



samk

Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

EERO LAIHINEN

3D-tulostamisen hyödyntäminen akku- tuotannon laajentamis- ja käyttöönot- tovaiheiden ongelmanratkaisussa

TUOTANTOTEKNIIKAN JA -TALOUDEEN TUTKINTO-OHJELMA
2023

TIIVISTELMÄ

Laihinen, Eero: 3D-tulostamisen hyödyntäminen akkutuotannon laajentamis- ja käyttöönottovaiheiden ongelmanratkaisussa

Opinnäytetyö, AMK

Tuotantotalous ja -tekniikka

Joulukuu, 2023

Sivumäärä: 75

Opinnäytetyössä tutkittiin 3D-tulostamisen hyödyntämismahdollisuuksia tuotantolinjan kehittämisessä. Työssä perehdyttiin tuotantolinjan uudistusvaiheessa ilmenevien ongelmatilanteiden ratkaisuun. Tavoitteena on todentaa nykyaikaisen valmistusmenetelmän toimivuus tuotantolinjan toimintaympäristössä.

Tutkimuksessa hyödynnettiin 3D-tulostukseen perehtyneiden nettisivujen ja tutkielmien materiaaleja. Työssä valmistettiin 3D-tulostettuja kappaleita, joita käytettiin ongelmanratkaisutilanteissa. Ratkaisut arvioitiin niille asetettujen tavoitteiden täyttymisen perusteella. Arviointiin yhdistettiin pohdinta 3D-tulostuksen toimivuudesta ongelmatilanteen ratkaisuissa. Opinnäytetyössä käsiteltiin erilaisten 3D-tulostimien toimintaperiaatteita ja materiaalivalintoja. 3D-tulostimella valmistettiin prototyyppisiä sekä pysyviä ratkaisuita. Tulostettujen kappaleiden valmistusta vertailtiin perinteisillä koneistusmenetelmillä valmistettuihin kappaleisiin. Opinnäytetyössä käsiteltiin myös 3D-mallinnuksen vaiheita ja suunnittelun kohdistamista 3D-tulostamiselle.

Opinnäytetyössä valmistettiin 3D-tulostettuja kappaleita erilaisiin ongelmatilanteisiin. Valmistetuilla kappaleilla muutettiin työkalun käyttötapaa, parannettiin työturvallisuutta sekä järjesteltiin työpisteen tarvikkeet. 3D-tulostetuilla kappaleilla estettiin tuotannon keskeyttäminen korvaamalla robotitarttujan alumiiniset osat muovilla. Valmistettujen kappaleiden hinta laskettiin olevan huomattavasti perinteisiä koneistuskeinoja edullisempi.

3D-tulostaminen todettiin päteväksi valmistustavaksi prototyypeille sekä pysyville ratkaisuille. Tulostimella pystyttiin valmistamaan laadukkaita ja toimivia kappaleita edullisesti sekä nopeasti. Kappaleet todettiin kestäviksi ja niitä käytettiin sarjatuotannossa.

ABSTRACT

Laihinien, Eero: Utilizing 3D-printing to solve challenges in battery production expansion and commissioning phases

Bachelor's thesis

Industrial management and engineering

December 2023

Number of pages: 75

This bachelor's thesis examines opportunities to utilize 3D-printing in production line development. The study was scoped in resolution of problematic situations arising during the renovation phase of the production line. The aim was to verify the functionality of a modern manufacturing method within the production line's work environment.

Material from 3D-printing oriented websites and studies were utilized in the research. 3D-printed pieces were produced and used for problem-solving in this study. Solutions were evaluated on the fulfillment of the predefined goals. Reflection on the functionality of 3D-printing in the resolving process was included in the evaluation. Principles of various 3D-printers and material choices were discussed in this study. Prototypes and permanent solutions were manufactured using a 3D-printer. Manufacturing 3D-printed parts were compared to ones made with traditional machining methods. Different stages of 3D modeling and design targeting 3D printing were also covered in this thesis.

3D-printed parts were manufactured to various problems in this study. Manufactured parts were utilized to change usage methods of tools, improve workplace safety and organization of work equipment. Production interruptions were prevented by replacing broken aluminum parts from a gripper with 3D-printed plastic after robot collision. Manufacturing costs for 3D-printed parts were found to be significantly cheaper than parts made with traditional methods.

3D-printing was verified as a valid manufacturing method for prototypes and permanent solutions. The printer could produce high quality and functional pieces which were inexpensive but fast to produce. The pieces were found to be durable and usable in serial production environment.

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	6
1.1 Kohdeyritys.....	6
1.2 Tutkimuksen taustat	7
1.3 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymys.....	7
1.4 Rajauksen määrittely	8
2 3D-TULOSTUKSEN HYÖDYNTÄMINEN KOHDEYRITYKSEN AKKUTUOTANTOLINJAN KÄYTTÖÖNOTOSSA	9
2.1 Akkutuotantolinjan kehittäminen.....	9
2.1.1 Tuotantolinjan rakentaminen	9
2.1.2 Tuotantolinjan laajennus.....	10
2.2 Tuotantolinjan käyttöönotto vaihe ja 3D-tulostuksen käyttömahdollisuudet sen ongelmatilanteissa	11
2.2.1 Käyttöönotto	11
2.2.2 3D-tulostuksen hyödyntäminen	12
3 3D-TULOSTUS VALMISTUSMENETELMÄNÄ.....	14
3.1 3D-tulostimen toimintaperiaate.....	14
3.2 Tulostustekniikka.....	15
3.3 Tulostusmateriaalin valinta	16
3.3.1 Muovipohjaiset materiaalit	17
3.3.2 Hybridi tulostus	18
3.4 3D-tulostimen rajoitukset ja vahvuudet.....	19
3.4.1 Tulostettavan kappaleen koko	19
3.4.2 Tukirakenteet	20
3.4.3 Valmistuskustannukset.....	21
3.4.4 Valmistusaika.....	22
3.5 Metalli ja hartsi 3D-tulostaminen	23
3.5.1 Metalli 3D-tulostus	23
3.5.2 Hartsin 3D-tulostaminen	24
4 3D-SUUNNITTELU	27
4.1 Käyttökohteen mallinnus	27
4.1.1 Kappaleen mitoittaminen	28
4.1.2 Kappaleen piirtäminen	28
4.2 Suunnittelun kohdentaminen 3D-tulostimelle	29
4.3 Kappaleen sisäisten muotojen valmistus.....	29
4.4 Prototyypin valmistaminen.....	30

5 TUTKIMUKSEN KEHITTÄMISTYÖ	32
5.1 Lähestymistapa	32
5.2 Menetelmät.....	33
6 TOTEUTUKSEN KUVAUS.....	34
6.1 3D-tulostuksen hyödyntäminen ongelmatilanteessa	35
6.2 3D-tulostetun kappaleen valmistus ja arviointi.....	36
7 VAURIOITUNEEN ROBOTTITARTTUJAN ONGELMANRATKAISU	37
7.1 Ongelmanratkaisun vasteaika	37
7.2 Halkeaman korjaus.....	40
7.3 Korjauksen lopullinen asennus.....	43
7.4 Materiaali- ja työkustannukset.....	43
8 ESIMERKITAPAUKSIA 3D-TULOSTUKSEN HYÖDYNTÄMISESTÄ TUOTANTOLINJAN PROSESSEISSA	45
8.1 Valmistettujen kappaleiden esittelyn ja arvioinnin kaava	45
8.2 Tuotantotyökalujen kehittäminen käyttöönoton aikana	46
8.2.1 Tarpeen määrittäminen.....	46
8.2.2 Valmistettavien kappaleiden esittely ja valmistaminen	48
8.2.3 Uuden toimintamallin testaus ja arviointi.....	53
8.3 Sähköturvallisuuden parantaminen	55
8.3.1 Tarpeen määrittäminen.....	55
8.3.2 Kappaleen mallinnus, prototyyppi ja valmistaminen	56
8.3.3 Suurjännitesuojien testaus ja arviointi.....	59
8.4 Työkalupidikkeiden valmistaminen ja työn standardisointi.....	62
8.4.1 Tarpeen määrittäminen.....	62
8.4.2 Kappaleen mallinnus ja valmistaminen.....	63
8.4.3 Valmiiden telineiden asennus, testaus ja arviointi.....	65
9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	71
LÄHTEET	73

1 JOHDANTO

Tässä työssä tarkastellaan 3D-tulostamisen mahdollisuuksia tuotantolinjan laajentamis- ja käyttöönottovaiheiden aikana esiintyvien ongelmien ratkaisumallina. Opinnäytetyössä perehdytään 3D-tulostimen toimintaperiaatteen kautta sen mahdollisuuksiin sekä erilaisiin 3D-tulostimiin. Lisäksi tarkistellaan 3D-mallinnuksen mahdollisuuksia ja vaatimuksia tulostuksen toteuttamiseksi.

Opinnäytetyössä esitellään ongelmanratkaisumahdollisuuksia esimerkkitilanteiden avulla sekä niiden avulla saadut hyödyt prosessin edistämiseksi. Projektin aikana valmistetaan prototyyppejä, joista luodaan tuotantolinjan päivittäiseen käyttöön erilaisia työkaluja, telineitä ja suoja. Tavoitteena on edistää ja kehittää tuotantolinjan toimivuutta 3D-tulostimen avulla. Työssä käytetään termiä ongelmatilanne kuvaamaan tilannetta, jossa prosessin aikana ilmenee jonkintasoinen haaste.

1.1 Kohdeyritys

Kohdeyritys on kansainvälinen hybridiajoneuvojen akkuja valmistava toimija. Yrityksen nimi ja muut yritykseen viittaava tieto on jätetty mainitsematta tässä opinnäytetyössä, yrityksen omasta pyynnöstä. Yrityksellä on useita tuotantolinjoja, joista yhden muutosprosessiin perehdytään tarkemmin tässä työssä, 3D-tulostuksen hyödyntämisen näkökulmasta.

Kohdeyrityksen tuotantolinja on alun perin käyttöönotettu vuonna 2021, jonka jälkeen tuotantolinjalla on valmistanut tuhansia akkuja. Valmistettuja akkutyyppejä on ollut yksi ja tämän projektin tarkoituksena on laajentaa sen käyttömahdollisuuksia. Tämä uudistusprojekti aloitettiin vuoden 2023 alussa. Projektin tavoitteena on valmistaa kahta akkutyyppeä samalla tuotantolinjalla. Tämä vaatii uusia mekaanisia asennuksia, ohjelmistopäivityksiä ja työkaluja. 3D-

tulostusta hyödynnetään projektin ongelmantilanteiden ratkaisuja pohdittaessa. Tavoitteena on nopeuttaa ratkaisujen kehittämisprosessia.

1.2 Tutkimuksen taustat

Kohdeyritys on investoinut kolmeen 3D-tulostimeen, joiden käyttötarkoituksena on valmistaa kappaleita tehtaan tarpeisiin. Tulostimilla on entuudestaan valmistettu muutamia tuotantoprosesseja kehittäviä ratkaisuita. Valmistettuja kappaleita on käytetty tukemaan valmistettavaa tuotetta tai sen puolivalmis-teita.

Tuotantolinjan laajennusvaiheen alussa ilmenneen ongelman ratkaisuun päätettiin hyödyntää 3D-tulostettuja kappaleita. Yksinkertaiseen 3D-tulostettuun ratkaisuun oltiin tyytyväisiä ja valmistuskeinoa päätettiin kokeilla muissakin ongelmatilanteissa. Kohdeyrityksessä tiedostettiin 3D-tulosteiden pystyvän myös laajempaan ja monipuolisempaan ongelmanratkaisuun.

1.3 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymys

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on luoda ymmärrys 3D-tulostuksen potentiaalista ongelmanratkaisuvälineenä. Nykyaikaista valmistusmenetelmää voidaan hyödyntää keskenään erilaisissa ratkaisuissa. Kappaleiden valmistus on edullista ja nopeaa.

Tutkimuksessa käsitellään 3D-tulostimen mahdollisuuksia prototyyppien sekä pitkäaikaisten ratkaisuiden valmistamisessa. Työn tavoitteena on myös kehittää ja laajentaa tulostettujen kappaleiden käyttötarkoituksia. Tutkimuskysymys on ”miten 3D-tulostinta voidaan hyödyntää tuotantolinjan käyttöönottovaiheessa ilmenevän ongelman ratkaisussa?”.

1.4 Rajauksen määrittely

Tässä työssä perehdytään tuotantoympäristössä huomattuihin ongelmiin ja niiden 3D-tulostettuihin ratkaisuihin. Syvennytään valmistettavan kappaleen kehitys- ja valmistusprosessiin, jossa käsitellään kappaleelle tarvittavat ominaisuudet. Keskitytään valmistettavan kappaleen toimintaperiaatteeseen ja miten se edistää tuotantoprosessin kehittymistä.

Tässä opinnäytetyössä ei käsitellä yksityiskohtaisesti kappaleen suunnittelu- tai mallinnusprosessia. Suunnittelun sijaan käydään läpi jo valmistettujen kappaleiden toimintaperiaate. Lopuksi ratkaisut arvioidaan niille asetettujen tavoitteiden täyttymisen perusteella.

2 3D-TULOSTUKSEN HYÖDYNTÄMINEN KOHDEYRITYKSEN AKKUTUOTANTOLINJAN KÄYTTÖÖNOTOSSA

Kohdeyrityksen tuotantolinja valmistaa käyttövalmiita akkuja. Akut valmistetaan valmiista kappaleista, joista kootaan kokonainen hybridauton akku. Tuotantolinja koostuu useista eri työvaiheista, joita varten on noin 50 erilaista työasemaa.

Tässä opinnäytetyössä käsitellään tuotantolinjan laajennusvaiheita ja miten 3D-tulostamista voidaan hyödyntää niissä ilmenneiden ongelmien ratkaisussa. 3D-tulostetut kappaleet ovat työssä käytettäviä tai työtä tukevia kappaleita, joiden avulla tuotantoa kehitetään.

2.1 Akkutuotantolinjan kehittäminen

Kohdeyrityksen tuotantolinjalla oli mahdollista valmistaa vain yhtä akkumallia. Varianttien eli eri akkutyypin kasvattamiseksi osa tuotantolinjasta rakennettiin uudelleen. Projektin tarkoituksena on mahdollistaa kahden variantin valmistus samalla tuotantolinjalla.

Tuotantolinjan kehittämistä varten luotiin projekti, joka koostui kohdeyrityksen työntekijöiden lisäksi ulkopuolisista urakoitsijoista. Mekaanisten muutosten lisäksi päivitetään myös tuotantolinjan käyttöliittymä.

2.1.1 Tuotantolinjan rakentaminen

Akkutuotannon tarkoitukseen valmistettavan tuotantolinjan rakentaminen alkaa samalla tavalla, kuin lähes minkä tahansa muun tuotantolinjan rakentaminen. Ennen fyysisen valmistuksen aloittamista on usein vuosia kestävä

suunnitteluvaihe, jossa kehitetään linjan toimintaperiaatetta. Tuotantolinja kohdennetaan valmistettavalle tuotteelle. Projektissa käydään läpi, miten tuote valmistetaan resurssillisesti mahdollisimman kannattavasti. Kyseisessä vaiheessa on suunniteltava jokaisen työpisteen toimintatehtävät ja työkalut, joilla tuotetta valmistetaan. Kun tuotantolinjaa suunnitellaan, on haastavaa ottaa huomioon jokaista tarvetta tai todentaa suunniteltujen työkalujen toimivuutta. Tässä tulee esiin ongelma, joka tapahtui myös tämän tuotantolinjan laajennusprojektissa.

Vuonna 2021 tuotantolinjan rakennusvaiheessa linja suunniteltiin tuottamaan yhtä akkumallia, mutta optio toiselle akkumallille oli jo tällöin olemassa. Tuotantolinjan alkuosaa muokkaamalla, voidaan valmistaa molempia akkutyyppejä vuorotellen. Tämän takia tuotantolinjan nimeksi annettiin ”Mukautuva linja”.

Muutama vuosi alkuperäisen tuotantolinjan valmistumisen jälkeen, asiakas halusi vaihtaa linjalla valmistettavaa akkumallia. Tämä aloitti linjan laajennusprojektin vuodenvaihteessa 2023. Projektin aikataulu on valmistua saman vuoden aikana.

2.1.2 Tuotantolinjan laajennus

Vuonna 2023 alkaneen laajennusprojektin tarkoituksena on laajentaa tuotantolinjalla valmistettavien tuotevarianttien määrää. Tarvittavat muokkaukset ovat suunnitelleet intialainen insinööripalvelu, joka tuotti kohdeyritykselle suurimman osan linjan muokkauksessa tarvittavasta informaatiosta. Pohjapiirustukset, tahtiaikasimuloinnit, tuotantokoneet sekä robottien tarttijat ovat heidän suunnittelemiaan. Tuotantolinjan alkuosan lisäksi on muokattava linjaa myös kokonaisuutena.

Suurimmat muutokset painottuvat tuotteiden eroavaisuuksien huomiointiin ja puolivalmiin tuotteen kuljetukseen tuotantolinjaa pitkin. Tuotteet ovat eri kokoisia, joten niiden alla olevien telineiden kokoa on myös muutettava.

Työasemien, robottien ja kuljettimien määrä kasvoi huomattavasti sekä niiden käyttötarkoitusta muokattiin. Tästä syystä ongelmien löytymisen mahdollisuus suuresta kokonaisuudesta on erittäin todennäköistä.

2.2 Tuotantolinjan käyttöönottovaihe ja 3D-tulostuksen käyttömahdollisuudet sen ongelmatilanteissa

Käyttöönottovaiheessa saattaa ilmetä ongelmatilanteita, joiden ratkaisut ovat löydettävä nopeasti. Ongelmanratkaisukeinoja ja niihin sopivaa työkalua on pohdittava.

Tässä opinnäytetyössä ongelmanratkaisun työkaluna pohditaan 3D-tulostinta. Tarkoituksena on valmistaa tarvittavia kappaleita tulostamalla ne muovista. Tavoitteena on 3D-tulostaa tarvittavat kappaleet nopeammin ja edullisemmin kuin ulkoistettu konepaja voisi ne valmistaa.

2.2.1 Käyttöönotto

Käyttöönottovaiheessa tuotantolinjaa koekäytetään ensimmäistä kertaa, jolloin fyysisesti kokeillaan eri työkalujen toimivuus. Tässä vaiheessa kohdeyrityksen projektia ilmeni suuria ongelmia, jotka johtuivat pääosin kolmesta syystä: materiaalivalinta, suunnitteluvirhe sekä tarvikkeiden puuttuminen.

Materiaalivalinta valitulla insinööripalvelulla oli pääsääntöisesti teräs tai alumiini. Sähköä johtavien materiaalien sijainti ja käyttötarkoitus akkutuotannossa on erittäin kriittistä, koska oikosulkuriski on huomattava. Tämän riskin takia useiden robottien tarttuvien materiaaleja muokattiin, koska sähköä johtavat osat olivat liian lähellä tai jopa kontaktissa akkunapojen kanssa.

Suunnitteluvirheitä ilmeni, kun insinööripalvelulle lähetettyjen 3D-mallien osat olivat esimerkiksi täydellisesti taiteltuja tai tasaisia. Tämä ei kuitenkaan toteudu käytännössä. Palvelun suunnittelemisissa ratkaisuihin ei huomioitu tuotannossa ilmeneviä marginaalisia eroavaisuuksia. Tämä johti muun muassa

puolivalmisteen osumiseen robottien tarttujaan. Myös tuotantoprosessissa oli väärinymmärryksiä, joten työkalujen käyttötarkoitus ei vastannut tarpeita. Lisäksi tarvikkeita puuttui väärinymmärrysten takia.

2.2.2 3D-tulostuksen hyödyntäminen

3D-tulostuksella voidaan valmistaa tuotantolinjan tarpeisiin pysyviä tai väliaikaisia ratkaisuita. Kappaleiden valmistusmateriaalina voidaan käyttää muovi-seosta, metallia, hartsia tai näiden yhdisteitä. Alkuperäisen tuotantolinjan muutosprosessissa 3D-tulostusta ei käytetty valmistusmetodinä, vaan sitä käytettiin ongelmatilanteiden ratkomiseen. Tulostettujen kappaleiden avulla mahdollistetaan tuotantolinjan prosessin kehittäminen.

Ensimmäinen tuotantolinjalle 3D-tulostuksella valmistettu kappale liittyi edellä mainittuun materiaaliongelmaan, jossa robotin turvatarttujan materiaalina oli pinnoitettu teräs. Toimittaja oli pinnoittanut teräksen, minkä tarkoitus oli estää sähköjohtavuus, mutta pinnoite oli epäonnistunut. Turvatarttujen käyttäminen tuotannossa olisi aiheuttanut oikosulun, jonka estämiseksi tarttujat valmistettiin 3D-tulostimella. Tässä tulostuksessa käytettiin materiaalina muovia. Nopein valmistustapa oli hyödyntää kohdeyrityksen 3D-tulostinta. Tästä saadun kokemuksen perusteella aloitettiin 3D-tulostuksen laajempi hyödyntäminen ongelmatilanteiden ratkaisuisissa.

Ongelmanratkaisun lisäksi 3D-tulostuksen hyödyntäminen lisääntyi myös prosessin kehityksessä. Kehitysidea lähtee prosessin työvaiheesta, jossa huomataan kehitysmahdollisuus. Mahdollisuuden kohteena voi esimerkiksi olla tuotannon nopeuttaminen, tuotelaadun varmistaminen tai työntekijän turvallisuus. Näihin kehitysmahdollisuuksiin luodaan työkaluja, -alustoja tai -suoja, jotka voidaan valmistaa 3D-tulostamalla.

3D-tulostusta hyödyntämällä on mahdollisuus valmistaa tuotannon tarkoitukseen käytettyjä varaosia ilman suuren varastoarvon ylläpitämistä. Tilanteessa, jossa kaikki varaosat ovat valmiita kappaleita hyllyssä, niille on luotava

organisoitu järjestelmä, jolla niiden määriä ja paikkoja varastossa tarkkaillaan. Käyttötarkoituksissa, joissa voidaan hyödyntää 3D-tulostusta, ei tarvitse pitää valmiita kappaleita hyllyssä tai ainakin niiden lukumäärää voidaan vähentää. Tulostusmateriaalia varastoimalla voidaan valmistaa tarvittavia kappaleita nopeasti, jolloin yhdestä investoinnista voidaan valmistaa monenlaisia tuotannon varaosia.

3 3D-TULOSTUS VALMISTUSMENETELMÄNÄ

Valmistusmenemällä tarkoitetaan materiaalin työstämistä eri menetelmillä, josta valmistuu kappale. 3D-tulostaminen eroaa perinteisistä koneistustelmistä. Työstettävä materiaali voidaan valita valmistettavan kappaleen tarpeiden perusteella. (Xometry, 2022.)

Tässä työssä perehdytään eri materiaaleihin ja niiden käyttötarkoituksiin. Tutkitaan tulostusteorian vaikutusta valmistettavan kappaleen ominaisuuksiin. Tutustutaan tukirakenteiden käyttötarkoituksiin sekä yleisesti 3D-tulostuksen rajoituksiin ja vahvuuksiin.

3.1 3D-tulostimen toimintaperiaate

3D-tulostin on perinteiseen tulostimeen verrattuna huomattavasti kehittyneempi ja käyttötarkoituksiltaan monipuolisempi työkalu. 3D-tulostimella luodaan tekstin sijaan fyysisiä kolmiulotteisia kappaleita. Sen toimintaperiaate perustuu pienien päällekkäisten materiaalikerrosten luomiseen. Eri kerrosten muodot kehittävät yhtenäisen kappaleen. Yleisimmin 3D-tulostimissa käytetään erilaisia muoveja, jotka lämmitetään ja pursoitetaan tasaiselle tasolle ohjelmoidun muodon mukaisesti. Tason lämpötila säädetään käytettävän materiaalin mukaan. (Xometry, 2022.)

Muodot tehdään suuttimen erinäisillä liikkeillä, suhteessa sen alla olevaan tasoon. Yleisimmissä tulostinmalleissa koordinaatiston X- ja Y-akselin suuntaiset liikkeet tehdään liikuttamalla suutinta moottorien ja hihnojen avulla. Z-akselin suuntaiset liikkeet tapahtuvat joko suutinta tai sen alla olevaa tasoa nostamalla tai laskemalla. Yleisesti laadukkaimmat ja arvokkaimmat tulostimet käyttävät Z-akselin suuntaisissa liikkeissä tason liikuttamista suuttimen sijaan.

Jokaisen liikkeen määrittely tapahtuu 3D-tulostukseen tarkoitettussa ohjelmassa, jossa 3D-piirretty kappale jaetaan kerroksiin. Kappaleen jokainen kerros pursotetaan yksi kerrallaan, sille määrättyyn muotoon. Näin kappale valmistuu määriteltyyn muotoon kerros kerrokselta. (Carolo, 2022.)

Huomattavin ero perinteisiin valmistusmenetelmiin on materiaalin lisääminen, sen poistamisen sijaan. Tulostimen toimintaperiaate on hyvin lähellä CNC-koneistusta, mutta se on kuitenkin päinvastainen. CNC-kone jyrää isosta kappaleesta turhan materiaalin pois ja jäljelle jää haluttu kappale. 3D-tulostin lisää vain halutun materiaalin, joten materiaalin käyttö on tehokkaampaa. (Roboze, n.d.)

3.2 Tulostustekniikka

Tulostimen asetuksista voidaan vaikuttaa muun muassa tulostettujen kerrosten muotoon, tiheyteen, korkeuteen, tarkkuuteen ja nopeuteen. Yleisin ja muuttetuin asetus on kappaleen sisärakenteen tiheys ja muoto. Tulostettavan kappaleen ulkorakenne on lähtökohtaisesti yhtenäinen kerros, mutta kappaleen sisäosa on ontto. Valmistamalla sisältä onttoja kappaleita, saadaan säästettyä materiaalia ja aikaa. Ontot kappaleet ovat myös kevyempiä, mikä voi olla hyödyllistä joissakin tilanteissa. (Markforged, Markorged.com, n.d.)

Kappaleen sisärakenteessa olevasta materiaalista puhutaan täytteenä eli englanniksi infill. Mitä pienempää täyteprosenttia käytetään, sen nopeampaa tulostaminen on, koska suuttimen ei tarvitse kulkea läpi koko kerroksen pinta-alaa. Ontoksi tulostetun kappaleen sisälle rakennetaan täyterakenne, jonka muoto vaihtelee käyttökohteen mukaan. Kappaleen sisällä olevan rakenteen kuviota muuttamalla, saadaan kappale kestämään eri suunnista kohdistuvia voimia. Tämä on otettava huomioon suunnitteluvaiheessa. Yleisin ja yksinkertaisin kuvio on salmiakkikuvioinen ristikko. Ristikko on myös tulostuksen kannalta tehokasta, koska kyseinen liike on hyvin luonnollinen printterin toimintaperiaatteelle. Tilanteissa, joissa valmistettavan kappaleen on kestettävä

huomattavia voimia tai sen massalla on suuri merkitys, voidaan tulostaa umpinaisia kappaleita. (Markforged, n.d.)

Nykyaikaisten 3D-tulostimien tarkkuus on jokaisella akselilla alle mikrometri, kuten kohdeyrityksen käytössä olevassa Raised3D Pro3:ssa. Mikrometrin tarkkuus tarkoittaa, että suuttimen kärjellä on korkea toistettavuus ja tulostettava kappale vastaa alkuperäistä 3D-mallia. Tulostuksen tarkkuutta voidaan parantaa myös suutinta tai liikenopeutta pienentämällä. Yleinen suutinkoko on 0,6 mm. Tarkkoihin tulostuksiin voidaan käyttää esimerkiksi 0,2 mm tai 0,4 mm suutinta. Suuttimen koko vaikuttaa myös tulostuksen aikaan, mitä pienempi suutin, sitä pidempi tulostusaika (FlasForgeshop, 2023). Tämä johtuu siitä, että kerroksien ja niiden sisällä olevien suutinliikkeiden määrä kasvaa, koska materiaalia virtaa pienempi määrä. Kappaleen tarkkuutta voidaan myös parantaa tulostamalla tarkkuutta vaativimmat osat ylöspäin. Esimerkiksi tarkkaan mitoitettu reikä tai tappi kannattaa suunnata ylöspäin, jolloin tulostuksen laatu ja tarkkuus ovat parhaimmillaan. Kappale voidaan myös valmistaa tarkkuutta vaativa osuus alaspäin, mutta tukirakenteet saattavat aiheuttaa epätarkkuuksia.

3.3 Tulostusmateriaalin valinta

Materiaalivalinnalla voidaan vaikuttaa valmistettavan kappaleen ominaisuuksiin. Eri materiaalien hyödyntäminen voi vaatia erilaisen 3D-tulostimen. Valmistusvaiheet ja valmistetun kappaleen jälkikäsittely eroavat eri materiaaleilla. (Greguric, 2023.)

Materiaalit ovat usein muoviseoksia tai metallia. Eri materiaaleja voidaan yhdistää valmistuksen aikana tai sen jälkeen. Yhdistämisen tarkoituksena on muokata valmistettavan kappaleen ominaisuuksia tietyssä kohdassa kappaletta.

3.3.1 Muovipohjaiset materiaalit

Tulostusmateriaalin eli filamentin valinnassa on otettava huomioon käyttötarkoituksen asettamat vaatimukset valmiille kappaleelle. Materiaalivalinnoilla saadaan valmistettua kaksi identtistä kappaletta, joilla on päinvastaiset materiaaliset ominaisuudet. Termoplastisesta polyuretaanista eli TPU:sta valmistetaan kestäviä, elastisia ja korkean vetolujuuden omaavia kappaleita. Polykarbonaattia eli PC:tä pidetään sen sijaan lujimpana tulostusmateriaalina, jonka ei taivu vaan lopulta halkeaa erittäin kovan paineen alla. Usein erityisiä ominaisuuksia omaavien materiaalien käyttökokemus on haasteellisempi kuin perinteisten filamenttien. (O'Connell, 2021.)

Polylaktidi eli tunnetummin PLA on yleisin 3D-tulostukseen käytettävä muovi, joka on valmistettu uusiutuvista raaka-aineista ja on biohajoavaa. PLA on yleisin, koska sen käyttäminen on hyvin yksinkertaista. Kyseinen materiaali kanssa lämmitettävä taso ei ole pakollinen ja suuttimen lämpötila on 180–220 celsiusastetta, joka on alhainen. PLA-materiaalista valmistettu kappale ei tarvitse jälkikäsittelyä. PLA-muovilla tulostaminen ei myöskään aiheuta haitallisia kaasuja tai epämiellyttäviä hajuja. PLA ei johda sähköä, jolloin sitä voidaan hyödyntää sähköturvallisuutta parantavissa toteutuksissa. PLA-muovi on valittu tämän opinnäytetyön käytetyimmäksi filamentiksi edellä mainittujen ominaisuuksien vuoksi. PLA-muovin heikkouksia ovat matala lämmönsietokyky ja halkeaminen paineen alla. PLA kestää vain 65 celsiusastetta lämpöä ja siihen voidaan kohdistaa voimaa vain suurille pinta-aloille, jolloin paine pienenee. PLA:sta valmistetut terävät reunat ja tarkat yksityiskohdat hajoavat helposti verrattuna lujempiin materiaaleihin. (Kumar, 2022, s. 16–19.)

ESD-suojatuille komponenteille voidaan valmistaa esimerkiksi tasoja ja työkaluja käyttämällä PETG-ESD filamenttia. ESD (Electrostatic discharge) eli sähköstaattinen purkaus, voi vaurioittaa hauraita sähköosia. Akkutuotannossa on useita ESD-suojasta tarvitsevia komponentteja, jotka ohjaavat ja monitoroivat akkua. Tähän käyttötarkoitukseen on PETG-ESD-filamentti eli glykolimodifikoitu polyeteenitereftalaatti, joka pystyy purkamaan sähkövarauksen ESD-vaatimusten mukaisesti. Tutkimuksen perusteella suuttimen lämpötila

vaikuttaa PETG-ESD:n sähköjohtavuuteen. Esimerkiksi 3DXSTAT:n valmistaman PETG-ESD filamentin sähköjohtavuus on ESD-luokituksen tasolla, kun suuttimen lämpötila on 240–270 celsiusastetta. Verrattuna perinteiseen PLA filamenttiin, ESD materiaalin kilohinta on jopa useita kertoja suurempi. (Jane, 2022, s. 4–8.)

3.3.2 Hybridi tulostus

Hybriditulostuksen tarkoituksena on valmistaa kappale hyödyntämällä kahta tai useampaa eri materiaalia. Kappaleen valmistuksessa materiaalit yhdistetään tulostuksen aikana tai sen jälkeen. Materiaalien yhdistäminen tulostuksen aikana vaatii tulostimelta kahden materiaalin samanaikaisen syötön ja pur-sotuksen. Kaksi materiaalisyöttöä voidaan saavuttaa esimerkiksi hyödyntämällä kahta eri suutinta. Kahden materiaalin tulostaminen samanaikaisesti on kuitenkin haastavaa. Ongelmat aiheutuvat eri materiaalien ominaisuuksista ja niiden tarvitsemista tulostusasetuksista, kuten tulostustason lämpötilasta. Tulostettaessa kahdelle suuttimille voidaan määrittää eri lämpötilat, mutta tulostustason lämpötila on oltava vakio. Ongelmien takia kahden materiaalin tulostaminen samanaikaisesti ei ole kannattavaa, mutta materiaalien yhdistäminen tulostuksen jälkeen on toimiva prosessi. (Kelly, 2023.)

Metallista valmistetun kierteen asettaminen PLA-muovista valmistetun kappaleen sisälle on esimerkki ratkaisusta, jota on hyödynnetty akkuteollisuuden linjarakennuksessa. Tarve ilmeni, kun muovikierteillä olevaa pulttia kierrettiin usein. Edellä mainittu tilanne tapahtui linjan käyttöönottoaiheessa, jolloin kierreillä olevaa pulttia avaamalla voitiin tehdä erinäisiä säätöjä. Kuten aikaisemmin mainittiin, PLA-muovi ei kestä suurta rasitetta pieneen pinta-alaan, joten muovista valmistettu kierre hajoaa pulttia kiristettäessä. Kierteen sijaan kappaleeseen voidaan tulostaa reikä, jonka sisälle asetetaan kierreinsertti. Insertti on metallista valmistettu kierre, joka kestää kulutusta ja siihen kohdistuvaa voimaa paremmin kuin muoviseokset. Metallikierteitä voidaan kiinnittää tulostettavaan kappaleeseen myös painamalla tai pop-niittaamalla. Kappaleeseen sulatettava kierreinsertti lämmitetään, jonka jälkeen se asetetaan

muovissa olevaan reikään. Kierteen ympäröivä muovi sulaa ja kierre jämähtää kiinni kappaleeseen.

3.4 3D-tulostimen rajoitukset ja vahvuudet

3D-tulostin mahdollistaa muotojen valmistamisen, joita ei olisi mahdollista tehdä perinteisillä valmistusmenetelmillä. Kääntöpuolena on tulostimen rajoitukset, jotka estävät kappaleen valmistamisen tai sen kannattavuuden.

Pöydälle asetettavan 3D-tulostimen rajoitteena on sen koko, mutta vahvuuksia ovat nopeus ja tarkkuus. Yhdysvaltalainen korkeakoulu University of Maine omistaa suuren 3D-tulostimen, jonka vahvuutena on suurien kappaleiden valmistaminen.

3.4.1 Tulostettavan kappaleen koko

Kohdeyrityksen käytössä olevan Raised3D Pro3 tulostustason mitat ovat 300 mm x 300 mm, jotka rajaavat tulostettavan kappaleen ulkomitat. Kyseisestä tulostimesta on kaksi eri korkeuskapasiteettia. Tavallinen versio valmistaa 300 mm korkeita kappaleita ja Pro3 Plus -malli valmistaa 600 mm korkeita kappaleita. (Raised3D, n.d.)

300 mm rajoitus on tuotantolinjan yleisiin tulostustarpeisiin riittävä, koska tulostettavat kappaleet ovat yleisesti työtä tai konetta avustavia kappaleilta, jotka ovat kooltaan kompakteja. Ongelmatilanteita syntyy, kun tarkoituksena on valmistaa kokonaisia työkaluja kuten jigejä. Jigi on esimerkiksi japanilaiseen Poka Yoke -malliin perustuva teline, joka varmistaa oikeaoppisen työprosessin. Suuria kappaleita tulostettaessa on kappale jaettava osiin ja yhdistää palaset tulostuksen jälkeen. Tällöin kappale ei kuitenkaan ole yhtenäinen, joka voi aiheuttaa kappaleen epämuodostuneisuutta ja haurautta.

3D-tulostimia valmistavan yrityksen Bigrep:n tulostimet ovat huomattavasti suurempia ja pystyvät tulostamaan kuutiometrin kokoisen kappaleen.

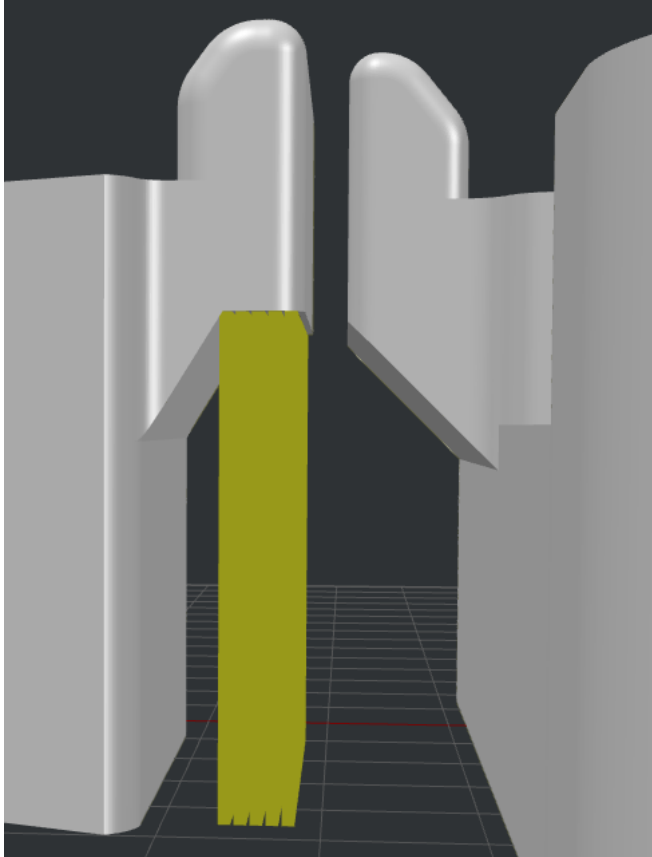
Vastaavat 3D-tulostimet ovat suunnattu teollisuuskäyttöön ja ne ulkonäöltään muistuttavat CNC-konetta. University of Maine omistaa maailman suurimman 3D-tulostimen, jonka tulostuspinta-ala on 18.3 m x 6.7 m x 3 m. Kyseinen tulostin on valmistanut veneen, joka painaa yli 2200 kilogrammaa, sekä kokonaisen omakotitalon. Näitä tulostimia ei voida verrata tässä työssä käytettyihin pöydälle asetettaviin 3D-tulostimiin. (Maine, 2022.)

3.4.2 Tukirakenteet

Tukirakenne eli englanniksi support on harvaan tulostettua filamenttia, jonka tarkoitus on tukea tulostettavan kappaleen haasteellisia muotoja. Tukirakenteita tarvitaan, kun tulostin ei kykene valmistamaan mallinnettuja muotoja, ilman muotojen romahtamista tai epämuodostumista. Tukirakenteet irrotetaan valmiista kappaleesta tulostuksen jälkeen. Usein tukirakenteita laaditaan vaakasuoraan asetettujen muotojen alle, jotta ne voidaan valmistaa. Tukirakenne on perusasetuksilla yhden kerroksen irti tulostettavasta kappaleesta, mutta sen ominaisuuksia voidaan muokata. Erityistä tukea vaativissa pinnoissa, joiden on oltava tarkkoja, voidaan tukirakenteet valmistaa suoraan kiinni kappaleeseen. Tällöin tukirakenne mukaillee kappaleen ulkopintaa ja tarttuu siihen kiinni. Mitä tarkemmin ja tiukemmin tukirakenteet luodaan kappaleen ympärille, sitä vaikeampi niitä on myös irrottaa. Yleisesti tukirakenteet irrotetaan esimerkiksi ruuvimeisseliä tai pihtejä käyttämällä. Tukien määrää voidaan vähentää muuttamalla kappaleen tulostussuuntaa. (HUBS, n.d.)

Esimerkkikuvassa (kuva 1) vertaillaan saman kappaleen valmistamista, mutta kappaleesta erkanevan osan kiinnitystapaa on optimoitu suunnitteluvaiheessa. Keltainen pylväs merkitsee tarvittavaa tukirakennetta. Osittain tasapohjainen osio tarvitsee itselleen tuen, jonka päälle tasainen pinta voidaan rakentaa. 45 asteen kulmaa mallinnettu pohja tukee itseään tulostuksen aikana. Kappaleen seuraavia kerroksia ei tulosteta vaakasuoraan, vaan osittain edellisen kerroksen päälle. Tällöin kerrokset kiinnittyvät toisiinsa ja tukevat kappaleen seuraavan kerroksen valmistusta. Tällaisen kappaleen alapinta saattaa olla hieman epätasainen riippuen pinnan kaltevuudesta ja suuttimen koosta,

mutta resursseja ei kulu tukirakenteiden valmistukseen. Vaakasuoraan tulostettava reikä tarvitsee myös tukirakenteen. Ilman reiän tukirakennetta sen yläpuolisko ei vastaisi 3D-mallia. (HUBS, n.d.)



Kuva 1. Tasopintojen vaikutus tukirakenteiden tarpeisiin

3.4.3 Valmistuskustannukset

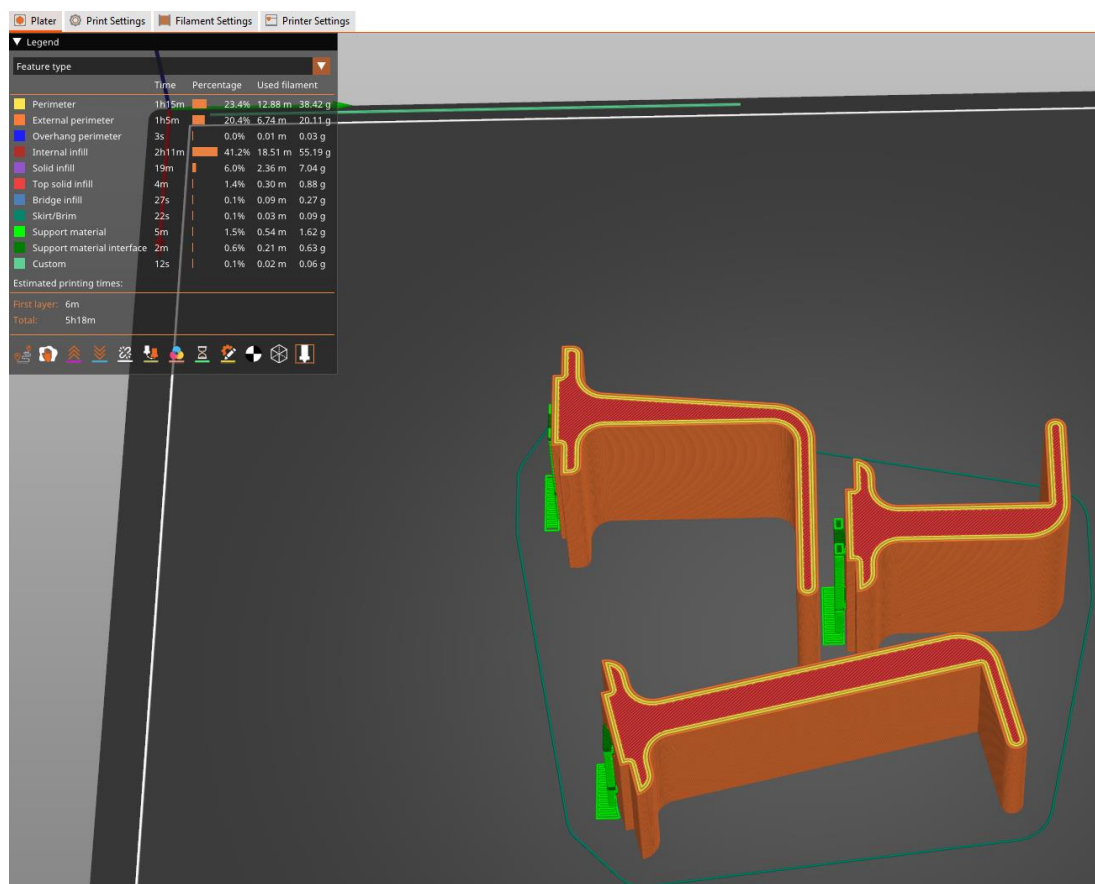
Pöydälle asetettavalla 3D-tulostimella valmistettavien kappaleiden kustannukset ovat usein muutamia euroa. Merkittävin suora kustannus on tulostuksessa käytettävä materiaali. 3D Jake -verkkokaupassa (3DJake, n.d.) voidaan vertailla eri filamentteja, joiden hinnat vaihtelevat noin 40–400 euron välillä, per kilogramma. Kalleimmat materiaalit sisältävät erityisiä ominaisuuksia tai ovat valmistettu muovin sijaan esimerkiksi hiilikuidusta.

Rishi Kumarin tutkimuksen (2022, s. 16–19) mukaan PLA:lta tulostettaessa sähköä kuluu 0,5 kWh per 13,59 grammaa PLA:ta. Sähköstä aiheutuvat kustannukset ovat siis muuttamia senttejä per tulostettava kappale.

3.4.4 Valmistusaika

Valmistusaika vaihtelee huomattavasti eri tulostimien välillä, koska niiden liikenopeudet vaihtelevat. Liikenopeuden rajoittaa suuttimen tulostuskyky. Nopeutta kasvatettaessa suuttimen kapasiteetti loppuu tai tulostettavan kappaleen laatu kärsii nopeiden liikkeiden takia. Tavallinen tulostusaika on vain muutamia tunteja, vaikka samalla kerralla tulostettaisiin useita kappaleita. 300 x 300 x 300 mm tulostimen kokoluokassa on harvinaista, että tulostuksen kokonaispituus ylittäisi 24 tuntia. (FlasForgeshop, 2023.)

Valmistusaikaa voidaan vähentää suutinnopeuden sijaan muuttamalla muita tulostimen asetuksia. Suuren muutoksen tulostusaikaan aiheuttaa kappaleen täyden lisäksi sen ulkokerrosten lukumäärä. Ulkokerros on yhtenäinen kerros, joka on näkyvä osa kappaleen ulkopuolella. Kerrosten lukumäärää pienentämällä, vaikutetaan myös negatiivisesti kappaleen lujuuteen.



Kuva 2. Valmistusajan jakautuminen eri työvaiheisiin

Havainnollistava kuva (kuva 2) on otettu PuraSlicer ohjelmasta, joka erittelee työvaiheiden kestot. Kyseiset kappaleet kuluttavat 100 kuutiosenttimeriä filamenttia, joka on noin 125 grammaa. Täyttö on 100 % eli kappaleista tulee täysin kiinteitä, joka lisää internal fill -työvaiheen kestoa. Viiden tunnin ja 18 minuutin tulostusajasta kuluu kahden yhtenäisen ulkokerrosten valmistamiseen tunti ja 15 minuuttia, eli 23,5 % kokonaisajasta. Ulkokerrosten lukumäärällä on siis huomattava vaikutus tulostuksen kokonaisaikaan, varsinkin kappaleen ollessa ontto.

3.5 Metalli ja hartsin 3D-tulostaminen

Materiaalina metallin ja hartsin tulostaminen eroaa muovitulostuksesta. Kovemmat ja kestävämmät materiaalit ovat myös haastavampia tulostaa. Suurin ero tulostustekniikassa on kappaleiden kerrokset valmistuksessa.

Valmistetut kappaleet tarvitsevat myös jälkiprosessointia, toisin kuin suurin osa muoviseoksista valmistetuista kappaleista. Jälkiprosessoinnissa kappaleen käyttöturvallisuus varmistetaan tai sen pinta käsitellään.

3.5.1 Metalli 3D-tulostus

Metallin 3D-tulostaminen on uusi tuotantotapa, jolla voidaan valmistaa monimutkaisia kappaleita metallista, joiden valmistaminen perinteisillä koneistustavoilla olisi jopa mahdotonta. Metallitulostuksen peruseriäitä on muutamia, jotka voidaan erottaa kahteen eri ryhmään. Ensimmäiset toimintaperiaatteet perustuvat muovin 3D-tulostuksen, jossa sulaa materiaalia lisätään kerroksittain. Toisessa toimintamallissa materiaali sulatetaan vasta sen asettamisen jälkeen. Jälkimmäinen valmistustapa hyödyntää pulverin sintraamista tai sulattamista laserin avulla, jotka valmistavat kiinteitä kappaleita kerroksittain. ”Sintraus on prosessi, jossa jauhemaiset materiaalit puristetaan kiinteäksi massaksi käyttämällä lämpöä” (Hengko, 2020). Erona muovien tulostukseen on, että valmistetut kappaleet joudutaan jälkiprosessoimaan. (Duda, 2016, s. 103–108.)

Pulveri pohjainen fuusiointi eli "Powder Based Fusion" (PBF) on 3D-tulostusmalli, jossa metallipohjainen pulveri sulatetaan tai sintteröidään kiinteäksi kappaleeksi, laserin kehittämän lämpöenergian avulla. Kappale valmistetaan kerros kerrallaan, joten tietokone jakaa kappaleen määriteltyihin kerroksiin, jonka perusteella laser kohdistetaan materiaaliin. Tutkimuksen mukaan tulostin levittää 4–10 mikrometrin paksuisen kerroksen pulveria, jonka jälkeen laser sulattaa sille kerrokselle ennalta määrätyn muodon, joka yhdistyy sen alla olevaan kerrokseen. Lopulta valmis kappale kaivetaan pulverin seasta ja ylijäämä materiaali voidaan käyttää uudelleen. Lopputulos on jopa 0,05 mm tarkkuudella valmistettu kappale. (Duda, 2016, s. 103–108.)

Metallia voidaan 3D-tulostaa myös muovitulostuksen kaltaisella valmistusmenetelmällä. Kyseisessä menetelmässä metalli sulatetaan valmiiksi ennen sen asettamista kappaleen päälle, esimerkiksi kasaamalla hitsausnaumoja päällekkäin. Tässä menetelmässä sähkön lämpöenergian avulla sulatettu materiaali, kuten hitsauslanka sulatetaan kerroksittain. Sulatetut kerrokset muodostavat kappaleen. Valmistustavan nimi on "Direct Energy Deposition" eli DED. (RAMLAB, n.d.)

Toinen tämän vaihtoehto on "Binder Jetting", jossa tulostuskärki asettaa kerroksen nestemäistä kiinnitysainetta ohuen pulveri partikkeli kerrosten päälle. Kiinnitysaine yhdistää pulverikerrokset toisiinsa, jotka valmistavat kiinteän kappaleen. (Mostafaei, 2021, s. 4–5.)

3.5.2 Hartsin 3D-tulostaminen

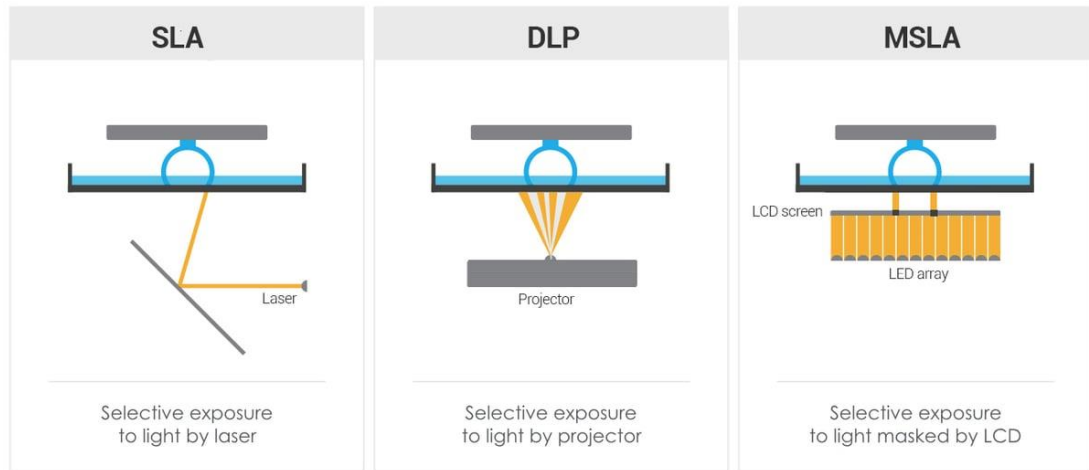
Hartsi eli "resin" on 3D-tulostuksessa käytettävä materiaali, jonka tulostusmenetelmät perustuvat materiaalin fotopolymeerisyteen. Hartsi reagoi tai kovettuu valon kosketuksesta. Hartsille tarkoitettuja tulostintyyppisiä on kolme: SLA, DLP ja MSLA. Hartsista on monia eri materiaalivariantteja, joilla on omat ominaisuutensa. Ominaisuuksia ovat esimerkiksi lujuus, taipuisuus ja palonkestävyys. Tulostustekniikassa, jossa tulostettavien kerrosten korkeus on vain

muutamia mikroneja, on tulostuslaatu erittäin mittatarkka ja kappaleen pinta on sileä. Kerrokset ovat niin pieniä, että niitä on lähes mahdoton huomata valmiista kappaleesta. Poiketen muovitulostuksesta, hartsista valmistetut kappaleet vaativat jälkikäsittelyä, koska ne valmistetaan myrkyllisestä materiaalista. Jälkikäsittelyssä kappale pestään puhtaaksi. Tulostusvaiheessa kehittyvät haitallisia kaasuja, sekä kappaleiden ja tulostinkomponenttien käsittelyssä on käytettävä hanskoja. (All3DP, 2023.)

SLA-tulostimessa (selective exposure to light by laser) käytetään peilejä, joihin kohdistetaan useita lasersäteitä. Säteet ohjataan nestemäiseen hartsiin, joka kovettuu säteiden kohdalta ja kerros kappaleesta valmistuu. Kerrokset ovat vain muutamia mikrometrejä korkeita ja jokaisen kerroksen välissä tulostuspeti ja laseri liikkuvat. Tästä syystä tämä tulostustekniikka on hidas, mutta erittäin tarkka. (All3DP, 2023.)

DLP-tulostimessa (selective exposure to light by projection) hartsi kovetetaan yksi kokonainen kerros kerrallaan, toistuvien laser säteiden sijaan. Projektorin kehittämästä valosta erotetaan UV-valo, joka ohjataan tulostettavan kappaleen pinnalle peilien avulla. Kappaleen kerros kovetetaan projektorin avulla, jonka lähettämä valo koostuu pikseleistä. Tällöin kappaleen kerrokset rakentuvat pienistä neliöistä, joita kutsutaan nimellä "vortex". Kun koko kerros kovetetaan kerralla, on tulostimen toimintaperiaate nopeampi, verrattuna SLA-tulostimeen. (All3DP, 2023.)

MSLA-tulostin (selective exposure to light masked by LCD) käyttää LCD-näyttöä, jonka ledeistä kehittyvä UV-valo kohdistetaan valmistettavaan kappaleeseen. Kuten DLP-tulostimessa, valmistettava kappale koostuu vortex-pikseleistä ja koko kerros kovetetaan kerralla. Mitä tarkempi LCD-näyttö on, kuten 4K tai 8K, sitä tarkempi tulostettava kappale on, koska pikselikoko pienenee. (All3DP, 2023.)



Kuva 3. Metallia hyödyntävien 3D-tulostimien toimintamallien kuvaus (Formlabs)

4 3D-SUUNNITTELU

Valmistettavasta kappaleesta luodaan 3D-malli, jonka pohjalta 3D-tulostin valmistaa sen. 3D-mallin suunnitteluun käytetään käyttökohteesta kerättyä tietoa. Kappaleesta voidaan valmistaa prototyyppi, jonka avulla kappaleen toimivuus voidaan todeta. Valmis mallinnus siirretään 3D-tulostimen tietokoneohjelmaan, jossa asetetaan tulostusparametrit.

Tulostettavan kappaleen 3D-mallia voidaan kohdentaa 3D-tulostettavaksi. Kohdentamisen avulla voidaan tehdä tulostuksesta tehokkaampaa tai edes kannattavaa.

4.1 Käyttökohteen mallinnus

Kohteen mallinnus on alkaa hyvin tavanomaisella ongelmanratkaisu kaavalla, jossa ensimmäinen vaihe on tarpeen havainnoiminen. Havainnoimisessa on tärkeintä huomata juurisyy ja kehittää idea tai ideoita, jonka pohjalta ongelmaa ratkotaan. Suunnittelun kohteesta on tärkeää ottaa useita mittoja ennen piirtämisen aloittamista, jotta on selkeää, miten kappale mallinnetaan. Opinnäytetyön tarkoituksena on arvioida toimintamallien hyödyllisyyttä.

3D-mallien kohdentaminen 3D-tulostimelle mahdollistaa sen tehokkaan käytön. Tulostimelle voidaan suunnitella myös muotoja, joiden valmistus perinteisillä valmistuskeinoilla olisi jopa mahdotonta. Ennen lopullisten kappaleiden tulostusta voidaan luoda prototyyppi, jolla kappaleen toimivuus voidaan todentaa.

4.1.1 Kappaleen mitoittaminen

Kappaleen mitoittamisessa on tavoitteena piirrettävän kappaleen mittojen määrittäminen ja kerääminen piirtämistä varten. Erityistä huomiota on kiinnitettävä käyttökohteen tärkeimpiin elementteihin, kuten pulttijako. Työntömitta on yksinkertainen ja monipuolisin mitoittamiseen käytettävä työkalu (kuva 4).



Kuva 4. 3D-mallinnettavan kappaleen mitoittaminen

4.1.2 Kappaleen piirtäminen

Kappaleen piirtäminen alkaa valitsemalla siihen käytettävä 3D-ohjelma. Ohjelmia on erittäin paljon, kuten AutoCAD, Siemens NX, SolidWorks, Fusion 360 jne. Kohdeyrityksen käytössä on Siemens NX, josta löytyy yleisimmät työkalut ja lisäosat.

3D-mallinnuksen haastavuus vaihtelee tapauskohtaisesti, mutta hyvällä mitoituksella sitä voidaan helpottaa huomattavasti. Mallinnus on helpoin aloittaa kappaleen suurimmasta osasta, tai siitä minkä mallinnus on tärkein. Kun kappaleen runko on suunniteltu, se on helppo viimeistellä lisäämisellä esimerkiksi kiinnitysreiät ja pyöritykset.

4.2 Suunnittelun kohdentaminen 3D-tulostimelle

3D-tulostimella valmistettavan kappaleen suunnitteluun on otettava huomioon aikaisemmin mainittuja tulostimen heikkouksia ja vahvuuksia. 3D-tulostimella voidaan valmistaa hyvinkin erikoisia muotoja, mutta niiden valmistamiseen joudutaan usein turvautumaan tukirakenteisiin. Kuten työssä aikaisemmin mainittiin, tukirakenteet ovat lopputuotteen valmistuksessa aiheutuvaa hukkamateriaalia, joita on hyvä välttää. Kappaleen tulostussuunnalla minimoidaan tukirakenteiden tarvetta sekä tulostuksen epäonnistumisriskiä. Tukirakenteita välttämällä säästetään resursseja ja vähennetään tulostuksen jälkiprosessointiin kuluva aikaa. Tulostus voi epäonnistua kappaleen irrotessa tasosta, joka johtuu liian pienestä kosketuspinnasta tason ja kappaleen välillä. Tulostettava kappale täytyy tulostaa asennossa, joka mahdollistaa tarpeellisen kosketuspinta-alan. (Markforged, Markforged.com, n.d.)

Yhtenäisen kappaleen keskelle voidaan myös valmistaa reikä, jos sillä ei ole vaikutusta kappaleen toimivuuteen. Reikä vähentää materiaalin määrää ja parantaa kappaleen kestävyyttä. Yhtenäisen kappaleen läpi tehtyyn reikään tulostuu automaattisesti kiinteät ulkoreunat, jotka ovat keskusrakennetta vahvempia. Tulostukseen kuluva aika ei vähene reikien avulla vaan se voi jopa kasvaa, koska materiaalipintojen määrä lisääntyy. Reiän avulla kappale on siis kestävämpi, mutta sen valmistukseen kuluu vähemmän resursseja. (Markforged, n.d.)

4.3 Kappaleen sisäisten muotojen valmistus

3D-tulostimen yksi vahvuuksista on kappaleiden sisälle tehtävien muotojen suunnittelu ja valmistus. Vahvuus esiintyy, kun valmistetaan esimerkiksi suuttimia tai suulakkeita. 3D-tulostin valmistaa kappaleen kerros kerrokselta, joten kappaleen sisälle voidaan suunnitella monimutkaisiakin kanavia, joiden valmistus perinteisimmillä koneistusmenetelmillä ei olisi mahdollista. Syynä mahdollisuudelle on, ettei koneistuksessa käytettävä työkalu pysty valmistamaan kappaleen sisälle kuin suorita reikiä, joista vähintään yksi läpäisee ulkokuoren.

Vaihtoehtona on valmistaa kappale useammasta osasta, jolloin perinteisen koneistusmenetelmän käyttö on mahdollista.

Mahdollisuutta tulostaa muotoja kappaleen sisälle on hyödynnetty yhdellä kohdeyrityksen tuotantolinjalla, jossa 3D-tulostetusta suuttimesta virtaa hitsaus-suojakaasua. Suojakaasun virtausta voitiin suunnitella ja simuloida etukäteen, jonka perusteella kanavia oli mahdollisuus muokata. Kanavien ollessa vain yhden millin kokoisia kappaleen 3D-tulostaminen ei tarvitse tukirakenteita. Tämä on erittäin tärkeää, koska tukirakenteiden poistaminen olisi mahdotonta ja ne tukkisivat kanavat.

4.4 Prototyyppien valmistaminen

Prototyyppien valmistaminen 3D-tulostimella vähentää virheiden päätymistä lopullisen kappaleen valmistukseen ja säästää siten aikaa sekä muita resursseja. Kun kappaleen käyttökohteesta löytyy 3D-mallit, on mahdollista kokeilla mallinnetun kappaleen sopivuutta 3D-ohjelman kokoonpano työkalulla. Tällöin voidaan havainnoida ensimmäiset virheet tai uudelleensuunnittelua tarvitsevat kohdat enne ensimmäistäkään valmistettua kappaletta. Tietokoneella tehdyllä validoinnilla on mahdollista poistaa fyysinen testausprosessi kokonaan. (Lattice, n.d.)

Prototyyppi voidaan valmistaa myös kappaleesta tai sen osasta, jonka lopullinen versio valmistetaan esimerkiksi muoteilla. Muoteilla valmistettavan kappaleen tekeminen on kallista ja se vie aikaa. On siis tärkeää varmistaa, että valmistetta kappale soveltuu sen tarkoitettuun käyttökohteeseen. 3D-tulostuksella voidaan valmistaa prototyyppijä tilanteisiin, jolloin kokeillaan mahdollista ratkaisua, mutta sen toimivuudesta ei ole varmuutta. (RapidDirect, n.d.)

Mahdollisia ratkaisuja kokeiltaessa on helppo valmistaa 3D-tulostettuja prototyyppijä, joita voidaan luoda nopeasti ja pienillä resursseilla. Tulostettaessa prototyyppiä, on tärkeää minimoida valmistukseen kuluva aika. Tulostettavasta kappaleesta voidaan poistaa sovitukseen tarpeettomia kohtia tai

muotoja, jotta tulostusaika lyhenee. Kappale voidaan myös skaalata pienemmäksi, jotta sen tulostaminen kuluttaa vähemmän resursseja. Tulostuksessa infill määrä on pieni, jolloin kappale on lähes ontto ja erittäin nopea tulostaa. Materiaalin minimoinniksi kappale suunnataan asentoon, joka tarvitsee vähiten tukirakenteita. (Abdelnaser, n.d)

Prototyypin koesovituksessa huomattavat puutteet tai korjaukset muokataan, jonka jälkeen kappale valmistetaan uudelleen. Uuden kappaleen valmistus voi tapauskohtaisesti olla lopullinen ratkaisu tai valmistetaan toinen prototyyppi, jos kappaleen toimivuudesta ei ole varmuutta. Prototyypin kehittämistä toistetaan, kunnes ollaan valmiita lopullisen tuotteen valmistamiseen (Fanchi, 2023). Fyysisen prototyypin valmistamisen huomattavin ero 3D-ohjelmalla tehtyyn koesovitukseen on, että siinä otetaan huomioon kaikki tapaukseen vaikuttavat tekijät kuten painovoima ja käyttäjäystävällisyys. Hennika Kestilän (2022) mukaan on lähes mahdotonta määrittää miltä kappale tuntuu kädessä ilman fyysisen prototyypin valmistamista.

5 TUTKIMUKSEN KEHITTÄMISTYÖ

Kehittämistyön tarkoituksena on luoda uusi ongelmanratkaisumalli, jossa hyödynnetään 3D-tulostinta. Ratkaisuisa suunnitellaan ja valmistetaan kappaleita, joilla ratkaistaan ongelmien juurisyitä.

Ongelmien ratkaisut ja 3D-tulostuksen soveltuvuus arvioidaan, kun niitä on käytetty sarjatuotannossa. Arviointi perustuu ennakkoon määritettyjen tavoitteiden täyttymiseen.

5.1 Lähestymistapa

Tämä opinnäytetyö on konstrukttiivinen tutkimus, joka kehittää uuden ongelmanratkaisutavan syklisen toiminnan avulla. Tutkimuksen tarkoituksena on ratkaista reaali maailman ongelmia, soveltamalla aiempaa teoriaa uusissa ongelmatilanteissa.

Tutkimus aloitetaan selvittämällä ongelman juurisyy ja suunnittelemalla siihen ratkaisu. Kehitetty ratkaisu valmistetaan 3D-tulostimella. Valmistettu osa voi olla prototyyppi tai lopullinen kappale. Valmistetun osan toimivuus todetaan käytännössä ja ratkaisun käytettävyyttä havainnoidaan. Löytöjen perusteella voidaan suunnitella uusi versio kappaleesta ja aloittaa sykli alusta. Kappaleen toimivuuden varmistamisen jälkeen kappale otetaan käyttöön sarjatuotannossa. Lopuksi arvioidaan ratkaisun käytännöllistä merkitystä sekä uutuusarvoa.

5.2 Menetelmät

Tavoitteena on tutkia 3D-tulostuksen toimintaperiaatetta ja löytää keino hyödyntää sitä ongelmatilanteiden ratkaisukeinona. Työssä kehitetään ratkaisuita uniikkeihin ongelmatilanteisiin, jotka ilmenevät tuotantolinjan laajennusvaiheessa. Ratkaisuiden käyttökohde on rajattu tietyn ongelman ratkaisuun, mutta ratkaisun ideologiaa voidaan hyödyntää laajemmin.

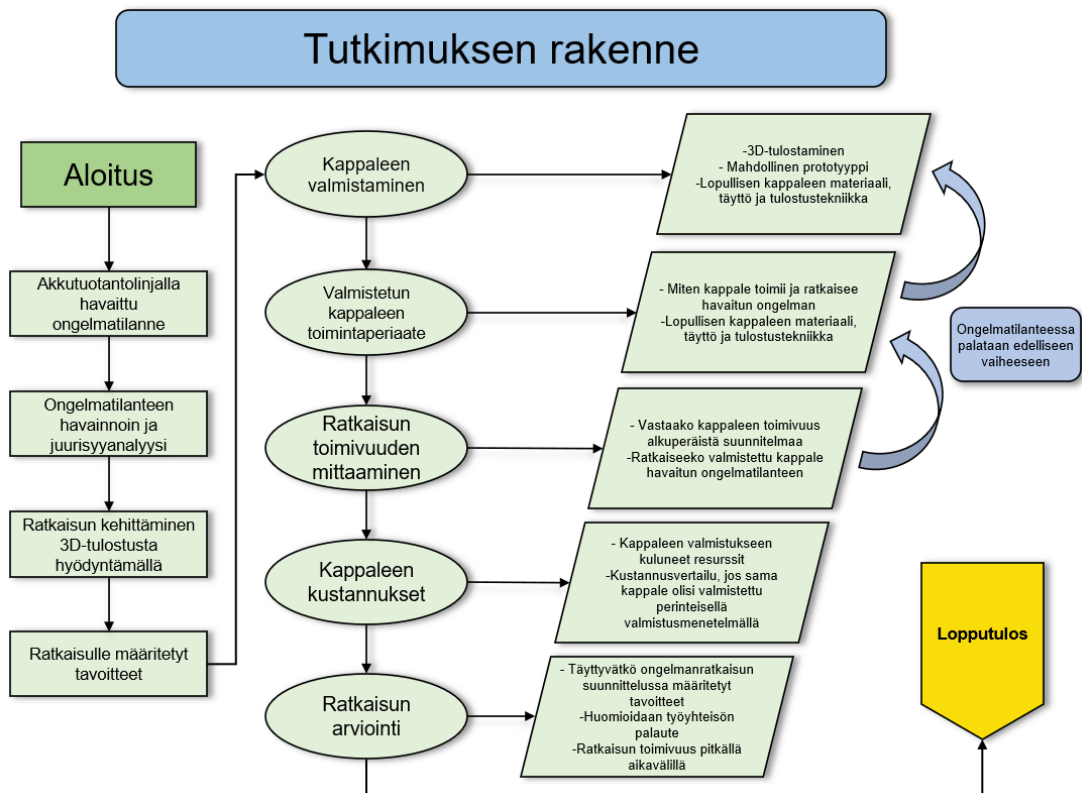
Ongelmatilanteen juurisyystä luodaan selkeä kuvaus, jotta ymmärretään ratkaistava ongelma. Ratkaisulle asetetaan tavoitteet, joiden täytyttyä ongelma on ratkaistu. Valmistettava kappale suunnitellaan 3D-ohjelmalla ja tulostetaan 3D-tulostimella. Perehdytään millä tavalla kappale ratkaisee ongelmatilanteen ja otetaan se käyttöön sarjatuotannossa. Tarkkaillaan kappaleen toimivuutta tuotannon aikana. Havaintojen perusteella voidaan tarvittaessa valmistaa uusi versio. Sykliä jatketaan, kunnes kappale ratkaisee ongelmatilanteen juurisyyn.

Lopuksi ratkaisun onnistuneisuus arvioidaan tavoitteiden täyttymisellä. Arvioinnin mittareina käytetään esimerkiksi tahtiajan kehitystä, työyhteisön tyytyväisyyttä sekä turvallisuutta. Ratkaisuihin käytettyjä resursseja verrataan ulkopuolisten toimittajien tarjouksiin. Arvioinnissa huomioidaan 3D-tulostuksen mahdollistamat rahalliset ja ajalliset säästöt. Arviointiin sisältyy myös 3D-tulostimen soveltuvuus kyseisen kappaleiden valmistamiseen.

6 TOTEUTUKSEN KUVAUS

Tässä opinnäytetyössä perehdytään kahdenlaisiin ongelmanratkaisutilanteisiin, joissa hyödynnetään 3D-tulostamalla valmistettuja kappaleita. Ensimmäisessä esimerkkitilanteessa käsitellään odottamattoman ongelman ratkaisua nopealla aikataululla. Perehdytään ongelmanratkaisun vasteajan vähentämiseen 3D-tulostimen avulla ja verrataan vasteaikaa perinteiseen valmistusmenetelmään. Toiset esimerkkitilanteet perehtyvät parhaan lopputuloksen saavuttamiseen. Ongelmaratkaisun aikataulu ei ole yhtä tiukka, mutta niiden valmistusaikaan, toimivuuteen sekä materiaalitehokkuuteen perehdytään tarkemmin.

Tutkimuksen rakenteessa (kuvio 1) perehdytään ongelmatilanteen juurisyyhyn, joka johtaa valmistettavan kappaleen suunnitteluun. Testikappaleen valmistuksen jälkeen aloitetaan sen toimivuuden ja ratkaisukyvyn arviointi. Valmiista kappaleesta jalostetaan toimiva ja lopullinen ratkaisu.



Kuvio 1. Tutkimuksen rakenne

6.1 3D-tulostuksen hyödyntäminen ongelmatilanteessa

Ongelmatilanteessa, jossa tavoitteena on kappaleen mahdollisimman nopea valmistus, voidaan hyödyntää 3D-tulostimen nopeutta. Tilanteet ovat yllättäviä ja aikaa niiden korjaamiseen on vähän. Kiireen taustalla on tuotantopaine, jonka takia tuotantolinja täytyy saada käynnistettyä mahdollisimman nopeasti. Tuotantoteollisuudessa tuotantolinjan pysähtyminen pitkiksi ajanjaksoiksi aiheuttaa suuret tappiot kohdeyritykselle. Tavoitteena on valmistaa mahdollisimman nopea, mutta toimiva ratkaisu. Nopeassa ratkaisussa ei panosteta kappaleen pieniin yksityiskohtiin kuten tulostuksen materiaalitehokkuuteen. Ensimmäisen esimerkitapauksen robotin kolarointi on tilanne, jossa tuotantoa on pystyttävä jatkamaan mahdollisimman nopeasti. Tulostettavat kappaleet vastaavat alkuperäisiä osia, mutta niiden kokoa kasvatettiin materiaalin heikkouden takia. Kappaleet valmistettiin yön aikana, jolloin tuotantoa päästiin jatkamaan odotetusti.

Kappaleita voidaan suunnitella pidempään, kun niiden käyttökohde ei tarvitse välitöntä ratkaisua. Suunnittelulla monipuolistetaan ja viimeistellään kappaleen ominaisuuksia. Ratkaisusta tulee varmempi, onnistuneempi sekä sen pitkän aikajänteen käyttö on todennäköisempää. Nämä ongelmatilanteet eivät varsinaisesti estä tuotannon jatkumista, mutta ne tekevät tuotannosta tehokkaampaa ja turvallisempaa. Kappaleiden valmistus ja suunnittelu saattaa kestää useita päiviä, koska ongelmanratkaisun päätavoitteena on nopeuden sijaan kappaleen toimivuus.

6.2 3D-tulostetun kappaleen valmistus ja arviointi

Kappaleen suunnittelun jälkeen tulostetaan ensimmäinen versio. Käyttötarkoituksen perusteella ensimmäinen versio on prototyyppi tai valmis kappale. Prototyypin tarkoituksena on kokeilla ratkaisun toimintaperiaate nopeasti valmistetulla kappaleella tai sen osalla. Prototyypin löytöjen perusteella palataan takaisin valmistusvaiheeseen, jossa kappale mallinnetaan ja valmistetaan uudelleen. Tarkoitus on muuttaa prototyypissä havaitut ongelmakohdat. Lopullinen kappale voidaan valmistaa, kun ollaan varmoja sen toimivuudesta. Lopuksi arvioidaan, ratkaiseeko kappale alkuperäisen ongelmatilanteen. Epäonnistuneen ratkaisun seurauksena palataan takaisin suunnitteluvaiheeseen. Kehitystä jatketaan, kunnes kappale ratkaisee ongelman.

Valmis kappale arvioidaan sen käyttökokemusten perusteella pidemmällä aikajänteellä. Arviointiin käytetään ongelmatilanteessa määritettyjen kehityskohdeiden onnistumista. Vertailukohtana käytetään perinteistä valmistusmenetelmää ja arvioidaan 3D-tulostimen hyödyntämistä sen sijaan. Arvioinnin jälkeen kappale on valmis ja se on ongelmanratkaisun lopputulos.

7 VAURIOITUNEEN ROBOTITARTTUJAN ONGELMANRATKAISU

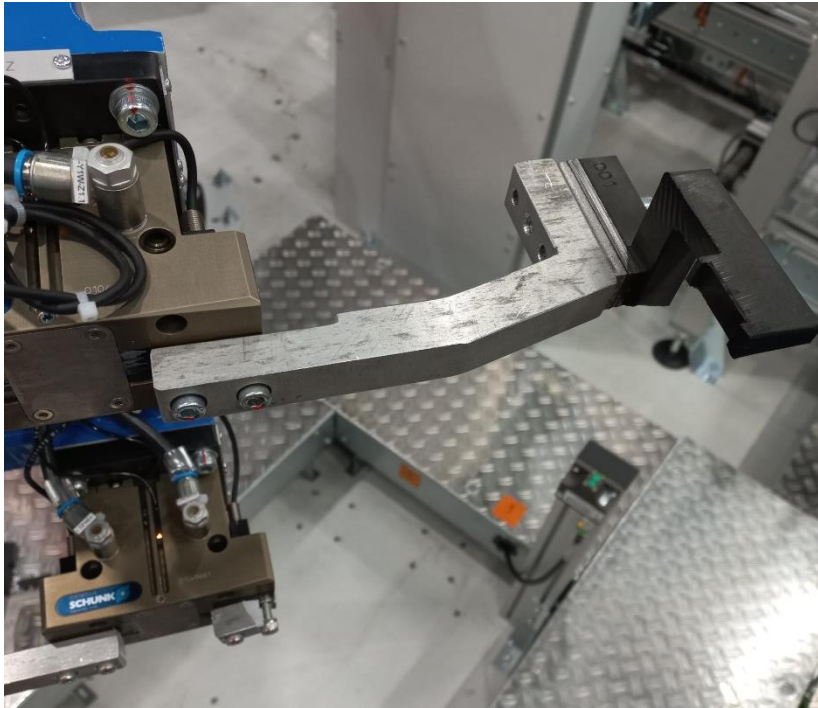
Robottitarttujan vaurioituminen on esimerkki tuotantolinjan käyttöönotossa tapahtuneesta ongelmasta, johon ei voitu varautua. 3D-tulostuksen käyttöä ja hyödyllisyyttä ongelmatilanteen ratkaisussa pohditaan.

Tavoitteena on kehittää nopea ratkaisu, jotta tuotantoa voitaisiin jatkaa mahdollisimman pian. Valmistuksessa käytetään tarttujan alkuperäisiä 3D-mallinnuksia, joita kohdennetaan 3D-tulostukseen sopiviksi.

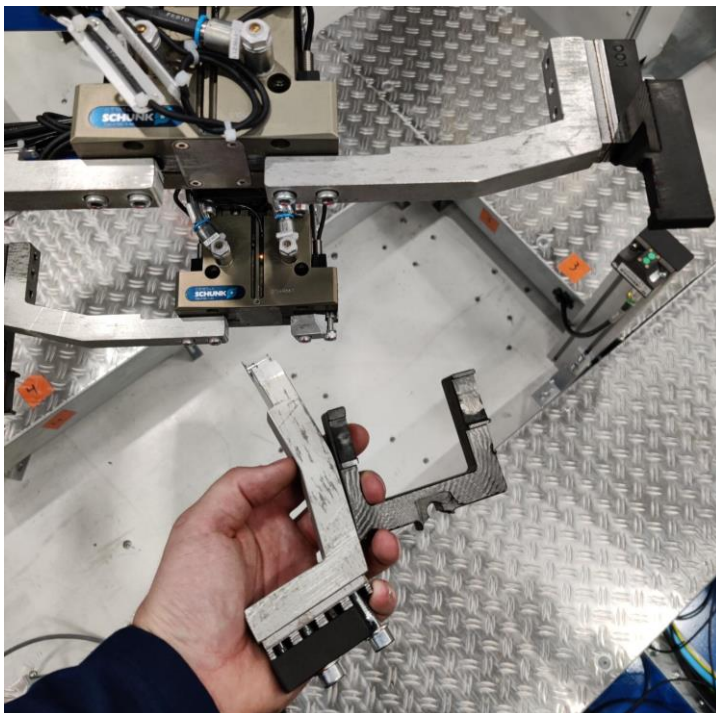
7.1 Ongelmanratkaisun vasteaika

Yksi 3D-tulostuksen vahvuuksista linjatuoannossa on ongelmanratkaisun vasteaika. Tällä tarkoitetaan aikaa, joka kuluu ongelman havainnoinnista, sen lopulliseen ratkaisuun. Vasteaika on erityisen tärkeä, varsinkin sarjatuotannossa, jolloin tuotantolinjan on tarkoitus valmistaa tuotteita jatkuvasti. Tällaisessa tilanteessa muutaman päivän tuotantotauko voi tarkoittaa satojen tuhansien eurojen menetyksiä. Ongelmatilanteen vasteajan kehittäminen sekä minimointi on yksi merkittävimpiä esimerkkejä 3D-tulostuksen hyödyistä.

Esimerkkitapauksena käytetään kohdeyrityksen tuotantolinjan käyttöönotto-vaiheen aikana tapahtunutta kolaria, joka tapahtui robotin osuessa tuotantolinjan työkaluun. Tilanne tapahtui perjantai iltapäivällä 1.9.2023. Kyseisessä tapauksessa PLC eli programmable logic controller oli lähettänyt robotille käskyn, jota robotti ei vastaanottanut. Kyseinen tilanne ohitettiin tuotantolinjan ohjauspaneelistä ja robotti resetoitiin. Tuotantolinja käynnistettiin uudelleen, jolloin robotti vastaanotti vanhan käskyn ja kolaroi tuotantolinjan kääntöpöytään.



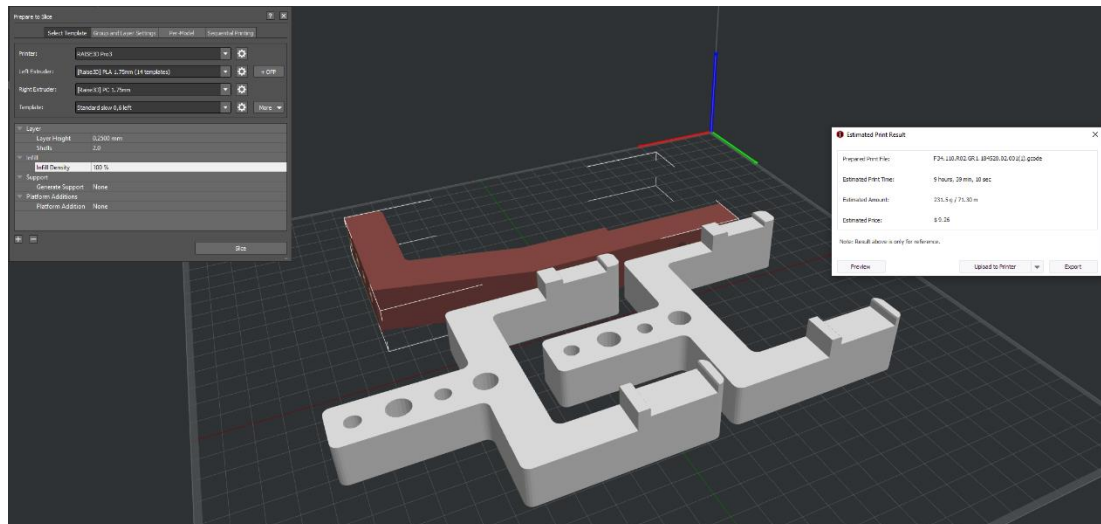
Kuva 5. Robottikolarin aiheuttamat vahingot



Kuva 6. Robottitarttujasta hajonneet kappaleet

Kolaritilanteessa robotin tarttujasta hajosi kolme osaa, mutta suurimman voiman vastaanottanut runko oli ehjä, joten tuotantoa voitaisiin jatkaa ehjällä tarttujalla (kuva 6). Alkuperäiset tarttujan osat olivat valmistettu alumiinista, joten CNC-koneistajaan oltiin yhteydessä välittömästi ja varaosat tilattiin nopealla

toimituksella. Akkutuotantoa oli kuitenkin voitava jatkaa, joten 3D-tulostaminen oli validi vaihtoehto. Kohdeyrittäjä oli 3D-mallit tarttujasta, joiden muotoilua kohdennettiin 3D-tulostusta silmällä pitäen. Kappaleet valmistettaisiin muovista, joka on alumiinia taipuisampi ja heikompi aine. Materiaalimuutoksen takia kappaleiden materiaalivahvuutta kasvatettiin, tukemaan kappaleita sekä estämään niiden taipumista.

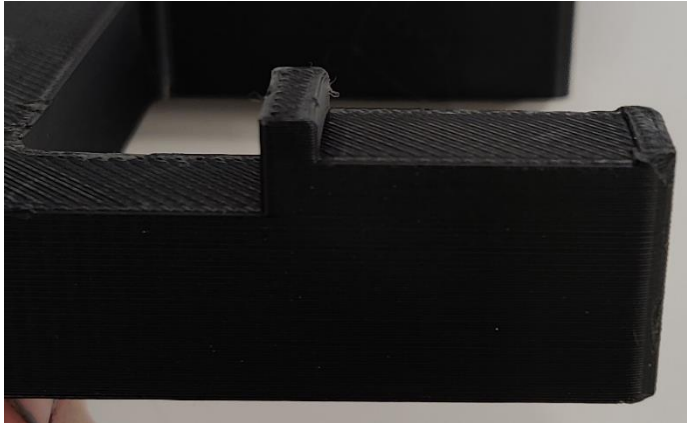


Kuva 7. Robottitarttujaan tulostettavien kappaleiden tulostusasetukset ja niihin kuluvat resurssit

Tulostusasetuksia säädettäessä oli otettava huomioon, että kyseessä on robotin tarttujaan tarkoitettuja osia, joihin kohdistuu puristusvoimaa ja nopeita suunnanmuutoksia. Kohdistuvien voimien vuoksi täytemääräksi asetettiin 100 % eli kappale on kiinteää muovia ja siten mahdollisimman kestävä sekä tukeva. IdeaMakerin kuvankaappauksesta nähdään, että osien valmistamiseen kuluu noin yhdeksän tuntia ja 40 minuuttia, sekä PLA:ta kuluu 232 grammaa (kuva 7). Tulostus aloitettiin yötä vasten, jotta ajankäyttö olisi mahdollisimman tehokasta. Tämä on erittäin hyödyllinen ominaisuus tulostimissa, koska ne voivat tehdä työtä täysin ilman ihmisen valvontaa. Ongelmatilanteessa tulostin huomaa ongelman ja keskeyttää tulostuksen automaattisesti.

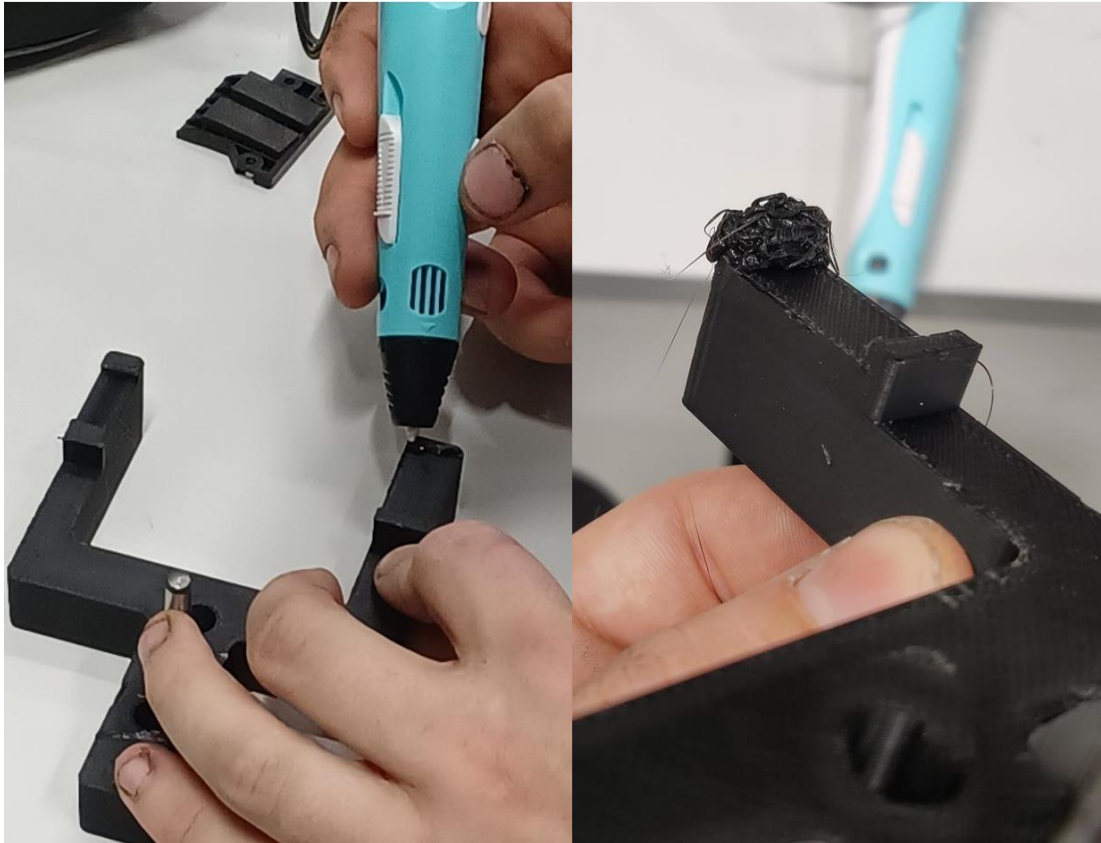
7.2 Halkeaman korjaus

Asennusvaiheessa tapahtui vahinko ja tulostettu tarttuja lipesi asentajan kädestä lattialle. Tulostetut kappaleet eivät yleisesti kestä teräviä kolahduksia, vaan ne aiheuttavat usein halkeamia. Tässä tilanteessa tarttujasta lohkesi pala (kuva 8).



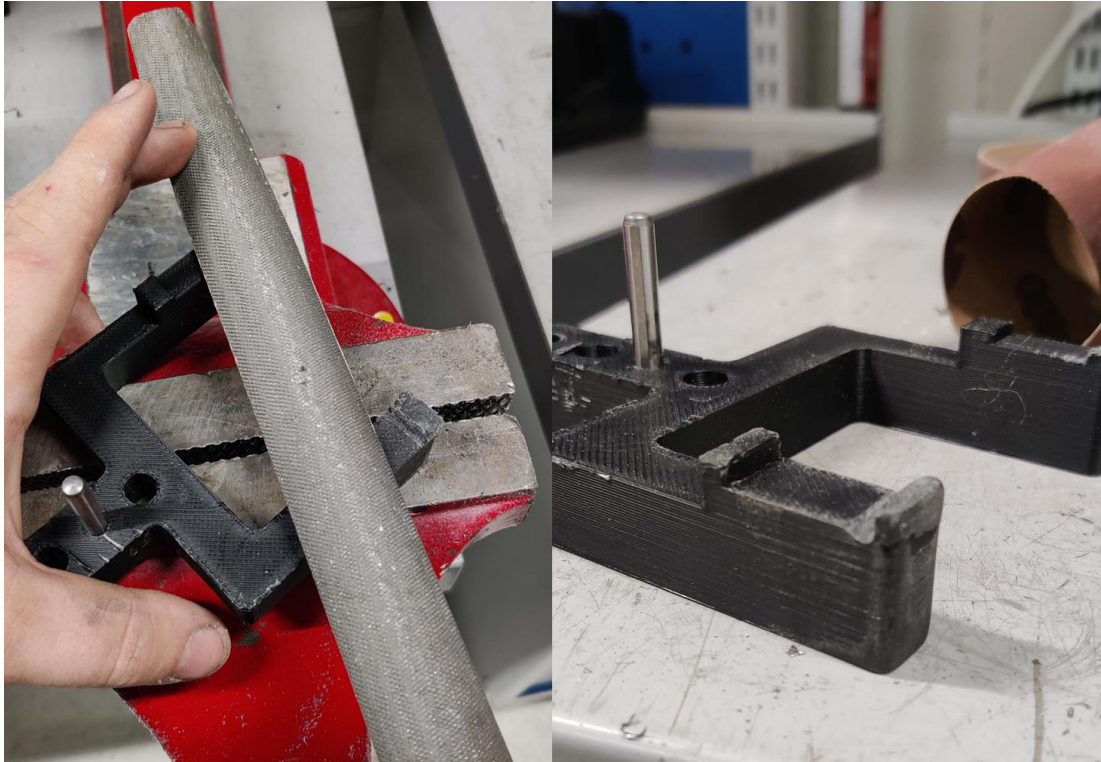
Kuva 8. Tulostetusta kappaleesta haljennut osa

Kokonaisen kappaleen uudelleentulostus ei ole kannattavaa näin pienen korjauksen takia, joten on järkevämpää käyttää tulostukseen tarkoitettua korjauskynää. Kynä toimii kuin 3D-tulostimen suutin, ensin se kytketään virtalähteeseen ja määritetään haluttu lämpötila. Kynän lämpötilaksi asetettiin 205 astetta. Lämpötilan saavutettua syötetään kynään pala filamenttia, joka tässä tapauksessa oli mustaa PLA muovia. Kynän sivusta voidaan säätää haluttu syöttönopeus, joka kannattaa pitää mahdollisimman hitaana. Hidas syöttönopeus helpottaa filamentin asettelua.



Kuva 9. Korjauskynän hyödyntäminen haljenneen kappaleen korjauksessa

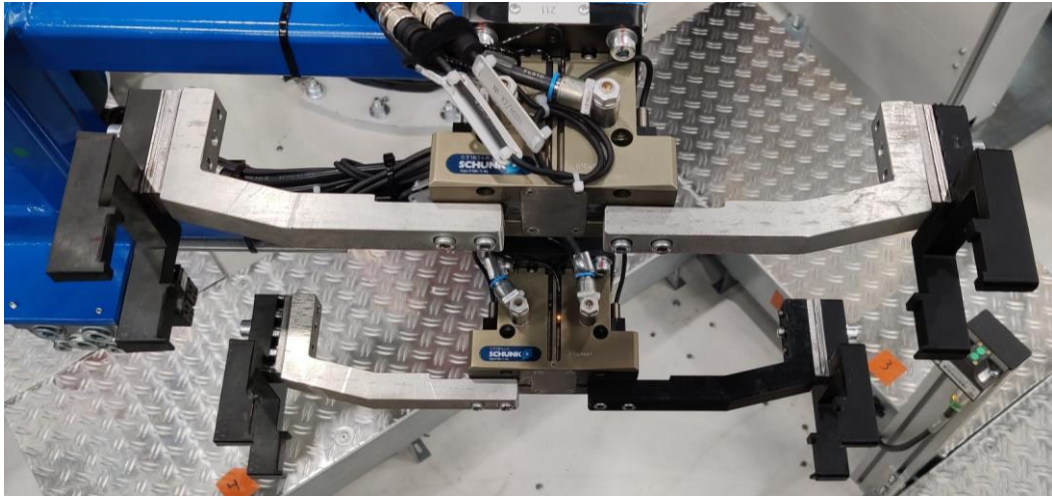
Muovia sulatetaan haluttuun kohtaan mahdollisimman tiivis kerros, jonka ulkoisella muodolla ei ole suurta merkitystä, kunhan kerros peittää koko halutun pinta-alan (kuva 9). Uusi kerros voidaan työstää haluttuun muotoon, kun muovi on kovettunut.



Kuva 10. Korjauksen viimeistely viilalla

3D-tulostettua muovia voidaan työstää esimerkiksi viilaamalla, jolloin saadaan kappale haluttuun muotoon (kuva 10). Tässä vaiheessa on hyötyä mitä tiiviimmän kerroksen tulostuskynällä sai tehtyä. Tiiviistä kerroksesta ei viilauksen aikana paljastu onttoja kohtia, jotka estävät halutun muodon saavuttamisen. Viilauksen jälkeen tarttujan osa on lähes samanlainen kuin ennen sen hajomista. Valmistettu kappale on valmiina asennusta ja testausta varten.

7.3 Korjauksen lopullinen asennus



Kuva 11. 3D-tulostetut kappaleet asennettuna robottitarttujaan

3D-tulostettut kappaleet olivat valmiina ja asennettuina alle 12 tunnin kuluttua kolarista (kuva 11). Tulostus tehtiin yön aikana ja niiden asennus seuraavana aamuna, joka mahdollisti tuotannon jatkamisen tauotta. Asennuksen jälkeen robotin haku- ja vientipisteitä ajettiin käsin. Käsiäjolla voitiin varmistaa, ettei tarttujen muoto ole muuttunut kolarin tai vaihdettujen kappaleiden takia. Käsiäjon aikana huomattiin, ettei tarttujaa tarvinnut säätää, eikä robottia opettaa uudelleen. Tulostetut kappaleet olivat täysin mittatarkkoja verrattuna alkupe- räisiin tarttujen alumiiniosiin.

Uusien alumiiniosien valmistukseen kului yhdeksän tuotantopäivää ja ne saapuivat 14.9. Näiden päivien aikana robottia ajettiin uusilla muovisilla osilla 100 % nopeudella, joten tuotantotahti ei kärsinyt kolarin aiheuttamista vahingoista. Tuotannon laadussa ei havaittu poikkeavuuksia.

7.4 Materiaali- ja työkustannukset

Materiaalikustannukset kolmelle edellisessä kappaleessa mainituille osille oli 9,26 \$ eli 8,69 €. Rishi Kumarin tutkimuksen (2022, s. 16–19) mukaan PLA:lla tulostettaessa sähköä kuluu 0,5 kWh per 13,59 grammaa PLA:ta. Sähköä osien valmistukseen kului 8,5 kWh. Kuluttajalle myytävän sähkön keskiarvo oli

heinäkuussa 2023 3,294 snt/kWh Alv 0 % (Omavoima, n.d.). Tulostettujen kappaleiden sähkökulut olivat yhteensä noin 28 senttiä. Ottamatta huomioon 3D-tulostimen huolto tai hankintakustannuksia, kappaleiden tulostaminen maksoi yhteensä alle yhdeksän euroa.

Tulostettujen kappaleiden yhteishinta alumiinista valmistettuna oli 2400 € Alv 0 %, eli huomattavasti muoviosia kalliimpia. Alumiiniosien käyttäminen on pitkällä aikavälillä kannattavampaa, joten alumiiniosien saavuttua ne asennettiin muovisten kappaleiden tilalle.

8 ESIMERKKITAPAUKSIA 3D-TULOSTUKSEN HYÖDYNTÄMISESTÄ TUOTANTOLINJAN PROSESSEISSA

3D-tulostuksen hyödyntäminen tuotantolinjan kehitysprosessissa esitellään valmistettujen esimerkkitapausten kautta. Kehitysprosessien tavoitteina on parantaa tuotantolinjan ongelmatilanteita.

Esimerkkitapaukset käsittelevät eri aihealueita, jotka ovat esimerkiksi työn standardisointi, turvallisuus, ergonomia sekä tahtiajan kehittäminen. Ongelmanratkaisuissa kehitetään valmiita prosesseja ja työkaluja sekä kehitetään uusia. Ratkaisut arvioidaan, kun niiden toimivuus sarjatuotannossa on todennettu.

8.1 Valmistettujen kappaleiden esittelyn ja arvioinnin kaava

Jokaisen esimerkkitapausten esittely suoritetaan samalla tavalla. Ensimmäinen esiteltävä vaihe on tarpeen tiedostaminen, johon 3D-tulostuksen tarvetta harkitaan. Ongelmatilanne avataan, jotta ymmärretään tarpeen alkuperä sekä pyrittävä lopputulos. Tarkoituksena on tarkkailla ja arvioida valmiita toimintamalleja ja ratkaisuita. Arviointi ja esittely suoritetaan toiminnallisuuden sekä hyödyllisyyden näkökulmasta, eikä valmistettavan kappaleen suunnitteluprosessin näkökulmasta.

Toisessa vaiheessa esitellään valmis mallinnus ja perehdytään suunnitteluvaiheen havaintoihin, joilla on vaikutus valmistettavan kappaleen toimintaperiaatteeseen. Lopuksi mahdollisten prototyyppien ja lopullisen kappaleen valmistus, jolloin kappale valmistetaan ensimmäistä kertaa.

Kolmas vaihe on valmistetun kappaleen asentaminen ja toiminnallisuuden varmistaminen käyttökohteessa. Pohditaan kappaleen vaikutusta tuotannon kehitykseen ja käyttöönottovaiheen tarpeisiin, sekä avataan päätöstä valmistaa kappale 3D-tulostamalla. Kolmannessa vaiheessa arvioidaan valmistetun kappaleen tavoitteiden onnistuminen arviointiasteikon avulla. Arviointiasteikon kriteerit vaihtelevat valmistetavan kappaleen tavoitteiden mukaiseksi.

Tavoitteiden täytyminen						
Tavoitteet	1	2	3	4	5	Kommentit

Taulukko 1. Esimerkki käytetystä arviointitaulukoista

8.2 Tuotantotyökalujen kehittäminen käyttöönoton aikana

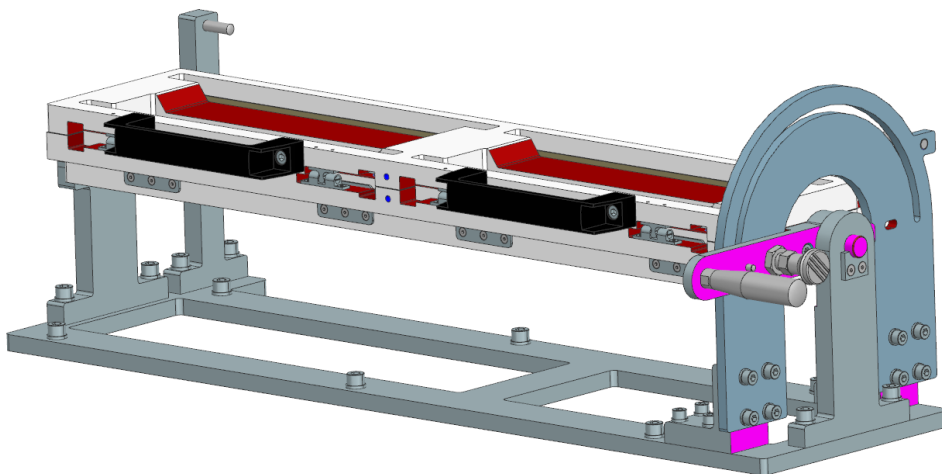
Tuotantolinjan käyttöönotossa huomattiin ongelmakohtia tuotantotyökaluissa. 3D-tulostuksen avulla työkalulle luotiin uusi toimintaperiaate. Uuden toimintaperiaatteen avulla työasemasta tuli ergonomisempi.

Asema ei saavuttanut tuotantotavoitteiden asettamaan tahtiaikaa. Työkalun toimintaperiaatetta oli muutettava, jotta sen käyttö olisi nopeampaa. Muutosten myötä työaseman oli mahdollista saavuttaa sille määritetty tahtiaika.

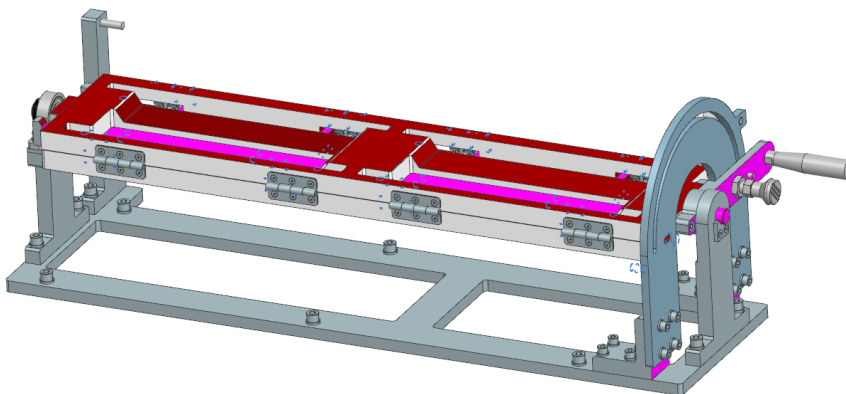
8.2.1 Tarpeen määrittäminen

Tuotantolinjan laajennusprojektille valmistettiin teipin kiinnitykseen suunniteltu työkalu eli jigi. Jigin tarkoituksena on ohjata operaattoria eli työntekijää asentamaan kaksipuolinen teippi akkutuotannossa käytettävään kehykseen. Teippi asennetaan kehyksen molemmille puolille, joten kehys täytyy kääntää työn aikana. Kääntämiselle helpoin ratkaisu on hetkellisesti kääntää koko työkalu ylösalaisin. Kahdeksan tunnin tuotantovuoron aikana näitä kehyksiä tarvitaan 1920 kappaletta. Valmistettavan kehyksen tahtiaika on 15 sekuntia.

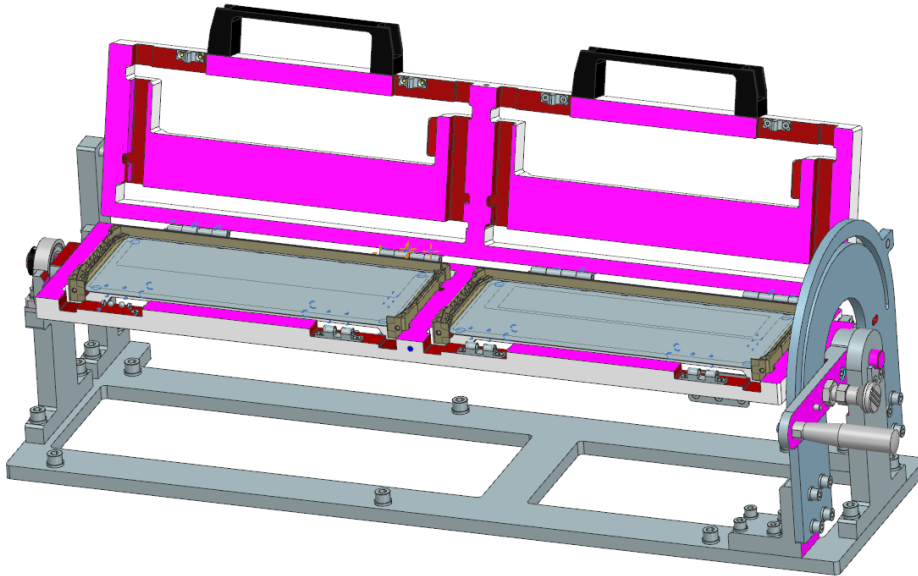
Tähän käyttötarkoitukseen suunniteltu jigi valmistaa kaksi kehystä kerralla. Työkalun käyttöön ja teippien levitykseen saa kulua 30 sekuntia per työkierto. Insinööritoimiston valmistamassa työkalussa huomattiin kuitenkin ongelma. Jigin mekanismi oli monimutkainen eikä työtä voitu suorittaa tahtiajassa. Jigin toimintaperiaatetta olisi yksinkertaistettava ja samalla työergonomiaa parannettava, koska työkiertojen määrä on erittäin suuri. Työssä käytettävän jigin on myös tarkoitus varmistaa, että työntekijä laittaa teipin piirustusten määrällällä tavalla. Valmistettu työkalu ei estänyt teipin asettamista piirustusten vastaisesti, joten se ei ollut japanilaisen Poka-Yoke-teorian mukainen. Yksi parannuskohteista on työkalun asettamat rajat teipin asennukselle. Jigi oli valmistettu kokonaan metallista ja painoi kokonaisuutena yli 50 kilogrammaa. Muutosten tekemisen aikataulu oli tiukka, koska tuotannon aloittaminen oli lähellä.



Kuva 12. Jigi ensimmäisessä työasennossa



Kuva 13. Jigi käännettynä toisen puolen teippausta varten



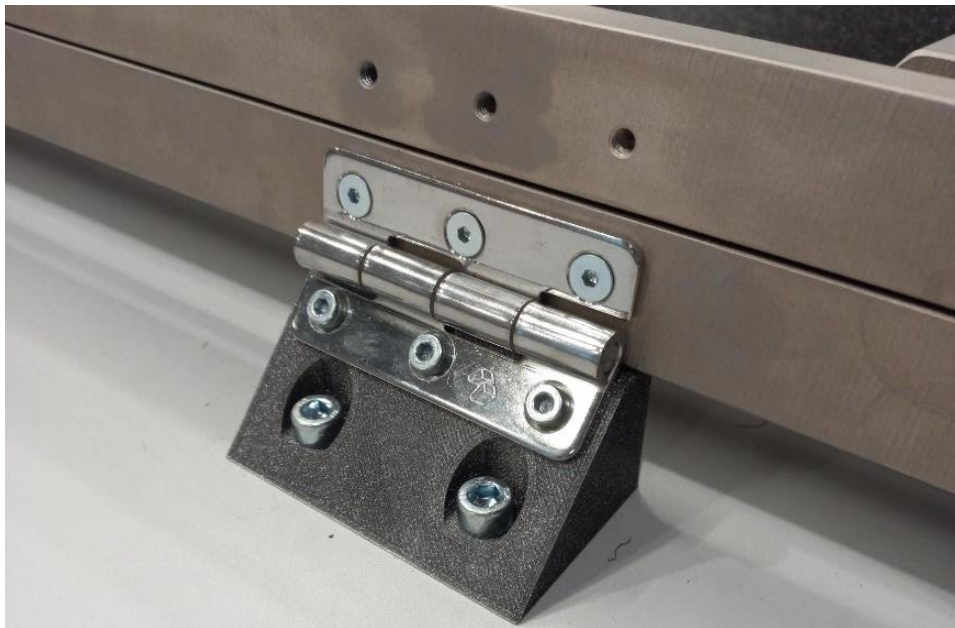
Kuva 14. Jigi avattuna kehysten vaihtamista varten

Alkuperäisessä rakenteessa työkalun kääntäminen tapahtuu samanaikaisesti vetämällä lukituspinniä ulospäin ja liikuttamalla kahvaa. Tämä liike oli haastava ja moni operaattori ei pystynyt tekemään sitä yhdellä kädellä. Kahvan siirtäminen oli myös yllättävän raskasta, koska sillä pyöritetään lähes 20 kilogrammaa metallia. Lukituksen tarkoituksena on pitää jigin alaosa paikallaan, kun jigi avataan kehysten vaihtamista varten. Teippauksen aikana teipattava taso oli myös täysin vaakasuorassa, joten teippausasento oli haastava ja epäergonominen.

8.2.2 Valmistettavien kappaleiden esittely ja valmistaminen

Uuden toimintamallin suunnittelussa on tarkoituksena hyödyntää edellä mainitun työkalun osia ja valmistaa niiden kanssa yhteensopivia kappaleita. Valmistuksessa hyödynnettiin 3D-tulostinta, koska sen vasteaika on huomattavasti nopeampi kuin metallikoneistuksen. Alkuperäinen tarkoitus oli, että kappaleista luodaan muoviset prototyypit ja vaihdetaan sen jälkeen metallisiin. Metalliset osat valmistettaisiin prototyyppien mallikuvista. 3D-tulostimella valmistettavat kappaleet tehtiin mustasta PLA-muovista 0,6 mm suuttimella. Täyteprosentti oli isoimmille osille 25 % ja saranan kiinnityskohdille 100 %.

Ensimmäinen ja huomattavin ongelmatilanne on jigin kääntäminen, johon tarvitaan yksinkertaisempi ratkaisu. Jigin takana oleviin saranoihin 3D-tulostettiin kappaleet, joista jigi kiinnitettiin pöytään (kuva 15). Tulostettujen kappaleiden varassa työkalua on mahdollista kääntää. Valmistettavien kappaleiden suunnittelussa otettiin myös huomioon, että ne nostaisivat työtasoa pystymmäksi. Pystympi työasento on ergonomisesti parempi. Kiinnityskappaleisiin kappaleisiin tiedostettiin kohdistuvan suuria voimia, joten ne valmistettiin 100 % täytöllä PLA-muovista.



Kuva 15. 3D-tulostettu kappale, jolla jigi kiinnitetään pöytään.

Kun jigi käännetään ympäri, on sille valmistettava vastakappale, jota vasten se voidaan nojata (kuva16). Nojaukseen valmistettiin pylväs, joka on muotoiltu vastaamaan jigin kulmaa, jigin ollessaan ergonomisessa työasennossa. Kehykseen asennetaan toinen teippi, jigin nojatessa pylvääseen. Vaikka pylvääseen kohdistuu kolahduksia ja suurehkoja voimia kappale valmistettiin 25 % täytöllä, koska voimat pyrkivät puristamaan kappaletta kasaan. Puristuksena kohdistuvat voimat, eivät aiheuta kappaleen murtumista.



Kuva 16. Jigi nojaa vastakappaleeseen

Jigissä on aukko, josta teippi asennetaan kehyksen päälle. Aukon koko, oli liian suuri ja se mahdollisti teipin asentamisen piirustuksissa määritettyjen toleranssien ulkopuolelle. Jigin reunoille valmistettiin 3D-tulostetut kappaleet, jotka estävät teipin asentamisen toleranssien ulkopuolelle (kuva 17). Kappaleen kiinnityksessä käytettiin jigien valmiita reikiä ja toisella puolella jigisiin porattiin kiinnityspisteet. Kappaleet valmistettiin PLA-muovista ja 25 % täytöllä, koska näihin ei kohdistu ulkopuolisia voimia.

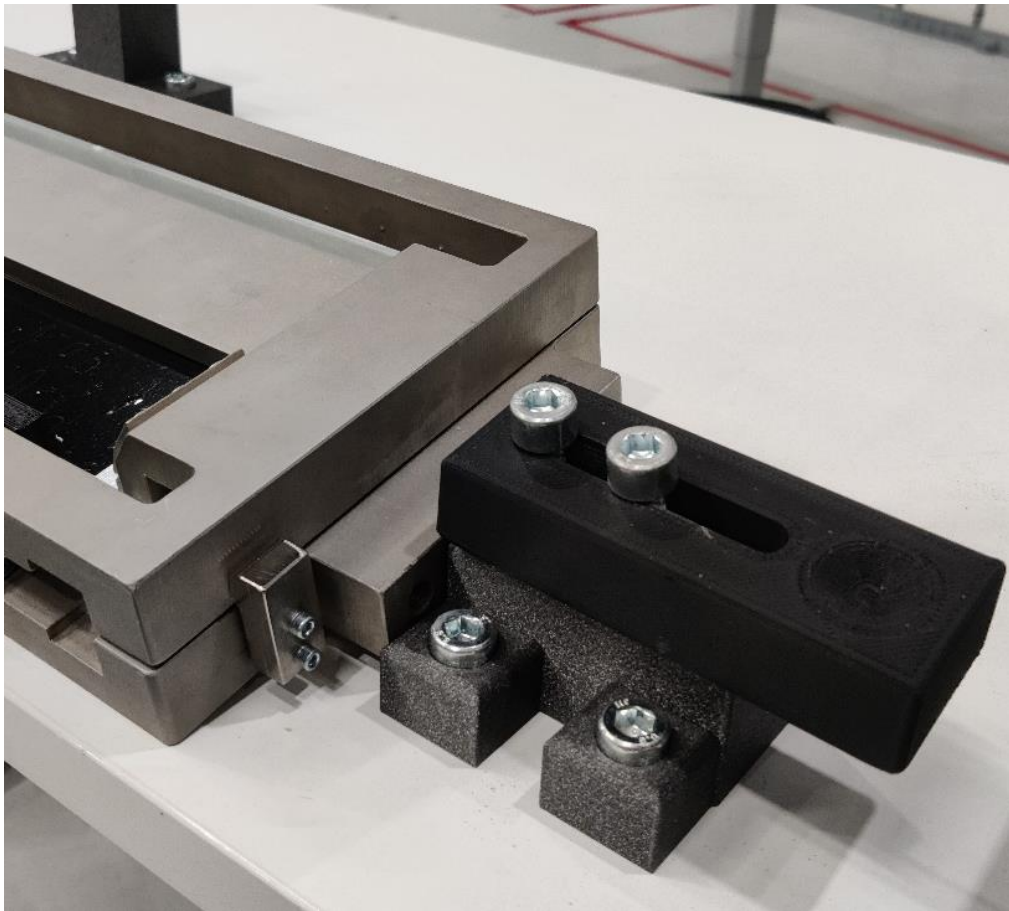


Kuva 17. 3D-tulostetut kappaleet estävät teipin asettamista määritettyjen rajojen ulkopuolelle

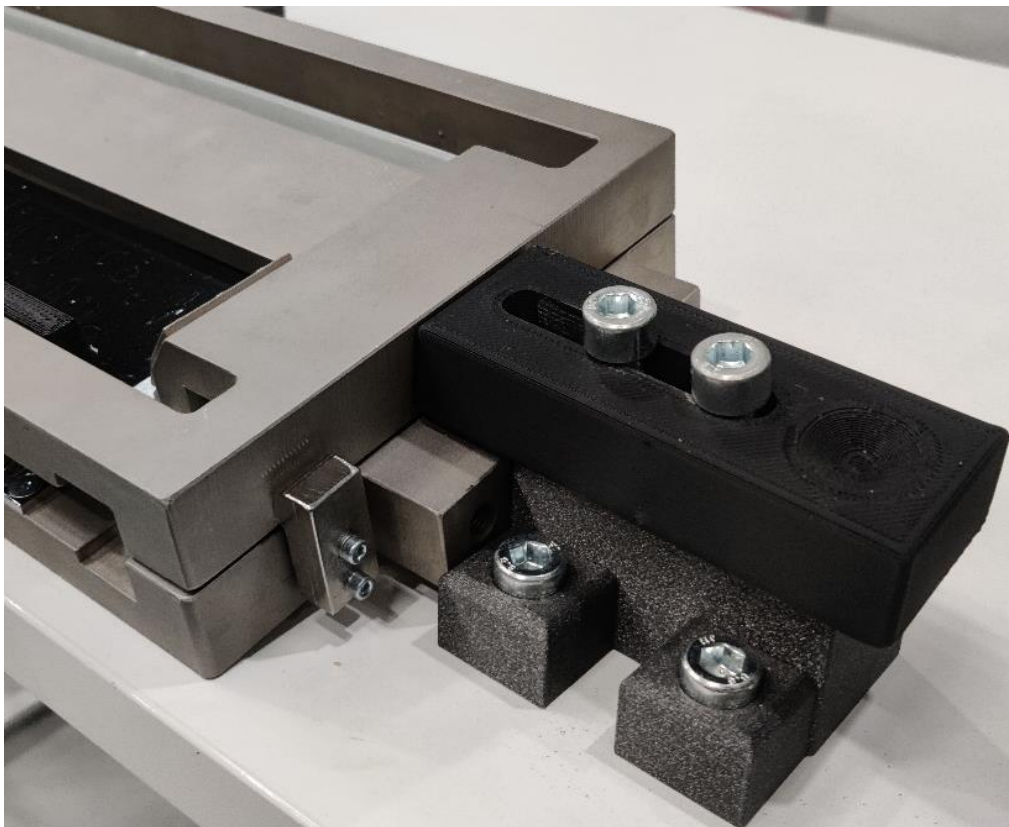


Kuva 18. Jigin toiselle puolelle lisätyt rajoittimet

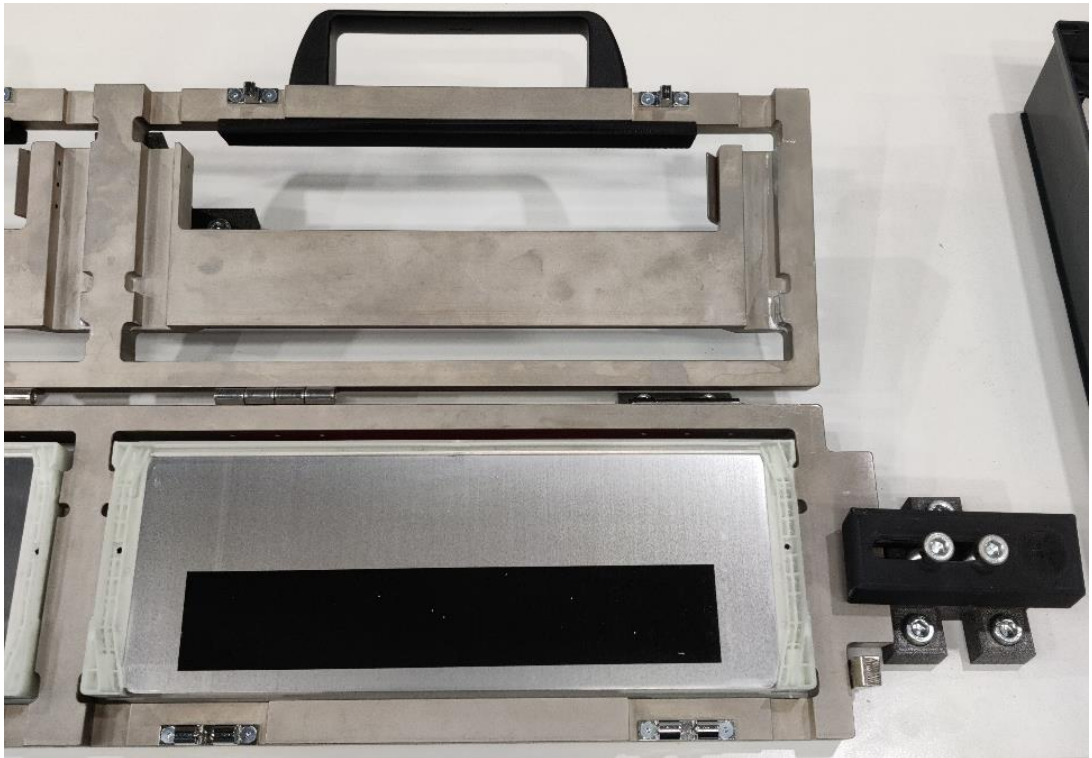
Jigin lukitseminen muutettiin yksikertaiseksi, jotta sitä on helppo ja nopea käyttää. Yksinkertainen lukitusmekanismi koostuu kahdesta kappaleesta, joista ensimmäinen toimii telineenä ja toinen lukitsee jigin alimmaisen osan. Lukituksessa hyödynnetään jigin alimmaisen osan muotoa, jonka päälle asetettu kappale lukitsee sen. Kun alimmainen osa on lukittu paikoilleen, jigi aukeaa kahvoista nostamalla ja kehykset voidaan vaihtaa. Lukitseva mekanismi liikuu kahden pultin varassa, jotka pitävät sen suorassa. Lukitusmekanismin kulma vastaa jigin pintaa, jotta kosketuspinta-ala on mahdollisimman suuri. Lukitusmekanismin runko on myös asennettu mahdollisimman lähelle jigiä, jottei siihen kohdistu suurta vääntömomenttia. Mekanismin prototyypissä käytettiin kahvaa, jonka avulla sitä liikutettiin. Kahvan huomattiin kuitenkin kohdistavan vääntömomenttia kahden liukupinnan välille ja siten aiheutti ongelmia lukon avaamisessa. Kahva vaihdettiin sormelle tarkoitettuun kuoppaan, josta kappaletta voidaan siirtää ja ongelma korjaantui. Muut kappaleet ovat prototyyppien kanssa samanlaisia.



Kuva 19. 3D-tulostettu lukitusmekanismi auki asennossa



Kuva 20. 3D-tulostettu lukitusmekanismi kiinni asennossa



Kuva 21. Jigi avattuna teippauksen jälkeen

8.2.3 Uuden toimintamallin testaus ja arviointi

Uusi toimintamalli on ollut tuotannon käyttöönotossa noin 6kk ja sillä on valmistettu arviolta yli 40 tuhatta kehystä. Työpisteen osat ovat pultattu kiinni sähkösuojaiseen työpöytään, jonka korkeutta voidaan säätää. Lukitusmekanismiin tehtyä muutosta lukuun ottamatta, jigin käyttö on ollut luontevaa ja sitä käyttäviltä operaattoreilta on tullut tyytyväistä palautetta. 15 sekunnin tahtiaika on erittäin vaativa, mutta nykyisellä työpisteellä on mahdollista päästä siihen.

Kappaleet päätettiin valmistaa 3D-tulostamalla, jotta uutta toimintaperiaatetta voidaan kokeilla. 3D-tulostetut prototyypit toimivat hyvin, jonka jälkeen 3D-tulostettiin kestävämmät osat. Tulostettujen osien valmistaminen on myös nopeampi prosessi perinteiseen koneistukseen verrattuna. Nopea aikataulu oli tärkeää, koska uuden toimintamallin käyttöönotolla oli kiire. Kiireen aiheutti tuotannonaloituksen päivämäärä, jota ennen kappaleiden tulisi olla valmiita. Nämä kappaleet suunniteltiin ja tulostettiin kolmen päivän aikana, joka ei olisi

ollut mahdollista, jos kappaleet olisi valmistettu perinteisellä koneistumene-
telmällä. 3D-tulostetut kappaleet olivat tarkoituksena valmistaa metallista,
koska 3D-tulostetut osat olivat alun perin prototyyppejä sekä väliaikainen rat-
kaisu käyttöönoton aikana. Muovista valmistetut kappaleet toimivat hyvin ja ne
olivat erittäin kestäviä. Kappaleiden toimivuudesta huolimatta, projekti pyysi
tarjousta koneistetuista metalliosista. Tarjouksen hinta oli 6600 € ja tulostettu-
jen kappaleiden yhteishinta oli 72 €.

Tavoitteet	Tavoitteiden täyttyminen					Kommentit
	1	2	3	4	5	
Työer- gonomian parantaminen			X			Työergonomia parani työtason asennon ja lukitusmekanismin muututtua. Jigin kääntäminen on kuitenkin vielä raskasta, joka johtuu alkuperäisestä me- talliosasta
Ongelmanrat- kaisun vaste- aika					X	Valmistuksen vasteaika oli no- pea, mutta kokonaan uuden mekanismin luominen kesti muutamia päiviä.
Valmistuskus- tannukset					X	Valmistuskustannuksissa säästettiin noin 6500 € verrat- tuna metalliosiin. Kyseinen säästö kattaa koko 3D-tulosti- men hankintahinnan.
Työyhteisön palaute				X		Palaute on pääosin positii- vistä, muutama negatiivinen palaute jigin avaamisen jäyk- kydestä.
Prosessin ke- hitys ja toimi- vuus				X		Prosessi on huomattavasti no- peampi ja toimivampi kuin en- nen. Toimivuutta pitkäaikai- sessa sarjatuotannossa ei ole vielä kokeiltu.
Pitkän aikavä- lin odotukset			X			Odotukset kappaleiden toimi- vuudesta ovat korkealla, mutta lukitusmekanismiin kohdistuu suuria voimia. Tämän kestä- vyyttä on tarkkailtava.

Taulukko 2. Kehitetyn ratkaisun arviointitaulukko

8.3 Sähköturvallisuuden parantaminen

Kohdeyrityksessä jännitteelliset kappaleet ovat yksi suurimmista työturvallisuuteen vaikuttavista riskeistä. Työturvallisuuden parantamiseksi voidaan luoda 3D-tulostettuja kappaleita.

Kappaleiden tarkoituksena on peittää riskin lähde. Akkutuotannossa jänniteriskin aiheuttaa akun tai sen puolivalmisteen navat. Näiden peittämiseksi valmistettiin napasuojat, jotka estävät jännitteellisiin napoihin koskemisen.

8.3.1 Tarpeen määrittäminen

Työasemalla on käytettävä sähköturvallisuuden parantamiseksi korkeajännitehanskoja, joiden tarkoituksena on suojata niiden käyttäjää sähköiskuilta. Sähköiskun aiheuttaa oikosulku, joka tapahtuu, kun operaattori koskee akun plus- ja miinusnapoihin samanaikaisesti. Sähköpurkaus saattaa olla hengenvaarallinen, joten suojakäsineiden käyttö on pakollista.

Kohdeyrityksen tuotantolinjalla on työasema, jolla työskenneltäessä on korkeajännitehanskojen käyttöpakko. Samalla asemalla käsitellään myös ESD-merkittyjä osia. ESD eli staattiselta purkaukselta suojattuja osia on käsiteltävä niille tarkoitetuilla hanskoilla. Korkeajännitehanskat luovat ja ylläpitävät staattista varausta, joten niiden kanssa ei voida koskea ESD-suojattuihin osiin. Ongelma ilmeni tuotantolinjan käyttöönottovaiheessa, eikä tällaista otettu huomioon työpisteen suunnitteluvaiheessa. Havainto käynnisti ongelmanratkaisuketjun. Tarkoituksena oli luoda ratkaisu, joka mahdollistaa ESD-hanskojen käyttämisen, ilman korkeajännitteestä aiheutuvaa riskiä.

Operaattorin on siis voitava vaihtaa korkeajännitesuojahanskat ESD-hanskoihin ilman, että hänelle aiheutuu vaaraa saada sähköiskua akusta. Ratkaisu on eristää jänniteriskin aiheuttaja, ennen korkeajännitesuojahanskojen vaihtoa ESD-hanskoihin. Kyseisessä tapauksessa jänniteriskin aiheuttaa akun plus- ja miinusnavat, jotka oli peitettävä. Materiaalina hyödynnetään PLA-muovia, jolla

on NIH:n (NIH, 2022) artikkelin mukaan korkea resistanssi, joten se ei johda sähköä.

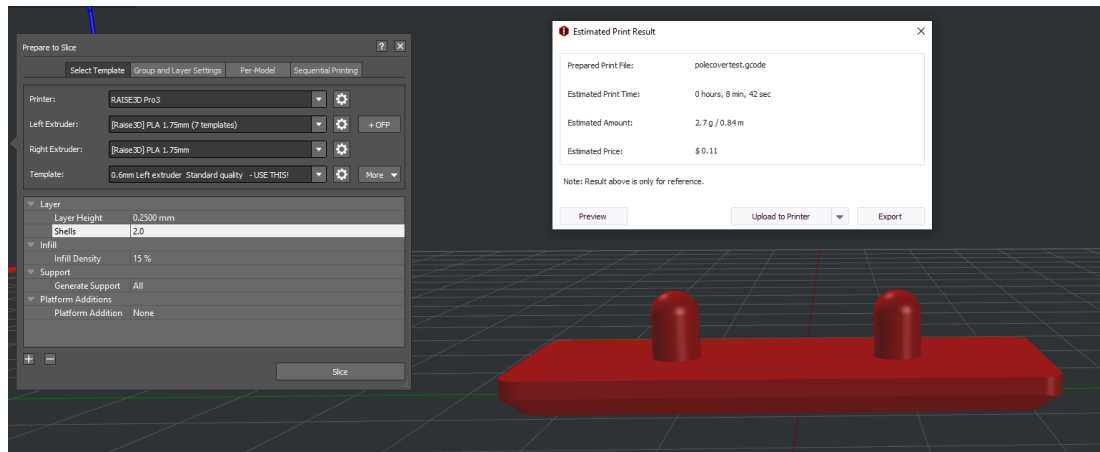
8.3.2 Kappaleen mallinnus, prototyyppi ja valmistaminen

Jännitesuoja mallinnettiin käyttämällä irrallista akun napaa, jonka mittojen perusteella suojat valmistettiin (kuva 22). Kiinnityspisteinä päätettiin käyttää navan kierteitä, joihin akun johtimet kiinnitetään. Navan kahdesta kiinnitysreiästä saadaan tuki, joka pitää napasuojat paikoillaan. Napasuojien poistaminen on prosessin aikana pakollista, jottei niitä unohdeta akun sisälle.



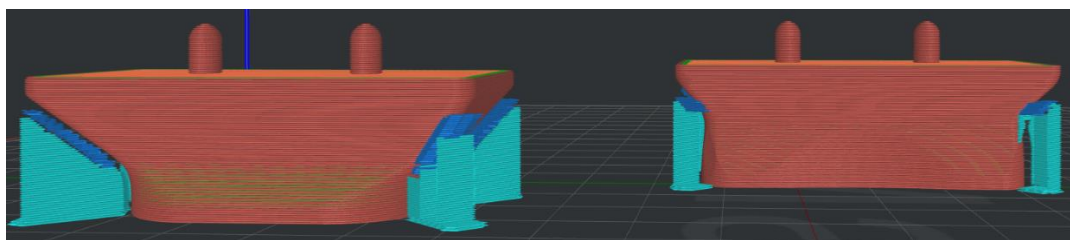
Kuva 22. Tulostettavan kappaleen mitoittaminen

Kierteiden sisälle asetetaan kaksi tappia, joiden koesovituksella valmistusprosessi alkoi. Valmistettiin prototyyppiin, jossa on tapit ja pieni osa tasaista aluetta (kuva 23). Näillä saadaan testattua kappaleen ja tappien koot sekä suojaavan alueen paikoitus. Tulostusasetukset kohdistettiin prototyyppien valmistukseen valitsemalla 15 % täyttö, jotta valmistusaika lyhenisi mahdollisimman paljon.



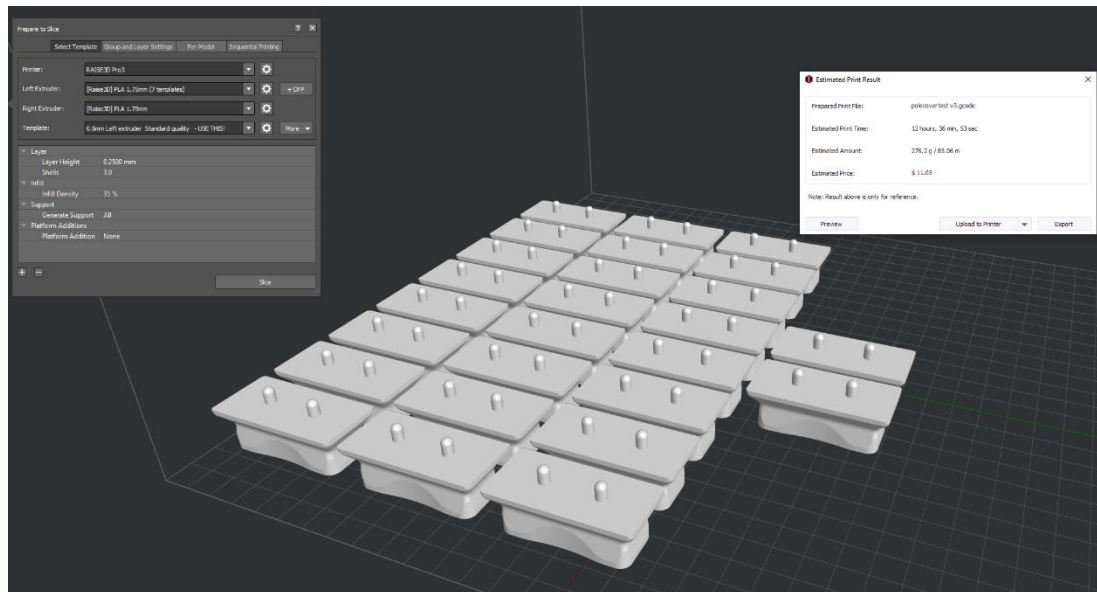
Kuva 23. Prototyypin valmistukseen käytettyjen tulostinasetukset ja kuluvat resurssit

Prototyypin testauksen jälkeen tappien kokoa muutettiin ja suunniteltiin osuus, josta napasuojasta pidetään kiinni. Kiinnipidettävään osuuteen suunniteltiin sennys, jotta napasuojasta on mahdollisimman helppo pitää kiinni paksuilla jännitesuojahanskoilla.

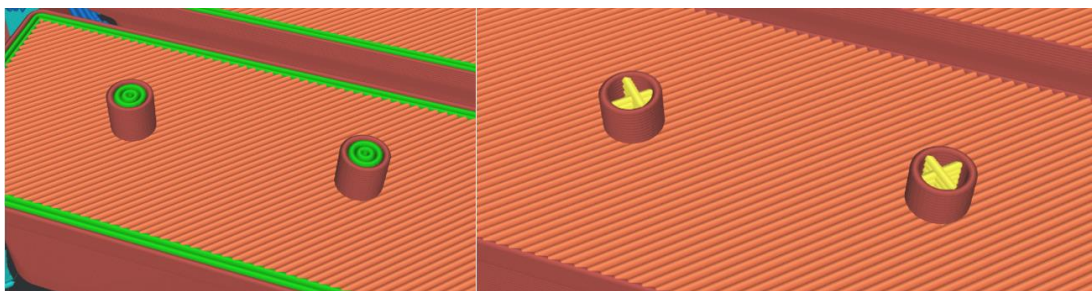


Kuva 24. Suunnittelun optimointi vähentää tukirakenteiden määrää

Tulostuksen valmisteluvaiheessa huomattiin, ettei napasuojan muoto ole optimaalinen 3D-tulostukselle (kuva 24). Kappaleen tulostaminen tarvitsee paljon tukirakenteita. Tukirakenteiden määrä ei haittaa kertaluonteisia tulosteita, mutta napasuojia valmistetaan useita. Useita kappaleita tulostettaessa tukirakenteiden valmistukseen kuluu huomattava määrä resursseja. Ensimmäisen napasuojan arvioi niitä käyttävät henkilöt, joiden palautetta kuunneltiin. Palautteen pohjalta valmistettiin toinen versio napasuojasta, jossa otettiin huomioon alkuperäisen muotoilun heikkoudet. Toisen version muotoilu on optimaalisempi ja tarvitsee tulostusvaiheessa vähemmän tukirakenteita. Toisesta versiosta tuli lopullinen valmistettava napasuojia.



Kuva 25. Napasuojien tulostusasetukset ja kuluvat resurssit



Kuva 26. Ulkokerrosten määrän vaikutus valmistettavan kappaleen rakenteeseen

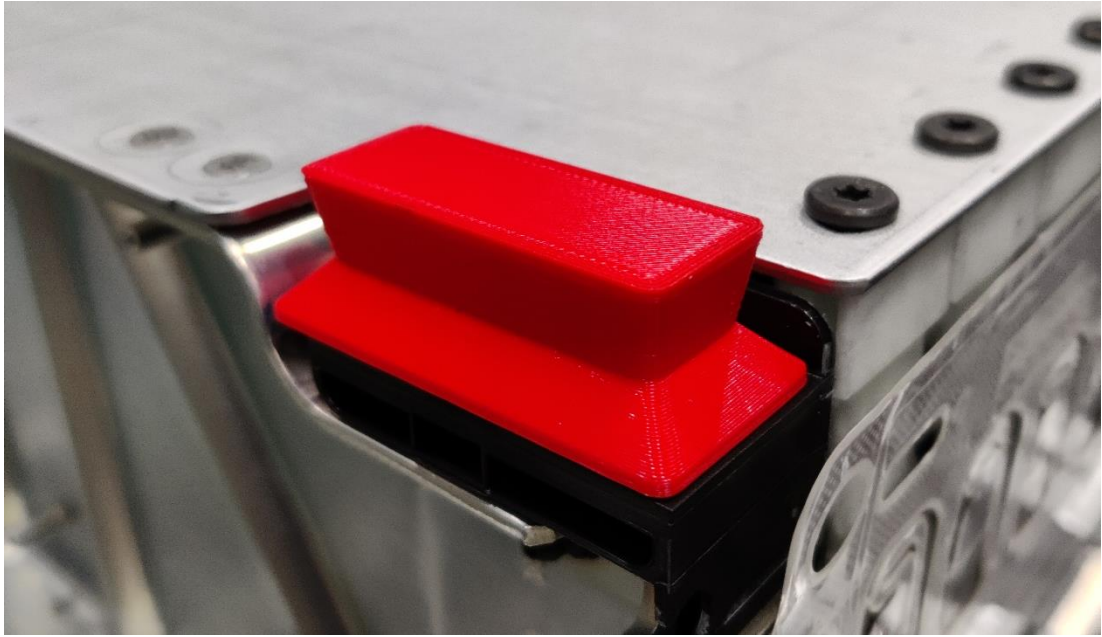
Napasuojia valmistettiin kerralla 26 kappaletta, joka oli niiden arvioitu tarve tuotantolinjalla. Tulostusasetukissa otettiin huomioon kappaleen heikoimmat kohdat, jotka ovat kappaleen kiinnitystapit. Tappien halkeaminen tai hajoaminen tekisi akusta valmistuskelvottoman. Kiinteiden ulkokerrosten määrää muuttamalla voitiin tapeista tehdä kiinteitä (kuva 26). Tappien kiinteys minimoi riskin niiden hajoamiseen. Kuva havainnollistaa tappien eron yhden ja kolmen ulkokerroksen välillä. Ulkokerrosten määrän muuttaminen mahdollistaa kiinteiden tappien tulostamisen ilman, että koko kappale tulostetaan kiinteäksi. Täyttö asetettiin 35 %, joka lisää kappaleiden painoa. Paino auttaa napasuojia pysymään paremmin paikoillaan.

8.3.3 Suurjännitesuojien testaus ja arviointi

Suurjännitesuojat käyttöönotettiin tuotantolinjan käyttöönottovaiheessa. Suojien turvallisuus tarkistettiin turvallisuusasiantuntijoiden toimesta ja niiden käyttö hyväksyttiin. Korkeajännitehanskojen käyttöpakko poistui, kun suojat olivat asennettu (kuva 27). Suojille asennettiin myös sensorit, jotta niiden käyttöä voidaan tarkkailla. Työaseman prosessia ei voida suorittaa, jos suoja ei ole asennettu. Käyttöä valvomalla työturvallisuudesta voidaan olla varmempia. Ongelmanratkaisun aloittanut syy oli ESD-tuotteiden turvallisuuden puutteellinen huomiointi. Napasuojien avulla on mahdollista käyttää korkeajännitehanskojen sijaan ESD-hanskoja ja sähköosien suojaus on varmistettu.

Suojat itsessään sopivat hyvin niiden suunnitelluille paikoille ja peittivät akun navan kokonaan minimoiden oikosulkuriskiä. Tappien koko oli sopiva, jolloin kappaleet olivat tukevasti kiinni, muttei jääneet kiinni irrotettaessa. Muotoilun ansiosta niistä oli helppo pitää kiinni paksuja korkeajännitehanskoja käytettäessä. Muotoilu mahdollisti tasaisen pinnan, johon anturit voidaan kohdistaa. Akkujen päälle lasketaan myös korkeajännitteeltä suojaavat levyt, joiden asennusta napasuojat eivät haitanneet.

Napasuojien valmistukseen käytettiin 3D-tulostinta, koska tarve tuli yllättäen ja tilanteeseen tarvittiin nopea ratkaisu. Projektin aikana 3D-tulostuksesta oli kehittynyt yleiseksi ratkaisutavaksi. Yleispätevyyden myötä tulostaminen oli myös tämän ratkaisun ensimmäinen valmistusvaihtoehto. Käytetyn 3D-mallin koneistaminen olisi myös hankalaa, joka vahvisti päätöstä hyödyntää 3D-tulostinta.



Kuva 27. Napasuoja asennettuna akkuun

Tavoitteet	Tavoitteiden täytyminen					Kommentit
	1	2	3	4	5	
Suurjännitetyön turvallisuuden parantaminen				X		Turvallisuutta parannettiin huomattavasti peittämällä työturvallisuusriskin lähde. Kappaleen asettaminen akun navan päälle mahdollistaa, että siihen voi koskea. Asentamisvaihe aiheuttaa kuitenkin tilanteen, jolloin napoihin kosketettaisiin. Kosketuksen aiheuttaman oikosulun riskit estetään korkeajännitehanskojen avulla.
Suurjännitehanskojen riisumisen mahdollisuus, ESD-työn mahdollistamiseksi					X	Korkeajännitehanskojen riisuminen on sallittua asiantuntijoiden luvalla. Tavoite saavutettiin.
Valmistuskustannukset					X	Valmistuskustannukset olivat matalat. Vastaavien monimutkaisten mallien valmistaminen esimerkiksi POM-materiaalista CNC-koneistuksen avulla olisi erittäin kallista. Valmiiden korkeajännitesuojien ostaminen olisi arvokasta.
Työyhteisön palaute					X	Palaute oli hyvin positiivista, koska muotoilu toteutettiin käyttäjien palautteidensa perusteella.
Prosessin kehitys ja toimivuus				X		Ratkaisu mahdollistaa ESD-työskentelyn, joten prosessi kehittyi ja oli ylipäätään mahdollista toteuttaa. Suojat eivät aiheuttaneet ongelmia muiden prosessissa käytettyjen tarvikkeiden kanssa. Sensoreiden avulla saatiin myös toimiva seurantatapa. Miinuksena on, että korkeajännitehanskoja joudutaan edelleen käyttämään. Hanskojen poistaminen kokonaan olisi seuraava kehityksen askel.
Pitkän aikavälin odotukset				X		Odotukset kappaleiden toimivuudesta ovat korkealla. Napasuojien tappeihin voi kuitenkin kohdistua poikkittaisia voimia, jos niitä ei käytetä oikein.

Taulukko 3. Kehitetyn ratkaisun arviointitaulukko

8.4 Työkalupidikkeiden valmistaminen ja työn standardisointi

Asettamalla työpisteen tarvikkeille omat paikat voidaan parantaa työn sujuvuutta. Telineihin asetetaan vuototestaukseen käytettävät tulpat, kun ne eivät ole kiinni akussa. Tulpat on asetettava lähelle niiden käyttötarkoitusta. Telineet valmistetaan 3D-tulostimella.

Telineisiin mallinnetaan paikka sensoreille, joiden avulla työvaiheita voidaan seurata. Seurannalla varmistetaan työturvallisuutta ja valmistettavan kappaleen virheettömyys.

8.4.1 Tarpeen määrittäminen

Akun ilmatiiviys tarkistetaan kolmella eri tavalla, joista kahdessa testissä mitataan ilman vuotonopeutta. Ilmavuotoa testaavat laitteet täyttävät akun paineilmalla, jonka jälkeen mitataan ulos virtaavan ilman vuototahti. Vuototestiä varten akun eri liittimiin asennetaan tulpat. Tulpat ovat irtonaisia kappaleita, jotka operaattori asentaa paikoilleen testin ajaksi. Tulpat irrotetaan testin jälkeen.

Ongelmana on inhimillisen virheen mahdollisuus, jolloin liitin unohtuisi kiinnittää tai irrottaa. Tulpan kiinnittämättä jättäminen aiheuttaisi hylätyn tuloksen vuototestissä, koska akku vuotaa liittimien läpi. Hylätyn vuototestin saanut akku joudutaan testaamaan uudelleen, johon kuluu aikaa. Vaarallisempaa on kuitenkin jättää tulpat kiinni akkuun testin jälkeen. Liittimet ovat kytketty testilaitteistoon ja akun siirtyessä seuraavalle asemalle kiinnitetyt tulpat repisivät testilaitteiston mukanaan. Testilaitteisto on herkkä elektroninen laite ja se hajoaisi pudotessaan telineestään lattialle. Testilaitteiston hajoaminen aiheuttaisi katkoksen tuotannossa. Tarve tulppien seurannalle ilmeni aikaisin tuotantolinjan muutosvaiheessa, mutta ratkaisua ei ollut kehitetty. Ongelmanratkaisu alkoi nopealla aikataululla tuotantolinjan käyttöönottovaiheessa.

Tarpeena on valmistaa jokaiselle kuudelle liittimelle oma teline, johon ne kuuluvat. Telineissä on oltava seurantamenetelmä, joka on kytkettävissä tuotantolinjan verkostoon. Tulpan telineessä on oltava merkintä siihen kuuluvan

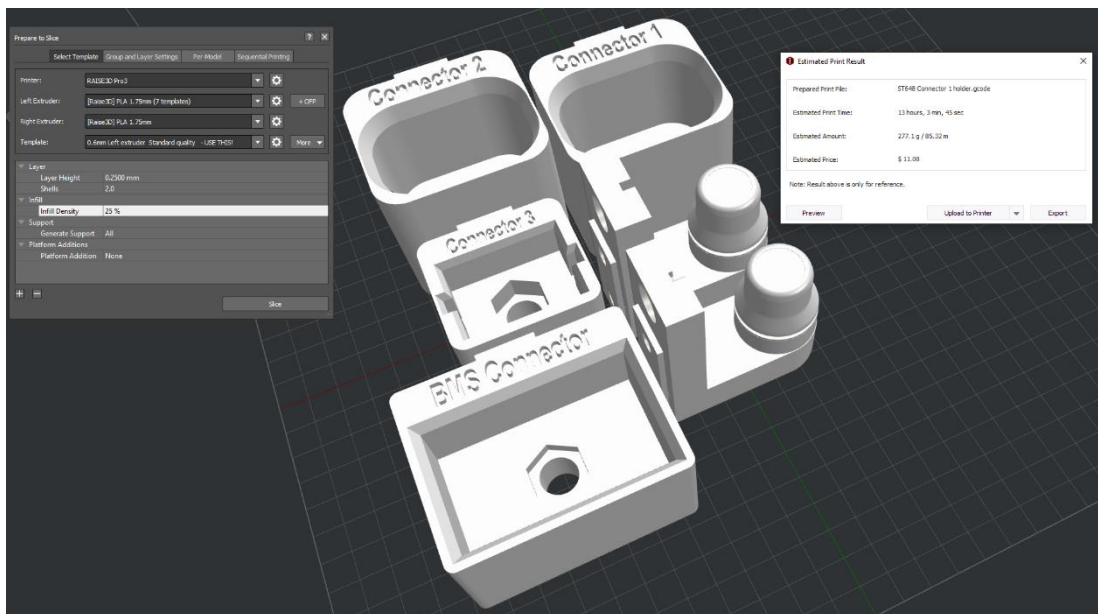
kappaleen nimestä. Merkinnöillä systematisoidaan työtä ja hyödyntää japanilaisen 5S-filosofian ajattelumalleja. 5S-filosofian mukaan jokaiselle työssä tarvittavalle kappaleelle on oltava sille merkitty paikka ja merkintä (Stoor ym., 2020, s. 12–15). Systematisoidut tarvikkeet ovat aina samassa järjestyksessä ja niiden löytyminen on helpompaa. Järjestyksen myötä työn tahtiaika pysyy vakiona. Telineet asennetaan robottisolun verkkoaitaan, joten kiinnitysmenetelmä on pohdittava verkkoaitaan sopivaksi. Lähtökohtana oli valmistaa telineet muovista, koska muovi ei vaurioita tulppien tiivistepintoja. Metallista valmistetut kappaleet olisivat olleet kalliita, niiden valmistusaika olisi pitkä ja materiaali olisi tarpeettoman kestävä.

8.4.2 Kappaleen mallinnus ja valmistaminen

Telineiden valmistus alkoi mitoittamalla jokainen tulppa, ottamalla niistä tarkat mitat. Jokainen tulppa oli keskenään hyvin erilainen, joten niiden asettelu telineisiin eroaa huomattavasti toisistaan. Telineiden tulisi kuitenkin olla helposti liikutettavia ja sopia lähes mihin tahansa kohtaan robottisolua. Telineiden asennuksen kiinnityspisteenä päätettiin käyttää solun suoja-aitaa. Suoja-aidan silmäreikä mitattiin, jotta se voidaan huomioida suunnitteluvaiheessa. Alkuperäinen ongelma eli tulppien seuranta suoritettaisiin sensoreilla, jotka ovat kiinnitetty telinesiin. Sensorit tunnistavat ovatko liittimet telineissään vai eivät. Telineillä voidaan taata myös systematisoitu työpiste, joka oli toisena ongelmanratkaisun kohteena.

Valkoisille tulpille luotiin niiden muotoja mukailevat telineet, joissa käytettiin yhden millimetrin toleranssia. Mustia tulppia käytetään jäähdytysjärjestelmän testaukseen. Tulppien kiinnittämiseen hyödynnettiin valmistettavan akun 3D-kuvaa, josta erotettiin jäähdytysjärjestelmän kiinnike. Kiinnikkeen kärki mallinnettiin osaksi telinettä. Tulppa kiinnitetään telineeseen, sen oikeaa käyttötarkoitusta vastaavalla tavalla. Tulppien seurantaan päätettiin käyttää induktiivisiä sensoreita, jotka tunnistavat telineeseen asetetun kappaleen.

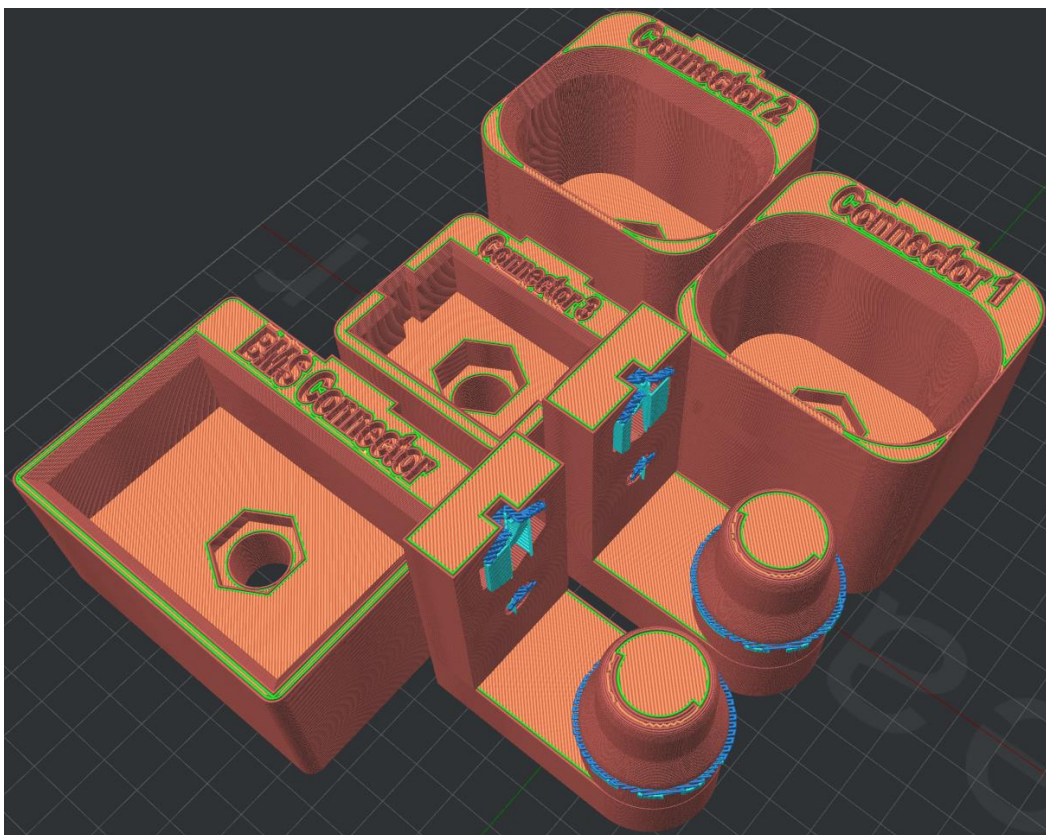
Tulppa otetaan pois telineestä ja sensori ei havaitse sitä, voidaan olettaa sen olevan kiinni testattavassa akussa. Vuototesti voidaan aloittaa, kun yksikään sensori ei havaitse telineeseen asetettua tulppaa. Testauksen jälkeen jokainen tulppa asetetaan takaisin telineisiin ja sensorit vaikuttavat. Kun kaikki sensorit tunnistavat kuhunkin telineeseen kuuluvan kappaleen, testattu akku voi siirtyä pois asemalta. Sensoreissa on kiinnitysmutteri, jolle voidaan mallintaa asennusta helpottava muoto. Telineiden kiinnityksessä suoja-aitaan käytetään pultteja, joita varten telineen taakse mallinnetaan kaksi reikää. Reikiin 3D-tulostetaan kierteet, joihin kiinnityspultit asennetaan. Kappaleen taakse valmistetaan myös ura, jonka tarkoitus on upota verkkoaidan läpi. Ura pitää telineen pystysuorassa ja estää sen kääntymisen. Telineiden päälle mallinnettiin tekstit, jotka tehtiin upottamalla ne valmistettavaan kappaleeseen. Teksti merkitsee kuhunkin telineeseen kuuluvan kappaleen.



Kuva 28. Telineiden tulostusasetukset ja kuluvat resurssit

Telineiden mallinnukset ovat hyvin yksinkertaisia valmistaa 3D-tulostimella, vaikka kahden telineen 3D-malli on monimutkainen. Kappaleiden valmistaminen perinteisellä CNC-koneella olisi aiheuttanut ongelmia kahden identtisen telineen kanssa. Liittimen kiinnitykselle tarkoitettu tappi estäisi koneistustyökäluä valmistamasta kiinnitysmutterille suunniteltua syvennystä. Pyöreässä muodossa on ympäri kulkeva ura sekä useita vinoja, mutta sileitä reunoja.

Liittimen kiinnitysura ja sileät viisteet ovat haastavia valmistaa CNC-koneella. Perinteistä valmistusmuotoa käytettäessä teline pitäisi suunnitella uudelleen. Uudelleensuunnittelusta aiheutuisi kompromisseja telineen toimintaperiaatteen. Kompromisseja välttämiseksi päädyttiin valmistamaan kappaleet 3D-tulostimella, joka on myös nopea sekä kustannustehokas. Tulostusasetuksina käytettiin kahta kokonaista ulkoreunaa ja 25 % täyttöä. Näillä asetuksilla valmistetuista kappaleista tulee kestäviä ja tulostusaika on noin 13 tuntia (kuva 28). Kappaleiden tulostussuunnaksi valitiin niiden normaali käyttösuunta, jolloin tukirakenteita tarvittiin vain vaakasuoriin kiinnitysreikiin (kuva 29).



Kuva 29. Tulostettavien kappaleiden tarvitsemat tukirakenteet

8.4.3 Valmiiden telineiden asennus, testaus ja arviointi

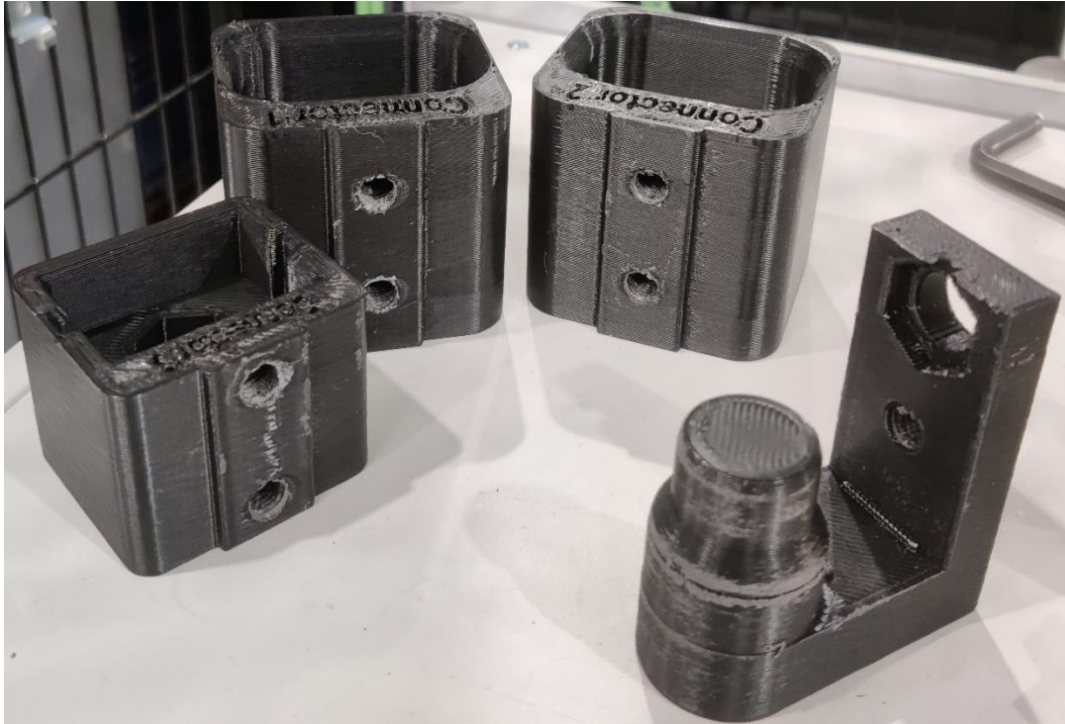
Valmistuksen jälkeen tukirakenteet irrotettiin ja varmistettiin vaakasuoraan tulostettujen kierteiden laatu kierretapilla. Näistä kappaleista huomattiin, että vaakasuorien kierteiden tulostaminen ei ole kannattava menetelmä. Kierteiden laatu on parempi, kun ne tehdään jälkikäteen kierretapilla. Kappaletta

suunniteltaessa ei mallinnettaisi kierrettä, vaan tehdään pelkästään sille tarkoitettu alkureikä. Mallinnettavan reiän koko valitaan standardien avulla. M8 kierteen valmistamiseksi mallinnetaan 6,8 millimetrin reikä. Valmiiseen kappaleeseen tehdään kierre M8 kierretapilla.

Jälkikäteen valmistetun kierteen laatu ja lujuus on parempi kuin vaakasuoraan tulostetun kierteen. Letkuliittimelle tarkoitettuja telineitä myös hiottiin hiomapaerilla, jotta tukirakenteiden jättämiä teräviä reunoja saatiin pyöristettyä. Hionnan jälkeen tulosteiden toimivuus todennettiin koesovittamalla niihin tarkoitettut kappaleet. Kappaleet sopivat ja telineitä oli helppo käyttää, joten tulosteet päätettiin asentaa tuotantolinjalle.



Kuva 30. Tulostetut telineet ennen tukirakenteiden irrottamista



Kuva 31. Telineet kierteiden valmistamisen ja tukirakenteiden irrottamisen jälkeen

Telineiden kiinnityksessä robottisolun turva-aitaan käytettiin läpipultteja. Telineiden asettelu perustui niiden käyttökohteisiin solun sisällä. Telineet olivat lähellä niiden tulpalle tarkoitettua liittintä, josta tulppien asettaminen akkuun olisi mahdollisimman vaivatonta. Telineisiin asennettiin myös anturit, joiden etäisyys ja tunnistusalue säädettiin käyttökohteeseen sopivaksi. Telineen runkoon mallinnettu muoto sensorin kiinnitysmutterille helpotti sensoreiden asennusta. Valmistettujen kappaleiden takana olevat urat pitivät telineet suorassa.

Asennuksen jälkeen telineisiin asetettiin niille tarkoitetut kappaleet (kuva 32). Ennen telineitä, tulpat olivat lattialla tai testilaitteiston päällä. Aiemmin tulppien käyttö oli huomattavasti vaikeampaa. Tulppien käyttökohteesta ei ollut varmaa tietoa, sekä liittimien löytäminen oli haasteellista. Sensorien käyttöönotossa voitiin ottaa niiden tunnistamat esineet huomioon ja nimetä ne järjestelmään. Vuototestiä aloitettaessa voidaan asettaa ehdoksi, ettei yksikään sensori ole vaikuttanut. Testin jälkeen voidaan todeta jokaisen liittimen olevan takaisin omalla paikallaan. Sensoritiedot ohjataan tuotantolinjan ohjausjärjestelmään. Järjestelmä antaa työpisteelle luvan siirtyä seuraavaan työtehtävään, kun

sensoritiedot täsmäävät määritettyä arvoa. Erillisten sensoreiden avulla voidaan myös asettaa näytölle teksti, joka kehoitetaan asentamaan eri liittimiä nimeltä. Syvennyksellä tehty teksti on yksinkertainen valmistaa ja sen lukeminen on vaivatonta.



Kuva 32. Tulpat asetettuina telineisiin



Kuva 33. Tulpat asetettuina telineisiin

Telineistä ei kysytty tarjousta CNC-koneistuksella, mutta niiden hinta valmistettuna POM-muovista olisi noin 3000 €. Syynä tälle on POM-muovin korkeat materiaalikustannukset. Telineiden valmistukseen soveltuvan kokoluokan muovi maksaa jälleenmyyjän (Vink, n.d.) nettisivuilla yli 3500 € per neliometri. Kukin teline vaatii 10 cm x 10 cm palan, joten ainoastaan materiaalikustannukset ovat 350 € per teline. Materiaalikustannuksiin lisätään koneistuskustannukset ja koneistuksen suorittavan yrityksen voittomarginaali. 3D-tulostuksen materiaalikustannukset olivat noin 11 €, joka on huomattavasti edullisempi vaihtoehto.

Valmistetuilla kappaleilla ratkaistiin alkuperäinen ongelma, joka aloitti ongelmanratkaisuprosessin. Jokaisella liittimellä on sille merkattu ja sensorilla valvottu teline. Uuden tuotantolinjan käyttöönotossa sen prosessit ovat vieraita operaattoreille. Työntekijälle ei ole kehittynyt henkilökohtaista rutiinia ja virheet ovat hyvin todennäköisiä. Ratkaisut pienentävät inhimillisen virheen mahdollisuutta ja standardisoivat työtehtävät. Telineitä on niiden paikotuksen ja muotoilun ansiosta helppo käyttää. Valmistetut kappaleet ovat työyhteisön mielestä onnistuneita ja niitä tullaan käyttämään pitkällä aikavälillä.

Tavoitteet	Tavoitteiden täytyminen					Kommentit
	1	2	3	4	5	
Merkittyjen telineiden valmistaminen liittimille					X	Tavoite täyttyi täysin. Jokaiselle liittimelle on nimetty ja muotoilulla ohjattu teline, johon ne kiinnitetään työn jälkeen. Työ on standardisoitu ja 5S-filosofian mukainen.
Liittimien kiinnittämisen seuranta, jolla ehkäistään inhimilliset virheet ja niiden aiheuttamat haitat					X	Tavoite täyttyi täysin. Telineisiin asennetut sensorit varmistavat liittimien irrotuksen ja asennuksen. Tämä tieto välitetään tuotantolinjan ohjausjärjestelmään, joka antaa luvan siirtyä seuraavaan työvaiheeseen.
Valmistuskustannukset					X	Valmistuskustannukset olivat matalat ja vastaavien monimutkaisten mallien valmistaminen CNC-koneistamalla olisi erittäin kallista tai jopa mahdotonta.
Työyhteisön palaute				X		Palaute positiivista, telineiden väri olisi voinut olla kirkkaampi, jotta ne erottuisivat selkeämmin.
Prosessin kehitys ja toimivuus				X		Telineet ja niiden sensorit vähentävät virheiden todennäköisyyttä. Merkatut telineet standardisoivat työtä. Telineet nopeuttavat ja selkeyttävät prosessia, jotta se on tehokkaampi.
Pitkän aikavälin odotukset					X	Odotukset kappaleiden toimivuudesta ovat korkealla, koska kappaleisiin ei kohdistu voimia. Kappaleet eivät myöskään joudu kulumisen tai putoamisvaaran kohteeksi. Kappaleiden oletetaan kestävän koko tuotantolinjan käytön ajan.

Taulukko 4. Kehitetyn ratkaisun arviointitaulukko

9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli ratkaista tuotantolinjan käyttöönottovaiheessa esiintyviä ongelmatilanteita 3D-tulostinta hyödyntämällä. Ongelmatilanteita oli erilaisia ja niiden ratkaisuissa käytettiin erilaisia menetelmiä. Pääsääntöisesti 3D-mallit suunniteltiin tapauskohtaisesti, lisäksi hyödynnettiin valmiita malleja. Tuloksena saatiin useita erilaisia käyttökohteita ja ratkaisumalleja, joissa 3D-tulostusta voitiin hyödyntää. Ratkaisut ovat todettu laadukkaiksi ja pitkäaikaisiksi, koska ne ovat kestäneet useita kuukausia sarjatuotantoa. Kappaleiden valmistaminen 3D-tulostimella lyhensi ongelmanratkaisun vasteaikaa ja siihen kuluvia resursseja. Tuotantolinjalla 3D-tulostettujen kappaleiden määrä on useita kymmeniä. Tässä työssä esitettävien kappaleiden määrää piti siis karsia huomattavasti. Karsimisen avulla oli mahdollista esitellä hyvin erilaisia ratkaisumahdollisuuksia.

Työssä esitetään yksityiskohtaisesti esimerkkejä, miten 3D-tulostaminen tehostaa ongelmanratkaisuprosessia ja sen kulurakennetta. 3D-tulostettujen kappaleiden kustannukset määritetään tulostusohjelman hinta-arvioiden perusteella, johon on määritetty käytettyjen materiaalien tarkat hinnat. 3D-tulostimella valmistettujen kappaleiden kustannuksia vertaillaan CNC-koneistetuista kappaleista saatuihin tarjouksiin. Kappaleiden valmistusaikoja vertaillaan tulostusajan ja toimittajan toimitusajan välillä. Aijat perustuvat toimittajan ilmoittamaan arvioon tai todelliseen keston, sekä 3D-ohjelman ilmoittamaan tarkkaan tulostusaikaan. Menetelmien luotettavuutta perustellaan todistamalla teorian toimivuus käytännön esimerkkien avulla. Ratkaisuiden toimivuus todistetaan niiden oikeassa ympäristössä sarjatuotannon aikana.

Vaikka opinnäytetyön käyttökohteet olivat laajat ja keskenään erilaiset, voisi sen laajuutta kasvattaa. Kehitysmahdollisuutena olisi materiaalien

monipuolisuuden lisääminen. Työssä tulostetuissa kappaleissa käytettiin materiaalina ainoastaan PLA-muovia. Muoviseosten lisäksi esimerkiksi metallin hyödyntäminen olisi laajentanut työn kokonaisuutta.

Työn rajoituksena olivat käytettävissä olevien laitteiden rajallinen määrä. Työ suoritettiin yhden tulostintyyppin ja kahdella tietokoneohjelman avulla. Mahdollisuus erilaisten tulostintyyppien ja materiaalien hyödyntämiseen olisi laajentanut käyttökohteiden määrää. Muoviseoksesta valmistetut kappaleet eivät kestä suuria voimia, joten niiden käyttökohteita oli myös rajattava.

Tämän opinnäytetyön hyödyllisyys toimeksiantajalle on uuden ongelmanratkaisumenetelmän kehittäminen. Ratkaisumenetelmien kehittäminen mahdollistaa kohdeyrityksen jatkuvan kehityksen ja nopean reagointikyvyn. Kohdeyrityksen tarvitsemat kappaleet voidaan valmistaa yrityksen sisällä, joka mahdollistaa valmistuskustannuksien minimoinnin. Kohdeyritykselle luotiin myös uusi toimintamalli ja kulttuuri 3D-tulostuksen hyödyntämiseksi. Työntekijöiden ennakkoarvot poistuivat ja tilalle tuli ajatus 3D-tulostuksen hyödyntämisestä muissakin tilanteissa. Työn tulokseksi saatiin varmuus 3D-tulostuksen hyödyntämisen kannattavuudesta tuotantolinjan ongelmaratkaisutilanteissa. 3D-tulostimella voidaan valmistaa kappaleesta prototyyppi tai lopullinen ratkaisu. Varmuus perustellaan pienien kustannusten ja toimivien ratkaisuiden avulla. Opinnäytetyön havaintoja voidaan hyödyntää jollain asteella jokaisella tuotantolinjalla.

LÄHTEET

- 3DJake. (n.d.). *3DJake.fi*. Noudettu osoitteesta
<https://www.3djake.fi/filamentit>
- Abdelnaser, A. (n.d.). *linkedin.com*. Noudettu osoitteesta
<https://www.linkedin.com/advice/1/how-do-you-test-validate-your-cadcam-software#test-print-a-prototype>
- All3DP. (18. Syyskuu 2023). *All3DP.com*. Noudettu osoitteesta
<https://all3dp.com/1/sla-resin-3d-printing-guide/>
- Carolo, L. (9. 7 2022). *All3DP.com*. Noudettu osoitteesta
<https://all3dp.com/2/3d-printer-axis-the-basics-simply-explained/>
- Duda, T. (2016). *3D Metal Printing Technology*. Bangalore: Elsevier.
- Fanchi, C. (27. 2 2023). *Backendless.com*. Noudettu osoitteesta
<https://backendless.com/the-importance-of-iterative-prototyping-in-application-development/>
- FlasForgeshop. (2023). *FlasForgeshop.com*. Noudettu osoitteesta
<https://www.flashforgeshop.com/article/Understanding-the-importance-of-3D-Print-nozzle-diameters>
- Greguric, L. (30. 10 2023). *All3DP.com*. Noudettu osoitteesta
<https://all3dp.com/2/fdm-3d-printing-post-processing-an-overview-for-beginners/>
- Hengko. (14. Elokuu 2020). *Hengko.com*. Noudettu osoitteesta
<https://www.hengko.com/fi/news/what-should-we-know-about-sintering/>
- HUBS. (n.d.). *hubs.com*. Noudettu osoitteesta
<https://www.hubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview/>
- Jane, M. (2022). *Characterization of Electrically Conductive 3D Printing Materials for use in ESD Control Programs*. Fremont.
- Kelly, R. (2. 10 2023). *All3DP.com*. Noudettu osoitteesta
<https://all3dp.com/2/multi-material-3d-printing-an-overview/>
- Kestilä, H. (29. 4 2022). *Jig.space*. Noudettu osoitteesta
<https://www.jig.space/blog/digital-prototyping-vs-traditional-methods-where-does-the-value-lie>
- Kumar, R. (2022). *A Comparative Study on the Life Cycle Assessment of a 3D Printed*. Braunschweig: Elsevier.

- Lattice. (n.d.). *lattice3d.com*. Noudettu osoitteesta
<https://www.lattice3d.com/solutions/assembly-process-planning>
- Maine, U. (11. Huhtikuu 2022). *The University of Maine*. Noudettu osoitteesta
<https://composites.umaine.edu/2022/04/11/umaine-3d-prints-two-new-large-boats-for-u-s-marines-breaking-previous-world-record/>
- Markforged. (n.d.). *Markforged.com*. Noudettu osoitteesta
<https://markforged.com/resources/blog/design-for-3d-printing-part-3-decreasing-print-time>
- Markforged. (n.d.). *Markforged.com*. Noudettu osoitteesta
<https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-plastics-composites/3d-printing-strategies-for-composites/composites-3d-printing-design-tips>
- Markforged. (n.d.). *Markforged.com*. Noudettu osoitteesta
<https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-plastics-composites/understanding-3d-printing-strength/3d-printing-settings-impacting-part-strength>
- Mostafaei, A. (2021). *Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges*. Pittsburg: Elsevier.
- NIH. (10. Helmikuu 2022). *National Library of Medicine*. Noudettu osoitteesta
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8877385/>
- O'Connell, J. (8. Marraskuu 2021). *All3DP.com*. Noudettu osoitteesta
<https://all3dp.com/2/strongest-3d-printer-filament/>
- Omavoima. (n.d.). *Omavoima.fi*. Noudettu osoitteesta
<https://omavoima.fi/spot-sahkon-hintahistoria/>
- PLM, G. (n.d.). *plmggroup.eu*. Noudettu osoitteesta
<https://plmggroup.eu/articles/frequently-asked-questions-metal-3d-printing/#Are%20there%20different%20metal%203D%20printing%20technologies>
- Raised3D. (n.d.). *Raised3D.com*. Noudettu osoitteesta
<https://www.raise3d.com/3d-printers/>
- RAMLAB. (n.d.). *ramlab.com*. Noudettu osoitteesta
<https://www.ramlab.com/resources/ded-101/>
- RapidDirect. (n.d.). *Rapiddirect.com*. Noudettu osoitteesta
<https://www.rapiddirect.com/blog/3d-prototyping/>
- Roboze. (n.d.). *Roboze.com*. Noudettu osoitteesta
<https://www.roboze.com/en/resources/difference-between-3d-printing-and-cnc-machining.html>

Stoor, T. K. (2020). 5S on tehokkaan ja turvallisen työympäristön perusta. *Lean-erikoisnumero*, 12-15.

Vink. (n.d.). *Vink.fi*. Noudettu osoitteesta <https://www.vink.fi/tuotteet/tekniset-muovit/levyt/polyasetali-levyt>

Xometry. (12. 9 2022). *Xometry.com*. Noudettu osoitteesta <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/3d-printing-vs-cnc-machining/>