

**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# ROBOTTITULOSTUKSEN HYÖDYNTÄMINEN RAKENNUSALALLA

TEKIJÄ Sauli Sormunen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Rakennusmestarin tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Sauli Sormunen	
Työn nimi Robottitulostuksen hyödyntäminen rakennusalalla	
Päiväys 1.12.2021	Sivumäärä/Liitteet 22
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia Ammattikorkeakoulu, Design Reform Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia robottitulostamisen mahdollisuuksia prototyyppien, betonivalumuottien sekä muiden rakennusteollisuuden tarpeisiin soveltuvien kappaleiden teossa. Robotiikan ja 3D-tulostuksen hyödyntäminen voisi tuoda rakennusteollisuudelle samanlaisia hyötyjä, mitä on saavutettu muussa valmistavassa teollisuudessa. Näitä ovat mm. geometrinen vapaus, pienempi materiaalikulutus, sekä parempi toistettavuus. Lisäksi tavoitteena oli kehittää tulostusprosessin käytettävyyttä Savonian robottitulostussolussa.</p> <p>Työ aloitettiin perehtymällä käytössä oleviin granulaatti muotoisiin materiaaleihin, joita olivat PP-lasikuitukomposiitti (pp 30 % gf), sekä UPM-Formi-puukuitukomposiitti (sisältää 20 % puukuitua). Opinnäytetyössä käytetty robottitulostuslaitteisto muodostui KUKA KR 120 -teollisuusrobotista, granulaatin kuivauslaitteesta sekä CEAD robotextruder -tulostuspäästä. Näiden lisäksi robottisolulle valmistettiin tulostusalusta sekä erilaisia jäähdytysratkaisuja joilla tulosteista pyrittiin saamaan tasalaatuisempia.</p> <p>Ensimmäisenä robottisoluuun suunniteltiin tulostusalusta, sekä kohdennettu jäähdytys. Seuraavaksi vuorossa oli tulostettavien geometrioiden suunnittelu ja 3D-mallinnus. 3D-mallien valmistukseen, 3D-tulosteiden ajoratoihin, sekä hienosäätöön käytettiin seuraavia ohjelmia: Fusion 360, Slic3r, RoboDK ja Notepad++ -ohjelmia. Työhön kuului 3D-tulosteiden laadun sekä kiinnityksen tarkkailu ja ajon aikana tulosteiden optimointi. Myös tulostusprosessin kokonaisvaltaiseen optimointiin kiinnitettiin huomiota työn aikana.</p> <p>Opinnäytetyöprojektin aikana valmistettiin useita testikappaleita molemmista materiaaleista, sekä prototyyppinä UPM-Formista kahteen projektiin liittyen. Ensimmäinen oli betonivalumuotin valmistus ja toinen oli modulaarinen ulkokaluste biokomposiitista. Opinnäytetyön loppupuolella prosessinhallinta, parametrien tuntemus, sekä kohdennettu jäähdytys mahdollistivat hyvätasoisten tulosteiden valmistamisen.</p>	
Avainsanat Betoni, 3D, 3D-tulostus, 3D-Mallinnus, Muotti, Betonivalu, Betonivalumuotti, Kehitys, Tutkimus, Rakennusala,	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Construction Management	
Author(s) Sauli Sormunen	
Title of Thesis Utilization of Robot 3D-Printing in Construction Industry	
Date 1 December 2021	Pages/Appendices 22
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences	
<p><b>Abstract</b></p> <p>The purpose of this Bachelor's thesis was to research the possibilities of robot 3D-printing for the use of making prototypes, concrete-cast-moulds and to seek possibilities for creating objects to be used in the construction industry. Robotics and 3D-printing could bring construction industry the same opportunities that are used by manufacturing industries. These include, but are not limited to, freedom of geometric shapes, consumption of less material and better ability to reproducibility. In addition, one goal was to develop the usability of the 3D-printing process for Savonia's robot printing.</p> <p>The project started by examining the materials, which were in the form of granulate. The materials used were PP-Fiberglass composite-material (pp 30% gf) and UPM-Formi wood fiber composite material (pla-plastic 20% cellulose). The robot-printing cell consisted of the KUKA KR 120 industrial robot, a granulate drying machine and the CEAD roobtextruder™ print head. In addition to these, a printing platform had to be manufactured for the robot cell, as well as various cooling solutions with the aim of making the prints more uniform.</p> <p>The first phase was to design the printing-platform and cooling system, for the purpose of the printed objects having less difficulties on de-attaching prints during the printing process. The second phase included designing and 3D-modeling geometries, paths for 3D prints and fine-tuning them. Software used for the second phase was Fusion 360, Slicer, RoboDK and notepad++. The work required monitoring the quality of the prints as well as how the prints attached on the printing platform for the 3D-prints. Optimizing the robot settings during the whole project was also part of the project.</p> <p>As a result, several test-pieces were made during the project from both materials, and multiple prototypes were fabricated from UPM-Formi in both cases. The first project was the manufacturing of concrete casting mould, and the second project was creating 3D-print prototypes of modular outdoor furniture with bio composite material. Towards the end of the project, the control of the process, the knowledge of parameters and a targeted cooling system enabled the production of higher-quality prints.</p>	
<p><b>Keywords</b> Concrete, 3D, 3D-printing, Printing, Construction, Development, Research, Concrete, Mould</p>	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	5
1.1	Tausta ja tavoitteet.....	6
1.2	Lyhenteet ja määritelmät.....	7
2	3D-TULOSTUS.....	8
2.1	Betonin valmistus ja 3D-tulostus maailmalla .....	8
2.1.1	Betonivalumuottien valmistus .....	9
2.1.2	Betonin suoratulostus .....	10
2.2	3D-tulostusjärjestelmän kuvaus .....	10
2.2.1	Ohjelmistot .....	11
2.2.2	Käyttöön liittyvät asiat .....	12
2.2.3	Nopeus, säädöt yms. ....	12
2.3	Materiaalikuvaus .....	13
3	3D TULOSTETTUJEN MUOTTIEN VALMISTUS.....	14
3.1	3D tulostus – edeltävät vaiheet.....	14
3.2	Case 1. Itse valmistettu betonivalumuotti .....	15
3.3	Case 2. Design Reform prototyyppi .....	16
3.4	UPM Formi puukuitu-granulaatti.....	16
4	TULOSTEN ESITTELY.....	17
4.1	Betonivalumuottien valmistus .....	17
4.2	Case 1 ja 2 .....	17
4.3	Tulostusjärjestelmä .....	18
4.4	Materiaalit .....	18
5	POHDINTA JA YHTEENVETO .....	20
	LÄHTEET .....	21

## 1 JOHDANTO

Aihe syntyi asiakasyrityksen yhteistyöhalusta pyrkiä valmistamaan 3D-tulostettu betonivalumuotti. Projektin lopussa toinen yhteistyökumppani ilmaisi mielenkiinnon teknologiaa kohtaan, modulaarisen tuotteen valmistukseen liittyen. Alkuperäisestä betonivalumuotin valmistamisesta 3D-tulostamalla, projekti laajeni suuremmaksi mitä oli odotettu.

Projektin aikana käytettiin Savonialle hankittuja uusia laitteita, sekä ohjelmistoja. Suuri osa ajasta käytettiin laitteistojen hienosäätöihin, sekä tiettyjen tulostusprosessin aikaisten ongelmien ratkaisemiseen.

3D-tulostusta on sovellettu usealle eri alalle jo ennen rakennusalaa. Tulostamalla on tuotettu Konditoria-alan suklaasta valmistetuista koristeista avaruusteollisuuden kantorakettien komponentteihin. Lisäävän valmistuksen mahdollisuudet ovat siis erittäin laajat, ja jopa koko valmistusteollisuutta mullistavat.

Rakennusalalla kehitys tapahtuu muuhun valmistavaan teollisuuteen verrattuna hyvin hitaasti. Hitauden taustalla on useita tekijöitä, mm. varovaisuus uusien tekniikoiden käyttöönotossa ja lisäävän valmistuksen osajien vähäisyys. Rakennuslehden mukaan rakennusala käyttää tuotekehitykseen alle puoli prosenttia liikevaihdostaan. (Rakennuslehti, 2019)

Rakennusalalle tulostusta soveltuvaksi on tutkittu jo useamman vuoden ajan. Rakentamiseen liittyvä tulostaminen on vielä suhteellisen alussa, varsinkin Suomessa rakennusalan yleisesti hallitsevan vanhollisen vakaumuksen suhteen. Asiat on totuttu tekemään niin, kuin ne on aina tehty, ja toimivaksi todettu. Alaan liittyen, on kuitenkin jo tuotettu ainakin kerrostaloja, betonivalumuotteja sekä siltoja. Raportissa käydään läpi projektin vaiheita robottitulostukseen liittyen, tulostusalustan suunnittelusta asiakasyrityksen modulaarisiin kalusteisiin.

## 1.1 Tausta ja tavoitteet

Rakentamisen tarve ja kysyntä on viime vuosina lisääntynyt asukasluvun kasvun seurauksena. Tämän myötä materiaalin kulutus, kuten myös rakentamisesta aiheutuneet päästöt ovat myös kasvaneet. Lisäävä valmistus, eli 3D-tulostus voisi olla hyvä vaihtoehto nykyisille menetelmille, sillä materiaalia voidaan lisätä valmistettavaan kappaleeseen juuri sen verran, kun tarvitaan.

3D-tulostuksen hyödyntäminen myös epäsuorasti työkalujen valmistuksessa voisi olla varteenotettava vaihtoehto. Esimerkiksi betonivalumuottien valmistaminen 3D-tulostamalla on yleistymässä kovaa vauhtia ja tätä odotellessa on syytä paneutua aiheeseen tarkemmin, jos haluaa pysyä kehityksen aallonharjalla. 3D-tulostus mahdollistaa eri kokoisten kappaleiden valmistamisen eri materiaaleista. Esimerkkeinä rakennusalaan lähellä olevista käyttökohteista ovat mm. erilaiset kalusteet ja rakenteet.

Euroopassa on jo valmistettu ensimmäinen asuintalo betonilla tulostamalla 4/2021. Eindhovenin kaupunkiin, Hollantiin tulostettu talo ensimmäinen viidestä. Kiinassa on aiemmin valmistettu kerrostalon elementtejä betonitulostuksella, ja Dubaissa toimistorakennus, joten 3d-tulostamisen hyödyntämistä tutkitaan maailmalla laajasti.

3D-tulosteita valmistetaan myös hitsaamalla metallista. Hollantilainen robotiikka-alan yritys, MX3D on jo 2018-vuoden lokakuussa paljastanut ensimmäisen ruostumattomasta teräksestä tulostamalla valmistetun sillan, kuva alla.



KUVA 1 Hollannissa metallista tulostettu silta (Archdaily.com 2018)

Betonimuottien tulostamisella pyritään tässä projektissa tuottamaan nyky menetelmillä vaikeasti toteutettavia muotoja, esimerkiksi veistosmaisia, monimutkaisia kappaleita esimerkiksi seinäpinnalle. Tämän projektin aikana muotit valmistettiin vähintään kahdesta osasta, jotta muotteja voitaisiin hyödyntää useammassa projektissa. Projektissa käytetty UPM-Puukuitu-granulaatti mielletään ympäristölle vähemmän haitallisena materiaalina. Tällä säästetään luontoa, sekä resursseja, joiden rajallisuutta aletaan huomioida jo enemmän. Kehityksen suunta vaikuttaa oikealta ja järkevältä.

Betonimuottien valmistusprosessi vaatii vielä aikaa ja tarkkaa suunnittelua. 3D-suunnittelun sekä tulostamisen ollessa vielä murrosvaiheessa ja sen osaaminen vaatii erikoisosaamista. Työn tavoitteena on tutkia mahdollisuuksia valmistaa sekä kehittää robottitulostettujen muottien ja prototyyppien valmistusprosessia, ja tutkia miten nämä voisivat soveltua rakennusalalle.

## 1.2 Lyhenteet ja määritelmät

AM	Additive Manufacturing, materiaalia lisäävä valmistus
Deformaatio	Kappaleen muodonmuutos muottipaineen vaikutuksesta
Filamentti	Muovia pursottavassa 3D-tulostuksessa käytetty materiaalilanka
Granulaatti	Raemuodossa oleva raaka-aine. 2–3 mm rakeista tulostimen rungossa sekä suuttimessa sijaitsevien lämpöelementtien avulla sulatettava materiaali. Käytetään myös mm. ruiskuvaluissa.
G-koodi	3D-tulostimissa ja työstökoneissa käytettävä ohjelmointikieli
Jakopinta	Kahden muottiosan yhdistävä pinta muotissa
Kestomuotti	Valumuotti, joka säilyy ehjänä useiden valukertojen ajan.
Layer / kerros	Robotin tulostama yhtenäinen alue yhden korkeusmittayksikön, kerroksen aikana
Muottipaine	Voimat, mitkä tulevat aiheutuvat materiaalin aiheuttamasta paineesta, ympäröiviin rakenteisiin.
Muotinpuolisko	Valumuotin puolikas osa, sisältää osan kappaleesta negatiivina.
Negatiivinen päästö	Muoto, joka on leveämpi alaosasta vaikeuttaen valukappaleen poistoa muotista.
PLA-muovi	Polylaktidi muovi, joka valmistetaan uusiutuvista luonnonvaroista, ja se on biohajoavaa.
Polygon	Tietokonegrafiikka, jossa kolmioiden kulmapisteet määrittävät koordinaatistopisteitä.
STL-tiedosto	Tiedostomuoto, jossa kappaleesta on muodostettu pintamalli tasokolmioina.
UPM-Formi	UPM:n valmistama biokuitukomposiitti, jossa on yhdistetty puukuitua 20 % ja 3D-tulostamisessa yleisesti käytettyä PLA-muovia.
Valumuotti	Kappale tai astia, jonka sisäontelossa materiaali saa halutun muodon.
Vaasi-ajo	Yhtenäisenä viivana tulostettava kappale, ilman siirtymisiä tulosteen sisällä tulostuksen aikana.
Viskositeetti	Kuvaa nestemäisen materiaalin kykyä vastustaa virtaamista. Yleisesti se käsitetään nestemäisen materiaalin "paksuudeksi".

## 2 3D-TULOSTUS

3D-tulostaminen vaatii kehitystyötä sekä asiantuntijuutta. Kouluttamalla 3D-osaajia mahdollistuu 3D-tulostuksen kaupallinen hyödyntäminen. Lisäävän valmistuksen, sekä 3D-tulostuksen alan johtavan julkaisun, Wohlers Reportin 2021 englanninkielisessä painoksessa kerrotaan laajasti alaan liittyvistä asioista. Lisäävä valmistus, sekä 3D-Tulostaminen on kasvattanut liikevaihtoa viimeisten 32 vuoden aikana keskimäärin 26.1 % ja vuosien 2017–2020 aikana 20.8 % (*Wohlers Report 2021, 104*). Painoksessa myös on tehty kyselytutkimusta asiakasyrityksiltä, liittyen liikevaihtoon, sekä tuotantoalaan liittyen. Suurinta liikevaihtoa edustaa neljä teollisuudenalaa (yht. 60,2 %), jotka ovat autoteollisuus (16,0 %), ilmailu ja avaruus (15,9 %), akateemiset instituutiot (14,4 %) ja lääke- sekä hammaslääketieteen (13,9 %) edustajat. Rakennusteollisuuden ja arkkitehtuurin edustajat ovat 6,0 % liikevaihdolla listan loppupäässä (*Wohlers Report 2021, 35*).

Wohlers report, sivuilla 104–105 kerrotaan, että vuonna 2019 alkanut koronapandemia on hidastanut lisäävän valmistuksen kasvua ja kehitystä. Vuonna 2020 ala kasvoi vain 7.5 %, 12,785 miljardiin euroon, edellisen vuoden 2019, jolloin kasvua oli 21.2 %, ja se saavutti 11.867 miljardin euron liikevaihdon, sekä vuonna 2018 33.5 % kasvu saavutti 9.795 miljardin liikevaihdon. Lisäävän valmistuksen tuotteista, tai palveluista saatujen tuottojen arvioidaan olevan 5.303 miljardia euroa 2020 (*Wohlers Report 2021, 104–105*).

### 2.1 Betonin valmistus ja 3D-tulostus maailmalla

Betonia on tehty jo antikin Rooman ajoista lähtien. Tästä betonoinnin taidonnäytteestä on vieläkin nähtävillä Roomassa (Italia) sijaitseva Colosseum, amfiteatteri, jossa muinaisroomalaiset saattoivat kokoontua paikalle jopa kymmenien tuhansien ihmisten joukkona. Roomalainen betoni koostui suoraan luonnosta saatavista raaka-aineista, jotka vaativat parhaimmillaan minimaalisen käsittelyn. Pääraaka-aineet olivat: kalkkikivi, kvartsi sekä savi. Roomalaiset käyttivät kuitenkin Vesuvius-tulivuoren kvartsipitoista, tuhkamaista kiviainesta, jonka he murskasivat sekä polttivat korkeassa lämpötilassa.

Lampinen Sami, kertoi opinnäytetyössään (Lisäävän valmistuksen käyttö rakennusalalla; tilannekatsaus 2017), että betonista on tehty suoratulostamalla useita rakennuksia testaustarkoituksessa ja jopa -35 celsiusasteen pakkasessa. Lisäävän valmistuksen tutkiminen on lisääntynyt edellisiin vuosiin verrattuna kiihtyvällä vauhdilla.

Suurien rakennusten tulostamista on tehty jo useamman vuoden ajan. Betonin 3D-tulostamiseen erikoistunut yritys, Apis Cor on vuonna 2019 tulostanut siihen asti maailman suurimman toimistorakennuksen Dubaihin, joka on korkeudeltaan 9,5 metriä ja pinta-alaltaan 640 neliometriä. Kokonaisen rakennuksen tulostaminen on jopa yhdeksän kertaa nopeampaa, nykyaikaisiin menetelmiin verrattuna, kuten Apis Corin verkkosivuilla mainitaan. Rakennusten suoratulostus ja sen täydellinen automaatio on vielä kehityksen alkuvaiheessa. Täydelliseen automaatioon tarvittaisiin automatisoidut materiaalinkuljettimet, materiaalin siirto kuljettimista työstövälineille sekä luultavasti tekoälyä käyttävän valvontajärjestelmän.

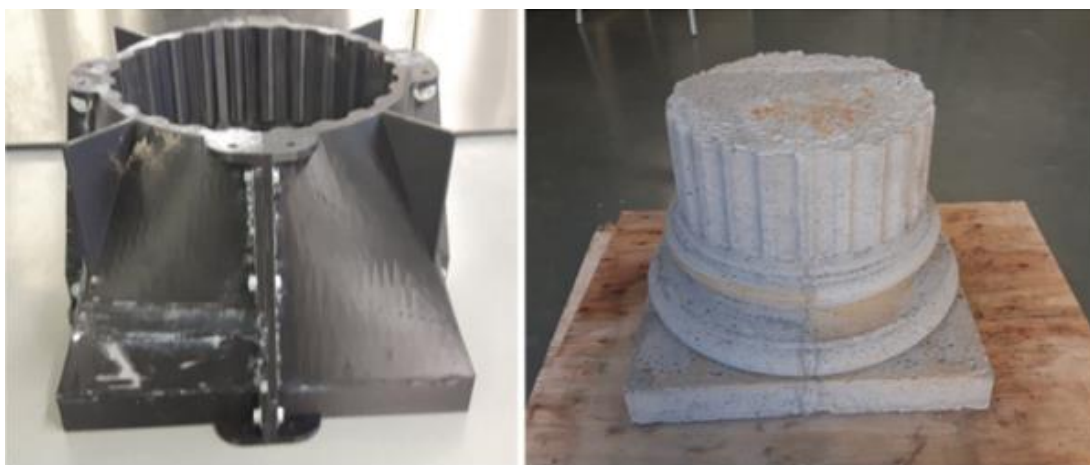


### 2.1.1 Betonivalumuottien valmistus

Betonivalumuotteja valmistetaan perinteisesti vanerista, mutta 3D-tulostuksen tuomien etujen ansiosta myös ympäristöystävälliset tulostusmateriaalit ovat saavuttaneet jalansijaa. Yrityksissä on myös herännyt mielenkiinto 3D-tulostusmenetelmien käytöstä muottien valmistuksessa eri käyttötärpeisiin.

Sami Lampisen opinnäytetyössä kuvataan betonivalumuotin valmistusta seuraavasti:

Lainaus: *–Savonia-ammattikorkeakoulun LIVA-hankkeessa on testattu muovista 3D-tulostettujen muottien toimivuutta betonivaluissa.– –Pursoitusmenetelmän etuna on halvempi materiaali kuin esimerkiksi jauhepetimenetelmissä.– –Ensimmäisenä koemuottina hankkeessa suunniteltiin ja 3D-tulostettiin antiikin kreikkalaisen pylvään alaosan muotti.– –Muotin tulostus kesti noin 105 tuntia. Betonivalussa muottiin laitettiin muottiöljyä, joka helpotti muotin irrottamista ja puhdistamista valun jälkeen.–* Kuva 2, 3D-tulostamalla tuotettu betonivalumuotti, sekä muotista poistettu kappale.



KUVA 2 Betonivalumuotti ja muotista poistettu kappale (Lampinen 2017)

UPM Formi-Materiaalista valmistetaan laadukkaita tuotteita, kuten muotteja sekä kalusteita. Hyvänä esimerkkinä toimii UPM: Lumotuli concrete casting case, jossa on valmistettu betonivalumuotteja kyseisestä materiaalista. Asiakkaalta saaduista tiedoista Lumotulen casessa hyödyistä sekä säästöistä kerrotaan tulostamisen, sekä tulostusmateriaalin käytöllä saavutetuista hyödyistä. Huomattavimpina hyötyinä ovat materiaalin aikaisempiin valmistusprosesseihin verrattuna: hukkaprosentin vähentyminen (jopa 80 % muotista riippuen), tuotantoaika (1 viikko, CNC-koneistetun muotin 4–5 viikkoa), sekä kustannukset (10 000 € vrt. koneistettuun 16 600 €). Seuraavia etuja on todettu materiaalin kehityksen myötä: manuaalinen työ vähenee lähes kokonaan, tuotantoaika on viidenneksen alkuperäisestä, muotin paino laskee kolmanneksen, materiaalihukkaa syntyy erittäin vähän, tai ei lainkaan, sekä materiaali on 100 % kierrätettävä (UPM: Lumotuli concrete casting case 2021).

## 2.1.2 Betonin suoratulostus

Betonin suoratulostusta tapahtuu hieman materiaalin pursotukseen perustuvan 3D-tulostuksen tavoin. Mittakaava on suurempi, ja toiminta poikkeaa tulostuspään osalta siten, että materiaalia ei siinä sulateta, vaan tulostuspäätä käytetään vain materiaalin sijoittamiseen haluttuihin kohtiin. Järjestelmien rakenne sekä komponentit vaihtelevat hieman laitevalmistajittain, mutta yleisesti ottaen prosessi on seuraavanlainen. Tulostuksessa käytettävä betonimateriaali sekoitetaan erillisessä sekoittimessa, mikserissä, jossa vesi, sekä kuiva-ainekset saavat halutun koostumuksen. Materiaalin viskositeetti, kuin myös vesi/sementtisuhte määritetään mikserissä säädettävillä suhteilla. Sekoitettu materiaali siirretään pumpun avulla tulostuspäälle, joka seuraa ja pursottaa materiaalia ennalta määritellyille poluille.

Betonin 3D-tulostuslaitteistoja on useita erityyppisiä, muutamia yleisimpiä ovat käsivarsirobottiin kiinnitettävä tulostuspää, sekä kiskoilla liikkuva tulostuspää (kuva 3). On olemassa myös pienemmille rakenteille tarkoitettuja, rakennuksen sisälle asennettavia tulostimia, jotka pyörivät yhden akselin ympärillä ja nousevat tulostuksen edetessä kerroksittain akselin säteen alueella.



KUVA 3 Betonin suoratulostus, kiskoilla kulkeva tulostinpää kuvituskuva (3Dnatives 1.9.2021)

## 2.2 3D-tulostusjärjestelmän kuvaus

Robottitulostussoluun kuului: KUKA-teollisuusrobotti KUKA KR HA 120 robotti, Cead robotextruder-tulostuspää, sekä granuluaattikuivuri. KUKA- Robotit ovat saksassa valmistettuja ja alun perin suunniteltu autoteollisuuden toistuviin työvaiheisiin. Teollisuusrobotit ovat nykyään teollisuuden vakiolaitteita, jotka pakkaavat, siirtävät, hitsaavat, lisäävät, poistavat tuotteita sekä toimivat tarvittaessa yhdessä muiden robottien kanssa. Projektin aikana Cead robotextruder tulostuspäällä pursotettiin materiaalia jopa 6 kg /h pursotusnopeudella. Granuluaattikuivain kuivaa tulostettavan materiaalin noin kolmessa tunnissa käyttökelpoiseksi, poistamalla granuluaatista säilönnän aikana ympäristön ilmasta keräämän veden.

## 2.2.1 Ohjelmistot

3D-tulostuksen toteutukseen tarvitaan useita ohjelmistoja.

KUKA-robotin käyttöön, sekä mallien tekoon tarvitaan useita ohjelmia, kuten:

Tulostukseen varsinaisesti liittyvät ohjelmat:

- RoboDK Yleiskäyttöinen robottisimulaatio-ohjelma, jolla voidaan ohjelmoida teollisuusrobotteja. Projektin aikana tätä käytettiin kappaleiden asettamiseen tulostusalueelle, sekä tutkittiin siivutettujen mallien eheyttä.
- Slic3r Ohjelma, jolla siivutettiin kappaleet, sekä tuotettiin malleille tarpeelliset ajoradat, määriteltiin tulostuspalon paksuus, tulostus- ja syöttöasetukset.
- Notepad++ Käytettiin pääosin g-koodin jälkikäsitteilyyn (post-processing).

Tulostettava malli on asetettava x/y/z akselin sisäpuolelle, tulostusalueelle. STL on pääasiainen projektissa käytetty tiedostomuoto 3D-mallien tulostusratojen tekoon. Uusia tiedostomuotoja, jotka pakkaavat informaatiota tehokkaammin on 3mf-tiedostomuoto. Ohjelmistoista riippuen käytettävät tiedostomuodot voivat vaihdella, mutta projektin aikana käytettiin roboDK ja slic3r ohjelmilla STL. muotoa.

Kaikki 3D-tulostaminen sisältää laatuun vaikuttavia lainalaisuuksia, joita kannattaa pyrkiä noudattamaan; esim. tulosteiden tulisi olla yhtenäisiä, eivätkä ne saa sisältää jyrkkiä seiniä, jotka kallistuvat yli 45 asteen kulmaan. Tulostimesta riippuen rei'ät, sekä ilman tukea olevat osat voivat olla vaikeita tulostaa. Projektin aikaisen ohjelmiston kehitysvaiheen, sekä kaikkien muuttujien vaikutukset huomioiden, oli tulostaminen haasteellista.

Mallinnusohjelmat:

- Fusion360 Helppokäyttöinen ja halpa, mutta ohjelma vaatii tietokoneelta enemmän laskentatehoa suuremmissa kappaleissa ja kokonaisuuksissa, kuin jotkin kevyemmät ohjelmistot. Soveltuu pääosin yksinkertaisten kappaleiden valmistukseen.
- SolidWorks Teollisuudessa yleisesti käytössä oleva 3D-mallinnusohjelma joka mahdollistaa osien versioinnin ja suurtenkin osakokonaisuuksien hallinnan.

## 2.2.2 Käyttöön liittyvät asiat

KUKA-robotin ja Cead robotextruderin käyttöön liittyy niin pienimuotoisen 3D-tulostuksen yleiset lainalaisuudet, kuin myös suurten materiaalmäärien tuomat hankaluudet, kuten kappaleen jäähdytys. Käyttöön liittyvät asiat pääasiallisesti ovat projektin/ aikaisten laitteistojen ominaisuuksista sekä puutteista.

Tulostaessa robotilla, on huomioitava tulostusmateriaalin ominaisuudet, ympäristön muuttujat, sekä laitteistossa takaisvedon puuttumisen takia jatkuva pursotus. Tämän takia mahdollisimman hyvän pinnanlaadun saaminen kappaleeseen edellyttää vaasi-ajon käyttämistä. Tukirakenteet tulisi suunnitella niin, että ulkopinnassa on niin sisäänmeno- kuin ulostuloaukko, ja että rakenne on ajettavissa vaasiajolla (yhtenäistä linjaa ilman siirtymiä seuraavalle tasolle). Prosessia helpottaa jo useamman yrityksen käytössä oleva tamppari, joka painaa sekä jähdyttää tulostettavaa materiaalia jatkuvasti samalle korkeudelle, tehden tulostuspinnasta tasaisempaa sekä painaen pinnat kiinni toisiinsa tiukemmin.

## 2.2.3 Nopeus, säädöt yms.

Cead robotextruderissa on neljä lämmityselementtiä, jotka voidaan asettaa materiaalin vaatimalle lämpötila-alueelle (kuva 4). Materiaalina käytetty UPM-Formi, on granulaattia, johon on lisätty puukuitua. Materiaali on ollut markkinoilla projektin ollessa käynnissä jo useamman vuoden. Materiaalin ominaisuudet huomioon ottaen, sekä materiaalin syötön määrästä johtuen, täytyi tulostusnopeuksia sekä materiaalin syöttöä seurata, sekä muuntaa kaikkien tulosteiden aikana.



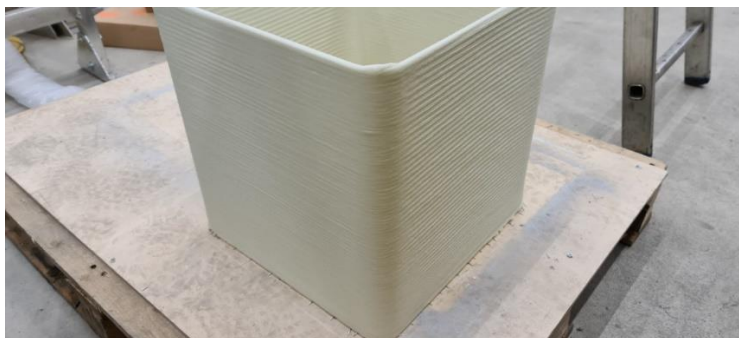
KUVA 4 Cead laitteiston tulostuspään lämmityselementtien asetusnäky (Sormunen 1.9.2021)

## 2.3 Materiaalikuvaus

Projektissa käytettiin kahta materiaalia, PP 30 sekä UPM-Formi. Molemmista materiaaleista tuotettiin useita testikappaleita, sekä jälkimmäisestä kuusi kappaletta prototyyppejä asiakasyritykselle. Testikappaleet olivat pääosin 40 cm x 40 cm reunapyörästettyjä onttoja kuutioita (kuva 4, sivulla 11).

### PP30

Polypropyleeni (30 % lasikuitua) on helposti tulostettava lasikuituvahvistettu materiaali, väriä muuttamaton hieman harmaan/turkoosin värinen, sekä kestävä. PP30 tuote sisältää polypropyleeni-muovia, sekä 30 % materiaalin painosta lasikuitua. Materiaali on sitkeää, sekä tasalaatuista (kuva 5).



KUVA 5 Materiaalin ominaisuuksia kartoittava testituloste (Sormunen 2021)

Polypropyleeni on vastustuskyvyltään erinomainen liuottimia, emäksiä sekä happoja vastaan. Sen sulamispiste on 160 celsiusastetta. Materiaalin tutkimuskohteena kannattaisi tutkia betonivalumuotti, jonka sisältämä betoni on emäksisyydeltään pH 13–14. Polypropyleeniä voitaisiin käyttää kuituina, jo itsessään betonia vahvistavana lisäaineena, mainitaan Sciencedirectin artikkelissa (Sciencedirect 2017)

### UPM-Formi

UPM-Formi, on biokomposiittia, joka koostuu PLA-muovista, sekä puukuidusta. PLA-muovin CO<sup>2</sup> päästöt ovat yleisimmin käytettyihin öljypohjaisiin muoveihin verrattuna 50 % vähäisemmät. UPM-Formi on 100 % biohajoavaa sekä kierrätettävää. UPM-Formi on PLA-muovia, ja se on eniten käytetty muovi 3D-tulostuksessa. Siihen on lisätty puukuitua (selluloosaa), ja tällä pyritään saamaan materiaalista valmistetuista tuotteista ympäristölle ystävällisempiä. Materiaalin kilohinta on suhteellisen edullinen, tiedottaa UPM-Formi verkkosivuillaan (2021).

### 3 3D TULOSETTUJEN MUOTTIEN VALMISTUS

#### 3.1 3D tulostus – edeltävät vaiheet

Tutkimuksen alussa keskityttiin tulostusalustan suunnitteluun sekä rakentamiseen. Paremmiin toimivan tulostusalustan kehittäminen katsottiin tarpeelliseksi, sillä alkuvaiheen tulosteet saattoivat irrota tulostuksen aikana, tulosteiden epätasaisen jäähtymisen, sekä kutistumisen seurauksena. Ensimmäisenä alustana toimi tasainen vanerilevy (kuva 6), johon tulosteet kiinnitettiin nitomalla alustaan ensimmäisten tulostuskerrosten aikana. Tämän monimutkaisen, sekä epäluotettavan kiinnityksen takia oli kehitettävä uusi alusta.

Ensimmäisenä testattiin tartuntapinta-alan kasvattamista leikkaamalla tulostusalustaan uria. Tämä toimi ensimmäistä paremmin, ja huomattiin että urien tulisi olla syvemmät. Lopputuloksena tehtiin kahdesta eri paksuisesta vanerista leikattujen rimojen eri korkeuksilla oleva kampamainen taso, joka kiinnitettiin aluksi trukkilavaan ruuveilla. Lopulliseen tulostusalustaan runko valmistettiin metallista, sekä alustan kiinnitys tapahtuu pulteilla kiinnitettyllä puristimella, puristaen alustan kiinni tukevasti runkoon.



KUVA 6 Tulostusalustan kehitysvaiheet (Sormunen 2021)

Lopullinen rakenne tulostusalustalla oli varsin laadukas, ja toimi odotuksia paremmin. Viimeisimmällä tulostusalustalla oli käyttötarkoitukseen erittäin hyvin toimivat ominaisuudet, kuten mm. urat, joihin tulosteen ensimmäiset kerrokset kiinnittyvät edellisiä versioita paremmin. Kehityksen jatkaminen toisi lisää varmuutta tulosteiden pysyvyyteen tulostusalustalla.

Vaneri oli hyvä materiaalivalinta 3D-tulostusalustaan, koska se ei luovuta lämpöä kovin nopeasti. Myös korkeusvaihtelu vähensi ilmavirtoja tulostuksen aikana. Nämä parannukset edesauttoivat tulosteiden pysymistä alustassa paremmin, sekä materiaalin ollessa urissa, hidasti jäähtymistä.

### 3.2 Case 1. Itse valmistettu betonivalumuotti

Ensimmäisenä projektina oli pienimuotoisen betonivalumuotin valmistus, ja samalla perehdyttiin tulostusprosessin ja ohjelmiston käyttöön. Tulosteiden laatua saatiin parannettua jatkuvasti, sekä ongelmakohdat tulostuksen aikana vähenivät päivä päivältä. Ongelmia ilmaantui betonivalumuotin tukemisesta, jos muotista olisi tehty suurempi, mutta tässä pienessä mittakaavassa ei vielä muottiin kohdistuva paine deformaoinut muottia ja sen myötä mittoja kovinkaan paljoa. Tämä oli niin kutsuttu testikappale.

UPM-Formilla tulostettaessa, ensimmäiset tulosteet tuli ulos varsin hyvänlaatuisina, mutta silloisesta ohjelmistosta johtuen, niissä oli vaikeuksia esimerkiksi kaarien tulostamisessa. Materiaalin syöttöä ei voitu keskeyttää tulosteiden teon aikana vielä tässä vaiheessa.

Betonivalumuotin muodolla, oli tarkoitus testata, kuinka helposti pystytään tulostamaan valmiin muotin monimuotoisen (kaarevia, teräviä, erilaisia muotoja sisältävän) kappaleen valumuotiksi, jota nykyisillä muotinvalmistusmenetelmillä rakennustyömailla, sekä tehtaissa valmistetuilla muoteilla ei voisi toteuttaa ilman kohtuuttomia kuluja. Muotti sai muotonsa erilaisten muotojen yhdistelemisestä, joita ei olisi järkevää toteuttaa (kuva 7).

Testauksen päämäärä oli tehdä suurempi muotti, mutta ajan, sekä yhteistyöyrityksen hiljetessä, oli tämä ainoa järkevä koko, sekä muoto mihin aika riitti.



KUVA 7 Monimuotoinen betonivalu, avattu muotti (Sormunen 26.4.2020)

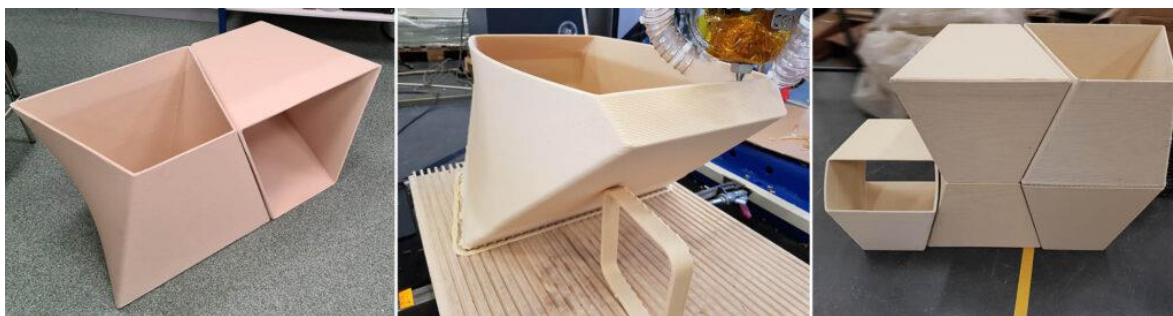
Valuprosessi toteutettiin yhteistyössä betonilaboratorion henkilökunnan kanssa. Betonilaboratorion henkilöstön käytännön kokemus, sekä Excel-taulukko auttoivat valmistamaan betonin sementistä, hiekasta sekä sorasta exceliin tehdyn betonilaskurikaavakkeen avulla. Kiinnitys valumuotin, ja alustan väliin tapahtui kuormausliinoilla muottipaineen aiheuttaman nousupaineen takia. Puristimilla muotti pidettiin kasassa x ja y- suunnassa. Valun onnistumiseksi oli myös käytettävä silikonipohjaista tiivistemassaa muotin kiinnityskohtiin, betonin valumisen välttämiseksi. Muotti avattiin viikonlopun jälkeen, ja betonivalu onnistui odotuksia paremmin, eikä tulostetun muotin kerroksien tuottamat pinta-odot näyttäneet pahalta.

### 3.3 Case 2. Design Reform prototyyppi

Design Reform Oy on helsinkiläinen muotoilutoimisto, joka tuottaa asiakkaiden tarpeisiin palvelu- ja tuotemuotoilua sekä visualisointia ja graafista suunnittelua. Yhteistyö yrityksen alussa käynnistyi betonivalumuotin valmistamisen jälkeen. Projektin idea oli valmistaa prototyyppi ympäristöystävällisestä materiaalista ja tutustua UPM Formi materiaalin käyttöön ja pinnanlaatuun käytännön esimerkin kautta. Tarkoituksena oli tuottaa 1:1 mittasuhteessa olevia prototyyppijä erilaisilla seinämävahvuuksilla ja tulostusparametreillä. Valmistettujen prototyyppien avulla oli tarkoitus tutkia materiaalin käyttömahdollisuuksia erilaisissa komponenteissa useissa eri ympäristöissä, julkisista tiloista ulkoikäyttötarpeisiin. (Kuva 8).

Aluksi valmistettiin kappale, jonka aukon vastakkaisen pinnan ollessa tulostusalustaa vasten. Kappale ilmeni laadultaan heikoksi, johtuen mm. samansuuntaisista kerroksista. Kappaleisiin mallinnettiin jatkopala, jonka avulla kappale pysyi pystyssä tulostusalustalla (kuva 8, keskellä). Lisätukea antoi erilliskappale, joka asetettiin tulostusalustan sekä tulosteen viistopintaa vasten.

Seuraaviin, 45 asteen kulmassa tulostettuihin kappaleisiin saatiin hyvä kerrosten välinen kiinnitys. Erilaisia testattuja syöttöasetuksia olivat palon leveys 6–14 mm, sekä kerroskorkeus 1,5–3 mm.



KUVA 8 Modulaariset istuimet, ohuet prototyyppit, tulostuksen aikainen tuettu, sekä 4kpl valmiina. (Sormunen 10/2021)

### 3.4 UPM Formi puukuitu-granulaatti

UPM-Formi materiaalista tulostettuna tulostusjälki on kohtalaisen hyvää. Materiaali on puukuidun takia hyvin tulostettavaa, mutta kerää granulaattimuodossa ollessa kosteutta. UPM Formi tulostusmateriaalina on herättänyt mielenkiintoa, sen maanläheisen värin, sekä ympäristöystävällisten materiaaliominaisuuksien kanssa. Tulostaminen eri materiaaleilla, tuo jokaisen materiaalin kohdalla omat ongelmat. Tässä materiaalissa ongelmat, tai ominaisuudet voidaan huomata lämmittämällä materiaalia joko kuumemmaksi, tai pidempään, mitä on suositeltu. Materiaali tummuu, mitä korkeammaksi lämpötila kohoaa, sekä lämmityksen pitkittyessä, mustuu ja ainesosat alkavat erottumaan, tuottaen pihkamaista, kirkasta mutta kovaa nestettä.

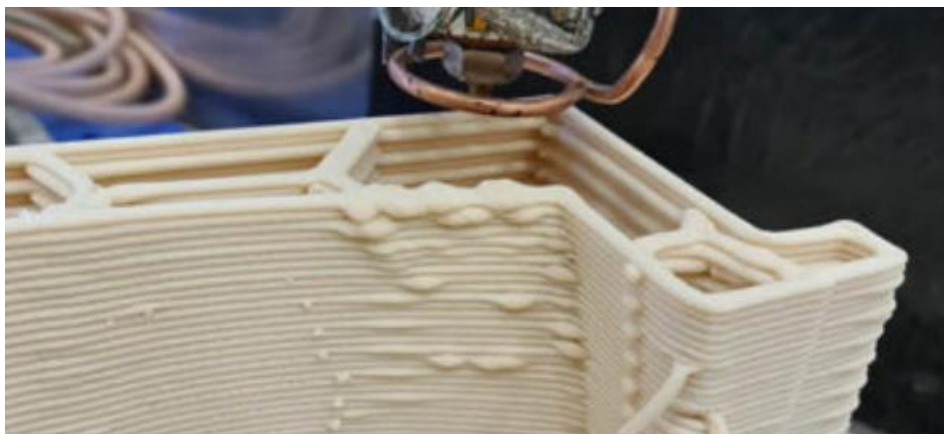


## 4 TULOSTEN ESITTELY

### 4.1 Betonivalumuottien valmistus

Monimuotoisen betonivalumuotin tarkoituksena oli tuottaa kappaleita, joilla voitaisiin nykyisille menetelmille hankalasti tuotettavaa pintaa, sekä testata UPM-Formin soveltuvuutta muottimateriaalina. Muotin valmistuksen aikana pyrittiin kiinnittämään huomiota betonimassan aiheuttamaan muottipaineeseen. Myös seinämävahvuuksilla saatiin muottipaineen aiheuttamaa deformaatiota vähennettyä. Vaikkakin tulostettu kappale oli huomattavasti pienempi, mitä tahdottiin, saatiin muotti toimimaan tahdotulla tavalla valun aikana. Tulostuskerrokset näkyivät erittäin selvästi niin tulosteessa, kuin valetussa betonissakin.

Muottien valmistuksen aikana ilmeni useita ongelmia liittyen tulostuksen aikaisiin pysähdyksiin. Nämä pysähdykset tuottivat pääosin ulkonäköön vaikuttavia ylipursotuksesta johtuvia poikkeamia, mutta joissakin tapauksissa myös seuraavien kerrosten laatu alkoi kärsiä, ja tuloste saattoi epäonnistua jopa kokonaan (kuva 9).



KUVA 9 Tulostuksen aikaisten pysähdysten aiheuttama ylipursotus (Sormunen 3/2020)

### 4.2 Case 1 ja 2

Materiaalin ylipursotus oli ongelmana lähes koko projektin ajan. Tuotteiden tulostaminen oli tapahduttava yhtenäisesti, ilman sisäisiä liikekäskyjä tampauksen, sekä takaisinvedon puuttumisen johdosta. Cead:in kanssa pidetyssä palaverissa mainittiin, että Cead:illa olisi mietitty joko lisäosaa, tai kokonaan uutta mallia tulostuspäästä, jolla olisi materiaalin takaisinvento-ominaisuus. Tämä auttaisi vaikeampien, monimutkaisempien tukien, sekä tulostuksen aikana sisäisten liikkeiden tekoon ilman mittavia virheitä tulosteen näkyviin osiin.

UPM Formin käyttöön suositeltujen lämpötila-arvojen mukana ei tullut oheistietoja, josta olisi selvinnyt niissä käytettyä materiaalin syöttönopeutta tai määrää. Tästä johtuen ensimmäisenä haasteena oli löytää tulostukselle sopivat parametrit: lämpötilat, materiaalin syöttömäärä ja robotin liikkumisnopeus.

Haastavia muotoja ovat tähän asti olleet kaarevat pinnat, jyrkät kulmat sekä korkealaatuiset mallit johtuen liian tarkasta geometriasta. Kun liian tarkka tulostettava geometria siivutetaan ja käännetään robodk:n puolella robotin liikekäskyiksi, syntyy robodk:ssa useita koordinaattipisteitä lyhyelle matkalle. Liian tarkasta mallista voi syntyä kymmeniä tai jopa satoja liikepisteitä muutaman millimetrin matkalle. KUKAn robotissa on ominaisuutena ennakkolaskenta, joka tarkoittaa sitä, että robotilla on aina viisi seuraavaa liikepistettä tiedossa puskurissa. Tämä aiheutti projektin aikana KUKA-Robotilla pysähdyksiä, sekä ohjelmiston kehitysvaiheen takia jatkuvaa pursotusta, huomioimatta mitä, ja missä tulostuspää on menossa, sekä paljonko tulostuspäällä on syöttöarvot.

Haasteet johtuivat pääosin ohjelmiston kehitysvaiheessa olevasta tilasta, sekä toiminnoista, joita ei oltu vielä implimentoitu toimimaan robotin, sekä tulostuspään kanssa.

### 4.3 Tulostusjärjestelmä

Tulostusjärjestelmälle saatiin projektin aikana kehitettyä post-prosessointia huomattavasti tehokkaammaksi, sekä koodattua tiettyjä muuttujia, jotka vähentävät esim. tulostuksen aikaisia pysähdyksiä. Näiden osalta kehitys jäi vielä kesken mutta paransivat ne tulostusjälkeä huomattavasti, ja projektin loppuvaiheessa pystyttiin tulostamaan jo hyvää laatua.

Nopeusmittaukset olivat hankalia todeta projektin aikaisilla tiedoilla, robotin liikenopeuden rajoitukset oli asetettu kolmeen ja puoleen prosenttiin (3,5) maksimista, mutta tulostusnopeuden ollessa ohjelmiston puolelta asetettuna 35–70 mm/s. Tulostusjärjestelmän parhaan tuloksen saavuttamiseksi on tärkeää pystyä vaikuttamaan materiaalien ominaisuuksiin, sekä ympäristön muuttujiin, kuten lämpötila, vetoisuus, ilmankosteus, jäähditys jne.

### 4.4 Materiaalit

UPM-Formin materiaaliominaisuuksista kerättiin tietoa, joista tärkeimmät olivat materiaalin kosteusprosentti sekä tulostuslämpötila. Kosteuden ollessa liian korkea, tuli tulosteista huokoisia, ja liian lämmin tulostuspää aiheutti tulosteiden tummumista. Myös tulostuspään alkulämmitys tuotti suuttimeen jääneen materiaalin tummumisen ja jopa palamisen mustaksi

Lämpötilojen ollessa väärät syötettyyn määrään nähden, tulosteista tuli huokoisempia johtuen määrästä granulaatista, liian korkeista lämpötiloista tai liiasta materiaalisyötöstä. Tulostettu materiaali myös tummui, johtuen liian korkeasta tulostuslämpötilasta, tai hitaasta syöttönopeudesta, joka aiheutti materiaalin lämpenemisen tulostuspään sisällä olevien lämmityselementtien takia. Suuttimesta ulos tuleva materiaali saattoi olla myös liian jäykkää, tai jäähditys oli pielessä, joka taas aiheutti tulosteiden väsymisen ja romahtamisen, tulostusmateriaalin venymisen, katkeamisen, ylipursotuksen tai vastaavia ongelmia.

Tulostusmateriaalin siirto kuivurista lämpimänä, jolloin granulaatti oli vielä 60–80 asteista, tuli tulostuksen laatuun eroavaisuuksia. Esimerkkinä tulostemateriaali tummui hieman, mutta samaan aikaan laadun parantuminen korkeamman viskositeetin, sekä alhaisen kosteusprosentin vuoksi olivat huomioitava eroja aikaisempiin tuotoksiin.

Alla kahdentoista minuutin kosteusmittaustulosten viimeisten tulosten taulukko. Vaalealla pohjalla kuivurista suoraan otettu näyte, sekä tummemmalla pohjalla on Cead laiteen-syöttökulusta otettu 24–72 h näyte (taulukko 1).

Taulukko 1. Granulaatin kosteusmittauksen tulokset. (Sormunen 10/2021 Tutkimustulokset)

Päivämäärä	Aika	Lämpötila	Kosteus	Ilmanpaine
22.10.2021	10:24:21	22.340	2.9400	101.33E+03
22.10.2021	10:24:41	22.340	2.9300	101.33E+03
22.10.2021	10:25:01	22.320	2.9200	101.33E+03
22.10.2021	10:25:21	22.320	2.9500	101.33E+03
22.10.2021	10:40:41	21.950	18.930	101.33E+03
22.10.2021	10:41:01	21.950	18.950	101.33E+03
22.10.2021	10:41:21	21.960	18.920	101.33E+03
22.10.2021	10:41:41	21.960	18.940	101.33E+03

Granulaatille tarkoitetun kuivaimen toimintaperiaatteena on, että granulaatti-kuiluun lastataan granulaattia, noin kahdesta neljään tuntia ennen sen käyttöä, jonka laitteisto lämmittää 80 celsiusasteeseen. Tämän jälkeen granulaatin on tarkoitus kulkea paineilman avulla suoraan kuivurin alaosassa sijaitsevan poistoaukon kautta Cead-laitteiston putkia pitkin tulostuspäälle, jossa granulaatti olisi kuivaa sekä tasalaatuista. Käytännössä tätä ei saatu toimimaan, ja lopulta granulaatti täytyi kuivata useimmiten edellisenä päivänä, sekä manuaalisesti siirtää granulaatit kuivaimesta Ceadin tulostuskaukaloon. Ceadin oma tulostuskaukalo on tiivistetty, mutta tiiviste menee kaasujousen väärältä puolelta, joka aiheuttaa jo kuivatun granulaatin kosteusprosentin nousua ympäristön kosteutta keräten.

Viimeisien tulostusajojen päätyttyä, vertailtiin materiaalin kosteutta kahden näytteen välillä: suoraan kuivurista otettu näyte sekä 3–5 päivää syöttökulussa ollut näyte. Kummatkin näytteet olivat pakattuna ilmatiiviisti, ja ne mitattiin kosteusmittarilla, 12 minuutin aikana. Ensimmäinen mittausta tehtiin kuivurista otetulle näytteelle, jonka tulokseksi saatiin 2,95 % suhteellinen kosteus. Toinen mittausta suoritettiin noin viisi minuuttia ensimmäisen jälkeen, ja syöttökulusta otetulle näytteelle saatiin 18,9 % suhteellinen kosteus. Tulokset viittaavat siihen, että kuivurista poistettu granulaatti imee ympäristön kosteutta erittäin voimakkaasti. Tulokset osoittavat hyvin vahvasti sitä, että kuivuri on erittäin tärkeä saada toimimaan kuten alun perin se oli tarkoitettu toimivaksi robottisolun kanssa. Kosteusprosentti nousi tulostuskulussa säilytetyssä materiaalissa 6,4 kertaiseksi, kuten ylläolevasta taulukosta voi nähdä.

## 5 POHDINTA JA YHTEENVETO

Projekti onnistui kaiken huomioiden, jopa yllättävän hyvin. Ensimmäisten kuuden viikon jälkeen UPM-formi materiaalista tulostaminen alkoi onnistua kohtalaisesti uuden ohjelmiston, sekä post-prosessoinnin käännosten teossa jopa odotuksia paremmin. Laatuheittelyn pääsyinä olivat Ceadin granulaaattisäiliössä yli 12 tuntia säilytetyn granulaatin kosteuden nousu, sekä postprossessorin päivityksien tuoma robotin toimintavarmuus.

Betonivalun aikaisen tiivistämisen, eli täryttämisen kesto oli pidempi mihin aluksi pyrittiin, tämä aiheutti materiaalien erkanemista toisistaan, jossa vesi nousi kohti muotin pintaa, ja kiviaines vajosi muotin pohjalle. Tulostetun muotin valujälki oli yllättävän hyvä, vaikka muotti-öljy sekä pinnan maaluskäsittely jätettiin valupinnoilta pois. Muotin ulkokuori irtosi kohtuullisen helposti.

Johtopäätöksinä voidaan todeta, että projektin aikana kehitystä on tapahtunut huomattavasti niin oman osaamisen, tulostusohjelmiston, kuin tietotaidon karttumisen saralla. Onnistumisia lopulta hyvin onnistui tulostuspeti, tulostusjälki aikaisempiin tulosteisiin liittyen. Lähes kaikkia projektin aikana opittuja asioita voi hyödyntää muuallakin 3D- tulostamiseen liittyvässä, sekä arkisessa elämässä.

Haasteita oli eniten tulostuslaadun, jäähtymisen, ohjelmiston sekä satunnaisten ohjelmistojen kaatumisien osalta. Näistä ongelmista suurin osa on joko poistunut lähes kokonaan, tai osittain.

Uskon hyvin vahvasti tulevaisuuden tuovan monimuotoisia, sekä monimutkaisia muotoja sisältäviä betonielementtejä valmistavia yrityksiä. Monimutkaisuus sekä muotorikkaus tuo niin iloa silmälle, kuin ympäristöllekin. 3D-tulostaminen mahdollistaa erittäin monimutkaisten, sekä nyky menetelmille lähes mahdottomien muotojen tuottamisen. Näiden, sekä olemattoman ja usein täysin materiaalihiukan väheneminen ovat erittäin positiivisesti kilpailukykyyn vaikuttavia asioita.

Onnistuneimmat projektin vaiheet, sekä sen aikana olivat:

- Tulostusalustan suunnittelu ja valmistaminen, ratkaistiin tulostuksen aikainen irtoaminen, sekä tulosteen kokonaisvaltainen, tai osittainen epäonnistuminen.
- Valumuotti, jolla aikaisemmin teknisesti lähes mahdoton muoto voidaan toteuttaa kustannustehokkaasti, ja 3D-tulosteena tuotettuna on hyvä vaihtoehto.

Jatkokehitystarpeita:

- Tulostusten pinnanlaatu, joka vasta projektin loppupuolella saatiin kelvolliselle tasolle.
- Tulostusprosessin optimointia voi vielä parantaa.
- Robottisolun toimintaa tulee kehittää, sekä tulostuksenaikaisia säätöparametreja.
- Ympäristön muuttujien vaikutuksen minimointi ja hallitseminen. Vaatii vielä rahallista panostusta, tai kekseliäisyyttä tulevilta projektityöntekijöiltä.

## LÄHTEET

**VERKKOLÄHTEET**

**Apis Cor** 2018. Maailman suurin tulostettu toimistorakennus. Verkkajulkaisu. apis-cor.com Rakennuksia 3D tulostava yritys. Päivitetty 2018. <https://www.apis-cor.com/dubai-project> (2018) Viitattu 17.12.2021

**Lampinen Sami**, Theseus, opinnäytetyö <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/137342/2017-LIVArakennusala.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Viitattu 10.10.2021

**Sciencedirect** 2021. Polypropyleeni-kuiduilla vahvistettu betoni. Sciencedirect.com. Päivitetty 6/2021 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521000644> Viitattu 17.12.2021

**Rakennuslehti**, 2019 rakennusalan laadun tulevaisuus, verkkajulkaisu. <https://www.rakennuslehti.fi/2019/04/rakennusalan-laadun-tulevaisuus/>

**UPM: Lumotuli concrete casting case**, Betonivalumuotin valmistus, verkkajulkaisu <https://www.upmformi.com/references/concrete-casting-moulds/>

**KIRJALÄHTEET**

**Wohlers Report 2021**, 3D Printing and Additive Manufacturing, Global State of the Industry 2021. Part 1: Introduction, 35 viitattu 29.12.2021

**Wohlers Report 2021**, 3D Printing and Additive Manufacturing, Global State of the Industry 2021. Part 3: Industry Growth, 104–105 viitattu 30.12.2021

**KUVALÄHTEET**

**KUVA 1** Hollannissa metallista tulostettu silta. Archdaily.com 2021. Valokuva. <https://www.archdaily.com/904529/worlds-first-3d-printed-steel-bridge-takes-center-stage-at-dutch-design-week> Viitattu 17.12.2021

**KUVA 2** Betonivalumuotti ja muotista poistettu kappale (Lampinen, 2017, 71–72) <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/137342/2017-LIVArakennusala.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Viitattu 1.12.2021

**KUVA 3** Betonin suoratulostus, kiskoilla kulkeva tulostinpää, verkkajulkaisu, kuvituskuva. Päivitetty 8.1.2021 <https://www.3dnatives.com/en/how-does-a-concrete-3d-printer-work-080120215/> 3Dnatives viitattu 1.9.2021

**KUVA 5** CEAD tulostuspään asetusten säätöpaneeli Valokuva, kuvauspäivä tuntematon. Kuopio: Sauli Sormunen arkistokuva.

**KUVA 4** Materiaalin ominaisuuksia kartoittava testituloste. Valokuva, 2/2021. Kuopio: Sauli Sormunen arkistokuva.

**KUVA 6** Tulostusalustan kehitysvaiheet (Sormunen 2021) Valokuva, kuvauspäivä tuntematon. Kuopio: Sauli Sormunen arkistokuva.

**KUVA 7** Sormunen, Sauli 2021 Monimuotoinen betonivalu, avattu muotti. Valokuva, kuvauspäivä tuntematon. Kuopio: Sauli Sormunen arkistokuva.

**KUVA 8** Modulaariset istuimet, ohuet prototyytit, tulostuksen aikainen tuettu, sekä 4kpl valmiina. Alonen, Antti 2021. Savonia blogi. 3D tulostusta robotilla 2. 11.12.2021 <https://blogi.savonia.fi/3dtulostus/2021/12/11/3d-tulostusta-robotilla-2/> . Viitattu 30.12.2021

**KUVA 9** Tulostuksen aikaisten pysähdysten aiheuttama ylipursotus Valokuva, kuvauspäivä tuntematon. Kuopio: Sauli Sormunen arkistokuva.

**TAULUKOT**

Kuivatun, sekä käsittelemättömän granulaatin kosteusmittaukset (Sormunen 8/2021)