huoltotasojen määrästä riippumatta ajatus niiden taustalla on sama: kunnossapitosuoritteiden ja niiden vaatimien resurssien porrastaminen käytettävyyden varmistamisen kannalta tehokkaasti ja siten kunnossapitojärjestelmän suorituskyvyn optimoimiseksi. Kunnossapitosuoritteiden ajallisen keston logistinen viive pitää sisällään mm. vaihtolaitteiden ja varaosien toimitusajan (SFS-EN 13306 2018). Järjestelmän käytettävyyttä ja luotettavuusanalyysin ja palautettavuusvaatimusten perusteella kriittiset varaosat osataan varastoida. Kaupallisten osien ja vaihtolaitteiden osalta on oltava vähintään tiedossa niiden toimitusajankohdat, toimittajat ja mahdolliset tuotantojaksot (obsolenttisuushallinta).

Kunnossapitokonsepti sovitetaan ja suunnitellaan järjestelmän operatiivisen konseptin perusteella. Kunnossapitotasot, niiden määrä ja kunnossapitosuoritteiden jakautuminen näiden kesken mahdollistaa varaosien ja vaihtolaitteiden tilaus- ja toimitusketjujen sekä varastointijärjestelyjen suunnittelun (Blanchard 2014). Yleisesti järjestelmien suunnittelussa on syytä huomioida kaupalliset tuotteet (COTS) sekä muut tuotteet, jotka eivät vaadi erillistä tuotekehitystä (Blanchard 2014; MIL-HDBK-338B 1988). Järjestelmän luotettavuussuunnittelun kannalta on erittäin merkityksellistä, ovatko järjestelmän komponentit (osat, laitteet) käytössä laajasti eri järjestelmissä vai rajoitetusti muutamissa konstruktioissa. Nykymaailmassa teknologian kehitystä ei enää ensisijaisesti ohjaa sotilassovellutukset, vaan siviiliyhteiskunnan vaatimukset (MIL-HDBK-338B 1988).

Varaosien ja vaihtolaitteiden määrittely aloitetaan jo uuden järjestelmän esisuunnitteluvaiheessa ja se on keskeinen osa kunnossapitokonseptia (Kuva 1). Näiden määrä, laatu ja tekniset tiedot (esim. materiaalit, toimittajat, konfiguraatiot, tuotanto ja toimitusajat



jne.) vaikuttavat olennaisesti järjestelmän muuhun suunnitteluun sekä sen haluttuihin ominaisuuksiin, kuten luotettavuus, käytettävyys, kunnossapidettävyys ja ylläpidettävyys (RAMS) (Blanchard 2014; MIL-HDBK-512 2000; MIL-HDBK-338B 1988).



Kuva1: Varaosatoimintojen kehys

Sotilassovellutuksissa ja niihin liittyvissä varaosissa korostuvat kaupallisten valmistusmenetelmien hyödynnettävyyden lisäksi myös kaupalliset materiaalit (MIL-HDBK-338B 1988). Tietyt erityismateriaalit ja niiden tuotanto, vaikka moderneilla valmistusmenetelmillä onkin muuttunut edullisemmaksi, on erittäin kallista (Rittenhouse & Singletary 1969; Gibson ym. 2014; Chua & Leong 2017). Eräs potentiaalinen 3D-tulostamisen ja muiden pikavalmistusmenetelmien sovellutus on ns. pikavaraosat tai tilapäisvaraosat (Salmi & Metsäkortelainen 2018). Tässä konseptissa tuotetaan varaosia huomattavasti alkuperäisvaraosista poikkeavalla laadulla. Tällöin poiketaan varaosan kyvystä ”säilyttää koneen alun perin vaadittu toiminta” (Finnish Standards Association 2010) esimerkiksi sen keston, materiaalin, lämmönjohtumisen tai viimeistelyn osalta. Käytännössä kyseeseen tulee tilanne, jossa on kyettävä vastaamaan kysymykseen ”kuinka huonosti voimme osan tulostaa, jotta se mahdollistaa riittävän toiminta-ajan tehtävän suorittamiseksi”.

Modernien valmistusmenetelmien, kuten 3D-tulostaminen, eduksi on luettava uudet mahdollisuudet valmistusprosessissa, mutta myös muutokset varaosien toimitusketjuissa (Rautio & Valtonen 2022). Viimeisten vuosikymmenien aikana on pyritty kaikenlaisten varastojen minimointiin johtuen niiden sitomasta pääomasta. Toisaalta varastoitujen materiaalien sekä puoli- ja kokovalmisteiden väheneminen on asettanut uudenlaisia vaatimuksia toimitusketjuille (Doldui & Proth 2010). Käytännössä toimitusketjujen on kyettävä toimittamaan tarvittavat tuotteet juuri oikeaan aikaan (JIT), jotta esimerkiksi tuotantoviivästyksiltä vältyttäisiin. Materiaalia lisäävä valmistus muun muassa mahdollistaa valmistuksen lähempänä tarvetta voi tuoda merkittävää joustavuutta varaosien toimituksiin ja niiden varastointeihin. (Khajavi ym. 2014)

Sotilaalliset toimitusketjut varaosien osalta eivät poikkea siviiliteollisuuden vastaavista. Sotilasjärjestelmien suunnittelussa COTS-tuotteiden, komponenttien ja osien kasvu on integroinut myös sotilas- ja siviilitoimitusketjut tiiviimmin yhteen. (Rautio & Valtonen ym. 2022) Erona siviili- ja sotilasjärjestelmiä sekä niiden elinjaksonaikaista varaosalogistiikkaa

suunniteltaessa on mahdolliset taisteluvaurioista johtuvat kulutuspiikit. Taisteluvauriot ovat merkittäviä häiriöitä järjestelmän normaalista kulumasta johtuviin kunnossapito- ja varaosatarpeisiin. Jos samanaikaisesti kansalliset ja globaalit toimitusketjut ovat häiriintyneet, on 3D-tulostamiskyvyllä tuetulla varaosalogistiikalla mahdollista saavuttaa korkeampi kansallinen omavaraisuus ja sotilaallinen huoltovarmuusaste. (Valtonen ym. 2022; Khajavi ym. 2014)

Vaikka 3D-tulostamisella on mahdollista tukea ja täydentää perinteisiä valmistusmenetelmiä sekä kehittää varaosien toimitusketjua, ei sillä kuitenkaan voida eliminoida muilla valmistusmenetelmillä valmistettuja komponentteja. (Gibson ym. 2014) Tämä johtuu mm. sarjatuotantovaatimuksista, joita suuret, esimerkiksi taisteluvaurioista johtuvat tuotantovolyymit edellyttävät. Lisäksi jo tehty tutkimus osoittaa, että myös 3D-tulostuskyky on edullisempaa sekä tehokkaampaa keskittää kuin hajauttaa (Khajavi ym. 2014) Edellä mainituista johtuen, vaikka tulostamalla saavutetaan merkittäviä tuotantonopeuksia ja tuotantokoneisto on helpompi saada liikuteltavaksi, niin olemassa olevilla tulostimilla sekä käyttökonsepteilla ei vielä kyetä tukemaan esimerkiksi operatiivisen sotilasjoukon välittömiä varaosatarpeita kunnossapidossa. (Valtonen ym. 2022)

### **3D TILAPÄISVARAOSIEN TARVETTA SOTILASLOGISTIIKASSA MÄÄRITTÄVÄT TEKIJÄT**

Sotilaalliseen käyttöön 3D-tulostettavien tilapäisvaraosiin liittyvien kriteerien painotus vaikuttaa siihen, miten, millaisilla järjestelmillä ja millaisesta materiaalista osat kannattaa tulostaa sekä siihen, missä valmistus kannattaa toteuttaa. Luvussa kaksi esitetyt materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmät poikkeavat merkittävästi toisistaan. Eri menetelmien materiaalit, materiaalien ominaisuudet ja kerrostustapa vaikuttavat siihen, miten osia kannattaa ja voi valmistaa.

Materiaalia lisäävään valmistukseen liittyvien kriteerien painotuksella voidaan selvittää sitä, millaisia tuotantovalintoja kannattaa tehdä koko materiaalia lisäävän valmistuksen tuotantoketjussa. Osien tulostamisessa lähtökohta valinnalle on, mitkä osat kannattaa mallintaa. Mallintamisen perusteella syntyy valmistustiedot valitulle tulostusmenetelmälle. Tulostusmenetelmä vaikuttaa siihen, mitä materiaaleja voidaan tulostaa. Nämä tekijät vaikuttavat siihen, mitä jälkikäsittelymenetelmiä käytettävään osaan tulee kohdistaa. Kaikki nämä valinnat vaikuttavat siihen, miten tuotantoketjussa eri tekijät painottuvat ja millaisia tuotannollisia valintoja menetelmän käyttöön kannattaa tehdä.

Tutkimuksessa laadittiin tilapäisvaraosien 3D-tulostuksen käyttöön vaikuttavien tekijöiden kriteerit. Kriteerien laatimiseksi pidettiin työpaja, jossa viisi materiaalia lisäävän valmistuksen asiantuntijaa Puolustusvoimista ja Aalto-yliopistosta määrittivät ne kirjallisuuden perusteella tunnistettujen tekijöiden pohjalta. Lähtökohdaksi työpajatyöskentelylle oli tunnistettu neljä kriteeriä: hinta, laatu, toimitusaika ja toimitusvarmuus. Työpajan tuloksena kyselytutkimuksessa käytettäväksi kriteereiksi määrittyivät:

- Tarvittavan kaluston/investoinnin hinta (investment cost)
- Tulostuksen hinta (3D-printing cost)
- Käytettävän materiaalin hinta (material cost)
- Mallinnukseen kuluva aika (3D-modeling time)
- Tulostukseen ja mahdolliseen jälkikäsittelyyn kuluva aika (3D-printing and post-processing time)
- Osan operatiivinen kestävyysaika (operational durability time)

- Valmistusprosessin luotettavuus (reliability of the process)
- Osan tarkkuus ja pinnanlaatu (accuracy and surface quality)

Kriteerien painotusta varten toteutettiin 3D-tulostettujen tilapäisvaraosien tuotantojärjestelmän tärkeysjärjestystä kartoittava kyselytutkimus. Kyselytutkimuksella kartoitettiin, miten asiantuntijat näkevät tilapäisvaraosien 3D-tulostuksen ja siihen liittyvien kriteerien tärkeyden suhteessa muihin kriteereihin. Samalla selvitettiin asiantuntijoiden näkemyksiä siitä, kuinka kauan tilapäisen varaosan tulisi kestää käyttökohteessaan. Kyselytutkimuksen tuloksena muodostettiin tärkeysjärjestys tilapäisvaraosien 3D-tulostamiseen liittyvistä kriteereistä.

Kyselytutkimus toteutettiin Euroopan puolustusviraston (EDA) ja NATO MLCC:n yhdessä keväällä 2023 järjestämässä AM Village 23 tapahtumassa Hollannissa, johon myös Suomi osallistui. Kaikki tapahtumaan osallistuvat organisaatiot olivat sotilaallisen kunnossapidon ja materiaalia lisäävän valmistuksen toimijoita. Osalla toimijoista oli pitkä kokemus materiaalia lisäävästä valmistuksesta ja osalla kokemus oli vähäisempää. Kyselytutkimukseen osallistui yhteensä 37 henkilöä. Kolmen kyselyyn osallistujan vastaus jouduttiin hylkäämään, sillä he eivät olleet noudattaneet kyselyn ohjeita ja olivat laatineet omia kriteerejä arvioitavaksi. Kyselyn vastaajat koostuivat siviiliasiantuntijoista, alkuperäisvaraosien valmistajista, sotilaista kunnossapidon ja varaosalogistiikan osa-alueilta sekä sotilasalan tutkijoista. Osallistujat edustivat seuraavia maita: Tsekki, Puola, Belgia, Yhdysvallat, Ranska, Espanja, Slovakia, Alankomaat, Iso-Britannia, Saksa, Norja, Ruotsi ja Suomi.

Tutkimus toteutettiin pitämällä vastaajille lyhyt aiheen esittely sekä määrittelemällä 3D-tulostettu tilapäisvaraosa: ”Varaosa, joka voidaan tulostaa alkuperäisen osan paikalle, mutta jonka ei tarvitse olla yhtä laadukas kuin alkuperäisosa. Tilapäisvaraosan tulee kyetä toteuttamaan sille suunniteltu tehtävä.” Kyselytutkimuksen taustakysymyksenä kysyttiin vastaajan maan ja tehtävän lisäksi kokemus materiaalia lisäävän valmistuksesta. Kyselyssä vastaajia pyydettiin asettamaan yllä mainitut kriteerit tärkeysjärjestykseen numeroimalla ne siten, että 1 on vastaajan mielestä tärkein ja 8 vähiten tärkein kriteeri. Saaduista numerojärjestyksistä muodostettiin sekä koko vastaajajoukon, että siitä koostettujen pienempien vastaajaryhmien tärkeysjärjestyksen keskiarvo. Keskiarvojen perusteella kyettiin selvittämään, millainen on eri alan toimijoiden näkemysten mukaan tärkeysjärjestys sotilasoperaatioissa tulostettavien tilapäisvaraosien kriteereille. Saatuja keskiarvoja vertailtiin eri ryhmien sekä koko vastaajajoukon välillä, jotta kyettiin selvittämään, mitä eroja eri vastaajaryhmien näkemyksissä on kriteerien tärkeysjärjestysten suhteen (taulukko 1). Kyselyssä vastaajilta kysyttiin arviota siitä, kuinka kauan tilapäisvaraosan tulisi yleisellä tasolla kestää. Vastaajia pyydettiin kirjaamaan lisäksi mahdollisia kommentteja tilapäisvaraosiin liittyen.

## TULOKSET

Kyselytutkimuksen tulosten analysoimiseksi vastaajajoukko jaettiin kolmeen eri ryhmään heidän asemansa perustuvan taustamuuttujan suhteen. Nämä ryhmät olivat:

- **A1** sotilas, kunnossapito (sotilasalalla kunnossapidon työtehtävissä toimiva henkilö)
- **A2** sotilas, tutkija (sotilasalalla tutkijan tehtävissä toimiva henkilö)
- **A3** siviili, AM asiantuntija puolustusteollisuudessa tai AM tuotannossa (AM-alalla asiantuntijatehtävissä työskentelevä henkilö)

Samaa vastaajajoukkoa tarkasteltiin myös materiaalia lisäävän valmistukseen liittyvän, vastaajan itse arvioiman tietämyksen ja kokemuksen perusteella. Tällä tavoin jaetut ryhmät olivat:

- **B1** ei lainkaan tai vähän osaamista ja tietämystä materiaalia lisäävästä valmistuksesta
- **B2** paljon osaamista ja tietämystä materiaalia lisäävästä valmistuksesta

Taulukossa 1 on esitetty 3D-tulostettujen tilapäisvaraosien kriteerien moodit taustamuuttujien (A1-A3 ja B1-B2) suhteen sekä vastaajien vastausten vaihteluväli hakasulkeissa  $[M_{\min}, M_{\max}]$ .

Taulukko 1: Tuotantotekijöiden tärkeysjärjestysten moodit\* ryhmittäin ja vastausten vaihteluväli \*\*

Taustamuuttuja	A			B		
Ryhmä	A1 (n=14)	A2 (n=14)	A3 (n=6)	B1 (n=18)	B2 (n=16)	Koko vastaajajoukon moodi (n=34)
Kriteeri						
Tarvittavan kaluston/investoinnin hinta	6* [4,8]**	8 [4,8]	5 [4,8]	6 [4,8]	8 [4,8]	6 [4,8]
Tulostuksen hinta	7 [5,8]	7 [5,8]	7 [6,7]	7 [5,8]	7 [5,8]	7 [5,8]
Käytettävän materiaalin hinta	8 [4,8]	8 [4,8]	7 [5,8]	8 [5,8]	8 [4,8]	8 [4,8]
Mallinnukseen kuluva aika	3 [3,5]	2 [1,8]	8 [2,8]	3 [1,8]	4 [1,8]	3 [1,8]
Tulostukseen ja mahdolliseen jälkikäsitteilyyn kuluva aika	1 [1,4]	3 [1,6]	3 [1,4]	3 [1,6]	1 [1,4]	3 [1,6]
Osan operatiivinen kestävyysaika	2 [1,6]	1 [1,5]	2 [1,5]	1 [1,5]	2 [1,6]	2 [1,6]
Valmistusprosessin luotettavuus	1 [1,6]	2 [1,4]	1 [1,5]	2 [1,6]	4 [1,5]	1 [1,6]
Osan tarkkuus ja pinnanlaatu	5 [2,8]	5 [3,8]	6 [1,6]	5 [2,8]	5 [1,8]	5 [1,8]

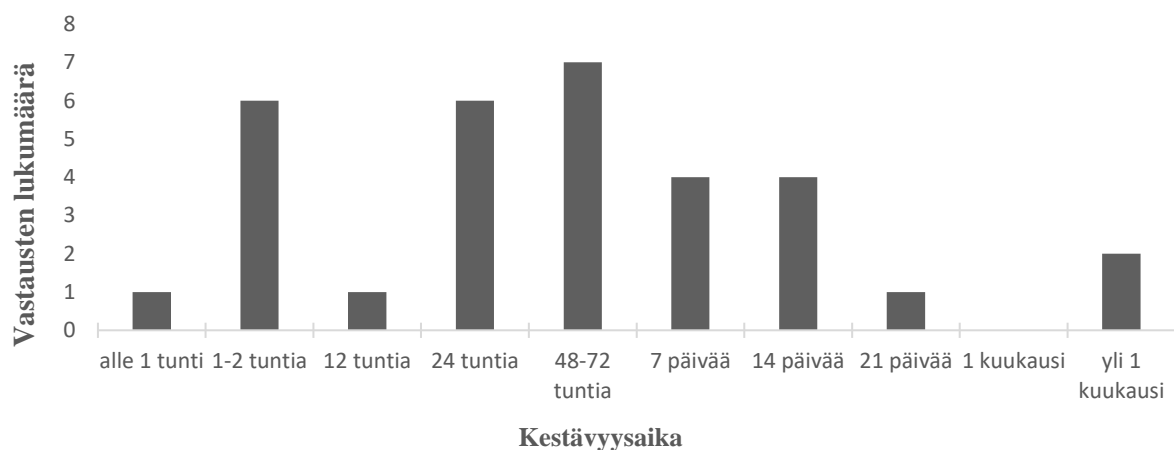
Vastaajaryhmien tulosten luotettavuuden arviointiin käytettiin Kruskal-Wallis testiä, koska se soveltuu erityisesti kyseessä olevan kaltaiselle aineistolle, jossa vastaajat ovat pakotettuja laittamaan vastauksensa järjestykseen. Testillä testattiin, onko taustamuuttujan A perusteella esitettyjen moodien välillä merkittävää eroa. Testin tuloksena saatiin, että H arvo on 0.335 (2, N = 24) ja P-arvo on 0.84578. Testin tuloksen perusteella voidaan sanoa, että vastaajaryhmien vastausten välillä ei ole merkittävää eroa. Tulee kuitenkin huomioida, että testin tulosta voidaan pitää vain suuntaa antavana, otoksen ollessa pieni. Taustamuuttujan B suhteen tarkasteltaessa vastaajien vastauksissa oli nähtävissä enemmän eroavaisuuksia H arvon ollessa 0.1765 (1, N = 16) ja P-arvon 0.67442. Tässäkään tapauksessa ero ei ollut merkittävä.

Taulukosta 1 nähdään, että vastaajat ovat asettaneet valmistusprosessin luotettavuuden tärkeimmäksi, tulostetun osan operatiivisen kestävyysajan toiseksi tärkeimmäksi ja aikaan liittyvät tekijät kolmanneksi tärkeimmäksi kriteeriksi. Kolme tärkeysjärjestyksen viimeiselle sijalle jäävä: investoinnin, tulostuksen sekä materiaalin hinnan kriteerit on sijoitettu viimeiseksi kaikkien vastaajajoukkojen toimesta.

Vastaajaryhmien moodissa on vaihtelua. Suurin vaihteluväli on mallinukseen kuluvaan aikaan liittyvässä kriteerissä sekä osien tarkkuuteen ja pinnanlaatuun liittyvässä kriteerissä. On nähtävissä, että ryhmä A1 on eniten yhtä mieltä mallinnusaikaan liittyvässä tekijässä, muiden vastaajaryhmien vastausten ollessa selvästi enemmän varioitunutta. Pienin vaihteluväli on tulostuksen hintaan liittyvässä kriteerissä. Toiseksi pienin vaihteluväli on investoinnin ja tulostusmateriaalin hintaan liittyen. Ensimmäiseksi, toiseksi ja kolmanneksi tärkeimpien kriteerien arvoissa on vaihtelua. Tarkasteltaessa moodia ja varianssia voidaan todeta, että erityisesti näiden kriteerien kohdalla ei niin tärkeäksi kriteeriksi kirjannut vain muutama vastaaja. Tämä vahvistaa käsitystä siitä, että tärkeimmät kriteerit ja vähiten tärkeät kriteerit on nähty kaikkien vastaajaryhmien osalta samalla tavalla. Tämä vahvistaa tutkimuksen luotettavuuden tarkastelusta saatua tulosta.

Tuloksista havaitaan, että sotilaskunnossapidon toimijoilla 3D-tulostukseen ja jälkikäsittelyyn kuuluva aika on tärkeysjärjestyksessä ensimmäisenä. Sotilaat näkevät aikaan liittyvät tekijät tärkeämpänä kuin sotilastutkijoiden sekä siviiliasiantuntijoiden vastaajaryhmät. Siviiliasiantuntijajoukossa mallinukseen kuluvaan ajan kriteeri oli sijalla 8, kun molemmilla sotilaiden vastaajaryhmillä kriteeri oli kolmen tärkeimmän joukossa. Tämä voi viitata siihen, kuinka yhtenäisesti 3D-mallinnusprosessi vastaajajoukossa mielletään ja ymmärretään. Mallintaminen voidaan arvioida tapahtuvan etukäteen, eikä vasta tarpeen ilmaannuttua. Eri vastaajat voivat myös tarkastella mallintamista siltä kannalta, onko kyse esimerkiksi mallintamisesta mallinnusohjelmistoa käyttäen, vai skannaamalla alkuperäinen osa.

Kyselyssä kysyttiin vapaana kysymyksenä, kuinka kauan tilapäisvaraosan tulisi kestää käyttökohteessaan. Kuvassa 2 on esitetty vastaukset luokiteltuina. Eri käyttökohteissa osan kestävyydelle asetetaan erilaisia vaatimuksia. Sen vuoksi kysymys yleistää tilapäisvaraosan kestoaikaa käyttökohteesta riippumatta. Suurin osa vastaajista (21 vastaajaa) on vastannut, että osan tulee kestää 0-72 tuntia.



Kuva 2: Kyselytutkimukseen osallistuneiden arvio tilapäisvaraosien operatiivisesta minimikestävyysajasta

Valmistettavan kappaleen tarkkuus ja pinnanlaatu oli kaikkien vastaajien yhteisessä keskimääräisessä tärkeysjärjestyksessä sijalla 5, vaikka pinnanlaatu ja pinnan tarkkuusvaatimukset ovat yksi isoimmista AM haasteista varaosien valmistuksessa. Tällä hetkellä 3D-tulostimilla ei saavuteta riittäviä pinnanlaatuja esimerkiksi tiettyjen sovitteiden ja

kulutuspintojen vaatimuksiin, jolloin tulostetut kappaleet vaativat jälkikäsittelynä materiaalia poistavaa työstöä.

Kyselyn tuloksissa on havaittavissa tilapäisvaraosan perusajatus ja etu: kuinka huonosti osa voidaan valmistaa, jotta se silti täyttää osan toiminnalle asetettavat ehdot. Tilapäisvaraosien etu on, että niissä voidaan hyväksyä matalampia laadullisia valmistuskriteerejä. Tästä on myös se etu, että valmistaminen 3D-tulostamalla on mahdollista nopeammin, tehokkaammin ja reaktiivisemmin. Jokaisessa vastaajaryhmässä tulostuksen ja käytettävän materiaalin hinta olivat tärkeysjärjestyksessä viimeisinä.

## **POHDINTA**

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, mitkä tekijät materiaalia lisäävän valmistuksen sotilaallisessa käytössä tulee huomioida valmistettaessa tilapäisiä varaosia. Tutkimuksessa luotiin sotilaallisen 3D-tulostuksen kannalta keskeiset kriteerit ja selvitettiin kyselytutkimuksen perusteella, miten asiantuntijat näkevät tekijöiden painottuvan. Näitä painotuksia tarkastelemalla voidaan ohjata tuotantovalintoja ja suunnitella varaosien valmistusta mukaan lukien toimitusketjun tekijöiden kehittäminen.

Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmät pitävät sisällään paljon erilaisia tulostuslaitteistoja. Nämä laitteistot käyttävät laajaa kirjoa erilaisia materiaaleja. Tästä syystä syntyy väistämättä valintatilanne. Tilapäisvaraosien 3D-tulostaminen sotilaskäyttöön edellyttää tietoa tutkimuksessa käytettyjen kriteerien vaikutuksesta menetelmän käyttöön niin, että koko toimitusketju voidaan toteuttaa valiten oikeat menetelmät, materiaalit ja tulostettavat varaosat sekä kohdentaa menetelmän hyödyntämiseen tarvittavat resurssit oikein.

Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmävalinnan kannalta tulee tunnistaa, milloin tulostuksella pyritään tuottamaan alkuperäiset vaatimukset täyttävä varaosa ja milloin näistä vaatimuksista voidaan joustaa. Alkuperäislaatuisten varaosien tuottaminen voi olla järkevää silloin, kun varaosia ei ole saatavilla ja alkuperäislaatuisten varaosan tuottaminen on mahdollista. Silloin, kun näin ei ole, tulee tarkastella tilapäisvaraosien mahdollisuutta. 3D-tulostuksen kyvykkyyttä kehitettäessä ja tehtäessä päätöksiä menetelmän käytöstä osana sotilaallisten osien tulostusta, tulee tarkastella, mikä järjestelmien ja materiaalien yhdistelmä tuottaa parhaan mahdollisen lopputuloksen. Kunnossapitopäätöksen kannalta tulee olla riittävästi tietoa materiaalia lisäävän valmistuksen mahdollisuuksista alkuperäislaatuisten ja tilapäisvaraosien tekijöistä. Tällöin kunnossapidosta vastaavalla organisaatiolla on valmius tehdä päätös tilapäisvaraosien käytöstä.

3D-tulostuksessa mallin, tulostusmateriaalin ja -menetelmän yhdistelmästä muodostuu valmistettavan kappaleen ominaisuudet. On selvää, että kaikkien eri tulostusteknologioiden ja materiaalien yhdistelmää ei voida hyödyntää kunnossapidossa. Sen vuoksi on valittava mahdollisimman moneen eri käyttötapaukseen soveltuvat valmistusprosessiin liittyvät menetelmät ja materiaalit tai niiden yhdistelmä. Menetelmään liittyvien tekijöiden valintaa ohjaa kaikkien eri tuotantovaiheiden ominaispiirteet. Keskeisten ominaispiirteiden tunnistamisella ja painottamisella voidaan tunnistaa, mitkä teknologiset valinnat voivat tuottaa mahdollisimman hyvän lopputuloksen.

Aiemman tutkimuksen perusteella on tunnistettu, että materiaalia lisäävää valmistusta voidaan käyttää sotilaallisten varaosien tulostukseen. Erilaisiin sotilaallisiin järjestelmiin on asennettu

3D-tulostettuja osia ja niitä on testattu oikeassa käyttöympäristössään. On siis selvää, että 3D-tulostuksella voidaan tuottaa varaosia sotilaskäytössä oleviin järjestelmiin. Aiemman tutkimuksen perusteella ei ole kuitenkaan selvää, miten tilapäisvaraosia voidaan tuottaa siten, että ne ovat riittävän hyviä täyttämään tehtävänsä, vaikka joistain varaosan ominaisuuksista olisi luovuttu.

Tämän tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että 3D-tulostettujen tilapäisvaraosien käytön kannalta materiaalia lisäävän valmistuksen tärkeimmäksi tekijäksi on tunnistettu valmistusprosessin luotettavuus. Materiaalia lisäävän valmistuksen nopea kehitys on johtanut siihen, että sen eri menetelmissä on teknistä epävarmuutta (Madhadevan ym. 2022). Materiaalia lisäävän valmistuksen prosessi on monivaiheinen, jonka vuoksi virhettä voi syntyä sen eri vaiheissa. Mallinnuksessa tehdyt virheet vaikuttavat suoraan lopputuotteeseen (Khosravani ym. 2023). Itse 3D-tulostusvaiheessa voi syntyä eri syistä johtuvia virheitä. Näistä tyypillisimpiä ovat materiaalin yhteenliittämiseen, lämpötilanhallintaan tai tulostuspään toimintaan liittyvät virheet (Wang ym. 2020). Sen vuoksi tulostettujen kappaleiden käyttökelpoisuusaste on ollut erityisen mielenkiinnon kohteena myös sotilaskäytössä. Valmistusprosessin luotettavuus vaikuttaa siihen, miten lopullisten osien käyttäjä voi luottaa menetelmän tuottavan tasalaatuisesti mallin määrittelemiä osia. Kyselyn tulosten perusteella on nähtävissä, että ne, joilla on enemmän kokemusta materiaalia lisäävästä valmistuksesta, eivät näe valmistusprosessin luotettavuutta niin tärkeänä kriteerinä kuin vähemmän materiaalia lisäävästä valmistuksesta kokemusta omaavat vastaajat. Tämä voi johtua siitä, että kokeneemmilla henkilöillä on enemmän tietoa menetelmän soveltuvuudesta tai he luottavat menetelmään enemmän. Joka tapauksessa valmistusprosessin luotettavuuteen liittyvät tekijät johtavat suoraan vastaajien toiseksi tärkeimmäksi nostamaan laatutekijään – osien kestävyys.

Osien kestävyiden osalta tietoa osien ominaisuuksista ja niiden piirteiden vaikutuksesta materiaalia lisäävän valmistuksen käyttöön on rajallisesti. Tilapäisvaraosien kestävyiden osalta jokainen tapaus tulee tarkastella erikseen. Osien kestävyys riippuu useista eri tekijöistä. Mekaaninen rasitus ja sotilastoiminnasta johtuva kineettinen vaikuttaminen voivat muuttaa osan kestävyiden tekijöitä. Järjestelmän käyttäjän oman toiminnan vaikutus järjestelmän osien kestävyteen voi olla merkittävää. Sen vuoksi kestävyystekijöitä 3D-tulostetuissa osissa tunnetaan vielä heikosti. Tämän tutkimuksen perusteella onkin tunnistettu, että olisi hyödyllistä tutkia 3D-tulostettujen tilapäisvaraosien kestävyystekijöitä sotilaskäytössä olevissa järjestelmissä. Tällaisen tutkimuksen perusteella voitaisiin löytää materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmän tai menetelmien ja materiaalien yhdistelmiä, jolla voitaisiin tämän tutkimuksen tekijöitä painottamalla tunnistaa keskeisiä hyötyjä.

Tutkimuksen tulosten perusteella tulostukseen, jälkikäsitteilyyn ja mallinnukseen käytetty aika nähdään luotettavuuden ja kestävyiden jälkeen seuraavaksi tärkeimpinä tekijöinä. Aiemmassa tutkimuksessa on havaittu, että kenttätulostuksen ongelmaksi metallin 3D-tulostuksessa muodostui menetelmän hitaus (Rautio & Valtonen 2022). Tämä tarkoittaa sitä, että menetelmän valinnan kannalta ajan optimointi koko valmistusprosessissa ja jälkikäsitteilyssä vaikuttaa menetelmän käytettävyyteen. Tämä tulos tukee aiempia tutkimustuloksia siitä, että 3D-tulostuksen tuotantoaika vaikuttaa suoraan siihen, onko 3D-tulostus mahdollinen ja järkevä tuotantomenetelmä osille. 3D-tulostustekniikan kehittyminen sekä valmistusoptimointi voi ratkaista aikahaasteita. Mallien muokkaaminen tulostukselle sopivaksi ja laitteiden valmistustehon kehittyminen nykyisestä voi tulevaisuudessa muuttaa merkittävästi yksittäisten osien tulostusaikaa. Kyselytutkimuksessa mallinnukseen käytettävä aika nähtiin tärkeänä.

Tämä tulos tukee aiempien tutkimustulosten havaintoja siitä, että tulostimien edellyttämät 3D-mallit voidaan tehdä jo ennen tarvetta ja laatia niistä digitaalinen kirjasto.

Kyselytutkimukseen osallistuneiden asiantuntijoiden vastausten perusteella voidaan havaita, että kustannustekijöitä ei pidetä niin merkityksellisenä kuin aikaa ja laatua. Ei sotilaallisessa tulostuksessa erityisesti kustannuksia pidetä tärkeänä tekijänä laskettaessa materiaalia lisäävän valmistuksen kannattavuutta (Khajavi ym. 2014). Ukrainan kriisissä on nähtävissä, että hinta ei ole niin tärkeä kuin saatavuus. Tämän kyselyn vastausten perusteella voidaan huomata, että vastaajat ovat samaa mieltä. Tällä perusteella voidaan siis sanoa, että kriisissä saatavuuden haasteen ylittäminen on oleellista. Tulee kuitenkin huomata, että suorituskyvyn rakentamisessa resurssit eivät ole rajattomat. Sotilaallisen suorituskyvyn rakentamisen rahoittaminen tapahtuu normaaliolojen rahoituskehyksessä, jonka vuoksi ei voida sanoa, ettei taloudellisilla tekijöillä olisi merkitystä. Tässä tutkimuksessa viitekehyksenä oli kriisi, jonka seurauksena syntyy tarve tilapäisille varaosille. Tällaisten osien tulostuksen kannalta taloudelliset tekijät eivät tulosten perusteella nouse niin merkityksellisiksi, että niillä kriisitilanteessa olisi oleellista merkitystä.

Tutkimuksen tuloksista nähdään, että vapaasti arvioituna tilapäisvaraosien operatiivinen kestävyysaika vaihtelee runsaasti. On nähtävissä, että selkeää yhtenäistä näkemystä siitä, kuinka kauan tilapäisvaraosan tulisi kestää ei ole. Eri järjestelmillä on erilaiset käyttöprofiilit, jonka vuoksi kestävyysajan yhdenmukaistaminen on vaikeaa. Avointen kysymysten vastausten perusteella vastaajat ovat tehneet karkeita yleistyksiä ilmoittaessaan kestoajaa. Suurin osa vastaajista näki, että tilapäisvaraosien tulisi kestää tunneista noin kolmeen vuorokauteen. Tällä perusteella 3D-tulostuksen menetelmän ja materiaalin tulisi olla eri käyttökohteisiin suunniteltuja. Tämä aiheuttaa järjestelmäkohtaisen suunnittelutarpeen, mikäli tulevissa tutkimuksissa osoitetaan, että 3D-tulostuksella pystytään tuottamaan tällaisia osia.

Vastaajat olivat avointen kysymysten perusteella arvioineet kestävyysaika järjestelmän korjausajan, kunnossapitopaikkojen, vaihtoehtoisten ratkaisujen, varsinaisen varaosan toimitusaikojen, tehtävän suorittamisen kriteerien sekä itse osan ominaisuuksien ja toiminnan näkökulmasta. Vastaajat olivat myös kirjanneet kestoajalle määrittelyjä, kuten: ”3D-tulostetun tilapäisvaraosan toiminta-ajan tulee ylittää siihen asti, kunnes voidaan toteuttaa kunnollinen/varsinainen järjestelmän korjaus”, ”järjestelmä on onnistuttu siirtämään kunnossapitopaikalle/turvalliseen sijaintiin varsinaista huoltoa varten”, ”vaihtoehtoinen ratkaisu järjestelmän korjaamiseen/operaation jatkamiseen on löytynyt”, ”varsinainen varaosa on saatu toimitettua paikalle”, ”tehtävä on saatu suoritettua tai toimintaa kyetään jatkamaan varsinaisen varaosan saapuessa”. Lisäksi erään näkemyksen mukaan uuden tilapäisvaraosan tulostamisajalla on enemmän merkitystä kuin itse toiminta-ajalla: Tilapäisvaraosan ei tarvitse välttämättä kestää kauaa, jos uusi vastaava kyetään tulostamaan suhteellisen nopeasti tilalle. Nämä vastaukset ovat hyviä lähtökohtia tuleville tutkimuksille ja käyttötapausten määrittelylle.

Ukrainan kriisin esimerkit osoittavat, että tutkimuksessa käytettyjen kriteerien painotus muuttuu normaaliolojen varaosavalmistukseen verrattuna. Itse 3D-tulostukseen ja jälkikäsitteilyyn käytettävä aika ratkaisee, kannattaako tilapäisiä varaosia tulostaa. Tulostusajan lyhentyminen edellyttää tulostusteknologian kehittymisen lisäksi sotilaallisilta organisaatioilta ymmärrystä siitä, mitä kannattaa tulostaa ja miten tulostukseen valittujen osien digitaaliset mallit tulee muokata siten, että ne ovat mahdollisimman hyvin tulostettavissa.

Materiaalia lisäävän valmistuksen teknologian käytön optimoiminen osana kunnossapidon



toimintaa parantaa menetelmän käytöstä saatavaa hyötyä. Tilanteessa, jossa jokainen tarpeeseen tuotettu osa on tärkeä joukon toiminnan kannalta ja kunnossapidon kriittisyys mahdollistaa tilapäisvaraosat, tulee niiden käytön mahdollisuutta tarkastella myös uudella digitaalisella valmistusmenetelmällä.

Uuden materiaalin hankinnassa tulee ottaa huomioon teknologian kehittyminen ja materiaalia lisäävän valmistuksen mahdollisuudet tuottaa järjestelmiin varaosia. Varaosien osalta valmistaja voi osoittaa järjestelmästäan 3D-tulostettavissa olevat osat. Tilapäisvaraosien tarkastelu voidaan tehdä jo ennen kriisiä, jolloin valmius materiaalia lisäävän valmistuksen käyttöön paranee. Tuotantokyvyn luomisessa voidaan tarvittaessa huomioida yhteiskunnassa jo oleva kapasiteetti ja tehdä tarvittavia täydennyksiä sotilaallisen tulostuksen tarpeisiin.

## LÄHTEET

Ahn, Don-Gyu (2021). Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8, 703-742. doi:<https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>

Baranov, A., Y. Baranov, O. Brychynskyi, V. Mishchenko & O. Burashnikov (2023). Justification of the initial principles of planning the need for spare parts for engineering equipment recovery. *The scientific heritage*, 114, 60-63.

Berman, Barry (2012). 3D-printing; The new industrial revolution. *Business horizons*, 55(2), 155-162.

Blanchard, Benjamin (2014). *Logistics Engineering and Management*. Essex: Pearson Education Limited.

Busachi, Alessandro, Daniel Kuepper, Jacopo Brunelli, Wilderich Heising, Clemens Moeller, Drosten Fisher, Chris Watts & Richard Drake (2018). *Modelling Applications of Additive Manufacturing in Defence Support Services: Introducing the AM - Decision Support System*. STO-MP-AVT-267, NATO STO, doi:<https://doi.org/10.14339/STO-MP-AVT-267-03B-PDF>.

Chowdhury, Sohini, N. Yadaiah, Chander Prakash, Seeram Ramakrishna, Saurav Dixit, Lovi Gupta & Dharam Buddhi, (2022). Laser powder bed fusion: a state-of-the-art review of the technology, materials, properties & defects, and numerical modelling. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 2109-2172.

Chua, Chee & Kah Leong (2017), *3D Printing and Additive Manufacturing: Principles And Applications*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

Costabile, G., M. Fera, F. Fruggiero, A. Lambiase & D. Pham (2017). Cost models of additive manufacturing: A literature review. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8, 263–282.

Den Boer, Jelmar, Wim Lambrechts & Harold Krikke (2020). Additive manufacturing in military and humanitarian missions: Advantages and challenges in the spare parts supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120301.

Department of Defence (2021). *Department of Defense Additive Manufacturing Strategy*. Washington DC: Strategic Technology Protection and Exploitation Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering.

Dilberoglu, Ugur, Bahar Gharehpapagh, Ulas Yaman & Melik Dolen (2017). The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545 – 554.

Doldui, Alexandre & Jean-Marie Proth (2010). *Supply Chain Engineering - Useful Methods and Techniques*. London: Springer.

Durach, Christian, Stefan Kurpjuweit & Stephan Wagner (2017). The impact of additive manufacturing on supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 47(10), 954-971.

Elkaseer, Ahmed, Karin Chen, Jan Janhsen, Oliver Refle, Veit Hagenmeyer & Steffen Scholz (2022). Material jetting for advanced applications: A state-of-the-art review, gaps and future directions. *Additive Manufacturing*, 60, part A, 103270  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103270>.

Feldman, Amy (2022). Putting 3D Printers To Work In Ukraine's War Zone. <https://www.forbes.com/sites/amyfeldman/2022/03/31/putting-3d-printers-to-work-in-ukraines-war-zone/>, (5.8.2023).

Gibson, Ian, David Rosen & Brent Stucker (2014). *Additive manufacturing technologies; 3D printing, Rapid prototyping and direct digital manufacturing*, New York: Springer-Verlag.

González, David & Almudena Álvarez (2018). *Additive Manufacturing Feasibility Study & Technology Demonstration*. Bryssel: European Defence Agency.

Gupta, Nikhil, Satish Bukka, Akash Tiwari & Ramesh Karri (2020). Additive Manufacturing Cyber-Physical System: Supply Chain Cybersecurity and Risks, *IEEE Access*, 8, 47322  
doi:10.1109/ACCESS.2020.2978815.

Harju, Jukka (2022). Suomalaiset 3d-tulostavat osia Ukrainassa käytettäviin kranaatteihin. Helsingin Sanomat, <https://www.hs.fi/kotimaa/art-2000009202252.html>, (7.8.2023)

Hasselbach, Christoph (2023). Polish-German repair workshop for Ukrainian tanks stalled. Deutche Welle, [www.dw.com/en/polish-german-repair-workshop-for-ukrainian-tanks-stalled/a-66178032](http://www.dw.com/en/polish-german-repair-workshop-for-ukrainian-tanks-stalled/a-66178032), (1.8.2023)

Heikkilä, Jussi & Mikko Ketokivi (2009). *Tuotanto murroksessa - strategisen johtamisen uusi haaste*. Helsinki, Talentum.

Heinen, Jakob & Kai Hober (2019). Assessing the potential of additive manufacturing for the provision of spare parts. *Journal of Operations Management*, 65(8), 810-826.

Hokkanen, Mervi & Samu Rautio (2018). *Materiaalia lisäävän valmistuksen käyttö sotilaslogistiikassa - Feasibility Study*, julkaisematon, Ylöjärvi: Puolustusvoimien tutkimuslaitos.

Holmström, Jan, Jouni Partanen, Jukka Tuomi & Manfred Walter (2010). Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 21(6), 687-697.

Integrated Publishing (2023). Maintenance Levels, <https://navyaviation.tpub.com/12324/css/Maintenance-Levels-11.htm>, (17.8.2023)

Ituarte, Inigo (2017). *From rapid prototyping to digitalization: Steps on industrializing additive manufacturing*. Helsinki: Aalto -yliopiston julkaisusarja, Väitöskirja, 69/2017.

Ituarte, Inigo, Siavash Khajavi & Mika Salmi (2017). Current and Future Business Models for 3D Printing Applications, Teoksessa Ballardini, Rosa, Marcus Norrgård & Jouni Partanen (toim.), *3D Printing, Intellectual Property and Innovation: Insights from Law and Technology*. Alphen aan den Rijn: Wolters Kluwer, 33-62.

Khajavi, Siavash, Jouni Partanen & Jan Holmström (2014). Additive manufacturing in the spare parts supply chain, *Computers in industry*, 68(1), 50-63.

Khosravani, Mohammad, Payam Soltani & Tamara Reinicke (2023). On the modeling of additive manufacturing: Printing process and printed structures. *Mechanics Research Communications*, 131, 1104144, ISSN 0093-6413  
<https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2023.104144>.

Knofius, Nils, Matthieu van der Heijden, Andrei Sleptchenko & W.H.M. Zijm (2021). Improving effectiveness of spare parts supply by additive manufacturing as dual sourcing option. *OR Spectrum*, 43, 189-221, doi:<https://doi.org/10.1007/s00291-020-00608-7>

Korpela, Markus, Niko Riikonen, Heidi Piili, Antti Salminen & Olli Nyrhilä (2020). Additive Manufacturing - Past, Present, and the Future. Teoksessa Collan, Mikael & Karl-Erik Michelsen (toim.), *Technical, Economic and Societal Effects of Manufacturing 4.0*, Cham: Palgrave Macmillan, 17-41.

Kristiawan, Ruben, Fitriani Imaduddin, Dody Ariawan, Ubaidillah Sabino & Zainal Arifin (2021). A review of the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, material, and printing parameters. *Open Engineering*, 11(1), 639-649, DOI:10.1515/eng-2021-0063.

Kunovjanek, Maximilian, Nils Knofius & Gerald Reiner (2022). Additive manufacturing and supply chains— a systematic review. *The Management of Operations*, 33(13), 1231-1251, doi:<https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1857874>.

Li, Ming, Wenchao Du, Alaa Elwany, Zhijian Pei & Chao Ma (2020). Metal Binder Jetting Additive Manufacturing: A Literature Review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142 (9), 090801, doi:<https://doi.org/10.1115/1.4047430>

Liu, Q., R. Djugum, S. Sun, K. Walker, J. Choi & M. Brandt (2017). Repair and Manufacturing of Military Aircraft Components by Additive Manufacturing Technology, *17th Australian International Aerospace Congress*, Engineers Australia, Royal Aeronautical Society, 363-368, <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.737547345073266>.

Mahadevan, Sankaran, Paromita Nath & Zhen Hu (2022). Uncertainty Quantification for Additive Manufacturing Process Improvement: Recent Advances. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems part B -Mechanical Engineering*, 8 (1), 010801, <https://doi.org/10.1115/1.4053184>

Mecheter, Asma, Shaligram Pokharel & Faris Tarlochan (2022). Additive Manufacturing Technology for Spare Parts Application: A Systematic Review on Supply Chain Management, *Applied Sciences*, 12(9), 4160, doi:<https://doi.org/10.3390/app12094160>

Metsä-Kortelainen, Sini, Joni Reijonen, Tuomas Riipinen, Antti Vaajoki, Pasi Puukko, Mika Salmi, Sergei Chekurov, Roy Björkstrand, Niklas Kretschmar, Jan Akmal, Tuomas Puttonen & Jouni Partanen (2020). *New business from digital spare parts*, Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland.

MIL-HDBK-338B (1988). *Military Handbook Electronic Reliability Design Handbook*, Washinton D.C: US Department of Defense.

MIL-HDBK-512 (2000). *Department of Defence - Parts Management*, Washinton D.C: US Department of Defence.

Montero, Joaquin, K. Paetzold, M. Bleckmann & Jens Holtmannspoetter (2018). Re-design and Re-manufacturing of Discontinued Spare Parts Implementing Additive Manufacturing in the military field. *International design Conference*. The DesignSociety, 1269-1278, doi:<https://doi.org/10.21278/idc.2018.0444>

Naghshineh, Bardia, Miguel Fragoso & Helena Carvalho (2023). Rethinking Additive Manufacturing for Spare Parts Supply Chain Management. *Research-Technology Management*, 66 (4), 38-47, doi:<https://doi.org/10.1080/08956308.2023.2207970>.

NATO (2012). *NATO Logistics Handbook*. Bryssel: NATO HQ, Defence Policy and Planning Division, Logistics Capabilities Section.

Pham, D. & R. Gault (1998). A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38 (10-11), 1257-1287.

Pinçe, Çerağ, Laura Turrini & Joern Meissner (2021). Intermittent demand forecasting for spare parts: A Critical review. *Omega*, 105, 102513, ISSN 0305-0483.

Puolustusvoimat (2003). *Kunnossapito-opas*. Helsinki: Edita prima.

Rashid, Ans, Waqas Ahmed, Muhammad Khalid & Muammer Koç (2021). Vat photopolymerization of polymers and polymer composites: Processes and applications. *Additive Manufacturing*, 47, 102279, doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102279>

Rautio, Samu & Valtonen Ilari (2022). Supporting military maintenance and repair with additive manufacturing. *Journal of Military Studies*, 11(1), 23-36.

Rittenhouse, John & John Singletary (1969). *Space Materials Handbook*, Third Edition. National Aeronautics and Space Administration, National Aeronautics and Space Administration.

Salmi, Mika, Jouni Partanen, Jukka Tuomi, Sergei Chekurov, Roy Björkstrand, Eero Huotilainen, Kirsi Kukko, Niklas Kretschmar, Jan Akmal, Kalle Jalava, Satu Koivisto, Matti Vartiainen, Sini Metsä-Kortelainen, Pasi Puukko, Ari Jussila, Tuomas Riipinen, Joni Reijonen, Hannu Tanner & Markku Mikkola (2018). *Digitaaliset varaosat*. Espoo: Aalto University, VTT Technical research Centre of Finland, <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-603746-2>.

SFS-EN 13306 (2018). SFS-EN 13306 *Kunnossapito. Kunnossapidon terminologia*, Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO/ASTM 52900, (2022), *Materiaalia lisäävä valmistus. Lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Perusteet ja sanasto*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Stucker, B. & Janaki Gabbita (2007). Layer-based additive manufacturing technologies. Teoksessa Groza Joannar, James Shackelford, Enrique Lavernia & Michael Powers (toim.), *Materials Processing Handbook*. Boca Raton: CRC, 649-680.

Tuomi, Jukka (2003). *Rapid Prototyping Applications and Effects of the Applications on Companies' Product Development Processes*. Tekniikan lisesiaatintyö. Helsinki: Helsinki University of Technology.

United States General Accounting Office (1996). *Air Force Maintenance - Two Level Maintenance Program Assessment*. Washington, D.C.: United States General Accounting Office.

Valtonen, Ilari, Samu Rautio & Juha-Matti Lehtonen (2022). Designing resilient military logistics with additive manufacturing. *Continuity & Resilience Review*, 5(1), 1-16, ISSN: 2516 7502

Valtonen, Ilari, Samu Rautio & Mika Salmi (2022). Capability Development in Hybrid Organizations - Enhancing Military Logistics with Additive Manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, (7), 1037-1052.

Verma, P. (2022). *How the 3D-printing community worldwide is aiding Ukraine*. The Washington Post. <https://www.washingtonpost.com/technology/2022/06/12/3d-printers-ukraine-war-supplies/> (20.8.2023).

Wang, Zhi, Meishen Xie, Yuanyuan Li, Weiwen Zhang, Chao Yang, Lauri Kollo, Jürgen Eckert & Konda Gokuldoss Prashanth (2020). Premature failure of an additively manufactured material. *NPG Asia Mater*, 12 (30), <https://doi.org/10.1038/s41427-020-0212-0>.

Westerweel, Bram, Rob Basten, Jelmar den Boer & Geert-Jan van Houtum (2020). Printing Spare Parts at Remote Locations: Fulfilling the Promise of Additive Manufacturing. *Production and Operations Management*, 30(6), 1615-1632.

Wilson, David (2018). The Anatomy of Two-Level Maintenance in Multi-Domain Battle. *Army Sustainment magazine*, 32-35, [https://www.army.mil/article/198430/the\\_anatomy\\_of\\_two\\_level\\_maintenance\\_in\\_multi\\_domain\\_battle](https://www.army.mil/article/198430/the_anatomy_of_two_level_maintenance_in_multi_domain_battle). (12.8.2023)

Yi, Shuping, Fei Liu, Jin Zhang & Shiquan Xiong (2004). Study of the key technologies of LOM for functional metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 150 (1-2), 175-181.