

LUT-YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

EDULLISET TULOSETETUT MUOVIMATERIAALIT HYÖTYKÄYTÖSSÄ
TEHDASYMPÄRISTÖSSÄ

INEXPENSIVE PRINTED PLASTIC MATERIALS USED IN THE INDUSTRIAL
APPLICATIONS

Lappeenrannassa 24.2.2020

Roope Ritala

Tarkastaja Dosentti Heidi Piili, TkT

Ohjaaja Dosentti Heidi Piili, TkT

TIIVISTELMÄ

LUT-Yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Roope Ritala

Edulliset tulostetut muovimateriaalit hyötykäytössä tehdasympäristössä

Kandidaatintyö

2020

44 sivua, 19 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastaja: Dosentti Heidi Piili

Ohjaaja: Dosentti Heidi Piili

Hakusanat: Lisäävä valmistus, 3D-tulostus, muovi, teollisuusympäristö

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tutkia edullisten muovimateriaalien lisäävää valmistusta. Tavoite oli löytää kirjallisuudesta, millaisia käyttökohteita edullisesti tulostetuilla muoveilla on tehdasympäristössä. Työssä selvennettiin, minkälaisia hyötyjä juuri tulostetuilla muoveilla saavutetaan. Työssä on aluksi avattu lisäävän valmistuksen periaatteita ja tulokset osiossa on esitelty kirjallisuudesta löytyviä case-esimerkkejä hyötykäyttökohteista.

Lisäävän valmistuksen tärkeimpinä etuina perinteisiin valmistusmenetelmiin voidaan pitää valmistettävien kappaleiden monimutkaisuutta. Lisäävällä valmistuksella voidaan hyödyntää topologista optimointia, jota ei voida hyödyntää samalla tavalla perinteisillä valmistusmenetelmillä. Lisäävässä valmistuksessa ei myöskään synny hukkamateriaalia, kuten perinteisillä menetelmillä.

Case-esimerkeissä esitellään edullisista muoveista tulostettuja robottitarraimia. Teollisuusympäristössä esiintyy tartuntarobotteja, joiden tarrain on valmistettu lisäävällä valmistuksella. Lisäävän valmistuksen hyödyntäminen on johtanut siihen, että robotin ohjaus ei enää tarvitse yhtä monimutkaista logiikkaa. Hyödyntämällä muovien luontaisia ominaisuuksia, robotin ohjaaminen helpottuu sekä robotti muuttuu monipuolisemmaksi.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Roope Ritala

Inexpensive printed plastic materials used in the industrial applications

Bachelor's thesis

2020

44 pages, 19 figures and 2 tables

Examiner: Docent Heidi Piili

Supervisor: Docent Heidi Piili

Keywords: additive manufacturing, AM, 3D-printing, plastic, industrial environment

This bachelor's thesis studies the additive manufacturing of inexpensive plastics. The goal was to find the possible industrial applications, where additive manufacturing of low-cost plastics were used. This thesis explores the basics of additive manufacturing and in the end the case-examples are used to demonstrate the industrial applications.

Additive manufacturing has benefits over traditional manufacturing methods. One of the key benefits is that by using additive manufacturing, complex models can be manufactured. Use of topology optimization is possible and often used, which can not be utilized so well with traditional methods. Also, there is less wasted material when using additive manufacturing.

The case-examples are about robotic grippers. In the industry there are robots used to grab objects. In these case-examples the gripper of the robot is manufactured with additive manufacturing using low-cost plastic materials. Because of the plastic's properties, the robot does not need complicated logic to control the grabbing process. Use of the printed plastics has led to the fact that the robot is more versatile and simpler to control

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	5
ABSTRACT	6
SISÄLLYSLUETTELO	4
SYMBOLILUETTELO	6
1 JOHDANTO	8
1.1 Tutkimusongelma	8
1.2 Tutkimusmenetelmät.....	8
1.3 Työn rajaus	8
2 MUOVIEEN LISÄÄVÄ VALMISTUS	10
2.1 Työnkulku lisäävässä valmistuksessa.....	10
2.2 Hinta.....	11
3 LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN HYÖDYT JA HAITAT	13
3.1 Hyödyt	13
3.1.1 Topologinen optimointi	13
3.2 Haitat.....	17
3.2.1 Haitat materiaalin pursotuksessa	17
3.2.2 Haitat allasvalokovetuksessa	17
4 LAITTEISTO	19
4.1 Materiaalin pursotus	19
4.2 Allasvalokovetus.....	21
5 MUOVIMATERIAALIT	24
5.1 Materiaalin pursotuksessa käytetyt muovit.....	24
5.2 Allasvalokovetuksessa käytetyt muovimateriaalit.....	26
6 KUSTANNUSTEHOKKUUS	28
7 CASE-ESIMERKKEJÄ TEOLLISISTA TULOSTETUISTA MUOVITUOTTEISTA	30
7.1 Robottitarraimet.....	30
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	37
9 POHDINTA	38

10 JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET	39
LÄHTEET	40

SYMBOLILUETTELO

C_{AM}	Valmistuksen kustannukset
C_E	Energian hinta [€ / J]
C_m	Materiaalin hinta [€ / kg]
C_{sivu}	Valmistuksen sivukustannukset [€ / h]
$C_{valmistuserä}$	Valmistuserän kustannukset
E_{ve}	Valmistuksen aikana kulutettu energia [J]
$FGI_{E,R,M}$	Valmiiden tuotteiden varastoinnin kustannukset materiaalin louhinnalle (E), raaka-aineen jalostukselle (R) ja valmistukselle (M)
m	Kappaleen paino [kg]
$MI_{R,M}$	Raaka-aineen hankinnan (R) ja valmistuksen (M) kustannukset
$P_{E,R,M}$	Materiaalin louhinnan (E), raaka-aineen jalostuksen (R) ja valmistuksen (M) prosessien kustannukset
RT_{AM}	Vähittäiskaupan kustannukset
T_{AM}	Toimitusketjun kuljetuskustannukset
$T_{valmistus}$	Valmistusaika [h]
VT_{AM}	Tukkumyynnin kustannukset
3D-tulostus	Puhekielen sana lisäävälle valmistukselle
ABS	Akryylinitriilibutadieenistyreeni
AM	Additive manufacturing (suomeksi lisäävä valmistus)
FDM	Fused deposit modelling (kauppanimi materiaalin pursotuksessa)
HIPS	Iskunkestävä polystyreeni
PC	Polykarbonaatti
PET	Polyetyleenitereftalaatti
PLA	Polylaktidi
PS	Polystyreeni
PVA	Polyvinyyliasetaatti
PVC	Polyvinyylikloridi
RP	Rapid prototyping (suomeksi pikavalmistus)
SLA	Stereolithography (kauppanimi allasvalokovetuksessa)

STL	Tiedostomuoto
TPE	Termoplastinen elastomeeri
TPU	Termoplastinen polyuretaani

1 JOHDANTO

Muovimateriaaleja on käytetty teollisuuden sovelluskohteissa pitkään. Tekniikan kehittyessä myös lisäävällä valmistuksella eli ns. 3D-tulostuksella on muoviosia saatu teollisuudessa tarvittaviin kohteisiin. Alun alkaen 3D-tulostus oli vain prototyyppien rakentamista varten, josta vanhanaikainen nimitys pikavalmistus (englanniksi 'rapid prototyping' RP). Nykyisin valmistusmenetelmää kutsutaankin nimellä lisäävä valmistus (englanniksi 'additive manufacturing' AM). Lisäävässä valmistuksessa kappaleeseen luodaan kerros kerrokselta uutta materiaalia. (Gibson, Rosen & Stucker 2015, s. 1)

1.1 Tutkimusongelma

Tässä työssä tutkitaan, millaisiin sovelluskohteisiin teollisuudessa edullisilla muovista tuotetuilla tuotteilla on tarvetta. Työssä selvitetään myös, että mistä syystä teollisuudessa on päädytty käyttämään lisäävällä valmistuksella tuotettua ratkaisua perinteisten valmistusmenetelmien sijaan.

1.2 Tutkimusmenetelmät

Tämä työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Aluksi työssä esitellään lisäävän valmistuksen sekä edullisten muovien teoriaa kirjallisuudesta löytyvien kirjoitusten ja tutkimusten perusteella. Työn tulokset case-esimerkkejä, jotka on kasattu kirjallisuudesta löytyvistä tutkimuksista.

1.3 Työn rajaus

Työ on rajattu siten, että tutkimuksessa otetaan huomioon vain edullisesti valmistettävissä olevia kappaleita, tässä tapauksessa alle 5000 euron hintaluokkaan kuuluvia laitteita. Etsittäessä Amazon:in verkkosivuilta tulostustekniikoita alle 5000 eurolla, löydetään useita eri valmistajan laitteita. Tulostintyyppinä löytyy kuitenkin vain kahdenlaisia: materiaalin pursotukseen (material extrusion) perustuvia tulostimia ja allasvalokovetuksen (vat photopolymerization) tulostimia. Taulukossa 1 on esiteltyinä muutamia Amazon:in verkkokaupasta löytyviä laitteita. (Amazon 2019).

Taulukko 1. Amazon -verkkokaupasta löytyvien alle 5000 euron laitteiden tietoja.

Valmistaja	Tekniikka	Hinta [€]	Koko [mm x mm x mm]
Comgrow	Materiaalin pursotus	236	220x220x250
R Qidi Technology	Allasvalokovetus	299	115x65x150
Makerbot	Materiaalin pursotus	1 999	295x193x165
Phrozen	Allasvalokovetus	1 699	170x68x120

Hinta rajoittaa myös valmistuslaitteen kokoa, ja täten myös valmistettavan kappaleen kokoa. Voidaan todeta, että edullisuus aspekti jättää jäljelle vain niin sanotun materiaalin pursotusmenetelmän, sekä allasvalokovetuksen (vat photopolymerization). Työssä ei käsitellä esimerkiksi jauhepetitekniikkaa (powder bed fusion), materiaalin suihkutusta (material jetting), sideaineen suihkutusta (binder jetting), arkkilaminointia (sheet lamination) tai materiaalin suorakerrostusta (directed energy deposition), vaikkakin kaikki edellä mainitut prosessit kuuluvat lisäävän valmistuksen piiriin.

2 MUOVIEN LISÄÄVÄ VALMISTUS

2.1 Työnkulku lisäävässä valmistuksessa

Aluksi haluttu kappale mallinnetaan tietokoneavusteisella 3D-mallinnusohjelmalla, jossa kappaleeseen annetaan tarkat mitat. Mallin voi tehdä useimmilla mallinnusohjelmilla. Kuitenkin täytyy huomioida, että malli on yksi kiinteä kappale ns. tilavuusmalli. (Gibson et al. 2015, s. 4). Mallinnusohjelma luo riippuen ohjelmasta mallille oman tiedostotyyppin, esimerkiksi Autodesk'in mallinnusohjelmat luovat tiedostotyyppin .3ds. Tällöin tiedostotyyppi on muutettava stl -tiedostomuotoon. Kyseinen tiedostomuoto kuvaa mallin ulkoisia pinnanmuotoja ja toimii täten perustana valmistusprosessin kerroksien optimoinnille. Kuvassa 1 on esiteltyä tärkeitä lisäävän valmistuksen työvaiheet (Sturm et al. 2017, s. 156).



Kuva 1. Kuvaus lisäävän valmistuksen työvaiheista. (Mukaillen: Sturm et al. 2017, s. 156).

Kuvasta 1 voidaan havaita oleelliset työvaiheet, jotta CAD -mallista saadaan aikaiseksi valmis kappale. Kun stl -tiedostomuoto on saavutettu, se ajetaan viipalointiohjelmaan, missä määritellään tulostukselle vaadittavat rakennusparametrit. Tällaisia rakennusparametreja ovat muun muassa liikeratojen määrittäminen, kerrospaksuus ja filamentin paksuus. Tämän jälkeen tiedosto siirretään tulostimelle. (Bell, C. 2014, s. 16-17).

Itse laitteesta on hyvä tarkastaa, että valmistukseen vaadittavaa filamenttia on riittävän paljon. Filamentin kunto on myös hyvä tarkastaa ennen valmistusta. Filamentin altistaminen kosteudelle tai liialliselle valolle voi vahingoittaa materiaalia, joka johtaa huonoon valmistusjälkeen. Itse valmistusprosessi on automaattinen, eikä se vaadi käyttäjältä erikoisempaa valvontaa. Mahdolliset virheet voivat johtua esimerkiksi materiaalin tai virran loppumisesta.

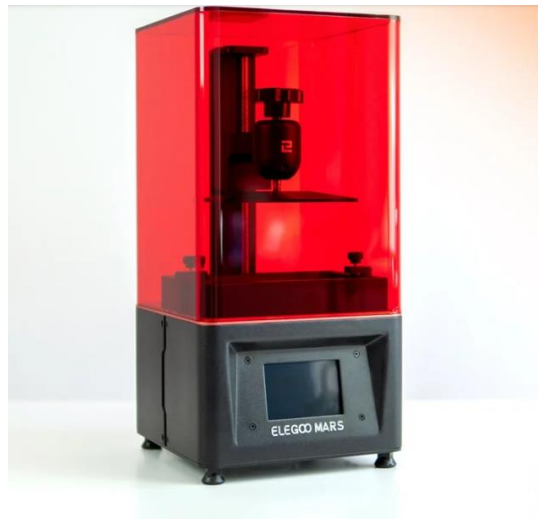
Tulostuksen päätyttyä kappale irrotetaan alustasta ja kappaleesta poistetaan mahdolliset tukirakenteet, joita on tarvittu valmistuksen aikana. Tukirakenteita joudutaan käyttämään niissä kohdissa, missä kappaleen geometrialla ei ole tukea suoraan alhaalle päin. (Gibson et al. 2015, s. 4-6). Jälkikäsitteilyyn kuuluu myös kappaleen puhdistus, laadun tarkastus sekä tarvittava kasaus, jos lopullinen kappale koostuu useammasta valmistetusta mallista. (Eyers & Potter. 2017, s. 213).

2.2 Hinta

Charles Hull kehitti ensimmäistä 3D-tulostinta jo vuonna 1984, joka myöhemmin kaupallistettiin vuonna 1989. (Horvath. 2014, s. 6). Tuolloin laitteiden hinnat olivat todella korkealla, jopa sadoissa tuhansissa euroissa. (Gibson et al. 2015, s. 293). Nykyisin materiaalin pursotustekniikkaa käyttävän tulostimen kuluttajakäyttöön voi ostaa alle kolmensadan euron. (Amazon 2019). Esimerkiksi Prusa i3 merkkisen tulostimen hinta on valmistajan omilla verkkosivuilla edullisimmillaan 749 dollaria (17.9.2019). Kyseisen tulostimen tulostusalue on 25 cm x 21 cm x 21 cm. (Prusa 3D 2019).

Materiaalin pursotuksen lisäksi myös allasvalokovetus luetaan edulliseen 3D-tulostustekniikkaan. Elegoo -merkkisen laitteen voi ostaa Amazonin verkkokaupasta hintaan 279,99 dollaria (24.10.2019). (Amazon 2019). Hinnoissa on myös suuria eroja laitteiden valmistajien välillä. Formlabs:in Form 3 laite maksaa valmistajan omilla internet-sivuilla 3 299 euroa. (Formlabs 2019).

Kuvassa 2 on esitelty Elegoo -merkkisen valmistajan tulostin. (All3DP 2019).



Kuva 2. Elegoo Mars allasvalokovetus tulostin. (All3DP 2019).

Kuvan 2 allasvalokovetus tekniikkaa käyttävä tulostin lukeutuu yksiin edullisimmista tulostimista.

3 LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN HYÖDYT JA HAITAT

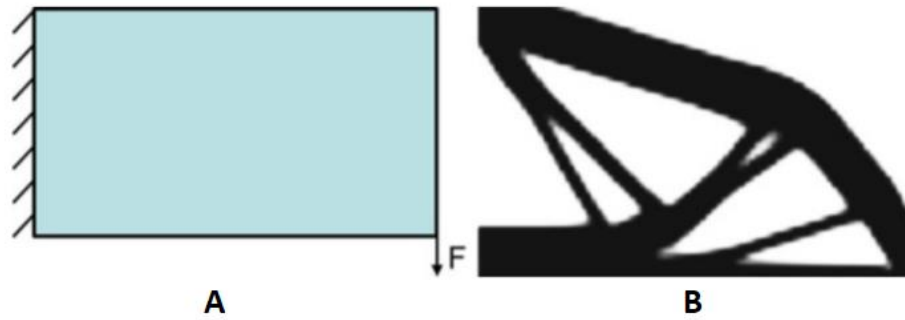
3.1 Hyödyt

Lisäävällä valmistusmenetelmällä saavutetaan useita hyötyjä. Käyttäjäystävällisyys ja etenkin valmiin kappaleen näkeminen viipalointiohjelmassa helpottaa käyttäjää ymmärtämään, mitä prosessissa tapahtuu. Kappale on nähtävillä 3D-mallina, josta valmistus fyysiseen kappaleeseen tapahtuu huomattavasti yksinkertaisemmin kuin esimerkiksi perinteisiä valmistusmenetelmiä käyttäen, joissa kappaleesta joudutaan usein tekemään 2D-valmistuskuva. Monimutkaiset kappaleet vaativat yleensä monia eri valmistusmenetelmiä, kuten esimerkiksi sorvaamista ja jyrsimästä, nämä valmistusmenetelmät ovat kalliita sekä aikaa vieviä. 3D-tulostuksen hyötyjä ovatkin juuri valmistuksen edullisuus, nopeus sekä yksinkertaisuus. (Ngo et al. 2018, s. 174). Vaikka perinteiset valmistusmenetelmät, kuten esimerkiksi sorvaus, saataisiin säädettyä optimaalisiksi valmistettavan kappaleen kannalta, toimisi tällöin vain yhden ja saman kappaleen valmistus sujuvasti. Pienikin muutos valmistettavan kappaleen rakenteeseen johtaisi perinteisen valmistusmenetelmän uudelleen suunnittelemiseen. Lisäävässä valmistuksessa kuitenkin prosessissa on vain yksi vaihe, riippumatta kappaleen monimutkaisuudesta. Geometrisesti vaativia kappaleita on myös lähes mahdotonta valmistaa koneistamalla. Tällaisia ovat esimerkiksi mallissa olevat syvät reiät ja sisäiset sekä ulkoiset tarkat ominaisuudet. (Gibson et al. 2015, s. 9-13).

3.1.1 Topologinen optimointi

Topologisella optimoinnilla yleisesti tarkoitetaan kappaleen rakenteen keventämistä siten, että materiaalin väheneminen ei johda rakenteen heikentymiseen. Topologisessa optimoinnissa kappaleen muoto muuttuu. (Gibson et al. 2015, s. 428)

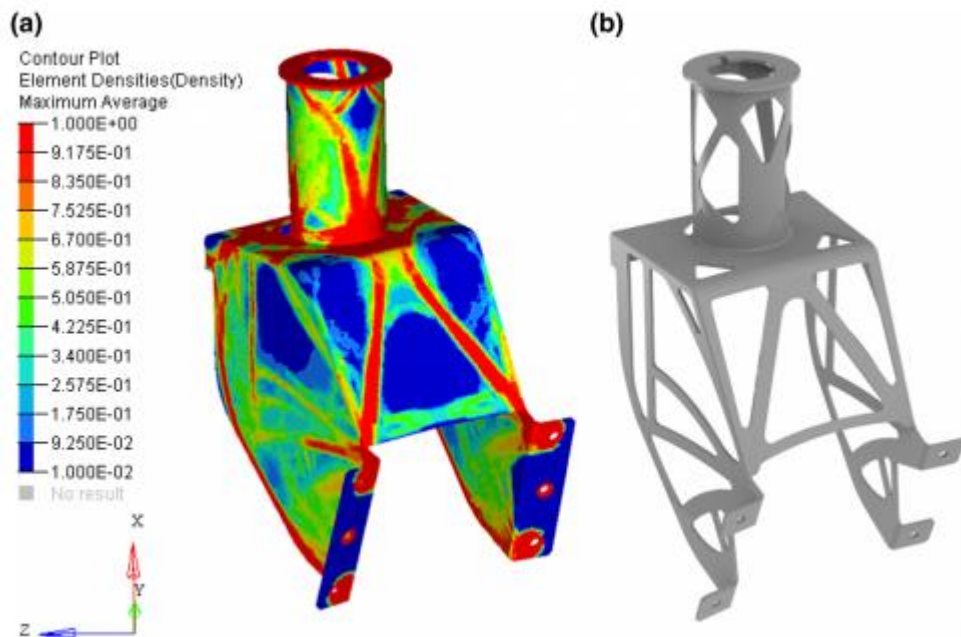
Kuva 3 esittelee yksinkertaistetun tilanteen, millaiseen lopputulokseen voidaan päästä topologisella optimoinnilla. (Gibson et al. s.430).



Kuva 3. Esimerkki palikkarakenteen topologisesta optimoinnista. (Gibson et al. s.430).

Kuvassa 3a on alkio, missä näkyy kappaleeseen vaikuttava voima F . Kuvassa 3b näkyy topologisella optimoinnilla aikaiseksi saatu malli, mikä on muuttanut muotoaan huomattavasti.

Kuvassa 4 on esitelty eräälle kappaleelle tehty topologinen optimointi. (Berrocal et al. 2018, s. 90).

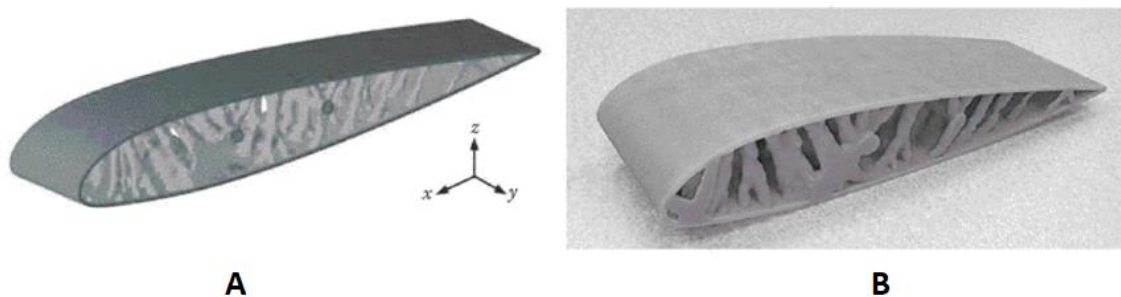


Kuva 4. Topologista optimointia hyödynnetty jättämällä materiaalia vain kriittisiin paikkoihin. (Berrocal et al. 2018, s. 90).

Kuvasta 4a nähdään, että siinä esiintyy tiivis kappale, mihin on syötetty sille kohdistuvat voimat. Punaisella oleville alueille kohdistuu suurin rasitus, kun taas sinisille alueille pienin rasitus. Kuvassa 4b nähdään, että materiaalia on poistettu juuri niiltä kohdista mihin suurta rasitusta ei kohdistu. (Berrocal et al. 2018, s. 90).

3D-tulostuksen myötä topologian optimoinnin hyödyntäminen on helpompaa. Optimoinnin tekemiseen on olemassa ohjelmistoja, jotka muodostavat syötetystä kappalemallista rakenteen, joissa vain tarvittavat pinnat sekä toiminnalliset alueet ovat esitettyinä. Yleisesti topologisesti optimoitu rakenne on verkkomainen, missä rakenne koostuu puristusta ja vetoa vastaanottavista sauvoista. Topologisen optimoinnin hyödyntäminen vaatii kuitenkin asiantuntemusta siitä, mitkä osat sekä rakenteet mallissa ovat kriittisiä. (Gibson et al. 2015, s. 428).

Kuvassa 5 on esitelty erään lentokoneen siiven segmentti, jolle on tehty topologinen optimointi, jonka jälkeen uusi rakenne on valmistettu lisäävällä valmistuksella. (Badiru, Valencia & Liu 2017, s. 824)



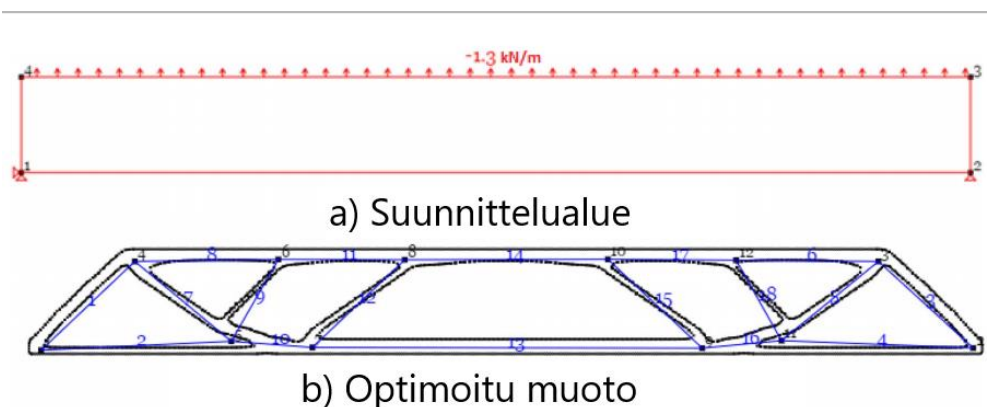
Kuva 5. Kuvassa topologisesti optimoitu lentokoneen siiven segmentti ja kyseinen osa 3D-tulostettuna. (Badiru et al. 2017, s. 824).

Kuvassa 5a voidaan havaita lentokoneen siiven osa, mikä sisältää joukon eri paksuisia palkkeja, mitkä tukevat siipeä sille kohdistuvalta rasitukselta. Kuvassa 5b voidaan havaita kyseinen siiven osa tulostettuna. (Badiru et al. 2017, s. 824).

Topologinen optimointi voidaan jakaa kahteen pääasialliseen menetelmään; ristikkorakenne ja materiaali tiheyden menetelmään. Ristikkomenetelmässä malli koostuu palkkien verkostosta. Palkkien lukumäärä on ennalta määritelty. Optimoinnilla pyritään selvittämään

mitkä palkit ovat rakenteellisen kestävyuden kannalta tärkeimpiä. Palkkien parametrit, kuten esimerkiksi paksuus selvitetään, jonka jälkeen ohuimmat palkit voidaan poistaa. Optimaalisia tuloksia on saavutettu, kun palkkien paksuutta sekä sijaintia on käytetty hyväksi suunnitteluprosessissa. (Gibson et al. 2015, s. 428-429).

Kuvassa 6 on esitelty kyseistä ristikkorakennemenetelmää hyödyntävä suunnitteluprosessi eräälle kappaleelle. (Mandhyan, Srivastava & Krishnamoorthi, 2017, s. 105).



Kuva 6. Ristikkorakennemenetelmää hyödyntävä suunnitteluprosessi. (Mukaiillen: Mandhyan et al. 2017, s. 105).

Kuvassa 6a nähdään, että aluksi suunnittelualueena on vain nelisivuinen suorakulmio, johon on asetettu vaikuttavat voimat. Kuvassa 6b on optimoitu ristikkomainen muoto.

Toinen menetelmä eli materiaalitiheyden hyödyntäminen on yleisempi menetelmä ja siksi se on myös kaupallisesti hyödynnetty tietokonepohjaisten sovelluksien muodossa. Menetelmässä kappale on aluksi vain tasasivuinen lohko, joka sisältää joukon kolmiulotteisia alkioita eli niin sanottuja vokseleita. Alkioilla on oma tiheysarvonsa minkä pohjalta optimoitu rakenne määräytyy. Tiheysarvolla 1 materiaali on täysin tiheää, kun taas tiheysarvolla 0 materiaalia ei ole ollenkaan. Mikäli tiheysarvo on jotakin 0 ja 1 väliltä, materiaalin ei tarvitse olla täysin tiheää rakenteen kestävyuden kannalta. Nämä arvot eivät kuitenkaan ole haluttuja, sillä on hankala valmistaa osittain tiheitä materiaaleja. (Gibson et al. 2015, s. 429-430)

3.2 Haitat

3.2.1 Haitat materiaalin pursotuksessa

3D-tulostusta on vaikea hyödyntää sarjatuotannon valmistusmenetelmänä, sillä prosessi on hidas sekä epätarkka, varsinkin edullisilla valmistuslaitteilla. Teolliset ammattitulostimet pystyvät kuitenkin tarkkaan jälkeen, sekä suuriin tuotantonopeuksiin. Teolliset toimijat käyttävätkin 3D-tulostusta piensarja- sekä varaosatuotannossaan. Edullisten laitteiden hitaus johtuu pääasiassa filamentin syötöstä sekä kuumapään kyvystä sulattaa filamentti. Edullisilla laitteilla myös kerrospaksuus on suuri, jolloin dimensionaalinen tarkkuus sekä pinnanlaatu on huono. Sulatustehon kasvattaminen johtaisi todennäköisesti siihen, että pursotin ja kuumapää painaisivat niin paljon enemmän, että sen liikuttaminen olisi hitaampaa. Lisäksi materiaali jäähtyisi hitaammin, mikä hidastaisi valmistusnopeutta. Näin ollen nopeus ei merkittävästi kasvaisi, ainakaan lisäkustanteita. 3D-tulostimen suuttimen aukko on pyöreä, jolla ei ole koskaan mahdollista valmistaa absoluuttisen teräviä reunoja. Pursotinta liikutellaan edullisissa laitteissa yleensä hihnan avulla, joka saattaa joustaa ja täten johtaa epätarkkuuksiin. (Gibson et al. 2015, s. 164-165).

Suurimpia haittoja valmiissa kappaleessa on sen mekaaniset heikkoudet. Kerros kerrokselta lisäävä valmistusmenetelmä muodostaa kerroksien väliin niin sanotun tyhjän alueen, eli pursottaessa uusi kerros vanhan päälle jättää niiden väliin pienen raon. Tämä vähentää kerroksien rajapintojen sitoutuneisuutta ja siten heikentää kappaleen mekaanisia ominaisuuksia. Kappaleen huokoisuus voi johtaa myös kerroksien jakaantumiseen ja irtoamiseen toisistaan valmistuksen jälkeen. Käyttämällä paksumpaa filamenttia, voidaan huokoisuutta parantaa. Tällöin taas koheesio kärsii, mikä johtaa vetolujuuden heikentymiseen. (Ngo et al. 2018, s. 189). Tulostusparametrien optimoinnilla saadaan laadukasta jälkeä. Etenkin tulostusnopeuden ja pursotettavan filamentin määrää säätelevät parametrit vähentävät tyhjän alueen muodostumista. (Yu et al. 2019. s. 26).

3.2.2 Haitat allasvalokovetuksessa

Allasvalokovetuksen heikkouksiin kuuluu kutistuminen kovetusvaiheessa. Epoksipohjaiset hartsit omaavat paremman kutistuskestävyyden kuin akryylipohjaiset hartsit. Molempien rakenteiden ominaisuuksien hallinta on kuitenkin vaikeaa, sillä valmistuksen aikana

tapahtuvaa polymerisaatiota on monenlaista. Rakenteen huonot mekaaniset ominaisuudet ja joustavuus ovat asioita, joita tulee parantaa, mikäli kappaletta käytetään sille vaikeissa olosuhteissa. (Feng et al. 2017, s. 272).

4 LAITTEISTO

4.1 Materiaalin pursotus

3D-tulostimia on markkinoilla monia erilaisia. Merkittävimmät erot laitteiden välillä on sen kapasiteetti valmistaa suuria kappaleita, sekä sen kyky pursottaa ohuita kerroksia. Edullisimmilla laitteilla on yleensä pieni tulostusala, sekä vain yksi mahdollinen kerrospaksuus. Kalliimmat ja niin myös kehittyneemmät laitteet omaavat suuremman valmistustilavuuden, sekä myös mahdollistavat eri kerrospaksuuksien pursottamista. (Gibson et al. 2015, s. 161-162).

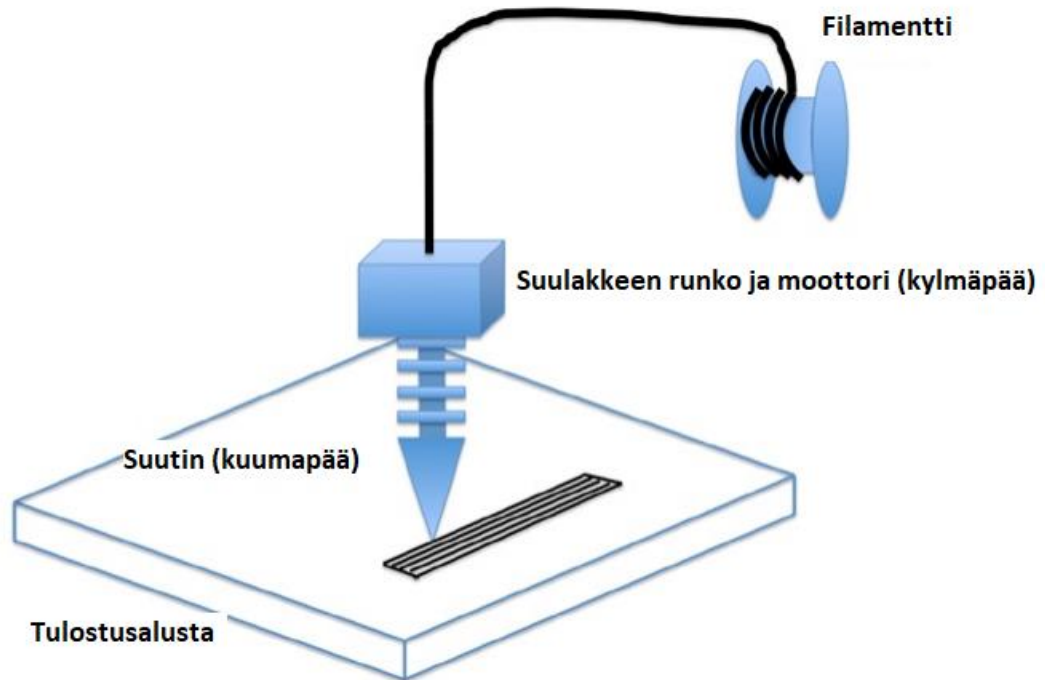
Kuva 7 esittelee Prusa -merkkisen 3D-tulostimen. (All3DP 2019).



Kuva 7. Prusa i3 MK3 3D-tulostin. (All3DP 2019).

Kuvassa 7 nähdään materiaalin pursotustekniikkaa käyttävä tulostin. Tulostusalueelle on aseteltu valmis kappale, jotta nähtäisiin millaisia, kappaleita on mahdollista valmistaa. Kyseinen kappale ei valmistuisi todellisuudessa tuon näköisenä, sillä malli vaatisi paljon tukirakenteita. (All3DP 2019).

Kuvassa 8 on havainnollistettu materiaalin pursotustekniikan tulostimen tärkeimpiä komponentteja.



Kuva 8. Yksinkertaistettu kuva materiaalin pursotus -tulostimen toiminnallisista osista. (mukaillen: Bell, C. 2014, s. 6).

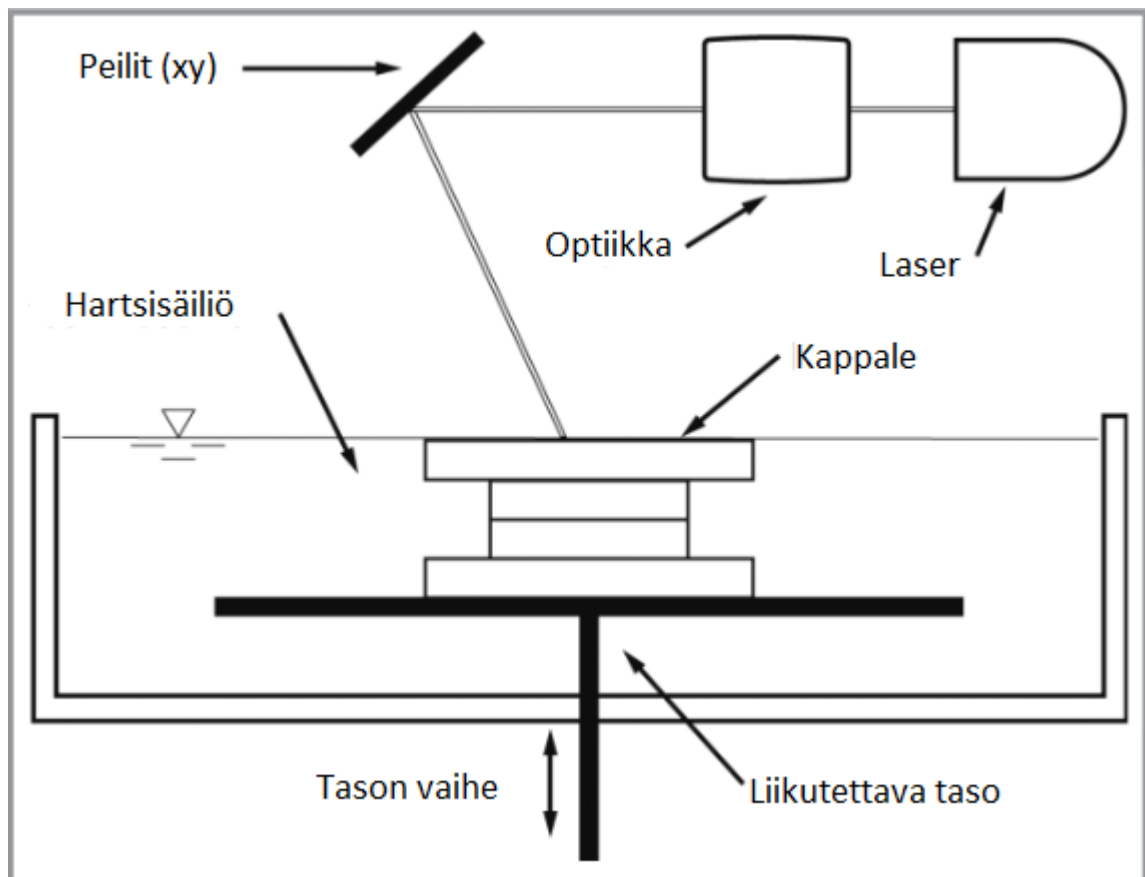
Kuvassa 8 rullassa olevaa filamenttia vedetään suulakkeen rungon läpi kuumapäälle, josta se pursotetaan tulostusalustalle. (Bell, C. 2014, s. 6).

3D-tulostimen tärkeimmät osat ovat emolevy, filamentti, pursotin/suulake, kuumapää sekä tulostusalusta. Emolevyn tehtävä on ohjata prosessin kulkua ja sen laadun merkitys kasvaa, kun tarkoituksena on valmistaa korkeampilaatuisia kappaleita. (3DInsider 2018). Pursotettava materiaali eli filamentti, on yleisesti rullattuna laitteen kyljessä. Pursottimen tehtävä on syöttää filamenttia kuumapäälle. Pursottimessa on askelmoottori, joka säätelee kuinka paljon ja millä nopeudella filamenttia syötetään suuttimelle. (Bell, C. 2014, s. 6). Kuumapää sulattaa sille syötetyn filamentin, joka lopuksi pursotetaan suuttimen läpi tulostusalustalle. Suuttimen koolla on merkittävä rooli valmistettavan tulostuskerroksen kokoon. Yleisesti tulostimessa käytetään useita eri suuttimia, joita vaihtamalla saadaan

erilaista pursotusjälkeä, kun sitä tarvitaan. (My3Dconcepts 2017). Suuttimen halkaisijoiden koot vaihtelevat yleensä aina 0,1 millimetrinä aina 1,0 millimetriin asti. Suurten suuttimien etuja ovat tulosteen parempi kestävyys sekä tulostusnopeus. Pienimmillä suuttimilla saavutetaan parempi tarkkuus. Myös ohuempien tukirakenteiden poistaminen on helpompaa. Pienten suuttimien heikkoutena on niiden suurempi riski tukkeutua. (All3DP:n www-sivut 2019). Itse materiaali, eli filamentti on käärittynä rullalle ja sen halkaisija on standardina joko 1,75 tai 3,00 millimetriä. (3DInsider 2018).

4.2 Allasvalokovetus

Allasvalokovetus laite koostuu lasersäteestä, joka kulkee optiikan läpi x- ja y-suuntaan liikkuvaan peiliin eli skanneriin. Säde kulkee skannerista hartsialtaan pintaan, ja näin kovettaa siihen kappaleen muodon. Yleensä näissä tulostimissa käytetään UV-valokovettuvaa hartsia ja lasersädettä, jota käytetään, kun aallonpituus on UV-alueella. Jokaisen kovetuksen jälkeen kappaletta pitelevä taso laskee syvemmälle hartsialtaaseen, jolloin voidaan kovettaa uusi kerros vanhan kerroksen päälle. Kyseinen prosessi on esiteltyä kuvassa 9. (Femmer, Flack & Wessling. 2016, s. 537).



Kuva 9. Allasvalokovetuslaitteen tärkeimmät osat esiteltynä. (Mukaiillen: Femmer et al. 2016, s. 537).

Kappaleen valmistuttua se poistetaan hartsialtaasta. Ylimääräiset hartsijäämät, jotka eivät kovettuneet poistetaan liuottimella. Jatkotoimenpiteenä kappale voidaan vielä asettaa jälkikovetusuuniin, missä viimeisetkin hartsit kovettuvat. (Femmer et al. 2016, s. 537).

Allasvalokovetuksella saadaan aikaiseksi hyvä pinnanlaatu, jonka suurin aiheuttaja on ohut kerrospaksuus. Hartsisäiliössä on kerrallaan vain yhtä nestemäistä materiaalia. Yhdessä kappaleessa voi olla myös monta eri hartsisekoitetta, mutta tämä lisää valmistuksen vaikeusastetta. Allasvalokovetuksessa valmistettavan kappaleen kokoa rajoittaa hartsisäiliön tilavuus. Kuten materiaalin pursotusmenetelmässä, niin myös allasvalokovetuksessa käytetään ennalta suunniteltuja tukirakenteita valmistusvaiheessa, mitkä poistetaan kappaleen kovetuttua. (Femmer et al. 2016, s. 537). Tukirakenteiden ja ylijäämä hartsien poistaminen on oma prosessinsa, sillä valokovettuva hartsi on todella tahmeaa. Sen poistamiseen käytetäänkin esimerkiksi etanolia tai isopropanolia. (Uzcategui et al. 2018, s. 6)

Allasvalokovetuksessa on myös paljon sellaisia laitteita, jonka tekniikka on hieman erilainen mitä edellä mainittu. Näissä tapauksissa kappaletta pitelevä taso lasketaan aluksi aivan hartsisäiliön pohjalle, josta sitä nostetaan ylöspäin, kun uusia kerroksia kovetetaan. Kyseinen malli rakentuu siis huipusta alaspäin. Kyseinen menetelmä säästää hartsia, mutta tekee raskaiden kappaleiden valmistuksesta hankalaa, sillä kappale voi pudota sitä pitelevästä alustasta. Tuennat vertikaalisuunnassa ovat tärkeitä, sillä painovoiman vuoksi kappaleen reunat voivat helposti taipua vääränlaisiksi. (Femmer et al. 2016, s. 537-538).

Kuvassa 10 on esiteltynä Formlabs -nimisen valmistajan allasvalokovetus tulostin. (Formlabs 2019).



Kuva 10. Formlabs:in SLA -tulostin ja valmistettu malli kiinni ylhäällä olevassa alustassa. (Formlabs 2019).

Kuva 10 esittää allasvalokovetus tulostimen, sekä valmiin kappaleen. Kyseinen kappale roikkuu tasosta kohti hartsiiallasta, eli kappale on valmistunut huipusta alaspäin. (Formlabs 2019).

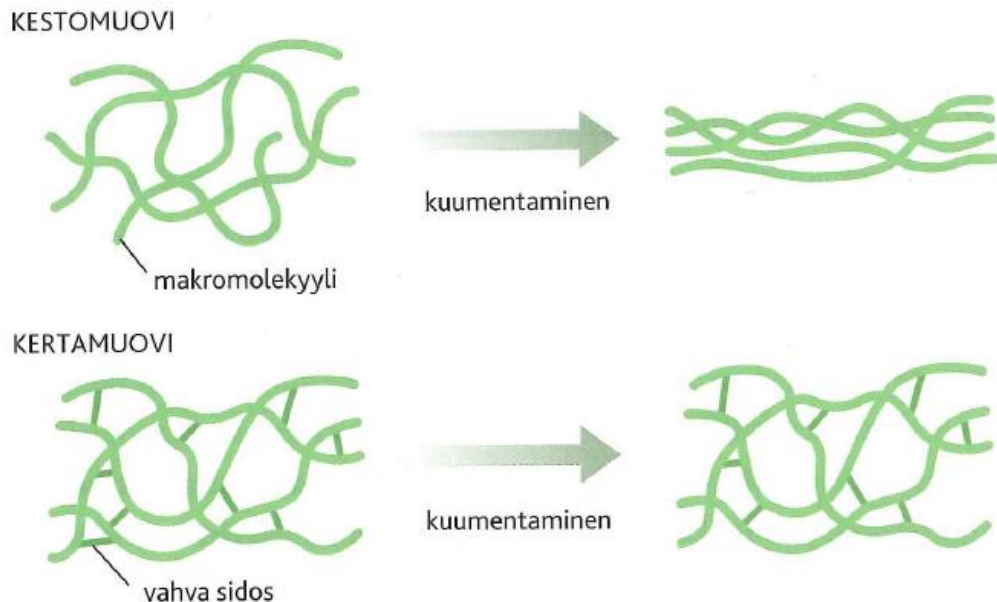
Allasvalokovetuksen etuja materiaalin pursotusmenetelmään ovat sen kyky valmistaa kappaleeseen kokonainen kerros yhdellä kertaa, sekä kyky valmistaa kappaleita, jotka ovat pehmeitä ja taipuisia. Tästä syystä allasvalokovetusta käytetään lisäävänä valmistusmenetelmänä esimerkiksi kudosteknologiassa. Etuna on myös se, että kerrokset allasvalokovetuksella tulostetuissa kappaleissa on todella huomaamattomat, kun taas materiaalin pursotuksessa ne voidaan huomata. (Mondschein et al. 2017, s. 176).

5 MUOVIMATERIAALIT

5.1 Materiaalin pursotuksessa käytetyt muovit

Parhaiten materiaalin pursotusmenetelmää käyttävässä lisäävässä valmistuksessa toimii amorfiset polymeerimuovit eli termoplastiset muovit. Termoplastiset muovit kuuluvat kestopuoveihin. Kestomuovin ominaisuutena on, että sen voi sulattaa ja muotoilla uudestaan. Edullisia termoplastisia muoveja ovat esimerkiksi PS- ja PVC -muovit. Kertamuovit taas voivat saavuttaa muotonsa vain kerran. (Plastics 2019).

Kuvassa 11 on esiteltyä kesto- ja kertomuovin rakenteellinen käyttäytyminen molekyylitasolla, kun muovi altistuu kuumentamiselle. (Hänninen et al. 2018, s. 208).



Kuva 11. Kesto- ja kertamuovin periaatteellinen rakenne. (Hänninen et al. 2018, s. 208).

Kuvasta 11 nähdään, että kestopuovin polymeeriketjuilla ei ole vahvoja sidoksia, mikä mahdollistaa uudelleen muotoilun sulattamisen jälkeen. Kertamuovin rakenne on verkkomainen, joka sisältää vahvoja sidoksia, joten sitä ei voida muotoilla uudelleen. (Hänninen et al. 2018, s. 207)

Termoplastisten muovien etu on se, ettei niillä ole erillistä sulamispistettä, vaan materiaali pehmenee sekä viskositeetti pienenee lämpötilan noustessa. Viskositeetti kuitenkin säilyy

tarpeellisen suurena, että pursotettu muovi säilyttää muotonsa sekä kiinteytyy. Tämä myös helpottaa pursotettujen kerroksien toisiinsa kiinnittymistä. (Gibson et al. 2015, s. 164)

Yleinen edullinen materiaali lisäävässä valmistuksessa on polymeereihin kuuluva ABS-muovi. ABS on teollinen muovi ja se on lyhenne akrylibutadieenistyreenista, joka on suhteessa hintaansa tarpeeksi kestävä ja sitkeä materiaali. ABS-muovin sulamislämpötila on 220-260 °C ja vetolujuus 25-65 MPa. (Wypych. 2016, s. 6-7).

PLA-muovi (lyhenne sanasta polylaktidi) on toinen hyvin yleinen filamenttina käytettävä muovimateriaali. Sen sulamislämpötila on 164-178 °C ja vetolujuus 52-72 MPa. (Wypych. 2016, s. 451-452). PLA-muovi on ympäristöystävällinen, sillä se on biologisesti hajoava polymeeri. Tämä johtuu siitä, että lähtötuote polymerointiin on johdettu mikro-organismeista. Bakteerien biologista aktiivisuutta hyödyntäen kasvituotteista saadaan luotua lähtötuote. (Sin, Rahmat & Rahman. 2012, s. 3). PLA-muovi hajoaa luonnollisesti noin puolen vuoden sisällä, toisin kuin kestumuovit, joiden hajoamisaika on tuhansia vuosia. Se alkaa hajoamaan myös lämpötilan noustessa yli 200 °C. Kuten ABS-muovi, PLA-muovia on saatavilla eri väreinä sekä seoksina. (All3DP 2019). PLA-muovin heikkouksia ovat muun muassa alhainen lämmönkesto, siksi PLA-muovilla tulostettaessa kannattaa käyttää pientä puhallinta, jolla saadaan juuri pursotetun muovin lämpötilaa laskemaan. (Bell, C. 2014, s. 49)

3D-tulostimen filamentteina voidaan käyttää myös muita muovimateriaaleja, kuten polykarbonaattia (PC), millä on hyvä iskunkestävyys. Polykarbonaatin sulamislämpötila on 255-267 °C ja vetolujuus 55-88 MPa. Myös nylon ja PET-muovit (lyhenne sanasta polyetyleenitereftalaatti) sekä sen eri seokset ovat yleisiä filamentteja. PET-muovin sulamislämpötila on 245-265 °C ja vetolujuus 24-41 MPa. (Wypych. 2016, s. 317-318, 399-400). HIPS- ja PVA-muoveja käytetään yleisesti prosessissa tukimateriaaleina kappaleille, sillä ne liukenevat joko kylmässä vedessä tai limoneenissa. Korkeiden sulamispisteiden omaavia muoveja yhdistää tarve lämmitettävään tulostuspetiin. Korkean sulamispisteen (>200 °C) omaa ABS, PET, HIPS, nylon ja polykarbonaatti. Tulostus on mahdollista suorittaa myös ilman lämmintä alustaa, mutta se heikentää tulosteen laatua. (Bell, C. 2014, s. 47-48)

Filamentteina voidaan käyttää myös joustavia muovimateriaaleja kuten TPU:ta (lyhenne sanasta termoplastinen polyuretaani) ja TPE:tä (lyhenne sanasta termoplastinen elastomeeri). (Mutlu et al 2016, s. 127; Anver, Mutlu & Alici. 2017, s. 443)

Taulukossa 2 on esiteltyä materiaalin pursotusmenetelmässä yleisesti käytetyt materiaalit joustoa vaativissa kohteissa, sekä niiden tärkeimmät ominaisuudet. (Ninjatek 2019; Ulprospector 2019).

Taulukko 2. Materiaalin pursotuksessa yleisesti käytettävien muovien teknisiä ominaisuuksia.

	Myötölujuus [MPa]	Shore -kovuus	Sulamislämpötila [°C]	Hinta [€/kg]
ABS	29,6 – 48,0	D 100	220 - 260	23,90
PLA	52,0 – 72,0	D 83	164 - 178	23,90
TPU (NinjaFlex)	4,0	A 85	216	79,90
TPE (FilaFlex)	12,0	A 82	215 - 250	67,52

Taulukosta 2 huomataan, että joustavien muovien (TPU ja TPE) kohdalla myötölujuus on radikaalisti pienempi, kuin perinteisemmällä ABS tai PLA -muoveilla. Luonnollisesti joustavien muovien kovuus on huomattavasti alhaisempi kuin perinteisillä polymeereillä. Sulamislämpötilassa ei ole huomattavissa suuria eroja kovien ja pehmeiden muovien välillä, pois lukien PLA -muovin alhaisempi sulamislämpötila. Hinta on paljolti riippuvainen ostopaikasta, filamentin paksuudesta sekä tuotteen merkistä, mutta selkeästi pehmeät ja joustavat materiaalit ovat kalliimpia kuin ABS tai PLA -muovit.

5.2 Allasvalokovetuksessa käytetyt muovimateriaalit

Allasvalokovetuksessa käytettävillä polymeereille vaatimuksena on joko sulamispiste alle huonelämpötilan, tai käsittely- ja lasittumislämpötilan tulee olla niin alhainen, että polymeeri pysyy nestemäisenä käsittelyn aikana. Käsittelylämpötilassa viskositeetin tulee olla myös alhainen. Viskositeetti perustuu molekyylien painoon ja suurien ketjurakenteiden kietoutumiseen. Hartsin viskositeetti allasvalokovetusprosesseissa on yleisesti noin 1 Pa s.

Molekyylipainon vaihtelun vuoksi viskositeetti voi kuitenkin olla 0,25 Pa s tai jopa 10 Pa s suurilla molekyylipainoilla. Alhainen viskositeetti nopeuttaa tulostuksen kestoa, antaa rakenteelle mahdollisuuden uudelleenpinnoitukselle sekä hartsi myös tasoittuu paremmin. Kappaleen jälkikäsittely on myös helpompaa. (Mondschein et al. 2017, s.176).

Allasvalokovetuksessa hartsi on tyypillisesti akryyli- ja/tai epoksipohjainen. (Femmer et al. 2016, s. 538).

6 KUSTANNUSTEHOKKUUS

Lisäävässä valmistusmenetelmässä valmistettavan geometrian monimutkaisuudella ei ole kustannuksellista merkitystä, joten kustannukset koostuvat pitkälti valmistettavan materiaalin kilohinnasta sekä valmistusprosessin kestosta (Piili et al. 2014, s. 16). Baumers ym. (2012) tekemässä tutkimuksessa, jota sivutaan LUT-yliopiston tekemässä Fast Coins -hankkeessa, selviää että valmistuserän kustannukset koostuvat materiaalista, valmistuksen sivukustannuksista sekä valmistukseen käytetystä energiasta. Alla olevassa kaavassa esitetään Baumersin ym. (2012) arvio valmistuskustannuksista.

$$C_{\text{valmistuserä}} = C_{\text{sivu}} \times T_{\text{valmistus}} + m \times C_m \times E_{ve} \times C_E \quad (1)$$

missä

$C_{\text{valmistuserä}}$	Valmistuserän kustannukset
C_{sivu}	Valmistuksen sivukustannukset, € / h
$T_{\text{valmistus}}$	Valmistusaika, h.
m	Kappaleen paino, kg
C_m	Materiaalin hinta, € / kg
E_{ve}	Valmistuksen aikana kulutettu energia, J
C_E	Energian hinta, € / J.

Lisäävän valmistuksen kustannustehokkuutta on tutkittu myös NIST:n (National Institute of Standards and Technology) tutkimuksessa vuonna 2015. Tutkimuksessa lisäävällä valmistuksella valmistetun tuotteen hinta määräytyy alla olevasta kaavasta. (Thomas & Gilbert. 2015, s. 34).

$$C_{AM} = (MI_{R,AM} + MI_{M,AM}) + (P_{E,AM} + P_{R,AM} + P_{M,AM}) \quad (2)$$

$$+ (FGI_{E,AM} + FGI_{R,AM} + FGI_{M,AM}) + VT_{AM} + RT_{AM} + T_{AM}$$

missä

C_{AM}	Valmistuksen kustannukset
MI	Raaka-aineen hankinnan (R) ja valmistuksen (M) kustannukset

P	Materiaalin louhinnan (E), raaka-aineen jalostuksen (R) ja valmistuksen (M) prosessien kustannukset
FGI	Valmiiden tuotteiden varastoinnin kustannukset materiaalin louhinnalle (E), raaka-aineen jalostukselle (R) ja valmistukselle (M)
VT_{AM}	Tukkumyynnin kustannukset
RT_{AM}	Vähittäiskaupan kustannukset
T_{AM}	Toimitusketjun kuljetuskustannukset

7 CASE-ESIMERKKEJÄ TEOLLISISTA TULOSTETUISTA MUOVITUOTTEISTA

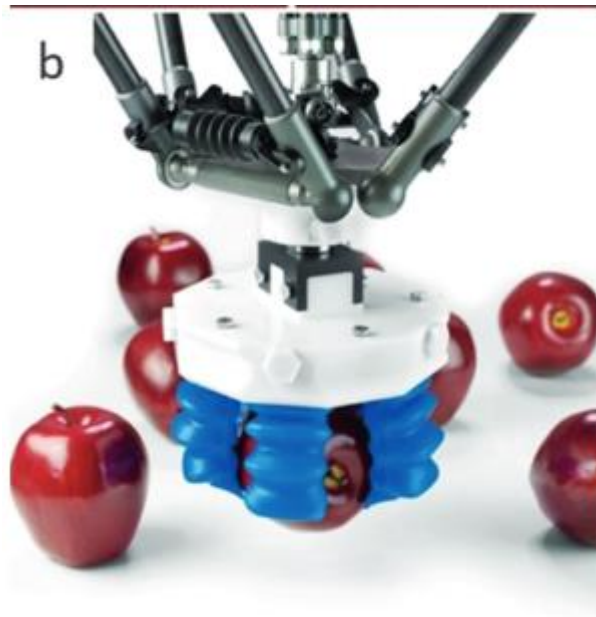
7.1 Robottitarraimet

Robottijärjestelmät voidaan jakaa karkeasti koviin- ja pehmeisiin robotteihin. Kovat robotit ovat valmistettu kovista ja kestävästä materiaaleista. Kovia robotteja yleensä ohjataan elektronisilla toimilaitteilla, kuten sähkömoottoreilla ja solenoideilla, tai käyttäen paineistettuja nesteitä eli pneumatiikkaa tai hydraulikkaa. Kovat robotit soveltuvat yksinkertaiseen jatkuvaan työhön, missä robotin toimintaa ei tarvitse muuttaa. Kova robotti on kallis ja hyvin painava, eikä sen lähellä ole turvallista työskennellä ilman vaadittavia suojavälineitä. (Whitesides 2018, s. 4260; Alici 2018, s. 6-7).

Pehmeät robotit ovat valmistettu pehmeistä ja joustavista materiaaleista, kuten muovista tai kumista. Pehmeät robotit ovat huomattavasti turvallisempia ja ne sopivat hyvin käytettäväksi ihmisten rinnalla. Esimerkiksi erilaisten kappaleiden tarttumiseen pehmeä robotti hyödyntää elastomeeripolymeerien luontaista joustavuutta, eli näissä tapauksissa robotti ei vaadi yhtä monimutkaista ohjausparametrien optimointia, kuten kovat robotit. Kova robotti vaatisi kappaleen tarttumista varten kappaleen tarkan sijainnin ja myös sensorit, joilla tunnustella kuinka kovan puristuksen tarttuminen vaatisi. Pehmeät robotit sisältävät usein 3D-tulostettuja materiaaleja, jotta robotin toiminnalliset osat voidaan integroida yhtenäiseen rakenteeseen. (Alici 2018, s. 6-7).

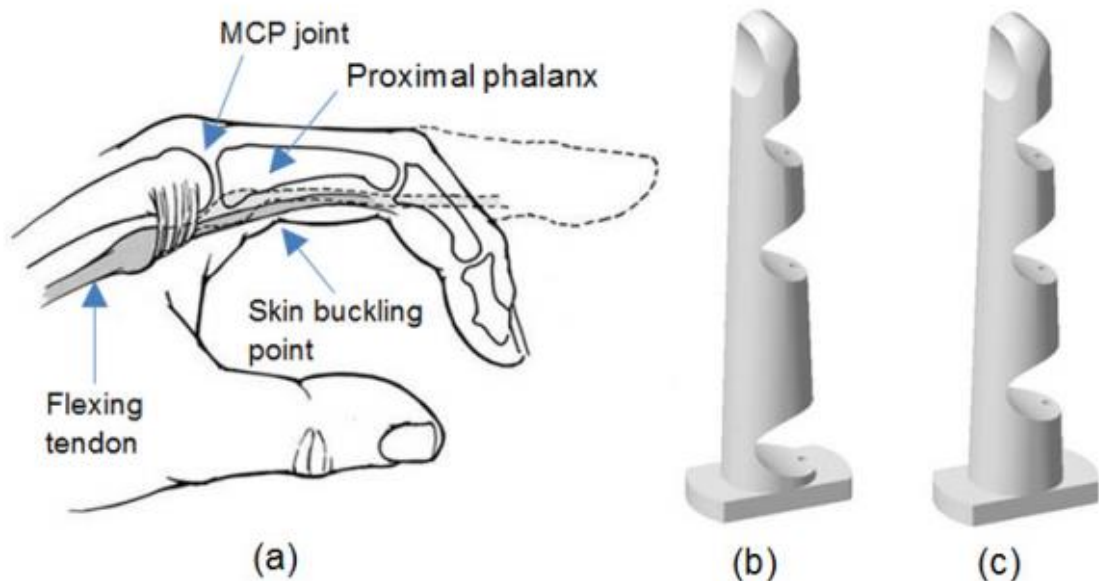
Tässä case-esimerkissä tutkitaan 3D-tulostamalla valmistettuja robottitarraimia. Robottitarraimilla tarkoitetaan robotin osaa, jolla tartutaan kiinni haluttuun kappaleeseen. Tutkitaan, millaisia erilaisia ratkaisuja on kehitetty tarttumista varten ja kuinka lisäävää valmistusta sekä edullisia muovimateriaaleja on onnistuttu hyödyntämään kyseisissä kohteissa.

Kuvassa 12 on esiteltyä tyypillisen näköinen pehmeän robotin tarrain. Tarrain koostuu useammasta lonkeromaisesta ”sormesta” ja robotti jäljittelee samaa tarttumismenetelmää ihmiskäden kanssa. ”Sormien” lonkeromainen pinta helpottaa erimuotoisiin kappaleisiin tarttumista. Robotin ”sormet” ovat pehmeitä ja niiden liikkeitä ohjataan pneumatiikalla. (Whitesides 2018, s. 4263).



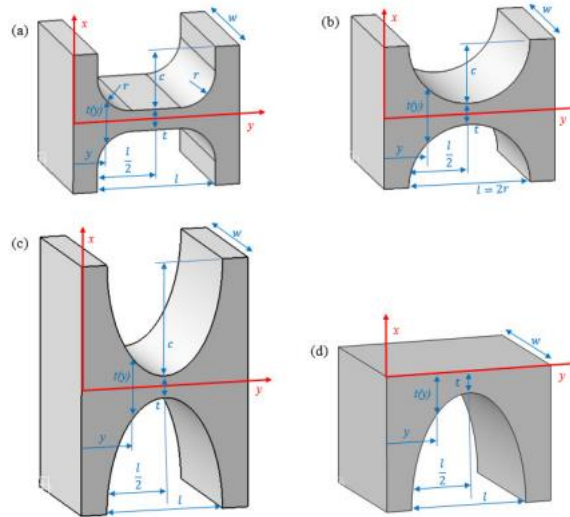
Kuva 12. Pehmeä robottitarrain tarttumassa hedelmään. (Whitesides 2018, s. 4263).

Lisävä valmistus mahdollistaa useiden erilaisten muotojen valmistuksen, tämän takia robottitarraimien suunnittelussa on nähty toisistaan paljon poikkeavia rakenteita. Ihmisen sormia vastaavat muodot on helppo valmistaa 3D-tulostamalla. Kuvassa 13 on esitetty Mutlu et al. tutkimuksessa suunniteltu tarraimen rakenne, missä lopputulokset (b) ja (c) on saatu aikaiseksi ihmisen etusormen rakenteesta ja sen taipuisista kohdista (a). (Mutlu et al. 2016, s. 131).



Kuva 13. Suunnittelun lähtökohtana oleva ihmisen sormi. (Mutlu et al. 2016, s. 131).

Kyseisen tutkimuksen suurimpana kysymyksenä oli sormessa olevien nivelten geometriset muodot, joiden käyttäytymistä tutkittiin FE-analyyseilla ja käytännön taivutuskokeilla. Tutkimuksessa oli 4 erilaista nivelgeometriaa, joista lopulta kuvassa 14 esitelty (d) geometria valittiin parhaaksi. (Mutlu et al. 2016, s. 128, 138).

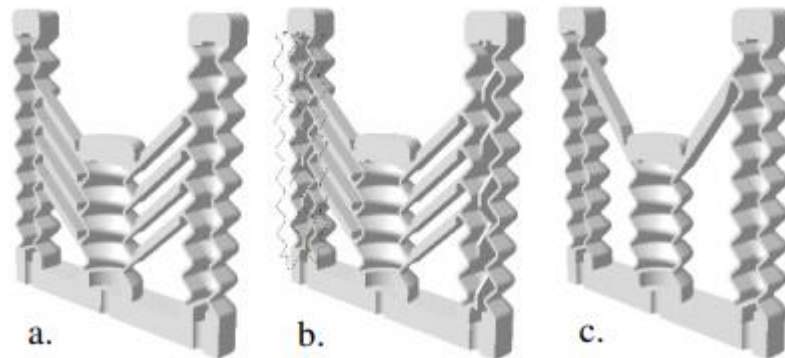


Kuva 14. Mahdolliset geometriat sormen niveleen, joista (d) valikoitui parhaaksi. (Mutlu et al. 2016, s. 128).

Kyseinen kappale valmistettiin käyttämällä materiaalin pursotustekniikkaa. Laitteena toimi UP Plus 2, jonka hinta Amazon -verkkokaupassa on 799 dollaria (20.11.2019). Filamenttina toimi robottitarraimelle tyypillinen TPU (lyhenne sanasta termoplastinen polyuretaani). TPU on hyvin joustava muovi. (Mutlu et al. 2016, s. 127). TPU on ominaisuuksiltaan yhdistelmä muovia ja kumia, jonka syystä se soveltuu hyvin joustoa vaativiin kohteisiin. TPU -filamenttia 500 gramman rullana 1,75 mm paksuudella maksaa alle 50 euroa. (3DPrima 2019).

Lopullinen malli koostui kolmesta sormesta, joista kaksi oli nelinivelisiä ja yksi kolminivelinen, mikä on esitelty kuvassa 14d. Tarraimen liikkeitä ohjaa vain yksi toimilaite, mikä osoittaa pehmeän robotin hallinnan yksinkertaisuuden. Tutkimuksen tuloksia tarkastellessa todettiin, että kyseinen malli on potentiaalinen vaihtoehto robottitarraimille, sillä mallilla on kyky tarttua sekä herkkiin että tuntemattomiin kappaleisiin ilman kappaleen tarkkaa sijaintia tai sensoreita, jolla säädettäisiin tarraimen käyttävää tartuntavoimaa. (Mutlu et al. 2016, s. 141-142).

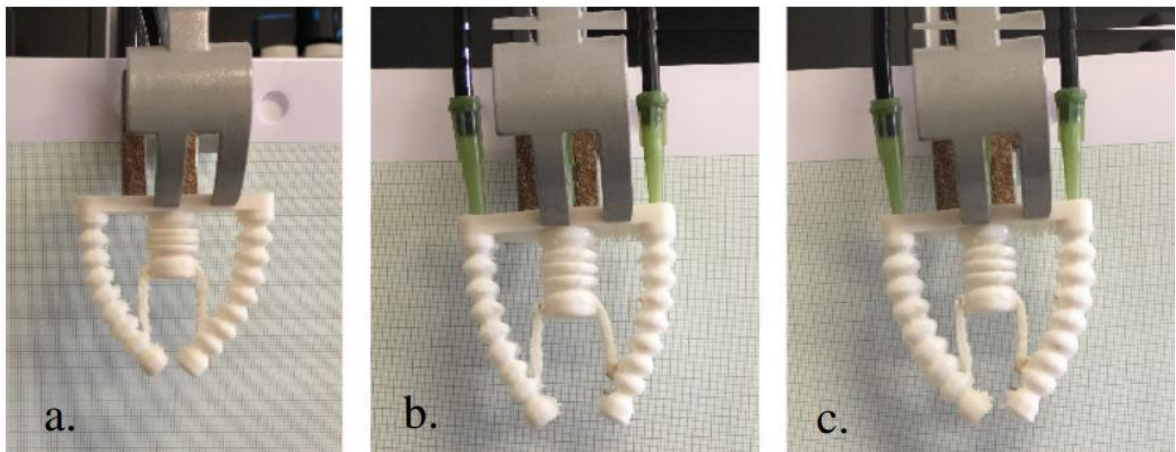
Mutlu et al. ovat tutkineet tarraimen rakenteita, jotka ovat täysin yhtenäisiä. Alla olevassa kuvassa 15 on esiteltyä suunniteltujen kappaleiden mallit halkaistuina. (Mutlu et al. 2017, s. 6237).



Kuva 15. (a) kohdassa usea välipalkki, (b) kohdassa väliseinä sormen sisällä ja (c) kohdassa ilman väliseinää sekä vain yhdellä välipalkilla. (Mutlu et al. 2017, s. 6237).

Kyseinen kappale on valmistettu materiaalin pursotusmenetelmällä. Laitteena on käytetty Flashforge Creator Pro:ta, minkä hinta Amazon -verkkokaupassa on 636,65 dollaria (26.11.2019). Käytettävä filamentti on niin ikään termoplastinen polyuretaani, merkiltään NinjaFlex. 500 gramman ja 1,75 mm paksuinen filamentti maksaa 3DPrima:n verkkokaupassa 39,90 euroa (26.11.2019). Seinämävahvuus kappaleessa on keskiarvolta 0,58 mm. (Mutlu et al. s. 6237; 3DPrima 2019).

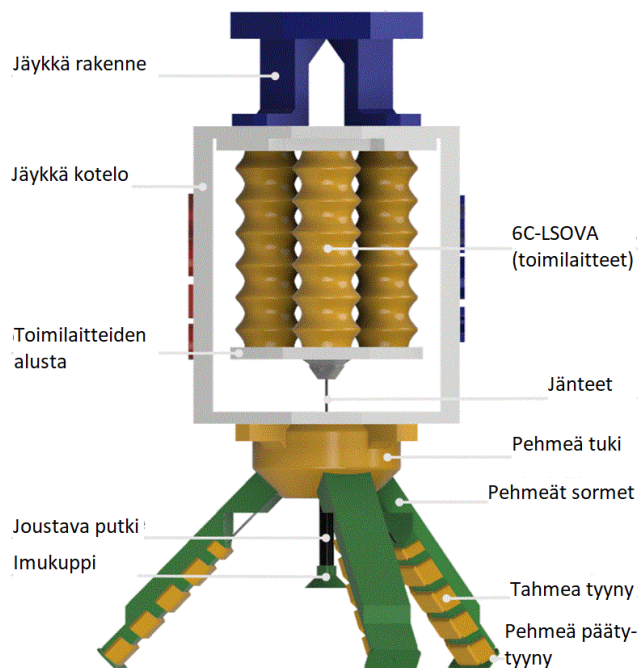
Tarrainta liikutetaan pneumatiikan avulla. Kesimmäiseen sormeen luodaan alipainetta, jonka takia sormi lyhentyy ja tällöin reunimmaisetsormet lähentyvät toisiaan. Myös reunimmaisetsormet voidaan paineistaa, jolloin ne saadaan entistä lähemmäksi toisiaan. Kyseinen prosessi on esiteltyä alla olevassa kuvassa 16. (Mutlu et al. 2017 s. 6238).



Kuva 16. Eri mallien käyttäytyminen kuvattuna pneumatiikan alaisena. (Mutlu et al. 2017, s. 6238).

Kuvassa 16a olevassa mallissa vaikuttaa vain keskimmäisen sormen alipaine, eikä rakenteessa ole väliseinää. Kuvassa 16b ja 16c rakenteessa on mukana väliseinä, mutta kuvassa 16c myös keskimmäisen sormen alipaineen lisäksi reunimmaiset sormet ovat täynnä ilmaa. (Mutlu et al. 2017, s. 6238).

Tawk et al. tutkimuksessa valmistettiin alla olevan kuvan 17 mukainen robottitarrain. Työn tärkeimpinä tavoitteina pidettiin 3D-tulostettujen osien hyödyntämistä, edullisuutta, tarraimen toiminnan parantamista sekä monipuolisuuden esittelyä. (Tawk et al. 2019, s. 1269)

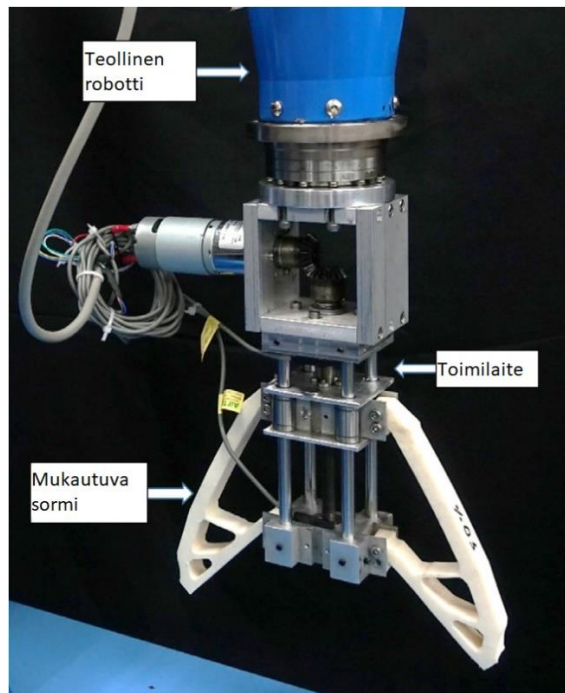


Kuva 17. Robottitarrain, joka koostuu sekä kovista, että pehmeistä muoveista. (mukaiillen: Tawk et al. 2019, s.1269).

Kuvassa 17 esitellyn mallin jäykät osat ovat ABS -muovia. Pehmeät osat ovat termoplastista polyuretaania NinjaFlex:ia. Osat ovat tulostettu materiaalin pursotustekniikalla, käyttäen FlashForge Inventoria. Tulostimen hinta on Amazon -verkkokaupassa 1180 dollaria (26.11.2019). Sormissa kiinni olevat tyynyt eivät ole valmistettu tulostustekniikalla, vaan valmiit tyynyt ovat kiinnitetty tulostettuun sormeen jälkikäteen. Tarraimen toimilaitteet ovat

pneumatiikalla toimivia ja jänteiden avulla liike saadaan sormiin asti. (Tawk et al. 2019, s.1269, 1274).

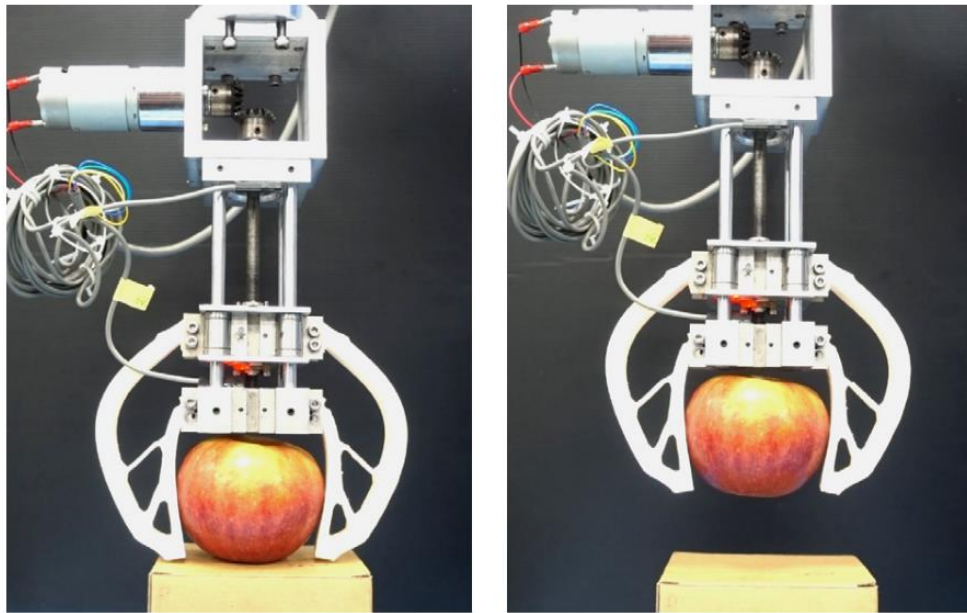
Liu et al. valmistivat prototyypin, joka koostuu lineaarisesta toimilaitteesta ja kahdesta tartuntasormesta. Sormien geometrian muodostuksessa on hyödynnetty topologista optimointia. Kuvassa 18 on esitelty kyseinen robottitarrain. (Liu et al. 2018, s. 192)



Kuva 18. Robotin toiminnallisia osia esiteltynä. (Mukaillen: Liu et al. 2018, s.192).

Mukautuvat sormet ovat niin ikään termoplastista materiaalia, paksuudeltaan 20 mm. Sormien yläosassa sijaitseva taso liikkuu vertikaalisesti, jolloin tasoa alaspäin liikuttamalla sormet puristuvat yhteen. Kuvassa 18, robottitarraimen liikutettava taso on yläasennossa, jolloin sormet ovat mahdollisimman kaukana toisistaan. (Liu et al. 2018, s. 192)

Kuvassa 19 nähdään, kun toimilaite on laskenut liikutettavan tason alas, jolloin tarrain on tarttunut kappaleeseen ja nostanut sen ylös. (Liu et al. 2018, s. 192)



Kuva 19. Robottitarrain tarttumassa omena. (Liu et al. 2018, s. 192).

Kuten kuvasta 19 huomataan, tartuntarobotin sormet ovat muuttaneet muotoaan joustavuuden ansiosta, jolloin tarttuminen onnistuu. Materiaali kestää venytystä, eikä se myöskään vahingoita nostettavaa kappaletta, mikä tekee robotista soveltuvan teollisiin kohteisiin, esimerkiksi hauraiden kappaleiden käsittelyyn. (Liu et al. 2018, s. 192-194)

Esitellyissä tutkimuksissa käytetty valmistustapa oli poikkeuksetta materiaalin pursotustekniikka. Käytettyjä muovimateriaaleja oli erilaisia, mutta kaikki joustoa vaativat osat olivat termoplastisia polyuretaaneja (TPU). Myös termoplastinen elastomeeri (TPE) on yksi filamenttina käytetty materiaali joustoa vaativissa kohteissa, kuten robottitarraimissa. (Anver et al. 2017, s. 443)

Tarttumisrobotin tartuntaosia valmistetaan lisäävällä valmistusmenetelmällä, sillä pehmeän robotin vaihtoehtoiset valmistusmenetelmät ovat aikaa vieviä sekä vaativia. Perinteisimpiin valmistusmenetelmiin kuuluu esimerkiksi erilaiset muovaustekniikat. (Mutlu et al. 2017, s. 6236)

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia edullisten muovimateriaalien lisäävää valmistusta ja valmiiden tuotteiden käyttökohteita tehdasympäristössä. Työssä esiteltiin edulliset tulostustekniikat sekä edullisia ja yleisesti käytettyjä materiaaleja.

Työ tehtiin täysin kirjallisuuskatsauksena, eli työn lähteinä käytettiin erilaisia kirjoituksia sekä tutkimuksia. Työn päätavoite oli selvittää, millaisia tulostettuja muovimateriaaleja voidaan hyödyntää tehdasympäristössä, ja tähän saatiin vastaus case-esimerkeistä.

Edullisuus aspekti rajasi lisäävän valmistuksen menetelmät materiaalin pursotukseen ja allasvalokovetukseen. Kyseiset prosessit ovat toisistaan poikkeavia, mikä johtaa myös tulostettujen kappaleiden eroavaisuuksiin. Materiaalin pursotuksessa kappaleista saadaan vahvempia, kuin allasvalokovetuksessa. Kuitenkin allasvalokovetuksen kappaleista saadaan joustavampia sekä tasaisempia, mitä materiaalin pursotuksessa. Tärkeimpänä ominaisuutena lisäävässä valmistuksessa on kuitenkin sen hyödyt verraten perinteisiin valmistusmenetelmiin. Materiaalin säästö sekä topologisen optimoinnin hyödyntäminen ovat asioita, joita on hankala tai jopa mahdoton saavuttaa perinteisillä menetelmillä.

Tulokset osiossa käytiin läpi case-esimerkkejä teollisista tulostetuista muovituotteista. Esimerkit käsitelivät robottitarraimia, joissa oli hyödynnetty materiaalin pursotusta, sekä joustavia muovimateriaaleja. Robottitarraimien tulostaminen pehmeistä muoveista johti pääasiassa siihen, että robotti ei tarvitse monimutkaista ohjauslogiikkaa kappaleeseen tarttumista varten. Robottitarraimen tulostaminen mahdollisti myös innovatiivisten geometrioiden käyttämisen.

9 POHDINTA

Tässä kappaleessa pohditaan tehdyn kirjallisuuskatsauksen perusteella saatuja tuloksia, sekä mietitään, millaisia mahdollisuuksia lisäävällä valmistuksella voi olla tulevaisuudessa.

Lisäävä valmistus on ollut olemassa jo 80-luvulta lähtien, mutta se on tullut suuren yleisön tietoisuuteen vasta hiljattain. Lisäävän valmistuksen tekniikka kehittyikin jatkuvasti lisää, mikä kasvattaa erilaisten käyttömahdollisuuksien määrää. Eniten hyötyä muoviosien tulostamisesta on sellaisissa käyttökohteissa, missä lisäävä valmistus on joko ainoa, tai vaihtoehtoisesti selvästi edullisin ja yksinkertaisin tapa valmistaa kappale. Lisäävän valmistuksen suurin etu onkin nopeus ja edullisuus.

Perinteiset valmistusmenetelmät vallitsevat yhä etenkin teollisuuden laitteita valmistettaessa. Tämä voi johtua pääasiallisesti siitä, että riittävästi tutkimuksia tai kokeiluja ei ole tehty tulostettujen osien soveltuvuudesta teollisiin kohteisiin. Kuten robottitarraimia tutkineessa osiossa esitettiin, tulostettujen muovimateriaalien käyttö vaatii uudenlaista ajatusmallia. Vanhalla valmistusmenetelmällä valmistetut robottitarraimet saattoivat vaatia suuria investointeja niin robotin ohjelmointiin kuten myös itse tarraimen valmistukseen. Tulostustekniikan ja muovin ominaisuuksien hyödyntäminen johti aivan uudenlaiseen tuotteeseen, mikä ei olisi ollut mahdollista perinteisillä valmistusmenetelmillä.

Tulevaisuudessa lisäävällä valmistusmenetelmällä tullaan todennäköisesti korvaamaan jo valmiita toimilaittekokonaisuuksia, hyödyntämällä tulostuksen etuja, kuten topologista optimointia sekä materiaalien ominaisuuksia.

10 JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET

Edullisia tulostettuja muoveja voisi jatkossa tutkia myös teollisten käyttökohteiden ulkopuolella. Teolliset käyttökohteet ovat usein rasitukselle altistavia, jolloin esimerkiksi allasvalokovetuksen tuotteet eivät sovellu niihin materiaalin pursotuksen tuotteiden tavoin. Allasvalokovetuksen tuotteiden pehmeiden hyödyntämistä voitaisiin tutkia esimerkiksi kudosteknologian käyttökohteissa.

LÄHTEET

- 3DInsider. 2018. Parts of a 3D Printer. [3DInsider:in www-sivuilla]. [Viitattu 13.8.2019.]
Saatavissa: <https://3dinsider.com/3d-printer-parts/>
- 3DPrima. 2019. [3DPrima:n www-sivuilla]. [Viitattu 20.11.2019].
Saatavissa: <https://www.3dprima.com/>
- Alici, G. 2018. Softer is harder: What differentiates soft robotics from hard robotics?
Julkaisussa: MRS Advances, Vol. 3, Nro. 28, s. 1557-1568.
- All3DP. 2018. 3D Printer Nozzle Size & Material – What to Know & Which to Buy.
[All3DP:n www-sivuilla]. [Viitattu 13.8.2019.]
Saatavissa: <https://all3dp.com/2/3d-printer-nozzle-size-material-what-to-know-which-to-buy/>
- Amazon. 2019. [Amazon:in www-sivuilla]. [Viitattu 13.8.2019.]
Saatavissa: <https://www.amazon.com/3D-Printers/b?ie=UTF8&node=6066127011>
- Anver, H., Mutlu, R. & Alici, G. 2017. 3D Printing of a Thin-Wall Soft and Monolithic Gripper Using Fused Filament Fabrication. Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Munich, Germany. 3-7.7.2017. s. 442-447.
- Badiru, A., Valencia, V. & Liu, D. 2017. Additive Manufacturing Handbook - Product Development for the Defense Industry. CRC Press. 912 s.
- Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., Rosamond, E. & Hague, R. 2012. Combined Build-Time, Energy Consumption and Cost Estimation for Direct Metal Laser Sintering. Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium – An additive Manufacturing Conference, SFF 2012. Austin, TX, USA. 6-8.8.2012. s. 932-944.

- Bell, C. 2014. *Maintaining and Troubleshooting Your 3D Printer*. Apress, Berkeley, CA. 498 s.
- Berrocal, L., Fernández, R., González, S., Periñán, A., Tudela, S., Vilanova J., Rubio L., Márquez, J., Guerrero, J. & Lasagni, F. 2018. Topology optimization and additive manufacturing for aerospace components. *Julkaisussa: Progress in Additive Manufacturing*. Springer International Publishing. Vol. 4, Nro. 2. s. 83-95.
- Eyers, D. & Potter, A. 2017. Industrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective. *Julkaisussa: Computers in Industry*. Vol. 92-93. s. 208-218.
- Femmer, T., Flack, I. & Wessling, M. 2016. Additive Manufacturing in Fluid Process Engineering. *Julkaisussa: Chemie Ingenieur Technik*. Vol. 88, Nro. 5. s. 535-552.
- Formlabs. 2019. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 24.10.2019].
Saatavilla: <https://formlabs.com/>
- Feng, X., Yang, Z., Chmely, S., Wang, Q., Wang, S. & Xie, Y. 2017. Lignin-coated cellulose nanocrystal filled methacrylate composites prepared via 3D stereolithography printing: Mechanical reinforcement and thermal stabilization. *Julkaisussa: Carbohydrate Polymers*. Vol. 169, s. 272-281.
- Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. 2015. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Second Edition. Springer, New York. 498 s.
- Horvath, J. 2014. A Brief History of 3D Printing. *Teoksessa: Mastering 3D Printing*. s. 3-10. Apress, Berkeley, CA.
- Hänninen, H., Karppinen, M., Leskelä, M. & Pohjakallio, M. 2018. *Tekniikan kemia*. 14. Painos. Keuruu. Edita Publishing Oy. 420 s.

Liu, C., Chen, T., Pai, T., Chiu, C., Peng, W. & Hsu, M. 2018. Topology Synthesis, Prototype, and Test of an Industrial Robot Gripper with 3D Printed Compliant Fingers for Handling of Fragile Objects. Proceedings of 2018 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA). Beijing, China. 16.8.2018. s. 189-194.

Mandhyan, A., Srivastava, G. & Krishnamoorthi, S. 2017. A novel method for prediction of truss geometry from topology optimization. Julkaisussa: Engineering with Computers, Vol. 33, Nro. 1, s. 95-106.

Mondschein, R., Kanitkar, A., Williams, C., Verbridge, S. & Long, T. 2017. Polymer structure-property requirements for stereolithographic 3D printing of soft tissue engineering scaffolds. Julkaisussa: Biomaterials. Vol 140, s. 170-188.

Mutlu, R., Alici, G., In het Panhuis, M. & Spinks, G. 2016. 3D Printed Flexure Hinges for Soft Monolithic Prosthetic Fingers. Julkaisussa: Soft Robotics. Vol. 3, Nro. 3, s. 120-133.

Mutlu, R., Tawk, C., Alici, G. & Sariyildiz, E. 2017. A 3D printed monolithic soft gripper with adjustable stiffness. Proceedings of IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing, China. 29.10-01.11.2017. s. 6235-6240.

My3Dconcepts. Main Components of FDM 3D Printer. 2017. [My3Dconcepts:in www-sivuilla]. [Viitattu 13.8.2019.]

Saatavissa: <http://my3dconcepts.com/explore/main-components-of-desktop-3d-printers/>

Ngo, T., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. & Hui, D. 2018. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Julkaisussa: Composites Part B. Vol. 143. s. 172-196.

Ninjatek. 2019. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 20.12.2019].

Saatavissa: <https://ninjatek.com/>

Piili, H., Hirvimäki, H., Väistö, T., Nyamekye, P., Pekkarinen, J. & Salminen, A. 2014. Katsaus lisäävän valmistuksen (aka 3D-tulostus) mahdollisuuksiin ja kustannuksiin

metallisten tuotteiden valmistuksessa: Case jauhepetitekniikka. Lappeenranta. 31 s.
Saatavissa: <http://www.urn.fi/URN:ISBN:978-952-265-671-1>

Plastics. 2019. [Plastics:in www-sivuilla]. [Viitattu 25.10.2019].
Saatavissa: <https://www.plastics.fi/>

Prusa 3D. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 17.9.2019].
Saatavissa: <https://shop.prusa3d.com/en/3d-printers/180-original-prusa-i3-mk3-kit.html#>

Sin, L., Rahmat, A. & Rahman, W. 2012. Overview of Poly(lactid Acid). Teoksessa: Polylactic acid: PLA biopolymer technology and applications. s. 1-70.

Sturm, L., Williams, C., Camelio, J., White, J. & Parker, R. 2017. Cyber-physical vulnerabilities in additive manufacturing systems: A case study attack on the .STL file with human subjects. Julkaisussa: Journal of Manufacturing Systems. Vol. 44, Nro. 1., s. 154-164.

Tawk, C., Gillett, A., In Het Panhuis, M., Spinks, G. & Alici, G. 2019. A 3D-Printed Omni-Purpose Soft Gripper. Julkaisussa: IEEE Transactions on Robotics. Vol. 35, Nro. 5, s. 1268-1275.

Thomas, D. & Gilbert, S. 2015. Costs and cost effectiveness of additive manufacturing: A literature review and discussion. Teoksessa: Brewer, F. 2015. Additive manufacturing: Costs, cost effectiveness and industry economics. Nova Science Publishers, Inc. s. 1 -96.

Ulprospector 2019. [Ulprospector:in www-sivuilla]. [Viitattu 20.12.2019].
Saatavissa: <https://plastics.ulprospector.com/>

Uzcategui, A., Muralidharan, A., Ferguson, V., Bryant, S. & Mcleod, R. 2018. Understanding and Improving Mechanical Properties in 3D printed Parts Using a Dual-Cure Acrylate-Based Resin for Stereolithography. Julkaisussa: Advanced engineering materials. Vol. 20, Nro. 12., 19 s.

Whitesides, G. 2018. Soft Robotics. Julkaisussa: Angewandte Chemie International Edition. Vol. 57, Nro. 16, s. 4258-4273.

Wypych, G. 2016. Handbook of Polymers (2nd edition). ChemTec Publishing. 712 s.

Yu, S., Hwang, Y., Hwang, J. & Hong, S. 2019. Analytical study on the 3D-printed structure and mechanical properties of basalt fiber-reinforced PLA composites using X-ray microscopy. Julkaisussa: Composites Science and Technology, Vol. 175, s. 18-27.