

Timo Anttila

**KANNETTAVAN LÄHI-INFRAPUNASKANNERIN SUUNNITTELU  
MUOVIMATERIAALIN TUNNISTUSTA VARTEN**

**KANNETTAVAN LÄHI-INFRAPUNASKANNERIN SUUNNITTELU  
MUOVIMATERIAALIN TUNNISTUSTA VARTEN**

Timo Anttila  
Opinnäytetyö  
Kevät 2021  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma

---

Tekijä: Timo Anttila

Opinnäytetyön nimi: Kannettavan lähi-infrapunaskannerin suunnittelu muovintunnistusta varten

Työn ohjaaja: Esa Kontio

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2021

Sivumäärä: 62 + 1 liite

---

Opinnäytetyö tehtiin toimeksiantajalle Head Recycle Systems Oy loppuvuoden 2020 ja alkuvuoden 2021 aikana. Työssä suunniteltiin kannettava ja ladattava skanneri, jonka tarkoituksena on pystyä tunnistamaan eri muovilaadut toisistaan. Skannaus perustuu lähi-infrapunaskanspektroskopiaan, jonka avulla voidaan lukea skannattavasta kohteesta heijastuvan valon spektri sensorin avulla. Tästä spektristä saatavan datan avulla on mahdollista tunnistaa muovipolymeerin sidostyyppit ja sen avulla saada selville, mistä muovilaadusta skannattu materiaali on valmistettu.

Työssä tutustuttiin tuotekehitysteoriaan ja sen perusteelta luotiin skannerin kehitystyön pohja. Työ alkoi kartoittamalla toimeksiantajan määrittelemät vaatimukset, joista tärkeimmät olivat keveys, ergonomisuus, toiminta liipaisimella, sensorin suojaaminen mekaaniselta vahingolta, kalibrointitela-kan suunnittelu, virranhallintajärjestelmän valinta ja sähköturvallisuus. Tämän jälkeen kehitystyö jatkui konseptisuunnittelulla, jossa määriteltiin käytettävät komponentit sekä vaihtoehdot skannerin elektroniikan jäähdytykseen ja virranhallintaan. Seuraavana vaiheena oli järjestelmätason suunnittelu, jossa skanneri jaettiin toiminnallisiin alajärjestelmiin, joiden perusteella tehtiin alustavat hahmottelut skannerin geometriasta ja kokoonpanosta. Tämän vaiheen jälkeen tehtiin yksityiskohtainen suunnittelu, jonka aikana geometria, valmistus ja kokoonpano määriteltiin yksityiskohtaisesti. Suunnittelu tehtiin paperille luonnoksina sekä 3D-mallina Solidworks-ohjelmalla.

Työn alkuperäisenä tarkoituksena oli kehittää Raspberry Pi 4 -tietokoneeseen pohjautuva tuotanto-versio, mutta tavoitteesta luovuttiin opinnäytetyön monimutkaisuuden ja taloudellisten rajoitteiden kasvaessa. Työn aikana kuitenkin syntyi Raspberry Pi Zeroa käyttävä esittelyprototyyppi, jonka avulla voidaan todistaa skannerin toimivuus ja käytännöllisyys eri sidosryhmille. Tämä prototyyppi valmistettiin käyttämällä FDM-tekniikkaan perustuvaa 3D-tulostinta Creality Ender 3. Työn aikana valmistettu skanneri testattiin toimeksiantajan tiloissa, ja se toimi luotettavasti testimateriaalien tunnistamisessa. Skanneria myös onnistuttiin lataamaan, ja sen käyttö onnistui sekä latauksessa että akkuvirralla. Esittelyprototyypistä mitattiin myös kuormituksen aikaiset lämpötilat. Työn aikana kehityksessä versiossa ei ole jäähdytystä, eikä se suhteellisen vähätehoista Raspberry Pi Zeroa käytettäessä olisi ollut tarpeellista. Lämpötilamittausten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että merkittävästi suuritehoisempaa Raspberry Pi 4:ää käytettäessä kotelon sisäinen lämpötila nousisi haitallisen korkealle, joten jäähdytys-elementin suunnittelu olisi tarpeen.

---

Asiasanat: muovi, kierrätys, skanneri, lähi-infrapunaskanspektroskopia, tuotekehitys, mekaniikkasuunnittelu, 3D-tulostus

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical Engineering, Option of Machine Automation

---

Author: Timo Anttila

Title of thesis: Design of Handheld Near-Infrared Scanner for Plastic Material Identification

Supervisor: Esa Kontio

Term and year when the thesis was submitted: spring 2021

Number of pages: 62 + 1 appendix

---

This thesis was commissioned by Head Recycle Systems Oy during the end of 2020 and the beginning of 2021. The aim of the thesis was to design a portable and rechargeable scanner, the purpose of which is to be able to identify between different grades of plastic material. The scanning works on the principle of near-infrared spectroscopy, which can be used to read the spectrum of light reflected off the scanned material. Data obtained from this spectrum makes it possible to identify the chemical bonds within the plastic polymer and thus identify plastic grade.

The thesis introduces the reader to a product development theory and creates a foundation for the development of the scanner. The work began by mapping the requirements and wishes of the client which included: portability and ergonomics, operation by pulling a trigger, protecting the sensor from mechanical damage, design of a calibration dock, power management and cooling systems, and complete electrical safety. After this, the development work continued with concept design, which defined the components to be used, as well as the selection of power management and cooling systems used in the scanner. The next step was system-level design, in which the scanner was divided into functional subsystems, from which preliminary plans for the scanner's geometry and assembly were made. This phase was followed by detailed design, during which the geometry, fabrication and assembly of the scanner were defined in detail. The design was done on paper as sketches as well as in 3D modeling on SolidWorks.

The original purpose of this thesis was to develop a production version of the scanner based on a Raspberry Pi 4 computer, but this goal was abandoned as the complexity and financial constraints of the thesis increased. However, a demonstration prototype based on Raspberry Pi Zero was developed in order to prove the functionality and practicality of the scanner to various stake holders. This prototype was fabricated using a Creality Ender 3 3D printer based on FDM technology. The scanner was tested for scanning, charging and mobile use, as well as for temperature performance under load. The demonstration prototype has no cooling, as it was not necessary when using the relatively low-powered Raspberry Pi Zero. However, based on previous load measurements of Raspberry Pi 4 and the temperature readings from Zero it can be concluded that the internal temperature of the housing would rise to harmful levels when using the significantly more powerful Raspberry Pi 4. Therefore, any further development of the scanner would require an integrated heat sink for the housing in order to cool the system.

---

Keywords: plastic, recycling, scanner, near-infrared spectroscopy, product development, mechanical design, 3D-printing

## ALKULAUSE

Tämä opinnäytetyö tehtiin toimeksiantona Head Recycle Systems Oy:lle. Haluaisin kiittää HRS:n automaatioinsinööri Jesse Lassilaa projektin aikana saadusta tuesta ja hyvistä ideoista. Erityiskiitokset tämän raportin valmistumisesta kuuluvat opinnäytetyötä ohjaavalla opettajalle, lehtori Esa Kontiolle.

Toivon, että tälle projektille löytyy myöhemmin jatkaja, joka voisi viedä tuotekehitystä tämän opinnäytetyön pohjalta pidemmälle. Tämän työn kirjoittamisen jälkeen lähden jatkamaan tuotekehityksen oppimista työelämään ja haluaisin nähdä tämän tarinan saavan arvoisensa päätöksen.

Oulussa 26.5.2021

Timo Anttila

# SISÄLLYS

SANASTO JA LYHENTEET .....	9
1 JOHDANTO .....	12
2 TUOTEKEHITYSPROSESSI .....	13
2.1 Tuotekehityksen perusteet .....	13
2.1.1 Tuotekehityksen sidosryhmät.....	13
2.1.2 Tuotekehityksen tavoitteet .....	14
2.2 Tuotekehitysprosessin vaiheet .....	14
2.2.1 Ideoiden kerääminen ja kehittäminen.....	15
2.2.2 Alustava suunnittelu.....	16
2.2.3 Konseptien kehittäminen.....	17
2.2.4 Järjestelmätason suunnittelu.....	17
2.2.5 Detalji-suunnittelu.....	18
2.2.6 Prototyyppien kehitys.....	19
2.2.7 Prototyyppien 3D-tulostusmenetelmät .....	20
2.2.8 Tuotannon käynnistäminen .....	22
3 MUOVINTUNNISTUSMENETELMÄT .....	23
3.1 Spektroskopia.....	23
3.2 Spektroskopi tekniikat .....	24
3.3 IR-spektroskopia .....	26
3.4 NIR-spektroskopia.....	26
3.5 Fabry–Pérot'n interferometri .....	28
4 PROJEKTIVAATIMUKSET .....	31
4.1 Projektin tausta.....	31
4.2 Toimeksiantajan vaatimukset skannerin suhteen .....	31
4.2.1 Geometria ja ergonomia.....	32
4.2.2 Osat ja käyttövoima .....	32
4.2.3 Turvallisuus.....	33
4.2.4 Valmistus ja kokoonpano .....	33
5 KONSEPTISUUNNITTELU .....	35
5.1 Käytettävien komponenttien esittely .....	35
5.1.1 Raspberry Pi .....	35

5.1.2	Spectral Engines Nirone S .....	36
5.2	Elektroniikan jäähdytys .....	36
5.2.1	Jäähdytysmenetelmät .....	38
5.2.2	Passiivinen konvektiojäähdytys .....	38
5.3	Virranhallintajärjestelmä .....	40
5.3.1	Virtapankki .....	40
5.3.2	Keskeytymätön virransyöttö (UPS) .....	40
6	JÄRJESTELMÄTASON SUUNNITTELU .....	43
6.1	Skannerin toimintakaavion määrittely .....	43
6.1.1	Skannerin runko .....	43
6.1.2	Virranhallintajärjestelmä .....	44
6.1.3	Skannausjärjestelmä .....	44
6.2	Geometrian hahmottelu .....	44
6.3	Alustavat valmistus- ja kokoonpanosuunnitelmat .....	45
7	DETALJISUUNNITTELU .....	46
7.1	Skannerin kokoonpanon luonnos .....	46
7.2	Pääkotelon suunnittelu .....	47
7.2.1	Pääkotelon rungon suunnittelu .....	48
7.2.2	Pääkotelon kannen suunnittelu .....	48
7.2.3	Sensorin suojakotelon suunnittelu .....	49
7.2.4	Pääkotelon kokoonpanomalli .....	49
7.3	Käsikahvan suunnittelu .....	50
7.3.1	Liipaisinmekanismin suunnittelu .....	51
7.3.2	Skannerin kokoonpanomalli .....	52
7.4	Kalibrointitelakka .....	53
8	ESITTELYPROTOTYYPIN VALMISTUS JA TESTAUS .....	55
8.1	Alkuvalmistelut .....	55
8.2	Osien viimeistely ja kokoonpano .....	56
8.2.1	Tulosteiden jäähtyminen ja tukirakenteen irrotus .....	56
8.2.2	Inserttien liittäminen ja akuston virtapiirin rakentaminen .....	56
8.2.3	Skannerin kokoonpano .....	57
8.3	Prototyypin testaus .....	58
8.3.1	Lämpötilamittaus .....	58
8.3.2	Testaus .....	58

9	JATKOKEHITYS.....	59
9.1	Valmistustekniikan valinta .....	59
9.2	Materiaalinvalinta .....	59
9.3	Jäähdytys-elementin kehittäminen .....	60
9.4	Geometrian optimointi .....	61
10	POHDINTA.....	62
	LÄHTEET.....	63

## SANASTO JA LYHENTEET

18650	lieriömäinen litiumioniakkukkenno
A	ampeeri, virran yksikkö
ABS	akrylinitriilibutadieenistyreeni, muovilaatu
3D-malli	tietokoneavusteisesti suunniteltu kolmiulotteinen malli
DC	direct current, tasavirta
DFMA	design for manufacturing and assembly, pyrkimys mahdollisimman edulliseen valmistukseen ja kokoonpanoon
FDM	fused deposit modeling, 3D-tulostusmenetelmä
FPI	Fabry–Pérot'n interferometri, valon spektrin lukemiseen käytettävä laite
G-koodi	matalan tason komentokieli, jolla ohjataan koneistuksen kulkua
I2C	kaksisuuntainen ohjaus- ja tiedonsiirtoväylä
IP	ingress protection, sähkölaitteiden tiiveyden määritelmä
IR	infrapuna
M#	metrijärjestelmän ruuvien ja muttereiden halkaisijaluokitus, mm
mAh	milliampeeritunti, varauksen yksikkö
N	newton, voiman perusyksikkö

NiCd	nikkelikadmium
NiMH	nikkelimetallihydridi
NIR	lähi-infrapuna
NMR	ydinmagneettinen resonanssi
NO	normally open, normaalisti auki oleva virtapiiri
offset	geometrian rajojen siirros 3D-suunnittelussa
PBT	polybutyleenitereftalaatti, muovilaatu
PE	polyetyleni, muovilaatu
PET	polyeteenitereftalaatti, muovilaatu
PLA	polylaktidi, muovilaatu
POC	proof of concept; prototyyppi konseptin esittelyä varten
Rapid prototyping	nopea prototyyppien valmistus
SLA	stereolitografia; 3D-tulostusmenetelmä
SLS	selective laser sintering; 3D-tulostusmenetelmä
UPS	uninterruptible power supply, keskeytymätön virransyöttö
USB	universal serial bus, sarjaväyläarkkitehtuuri oheislaitteille
UV	ultravioletti; säteily 100 - 400 nm aallonpituuksilla

V	voltti, jännitteen yksikkö
VDC	direct current voltage, tasavirtajännite
W	watti, tehon yksikkö

# 1 JOHDANTO

Muovinkierrätys on jatkuvasti kasvava teollisuuden ala, ja muovijätteestä on tulossa merkittävä ongelma ihmiskunnalle. Muovin kierrättämisen onnistumiseksi on tärkeää, että muovilaadut pystytään erottamaan toisistaan ja prosessoimaan erikseen. Tähän ongelmaan on tarttunut alalla toimiva oululainen yritys Head Recycle Systems Oy, joka pyrkii kehittämään muovin erotteluun tehokkaita menetelmiä. Yritys on tämän tuotekehitysprojektin toimeksiantaja.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää muovilaatujen tunnistukseen käytettävän NIR-spektrometriskannerin toiminnallinen esittelyprototyyppi tuotekehitysprosessin mukaisesti ja luoda pohja skannerin sarjatuotantoversion kehitystyölle. Työn aikana valmistettavan esittelyprototyypin on tarkoitus esitellä skannerin toimivuutta ja hyödyllisyyttä eri kohteissa. Skannerilla voidaan tunnistaa muovilaadut toisistaan ja siten edistää muovinkierrätyksen tehokkuutta.

Yritykselle oli aiemmin valmistettu kaksi proof of concept -prototyyppiä, joiden toiminnallisuus, kannettavuus, geometria ja ergonomia eivät olleet hyväksyttävällä tasolla. Alkuperäisten skannereiden keskeisin ongelma oli virranhallintajärjestelmän ja siten kannettavuuden puute. Työssä etsittiin tähän luotettavasti toimiva järjestelmä, jota voitaisiin käyttää myös sarjatuotantoversiossa. Tässä raportissa käydään läpi projektivaatimukset, suunnitteluprosessin vaiheet ja esittelyprototyypin valmistus. Lisäksi tutustutaan tuotekehitysprosessiin, 3D-tulostukseen, käytettävän muovintunnistumenetelmän teoriaan sekä tiiviin elektroniikkakotelon jäähdytyksen teoriaan ja sen toteuttamisen tuomiin haasteisiin.

Suurimpia haasteita skannerin suunnittelussa on toteuttaa toimeksiantajan määrittelemät vaatimukset yhdellä ratkaisulla, jonka sarjatuotantoversio ei merkittävästi muuttuisi käytettävien komponenttien ja ulkoisen geometrian osalta. Tässä työssä ei kuitenkaan syvällisesti käsitellä tuotantoversion suunnittelua ja valmistusprosessia. Työn tuloksena valmistunutta skanneria on mahdollista käyttää muovilaatujen tunnistukseen luotettavasti teollisuusympäristössä testaus- ja esittelytarkoituksessa. Skanneri valmistetaan opinnäytetyön toteuttajan kotona 3D-tulostamalla FDM-tekniikkaa hyödyntäen.

## **2 TUOTEKEHITYSPROSESSI**

### **2.1 Tuotekehityksen perusteet**

Yritysten on kilpailukykyensä säilyttämiseksi jatkuvasti ja säännöllisesti pystyttävä innovoimaan uusia tuotteita tai palveluita tai modifioimaan ja parantamaan olemassa olevia. Tätä uusien tai olemassa olevien tuotteiden tai palveluiden kehitystyötä kutsutaan tuotekehitykseksi, ja tässä raportissa keskityttiin ainoastaan fyysisten, teollisesti valmistettavien tuotteiden tuotekehitykseen. Tuotekehityksen tarkoituksena on jatkuvasti etsiä ja kehittää yrityksen strategiaan sopivia ideoita, joista voidaan jatkokehittää tuotteita tai joilla voidaan parantaa olemassa olevaa tuoteportfoliota. Tuotekehitysprojektit voidaan jakaa neljään eri luokkaan tuotteen elinkaarivaiheen ja tuoteportfolion mukaan. Näitä ovat uudet tuotealustat ja -perheet yrityksen ydinmarkkinoilla, näiden johdannaiset kuten tuoteperheen uusi jäsen, olemassa olevien tuotteiden parannukset sekä täysin uusille markkinoille suuntautuvat tuotteet. (Ulrich 2003, 35.)

#### **2.1.1 Tuotekehityksen sidosryhmät**

Tuotekehitys kattaa laajan kirjon toimintoja, jotka alkavat markkinamahdollisuuden havaitsemisesta ja päättyvät tuotteen tuotantoon, myyntiin ja toimitukseen. Tuotekehitys on siksi prosessi, johon kannattaa ottaa mukaan kaikki oleelliset osastot. Näitä ovat erityisesti myynti, markkinointi, suunnittelu sekä valmistus. Kullakin osastolla on oma tuotteisiin liittyvä erityisosaamisensa, joten kaikkien niiden työpanosta tarvitaan tuotekehityksessä. Osastoista kootaan asiantuntijoista koostuva projektitiimi, jolla on oma johtajansa. Projektitiimin tulisi olla riittävän pieni, jotta hankkeessa käytävät palaverit olisivat tehokkaita ja tuottavia. Ydintiimin lisäksi hankkeessa voi olla laajennettu tiimi, johon saattaa kuulua projektin laajuuden mukaan useita kymmeniä, satoja tai tuhansia henkilöitä. Tämän laajennettuun tiimiin voidaan tarpeen mukaan sisällyttää muitakin sidosryhmiä, kuten asiakkaita, tavarantoimittajia ja alihankkijoita. (Ulrich 2003, 3 - 4.)

## 2.1.2 Tuotekehityksen tavoitteet

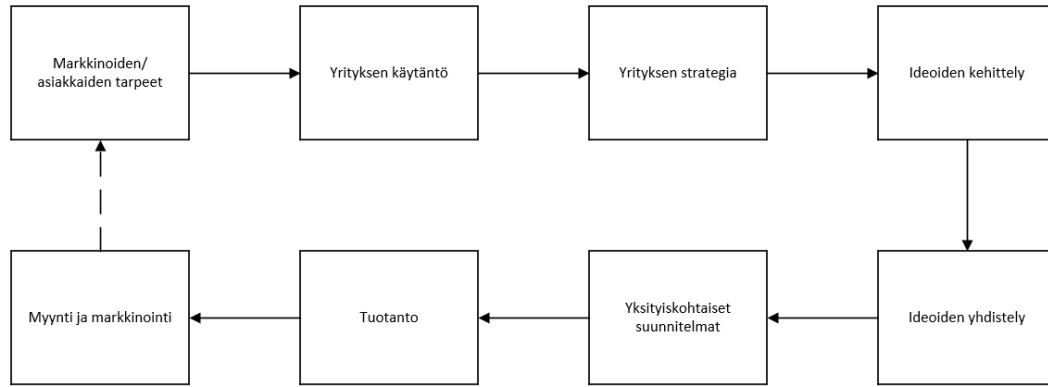
Tuotekehityksen ajurina toimivat markkinat ja asiakkaat, jotka vaikuttavat yrityksen käytäntöihin ja strategiaan ja sitä kautta itse tuotekehitysprosessiin. Tuotekehitysprosessin aikana selviää, voidaanko tuotteesta kehittää sellainen, joka on teknisesti ja kaupallisesti toteuttamiskelpoinen sekä kilpailijoiden tuotteita parempi ja halutumpi. (Kotler 1990, 388.).

Lopulta valmistuneen tuotteen menestyksen kannalta olennaisinta on ominaisuuksien ja toimintojen tarpeellisuus sekä niiden vaikutus valmistettavan tuotteen hintaan. Tuotekehityksessä siis pyritään luomaan tuote, joka ominaisuuksiensa ja hintansa takia parantaa yrityksen nykyistä markkina-asemaa tai jolla voidaan murtautua uusille markkinoille. Tuotekehityksen lopullisena tavoitteena ei kuitenkaan ole niinkään uusien tuotteiden kehittäminen, vaan yrityksen strategisten tavoitteiden saavuttaminen. Tuotekehitysprojekti, joka ei käynnisty markkinoiden tarpeista ja pyri strategisten tavoitteiden saavuttamiseen on tuomittu epäonnistumaan. (Mital ym. 2014, 21.)

Tuotekehitysprosessissa onnistumisen kannalta olennaisinta on kehitetyn tuotteen kyky kasvattaa yrityksen kokonaisyntiä ja voittomarginaalia. Tämän suoraviivainen arvioiminen lyhyellä aikavälillä on kuitenkin yksittäisen tuotteen osalta vaikeaa, joten onnistumisen arviointiin tarvitaan muitakin ulottuvuuksia kuten tuotteen laatu, valmistuskustannukset, tuotekehityksen kesto ja kustannukset, ja tuotekehityksosaamisen karttuminen (Ulrich 2003, 2).

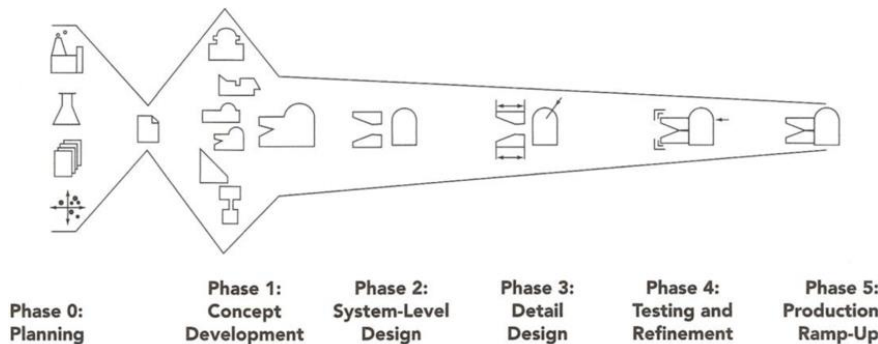
## 2.2 Tuotekehitysprosessin vaiheet

Tuotekehitys on jatkuva ja syklinen prosessi, joka alkaa markkinoiden tarpeista ja päättyy markkinoille tuotavan tuotteen myyntiin ja toimitukseen, alkaen alusta jossain vaiheessa tuotteen elinkaarta (kuva 1). Tuotekehitys voi keskeytyä ennalta arvaamattomiin teknisiin tai taloudellisiin haasteisiin jatkuen tai alkaen alusta joskus myöhemmin. Tuotekehitys on koko yrityksen harjoittama toiminto, jonka tavoitteena on pitää yritys innovatiivisena ja kyvykkäänä vastaamaan muuttuvan markkinaympäristön tarpeisiin. (Mital ym. 2014, 21 - 22.)



KUVA 1. Tuotekehitystoimien eteneminen liiketoiminnassa (Mital ym. 2014, 22)

Varsinainen tuotekehitysprojekti voidaan jakaa kuuteen toimintavaiheeseen, joita ovat alustava suunnittelu, konseptien kehittäminen, järjestelmätason suunnittelu, detajisuunnittelu, prototyyppien testaus ja tuotejalostus sekä tuotannon käynnistäminen (kuva 2). Näihin vaiheisiin osallistuvat eri osastot samanaikaisesti omien asiantuntemusalojensa mukaisesti. Tuotekehitysprosessi ei kuitenkaan voi alkaa ilman uutta tuoteidea, joten sitä voidaan pitää jatkuvana ja erillisenä prosessina, joka ei ole riippuvainen yksittäisen tuotekehitysprojektin kulusta. (Ulrich 2003, 14 - 15.) Tässä luvussa käydään läpi tuotekehitysprosessin eri vaiheet sekä skannerin prototyyppien luomiseen soveltuvat ainetta lisäävät valmistusmenetelmät.



KUVA 1. Geneerinen tuotekehitysprosessi (Ulrich 2003, 14)

### 2.2.1 Ideoiden kerääminen ja kehittäminen

Tuotekehitysprosessin liikkeelle laukaiseva tekijä on uusi tuoteidea, joka on parhaimmillaan sellainen, jossa tekniset mahdollisuudet yhdistyvät markkinoiden tarpeisiin ja oletettuun kysyntään. Tuotekehityksen menestys voi riippua hyvästä ideasta, joten ideoiden kerääminen ja kehittäminen on

oleellista tuotekehitysprojektin kannalta, mutta on siitä erillinen prosessi. Ideoiden kehittämisen perusedellytyksenä on se, että yrityksellä on olemassa oleva strategia uusien tuotteiden kehitysprosessia varten. Tällä tavalla yritys voi keskittyä siihen, mistä ja minkälaisia ideoita tulee kerätä tuotekehitysprosessin käynnistämiseksi. (Cooper 2001, 154 - 155.)

Tuotekehityksen menestyksen kannalta on oleellista aloittaa kehitystyö markkinoiden tarpeen perusteella. Ideoiden ei kuitenkaan tarvitse tulla pelkästään markkinoilta, vaan ideoita voi passiivisesti kerätä eri lähteistä, kuten esimerkiksi eri osastoilta, nykyisiltä ja potentiaalisilta asiakkailta, alihankkijoilta, tavarantoimittajilta, keksijäyhteisöiltä, yliopistoilta ja yhteistyökumppaneilta. Ideoita voi kerätä myös aktiivisesti tekemällä asiakaskyselyitä, haastattelemalla superkäyttäjiä, tekemällä markkinatutkimusta ja pyytämällä opiskelijoita tekemään yritykselle esimerkiksi projektin tai opinnäytetyön. (Ulrich 2003, 37.) Keskenäisetkin ideat ja alkuunsa tyrehtyneet projektit tulevat säilyttää, vaikka ne yksistään eivät riittäisi käynnistämään tuotekehitysprosessia. Ideoiden säilyttäminen verkkokansiossa tai intranet-sivuilla mahdollistaa koko organisaation osallistumisen, jolloin jostain ideasta saattaa jonain päivänä kehittyä myyntikelpoinen tuote. Riittävän hyvän idean löydyttyä on syytä käynnistää itse tuotekehitysprosessi. (Cooper 2001, 172.)

### **2.2.2 Alustava suunnittelu**

Alustavaa suunnittelua pidetään yleensä niin sanottuna nollavaiheena, sillä se edeltää projektin virallista hyväksyntää ja varsinaisen tuotekehitysprojektin aloitusta. Alustavan suunnittelun alussa käydään läpi ja priorisoidaan eri tuotekehitysideat ja mahdollisuudet, joista lupaavimmat valitaan jatkoon. Tämän jälkeen jokaiselle jatkokehitykseen valituista projekteista tehdään kattava tuotesuunnitelma, jonka perusteella allokoidaan tarvittavat resurssit ja laaditaan alustavat aikataulut, liiketoiminnalliset tavoitteet ja tavoitelausumat. Tuotekehitysprojektin tavoitelausuma on yksi lause, jolla kuvataan tuotteelta halutut tärkeimmät ominaisuudet, asetetut tavoitteet ja asiakkaalle tuotettava lisäarvo. Vaikka tuotesuunnitelma kuvataan yhdestä vaiheesta seuraavaan kulkevana lineaarisena prosessina, on se todellisuudessa iteratiivinen. Tämä johtuu siitä, että useimmat projektit vaativat aikatauluihin, budjetteihin ja tavoitteisiin muutoksia prioriteettien muuttuessa. Tuotesuunnitelmaa voidaan päivittää myöhemmissä vaiheissa, mikäli kohdataan ongelmia, jotka vaativat projektin uudelleenarviointia. (Ulrich 2003, 37 - 50.)

### **2.2.3 Konseptien kehittäminen**

Tuotekonsepti on likimääräinen kuvaus vaaditusta teknologiasta, tuotteen toimintaperiaatteista ja yleisestä muodosta. Sillä kuvataan tarkasti, kuinka tuotteella täytetään asiakkaan tarpeet. Yleensä konseptivaiheessa on melko tarkasti määritelty tekniset vaatimukset, kuten esimerkiksi voima ja teho. Konseptikehitysvaihe alkaa kohdemarkkinoiden ja asiakkaiden tarpeiden identifioimisella. Tällä varmistetaan asiakkaiden tarpeiden täytyminen ja luodaan faktapohja, jonka perusteella puolestaan voidaan määrittää tuotteen tekniset vaatimukset ja aloittaa konseptien luominen, analysointi ja testaus. (Ulrich 2003, 16 - 17.)

Kehitettävien konseptien määrän voidaan kuvitella olevan suoraan verrannollinen tuotteen monitkaisuuteen ja osatoimintojen määrään. Tärkeintä konseptien kehittämisessä on saada jaettua tuoteidea osatoimintoihin, joille kehitetään toiminnallinen vastine kussakin tuotekonseptissa. Konsepteista voidaan kustakin rakentaa, testata ja analysoida malleja sekä prototyyppejä, joiden avulla voidaan arvioida osatoimintojen toteuttamisen onnistuminen. Parhaiten toimivasta konseptista aletaan kehittää varsinaista tuotetta. (Ulrich 2003, 98.)

### **2.2.4 Järjestelmätason suunnittelu**

Yleensä tuote koostuu erityisistä fyysisistä ja toiminnallisista osista, joilla kullakin on tuotteessa oma tehtävänsä. Esimerkiksi muovintunnistuslaite koostuu useista osasista, kuten piirilevystä ja prosessorista, virranhallintajärjestelmästä, näytöstä, sensorista ja kotelosta, joista kullakin on oma tehtävänsä ja tekniset ominaisuutensa. Tätä osien ja osatoimintojen kokonaisuutta kutsutaan tuotearkkitehtuuriksi. Järjestelmätason suunnittelu sisältää tuotearkkitehtuurin määrittelyn sekä tuotteen jakamisen alajärjestelmiin ja komponentteihin. Tässä vaiheessa tuotteen geometrian perusmuoto määrittäminen ja muun muassa komponenttien osalta voidaan selvittää, valmistetaanko ne itse vai hankitaanko ne tavarantoimittajilta. Lisäksi voidaan tehdä myös karkeita valmistus- ja kokoonpanosuunnitelmia (Ulrich 2003, 15.)

Tuotearkkitehtuurit voivat olla integroituja ja modulaarisia tai niiden yhdistelmiä. Modulaarisessa arkkitehtuurissa tuote on jaettu erillisiin toiminnallisiin palasiin, jotka koostuvat pienemmistä komponenteista. Varsinkin tuoteperheissä kannattaa pyrkiä hyödyntämään modulaarisuutta, jolloin pitkälle suunniteltua moduulia voidaan käyttää useissa eri tuotteissa, jolloin saadaan aikaan säästöjä

tuotekehityksessä, valmistuksessa ja kokoonpanossa. Modulaarisuuden vastakohtana on osien integraatio, jolloin tuotteen toiminnallisuus on jakautunut useiden osien välille eikä yksittäisellä palasella ole omaa, selkeästi muista eroavaa toimintoaan ja rajat osasten välillä ovat häilyviä ja vaikeasti määriteltävissä. Integraatiolla pyritään saamaan aikaan mahdollisimman hyvä tuotteen suorituskyky ja integroidun tuotteen suunnittelu täytyy aloittaa aina lähes puhtaalta pöydältä. Integroitu tuote on yleensä monimutkaisempi ja kalliimpi valmistaa kuin modulaarinen. (Ulrich 2003, 165 - 166.)

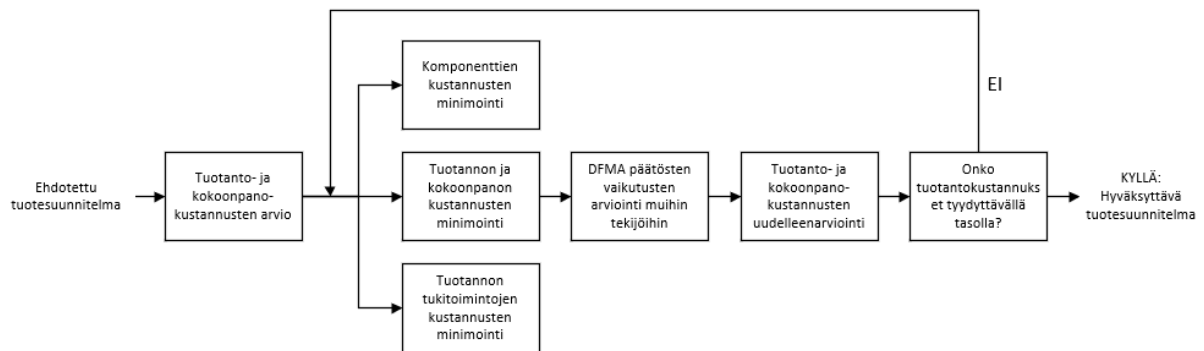
Tuotearkkitehtuurin rakentamista voidaan pitää nelivaiheisena prosessina. Alussa luodaan tuotteen toimintakaavio, jossa hahmotellaan tuotteen rakenneosat, kriittiset komponentit ja niiden väliset suhteet. Kriittiset osat voidaan jo nimetä, sillä ne eivät muutu, mutta muut toiminnot ja osat nimetään vain niiden perusominaisuuksien mukaisesti. Seuraavaksi nämä voidaan ryhmittää toiminnallisiksi elementeiksi ja alkaa hahmottelemaan integroitua geometriaa ja elementtien yhteensopivuutta. Tämän jälkeen tuotteesta voidaan ruveta hahmottelemaan karkeaa geometriaa, jossa toiminnalliset ryhmät muodostavat omat, erilliset osansa ja tuotteen rakenne alkaa selkeytyä. Lopuksi identifoidaan osien väliset vuorovaikutukset ja niiden vaikutus kokonaisuuteen. Esimerkiksi virranhallintajärjestelmän akku lämpenee käytössä, joten sen sijainti pitäisi valita siten, ettei se haittaa elektroniikan toimintaa. (Ulrich 2003, 172 - 177.)

### **2.2.5 Detaljisuunnittelu**

Detaljisuunnitteluvaiheessa tehdään täydelliset spesifikaatiot tuotteen geometriasta, käytetyistä materiaaleista ja kaikkien valmistettavien osien toleransseista ja laatuvaatimuksista. Lopputuloksena syntyy prototyyppien tekemiseksi vaadittavat kontrollidokumentaatiot, jotka kuvaavat kunkin osan geometrian, valmistusmenetelmät, koneistuksen, kokoonpanon sekä ostettujen osien laatuvaatimukset. Tässä vaiheessa keskitytään erityisesti valmistus- ja kokoonpanokustannusten minimointiin hyödyntämällä DFMA-ajattelua. (Ulrich 2003, 15.)

DFMA-ajattelun tarkoituksena on suunnitella tuote detaljisuunnitteluvaiheessa siten, että suunnittelulla voidaan minimoida tuotteen valmistus- ja kokoonpanokustannukset. Tässä suunnitteluvaiheessa on siis tärkeä muodostaa osastojen rajat ylittäviä tiimejä, jotka hyödyntävät mm. tuotantoin-sinöörien ja -henkilöstön sekä osto-osaston asiantuntemusta. DFMA on iteratiivinen prosessi (kuva

3), eli tuotteen alustavia detaljisuunnitelmia käydään tiimin kanssa läpi, jolloin jokaisella iteraatio-kerralla tuotteesta tulee taloudellisempi valmistaa. (Ulrich 2003, 211 - 212.)

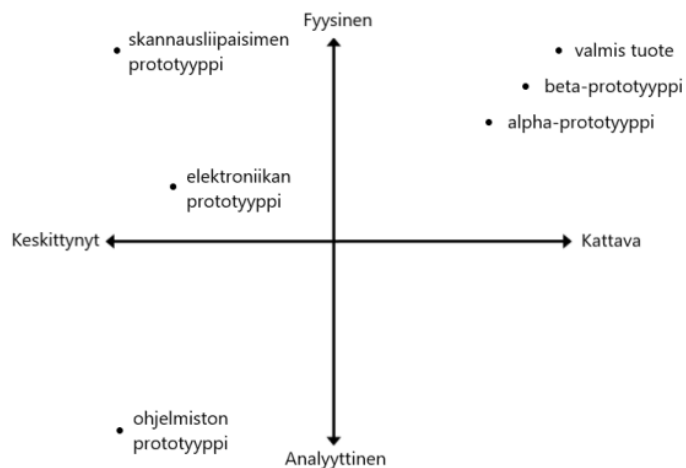


KUVA 2. DFMA prosessi (käännetty, Ulrich 2003, 213)

## 2.2.6 Prototyyppien kehitys

Prototyyppien kehitysvaiheessa luodaan ja testataan useita esituotannollisia versioita tuotteesta, joita kutsutaan prototyypeiksi. Prototyyppejä on eritasoisia tuotekehitysvaiheen mukaan. Detaljisuunnittelun jälkeiset prototyypit voidaan jakaa kahteen luokkaan, Alpha ja Beta. Alpha-prototyypit valmistetaan tuotantoon tarkoitetuista osista, mutta niiden valmistukseen ei välttämättä käytetä samoja metodeja kuin valmiiseen tuotteeseen. Beta-prototyypit puolestaan ovat kehittyneempi ja lähes valmiita, ja niissä käytetään samoja valmistus- ja kokoonpanotyökaluja kuin valmiissa tuotteessa (Ulrich 2003, 15).

Yleisesti kuitenkin voidaan sanoa, että prototyyppejä voidaan valmistaa myös aikaisemmissa tuotekehitysvaiheissa. Mitä useampia prototyyppi tuotekehitysprosessin aikana luodaan, sitä helpommin voidaan löytää mahdollisia ongelmia esimerkiksi käytettävyyden ja valmistettavuuden kannalta. Varhaisempia prototyyppejä ovat esimerkiksi proof of concept -prototyypit, esittelyprototyypit, toiminnalliset prototyypit ja teollisen muotoilun prototyypit. Prototyypit voidaan luokitella kahden pääluokituksen mukaan nelikenttään. Prototyyppejä voidaan tehdä tuotteen lisäksi sen yksittäisistä osatoiminnoista sekä ei-aineellisista toiminnoista, kuten ohjelmistosta. Siten prototyyppi voi olla joko analyttinen tai fyysinen ja lisäksi laajuudeltaan joko keskittynyt tai kattava (kuva 4). (Ulrich 2003, 249.)

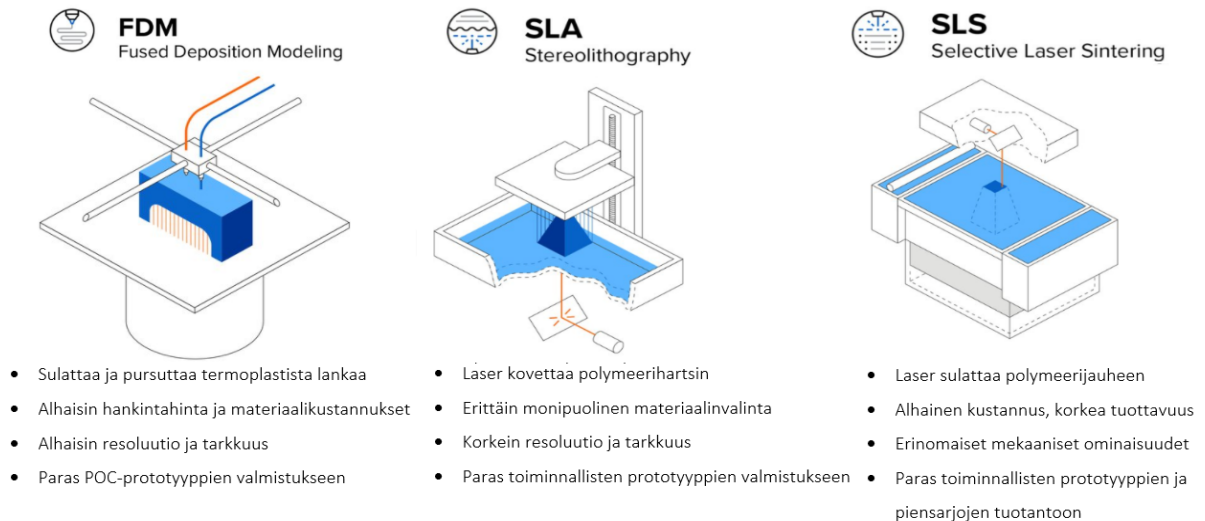


KUVA 3. Prototyyppien nelikenttä (muokattu, Ulrich 2003, 249)

Prototyyppien tarkoituksena on testata tuote ja sen olennaisimmat osat sekä havaita ennalta-arvaamatonta fyysistä käyttäytymistä, jota voi olla mahdoton analysoida, simuloida tai mallintaa ennakoon. Tästä opittua tietoutta voidaan käyttää detaljisuunnittelussa ja esituotannon valmistuksessa. Prototyyppijä voidaan tehdä myös kommunikaatiotarkoituksia varten, kuten varhaisempien prototyyppien esittely sijoittajille ja asiakkaille. Prototyyppien kehitys on olennainen osa tuotekehitysprosessia, ja sen avulla voidaan vauhdittaa muita tuotekehitysvaiheita. (Ulrich 2003, 247 - 253). Jos esimerkiksi ruiskuvalumuotin suunnittelijalla on käsissään skannerin kuoresta tehty prototyyppi, on muotin suunnittelu helpompaa.

### 2.2.7 Prototyyppien 3D-tulostusmenetelmät

Prototyyppien valmistamiseen on nykyisin useita eri vaihtoehtoja, ja kehittyneitä prototyyppijä voidaan valmistaa jopa kotioloissa 3D-tulostamalla. Aiemmin POC-prototyypit tehtiin perinteisillä työkaluilla ja toiminnallisten prototyyppien kehittäminen saattoi vaatia samoja työkaluja ja valmistusprosesseja kuin varsinainen tuote. Rapid prototyping, eli nopea prototyyppien valmistus, auttaa yrityksiä valmistamaan ideoistaan nopeasti POC-prototyyppijä sekä korkeatasoisia prototyyppijä, jotka näyttävät ja toimivat lähes kuin valmis tuote. Rapid prototyping on mahdollista nykyaikaisten CAD-ohjelmistojen ja erilaisten ainetta lisäävien valmistusmenetelmien, kuten 3D-tulostamisen ansiosta. Tämän tekniikan ansiosta prototyyppijä voidaan valmistaa iteratiivisena prosessina useita, jolloin tuotteesta kehittyy pikkuhiljaa täydellinen versio. Muovimateriaalista valmistettavien prototyyppien yleisimmin käytetyt valmistusmenetelmät ovat FDM, SLA ja SLS (kuva 5). (Formlabs 2021.)



KUVA 4. Yleisimmät muovintulostuksen menetelmät (muokattu ja käännetty, Formlabs 2021)

FDM-menetelmässä muovimateriaalia syötetään tulostimeen lanka- tai filamenttirullasta ja työnnetään tulostinpäähän mekaanisesti. Tulostinpäässä on lämpövastus, joka sulattaa muovin. Tulostinpäähän työnnetty sulamaton muovi puskee sulaneen muovin ulos sulakkeesta, jonka halkaisija on 0,1 – 1 mm riippuen tulosteen koosta ja halutusta tarkkuudesta. Tulostettu lanka jäähtyy osuessaan alempaan kerrokseen ja tulostinpäässä on usein tuuletin, jolla vauhditetaan jäähtymistä. FDM menetelmällä tulostaessa joudutaan tulostamaan usein tukirangan päälle, mikäli tulostettava osa muuten tulostuisi niin sanotusti tyhjän päälle. (Formlabs 2021.)

SLA-tulostuksessa käytetään nestemäistä polymeerihartsia, joka kovetetaan UV-lasersäteellä. Tulostuksessa kovetetaan ohut kerros hartsia kerrallaan ja kerroksen kovettumisen jälkeen tulostus-alueetta liikutetaan kerroksen paksuuden verran. Näin tulostus valmistuu kerros kerrokselta kovettuen. Lasersäteen tarkkuuden ansiosta SLA-tekniikalla saadaan aikaan korkean resoluution ja tarkkuuden malleja, joten sillä on helppo valmistaa liikkuvia osia, kuten hammaspyöriä. SLA-tekniikalla valmistettujen osien pinnat ovat valmiiksi hyvin sileitä. (Formlabs 2021.)

SLS-tulostuksessa käytetään polymeerijauhetta, jota levitetään mekaanisesti tulostusalueelle ohut kerros. Laser lämmittää polymeerijauheen, jolloin polymeerihiukkaset kylmähitsautuvat toisiinsa. Tulostuskierron päätteeksi tulostusalueelle lisätään polymeerijauhetta, joka sulatetaan seuraavaksi kerrokseksi. Myös tällä tekniikalla saadaan aikaiseksi tarkkoja osia, johtuen laserin korkeasta resoluutiosta ja tarkkuudesta. SLS-tulostetut osat ovat kuitenkin karheita, joten sileän pinnan aikaansaaminen vaatii jatkokäsittelyä. (Formlabs 2021.) Edellä mainittujen menetelmien laatuero ovat nähtävissä kuvassa 6.



*KUVA 6. FDM, SLA ja SLS menetelmien laatuerojen vertailu (Formlabs 2021)*

Ennen tulostuksen aloittamista valmistettavasta osasta on luotava 3D-malli ja tallennettava se 3D-tulostimen tukemaan muotoon, kuten STL. STL-muotoinen tiedosto sisältää ainoastaan tiedot kapaleen pintageometriasta, joka muodostuu pienistä yhteen linkittyneistä kolmiopinnoista. Mitä enemmän kolmiopintoja, sitä tarkempi pinnanlaatu STL-mallissa on. STL-malli siirretään niin sanottuun viipalointiohjelmaan kuten Ultimaker Cura, joka tekee geometriasta tietynpaksuisia kerroksia halutun tulostustarkkuuden mukaan. Yksi kerros kuvastaa yhtä tulostuskierrosta, eli tulostuspään tekemää reittiä kerroksen valmistamiseksi. Tämän perusteella ohjelma tekee G-koodin, jolla ohjataan varsinaista 3D-tulostinta. G-koodi käytännössä kertoo tulostimelle mihin koordinaatteihin sen pitäisi milloinkin liikkua ja millä nopeudella, ja esimerkiksi kuinka lämmin tulostuspään ja alustan tulisi olla. Curassa pääsee valitsemaan halutut parametrit, kuten esimerkiksi tulostustarkkuuden, tulostusnopeuden, seinämien paksuudet ja solidien täyttöasteen.

### **2.2.8 Tuotannon käynnistäminen**

Prototyypin kehitystyön jälkeen tuotantoon valittua prototyyppiä jalostetaan, jotta saadaan aikaiseksi paras mahdollinen tuotantoversio tuotteesta. Tuotantoversion kehitykseen kuuluu oleellisesti tarkkojen spesifikaatioiden luominen laadun, toleranssien, valmistusmateriaalin ja valmistusmenetelmien osalta. Tuotannon käynnistäminen aloitetaan valmistamalla pieniä määriä tuotantoversiota valitulla tuotantomenetelmällä, jotta voidaan varmistaa tuotantomenetelmän soveltuvuus ja korjata tuotantoversiossa mahdollisesti esiintyvät ennalta-arvaamattomat virheet. Tuotannon käynnistäminen on asteittainen prosessi, jonka lopputuloksena tuote lanseerataan markkinoille (Ulrich 2003, 15). Skannerin osalta tuotannon käynnistämisen ensimmäiset vaiheet ovat tuotantomenetelmän ja käytettävien materiaalin valinta.

### 3 MUOVINTUNNISTUSMENETELMÄT

Kierrätettäviä muovilaatuja on nykyisin useita erilaisia, ja toisinaan niiden erottaminen toisistaan on vaikeaa. Monet muovilaadut ovat ulkoisesti lähes identtisiä keskenään, ja niiden erottamiseen tarvitaan järkevä ja luotettavasti toimiva keino. Muovilaatuja voi toki tunnistaa opiskelemalla ensin yleisimpien muovilaatujen ulkonäkö, mekaaniset ominaisuudet ja käyttäytyminen poltettaessa, ja sitten aistiensa avulla erottaa ne toisistaan. Tämä ei ole erityisen tehokas tai hienostunut tapa tunnistaa muovilaatuja teollisessa tai kaupallisessa käytössä.

#### 3.1 Spektroskopia

Hienostuneempi muovintunnistustekniikka on spektroskopia, joka perustuu atomeiden ja molekyylien värähtelyn tarkasteluun. Kaikki atomit ja molekyylit värähtelevät tietyllä ominaisvärähtelytaajuudella, joka voi voimistua, jos siihen kohdistuvan sähkömagneettisen säteilyn taajuus on sama tai lähes sama kuin ominaistaajuus. Atomien ja molekyylien elektronit ovat normaalisti alhaisimmassa mahdollisessa energiatilassa. Kun sähkömagneettisen säteilyn välittäjähiukkanen, eli fotoni, törmää atomiin saattaa se virittyä, jolloin elektroni nousee korkeammalle energiatasolle. Tämä on mahdollista vain, jos fotonin energia tai värähtelytaajuus vastaa elektronin energia- tai värähtelyeroa (kaava 1). Tällöin elektroni ottaa vastaan fotonin värähtelyn tai energian, eli absorboi sen. Toisaalta normaalia korkeammalla energiatasolla oleva elektroni pyrkii takaisin alhaisimmalle mahdolliselle energiatasolle vapauttaen fotonin, jolla on eri säteilytaajuus kuin absorboituneella fotonilla. Tätä kutsutaan emissioksi ja kaikki absorboitu säteily muuttuu ajallaan emissioksi. (Ball 2001, 3 - 5).

*KAAVA 1. Absorptioenergia (muokattu, Ball 2001, 8)*

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

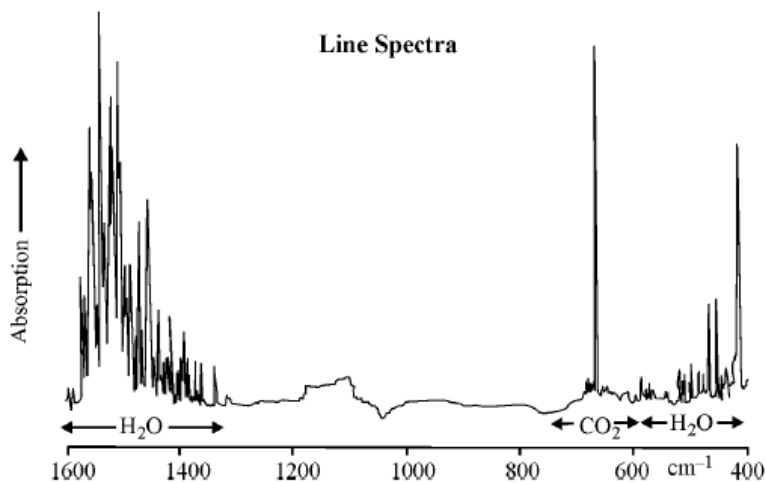
$E$  = fotonin energia [J]

$c$  = valon nopeus tyhjiössä (299 792 458 m/s)

$\lambda$  = valon aallonpituus [m]

$h$  = Planckin vakio ( $6,625 \times 10^{-34}$  Js)

Spektri on sähkömagneettisen säteilyn välittäjähiukkasen värähtelyn aallonpituuden alue. Se on jaettu aallonpituuksien mukaan taajuusalueisiin: radioaallot, mikroaallot, infrapuna-aallot, näkyvä valo, ultravioletti, röntgensäteily ja gammasäteily. Kaikki sähkömagneettinen säteily sisältää yhtä tai useampaa taajuusaluetta. Säteilyn taajuudesta riippuen atomit ja molekyylit joko absorboivat säteilyä tai eivät vaikuta siitä lainkaan. Nämä taajuudet ovat tarkkaan mitattavissa, jolloin säteilyalueen spektri voidaan analysoida. Mikäli säteilyn kohteena oleva atomi tai molekyyli absorboi fotonin, tulee mittalaitteen vastaanottamaan spektriin eroavaisuus normaaliin verrattuna. Toisaalta, jos säteily on emissiivistä, voidaan mitata muuttuneen säteilyn spektriä (NASA 2013). Tämä voidaan kuvata graafina, jossa x-akselilla on aaltoluku (aallonpituuden käänteisluku  $\text{cm}^{-1}$ ) ja y-akselilla sen kohdalla tapahtuva absorptio (kuva 7).

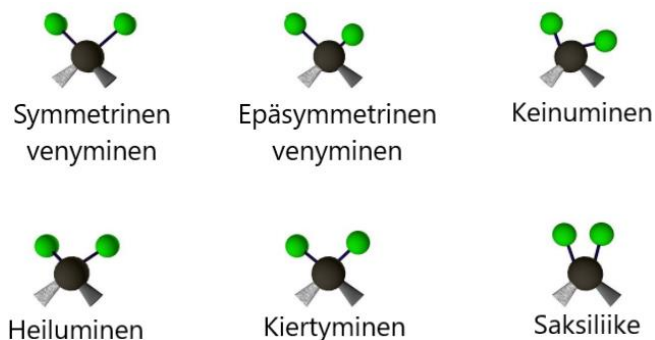


KUVA 7. Absorption viivaspektri vedelle ja hiilidioksidille välillä 1600 - 400  $\text{cm}^{-1}$  (Ball 2001, 13)

### 3.2 Spektroskopiitekniikat

Spektroskopian avulla on mahdollista saada tarkkoja tietoja mitattavan molekyylin rakenteesta. Spektroskopiitekniikoita on useita, mutta yleisimmät ovat ultravioletti ja näkyvän valon spektroskopia, infrapunaspektroskopia (IR) ja ydinmagneettinen resonanssispektroskopia (NMR). Spektroskopiassa käytettäviä mittalaitteita kutsutaan spektrometreiksi. Suurin osa muoveista sisältää orgaanisia polymeerejä, eli pitkiä ketjuja toistuvia molekyylejä, joissa kussakin on ytimenä hiiliatomi. Esimerkiksi PE-muovi (polyeteeni), joka on nykyisin maailman yleisimmin käytetty muovityyppi, koostuu jatkuvasta ketjusta molekyylejä, joissa on kaksi hiiliatomia yhdistyneenä neljään vetyatomiin [kemiallinen kaava:  $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$ ]. (Norman ym. 2020.)

Orgaanisessa kemiassa atomit muodostavat kovalenttisia sigmasidoksia, jolloin atomit jakavat ulkokuorensa elektroneja toisten atomien kanssa. Nämä sidokset eivät kuitenkaan ole jäykkiä, vaan sidokset luonnollisesti heiluvat ja venyvät ominaistuuksillaan. Näistä heilumisista ja venymisistä rakentuu kuusi perusvärähtelyliikettä (kuva 8). Tämä molekyylien sisäinen liike kuvaa molekyylin eri energiatasoja ja sitä vastaavan taajuuden säteily voimistaa tätä liikettä, jolloin säteilyn energiaa absorboituu. (Norman ym. 2020.)



KUVA 8. Molekyylien perusvärähtelyliikkeet

Vaadittava säteilytaajuus määrittelee, mitä spektroskopiotekniikkaa tulisi käyttää. Sidosten taajuus voidaan voiman ja värähtelyn yhtälöistä johtaa kaavassa 2 esitettyyn muotoon. Kun tiedetään sidokseen osallistuvat atomit ja niiden välisen sidoksen jäykkyys, voidaan laskea aaltoluku ja värähtelytaajuus (kaava 2).

KAAVA 2. Sidoksen värähtelytaajuuden laskeminen (Chemistry Libretexts 2020)

$$\hat{\nu} = \frac{h}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

$\hat{\nu}$  = absorptiomaksimin aaltoluku [ $\text{cm}^{-1}$ ]

$h$  = Planckin vakio ( $6,625 \times 10^{-34}$  Js)

$c$  = valon nopeus tyhjiössä (299 792 458 m/s)

$k$  = sidoksen jäykkyys [ $\text{Ncm}^{-1}$ ]

$\mu$  = sidoksen redusoitu massa ( $\frac{m_1 \times m_2}{m_1 + m_2} = \text{g/mol}$ )

### 3.3 IR-spektroskopia

Infrapunaspektroskopia on yksi yleisimmin käytetyistä spektroskopiitekniikoista. Erityisesti orgaanisessa kemiassa käytetään IR-spektroskopiaa, sillä molekyylien värähtelytaajuus sijaitsee infrapunaspektrillä, 700 nm – 1 mm. IR-spektroskopiassa polykromaattista (useista taajuuksista koostuvaa) valoa kohdistetaan tutkimuskohteeseen, josta se heijastuu vastaanottimeen. Vastaanotetun valon viivaspektrien huippukohtia verrataan tunnettuun dataan, jolloin voidaan määrittellä mitä sidoksia tutkitussa materiaalissa on (Chemistry Libretexts 2020). Infrapunasäteily on jaettu aallonpituuksien mukaan alueisiin (kuva 9). Näistä alueista tarkempaan tarkasteluun otetaan lähi-infrapuna-alueen säteily (NIR, near-infrared).

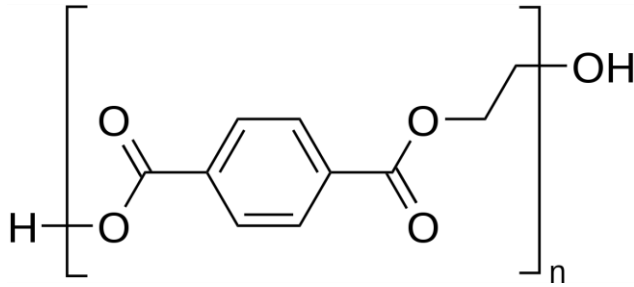
Alue	Aallonpituus, nm	Aaltoluku, $\text{cm}^{-1}$	Taajuus, Hz
Lähi	780 - 2 500	12 800 - 4 000	$3,8 \times 10^{14}$ - $1,2 \times 10^{14}$
Keski	2 500 - 50 000	4 000 - 200	$3,8 \times 10^{14}$ - $1,2 \times 10^{14}$
Kauko	50 000 - 100 000	200 - 10	$3,8 \times 10^{14}$ - $1,2 \times 10^{14}$
Yleisin	2 500 - 15 000	4 000 - 670	$3,8 \times 10^{14}$ - $1,2 \times 10^{14}$

KUVA 9. Infrapuna-alueet (käännetty, Chemistry Libretexts 2020)

### 3.4 NIR-spektroskopia

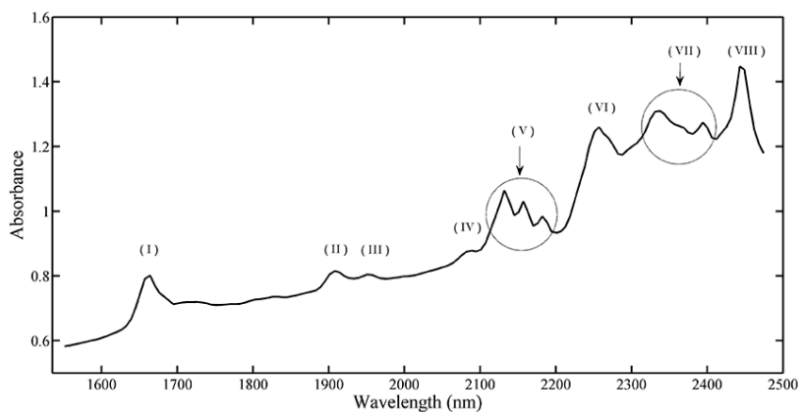
Eniten säteilyn absorboitumista tapahtuu infrapunankeskialueella 2 500 - 50 000 nm, jolloin molekyylien värähtelyt ovat voimakkaita ja yksinkertaisia. Keskialueen ja näkyvän valon välissä on kuitenkin NIR-alue, joka kattaa aallonpituudet (780 - 2 500 nm). Tällä alueella molekyylien värähtely on monimutkaisempaa, ja tällä alueella on absorptiokaistoja, jotka vastaavat perusvärähtelyjen yhdistelmiä ja ylisäveliä. Ylisävel on taajuus kerrottuna kokonaisluvulla, esimerkiksi ensimmäinen ylisävel on taajuus kaksinkertaisena. Erityisesti toiminnalliset ryhmät, eli sidokset, jotka antavat molekyyille niiden kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet, värähtelevät yhdistelminä ja ylisävelinä. (Burns & Ciurczak, 566.)

Esimerkiksi PET-muovi (polyetyleenitereftalaatti,  $(\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4)_n$ ) (kuva 10) on yleinen termoplastinen polymeerimuovi, jolla on kaksi hydroksyyli ryhmää (-OH), karboksyyli ryhmä (-COO), metyleeniryhmät (-CH<sub>2</sub>-), sidokset C-O ja C=O sekä aromaattisia C-H sidoksia.



KUVA 10. PET-muovin kemiallinen rakenne

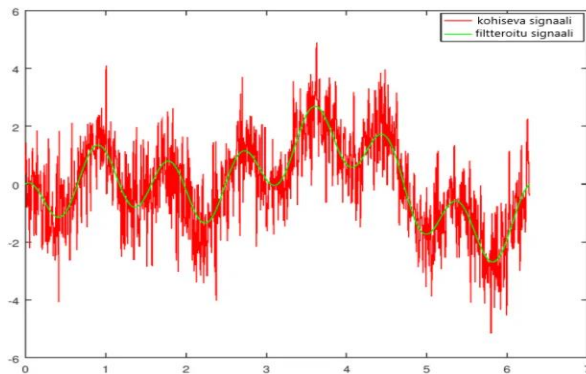
PET-muovin NIR spektrin ns. sormenjälkialueet löytyvät aallonpituusalueelta 1 500 – 2 500 nm (kuva 11). Kukin numeroidusta huipuista kuvaa joko ylisäveliä tai yhdistelmiä. Kaista I on C-H sidosten ja metyleeniryhmän venymisestä aiheutuva ensimmäinen ylisävel. Kaista II on O-H venymä ja havaitaan kohdassa n. 1900 nm. Kaistat III ja IV liittyvät C=O sidoksen venymän toiseen ylisäveleen ja C-O sidoksen kolmannen ylisävelen, tässä järjestyksessä. Kaistat V ja VI ovat aromaattisten sidosten ja metyleeni ryhmän yhdistelmäkaistoja, tässä järjestyksessä. Lopuksi kaistat VII ja VIII ovat metyleeniryhmän, karboksyyliiryhmän ja aromaattisten C-H sidosten päällekkäisyyksiä. (de Oliveira 2018, 5.)



KUVA 5. PET-muovin NIR spektri (da Oliveira ym 2018)

NIR-spektroskopian etu on siinä, että analyysin suorittaminen on nopeaa, halpaa ja menetelmä on materiaalia rikkomaton. Lisäksi näytteitä ei tarvitse esikäsitellä. (Burns & Ciurczak 1992, 2.) Tämä esikäsitteilyn puute kuitenkin aiheuttaa haasteita datan käsittelyyn, sillä esikäsittelemättömästä näytekappaleesta luettu spektri sisältää usein säteilyn taustakohinaa, joka pitää saada eristettyä. Lisäksi näytteissä voi olla fyysisiä eroavaisuuksia, jotka aiheuttavat dataan hajontaa. Laitteet vaativat myös säännöllistä kalibrointia. (Burns & Ciurczak 1992, 250 - 253.) NIR-spektroskopialla voidaan tunnistaa läpinäkyviä tai kevyesti värjättyjä muovilaatuja, mutta tummia muoveja sillä ei voi tunnistaa, sillä tumma muovi absorboi laajemman NIR-spektrin.

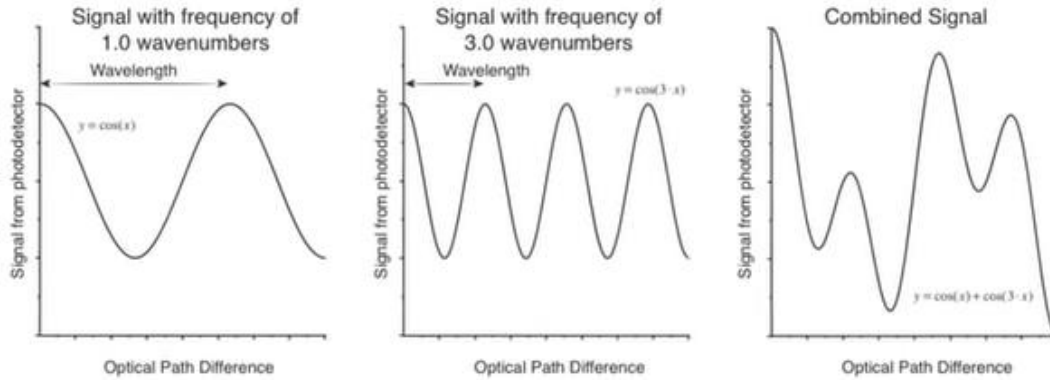
Kaikkien yleisimpien muovilaatujen spektrit on tutkittu ja tieto on yleisesti saatavilla. Tällöin voidaan luoda tietokonepohjainen ohjelmisto, joka vertaa sensorin dataa tunnettujen spektrien dataan, jolloin voidaan selvittää, mikä materiaali on kyseessä. Tutkittavaan dataan vaikuttavien häiriötekijöiden, kuten taustakohinan poistamiseksi on käytettävä matemaattisia metodeja. Yleinen metodi on Savitsky-Golay filtteri (kuva 12), jossa häiriöisestä datasta saadaan ulos signaalin tendenssi sovitamalla vierekkäisten datapisteiden alajoukot matalan asteen polynomiin, esimerkiksi  $x^3$ ,  $x^2$  ja niin edelleen, pienimmän neliösumman menetelmällä. (Esteve Agelet & Hurburg 2010, 28 - 29.)



KUVA 12. Esimerkki signaalikohinan suodattamisesta (oma kuva)

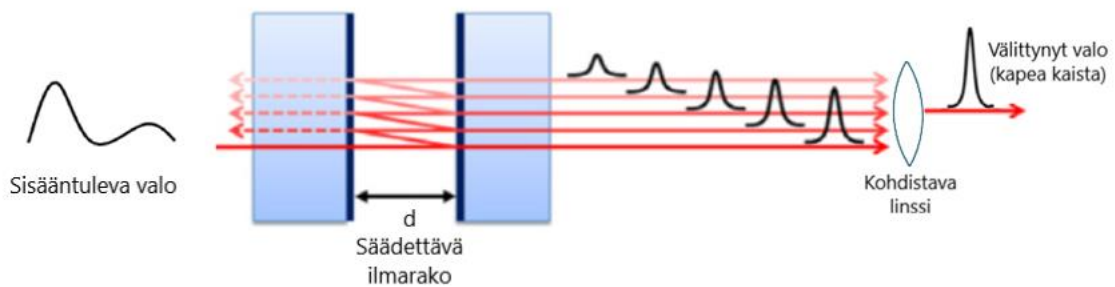
### 3.5 Fabryn-Pérot'n interferometri

Valosignaalia voidaan pitää poikittaisena sähkömagneettisena aaltoliikkeenä, joka etenee avaruudessa. Kun kaksi aaltoliikettä asettuvat päällekkäin samaan tilaan, aaltojen resultanttisignaali jokaisessa pisteessä riippuu siitä, vahvistavatko vai neutralisoivatko aallot toisiansa. Jos kahden valosignaalin aallonpituus ja vaihe ovat samoja, niiden yhdistelmän, eli resultanttisignaalin amplitudi on kahden aallonpituuden yhteenlaskettu summa. Tätä kutsutaan konstruktiviseksi interferenssiksi. Jos kahden valosignaalin aallonpituus on sama, mutta niillä on 180 asteen vaihe-ero, neutralisoivat ne toisensa ja resultanttisignaalin amplitudi on nolla. Tätä kutsutaan destruktiiviseksi interferenssiksi. Mikäli taas signaali on yhdistelmä useita eri taajuuksien signaaleja, ne muodostavat monimutkaisen resultanttisignaalin, jonka monimutkaisuus riippuu konstruktivisten ja destruktiivisten häiriöiden määrästä (kuva 13). Interferometriä perustuu juuri tämän perustavanlaatuisen ilmiön tarkasteluun. (Hariharan 2006, 2 - 5.)



KUVA 13. Aallonpituuksien kombinaatio (Keynote Chemistry 2014)

Interferometrillä mitataan valosignaalin taajuuksia erikseen, joten sen avulla voidaan määrittää mitä valosignaalia tutkittava näyte on heijastanut ja absorboinut. Interferometrinen menetelmä on lukemattomia erilaisia, mutta yksi yleisesti elektroniikassa käytetty interferometri on Fabry–Pérotin interferometri (kuva 14), joka on nimetty keksijöidensä Charles Fabry ja Alfred Pérotin mukaan. Tässä menetelmässä kahta osittain heijastavalla pinnoitteella päällystettyä peiliä käytetään valosignaalin suodattamiseen. Kun valosignaali kohtaa osittain heijastavan pinnan, se jakautuu kahdeksi signaaliksi, joista toinen heijastuu ja toinen kulkeutuu pinnan läpi. (Hariharan 2006, 35 - 36.) Tämä johtuu valon aalto-hiukkasdualismista, jonka mukaan valolla on samanaikaisesti aallon ja hiukkasen ominaisuuksia.



KUVA 14. Fabry–Pérotin interferimetrin toimintaperiaate (oma kuva)

Osa valonsäteestä läpäisee pinnan ainoastaan silloin, kun säädettävä ilmarako on kokonaisnumeerikertoiminen aallonpituuteen nähden, esimerkiksi kaksi kertaa aallonpituutta pidempi. Joka kerta kun valonsäde kimpoaa seinästä, sen vaihe siirtyy puolikkaan aallonpituuden verran. Valonsäteet kimpoilevat osittain heijastavista pinnoista useita kertoja, joka kerta osittain heijastuen, osittain läpäisten seinämän. Lopuksi valonsäteet kohdistetaan samaan pisteeseen, jolloin niissä tapahtuu interferenssiä, jonka tuloksena vain yksi aallonpituus voimistuu ja muut ovat interferenssin takia

hävinneet. Tämä voidaan lukea sähköisellä mittalaitteella, jossa jännite kasvaa vastaanotetun aaltoliikkeen mukaisesti. Näin voidaan määrittellä vastaan otetun signaalin taajuus ja aallonpituus. (Harriharan 2006, 134 – 139.)

Säädettävää ilmarako voidaan liikuttaa erilaisilla mikroeletromekaanisilla laitteilla, jolloin tämä vaikuttaa suodattimessa seuraavaksi läpi pääsevän valon aallonpituuteen. Säädettävää rakoa hyödyntämällä on mahdollista saada sisään tulevasta valosta erotettua kaikki aallonpituudet, jolloin voidaan nähdä mitkä aallonpituudet on absorboituneet, kun lähdevalon aallonpituudet ovat tiedossa. (Antila 2013.) Tätä toimintaperiaatetta hyödynnetään erityisesti pienelektronikasta, esimerkiksi tässä projektissa käytetyssä NIR-sensorissa.

## 4 PROJEKTIVAATIMUKSET

### 4.1 Projektin tausta

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää muovintunnistukseen soveltuva, kannettavasti käytettävä ja omalla akkuvirrallaan toimiva skanneri. Skannerin käyttökohteet olisivat muovinlajittelu-keskukset sekä teolliset ja kaupalliset kohteet, joissa kierrätetään paljon muovia. Näissä kohteissa olisi hyödyllistä epävarmuustilanteissa varmistaa muovin laatu, ennen kuin se lajitellaan kierrätykseen. Toimeksiantaja oli aiemmin kehittänyt skannereista konseptiprototyyppejä, mutta tämän skannerin osalta suunnittelu aloitettiin täysin puhtaalta pöydältä ja pyrkimyksenä oli kehittää toiminnallinen esittelyprototyyppi, jota voidaan esitellä mahdollisille asiakkaille, sijoittajille ja muille oleellisille sidosryhmille.

Esittelyprototyyppi valmistettiin 3D-tulostamalla PLA-muovista FDM-tekniikkaa hyödyntäen. Prototyypin suunnittelussa ja valmistuksessa pyrittiin minimoimaan valmistuskustannukset, joten standardiosia käytettiin aina kun taloudellisesti järkevää. Alkuperäisenä tavoitteena oli luoda SLS- tai ruiskuvalutekniikalla valmistettava tuotantoversio skannerista, mutta projektin edetessä oli selvää, ettei sitä tämän opinnäytetyön puitteissa voida vaaditun työmäärän ja resurssivaatimusten takia toteuttaa. Valmistetun prototyypin perusteella voidaan myöhemmässä vaiheessa alkaa kehittämään teollisena sarjatuotantona tai piensarjatuotantona valmistettavaa kaupallista versiota, mutta sen suunnitteleminen ei kuulu tämän opinnäytetyön laajuuteen.

Huomioitavaa on myös, että skannerissa toimiva ohjelmisto on kehitetty toimeksiantajan puolelta, ja sen toimintaa tässä raportissa ei käsitellä. Seuraavassa luvussa käydään läpi toimeksiantajan asettamat vaatimukset projektin päätteeksi valmistuvan esittelyprototyypin suhteen.

### 4.2 Toimeksiantajan vaatimukset skannerin suhteen

Projektin aloituspalaverissa käytiin läpi valmistettavaan prototyyppiin liittyvät vaatimukset ja halutut ominaisuudet. Projektin aikana käytiin läpi konseptien kehitysvaiheita ja prototyyppien iteraatiovaiheita tarpeen mukaan. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi toimeksiantajan vaatimukset osa-

alueittain. Nämä vaatimukset siis koskevat toiminnalliseksi prototyypiksi valmistettavaa skanneria ja teollisesta valmistettavasta versiosta tehdään tässä opinnäytetyössä vain esiselvitys.

#### **4.2.1 Geometria ja ergonomia**

Skannerin yleiselle ilmeelle tai mitoille ei asetettu vaatimuksia. Skanneri tuli kuitenkin suunnitella siten, että se on mahdollisimman kevyt, sen painopiste sijaitsee lähellä kahvaa ja se on käteen sopivaksi muotoiltu, jotta sitä olisi mukava käyttää myös useamman tunnin ajan päivässä. Myös skannausliipaisimen ja virtanapin sijainti tuli valita siten, että skannerin käyttö onnistuu vain yhdellä kädellä. Virtanapin sijainti tuli kuitenkin valita siten, ettei sitä voi vahingossa painaa. Käytön jälkeen skannerin pystyisi laskemaan pöydälle tukevasti vaaka-asentoon ilman, että sensori voisi koskettaa pöydän pintaa.

Sensori oli muutenkin suojattava skannerissa siten, että sen rikkoutuminen 1 m:n pudotuksessa olisi hyvin epätodennäköistä. Lisäksi sensori saa olla korkeintaan 2 mm:n päässä tunnistettavasta kohteesta, joten se on huomioitava skannerin otsapinnan suunnittelussa ja sensorin kiinnityksessä. Sensori vaatii säännöllistä kalibrointia, jota varten suunniteltiin kalibrointitelakka, johon on liitettävissä sensorin kanssa tuleva kalibrointipala. Skannerin tulee olla laskettavissa telakan päälle samalla tavoin kuin pöydällekkin ja pysyä tukevasti paikallaan. Myös kalibroinnin tulee onnistua luotettavasti.

#### **4.2.2 Osat ja käyttövoima**

Skanneri tuli suunnitella siten, että siihen sopii Raspberry Pi -pienoistietokone, Spectral Enginesin NIR-sensori Nirone S sekä 3,5 tuuman Raspberryn yhteensopiva kosketusnäyttö, jonka koskettaminen ja käyttö olisi mahdollisimman helppoa. Näytön tuli olla sijoitettu siten, että sen vahingoittuminen olisi normaalissa käytössä epätodennäköistä. Skanneriin pitää kuulua myös latauspistoke sekä data-kaapelipistoke, jonka avulla skannerin lukemaa dataa voidaan siirtää tietokoneelle.

Skannerin tulee olla kannettavissa ja kestää usean tunnin käyttöaika ilman latausta. Tämän toteuttamiseksi skannerin on saatava virtansa jonkinlaisesta akusta, jonka sähkövarauksen täydessä varauksessa tulisi olla minimissään 5 500 mAh. Skannerissa käytettävän virranhallintajärjestelmän pitäisi pystyä antamaan Raspberrille tasainen, minimissään 2,0 A virta sekä 5 V tasavirtajännite.

Skanneria pitää pystyä myös käyttämään myös silloin, kun se on latauksessa. Virtajohdon äkillisen irtoamisen ei pidä vaikuttaa skannerin toimintaan. Akku pitää pystyä irrottamaan ja vaihtaa uuteen, kun tarve vaatii.

#### **4.2.3 Turvallisuus**

Skannerin sähköjärjestelmä ja sen sijoitus tuli tehdä siten, että laite on sähköturvallinen, virtapiiri vakaa ja elektroniset osat eivät pääse ylikuumentamaan. Mikäli myöhemmin tehtävissä lämpötilamittauksissa havaitaan liiallista lämpenemistä, suunnitellaan prototyyppiin jäähdytysmekanismi.

Sähköliitosten laatuun pitää kiinnittää erityisesti huomiota, ettei virtapiiri katkea eikä oikosulkutilaa voi tapahtua. Käyttäjälle ei saa aiheutua sähköiskun riskiä normaalista skannerin käytöstä. Sähköturvallisuuden varmistamiseksi skanneriin tuli lisätä asennossaan pysyvä suojakytin, jotta skannerin virtapiiriin voi katkaista esimerkiksi kuljetuksen tai säilömistä ajaksi.

Lisäksi skannerin suunnittelussa piti pyrkiä minimoimaan pölyn ja vesiroiskeen pääseminen skannerin sisäosiin, mutta tämän osalta ei asetettu IP-luokkavaatimuksia, sillä sen vaatimiin toleransseihin pääseminen ei ole mahdollista FDM-menetelmän karkeuden ja epätarkkuuden takia. Skannerin lataus- ja datapistokkeet tuli suojata silikonitulpilla, jotka eivät voi normaalikäytössä irrota skannerin rungosta.

#### **4.2.4 Valmistus ja kokoonpano**

Skannerin kaikki prototyypit ja muut tarvittavat muoviset osat tuli valmistaa FDM-menetelmällä opinnäytetyön tekijän kotona PLA-muovista. Skannerin rakenteellisen vakauden maksimoimiseksi ja kokoonpanon helpottamiseksi skannerin kiinnitys tuli tapahtua pääosin messinki-inserttien ja niihin sopivien ruuvien avulla. Sähköjohtojen liitostyössä piti olla erityisen huolellinen, ja sähköliitosten tuli olla kestäviä ja varmoja.

Käytettävien ruuvien tulee olla mahdollisimman samankaltaisia, jotta asennuksessa voidaan käyttää samaa työkalua. Kiinnityskohtien sijoituksessa tulee ottaa huomioon mahdollisimman helppo asennettavuus ja osien suojaaminen vahingoilta asennuksen aikana. Kokoonpanon tulee onnistua mahdollisimman vähäisellä määrällä työkaluja sekä ilman turhia erikoislaitteita. Lisäksi laite pitäisi

olla mahdollista purkaa ja koota useita kertoja ilman kiinnitysten tai yhteensopivuuksien heikkene-  
mistä. Osia tulee olla mahdollisimman vähän ja asennuksen tulee onnistua ilman sen suurempaa  
oppimista. Elektroniikkaosat tulee olla mahdollista liittää skannerin runkoon ilman riskiä kompo-  
nenttien rikkoutumisesta, ne pitää olla myös helposti irrotettavissa skanneria purettavissa, mutta  
silti pysyä vakaasti paikallaan käytön aikana.

## 5 KONSEPTISUUNNITTELU

Skannerin tuotekehitysprosessissa ei käyty läpi tuotekehitysprosessin teorian mukaista kolmea ensimmäistä vaihetta, eli ideoiden keräämistä, alustavaa suunnittelua ja konseptien kehittämistä. Tämä tehtiin siksi, että toimeksiantajalla oli jo melko tarkka tieto siitä, minkälaista skanneria pitäisi alkaa kehittämään, mitä osia siinä tullaan käyttämään ja miten se toimisi. Konseptisuunnitteluvaiheessa käydään kuitenkin läpi kaksi osatoimintoa: elektroniikan jäähdytys ja virranhallintajärjestelmä. Lisäksi tätä seuraavissa luvuissa esitellään projektissa käytettävät komponentit, jotka ovat kiinteitä vaatimuksia.

### 5.1 Käytettävien komponenttien esittely

#### 5.1.1 Raspberry Pi

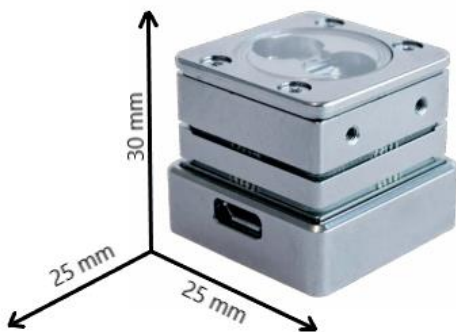
Raspberry Pi on pienten, yhden piirilevyn tietokoneiden sarja, josta on kehitetty useita eri versioita, kuten Zero, 3 ja 4 (kuva 15). Tässä tuotekehitysprojektissa käytettiin Zeroa ja versiota 3 testausvaiheessa, ja valmiissa teollisesti tuotetussa skannerissa käytettäisiin versiota 4. Käyttöjärjestelmänä Raspberry käyttää useita erilaisia käyttöjärjestelmiä, kuten Linux-pohjaisia käyttöjärjestelmiä, Ubuntuja ja Windows 10 IoT Corea. Raspberry on kokonsa nähden hyvin tehokas tietokone, esimerkiksi Raspberry Pi 4:ssa on 1,5 GHz 64-bittinen neliydinsuoritin ja jopa 8 Gt muistia. Raspberry Pi 3 ja 4 ovat kooltaan yhteneväisiä, joten kiinnityksen suunnittelun kannalta ei ole väliä kumpaa tietokonetta käytetään. Molemmat ovat noin 86 mm pitkiä ja 57 mm leveitä, ja korkeutta on noin 20 mm. Zero on kuitenkin kapeampi, joten sitä käytettäessä skannerin elektroniikkakiinnitysten rakenteeseen pitää tehdä muutoksia. (Raspberry Pi Foundation.)



KUVA 15. Raspberry Pi versiot Zero, 3 ja 4 (Raspberry Pi Foundation)

### 5.1.2 Spectral Engines Nirone S

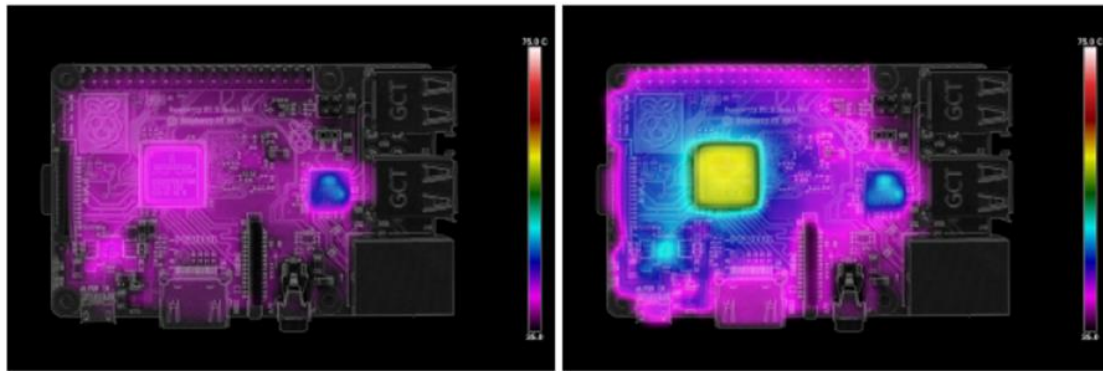
Spectral Enginesin valmistama Nirone S (kuva 16) on NIR-sensori, joka käyttää hyväkseen mikroelektromekaanista Fabryn–Pérot'n interferometriä. Mikroelektromekaanikan hyödyntämisen ansiosta sensorista on saatu hyvin pieni, kompakti ja kevyt, painaen ainoastaan 15 grammaa. Skanneri pystyy lukemaan NIR-aluetta 1100 ja 2450 nm välillä ja käy läpi yhden aallonpituuden yhdessä millisekunnissa, joten koko NIR-alueen läpikäyminen tapahtuu alle 1,4 sekunnissa. Nirone S voidaan yhdistää Raspberryn Micro-USB johdolla, ja sen käyttöä ohjataan I2C-kanavalla, joten skannerin liipaisin voidaan yhdistää Raspberryn I2C-kanavaan ja maahan. Näin skannauserätteen virtapiiriin luominen onnistuu liipaisimen kanssa mekaanisessa yhteydessä olevalla yksinkertaisella NO-painikkeella. (Spectral Engines.)



KUVA 16. Nirone S sensori mittoineen (Spectral Engines)

### 5.2 Elektroniikan jäähdytys

Lämpötilan hallinta on kriittistä elektroniikan toimivuuden ja pitkäkestoisuuden takaamiseksi. Virallisesti Raspberry Pi 3:n ja 4:n maksimikäyttölämpötilat ovat 75 °C ja 85 °C, mutta käytännössä tällaisessa lämpötilassa mikropiirin toimintaa rajoitetaan automaattisesti lämpötilan laskemiseksi. Raspberry Pi 3:n toimintaa aletaan rajoittamaan jo 60 °C:n kohdalla, joskaan kuormitustesteissä sen lämpötila ei noussut tämän yli (kuva 17). (Bate 2019).

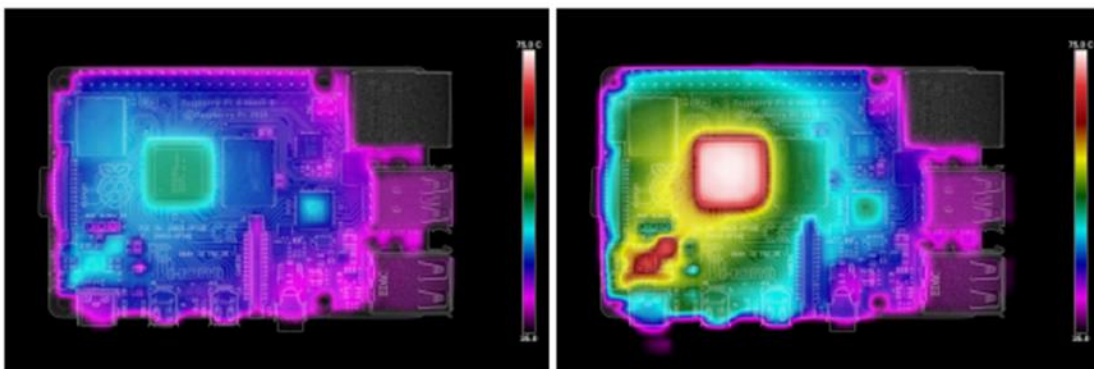


Raspberry Pi 3B+ lämpöjakauma tyhjäkäynnillä

Lämpöjakauma kuormituksessa (maksimi 58,1 °C)

*KUVA 17. Raspberry Pi 3B+ tyhjäkäynnin ja kuormituksen aikaiset lämpötilat (Bate 2019)*

Mittausten mukaan Raspberry Pi 4:n lämpötila kuormituksen alla nousee jopa 72 °C:seen huoneenlämmössä (kuva 18) (Bate 2019), joten korkeassa ympäröivässä lämpötilassa 85 °C:n ylitys ei tunnu mahdottomalta.



Raspberry Pi 4:n lämpöjakauma tyhjäkäynnillä

Lämpöjakauma kuormituksessa (maksimi 72,1 °C)

*KUVA 18. Raspberry Pi 4 tyhjäkäynnin ja kuormituksen aikaiset lämpötilat (Bate 2019)*

Mitä lämpimämpää ympäröivä ilma on, sitä hitaammin skannerin käyttöjärjestelmä tulee toimimaan. Mikäli elektronisten osien lämpötila nousee liian korkealle, sitä joudutaan jäähdyttämään tavalla tai toisella toimintavarmuuden ylläpitämiseksi. Ympäröivän ilman lämpötilalle ei ole mitään yleisesti hyväksyttyä maksimilämpötilaa, sillä se riippuu täysin elektronisten komponenttien laadusta ja ominaisuuksista. Kirjallisuudesta ei löydy tietokoneiden osalta yleisesti hyväksyttyä maksimilämpötilaa ympäröivälle ilmalle, mutta yleinen suositus vaikuttaa olevan, ettei se saa nousta yli 45 °C:seen pitkäaikaisessa käytössä. Tässä lämpötilassa ja kuormituksen alla prosessorin pintalämpötila voi nousta jopa 90 °C:seen, joka on suorituskyvyn kannalta haitallisen korkea lämpötila. (Bach 2012.) Seuraavissa luvuissa esitellään erilaiset käytettävissä olevat jäähdytysmenetelmät ja annetaan perustelut sille, minkälaista jäähdytystä skannerissa tulisi hyödyntää.

### 5.2.1 Jäähdytysmenetelmät

Jäähdytymisellä tarkoitetaan lämpöenergian siirtymistä korkeammasta lämpötila-alueesta matalamman lämpötilan alueelle joko johtumisen, säteilyn tai konvektion avulla. Johtuminen tapahtuu kiinteästä aineesta toiseen, jossa lämpöenergia siirtyy siihen kosketuksissa olevaan aineeseen. Säteilyssä lämpöenergia muuttuu sähkömagneettiseksi säteilyksi kulkeutuen pois jäähtyvistä aineista. Konvektiossa lämpöenergia siirtyy pois virtaavan aineen eli fluidin mukana.

Yleisesti ottaen jäähdytysmenetelmät voidaan jakaa aktiivisiin ja passiivisiin jäähdytysmenetelmiin. Aktiiviset jäähdytysjärjestelmät käyttävät hyväksi jonkinlaista mekaanisesti pakotettua konvektiota, eli fluidin virtausta jäähdyttämisen toteuttamiseksi. Passiivissa jäähdytysjärjestelmissä taas jäähdytymisen perustuu johtumiseen, säteilyyn tai vapaaseen konvektioon. Aktiiviset jäähdytysjärjestelmät ovat passiivisia järjestelmiä tehokkaampia, mutta vaativat erillisen prosessin lämmönsiirtoa varten. (Sundaram & Velraj, 7 - 8.)

Skannerin sisälämpö pitää saada siirrettyä ympäröivään ilmaan, joten konvektio on ainoa vartenotettava jäähdytysmenetelmä. Pakotettu konvektiojäähdytys vaatisi moninkertaisen suodatuksen pölyn eristämiseksi skannerista, ja näitä suodattimia pitäisi vaihtaa säännöllisesti. Lisäksi se menettäisi jäähdytystehoaan, kun ilmaa pitäisi työntää filترین läpi.

### 5.2.2 Passiivinen konvektiojäähdytys

Passiivinen konvektiojäähdytys perustuu lämpöenergian siirtymiseen aineesta ympäröivään fluidiin ilman, että sen saavuttamiseksi tehtäisiin työtä. Vapaassa konvektiossa pintaa lähimpänä olevat fluidin molekyylit vastaanottavat lämpöenergiaa ja nousevat ylös, jolloin tilalle tulee uutta fluidia. Konvektiota kuvaa alla esitetty kaava 3.

*KAAVA 3. Lämpöenergian konvektio pinnan kautta (The Engineering Toolbox 2003)*

$$q = h_c A \Delta T$$

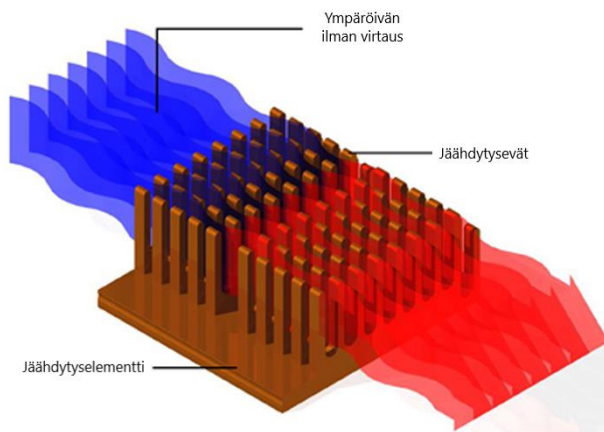
$q$  = siirtynyt lämpöenergia per aikayksikkö [W]

$h_c$  = konvektion lämmönsiirtokerroin [ $W/m^2K$ ]

$A$  = pinta-ala [ $m^2$ ]

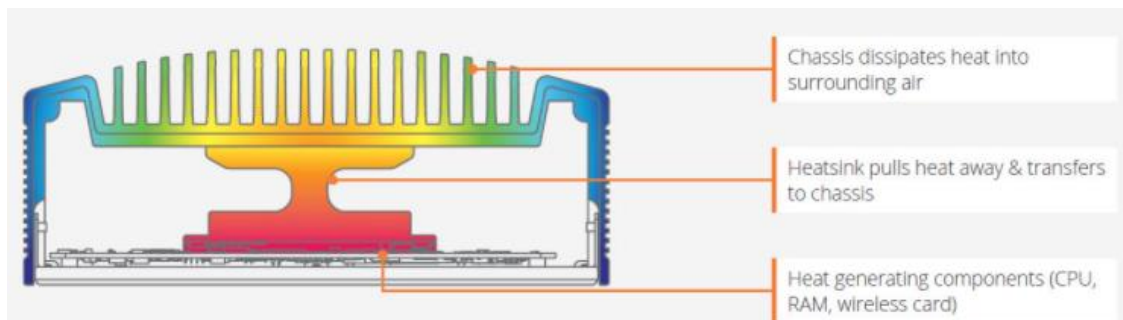
$\Delta T$  = pinnan ja fluidin välinen lämpötilaero [K]

Käytännössä jäähdytyselementissä (kuva 19) tapahtuu lämpöenergian siirtymistä johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla. Jäähdytyselementin tehoon vaikuttaa monta tekijää, esimerkiksi ympäröivän fluidin nopeus, ominaislämpökapasiteetti, materiaalin lämmönjohtavuus ja kokonaispinta-ala. Valmistettavassa jäähdytyselementissä pitäisi siis pyrkiä tekemään jäähdytyselementti pinta-alaltaan mahdollisimman suureksi ja valmistaa hyvin lämpöä johtavasta materiaalista. Optimaalinen materiaali skannerin jäähdytyselementtiin olisi kupari, sen korkean lämmönjohtavuuden ja korroosionkestävyyden takia. Alumiini on myös erinomainen materiaali, koska sillä on korkea lämmönjohtavuus ja se on kuparia halvempaa. Alumiini voitaisiin myös pinnoittaa esimerkiksi anodisoimalla korroosion estämiseksi. (Kumar 2017, 17 - 19.)



KUVA 19. Jäähdytyselementin toimintaperiaate (käännetty, Kumar 2017, 18)

Raspberryn prosessorin pinnalle sijoitettava jäähdytyselementti olisi kuitenkin turha, ellei se ole kosketuksissa ympäröivään ilmaan sekä elektroniikan herkästi lämpiäviin osiin. Voitaisiin kuitenkin suunnitella skanneriin sijoitettava rakenteellinen elementti, joka olisi kosketuksissa Raspberryn prosessoriin ja samalla osa skannerin kotelointia (kuva 20). Näin saataisiin johtumisella siirrettyä lämpöenergia skannerin ulkokuoreen, josta se vapaana konvektiona siirtyisi ympäröivään ilmaan.



KUVA 20. Konvektiojäähdytinkotelo (Onlogic Blog 2020)

### 5.3 Virranhallintajärjestelmä

Toimeksiantajan vaatimuksista ehkä oleellisin on skannerin käytettävyys kannettavasti ilman latausjohtoa. Tämän aikaansaamiseksi tarvitaan sellainen virranhallintajärjestelmä, joka antaa tietokoneelle tasaisen 5 VDC:n jännitteen sekä 2 A:n virran. Lisäksi virranhallintajärjestelmän pitää olla sijoitettavissa skanneriin siten, että skannerin geometria ja ergonomia, esimerkiksi painopisteen sijainti ja kahvan muotoilu, pysyvät järkevinä. Seuraavassa esitellään tähän sopivat vaihtoehdot.

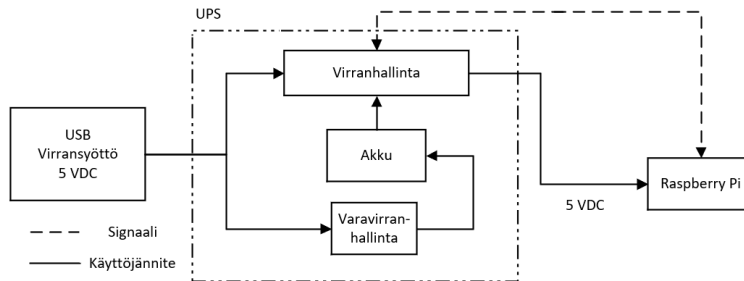
#### 5.3.1 Virtapankki

Kannettavissa ja harrastusmielessä tehdyissä Raspberry Pi -järjestelmissä hyödynnetään usein virtapankkeja, joita normaalisti hankitaan puhelimien ja muiden mobiililaitteiden lataamista varten. Virtapankki kuitenkin sisältää oman kotelointinsa, joka tekee sen sijoittamisesta skanneriin haastavaa. Periaatteessa virtapankki voisi toimia skannerin virtalähteenä, jos siinä on pass through -ominaisuus, joka sallii virran jakautumisen akkuun ja kuormaan. Virtapankkeja kuitenkin ladataan yleensä 2,1 tai 2,5 A:n virralla, joten virran jakaminen antaisi vain noin 1 A:n virran itse laitteelle. Raspberry vaatii vakaan 2 A:n virran toimiakseen luotettavasti, joten virtapankin latauksen aikainen virta olisi liian matala skannerin mobiilikäyttöön. Lisäksi virtapankki voi kuumeta merkittävästi virranjakautumisen aikana. (Power Bank Expert 2021.)

#### 5.3.2 Keskeytymätön virransyöttö (UPS)

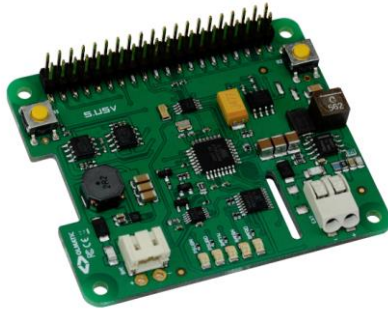
Raspberry käytetään jonkin verran myös teollisuudessa, jossa tarvitaan helposti kustomoitavia applikaatioita, jotka voidaan nopeasti ja halvasti kehittää äkilliseen ja väliaikaiseen tarpeeseen. Tätä varten on olemassa UPS, eli keskeytymätön virransyöttö, joka takaa, että Raspberry saa virtaa

akuista esimerkiksi sähkökatkon aikana. UPS-järjestelmä on kaksikanavainen virtalähde, joka vaihtaa automaattisesti päävirtalähteen ja akun välillä. Tällöin järjestelmä toimii joko akkuviralla tai päävirtalähteestä (kuva 21).



KUVA 21. UPS lohkoakaavio (käännetty, Bennet & Versteeg 2017)

On olemassa lukuisia UPS-valmistajia, joten on helppo löytää toimittajia, jotka valmistavat laadukkaita ja luotettavasti toimivia UPS-järjestelmiä. Tärkeintä on löytää luotettava tavarantoimittaja, jolta komponentteja voi tilata paljon kerralla ja johon voi luottaa tulevaisuudessakin. Esimerkkinä tästä on Olmatic, jonka UPS (kuva 22) on yhteensopiva Raspberryn versioiden 3 ja 4 kanssa. Tätä UPS:ää voidaan tilata jopa satojen kappaleiden erissä.



KUVA 22. Olmatic S.USV Advanced

UPS:n suurin hyöty on siinä, että sen akusto voidaan luotettavasti rakentaa itse. Näin voidaan päättää, kuinka paljon varausta järjestelmässä voi olla ja tehdä myöhemmin modifiointeja. Suurin osa UPS-järjestelmistä vaatii akustoltaan nimellisen 3,7 V:n jännitteen, joka on helposti saavutettavissa rinnan kytketyistä litiumioniakuista. Litium on kaikista metalleista kevein ja sillä on suurin sähkökemikaalinen potentiaali. Tämän ansiosta sen energiatiheys suurin ja siitä voi siten myös valmistaa keveitä korkean varauksen akustoja. Litiumioniakut ovat myös turvallisia, kunhan tietyt varotoimet otetaan huomioon. Ne eivät vaadi säännöllistä sähkövarauksen tyhjennystä, kuten

NiCd- ja NiMH-akut. Litiumioniakut tarvitsevat varotoimia, kuten suojauspiirin, joka estää jännityspiikkien muodostumisen ladatessa ja liian nopean jännitepudotuksen akun purkautuessa. Kaikista taloudellisin litiumioniakku on 18650 (kuva 23), joka muistuttaa normaalia AA-paristoa, mutta on hieman sitä kookkaampi (Buchmann 2001, 38 - 43.) Tätä projektia varten valittiin Samsungin 3000 mAh:n akku, joista on helppo rakentaa 6000 mAh:n akusto, joka täyttää toimeksiantajan vaatimukset. Akut kestävät minimissään 300 lataussykliä, joten niiden vaihtamista ei tarvitse tehdä usein. Lisäksi skanneri suunniteltiin siten, että sen purkaminen onnistuu helposti yhdellä työkalulla ilman erityisosaamista, joten akkujen vaihtaminen on helppoa



KUVA 23. Samsung 18650 (Proakku)

UPS keskeyttää akun purkautumisen ja Raspberry Pi sammuu, kun varaus on tippunut alle 10 %:n. Varaus on 10 % silloin, kun jännite on 3,5 - 3,7 V. Valitun akun maksimivaraus saavutetaan, kun jännite kasvaa 4,2 V:iin (kuva 24). Raspberyllle suunniteltu UPS sammuttaa käyttöjärjestelmän turvallisesti, jotta data ei pääse korruptoitumaan. Kun järjestelmä on kytketty latausjännitteeseen, UPS alkaa ladata akkua ja antaa virtaa Raspberyllle. UPS-järjestelmässä on yleensä valinta automaattiselle käynnistykselle, jolloin voidaan valita, käynnistyykö skanneri automaattisesti latauksen alettua vai tuleeko se käynnistää manuaalisesti.



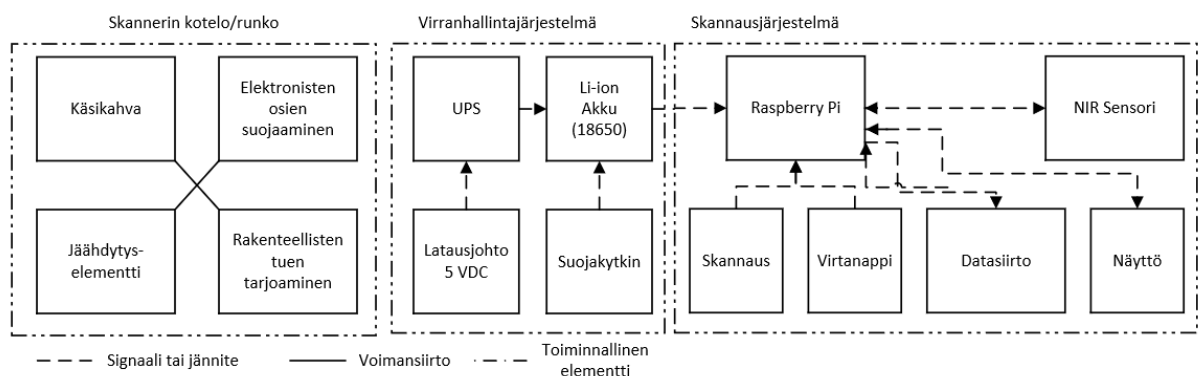
KUVA 24. Purkautumisen jännitekäyrä (tehty esimerkin perusteella, Buchmann 2001, 40)

## 6 JÄRJESTELMÄTASON SUUNNITTELU

Järjestelmätason suunnitteluun kuuluu osien ja osatoimintojen määrittely kokonaisvaltaiseksi tuote-arkkitehtuuriksi, jonka perusteella tuote jaetaan alajärjestelmiin ja komponentteihin. Tässä vaiheessa myös hahmoteltiin karkea tuotegeometria ja tehtiin karkeat valmistus- ja kokoonpanosuunnitelmat.

### 6.1 Skannerin toimintakaavion määrittely

Skannerissa on kolme selkeästi erillistä, mutta yhteensopivaa alajärjestelmää, jotka koostuvat skannerin rakenneosista ja kriittisistä komponenteista. Näitä ovat skannerin runko, virranhallintajärjestelmä ja skannausjärjestelmä (kuva 25).



KUVA 25. Skannerin toimintakaavio (tehty esimerkistä, Ulrich 2003, 172 & 174)

#### 6.1.1 Skannerin runko

Skannerin rungon tärkein toiminto on elektronisten osien suojaaminen. Sen tulee lisäksi tarjota rakenteellinen tuki ja ergonominen kannettavuus käsi kahvan avulla. Mahdollisesti rungon tai sen osan tulee toimia myös integroituna jäähdytys-elementtinä, mikäli myöhempi tuotekehitys sitä vaatii. Jäähdytys-elementin valmistuskustannukset ovat kuitenkin tämän projektin osalta rajoittavat, joten toiminnalliseen esittelyprototyyppiin sitä ei suunniteltu.

Rungon geometrian pitää myös olla sellainen, että virranhallintajärjestelmä ja skannausjärjestelmä voidaan sijoittaa siihen järkevästi, ottaen huomioon ergonomian, valmistettavuuden ja kokoonpan-tavuuden. Lisäksi geometriassa on huomioitava muut sille asetetut toimeksiantajan vaatimukset, kuten kalibrointitelakka ja asetettavuus pöydälle tukevaan asentoon.

### **6.1.2 Virranhallintajärjestelmä**

Virranhallintajärjestelmäksi valittiin konseptisuunnittelun perusteella käytettäväksi 18650-akustoon perustuva UPS. Tämä mahdollisti sen, että akuston sijoitus voitiin suunnitella laitettavaksi skanne-rin käsikahvaan, jolloin myös painopiste siirtyi ergonomisempaan kohtaan. Virranhallintajärjestelmä koostuu siis UPS:sta, akustosta, latausjohdosta sekä suojakytkimestä, joka avaa akuston piirin es-täen skannerin toiminnan esimerkiksi varastoinnin aikana. Akuston suunnittelussa on otettava huo-mioon, että akut on kytkettävä rinnan, jotta vaadittava nimellisjännite on 3,7 V.

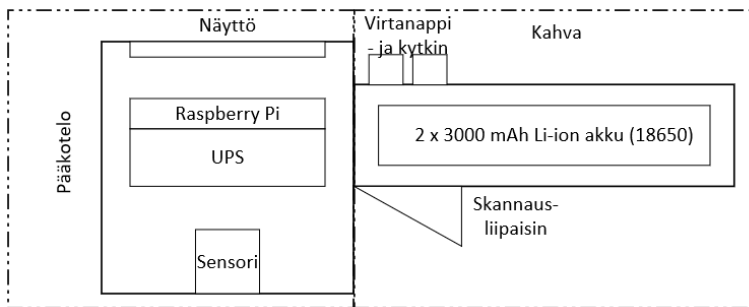
### **6.1.3 Skannausjärjestelmä**

Skannausjärjestelmä on skannerin toiminnallinen ydin ja koostuu Raspberrystä, skannausliipai-simesta, virtanapista, datasiirtokaapelista, sensorista ja näytöstä. Raspberry ja näyttö kytketään pinoon UPS:n kanssa, ja sensori yhdistetään USB-kaapelilla Raspberryyyn. Skannausliipaisin ja vir-tanappi tuli sijoittaa siten, että niitä voidaan käyttää yhdellä kädellä käsikahvasta kiinni pitäen. Sen-sorin sijoitus on vapaampaa kuin muiden skannausjärjestelmän osien.

## **6.2 Geometrian hahmottelu**

Kuvassa 26 näkyy hahmoteltu geometria. Tämä on hyvin yksinkertainen ja kertoo vain alajärjestel-mien suurpiirteisen sijainnin skannerissa sekä sen rakenteen. Skannerin geometrian suunnitteluun vaikutti käytetty 3D-tulostin, jonka suurin xy-suuntainen tulostusalue on 235 x 235 mm. Lisäksi pääkotelon suunnittelussa oli otettava huomioon skannausjärjestelmän mitat sekä tila johdoille, kun taas käsikahvan suunnittelussa piti pyrkiä minimoimaan kahvan poikkileikkauksen korkeus ja le-veys. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että akut oli sijoitettava jonoon, sillä kaksi päällekkäin ase-tettua 18650 akkua on minimissään 36,6 mm korkea, joka olisi tehnyt käsikahvasta melko paksun. Lisäksi käsikahvan paksuutta lisää sen läpi kulkevat lataus- ja datakaapelit. Jonoon sijoitettuna akuston minimipituus on 130 mm. Näistä rajoittavista tekijöistä johtuen skanneri oli valmistettava

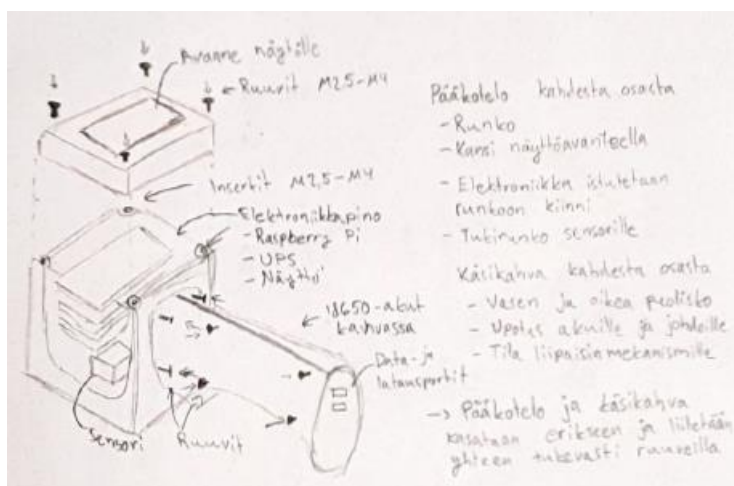
kahdesta pääosasta; pääkotelosta ja kahvasta, ja näiden osien jakopinnan todennäköisesti paras sijainti on pääkotelon ja kahvan välillä.



KUVA 26. Skannerin geometriahahmottelu (tehty esimerkistä, Ulrich 2003, 175)

### 6.3 Alustavat valmistus- ja kokoonpanosuunnitelmat

Geometriahahmottelun perusteella skanneri tuli siis koostumaan kahdesta pääosasta: pääkotelosta ja käsikahvasta. Pääkotelo sisältää tärkeimmät elektronit komponentit eli näytön, UPS:n, Raspberryn ja sensorin. Pääkotelo koostuu kahdesta osasta: rungosta ja kannesta. Elektroniikka istutetaan runkoon ja kansi auttaa pitämään tämän alakokoonpanon tukevasti paikallaan, ja mahdollisimman tiiviinä. Käsikahva puolestaan sisältää liipaisinmekanismin, akuston sekä data- ja latauskaapelit. Se koostuu kahdesta puoliskosta, joiden jakopinta on pituussuuntainen. Toinen puolisko toimii kantena, joka auttaa pitämään osat paikallaan, ja toiseen tehdään tarvittavat tilat akustolle, data- ja latauskaapeleille sekä liipaisinmekanismille. Osat kootaan erikseen ja liitetään sitten yhteen (kuva 27). Liitoselininä käytetään M2,5 – M4 inserttejä ja ruuveja.



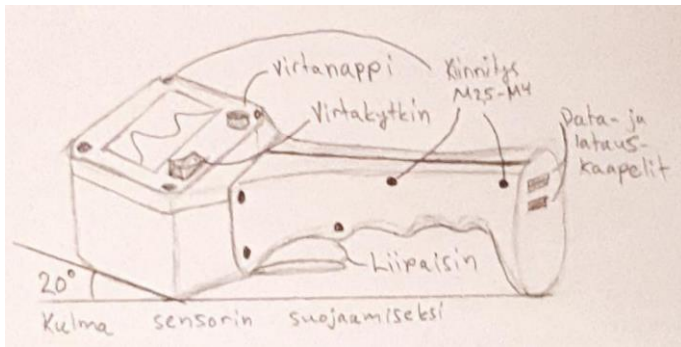
KUVA 27. Skannerin kokoonpanon hahmottelu

## 7 DETALJISUUNNITTELU

Tässä luvussa käydään läpi esittelyprototyypin geometrian yksityiskohtainen suunnittelu vaihe kerrallaan. Suunnittelu tehtiin paperille luonnostelemalla, josta jatkettiin 3D-suunnitteluun SolidWork-silla. Tämä työvaihe pohjautui aiempaan skannerin geometrian ja kokoonpanon hahmotteluun. Suunnittelupäätökset perustuivat pitkälti valmistettavuuteen, kokoonpantavuuteen, ulkonäköön, käytettävyyteen ja yleiseen intuitioon. Jokaisen prototyyppi-iteraation jälkeen tehtiin luonnokset seuraavasta prototyypistä ja alettiin suunnittelemaan 3D-mallia. Skannerista tehtiin useita prototyyppiversioita, joita ei kuitenkaan työssä esitellä. Esittelyprototyyppiin valittiin käytettäväksi Raspberry Pi Zero ja DFRobotin UPS-piirilevy. Tämä siksi, että aiemmassa prototyypissä käytettiin Raspberry Pi 3:sta ja Geekwormin UPS-piirilevyä, joiden testauksen aikana ilmeni virhe. Testauksen aikana piirilevy syttyi palamaan ja myös Raspberry oli sen jälkeen käyttökelvoton, ilmeisesti käyttöjärjestelmän korruptoitumisen takia. Skannerin esittelyprototyypin valmistuksessa päädyttiin käyttämään M3 inserttejä ja ruuveja, sillä se on pienin laajalti saatavilla oleva ruuvikoko.

### 7.1 Skannerin kokoonpanon luonnostelu

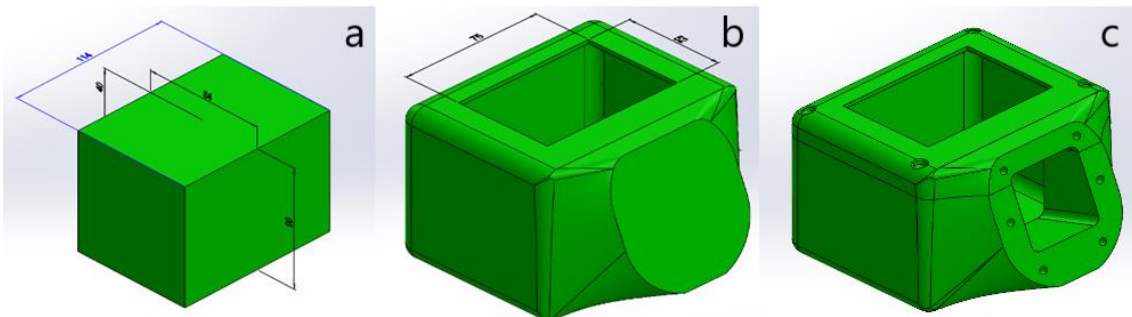
Skannerin kokoonpanopiirustuksen luonnoksella (kuva 28) voidaan kuvata kuinka alikokoonpanojen runko-osat sopivat yhteen. Skannerin pääkotelo sekä käsikahva suunniteltiin molemmat erikseen yksittäisistä solidikappaleista, jotka halkaistiin kahteen osaan piirroksessa näkyvien jakosiivojen mukaan. Molempien suunnittelussa kiinnitettiin huomiota siihen, että niiden yhteinen kiinnityspinta on täysin identtinen. Tässä vaiheessa sensorin suojaamiseksi päätettiin luoda 20 asteen kulma pöydän pinnan ja skannerin pääkotelon alapinnan väliin. Skannerin käsikahva on pöydän pinnan kanssa samansuuntainen. Näin skanneri voidaan asetta pöydälle ilman riskiä skannerin vioittumisesta tai sen suojalasin naarmuuntumisesta. Tässä vaiheessa ei annettu mittoja skannerille, sillä sen mitat riippuvat rungon sisälle asennettävien osien minimimitoista.



KUVA 28. Skannerin kokoonpanon luonnos

## 7.2 Pääkotelon suunnittelu

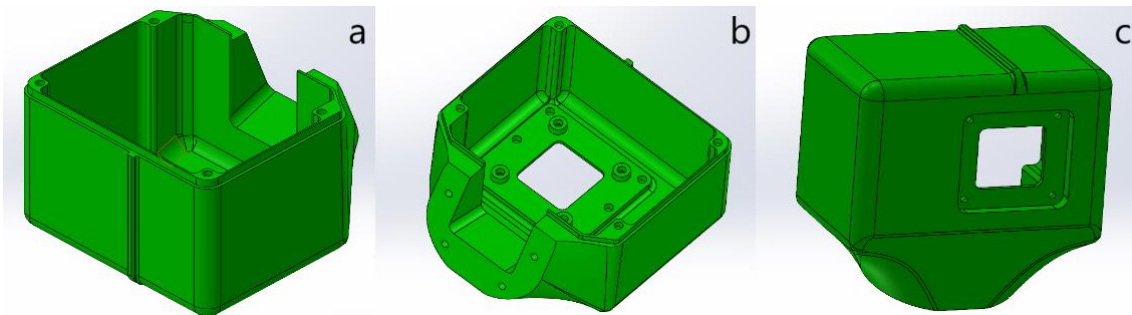
Pääkokoonpanon suunnittelu esitellään vaihe vaiheelta, alkaen solidista laatikosta, joka pikkuhiljaa muovautuu skannerin pääkoteloksi. Päämitoista sanottakoon sen verran, että sen kokoon vaikutti elektronisten osien mitat ja seinämän paksuus. Suunnittelu aloitettiin suorakaiteen muotoisesta laatikosta (kuva 29, kohta a), joka muodostaa skannerin pääkotelon sisätilan ja seinämät. Seinämän paksuudeksi valittiin 2,4 mm, jotta PLA-muovista tulostettu runko on riittävän tukeva. Tällä säästettiin muovimateriaalissa ja saatiin kotelosta mahdollisimman kevyt. Pääkoteloa suunniteltaessa kappaleesta tehtiin useita kokoonpanomalleja, jotta voitiin tarkistaa esimerkiksi näytön 3D-mallin sopivuus koteloon näyttöavanteeseen. Suorakaiteen muotoiseen laatikkoon lisättiin 20 asteen kulmassa oleva yhdistyspinta, johon käsikahva kiinnittyi (kuva 29, kohta b). Tämän jälkeen malliin luotiin ruuvireiät ja inserttien upotukset sekä käsikahvan liitosaukko (kuva 29, kohta c). Malli jaettiin kahteen osaan: kanteen ja runkoon, joihin tuli 4 mm syvä huuliura vedenpitävyyden parantamiseksi. Tämän jälkeen niitä muokattiin erillisinä osina, jotta saatiin kuhunkin halutut muodot.



KUVA 29. Pääkotelon 3D-mallin muodostuminen

## 7.2.1 Pääkotelon rungon suunnittelu

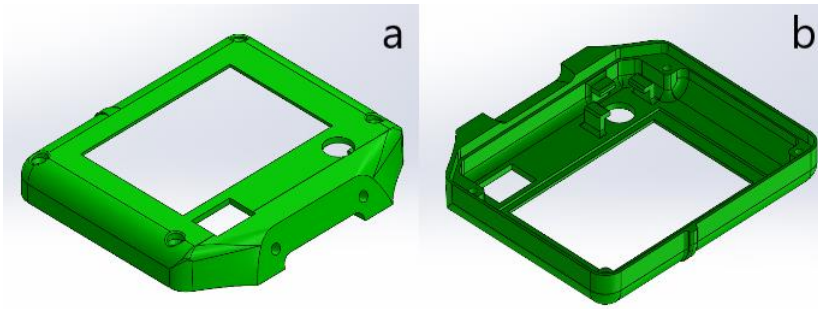
Skannerin pääkotelon etupintaan suunniteltiin kohotettu kohdistusviiva (kuva 30, kohta a), jonka avulla voidaan nähdä missä kohtaa skannerin leveysmittaa sensorin lukupää sijaitsee. Sensori sijaitsee hieman skannerin vasemmalla sivulla, sillä näyttö haluttiin keskelle skannerin yläpintaa, ja Rasperryn kiinnityskohdat ovat tähän nähden jonkin verran vasemmalla. Raspberry suunniteltiin kiinnitettäväksi M3-korotusruuveilla, jolloin se on korotettuna rungon alapinnasta noin 40 mm. Sensorin ja sen suoja-kuoren liittämiseksi tehtiin rungon pohjaan ruuvi-inserttiupotuksilla varustettu kiinnityssovitte ja avanne (kuva 30, kohta b). Kuvan 30 kohdassa c näkyy sensorin upotuskohta alapuolelta. Ideana tässä prototyypissä oli asentaa sensorin oma suoja-kuorensa ja liittää se skanneriin alapuolelta.



KUVA 30. Rungon yksityiskohtien suunnittelu

## 7.2.2 Pääkotelon kannen suunnittelu

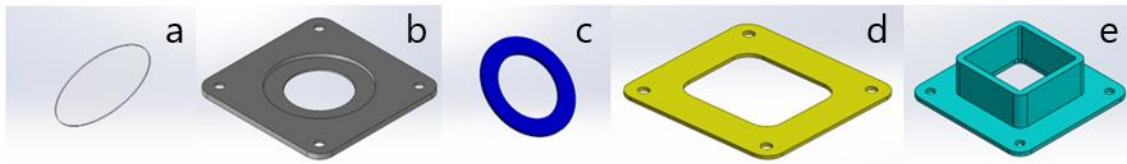
Kanteen suunniteltiin kaksi upotusta virtakytkimelle- ja napille (kuva 31, kohta a). Kanteen tehtiin myös syvennys näyttöreiän kohdalle, jotta näytön kohdistaminen olisi helpompaa ja näytön pinta olisi lähempänä kannen yläpintaa. Virtakytkin on sellainen, että sen voi napsauttaa paikoilleen, joten siihen tarvittiin yksinkertainen upotus. Virtanappi vaatii kuitenkin tuennan alapinnasta, jotta nappi ei voi irrota sitä painettaessa (kuva 31, kohta b).



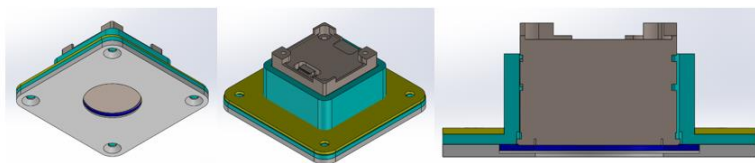
KUVA 31. Kannen yksityiskohtien suunnittelu

### 7.2.3 Sensorin suojakotelon suunnittelu

Sensori istutetaan suojakoteloon ennen asennusta. Tämän tarkoituksena on suojata skannerin arvokkainta osaa asennuksen ja käytön aikana. Suojakotelo koostuu viidestä osasta: 0,3 mm paksusta panssarilasista (kuva 32, kohta a), alakannesta (kuva 32, kohta b), lasin ja skannerin otsapinnan väliin asennettavasta tiivistysrenkaasta (kuva 32, kohta c), suojakotelon yläpintaan tulevasta tiivistyslevystä (kuva 32d) sekä koteloon tukirungosta (kuva 32, kohta e). Kuvassa 33 näkyy suojakotelon kokoonpano eri kuvakulmista.



KUVA 32. Sensorin suojakotelon osat

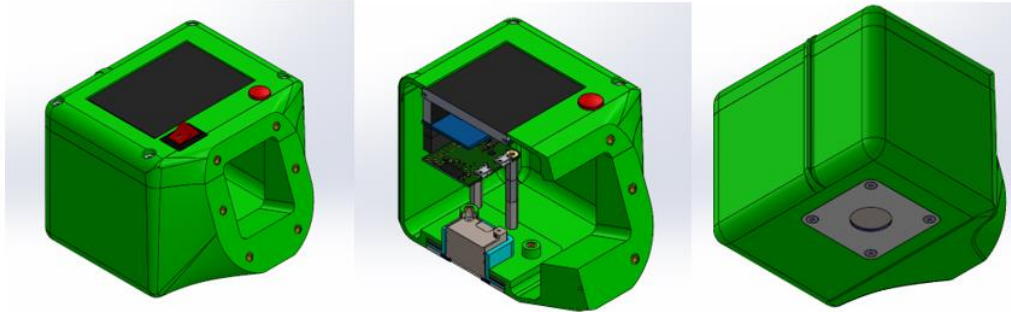


KUVA 33. Skannerin suojakotelon kokoonpano

### 7.2.4 Pääkoteloon kokoonpanomalli

Pääkoteloon kokoonpanomalli (kuva 34) on suunniteltu siten, että siihen asennetaan ensin sensorin suojakotelossa. Tämän jälkeen koteloon asennetaan ruuvikorotukset, jonka päälle istutetaan

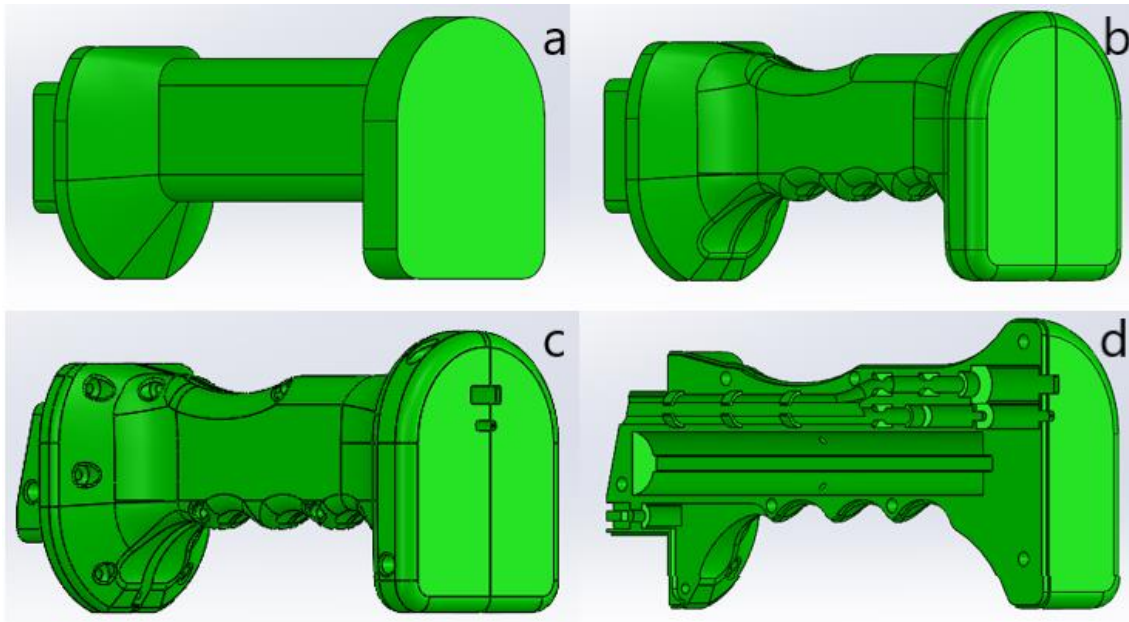
elektroniikkaosat. Viimeisenä asetetaan kansi, joka kiinnittyy ruuveilla kulmista. Raspberryn näyttössä on pohjana vaahtomuovikerros, joka puristuu hieman kasaan. Tätä hyödyntäen kannella voidaan kevyesti puristaa kokoonpano paikalleen.



KUVA 34. Pääkotelon kokoonpanomalli

### 7.3 Käsikahvan suunnittelu

Käsikahvan suunnittelussa tärkeintä oli saada aikaiseksi kompakti ratkaisu, jossa kahvan paksuus on minimoitu ja sisälle mahtuu akut, kaapelit ja liipaisinmekanismi. Kahvaosuuden pituuden pitää olla sopiva monille erikokoisille käsille. Tästä syystä kahvan tarttumisalueen leveys on 23 mm, korkeus 35 - 47 mm (kohdasta riippuen) ja pituus on noin 120 mm. Suunnittelu aloitettiin luomalla kahvan perusgeometria (kuva 35, kohta a). Tämän jälkeen kahvaan tehtiin muotoilu- ja ergonomiasyistä pyöristykset ja sormille syvennykset, joiden koko ja sijainti arvioitiin tekemällä mitauksia raportin kirjoittajan kädestä (kuva 35, kohta b). Tämän lisäksi kahva jaettiin kahteen symmetriseen osaan pituussuuntaisella leikkauspinnalla. Skannerin suunnittelu viimeisteltiin sijoittamalla käsikahvaan ruuvireiät ja inserttien upotukset siten, että käsikahvan kokoonpano saadaan kiristettyä mahdollisimman laajalta alueelta. Käsikahvan kiinnitykseen tuli yhteensä 7 ruuvipaikkaa sekä pääkotelon ja käsikahvan yhdistymispintaan 6 ruuvipaikkaa (kuva 35, kohta c). Puoliskoihin tehtiin upotukset johdoille, liipaisinmekanismille ja akustolle. Johtouputuksien reunoille tehtiin kiinnityssiivekkeet, joiden avulla voidaan varmistaa johtojen pysyminen paikallaan kokoamisen ja purkamisen aikana (kuva 35, kohta d). Skannerin lataus- ja datapistokkeille ei löytynyt silikonitulppia, jotka voitaisiin liittää runkoon, joten ne jätettiin tästä versiosta pois.



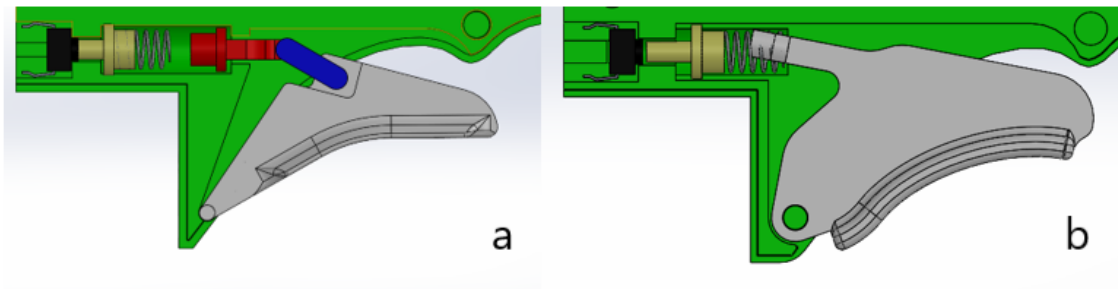
KUVA 35. Käsikahvan suunnittelun välivaiheet

### 7.3.1 Liipaisinmekanismin suunnittelu

Suunnittelun lähtökohtana oli kehittää liipaisinmekanismi, joka tuntuisi käyttäjältä luonnolliselta. Liipaisimen tarkoitus on mekaanisesti painaa kasaan virtapiirin sulkevaa sähkönappia, joka antaa I2C-portin kautta komennon sensorille skannausta varten. Käytettävän Omron B3W-1020 napin käyttövoima on noin 2 N, joten napin painaminen onnistuu hyvin kevyesti. Tätä varten mekanismiin on lisättävä napin ja liipaisimen väliin jousi, joka pehmentää liipaisimen puristuksesta välittyvän voiman. Lisäksi liipaisin tuli suunnitella siten, että liipaisin ei ole täydellisessä fyysisessä kontaktissa nappiin, sillä muuten liipaisimeen kohdistunut voima siirtyisi kokonaan nappiin mahdollisesti rikoen sen.

Liipaisinmekanismia alettiin kehittämään luomalla napin kontaktikappale, liipaisin sekä välittäjänivelet (kuva 36, kohta a). Tämä versio koostuu neljästä 3D-tulostetusta osasta napin ja jousen lisäksi. Liipaisimen vaikutusnivel oli kiinteä osa liipaisinta. Ennen valmistusta mallin toimintaa tarkasteltiin Solidworks-simulaatioilla. Tulostettu versio toimi odotetusti, ja testauksessa liipaisinta piti painaa noin puoleen väliin liikerataa, jotta virtapiiri sulkeutui. Toimivuudesta huolimatta liipaisinmekanismin kokoonpano oli hyvin vaikeaa ja tarkkaa. Useiden osien takia liipaisinmekanismi oli vaikea koota, sillä osat irtosivat helposti toisistaan. Kokoonpanon monimutkaisuudesta johtuen liipaisinmekanismi suunniteltiin uudestaan DFMA-näkökulmasta (kuva 36, kohta b). Liipaisinmekanismista

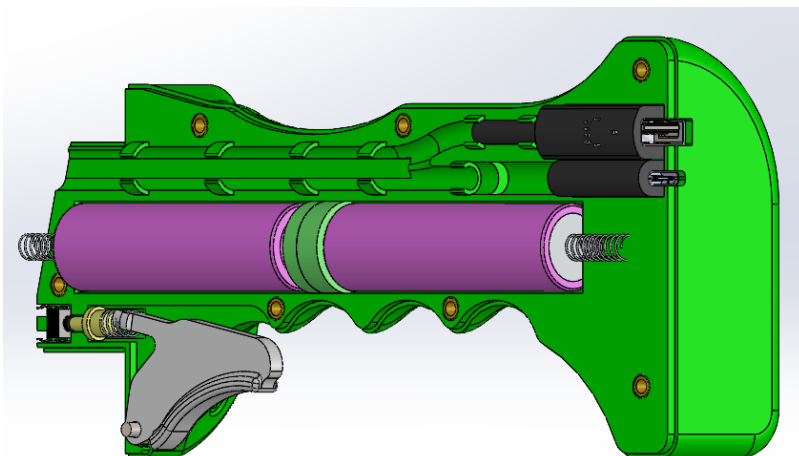
luotiin uusi versio, jossa nivelet integroitiin osaksi liipaisinta. Näin kokoamisesta tuli yksinkertaisempaa ja toimintavarmuus parani. Liipaisimen vaikutusnivel suunniteltiin uudestaan siten, että skannerin käsikahvan puoliskoihin tuli upotukset, joiden sisälle sijoitetaan metallinen akseli. Tämä teki nivelestä tukevampaa ja kestävämmän.



KUVA 36. Liipaisinmekanismin DFMA-optimointi

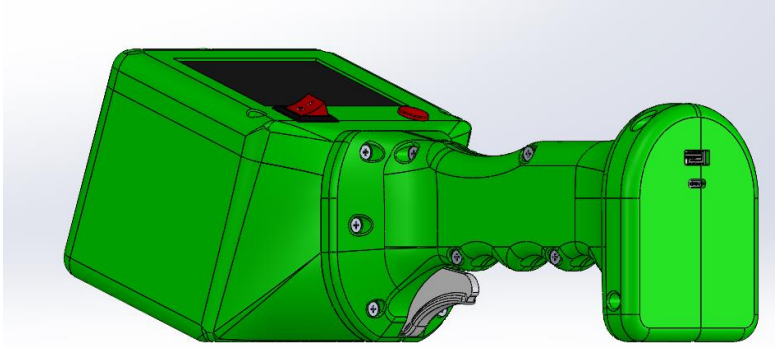
### 7.3.2 Skannerin kokoonpanomalli

Käsikahvan kokoonpanomalli (kuva 37) koostuu akuista, akkujen positiivisten napojen yhdistyskappaleesta, kontaktijousista, data- ja virtakaapeleista (kaapeleita ei mallinnettu) sekä liipaisinmekanismista. Käsikahvan kokoonpano tapahtuu siten, että kaikki kokoonpanon komponentit asetetaan käsikahvan oikeaan puoliskoon ja vasen puolisko asetetaan sen päälle ja kiristetään ruuveilla. Mikäli akut pitää vaihtaa, skanneri pitää purkaa ja puoliskot irrotetaan toisistaan. Akut kestävät kuitenkin minimissään 300 latausykliä, joten niitä ei tarvitse useasti vaihtaa.



KUVA 37. Käsikahvan kokoonpanomalli sisältä

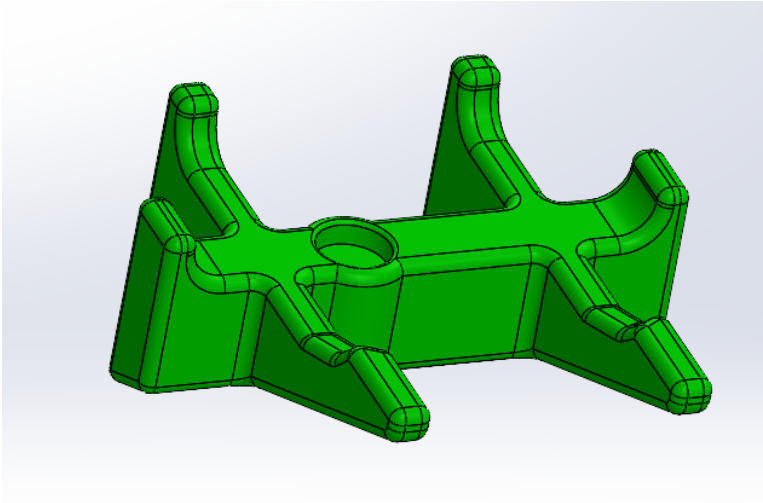
Skannerin käsikahvan ja pääkotelon kokoonpano (kuva 38) on hyvin yksinkertainen. Molemmat kootaan erikseen, pitäen kuitenkin huolta että data- ja virtakaapelit yhdistetään ennen alikokoonpanojen yhdistämistä. Käsikahva työnnetään sovitussosa edellä pääkotelon sovitusreikään ja painetaan yhteen. Käsikahva liitetään kuudella M3-ruuvilla pääkoteloon ja kokoonpano on valmis.



KUVA 38. Skannerin kokoonpanomalli

#### 7.4 Kalibrointitelakka

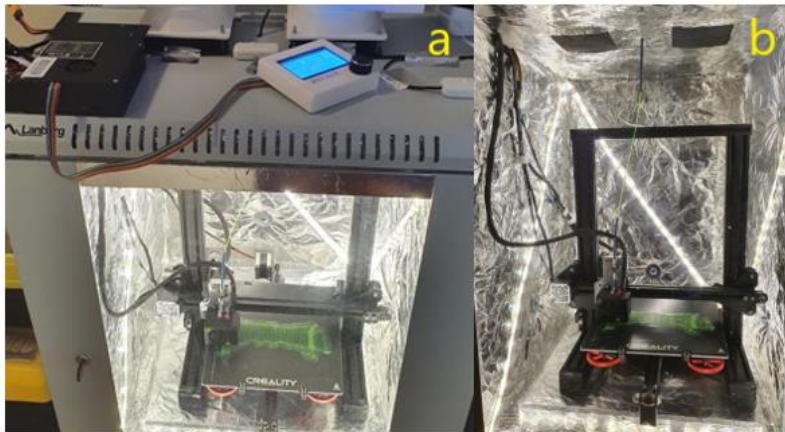
Skannerin kalibrointitelakka suunniteltiin yksikertaisesta lisäämällä skannerin pääkotelon runko-osan 3D-malliin solidi kuutio, josta vähennettiin rungon tilavuus. Tämän jälkeen siitä poistettiin 0,2 mm materiaalia offset-komennon avulla ja leikattiin irti ristikkomainen muoto (kuva 39). Lopuksi malliin lisättiin kalibrointinapille upotus, jonka syvyys mitoitettiin siten, että kalibrointinapin yläpinta on noin 0,2 mm päässä sensorin suojaalasista. Kalibrointitelakkaan asetettuna skanneri on lähes samassa asennossa kuin pöydälle asetettuna, jotta sen käyttö olisi mahdollisimman helppoa. Myöhemmässä kehitystyössä olisi ehkä tarpeellista suunnitella kalibrointitelakka siten, että sen voisi kiinnittää esimerkiksi seinään.



*KUVA 39. Kalibrointitelakan 3D-malli*

## 8 ESITTELYPROTOTYYPIN VALMISTUS JA TESTAUS

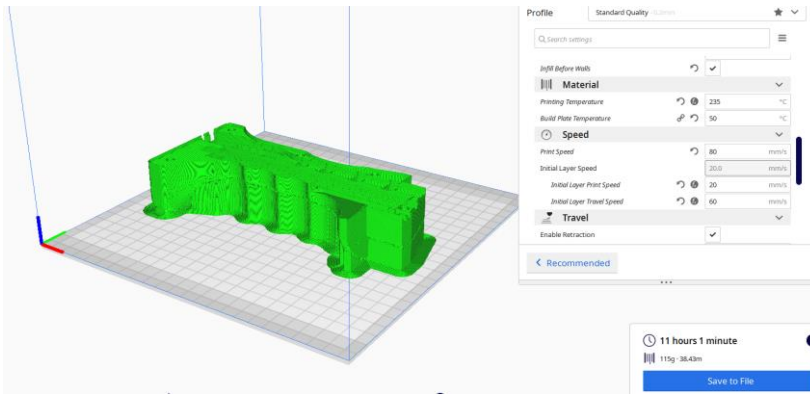
Skannerin prototyypit valmistettiin opinnäytetyön tekijän kotona. Tulostimena käytettiin modifioitua Creality Ender 3 -tulostinta, joka on lämpöeristetyssä ja ilmastoidussa tulostinkaapissa (kuva 40). Tulostimella saadaan aikaan korkealaatuisia FDM-tulosteita kotioiloissa ilman riskiä haitallisista kaasuista. Lämpöeristyksen ansiosta kaapin sisällä on tasainen, noin 45 °C:n lämpötila. Tulostimessa on karkaistusta lasista tehty tulostusalusta, johon tulostettu materiaali tarttuu tiukasti, mutta josta se irtoaa helposti lämpötilan laskettua.



KUVA 40. Prototyypin valmistuksessa käytetty FDM-tulostin

### 8.1 Alkuvalmistelut

Ennen tulostuksen aloitusta tulostettavasta 3D-mallista tehtiin STL-versio, joka siirrettiin Ultimakerin Cura -ohjelmaan. Cura tekee 3D-mallista tasokuvan, joka koostuu useista päällekkäisistä kerroksista. Jokainen kerros kuvastaa tulostinpään kulkureittiä tietyllä z-tasolla. Curalla voidaan tehdä säädöt muun muassa tulostusnopeudesta, lämpötiloista, seinämien paksuuksista, solidin täyttötiheydestä ja sisäisestä geometriasta. Lisäksi sillä voidaan säätää tulostettavan kappaleen orientatio tulostusalustalla ja se tekee automaattisesti mallille tarvittavat tukirakenteet. Ohjelmalla voidaan myös esikatsella tulostuksen simulaatio, jotta mahdolliset ongelmakohdat voidaan korjata ennen tulostusta. Ohjelma ilmoittaa myös odotetun tulostusajan, joka helpottaa tulostusaikataulun suunnittelemisessa. Curan tekemä G-koodi siirretään tulostimeen ja tulostus voidaan alustan säädön jälkeen aloittaa. Kuvassa 41 näkyy vasemman käsikahvan tasokuva ja käytetyt tulostusasetukset.



KUVA 41. Vasemman käsikahvan puoliskon tulostusasetusten säätö Curalla

## 8.2 Osien viimeistely ja kokoonpano

### 8.2.1 Tulosteiden jäähtyminen ja tukirakenteen irrotus

Tulostuksen jälkeen osan pitää jäähtyä tasaisesti. Liian nopeasti jäähtyvään filamenttiin voi muodostua epätasaisia vetojännityksiä, jonka ansiosta osa voi vääntyä tai kerroksista tulee epätasaisia ja aaltomaisia. Osien laadun maksimoimiseksi jokainen osa jätettiin yöksi tulostuskaappiin jäähtymään. Tässä on myös se lisäetuna, että jäähtynyt osa irtoaa tulostusalustasta helposti. Lämpimänä irrotettuun osaan muodostuu helposti pysyviä plastisia muodonmuutoksia, joita voi olla mahdotonta korjata jälkepäin. Mikäli osassa oli tukirakenteita, ne irrotettiin pihtien ja kulmaleikkurien avulla. Tukirakenteet on automaattisesti suunniteltu Curassa siten, että niiden kontaktipinta varsinaiseen osaan on hyvin pieni. Tästä syystä irrotettu tukirakenne yleensä napsahtaa helposti irti osasta, kunhan sitä aletaan irrottamaan oikeasta kohdasta. Loput tukirakenteesta jääneet epätasaisuudet voidaan hioa pois tarvittaessa.

### 8.2.2 Inserttien liittäminen ja akuston virtapiirin rakentaminen

Tulosteeseen suunniteltiin valmiiksi messinki-inserteille upotukset. Seuraavaksi insertit upotettiin muoviiin kuumentamalla kolvilla ja painamalla kevyesti alaspäin. On olemassa insertointilaitteita, mutta kotipajassa tämänkaltaiseen luksukseen ei ollut varaa. Inserttien upotuksen kanssa piti olla erittäin tarkka, jotta saatiin ylläpidettyä riittävä geometrinen ja kohtisuora toleranssi ruuvien kiinnittämisen onnistumiseksi.

Käsikahvan oikeaan puolikkaaseen upotettiin myös jouset akku-upotuksen päihin akuston virtapiiriin ja kiinnityksen aikaansaamiseksi. Näihin jousiin juotettiin kiinni sähköjohdot, jotka kulkivat akku-upotuksen alapuolelle suunnitellussa urassa. Sähköjohdot myös kiinnitettiin uraan pikaliimalla, jotta ne eivät irtoaisi akkuja irrotettaessa. Akkujen väliin tehtiin messinkikontakteista, jousesta ja 3D-tulostetusta osasta tehty välikontakti, jolla positiiviset navat saatiin yhdistettyä samaan sähköjohtoon. Näin saatiin aikaan rinnankytkentä, mikä oli virtapiiriin vaatimus. Lopuksi kaikki sähköjohdot liitettiin yhteen huolellisesti ja pitävästi sitomalla ne ensin yhteen ja sitten juottamalla päälle. Skannerin pääkotelon kanteen liitettiin virtanappi- ja kytkin, ja lisäksi tehtiin tarvittavat sähköliitokset. Kaikki liitokset eristettiin joko sähköteipillä tai kuumaliimalla.

### 8.2.3 Skannerin kokoonpano

Kun insertit ja akuston virtapiiri oli valmis, oli aika liittää kaapelit, akut ja liipaisinmekanismi käsikahvan oikeaan puoliskoon (kuva 42). Tämän jälkeen pääkotelon runkoon kiinnitettiin sensori suojakotelossaan ja siihen liitettiin USB-johto. Sensorin ympärille asennettiin ruuvikorotukset, jonka päälle asetettiin ensin Raspberry. Rasperryn päälle tuli ruuvikorotukset, ja tämän päälle UPS. Tämän jälkeen UPS:iin liitettiin latauskaapeli ja Rasperryy sensorin USB-kaapeli. Datakaapeli ei tässä prototyyppissä yhdistetä, sillä Raspberry Zerossa on vain yksi USB-kaapeliliitäntä. Johtojen liittämisen jälkeen UPS:n päälle tuli näyttö ja ruuvikorotukset sen tueksi. Sitten kansi asetettiin pääkotelon kokoonpanon päälle ja kiristettiin paikoilleen neljällä M3 x 12 mm ruuvilla. Seuraavaksi vasen käsikahvapuolisko liitettiin seitsemällä M3 x 16 mm ruuvilla oikeaan puoliskoon. Pääkotelo ja käsikahva liitettiin toisiinsa kuudella M3 x 16 mm ruuvilla ja kokoonpano oli valmis.



KUVA 42. Kokoonpanon edistyminen

## 8.3 Prototyypin testaus

### 8.3.1 Lämpötilamittaus

Skannerin pääkotelon sisältä mitattiin Raspberryn Pi Zeron pintaa ympäröivän ilman lämpötila kahden tunnin kuormitustestin ajan. Testissä saatiin aikaan kuormituksessa noin 35 °C:n lämpötila kotelon sisäilmassa ympäröivän ilman ollessa noin 21 °C:ta. On hyvin todennäköistä, että Raspberry Pi 4:n osalta ympäröivän ilmassa lämpötila nousee nopeasti yli 45 °C:n, sillä Raspberry Pi 4 kuluttaa kuormituksessa 5 - 6 W, kun taas Raspberry Pi Zero kuluttaa vain noin 1,2 W. Lähes kaikki tietokoneen käyttämästä energiasta menee ympäröivän ilman lämmittämiseen. Myöhemässä kehityksessä ja erityisen herkästi lämpenevää Raspberry Pi 4:ää käytettäessä on todennäköistä, että jäähdytyslementtiä tarvitaan.

### 8.3.2 Testaus

Skannerin akustoa pystyttiin onnistuneesti lataamaan latausjohdolla ja myös virtakytkin- ja nappi toimivat odotetusti. Näitä toimintoja testattiin jo kokoonpanoa valmistettaessa. Esittelyprototyyppiä (kuva 43) testattiin toimeksiantajan tiloissa tunnetuilla muovilaaduilla. Skanneri onnistui tunnistamaan kaikki ohjelmaan tallennetut muovilaadut tehokkaasti, lukuun ottamatta mustaa muovia, jonka osalta ei odotetusti saatu muovilaatua määriteltyä. Myös kalibrointi telakassa onnistui ja sen istuvuus oli hyvä. Skanneri istui käteen hyvin ja sitä oli vaivatonta käyttää.



KUVA 43. Käyttövalmis skanneri kalibrointitelakassa

## 9 JATKOKEHITYS

### 9.1 Valmistustekniikan valinta

Idea muovintunnistukseen käytettävästä skannerista tuli toimeksiantoyritykseltä itseltään eikä asiakkailta tai markkinatarpeesta. Sen takia markkinat ja kysyntä skannerille ei ole vielä tarkkaan karotettu. Tätä varten luotiin toiminnallinen esittelyprototyyppi, jota voidaan esitellä sijoittajille ja mahdollisille asiakkaille. Mikäli kysyntää tämänkaltaiselle skannerille löytyy, on aiheellista alkaa kehittämään tuotantoversiota, joka valmistetaan joko SLS- tai SLA-menetelmällä, jos kyseessä on pienisarjatuotanto, tai ruiskuvalutekniikalla, jos kyseessä on massatuotanto.

Ennen valmistustekniikan valintaa tulee tehdä tarkat markkina-analyysit, jotta voidaan tehdä arviot kysynnän määrästä. Piensarjatuotannon varteenotettavat valmistustekniikat ovat SLA ja SLS, joilla voitaisiin valmistaa hyvin mittatarkkoja ja kestäviä osia alhaisilla käynnistyskustannuksilla. Massatuotantomenetelmänä käytettäisiin tuotannon käynnistyksen osalta kalliimpaa ruiskuvalutekniikkaa, jolla valmistetut osat ovat laadukkaampia. Ruiskuvalu on yleisesti käytetty tekniikka sähkötyökalujen ja -laitteiden muovisten koteloiden valmistukseen.

Mikäli valmistustekniikaksi valikoituisikin ruiskuvalaminen, tuotteesta tulisi silti valmistaa SLA- tai SLS-tekniikalla valmistettuja tuotantoversioita, jotta voitaisiin varmistua ruiskuvalettavien osien toimivuudesta. Ruiskuvalumuotin valmistus on pitkä ja kallis prosessi, jonka jälkeen muokkausten tekeminen on vaikeaa, joten tuotantoversioon pitää olla tyytyväinen ennen tuotannon aloittamista.

### 9.2 Materiaalinvalinta

Olenainen osa tuotantoversion suunnitteluprosessia on materiaalinvalinta. Materiaalinvalinta on oma prosessinsa, jonka tarkoituksena on löytää tuotteelta haluttuja ominaisuuksia parhaiten vastaava valmistusmateriaali kohtuullisilla kustannuksilla. Materiaalinvalinta kriittinen osa tuotekehitystä ja se tulee tehdä aikaisessa vaiheessa tuotantoversion DFMA-suunnittelua. Ruiskuvalettavaa lämpökovettuvaa muovia on kahta pääluokkaa: amorfinen ja osakiteinen. Amorfisiin muovilaatuihin kuuluu esimerkiksi ABS ja puolikiteisiin muovilaatuihin esimerkiksi PBT. Molemmissa pääluokissa

on omat etunsa ja haittapuolensa, mutta yleisesti voidaan sanoa, että amorfiset muovilaadut sopivat paremmin alhaisiin käyttölämpötiloihin, joissa tuotteelta vaaditaan joustavuutta, ja puolikiteiset muovilaadut sopivat paremmin käyttökohteisiin, joissa vaaditaan mekaanista kestävyttä ja rakenteen jäykkyyttä. (deVries 2018.)

Tähän valintaprosessiin vaikuttaa materiaailta halutut ominaisuudet, kuten naarmun- ja iskunkestävyys. Myös valmistettavuus on otettava huomioon, sillä muovilaatujen valmistus- ja materiaalikustannuksissakin on eroja. Skannerin tuotantoversioon voisi sopia paremmin puolikiteinen muovilaatu, esimerkiksi PBT tai sen seos. Esimerkkiseoksena PC/PBT, jossa PC lisää seokseen iskun- ja lämmönkestävyyttä ja jäykkyyttä, kun taas PBT antaa sille kemiallisen kestävyden. PC/PBT on sitkeä ja vastustaa kemikaalien ja ympäristön aiheuttamaa halkeilua. PC/PBT ei kuitenkaan sovi ohutseinäisten tuotteiden suunnitteluun, sillä se kutistuu helposti. Se sopii teollisiin käyttökohteisiin, ja sitä käytetään usein sähkötyökalujen kotelointina. (Omnexus 2021). Tarkemmat muovilaadun spesifikaatiot määrittäisivät yhteistyössä materiaalinvalmistajien kanssa.

### 9.3 Jäähdytyslementin kehittäminen

Raspberry Pi 4:ään pohjautuvassa tuotantoversiossa on todennäköisesti tarpeellista käyttää koteloon liitettyä jäähdytyslementtiä. Tietokoneissa käytetyt kamman tai siilin muotoiset jäähdytyslementit valmistetaan usein alumiinista pursottamalla, sillä muoto on pituussuunnassa symmetrinen. Skannerin koteloon valmistettavan jäähdytyslementin voisi valmistaa kylmätaonnalla, jossa alumiini pakotetaan suurella paineella muottiin. Kylmätaonnalla alumiinista voidaan valmistaa valmiiksi monimutkaisia muotoja ja tiheästi sijoitettuja pitkiä jäähdytysseiviä. Jäähdytyslementti olisi myös hyvä värjätä ja suojata korroosiolta, jotta valmis tuote säilyisi esteettisesti miellyttävänä. Korroosiosuojaaminen onnistuu anodisoinnilla, jossa sähkövirran avulla luodaan suojaava oksidipinnoite. Anodisointi luo pinnasta karhean, joka on helppo värjätä. (Luger Research, 2019.)

Jäähdytyslementin pitää olla kontaktissa Raspberryn prosessoriin ja samalla osa skannerin ulkokuorta. Jäähdytyslementin pitäisi myös olla tiiviisti ulkokuoreen kiinnitettävissä, ettei sen liitoskohdista pääse kulkeutumaan vettä tai pölyä skannerin sisälle. Elektronisten osien kiinnitys skannerin pääkoteloon tulisi suunnitella uudestaan, jotta Raspberry ja muut elektroniset saadaan sijoitettua mittatarkasti kontaktiin jäähdytyslementin kanssa. Jäähdytyslementti voitaisiin kiinnittää koteloon liimaamalla tai kuumentamalla kiinnitysankkurien avulla, jolloin ulkoisista liitoskohdista tulisi tiiviit.

## 9.4 Geometrian optimointi

Tuotantoversion geometriaa tulisi parantaa esittelyversiosta, sillä FDM-menetelmällä on vaikea saada valmistettua monimutkaisia geometrioita. Esimerkiksi skannerin käsikahvan ulkopinnan piti tulostaessa osoittaa alas, jolloin siihen piti tulostaa myös tukirakenteet. Tästä syystä käsikahvan ulkopinta oli geometrialtaan mahdollisimman yksinkertainen, jotta tukirakenne saataisiin helposti poistettua valmiista tulosteesta. Tuotantoversioon käsikahvan taas tulisi olla mahdollisimman hyvin kämmenen muotoja myötäilevä ja ergonominen. Lisäksi käsikahvassa tulisi olla joko ristikkorakenne tai pehmike, joka parantaisi pitoa. Myös suojaremmi olisi järkevä suunnitella laitteen käsikahvaan, jotta skanneri ei otteen livetessä putoa maahan.

Tuotteen geometria tulee optimoida myös sisäisesti. FDM-menetelmällä tulostetussa osassa voidaan osa skannerin sisägeometriasta pitää solidina, sillä sen täyttöastetta voidaan muuttaa materiaalin säästämiseksi. Ruiskuvaletun osan 3D-mallit pitää kuitenkin suunnitella siten, että skannerissa on mahdollisimman vähän solideja kohtia, joiden ruiskuvalaminen kuluttaisi paljon muovia ja lisäksi skannerin kotelon painoa merkittävästi. Geometriaa suunniteltaessa tulisi ottaa huomioon myös päästökulmat, jotta kotelon osat voidaan helposti irrottaa muotista ruiskuvalun jälkeen. Lisäksi skannerin sisäosat tulisi optimoida sulan muovin valumisen helpottamiseksi. Ruiskuvalamalla voidaan valmistaa myös suurempia osia kuin tässä projektissa käytetyllä 3D-tulostimella, joten osien määrää voidaan vähentää esimerkiksi yhdistämällä pääkotelon runko käsikahvaan.

Toisaalta SLA- tai SLS-tekniikalla valmistettavan osan suunnitteluun ei tarvitse käyttää yhtä paljon aikaa kuin ruiskuvalettavan osan suunnitteluun, sillä osan geometriaan ei tarvitse suunnitella esimerkiksi päästökulmia tai valukanavia, eikä sitä muutenkaan tarvitse optimoida ruiskuvalua varten. Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että ruiskuvalu on kannattavampaa vasta, kun tuotetta valmistetaan useita satoja tai tuhansia kappaleita. Valmistustekniikan valitseminen riippuu eniten siis siitä, kuinka monta muovintunnistusskanneria aiotaan valmistaa. Tätä varten pitää saada selkeys mahdollisten asiakkaiden määrästä ja arviot myytävien yksiköiden lukumäärästä. SLA- tai SLS-tekniikka on järkevin valinta alkuun, ja kysynnän kasvaessa voidaan siirtyä ruiskuvalutekniikkaan. Osat kannattaa kuitenkin suunnitella siten, että valmistustekniikan vaihtaminen on mahdollisimman helppoa.

## 10 POHDINTA

Opinnäytetyön alkuperäisenä tavoitteena oli suunnitella sarjavalmistusversio muovintunnistukseen käytettävästä skannerista. Kuitenkin projektin aikana nopeasti oli selvää, ettei tämä tulisi onnistumaan kasvavan työmäärän ja resurssivaatimusten takia. Tästä syystä tavoitetta muokattiin toimeksiantajan kanssa yhteisymmärryksessä pyrkimykseksi valmistaa toiminnallinen esittelyprototyyppi, jonka pohjalta olisi mahdollista alkaa kehittämään kaupallista tuotantoversiota.

Esittelyprototyypin sensorin piti pystyä luotettavasti tunnistamaan ohjelmaan syötettyjä muovilautuja ja olla sijoitettuna skannerin runkoon siten, että se on suojassa iskuilta ja naarmuuntumiselta. Skanneri piti olla myös käytettävissä siten, että sitä voidaan käyttää kannettavasti akkuvirralla ja latauksen aikana. Skannerin piti olla myös ergonominen ja ulkonäöltään sellainen, että siitä voitaisiin pienillä ulkoisen geometrian muokkauksilla alkaa suunnittelemaan tuotantoversiota, joka olisi mahdollista valmistaa joko SLS- tai SLA-menetelmillä tai ruiskuvalutekniikalla. Näissä tavoitteissa onnistuttiin.

Työssä käytiin läpi myös tuotekehityksen, muovintunnistustekniikan ja jäähdytysmenetelmien teoria ja esittelyprototyypin tuotekehitysprosessi vaihe vaiheelta. Projektin aikana selvästi eniten aikaa kului 3D-mallien luonnosteluun ja suunnitteluun, 3D-tulostukseen sekä muihin valmistustöihin, kuten juottamiseen, insertöintiin ja osien viimeistelyyn. Esittelyversiosta tehtiin useita iteraatioita niin 3D-mallina kuin tulostamalla, ja sen ansiosta lopputuloksena saatiin aikaan prototyyppi, joka on täysin toiminnallinen ja johon voi olla tyytyväinen. Tuotekehitysprosessi ei kuitenkaan aina sujunut suunnitelmien mukaan, ja useita ennalta arvaamattomia ongelmia kohdattiin työn aikana. Näitä varten opinnäytetyössä olisi paremmin pitänyt pystyä varautumaan erilaisiin riskeihin.

Jatkokehityksessä on vielä työsarkaa riittävästi ja muovintunnistukseen käytettävälle skannerille voi hyvinkin löytyä kysyntää niin teollisuudesta kuin kaupan alaltakin. Olisi ollut kiinnostavaa jatkaa projektia luonnolliseen päätökseensä eli tuotantoprototyypin valmistamiseen, mutta toivottavasti tuotekehitystyö saa jatkoa ja tätä opinnäytetyötä käytettäisiin sen jatkokehitystyön pohjana.

## LÄHTEET

Antila, Jarko 2013. VTT FPI Overview. VTT/Open Photonics Inc. Hakupäivä 16.4.2021. <http://www.open-photonics.com/wp-content/uploads/2013/03/VTT-FPI-Overview.pdf>.

Bach, Matt 2012. How ambient temperatures affect your PC. Puget Systems. Hakupäivä 18.4.2021. <https://www.pugetsystems.com/labs/articles/How-Ambient-Temperatures-Affect-Your-PC-158/>.

Ball, David 2001. The Basics of Spectroscopy. 1. painos. Bellingham, USA: OP-TEC University of Central Florida. Hakupäivä 13.4.2021. [https://spie.org/Documents/Courses/OP-TEC/Basics\\_of\\_Spectroscopy\\_2008\\_CORD.pdf](https://spie.org/Documents/Courses/OP-TEC/Basics_of_Spectroscopy_2008_CORD.pdf).

Bate, Alex 2019. Thermal testing Raspberry Pi 4. Raspberry Pi Blog. Hakupäivä 18.4.2021. <https://www.raspberrypi.org/blog/thermal-testing-raspberry-pi-4/>.

Bennet, Bud & Versteeg, Paul 2017. Single cell li-ion powered UPS for Raspberry Pi. Hackaday.io. Hakupäivä 21.4.2021. <https://hackaday.io/project/25116-single-cell-li-ion-powered-ups-for-raspberry-pi>.

Buchman, Isidor 2001. Batteries in a portable world: a handbook on rechargeable batteries for non-engineers. 2. painos. Richmond, Kanada: Cadex Electronics Inc.

Burns, Donald & Ciurczak, Emil 1992. Handbook of near-infrared analysis. 1. painos. New York, USA: Marcel Dekker Inc.

Chemistry Libretexts 2020. Infrared Spectroscopy. Hakupäivä 15.4.2021. <https://chem.libretexts.org/@go/page/1847>.

Cooper, Robert G. 2001. Winning at new products: accelerating the process from idea to launch. 3. painos. Cambridge, USA: Perseus Publishing.

de Oliveira, Alianda Dantas, da Silva, Vitor Hugo & Pimentel, Maria Fernanda 2018. Use of infrared spectroscopy and near infrared hyperspectral images to evaluate effects of different chemical

agents on PET bottle surfaces. Researchgate. Hakupäivä 15.4.2021. [https://www.researchgate.net/publication/326560244\\_Use\\_of\\_Infrared\\_Spectroscopy\\_and\\_Near\\_Infrared\\_Hyperspectral\\_Images\\_to\\_Evaluate\\_Effects\\_of\\_Different\\_Chemical\\_Agents\\_on\\_PET\\_Bottle\\_Surface](https://www.researchgate.net/publication/326560244_Use_of_Infrared_Spectroscopy_and_Near_Infrared_Hyperspectral_Images_to_Evaluate_Effects_of_Different_Chemical_Agents_on_PET_Bottle_Surface).

DeVries, Gary 2018. Preparing for injection molding resin selection. Plasticcomponents.com. Hakupäivä 27.4.2021. <https://www.plasticcomponents.com/blog/preparing-for-injection-molding-resin-selection>.

Esteve Agelet, Lidia & Hurburgh, Charles 2010. A tutorial on near infrared spectroscopy and its calibration. Researchgate. Hakupäivä 16.4.2021. [https://www.researchgate.net/publication/233102449\\_A\\_Tutorial\\_on\\_Near\\_Infrared\\_Spectroscopy\\_and\\_Its\\_Calibration](https://www.researchgate.net/publication/233102449_A_Tutorial_on_Near_Infrared_Spectroscopy_and_Its_Calibration).

Formlabs 2021. The Ultimate Guide to Rapid Prototyping for Product Development. Hakupäivä 11.4.2021. <https://formlabs.com/eu/blog/ultimate-guide-to-rapid-prototyping/>.

Formlabs 2021. 3D Printing Technology Comparison: FDM vs. SLA vs. SLS. Hakupäivä 11.4.2021. <https://formlabs.com/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/>.

Hariharan, P. 2006. Basics of interferometry. 2. painos. Amsterdam, Hollanti: Elsevier Inc.

Keynote Chemistry 2014. Chem 361 – The interferometer in IR spectroscopy. Hakupäivä 16.4.201. <https://www.youtube.com/watch?v=BSfpcsSafWQ>.

Kotler, Philip 1990. Markkinoinnin käsikirja: analyysi, suunnittelu, toteutus ja seuranta. 6. painos. Helsinki: Rastor-julkaisut.

Kumar, Ashwini, Londhe, Kiran & Kaushik, Vipul Ranjan 2017. Heat sink design for optimal performance of compact electronic appliances – a review. Researchgate. Hakupäivä 18.4.2021. [https://www.researchgate.net/publication/320187880\\_heat\\_sink\\_design\\_for\\_optimal\\_performance\\_of\\_compact\\_electronic\\_appliances-a\\_review](https://www.researchgate.net/publication/320187880_heat_sink_design_for_optimal_performance_of_compact_electronic_appliances-a_review).

Luger Research 2019. Materials, manufacturing and technologies for designing passive cooling devices. Hakupäivä 21.5.2021. <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/materials-manufacturing-and-technologies-for-designing-passive-cooling-devices>.

Mital, Anil, Desai, Anoop, Subramanian, Anand & Mital, Aashi 2014. Product development: a structured approach to consumer product development, design, and manufacture. 2. painos. Waltham, USA: Elsevier Inc. Hakupäivä 4.4.2021. [https://oula.finna.fi/oamk/Record/oy\\_electronic\\_oamk.9917616354706252](https://oula.finna.fi/oamk/Record/oy_electronic_oamk.9917616354706252).

NASA 2013. The Electromagnetic Spectrum. Hakupäivä 14.4.2021. <https://image.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html>.

Norman, Richard, Zumdahl, Steven, Usselman, Melvyn & Noller, Carl 2020. Chemical compound. Encyclopedia Britannica. Hakupäivä 14.4.2021. <https://www.britannica.com/science/chemical-compound/Spectroscopy-of-organic-compounds>.

Olmatic. S.USV Advanced. Hakupäivä 21.4.2021. <https://s-usv.de/produkt/s-usv-advanced/>.

Omnexus 2021. Complete guide on polybutylene terephthalate (PBT). Hakupäivä 19.5.2021. <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polybutylene-terephthalate-pbt-plastic>.

Onlogic Blog 2020. Keeping your PC cool – an introduction to fanless PC cooling. Hakupäivä 18.4.2021. <https://www.onlogic.com/company/io-hub/keeping-your-pc-cool-an-introduction-to-fanless-pc-cooling/>.

Power Bank Expert 2021. Can a power bank charge and discharge simultaneously? Hakupäivä 21.4.2021. <https://www.powerbankexpert.com/can-power-bank-charge-and-discharge-simultaneously>.

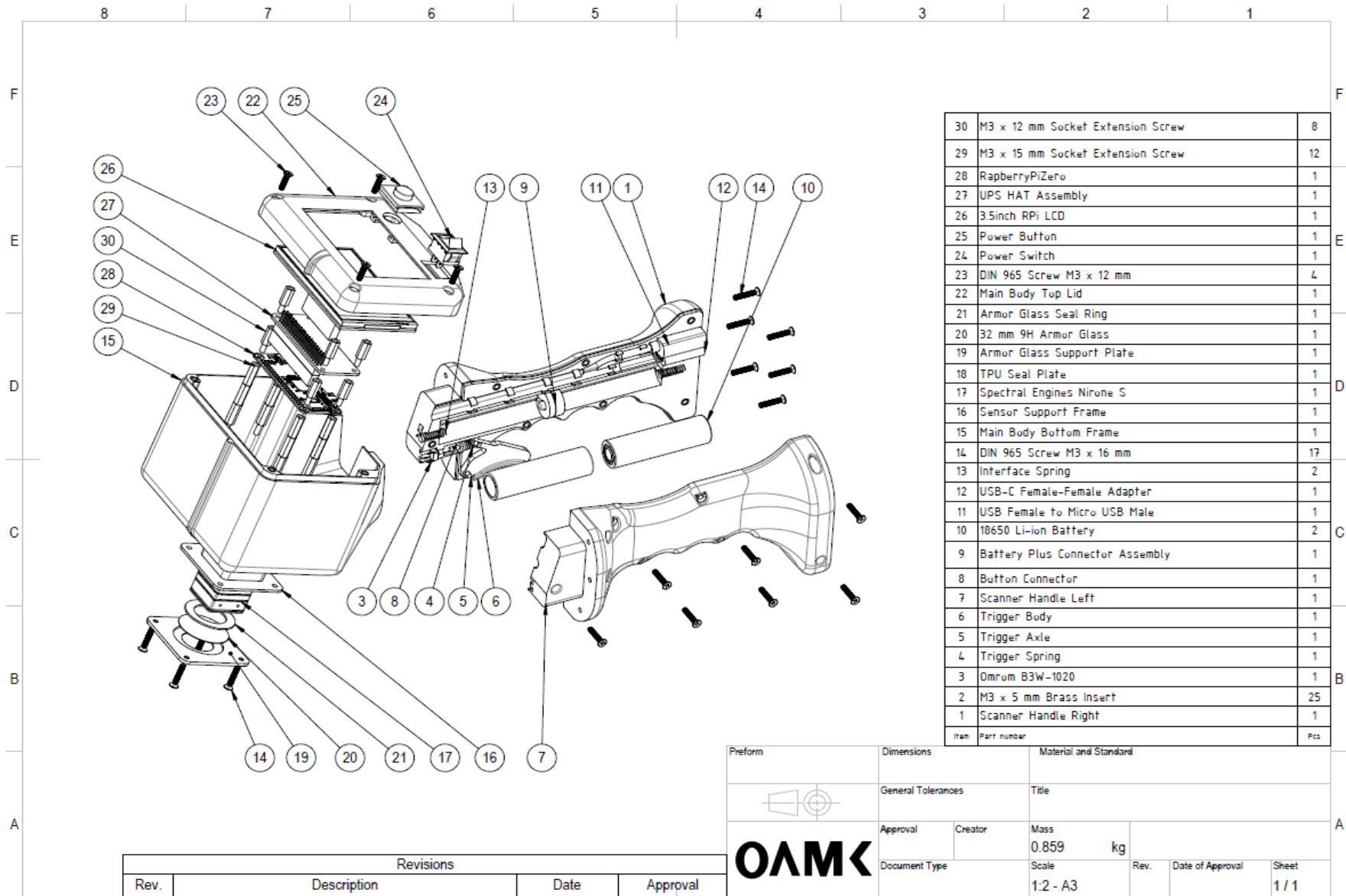
Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi 4 Tech Specs. Hakupäivä 10.5.2021. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>.

Spectral Engines. Nirone Sensor S. Hakupäivä 18.4.2021. <https://www.spectralengines.com/products/nirone-sensors>.

Sundaram, A. Shanmuga & Velraj, R. 2008. Thermal management of electronics: A review of literature. Researchgate. Hakupäivä 18.4.2021. [https://www.researchgate.net/publication/239412558\\_Thermal\\_management\\_of\\_electronics\\_A\\_review\\_of\\_literature\\_](https://www.researchgate.net/publication/239412558_Thermal_management_of_electronics_A_review_of_literature_)

The Engineering Toolbox 2003. Convective heat transfer. Hakupäivä 19.5.2021. [https://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d\\_430.html](https://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html)

Ulrich, Karl & Eppinger, Steven 2003. Product design and development. 3. painos. New York, USA: McGraw-Hill/Irwin.



Revisions			
Rev.	Description	Date	Approval

Preform		Dimensions		Material and Standard	
		General Tolerances		Title	
		Approval	Creator	Mass	kg
Document Type		Scale	Rev.	Date of Approval	Sheet
		1:2 - A3			1 / 1

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.