



**Aalto-yliopisto**  
Insinööritieteiden  
korkeakoulu

Joonas Lehtinen

## **Monimateriaalitulosus ja älykkäät digitaaliset varaosat**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 17.06.2019

Valvoja: Professori Jouni Partanen

Ohjaajat: TkT Mika Salmi, DI Tuomas Puttonen

---

**Tekijä** Joonas Lehtinen

---

**Työn nimi** Monimateriaalitulosustus ja älykkäät digitaaliset varaosat

---

**Maisteriohjelma** Koneenrakennustekniikka

**Koodi** ENG25

---

**Työn valvoja** Professori Jouni Partanen

---

**Työn ohjaaja(t)** TkT Mika Salmi, DI Tuomas Puttonen

---

**Päivämäärä** 17.06.2019

**Sivumäärä** 54

**Kieli** suomi

---

### Tiivistelmä

Tämä työ käsitteli monimateriaalitulosusta ja älykkäitä digitaalisia varaosia. Työ on jaettu teoriaosuuteen, jossa esitellään aiheeseen liittyvä tutkimus, ja käytännön osuuteen.

Työssä valmistettiin materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä (AM, Additive manufacturing) älykäs osa, jolle suoritettiin erilaisia reaktiota mittaavia kokeita. Älykkäällä osalla tarkoitetaan osaa, joka antaa tietoa itsestään ja ympäristöstään. Älykkäänä komponenttina osassa oli RuuviTAG-anturialusta, joka lähetti mittaustietoa Bluetoothin välityksellä. RuuviTAG sisälsi kaksi anturia: kiihtyvyyssanturin ja ympäristönmittausanturin. Tutkimuksessa haluttiin selvittää, kuinka hyvin mittauksista saadut tulokset vastaavat todellisuutta. Mahdollisimman tarkkoista tuloksista on hyötyä muun muassa tuotantoprosessien valvonnassa esimerkiksi digitaalisen kaksosen avulla.

Tutkimustuloksista voitiin todeta, että anturien lähettämä data vastasi hyvin todellisuutta kiihtyvyyden ja paineen osalta. Ilmankosteusanturin tulokset eivät olleet luotettavia ja lämpötilanmittausanturi toimi hieman viiveellä. Lämpötilaa on kuitenkin mahdollista ennustaa, jos tiedossa on osan geometria, materiaali ja anturin paikka osassa.

---

**Avainsanat** Materiaalia lisäävä valmistus, 3D-tulosustus, Monimateriaalitulosustus, Älykkäät osat, Digitaaliset varaosat

---

---

<b>Author</b> Joonas Lehtinen		
<b>Title of thesis</b> Multi material printing and intelligent digital spare parts		
<b>Master programme</b> Mechanical engineering		<b>Code</b> ENG25
<b>Thesis supervisor</b> Professor Jouni Partanen		
<b>Thesis advisor(s)</b> Mika Salmi, D.Sc (Tech.), Tuomas Puttonen, M.Sc (Tech.)		
<b>Date</b> 17.06.2019	<b>Number of pages</b> 54	<b>Language</b> Finnish

---

### **Abstract**

The topic of this master's thesis was multi material printing and intelligent digital spare parts. The thesis is divided into two sections: theory and practical part. In theory section the research about the subject is introduced.

In this thesis an intelligent spare part was designed and manufactured using additive manufacturing (AM). Also, handful of tests were performed on the intelligent part. Intelligent part means a part that gives data about itself and its environment. The intelligence to the part was brought with RuuviTAG-sensor platform, which sent data through Bluetooth. It had two sensors: acceleration sensor and environmental sensor. The point of the research was to find out how the data from the sensors equated to the real-world tests. Getting reliable data is important for example in manufacturing process monitoring using a digital twin.

From the research it could be concluded that the sensors gave reliable enough data from acceleration and pressure. The air humidity sensor data wasn't reliable and there was some lag in the data from the temperature sensor. The temperature is however possible to forecast if enough information is known about the part, such as geometry, material and where the sensor is placed within the part.

---

**Keywords** Additive Manufacturing, 3D Printing, Multi Material Printing, Intelligent Parts, Digital Spare Parts

---

## **Alkusanat**

*Tämä diplomityö tehtiin Aalto-yliopiston Insinöörیتieteiden korkeakoulun tuotantotekniikan laitokselle.*

*Kiitän professori Jouni Partasta työni valvomisesta.*

*Kiitos Tuomas Puttoselle ja Mika Salmelle työn ohjaamisesta, kannustavista kommenteista, sekä kirjoitustilojen järjestämisestä.*

*Kiitos myös avuliaalle Konetekniikka 3-rakennuksen muulle henkilökunnalle.*

*Kiitos perheelleni ja ystäväilleni tuesta prosessin aikana.*

Espoo 17.6.2019

Joonas Lehtinen

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Lyhenteet

1	Johdanto .....	1
2	Materiaalia lisäävä valmistus .....	3
2.1	Yleistä .....	3
2.2	AM-pohjainen suunnittelu (Design for AM) .....	5
2.3	AM-tekniikat .....	6
2.3.1	Materiaalin pursotus (Material Extrusion) .....	6
2.3.2	Valokovetus altaassa (Vat Photopolymerization) .....	8
2.3.3	Jauhepetisulatus (Powder Bed Fusion) .....	9
2.3.4	Materiaalin suihkutus (Material Jetting) .....	10
2.3.5	Sideaineen suihkutus (Binder Jetting) .....	11
2.3.6	Kerros laminointi (Sheet Lamination) .....	12
2.3.7	Suorakerrostus (Directed Energy Deposition) .....	13
2.4	AM-sovellukset .....	14
2.4.1	Prototyypin pikavalmistus (Rapid Prototyping) .....	14
2.4.2	Tuotannon apuvälineiden pikavalmistus (Rapid Tooling) .....	14
2.4.3	Suoravalmistus (Rapid Manufacturing) .....	15
3	Monimateriaalitulos .....	16
3.1	Yleistä .....	16
3.2	AM-tekniikat ja monimateriaaliosien valmistustavat .....	19
3.3	Älykkäät osat .....	21
3.3.1	Komponenttien upotus .....	21
3.3.2	Sähköä johtavat musteet .....	23
3.3.3	Pinnoitteet .....	24
4	Digitaaliset varaosat .....	25
4.1	AM-pohjainen toimitusketju .....	25
4.2	Varastonhallinta .....	27
4.3	Käyttöönnoton ongelmat .....	28
5	Tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät .....	29
5.1.1	Anturialustan spesifikaatiot .....	29
5.1.2	Älykkään osan rungon vaatimukset .....	29
5.1.3	Älykkään osan rungon suunnittelu .....	30
5.1.4	Älykkään osan rungon kehitysideat .....	32
5.2	Älykkään osan valmistus .....	32
5.3	Älykkään osan tukirakenteiden liuottaminen .....	33
6	Tutkimustulokset ja tulosten käsittely .....	34
6.1	Älykkään osan tulos .....	34
6.2	Älykkään osan tukirakenteiden liuottaminen .....	37
6.3	Kokeet älykkäälle osalle .....	40
6.3.1	Lyhyet reaktiokokeet .....	40
6.3.2	Pitkä seurantakoe .....	44
7	Yhteenveto .....	49
	Lähdeluettelo .....	51

## **Lyhenteet**

AM	Additive Manufacturing – Materiaalia lisäävä valmistus
CAD	Computer Aided Design – Tietokoneavusteinen suunnittelu
CM	Conventional Manufacturing – Perinteinen valmistus
FDM	Fused Deposition Modeling
MMAM	Multiple Material Additive Manufacturing – Monimateriaalitulos
SLA	Stereolitografia
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Stereolitografia-tiedostoformaatti

# 1 Johdanto

Materiaalia lisäävä valmistus (AM, Additive Manufacturing) tai 3D-tulostus on joukko teknologioita, joissa digitaalisesta 3D-mallista valmistetaan kolmiulotteinen fyysinen kappale kerros kerrokselta, joka mahdollistaa monimutkaistenkin geometrioiden valmistuksen. Materiaalia lisäävään valmistukseen on aikaisemmin viitattu termillä rapid prototyping, sillä alun perin se suunniteltiin nopeiden prototyyppien valmistukseen. Tähän tarkoitukseen sitä on käytetty jo vuodesta 1987, kun ensimmäiset stereolitografia-teknologiaan perustuvat koneet tulivat markkinoille. Muita käyttökohteita ovat tuotannon apuvälineiden valmistus ja lopputuotteet. (Gibson et al. 2010)

AM-teollisuuden arvon on arvioitu nousevan 26 miljardiin dollariin vuoteen 2022 mennessä. Vuonna 2016 teollisuuden arvo oli 6 miljardia dollaria. Nopean nousun selittäväenä tekijänä on vaihdos prototyyppien valmistuksesta lopputuotteiden valmistukseen, joissa suurimpina teknologioiden soveltajina ovat ilmailu-, ajoneuvo- ja lääketieteen teollisuudet. (Wu, et al. 2017) Tulevaisuudessa pystytään valmistamaan osia entistä monimutkaisemmilla materiaaliominaisuuksilla, joka tulee mahdollisesti entisestään kasvattamaan AM-teollisuuden arvoa.

Monimateriaalitulostus (MMAM, Multiple Material Additive Manufacturing (Vaezi et al. 2019)) eli useiden materiaalien käyttäminen AM-prosesseissa mahdollistaa monimutkaisuuden materiaaliin ja sen koostumukseen. Tarkkaa määritelmää sille, mikä lasketaan monimateriaalitulostukseksi ei ole, vaan eri lähteet määrittelevät sen hieman eri tavalla. Tässä työssä kaikki AM-prosessit, joissa on käytetty kahta tai useampaa materiaalia, on luokiteltu monimateriaalitulostukseen. Tähän kuuluvat silloin myös upotetut komponentit ja musteet ja tätä kautta älykkäät osat, joilla tarkoitetaan osia, jotka antavat tietoa itsestään ja ympäristöstään. Sisäänrakennettu älykkyys mahdollistaa muun muassa osien kunnon seuraamisen, sekä yksilöimisen. Passiivista älyä voidaan lisätä myös erilaisilla pinnoitteilla, joilla voidaan seurata osien kuntoa.

Älykkyyttä olisi mahdollista hyödyntää myös AM-valmisteisissa varaosissa. Digitaaliset varaosat on konsepti, jossa varaosien tiedot säilytetään ja lähetetään digitaalisesti. Teknologian tutkimuskeskus VTT ja Aalto-yliopisto yhdessä yritysten kanssa selvittivät kaksi vuotta kestäneessä projektissa, kuinka yritykset mahdollisesti voisivat saada digitaalisista varaosista kilpailuetua. Projektin aikana valmistettiin 20 erilaista varaosaa AM-teknologioilla. (Salmi et al. 2018.) Tässä työssä käytiin läpi eri tutkimuksissa esiteltyjä digitaalisten varaosien hyötyjä liiketoiminnalle, sekä konseptin nykytilaa.

Tämän työn tarkoituksena on antaa viitteitä siitä, miten älykkäitä osia voidaan soveltaa eri teollisuudenaloilla ja kuinka ne mahdollisesti voisivat parantaa liiketoimintaa. Osiin lisätty älykkyys mahdollistaa muun muassa niiden alkuperäisyyden vahvistamisen, käyttöympäristön olosuhteiden seuraamisen ja osien kunnonvalvonnan. Lisäksi esimerkiksi lääketieteen sovelluksissa niihin voidaan sitoa potilaskohtaista tietoa. Reaaliaikaisen tiedon saaminen osista mahdollistaa prosessien kehittämisen digitaalisen kaksosen avulla. Digitaalinen kaksonen on reaaliaikainen digitaalinen kopio tosimaailman osasta tai prosessista.

Työ alkaa teoriaosuudella. Toisessa luvussa esitellään materiaalia lisäävä valmistus ja verrataan sitä muihin valmistusmenetelmiin. Lisäksi esitellään materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien peruseriaatteet ja yleisimmät sovellukset. Kolmas luku käsittelee monimateriaalitulostusta. Siinä esitellään teknologioissa käytetyt materiaalit ja mitä

mahdollisuuksia useat materiaalit tarjoavat valmistuksessa. Lisäksi esitellään muutamia tapoja monimateriaalikappaleiden valmistukseen eri AM-teknologioilla. Älykkäät osat ovat myös tämän luvun alla ja niitä käsitellään case-esimerkkien kautta. Neljäs luku käsittelee digitaalisia varaosia. Siinä käydään läpi perinteisiin menetelmiin perustuvan toimitusketjun ja AM-toimitusketjun eroja, sekä konseptin tämän hetkistä tilaa.

Viides ja kuudes luku sisältävät diplomityön käytännön osuuden. Tässä diplomityössä älykäs osa valmistettiin tyypilliseen AM-prosessiketjun tapaan, joka lähtee liikkeelle osan suunnittelusta päättyen valmiiseen osaan. Valmistuksen aikaisista prosesseista, kuten tulostus ja tukirakenteiden liuottaminen, kerättiin dataa osan sisään upotetun anturialustan avulla. Osa itsessään oli geneerinen osa, joka suunniteltiin sille tehtäviä kokeita varten, mutta design on helposti muokattavissa erilaisiin käyttötarkoituksiin. Kokeen aikaiset tapahtumat kirjattiin ylös sekuntikellon avulla ja niitä verrattiin anturista saatuun dataan. Tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin anturin lähettämä data vastaa todellisuutta. Mitä todenmukaisempaa dataa saadaan, sitä paremmin prosesseja ja osia voidaan mahdollisesti parantaa. Tutkimustulokset on esitetty ja analysoitu luvussa tutkimustulokset ja tulostenkäsittely.



## 2 Materiaalia lisäävä valmistus

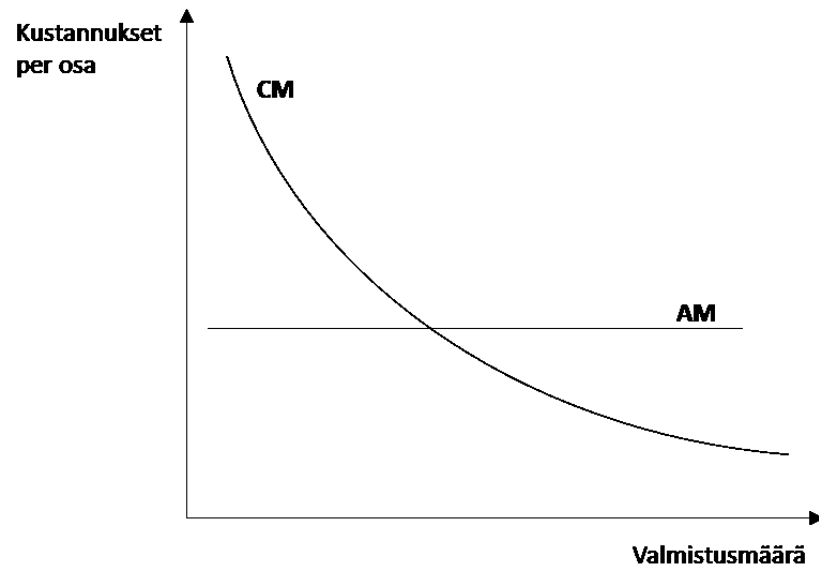
Tässä luvussa esitellään materiaalia lisäävä valmistus ja miten se eroaa muista valmistusmenetelmistä. Lisäksi esitellään AM-teknologiat, sekä miten materiaalia lisäävää valmistus voidaan huomioida suunnittelussa. Lopuksi esitellään tyypillisimmät AM-sovellukset.

### 2.1 Yleistä

Valmistaminen on prosessi, jossa tyypillisesti raakamateriaaleista luodaan osaprosessien kautta jokin valmiste. Jokainen näistä prosesseista tuo lisäarvoa valmisteelle. Valmistamista vastaava englanninkielinen termi ”manufacture” esiintyi ensimmäisen kerran englanninkielessä vuona 1567. Termi on johdettu latinan kielen sanasta ”manu factus”, joka tarkoittaa käsin tehtyä. (Kalpakjian, Schmid et al. 2014) Valmistusmenetelmät voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: materiaalia poistava valmistus (Subtractive Manufacturing), muotoon valmistus (Formative Manufacturing) ja materiaalia lisäävä valmistus. Kahdesta ensin mainitusta käytetään myös yhteistä termiä perinteinen valmistus (CM, Conventional Manufacturing).

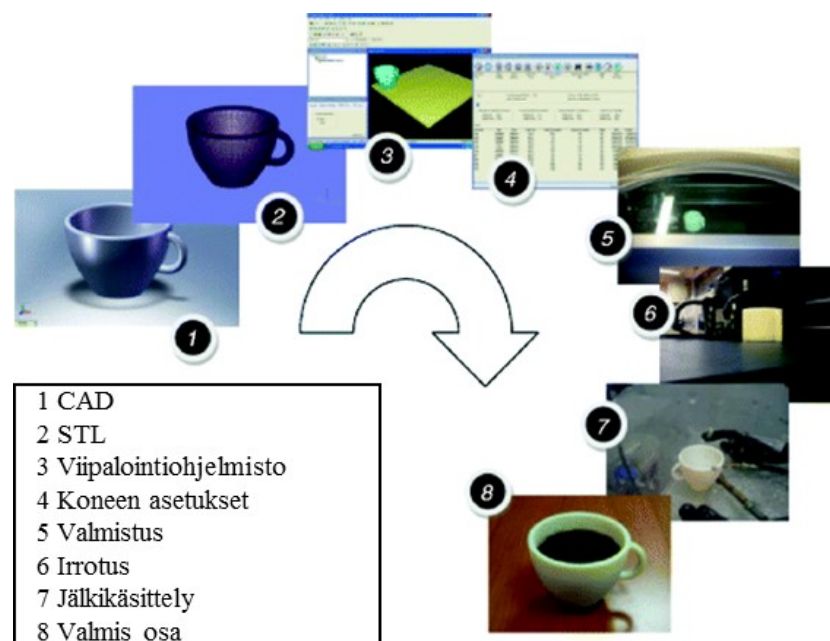
Materiaalia poistavaa valmistusta ovat muun muassa, jyrsintä, poraus, hionta ja sorvaus. Siinä lopullinen osan muoto saavutetaan poistamalla materiaalia eri prosessein kiinteästä materiaalipalasesta. Menetelmä soveltuu parhaiten, kun valmistetaan pieniä tai keskisuuria määriä osia, joilla on yksinkertaiset geometriat. Muotoon valmistusta ovat muun muassa takominen ja eri valutekniikat, joissa materiaalia syötetään muotteihin, joissa osa saa muotonsa. Valamisessa on korkeat alkukustannukset, sillä muottien valmistaminen on kallista. Tämän takia se soveltuu tyypillisesti massatuotantoon eli kun tuotetaan suuria määriä samanlaisia osia. (Redwood, Schöffner et al. 2017)

Materiaalia lisäävä valmistus, josta käytetään myös termiä 3D-tulostus, tarkoittaa valmistusta, jossa kolmiulotteinen osa valmistetaan poikkileikkaus kerrallaan 3D-tietokonemallista saadusta digitaalisesta datasta. Hukkamateriaalia syntyy valmistusprosessissa vähän suhteessa perinteisiin valmistusmenetelmiin, sillä materiaalia poistetaan tyypillisesti vain jälkikäsittelyn aikana. AM-teknologiat ovat optimaalisia, kun tuotetaan pieniä sarjamääriä geometrisesti monimutkaisia osia, jotka ovat mahdottomia tai kallista valmistaa perinteisillä valmistusmenetelmillä. Monimutkaisuus tuo lisäkustannuksia materiaalia lisäävässä valmistuksessa lähinnä vain jälkikäsittelyn osalta. Yleistäen osien kustannukset pysyvät AM-teknologioilla valmistaessa vakiona valmistusmäärästä riippumatta (Kuva 1) (Redwood, Schöffner et al. 2017).



Kuva 1. Valmistusmäärän vaikutus osien kustannuksiin CM- ja AM-tekniikoilla.

AM-prosessi alkaa suunnittelemalla ensin valmistettava osa. Tämä toteutetaan luomalla 3D-malli osasta tietokoneavusteisella suunnitteluohjelmistolla (CAD, Computer Aided Design). CAD-tiedostosta saadaan tiedosto, joka sisältää kappaleen geometrian. Yleisin geometrian määrittävä tiedostotyyppi on STL. Muita ovat muun muassa OBJ-, DAE- ja AMF-tiedostoformaattit. Kappaleen geometrian sisältävä tiedosto viedään viipalointiohjelmistoon, jossa graafisen käyttöliittymän kautta voidaan tyypillisesti määrittää eri tulostusparametreja, kuten kerrospaksuus. Viipalointiohjelmistosta saadaan G-koodi, joka lähetetään tulostimelle, joka toteuttaa osan valmistuksen sen sisältämien ohjeiden mukaan. Kun tulostimen asetukset ovat kunnossa, voidaan osa tulostaa. Osan valmistuttua voidaan se poistaa tulostimesta ja tehdä mahdolliset jälkikäsittelyt. AM-prosessi on esitetty kuvassa 2. (Gibson, Rosen et al. 2010)



Kuva 2. Tyypillinen AM-prosessiketju. Lähteen (Gibson et al. 2010) kuvaa muokattu.

## 2.2 AM-pohjainen suunnittelu (Design for AM)

Suunnittelulla valmistukseen ja kokoonpanoon (DFMA, Design For Manufacture and Assembly) tarkoitetaan kustannukset ja rajoitteet huomioon ottavaa suunnittelua. DFMA pyrkii minimoimaan valmistus-, kokoonpano ja logistiikkakustannuksia. Sen avulla suunnittelijan on tarkoitus ymmärtää perinteisten valmistusmenetelmien, sekä kokoonpanojen rajoitteet ja huomioida ne suunnittelussa. Suunnittelun AM-teknologiapohjaiseen lähestymistapaan on kehitetty termi DFAM (Design For Additive Manufacturing), jolla korostetaan rajoitteiden sijasta suunnittelun vapautta. AM-teknologiat mahdollistavat monimutkaisuuden osassa muun muassa muotoon, materiaaliin ja toiminnallisuuteen. (Gibson, Rosen et al. 2010)

Kuten mainittu AM- teknologioilla voidaan valmistaa geometrialtaan monimutkaisia kappaleita kustannustehokkaasti. Täysin digitaalisen suunnitteluprosessin (Digital workflow) ansiosta kaikki AM-teknologioille tuotetut mallit ovat vapaasti muokattavissa. AM-teknologiat ovat erityisen suosittuja lääketieteen sovelluksissa, sillä ne mahdollistavat potilaskohtaisen geometrian mukaisen valmistamisen. Potilaskohtaisesta geometriasta on hyötyä muun muassa implanteissa ja potilaskohtaisissa malleissa. (Kontio, Björkstrand et al. 2012)

Osien materiaalintarvetta ja niiden valmistukseen käytettyä energian käyttöä voidaan vähentää topologian optimoinnilla lujuusominaisuuksien kärsimättä. Optimointi voidaan tehdä olemassa olevalle mallille erilaisten ohjelmistojen avulla, kun tiedetään osan vaikuttavat voimat ja rajoitteet osan lujuudelle. Topologian optimointi soveltuu erityisen hyvin AM-menetelmille, sillä useimmiten geometriat, joita optimoinnilla saadaan ovat haastavia tai mahdottomia toteuttaa perinteisillä valmistusmenetelmillä. (Jalava et al. 2019) Ristikkorakenteet (lattice structures) ovat toinen tapa valmistaa kevyitä rakenteita AM-menetelmillä. (Panesar et al. 2018)

Monimateriaalitulos mahdollistaa toiminnallisen monimutkaisuuden, kuten esimerkiksi jäykkien ja elastisten materiaalien yhdistäminen samassa osassa. (Vaezi et al. 2013) Funktionaalisesti porrastetut materiaalit (FGM, Functionally Graded Materials) ovat materiaaleja, joissa materiaalikoostumus voi vaihdella eri kohdassa osaa. (Thompson, Moroni et al. 2016) FGM-osat voidaan suunnitella niin, että ne ovat herkkiä tietyille ärsykkeille. Lisäksi niillä voidaan parantaa muun muassa iskunkestävyyttä, sekä lämmöneristävyyttä. Saumaton rajapinta materiaalien välillä parantaa myös osien kestävyyttä. Toiminnallisesti porrastetun materiaalia lisäävän valmistuksen (FGAM, Functionally Graded Additive Manufacturing) toteutuminen vaatii vielä muun muassa tehokkaampia laskentatyökaluja mallintamista, simulointia ja valmistusta varten. (Pei et al. 2017)

AM-menetelmillä voidaan valmistaa toimivia mekanismeja samassa prosessissa, mikä taas mahdollistaa kokoonpanojen yksinkertaistamisen. (Gao et al. 2015) Esimerkkejä ovat esimerkiksi erilaiset nivelet, sekä upotetun elektroniikan lisäämisen tulostettuihin osiin, kuten anturit, sähköä johtavat musteet ja virtalähteet. (Thompson et al. 2016)

## 2.3 AM-tekniikat

Vuonna 2015 julkaistu ISO-standardi (ISO/ASTM 52900 2015) vakiinnutti ja määritteli AM-menetelmille käytetyn terminologian. Materiaalia lisäävät valmistustekniikat jaettiin seitsemään eri luokkaan, jotka ovat:

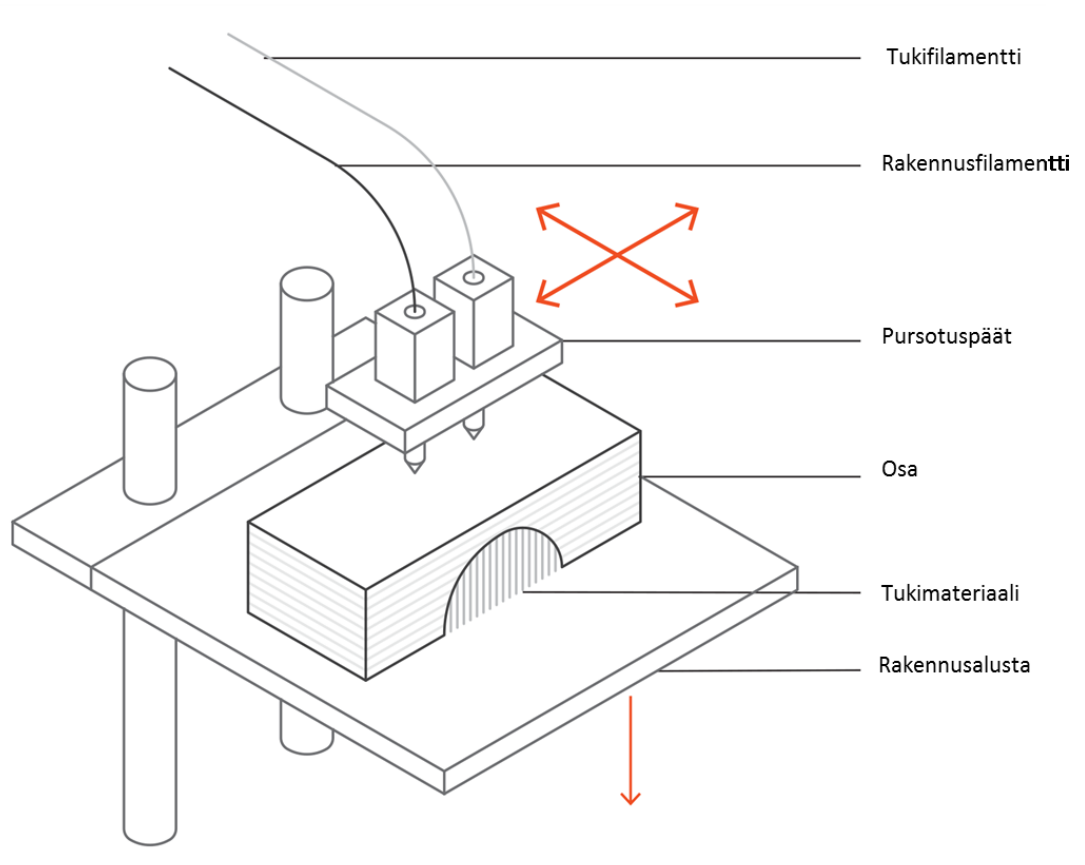
- materiaalin pursotus
- valokovetus altaassa
- jauhepetisulatus
- materiaalin suihkutus
- sideaineen suihkutus
- kerroslaminointi
- ja suorakerrostus.

Teknologioiden suomennokset ovat Suomen pikavalmistusyhdistyksen (FIRPA, Finnish Rapid Prototyping Association) käyttämiä suomennoksia. (FIRPA 2019)

### 2.3.1 Materiaalin pursotus (Material Extrusion)

Materiaalin pursotusmenetelmässä, joista yleisin tekniikka on Fused Deposition Modeling (FDM), josta käytetään myös termiä Fused Filament Fabrication (FFF), sulaa materiaalia pursotetaan lämmitetystä suuttimesta. Tekniikan peruseräkkeet ovat esitelty kuvassa 3. Materiaalina menetelmässä käytetään tyypillisesti kestäviä muovia, joka on lankamaisessa muodossa eli filamenttina. Filamentin syöttö nesteytyskammioon tapahtuu tyypillisesti moottoroitujen rullien avulla. Materiaalia virtaa suuttimesta tasaisella nopeudella suuttimen liikkeessä pitkin alustaa luoden osaa poikkileikkaus kerrallaan. Optimaalisessa tilanteessa materiaali jäähtyy ja kovettuu saman tien ja säilyttää muotonsa, kun se on alustalla. Muoto ja sen koko saattavat kuitenkin hieman muuttua pintajännityksen, painovoiman ja materiaalin viilenemisen vaikutuksesta. Koska materiaali viilenee eri tahdilla, saattaa se aiheuttaa sisäisiä jännityksiä osassa, mikä taas muodostaa vääristymiä. Suuttimen halkaisija määrittää sulatetun materiaalin koon ja muodon. Suuremmalla halkaisijalla materiaalia virtaa nopeammin, mutta tulostustarkkuus on heikompi. (Gibson, Rosen et al. 2010, Kalpakjian, Schmid et al. 2014)

Suunniteltaessa osan geometriaa on huomioitava tukimateriaalin tarve. Näin on yleensä, jos osassa on uloke, joka on alle 45° kulmassa vaakatasoon nähden. Jos tukimateriaalia ei ole, pinnanlaatu ulokkeessa kärsii huomattavasti. Pursotustekniikkaan pohjautuvissa koneissa voi olla kaksi suutinta, joista toista voidaan käyttää muun muassa tukimateriaalin tulostukseen. Tukimateriaali on tyypillisesti vesiliukoista, jolloin saavutetaan parempi pinnanlaatu, sekä tällöin myös sisäiset tukirakenteet ovat poistettavissa. Muita käyttötapoja toiselle suuttimelle ovat kahdesta tai useammasta eri materiaalista tai väristä koostuvat osat. Pursotuksessa se, miten päin osa tulostetaan vaikuttaa huomattavasti sen mekaanisiin ominaisuuksiin. Vetolujuus voi olla yli viisinkertainen, jos kappaleen tulostaa pystysuoraan tulostamisen sijasta vaakatasossa. Tyypillisiä parametreja ovat pursotusnopeus, sekä suuttimen ja alustan lämpötila. Pursotuksessa tyypillisesti tulostetaan seinät poikkileikkaukselle ja niiden sisään täytekuviointi. Täytekuviointin väljyys määrää, kuinka kiinteä kappale on. Tyypilliset sovellukset ovat pienoismallit ja prototyypit. Näiden lisäksi sitä sovelletaan muun muassa vahamallikaavauksen valumallien tekoon, elektroniikkakoteloina muovien sähköeristävyyden ansiosta, sekä eri kiinnittimissä. (Redwood, Schöffner et al. 2017)

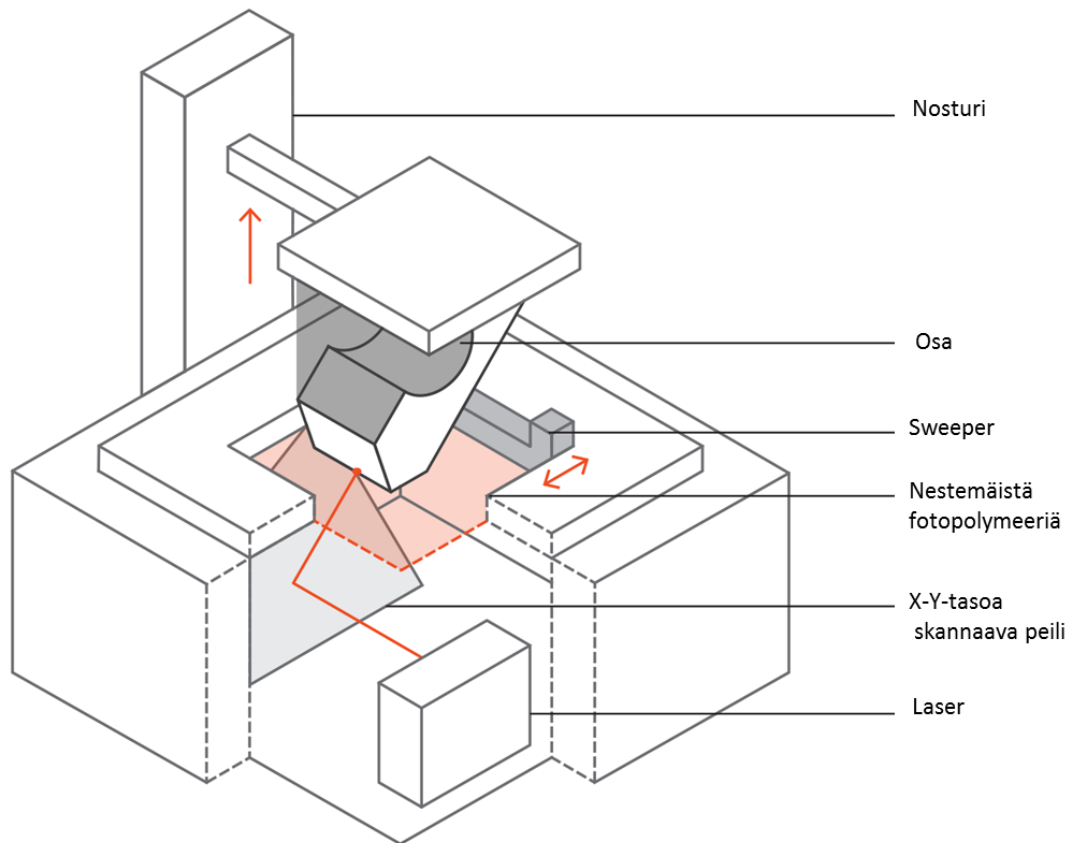


*Kuva 3 Materiaalin pursotusteknologian perusperiaatteet. Lähteen (Redwood, Schöffler et al. 2017) kuvaa muokattu.*

### 2.3.2 Valokovetus altaassa (Vat Photopolymerization)

Valokovetus on valoherkkien polymeerien kovetusta valon avulla. Tätä kemiallista reaktiota kutsutaan fotopolymerisaatioksi. Suosituimmat valokovetus-teknologiat ovat stereolitografia (SLA, Stereolithography) ja suoravalokäsittely (DLP, Direct Light Processing). Stereolitografiassa polymeeriä kovetetaan pistemäisellä lasersäteellä, joka luo osaa poikkileikkaus kerrallaan x-y-tasoa pitkin. Suoravalokäsittelyssä projektori heijastaa ja kovettaa yhden kokonaisen poikkileikkauksen kerrallaan. Poikkileikkauksen valmistuttua lakaisin (sweeper) levittää uuden polymeerikerroksen. Teknologian peruseräaatteet ovat esitelty kuvassa 4. (Gibson, Rosen et al. 2010)

Valokovetuksella saadaan tarkat mittatoleranssit ja hyvä pinnanlaatu. Jos valokovetuksessa tarvitaan tukimateriaalia, sen tulostus onnistuu vain päämateriaalista. Tukimateriaali tulostuu rihmamaisena ja se jättää pienet merkit osaan, jotka joudutaan hiomaan, jos osalle halutaan tasainen pinta. Suunnittelijan on huomioitava siis, että osa tulostuu niin, että näkyvältä pinnalta ei tarvitsisi poistaa tukimateriaalia. Valokovetusta sovelletaan muun muassa hammashoitoteknologiassa ja koruissa, sillä molemmissa tarvitaan tarkkuutta ja hyvää pinnanlaatua. (Redwood, Schöffner et al. 2017)

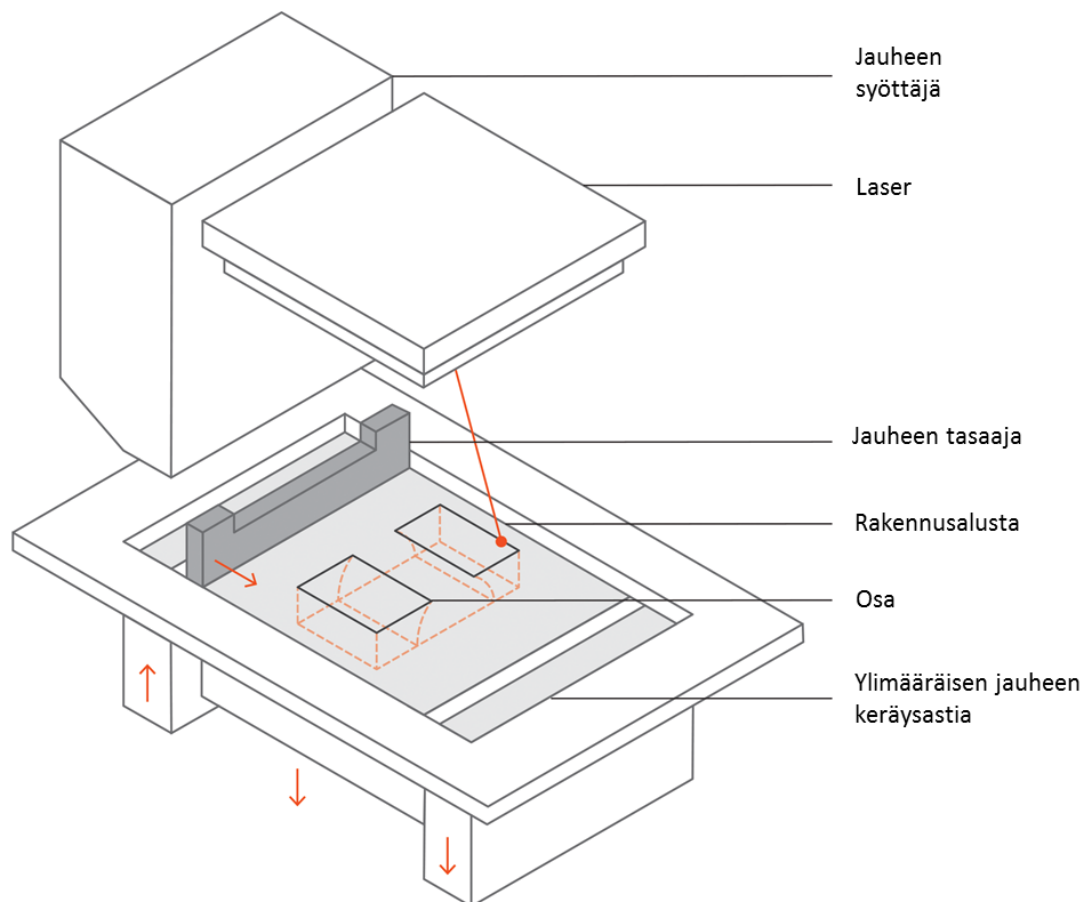


Kuva 4. Valokovetuksen (SLA) peruseräaatteet. Lähteen (Redwood et al. 2017) kuvaa muokattu.

### 2.3.3 Jauhepetisulatus (Powder Bed Fusion)

Jauhepetisulatuksessa rakennusalustalle levitettyä jauhekerrosta sulatetaan pistemäisesti tyypillisesti laserin avulla hieman sen sulamispisteen alapuolella, mikä saa aikaan jauhepartikkelien fuusioitumisen (Gibson, Rosen et al. 2010). Ensimmäisiä jauhepetisulatusteknologioita oli Selective Laser Sintering (SLS), jossa jauhekerrosta sulatetaan CO<sub>2</sub>-laserin avulla. Siinä mäntä työntää jauhetta sylinteristä rakennusalustalle, jonka jälkeen rullamekanismi levittää jauheen tasaisesti pitkin alustaa. Jokaisen rullaus- ja lämmitysvaiheen jälkeen, poikkileikkauksen valmistuttua, rakennusalusta laskeutuu yhden askeleen ja sama prosessi toistetaan, kunnes osa on valmis. (Kalpakjian, Schmid et al. 2014) SLS-menetelmää sovelletaan polymeereille. Metal Laser Sintering (DMLS) ja Selective Laser Melting (SLM) ovat menetelminä samanlaiset, mutta niitä sovelletaan metalleille. Electron Beam Melting (EBM) käyttää laserin sijasta elektronisuihkua jauheen sulattamiseen. (Redwood, Schöffner et al. 2017)

Jauhepetisulatuksessa osien tarkkuuteen vaikuttavat laserin pisteen koko, jauhepartikkelien koko ja geometria, sekä kerroksen korkeus. SLS-tulokset kutistuvat yleensä noin 3-3,5%. Kutistuminen on ennakoitavissa ja tulostinohjelmistot ottavat sen tyypillisesti automaattisesti huomioon. Vinoumat ovat suurin ongelma menetelmässä. Jauhepetisulatusta käytetään muun muassa ilmailu ja ajoneuvoteollisuudessa, joissa geometrian avulla voidaan vähentää materiaalin määrää topologian optimoinnilla mekaanisten ominaisuuksien kärsimättä. (Redwood, Schöffner et al. 2017)



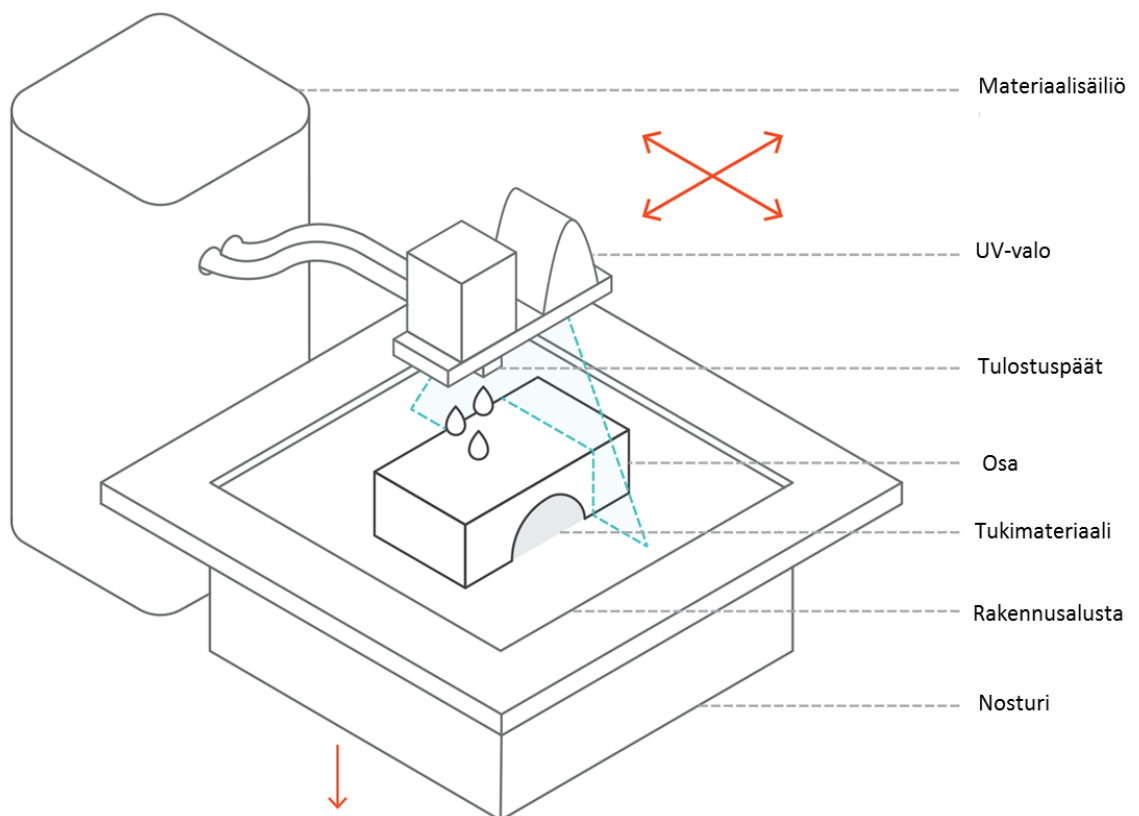
Kuva 5. Jauhepetisulatuksen peruseräatteen. Lähteen (Redwood et al. 2017) kuvaa muokattu.

### 2.3.4 Materiaalin suihkutus (Material Jetting)

Materiaalin, sekä sideaineen suihkutus muistuttavat hyvin paljon painoväritulostusta. Menetelmässä tulostuspäät suihkuttavat fotopolymeeriä tulostusalustalle, joka kovetetaan UV-valolla. (Kalpakjian, Schmid et al. 2014) Poikkileikkauksen valmistuttua rakennusalusta laskeutuu ja prosessi toistuu. Teknologian peruseräatteen ovat esitelty kuvassa 6. Materiaalin suihkutus on yksi tarkimmista 3D-tulostusmenetelmistä, sillä siinä ei tarvitse ottaa huomioon lämmön vaikutusta materiaalin kutistumisessa ja vääristymät ovat harvinaisia. Pinnanlaatu on myös yksi parhaimmista. Menetelmä soveltuu hyvin monimateriaalitulostukseen. Sen monimateriaaliominaisuuksia voidaan hyödyntää kolmella tavalla, jotka ovat:

- digitaaliset materiaalit, jolla voidaan määrittellä materiaaliominaisuuksia vokselin tarkkuudella kahden tai useamman materiaalin sekoitussuhteen avulla
- mixed tray, jossa samalla tulostusalustalla voidaan valmistaa samanaikaisesti useita osia eri materiaaleista
- ja mixed parts, jolla voidaan tulostaa yksittäisiä osia, jotka koostuvat eri materiaaleista ja väreistä.

Tyypilliset käyttökohteet teknologialle ovat visuaaliset prototyypit ja lääketieteessä käytetyt mallit, jotka ovat valmistettu potilaskohtaisesta datasta. (Redwood, Schöffler et al. 2017)

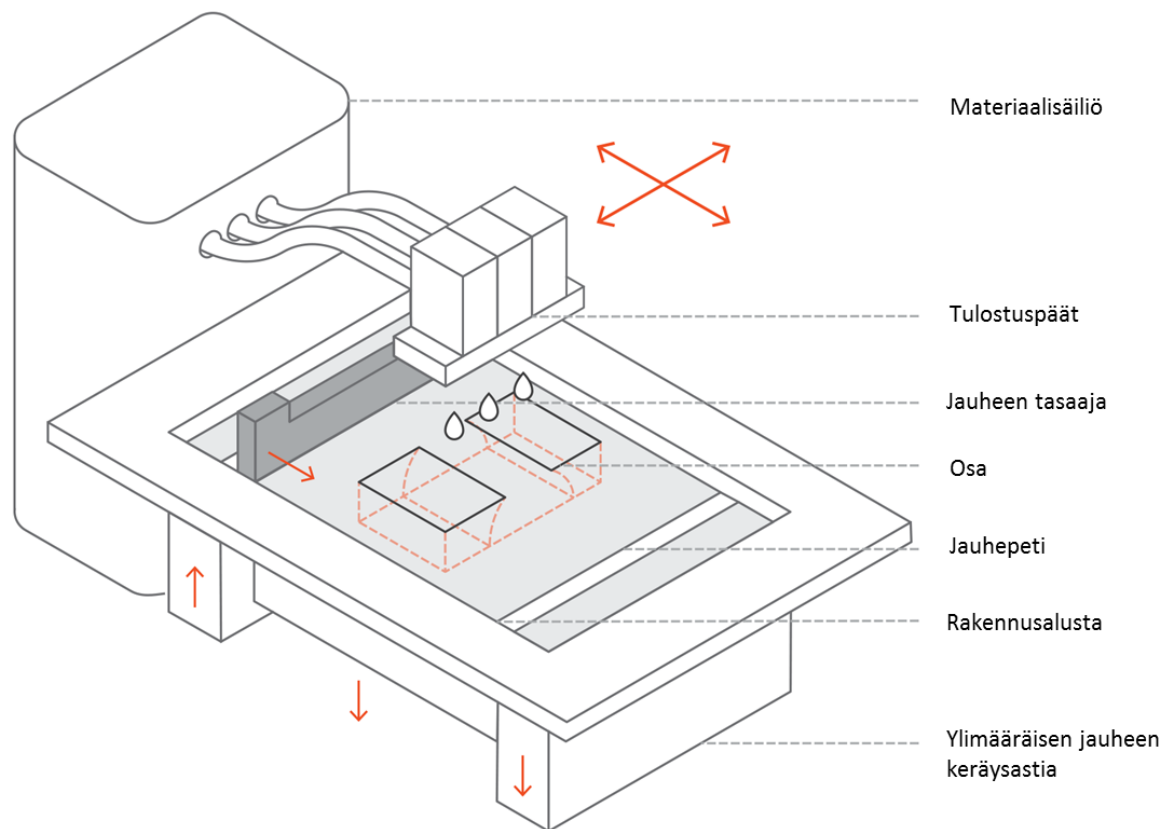


Kuva 6. Materiaalin suihkutuksen peruseräatteen. Lähteen (Redwood et al. 2017) kuvaa muokattu.



### 2.3.5 Sideaineen suihkutus (Binder Jetting)

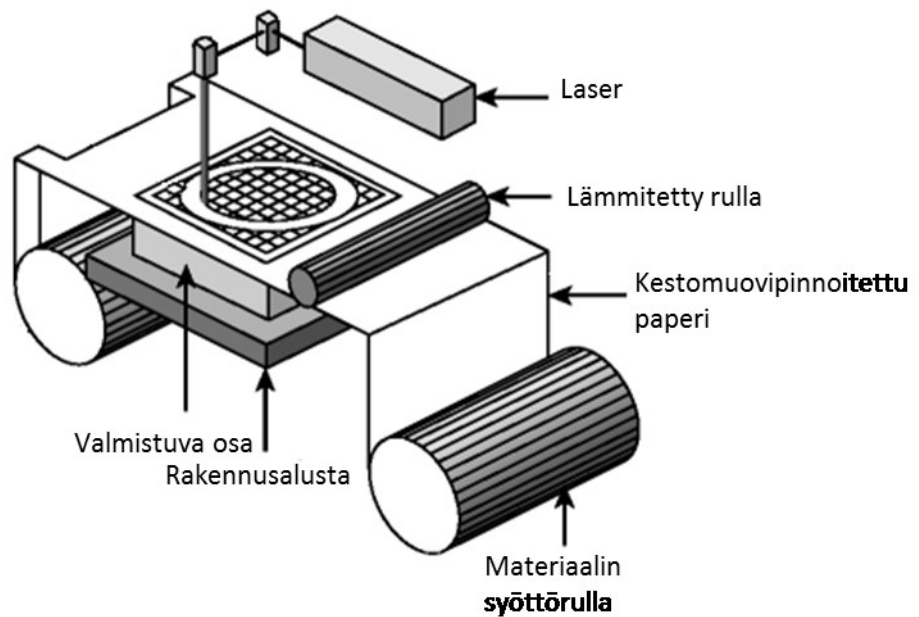
Sideaineen suihkutuksessa sideainetta suihkutetaan tulostuspäistä alustalle, jolle on levitetty jauhetta, joka voi olla esimerkiksi hiekkaa, kipsiä tai metallia. Teknologian peruseräatteen ovat esitelty kuvassa 7. Menetelmä ei vaadi tukirakenteita muoviosien kanssa, sillä sideaineen ulkopuolelle jäävä jauhe tukee valmistuvaa rakennetta. Metalliosille tarvitaan sekundaarikäsittelyä esimerkiksi imeyttämällä (infiltration) tai sintraamalla. Jos käsittelyä ei tehdä, ovat valmistetun osan mekaaniset ominaisuudet heikot verrattuna jauhepetisulatuksella valmistettuihin osiin. Prosessissa ei synny lämpöä, joten jäännösjännitystä ei menetelmällä valmistettavilla osilla esiinny. Jäännösjännitys on osan sisäisiä lämmön vaikutuksesta jääviä jännityksiä, joita esiintyy esimerkiksi hitsaamisen yhteydessä osan lämpötilan vaihdellessa nopeasti. Tästä syystä menetelmällä voidaan valmistaa suuriakin osia. Menetelmää tyypillisesti käytetään värimallien, hiekkavalussa käytettävien ytimien ja muottien valmistukseen. (Redwood, Schöffner et al. 2017)



Kuva 7. Sideaineen suihkutuksen peruseräatteen. Lähteen (Redwood et al. 2017) kuvaa muokattu.

### 2.3.6 Kerroslaminointi (Sheet Lamination)

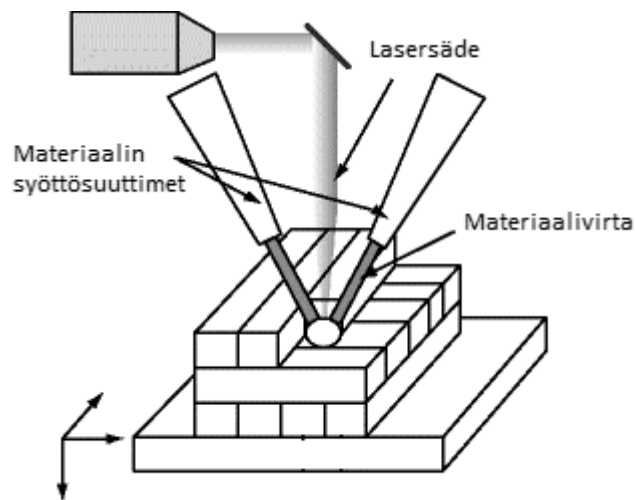
Kerroslaminointi-tekniikoiden toiminta perustuu tyypillisesti paperiarkkien leikkaamiseen CO<sub>2</sub>-laserilla, missä jokainen paperiarkki on yksi poikkileikkaus CAD-mallista. Teknologian peruseriaatteet ovat esitelty kuvassa 8. Kerroslaminointi on ensimmäisiä kaupallisia materiaalia lisääviä valmistusteknologioita. Teknolojista ensimmäinen oli Laminated Object Manufacturing (LOM), joka saapui markkinoille vuonna 1991. Kerroslaminoinnin liitosmenetelmiä ovat muun muassa sideaine, lämpöliitos, lukitus ja ultraäänihitsaus. Sideaine on näistä liittämismenetelmistä suosituin. Siinä paperiarkin toisella puolella on kestopuovipinnoite, jota kuumennetaan liitoksen aikaansaamiseksi. Visuaaliset värimallit ovat kerroslaminoinnin yksi tyypillisimmistä sovelluksista. (Gibson, Rosen et al. 2010)



Kuva 8. Kerroslaminoinnin peruseriaatteet. Lähteen (Gibson et al. 2010) kuvaa muokattu.

### 2.3.7 Suorakerrostus (Directed Energy Deposition)

Suorakerrostus-teknologioissa materiaalia virtaa suuttimesta rakennusalustalle. Materiaali on suuttimessa tyypillisesti jauheena tai lankamaisessa muodossa. Alustalla se sulatetaan korkeaaenergisestä säteestä, kuten laserista, avulla. Teknologioiden peruseräpäätteet ovat esitelty kuvassa 9. Teknologiat ovat samankaltaisia plasmahitsauksen kanssa. Tyypillisimmät sovellukset teknologioille ovat myös samanlaiset: osien korjaaminen ja kunnossapito. Erona on, että hitsauksessa ei yleensä käytetä CAD-dataa. Suorakerrostukselle ominaista on, että sillä pystytään valmistamaan toiminnallisesti porrastettuja materiaaleja muuttamalla tulostuksen aikaisia parametreja, kuten kiinteytymisnopeutta energiansyötön funktiona ja syöttösuuttimen materiaalikoostumusta. (Gibson, Rosen et al. 2010)



Kuva 9. Tyypillinen suorakerrostusprosessi. Lähteen (Gibson, Rosen et al. 2010) kuvaa muokattu.

## **2.4 AM-sovellukset**

Tässä luvussa esitellään tyypillisimmät AM-sovellukset. Sovelluskohteita ovat prototyyppit, tuotannon apuvälineet ja lopputuotteet.

### **2.4.1 Prototyyppien pikavalmistus (Rapid Prototyping)**

Prototyyppi on ensimmäinen toiminnallinen versio jostakin tuotteesta tai sen osasta ja sen perusteella tyypillisesti tehdään investointipäätös. Tuotantolaitosten rakentaminen uudelle tuotteelle on kallis investointi, joten huolellinen tuotesuunnitteluprosessi on tarpeellinen, mihin oleellisena osana prototyyppit liittyvät. Tuotekehityksen nopeus ja tätä kautta nopeat prototyyppit ovat tärkeitä. Yleisesti se yritys, jonka tuote on ensimmäisenä markkinoilla, saa markkinajohtajan paikan. (Kalpakjian, Schmid et al. 2014) Prototyyppien pikavalmistus kehitettiin madaltamaan prototyyppien valmistuskustannuksia, sekä nopeuttamaan niiden valmistusprosessia. Perinteisillä valmistusmenetelmillä kustannuksia lisäävät muun muassa muotit ja muut työkalut, sekä niiden valmistukseen käytettävä työvoima, sillä ne valmistetaan yleensä käsityönä. (Gibson, Rosen et al. 2010)

### **2.4.2 Tuotannon apuvälineiden pikavalmistus (Rapid Tooling)**

Materiaalia lisäävää valmistusta sovelletaan myös muottien, jigien ja muiden tuotannossa käytettyjen apuvälineiden valmistukseen. Etuina perinteisiin menetelmiin ovat muun muassa matalammat kustannukset, nopeampi läpäisy aika ja se, että ne voidaan valmistaa heti tarpeen vaatiessa. Lisäksi muottien jäähdytyskanavat pystytään optimoimaan tarkemmin ja kutistumat voidaan ottaa huomioon eri ohjelmistoilla. Muottien kestävyys on kuitenkin heikompi verrattuna koneistettuihin työkalu- ja muottimateriaaleihin, kuten volframikarbidi ja työkaluteräksset. (Kalpakjian, Schmid et al. 2014)

### 2.4.3 Suoravalmistus (Rapid Manufacturing)

AM-menetelmien osuus lopputuotteiden valmistuksessa kasvaa nopeasti. On arvioitu, että AM-teollisuuden arvo nousee vuoden 2016 6 miljardista 26 miljardiin vuoteen 2022 mennessä. (Wu et al. 2017) Tähän vaikuttavat muun muassa teknologioiden kehitys, kun pystytään valmistamaan entistä monimutkaisempia osia paremmalla tarkkuudella, pinnanlaadulla ja lujuusominaisuuksilla. Teknologioiden hinnat laskevat myös jatkuvasti. AM-menetelmiä käytetään myös jatkuvasti enemmän yhdessä CM-menetelmien kanssa. Tästä valmistustavasta käytetään myös termiä hybridi- tai moniprosessitulostus. (MacDonald, Wicker 2016)

Yleisimmät AM-teknologioita soveltavat alat ovat ajoneuvo-, ilmailu-, sekä lääketieteen teollisuudet. Näiden alojen osuus kaikista AM-menetelmillä valmistetuista lopputuotteista ovat: 20%, 12% ja 15%. (Thomas, Gilbert 2015) Lääketieteen sovelluksia ovat muun muassa kirurgian ja diagnostiikan aloilla käytettävät mallit potilaskohtaisista kehonosista, erilaiset implantit ja proteesit, sekä biotulostuksella valmistetut kudokset. (Tuomi, Paloheimo et al. 2009) Kuulolaitteet ovat 3D-tulostuksen eräs menestyneimmistä sovelluksista. Nykyisin 10 miljoonasta kuulolaitteesta 97 prosenttia ovat 3D-tulostettuja. Asiakaskohtaisen kustomoinnin ansiosta palautusten määrät vähentyneet 40 prosentista 10 prosenttiin. Läpäisyajat kuulolaitteelle olivat aikaisemmin viikkoja, koska ne tehtiin käsityönä. Nykyään ne ovat muutamia päiviä. (Redwood, Schöffner et al. 2017) Hammashoitoteknologiassa potilaskohtaista geometriaa hyödyntävillä hampaiden oikomiskalvoilla on korvattu perinteisiä hammasrautoja. (Kalpakjian, Schmid et al. 2014) AM-teknologiat mahdollistavat lääketieteellisten potilaskohtaisten implanttien valmistuksen paikan päällä tarpeen vaatiessa. (Emelogu, Marufuzzaman et al. 2016)

AM-menetelmiä on hyödynnetty myös anturitekniikassa. Kaupalliset anturit eivät yleensä ole suunniteltu tarkkoja vaatimuksia varten, sillä ne ovat tarkoitettu yleispäteviksi antureiksi, jotka toimivat laajalla skaalalla sovelluksia. AM-teknologioilla voidaan valmistaa tarkasti räätälöityjä antureita kustannustehokkaasti eri sovelluksiin. Samaa digitaalista rakennemallia voidaan uusiokäyttää eri materiaaliyhdistelmien kanssa. (Xu, Wu et al. 2017) Muun muassa kapasitiivisia kosketukseen reagoivia antureita, joissa kupariverkkoa sovitettiin FDM-menetelmällä tulostetun osan kanssa yhteen, on valmistettu. (O'Donnell 2017)

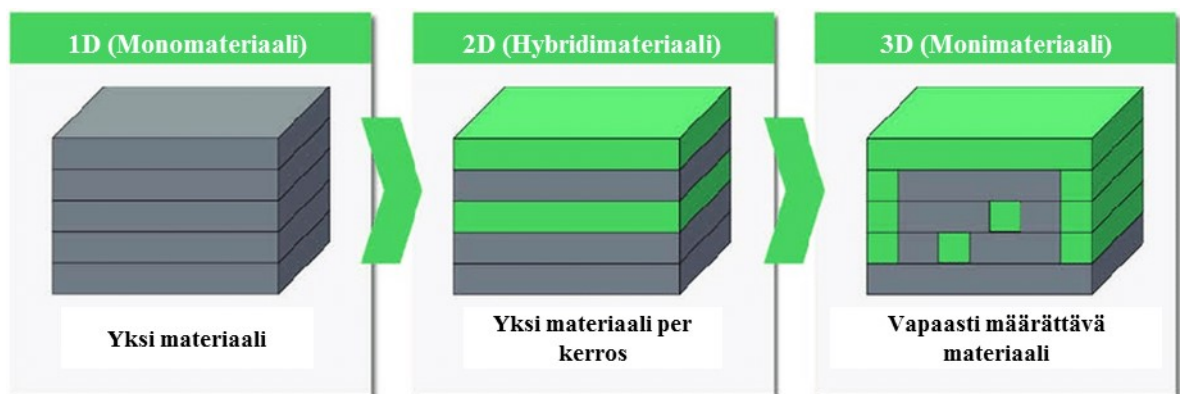
Suoravalmistuksen rajoitteita ovat muun muassa materiaalien hinta, materiaalien määrä, prosessien hitaus, osien heikot mekaaniset ja sähköiset ominaisuudet verrattuna muihin menetelmiin, sekä 3D-tulostimien tulostustilojen koko. (Salmi et al. 2018)

### 3 Monimateriaalitulostus

Tämä luku käsittelee monimateriaalitulostusta. Luvussa esitellään monimateriaalitulostus-konsepti, materiaalitekniikan perusteita, sekä tyypillisimmät AM-teknologioissa käytetyt materiaalit. Lisäksi esitellään lyhyesti muutamia eri monimateriaalitulostusmenetelmiä ja niihin liittyviä tutkimuksia. Lopuksi käsitellään älykkäitä osia. Niiden valmistustapoja käydään läpi, sekä niiden hyötyjä eri teollisuuden aloilla.

#### 3.1 Yleistä

Monimateriaalitulostuksella tarkoitetaan tyypillisesti kahden tai useamman materiaalin käyttöä AM-prosessissa. Monimateriaalit voidaan jakaa diskreetteihin ja porrastettuihin (graded) materiaaleihin. Diskreeteissä materiaaleissa on selkeästi nähtävissä oleva jyrkkä rajapinta materiaalien välillä. Osissa voi olla sulautettuna esimerkiksi, sekä jäykkää, että joustavaa materiaalia. Tyypillinen esimerkki diskreetistä monimateriaalitulostuksesta on erilaisten tukimateriaalien käyttö tulostusprosessissa. Porrastetuissa materiaaleissa materiaalien rajapinta on sulava. (Anstaett, Seidel 2016) Myös upotettujen komponenttien voidaan ajatella kuuluvan diskreettiin monimateriaalitulostukseen. Digitaaliset materiaalit ovat materiaaleja, joissa materiaalikoostumusta voidaan määrittellä yhden vokselin tarkkuudella. Monimateriaalitulostusta varten kehitetty tiedostoformaatti, Additive Manufacturing File (AMF), sisältää geometrian lisäksi tiedot materiaaliominaisuuksista. Materiaaliyhdistelmien monimutkaisuus voidaan jakaa kolmeen luokkaan: 1D-, 2D- ja 3D-materiaaleihin. Yksiulotteisessa on käytössä vain yksi materiaali. 2D:ssä materiaali voi vaihdella kerroksittain ja 3D:ssä kerroksen sisällä. Materiaalien kompleksisuutta on verrattu kuvassa 10. (Anstaett et al. 2016)

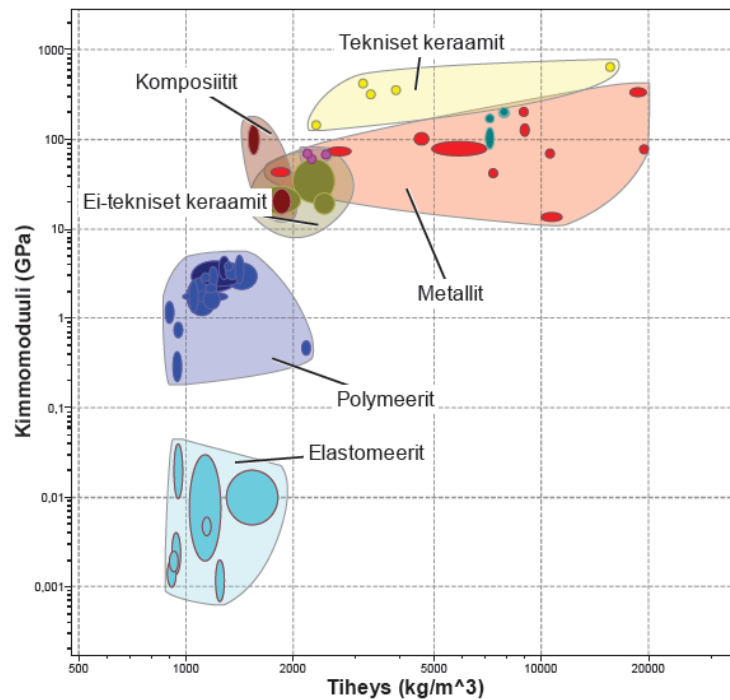


Kuva 10. Mono-, hybridi- ja monimateriaaliosa. Lähteen (Anstaett et al. 2016) kuvaa muokattu.

Materiaalit voidaan jakaa ominaisuuksiensa perusteella viiteen ryhmään, jotka ovat metallit, keraamit, lasit, polymeerit ja komposiitit. Metallit ovat tyypillisesti lujia, jäykkiä, sitkeitä, hyvin muovattavia, sekä iskunkestäviä. Lisäksi ne ovat hyviä sähkön johteita. (Askeland, Fulay et al. 2011) Keraamien ja lasien ominaisuudet vaihtelevat erittäin laajasti. Yhdistävänä tekijänä niille on hauraus. (Ashby, Jones 2013) Polymeerit ovat hyviä sähkön- ja lämmöneristeitä, niillä on korkea lujuus-painosuhte, sekä hyvä korroosionkestävyys. Tämän lisäksi ne ovat helposti muovattavissa ja työstettävissä eri menetelmillä, kuten metallit. Amorfisilla polymeereillä ei ole selkeää sulamislämpötilaa vaan niiden mekaaniset ominaisuudet muuttuvat tietyillä lämpötila-alueilla. Matalissa lämpötiloissa ne ovat kovia, hauraita ja jäykkiä ja korkeammassa lämpötiloissa kumimaisia. Lämpötila, jossa ominaisuudet muuttuvat kutsutaan lasittumislämpötilaksi.

Haurauteen voidaan vaikuttaa sekoittamalla niihin pieniä määriä elastomeeria. Polymeerit ovat korvanneet metallikomponentteja erityisesti ajoneuvo- ja ilmailuteollisuudessa. (Kalpakjian, Schmid et al. 2014) Komposiitit ovat yhdistelmä kahta tai useampaa ominaisuuksiltaan erilaista olevaa materiaalia. (Askeland, Fulay et al. 2011) Toiminnallisesti porrastettuja materiaaleja on kutsuttu komposiitteja seuraavaksi kehitysaskeleeksi materiaalitekniikassa.

Materiaalin valinta on kriittinen osa tuotesuunnittelua. Sitä helpottamaan on olemassa ohjelmistoja, joiden avulla voidaan asettaa tietyt rajoitteet materiaaliominaisuuksille. Eräs suosituimmista on CES EduPack, jolla voidaan luoda kuvan 11 tapaisia materiaalinvalintakarttoja, kun tiedetään rajoitteet, kuten esimerkiksi painon ja lujuuden suhde.



Kuva 11. Materiaalinvalintakartta. (CesEduPack 2018-ohjelmisto)

Yleisimmin käytetyt materiaalit AM-teknologioilla ovat metallit ja polymeerit, jotka ovat jaettu kesto- ja kertamuoveihin. Kestomuoveja voidaan sulattaa ja muokata uudelleen, kun taas kertamuovit eivät sula kiinteytymisen jälkeen. Taulukkoon 1 on listattu teknologiat ja niissä tyypillisesti käytetyt materiaalit.

*Taulukko 1. AM-tekniikat ja niissä tyypillisesti käytetyt materiaalit.*

Tekniikka	Materiaalit
Materiaalin pursotus	Kestomuovit
Valokovetus altaassa	Kertamuovit
Jauhepetisulatus	Kestomuovit, Metallit, Keraamit
Materiaalin suihkutus	Kertamuovit
Sideaineen suihkutus	Polymeerit, Metallit
Kerros laminointi	Paperi
Suorakerrotus	Metallit

Monimateriaalitulostuksella voidaan parantaa osien mekaanisia ominaisuuksia, sekä lisätä teknologiasta riippuen vokselin tarkkuudella eri toiminnallisuuksia eri kohtiin osaa, kuten värejä, elastisuutta, sähkön- ja lämmönjohtavuutta. (Gao, Zhang et al. 2015) Varsinkin lääketieteen sovelluksissa on hyötyä useiden materiaalien käytöstä muun muassa älykkäissä implanteissa tai kudostekniikassa. Perinteisillä valmistusmenetelmillä ei pystytä vastaamaan niissä vaadittaviin materiaali- ja geometriavaatimuksiin. (Vaezi, Chianrabutra et al. 2013)



### 3.2 AM-tekniikat ja monimateriaaliosien valmistustavat

Useita materiaaleja voidaan hyödyntää AM-menetelmillä muutamalla tavalla, joista komponenttien upotus on yksi, joka pystytään toteuttamaan lähes kaikilla tekniikoilla. Vaatimuksena on, että komponentit kestävätkä tulostuksen aikaiset lämpötilat. Todellisten diskreettien monimateriaalikappaleiden valmistuksessa materiaalien annostusjärjestelmien on tuettava monimateriaalitulostusta. Tekniikat, joissa materiaalia levitetään rakennusalustalle siivu (SLA) tai paperiarkki (LOM) kerrallaan pystytään materiaalia tyypillisesti vaihtamaan korkeintaan kerroksen välein. (Vaezi, Chianrabutra et al. 2013) Tekniikoilla, kuten materiaalin pursotus, materiaalin suihkutus ja suorakerrostus materiaalien määrittely vokselikohtaisesti samassa kerroksessa onnistuu ilman ylimääräisiä moduuleita.

Materiaalin pursotuksella tapoja monimateriaalikappaleiden valmistukseen ovat muun muassa: manuaalinen tai automaattinen filamentin vaihto, useammat tulostuspäät ja tulostuspäiden vaihtojärjestelmät. Tekniikalla tyypillisesti muodostuu suuria määriä hukkamateriaalia, jos suuttimia on käytössä yksi useiden materiaalien tulostamiseen. Hukkamateriaalia syntyy koneen vaihtaessa filamenttia toiseen ja sitä saattaa kertyä jopa enemmän, kuin mitä tulostettavaan osaan vaaditaan materiaalia. Tapaa pyritään saamaan materiaalitehokkaammaksi muun muassa tutkimalla, voidaanko hukkamateriaalia käyttää sisäisessä tukirakenteessa. Hukkamateriaalilta vältytään käyttämällä useampia suuttimia, joilla jokaisella on omat filamenttinsa. Tällöin tosin materiaali- tai väriyhdistelmien määrä jää pienemmäksi. Tyypillisesti useampia suuttimia käytetään niin, että toinen suutin on tukimateriaalia varten. Tukimateriaalin voi myös korvata materiaalilla, jolla voidaan esimerkiksi korostaa eri yksityiskohtia. Hyötyä tästä on lääketieteen malleissa, kun halutaan esimerkiksi erotella kasvain terveestä kudoksesta. Monimateriaali-FDM-tulostimet ovat suosituimpia kuluttajien keskuudessa niiden edullisuuden ja saatavuuden takia. (Pires 2018)

Materiaalin suihkutuksessa, toisin kuin materiaalin pursotuksessa, hukkamateriaalia kertyy vähän, sillä jokaisen tulostuspään materiaali voidaan määrittellä, jolloin materiaalin vaihtoa ei tarvita. Valokovettuvaan hartsiin voidaan sekoittaa eri määriä kovetusainetta, jolla saadaan yksittäisille vokseleille eri kovuuksia, mikä mahdollistaa digitaaliset ja toiminnallisesti porrastetut materiaalit. (Redwood et al. 2017)

Jauhepetisulatukseen ja sen avulla valmistettuihin porrastettuihin materiaalien on ollut kiinnostusta, koska sillä voidaan mahdollisesti valmistaa teollisuuteen sopivia metalliosia erilaisin materiaaliominaisuuksin. Anstaett et al. (2016) esittivät kolme tapaa, miten jauhetta voidaan jakaa rakennustilaan. Tavat ovat valojohde (photoconductor), suutin ja useammat jauhekammiot eri materiaaleille. Valojohde avulla jauhe varataan sähköisesti ja annostellaan ja asetetaan valoherkälle kalvolle. Suuttimen avulla jauhe annostellaan paikallisesti, mikä toimii hyvin, kun tulostetaan pienille alueille. Useammat jauhekammiot toimivat taas hyvin suurille alueille.

Choi et al. (2011) kehittivät tavan valmistaa diskreettejä monimateriaalikappaleita stereolitografian avulla. Tutkimuksessa kaupallinen SLA-kone muokattiin monimateriaalitulostukseen yhteensopivaksi lisäämällä siihen uusia moduuleja. Koneeseen valmistettiin uusi runko, sekä kiertoallaskarusellijärjestelmä ja automaattinen rakennusalustan tasausjärjestelmä. (Choi, Kim et al. 2011) Stereolitografialla voidaan myös valmistaa diskreettejä monimateriaaliosia hyödyntämällä hartseja, jotka vaihtavat väriä, kun ne altistuvat pitkiksi ajoiksi valolle. (Gibson et al. 2010) SLA:n etuja ovat hyvä

pinnanlaatu ja mittatarkkuus, joiden takia sen käytöstä monimateriaalitulosuksessa on kiinnostusta. (Vaezi et al. 2013)

Suorakerrostus soveltuu metallisten FGM-osien valmistukseen säätämällä pursotetun jauheen määrää sijainnin mukaan. Carrol et al. onnistuivat yhdistämään kahta metallia, SS304L ja IN625, luoden gradienttirakenteen, joka alkaa koostumukseltaan 100 prosenttisesti ensimmäisestä materiaalista päättyen toiseen materiaaliin. (Carroll, Otis et al. 2016)

### 3.3 Älykkäät osat

Älykkyyden lisääminen osiin on eräs tapa hyödyntää monimateriaalitulostusta. Älykkäillä osilla tyypillisesti tarkoitetaan osia, jotka antavat tietoa kunnostaan tai käyttöympäristöstään. Lehmus et al. (2016) ovat listanneet älykkäiden osien hyödyiksi muun muassa:

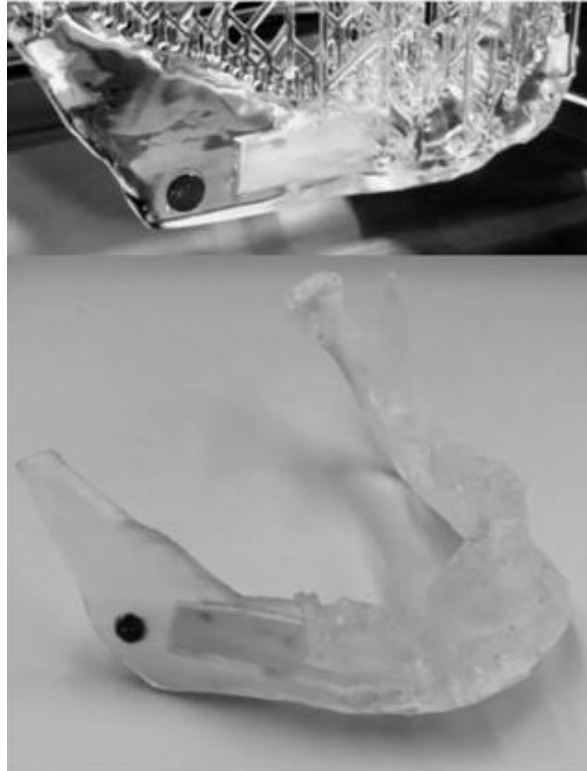
- alkuperäisyyden vahvistaminen
- seuraaminen ja paikantaminen
- rakenteiden monitorointi ja värähtelyn vaimentaminen sen kautta
- rakenteiden kunnan monitorointi
- ja tuotantoprosessien monitorointi.

Älykkäisiin osiin liittyvät olennaisesti langattomat tiedonsiirtoteknologiat, jotka mahdollistavat sähkölaitteiden yhdistämisen ja kommunikoinnin. Teknologioita ovat muun muassa radiotaajuinen etätunnistus (RFID, Radio Frequency Identification) ja sekä tämän työn tutkivassa osuudessa käytetty Bluetooth, joista kumpikaan ei vaadi suoraa yhteyttä lukijan kanssa, joten näihin teknologioihin perustuvia komponentteja voidaan myös upottaa rakenteiden sisälle. Tässä luvussa käydään läpi erilaisia tapoja älykkyyden lisäämiseen ja niiden hyötyjä esimerkkien avulla.

#### 3.3.1 Komponenttien upotus

Eräs tapa lisätä älykkyyttä AM-valmistettuihin osiin on komponenttien upotus. Termejä, joita tästä prosessista käytetään ovat muun muassa stop-and-go tai pienelektronikan kohdalla pick-and-place. (Espalin et al. 2014, Hossain et al. 2016, Wachtor et al. 2016)

Yhtenä esimerkkinä upotetuista komponenteista ovat lääketieteen älykkäät implantit. Älykkyyden hyötyjä implanteissa on muun muassa, että lääkeaine voidaan annostella lähellä kohdekudosta, joka on paranemisen kannalta tehokkaampaa. Lisäksi vältetään terveisiin kudoksiin kohdistuneilta sivuvaikutuksilta tai komplikaatioilta, kun lääkeaine annostellaan paikallisesti. Akmal et al. (2018) todistivat, että kyseinen järjestelmä on mahdollista rakentaa sisään implantaattiin. Implantin geometria saadaan 3D-skannausmenetelmillä, kuten magneettikuvaus (MRI, Magnetic Resonance Imaging) ja tietokonetomografia (CT, Computed Tomography). Tutkimuksessa valmistettiin implantaatti alaleukaan. Implantaattiin upotettiin RFID-tunniste ja konseptuaalinen lääkeaine, joka vastasi kooltaan ja muodoltaan yleisesti käytettyjä suun kautta nieltäviä lääketabletteja. Implantaatti valmistettiin neljällä eri AM-teknologialla, jotka olivat materiaalin pursotus, valokovetus, sideaineen suihkutetus ja jauhepetisulatus. Valmistetut implantit toimivat ja ne pystyivät tuottamaan potilaskohtaista tietoa. (Akmal, Salmi et al. 2018)



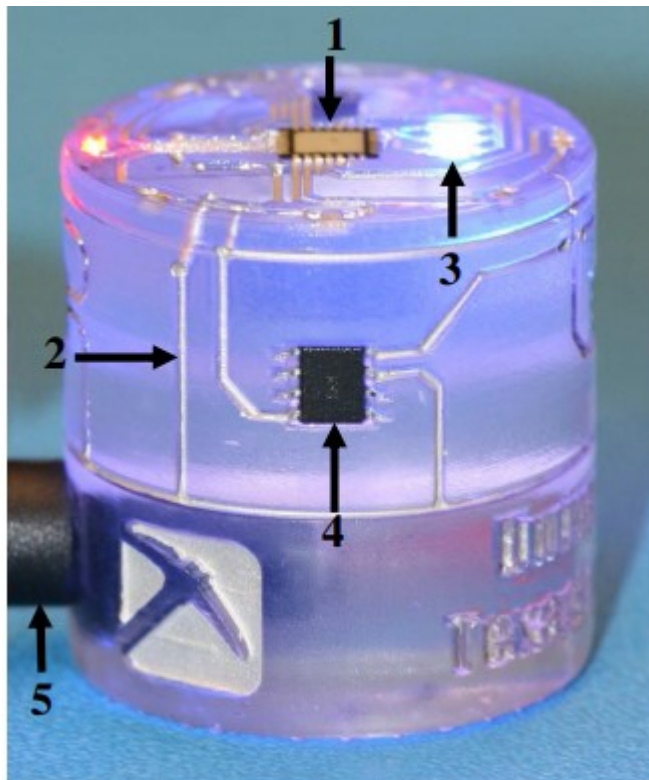
*Kuva 12. SLA-tulostettu leukanivel, jossa on älykäs implantti RFID-tunnisteella. (Akmal et al. 2018)*

Korkeat sulamislämpötilat joillain materiaaleilla rajaavat antureiden määrää, joita voidaan käyttää AM-prosessissa. Esimerkiksi tyypillisimmällä EBM-menetelmässä käytetyllä metalliseoksella Ti-6Al-4V sulamispiste on yli 700 °C. Hossain et al. 2016 valmistivat onnistuneesta kyseisestä metalliseoksesta, kuparista ja pietsosähköisestä keraamisesta materiaalista älykkään osan. Pietsosähköisyydellä tarkoitetaan ilmiötä, jossa mekaaninen jännitys muodostaa jännitteen kahden pinnan välille. Osalle tehtiin puristuskokeita sen voiman havaitsemiskyvyn määrittämiseksi. Kokeissa käytettiin neljää eri taajuutta muuttuvalla kuormalla. Anturin jännitevasteet käytetylle voimalle antoivat hyviä tuloksia eri taajuuksilla. Tutkimuksella todistettiin, että EBM-tekniikalla on mahdollista valmistaa insinöörisovelluksiin soveltuvia metallisia älykkäitä osia. Metallisiin osiin upotetuilla komponenteilla on muun muassa sovelluksensa energiajärjestelmissä, joissa voidaan reaaliajassa seurata niiden suorituskykyä korkeissa lämpötiloissa ja paineissa. (Hossain, et al. 2016)

### 3.3.2 Sähköä johtavat musteet

Onkalot AM-osissa, mahdollistavat muun muassa sähköä johtavien materiaalien pursotuksen rakenteisiin, joka on toinen tapa lisätä älykkyyttä. (Panesar, Ashcroft et al. 2017) Esimerkkinä tästä on vuonna 2013 laukaistu satelliitti CubeSat Trailblazer. Satelliitissa oli AM-tekniologialla valmistettuja osia, joiden rakenteisiin oli annosteltu sähköä johtavaa mustetta ja upotettu elektroniikkaa. Muun muassa se sisälsi kuvan 13 magnetometrijärjestelmän, joka mittasi magneettikenttää ja sen muutoksia. Anturien ja musteiden rakenteeseen oli upotettuna LEDejä, virtalähde, sekä mikrokontrolleri. Näiden saaminen kompaktin kokoisen osan sisälle onnistui vain AM-menetelmillä.

Rakenteet eivät kuitenkaan olleet tarpeeksi kestäviä avaruuden olosuhteisiin, eivätkä musteet tarpeeksi sähköä johtavia, joten kehitystyö on ollut käynnissä FDM-pohjaiselle hybriditulostusjärjestelmälle nimeltään multi3D, jolla voidaan käyttää fotopolymeerejä kestävämpiä materiaaleja 3D-tulostamiseen tarkemmalla pinnanlaadulla. Prosessin on tarkoitus mahdollistaa paremmin sähköä johtavien materiaalien, kuten kuparilangan upottamisen. Perinteinen FDM ilman ylimääräisiä moduuleita soveltuu huonosti virtapiirien tulostukseen, sillä muun muassa materiaalin huokoisuus aiheuttaa oikosulkuja. (Espalin, Muse et al. 2014)



Kuva 13. Kompakti AM-valmistettu magnetometri, joka sisältää mikrokontrollerin (1), sähköä johtavaa mustetta (2), LEDejä (3), anturit (4) ja virtalähteen (5). (Espalin et al. 2014)

### 3.3.3 Pinnoitteet

Älykkyyttä voidaan lisätä myös erilaisten pinnoitteiden avulla. Esimerkkinä tästä on Kestilä et al. (2018) tutkimus, jossa selvitettiin, miten pinnoitteet vaikuttavat AM-valmistettujen osien ominaisuuksiin. Tyypilliset AM-teknologioiden muovimateriaalit kestävät huonosti UV-säteilyä ja kaasunpurkautumista, jonka takia ne soveltuvat huonosti avaruusteknologian sovelluksiin. Tutkimuksessa tarkasteltiin satelliittien propulsiojärjestelmää, sillä se altistuu edellä mainituille ympäristön olosuhteille. Testattavat komponentit olivat propulsiojärjestelmään kuuluvat virtauksensäätimet. Komponenttien ominaisuuksien parantamiseksi käytettiin atomikerroskasvatusta (ALD, Atomic Layer Deposition). Menetelmällä muodostetaan ohuita kalvoja atomikerroskerrallaan kahden tai useamman kemikaalin kemiallisen reaktion avulla. Kalvojen paksuutta voidaan näin hallita tarkasti ja sitä pystytään käyttämään epätasaisillekin pinnoille. Tutkimuksessa ALD-menetelmällä pinnoitettiin kaksi osaa, joiden valmistusmenetelmät olivat materiaalin pursotus ja jauhepetisulatus ja materiaaleina ABS ja PA. ALD-pinnoitukseen käytettiin alumiinioksidia ja kalvojen paksuuksina käytettiin 20, 100 ja 200 nanometriä. FDM-tulostetussa ABS osassa huomattiin muun muassa pinnanlaadun paranemista, jonka vuoksi takia myös argon virtasi paremmin, jopa 20 nanometrin pinnoituksella. Makrotason tarkastelussa pinnanlaadussa ei näkynyt parannusta, mutta mikro- ja nanotasolla halkeamien määrä oli vähentynyt verrattuna alkuperäiseen. Tutkimuksessa saatiin myös näyttöä, että pinnoite olisi parantanut osan lämmönkestävyyttä. (Kestilä, Nordling et al. 2018) ALD-menetelmää voidaan soveltaa myös sähköä johtaviin ja eristäviin pinnoitteisiin, joilla saadaan osaan niin kutsuttua passiivista älyä.

## 4 Digitaaliset varaosat

Varaosat ovat olennainen osa teollisen tuotannon palvelukeskeistä jälkimarkkinointia. Asiakkaiden vaatimukset kustomoiduille matalan tuotantomäärän tuotteille vaativat joustavaa tuotantoa, joka on mahdollista AM-teknologioilla. (Muir et al. 2018) Salmi et al. (2018) ovat ehdottaneet digitaalisia varaosia tuotannon joustavuuden parantamiseksi. Konseptissa varaosat ja niihin liittyvä tieto siirretään ja säilytetään digitaalisesti. Yritykset voisivat esimerkiksi lähettää varaosan digitaalisen 3D-mallin AM-palveluntuottajalle tai tulostaa sen yrityksen omissa tiloissa.

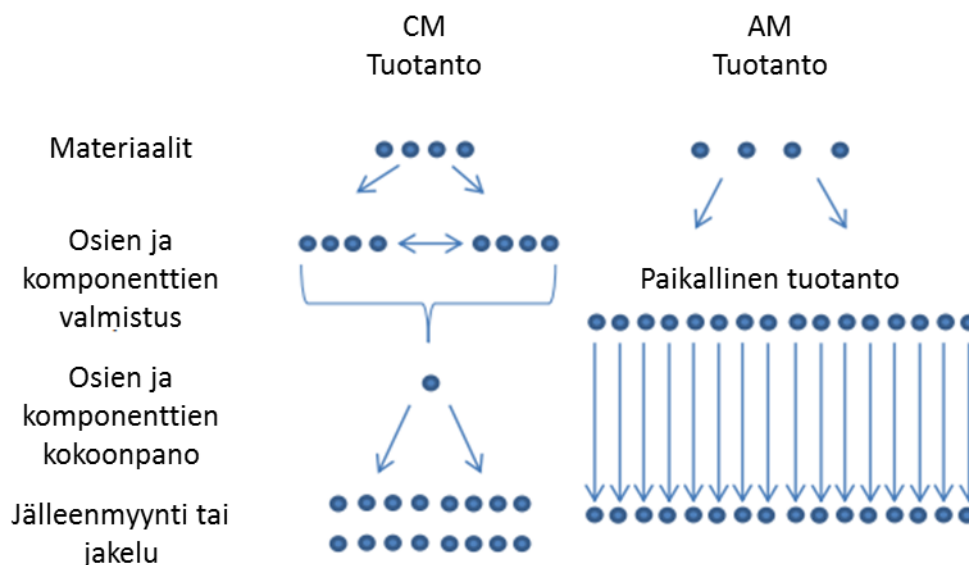
Digitaalisten varaosien hyötyjä olisivat muun muassa osien lyhyempi läpimenoaika, koska työkaluja ei tarvita ja asetusajat ovat lyhyitä, varastojen koon pieneneminen, sekä vähentyneet hallinto- ja kuljetuskustannukset. (Kretzschmar, Chekurov et al. 2018) Myös hiilidioksidipäästöt laskisivat siirryttäessä AM-pohjaiseen varaosatoimitusketjuun. Suurimmat päästöt tulevat tällä hetkellä materiaalien tuotannosta, mutta itse varaosien valmistuksessa hukkamateriaalia on vähän verrattuna CM-menetelmiin. (Li, Jia et al. 2017) On arvioitu, että vähintään 5% yritysten varaosista soveltuisivat digitaalisiksi varaosiksi. (Salmi, Partanen et al. 2018) Digitaalisten varaosien on katsottu soveltuvan hyvin erityisesti ilmailu- ja ajoneuvoteollisuuteen, sekä kuluttajaelektroniikkaan. (Kretzschmar, Chekurov et al. 2018)

Älyn lisääminen varaosiin mahdollistaisivat yksittäisten osien seuraamiseen ja niiden alkuperäisyyden vahvistamiseen, sillä jokaiselle voidaan luoda oma tunnisteensa (ID). (Salmi, Partanen et al. 2018) Niistä voitaisiin luoda anturien avulla niin kutsuttu digitaalinen kaksonen, joka on reaaliaikainen digitaalinen kopio fyysisestä varaosasta.

### 4.1 AM-pohjainen toimitusketju

Toimitusketju on peräkkäinen joukko prosesseja, joiden kautta tuote siirtyy valmistajalta loppukäyttäjälle. Toimitusketjua pyritään optimoimaan niin, että tuotteiden toimittaminen asiakkaille on mahdollisimman tehokasta ja luotettavaa. (Li et al. 2017)

Tällä hetkellä yritykset keskittävät tuotannon, tuotekehityksen ja jakelun muutamiin sijainteihin. Keskitetyssä tuotannossa ongelmana ovat muun muassa resurssien alikäyttö, mikä näkyy muun muassa korkeina työttömyyslukuina muilla alueilla, sekä niiden eriarvoistumisena. AM-teknologioilla ei keskitettyä tuotantoa tarvita, sillä tuotteet voidaan säilöä ja jakaa digitaalisesti. Tämä mahdollistaa sen, että ne voitaisiin valmistaa käytännössä missä vain, mistä olisi myös kansantaloudellista hyötyä. (Gibson, Rosen et al. 2010) Paikallinen valmistus yksinkertaistaa toimitusketjua vähentäen kustannuksia, sillä alihankkijoita ei tarvita eri osien ja komponenttien valmistukseen, sekä niiden kokoonpanoon. Perinteisten valmistusmenetelmien ja materiaalia lisäävän valmistuksen toimitusketjua on verrattu kuvassa 14. (Thomas, Gilbert 2015)



Kuva 14. Ero CM- ja AM-toimitusketjujen välillä. Lähteen (Thomas, Gilbert 2015) kuvaa muokattu.

Toimitusketjun pääasialliset kustannukset koostuvat kuljetuksesta, materiaaleista, hallinnoinnista ja varastoinnista. Li et al. (2017) tekivät kustannusanalyysin toimitusketjusimulaation avulla. Tulokset ovat nähtävissä taulukossa 2. Simulaatiossa verrattiin keskitettyä ja hajautettua AM-toimitusketjua, sekä perinteistä toimitusketjua. Hajautettu toimitusketju oli tutkimuksen mukaan halvin, mutta siinä ei otettu huomioon muun muassa useampien tuotantolaitosten sijaintien vaikutusta, mikä lisäisi työvoiman kustannuksia. Lopulliset kustannukset olivat tuhanteen euroon pyöristettynä CM-toimitusketjulle noin 129 000 €, keskitetylle AM-toimitusketjulle 94 000 € ja hajautetulle AM-toimitusketjulle 59 000 €. CM-toimitusketjussa on tyypillisesti enemmän tasoja, joka lisää muuttuvia kustannuksia. (Li et al. 2017)

Taulukko 2. CM- ja AM-toimitusketjujen muuttuvien kustannusten vertailu. (Li et al. 2017)

Muuttuva kustannus	CM-toimitusketju (€)	Keskitetty AM- toimitusketju (€)	Hajautettu AM-toimitusketju (€)
Kuljetus	74 000 (57%)	46 000 (49%)	19 000 (32%)
Valmistus	18 000 (14%)	26 000 (27%)	26 000 (44%)
Varastointi	14 000 (11%)	8000 (9%)	5000 (9%)
Hallinnointi	23 000 (18%)	14 000 (15%)	9000 (15%)
Yhteensä	129 000 (100%)	94 000 (100%)	59 000 (100%)

On liian aikaista sanoa, minkälainen toimitusketju olisi toimiva mihinkin tarkoitukseen, sillä konsepti on vielä alkutekijöissään, sekä AM-teknologiat kehittyvät hyvin nopeasti. (Li et al. 2017) Salmi et al. (2018) ovat esittäneet viittä mahdollista varaosien toimitusketjumallia, jotka ovat:

- alkuperäisvalmistajakeskeinen- (OEM, Original Equipment Manufacturer)
- huoltopalvelutarjoajakeskeinen-
- 3D-tietokantaoperaattorikeskeinen-
- 3D-tulospalvelutarjoajakeskeinen-
- ja loppukäyttäjakeskeinen malli.



OEM-keskeisessä mallissa alkuperäisvalmistaja hallinnoi kaikkea toimitusketjuun liittyvää. Malli on joustamaton, mutta soveltuu tilanteisiin, joissa toimintoja on mahdotonta ulkoistaa niiden korkean vastuukynnyksen takia, kuten lääkinälliset laitteet. Huoltopalvelutarjoajakeskeisessä mallissa muun muassa laadunvarmistus, varastointi, 3D-skannaus, 3D-malli-tietokannan operointi, sekä huolto ja asennus ovat ulkoistettu muille luotettaville toimijoille. 3D-tietokantaoperaattorikeskeisessä mallissa varaosiin liittyvä data kulkisi suuremman toimijan kautta. Loppukäyttäjälle olisi tällöin enemmän valinnanvaraa, mutta myös enemmän vastuuta, sillä laadunvarmistus, sekä huolto ja asennus jäisivät loppukäyttäjän vastuulle. 3D-tulostuspalvelutarjoajakeskeisessä mallissa keskeinen toimija on valmistusyritys tai komponenttitoimittaja, jonka kautta osat tulevat loppukäyttäjälle. Vastaavasti tässäkin mallissa loppukäyttäjälle jäävät laadunvarmistus, sekä huolto ja asennus. Loppukäyttäjakeskeisessä mallissa loppukäyttäjällä on eniten vaikutusta varaosaprosessiin. Siinä loppukäyttäjä määrittelee, mitkä toiminnot jätetään itselle ja mitkä ulkoistetaan muille toimijoille. (Salmi et al. 2018)

## **4.2 Varastonhallinta**

Monimutkaiset ja monia tasoja sisältävät perinteisiin valmistusmenetelmiin pohjautuvat toimitusketjut tuovat haasteita erityisesti varastonhallintaan. Lean on johtamisfilosofia, jolla pyritään vähentämään tai poistamaan arvoa tuottamattomia toimintoja eli hukkia. Tuotannossa sovellettaessa käytetään siitä yleisesti termiä Lean-tuotanto. Hukkia on filosofian mukaan seitsemän: ylituotanto, kuljetus, laatuvirheet, ylikäsittely, varastot ja odotus. AM-toimitusketjulla voidaan vaikuttaa erityisesti varastojen kokoon ja kuljetuskustannuksiin. Digitaalisiin varaosiin siirryttäessä fyysisten varastojen koko pienenee ja voidaan hyödyntää JIT-tuotantoa (Just-In-Time), jossa osat valmistuvat silloin kun niitä tarvitaan eli tuotantoa ohjaa kysyntä. Materiaalivirtaa ohjaa asiakkaan tilaus, kun taas työntöohjauksessa osia valmistetaan tuotantosuunnitelman mukaisesta tarvelaskentaa (MRP, Material Resource Planning) hyödyntäen. (Kalpakjian et al. 2014)

Varaosaliiketoiminnan kolme suurinta haastetta ovat: varaosien saatavuus, hinta ja aika. Tuotteiden kysynnän ennustaminen on haastavaa, jonka takia on olemassa niin kutsuttuja puskurivarastoja toimitusvarmuuden varmistamiseksi. Myöhästymiskustannukset ja uskottavuuden menettäminen ovat varastoinnin suurimmat motivaattorit. (Muir, Habbud 2018) Tarvetta varastoinnille on varsinkin, jos varaosien valmistus on ulkoistettu alihankkijoille ja läpimenoajat ovat pitkiä. (Chekurov, Metsä-Kortelainen et al. 2018, Liu, Huang et al. 2014) Varastossa säilyttäminen ei ole arvoa tuottavaa ja varastoissa kiinni oleva pääoma olisi paremmin käytettävissä liiketoiminnan kehittämiseen. Ongelmana monilla yrityksillä on vanhempien tuotteiden varaosien toimittaminen, sillä niitä ei usein ole enää varastoissa saatavilla. Näiden valmistaminen voi olla hidasta ja kallista erityisesti, jos valmistukseen vaadittavat työkalut, kuten muotit, joudutaan ensin valmistamaan (Salmi, Partanen et al. 2018).

### **4.3 Käyttöönoton ongelmat**

Rajoitteina digitaalisten varaosien käyttöönottoon ovat muun muassa tulostusmateriaalien määrä ja hinta, sekä tulostusten tarkkuus, 3D-mallin puuttuminen tai sen epätarkkuus, tulostimien rakennustilojen koko ja jälkikäsittelyn tarve. Lisäksi useimmat yritysten käyttämistä IT-järjestelmistä eivät sovellu digitaalisten varaosien käyttöönottoon. Myöskään perinteisiä menetelmiä varten suunnitellut osat eivät välttämättä sovellu 3D-tulostettavaksi ominaisuuksien ja tarkkuuden kärsimättä. Jotta tuotesuunnittelussa voitaisiin siirtyä enemmän AM-teknologioita tukevaksi, tulisi suunnittelijoiden tuntea myös nykyistä paremmin eri AM-teknologioita. (Salmi, Partanen et al. 2018) Haasteita liittyy myös immateriaalioikeuksiin (IPR, Immaterial Property Rights). Tämän hetken IPR-lakeja tulisi kehittää huomioimaan paremmin tuotannon digitalisaatio. Ongelmia liittyy patentteihin ja siihen, jos AM-varaosia korjataan kolmansilla osapuolilla. Tämänhetkisen Euroopan patenttilain mukaan omistaja voi estää patentoidun keksinnön valmistamisen, käyttämisen, myymisen, markkinoille tuomisen, tarjoamisen, maahantuomisen ja säilyttämisen. AM-varaosien korjaustoiminnot kuitenkin saattavat todennäköisesti vaatia ainakin osittain, johonkin patentoituun keksintöön kuuluvan komponentin valmistamisen kaupallisessa tarkoituksessa. (Ballardini, Ituarte et al. 2018)

## 5 Tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät

Diplomityössä suunniteltiin ja valmistettiin älykäs osa, jolle suoritettiin reagoitukykyä mittaavia kokeita. Osan valmistuksen aikana Bluetooth-anturialusta upotettiin rakenteen sisälle. Tulostusprosessista, sekä osalle suoritetusta pesusyklistä kerätystä datasta ja sille suoritetuista reaktiokokeista saadut kuvaajat ovat esitetty luvussa tutkimustulokset ja tulostenkäsittely.

Tässä luvussa esitellään älykkäässä osassa käytetyn anturialustan RuuviTAGin spesifikaatiot, sekä osalle laaditut vaatimukset. Lisäksi esitellään osan suunnitteluprosessi ja mahdollisia osan toimintaa parantavia kehitysehdotuksia. Viimeiseksi esitellään valmistuksessa käytetyt ohjelmistot ja koneet.

### 5.1.1 Anturialustan spesifikaatiot

Älykkääseen osaan upotettiin Ruuvi Innovations Oy:n RuuviTAG anturialusta, joka sisältää kaksi erillistä anturia. Ympäristön olosuhteita mittaava anturin, sekä kiihtyvyyssanturin. Olosuhteet, joita anturi mittaa ovat lämpötila, ilmanpaine ja suhteellinen ilmankosteus. Lisäksi tietoa saadaan myös signaalinvahvuudesta (RSSI, Received Signal Strength Indication). Maksimioperaatiolämpötilaksi on annettu  $-40-85^{\circ}\text{C}$  ja suositukseksi  $-20-65^{\circ}\text{C}$ . Anturi lähettää dataa Bluetoothin välityksellä ja anturialustan virtalähteenä on paristo. (Jämsä 2017)

Järjestelmäpiirinä RuuviTAGissa on Nordic Semiconductor nRF52832. Prosessorin kellotaajuus on 64 MHz ja sen Bluetooth-datalähetysnopeus 2 Mbps. Kiihtyvyyssanturina alustassa on STMicroelectronics LIS2DH12, Ympäristön olosuhteita mittaava anturi on Bosch BME 280. Kosteusanturin tarkkuus on  $\pm 3\%$  suhteellisesta ilmankosteudesta ja lämpötila-anturin  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$   $25^{\circ}\text{C}$ :ssa ja  $\pm 1$  välillä  $0-25^{\circ}\text{C}$ . Virheen määrä paineanturissa määräytyy korkeuden muutoksen funktiona. Virhettä välillä 1-400 metriä kertyy  $\pm 0,25\%$ .

Datankeruulaitteistona älykkäälle osalle suoritetuissa kokeissa oli Raspberry PI 3 - tietokone, jossa käyttöjärjestelmänä oli Raspbian. Käyttöjärjestelmän päälle oli asennettu Bluetooth-kirjasto. Lyhyt node-skripti loi datavirrasta csv.-tiedoston, jonka avulla pystyttiin luomaan kuvaajat älykkäälle osalle tehdyistä kokeista Excelillä.

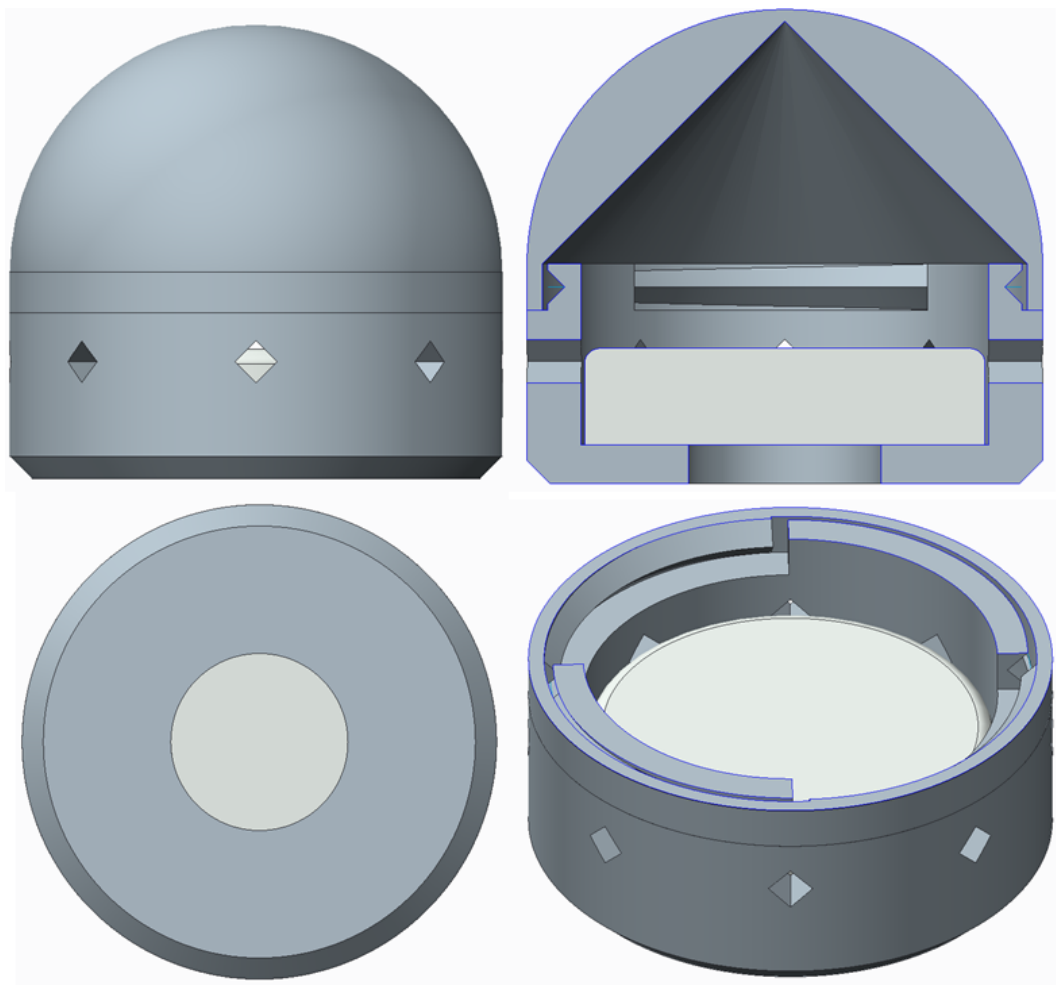
### 5.1.2 Älykkään osan rungon vaatimukset

Toiminnan ja mittausten laadun vuoksi älykkään osan rungolle asetettiin tiettyjä vaatimuksia, jotka olivat seuraavat:

- ilman kosteus pääsee kulkemaan tilaan vapaasti
- anturi ei liiku osan sisällä
- kiihtyvyyssmittausdata vastaa kappaleen koordinaatistoa
- anturi on mahdollista ottaa ulos osan sisältä hajottamatta osaa
- osa on kompakti
- sisältää tukirakenteita
- mahdollisuus kiinnitykseen, johonkin toiseen rakenteeseen
- pinnanmuoto mahdollisimman aerodynaaminen
- ja siisti ulkonäkö.

### 5.1.3 Älykkään osan rungon suunnittelu

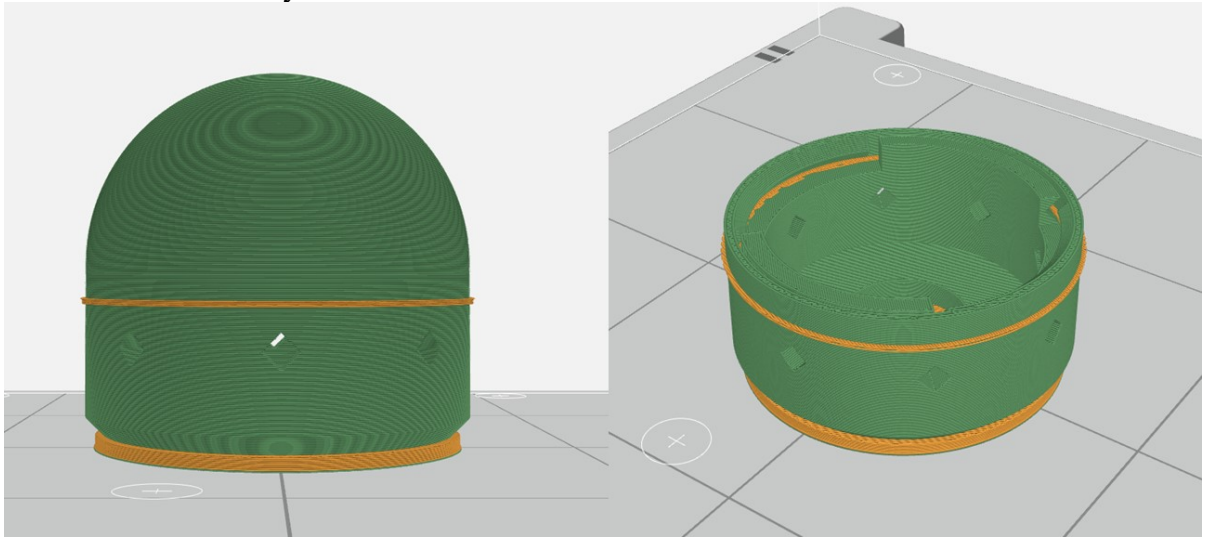
AM-menetelmien etuja pyrittiin ottamaan mahdollisimman paljon huomioon suunnittelussa. Runko mallinnettiin Creo 3.0 CAD-ohjelmistolla. Muun muassa yli 45° kulmia hyödynnettiin ulkonemissa, jotta tukimateriaalia tarvittiin mahdollisimman vähän. Runko koostui pohjasta ja kannesta. Pohjassa oli tähdenmuotoisia tuuletusreikiä, jotta ilma pääsisi vaihtumaan osan sisällä. Tämän lisäksi siinä oleva upotus oli oltava tarpeeksi syvä, jolloin anturi uppoaisi rakenteen sisälle ilman, että suutin osuu siihen tulostusprosessin aikana. Suunnittelussa oli otettava huomioon, että tulostusalustan paikka ei muutu, kun anturialusta upotetaan runkoon. Upotuksen halkaisijan välykseksi valittiin 1 millimetri, että anturialusta uppoaisi ilman ylimääräistä voimaa. Voiman käyttö upotuksessa saattaisi aiheuttaa rakennusalan liikuttamisen ja tulostuksen epäonnistumisen. Runko suunniteltiin niin, että se oli kierrettävissä kiinni pohjassa ja kannessa olevilla urilla, jotta anturialustan paristo olisi vaihdettavissa. 3D-malli älykkäästä osasta on esitetty kuvassa 15.



*Kuva 15. CAD-malli osasta ja siihen upotetusta anturista.*

Suunnittelun aikana tehtiin muutamia testitulosteita välysten ja dimensioiden varmistamiseksi Ultimaker 3-tulostimella. Stratasyn uPrintillä tehtiin muutama testitulostus, jotta tulostimen käyttö sujui varsinaisen tulostuksen aikana. Viipalointiohjelmistona oli GrabCad Print. Viipalointiohjelmisto loi aluksi tukirakenteita osan sisälle. Tukirakenteet poistuivat STL-tiedoston tarkkuutta nostamalla.

Ohjelmistossa oli kolme vaihtoehtoa, sille miten se loi tukimateriaalit osaan: smart, basic ja surround. Lisäksi tukimateriaalin tiheys voitiin määrittää. Viipalointiohjelmiston luoma malli on esitetty kuvassa 16.



*Kuva 16 Malli viipalointiohjelmisto GrabCadissä.*

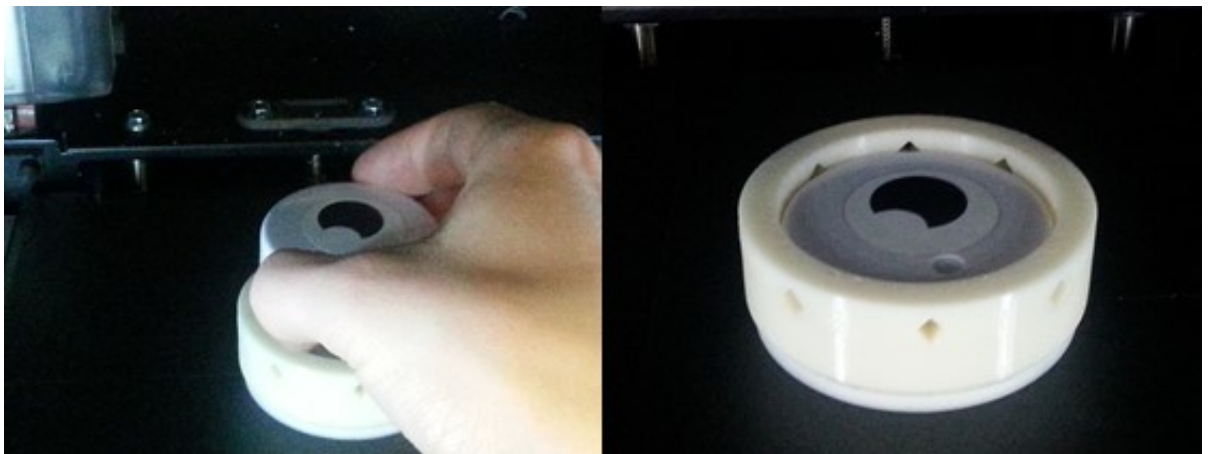
### 5.1.4 Älykkään osan rungon kehitysideat

Pohjan ja kannen kiinnityksen välyksiä on vielä varaa tiukentaa. Anturin lukitukseen paikalleen voitaisiin tulostaa joustavasta elastomeerista tiiviste osan sisään tai kiinnitinruuvilla osan sivusta. Osan muotoa voitaisiin optimoida ristikkorakenteilla, jolloin ympäristönmittausanturi reagoi paremmin paineen, lämpötilan ja ilmankosteuden muutoksiin.

### 5.2 Älykkään osan valmistus

Osa tulostettiin Stratasyksen uPrint-FDM-tulostimella. Materiaalina oli kestumuovi ABS. Viipalointiohjelmistossa määritettiin tulostin pysähtymään tietyn kerroksen kohdalla, niin että anturin upottaminen oli mahdollista. Mallia yksinkertaistettiin tulostusta varten jättämällä kiinnittimet pois, sillä ne eivät olleet kokeiden kannalta oleellisia. Anturin upotus ja tulostusprosessi ovat esitetty kuvissa 17 ja 18.

GrabCad-ohjelmisto arvioi tulostuksen kestoksi 4 tuntia ja 12 minuuttia. Viipalointiohjelmiston arvioima materiaalien määrät olivat 73,58 cm<sup>3</sup> osalle ja 3,021 cm<sup>3</sup> tukimateriaalille. Osan valmistus onnistui ensimmäisellä tulostuskerralla.



Kuva 17 Anturin upotus.



Kuva 18. Tulostusprosessi Stratasyksen uPrintillä.

### 5.3 Älykkään osan tukirakenteiden liuottaminen

Osassa olevien tukirakenteiden poistamiseksi suoritettiin neljä tuntia kestänyt pesusykli. Samalla selvitettiin kuinka hyvin anturialusta kestää pesuainetta ja vettä, kun se on upotettuna osan sisälle ja minkälaista mittausdataa se antaa. Pesu suoritettiin WaveWash-koneella. Pesusykliä käytettiin Ecoworxsin pesuainetta, joka on tarkoitettu yleisimpien Stratasyksen koneissa käytettyjen tukimateriaalien poistoon. Pesuaine oli osittain natriumkarbonaattia sekä dinatriumkarbonaattivetyperoksidi-seosta. Pesusyklistä saatu data on esitelty luvussa tutkimustulokset. Pesukone on esitetty kuvassa 19.



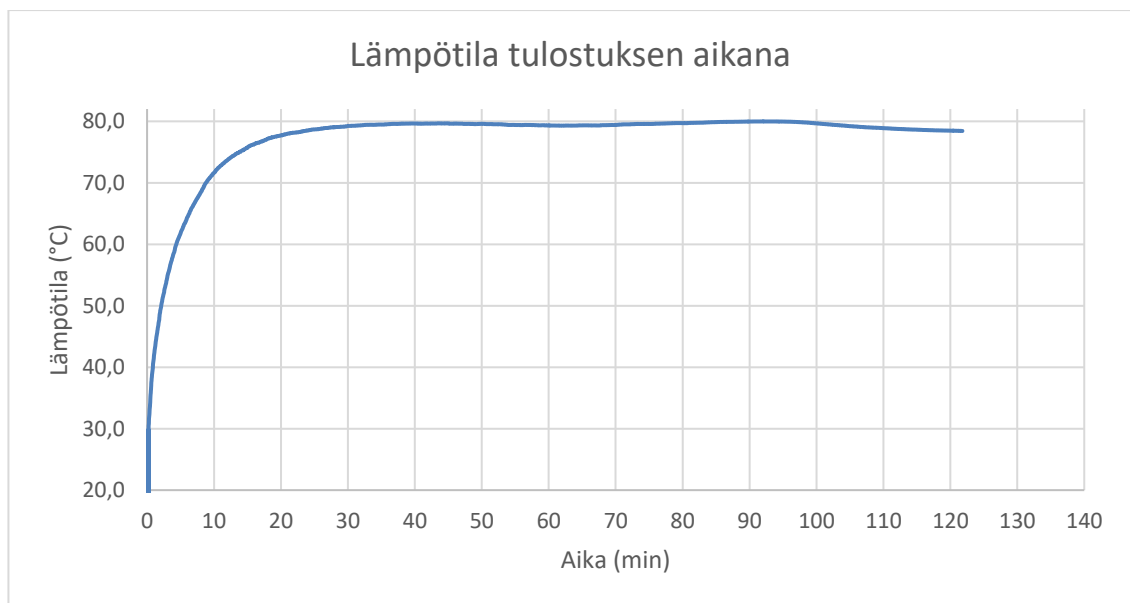
Kuva 19. Tukirakenteiden liuottamiseen käytetty pesukone..

## 6 Tutkimustulokset ja tulostenkäsittely

Tässä luvussa on esitelty työssä saadut tutkimustulokset. Osan tulostuksen ja pesusyklin mittauksista saadut kuvaajat ovat esitetty kahdessa ensimmäisessä alaluvussa. Kolmanteen alalukuun on koottu tulokset älykkäälle osalle tehdyistä reaktiokokeista.

### 6.1 Älykkään osan tulostus

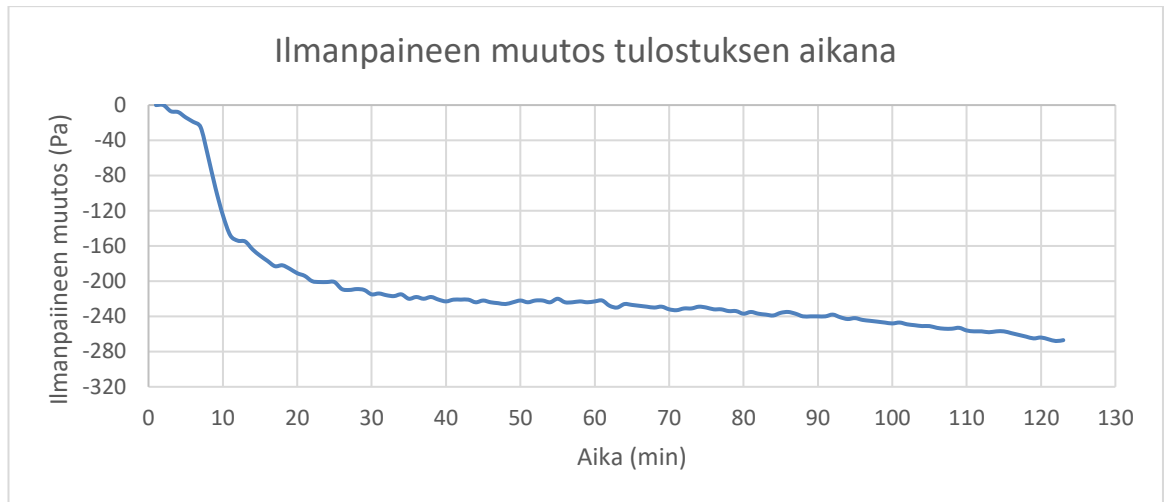
Älykkään osan tulostuksen mittausdata on esitetty tässä luvussa. Kuvassa 20 on esitetty lämpötilan mittausdata tulostuksen ajalta. Kuvasta nähdään, että lämpötila kohoaa nopeasti ensimmäisen viidentoista minuutin aikana, jonka jälkeen se tasoittuu 30 minuutin jälkeen. Lopussa lämpötila putoaa hieman tulostuksen päättyessä. Sisäänrakennettua lämpötila-anturia voitaisiin hyödyntää osissa, joiden toimintaympäristön lämpötilalla on merkitystä. Vaaditut toimenpiteet toimilaitteilla tietyn lämpötilarajan voidaan tehdä anturin lämpötila-anturin tarkkuus huomioiden.



Kuva 20. Lämpötila tulostuksen aikana.

Tulostuksen aikana saatu ilmanpaineenmuutos-data on esitetty kuvassa 21. Mittapisteitä on verrattu alkupaineeseen. Paine laski tulostuksen aikana, vaikka olisi voinut olettaa sen kasvavan ideaalikaasulain mukaisesti. Tulostustilan tilavuus pienenee osan valmistuessa ja lämpötila pysyy vakiona, kuten lämpötilakuvaajasta nähtiin. Syynä tälle voi olla, että koneen puhaltama lämmin ilma pääsi heikommin reagoimaan anturin kanssa, mitä korkeammaksi ja suljetummaksi anturia ympäröivä runko valmistui.



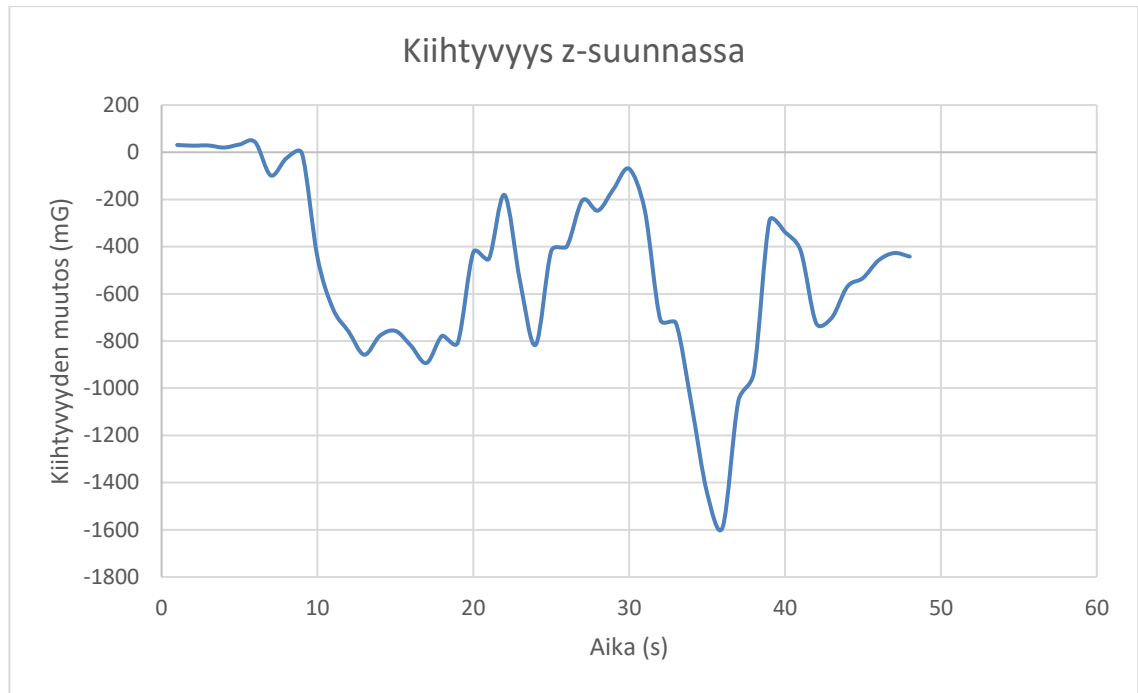


*Kuva 21. Ilmanpaineen muutos tulostuksen aikana.*

Anturin lähettämä kiihtyvyydsdata z-suunnassa on esitetty kuvissa 22 ja 23. Datapisteitä verrattiin alkukiihtyvyyteen. Suurimmat piikit ovat nähtävissä viimeisimmän neljänkymmenen sekunnin ajalta, kun osa poistetaan tulostimesta. Vastaavanlaista mittausdataa voitaisiin hyödyntää esimerkiksi kuljetuksessa olevien tavaroiden seuraamiseen. Tällöin voitaisiin nähdä esimerkiksi ajanhetket, jolloin tavarat lastataan ja puretaan. Lisäksi odottamattomat tapahtumat, kuten tavaroiden tippuminen näkyisivät selkeinä piikkeinä saadussa datassa.



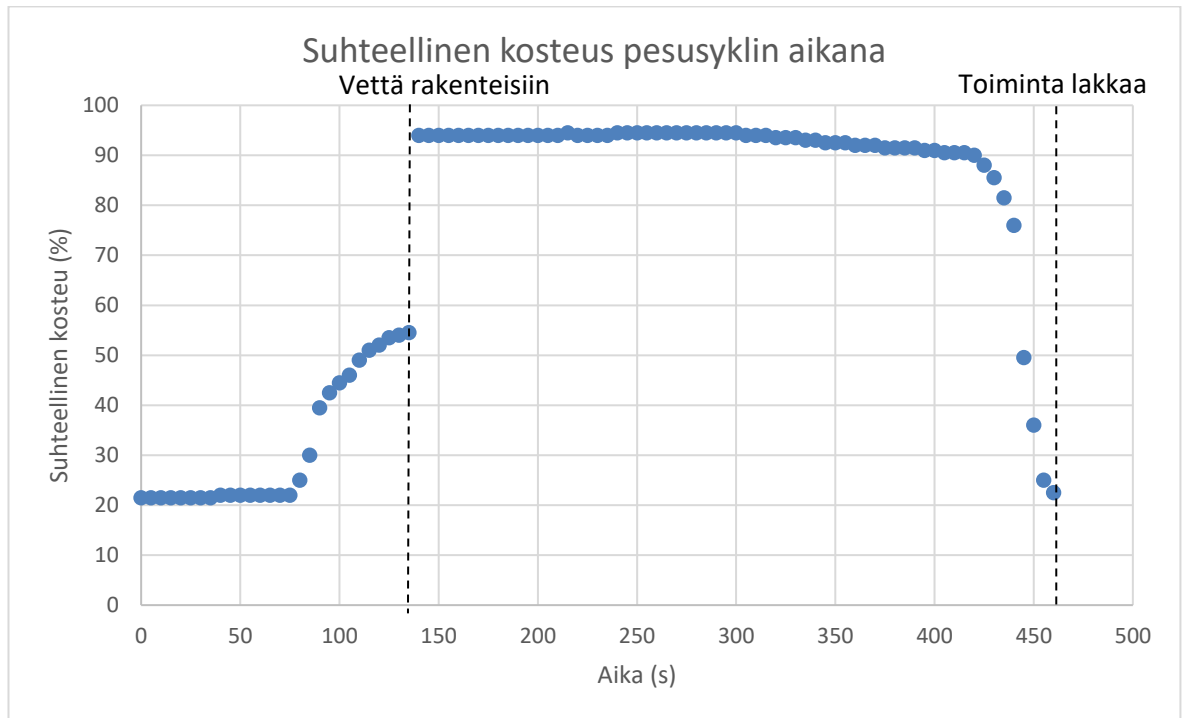
*Kuva 22. Kiihtyvyyden muutos tulostuksen aikana.*



*Kuva 23. Kiihtyvyyden muutos viimeisellä minuutilla.*

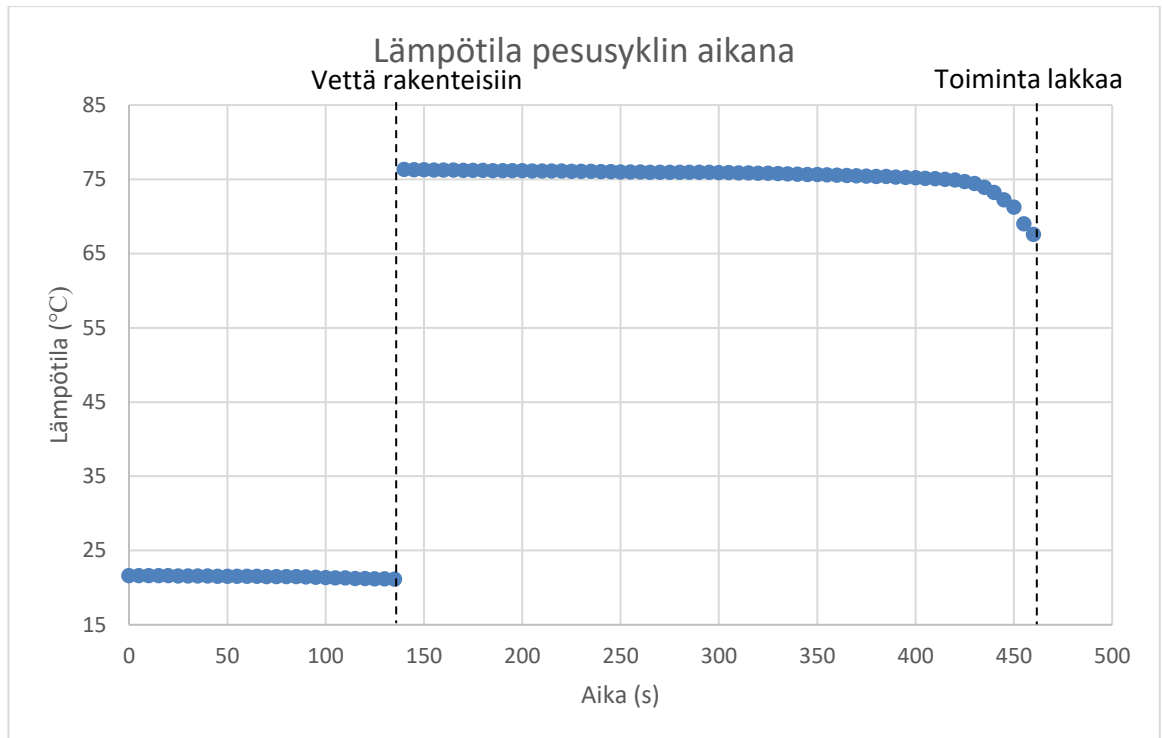
## 6.2 Älykkään osan tukirakenteiden liuottaminen

Osalle suoritetun pesusyklin mittausdatan kuvaajat ovat esitetty tässä luvussa. Kaikista kuvaajista on nähtävissä, että mittausdataa saatiin 460 sekunnin ajalta. Tämän jälkeen lähetin lopetti toimintansa. Todennäköisesti syynä oli tiivisteiden pettäminen, jonka takia pesuainetta ja vettä pääsi anturin sisälle. Suhteellisen kosteuden kuvaajasta (Kuva 24) nähdään, että vettä ja pesuainetta pääsi anturin elektroniikan kanssa kosketuksiin 140 sekunnin kohdalla pesun aloittamisesta. Suhteellinen kosteus nousee hetkessä 95 prosenttiin ja pysyy siinä noin seuraavat 300 sekuntia, kunnes vähitellen kosteus laskee ja lähetin lakkaa toimimasta 460 sekunnin kohdalla pesusyklin aloituksesta.



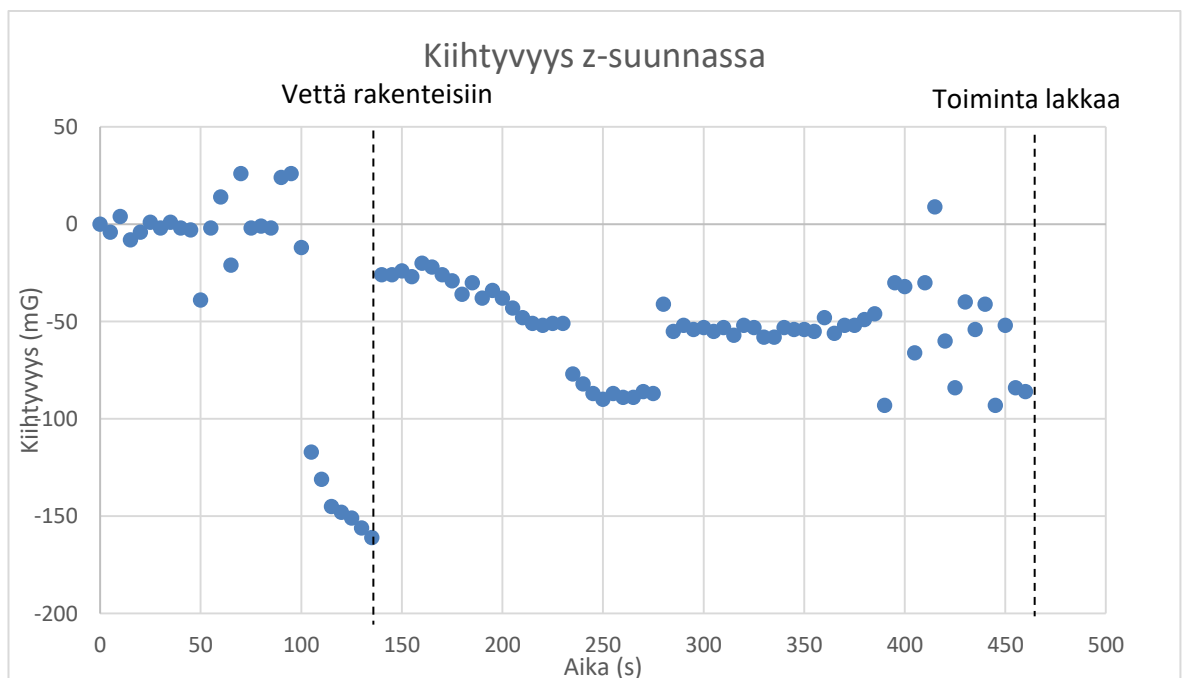
Kuva 24. Kosteus pesusyklin aikana.

Lämpötilan kuvaaja (Kuva 25) eroaa kosteuden kuvaajasta siinä, että 21 celsiuksesta nousee noin 80 asteeseen vielä jyrkemmin ja lämpötilan lasku on vähäistä ennen anturin hajoamista.



Kuva 25. Lämpötila pesusyklin aikana.

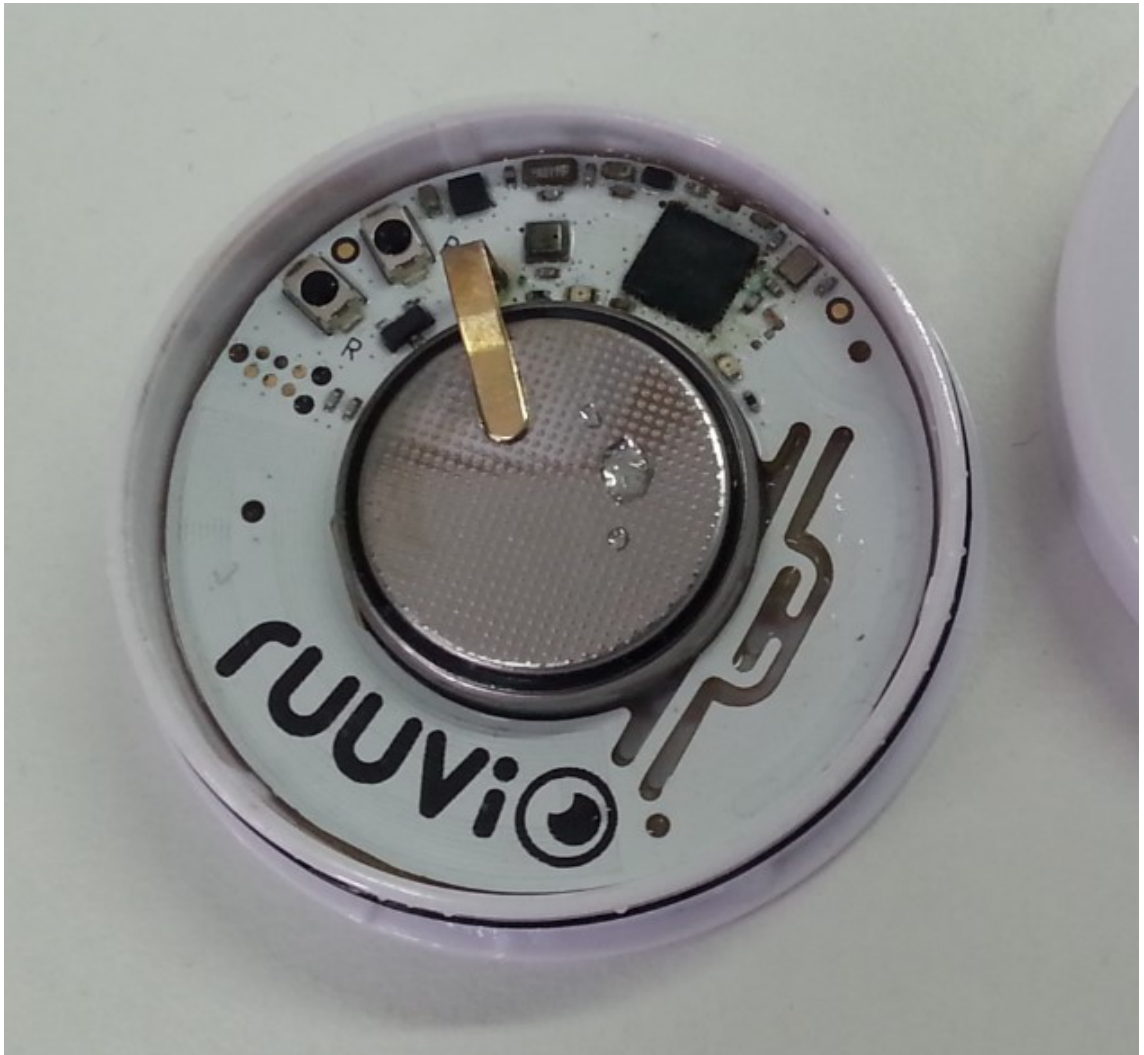
Kiihtyvyyden kuvaajasta (Kuva 26) voidaan nähdä, että suurimmat kiihtyvyydet ovat heti pesun alussa, kun pesuastia täyttyy vedellä. Koska kiihtyvyyssdataan saaminen loppui myös 460 sekunnin kohdalla pesusyklin alusta, on lähetin todennäköisesti vaurioitunut.



Kuva 26. Kiihtyvyyden muutos z-suunnassa pesusyklin aikana.

RuuviTAGin suoja oli osittain pois paikaltaan pesusyklin jälkeen. Kuvasta 27 voidaan nähdä anturin sisälle päässyttä pesuainetta. Pesusyklistä saadusta datasta oli pääteltävissä, milloin anturi hajosi. Vastaavasta datasta on hyötyä myös teollisuus- ja kuluttajaosissa.

Varsinkin anturin ollessa osaan upotettuna voidaan varmistua muun muassa siitä, että osa ei ole vesitiivis. Tästä voisi olla hyötyä sovelluksissa, joiden toimintaympäristö on esimerkiksi merellä.



*Kuva 27. RuuviTAG pesusyklin jälkeen.*

### 6.3 Kokeet älykkäälle osalle

Älykkäälle suoritettiin erilaisia sen reagoitukykyä mittaavia kokeita. Ensimmäisenä osalle suoritettiin kaksi lyhyempää reaktiota testaavaa koetta. Kolmas koe oli pidempi seurantakoe, jossa reaktiokokeita suoritettiin sarjassa 10 minuutin ajan. Pidempi seurantakoe suoritettiin sekä älykkäälle osalle, että pelkälle RuuviTAGille. Kuvassa 28 on esitetty muutamia osalle suoritettuja kokeita.



Kuva 28. Älykkäälle osalle suoritettuja, sen havainnointikykyä, mittaavia kokeita.

#### 6.3.1 Lyhyet reaktiokokeet

Älykkäälle osalle suoritettiin kaksi reaktiokoetta sen reagoimiskyvyn määrittämiseksi. Osaa pidettiin ensin kylmän veden (n. 8°C) alla neljä minuuttia, jonka jälkeen se siirrettiin välittömästi kuumaan veteen (n. 58°C), jossa sitä pidettiin myös neljä minuuttia. Lisäksi selvitettiin, miten veden alla oleminen vaikutti radiosignaaliin. Toisessa lyhyessä reaktiokokeessa osa suljettiin pakastimeen viideksi minuutiksi.

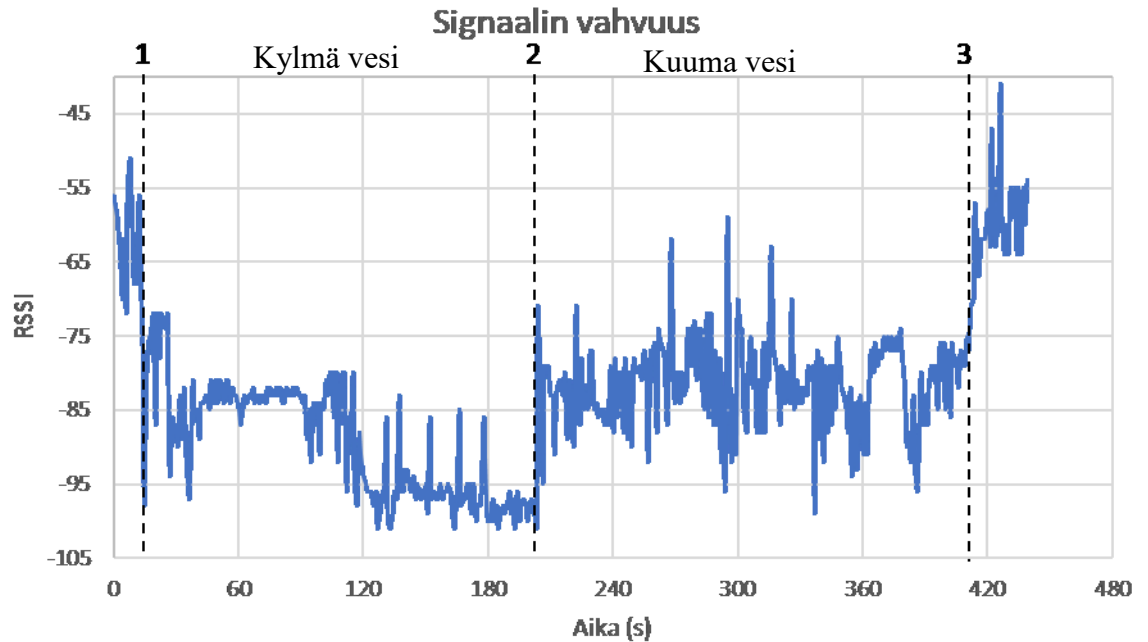
Osaltaan lämpötilan reagoitukykyyn vaikuttaa anturia ympäröivän materiaalin lämpökapasiteetti, joka on osaan sitoutunut lämpöenergia lämpötilayksikköä kohden. (Lampinen 2010)

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (1)$$

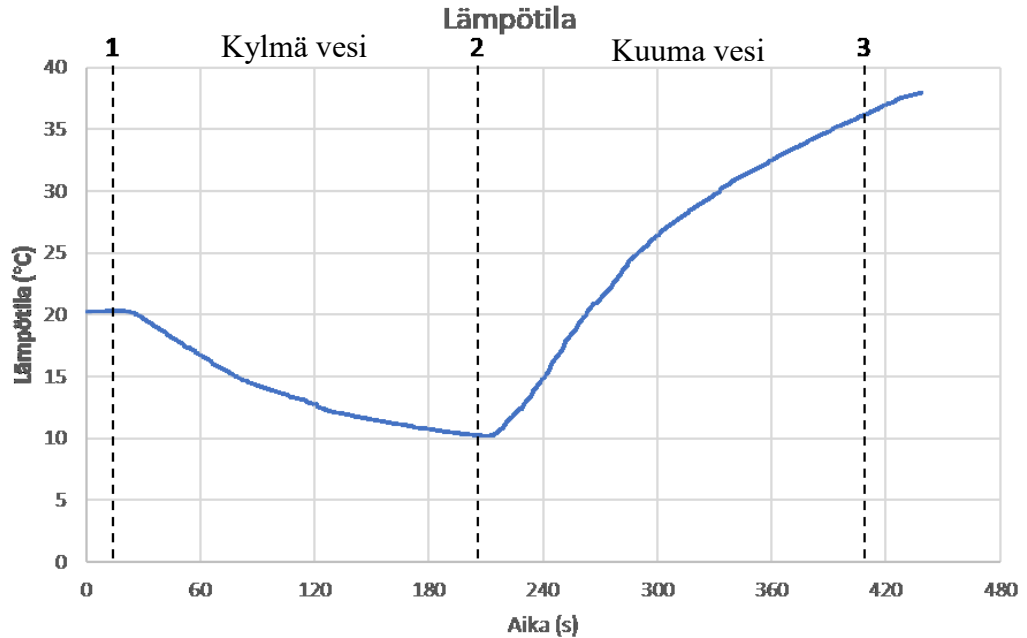
Seuraavassa alaluvussa on verrattu pelkän anturialustan ja älykkään osan eroja lämpötilan havainnointiin. Kuvaajien lämpötilamuutosten viiveestä voidaan tehdä johtopäätöksiä materiaalin vaikutuksesta reagoitukykyyn.

Kylmä-kuuma-kokeen tulokset ovat esitelty kuvissa 29 ja 30. Signaalin vahvuuden kuvaajasta voidaan nähdä, milloin älykäs osa upotetaan kylmään veteen. Tämä voidaan nähdä kuvaajan pisteessä 1. Vaihto kylmästä kuumaan veteen tapahtuu noin 204 sekunnin kohdalla pisteessä 2. Radiosignaali vahvistuu, siirryttäessä kuumaan veteen, sillä mittaustilaiteisto on lähempänä anturia. Pisteessä 3 älykäs osa otetaan pois vedestä ja huomataan taas radiosignaalin vahvistumista. Lämpötila-anturilla kestää muutama sekunti reagoida olosuhteiden muutokseen kuten voidaan nähdä kuvan 30 pisteestä 2.

Ajan otossa on tapahtunut virhe, sillä osa ehti olla kylmässä vedessä vain reilun 3 minuuttia ja 30 sekuntia signaalin vahvuuden kuvaajan mukaan. Kuumassa vedessä se ehti olla kuitenkin halutut 4 minuuttia.



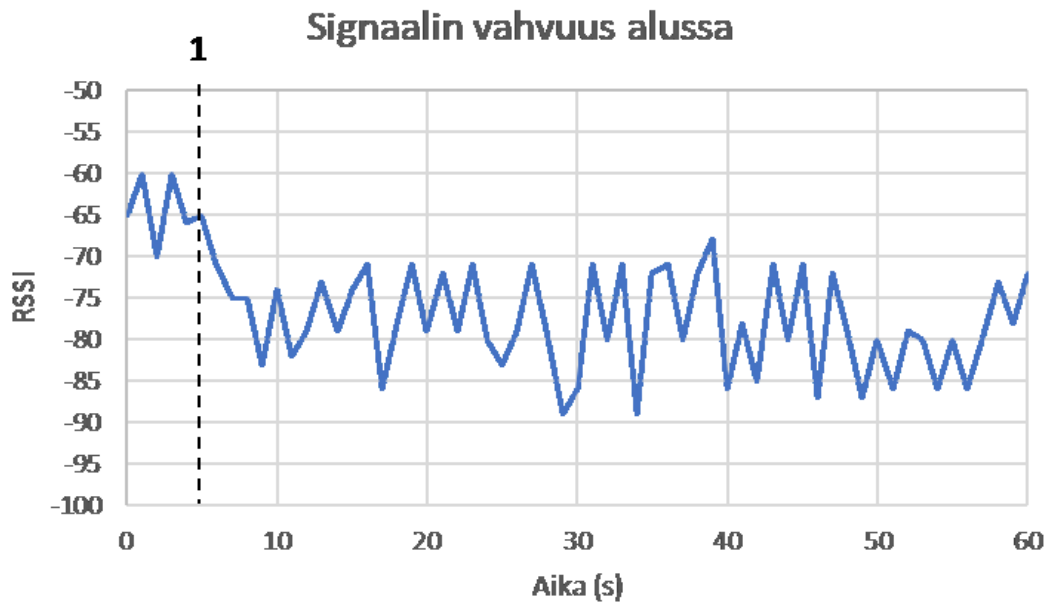
Kuva 29. Signaalin vahvuus, kun älykäs osa upotettiin kylmään ja kuumaan veteen..



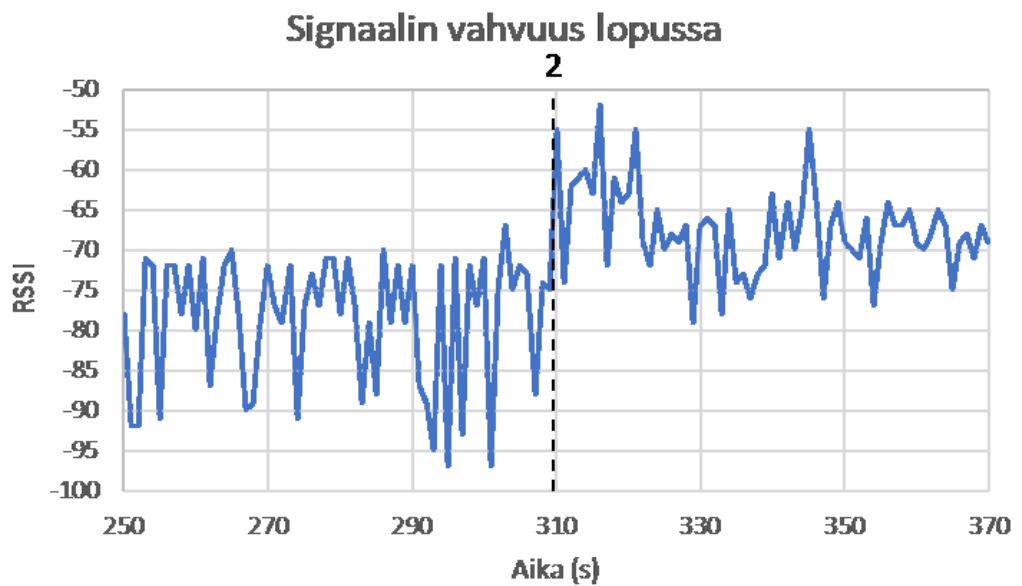
Kuva 30. Lämpötila, kun älykäs osa upotettiin kylmään ja kuumaan veteen..

Kuvaajat siitä, kun älykäs osa suljettiin pakastimeen viideksi minuutiksi, on esitetty kuvissa 31, 32 ja 33. Älykkään osan sulkeminen pakastimeen on nähtävissä signaalin vahvuuden kuvan 31 pisteestä 1 ja ulos ottaminen kuvasta 32 pisteessä 2. Lämpötila-anturi reagoi hitaasti pakastimen lämpötilaan kuvassa 33. Pakastimen lämpötilaksi oli

mitattu ennen kokeiden aloittamista  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Voidaan nähdä, että reagointi kiihtyy 120 sekunnin kohdalla kulmakertoimen kasvaessa.

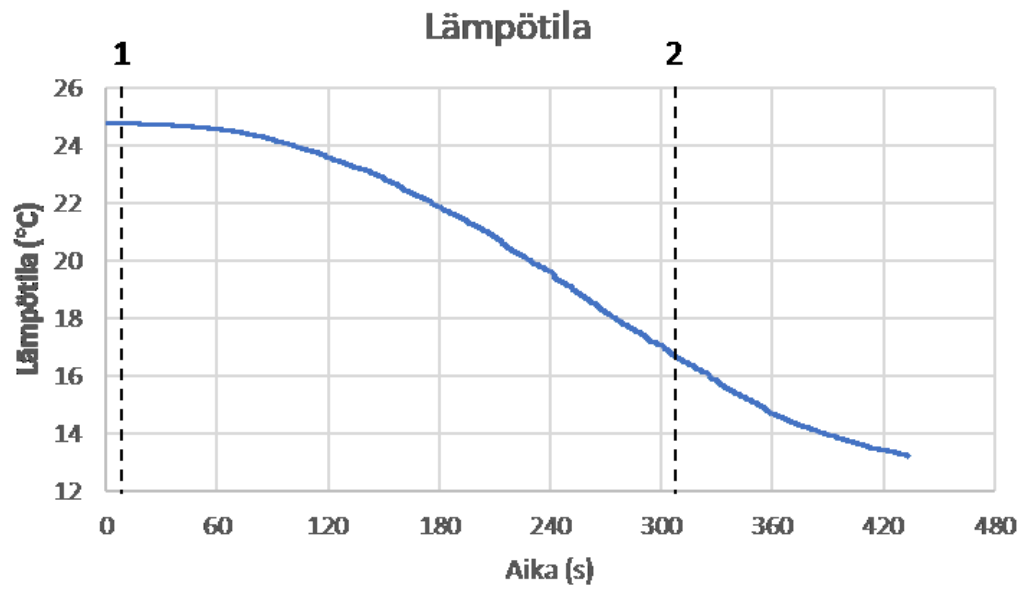


Kuva 31. Signaalin vahvuus alussa, kun älykäs osa on suljettu pakastimeen (piste 1).



Kuva 32. Signaalin vahvuus lopussa, kun älykäs osa otetaan pois pakastimesta (piste 2).





Kuva 33. Älykkään osan reagointi pakastimen lämpötilaan..

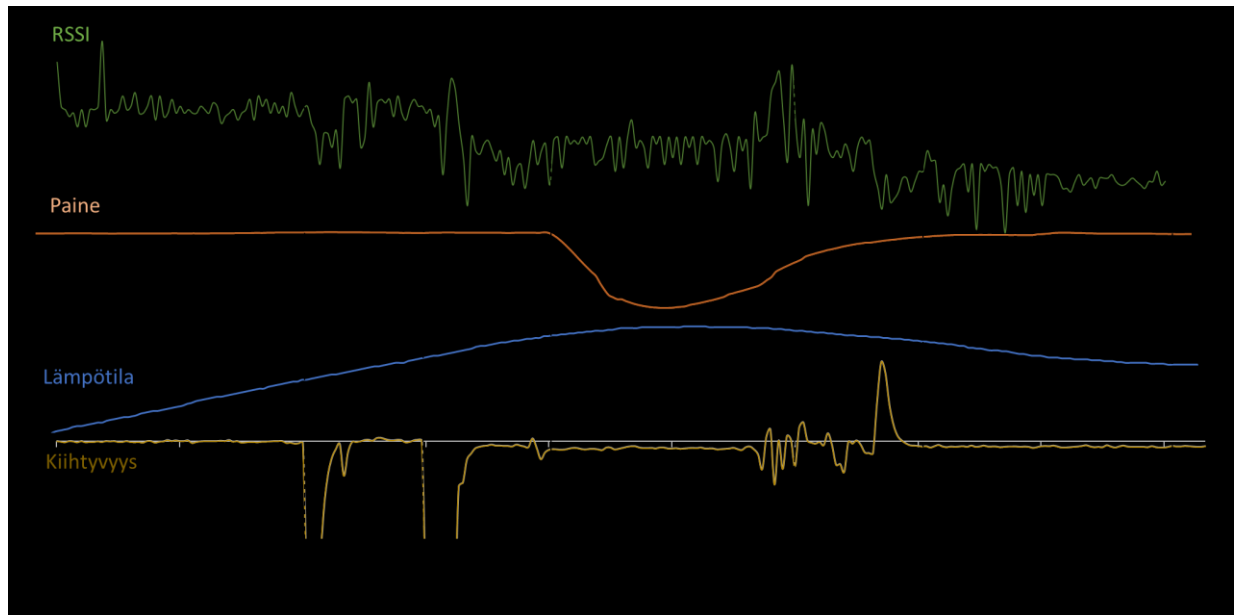
### 6.3.2 Pitkä seurantakoe

Älykkäälle osalle, sekä pelkälle RuuviTAG-anturialustalle suoritettiin sarja reaktiokokeita taulukon 3 mukaisesti. Tapahtumat ovat merkitty samoilla numeroilla kokeista saatuihin kuvaajiin. Ensimmäisenä osaa pudotettiin kaksi kertaa puolen minuutin välein. Tämän jälkeen se vietiin pakastimeen minuutiksi, josta osa kuljetettiin saunaan. Lisäksi kaksi ovea suljettiin anturialustan ja mittalaitteiston väliltä, sillä haluttiin selvittää vaikuttaako se radiosignaalin vahvuuteen. Ilmankosteuden kuvaajista ei ollut nähtävissä selkeitä poikkeamia eri tapahtumissa, joten sen kuvaajia ole esitelty. Pitkä seurantakoe suoritettiin puolen tunnin sisällä lyhyistä reaktiokokeista, minkä takia muun muassa ilmankosteuden ja lämpötilan data eivät ole yhtä tarkkoja kuin, jos kokeiden välillä olisi ollut pidempi tauko.

*Taulukko 3. Osalle ja anturialustalle suoritettut seurantakokeet.*

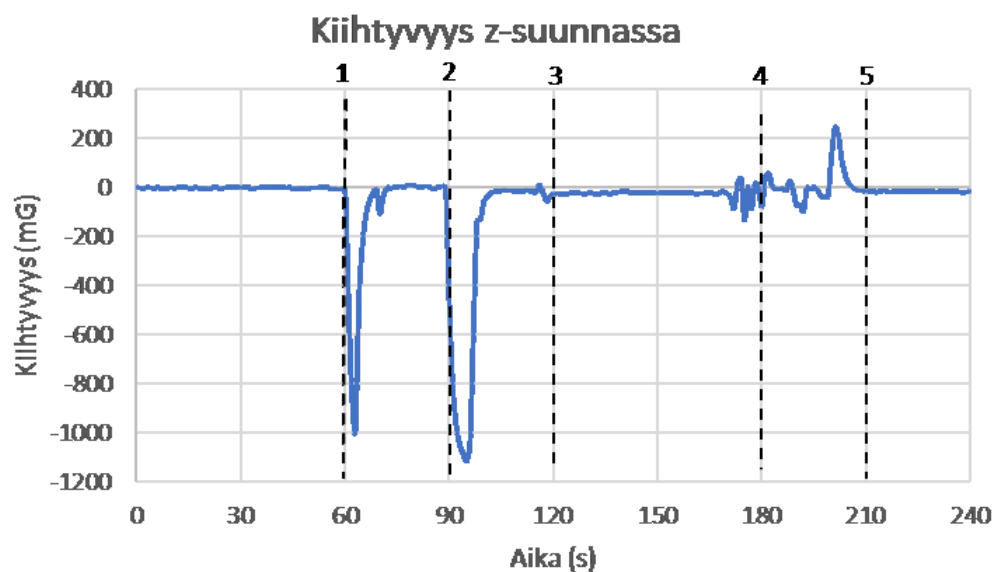
#	Tapahtuma	Aika (s)
1	Pudotus	60
2	Pudotus	90
3	Pakastin (-26 °C)	120
4	Pakastimesta ulos	180
5	Sauna (73 °C ja 74 °C)	210
6	Tilan ovi kiinni	270
7	Tilan toinen ovi kiinni	330
8	Vettä kiukaalle	450
9	Vettä kiukaalle	570

Kuvaajat anturin antamille kiihtyvyyden, lämpötilan, paineen ja signaalin vahvuuden arvoille on esitetty kuvassa 34. Vain ensimmäiset 270 sekuntia on esitetty, sillä tämän jälkeen muutoksia näkyy lähinnä lämpötilan kuvaajassa. Jokainen suure on myös esitetty myöhemmin omassa kuvaajassaan, joissa näkyy mittaustulokset koko seurantakokeen ajalta. Sekuntikellolla ajastetut pisteet ovat merkitty kuvaajiin, jotta voidaan verrata sen aikoja anturin lähettämään dataan. Mahdolliset poikkeamat näiden välillä saattavat olla myös mittausvirheitä ajanotossa.



Kuva 34. Älykkään osan reagointi paineeseen, lämpötilaan, kiihtyvyyteen kokeen aikana. Signaalin vahvuus on myös esitetty.

Anturin lähettämä kiihtyvyydata on esitetty kuvassa 35. Pudotukset ovat nähtävissä selkeinä piikkeinä pisteissä 1 ja 2. Ensimmäisen pudotuspiikin avulla pystyttiin sovittamaan loputkin taulukon ajankohdat kuvaajiin. Älykkään osan laittaminen pakastimeen ja sen sieltä pois ottaminen on osittain nähtävissä kiihtyvyyden kuvaajasta kohdissa 3 ja 4. Ajanotossa on todennäköisesti sattunut virhe pisteessä 4, kun osa poistettiin pakastimesta, sillä liikehdintää on havaittavissa kuvaajan mukaan aikaisemmin. Lisäksi saunaan vieminen näkyy pisteiden 4 ja 5 välissä. Pelkän anturin kiihtyvyydata ei olennaisesti eronnut älykkään osan kiihtyvyydatasta, jonka takia sen kuvaajaa ei ole tässä esitelty. Erot kiihtyvyydatasta eri koordinaateilla riippuivat lähinnä siitä, minkälaisessa asennossa osa, sekä anturi liikkuvat tai putosivat.

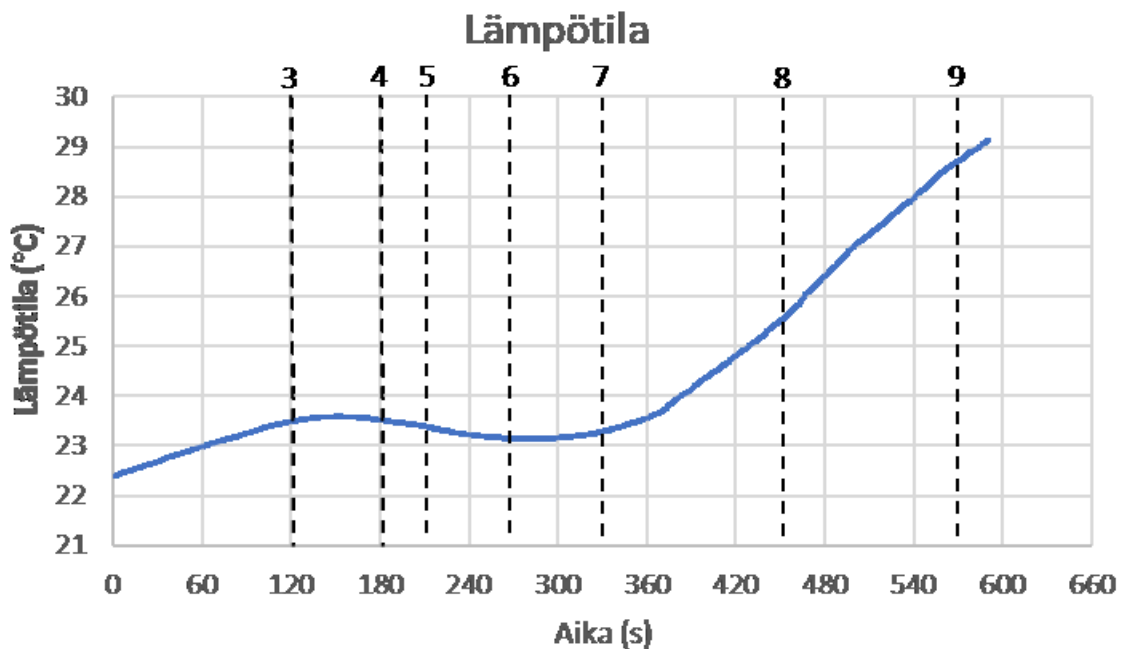


Kuva 35. Älykkään osan reagointi kiihtyvyyteen.

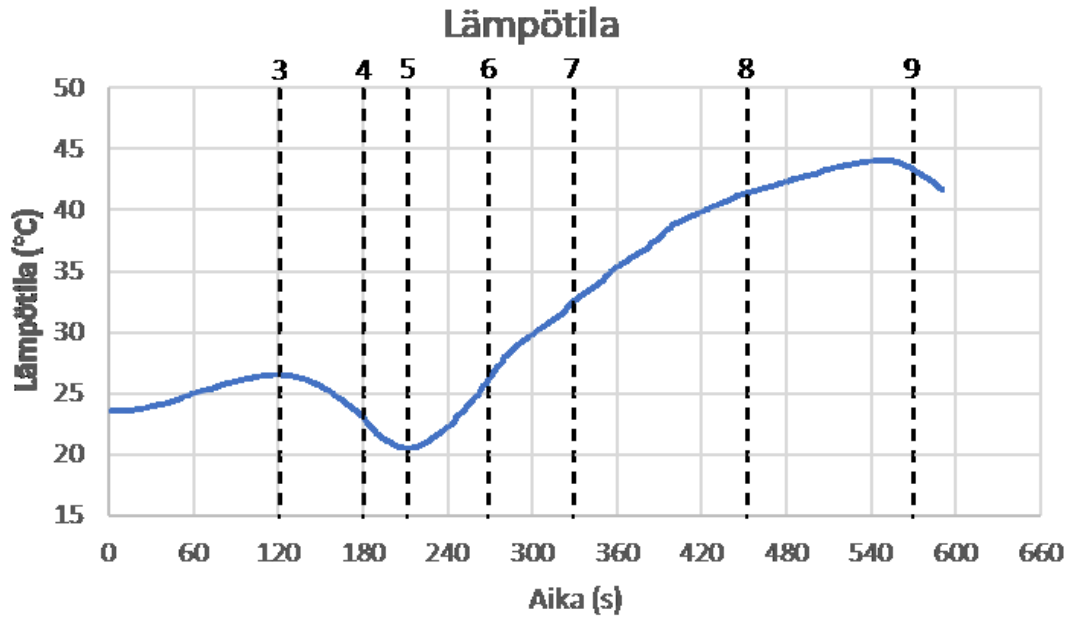
Kuvassa 36 on esitetty älykkäästä osasta saatu lämpötiladata. Osa reagoi viiveellä pakastimen olosuhteisiin pisteiden 3 ja 4 välillä. Lämpötila rupeaa laskemaan vasta viimeisen kahdenkymmenen sekunnin aikana. Osan runko eristää lämmön pääsyä anturille. Ilmanpaineen kuvasajassa 38 on tarkemmin nähtävissä, kun älykäs osa suljetaan pakastimeen, sekä otetaan sieltä ulos. Saunaan osa viedään pisteessä 5. Myös saunan lämpötilaan se reagoi lähes kahden minuutin viiveellä. Osaan varastoitunut lämpöenergia on laskettavissa lämpökapasiteetin avulla, kun tiedetään osan massa ja materiaalin ominaislämpökapasiteetti.

Kuvassa 37 on esitetty pelkän anturin lähettämä lämpötiladata. Verrattuna älykkään osan lämpötilakuvaajan reagoi, se nopeammin lämpötilan muutoksiin. Lämpötila laskee lähes välittömästi, kun se asetetaan pakastimeen, sekä nousee nopeammin, kun se on saunassa.

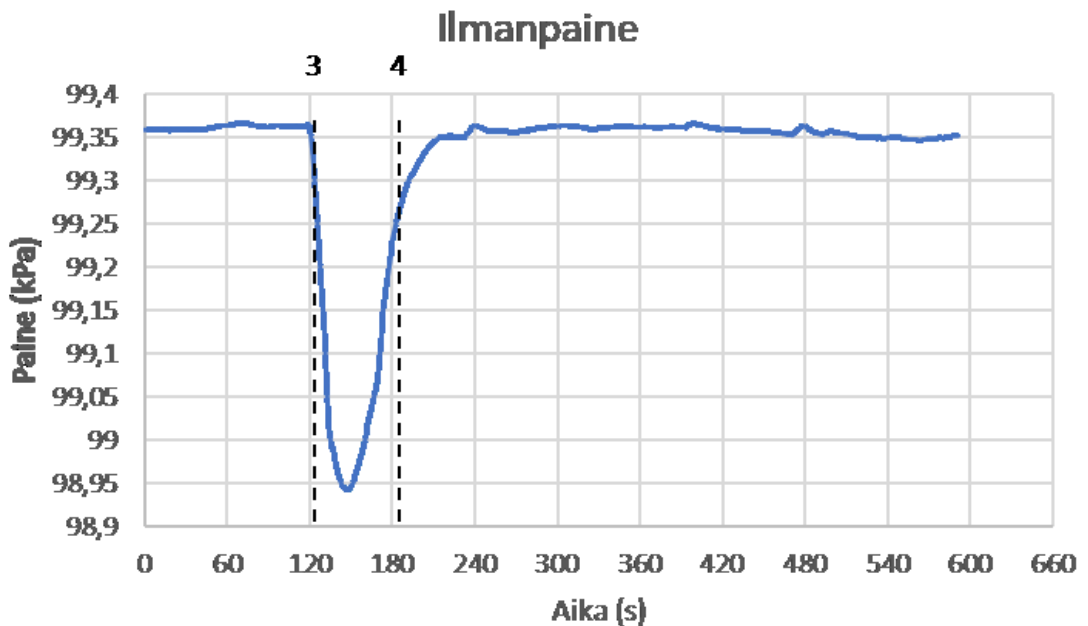
Älykkään osan reagointikykyä voidaan parantaa materiaalivalinnalla ja geometrialla. Vaihtoehtoja ovat muun muassa ristikkorakenteet, sekä monimateriaalitulostuksella valmistetut kappaleet, joissa toisena materiaalina käytettäisiin lämpöä johtavia materiaaleja. Lisäksi anturin paikka osan sisällä vaikuttaa sen havainnointikykyyn. Lämpöeristettyyn osaan upotetun anturin nopea reagointi lämpötilaan viittaisi siihen, että rungossa on koloja tai säröjä, joiden läpi anturi pääsee reagoimaan ympäristön kanssa.



Kuva 36. Älykkään osan reagointi lämpötilaan.

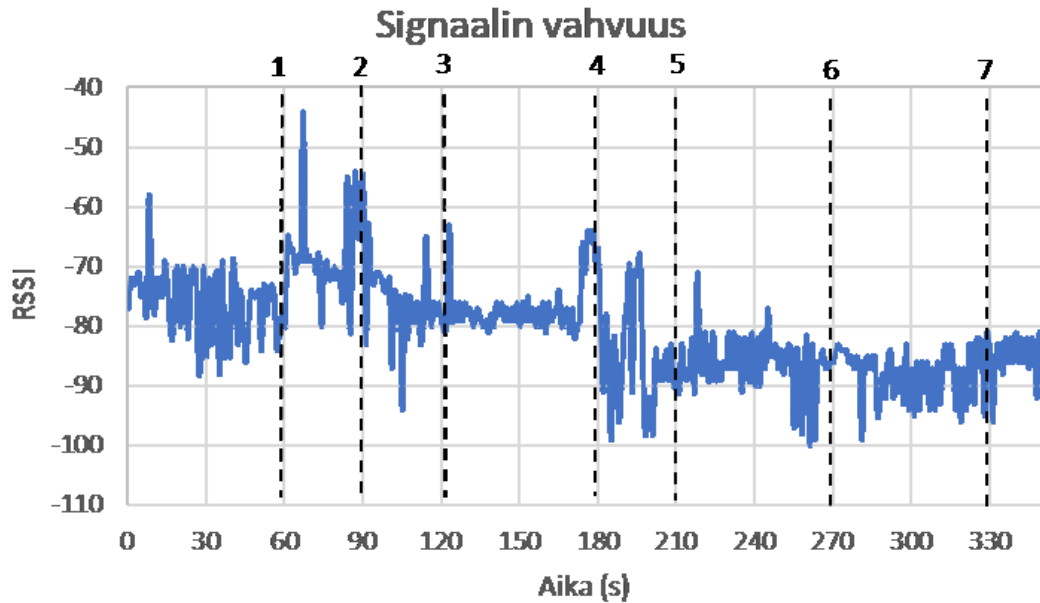


Kuva 37. Reagointi lämpötilaan, kun kokeet tehtiin pelkälle anturille.



Kuva 38. Älykkään osan reagointi paineeseen.

Signaalin vahvuus pitkän seurantakokeen aikana on esitetty kuvassa 39. Siitä voidaan nähdä muun muassa, kun anturia kuljetetaan eri toimintapaikoille. Ennen pistettä 1 signaali heikkenee, kun se kuljetetaan kauemmaksi vastaanottimesta. Pudotusten kohdalla pisteissä 1 ja 2 signaalissa näkyy selkeitä piikkejä. Myös pakastimeen sulkeminen ja sieltä pois ottaminen näkyvät piikkeinä pisteissä 3 ja 4. Saunaan älykkään osan kuljettaminen näkyy pisteiden 4 ja 5 välillä signaalin vahvuuden heikkenemisenä. Anturin ja mittalaitteiston välillä olevien ovien sulkemisella ei ollut vaikutusta signaalin vahvuuteen. Tämä saattoi johtua koejärjestelyistä eli anturin ja vastaanottimen sijainneista. Signaali todennäköisesti kulki suihkutilan ja saunan seinän läpi, jonka takia ovilla ei ollut mitään vaikutusta sen vahvuuteen.



Kuva 39. Älykkään osan signaalin vahvuus.

Äkkinäisiin lämpötilan muutoksiin anturi reagoi hitaasti. Nopeimmin anturi reagoi paineen ja kiihtyvyyden muutoksiin. Ilmankosteuden ja lämpötilan tasaantumista olisi pitänyt odottaa, jotta niistä olisi saatu tarkempaa dataa. Ilmankosteudenmittausanturi erityisesti vaatii erillistä kuivaamista jokaisen mittauskerran jälkeen. Lyhyemmistä reaktiokokeista jäänyt kosteus ei ehtinyt kunnolla poistumaan anturista.

Mitä reaaliaikaisempaa dataa anturi lähettää, sitä nopeammin pystytään vastaamaan osaan liittyviin poikkeamiin tai sen olosuhteisiin. Digitaalisen kaksosen avulla muun muassa tuotantoprosesseja voidaan kehittää reaaliajassa, mikäli data on myös mahdollisimman reaaliaikaista. Lämpötiladatan kulmakertoimien avulla on mahdollista ennustaa älykkään osan ympäristön lämpötilaa, kun tiedetään osan lämpöenergian varastointikyky eli lämpökapasiteetti. Lämpötilojen ennustaminen mahdollistaa datan hyödyntämisen muun muassa paljon lämpöä tuottavissa koneiden osissa. Vastareaktioina voisi olla jäähdytysjärjestelmän tehon lisääminen tai pysäyttämällä kone ennen toimintaa haittaavaa kriittistä lämpötilaa. Kiihtyvyydata oli saaduissa kokeissa hyvinkin reaaliaikaista, mitä voidaan hyödyntää muun muassa värinäestöjärjestelmissä tai kuljetuksessa olevien osien seurantaan.

## 7 Yhteenveto

Tämä diplomityö käsitteli monimateriaalitulostusta ja älykkäitä digitaalisia varaosia. AM-teknologiat ovat merkittäviä suunnittelun kannalta, sillä niillä voidaan valmistaa geometrisesti ja materiaaleiltaan monimutkaisia rakenteita, jotka ovat mahdottomia valmistaa perinteisillä valmistusmenetelmillä. Suunnittelu AM-menetelmiä varten (DFAM) korostaa suunnittelun vapautta, kun perinteisiin menetelmiin pohjautuva suunnittelu (DFMA) valmistusmenetelmien rajoituksia. ISO/ASTM 52900-standardi määritteli ja vakiinnutti AM-teknologiat seitsemään eri luokkaan, jotka olivat materiaalin pursotus, valokovetus altaassa, jauhepetisulatus, materiaalin suihkutetus, sideaineen suihkutetus, kerroslaminointi ja suorakerrostus. Tyypillisimmät AM-sovellukset ovat prototyyppien valmistus, tuotannon apuvälineiden valmistus, sekä suoravalmistus.

Useamman kuin kahden materiaalin käyttöä AM-valmistusprosessissa kutsutaan monimateriaalitulostukseksi. Useiden materiaalien käytöllä voidaan parantaa muun muassa osien mekaanisia, kemiallisia ja sähköisiä ominaisuuksia. Lisäksi voidaan valmistaa osia, joissa materiaaliominaisuudet vaihtuvat eri kohdissa osaa eli niissä voidaan esimerkiksi yhdistää jäykkää ja elastista materiaalia tai lisätä sähkönjohtavuutta haluttuihin paikkoihin. Digitaalisilla materiaaleilla mekaanisia ominaisuuksia, kuten joustavuutta tai kovuutta, sekä värejä voidaan määrittää yhden kolmiulotteisen kuva-alkion eli vokselin tarkkuudella. Toiminnallisesti porrastetuissa materiaaleissa (FGM) materiaalikoostumusta voidaan muuttaa vokselin tarkkuudella.

Monimateriaalitulostuksella voidaan lisätä osiin älyä. Osien älykkyydellä tyypillisesti tarkoitetaan, että ne antavat tietoa itsestään ja käyttöympäristöstään, sekä niiden alkuperäisyys pystytään varmistamaan tunnusteen avulla. Älykkyyden lisääminen rakenteiden sisään on mahdollista AM-menetelmillä, joissa tapoina ovat muun muassa komponenttien upotus, sähköä johtavat musteet ja pinnoitteet.

Digitaaliset varaosat ovat konsepti, jossa varaosat ovat säilytettävissä ja lähetettävissä digitaalisesti. Konseptin on ajateltu sopivan AM-teknologioille, sillä ne käyttävät valmistukseen digitaalista dataa. Digitaaliset varaosat vähentäisivät muun muassa varastointi- ja kuljetuskustannuksia.

Diplomityössä suunniteltiin ja valmistettiin AM-valmisteinen älykäs osa. Osan runko valmistettiin FDM-tulostimella ABS-muovista. Tutkimuksessa haluttiin selvittää, miten älykkyyden lisääminen osiin toimii käytännössä ja kuinka hyvin siitä saatu data vastaa todellisuutta. Älykkyyden osaan toi rakenteen sisälle upotettu RuuviTAG-anturialusta, jolla saatiin tietoa osasta ja sen ympäristöolosuhteista. Mittausdataa saatiin lämpötilasta, ilmankosteudesta, paineesta, kiihtyvyydestä, sekä signaalin vahvuudesta. Datan avulla pyrittiin selvittämään, kuinka nopeasti osa on reagoinut erilaisiin toimintoihin.

Älykkästä osasta saatiin mittausdataa valmistuksen ajalta, johon kuuluivat tulostaminen ja tukirakenteiden liuottaminen. Anturialusta jouduttiin kerran vaihtamaan, sen hajotessa pesusyklin aikana pesuaineen päästessä anturin tiivisteiden välistä elektroniikkaan. Anturin hajoamisen ajankohta oli nähtävissä datassa. Osalle suoritettiin myös reaktiokokeita. Saadusta datasta pystyttiin havaitsemaan muun muassa, milloin osaa kuljetettiin ja minkälaisissa ympäristöissä se oli milläkin ajanhetkellä. Saadut mittausdatat valmistusprosesseista, sekä kokeista vastasivat hyvin todellisuutta ja niistä nähtiin, mitä osalle tapahtui milläkin ajanhetkellä. Ainoastaan nopeat muutokset lämpötilassa ja kosteudessa eivät olleet nähtävissä kuvaajista. Lämpötilan muutoksiin eri ympäristöissä osa reagoi hitaasti. Lämpötila olisi todennäköisesti mahdollista ennustaa,

jos dataa on riittävästi ja osan materiaalin lämpökapasiteetti on tiedossa. Vastaavanlainen mittausdata on hyvin hyödynnettävissä myös teollisuuden komponenteilla, sekä kuluttajaosissa. Varsinkin tuotantoprosesseissa datalla pystytään takaisinkytkennällä parantamaan mahdollisesti reaaliaikaisesti tuotantoprosesseja luomalla digitaalinen kaksonen koko prosessista.

Tutkimusta voitaisiin laajentaa muihin teknologioihin. Varsinkin niihin, joilla komponenttien upottaminen on todistetusti onnistunut, kuten SLS, SLA ja MJ. Tällä tavalla saataisiin vertailukelpoista dataa teknologioiden välisistä, joko prosessiin tai materiaaleihin liittyvistä eroista. Upottaminen johonkin olemassa olevaan varaosaan olisi looginen seuraava askel, millä saataisiin dataa oikeasta sovelluksesta. Anturien valinta tulisi tehdä sovelluksen mukaan ja se mihin kohtaan osaa se upotetaan vaikuttaa mittaustuloksiin. Tässä tutkimuksessa käytetty anturialusta olisi todennäköisesti kooltaan liian suuri osaan sovelluksista.



## Lähdeluettelo

Akmal, J., Salmi, M., Mäkitie, A., Björkstrand, R. & Partanen, J., 2018. Implementation of industrial additive manufacturing: intelligent implants and drug delivery systems. *Journal of functional biomaterials*. Vol 9:3. S. 41. ISSN 2079-4983.

Anstaett, C. & Seidel, C., 2016. Multi-material processing. *Laser technik journal*. Vol 13:4. S. 28-31. ISSN 1613-7728.

Ashby, M.F. & Jones, D.R.H., 2013. *Engineering materials 2: an introduction to microstructures and processing*. 4th ed. Waltham, Mass: Butterworth-Heinemann. 553 s. ISBN 978-0-08-096669-4.

Askeland, D.R., Fulay, P.P. & Wright, W.J., 2011. *The science and engineering of materials*. 6th ed. Stamford, Ct: Cengage Learning. 920 s. ISBN 978-0-495-29602-7.

Ballardini, R.M., Ituarte, I. & Pei, E., 2018. Printing spare parts through additive manufacturing: legal and digital business challenges. *Journal of manufacturing technology management*. Vol 29:6. 958 s. ISSN. 1741-038X.

Carroll, B.E., Otis, R.A., Borgonia, J.P., Suh, J., Dillon, R.P., Shapiro, A.A., Hofmann, D.C., Liu, Z. & Beese, A.M., 2016. Functionally graded material of 304l stainless steel and inconel 625 fabricated by directed energy deposition: characterization and thermodynamic modeling. *Acta Materialia*. Vol 108. S. 46-54. ISSN 1359-6454.

Chekurov, S., Metsä-Kortelainen, S., Salmi, M., Roda, I. & Jussila, A., 2018. The perceived value of additively manufactured digital spare parts in industry: an empirical investigation. *international journal of production economics*. Vol 205. 87 s. ISSN 0925-5273.

Choi, J.W., Kim, H. & Wicker, R., 2011. Multi-material stereolithography. *journal of materials processing technology*. Vol 211:3. 318 s. ISSN 0924-0136.

Emelogu, A., Marufuzzaman, M., Thompson, S., Shamsaei, N. & Linkan, B., 2016. Additive manufacturing of biomedical implants: a feasibility assessment via supply-chain cost analysis. *Additive manufacturing*. Vol 11. S. 97. ISSN 2214-8604.

Espalin, D., Muse, D., Macdonald, E. & Wicker, R., 2014. 3D printing multifunctionality: structures with electronics. *The international journal of advanced manufacturing technology*. Vol 72:5. S. ISSN 0268-3768.

FIRPA. Sanasto [verkkoaineisto]. [viitattu: 23.4. 2019]. Saatavissa: <http://www.firpa.fi/html/sanasto.html>

Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C., Wang, C., Shin, Y., Zhang, S. & Zavattieri, P., 2015. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer aided design*. Vol 69. S. 65. ISSN 0010-4485.

Gibson, I., Rosen D., & Stucker B., 2010. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer. 459 s. ISBN 978-1-4419-1119-3.

Hossain, M.S., Gonzales, J., Hernandez, R., Shuvo, M., Mireles, J., Choudhuri, A., Lin, Y. & Wicker, R., 2016. Fabrication of smart parts using powder bed fusion additive manufacturing technology. *Additive manufacturing*. Vol 10. S. 58. ISSN 2214-8604.

ISO/ASTM 52900. 2015. Additive manufacturing – General Principles – Terminology. Sveitsi: ISO/ASME. 19 s.

Jalava, K., Salmi, M., Kukko, K. & Orkas, J., 2018. Multi-scale topologically optimised components made by casting and additive manufacturing. *Foundry trade journal international*. Vol 193. S. 24-25.

Jämsä, L. Datasheet 4/2018 [verkkoaineisto]. [viitattu 25.4.2019}. Saatavissa: <https://blog.ruuvi.com/datasheet-52fb00265c60>

Kalpakkian, S., Schmid, S.R. & Sekar, K.S.V., 2014. *Manufacturing engineering and technology*. 7th Ed. Singapore: Pearson. 1180 s. ISBN 978-981-06-9406-7.

Kestilä, A., Nordling, K., Miikkulainen, V., Kaipio, M., Tikka, T., Salmi, M., Auer, A., Leskelä, M. & Ritala, M., 2018. Towards space-grade 3d-printed, ALD-coated small satellite propulsion components for fluidics. *Additive manufacturing*. Vol 22. S. 31-37. ISSN 2214-8604.

Kontio, R., Björkstrand, R., Salmi, M., Paloheimo, M., Paloheimo, K.S., Tuomi, J. & Mäkitie, A., 2012. Designing and additive manufacturing a prototype for a novel instrument for mandible fracture reduction. *Surgery S*. Vol 1. S. 2161-1076. ISSN 2161-1076.

Kretschmar, N., Chekurov, S., Salmi, M. & Tuomi, J., 2018. Evaluating the readiness level of additively manufactured digital spare parts: an industrial perspective. *Applied sciences*. Vol 8:10. S. 1837. ISSN 2076-3417.

Lampinen, M., 2010. *Termodynamiikan perusteet*. 7th ed. Helsinki: HakaPaino. 182 s. ISBN 978-951-672-368-9.

Lehmhus, D., Aumund-Kopp, C., Petzoldt, F., Godlinski, D., Haberkorn, A., Zöllmer, V. & Busse, M., 2016. Customized smartness: a survey on links between additive manufacturing and sensor integration. *Procedia technology*. Vol 26. S. 284. ISSN 2212-0173.

Li, Y., Jia, G., Cheng, Y. & Hu, Y., 2017. Additive Manufacturing Technology In Spare Parts Supply Chain: A Comparative Study. *International Journal Of Production Research*. Vol 55:5. S. 1498-1515. ISSN 0020-7543.

Liu, P., Huang, S.H., Mokasdar, A., Zhou, H. & Hou, L., 2014. The Impact Of Additive Manufacturing In The Aircraft Spare Parts Supply Chain: Supply Chain Operation Reference (Scor) Model Based Analysis. *Production Planning & Control*. Vol 25:13-14. S. 1169-1181. ISSN 0953-7287.

Macdonald, E. & Wicker, R., 2016. Multiprocess 3D printing for increasing component functionality. *Science*. Vol 353:6307. ISSN. 0036-8075

Muir, M. & Habbud, A., 2018. Additive manufacturing in the mechanical engineering and medical industries spare parts supply chain. *Journal of manufacturing technology management*. Vol 29:2. S. 372. ISSN 1741-038X.

O'Donnell, J., Kim, M. & Yoon, H-W., 2017. A review on electromechanical devices fabricated by additive manufacturing. *Journal of manufacturing science and engineering*. 139:1. 10 s. ISSN 1087-1357.

Panesar, A., Abdi, M., Hickman, D. & Ashcroft, I., 2018. Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for additive manufacturing. *Additive manufacturing*. Vol 19. 81 s. ISSN 2214-8604.

Panesar, A., Ashcroft, I., Brackett, D., Wildman, R. & Hague, R., 2017. Design framework for multifunctional additive manufacturing: coupled optimization strategy for structures with embedded functional systems. *Additive manufacturing*. Vol 16. 98 s. ISSN 2214-8604.

Pei, E., Loh, H., Harrison, D., Almeida, H., Verona, M. & Paz, R., 2017. A study of 4D printing and functionally graded additive manufacturing. *Assembly automation*. Vol 37:2. 147 s. ISSN 0144-5154.

Pires, R., Multi-material 3D printing – 2018 overview [verkkoaineisto]. [viitattu: 26.4.2019]. Saatavissa: <https://all3dp.com/2/multi-material-3d-printing-an-overview/>

Redwood, B., Schöffner, F., Garret, B., 2017. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs B.V. 289 s. ISBN 978-90-827485-0-5.

Salmi, M., Partanen, J., Tuomi, J., Chekurov, S., Björkstrand, R., Huotilainen, E., Kukko, K., Kretzschmar, N., Akmal, J., Jalava, K., Koivisto, S., Vartiainen, M., Metsä-Kortelainen, S., Puukko, P., Jussila, A., Riipinen, T., Reijonen, J., Tanner, H. & Mikkola, M., 2018. *Digitaaliset varaosat*. 64 s. ISBN 978-952-60-3745-5. Saatavissa: <http://urn.fi/urn:isbn:978-952-60-3745-5>.

Thomas, D. & Gilbert, S., 2015. *Costs and cost effectiveness of additive manufacturing: a literature review and discussion*. NIST special publication 1176. 89 s. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1176>

Thompson, M.K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B. & Martina, F., 2016. Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints. *Cirp Annals*, 65(2), 737 s. ISSN 0007-8506.

Tuomi, J., Paloheimo, K., Björkstrand, R., Salmi, M., Paloheimo, M. & Mäkitie, A., 2009. Medical applications of rapid prototyping—from applications to classification. *Innovative developments in design and manufacturing: advanced research in virtual and rapid prototyping—proceedings of VR"04*. S. 701-704.

Vaezi, M., Chianrabutra, S., Mellor, B. & Yang, S., 2013. Multiple material additive manufacturing – part 1: a review. *Virtual and physical prototyping*. Vol 8:1. S. 19-50. DOI: 10.1080/17452759.2013.778175

Wachtor, A.J., Bernardin, J.D., Morgan, R.V., Thompson, J.M., Baker, A.M. & Sbriglia, L.R., 2016. Embedding sensors in FDM plastic parts during additive manufacturing. *Topics in Modal Analysis & Testing*, Vol 10. ISBN: 978-3-319-30249-2

Wu, B., Myant, C. & Weider, S., 2017. The value of additive manufacturing: future opportunities. DOI: 10.13140/RG.2.2.35985.33127

Xu, Y., Wu, X., Guo, X., Kong, B., Zhang, M., Qian, X., Mi, S. & Sun, W., 2017. The Boom In 3d-Printed Sensor Technology. *Sensors (Basel, Switzerland)*. Vol: 17:5., 1166 s. DOI:10.3390/s17051166.