



MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN LAITTEET JA SOVELLUKSET ALUEELLISESSA TEKNOLOGIAKLUSTERISSA

Ilkka Vanttaja, Mikko Nykänen ja Eetu Huttunen

Ilkka Vanttaja, Mikko Nykänen ja Eetu Huttunen

MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN LAITTEET JA SOVELLUKSET ALUEELLISESSA TEKNOLOGIAKLUSTERISSA



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu



Etelä-Savon
maakuntaliitto



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020

XAMK TUTKII 23

KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU

SAVONLINNA 2023

© Tekijät ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu
Kannen kuva: Mikko T. Nykänen
Taitto ja paino: Grano Oy
ISBN: 978-952-344-467-6 (PDF)
ISSN: 2489-4575 (verkko)
julkaisut@xamk.fi

LUKIJALLE

Ajatus 3D-tulostusteknologiaan tarttumisesta Xamkin Savonlinnan kampuksella syntyi keskusteluissa, joita Xamk jatkuvasti järjestää alueen teknologiaklusteriin kuuluvien yritysten kanssa. Keväällä 2018 asiasta teetätettiin Tikomat Oy:llä selvitys, ja yhdessä yritysten kanssa jatkettiin tarveselvitystä yhtenä työpakettina Työ- ja elinkeinoministeriön (TEM) rahoittamassa Biokasvu-hankkeessa vuosina 2018–2019. Tämä esityö johti Savonlinnassa laiteinvestointeihin ja kehitystoiminnan käynnistämiseen tähtäävän hankeparin valmisteluun. Niille haettiin rahoitusta keväällä 2019 Euroopan aluekehitysrahastosta (EAKR).

Vuosina 2020–2021 toteutettua AMAP-hanketta rahoittivat Etelä-Savon Maakuntaliitto (EAKR), Xamk Oy, Andritz Savonlinna Works Oy, Oy Esmarin Composites Ltd, Ket-Met Oy, Savox Communications Oy, Joros Oy, Riitek Oy, Makron Engineering Oy, Punkaharjun Puutaito Oy, SAMI-Palvelut Oy ja Savonlinnan Oopperajuhlat Oy. AMAP-laite-rinnakkaishanketta rahoittivat puolestaan Etelä-Savon Maakuntaliitto (EAKR), Xamk Oy ja Savonlinnan kaupunki. Tässä julkaisussa esitellään lyhyesti hankeparin tuloksia.

TEKIJÄT

ILKKA VANTTAJA, DI, TKI-asiantuntija

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

MIKKO T. NYKÄNEN, DI, TKI-asiantuntija

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

EETU HUTTUNEN, DI, TKI-asiantuntija

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

SISÄLTÖ

LUKIJALLE	3
TEKIJÄT	4
1 JOHDANTO	6
2 PILOT-YMPÄRISTÖN RAKENTAMINEN	8
2.1 Erikoismuovien 3D-tulostin Ultra	9
2.2 Komposiittitulostin Mark Two.....	11
2.3 Bioprintteri Brinter 3D.....	12
2.4 Hartsitulostin Asiga PRO 4K65.....	13
2.5 3D-skanneri Handyscan 307.....	14
3 HANKKEEN TUTKIMUKSELLINEN OSUUS	15
3.1 Mikropoliksen materiaalitestien tuloksia	15
3.2 Radiosignaalin ja veden läpäisykokeet Elektroniiikan 3K-tehtaalla.....	19
3.3 Elektroniiikan jäähdytysrakenteiden optimointi.....	23
3.4 Topologiaoptimoitujen rakenteiden suunnittelu.....	25
3.5 Jatkuvan kuidun määrän ja sijainnin FEM-pohjainen simulointi.....	26
3.6 Puupohjaisten materiaalien tulostaminen granulaateista.....	28
4 3D-TULOSTUKSEN JA -SKANNAUKSEN KOKEELLISIA ESIMERKKEJÄ ...	30
4.1 Hitsauskiinnittimiä Mark Two -tulostimella.....	30
4.2 Veneen skannaus ja takaisinsuunnittelu.....	31
4.3 IoT-anturikotelointi.....	32
4.4 Kovalevyn kiintolevykelkka.....	33
4.5 Nojatuoli.....	34
4.6 Lavaste-elementti.....	35
5 YHTEENVETO	37
6 LÄHTEET	38

1 JOHDANTO

AMAP-hankkeen tutkimuksellisessa osuudessa toteutettiin tulostusmateriaaleille mekaanisia testejä (vetokokeita, taivutuskokeita ja iskukokeita) sekä UV-vanhennuskokeita Xamkin Materiaalitekniikan laboratoriossa Mikpoliksessa sekä vedenläpäisytestejä ja signaalin läpäisytestejä Xamkin Elektroniikan 3K-tehtaalla. Yhdeksi tutkimuksen painopisteeksi valikoitui elektroniikan jäädytysrakenteiden optimointi. Tutkimusosuudessa tehtiin myös tulostustestejä uusilla ja kokeellisilla puupohjaisilla tulostusmateriaaleilla.

3D-tulostuksen esimerkkitapausten tarkoituksena oli toteuttaa erilaisia AMAP-hankkeessa mukana olleiden yritysten innoittamia case-kokeiluja liittyen hankkeen aihepiireihin ja laitehankintoihin. Toteutettuja haasteellisia esimerkkikokeiluja olivat mm. hitsausjigi, IoT-anturikotelo, kypäräkiinnikkeet, akselin ohjausholkki, venttiilihattu, kiintolevykelkka, piirilevyn kiinnittimet, korvakappaleet, elektroniikkakotelo, letkunkiinnittimet, tuulilasin kehyksen skannaus, veneen muotin skannaus, tuoli ja oopperajuhlien lavaste-elementti.

PILOT-ympäristön laitteisto koostuu erikoismuovien 3D-tulostimesta, kuitukomposiittien tulostimesta, bioprintteristä, hartsitulostimesta ja 3D-skannerista. Hankkeessa osoitettiin, että laitteistoilla voidaan testata lisäävää valmistusta vahvoilla kuitulujitetuilla komposiiteilla ja vaativiin olosuhteisiin tarkoitetuilla teknisillä erikoismuoveilla. Laitteilla voidaan valmistaa myös hyvin tarkkoja prototyyppjeä sekä tulostaa kestumuoveja ja esimerkiksi puukuitukomposiitteja suoraan rakeista tekemättä niitä ensin tulostuslangaksi. Lisäksi voidaan käyttää 3D-skanneria käänteiseen suunnitteluun tai laadunvarmistukseen.

Tutkimustoiminnan tulokset osoittavat, että lisäävän valmistuksen muovit ja komposiitit ovat kehittyneet teknisiltä ominaisuuksiltaan siten, että niille löydetään jatkossa yhä enemmän käyttöä myös lopputuotteissa. Samoin materiaalien bioperäisyyteen ja kierrätettävyyteen kiinnitetään lisääntyvässä määrin huomiota. Erityisesti suurten kappaleiden tulostus bio- ja puupohjaisten materiaalien osalta vaikuttaa lupaavalta kehityssuunnalta. Lukuisat koe-esimerkit, joita yritykset ovat PILOT –ympäristöön tuoneet testattavaksi, kannustavat jatkamaan tutkimusta ja kehitystyötä 3D-teknologian parissa paikallisten yritysten tarpeiden pohjalta.

Lisäävä valmistus tarjoaa useita etuja, jotka tekevät siitä kiinnostavan tutkimus- ja kehityskohteen. Materiaalihukka on pieni ja suunnittelun vapaus suuri verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Puhutaan jopa ilmaisesta monimutkaisuudesta. Osia voidaan opti-

moida siten, että turha materiaali jätetään pois. Siten voidaan esimerkiksi keventää kappaleita menettämättä niiden jäykkyyttä ja lujuutta. Osia voidaan yhdistää ja vähentää siten kokoonpanotyötä. Valmistus voi olla hyvin paikallista, jolloin logistiikkaketjut ja toimitusajat lyhenevät. Osien väheneminen ja varaosien digitalisoiminen vähentävät varastojen tarvetta. Prototyypin ja lyhyiden sarjojen valmistamiseksi ei tarvita työkaluja tai kalliita muotteja.

Uusi teknologia on kuitenkin nähtävä muita menetelmiä täydentävänä menetelmänä. Kaikkiin sovelluksiin se ei tietenkään sovi. Kaksi kysymystä korostuvat sitä pohdittaessa: täyttävätkö 3D-tulosteen ominaisuudet sille asetettavat vaatimukset ja miten kustannukset asettuvat perinteiseen valmistukseen verrattuna. Xamkin Elektroniikan 3K-tehdas tarjoaa nyt testipaikan ja koekentän uusille innovaatioille. Työ 3D-tulostuksen parissa on nyt AMAP-hankkeessa aloitettu ja jatkuu varmasti eri muodoissaan sen jälkeenkin. Perimmäisenä tavoitteena on huolehtia alueellisen teknologiaklusterin kilpailukyvyistä tältäkin osin.

2 PILOT-YMPÄRISTÖN RAKENTAMINEN

Xamkin Elektroniikan 3K-tehtaalle Savonlinnaan rakennettiin hankintalain mukaisen kilpailutuksen kautta teollisuustasoinen 3D-tulostuksen testaus- ja pilotointiympäristö tutkijoille ja yrityksille. Kohteena ovat lisäävän valmistuksen prosessit, jotka soveltuvat muovi- ja kuitumateriaalien työstämiseen. Testausympäristö toimii tutkimus- ja kehittämistoiminnan koekenttänä 3D-tulostuksen uusille, teollisuuteen soveltuville materiaali- ja konstruktioiduille.

PILOT-ympäristön laitteisto koostuu erikoismuovien tulostimesta (Ultra), kuitukomposiittien tulostimesta (Mark Two), bioprintteristä (Brinter), hartsitulostimesta (Asiga) ja 3D-skannerista (Handyscan 307). Lisäksi kokonaisuuteen kuuluu ohjelmistoja suunnitteluun ja prosessin monitorointiin sekä lisävarusteita mm. tulosteiden jälkikäsittelyyn. Laitteiston pääkomponentit on esitetty kuvassa 1.

LAITTEISTOA



Kuva 1. AMAP-laitteistoa. Vasemmalla vaativiin kohteisiin tarkoitettujen muovien lankatulostin Ultra, siitä oikealle ylhäällä ns. komposiittitulostin Mark Two, sen alapuolella bioprintteri Brinter, edelleen oikealle hartsitulostin Asiga ja oikeassa yläkulmassa 3D-skanneri Handyscan 307. Kuvakollaasi: Mari Rasku.

2.1 Erikoismuovien 3D-tulostin Ultra

Ultra -tulostimessa (kuva 2) on avoin materiaalirajapinta, joka yhdessä lämmitetyn tuloskammion kanssa mahdollistaa laajan materiaalivalikoiman (taulukko 2). Tulostettavia materiaaleja löytyy perusmuoveista aina vaativiin sovelluksiin kehitettyihin erikoispolymeereihin saakka. Käytössä on Aarni-prosessinmonitorointiohjelmisto, jonka avulla voidaan tarkastella tulostusprosessin aikaisia lämpötiloja. Näin varmistetaan tulosteiden korkeasta laadusta. Aarni mahdollistaa myös tulostusprosessin dokumentoinnin, jolloin tulostusprosessin aikaisia tapahtumia voidaan tarkastella myös myöhemmässä vaiheessa ja tulostetun kappaleen materiaalin jäljitettävyys säilytetään.



Kuva 2. miniFACTORY Oy:n Ultra. Kuva: Mikko Nykänen.

Ultran tärkeimmät tekniset tiedot ovat taulukossa 1.

Taulukko 1. Ultra –tulostimen tärkeimmät tiedot. (miniFactory, 2021a)

Ominaisuus	
Tulostusteknologia	FFF
Tulostustilavuus	330 x 180 x 180 mm
Tulostussuuttimien (2kpl) maksimilämpötila	470 °C
Tulostuspedin maksimilämpötila	250 °C
Tulostuskammion maksimilämpötila	250 °C

Ultra –tulostimessa käytettäviä tyypillisiä tulostusmateriaaleja on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Materiaaleja Ultra –tulostimelle. (miniFactory, 2021b) ja (3DXtech, 2022.)

Materiaali	Erikoisominaisuus
PA Carbon	Lämpötilan kesto 150°C, mekaaninen kestävyys, hyvä pinnanlaatu
PPSU	Lämpötilan kesto 220°C, UL94-V0, autoklaavauksen kesto, kemikaalien sieto
Ultem AM1010F	Lämpötilan kesto 210°C, UL94-V0, kemikaalien sieto, korkea läpilyöntilujuus
Ultem AM9085F	Lämpötilan kesto 170°C, UL94-V0, FST, EN45545-2
TPI	Lämpötilan kesto 240°C, UL94-V0, korkea läpilyöntilujuus
PEKK-A	Lämpötilan kesto 150°C, UL94-V0, FST, EN45545-2, kemikaalien sieto
PEKK-CF	Lämpötilan kesto 150°C, UL94-V0, mekaaninen kestävyys
PC	Lämpötilan kesto 130°C, iskun kestävä ja sitkeä
PC ESD	ESD-yhteensopivuus, mm. elektroniikka koteloinnit ja tuotantojigit
ABS	Lämpötilan kesto 90°C
PETG	FDA hyväksytty

2.2 Komposiittitulostin Mark Two

Mark Two tulostin (kuva 3) mahdollistaa lujien kuitukomposiittikappaleiden valmistuksen. Tässä tutkimuksessa saavutettiin parhaimmillaan yli 160 MPa:n lujuus vetokokeessa (kuva 7), eikä se varmasti ole vielä saavutettavissa oleva maksimilujuus. Pohjapolymeerinä Onyx-materiaali tarjoaa hyvän pinnan laadun ja mittatarkkuuden. Kappaleen sisään mekaanista lujuutta vaativiin kohtiin voidaan määrittää kerroksittainen kuiturakenne jatkuvasta kuidusta mekaanisten ominaisuuksien parantamiseksi.



Kuva 3. Markforged Mark Two. Kuva: Mikko T. Nykänen.

Mark Twon tärkeimmät tekniset tiedot ovat koottuna taulukossa 3.

Taulukko 3. Mark Twon tärkeimmät tekniset tiedot. (Markforged, 2022)

Ominaisuus	
Tulostusteknologia	CFR
Tulostustilavuus	320 x 132 (151) x 154 mm*
Pohjapolymeeri, suutin 1	Onyx (tai Nylon White)
Jatkuva kuitu, suutin 2	Hiilikuitu, Kevlar, lasikuitu, HSHT lasikuitu

*) Tulostusala leveydeltään 151 mm, jos jatkuvaa kuitua ei käytetä.

2.3 Bioprintteri Brinter 3D

3D-bioprinter (kuva 4) soveltuu granulaatti- eli raemuodossa olevien komposiittimateriaalien tulostukseen. Bioprinterillä voidaan toteuttaa tutkimusluontoisia projekteja liittyen erilaisten puukomposiittimateriaalien hyödyntämiseen käytännön sovelluksissa. Bioprinterillä voidaan myös valmistaa pienehköjä protokappaleita ennen siirtymää varsinaiseen sarjatuotantovaiheeseen.



Kuva 4. Brinter. Granu –työkalu oikealla etukulmassa. Kuva: Mikko Nykänen.

Taulukossa 4 on esitetty Brinterin tärkeimpiä teknisiä ominaisuuksia. (Brinter, 2022)

Ominaisuus	
Tulostusteknologia	FGF
Tulostustilavuus	304 x 174 x 43 (75) mm
Tulostussuuttimen maksimilämpötila	250 °C
Tulostusalustan maksimilämpötila	80 °C
Tyypilliset materiaalit	PLA, UPM Formi, Stora Enso Durasense 3D

2.4 Hartsitulostin Asiga PRO 4K65

Asiga Pro 4K:n (kuva 5) toiminta perustuu nestemäisen UV-reagoivan fotopolymeerin kovettamiseen kerros kerrallaan UV-projektorin avulla. Tulostustekniikan etuina ovat nopeus, tulostetun kappaleen tarkat yksityiskohdat ja isotrooppiset ominaisuudet. Asiga Pro 4K -tulostimella voidaan käyttää esimerkiksi Henkel Loctiten teknisiä tulostusmateriaaleja. Näillä materiaaleilla on mahdollista saavuttaa mm. hyvä mekaaninen lujuus (tässä tutkimuksessa 3172:lla ja 3843:lla 30–50 MPa, kuva 7) ja iskunkestävyys (Loctiteam, 2021).



Kuva 5. Asiga Pro 4K -tulostin. Kuva: Mikko Nykänen.

Taulukossa 5 on Asiga Pro 4K -tulostimen teknisiä ominaisuuksia.

Taulukko 5. Asiga Pro 4K-tulostimen tärkeimmät tekniset tiedot. (Asiga, 2022)

Ominaisuus	
Tulostusteknologia	DLP
Tulostustilavuus	176 x 99 x 200 mm
Kerroskorkeus	25–150 mm
Pikselikoko	46 mm

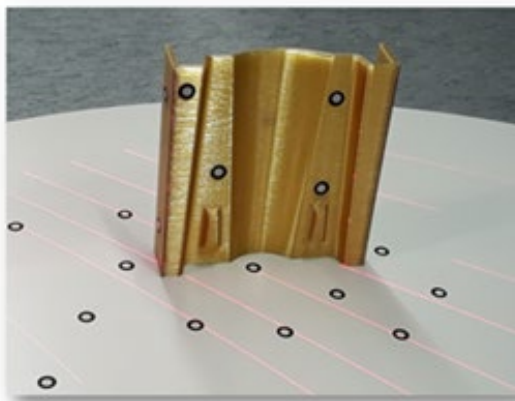
Taulukossa 6 on koottuna Asigan tyypillisiä tulostusmateriaaleja.

Taulukko 6. Loctiten tulostusmateriaaleja Asiga-tulostimelle (Loctiteam, 2021)

Materiaali	Pääominaisuus
Loctite 3172, harmaa	Iskunkestävyys
Loctite 3843, musta	Yleismateriaali
Loctite 8195, harmaa	Kovuus 60A, esim. tiivisteratkaisut
Loctite 3820, kirkas	Optiikkaratkaisut
Loctite IND147, musta	Lämpötilan kesto >230°C, kovuus 94D

2.5 3D-skanneri Handyscan 307

HandyScan307 (kuva 6) on 3D-käsiskanneri, jonka toiminta perustuu kolmiomittaukseen lasertekniikalla. Skannauksessa käytetään 20–100 mm välein kappaleeseen ja/tai sen välittömään ympäristöön kiinnitettäviä kohdistusmerkkejä. Skannerin tarkkuus on 0,02 mm + 0,1 mm/m, resoluutio 0,2 mm ja skannattavan kappaleen kokosuositus 0,1–4 m (Creaform, 2019)



Kuva 6. HandyScan307 3D-käsiskanneri ja 3D-tulostettu muottikappale, johon on kiinnitetty kohdistusmerkkejä skannausta varten. Kuvakollaasi: Mikko Nykänen.

3 HANKKEEN TUTKIMUKSELLINEN OSUUS

Tutkimuksellisessa osuudessa tehtiin tulostusmateriaaleille mekaanisia testejä (vetokokeita, taivutuskokeita ja iskukokeita) ja UV-vanhennuskokeita Xamkin Materiaalitekniikan laboratoriossa Mikpoliksessa sekä vedenläpäisytestejä ja radiosignaalin läpäisytestejä Xamkin Elektroniikan 3K-tehtaalla.

Yhdeksi tutkimuksen painopisteeksi valikoitui elektroniikan jäähdytysrakenteiden optimointi yhdessä rinnakkaisrahoituksella työskennelleen diplomityöntekijän, kilpailutetun tutkimusalihankkijana toimineen suunnittelutoimiston (Etteplan) ja Etelä-Tanskan yliopiston tutkijan kanssa.

Tutkimusosuudessa tehtiin myös tulostustestejä uusilla ja kokeellisilla puupohjaisilla tulostusmateriaaleilla. Näille materiaaleille etsittiin sovelluskohteita korvaamaan fossiilisia muovimateriaaleja.

3.1 Mikpoliksen materiaalitestien tuloksia

AMAP-hankkeessa toteutettiin 3D-tulostetuille koesauvoille standardien mukaisia veto-, taivutus- ja iskukokeita Xamkin Materiaalitekniikan laboratoriossa Mikpoliksessa Mikkelissä. Materiaalien valmistajat tarjoavat paljon valmistakin dataa tuotteistaan, mutta omilla testeillä haluttiin koestaa ja vertailla koesauvoja samoissa olosuhteissa tehdyissä testeissä ja samalla tarkastella omien tulostusprosessien toimivuutta.

Haluttiin testata myös kuitulujittamisen vaikutusta. Vetokokeissa käytettiin standardia ISO527-2/1A (tai /1B), taivutuskokeissa jatkuvalla kuidulla lujitetuille ISO14125 Class II- ja muille ISO178- sekä iskukokeissa ISO179-1/1-standardia, jossa sauvan leveys oli muutettu 10 mm:stä 20 mm:iin. Testeihin valitut materiaalit on esitetty taulukossa 7.

Taulukossa 7 PEI on polyeetteri-imidi, PA polyamidi, CF lyhytkuituinen hiilikuitu ja HSHT GF korkean lämpötilan lasikuitu. Hiilikuitu 1 ja 2 edustavat eri määriä jatkuvaa hiilikuitua. Jälkimmäisessä on enemmän. Hiilikuitu 2 ja 3 ovat muuten samat, mutta ”kolmosessa” on pitkien kuitujen suunta 45 astetta vetosuuntaan nähden.

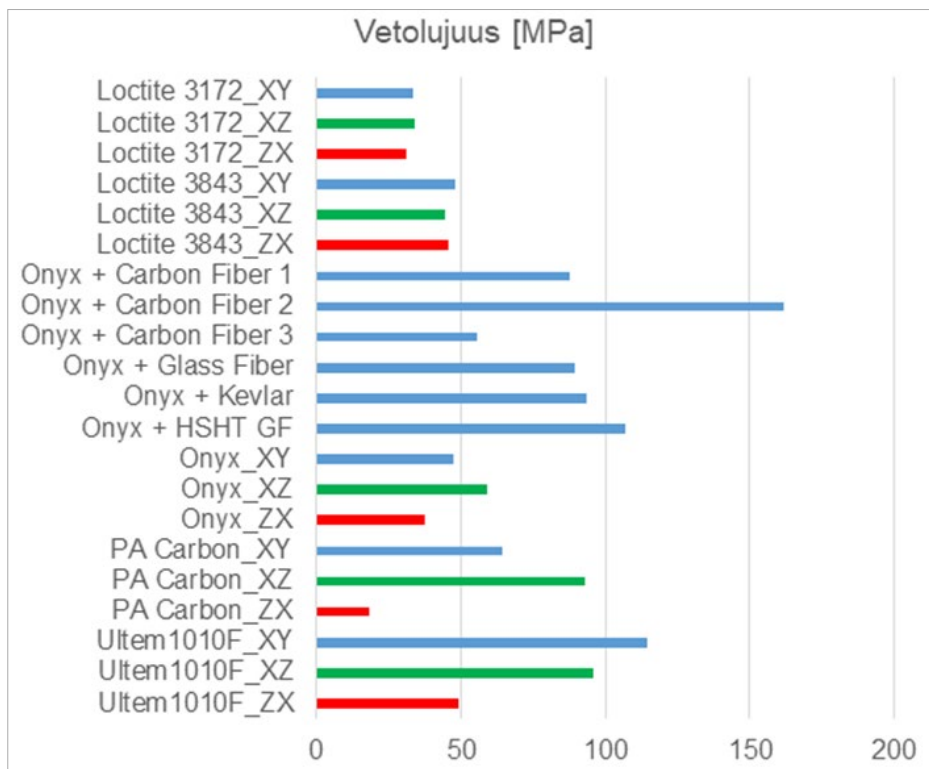
Taulukko 7. Koemateriaalit vetokoetestissä ISO527

Materiaali	3D-tulostin
PEI 1010 (Ultem)	Minifactory Ultra
PA6/66 + CF 10 % (PA Carbon)	Minifactory Ultra
PA6 + CF (Onyx)	Markforged Mark Two
PA6 + CF + jatkuva hiilikuitu 1	Markforged Mark Two
PA6 + CF + jatkuva hiilikuitu 2	Markforged Mark Two
PA6 + CF + jatkuva hiilikuitu 3	Markforged Mark Two
PA6 + CF + jatkuva lasikuitu	Markforged Mark Two
PA6 + CF + jatkuva HSHT GF	Markforged Mark Two
PA6 + CF + jatkuva Kevlar	Markforged Mark Two
Henkel Loctite 3843	Asiga PRO 4K65
Henkel Loctite 3172	Asiga PRO 4K65

Kuvassa 7 esitetyt tulokset ovat keskiarvoja kuuden keskenään samanlaisen vetosauvan kokeista. Kuvassa 7 siniset palkit edustavat lappeellaan, vihreät kyljellään ja punaiset pystyasennossa tulostettuja vetosauvoja.

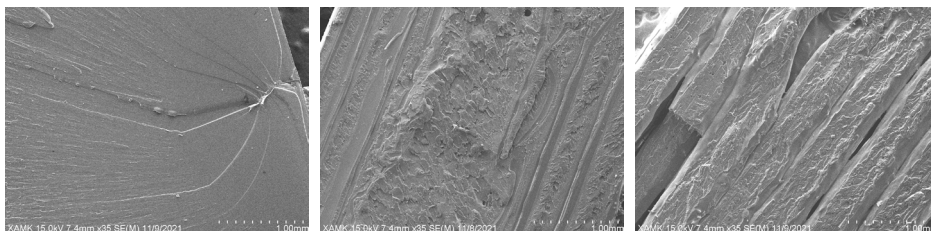
Vähemmän yllättäen parhaat vetolujuudet saavutettiin pätkäkuidun lisäksi jatkuvalla kuidulla lujitetuilla materiaaleilla, ja lujin niistä eli 161,5 MPa oli se laatu, jossa pitkää kuitua oli eniten. Kuiduttomista materiaaleista huomattavan lujaa 114,7 MPa oli lappeellaan tulostettu Ultem 1010. Sen lujuus pystyssä tulostettuna oli sekin vielä 49,3 MPa.

Lankatulostukselle on tyypillistä, että pystyssä tulostetut sauvat ovat heikoimpia. Mielenkiintoinen havainto on sekin, että allasvalokovetetun Loctiten vetolujuudet ovat melko samoja tulostussuunnasta riippumatta (3843:lla 44,7–48 MPa ja 3172:lla 31,1–33,7 MPa).



Kuva 7. Vetokoetuloksia (ISO527) kuuden vetokokeen keskiarvoina. Kuva: Ilkka Vanttaja.

Kuvassa 8 on nähtävissä pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM) otettuja kuvia pystyyn tulostettujen Loctite 3172, Ultem 1010 ja PA Carbon -vetosauvojen murtopinnoista. Hart-situlosteessa 3172 tulostuspalot eivät erotu, mutta lankatulosteissa ne erottuvat. Ultemissa palot ovat hitsautuneet hyvin yhteen, kun taas PA Carbonissa näkyy ilmarakojakin niiden välissä. Sen kohdalla tulostusparametrit eivät ehkä ole olleet optimaaliset.



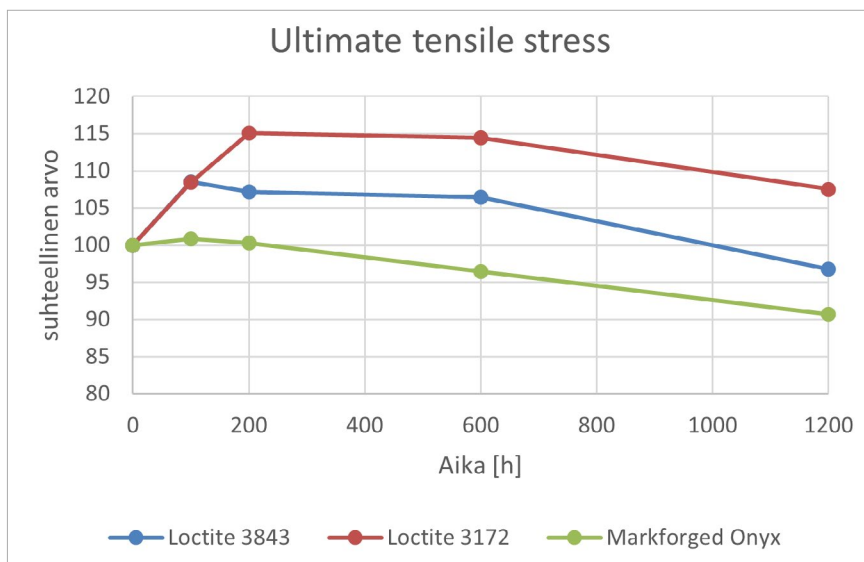
Kuva 8. SEM-kuvia pystyyn tulostettujen Loctite 3172, Ultem 1010 ja PA Carbon -vetosauvojen murtopinnoista. Kuvat: Laura Lukkarinen.

Taivutuskokeet antoivat hyvin samansuuntaisia tuloksia kuin vetokokeetkin – sen sijaan iskuitkeystestit näille samoille koemateriaaleille muuttivat järjestystä. Paras materiaali näissä testeissä oli Loctite 3172, ja muista laaduista selkeästi erottuva, toiseksi paras materiaali oli jatkuvalla lasikuidulla lujitettu Onyx. Iskuitkeyden kohdalla allasvalokovetetunkin materiaalin tulostussuunnalla näytti olevan merkitystä. Paras tulos tuli kyljellään tulostetuilla sauvoilla, toiseksi paras lappeellaan ja huonoin pystyasennossa tulostetuilla.

Mikpoliksessa UV-vanhennettiin koesauvoja ksenonlampujen avulla auringonvaloa mu-
kaillen. Altistusajat (UVA-340, lämpötila 40 °C, kosteus 50 %) olivat 0, 100, 200, 600 ja 1200 t ja niiden jälkeen kukin erä koesauvoja koestettiin. 600 tuntia vastaa 1 vuoden ulkoilman UV-
altistusta Suomessa.

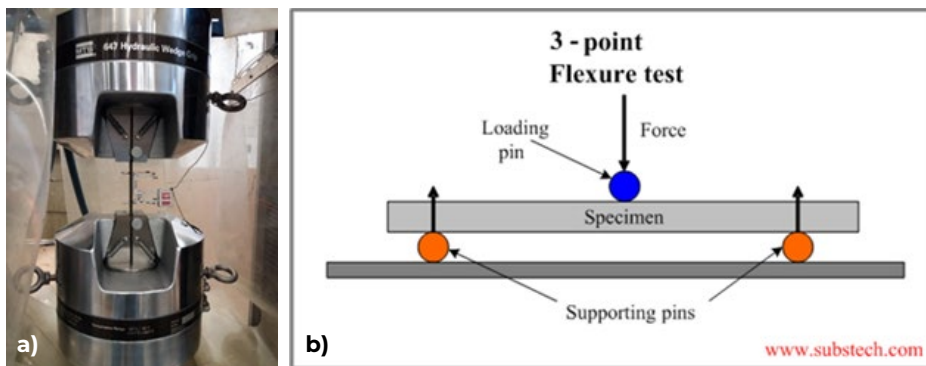
Resiinitulosteiden käyttöä lopputuotteissa rajoittanut tekijä on ollut haurastuminen ajan saatossa. Syynä tähän on ympäristön UV-valon aiheuttama materiaalin kovettumisen jatkuminen ja sitä kautta haurastuminen. Asiga Pro 4K:lle validoiduille Henkel Loctite -resiineille luvataan parempia ominaisuuksia tässä suhteessa.

Vanhennuskokeet Mikpoliksella alkoivat syyskuussa 2021 ja päättyivät marraskuun puoli-
välissä. Testattavina materiaaleina olivat Loctite 3172, Loctite 3843 sekä Markforged Onyx. Testikappaleet olivat veto- ja taivutussauvoja – molempia oli 75 kpl eli 25 kpl/materiaali. Vetokoetulokset on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Loctiten materiaalien 3172 ja 3843 sekä Markforged Onyxin vetolujuus vanhennusajan funktiona. Kuva: Mikko Nykänen.

Kuvasta 9 havaitaan, että erityisesti materiaalien Loctite 3843 ja Loctite 3172 vetolujuus kasvaa alussa UV-jälkikovettumisen seurauksena. Ominaisuudet myös säilyvät hyvin alkutilanteeseen verrattuna. Tämä pätee myös Onyx -materiaaliin. Vastaava ilmiö havaittiin myös taivutuslujuuden ja kimmomoduulien kohdalla. Kuvissa 10 a ja b on esitetty valokuva vetokoejärjestelystä ja periaatepiirros 3-pistetaivutuskokeesta.



Kuva 10. a): Vetokoejärjestely ja **b)** taivutuskoejärjestely. Kuva a): Laura Lukkarinen. Kuva b): Substech, 2012.

3.2 Radiosignaalin ja veden läpäisykokeet Elektroniikan 3K-tehtaalla

Vedenläpäisevyydestäuksen koekappaleet olivat Mark II:lla Onyxista tehtyjä testipikareita kooltaan 150 x 40 x 40 x 4 mm (korkeus x leveys x syvyys x seinämänpaksuus). Tulostetuille koekappaleille tehtiin seuraavanlaisia jälkikäsittelyjä:

- käsittelemätön
- kuumailmakäsittely
- XTC3D-epoksinnoite, sively 1 kerros
- sprayfilleri + spraymaali, 3+3 kerrosta
- spraymaali, 3 kerrosta ja
- spraylakka, 3 kerrosta.

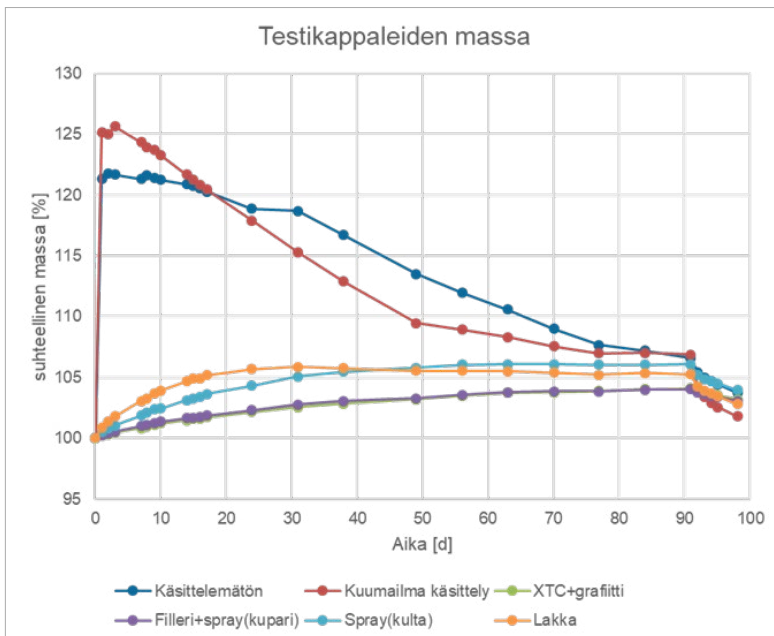
Kappaleiden massaa punnittiin alussa ja vähintään viikon välein. Nestepatsaan korkeus vesiasiassa pidettiin 12 cm:ssä täydentämällä sitä tarvittaessa punnituksen yhteydessä. Kuvan 11 tilanteessa on meneillään vedenläpäisevyydestäus. Koekappaleet on upotettu veteen muovisangossa.

Kuten kuvasta 12 nähdään, käsittelemätön ja kuumailmakäsittely koekappale vuotivat läpi heti alussa siten, että sisäpuolella oli jopa vesipisaroita. Ajan kuluessa pintakerros kuitenkin

”turpoaa” umpeen ja sisärakenne kuivuu. Pinnoitetut koekappaleet sen sijaan pitivät vettä. Kuitenkin myös pinnoitettujen koekappaleiden massa nousi ajan myötä. Todennäköisenä syynä tähän on materiaalin itseensä imemä ilmankosteus, koska tulostusprosessissa materiaalin suhteellinen kosteus on lähellä nollaa. Tulostuksen jälkeen kosteus alkaa tasaantumaan kohti ympäristön kosteutta. Hetkellä 2181 t (=91 päivää) aloitettiin kuivaus. Massat palautuvat kohti lähtötilannetta.



Kuva 11. Vedenläpäisevyytestaus. Kuva: Mikko Nykänen.



Kuva 12. Veden läpäisykokeiden tulos ajan funktiona. Kuva: Mikko Nykänen.

Materiaalivalmistajat eivät yleisesti ilmoita tietoja 3D-tulostusmateriaalin aiheuttamasta radiosignaalin vaimennuksesta, tai korkeintaan saatavilla on tieto lähimmälle vastaavalle ruiskuvalulaadulle. Hankkeen aikana ilmeni tarve tutkia tarkemmin tätä aihepiiriä.

Mittaukset tehtiin 3K-tehtaan GTEM-kammiossa (kuva 13) käyttäen vastaanotinantennina kammion omaa antennaa. Lähetinantennina käytettiin kaapelin päässä olevaa 50 ohmin päätevastusta ja sen epäideaalisuuden aiheuttamaa radiosäteilyä. Näytekappaleet olivat muodoltaan sisähalkaisijaltaan $\varnothing 40$ mm olevia onttoja palloja. Seinäpaksuutena käytettiin 2 ja 4 mm. Tutkittava taajuusalue oli 300 MHz – 3 GHz, sekä kiinnostavia lisenssivapaita taajuuksia edustavat pistetaajuudet 868, 2400 ja 2500 MHz.

Näytemateriaalit:

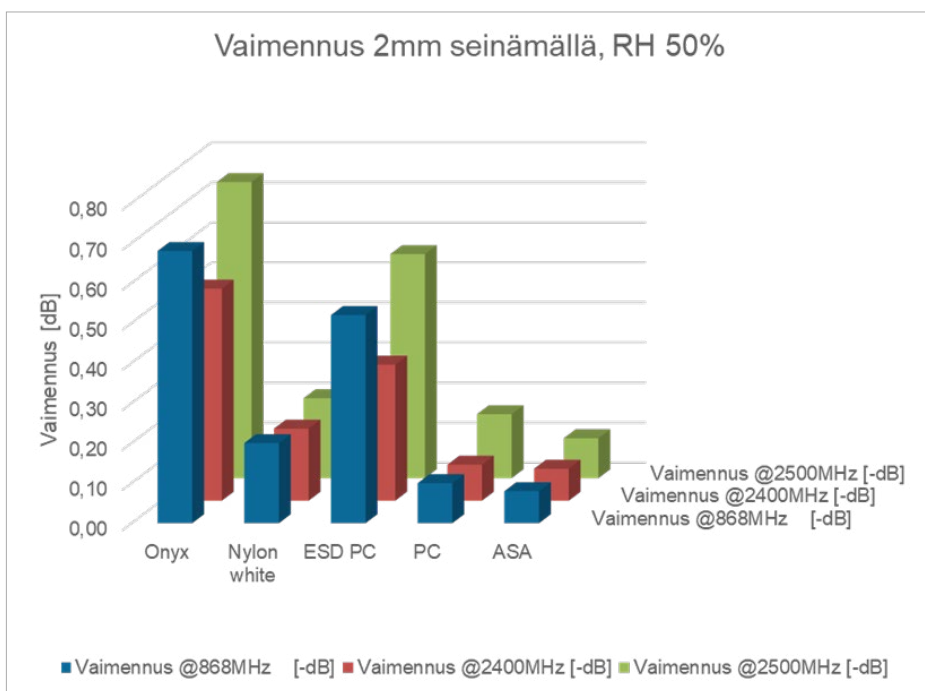
- Onyx (PA6 + lyhyttä hiilikuitua)
- Nylon white (PA6)
- ESD-PC (sisältää sähköä johtavaa lisäainetta)
- PC ja
- ASA.

Ennen mittauksia näytteiden kosteus tasattiin sääkaapissa RH 50 %:iin ja uusintamittauksessa RH 90 %:iin. Mittauksen aluksi mitattiin referenssitaso taajuuspyyhkäisyllä ilman näytettä, minkä jälkeen mittaus toistettiin asettamalla näytepallo lähetinantennin ympärille. Referenssitason määrittäminen suoritettiin uudelleen jokaisen näytteen vaihdon välissä.



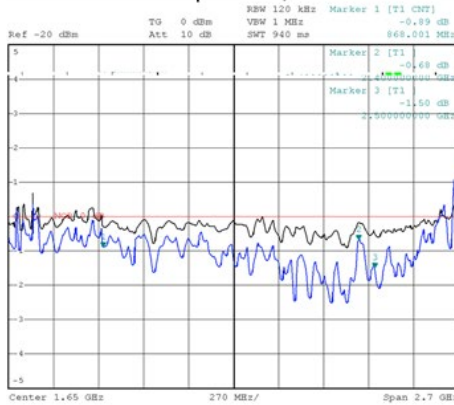
Kuva 13. Radiosignaalin läpäisevyyden mittausjärjestely GTEM-kammiossa. Kuva: Mikko Nykänen.

Kuvassa 14 on esitetty pylväsiagrammin avulla eri materiaalien aiheuttama signaalin vaimennus 2 mm seinämän paksuudella. Kuvassa 15 on esitetty graafisesti vasemmalla 3D-tu-
lostusmateriaalien radiosignaalin vaimennus Nylon white vs. Onyx ja oikealla ESD-PC 2 mm vs. 4 mm taajuuksilla 300 MHz – 3 GHz. Mittaustuloksista voidaan päätellä puhtaiden polymeerien (Nylon White, PC ja ASA) vaimentavan radiosignaalia hyvin vähäisesti. Vas-
taavasti lisäaineilla seostetut laadut (Onyx ja ESD PC) vaimentavat signaalia huomattavasti enemmän. Seinämäpaksuuden vaikutus vaimennukseen on odotetusti lähes lineaarinen. Materiaalin kosteudella ei havaittu olevan mitattavissa olevaa vaikutusta vaimennukseen.

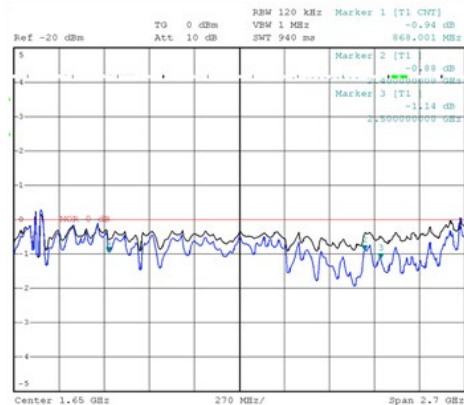


Kuva 14. Vaimennus 2 mm seinämänpaksuudella. Kuva: Mikko Nykänen.

Lisäaineistuksen vaikutus:
Nylon white vs Onyx
4mm seinämäpaksuus, RH 50%



Seinämapaksuuden vaikutus:
ESD-PC 2mm vs 4mm, RH 90%



Kuva 15. Radiosignaalin läpäisevyys taajuuksilla 300 MHz – 3 GHz. Kuva: Mikko Nykänen.

3.3 Elektroniikan jäähdytysrakenteiden optimointi

Elektroniikan jäähdytysrakenteet ovat Elektroniikan 3K -tehtaalla jatkuvan mielenkiinnon kohteina. 3D-tulostuksen odotetaan mahdollistavan nykyistä monimutkaisempien muotojen käytön jäähdytys-elementeissä. Perinteiset ratkaisut eivät välttämättä ole jäähdytysominaisuuksien mukaan optimoituja vaan perinteisten valmistusmenetelmien rajoitteiden mukaisia.

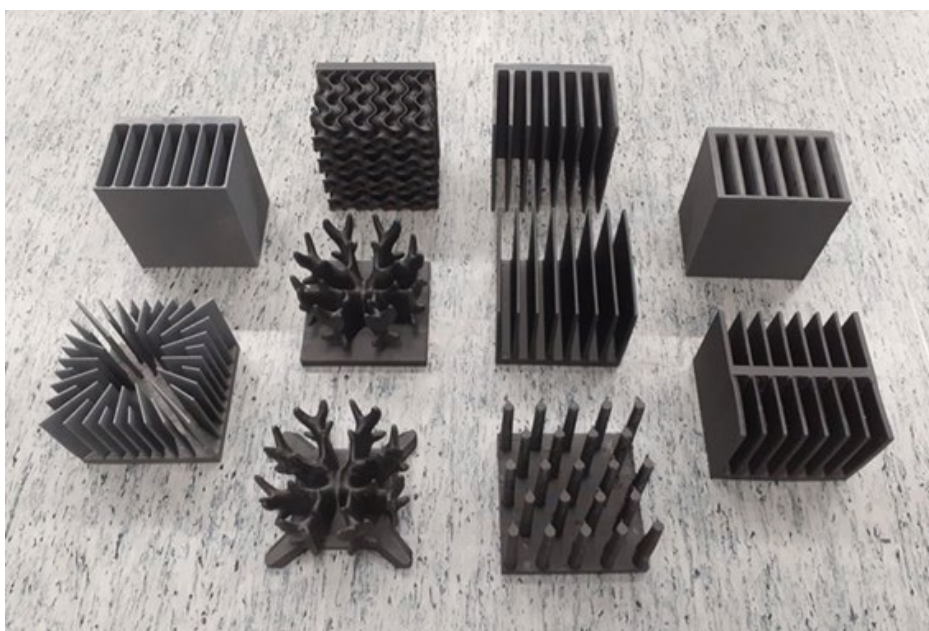
Jäähdytys-elementit on tyypillisesti valmistettu alumiinista tai jostain muusta hyvin lämpöä johtavasta metallista. Nyt niiden rinnalle on tullut myös 3D-tulostettavia lämpöä johtavia muoveja. TCPoly Inc. on ensimmäisenä kaupallisena toimijana tuonut niitä markkinoille myös 3D-tulostusmateriaaleina. Heidän tuotteistaan Ice9 Rigid Nylon on otettu Elektroniikan 3K-tehtaan laitteistolla käyttöön, ja sille on kokeellisesti haettu 3K-tehtaalla miniFactory Ultralle sopivat tulostusparametrit ja sopiva vesiliukoinen tukimateriaali (TCPoly 2021).

Jäähdytysrakenteiden optimointi jäähdytyksen ehdoilla on haasteellista. Viimeisimmän tiedon äärelle päästäksemme haimme suunnittelutukea AMAP-hankkeelle kilpailutettuna tutkimuspalveluna Etteplan Oy:ltä sekä vapaan akateemisen yhteistyön merkeissä Etelä-Tanskan yliopistosta Joe Alexanderseniilta, joka on alan johtavia tutkijoita (Lazarov 2018). Etteplania pyydettiin suunnittelemaan verrokiksi annettua standardielementtiä parempia jäähdytys-elementtejä sekä alumiinista että lämpöä johtavasta muovista. Alumiiniset han-

kittiin kilpailuttamalla (vasemmanpuoleiset kaksi kuvassa 16) ja muoviset 3D-tulostettiin Ultralla 3K-tehtaalla (oikeanpuoleiset kaksi kuvassa 16).

Kuvassa 16 esillä olevat korallimaiset rakenteet (toinen ”sarake” vasemmalta) ovat myös Ultralla tulostettuja. Ne ovat peräisin Joe Alexandersenilta, joka optimoi topologiaa Ete-lä-Tanskan yliopistolla (SDU) käyttäen siihen supertietokoneita ja useiden vuorokausien laskenta-aikoja. Korallirakenteiden yläpuolella on LUTin diplomityöntekijän Eetu Huttusen itse Matlab-ohjelmalla laskema matemaattinen gyroid-rakenne (Huttunen 2021).

Kolmas ”sarake” vasemmalta käsittää pari yksinkertaista levyrakenteista standardielementtiä sekä tappirakenteen, jossa 3K:n tutkijat ovatideoineet tappien poikkileikkauksen muodoksi pisanan.



Kuva 16. Esimerkkejä testattavista jäähdytys-elementeistä. Kuva: Eetu Huttunen.

Kuvassa 16 on mukana vain osa tutkimuksen aikana valmistetuista jäähdytys-elementeistä. Tutkimuksen aikana valmistettiin myös supertietokoneen avulla laskennallisesti topologia-optimoituja jäähdytys-elementtejä, joissa on huomioituna lämpöä johtavasta muovimateriaalista 3D-tulostamalla valmistettujen jäähdytys-elementtien anisotrooppinen koostumus. Anisotrooppinen koostumus vaikuttaa jäähdytys-elementeissä siten, että lämmönjohtavuus on eri tulostussuunnasta riippuen saman kappaleen sisällä. Lämmönjohtavuus on noin

nelinkertainen tulostuskerroksen sisäisessä suunnassa kuin tulostuskerroksien välillä. Tämä luonnollisesti vaikuttaa myös jäähdytyselementtien optimointiin ja syntyviin rakenteisiin.

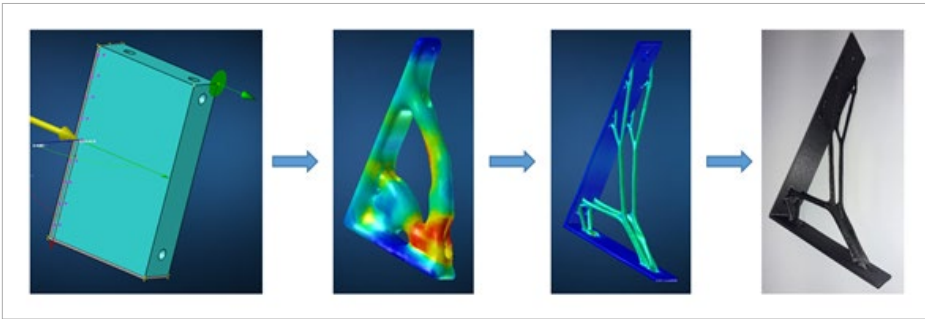
Tutkimuksessa todettiin, että ainetta lisäävillä valmistusmetodeilla valmistettujen rakenteellisesti optimoitujen jäähdytyselementtien jäähdytysteho parani tapauksesta riippuen parhaimmillaan noin 10–20 %. Kuitenkin muovista valmistetuilla jäähdytysrakenteilla voidaan saavuttaa myös muita etuja, kuten keveyshyöty sekä korroosionkesto. Nämä ominaisuudet voivatkin korostua tietyissä teknisissä sovelluksissa ja mahdollistaa lämpöä johtavien muovien hyödyntämisen uusissa sovelluskohteissa (Huttunen 2021).

3.4 Topologiaoptimoitujen rakenteiden suunnittelu

Topologiaoptimoinnilla tarkoitetaan yleisesti tietokonepohjaista laskentamenetelmää, jolla kappaleelle saadaan halutut ominaisuudet käyttäen materiaalia paikoissa, joissa se on näiden ominaisuuksien saavuttamisen kannalta tarpeellista. Haluttu ominaisuus liittyy tyypillisesti kappaleen mekaaniseen kestävyys. Lopputuloksena saatu kappaleen muoto on yleensä monimutkainen ja muistuttaa luonnossa esiintyviä rakenteita.

Tällaisen muodon valmistaminen perinteisillä valmistusmenetelmillä voi olla vaikeaa, ellei jopa mahdotonta. Lisäävällä valmistuksella on valmistettavissa olevien muotojen suhteen vähiten rajoitteita, minkä ansiosta menetelmä soveltuu mainiosti topologiaoptimoitujen rakenteiden valmistukseen.

Optimoinnin alussa määritetään halutut ominaisuudet, esim. voimat, jotka kappaleen täytyy kestää rikkoutumatta. Optimointiohjelma poistaa lähtötilanteesta määritetystä suunnitteluavaruudesta lukuisilla iteraatiokierroksilla kaiken ylimääräisen massan, joka on merkityksetön mekaanisen kestävyuden kannalta. Kuvassa 17 on esitetty hyllynkannattimen suunnittelun eri vaiheet tehtynä hankkeelle ostetulla ”MSC Apex Generative design”-topologiaoptimointiohjelmistolla.

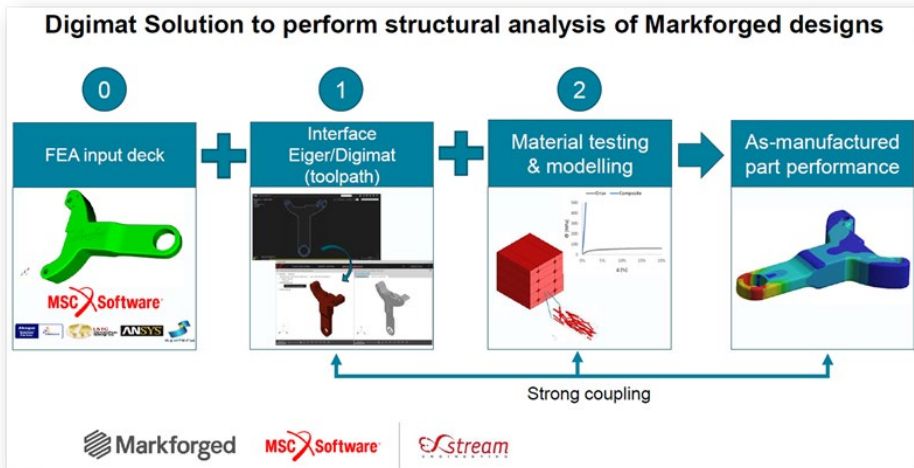


Kuva 17. Topologiaoptimoidun hyllynkannattimen suunnittelun työvaiheet. Viimeisessä vaiheessa kappale on valmistettu 3D-tulostamalla Minifactory Ultralla. Kuva MSC Apex Generative design -ohjelmasta: Mikko Nykänen.

3.5 Jatkuvan kuidun määrän ja sijainnin FEM-pohjainen simulointi

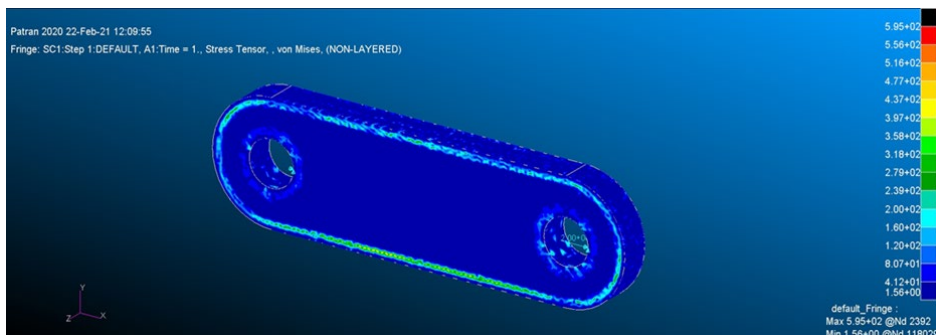
3K-tehtaalle hankitun Markforged Mark Two -tulostimen erikoisuus on mahdollisuus lisätä jatkuvaa kuitua kappaleen sisään parantamaan kappaleen mekaanisia ominaisuuksia. Kuitujen sijainnin ja määrän määrittäminen kappaleessa perustuu usein ainoastaan suunnittelijan kokemukseen. Näin ollen valmistetun kappaleen kestävydestä voidaan tehdä lähinnä valistuneita arvailuja ja todellinen kestävyys selviää ainoastaan valmistamalla kappale ja testaamalla kestävyys käytännössä. Tämä toimintatapa on hidas ja kallis etenkin, jos joudutaan suorittamaan useita iteraatiokiertoja.

Jatkuvan kuidun määrän ja paikoituksen vaikutuksen simuloimiseksi on kehitetty useita ohjelmia käyttävä workflow eli työnkulku (kuva 18), jonka avulla voidaan etukäteen varmistua, jo ennen ensimmäisen kappaleen valmistusta, kappaleen mekaanisista ominaisuuksista FEM-laskennan avulla.



Kuva 18. Jatkuvalla kuidulla vahvistetun kappaleen mekaanisen kestävyuden simulointi. Menetelmä hyödyntää materiaalidataa, tulostuksen työkalurajoja ja FEM-laskentaa. Kuva: MSC/Markforged.

Kuvassa 19 on esitetty erään kappaleen vetolujuuden simuloinnin tuloksena saatu jännitysjaumakuva. Simulaatiossa kappaletta venytetään eli kappaleen toiseen päähän on määritetty venyttävä voima. Kappaleen sisään, ulkokehälle kohtiin, joissa näkyy suurempi jännitys, on määritetty jatkuvaa hiilikuitua vahvistamaan rakennetta. Kuvasta käy ilmi, että hiilikuitu vastaanottaa suurimman jännityksen johtuen sen suuremmasta vetolujuudesta verrattuna pohjapolymeeri Onyxiiin.



Kuva 19. Vetolujuuden simulointi jatkuvalla hiilikuidulla vahvistetulle 3D-tulostetulle kappaleelle. Jännitysjaumasta erottuvat selvästi kappaleen ulkokehälle sijoitetut jatkuvat kuidut. Kuva MSC Patran ohjelmasta: Mikko Nykänen.

3.6 Puupohjaisten materiaalien tulostaminen granulaateista

Puupohjaisia materiaaleja tulostettaessa on helpompi toimia rakeiden eli granulaattien kanssa kuin tehdä materiaali lankamaiseksi tulostusfilamentiksi. Langaksi teko nostaa kustannuksia ja asettaa itsessään teknisiä haasteita. Tulostuslangalta eli filamentilta vaaditaan erilaisia mekaanisia ominaisuuksia. Se ei saa katketa helposti eikä myöskään olla niin pehmeää, että se ”nurjauttaa” syötettäessä sitä 3D-tulostimen syöttöletkun läpi. Näitä ominaisuuksia hallitaan mm. lisäaineilla.

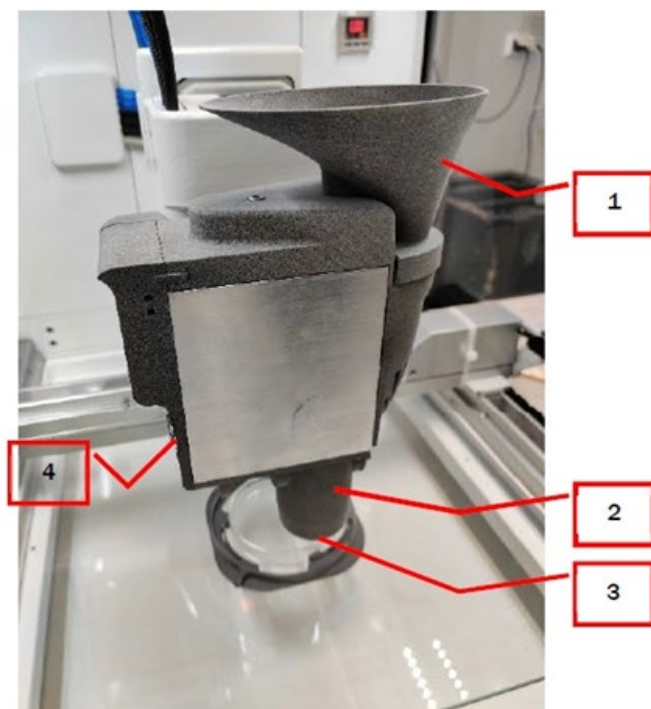
Rakeiden tulostaminen vaatii granutyökalun. Sellainen on esitetty kuvassa 20, jossa

1 = säiliö

2 = ekstruusio-osa, jonka sisällä on materiaali eteenpäin työntävä ruuvi

3 = lämmitettävä suutin ja

4 = jäähdytin.

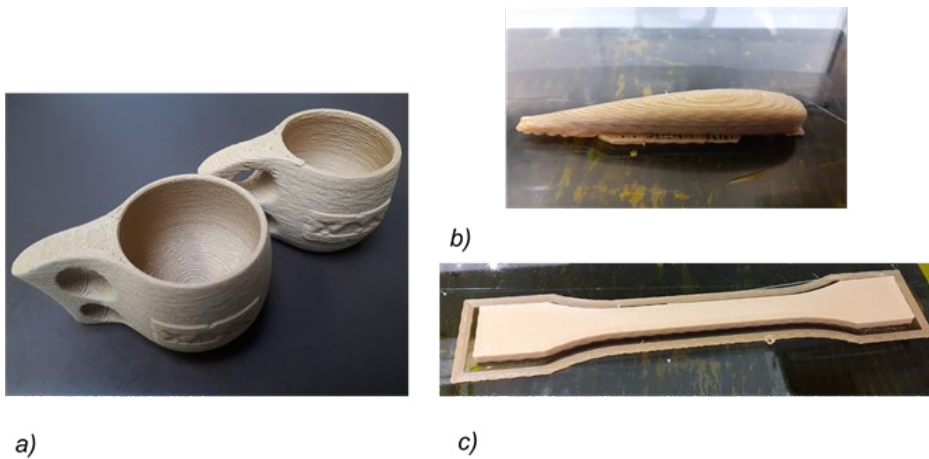


Kuva 20. Brinter -tulostimen granutyökalu. Kuva: Brinter Oy.

Suoraan granulaateista tulostettuja ja tällä laitteella testattuja materiaaleja ovat

- UPM Formi 3D granulateja, selluloosa (20 %) and PLA (80 %)
- Termoplastinen selluloosapohjainen komposiitti “X” (Immonen 2021)
- Stora Enso DuraSense® 3D Plus 50, PP ja 50 % puukuituja.

Kuvassa 21 on em. laitteella listan materiaaleista tulostettuja esimerkkikappaleita.



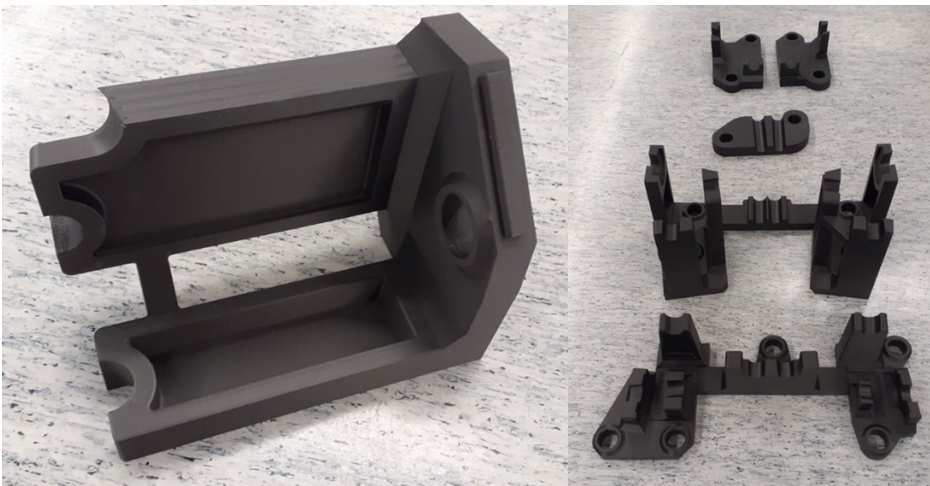
Kuva 21. a) Kuksa-juoma-astioita DuraSensestä. Vasemmalla 1,2 mm suuttimella ja oikealla 2 mm suuttimella 3D-tulostetut kuksat. **b)** Vaappurunko Formi 3D:stä ja **c)** vetosauva VTT:n kehittämästä selluloosapohjaisesta komposiitista. Kuvakollaasi: Mikko Nykänen ja Ilkka Vanttaja.

4 3D-TULOSTUKSEN JA -SKANNAUKSEN KOKEELLISIA ESIMERKKEJÄ

Hankkeen tarkoituksena oli toteuttaa myös erilaisia AMAP-projektissa mukana olleiden yritysten innoittamia case-kokeiluja liittyen hankkeen aihepiireihin ja laitehankintoihin. Seuraavaksi esitellään näitä case-esimerkkejä ja niissä saavutettuja tuloksia

4.1 Hitsauskiinnittimiä Mark Two -tulostimella

3K-tehtaan PILOT-ympäristössä kokeiltiin kokoonpanojigien valmistusta 3D-tulostamalla niitä kuitulujitetusta ja Kevlarilla vahvistetusta polyamidimuovista Mark Two –tulostimella. Joros Oy:llä hitsausjigien avulla hitsataan taivutetuista putkista esimerkiksi veneiden kai- teita. Nykyisellään käytössä ovat teräksestä koneistetut jigit, jotka ovat painavia ja työläitä varastoida, koska niitä on paljon erilaisia.



Kuvat 22 a ja b. Kuvassa vasemmalla (a) lähikuvaa yksittäisestä jigien osasta ja oikealle (b) koko PILOT-ympäristössä 3D-tulostettu setti. Kuvat: Mikko Nykänen.

Kuvissa 22 a ja b on esitetty yksittäinen jigi sekä koko sarja (13 osaa). Jigin osat kiinnitetään mittatarkkaan reikäpöytäan ja hitsausjigi on valmis. Tuotannossa testattaessa 3D-tulostetut

jigit näyttäisivät olevan ensiarvion mukaan riittävän jäykkiä ja niiden käyttölämpötiloja kestäviä. Haasteina ovat materiaalikustannus kyseisellä materiaalilla sekä tulostusaika (491 t). Vertailun vuoksi jigin osia valmistettiin suuremmalla suuttimella vanhalla lankatulostimella (Sigma R19) myös tavallisesta PETG-muovista, joka ratkaisisi materiaalikustannushaasteen (709 € → 90 €) ja nopeuttaisi tulostusta (200 t). Kokeiltaessa se vaikutti olevan riittävän jäykkää ja lämmönkestävää mutta ei niin mittatarkkaa kuin kuituvahvistetusta muovista valmistetussa tapauksessa. Tämä ero tarkkuudessa johtuu ko. materiaalien kohdalla käytetyistä erilaisista tulostimista ja tulostusparametreistä – ei itse materiaalista.

Koska jigin tulostaminen on mahdollista suhteellisen edullisilla pöytätulostimilla, yksi ratkaisu tulostamisen nopeuttamiseen olisi hankkia useampi rinnakkainen laite 3D-tulostamaan samaan aikaan. Materiaalia voitaisiin säästää myös topologian optimoinnilla. Se vaatii kuitenkin paljon työaikaa eikä ainakaan perusmuovin kohdalla olisi järkevää. Joros Oy jatkoi tutkimuksen parissa (Voutilainen 2021).

4.2 Veneen skannaus ja takaisinsuunnittelu

Esmarin Compositesilla oli olemassa veneen rungon sisäpohjasta oleva muotti, mutta CAD-mallia ei ollut saatavilla. CAD-malli on tarpeellinen suunniteltaessa tuotantoketjua esimerkiksi materiaalin käytön optimoimiseksi. Tästä syystä päätettiin kokeilla 3D-skannausta CAD-mallin takaisinsuunnittelua varten.

Skannaustyö (kuva 23) suoritettiin Esmarin Compositesin tiloissa. Ennen skannausta skannattaviin pintoihin kiinnitettiin skannerin vaatimat kohdistusmerkit kuvan 23 mukaisesti. Kun kohdistusmerkit oli kiinnitetty, voitiin suorittaa skannaus. Isohkon, noin 6 m pitkän ja 2,5 m leveän veneen rungon skannaukseen meni kokonaisuudessaan aikaa noin 2,5 t mukaan lukien kohdistusmerkkien kiinnitys ja irrotus. Rungon muotti skannattiin vain toiselta puolelta. Skannauksen jälkeen suoritettiin mittausdatan jälkikäsitteily skannerin omalla VXelements-ohjelmistolla.

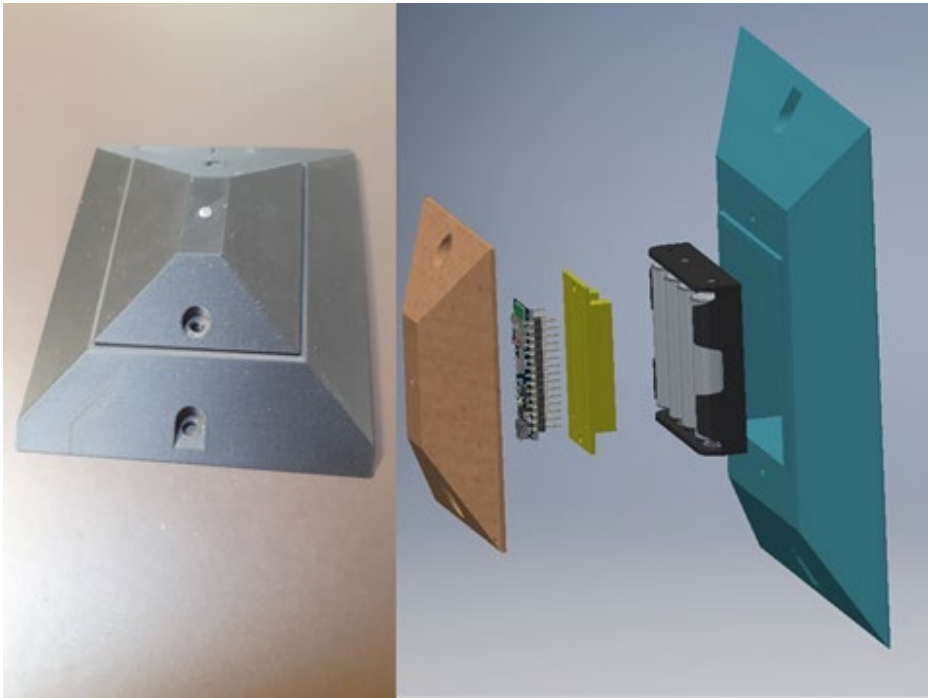
Aluksi skannausdatasta siivottiin pois kaikki ylimääräiset skannautuneet pinnat, minkä jälkeen siistittiin kappaleen ääriviivat. Seuraavaksi määriteltiin skannatun kappaleen koordinaatisto järkeväksi hyödyntäen kappaleen symmetrioita ja tasomaisia pintoja. Viimeisessä vaiheessa skannausdataan sovitettiin NURBS-pinnat koko alueelle. Lopputulos toimitettiin Esmarinille ”.stp” CAD-formaatissa. Skannausdatan muokkaus CAD-malliksi vaati tässä tapauksessa noin yhden työpäivän verran jälkikäsitteilyaikaa.



Kuva 23. Mikko Nykänen 3D-skannaa veneen muotin runkoa ja sisäpohjaa. Kuvassa pienet pyöreät tarrat ovat skannauksen aikana käytettyjä kohdistusmerkkejä. Kuva: Eetu Huttunen.

4.3 IoT-anturikotelointi

Andritzin casen lähtökohtana oli kotelointitarve komponenttilevylle, joka sisältää mikrokontrollerin, bluetooth-lähtetimen ja useita antureita (valo, kosteus, lämpötila, melu...). Kokoa anturikotelolla (kuva 24) sai olla muutaman sentin verran suuntaansa. Koteloon tulee komponenttilevyn lisäksi virtalähde (akku tai paristo) sekä tarvittavat aukotukset antureille. Laitetta käytetään erilaisten tuotantokappaleiden seurantaan. Lisäksi muina vaatimuksina olivat suojaus kosteutta ja lämpötiloja vastaan, (tippuvan) veden kesto ja mekaaninen kestävyys. Lisäksi kotelo ei saa blokata radioaaltoja ja sen muodon on oltava sellainen, että siihen ei helposti tartuta tai takerruta. Kiinnitysvaihtoehtoina esitettiin esim. ripustuslenkki, ruuvi tai nippuside.



Kuva 24. Ensimmäinen versio IoT-anturin kotelosta. Kuva: Mikko Nykänen.

Suunnittelulähtökohdat ovat hieman muuttuneet alkuperäisestä, ja Andritz jatkaa kehitystyötä. Ensimmäisissä harjoituksissa käytetty hiilikuitulujitteinen tulostusmateriaali vaimentaa bluetooth-signaalia liikaa. Tämän vuoksi hankkeessa tutkittiin myös erilaisten 3D-tulostusmuovien signaalin läpäisevyyttä, jotta tulevaisuudessa voidaan valita vastaaviin sovelluksiin paremmin signaaleja läpäiseviä materiaaleja.

4.4 Kovalevyn kiintolevykelkka

Teollisuustietokoneen kovalevyn ejektointimekanismin 3D-tulostamisen lähtökohtana oli ruiskuvallulla valmistettavaksi suunnitellut kappaleet, 2 kpl vipuosia ja yhdystanko (kuva 25). Malleja muokattiin 3D-tulostukseen soveltuvaksi ja samalla parannettiin mekanismin toimivuutta muutaman ongelmakohdan osalta. Vaatimuksena materiaalille on jatkuvan lämpötilan kesto 85 °C:ssa ja joissain tapauksissa (riittävä) paloluokitus. Koekappaleissa materiaalina käytettiin Markforgedin Onyxia (PA6 + lyhyt CF), jonka HDT= 145 °C. Tämä materiaali soveltuu myös lopputuotteeseen. Koekappaleita on tulostettu ja viimeisimmät toimitettu Savoxille käytännön testiin. Mekanismi on todettu toimivaksi lukuun ottamatta yhdystankoa, joka ei ole riittävän jäykkä tulostettuna. Lopullinen mekanismi on päätyntä tuotantoon Savoxin jatkojalostamana.



Kuva 25. Teollisuustietokoneen kovalevyn kiintolevykelkan ejektointimekanismin yksi versio. Tummempi osa kuvaa suunnitellun kovalevyn ulostyöntömekanismin yhtä versiota. Kuva Fusion 360 ohjelmasta: Mikko Nykänen.

4.5 Nojatuoli

Tässä casessa hankittiin kolme isoja 3D-tulostettua tuolia, joiden mallina toimi Punkaliven Tuhto-tuoli. Nämä tuolit tulostettiin Prenta Oy:llä suurten kappaleiden kilpailutettuna tulostusali-hankintana. Kahdessa ensimmäisessä tuolissa (kuvassa 26 vasemmalla) tulostusmateriaalina toimi UPM Formi 3D. Kolmas tuoli (kuvassa 26 oikealla) 3D-tulostettiin Stora Enson DuraSense 3D materiaalista ja osittaistäytöllä, jonka avulla saatiin laskettua lopullisen kappaleen massaa (39 kg → 27 kg).



Kuva 26. 3D-tulostetut tuolit a) UPM Formi 3D:stä ja b) Stora Enson DuraSensestä
Kuvat: Mikko Nykänen.

Puutaidon myöhemmässä tuolien työstettävyyden kokeilussa UPM Formi oli hiottavissa eikä tukkinut hiomapaperia. UPM Formi -materiaalista valmistetuissa tuoleissa hiontapöly toimii ikään kuin kittinä täyttäen tulostuskerrosten välisiä koloja. Myös Durasense 3D oli hiottavissa eikä tukkinut hiomapaperia, mutta hionta vaatii kärynpoiston. DuraSensestä valmistetun tuolin hiotusta lopputuloksesta tehtiin havainto, että tuoli ei näyttänyt enää puumaiselta. Kaikki 3D-tulostetut tuolit ovat kestäneet hyvin istumista.

4.6 Lavaste-elementti

Tässä casessa Oopperajuhlien lavaste-elementtejä tulostettiin alihankintana Prenta Oy:l-
lä. Malli elementtien pintarakenteelle skannattiin Olavinlinnan muurista. Alkuperäinen elementin koko oli 1200 x 1200 x 25 mm. Lämpöliikkeet aiheuttivat vääntyilyä eikä elementtiä saatu aluksi tulostettua kokonaisena. Elementin paksuutta madallettiin 25 mm:stä 15 mm:iin. Kivet erottuvat riittävän selvästi matalampanakin (kuva 27). Ohuemmalla elementillä vääntyminen oli vähäisempää ja tulostus onnistui kokonaisena. Tulostus tehtiin kovalevyn päälle, ja se toimii myös tukena.



Kuva 27. Oopperan lavaste-elementti 3D-tulostettuna. Kuva: Marko Hiltunen.

Edellä jo esitettyjen esimerkkitapausten lisäksi yritysten case-tapauksina käsiteltiin mm. kypärän kiinnikkeiden, akselin ohjausholkin, venttiilihatus, piirilevyn kiinnittimien, elektroniikkakotelon ja letkunkiinnittimien 3D-tulostusta sekä erikseen tuulilasin kehyksen 3D-skannausta laadunvarmistusmenetelmänä. Yhteenveto tärkeimmistä esimerkeistä on koottu taulukkoon 8.

Taulukko 8. Case-esimerkkien yhteenveto.

Case	Yritys	3D-tulostin	Materiaali	Kommentti
Hitsausjigi	Joros	Mark Two	Onyx + Kevlar	Toimiva ratkaisu, materiaali kallis
IoT anturikotelo	Andritz	Mark Two	Onyx	Vaimentaa liikaa radiosignaalia
Kypärä kiinnikkeet	Andritz	Mark Two	Onyx	Toimivia kappaleita
Akselin ohjausholkki	Andritz	Ultra	Ultem 9085	Rikkoutui käytössä kuukausien jälkeen
Venttiilihattu	Andritz	Mark Two	Onyx	Sopii käyttöön
Kiintolevykelkka	Savox	Mark Two	Onyx	Päätyi tuotteeksi
Piirilevyn kiinnittimet	Savox	Ultra	PA Carbon	Toimivia protokappaleita
Korvakappaleet	Savox	Asiga PRO	Loctite	Protoiluun kyllä
Elektroniikka-kotelo	Savled	Sigma R19	ASA	Valmistuskustannus vielä liian korkea
Letkun-kiinnittimet	Esmarin	Mark Two	Onyx + Kevlar	Sopii käyttötarkoitukseensa
Tuulilasin kehys skannaus	Esmarin	-	-	Laadunvarmistus = vertailu 3D-malliin
Veneen muotti skannaus	Esmarin	-	-	Takaisinsuunnittelu, muotista 3D-malli
Tuoli	Puutaito	Alihankinta	Formi/ Durasense	Painavia, malli vaatii kehitystyötä
Lavaste-elementti	Ooppera	Alihankinta	Formi	Haasteita alustaan kiinnityksessä, lopputulos hyvä

5 YHTEENVETO

EAKR –rahoitteisessa AMAP-hankeparissa vastattiin alueellisen teknologiaklusterin tarpeeseen saada lisätietoja 3D-tulostuksen hyödyntämismahdollisuuksista. Hankkeessa rakennettiin PILOT–ympäristö Xamkin Elektroniikan 3K-tehtaalle Savonlinnaan erilaisten ideoiden ja innovaatioiden testaamiseksi käytännössä.

Laitteistoilla voidaan testata lisäävää valmistusta vahvoilla kuitulujitetuilla komposiiteilla ja vaativiin olosuhteisiin tarkoitetuilla teknisillä erikoismuoveilla. Laitteilla voidaan valmistaa myös hyvin tarkkoja prototyyppjejä sekä tulostaa kestumuoveja ja esimerkiksi puukuitukomposiitteja suoraan rakeista tekemättä niitä ensin tulostuslangaksi. Lisäksi voidaan käyttää 3D-skanneria käänteiseen suunnitteluun tai laadunvarmistukseen.

Lisäävän valmistuksen muovit ja komposiitit ovat kehittyneet teknisiltä ominaisuuksiltaan siten, että niille löydetään jatkossa yhä enemmän käyttöä myös lopputuotteissa. Materiaalien bioperäisyyteen ja kierrätettävyyteen kiinnitetään siihenkin lisääntyvässä määrin huomiota. Erityisesti suurten kappaleiden tulostus bio- ja puupohjaisten materiaalien osalta vaikuttaa lupaavalta kehitysuunnalta.

Lukuisat koe-esimerkit, joita yritykset ovat tuoneet testattavaksi PILOT –ympäristöön ja joista tässä esitettiin tarkemmin vain muutama, kannustavat jatkamaan tutkimusta ja kehitystyötä 3D-teknologian parissa paikallisten yritysten tarpeiden pohjalta.

6 LÄHTEET

3DXtech, 2022. 3DXSTAT ESD PC. [verkkodokumentti] [viitattu: 24.8.2022] saatavissa: [ESD PC \(Polycarbonate\) 3D Printing Filament | Made in the USA! \(3dxtech.com\)](https://www.3dxtech.com/3DXSTAT-ESD-PC-Polycarbonate-3D-Printing-Filament-Made-in-the-USA/)

Asiga, 2022. Asiga Pro4K. [verkkodokumentti] [viitattu: 24.8.2022] saatavissa: <https://www.asiga.com/downloads/printers/Asiga-PRO-4K-usen-web.pdf>

Brinter, 2022. Brinter ONE – Multitool 3D Bioprinter, [verkkodokumentti] [viitattu: 24.8.2022] saatavissa: <https://www.brinter.com/product/brinter-one/>

Creaform, 2019. Creaform 307 TECHNICAL SPECIFICATIONS. [verkkodokumentti] [viitattu: 24.8.2022] saatavissa: <https://www.ashtead-technology.com/wp-content/uploads/2021/06/Creaform-HandySCAN-307-3D-Scanner.pdf>

Huttunen, E. 2021. Ainetta lisäävän valmistuksen mahdollisuudet elektroniikan jäähdytysratkaisuissa [verkkodokumentti] [viitattu:25.1.2022] saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2021093047762>

Immonen, K., Willberg-Keyriläinen, P, Ropponen J., Nurmela A, Metsä-Kortelainen S., Kaukonieni, O-V. & Kangas, H. 2021. Thermoplastic Cellulose- Based Compound for Additive Manufacturing. *Molecules* 2021, 26(6), 1701.

Lazarov, B., Sigmund Ole., Meyer, K. & Alexandersen, J 2018. Experimental validation of additively manufactured optimized shapes for passive cooling. *Applied Energy* 226, 330–339.

Loctiteam, 2021. High Performance Photopolymer resins for Prototyping and Mass Production. [verkkodokumentti] [viitattu: 24.8.2022] saatavissa: <https://www.loctiteam.com/materials/>

Markforged, 2022. PRODUCT SPECIFICATIONS Mark Two (Gen 2), [verkkodokumentti] [viitattu: 24.8.2022] saatavissa: https://s3.amazonaws.com/mf_product_doc_images/Datasheets/F-PR-2027.pdf

miniFactory, 2021a. Data sheet (Ultra 3D), [verkkodokumentti] [viitattu: 24.8.2022] saatavissa: [PowerPoint Presentation \(minifactory.fi\)](#)

miniFactory, 2021b. Materials & applications, [verkkodokumentti] [viitattu: 24.8.2022] saatavissa: <https://minifactory.fi/wp-content/uploads/2021/11/miniFactory-Materials-2021-1.pdf>

TCPoly. 2021. Thermally conductive plastics for 3D printing [verkkodokumentti] [viitattu: 25.1.2022], saatavissa: <https://tcpoly.com/>

Susbstech. 2012. [verkkodokumentti] [viitattu: 25.11.2022] saatavissa: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=flexural_strength_tests_of_ceramics

Voutilainen, R. 2021. Lisäävän valmistuksen hyödyntäminen Joros Oy:n kokoonpanojeissa. Insinöörityö. Savonia AMK.

KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU

- 1 *Srujal Shah – Kari Dufva: CFD modeling of airflow in a kitchen environment. Towards improving energy efficiency in buildings. 2017.*
- 2 *Elias Altarriba: Öljyn leviämisen estimointi arviointitaulukoiden avulla osana operatiivista öljyntorjuntatyötä Saimaalla. 2017.*
- 3 *Elina Havia – Jari Käyhkö (toim.): Fotoniikkasensori- ja korkean teknologian kuvantamisen demonstrointi metsäbiojalostamon hallintaan (FOKUDEMO). 2017.*
- 4 *Justiina Halonen – Emmi Rantavuo – Elias Altarriba: Öljyntorjuntakoulutuksen ja -osaamisen nykytila. SCAROIL-hankkeen selvitys öljyntorjunnan koulutus-tarpeista. 2017.*
- 5 *Veli Liikanen – Arto Pesola: Physical fun: exercise, social relations and learning in SuperPark. 2018.*
- 6 *Timo Hantunen – Petri Janhunen (toim.): Sote-alan videoneuvottelujärjestelmien käytettävyys ja käyttöönotto. 2018.*
- 7 *Pekka Turkki: Selluloosa ja selluloosajohdannaiset elintarvikkeissa. 2018.*
- 8 *Elias Altarriba – Minna Pelkonen – Jukka-Pekka Bergman: Laadullinen tapaus-tutkimus opetusresurssien nopean ja voimakkaan vähenemisen vaikutuksista korkeakouluopetukseen. 2018.*
- 9 *Sari Tuuva-Hongisto: Nuorten syrjäytyminen ja alueellisen eriytymisen vähentäminen. Tutkimuskirjallisuuteen ja -raportteihin pohjautuva kartoitus. 2019.*
- 10 *Susan Eriksson: Digitalisaatio nuorisotyön opetuksessa. 2019.*
- 11 *Susan Eriksson – Sari Tuuva-Hongisto: Nuorisotyön digitalisaatio 2030. ”Meidän tulisi osata tarjota nuorille työkaluja maailmaan, jota me emme vielä itse tunne.” 2019.*

- 12 *Susan Eriksson*: Digital applications in youth employment services. 2019.
- 13 *Hilla Sumanen – Jaakko Harkko – Jouni Lahti – Eeva-Leena Ketonen – Olli Pietiläinen – Anne Kouwonen*: Nuorten työntekijöiden työkyky ja työterveyshuollon palvelujen käyttö. 2020.
- 14 *Marja Moisala (toim.)*: Paikkariippumattomuus nuorten tulevaisuuden palveluissa maaseudulla. 2020.
- 15 *Hilla Sumanen*: Experiences and impacts of the post critical incident seminar among rescue and emergency medical service personnel. 2020.
- 16 *Marja-Liisa Neuvonen-Rauhala (ed.)*: XAMK BEYOND 2020. At Your Service – Business Development, Co-operation and Sustainability. 2020.
- 17 *Mikhail Nemilentsev, Jarmo Kujanpää & Jan Kettula (eds.)*: Research on current and development needs in the automotive and motorsport industry. 2021.
- 18 *Vesa Tuomala*: Maritime cybersecurity. Before the risks turn into attacks. 2021.
- 19 *Jaana Poikolainen, Vappu Myllärinen & Ilari Salomaa (eds.)*: Mentoring needs in theory and practice. 2021
- 20 *Hilla Nordquist (toim.)*: MENTALFIREFIT: Tutkimusta mielenterveydestä ja jälkipurkukäytännöistä pelastusallalla. 2021.
- 21 *Marja-Liisa Neuvonen-Rauhala – Cai Weaver (eds.)*: XAMK BEYOND 2021. Sustainable Development and Social Responsibility. 2021.
- 22 *Marja-Liisa Neuvonen-Rauhala – Cai Weaver (eds.)*: XAMK BEYOND 2022. Impacts. 2022.
- 23 *Ilkka Vanttaja, Mikko Nykänen ja Eetu Huttunen*: Materiaalia lisäävän valmistuksen laitteet ja sovellukset alueellisessa teknologiaklusterissa. 2022.
- 24 *Elias Altarriba (toim.)*: Meriliikenteen päästövähennysratkaisut. MEPTEK-hankkeen loppuraportti. 2022.



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu