

Elias Marttala

**ASKELMOOTTORIN TOIMINTA JA OHJAUS 3D-TULOSTUK-  
SESSA**

# **ASKELMOOTTORIN TOIMINTA JA OHJAUS 3D-TULOSTUK- SESSA**

Elias Marttala  
Opinnäytetyö  
Syksy 2017  
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu

Tietotekniikan tutkinto-ohjelma, laite- ja tuotesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

---

Tekijä(t): Elias Marttala

Opinnäytetyön nimi: Askelmoottorin toiminta ja ohjaus

Työn ohjaaja(t): Ensio Sieppi

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: marraskuu 2017

Sivumäärä: 40 + 1 liite

---

Työn tavoitteena oli ottaa selvää eri 3D-tulostusmenetelmistä, niiden tulostustavoista, tarkkuuksista ja materiaalivaihtoehtoista. Osana opinnäytetyötä oli myös kertoa, millainen 3D-tulostin minulta löytyi ennestään, selvittää miten todeta, että laitteisto on sopiva 3D-tulostukseen kyseisellä rakenteella, sekä tutkia, mistä ongelmat tulostuksessa johtuvat ja löytää ratkaisu tähän ongelmaan. Samalla oli tarkoitus tuoda esille, miksi hankin 3D-tulostimen aikanaan osina, enkä ostanut kaupallista, valmista laitteistoa.

Kun olemassa olevan laitteiston ongelmakohdat oli selvitetty, oli aika siirtyä suunnittelemaan, millaisia osia täytyisi päivittää, että se saataisiin toimimaan halutuin laatuvaatimuksin. Tämä taas nosti esiin kysymyksen, olisiko kaikin puolin helpompi hankkia vain uusi kaupallinen 3D-tulostin. Pohdinta johti osien ja kaupallisten 3D-tulostimien vertailuun.

Lopputuloksena oli vertailu, missä 3 kaupallista sekä opinnäytetyössä suunniteltu päivitys laitettiin vastakkain, joista suunniteltu päivitys vei voiton muutaman hyödyllisen toiminnon sekä alhaisemman hinnan turvin.

---

Asiasanat: 3D-tulostus, pikamallinnus, askelmoottori, Makerbot, Prusa

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Bachelor's degree programme, Information Technology

---

Author(s): Elias Marttala

Title of thesis: Stepper motor working principles and guidance

Supervisor(s): Ensio Sieppi

Term and year when the thesis was submitted: November 2017

Pages: 40 + 1 appendices

---

The aim of the thesis was to find out about the different 3D-printing methods, their printing principles, accuracy's and wide variety of different materials. Part of the thesis was to explain what kind of 3D-printer I already had, find out that it was suitable for 3D-printing with it's structure and resolve the reason why 3D-prints have been so inaccurate. Also, I was to bring up why I bought the 3D-printer in parts and not prebuilt commercial 3D-printer.

When existing hardware troubleshooting was done, and problems were found. It was time to start planning about what parts should be upgraded so that it would meet the qualifications. But in order to find out if it would be easier and cheaper just to buy a commercial 3D-printer, a comparison had to be made between those two.

Final results were a comparison where 3 commercial 3D-printers and designed upgrade were put side-by-side, where the upgrade took the victory by only few useful functions and lower price.

---

Keywords: 3D-printing, rapid prototyping, stepper motor, Makerbot, Prusa

## **ALKULAUSE**

Haluaisin kiittää ohjaavaa opettajaani Siepin Ensiota kannustavasta ja selkeästä ohjauksesta.

6.11.2017 Elias Marttala

# SISÄLLYS

1 JOHDANTO	8
2 3D-TULOSTIN	9
2.1 3D-tulostin	9
2.2 3D-tulostimien tekniset ratkaisut	9
2.2.1 FDM-menetelmä	10
2.2.2 SLA-menetelmä	11
2.2.3 DLP-menetelmä	12
2.2.4 MJP-menetelmä	13
2.2.5 DMLS-menetelmä	14
2.2.6 SLS- menetelmä	15
2.2.7 3DP-menetelmä	16
2.2.8 EBM-menetelmä	17
2.2.9 LOM-menetelmä	18
2.3 3D-tulostimien vertailua	19
2.3.1 Materiaalit	19
2.3.1.1 ABS & PLA	20
2.3.1.2 PA	21
2.3.1.3 TPU	22
2.3.1.4 Ruostumaton teräs	22
2.3.1.5 Titaani	23
2.3.1.6 Hartsit	23
2.3.2 Kehitys	24
3 3D-TULOSTIMEN TIEDOT	30
3.1 Askelmoottorit	30
3.1.1 Askelmoottoreiden toiminta	31
3.1.2 Askelmoottoreiden yhteys 3D-tulostamiseen	32
3.1.3 Askelmoottoreiden määrittäminen eri käyttötarkoituksiin	32
3.1.4 Nykyisessä tulostimessa olevat askelmoottorit	33
3.2 Prosessori	35
3.3 Virtalähde	36
3.4 A4988 Askelmoottorin ohjain (Stepper motor driver)	37

3.5 Akseleiden liikutusmenetelmät/teoreettinen tarkkuus	37
3.6 Olemassa olevan laitteiston kustannukset	38
3.7 Saman hintaluokan kaupallisia tulostimia	40
3.8 Jatkokehitysmahdollisuudet	41
4 PÄIVITETYN 3D-TULOSTIMEN SUUNNITTELU	43
4.1 Päivityksen suunnittelu	43
4.2 Kustannusarvio	44
4.3 Vertailu	45
4.3.1 XYZprinting Da Vinci Mini	45
4.3.2 Monoprice Maker Select V2	46
4.3.3 New Matter MOD-t	47
4.3.4 Yhteenveto vertailusta	48
5 YHTEENVETO	49

# 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on askelmootorit ja niiden hyödyntäminen 3D-tulostuksessa. 3D-tulostus on jatkuvasti kehittyvä teknologian ala, joka on kovaa vauhtia siirtymässä kohti joka kodin laitteistoa. Valitsin aiheen kiinnostuksestani 3D-tulostusta ja sähkömoottoreita kohtaan sekä halusin syventyä 3D-tulostuksen tulostustapoihin, materiaaleihin sekä hinnoitteluun. Myös 3D-tulostuksen yleistyksen alkua ja kehittyminen ovat aihealueita, joista haluan ottaa selvää.

Minulta löytyi jo ennestään 3D-tulostin, joka rakennettiin aikanaan ilman tarkempaa tietämystä laitteiston toiminnasta tai sen osien kykenevyydestä tehtäviinsä. Tästä syystä ensimmäiseksi tavoitteeksi päätettiin asettaa laitteistolle tehtävä katsaus, missä lasketaan teoreettisesti osien kyvyt suoriutua osastaan. Tavoitteena on myös selkeyttää lukijalle itse kasatun 3D-tulostimen edut verrattuna kaupalliseen sekä kertoa kuinka molempien hankkimisen kannattavuuden aste on muuttunut viime vuosien aikana.

Lisäksi pohdinnassa on ollut jo pidemmän aikaa 3D-tulostimen päivittäminen, joten osana opinnäytetyötä on selvittää, mikä nykyisessä 3D-tulostimessa on vialla ja suunnitella laitteistolle päivitys, millä ne saataisiin korjattua. Koska 3D-tulostimet ovat halventuneet viime vuosina todella paljon, täytyy huomioon ottaa myös mahdollisuus, että kaupallinen 3D-tulostin saattaisi olla helpompi ja/tai halvempi hankinta, joka vaatii oman vertailunsa.

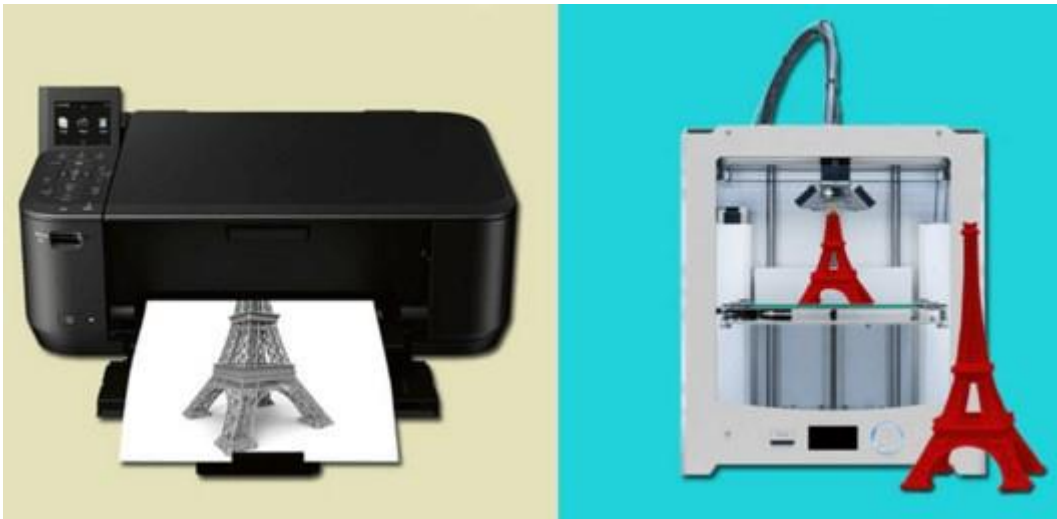


## 2 3D-TULOSTIN

### 2.1 3D-tulostin

3D on englanninkielinen lyhennys, joka tarkoittaa sanoja "three dimensional" eli suomennettuna kolmiulotteinen. Tällä tarkoitetaan kohdetta, millä on kolme ulottuvuutta; syvyys, leveys ja korkeus.

Lähes jokaisen kotoa löytyvillä tulostimilla tulostetaan vaakatasossa niin, että tulostuspää liikkuu poikittais- ja pitkittäissuuntaisilla akseleilla, jolloin tuloste tulee vain yhteen kerrokseen. Siitä poiketen 3D-tulostin voi tulostaa myös pystyakselilla, joka tarkoittaa, että painettavaa materiaalia voidaan tulostaa edellisten kerrosten päälle kuvan 1 oikeanpuoleisen mallin mukaisesti.



*KUVA 1. 2D- ja 3D-tulostamisen eroja (1)*

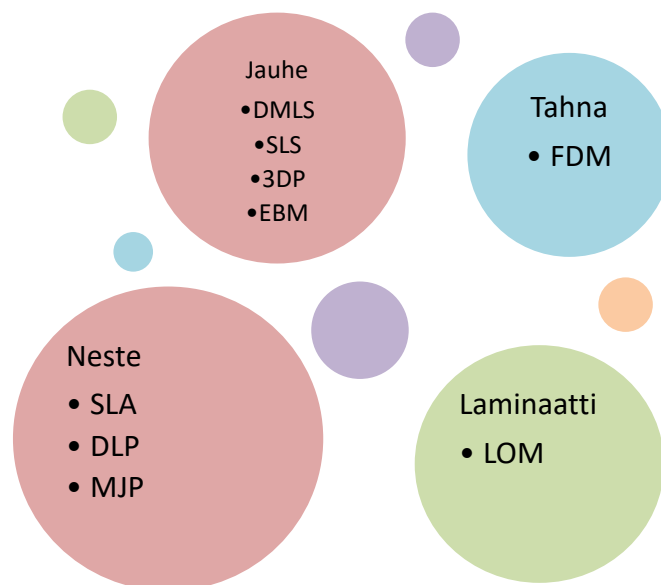
### 2.2 3D-tulostimien tekniset ratkaisut

3D-tulostimista on olemassa huikea määrä erilaisia versioita, jotka hyödyntävät useita eri materiaaleja ja metodeja tulostaakseen kolmiulotteisen mallin.

3D-tulostusmenetelmiä on kehitetty lukemattomia määriä, jotka pohjautuvat useasti johonkin toiseen tulostusmenetelmään.

Ne voidaan luokitella kuvan 2 tapaan neljään ryhmään materiaalien perusteella, jotka ovat neste, jauhe, tahna sekä laminaatti (2). Näille ei varsinaisesti ole määritelty oikeita tai hyviä käännöksiä, joten kukin voi suomentaa ne ymmärtämällään tavalla. Kuitenkin harkiten, että lukijalle tulee selväksi, mistä menetelmäkategoriasta on kyse. Englanniksi ne ovat powder, resin, plastic filament ja sheet.

## Tulostusmenetelmät



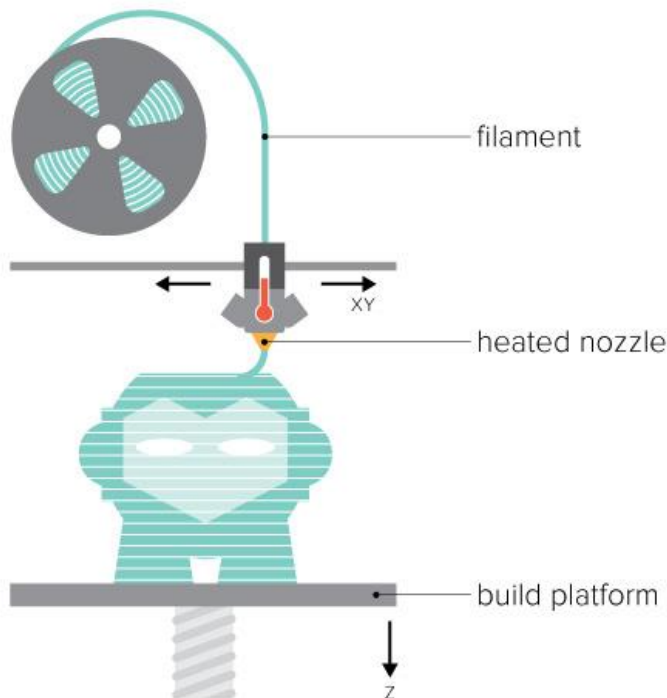
*KUVA 2. Eri valmistusmenetelmien jaotteluita (2)*

### 2.2.1 FDM-menetelmä

FDM eli engl. Fused Deposition Modeling on menetelmä, missä muovimateriaali pursotetaan kuvan 3 mukaisesti kuumennetun suuttimen läpi tulostusalustalle. Suutin lämmitetään materiaalin sulamispistettä kuumemmaksi, jolloin materiaali tulee suuttimesta sulana nauhana tulostusalustalle tai aiempien kerrosten päälle sulaen niihin kiinni. (2.) Jotta tulostusalustalle tuleva ensimmäinen kerros ei jäähtyisi liian nopeasti, täytyy useimmissa tapauksissa myös alustan olla lämmitetty.

Sekä suuttimen että tulostusalustan lämpötilat riippuvat täysin tulostettavasta materiaalista, sillä niiden sulamispisteillä on melko suuria eroja.

FDM-tulostimet ovat todella suosittuja kotitalouksissa, sillä ne ovat hinnoiltaan kuluttajaystävällisiä sekä niitä helppo rakentaa itse. FDM-tulosteet ovat tunnetusti epätarkempia kuin suuressa osassa muista tulostusmenetelmistä.



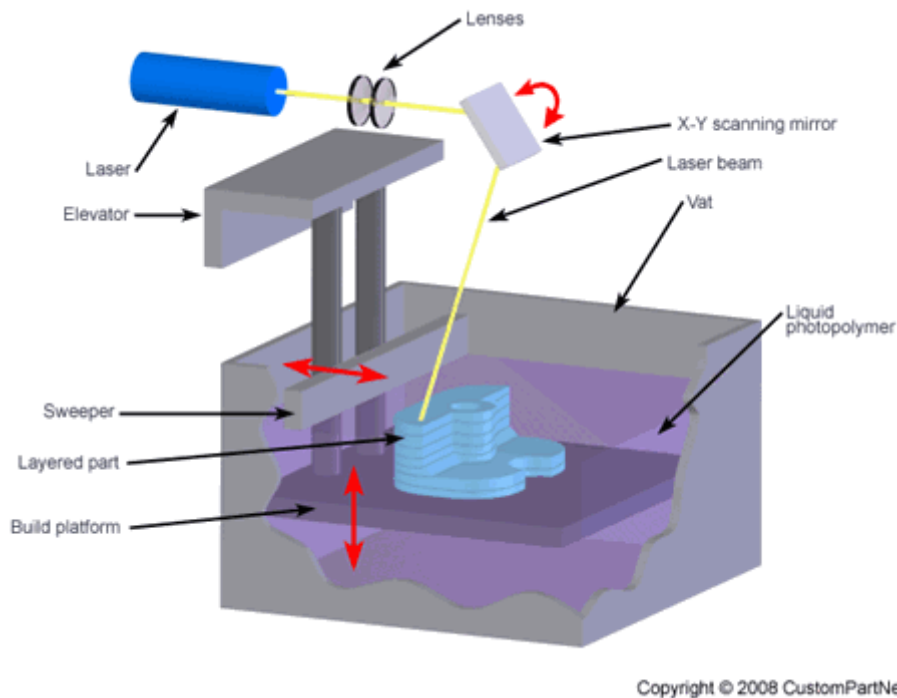
*KUVA 3. FDM-tulostusmenetelmä (3)*

Valmistusmateriaaleina voidaan käyttää, joko muovipohjaisia tai metallisia materiaaleja, joista metalliset jäävät kuitenkin kyseisellä valmistusmetodilla ulkonäöltään karkeiksi ja niitä joudutaan jälkikäsittelemään siedettävän ulkonäön takaamiseksi. (4.)

### **2.2.2 SLA-menetelmä**

SLA eli engl. Stereolithography on menetelmä, joka muistuttaa huomattavasti SLS-metodia, mutta jauheen sijasta materiaalina käytetään nestemäistä epoksi-pohjaista hartsia. SLA-metodissa alusta lasketaan kuvan 4 mukaisesti nesteseen, missä se kovetetaan alustalle hyödyntäen UV-laservaloa. Sen jälkeen

alusta lasketaan kerros kerrokselta alemmaksi kovettaen nestettä aina välissä niin, että vain pieni määrä nestettä yltää aina kovetetun hartsin päälle.

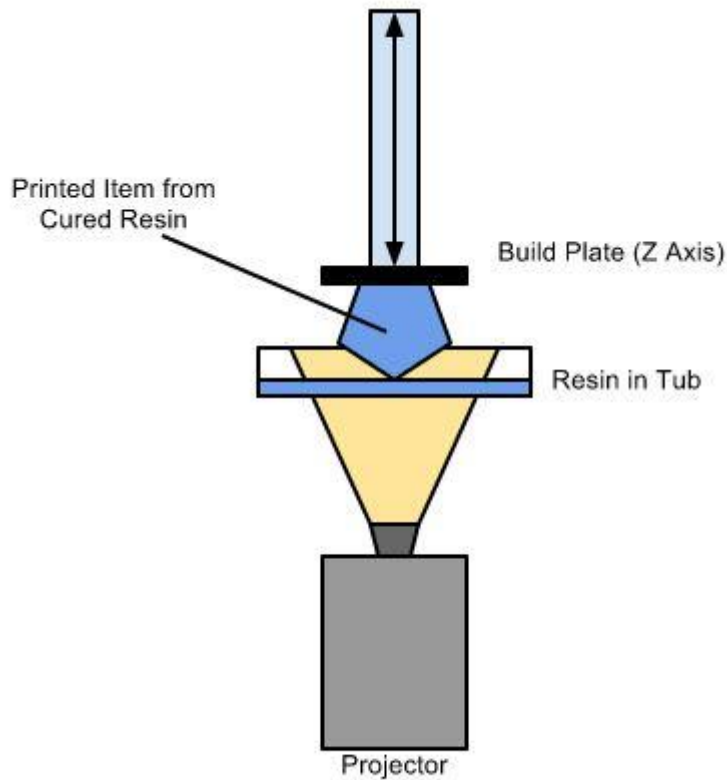


*KUVA 4. SLA-tulostusmenetelmä (5)*

Menetelmän hyviä puolia ovat tulostuksen nopeus sekä erinomainen tarkkuus, joka näkyy SLA-tulostimien hinnoissa. Tulostusmateriaali on todella kallista ja monimutkaisempia tulosteita tehdessä tarvitsee FDM-metodin tapaan tulostukseen lisätä tukirakenteita, etteivät rakenteet jäisi ”tyhjän päälle”, sillä toisin kuin SLS-metodissa neste ei ole yhtä kiinteää kuin jauhe eikä riitä tukemaan rakenteita.

### **2.2.3 DLP-menetelmä**

DLP eli engl. Digital Light Processing on menetelmä, joka hyödyntää materiaalinaan SLA-metodin tapaan nestemäistä epoksipohjaista hartsia, joka tässä tapauksessa kovetetaan hyödyntäen DLP-sirun heijastamaa kuvaa, jonka alueelta valokovete kovettuu. Menetelmän toiminta on muuten täysin sama kuin SLA:ssa, mutta sen sijaan, että koko kerros käytäisiin läpi laserilla, heijastetaan yhden kerroksen kuva kuvan 5 mukaisesti yhdellä kertaa nesteeseen, joka nopeuttaa prosessia huomattavasti.



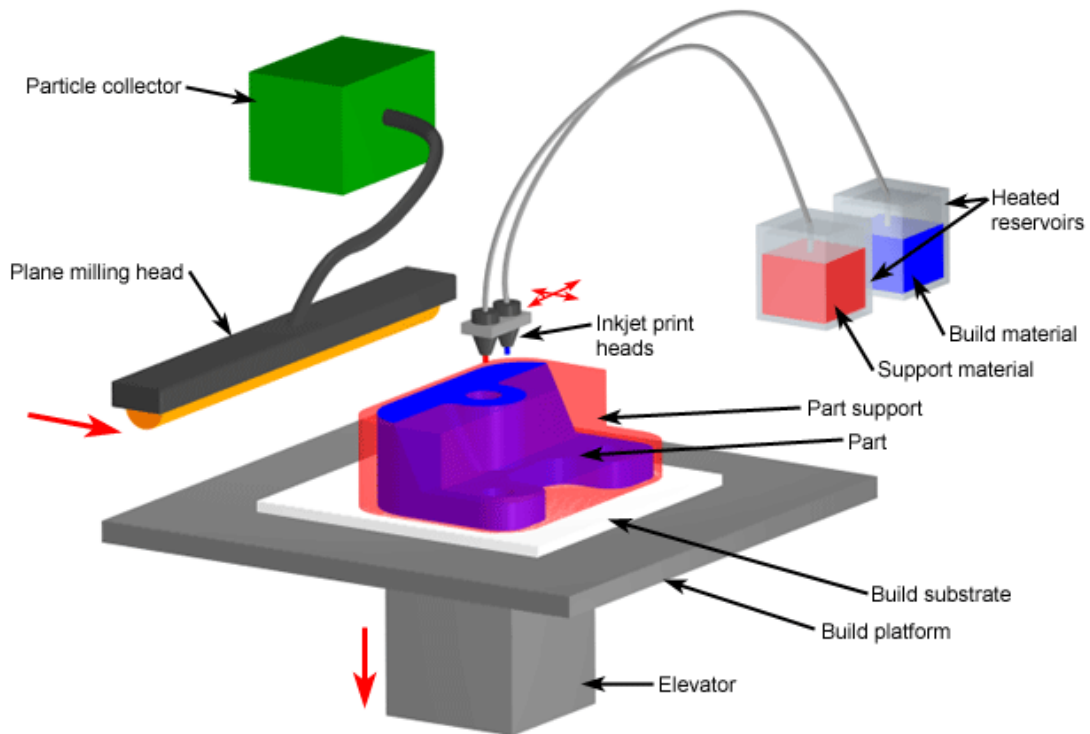
*KUVA 5. DLP-tulostusmenetelmä (6)*

Kuten kaikissa 3D-tulostimissa, mitä tarkempaa ja vahvempaa tulostusta tahdotaan saada sitä kalliimmaksi tulosteen kustannukset tulevat niin laitteen komponenttien kuin materiaalienkin osalta. DLP-tulostin hyödyntää samoja nesteitä kuin SLA:kin ja sen komponentit, varsinkin itse DLP-siru tai -projektorit tulevat maksamaan huomattavasti.

#### **2.2.4 MJP-menetelmä**

MJP eli engl. Multi-jet Printing on tulostusmenetelmä, joka muistuttaa huomattavasti tavallista mustesuihkutulostinta. Siitä poiketen MJP-tulostus hyödyntää materiaalinaan, joko epoksipohjaista hartsia tai valettavaa vahaa. Malli tulostetaan kuvan 6 mukaisesti kerros kerrokselta ja kovetetaan aina kerroksen tulostuksen jälkeen UV-valolla. Tämä tulostusmetodi kilpailee tarkkuudellaan SLA-tulostusmenetelmän kanssa ja on todella nopea. (7.)

Vaikka MJP-menetelmässä käytettävät materiaalit ovatkin kehittyneet vuosien varrella kovaa vauhtia, ovat ne kuitenkin helposti särkyviä verrattuna muiden tulostusmenetelmien hyödyntämiin materiaaleihin nähden. Muita huonoja puolia tässä menetelmässä ovat tulostimien korkeat hinnat, materiaalivaihtoehtojen vähäisyys sekä niiden heikko korjattavuus. (8.)

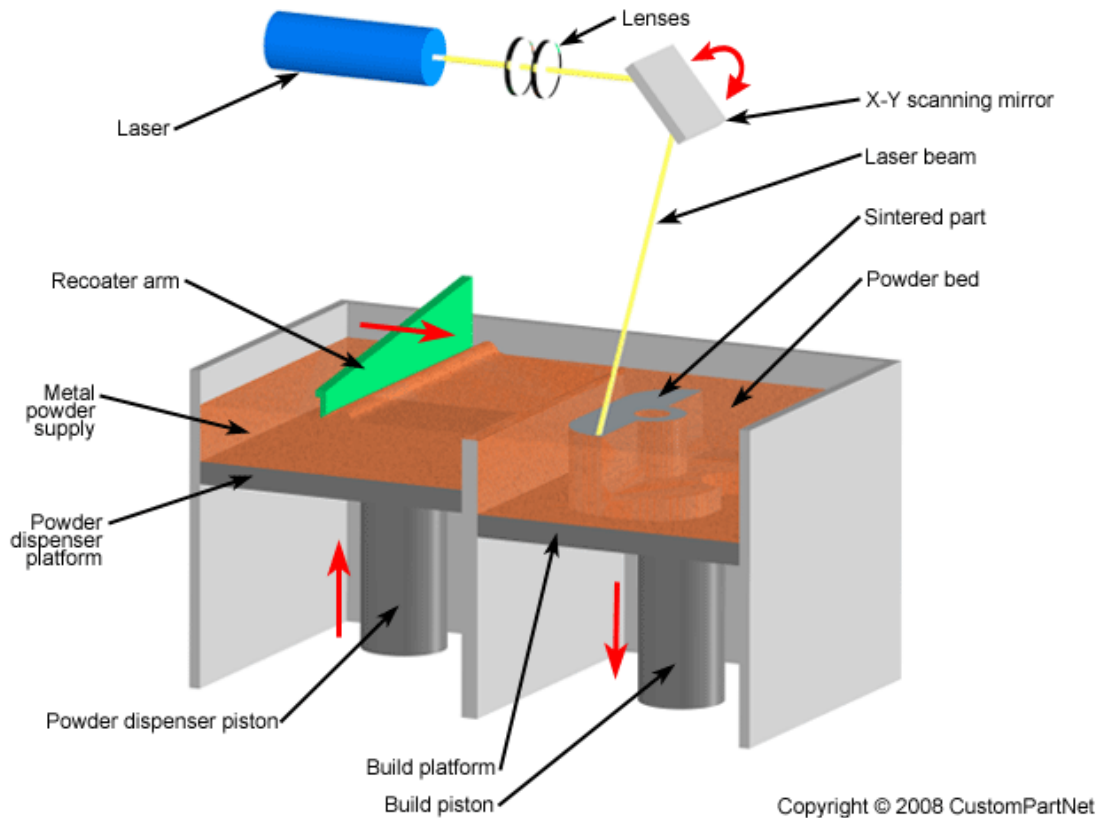


Copyright © 2008 CustomPartNet

KUVA 6. MJP-tulostusmenetelmä (8)

### 2.2.5 DMLS-menetelmä

DMLS eli engl. Direct Metal Laser Sintering on menetelmä, joka toimii juuri samoin kuin SLS-menetelmä kuten kuvasta 7 voi todeta, mutta laitteisto sisältää tehokkaamman laserin, sekä materiaalina toimii muovi tai komposiittijauheiden sijasta metallijauhe. Materiaalivaihtoehtoja kyseiselle tulostustavalle ovat seostet-  
 räs-, ruostumaton teräs-, alumiini-, koboltti-kromijauhe sekä titaani jauhe. (9.)

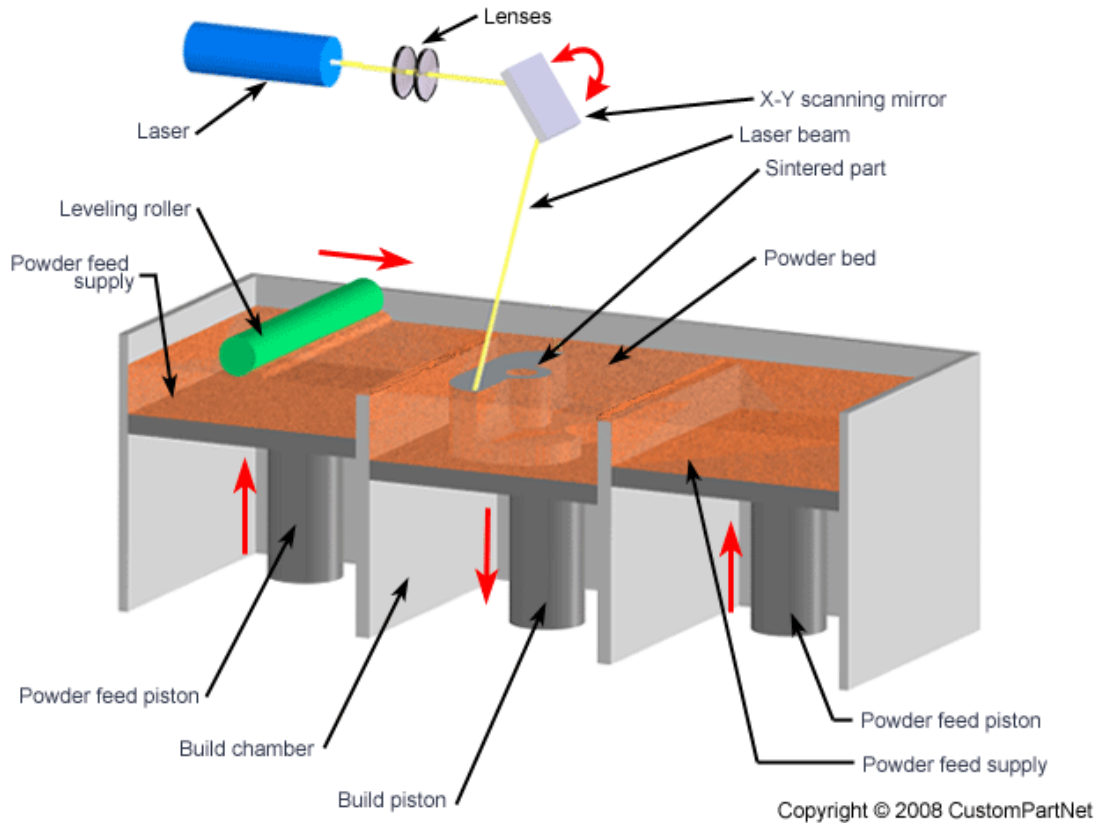


*KUVA 7. DMLS-tulostusmenetelmä (9)*

Koska kyseessä on metallijauhe, voidaan sitä kuumentaa tässä tapauksessa kuumemmaksi kuin SLS-menetelmässä muovia sulamispisteeseen verrattuna, joka takaa tiheimmän sintrauksen, millä saadaan kestävämpiä tulosteita. Lähteen 18 mukaan DMLS-tulosteen tiheys voi olla jopa 95 % kun SLS-menetelmässä se on vain n. 70 %.

### **2.2.6 SLS- menetelmä**

SLS eli engl. Selective Laser Sintering on menetelmä missä tulostettavalle tasolle levitetään muovi- tai metallijauhetta, joka sintrataan kiinteäksi laserilla, lasketaan tasoa kerros alemmaksi, lisätään ja tasoitetaan jauhetta rullalla, jonka jälkeen prosessi toistetaan uudelleen kuvan 8 mukaisesti. (10.) SLS-menetelmä on siitä hyvä, että sillä on mahdollista tulostaa tarkkoja ja hankalia muotoja ilman tukirakenteita. Tämä on jauheen ansiota, joka tukee ylempiä rakenteita eikä anna juuri sintratun materiaalin jäädä tyhjän päälle. Valmistusmateriaaleina on mahdollista käyttää laajaa valikoimaa eri muovi- ja komposiittijauheita sekä valuhiekkoja.

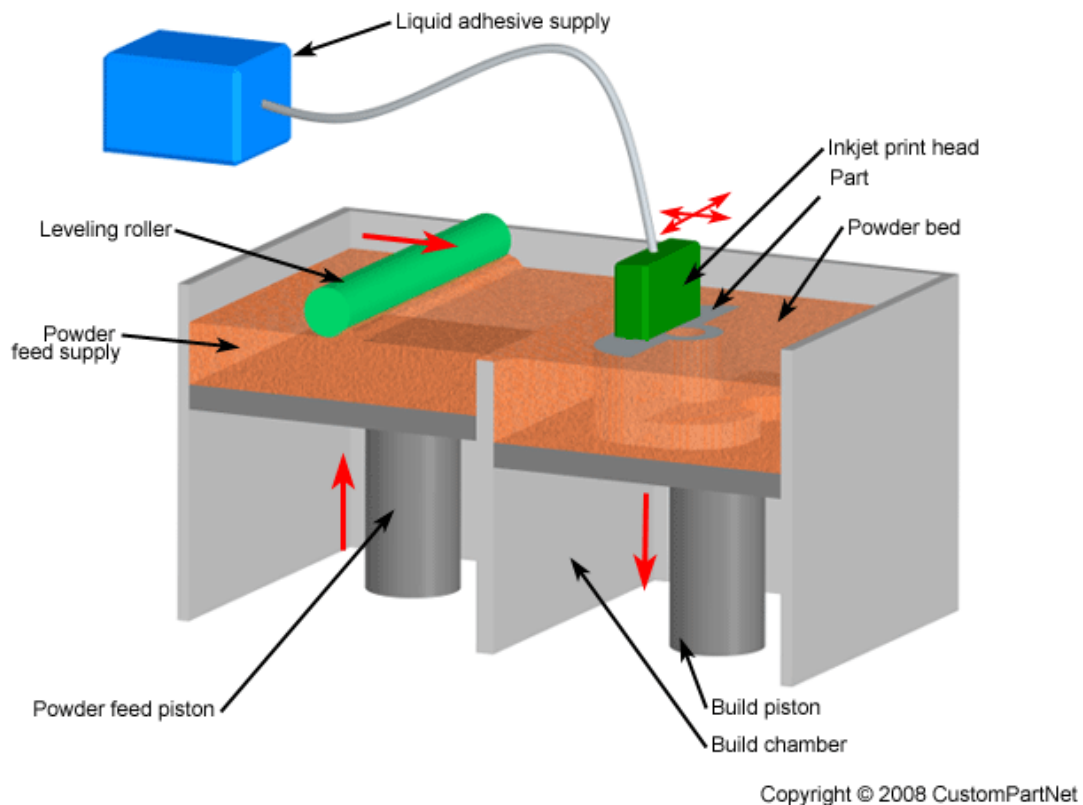


KUVA 8. SLS-tulostusmenetelmä (10)

### 2.2.7 3DP-menetelmä

3DP eli engl. Three Dimensional Printing on menetelmä, joka muistuttaa huomattavasti SLS-menetelmää, mutta sen sijaan, että jauhe sintrattaisiin laserilla lisäksi tulostuspää kuvan 9 mukaisesti sideainetta jauheeseen, joka sitoo jauheen yhteen. Tällä tavalla on mahdollista saavuttaa suuret tulostusnopeudet, mutta se näkyy tulostuksen heikossa laadussa, eikä lopputulos ole yhtä kestävä kuin sintrausta hyödyntävissä tulostusmenetelmissä. (11.)



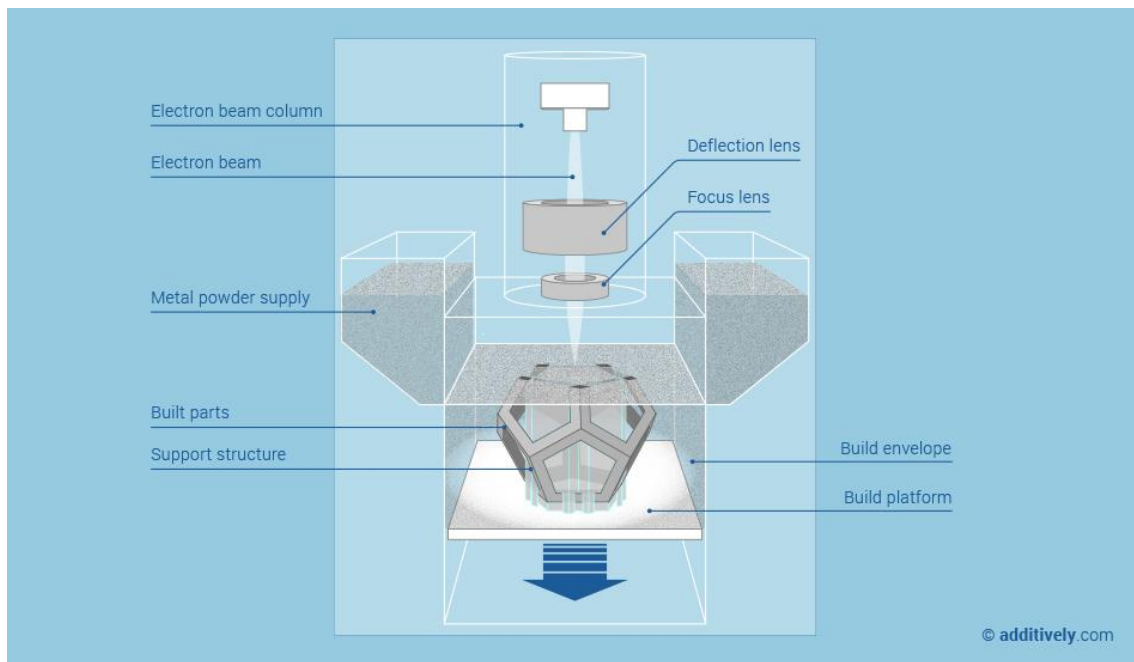


KUVA 9. 3DP-tulostusmenetelmä (11)

Tulostusmenetelmä säästää esim. SLS-menetelmään nähden enemmän sähköä, sillä jauhetta ei tarvitse sintrata, mutta sideaine tuo toisaalta toisen kustannuksen tilalle.

### 2.2.8 EBM-menetelmä

EBM eli engl. Electron Beam Melting on menetelmä, joka muistuttaa hieman DMLS-menetelmää, sillä molemmissa sintrataan metallijauhetta sekä lisätään metallijauhetta samalla tavoin kerroksittain tulosteen päälle. Pinnan alta menetelmät kuitenkin toimivat aivan eri tavoin. Sen sijaan, että jauhe sintrattaisiin laseria hyödyntäen, käytetään EBM-tulostusmenetelmässä nimensä ja kuvan 10 mukaisesti elektronisuihkua jauheen sulattamiseksi. Jotta elektronisuihkua olisi mahdollista käyttää kyseisessä käyttötarkoituksessa, täytyy prosessi toteuttaa tyhjiössä. (12.)

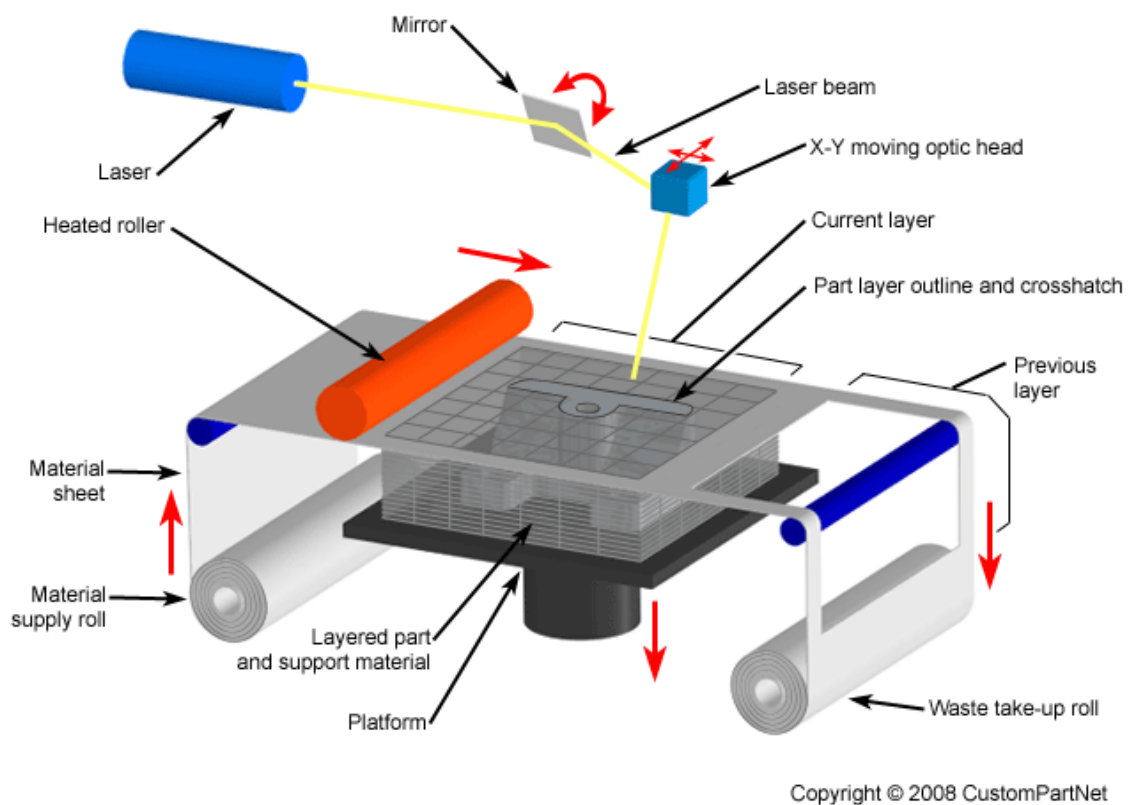


*KUVA 10. EBM-tulostusmenetelmä (13)*

EBM-menetelmän hyviä puolia DMLS-menetelmään nähden ovat hieman parempi tulostuksen tiheys, joka voi olla jopa 99,9%. EBM on myös tulostusmenetelmänä hieman nopeampi kuin SLS- tai DMLS-menetelmät. Mutta edellä mainittuihin nähden jäävät EBM-tulosteiden pinnat hieman rouheammiksi, joka tarkoittaa enemmän työtä jälkikäsittelyssä. Vaikka EBM- ja DMLS-menetelmät ovat molemmat kalliita laitteistoja monimutkaisen rakenteensa vuoksi, vie EBM kuitenkin voiton kalliimpana tulostusmenetelmänä. (13.)

### **2.2.9 LOM-menetelmä**

LOM, eli engl. Laminated Object Manufacturing on nimensä mukaisesti laminoitukone, millä lämmitetään kuvan 11 mukaisesti kerros kerrokselta materiaalirullasta laserilla leikattu kohta kiinni edelliseen kerrokseen. Laserin leikkaa mallia vastaavan kerroksen muodon sekä reunoille jäävän osan, joka jää tukimateriaaliksi tuleville kerroksille.



KUVA 11. LOM-tulostusmenetelmä (14)

LOM on muihin tulostusmenetelmiin nähden melko hidas, laitteisto on melko massiivinen ja tulostuksesta syntyy todella suuri määrä ylijäävää materiaalia.

## 2.3 3D-tulostimien vertailua

### 2.3.1 Materiaalit

Osa 3D-tulostinten vertailua on vertailla niiden materiaaleja, kuinka ne vaikuttavat tulostetun mallin ulkonäköön, tarkkuuteen, kestävyys ja jälkikäsittelyn määrään. Taulukossa 1 on listattu mitä materiaaleja kullakin tulostusmenetelmällä on mahdollista tulostaa ja tekstissä on käyty läpi tarkempia tietoja kuten sitä, missä muodossa materiaalit ovat.

TAULUKKO 1. 3D-tulostusmateriaalit lajiteltuna (15)

	FDM	MJP	SLS	3DP	DMLS	EBM	SLA	DLP	LOM
ABS									
PLA									
PA									
TPU									
Ruostu- maton teräs									
Titaani									
Harts									

### 2.3.1.1 ABS & PLA

Kaksi yleisintä 3D-tulostuksessa käytettävää materiaalia ovat kestopuovut ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) ja PLA (PolyLactic Acid). Kestopuovilla tarkoitetaan puovia, joka lämmittäessä muuttuu pehmeäksi ja puovattavaksi sekä jäähtyessään takaisin kiinteäksi. Mikä kestopuovista tekee normaalista puovista poikkeavan, on niiden kyky säilyttää ominaisuutensa, vaikka niitä kuumennettaisiin ja jäädytettäisiin uudelleen ja uudelleen. Tähän tietysti liittyy muitakin muutujia jotka rajoittavat mitä kestopuoveja on mahdollista tai kannattavaa käyttää 3D-tulostuksessa. (16.)

PLA on biologisesti hajoavaa puovia mitä käytetään usein esim. ruuan pakkauspuovina. Sen suurimpana etuna on helppo tulostettavuus, sillä se vaatii matalan tulostuslämpötilan (180–230 °C) eikä lämmitysalustan käyttö ole pakollinen. Matalassa tulostuslämpötilassa on omat huonotkin puolensa, sillä se tarkoittaa, ettei PLA kestä lämpimiä olosuhteita ja voi alkaa muuttaa muotoaan jo 60 °C:ssa.

ABS on näistä kahdesta kestävämpi tulostusmateriaalina niin lämmönsietokykynsä kuin käsiteltävyytensäkin puolesta. Se on myös taipuisampaa ja kestää paremmin siihen kohdistuvaa voimaa. ABS on kuitenkin monimutkaisempi materiaali tulostaa. Se vaatii huomattavasti suuremman tulostuslämpötilan (210–250 °C) sekä kuumennetun lämmitysalustan. Lämmitysalustaa käytetään 3D-mallin liikkumisen ennaltaehkäisyyn alustalla sekä mallin vääntyilyn estämiseen, joka johtuu liian suuresta lämpötilavaihtelusta. (17.) Valmistusmateriaalistaan johtuen ABS on myös kuumentaessa terveystarve, sillä se vapauttaa kuumuessaan epäterveellisiä kaasuja. Näin ollen ABS-pohjaisten materiaalien tulostus vaatii hyvällä ilmanvaihdolla varustetun tilan (18.).

3D-tulostuksissa tarkkuuteen voidaan vaikuttaa monella tapaa, joista yksi on materiaalin tasainen paksuus koko materiaalirullan ajan. Materiaalin tarkkuus ilmoitetaan muodossa +/- x mm, millä ilmoitetaan, että materiaalin paksuus saattaa vaihdella lukeman x verran paksummaksi tai kapeammaksi. Tämä on useimmilla johtavilla brändeillä n. +/- 0,05 mm, mutta voi olla jopa niinkin pieni kuin +/- 0,02 mm. (18.)

### **2.3.1.2 PA**

PA eli PolyAmide on myös todella suosittu 3D-tulostusmateriaali, jota hyödynnetään usein kestävyttä vaativissa 3D-malleissa. Useimmiten PA-muovi on tehty synteettisestä kestumuvovista, nailonista. Nailon voi olla useimmille tuttu vaate-materiaalina, mutta siitä valmistetaan useita muitakin arkipäiväisiä esineitä kuten renkaiden ja köysiä. Useat auton osat on valmistettu nailonia hyödyntäen. (19.)

PA on ABS-pohjaisten materiaalien tapaan monimutkainen tulostaa, sillä se vaatii korkeat lämpötilat tulostaessa (n. 220 °C). Sen lisäksi sillä on tapana vääntyä jäähtyessään jopa helpommin kuin ABS-materiaaleilla. Tulostuksesta voi myös tulla hieman lankamainen ja vaatii siksi usein pientä jälkikäsittely laadukkaan ulkonäön takaamiseksi. PA:n sekaan lisätään usein 10–40 % verran lasikuituja kestävyuden parantamiseksi, mikä voi lisätä tulosteen loppukustannuksia. (19.)

Toisaalta PA on halpa materiaalina, sillä sitä on valmistettu lankana/tahnana jo pitkään eri käyttötarkoitukseen. Se on myös joustavaa ja kestää hyvin kulutusta (20.)

### **2.3.1.3 TPU**

TPU eli Thermoplastic PolyUrethane on muiden FDM-tulostusmenetelmälle sopivien materiaalien tapaan kestopuovia, joka eroaa joukosta muutamalla lisäominaisuudella. Se on todella joustavaa materiaalia ja muistuttaa ominaisuuksiltaan huomattavasti kumia. TPU kestää hyvin kulutusta ja iskuja, ja sillä on hylkivä vaikutus rasvoihin ja öljyihin. (21.)

Mitä TPU:n haittapuoliin tulee, sen tulostus voi olla todella hankalaa ja hidasta, sillä TPU tunnetaan taipuvuudestaan, eikä materiaali ole yhtään jäməkämpä ennen kuin jälkeenkään tulostuksen. Sillä on tapana pakkautua tahnan syöttömekanismiin, sillä useimpien FDM-tulostimien laitteistot on suunniteltu taipumattomille materiaaleille. Samasta syystä johtuen tulostusnopeutta täytyy usein hidastaa, sillä tulostin ei kykene syöttämään taipuisaa tahnaa riittävän nopeasti. Tilannetta ei myöskään yhtään helpota se, että tulostuslämpötilan täytyy olla sama kuin ABS-pohjaisten materiaalien kanssa (245–255 °C) sekä lämmitysalustan jopa 90 °C. (21.)

TPU on päivitetty versio TPE:stä (ThermoPlastic Elastomer), joka voitaisiin varsinaisesti luokitella tämän tulostusmenetelmän yläluokaksi. Molemmat ovat joustavia kumin kaltaisia kestopuoveja joista TPE on joustavampi, mutta sen kulutuksen sietokyky sekä öljyn ja rasvojen hylkivä vaikutus ovat heikompia. TPE:llä on myös tapana kutistua jäähtyessään hieman enemmän kuin TPU:lla. (21.)

### **2.3.1.4 Ruostumaton teräs**

Teräs eli engl. Steel on yleisesti 3D-metallitulostuksessa käytetty materiaali, joka useimmissa tapauksissa tulostetaan hyödyntämällä DMLS- ja EBM- tulostusmenetelmiä. Näissä tapauksissa teräs on jauhattu hienoksi jauheeksi, joka sulatetaan kappaleiden 2.2.5 ja 2.2.8 menetelmien mukaisesti.

Teräksestä on väitetty olemassa FDM-tulostimille tahna, mitä on mahdollista tulostaa PLA:n tavoin 190–200 °C:ssa. Näissä tapauksissa tahnasta sanotaan löytyvän jopa noin 85 % metallia sekä loput 15 % PLA:ta. (22.)

Siinä missä SLS-menetelmässä vaaditaan 160–200 °C:n laseri, DMLS-menetelmässä vaaditaan huomattavasti tehokkaampi laseri, sillä 3D-tulostuksessa käytettävät metallit sulavat vasta 1400 ja 1700 °C:n välillä, missä ruostumaton teräs on matalammasta päästä ja sulaa jo 1400 asteessa.

3D-tulostettavissa metalleissa on omat huonot puolensa, sillä ne vaativat suuret lämpötilat ja lopputulos on useasti hieman karkea, joka vaatii jälkikäsittelyä. Lämpötilojen kasvaessa suuremmiksi näkyvät lämmön vaikutukset vielä enemmän metalleissa kuin muoveissa, joten suunnittelijan täytyy olla tietoinen lämmön vaikutuksista eri osiin, osien mekaanisen kestävyuden muutoksista eri lämpötiloissa lämmittäessä ja jäähdyttäessä. Parhaissa olosuhteissa tällä materiaalilla on mahdollista tulostaa 0,04 mm:n tarkkuudella. (23.)

#### **2.3.1.5 Titaani**

Titaani eli engl. Titanium on teräksen kanssa todella kestävä metalli, mutta sillä on suurempi sulamislämpötila (1680 °C), joka tekee siitä hankalamman tulostettavan. Myös titaani ruostumattoman teräksen tapaan jättää melko karkean pinnan tulostetulle mallille, vaikka teoreettisesti titaanin tarkkuus onkin 10 µm tarkempi kuin ruostumattomalla teräksellä (0,03).

Sen lisäksi titaani on myös noin puolet kevyempää kuin ruostumaton teräs, joten se soveltuu useimpiin käyttötarkoituksiin paremmin. Myös titaanissa on otettava huomioon tulostettavien osien lämpötilavaihteluista johtuvat muutokset. (24.)

#### **2.3.1.6 Hartsit**

Hartsit eli engl. Resin on SLA- ja DLP- menetelmissä käytettävä materiaali, joka on epoksipohjaista nestettä, mitä voidaan kovettaa hyödyntämällä UV-valoa. Tällä menetelmällä voidaan saavuttaa erittäin tarkkoja 3D-tulostuksia, jotka vaativat vain vähäistä jälkikäsittelyä, joka sekin on vain pinnan puhdistus kovettamattomasta materiaalista. (25.)

Materiaalin puolesta hartsilla voidaan saavuttaa n. 0,03 mm tarkkuus. Hartsin hyvä puoli on, että siinä on materiaalina vähemmän tekijöitä jotka voivat vaikuttaa tulostuksen laatuun. Toisin kuin esim. tahnaa, jauhetta ja laminaattia hyödyntävät menetelmät, joissa materiaalin vaihteleva paksuus näkyy suoraan lopputuloksessa, on hartsi tasapaksua nestettä, joten partikkelit jotka ovat vain puoliksi kiinni kovetteessa, eivät ole silmin erotettavissa. (25.)

Huonoja puolia materiaalissa ovat sen kustannukset, sillä hartsi on melko kallista muihin materiaaleihin nähden ja tulostukset ovat hauraita, eivätkä kestä kuumuutta hyvin, sillä UV-kovetettu malli alkaa muuttaa muotoaan jo 65 °C:ssa. (25.)

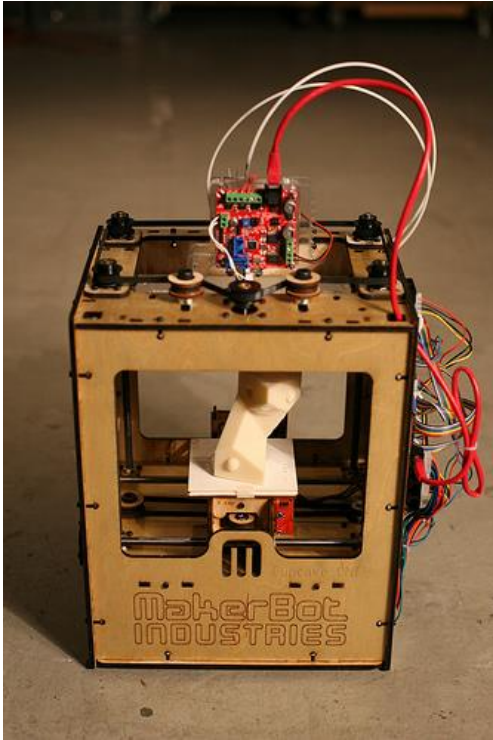
### **2.3.2 Kehitys**

Noin 10 vuotta sitten, kun 3D-tulostus ei vielä ollut kovin monen kuluttajan tiedossa eikä kiinnostanut suurinta osaa heistä ketkä niistä tiesivät. Tämä johtunee siitä, että kuluttajille suunnatut laitteet eivät toiminnallisuudeltaan olleet täysin valmiita, ne täytyi koota itse, ne olivat kalliita ja laitteiston käyttö vaati jatkuvaa kalibrointia. Laitteiden ulkonäkökään ei ollut kovin monen kuluttajan mieleen.

Vasta vuonna 2007 markkinoille tuli ensimmäinen alle 10 000 dollarin (8500 eur) 3D-tulostinjärjestelmä. Tämä nähdään yhtenä käännekohtana 3D-tulostukselle, sillä vuoden 2007 jälkeen 3D-tulostuksen kehitys lähti kunnolla liikkeelle, kun avoimen lähdekoodin 3D-tulostus alkoi saada huomattavaa näkyvyyttä ja tulostimien koko ja hinnat alkoivat lähestymään kuluttajamarkkinoita. (26.)

Vasta vuoden 2009 tammikuussa julkaistiin ensimmäinen kaupallinen 3D-tulostin, BfB RapMan. Laitteisto perustui avoimen lähdekoodin RepRap-konseptiin millä oli luotu jo vuonna 2004 itseään monistava 3D-tulostin. BfB RapMania myytiin settinä missä tuli kaikki tarvittavat osat, mutta käyttäjän täytyi itse koota ja kalibroida laite. Markkinoille tullessaan RapMan maksoi 750 puntaa, joka on n. 850 euroa. Kolme kuukautta myöhemmin 3D-tulostinvalmistaja Makerbot julkisti kuvan 12 mukaisen oman versionsa kaupallisesta 3D-tulostimesta. (26.)





*KUVA 12. Makerbotin ensimmäisestä 3D-tulostimesta, Cupcake CNC (27)*

Makerbot perustettiin vuonna 2009 tammikuussa, kun heidän ensimmäinen 3D-tulostimensa Cupcake CNC tuotiin markkinoille, jonka jälkeen markkinoille alkoi tulla 3D-tulostimia yhä useammalta eri taholta (27.). Toinen tunnettu 3D-tulostinvalmistaja Prusa alkoi valmistaa 3D-tulostimia kuluttajille vuonna 2010. Vuosi vuodelta molemmat sekä Makerbot että Prusa ovat valmistaneet toinen toistaan parempia 3D-tulostimia ja yrittäneet erottua joukosta omaksi edukseen. Taulukoissa 2. ja 3. on listat molempien valmistajien tulostimista julkistusvuoden mukaan, sisältäen tiedot tulostusnopeudesta, -koosta, tarkkuudesta, kehityksestä edelliseen malliin sekä hinnasta. Kehitys edelliseen eli muutokset edellisestä versiosta uudempaan on numeroitu seuraavasti:

1. Tarkempi
2. Nopeampi
3. Isompi/parempi tulostusalusta
4. Muita lisälaitteita
5. Helpommin rakennettavissa

Taulukosta 2 näkee Makerbotin 3D-tulostimien kehityksen vuosien varrella. Näistä tiedoista voimme todeta, että alkuaikoina Makerbotin tulostimet kehittyivät tasaista tahti paremmiksi useimmilta osa-alueilta. Vuoden 2012 jälkeen julkistetut 3D-tulostimet eivät kuitenkaan vaikuttaisi parantuneen teoreettisilta arvoiltaan melkein laisinkaa, elleivät jopa ole heikentyneet.

Taulukosta näkyy myös, että Makerbot on selvästikin panostanut aina vain suurempiin tulostusalustoihin, pitämällä tulostuksen tarkkuuden yhtenäisenä edellisten mallien kanssa. Jokainen päivitys on kuitenkin tuonut aina uusia lisätoimintoja kuten WI-FI:n, kameran, Ethernetin, LCD-näytön jne.

3D-tulostinta hankkivalle voi olla hankala päätös valita, ostaako Makerbotin uusimpia malleja vai tyytyykö vanhempaan malliin, jonka voi nykyisin hankkia puolta halvemmalla.

TAULUKKO 2. Makerbotin 3D-tulostimet järjesteltynä vanhimmasta uusimpaan

<b>Makerbot</b>	<b>Vuosi- malli</b>	<b>Tulostus- nopeus mm/s</b>	<b>Tulostus- koko mm</b>	<b>Tark- kuus mm</b>	<b>Kehitys edelli- sestä</b>	<b>Hinta € (sis. alv)</b>
<b>Cupcake CNC (28.)</b>	2009	80	100 x 100 x 130	0,5	-	650
<b>Thing-O- Matic (29.)</b>	2010	80	100 x 100 x 100	0,5	1, 2, 4, 5	1100
<b>Replica- tor (30.)</b>	2012	80	225 x 145 x 150	0,2–0,3	1, 2, 3, 4	1500
<b>Replica- tor 2 (31.)</b>	2012	100	284 x 152 x 155	0,1	1, 2, 3, 4,	2100
<b>Replica- tor 2X (32.)</b>	2013	100	284 x 152 x 155	0,1	4	2100
<b>Replica- tor Mini + (33.)</b>	2014	45	101 x 126 x 126	0,1	-	1100
<b>Replica- tor 5<sup>th</sup> gen (33.)</b>	2014	75	295 x 195 x 160	0,1	3, 4	2100
<b>Replica- tor Z18 (33.)</b>	2014	90	300 x 305 x 457	0,1	2, 3, 4	5500

Taulukosta 3 näkee vastaavat tiedot Makerbotin kilpailijan, Prusan 3D-tulostimista. Näistä tiedoista voidaan havaita, että Makerbottiin nähden Prusa on kiinnittänyt huomattavasti enemmän huomiota tulostusnopeuteen sekä tarkkuuteen.

Toisin kuin Ultimaker, Prusa myi ja myy 3D-tulostimiaan valmiiksi koottuna sekä tee-se-itse -pakettina, kun Ultimakerin 3D-tulostimia toimitetaan vain valmiiksi koottuina ja kalibroituina. Prusan tilaajalla on siis mahdollista säästää huomattavasti tilaamalla tulostin tee-se-itse-pakettina ja koota, sekä kalibroida se itse, jos tuntee siihen kykenevänsä.

Taulukkoon on merkitty kaksi hintaa pilkulla (,) erotettuna, joista ensimmäinen on tee-se-itse -paketin hinta ja jälkimmäinen valmiiksi kasatun. Mendel I1 ja - I2 olivat kuitenkin aikanaan malleja, jotka myytiin vain tee-se-itse paketteina tai erillisinä osina. Vuonna 2012 I3 mallin kohdalla Prusa aloitti myös valmiiden pakettien valmistuksen, joille tuli hintaan huomattava lisä. Tällä he kuitenkin mahdollistivat vähemmän 3D-tulostimia tai elektroniikkaa harrastavien asiakkaiden saamisen.

3D-tulostimien ulkonäköjä verrattaessa voidaan todeta, että Makerbot on kiinnittänyt huomiota laitteiden ulkoasuun todella paljon. Samalla kun Prusan tulostimet vaikuttavat vetoavan enemmän nikkareihin, joille ei ole niin väliä, onko pöydällä tyyllitelty laserleikatulla puu- tai metallirungolla ja muilla herkuilla varusteltu 3D-tulostin vai rautakehikkoinen kotitekoinen tekele, kunhan tulostus on laadukasta, nopeaa ja hinta on pieni.

TAULUKKO 3. Prusan 3D-tulostimet järjesteltyinä vanhimmasta uusimpaan

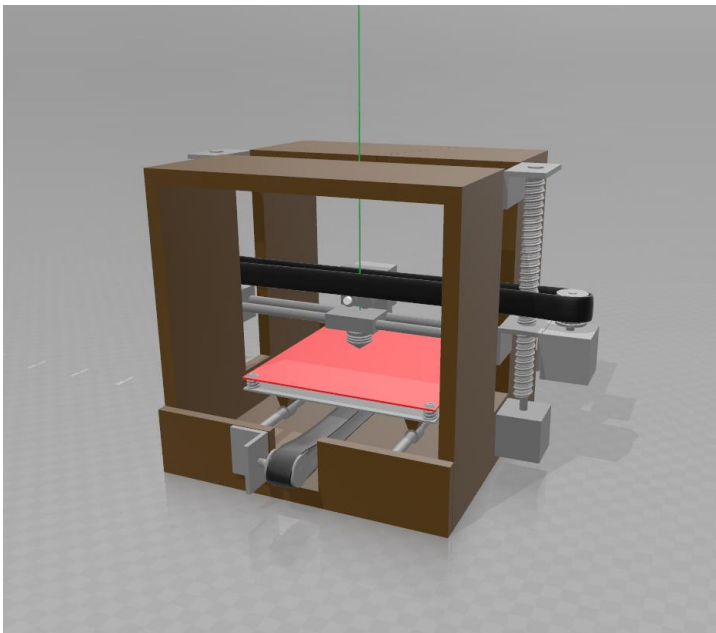
Prusa	Vuosi- malli	Tulostus- nopeus mm/s	Tulostus- koko mm	Tark- kuus mm	Kehitys edelli- sestä	Hinta € (sis. alv)
<b>Mendel I1</b> (34.)	2010	30–50	200 x 200 x 100	0,5	-	400
<b>Mendel I2</b> (35.)	2011	60–70	200 x 200 x 150	0,2–0,3	1, 2,3	670
<b>I3</b> (36.)	2012	75	200 x 200 x 200 (– 270)	0,1	1, 2, 3, 4, 5	250 - 850
<b>I3 MK2</b> (37.)	2016	100	250 x 210 x 200	0,05	1, 2, 3, 4, 5	590, 760
<b>I3 MK2S</b> (38.)	2017	100	250 x 210 x 200	0,05	-	620, 920
<b>I3 MK3</b> (39.)	2017	200+	250 x 210 x 210	0,05	1, 2, 3, 4	770, 1000

### 3 3D-TULOSTIMEN TIEDOT

Tavoitteena on suunnitella ja tehdä kustannusarvio parannelusta 3D-tulostimesta osana opinnäytetyötä. Ennen suunnittelun aloittamista täytyy vanhasta 3D-tulostimesta saada seuraavat tiedot:

- tarkkuus
- nopeus
- ja laitteiston tärkeiden komponenttien tekniset tiedot.

Nykyinen 3D-tulostin on kuvan 13 mukainen kokonaisuus. Sen tärkeimmät laitteiston osat, jotka vaikuttavat osaltaan päivitettävyyteen ja uudelleen käytettävyyteen, ovat seuraavien lukujen mukaiset.



*KUVA 13. Nykyinen 3D-tulostin (Liite 1)*

#### 3.1 Askelmoottorit

Perinteisillä sähkömoottoreilla (kuva 14) on mahdollista pyörittää sähkömoottorin roottoria vasta- tai myötäpäivään, mutta niiden tarkoituksena on yleensä jatkuva pyörimisliike, jota ei tarvitse äkisti pysäyttää.



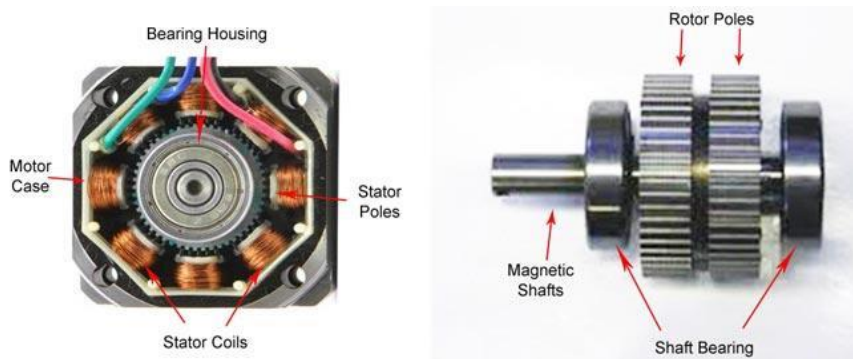
*KUVA 14. Kestomagneettimoottorin roottorista sekä staattorista (40)*

Askelmoottori on myös sähkömoottori, mutta perinteisestä sähkömoottorista poiketen askelmoottorin rottori on mahdollista pysäyttää haluttuun asentoon ja liikuttaa sitä tarkemmin halutun astemäärän verran suuntaan tai toiseen. Askelmoottorilla on myös mahdollista vaihtaa akselin pyörimissuuntaa nopeammin, kuin perinteisellä sähkömoottorilla. Askelmoottorilla on myös mahdollista jännittää akseli paikoilleen niin, ettei se liiku, vaikka siihen kohdistettaisiin voimaa tiettyyn pisteeseen asti kuitenkin.

### **3.1.1 Askelmoottoreiden toiminta**

Askelmoottori toimii samalla periaatteella, kuin perinteinenkin sähkömoottori, mutta sisältää useamman käämin joilla luodaan vaihtuvat polariteetit staattoriin. Askelmoottorin rottori on myös perinteiseen sähkömoottorin rottoriin verrattuna erilainen. Se koostuu useasta eri osasta jotka kokonaisuutena luovat tarkan ja pienikokoisen askelmoottori-paketin.

Askelmoottorin osat voidaan luokitella kuvan 15 mukaisesti rottorin osiin: akseliksi (magnetic shaft), akselin laakereiksi (shaft bearings), rottorin navoiksi (rotor poles), sekä staattorin osiin: käämeiksi (stator coils), staattorin navoiksi (stator poles), moottorin koteloksi (motor case) sekä laakeripesäksi (bearing housing).



*KUVA 15. Askelmoottorin sisällöstä (41)*

Kuvista 14 ja 15 voidaan havaita kestmagneettimoottorin ja askelmoottorin erot. Askelmoottori sisältää enemmän käämejä ja pyöritettävä akseli sisältää eri polariiteeteilla varustettuja "rattaita", joiden piikit toimivat akselin kääntimenä. Näiden muutosten ansiosta akselin tarkka kääntäminen sekä suuri pitomomentti (holding torque) on mahdollista.

### **3.1.2 Askelmoottoreiden yhteys 3D-tulostamiseen**

Lähes kaikki 3D-tulostusmenetelmät hyödyntävät tavalla tai toisella askelmoottoreita. FDM-tulostusmenetelmä hyödyntää yleensä useita askelmoottoreita, joilla liikutetaan joko tulostuspäätä tai alustaa, jolle malli tulostetaan.

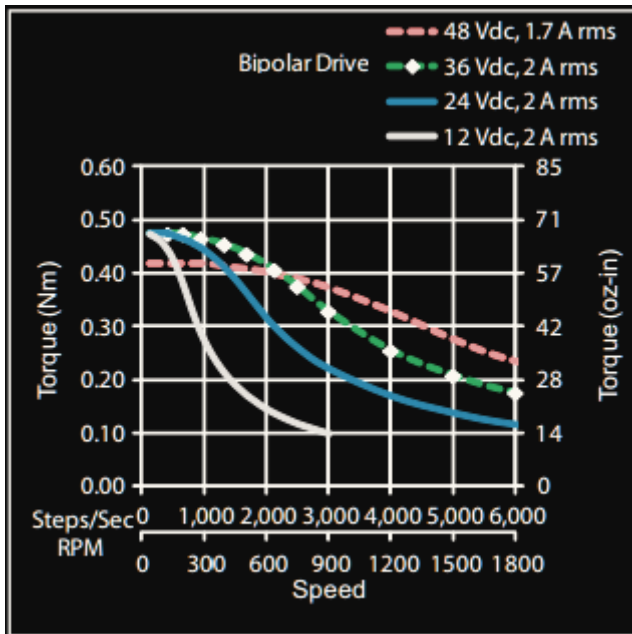
DLP- ja SLA-menetelmissä tarvitaan yleensä vain yhtä askelmoottoria, sitä hyödynnetään tulostusalustan laskemisessa tulostuksen edetessä.

### **3.1.3 Askelmoottoreiden määrittäminen eri käyttötarkoituksiin**

Ensimmäisenä tehtävänä askelmoottorin määrittämisessä 3D-tulostimeen on selvittää, millaiseen käyttötarkoitukseen sitä tullaan tarvitsemaan. 3D-tulostimen toimintatavasta riippuen täytyy liikutettavien akselien vaatimat liike-energiat laskea ja niiden pohjalta määrittää kyseiseen käyttötarkoitukseen soveltuva askelmoottori. Askelmoottoreissa pitää ottaa huomioon myös väännön muutos tulostusnopeuden kasvaessa, joka voidaan usein todeta kuvan 16 tyyllisestä kaaviosta. Siinä pystyakselilla näkyy vääntö vaakatason eri nopeuksille ja viivan värillä



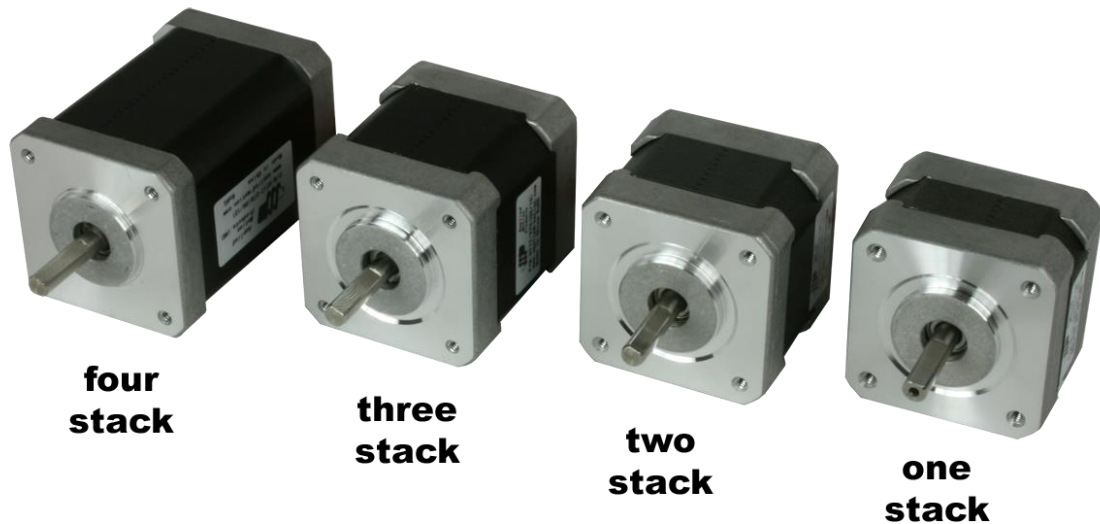
kerrotaan, millä jännitteellä kyseinen käyrä on laskettu sekä kerrottu, mikä on kyseiselle jännitteelle sallittu maksimi virransaanti.



KUVA 16. NEMA17-askelmoottorin väännön muutos nopeuden muuttuessa eri jännitteillä (42)

### 3.1.4 Nykyisessä tulostimessa olevat askelmoottorit

Askelmoottoreina toimivat 5 kappaletta "two stack" eli 2-kerroksisia NEMA17-askelmoottoreita, jotka vastaavat kuvan 17 toista askelmoottoria oikealta. Askelmoottorit valittiin aikanaan 3D-tulostimeen sillä perusteella, että ne olivat suosituimpia tee-se-itse 3D-tulostimien askelmoottoreita. Niitä oli myös paljon saatavilla ja ne sopivat vähätuloisen opiskelijan lompakolle täydellisesti.



KUVA 17. 4-1-kerroksiset NEMA17-askelmootorit (43)

Nimen alkuliitteellä NEMA tarkoitetaan NEMA-ammattijärjestön kehittämää sähkömoottoreiden koko-standardia. Kyseinen standardi määrittää sähkömoottorin etupaneelin ja akselin suun kehyksen koon sekä kiinnitysreikien sijainnit. (44.) Näin ollen esim. NEMA17-askelmootoreiden väleillä voi olla melko suuriakin muutoksia, niin askelmootorin pituuden kuin sen tarkkuuden ja tehojenkin suhteen.

Kierretankoja pyörittävät NEMA17-askelmootorit joiden datalehdessä (42.) voidaan todeta, että kyseisen 2-kerroksisen askelmootorin vääntö on parhaimmillaan n. 0,40 Nm. Kun halutaan tietää kierretangon avulla nostettava määrä, voidaan kaavaa 1 hyödyntää taulukon 4 symboleiden selityksien kanssa.

KAAVA 1

$$\text{Vääntö(Nosto)} = \frac{F * d_m}{2} * \left( \frac{L + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m - f L \sec \alpha} \right) + T_c$$

Kaavasta 1 ratkaisemalla saadaan selville, että yhdellä askelmootorilla ja luvun 2.4.5 mukaisella kierretangolla on teoriassa mahdollista nostaa 49,7 kg. (45.)

TAULUKKO 4. Kaavan symboleiden selitykset (46)

Symboli	Selitys
$F$	Kuorma
$f$	Kierteen kitkakerroin
$d_m$	Keskihalkaisija
$L$	Kierteen kierroksen pituus
$T_c$	Kärkikauluksen kitkamomentti (Frictional torque of the thrust collar)

### 3.2 Prosessori

Myös vanhan 3D-tulostimen ”keskusyksikkö” (kuva 18.) Arduino Mega 2560 on valittu sen suosion, mutta myös sen hallittavuuden takia. Mega on siitä hyödyllinen kehitysalusta, että sitä on mahdollista hyödyntää uudelleen ja uudelleen eri projekteissa ja sen ominaisuuksien ansiosta se soveltuu useita muita kehitysalustoja paremmin laajempiin laitekokonaisuuksiin. Nämä ominaisuudet ovat suuri määrä (54) sisään- ja ulostuloliitännöitä, joita on mahdollista ohjata ja lukea käyttötarkoituksen mukaan.



*KUVA 18. Arduino Mega 2560 kehitysalusta (47)*

### **3.3 Virtalähde**

Koska askelmoottoreiden tehonvaatimukset ovat niin suuret, ainakin Arduinojen skaalassa, tarvitsee niille tuoda virta jostain muualta kuin suoraan Arduinolta. Se on mahdollista ulkoisella virtalähteellä, jonka virkaa tässä tapauksessa toimittaa vanha 400 watin tietokoneen virtalähde, millä on mahdollista syöttää +12 V, -12 V, +5 V, -5 V ja 3,3 V jännitteitä. Askelmoottoreiden lisäksi laitteistossa kuluttaa virtaa suoraan virtalähteeltä tulostuspään lämmitysvastus, lämmitysalusta, sekä Arduino Mega. Muut komponentit hyödyntävät Arduino Megalta saatavaa virtaa, joka on laskettu sen maksimi-virrankulutukseen.

Taulukosta 5 voimme todeta, että 400 watin virtalähde olisi riittävä kyseiselle laitteistolle, vaikka kaikki komponentit toimisivat täydellä teholla samanaikaisesti. Virtalähteen osalta laitteistoon on siis mahdollista lisätä vielä komponentteja.

TAULUKKO 5. 3D-tulostimen komponenttien tehonkulutukset

Osa	Tehonkulutus (Max)
Askelmoottorit	5 kpl x 12 V x 2 A = 120 W (42.)
Tulostuspään lämmitysvastus	12 V / 4,7 ohm * 12 V = 30,6 W (48.)
Lämmitysalusta	12 V x 15 A = 180 W (49.)
Arduino Mega 2560	12 V * 1 A = 12 W (50.)
<b>Yhteensä</b>	343 W < 400 W

### 3.4 A4988 Askelmoottorin ohjain (Stepper motor driver)

Askelmoottorin ohjainta hyödynnetään laitteissa, joissa mikrokontrollerin läpi ei ole mahdollista syöttää suurempia jännitteitä, virtoja ja/tai tarkkaa signaalia. Kyseisellä piirillä on mahdollista syöttää askelmoottorille jopa 70 watin verran tehoa, 35 voltin jännitteellä, sekä tehdä jopa 1/16 mikroaskelluksia. (51.)

### 3.5 Akseleiden liikutusmenetelmät/teoreettinen tarkkuus

3D-tulostin hyödyntää pystyakselin liikutukseen kierretankoja tulostimen molemmilla puolilla, joilla nostetaan vaaka-akselia liikuttavaa tasoa. Kierretangoissa on hyödynnetty M8-kierteellä tehtyjä kierretankoja, joka tarkoittaa, että yksi kierros tangossa on 1,25 mm. Tästä voidaan päätellä, että yksi kierros liikuttaa pystyakselia 1,25 mm ylemmäs ja yhteen kierrokseen on mahdollista sisällyttää 200 askelta, voidaan kierretangoilla siis nostaa vaaka-akselia 0,0063 mm:n tarkkuudella teoriassa.

Vaaka-akseleiden liikutukseen on kuitenkin hyödynnetty kuvan 19 mukaista väkipyörää sekä hihnaa. Koska väkipyörän halkaisija on 23 mm, voidaan tästä todeta, että kumpaakin vaakatason akselia on mahdollista liikuttaa 0,0361 mm:n teoreettisella tarkkuudella. Tämä voidaan laskea hyödyntämällä kaavaa: halkai-

sija kertaa pii jaettuna yhden kierroksen askeleiden määrällä, joka tässä tapauksessa on kyseisen askelmoottorin maksimi (200 askelta).



*KUVA 19. 3D-tulostuksessa käytetyt hammasrattaat ja hihna (52)*

### **3.6 Olemassa olevan laitteiston kustannukset**

Vuonna 2015 3D-tulostimien hinnat olivat huomattavasti kalliimmat kuin mitä ne maksoivat vuoden 2017 loppuneljänneksellä. Tämä johtuu suurimmalta osin siitä, etteivät 3D-tulostimien osat ole muuttuneet lähes ollenkaan kahdessa vuodessa. Vuonna 2015 valmistetut komponentit ovat muuttuneet vanhentuneiksi tekniikoiksi, eikä niistä voi enää pyytää taulukon 6 mukaisia hintoja.

TAULUKKO 6. Vuonna 2015 rakennetun 3D-tulostimen hintajaottelu osakohtaisesti

Tuote	Hinta € (sis. alv)
5 x Nema17-askelmoottoreita	70
Tahnan syöttömekanismi	15
Laakerit	15
Hihna ja hammasrattaat	30
Arduino + RAMPS-ohjainalusta + A4988-ajurit -setti	30
Lämmitysalusta	15
Tulostuspää	50
Termistori-lämpösensori	0,70
Mänty-levy, 300 x 1200 x 12 mm	10
6 x kulmarauta	25
8 mm metallitankoa 2 m	10
8M kierretankoa 1 m	10
pultit & mutterit	3
<b>Yhteensä</b>	<b>283,7 €</b>

### 3.7 Saman hintaluokan kaupallisia tulostimia

Vuonna 2015 rakennetusta 3D-tulostimesta syntyi kustannuksia n. 280 euroa, sekä huomattava määrä työtä. Saman hintaluokan 3D-tulostinta olisi tuohon aikaan ollut melko hankala löytää, joten alla on lueteltuna kaupallisia 3D-tulostimia joiden hinnat ovat olleet julkistuspäivänään alle 500 euroa. Luettelo on tehty vuosilta 2015 sekä 2017.

Taulukoiden 6 ja 7 hintoja vertailemalla voidaan todeta, että vuonna 2015 lähimmäksi vastaavia hintoja pääsee Prusan I3 -malli mistä on tehty useita erilaisia toteutuksia joista halvimmat ovat n. 280 euroa. Tarkkuuksien ja nopeuden osalta itsetehty 3D-tulostin ei aivan vedä vertoja kaupallisille, vaikka niistäkin löytynee omat heikot puolensa.

Vuosina 2016 ja 2017 ilmestyi markkinoille suuri määrä tarkkoja, nopeita ja halpoja 3D-tulostimia. Taulukoita 7 ja 8 vertaillen, voidaan havaita, ettei tarkkuuden eikä nopeuden osalta ole syntynyt merkittävää kehitystä. Kehitys on selvästi ollut ulkonäköön ja lisätoimintoihin kohdentuvaa, mikä on lisännyt huomattavasti harrastelijoiden määrää 3D-tulostajien keskuudessa.

*TAULUKKO 7. Vuoden 2015 halvemman luokan kaupalliset 3D-tulostimet*

<b>3D-tulostin</b>	<b>Vuosi-malli</b>	<b>Tulostus-nopeus mm/s</b>	<b>Tulostus-koko mm</b>	<b>Tarkkuus mm</b>	<b>Hinta € (sis. alv)</b>
<b>Kossel (53.)</b>	2012	320	260 x 260 x 275	0,03	340
<b>Printrbot (54.)</b>	2012	60	101 x 101 x 114	0,05	340
<b>Prusa I3 (36.)</b>	2012	75	200 x 200 x 200 (-270)	0,1	280 – 850



TAULUKKO 8. Vuoden 2017 halvemman luokan kaupalliset 3D-tulostimet

3D-tulostin	Vuosi- malli	Tulostus- nopeus mm/s	Tulostus- koko mm	Tarkkuus mm	Hinta € (sis. alv)
<b>Monoprice MP Select Mini</b> (55.)	2017	55	120 x 120 x 120	0,1	170
<b>M3D Micro Re- tail</b> (55.)	2016	60	116 x 109 x 113	0,05	210
<b>XYZprinting da Vinci Mini</b> (55.)	2016	120	150 x 150 x 150	0,1	245
<b>Monoprice Maker Select V2</b> (56.)	2017	100	200 x 200 x 180	0,1	255
<b>New Matter MOD-t</b> (57.)	2016	80	150 x 100 x 125	0,05	255
<b>Printbot Play</b> (55.)	2016	80	100 x 100 x 130	0,05	340
<b>Wanhao Dupli- cator i3 Plus</b> (55.)	2017	70	200 x 200 x 180	0,1	390

### 3.8 Jatkokehitysmahdollisuudet

Kun 3D-tulostin asetettiin vuonna 2017 testiin, saavutettiin sillä n. 60 mm/s tulostusnopeus ja n. 0,3 mm tarkkuus. Vaikka tulostusalusta on kooltaan 214 x 214 mm, todettiin tulostuskooksi kuitenkin 200 x 200 x 150 mm, joka tarkoittaa, että 14 mm vaaka-akseleista jää käyttämättä.

Tulostuksen laatu oli heikko, tarkkuus vaihteleva eikä sillä ollut mahdollista tulostaa geometrisesti mutkikkaita malleja. Ongelmaksi syntyi myös muiden kuin PLA:n materiaalien tulostus, joka ei onnistunut tulostuspään matalan lämpötilan

vuoksi. Tulostuspään ollessa ”yksinkertainen” ei sillä ollut mahdollista myöskään vaihtaa eri väristä tahnaa kesken tulostuksen.

Kun 3D-tulostinta alettiin tutkia tarkemmin, havaittiin, että vaihteleva tarkkuus johtui väljentyneistä kierretangon ja muttereiden kierteistä sekä tankojen ja laakereiden kulumisesta. Heikko laatu juontaa juurensa epätarkasta rungon kasauksesta, joka on ollut ongelmana jo alusta asti.

Näihin vikoihin olisi mahdollista vaikuttaa hankkimalla uudet tangot, mutterit sekä laakerit. Heikkoa laatua ei kuitenkaan ole mahdollista korjata muuten kuin rakentamalla runko joko täysin uusiksi tai hankkimalla valmis runko.

## 4 PÄIVITETYN 3D-TULOSTIMEN SUUNNITTELU

### 4.1 Päivityksen suunnittelu

Luvussa 2.6 käytiin läpi asioita, jotka ovat pielessä nykyisessä 3D-tulostimessa sekä kerrottiin mistä ne johtuvat. Suuri osa ongelmista johtui kuluneista osista sekä huonosta suunnittelusta, mikä johti uusien osien ja/tai rungon harkintaan.

Tavoitteena olisi tehdä suunnitelma, jossa käytäisiin läpi, mitä kyseiseen tulostimeen pitäisi hankkia ja paljonko se tulisi maksamaan sekä mitä päivityksellä voitaisiin saavuttaa. Arviolla voidaan myös määritellä, tulisiko kaupallinen laite halvemmaksi tai olisiko se muuten vain parempi. Jos ei, niin vertailtaisiin, miltä osin uudet osat olisivat parempi vaihtoehto kuin uusi kaupallinen.

Tarkkuuden osalta tavoitteena olisi saavuttaa teoreettinen 0,1 mm kerrospaksuus sekä teoreettinen n. 80 mm/s tulostusnopeus, jotka vastaavat suurinta osaa uudempien kaupallisten 3D-tulostimien tarkkuuksista.

Helpoin vaihtoehto rungon osalta olisi hankkia valmis runko, joiden hinnat alkavat 20 eurosta ja nousevat valmiiden 3D-tulostimien hintoihin. Verkosta, varsinkin Ebay:stä löytyy huomattava määrä 3D-tulostin-tarvikkeita ympäri maailmaa. Sieltä löytyi useita eri vaihtoehtoja valmiille rungoille, joista osassa niissä oli mukana laakerit, kierretangot ja kaikki muut mitä varsinaisesti voisi rungoksi luokitella.

Jos päivitys päätettäisiin tehdä, lisättäisiin siihen todennäköisesti muita ei-tarkkuuteen tai tulostusnopeuteen vaikuttavia lisätoimintoja. Niitä olisivat WIFI-moduuli sekä LCD-näyttö. Näillä voitaisiin saavuttaa 3D-mallin lataus verkon yli, virhetiloista ilmoittaminen verkkosivustolle tai puhelin-sovellukseen sekä tulostuksen vaiheen ilmaiseminen niin vastaanottaville laitteille kuin LCD-näytölle.

## 4.2 Kustannusarvio

Kuten päivityksen suunnittelussa käytiin läpi, tarkoituksena on tehdä kustannusarvio osista, jotka vaaditaan, että tulostin täyttää ennalta määrätyt reunaehdot. Kovin montaa vaihtoehtoa rungon kasaukselle ei löytynyt, sillä suurin osa kaupattavista 3D-tulostinten rungoista oli eri materiaaleista tehtyjä Prusa I3 runkoja. Osa myynnissä olleista rungoista oli myös niin alkutekijöissä, että samaan lopputulokseen pääsisi ostamalla rautakaupasta metalliputkea, sahaamalla sen osiin ja poraamalla niihin muutaman reiän.

Ainoita todistettavasti laatuskaalaan mahtuvat 3D-tulostimien rungot olivat taulukon 10 kaksi runkovaihtoehtoa, joista ensimmäiseen täytyy hankkia lisäksi myös kaikki taulukon 9 tuotteet ja joista jälkimmäiseen runkoon tarvitaan samasta taulukosta vain tuotteet 8, 9 ja 10.

TAULUKKO 9. Päivitykseen tarvittavien komponenttien hintataulukko

	Tuote	Tarvittava määrä (kpl)	Hinta/kpl (sis. alv)	Hinta (yhteensä) (sis. alv)
1.	8 mm metallitanko (58.)	6	6 €	36,00 €
2.	8 mm kierretankoja (59.)	2	4 €	8,00 €
3.	Lineaari laakereita (60.)	7	0,66 €	4,62 €
4.	Kierretanko runkoa varten/metri (61.)	3	5,50 €	16,50 €
5.	Prusa I3 muoviosat (62.)	1	30 €	30,00 €
6.	Hihna ja hammasrattaat (63.)	1	4,43 €	4,43 €
7.	Askelmoottorin akseliliitin (64.)	2	1,02 €	2,04 €
8.	Tuplasuutin-tulostuspää (65.)	1	35 €	35,00 €
9.	ESP8266-WIFI-moduli (66.)	1	1,80 €	1,80 €
10.	16x2 LCD-näyttö (67.)	1	1,50 €	1,50 €
	<b>Yhteensä</b>	25	89,91 €	139,89 €

TAULUKKO 10. Kustannusarvio päivityksestä

Runko	Hinta (pelkkä runko)	Erikseen tarvittavat tuotteet	Hinta (yhteensä) (sis. alv)
Prusa I3 Vanerirunko (68.)	21 €	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	160,89 €
Prusa I3 akryyliseti (69.)	120 €	8, 9, 10	158,3 €

Näillä tuotteilla eli noin 160 eurolla olisi mahdollista saada rakennettua 3D-tulostin, joka täyttää aiemmin määritetyt vaatimukset. Näille kokonaisuuksille on määritetty maksimi tulostusnopeudeksi n. 100 mm/s, tarkkuudeksi 0.1 mm sekä tulostuskoko alkuperäisen tulostusalustan verran, mutta korkeuden osalta hieman korkeampi eli 200 x 200 x 180 mm.

Taulukkoa 8 ja kasatun kokonaisuuden arvoja vertailemalla voidaan havaita, että taulukon tulostimet ovat kaikki hieman kalliimpia kuin päivityksestä koituva summa. Muutamat taulukon 8 3D-tulostimista ovat melko lähellä samoja arvoja, jotka aiemmin määritettiin päivitykselle tavoitteeksi. Niitä ovat XYZprinting da Vinci Mini, Monoprice Maker Select V2 sekä New Matter MOD-t.

### 4.3 Vertailu

#### 4.3.1 XYZprinting Da Vinci Mini

XYZprinting da Vinci Mini on kuvan 20 mukainen 3D-tulostin, jolla on mahdollista saavuttaa vertailun nopein tulostusnopeus 120 mm/s. Tulostuskoko on kuitenkin hieman pienempi kuin päivitetyn version, joka on vain 150 x 150 x 150 mm. Kuitenkin tarkkuudessa on päästy samaan loppulukemaan, joka todennäköisesti tarkoittaa, että kyseisellä tulostimella on mahdollista tulostaa tarkempia malleja nopeuteen nähden. Tulostimesta löytyy WIFI, joka mahdollistaa langattoman tulostamisen sekä tulostuksen etenemisen tarkkailun. (55.)

Kuitenkin, 3D-tulostin ei ole avoimeen lähdekoodiin perustuva, joten laitteiston modifiointi jälkikäteen voi olla hankalaa. 3D-tulostimen käytön laajuutta rajoittaa

lämmitysalustan uupuminen sekä tehoton tulostuspää, jotka rajaavat huomattavasti tulostettavien materiaalien määrää. Tulostimesta ei myöskään löydy minikäänlaista näyttöä/ruutua, joka olisi hyödyllinen lisävaruste. Tulostin maksaa n. 245 € ja on vertailuun päässeistä kolmesta tulostimesta halvin. (55.)



*KUVA 20. XYZprinting Da Vinci Mini- 3D-tulostin (55)*

#### **4.3.2 Monoprice Maker Select V2**

Kuvan 21 mukainen Monoprice Maker Select V2 on hieman edellistä kaupallista tulostinta kalliimpi vaihtoehto, joka maksaa n. 255 €. Sen tekniset tiedot ovat melkein samat kuin päivitetyllä versiolla, mutta siitä jää uupumaan langattoman verkon mahdollisuus. Kyseisellä 3D-tulostimella on mahdollista tulostaa myös kuumemman tulostuspään ja lämmitysalustan vaativia materiaaleja. Tulostimen ohjelmisto perustuu avoimeen lähdekoodiin, joten sitä on helpompi muokata omaan käyttötarkoitukseen sopivaksi ja siitä löytyy myös mahdollisuus hyödyntää SD-korttia 3D-mallin siirrossa. Laitteisto sisältää myös pienen LCD-näytön. (56.)

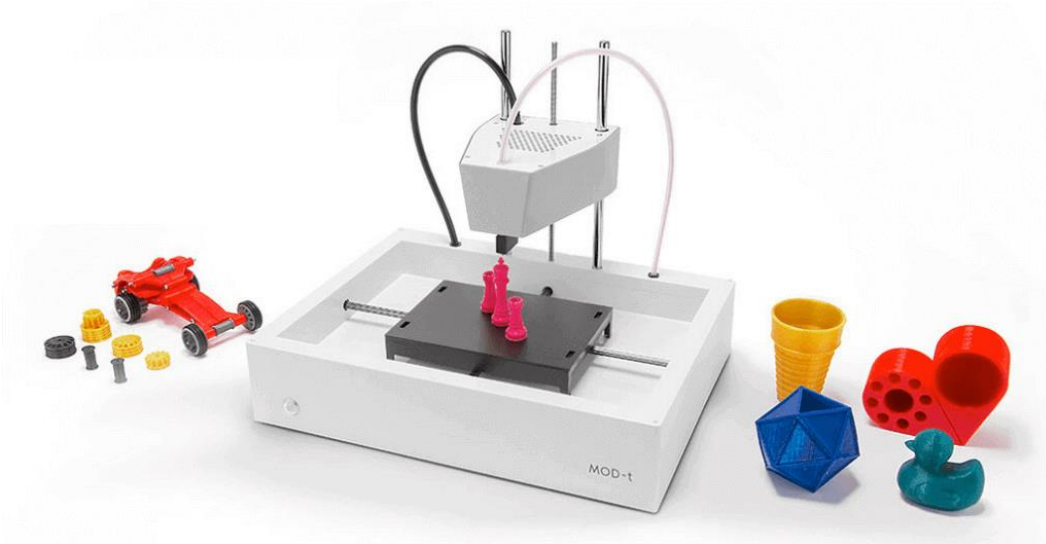


*KUVA 21. Monoprice Maker Select V2- 3D-tulostin (55)*

#### **4.3.3 New Matter MOD-t**

Samaan hintaan edellisen 3D-tulostimen kanssa sijoittuu kuvan 22 New Matter MOD-t, joka on näistä kolmesta teknisiltä tiedoiltaan heikoin, sillä vaikka siitä löytyy etuna WIFI sekä 0,05 mm tarkempi tulostusjälki, on sen tulostusnopeus hitaampi ja tulostuskoko pienempi kuin muissa vertailun kohteissa. Kuten ensimmäisessäkin vertailun 3D-tulostimessa, ei tästäkään löydy minkäänlaista näyttöä tai ruutua. (57.)

Muista poiketen kyseiseen 3D-tulostimen ulkonäköön on kuitenkin panostettu hieman enemmän ja se vaikuttaa hieman enemmän laitteelta, jota säilyttäisi mielusti työpöydällä.



*KUVA 22. New Matter MOD-t- 3D-tulostin (55)*

#### **4.3.4 Yhteenveto vertailusta**

Vaikka kaikki valitut tulostimet ovat todella kehittyneitä ja niistä löytyy omat hyvät ja huonot puolensa, päädyttiin kuitenkin siihen lopputulokseen, ettei kaupallisena versiona ole mahdollista saada yhtä halvalla yhtä hyvää 3D-tulostinta kuin olisi päivittämällä vanhan paremmaksi. Vaikkei mikään kaupallisista laitteista ollut tarpeeksi hyvä päivityksen rinnalla, ei Monoprice Maker Select V2 jäänyt kauaksi valinnasta. Ellei käytössä olisi jo ennestään 3D-tulostinta, Monoprice Maker Select V2 olisi takuuvarma hankinta.

Taulukosta 8. olisi löytynyt muutama halvempikin 3D-tulostin, joita ei valittu vertailuun mukaan niiden selkeästi pienemmän tulostusnopeuden sekä tulostuskoon perusteella. Tältä pohjalta niillä ei olisi pienintäkään mahdollisuutta tulla valituksi. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, etteivätkö ne olisi hyviä ja halpoja vaihtoehtoja ensimmäistä 3D-tulostintaan harkitsevalle.



## 5 YHTEENVETO

3D-tulostamisen suosio on jatkuvassa kasvussa ja valmistajat tekevät jatkuvasti entistä parempia ja halvempia laitteistoja sekä materiaaleja. Myös uusia tulostusmenetelmiä tulee yleiseen tietoon yhä vain enemmän, joista osa on monimutkaisia ja loput vielä enemmän. 3D-tulostusmateriaaleja on liuta eri variaatioita, joilla kaikilla on omat hyvät ja huonot puolensa. Niistä voidaan todeta kuitenkin yksi selkeä linja jossa kuumemman tulostuslämpötilan vaativat materiaalit ovat kestävämpiä, mutta toisaalta hankalampia tulostaa. Siinä missä matalamman lämpötilan materiaalit ovat helpompia tulostaa, ovat ne joko herkkiä sulamaan ja särky-mään ja/tai taipuvat helposti.

Myös tulostusmenetelmillä on eroja, sillä osalla niistä on mahdollista tulostaa erittäin tarkkoja malleja ja toisilla mitä erikoisimpia materiaaleja. Loput menetelmät hyödyntävät mahdollisesti samoja materiaaleja, mitä muissakin menetelmät, mutta tulostus tapahtuu aivan eri tavoin. Vaikuttaisi, että lähestulkoon kaikilla 3D-tulostimilla on ainakin yksi yhteinen tekijä; kaikki hyödyntävät jollain tapaa askelmootoreita tai muuta tarkkuutta tarjoavaa sähkömoottoria tulostettavan mallin aikaansaamiseksi.

Olemassa olevasta 3D-tulostimesta tuli lopuksi käsitys, että sen laitteistolla olisi mahdollista saavuttaa todella tarkka ja melko nopea FDM-tulostin. Se vaatisi, että pohjalla olisi jykevä runko, tarkat laakerit ja tangot sekä mutterit. Jos siihen olisi vuonna 2015 hankkinut kunnollisen rungon, olisi se ollut hintansa väärti. Kuten tekstissä ja taulukolla käytiin läpi, olivat 3D-tulostimet silloin huomattavasti kalliimpia. Niin olivat osatkin, sillä samat osat, jotka tulostinta hankittaessa maksoivat n. 280 €, maksaisivat nykypäivänä hieman päälle 150 €.

## LÄHTEET

1. 2D-printing vs 3D-printing. 2016. Morphedo. Saatavissa: <http://blog.morphedo.com/2d-printing-vs-3d-printing/>. Hakupäivä 3.10.2017.
2. Löfgren, Jani 2015. 3D-tulostusmenetelmien käyttö auton osien valmistuksessa. Opinnäytetyö. Helsinki: Metropolia Ammattikorkeakoulu, auto- ja kuljetustekniikan tutkinto-ohjelma. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/92321/Lofgren\\_Jani.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/92321/Lofgren_Jani.pdf?sequence=1). Hakupäivä 1.08.2017.
3. 3D printing guide. 2016. Obsessively Geek 3D. Saatavissa: <http://og3dprinting.com/3d-printing/>. Hakupäivä 3.10.2017.
4. Peura, Risto 2017. 3D-tulostaminen ja sen soveltaminen rakentamiseen. Opinnäytetyö. Seinäjoki: Seinäjoen Ammattikorkeakoulu, rakennustekniikan tutkinto-ohjelma. Saatavissa: [http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/125901/Peura\\_Risto.pdf?sequence=2](http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/125901/Peura_Risto.pdf?sequence=2). Hakupäivä 1.08.2017.
5. Stereolithography. 2008. CustomPartNet. Saatavissa: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>. Hakupäivä 3.10.2017.
6. Holland, Sam. 2013. Lupe: An open source 3D printer. Blogspot. Saatavissa: <http://lupe3d.blogspot.fi/2013/02/dlp-printing-pt-1-basics.html>. Hakupäivä 3.10.2017.
7. What is MJP. 2017. 3D Systems. Saatavissa: <https://www.3dsystems.com/resources/information-guides/multi-jet-printing/mjp>. Hakupäivä 10.10.2017.
8. Inkjet printing. 2008. CustomPartNet. Saatavissa: <http://www.custompartnet.com/wu/ink-jet-printing>. Hakupäivä 10.10.2017.
9. Direct Metal Laser Sintering. 2008. CustomPartnet. Saatavissa: <http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>. Hakupäivä 11.10.2017.
10. Selective Laser Sintering. 2008. CustomPartNet. Saatavissa: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>. Hakupäivä 3.10.2017.

11. 3D Printing. 2008. CustomPartnet. Saatavissa: <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>. Hakupäivä 11.10.2017.
12. Electron Beam Melting. 2017. CalRAM. Saatavissa: <http://calraminc.com/how-it-works-electron-beam-melting/>. Hakupäivä 11.10.2017.
13. Electron Beam Melting. 2017. Additively. Saatavissa: <https://www.additively.com/en/learn-about/electron-beam-melting>. Hakupäivä 11.10.2017.
14. Laminated Object Manufacturing. 2008. CustomPartNet. Saatavissa: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>. Hakupäivä 11.10.2017.
15. 3D Systems. 2017. 3D Systems. Saatavissa: <https://www.3dsystems.com/shop/cartridges>. Hakupäivä 13.10.2017.
16. PLA vs. ABS: What's the difference? 2017. 3D Hubs. Saatavissa: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/pla-vs-abs-whats-difference#what-are-abs-and-pla>. Hakupäivä 24.10.2017.
17. Rohringer, Sean. 2017. PLA vs ABS: Filaments for 3D Printing Explained & Compared. All3DP. Saatavissa: <https://all3dp.com/pla-abs-3d-printer-filaments-compared/>. Hakupäivä 24.10.2017.
18. Olson, Maryanne. 2016. What To Look For When Selecting Filament. AIO Robotics. Saatavissa: <http://www.zeus.aiorobotics.com/single-post/2016/08/09/What-To-Look-For-When-Selecting-Filament>. Hakupäivä 27.10.2017.
19. Everything You Need To Know About Nylon (PA). 2017. Creative Mechanisms. Saatavissa: <https://www.creativemechanisms.com/blog/3d-printing-injection-molding-cnc-nylon-plastic-pa>. Hakupäivä 24.10.2017.
20. Polyamide. 2016. RepRap. Saatavissa: <http://reprap.org/wiki/Polyamide>. Hakupäivä 27.10.2017.
21. Tyson, Ed. 2016. What is the difference between TPE and TPU Flexible Filament? Rigid.ink. Saatavissa: <https://rigid.ink/blogs/news/172062855-what-is-the-difference-between-tpe-and-tpu-flexible-filament>. Hakupäivä 27.10.2017.
22. Locker, Anatol. 2017. Metal 3D Printer Guide 2017 – All About Metal 3D Printing. All3DP. Saatavissa: <https://all3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing/>. Hakupäivä 28.10.2017.

23. 3D Printing Material: Stainless Steel 316L. 2017. Sculpteo. Saatavissa: <https://www.sculpteo.com/en/materials/metals/dmls-stainless-steel-material/>. Hakupäivä 28.10.2017.
24. 3D Printing Material: Titanium 6Al-4V. 2017. Sculpteo. Saatavissa: <https://www.sculpteo.com/en/materials/metals/dmls-titanium-material/>. Hakupäivä 28.10.2017.
25. 3D Printing Material: VeroClear Resin (Translucent PolyJet Resin). 2017. Sculpteo. Saatavissa: <https://www.sculpteo.com/en/materials/polyjet-resin-material/veroclear-polyjet-resin-material/>. Hakupäivä 28.10.2017.
26. History of 3D Printing. 2017. 3D Printing Industry. Saatavissa: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#02-history>. Hakupäivä 17.10.2017.
27. Cory Doctorow's Future Is Full Of 3d Printers! 2009. Makerbot. Saatavissa: <https://www.makerbot.com/media-center/2009/04/20/cory-doctorows-future-is-full-of-3d-printers>. Hakupäivä 19.10.2017.
28. CupCake CNC. 2010. Makerbot. Saatavissa: <http://makerbot.wikidot.com/cupcake>. Hakupäivä 17.10.2017.
29. MakerBot Industries Thing-O-Matic 3D Printer. 2012. Makerbot. Saatavissa: <http://makerbot.wikidot.com/thingomatic>. Hakupäivä 17.10.2017.
30. Replicator Original. 2017. 3D Hubs. Saatavissa: <https://www.3dhubs.com/3d-printers/replicator-original>. Hakupäivä 17.10.2017.
31. A Whole New Makerbot: Introducing Replicator 2 Desk-Top 3d Printer. 2012. Makerbot. Saatavissa: <https://www.makerbot.com/media-center/2012/09/19/a-whole-new-makerbot-introducing-replicator-2-desktop-3d-printer>. Hakupäivä 17.10.2017.
32. Announcing The Makerbot Replicator 2x Experimental 3d Printer! 2013. Makerbot. Saatavissa: <https://www.makerbot.com/media-center/2013/01/09/announcing-the-makerbot-replicator-2x-experimental-3d-printer>. Hakupäivä 17.10.2017.
33. Compare Makerbot 3d Printers. 2014. Makerbot. Saatavissa: <https://www.makerbot.com/compare-3d-printers/>. Hakupäivä 17.10.2017.

34. Prusa Mendel (iteration 1). 2012. RepRap. Saatavissa: [http://reprap.org/wiki/Prusa Mendel \(iteration 1\)](http://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel_(iteration_1)). Hakupäivä 14.10.2017.
35. Prusa Mendel (iteration 2). 2016. RepRap. Saatavissa: [http://reprap.org/wiki/Prusa Mendel \(iteration 2\)](http://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel_(iteration_2)). Hakupäivä 14.10.2017.
36. Prusa I3. 2017. RepRap. Saatavissa: [http://reprap.org/wiki/Prusa i3](http://reprap.org/wiki/Prusa_i3). Hakupäivä 14.10.2017.
37. Prusa I3 MK2. 2016. RepRap. Saatavissa: [http://reprap.org/wiki/Prusa i3 MK2](http://reprap.org/wiki/Prusa_i3_MK2). Hakupäivä 14.10.2017.
38. Original Prusa i3 MK2S kit. 2017. Prusa3D. Saatavissa: [https://shop.prusa3d.com/en/3d-printers/59-original-prusa-i3-mk2-kit.html#\\_ga=2.40010406.582329575.1507960267-1203285612.1507138080&\\_gac=1.188933721.1507963803.CjwKCAjwylHPBRAIEiwAHPS-GLGIKWW6igeBQjLS5QcrLkKZhyQ\\_5GFEASIK-Zxi3Hrfrzmwh04jMohoCXWoQAvD\\_BwE](https://shop.prusa3d.com/en/3d-printers/59-original-prusa-i3-mk2-kit.html#_ga=2.40010406.582329575.1507960267-1203285612.1507138080&_gac=1.188933721.1507963803.CjwKCAjwylHPBRAIEiwAHPS-GLGIKWW6igeBQjLS5QcrLkKZhyQ_5GFEASIK-Zxi3Hrfrzmwh04jMohoCXWoQAvD_BwE). Hakupäivä 14.10.2017.
39. Prusa, Josef. 2017. Original Prusa I3 Mk3 Is Out! And It's Bloody Smart! Prusa Printers. Saatavissa: <http://www.prusaprinters.org/original-prusa-i3-mk3-bloody-smart/>. Haku-päivä 14.10.2017.
40. Murphy, Jim. 2012. What's the Difference Between AC Induction, Permanent Magnet, and Servomotor Technologies? MachineDesign. Saatavissa: <http://www.machinedesign.com/motorsdrives/whats-difference-between-ac-induction-permanent-magnet-and-servomotor-technologies>. Hakupäivä 3.11.2017.
41. Agnihotri, Nikhil. 2011. Stepper Motors or Step Motors. EngineersGarage. Saatavissa: <https://www.engineersgarage.com/articles/stepper-motors>. Hakupäivä 3.10.2017.
42. Stepper Motor NEMA 17. 2017. PBC Linear. Saatavissa: <http://www.pbclinear.com/Download/DataSheet/Stepper-Motor-Support-Document.pdf>. Hakupäivä 6.11.2017.
43. Kordik, Jeff. 2015. What is Step Motor Stack Length? Applied Motion Products. Saatavissa: <https://www.applied-motion.com/news/2015/10/stacks-stacks>. Hakupäivä 11.10.2017.

44. Why is NEMA 17 steppers so common. 2016. Reddit. Saatavissa: [https://www.reddit.com/r/Reprap/comments/3nfgtv/why\\_is\\_nema\\_17\\_steppers\\_so\\_common/](https://www.reddit.com/r/Reprap/comments/3nfgtv/why_is_nema_17_steppers_so_common/). Hakupäivä 1.08.2017.
45. Lead Screw Torque and Force Calculator. 2016. Daycounter Inc. Saatavissa: <http://www.daycounter.com/Calculators/Lead-Screw-Force-Torque-Calculator.phtml>. Hakupäivä 31.10.2017.
46. Leadscrew (Power Screw) Torque And Efficiency Calculations For Acme Threads. 2017. Advanced Mechanical Engineering Solutions. Saatavissa: <http://www.amesweb.info/Screws/LeadScrewCalculationsAcmeThreads.aspx>. Hakupäivä 11.11.2017.
47. Arduino Mega 2560 Rev3. 2017. Arduino. Saatavissa: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>. Hakupäivä 6.11.2017.
48. Hot end V2.0. 2014. Geeetech wiki. Saatavissa: [http://www.geeetech.com/wiki/index.php/Hot\\_End\\_V2.0](http://www.geeetech.com/wiki/index.php/Hot_End_V2.0). Hakupäivä 7.10.2017.
49. PCB heatbed. 2017. RepRap. Saatavissa: [http://reprap.org/wiki/PCB\\_Heatbed](http://reprap.org/wiki/PCB_Heatbed). Hakupäivä 7.10.2017.
50. Lextrait, Thomas. 2016. Arduino: power consumption compared. Saatavissa: <https://tlextrait.svbtle.com/arduino-power-consumption-compared>. Hakupäivä 8.10.2017.
51. DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection. 2014. Allegro. Saatavissa: [https://www.pololu.com/file/download/A4988.pdf?file\\_id=0J450](https://www.pololu.com/file/download/A4988.pdf?file_id=0J450). Haku-päivä 06.11.2017.
52. 2PCS GT2 Timing Pulley 16T Bore 5mm & 3M GT2 Timing Belt 3D Printer RepRap Prusa. 2017. Ebay. Saatavissa: <https://www.ebay.com/itm/2PCS-GT2-Timing-Pulley-16T-Bore-5mm-3M-GT2-Timing-Belt-3D-Printer-RepRap-Prusa-/292095410367?hash=item44023e40bf>. Hakupäivä 3.11.2017.
53. Reprap Kossel. 2017. 3D Hubs. Saatavissa: <https://www.3dhubs.com/3d-printers/kossel>. Hakupäivä 23.10.2017.

54. Dotson, Kyt. 2015. The best desktop 3D printers of 2015 for the enthusiast and where to buy supplies. Silicon Angle. Saatavissa: <https://siliconangle.com/blog/2015/08/27/the-best-desktop-3d-printers-of-2015-for-the-enthusiast-and-where-to-buy-supplies/>. Hakupäivä 23.10.2017.
55. Yusuf, Bulent. 2017. 20 Best Cheap 3D Printers under \$500 / \$1000. All3DP. Saatavissa: <https://all3dp.com/1/best-cheap-budget-3d-printer-affordable-under-500-1000/>. Hakupäivä 24.10.2017.
56. Maker Select 3D Printer v2. 2017. Monoprice Saatavissa: [https://www.monoprice.com/product?p\\_id=13860](https://www.monoprice.com/product?p_id=13860). Hakupäivä 24.10.2017.
57. New Matter MOD-t: a 3D printer for everyone. 2017. Indiegogo. Saatavissa: <https://www.indiegogo.com/projects/new-matter-mod-t-a-3d-printer-for-everyone#/>. Hakupäivä 24.10.2017.
58. 8mm 3D-printer parts Reprap Chromed CNC shaft smooth Rod Round bar steel. 2017. Ebay. Saatavissa: [https://www.ebay.com/itm/8mm-3D-printer-parts-Reprap-Chromed-CNC-shaft-smooth-Rod-Round-bar-steel-45/132380900061?hash=item1ed2843add:m:mBRuKzS\\_QHft8RLgxd0vyvA](https://www.ebay.com/itm/8mm-3D-printer-parts-Reprap-Chromed-CNC-shaft-smooth-Rod-Round-bar-steel-45/132380900061?hash=item1ed2843add:m:mBRuKzS_QHft8RLgxd0vyvA). Hakupäivä 3.11.2017.
59. 3D-Printer 8mm Lead Screw Rod Z Axis Linear Rail Bar Shaft 100 to 600mm Nut T8. 2017. Ebay. Saatavissa: [https://www.ebay.com/itm/3D-Printer-8mm-Lead-Screw-Rod-Z-Axis-Linear-Rail-Bar-Shaft-100-to-600mm-Nut-T8/191906812853?hash=item2cae8993b5:m:mhJzsHLtZTxYJ3drl-jpb\\_FQ](https://www.ebay.com/itm/3D-Printer-8mm-Lead-Screw-Rod-Z-Axis-Linear-Rail-Bar-Shaft-100-to-600mm-Nut-T8/191906812853?hash=item2cae8993b5:m:mhJzsHLtZTxYJ3drl-jpb_FQ). Hakupäivä 3.11.2017.
60. LM8UU 8mm Linear Bush Ball Bearing Bushing For Reprap Prusa 3D-Printer Hot. 2017. Ebay. Saatavissa: <https://www.ebay.com/itm/LM8UU-8mm-Linear-Bush-Ball-Bearing-Bushing-For-Reprap-Prusa-3D-Printer-Hot/301860492764?hash=item46484995dc:g:JmcAAOSwX~dWpoze>. Hakupäivä 3.11.2017.
61. Kierretanko m8 1m a4 din976. 2017. IKH. Saatavissa: <https://www.ikh.fi/fi/kierretanko-m8-1m-a4-din976-pkt08100rh>. Hakupäivä 3.11.2017.
62. 3D-Printer Plastic Printed Part Frame Kit for MK8 Extruder Reprap Mendal Prusa i3. 2017. Ebay. Saatavissa: <https://www.ebay.com/itm/3D-Printer->

- [Plastic-Printed-Part-Frame-Kit-for-MK8-Extuder-Reprap-Mendel-Prusa-i3/151662910912?epid=681138153&hash=item234fd05dc0:g:xAQAA-OSwNSxVPkE4](https://www.ebay.com/itm/Plastic-Printed-Part-Frame-Kit-for-MK8-Extuder-Reprap-Mendel-Prusa-i3/151662910912?epid=681138153&hash=item234fd05dc0:g:xAQAA-OSwNSxVPkE4). Hakupäivä 3.11.2017.
63. 2 5m 20T GT2 Timing Belt 2X Pulley 2X Idler 4X Tensioner For 3D-printer-RepRap. 2017. Ebay. Saatavissa: <https://www.ebay.com/itm/2-5m-20T-GT2-Timing-Belt-2X-Pulley-2X-Idler-4X-Tensioner-For-3D-printer-RepRap/172936505567?hash=item2843d1a8df:g:l2kAAOSwzppZ6aLX>. Hakupäivä 3.11.2017.
64. 3D-printer 5x5 5x8 5x10 6 35x8 8x8 Motor Jaw Shaft Coupler Flexible Coupling. 2017. Ebay. Saatavissa: [https://www.ebay.com/itm/3D-printer-5x5-5x8-5x10-6-35x8-8x8-Motor-Jaw-Shaft-Coupler-Flexible-Coupling/222677274136?hash=item33d8998e18:m:mih01jOgHrntVXOMv4u\\_x9Q](https://www.ebay.com/itm/3D-printer-5x5-5x8-5x10-6-35x8-8x8-Motor-Jaw-Shaft-Coupler-Flexible-Coupling/222677274136?hash=item33d8998e18:m:mih01jOgHrntVXOMv4u_x9Q). Hakupäivä 3.11.2017.
65. Dual Head Extruder V6-E3D Hot End Extruder With Wire For 3D-Printer. 2017. Ebay. Saatavissa: <https://www.ebay.com/itm/Dual-Head-Extruder-V6-E3D-Hot-End-Extruder-With-Wire-For-3D-Printer/112455108285?hash=item1a2ed8c6bd:g:XA4AAOSwi0RX0A8y>. Hakupäivä 3.11.2017.
66. 1 2 5 10PCS ESP8266 ESP 12E Wireless Remote Serial WIFI Transceiver Board Module. 2017. Ebay. Saatavissa: <https://www.ebay.com/itm/1-2-5-10PCS-ESP8266-ESP-12E-Wireless-Remote-Serial-WIFI-Transceiver-Board-Module/191981905297?hash=item2cb3036591:m:m32tG5UYU4U1RfD8dfj8Uw>. Hakupäivä 3.11.2017.
67. 1602 16x2 Character LCD Display Module HD44780 Controller Blue Arduino. 2017. Ebay. Saatavissa: <https://www.ebay.com/itm/1602-16x2-Character-LCD-Display-Module-HD44780-Controller-Blue-Arduino/171983948287?hash=item280b0ac9ff:g:RsQAAOSwtnpXmusW>. Hakupäivä 3.11.2017.
68. 3D-Printer Reprap Mendel Rework Prusa i3 Frame Laser Cut 6mm Plywood. 2017. Ebay. Saatavissa: <https://www.ebay.com/itm/3D-Printer-Reprap-Mendel-Rework-Prusa-i3-Frame-Laser-Cut-6mm-Plywood>



[Wood/182664588276?epid=9006966927&hash=item2a87a86bf4:g:E-IAAOSw9gRZ-4K5](https://www.ebay.com/itm/Wood/182664588276?epid=9006966927&hash=item2a87a86bf4:g:E-IAAOSw9gRZ-4K5). Hakupäivä 3.11.2017.

69. Sintron 3D-printer full acrylic frame mechanical Kit for Reprap Prusa i3 DIY. 2017. Ebay. Saatavissa: <https://www.ebay.com/itm/Sintron-3D-printer-full-acrylic-frame-mechanical-Kit-for-Reprap-Prusa-i3-DIY/161561879405?hash=item259dd6a36d:g:twgAAOSwu4BVillB>. Hakupäivä 3.11.2017.

## LIITTEET

1. 3D-malli nykyisestä 3D-tulostimesta. Liitteet.zip

