

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

UUSIOMUOVIA KÄYTTÄVÄN 3D-TULOSTIMEN KONSEPTISUUNNITTELU

CONCEPT DESIGN OF RECYCLED PLASTIC 3D-PRINTER

Lappeenrannassa 21.12.2016

Antero Komi

Tarkastaja: TkT Kimmo Kerkkänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Antero Komi

Uusiomuovia käyttävän 3D-tulostimen konseptisuunnittelu

Kandidaatintyö

2016

35 sivua, 5 kuvaa ja 8 taulukkoa

Tarkastaja: TkT Kimmo Kerkkänen

Hakusanat: 3D-tulostin, kierrätysmuovi, koneensuunnittelu, FDM, TRIZ

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää uusiomuovia raaka-aineena käyttävän 3D-tulostimen suunnitteluun vaikuttavat tekijät ja mahdolliset raaka-aineet. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksen ja järjestelmällisen teknisen suunnittelun avulla.

Fused deposition modeling -menetelmä (FDM) on yleisin edullisissa kuluttajatason tulostimissa käytetty 3D-tulostustekniikka. Polyetyleni ja polypropyleeni ovat yleisimmät pakkausjätteestä löytyvät muovimateriaalit. Ne ovat ominaisuuksiltaan amorfisia. FDM-menetelmään sopivat parhaiten amorfiset polymeerit. Tulostimen vaatimukset muodostettiin moduulipakkausjärjestelmän ja nykyisiin laitteisiin verrattavien ominaisuuksien mukaiseksi.

Polyetyleniä ja polypropyleeniä käyttämällä saavutetaan hyvä jätteen hyötykäyttö. Ne myös soveltuvat käytettäväksi FDM-menetelmää käyttävissä tulostimissa. Tulostimesta ideoitiin 3 konseptiratkaisua ideamatriisiin perusteella, ja niiden arvioinnissa selvitettiin soveltumattomat ja muita selkeästi huonommat ratkaisut. Jatkotutkimukset voivat keskittyä tarkempaan suunnitteluun, tulostuskokeisiin tai ohjausjärjestelmän kehitykseen.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Antero Komi

Concept design of recycled plastic 3D-printer

Bachelor's thesis

2016

35 pages, 5 figures and 8 tables

Examiner: D. Sc. (Tech.) Kimmo Kerkkänen

Keywords: 3D-printer, recycled plastic, machine design, FDM, TRIZ

The goal of this study was to examine the properties affecting the design of 3D-printer using recycled plastic as raw material. Also, the possible material options were to be discussed. Study was based on literature review and systematic machine design process.

Fused deposition modeling (FDM) is the most common technology used in consumer-grade printers nowadays. Polyethylene and polypropylene are the most common plastics found in packaging waste. They have amorphous material properties. FDM works best with these kinds of amorphous materials. Requirements for the printer design were drafted to suit a module packing system and to have comparable properties with current products.

Using polyethylene and polypropylene as the raw material results in efficient waste usage. It also is possible to use these materials with FDM-process printers. Three concept designs were drafted for the printer. In the analysis, incompatible and otherwise clearly inferior designs were found. Further research may focus on detailed design, printing tests or control system development.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	6
1.1	Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimusongelma	7
1.2	Rajaukset	8
1.3	Tutkimusmenetelmät	8
2	KIRJALLISUUSKATSAUS	10
2.1	Järjestelmällinen tekninen suunnittelu	10
2.1.1	Tehtävän asettelu	11
2.1.2	Konseptisuunnittelu	12
2.1.3	Konseptien arviointi	14
2.2	3D-tulostaminen ja sen kehitys	15
2.3	Pakkaustekniikan muovituotteet ja materiaalit	16
2.4	Kierrätysmuovi tulostimen raaka-aineena	17
2.5	Nykyiset tekniset ratkaisut	19
3	TULOKSET	20
4	JOHTOPÄÄTÖKSET	28
4.1	Teknisten ratkaisujen soveltuvuus	28
4.2	Tekniikan ja materiaalien soveltuvuus	29
4.3	Luotettavuustarkastelu	30
4.4	Jatkotutkimusaiheet	30
5	YHTEENVETO	32
	LÄHTEET	33

LYHENNELUETTELO

ABS	Akrylinitriilibutadieenistyreeni
FDM	Fused deposition modeling
HDPE	Korkeatiheyksinen polyetyleeni (high density polyethylene)
HIPS	Iskunkestävä polystyreeni (high impact polystyrene)
LDPE	Matalatiheyksinen polyetyleeni (low density polyethylene)
PE	Polyetyleeni
PP	Polypropyleeni
PS	Polystyreeni
PET	Polyeteenitereftalaatti
PVC	Polyvinyylikloridi
SLA	Stereolitografia
SLS	Selective laser sintering
TRIZ	Theory of innovative machines

1 JOHDANTO

3D-tulostus on ainetta lisäävä valmistusmenetelmä, jossa tuote rakennetaan kerroksittain kolmiulotteisen mallin perusteella. Se mahdollistaa pienet valmistusmäärät edullisesti, eikä kalliita työvälineitä tarvita. Valmistusprosessi voidaan automatisoida ja raaka-aineena käyttää muista prosesseista jääneitä kierrätysmateriaaleja. (Berman 2012, s. 155, 158.) Tällä hetkellä tekniikkaa käytetään useimmiten prototyyppien valmistamiseen pieninä määrinä. Kuitenkin kehitys nopeudessa, laadussa ja materiaaleissa auttaa tuomaan yhä enemmän loppukäyttäjälle valmistettavia kustomoituja tuotteita. (Gibson, Rosen & Stucker 2015, s. 40–41.)

Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät voidaan jakaa useampaan kategoriaan esimerkiksi prosessin tekniikan perusteella, muun muassa laser- tai ekstruusiomenetelmiin. Jako voidaan tehdä myös perusmateriaalin avulla, jolloin pääkategoriat ovat nestepolymeeri-, partikkeli-, levy- ja sula materiaali -menetelmät. ASTM- ja ISO-standardien menetelmäjako erittelee vastaavalla tavalla materiaalin ekstruusion. (Gibson et al. 2015, s. 30–35.) FDM-menetelmä (fused deposition modeling) perustuu juoksevaksi kuumennetun polymeerin ekstruusioon liikkuvan elementin kautta (Huang et al. 2013, s. 1192).

Nykyiset suosituimmat kuluttajaluokan tulostimet käyttävät useimmiten edellä kuvattua ekstruusiotekniikkaa, pystyvät tulostamaan mitoiltaan noin 200 mm kappaleita ja ovat hinnaltaan alle 2000 dollaria (Evans 2012, s. 1, 17). Teollisuuskäyttöön tarkoitettuja tulostimia voi hakea Senvol-tietokannasta. Polymeeriekstruusiomenetelmään perustuvia, ulkomittoiltaan yli 600 mm kappaleita tulostavia ja alle 50 000 dollarin hintaisia laitteita on listattu vain yksi. Sitä kalliimpia, mutta alle 100 000 dollarin hintaisia löytyy neljä. (Senvol 2015.)

Myös Stansbury & Idacavage (2016, s. 60) ja Huang et al. (2013, s. 160) esittävät FDM-menetelmän yleisimmin käytetyksi edullisissa kuluttajatasen 3D-tulostimissa. Menetelmän etuja ovat laaja materiaalivalikoima ja mahdollisuus käyttää myös kierrätettyjä materiaaleja, mutta haitoiksi mainitaan kerrosten väliset kestävyysongelmat ja delaminaatio. (Stansbury & Idacavage 2016, s. 60; Huang et al. 2013, s. 163–165.)

Pakkauskulut yrityksen toiminnassa ovat noin prosentin liikevaihdosta. Kaikki logistiikkaan liittyvät kustannukset voivat kuitenkin olla yhteensä jopa 20 prosenttia liikevaihdosta, mutta suurilla yrityksillä hieman pienemmät. (Engblom et al. 2012, s. 32.) Yhdyskuntajätteistä muovi hyödynnetään hyvin energiana tai kierrätetään uudelleen käyttöön, ja vain alle promille muovijätteestä päätyi kaatopaikalle vuonna 2014 (Tilastokeskus 2014). Jätekuustannukset voivat motivoida kierrättämään, mutta yrityksille ne ovat vain pieni osa kokonaisuudesta eikä siksi kovin tärkeä mittari kierrätyksen kasvattamiseksi (Verghese & Lewis 2007, s. 4385). Muovin uusiokäyttöä voisi entisestään parantaa teollisuudessa ja toiminnan jäte- ja logistiikkakuluja vähentää käyttämällä muovijäte uudelleen suoraan yrityksen omissa toiminnoissa 3D-tulostettuihin pakkauksiin materiaalina.

1.1 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimusongelma

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää yleisimpien yrityksen toiminnassa syntyvien jätteiden muovien soveltuvuus 3D-tulostuksen raaka-aineeksi, tutkia tekniikan rajoitteita sekä ratkaista yleisiä kuljetuspakkauksia valmistavan 3D-tulostimen rakenteen suunnitteluun vaikuttavat tekijät. Tutkimuksessa ideoidaan lisäksi järjestelmällisen teknisen suunnittelun metodeja käyttämällä erilaisia konseptiratkaisuja ja arvioidaan niitä karkeasti teknisten ja taloudellisten kriteerien perusteella.

Tutkimuksen ongelmia ovat kierrätysmuovin erilaiset ominaisuudet ja käyttäytyminen tulostuksessa, kun sitä verrataan homogeeniseen käyttötarkoitustaan varten valmistettuun raaka-aineeseen. Tulostimen rakenteiden värähtely on ongelma tarkkuuden kannalta, ja toisaalta kevyet liikkuvat osat ovat myös olennaisia alhaisen tehontarpeen ja materiaalikustannusten kannalta. Tulostimen vaadittu kokoluokka on selvitettävä perustuen nykyisiin pakkausratkaisuihin. Tutkimusongelmat ratkaistaan riittävän laajalla kirjallisuustutkimuksella ja soveltamalla kirjallisuudesta selvitettävän järjestelmällisen teknisen suunnittelunprosessin vaiheita.

Tulostinpään vaikutus materiaalin tulostusominaisuuksiin jätetään tässä tutkimuksessa huomiotta, ja johtopäätökset tehdään vain yleisellä tasolla materiaariominaisuuksien perusteella. Tutkimuksessa käytetyt tutkimuskysymykset ovat:

- Miten kierrätysmuovi käyttäytyy tulostimen raaka-aineena?
- Mitä materiaaleja tulostin voi käyttää?

- Mikä on tulostimella valmistettavien tuotteiden vaadittu koko?
- Miten tulostuksen tarkkuusvaatimukset vaikuttavat suunnitteluun?
- Miten rakenne voi vaikuttaa tulostuksen tarkkuuteen?
- Miten tekninen ratkaisu suunnitellaan tehokkaasti?

Tutkimus tehdään käyttäen kirjallisuusmateriaalia ja konseptimallien vertailua. Menetelmät on esitetty tarkemmin luvussa 1.3.

1.2 Rajaukset

Suunnittelu rajataan kokonaisratkaisuiden arviointiin ja vertailuun, ja yksityiskohtaisia komponenttivalintoja ja –mitoituksia ei tehdä. Komponenttiehdotuksissa käytetään olemassa olevia ratkaisuja mahdollisimman paljon, jotta tutkimus keskittyy suunnitteluun vaikuttavien tekijöiden arviointiin. Tekninen suunnittelu on rajattu tulostinpäätä liikuttavaan rakenteeseen, joten tulostinpäätä itsessään ei suunnitella tai sen rakennetta arvioida tässä tutkimuksessa. Värähtelyjen kompensointia ohjausjärjestelmän avulla ei tutkita. Materiaaleista tutkitaan yleisimpiä teollisuuden pakkausmuoveja, ja vaarallisten aineiden merkitystä näiden materiaalien kestävyydelle ei tutkita. Tutkimuksessa käsitellään vain yleisesti käytössä olevia tulostusmenetelmiä.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimus on teoreettinen tapaustutkimus, jossa tarkaillaan yhtä sovelluskohdetta kattavasti. Materiaalien osalta tutkimus suoritetaan kirjallisuuden perusteella poikittaistutkimuksena, kun tarkaillaan useita tällä hetkellä käytettävissä olevia materiaaleja. Tulosten arvioinnissa käytetään kvantitatiivisia menetelmiä materiaalien vertailuun. Koneensuunnittelun prosessin osalta tutkimus on pitkittäistutkimus, jossa tarkaillaan uusia innovaatiota ja prosessin kehitystä pitkällä aikavälillä.

Teknisen suunnittelun osalta käytetään ohjaavaa tutkimusta, jossa suunnittelun kulun selvittämiseen ja ratkaisujen arviointiin käytetään tukena kirjallisuutta. Pitkittäistutkimuksen avulla tarkaillaan koneenosien suunnittelua, prosessien kehitystä ja komponenttien valintaa pidemällä aikavälillä vertaillen tuloksia.

Teknisen suunnittelun vaiheiden kulku esitetään sanallisesti. Vaiheiden tulokset taulukoidaan, ja osatoimintojen ratkaisuvaihtoehtojen ja kokonaisratkaisuiden osalta esitetään havainnollistavia piirustuksia. Ideamatriisi ja kokonaisratkaisuvaihtoehdot esitetään taulukossa, josta arvioitavat kokonaisratkaisut johdetaan.

Artikkelilähteet etsittiin Scopus- ja Google Scholar -tietokannoista käyttämällä vertaisarvioituja ja pääosin vuoden 2010 jälkeen julkaistuja teoksia. Kirjallisuuslähteet etsittiin Lappeenrannan tiedekirjaston kokoelmista käyttämällä Wilma-tietokantaa ja etsimällä lisäksi artikkeleissa mainittuja eniten viitattuja teoksia.

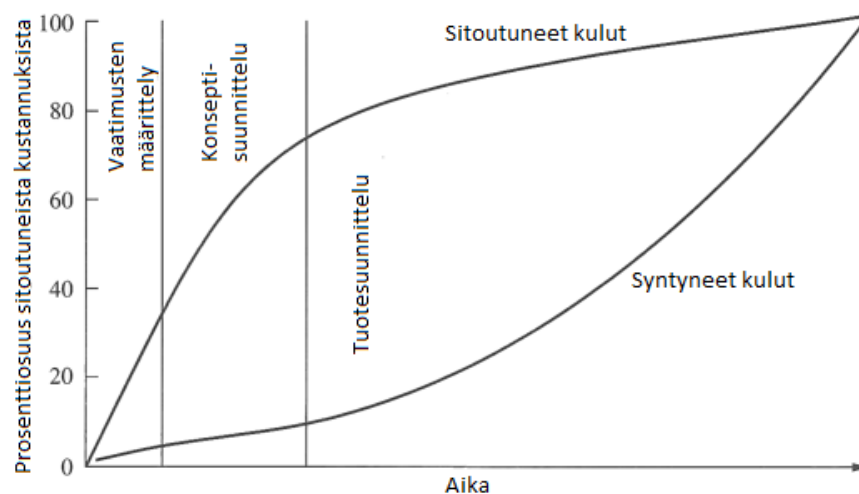
2 KIRJALLISUUSKATSAUS

Kirjallisuuskatsaus on toteutettu luvussa 1.3 esitetyllä tavalla. Työn tulokset ja johtopäätökset perustuvat tässä esitettyihin tietoihin. Tekninen suunnittelu ja luodut konseptiratkaisut perustuvat luvussa 2.1 esitettyyn prosessiin.

2.1 Järjestelmällinen tekninen suunnittelu

Tekninen suunnittelu ei voi tukeutua sattumanvaraisiin ratkaisuihin, koska prosessin tavoitteena on vaatimuksia vastaava tuote. Koska suunnittelija on vastuussa tuotteen taloudellista ja teknisistä ominaisuuksista, ratkaisujen kehittämiseksi on oltava luotettava menetelmä. Sen on oltava joustava, suunnitelmallinen, optimoitu ja varmistettu. Menetelmän on tuettava kekseliäisyyttä ja olemassa olevia ratkaisuja ja sovelluttava kaikkiin suunnitteluprosesseihin. (Pahl & Beitz 1996, s. 10.)

Suunnittelun kulut ovat yleensä pienet mutta vaikutus suuri verrattuna muihin tuotteen valmistuksen vaiheisiin. Onnistunut suunnittelu voi vähentää kokonaiskustannuksia yleensä noin 35 prosenttia. Kuva 1 esittää sitoutuneiden ja todellisten kustannusten muutosta suunnitteluprosessin edetessä. Kuvaajasta voidaan nähdä, että konseptisuunnittelun loputtua vaikutus kokonaiskustannuksiin on yli 70 prosenttia, mutta kokonaiskustannukset alle 10 prosenttia. (Ullman 2010, s. 3–5.)



Kuva 1. Suunnittelun vaikutus kokonaiskustannuksiin (mukaihen Ullman 2010, s. 5).

Suunnitteluprosessi voidaan jakaa pääosiin, joita ovat tehtävän asettelu, konseptisuunnittelu, konstruktion suunnittelu ja yksityiskohtien suunnittelu. Pääosien välillä on tehtävä myös valintaa tulosten välillä. Olennaista on tarkastella jatkuvasti suunnittelun kannattavuutta, sillä aikaisin havaittu ongelma minimoi tappiot. (Pahl & Beitz 1996, s. 65.)

Myös Ullman (2010, s. 82) että Jiang (2015, s. 113–114) esittävät suunnitteluprosessin lähes vastaavalla tavalla jaoteltuna. Jiang asettaa lisäksi virheiden arvioinnin prototyyppien avulla oleelliseksi osaksi suunnittelua ja prosessin viimeiseksi vaiheeksi. Ullman esittää tuotetuen viimeiseksi vaiheeksi ja kehottaa muutoksiin aikaisin suunnittelussa. Täydellistä tuotetta ei kuitenkaan ole, joten virheet ja muutostarpeet voivat tulla ilmi vasta todellisen käytön aikana. (Ullman 2010, s. 370–371.)

Teknisessä suunnittelussa alkuvaiheet keskittyvät tuotteen toiminnallisuuden optimointiin. Yksityiskohtainen suunnittelu pohjautuu osakokoonpanoihin, joiden arvionnissa voidaan tutkia esimerkiksi valmistettavuutta, luotettavuutta, turvallisuutta ja laatua. Kustannuksiin voidaan vaikuttaa vielä merkittävästi myös yksityiskohtien suunnittelussa. (Jiang 2015, s. 12–13.)

2.1.1 Tehtävän asettelu

Tehtävän asettelussa selvitetään idean toteutettavuus. Idea voi olla peräisin esimerkiksi asiakkaan vaatimuksesta tai tuotekehittäjiltä, mutta ennen suunnittelun aloittamista on aina huomioitava lopullisen tuotteen vaatimukset ja mahdolliset rajoitteet. Tehtävän asettelussa luodaan vaatimuslista, joka sisältää suunnittelun aloittamiseen tarvittavat määrittäykset muttei keskity yksittäisiin ratkaisumalleihin. Tuoteratkaisun on täytettävä vaatimukset ja oltava samalla edullinen. Monimutkaiset vaatimukset tehtävän asettelussa korostavat systemaattisen suunnittelun merkitystä, sillä muut ideointi- ja kehitysprosessit eivät yleensä tuota toivottua tulosta. (Pahl & Beitz 1996, s. 67, 128–129.)

Vaatimuslistan luonnissa on tärkeä erotella vaatimukset ja toivomukset, jotta ratkaisujen valinta ja arviointi voidaan tehdä riittävällä tarkkuudella. Kohdat pyritään esittämään kvantitatiivisesti tai selkeillä termeillä, jottei arviointi riipu arvioinnin tekijästä. Vaatimuslistaa on päivitettävä uusien kohtien ilmettyä, ja tieto vaatimuksen asettajasta ja muutoksen syistä on kirjattava selvityksiä varten. (Pahl & Beitz 1996, s. 131–132.)

Suunnittelun aikana muuttuvat vaatimukset voivat aiheuttaa merkittäviä kuluja ja viiveitä. Syitä jatkuviin muutoksiin ovat tuotteeseen lisättävät ominaisuudet, ilmi tulleet muutostarpeet alkuperäisiin vaatimuksiin sekä prosessin aikana tehdyt päätökset. Vaatimusmäärittely on tehtävä huolellisesti, ja ensimmäisessä vaiheessa keskitytään siihen, mitä pitää suunnitella, eikä siihen, miltä tuotteen pitäisi näyttää. (Ullman 2010, s. 144–146.)

2.1.2 Konseptisuunnittelu

Konseptisuunnittelun tarkoituksena on selvittää vaatimusmäärittelystä olennaiset toiminnot ja keksiä ratkaisu toimintojen synnyttämiin ongelmiin. Virheisiin on puututtava tässä vaiheessa, sillä toimiva ratkaisu perustuu usein hyvään konseptiin. Ongelman abstrahointi on tärkeää, jotta ratkaisu keskittyy olennaisiin asioihin. (Pahl & Beitz 1996, s. 67–68, 140–141.)

Abstrahoinnissa selvitetään idean pääasiallinen ongelma yleisellä tasolla riippumatta ratkaisumahdollisuuksista ja sovelluskohteen rajoitteista. Abstrahoinnissa alkuperäisestä vaatimuslistasta muodostetaan vain olennaisimmat toiminnallisuudet käsittävä ja laadullisilla termeillä ilmaistu ratkaisutavoite. Tavoite on ilmaistava mahdollisimman laajasti, jottei ratkaisussa keskitytä osatoiminnon optimointiin. Tavoitteen muotoilussa on myös huomioitava kuvitteelliset rajoitteet, ja esimerkiksi tehonsiirtojärjestelmän tai vastaavan osatoiminnon valinta on tehtävä ja perusteltava vasta myöhemmissä suunnittelun vaiheissa. (Pahl & Beitz 1996, s. 141–142, 147–148.)

Abstrahoinnissa muodostettu ongelman asettelu on jaettavissa osatoimintoihin. Niistä voidaan muodostaa toimintorakenne, ja yksittäistä osatoimintoa käsitellään erikseen. Toimintorakenteen selvittäminen auttaa ongelmanratkaisua ja on erityisen tärkeää modulaarisia rakenteita suunnitellessa. Osatoiminnot kuitenkin usein riippuvat jollain tavalla toisistaan, joten toimintorakenne voidaan muodostaa myös tarkentamalla sitä iteroimalla. Toimintorakenteen avulla tunnistetaan myös tarvittavat uudet ratkaisut ja olemassa olevien käytettävyys, jotta lopullinen ratkaisu on taloudellinen. (Pahl & Beitz 1996, s. 150–151, 160.)


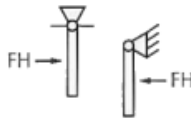
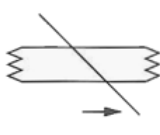

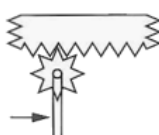



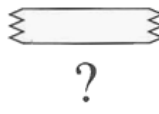

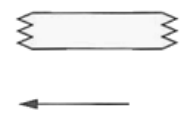
Osatoimintojen kehittelyyn voidaan käyttää esimerkiksi olemassa olevia rakenteita, patenteja tai vapaata ideointia aivoriihen avulla. Systemaattiseen kehitykseen on myös

käytettävissä TRIZ-menetelmä (theory of innovative machines). Se perustuu olettamuksiin, joiden mukaan ongelma on jo ratkaistu ehkä täysin eri sovelluksessa ja sopivin ratkaisu voidaan perustella ennustettavien mallien pohjalta. TRIZ-menetelmää käyttämällä on hyvä mahdollisuus kehittää uusia patentoitavia rakenteita. (Ullman 2010, s. 190, 192, 194, 201–202.)

Periaate TRIZ-menetelmän käytössä on, ettei ristiriitoja sallita, vaan ne on ratkaistava. Menetelmä perustuu taulukon käyttöön, johon on listattu 40 erilaista ratkaisua tapauksiin, joissa osatoiminnon kehittäminen voi johtaa teknisiin ristiriitoihin. (Juraeva, Song & Ryu 2016, s. 2119.) Sitä voi soveltaa myös esimerkiksi materiaalien valintaan. Valinta voidaan perustella selvittämällä kaikkien ominaisuuksien ristiriitojen väliset riippuvuudet ja sovellettavat TRIZ-tilukon ratkaisut. Suunnittelu voi siten keskittyä useimmiten esiintyvien ristiriitojen selvittämiseen. (Kremer et al. 2012, s. 831.)

Ideamatriisin avulla voidaan tehokkaasti muodostaa osatoiminnoista konseptiratkaisuja. Menetelmä vaatii kuitenkin suunnittelijalta luovuutta ja vahvaa tietämystä, koska muut vaiheet pohjautuvat kehitettyihin ideoihin. Ideamatriisissa osatoiminnoille kehitetään mahdollisimman monta ratkaisua, joista yhdistelemällä luodaan kokonaisratkaisuehdotuksia. Osatoiminnoille on löydettävä useita ratkaisuja, sillä niiden vähyys voi olla merkki rajoittavasta oletuksesta. Ideoiden kehitykseen tässä vaiheessa voi käyttää edellä mainittuja menetelmiä, kuten TRIZ-tietokantaa tai patenteja. Taulukossa 1 on esitetty esimerkki ideamatriisista. (Ullman 2010, s. 204–206.)

Taulukko 1. Esimerkki ideamatriisista (mukaillen Ullman 2010, s. 204).

Osatoiminto	Konsepti 1	Konsepti 2	Konsepti 3	Konsepti 4
Voima ja liike käyttäjältä	Yksi vipu 	Kaksi vipua 		
Siirrä voima ja liike tankoon	Levy 	Räikkä 	Hammastanko 	Mekanismi 
Tangon liike	Vapaasti liikkuva 	Kaksinopeuksinen 	Yli 2 nopeutta 	
Vahvista voima	Lyhyt liike 	Pitkä liike 		

Kokonaisratkaisujen kehityksessä ideamatriisin avulla on mahdollista luoda ongelmallisia ratkaisuja, jos matriisin toiminnot ovat yhteensopimattomia. Ideamatriisista voidaan muodostaa myös liikaa tuloksia, jolloin arvioinnissa on pidettävä huoli siitä, ettei lupaavia ratkaisuja hylätä väärin perustein. Tässä vaiheessa kokonaisratkaisusta on hyvä piirtää luonnoksia, jotta kehityksen vaiheet tulee dokumentoitua riittävän tarkasti. Tarkoituksena on kuitenkin kehittää konsepteja, joten yksinkertaiset mallit ovat riittäviä. (Ullman 2010, s. 204–208.)

2.1.3 Konseptien arviointi

Konseptien arvioinnissa on tarkoitus valita lupaavin tuote jatkokehitystä varten. Valinta on kuitenkin tehtävä rajoitetuilla tiedoilla, joten tässä vaiheessa on hallittava suunnitelmia sisältämä epävarmuus. Arviointi voi päättyä vain yhteen ratkaisuun, mutta epävarmojen valintojen takia on mahdollista edetä kehityksessä tarkempiin vaiheisiin ja jättää siten heikoimpia ratkaisuja huomiotta yksi kerrallaan. Arviointi on tehtävä objektiivisesti, jolloin suunnittelijan omat suosikit eivät saa vaikuttaa valintaan. (Ullman 2010, s. 213–215.)

Arviointikriteerit on perusteltava vaatimuslistan avulla, ja tarkan tiedon puuttuessa valinta on tehtävä oletusten perusteella siitä, miten tarkasti jatkokehityksessä saavutetaan vaaditut ominaisuudet. Arviointiin on myös yhdistettävä taloudelliset kriteerit ainakin kvalitatiivisillä termeillä ilmaistuna. Alle 15 kriteeriä konseptien arvioinnissa on sopiva määrä, joista tärkeimpiä voidaan painottaa tässä vaiheessa. (Pahl & Beitz 1996, s. 178–179.)

Pisteytyksen jälkeen ratkaisujen arvioinnissa on huomioitava epävarmuus, sillä esimerkiksi heikko yksittäinen pistemäärä voi aiheuttaa ongelmia jatkokehityksessä. Epävarmoissa tilanteissa voidaan valita myös alhaisempi kokonaispistemäärä, jos sen jakautuminen on tasaisempi. Heikkoja kohtia ideoissa voidaan paikata myös valitsemalla osatoimintoja uudelleen. (Pahl & Beitz 1996, s. 182–183.)

2.2 3D-tulostaminen ja sen kehitys

Suosituin FDM-menetelmän tulostimissa käytetty materiaali tällä hetkellä on ABS-muovi ja siihen perustuvat muunnokset, kuten lisätty polykarbonaatti. Menetelmä toimii parhaiten materiaaleilla, joilla on amorfisia ominaisuuksia. Se edesauttaa tuotetun muodon säilymistä ekstruusion jälkeen sekä kerrosten välistä tarttuvuutta. (Gibson et al. 2015, s. 164.)

Tulostettavien kerrosten välistä tarttuvuutta on pyritty lisäämään eri keinoin. Siihen liittyviä tutkimuksia on tehty esimerkiksi jälkikäsittelemällä tuotteita gammasäteilyllä, jotta saavutetaan kerrosten välisiä sidoksia. Säteilyllä saadaan aikaan kestumuoveista kertamuovituotteita yhdenmukaisilla materiaaliominaisuuksilla. FDM-menetelmässä voidaan käyttää myös useita tulostuspäitä esimerkiksi tukirakenteiden tulostamiseen. (Stansbury & Idacavage 2016, s. 60.)

Kotitalouksissa 3D-tulostimella voidaan valmistaa käyttöesineistä edullisesti avoimista mallitietokannoista (Widdbrotd et al. 2013, s. 720). Kierrättämällä tuotteita tulostimen raaka-aineeksi voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä. Esimerkiksi korvaamalla kaupallinen PLA-raaka-aine kierrätetyllä korkeatiheyksisellä polyetyleenillä (HDPE, high density polyethylene), lopputuotteen hinta on noin 2 % verrattuna alun perin käytettyyn raaka-aineeseen. Kustannussäästöjä voi tuoda myös optimoitu täyttö, jolloin vähemmän rasitetut tuotteet voidaan valmistaa onttoina pienillä täyttöasteilla. Myös tulostustason lämmityksen

optimointi voi säästää energiaa, ja esimerkiksi kahden tuotteen valmistus samalla aikaa voi säästää 4 % energiaa. (Kreiger & Pearce 2013, s. 1516–1517.)

Tuotteiden valmistaminen teollisuudessa 3D-tulostimilla tai muihin ainetta lisääviin valmistusmenetelmiin perustuvilla työkaluilla ja laitteilla mahdollistaa nykyisten toimitusketjujen muutoksen. Tuote voidaan valmistaa lähellä asiakasta ja vasta tilauksesta, jolloin kulut säilytyksessä ja siirtelyssä pienenevät ja toimitusten reagointikyky kasvaa. (Huang et al. 2013, s. 1197.) Yli 20 % 3D-tulosteista on loppukäyttäjän tuotteita, ja niiden osuuden oletetaan kasvavan yli 50 prosentin vuonna 2020 (Berman 2012, s. 159).

Valoon reagoiviin materiaaleihin perustuvilla 3D-tulostusprosesseilla on muutamia etuja esimerkiksi FDM-menetelmään. Prosessilla saadaan aikaan hyvä pinnanlaatu ja tarkka tulostusjälki, sekä kemiallisiin sidoksiin perustuva z-akselin suuntainen kerrosten välinen tarttuvuus. Tällainen menetelmä on esimerkiksi SLA (stereolitografia), jossa kerrosten paksuus on useimmiten 50–200 µm ja erikoistapauksissa jopa 10 µm. Vastaavan tyyppisellä MultiJet-tulostusmenetelmällä voidaan saavuttaa 20 µm resoluutio z-akselilla. SLS-menetelmällä (selective laser sintering) kerroksen paksuus on noin 100 µm, ja kyseisen menetelmän etu on myös se, ettei tukirakenteita tarvita, koska kappale tukeutuu ympäröivään ylijääneeseen raaka-ainejauheeseen. Menetelmiin kuitenkin vaaditaan tarkat raaka-aineen ominaisuudet, kun toisaalta FDM-prosessissa voidaan käyttää jopa kierrätettyjä raaka-aineita. (Stansbury & Idacavage 2016, s. 55–60.)

3D-tulostinten prosesseihin ja tekniikoihin liittyviä patenteja on todella paljon ja niitä on hankala käydä läpi suuren määrän vuoksi. Kuitenkin jo vuonna 2015 muutamia tärkeitä jauhesintraus- ja pisarakerrostusprosesseihin liittyviä patenteja vanheni, joka voi auttaa laskemaan näihin perustuvien laitteiden hintoja. (Gibson et al. 2015, s. 295–296.)

2.3 Pakkaustekniikan muovituotteet ja materiaalit

Suorakulmaisten kuljetuspakkausten peruskoko on 600x400 mm, ja yksittäisen pakkauksen korkeus valittavissa siten että ladottu kuorma on 1100 mm korkea (SFS 3536 1976). Standardin mukaiset kuljetus- ja myymäläpakkaukset tulisi olla rakenteeltaan kantavia ja pinottavia (SFS 5352 2000).

Pakkauksista voidaan erottaa kolme pääkategoriaa, joita ovat itse tuotteen pakkaus, toissijainen esittely- tai käsittelypakkaus ja kuljetus-, jakelu- tai logistiikkapakkaus. Kuluttajatavaran toimitusketjussa pakkauksilla on suurempi merkitys kuin teollisuudessa. Valinta teollisuudessa perustuukin siihen, että pakkaukset suojaavat tuotetta riittävästi ja ne tuotetaan tehokkaasti vähimmällä mahdollisella ympäristökuormituksella. Pakkauksen elinkaaren kustannuksista voidaan erottaa esimerkiksi kuljetuskustannukset, joihin vaikuttaa tehokas tilankäyttö, sekä säilytyskustannukset, joihin kuuluu tyhjien pakkausten säilytys. Pakkauksien valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat myös uudelleenkäyttöön ja rikkoutuviin tuotteisiin liittyvät kustannukset. (Varghese & Lewis 2007, s. 4382–4383, 4385)

Jääkaappien pakkausmuovien elinkaarikustannustutkimuksessa huomattiin merkittävä ero iskunkestävän polystyreenin (HIPS, high impact polystyrene) energiantarpeessa riippuen siitä, tuotetaanko pakkaus kierrätetyistä vai alkuperäisistä raaka-aineista. Tutkimuksessa havaittiin myös kuljetuksiin käytetyn energian olevan toissijaisia koko elinkaaren kulutukseen. Pakkaustuotteen valmistukseen sitoutunut energia on ainakin yhtä merkittävä, ja sitä on siksi tutkittava myös tarkasti. Pakkauksessa käytettyä muovikalvoa, joka on tehty polyetyleenistä (PE), ei kierrätetä, ja sen valmistuksesta johtuvat päästöt ovat merkittäviä. Materiaali on pääosin matalatiheyksistä polyetyleenä (LDPE, low density polyethylene). (Ross & Evans 2003, s. 564, 570.)

Jätteenkäsittelylaitokselta mitatusta pakkausjätteen koostumuksesta kaksi yleisintä materiaalia ovat polyetyleni ja polypropyleeni (PP), jotka yhdessä muodostavat yli 44 % jätteen painosta. Näiden lisäksi pakkausjätteessä on polystyreeniä (PS), polyetyleenitereftalaattia (PET) ja polyvilyynikloridia (PVC). PE- ja PP-kalvoja jätteestä on näitä pienempi osa, noin kaksi painoprosenttia kumpaakin. ABS-muovia (akryliniiriilbutadieenistyreeni) jätteestä on 2,49 painoprosenttia. (Adacros et al. 2012, s. 827.)

2.4 Kierrätysmuovi tulostimen raaka-aineena

Ensisijainen kierrätys, eli tuotteiden suora valmistus samasta materiaalista esimerkiksi ruiskuvalamalla ei ole kovin suosittu jätteen puhtausvaatimusten takia. Mekaanisen kierrätyksen aiheuttamia ominaisuuksien heikkenemisiä on tutkittu monille edellä

mainituille jätemuoveille, ja pesemällä ja lisäaineilla voidaan saavuttaa hyvä kierrätetty raaka-aine. Kiinteän muovijätteen kierrätystä kemiallisin menetelmin on myös tutkittu. Pyrolyysi on yksi näistä tekniikoista, ja sen etuja ovat päästöjen vähennys ja öljypohjaisiin polttoaineisiin verrattavan korkean lämpökapasiteetin polttoaineen saanti. (Al-Salem, Lettieri & Baeyens 2009, s. 2627–2629, 2640)

Muovijätteen erottelu on tärkeää, ja menetelmät voivat perustua esimerkiksi tiheyteen tai triboelektriksiin keinoihin. Tiheyden mukaan lajittelu on kuitenkin epävarmaa, koska tiheydet ovat lähellä toisiaan. Muovista on myös poistettava maalit ja pinnoitteet, mutta niihin liittyvät menetelmät vaativat tarkat olosuhteet ja ovat silti epätydyttäviä. Materiaalin ominaisuudet voivat myös heikentää. (Al-Salem et al. 2009, s. 2627–2628)

Polymeerit voidaan jakaa niiden molekyyliarakenteen perusteella amorfisiin ja kristallisoituneisiin polymeereihin. Tehokkaammin pakkautuneilla kristallisoituneilla polymeereilla on suurempi tiheys, usein noin 15 % suurempi kuin saman polymeerin amorfisilla rakenteilla. Tiheys on yksi eniten mekaanisiin ominaisuuksiin liittyvä parametri, joka kasvaessaan kasvattaa esimerkiksi myös kovuutta, myötörajaa ja pehmenemislämpötilaa. (Kholodovych & Welsh 2007, s. 612.)

Amorfisen polyetyleenin tiheys on $0,85 \text{ g/cm}^3$ ja kristalloituneen on $0,99 \text{ g/cm}^3$. LDPE on tiheydeltään hieman lähempänä täysin amorfista polymeeria, ja sen tiheys on $0,910\text{--}0,925 \text{ g/cm}^3$. Polypropyleenin mitattu tiheys on $0,85\text{--}0,92 \text{ g/cm}^3$ ja polystyreenin $1,04\text{--}1,09 \text{ g/cm}^3$. Yleisesti käytetyn ABS-muovin tiheys on $1,04\text{--}1,07 \text{ g/cm}^3$. PET- ja PVC-muovien tiheydet ovat huomattavasti näitä suurempia, yli $1,3 \text{ g/cm}^3$ molemmilla. (Kholodovych & Welsh 2007, s. 614–617.) Usein enemmän kristallisoituneilla polymeereilla on myös suurempi lasisiirtymälämpötila (Plazek & Ngai 2007, s. 196). Edellä mainittujen polymeerien lasisiirtymälämpötilat ja lämpökapasiteetit 300 K lämpötilassa on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Muutamien polymeerien lasisiirtymälämpötilat ja lämpökapasiteetit (mukaillen Wen 2007, s. 146–148, 151).

Polymeeri	Lämpökapasiteetti [kJ/(kg K)]	Lasiirtymälämpötila [K]
PE	1,555	252
PP	1,622	260
PS	1,223	373
PVC	0,946	354
PET	1,172	342
Akryylinitriili	1,297	378
Butadieeni	1,960	171

2.5 Nykyiset tekniset ratkaisut

Useimmat FDM-menetelmää käyttävät edulliset tulostimet perustuvat karteeseeseen robottiin, jossa tulostinpää liikkuu erikseen x-, y- ja z-suunnissa (Evans 2012, s. 2). Tekniikkaa rajoittaa suurin mahdollinen materiaalin syöttönopeus, joka kasvattaa tulostinpään massaa ja vähentää suurinta mahdollista liikenopeutta. Magneeteilla kannateltua ja ilmapatjan päällä liikkuvaa tulostinpäätä on kokeiltu, mutta lisäntyneet kustannukset eivät olleet perusteltuja etuihin nähden. Vaadittavan tarkkuuden vuoksi laitteissa käytetään useimmiten johtoruuvilla ajettuja mekanismeja. (Gibson et al. 2015, s. 165.)

FDM-menetelmää käyttävillä Stratasys-valmistajan laitteilla on saavutettavissa 78 µm kerroksen paksuus kalleimmilla tulostimilla. Tulostustarkkuus riippuu myös suuttimesta ja täysin suoria kulmia on mahdotonta tehdä. (Gibson et al. 2015, s. 164). Kuluttajalaitteilla resoluutiot useimmissa malleissa ovat yli 100 µm, mutta Ultimaker-mallissa jopa 40 µm. Tulostusnopeus on myös Ultimaker-mallissa suurin esitetyistä, 300 mm/s. Halvemmissa malleissa nopeudet ovat pienempiä, jopa 25 mm/s. Useimmissa kuluttajatulostimissa on lämmitetty tulostustaso, jotta materiaali tarttuu alustaan ja lämpölaajenemisesta johtuvat vääristymät vähenevät. Kaikissa suunnissa liike saadaan aikaan askelmoottoreilla, ja kussakin suunnassa osat paikoitetaan rajakytkimien avulla. (Evans 2012, s. 4, 17, 30.)

3 TULOKSET

Tulokset on esitetty tässä teknisen suunnitelun prosessille. Kirjallisuuskatsauksen perusteella todettavat asiat on huomioitu suunnitelun vaiheissa esimerkiksi vaatimuslistan kohtina, ja muut tekniikan ja materiaalin hyödyntämiseen liittyvät johtopäätökset on esitetty erikseen johtopäätöksissä luvussa 4. Tekniset ratkaisut ja suunnitelmat on esitetty luvun 2.1 mukaisilla keinoilla, kuten ideamatriisina ja vaatimuslistana taulukossa.

Tehtävän asettelussa muodostettu vaatimuslista on esitetty taulukossa 3. Merkintä V tarkoittaa vaatimusta ja T toivomusta. Tutkittujen laitteiden perusteella FDM-menetelmää käyttävä tulostin on edullinen ja kierrätysmuoveja voidaan käyttää, joten tekniikka on valittu vaatimuslistalle. Suurten kappaleiden tulostamisen nopeuttamiseksi toivomuksena on lisätty useampi tulostinpää. Parempien kerrosominaisuuksien vuoksi on toivottava, että rakenteeseen voidaan yhdistää myös jälkikäsittelykomponentti. Raaka-aine on määritetty kierrätysmuovien perusteella, ja resoluutiota sekä tulostusnopeutta on verrattu nykyisiin ratkaisuihin. Tulostustason koon määrittää standardimoduulit, ja toivomuksena on lisätty yhtä kokoa leveämpi moduuli. Korkeus on määritetty perustilanteessa neljäsosaksi moduulikorkeutta, ja toivomuksena on koko korkeuden hyödyntävä tulostin. Lämmitetty tulostustaso vaaditaan, koska suurissa kappaleissa pienikin asentovirhe lämmönvaihtelun takia korostuu. Tutkimuksen tarkoitus on suunnitella edullinen tulostin, joten kustannuksia verrataan kuluttajalaitteisiin siltä osin.

Taulukko 3. 3D-tulostimelle muodostettu vaatimuslista.

Numero	Kuvaus	V/T
1	Tulostin perustuu FDM-menetelmään	V
2	Tulostimessa on useampi ekstruuderit	T
3	Tulostimessa on jälkikäsittelyn mahdollistava komponentti	T
4	Raaka-aine on kierrätettyä PP- tai PE-muovia	V
5	Tulostimen resoluutio on 300 µm	V
6	Tulostimen resoluutio on 100 µm	T
7	Tulostustason koko on vähintään 650 x 450 mm	V

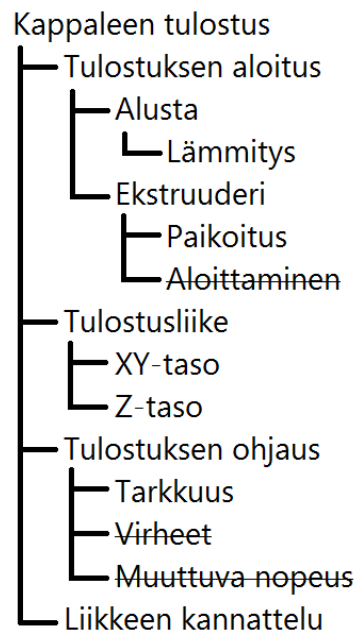
Taulukko 3 jatkuu. 3D-tulostimelle muodostettu vaatimuslista.

Numero	Kuvaus	V/T
8	Tulostustason koko on vähintään 650 x 850 mm	T
9	Tulostusalueen korkeus on vähintään 300 mm	V
10	Tulostusalueen korkeus on vähintään 1100 mm	T
11	Tulostusnopeus on 200 mm/s	V
12	Tulostusnopeus on 400 mm/s	T
13	Tulostustaso on lämmitetty	V
14	Kustannukset verrattavissa kuluttajalaitteisiin suhteessa kokoon	V

Konseptisuunnittelun ensimmäinen vaihe on abstrahointi. Ongelma voidaan määrittellä vaatimuslistan kohtien perusteella yksinkertaisesti ja laadullisilla termeillä muodossa ”kierrätysmateriaalia pakkauksiin riittävällä tarkkuudella tulostava verrattain edullinen laite”. Tulostimen rakenne voidaan edelleen jakaa osatoimintoihin. Pääprosessi, eli kappaleen tulostus, voidaan jakaa sitä tukeviin toimintoihin, joita ovat aloitus, itse tulostusliike, liikkuvien osien kannattelu ja prosessin ohjaus. Määrittelmällä toiminnot nimeämättä esimerkiksi liikkuvaa komponenttia ei suunnata ideointia johonkin tiettyyn ratkaisuun, kuten nykyisiin karteeseisiin robotteihin jossa tulostinpää liikkuu.

Tulostuksen aloitus voidaan jakaa alustan toimintoihin ja ekstruderin toimintoihin, joita ovat lämmitys sekä alun paikoitus ja varsinainen materiaalin syötön aloittaminen. Tässä tutkimuksessa ei arvioida tai suunnitella ekstruderin sisäistä toimintaa, ja toiminto rajataan paikoitukseen. Tulostusliike jaetaan xy- ja z-tason suunnissa, sillä vaadittava liikenopeus on huomattavasti erilainen. Esimerikiksi 300 mm/s xy-suuntaisella tulostusnopeudella ja 100 µm resoluutiolla 300 mm piiriä tulostava laite vaatii z-akselin liikenopeudeksi 0,1 mm/s.

Ohjaustoiminnot jaetaan tarkkuuden ja virheiden seurantaan ja muuttuvan nopeuden mahdollistamiseen, joista tämän tutkimuksen rajausten perusteella huomoidaan tarkkuuden seuranta värähtelyjen vuoksi. Liikkuvien osien kannattelu on jaettu omaksi toiminnokseen, johon sisällytetään tulostustason suuntainen tuki liikkeelle. Kehitetty toimintorakenne on esitetty kuvassa 2, jossa huomiotta jätetyt toiminnot on merkitty yliviivattuna.



Kuva 2. 3D-tulostimen osatoimintorakenne.

Kustakin osatoiminnosta selvitettiin tärkeimmät kehitettävät mutta ristiriitaiset ominaisuudet. TRIZ-menetelmän taulukon perusteella selvitettiin näiden ristiriitojen selvittämiseen sopivat periaatteet. Tämän suunnitteluvaiheen periaatteen esittää Kremer et al. (2012, s. 831–832) ja Lin & Su (2007, s. 148) vastaavilla tavoilla. Taulukossa 4 on esitetty suunnitelun tavoitteena parannettavat ominaisuudet, niihin ristiriitaiset ominaisuudet ja selvittämiseen soveltuvat TRIZ-periaatteet niiden yhteyskohdassa. Taulukon numerointi ominaisuuksien ja ratkaisujen perusteella viittaa TRIZ-matriisiin, jossa esimerkiksi liikkuvan massan pienentäminen (1) heikentää stabiliteettia (13), joka voidaan ratkaista muun muassa eriaikaisella toiminnalla (19) (Oxford Creativity 2016).

Taulukko 4. Ristiriidat ja sovellettavat TRIZ-periaatteet.

Parantuva	Huonontuva	Sovellettavat periaatteet
1	13	1, 35, 19, 39
7	26	29, 30, 7
8	13 / 14	34, 28, 35, 40 / 9, 14, 17, 15
9	28	28, 32, 1, 24
19	9	8, 15, 35
28	36 / 39	27, 35, 10, 34 / 10, 34, 28, 32

Taulukko 4 jatkuu. Ristiriidat ja sovellettavat TRIZ-periaatteet.

Parantuva	Huonontuva	Sovellettavat periaatteet
37	32 / 34	5, 28, 11, 29 / 12, 26

Taulukosta 4 voidaan selvittää useimmiten esiintyvät ratkaisuperiaatteet laskemalla niiden esiintymismäärä koko taulukossa. Taulukkoon 5 on koottu eniten esiintyvät kolme periaatetta, niiden määrä ja kuvaus mahdollisuuksista ratkaista ristiriita, kuten Oxford Creativity (2016) ne esittää. Vastaavan taulukon esittää Kremer et al. (2012, s. 833), jossa parametrien muuttaminen periaatteessa 35 koskee painolastin materiaaliominaisuuksia.

Taulukko 5. Eniten esiintyvät ratkaisuperiaatteet.

Ratkaisuperiaate	Lukumäärä	Kuvaus
35	4	Parametrien eri arvot, esim. ristiriita 9-19
28	4	Mekaaninen järjestelmän eri tyypit, esim. 28-39
34	3	Toiminta eri ajassa, esim. 8-13

Toimintorakenteen perusteella muodostettu ideamatriisi on esitetty taulukossa 6. Ratkaisuehdotukset kullekin osatoiminolle on muodostettu perustuen nykyisiin ratkaisuihin ja muutokset ehdotusten välillä perustuvat TRIZ-menetelmällä löydettyihin parannettaviin ominaisuuksiin. Esimerkiksi erilaiset mekaaniset ratkaisut (28) on huomioitu johteiden valinnassa, jossa erilaiset tekniikat on esitetty.

Taulukko 6. Ideamatriisi.

Osatoiminto	1	2	3	4
1. Pääliike	Pyörivä	Lineaarinen	Kolmiulotteinen	
2. Liikkuva osa	Ekstruuderi	Taso	Molemmat	
3. Tulostinpäiden määrä	1	2	3	> 3
4. Pääliikkeen johteet	Ruuvi	Hihna/ketju	Sylinteri	
5. Liikkuvan osan runkomateriaali	Muovi	Metalli	Puu	Muu

Taulukko 6 jatkuu. Ideamatriisi.

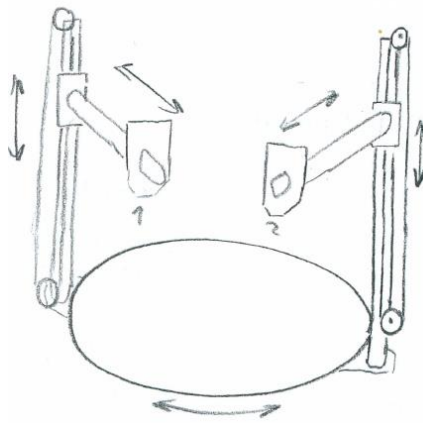
Osatoiminto	1	2	3	4
6. Liikesuuntien muuttaminen	Jatkuva	Hidastettu	Askel	
7. Paikoitus	Hihnan asema	Rajakytkin	Jatkuva laser	

Liikesuuntien muuttaminen liittyy taulukon 5 ratkaisuperiaatteeseen 34, jossa ristiriidalle 8 ja 13 (liikkuvan osan tilavuus vastaan stabiliteetti) pyritään saamaan ratkaisu toimintojen eriaikaistamisella. Osatoiminnoista xy-tason liike voidaan edelleen jakaa x- ja y-suuntaisiin, joiden välinen muutos suorakulmien takia aiheuttaa kiihtyvyyden. Muutos vaikuttaa toimintorakenteessa esitettyyn tarkkuuteen. Samaa periaattetta 34 soveltaa ekstruuderin paikoitusmenetelmän valinta, jossa rajakytkimellä toteutettu mittausta erottaa ohjaus- ja paikoitustoiminnallisuudet ajassa.

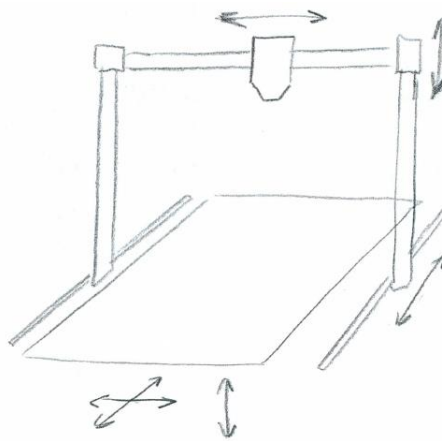
Ideamatriisista muodostettiin kokonaisratkaisuehdotukset valitsemalla eri kombinaatioita taulukon riveillä esiintyvistä osatoiminnoista. Alustavassa arvioinnissa muodostetut mutta mahdottomat ratkaisut sivuutettiin, ja lopputuloksena valittiin 3 lupaavinta luonnosteltavaa kokonaisratkaisua. Nykyisiä laitteita vastaavia karteesisia robotteja ei luonnostella, vaan tutkimus keskittyy uusiin konsepteihin. Nämä on esitetty taulukossa 7. Konsepteista 1, 2 ja 3 tehdyt luonnokset on esitetty kuvissa 3, 4 ja 5, kukin erikseen.

Taulukko 7. Valitut kolme luonnosteltavaa kokonaisratkaisua.

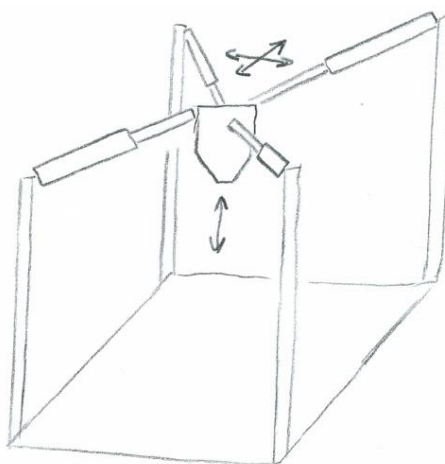
Ratkaisu	1	2	3
Osatoiminto			
1	Pyörivä	Lineaarinen	Kolmiulotteinen
2	Taso	Molemmat	Ekstuuderi
3	2	1	1
4	Hihna/ketju	Ruuvi	Sylinteri
5	Muovi	Metalli	Metalli
6	Hidastettu	Askel	Jatkuva
7	Hihnan asema	Jatkuva laser	Jatkuva laser



Kuva 3. Kokonaisratkaisun 1 hahmotelma.



Kuva 4. Kokonaisratkaisun 2 hahmotelma.



Kuva 5. Kokonaisratkaisun 3 hahmotelma.

Arviointitaulukko on luotu taulukossa 3 esitetyn vaatimuslistan mukaan. Taulukko ja eri kokonaisratkaisujen pisteet on esitetty taulukossa 8. Pisteet on arvioitu karkeasti, jotta konseptiratkaisuista voitaisiin valita parhaimmat jatkokehittelyyn. Tässä tutkimuksessa kuitenkin arvioidaan prosessiin vaikuttavia tekijöitä, ja konseptien arviointiin karkea pisteytys voidaan katsoa riittäväksi.

Taulukko 8. Konseptien arviointitaulukko.

Kriteeri	Ratkaisu 1	Ratkaisu 2	Ratkaisu 3
Ekstruuderien määrä	2	1	1
Resoluutio	1	2	2
Tulostustason koko	1	1	2
Tulostusnopeus	3	2	1
Kustannukset	Hyvä	Keskinkertainen	Huono
Lämmitetty tulostustaso	0	1	2
Rakenne	3	2	1
Liikutettava massa	2	2	1
Värähtelyjen syntyminen	1	3	1
Yhteensä	13	14	10

Resoluutio on arvioitu ensimmäisessä hinnalla ajetun tulostinpään vuoksi pienemmäksi, ja tulostustason koko määräytyy myös suurimman mitan mukaan sen ollessa pyöreä. Siten toivottuja isompia moduuleja tulostava laite on suurempi kahdessa suunnassa. Tulostusnopeus useammalla tulostuspäällä on parempi, ja yksinkertaisten hihna- ja moottorirakenteiden vuoksi kustannukset ovat hyvät. Monimutkaisen kolmiulotteisen sylinterirakenteen kustannukset arvioidaan suuriksi, ja siksi sopivat huonosti tähän tarkoitukseen.

Pyörivän tulostustason lämmitys vaatii erikoismenetelmiä virran johtamisessa, ja siksi laitteelle on annettu 0 pistettä. Linearisesti liikkuva taso on sitä parempi, mutta paikallaan olevalle tasolle on annettu 2 pistettä. Pyörivän mallin rakenne on yksinkertainen ja tulostinpäitä voi myös lisätä laitteeseen ulkolaidalle, ja siten malli sopinee hyvin pakkausten valmistamiseen jotka ovat keskipisteensä suhteen symmetrisiä ja keskeltä ontoja.

Liikuteltava massa on suurin, kun sylinterit liikuttavat päätä kolmiulotteisesti. Ratkaisussa 2 x- ja y-suunnat on erotettu mekanismeina, ja on siten verrattavissa pyörivään laitteeseen. Värähtelyä oletetaan syntyvän vähiten, kun sekä taso että tulostuspää liikkuvat ja suunnan muutos tapahtuu hetkellisesti. Kokonaispistemäärän perusteella ratkaisu 2 olisi paras, ja lähimpänä oleva ratkaisu 1 sai huonon pistemäärän lämmityksen vuoksi. Se on kuitenkin vaatimus, ja siksi lämmittämätön pyörivä taso on hylättävä.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Teknisen suunnittelun ja kirjallisuuskatsauksen teorian johtopäätökset on esitetty tässä luvussa. Suunnittelun tulokset perustuvat alustavaan arviointiin ja prosessin aikana havaittuihin esteisiin ja mahdollisuuksiin. Materiaalien ja prosessien sovelutuvuus teoriassa tämän tutkimuksen kohteena oleviin pakkauksiin on johdettu kirjallisuuskatsauksessa havaituista asioista.

Suunnitteluprosessi on toteutettu tutkitun mukaisena, ja vaiheet on käsitelty riittävällä tarkkuudella. Vaatimuslistan kohdat kuvaavat, mitä pitää suunnitella, ja taulukkoon on tuotu riittävä määrä absoluuttisia arvoja myöhemmin tapahtuvat vertailun tueksi. Absrahoinnissa tehty määrittely ei ota kantaa osatoimintoihin ja esittää suunnittelun kohteen selkeästi. TRIZ-menetelmällä on todettu luovettavalla tavalla osatoiminnot, joihin on kiinnitettävä erityisesti huomiota. Osatoimintojen kehittäminen on tehty edullisesti käyttämällä jo olemassa olevia ratkaisuja. Kullekin osatoiminnolle on kehitetty useita vaihtoehtoja, ja rajoittavia oletuksia ei siten synny niistä. Arvointi perustuu vaatimuslistaan, kohtia on sopiva määrä ja mukaan on otettu myös taloudellisia kriteerejä. Prosessi on siis toteutettu riittävän laajana ja todetun mukaisena.

4.1 Teknisten ratkaisujen soveltuvuus

Lisäämällä tulostinpäitä voidaan kasvattaa tulostusnopeutta ilman kannateltavan ja/tai liikkuvan massan lisäämistä. Toisaalta TRIZ-menetelmällä löydetty kaksi tärkeintä periaatetta suunnitelmien parantamiseksi ovat materiaali-parametrien muuttaminen ja eri tyyppiset tekniset ratkaisut. Tuotteen tarkemmassa mitoituksessa on siis huomioitava eri konstruktio-materiaalit, jos niillä voidaan säästää painoa, sekä erilaiset tekniset ratkaisut esimerkiksi mittauksia varten, jos niillä saadaan parempi tuottavuusaste.

Kokonaisratkaisujen arvioinnissa havaitut ongelmat joissakin osatoiminnoissa jatkuvat muissa kohdissa valituista mekanismeista. Myös tarkkuutta, joka oli tutkimuksen yksi selvitetävissä kriteereistä, voidaan parantaa osatoiminnoista johdettujen ristiriitojen parantamiseen keskittyvillä periaatteilla. TRIZ-menetelmän voidaan näin sanoa soveltuvan hyvin myös tämän kaltaisten konseptiratkaisujen suunnitteluun.

4.2 Tekniikan ja materiaalien soveltuvuus

Kuljetuspakkaukset ovat parhaimmillaan moduulijärjestelmään sopivia standardoituja pakkauskokoja, jotta kustannuksia voidaan vähentää tehokkaalla tilankäytöllä. Myös 3D-tulostustekniikan soveltaminen pakkausten valmistamiseen vähentää kustannuksia tyhjiä pakkausten säilytykseen liittyen.

Edullisimmissä tulostimissa käytettyä FDM-menetelmää voi soveltaa tässä tutkimuksessa esitettyihin sovelluskohteisiin, mutta prosessin rajoitteet on hyvä huomioida tuotteita suunniteltaessa. Esimerkiksi muuttolaatikon tyyppinen yläreunasta kannateltava tuote ei välttämättä sovellu tällä tekniikalla valmistettavaksi, sillä delaminaatio voi aiheuttaa rakenteen pettämisen. Toisaalta luvussa 2.3 mainittu jääkaappien pakkausmateriaali voi olla parempi kohde, jossa pakkauksen kappaleet eivät joudu rasitukselle z-akselin suunnassa. Jälkikäsitteilyllä voidaan tällaisissa pakkausissa vaikuttaa esimerkiksi kerrosten tarttuvuuteen ja muuttamaan kestumuovien ominaisuuksia kertamuovien kaltaiseksi.

Käyttämällä materiaalina PE- tai PP-muovijätteitä voidaan saavuttaa suurempi kierrätysaste, koska niitä on pakkausmateriaalijätteen painosta eniten. Jättemateriaalista tai jo valmistetuista tuotteista materiaali uudelleen kierrättämällä voidaan saavuttaa jopa 98 % kustannussäästö tuotteen hinnassa. Nykyisissä tulostimissa suosittu ABS-muovin tiheys on noin 15 % suurempi ja sen polymeereista polystyreenillä ja akryliniriirillä lasisiirtymälämpötila on noin 100 K suurempi kuin PE- tai PP-muoveilla. Kuitenkin PE- ja PP-muovien lämpökapasiteetti on toisaalta hieman suurempi, mutta alempi tulostuslämpötila kompensoi energiankulutusta. Amorfisilla polymeereilla havaittu parempi tarttuvuus tukee myös näiden materiaalien käyttöä. Alempi tiheys usein merkitsee enemmän amorfisia ominaisuuksia ja alemmaa lasisiirtymälämpötilaa, joten PE ja PP soveluvat siksi käytettäväksi. PET- ja PVC-muoveilla tiheys on yli 20 % suurempi, jolloin kristallisoituneen polymeerin ominaisuudet ovat enemmän merkitseviä, eivätkä ne siksi sovellu yhtä hyvin käyttöön FDM-tulostimissa.

Jättemateriaalin puhtausvaatimukset on kuitenkin huomioitava, ja materiaalin erotteluun on käytettävä luotettavia menetelmiä. Tiheyden perusteella tehtävä erottelu ei sovellu hyvin tähän, joten kierrätysjärjestelmän käyttöönotosta voi syntyä yllättäviä kustannuksia luotettavan materiaalin saamiseksi. Puhtaat pinnoittamattomat pakkausmateriaalit voidaan

esimerkiksi lajitella manuaalisesti, jolloin mekaanisen erottelun tai pinnoiteen poiston kustannuksia ei synny.

Kuluttajaluokankaan edullisten FDM-menetelmän tee-se-itse -tulostimien resoluutio ei ole merkittävästi huonompi kuin muilla menetelmillä saavutettavat resoluutiot, ja toisaalta kalliimpien teollisuustulostimienkaan resoluutio ei ole huomattavasti parempi kustannuksiin nähden. Suuremmissa pakkauksissa esimerkiksi mittojen epätarkkuus ja tarvittava korkea resoluutio eivät välttämättä merkitse yhtä paljon, joten menetelmä soveltuu edullisiin isonkin kokoluokan laitteisiin. Toisaalta SLS- tai SLA-menetelmillä tarvitaan tarkat materiaaliominaisuudet, joten senkin puolesta FDM-menetelmä soveltuu parhaiten juuri tämän tyyppiseen valmistukseen.

4.3 Luotettavuustarkastelu

Materiaalien osalta kirjallisuuskatsauksessa käsiteltiin uusia julkaisuja, ja haku rajattiin vuonna 2010 ja myöhemmin julkaistuihin lähteisiin. Haettaessa Scopus-tietokannassa lähteitä valittiin viittausten määrän perusteella. Koneensuunnitteluprosesseihin liittyen valittiin useita lähteitä eri aikakausilta, jotta prosessien kehityksestä voitiin tehdä vertailua tutkimuksen luotettavuutta varten.

Järjestelmällisen koneensuunnittelun prosessi itsessään on vaikeaa toteuttaa täysin luotettavasti, sillä aikaisemmat mallit voivat ohjata suunnittelijna epäobjektiivisiin päätöksiin (Ullman 2001, s. 57). Kuitenkin tutkimus rajautui tässä konseptiratkaisuihin, jossa epävarmuuksia valinnassa on oletettavissa ja vasta tarkemmassa suunnittelussa arvioidaan syntyneitä kustannuksia ja ominaisuuksia suunniteltuihin ja arvioidaan onnistumista (Pahl & Beitz 1996, s. 206).

4.4 Jatkotutkimusaiheet

Konstruktion tarkempi suunnittelu auttaa arvioimaan edellä mainituja ominaisuuksia, jota suunnittelun aloituksessa määriteltiin vaatimuksina ja toivomuksina. Suunnittelua voidaan jatkaa valitsemalla kehitettävä konstruktio ja mitoittamalla sen komponentteja ja materiaaleja kuormien perusteella.

Tulostinpään tekniikkaa ja jätemateriaalin käsittelyä raaka-aineeksi voi myös tutkia nykyisillä laitteilla pienemmässä mittakaavassa, jotta voidaan määrittää esimerkiksi tulostinpään elementtien vaadittu teho ja siten ekstruuderin massa. Nykyisillä tulostimilla ja tulostinpäillä voidaan tehdä myös tulostuskokeita eri tyyppisillä jätemateriaaleilla, ja tutkia kappaleiden kestävyyttä ja muita ominaisuuksia tämän tutkimuksen vahvistamiseksi.

Osaltaan rakenteen suunnittelussa voi tutkia ja kehittää uusia dynaamisen käytöksen malleja ja ohjausjärjestelmän mahdollistamia ratkaisuja, kuten on tehty esimerkiksi nostureiden heilunnan vähentämiseksi (Pat. FI 101215 1996, s. 3). Näin esimerkiksi materiaali-paksuuksia voidaan vähentää ja liikutettavia massoja pienentää.

5 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin pakkauksia valmistavan 3D-tulostimen suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä. Tutkimus rajattiin polymeeriekstruusiomenetelmään ja yleisimpiin yritysten toiminnassa syntyviin kierrätysmuoveihin tulostimen raaka-aineena. Konstruktiio suunniteltiin käyttäen järjestelmällisen teknisen suunnittelun metodeja. Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksen ja teknisen suunnittelun avulla luotettavasti. Työssä käytettiin ajankohtaisia lähdemateriaaleja ja suunnitteluun varmistettua ja riittävän laajaa järjestelmällistä prosessia.

Tulostimen suunnitteluun vaikuttavat mitat ja parametrit valittiin nykyisten ratkaisujen perusteella. Edullisen tuotteen varmistamiseksi ideoiden pohjana käytettiin nykyisiä teknisiä ratkaisuja eri osatoiminnoille. Ideamatriisin perusteella valitut konseptiratkaisut arvioitiin ja todettiin kelpaavan jatkokehittelyä varten. Arviointikriteereistä ja osatoiminnoista löydettiin muutamia eniten suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä, joita ovat materiaaliominaisuuksien muuttaminen ja teknisten ratkaisujen vaihtaminen.

Polyetyleni ja polypropeeni havaittiin parhaiten soveltuviksi jätemuoveiksi, sillä niitä on lähes puolet pakkausjätteestä, niillä on sopivat ominaisuudet, esimerkiksi amorfinen polymeerirakenne FDM-menetelmän kerrosten tarttumista varten, ja FDM sallii materiaaliominaisuuksissa suuremmat vaihtelut kuin muut ainetta lisäävät laseriin perustuvat valmistusmenetelmät.

3D-tulostus pakkaustuotteiden valmistusmenetelmänä ja muovijätteen käyttö raaka-aineena todettiin mahdolliseksi, ja tarkemmalla suunnittelulla ja jatkotutkimuksilla voidaan varmistaa nämä tulokset. Seuraavat tutkimukset voivat keskittyä komponenttien mitoitukseen ja tarkempaan analyysiin, ohjausjärjestelmien kehitykseen tai materiaalitutkimuksiin kokeellisilla menetelmillä.

LÄHTEET

Adrados, A., de Marco, I., Caballero, B. M., López, A., Laresgoiti, M. F. & Torres, A. 2012. Pyrolysis of plastic packaging waste: A comparison of plastic residuals from material recovery facilities with simulated plastic waste. *Waste Management*, 32: 5. S. 826–832.

Al-Salem, S. M., Lettieri, P. & Baeyens, J. 2009. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29: 10. S. 2625–2643.

Berman, B. 2012. 3-D printing: The new industrial revolution. *Business horizons*, 55: 2. S. 155–162.

Engblom, J., Solakivi, T., Töyli, J. & Ojala, L. 2012. Multiple-method analysis of logistics costs. *International Journal of Production Economics*, 137: 1. S. 29–35.

Evans, B. 2012. *Practical 3D Printers*. New York: Springer. 306 s.

Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. 2015. *Additive Manufacturing Technologies*. New York: Springer. 498 s.

Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A. & Hou, L. 2013. Additive manufacturing and its societal impact: A literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67: 5-8. S. 1191–1203.

Jiang, R. 2015. *Introduction to Quality and Reliability Engineering*. Berlin: Springer. 326 s.

Juraeva, M., Song, D. J. & Ryu, K. J. 2016. Improving airflow loss through the yarn-loading slit of the air-interlacing nozzle using TRIZ. *Textile Research Journal*, 86: 19. S. 2117–2124.

Kholodovych, V. & Welsh, W. J. 2007. Densities of Amorphous and Crystalline Polymers. Teoksessa: Mark, J. E. *Physical Properties of Polymers Handbook*. New York: Springer. S. 611–618.

Kreiger, M. & Pearce, J. M. 2013. Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Three-Dimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1: 12. S. 1511–1519.

Kremer, G.O., Chiu, M., Lin, C., Gupta, S., Claudio, D. & Thevenot, H. 2012. Application of axiomatic design, TRIZ, and mixed integer programming to develop innovative designs: A locomotive ballast arrangement case study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61: 5-8. S. 827–842.

Lin, C. S. & Su, C. T. 2007. An innovative way to create new services: Applying the TRIZ methodology. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 24: 2. S. 142–152.

Oxford Creativity. 2016. Contradictions Matrix [verkkodokumentti]. [Viitattu: 10.12.2016]. Saatavissa: https://www.triz.co.uk/files/oxfordtriz_contradictions_matrix.pdf

Pahl, G. & Beitz, W. 1996. *Engineering design: a systematic approach*. Glasgow: Springer. 544 s.

Pat. FI 101215. 1996. Menetelmä nosturin taakan heilahtelun vaimentamiseksi. Abb Industry Oy, Helsinki: Suomi. (Mård, O. & Ahvo, L.) Hak. FI 945859, 13.12.1994. Julk. 14.6.1996. 14 s.

Plazek, D. J. & Ngai, K. L. 2007. The Glass Temperature. Teoksessa: Mark, J. E. *Physical Properties of Polymers Handbook*. New York. Springer. S. 187–216.

Ross, S. & Evans, D. 2003. The environmental effect of reusing and recycling a plastic-based packaging system. *Journal of Cleaner Production*, 11: 5. S. 561–571.

Senvol. 2015. Machine Search [verkkotietokanta]. [Viitattu: 17.10.2016]. Saatavissa: http://senvol.com/5_machine-search/.

SFS 3536. 1976. Pakkaukset. Suorakulmaiset kuljetuspakkaukset. Ulkomitat. Helsinki: Suomen Standartoimisliitto SFS. 3 s.

SFS 5352. 2000. Pakkaukset. Mittojen koordinointi. Periaatteet, terminologia, säännöt ja mitat. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. 18 s.

Stansbury, J. W. & Idacavage, M. J. 2016. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials*, 32: 1. S. 54–64.

Tilastokeskus. 2014. Yhdyskuntajätteet 2014, tonnia. [verkkodokumentti] Helsinki: Tilastokeskus. Päivitetty 1.12.2015. [Viitattu: 7.3.2016]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/jate/2014/jate_2014_2015-12-01_tau_001_fi.html.

Ullman, D. G. 2010. *The Mechanical Design Process*. Singapore. McGraw-Hill. 433 s.

Verghese, K. & Lewis, H. 2007. Environmental innovation in industrial packaging: A supply chain approach. *International Journal of Production Research*, 45: 18–19. S. 4381–4401.

Wen, J. 2007. Some Mechanical Properties of Typical Polymer-Based Composites. Teoksessa: Mark, J. E. *Physical Properties of Polymers Handbook*. New York: Springer. S. 487–496.

Wittbrodt, B. T., Glover, A. G., Laureto, J., Anzalone, G. C., Oppliger, D., Irwin, J. L. & Pearce, J. M. 2013. Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers. *Mechatronics*, 23: 6. S. 713–726.