

Valtteri Martikainen

**SUURESSA MITTAKAAVASSA
3D-TULOSTETTU PUUKUITU**
Ekologisuus ja arkkitehtoniset mahdollisuudet

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Markku Karjalainen
Teemu Hirvilammi

TIIVISTELMÄ

Valtteri Martikainen: Suuressa mittakaavassa 3D-tulostettu puukuitu – Ekologisuus ja arkkitehtoniset mahdollisuudet (Large scale wood based additive manufacturing– Ecology and architectural possibilities)

Tampereen yliopisto

Arkkitehtuurin TkK-tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2022

Tässä kandidaatintyössä käsittelen puukuidun 3D-tulostamisen ekologisuutta ja arkkitehtonisia mahdollisuuksia. Betonista on jo valmistettu taloja 3D-tulostamalla, mutta puukuidun 3D-tulostaminen on rakennusteollisuudessa vasta kokeilun asteella. Betoniin verrattuna puukuituisilla 3D-tulostusmateriaaleilla on monia etuja. Puukuidusta voidaan esimerkiksi valmistaa kevyempiä rakenteita, se on ekologisempaa ja 3D-tulostettua puukomposiittia on helpompi jälkikäsitellä esimerkiksi hiomalla tai leikkaamalla. Erityisen hyvin puukuitu soveltuu elementtirakentamiseen, sisäarkkitehtuuriin tai näyttäväksi tilallisiksi koristeiksi. Ilmankosteuden ja UV-säteilyn on havaittu heikentävän puukuituisia 3D-tulosteita, joten ne ovat herkkiä ulko-olosuhteille. Tutkimuksia ulkoilmansietokyvyn parantamiseksi on meneillään ja esimerkiksi erilaisia pintakäsittelyvaihtoehtoja tutkitaan.

Tämänhetkiset puukuituiset 3D-tulostusmateriaalit sisältävät lähes poikkeuksetta aina muovia eli ovat näin ollen puukomposiittia. Muovi on yleisimmin biohajoavaa muovia, jonka raaka-aine voidaan ottaa jätemuovista kierrättämällä. Tulosteen puukuitumateriaali saadaan esimerkiksi puu- ja paperiteollisuuden jätevirroista. Verrattuna kokonaan muovisiin 3D-tulostusmateriaaleihin, puukuidun lisääminen muovin sekaan nopeuttaa sen biohajoavuutta, tekee siitä ekologisempaa ja sillä on myös pienissä määrin käytettynä vahvuutta parantavia ominaisuuksia. Myös täysin muovittomia puisia 3D-tulostusmateriaaleja on kehitteillä, mutta tällä hetkellä ne ovat todella pieniä eivätkä vielä sovellu rakennusteollisuuden käyttöön.

3D-tulostaminen on uusi teknologian ala, jolle vasta etsitään käyttömahdollisuuksia rakennusteollisuudessa. Sen koko potentiaalia ei kuitenkaan ole vielä saatu käyttöön. Tähänastiset 3D-tulostamalla toteutetut rakennukset ja rakenteet ovat vielä mukailleet pitkälti perinteisiä rakennusmenetelmiä. 3D-tulostamalla pystytään valmistamaan vapaamuotoisia kappaleita ja haastavia geometrioita ilman perinteisiä työkaluja. Koska 3D-tulostettu tuote valmistetaan automaattisesti materiaalia lisäämällä ja ilman muotteja, hukkamateriaalia syntyy huomattavasti vähemmän kuin perinteisissä rakennusmenetelmissä. Myös materiaali- ja työvoimakustannukset pienenevät. Kyseessä on uusi teknologia-ala, joka kehittyy koko ajan, ja jolle etsitään jatkuvasti uusia käyttötarkeitä.

Avainsanat: 3D-tulostus, materiaalia lisäävä valmistus, puukuitu, arkkitehtuuri, ekologisuus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|---|----|
| 1. JOHDANTO | 1 |
| 2. PUUKUITU 3D-TULOSTUSMATERIAALINA | 3 |
| 2.1 Ekologisuus | 3 |
| 2.2 Ominaisuudet | 5 |
| 3. PERUSTIETOA 3D-TULOSTAMISESTA..... | 6 |
| 4. 3D-TULOSTAMINEN RAKENNUSTEOLLISUUDESSA..... | 9 |
| 4.1 3D-tulostettujen rakennusten arkkitehtoniset mahdollisuudet | 10 |
| 4.1.1 3D-tulostettujen rakennusten yleispiirteitä..... | 10 |
| 4.1.2 3D-tulostetun rakennuksen jaottelu eri osiin..... | 14 |
| 4.2 Puukuidun 3D-tulostaminen rakennusteollisuudessa..... | 16 |
| 5. YHTEENVETO..... | 19 |
| LÄHTEET | 21 |
| KUVALÄHTEET | 25 |

LYHENTEET

| | |
|-----|--|
| ABS | Akrylinitriliibutadienistyreeni, 3D-tulostuksessa käytetty muovi. |
| CLT | Cross laminated timber. Ristiinliimattu massiivipuu. |
| FDM | Fused Deposit Modeling. 3D-tulostustekniikka. Tästä menetelmästä käytetään myös nimeä FFF. |
| FFF | Fused Filament Fabrication, 3D-tulostustekniikka. Tästä menetelmästä käytetään myös nimeä FDM. |
| LDM | Liquid Deposition Modeling. 3D-tulostustekniikka. |
| PLA | Polylaktidi. 3D-tulostuksessa käytetty biohajoava muovi. |
| SLS | Selective Laser Sintering. 3D-tulostustekniikka. |

1. JOHDANTO

3D-tulostaminen on nopeasti kehittyvä teknologia, jolle löytyy jatkuvasti uusia käyttökoh- teita. Rakennusteollisuudessa 3D-tulostaminen haastaa perinteiset rakennusmenetel- mät ja mahdollistaa aivan uudenlaisten vapaamuotoisten rakenteiden suunnittelun. Ark- kitehdeille 3D-tulostin on jo arkipäiväinen työkalu pienoismallien valmistamisessa, mutta myös kokonaisia rakennuksia on valmistettu 3D-tulostamalla ne esimerkiksi betonista tai savesta. (Turunen 2017, 112–113; García-Alvarado et al. 2021, 3–4, 9)

Rakentaminen 3D-tulostamalla on perinteisiä rakennusmenetelmiä nopeampaa ja hal- vempaa. Koska 3D-tulostettu tuote valmistetaan materiaalia lisäämällä ja ilman muotteja, ei hukkamateriaalia synny. Rakenteet on myös mahdollista suunnitella siten, että vain lujuutta vaativissa kohdissa tulosteen paksuus on suurempi ja muissa kohdissa materi- aalia käytetään vähemmän. Tällä tavalla optimoimalla saadaan valmistettua kevyitä ra- kenteita. Koska tulostaminen on automaattista, myös työvoiman tarve vähenee. Työtur- vallisuuden nähdään myös paranevan, koska työtehtävät muuttuvat perinteisestä käsin rakentamisesta 3D-tulostimen valvontatehtäviksi. (Chandler 2017)

Yleisimmät 3D-tulostusmateriaalit ovat muovi, betoni sekä metallit, mutta myös puuta voidaan 3D-tulostaa. Ilmastonmuutoksen torjumiseksi kiinnostus puunkäyttöön on li- sääntynyt rakennusteollisuudessa. Puiset rakennukset toimivat hiilivarastoina ja puusta rakentaminen tuottaa vähemmän kasvihuonepäästöjä kuin metalli- ja betonirakentami- nen (Puuinfo 2020; Mölsä 2021). Myös esimerkiksi EU:n uusi metsästrategia vaatii puun- käytön lisäämistä rakennusteollisuudessa (Euroopan komissio 2021, 6–7).

Tässä kandidaatintyössä käyn läpi, minkälaisia mahdollisuuksia puukuidun 3D-tulosta- minen tuo arkkitehtuuriin ja rakennusteollisuuteen. Esittelen kirjallisuuslähteistä, tieteel- lisistä julkaisuista ja artikkeleista löytämäni tietoa minusta kiinnostavimpiin aiheeseen liittyviin kysymyksiin. Nämä kysymykset ovat:

- Onko puukuidusta 3D-tulostamalla valmistettu rakennuksia ja rakennuksen osia samassa mittakaavassa kuin jo betonista, savesta ja muovista on valmistettu?
- Minkälaisia haasteita sekä mahdollisuuksia puukuidun 3D-tulostamisessa on?
- Kuinka ekologisia puukuituiset 3D-tulostusmateriaalit ovat?

Puukuidun ekologisuus on tärkeä kysymys, koska yleisimmät puiset 3D-tulostusmateriaalit ovat tällä hetkellä puun ja muovin yhdistelmiä. Ympäristönsuojelun ja kestävän kehityksen kannalta on tärkeää, että luontoon joutuvan muovin määrä pyritään minimoimaan. Puukuituisen 3D-tulostusmateriaalin ekologisuudesta löytyy muutamia julkaisuja ja joitakin täysin muovittomiakin tulostusmateriaaleja on jo kehitetty. (Chalmers tekniska högskola 2015; Klar et al. 2017, 86; Klar et al. 2018, 94)

Oletan, että tämän kandidaatintyön lukija on jo perehtynyt 3D-tulostamisen perusasioihin. 3D-tulostamisen perustiedot löytyvät hyvin esitettyinä esimerkiksi Mirja Salmijärven diplomityöstä: "3D-tulostaminen arkkitehtuurissa: Valmistusmenetelmän mahdollisuudet ja vaikutus arkkitehdin työhön" (2019).

2. PUUKUITU 3D-TULOSTUSMATERIAALINA

Kun puhutaan puun 3D-tulostamisesta, on tulostettava materiaali todellisuudessa yleisimmin puukomposiittia eli puukuidun ja jonkin sulavan sideaineen muodostamaa seosta. Tämä johtuu siitä, että pelkkä puukuitu ei sellaisenaan sula, kun sitä lämmitetään. (Tiede 2015; Aalto-yliopisto 2015) Yleinen puisissa 3D-tulostusmateriaaleissa käytetty sulava sideaine on biohajoava polylaktidimuovi (PLA) (Lamm et al. 2020, 2; Immonen et al. 2022, 2). Myös täysin muovittomia tulostustekniikoita on jo kehitetty. Esimerkiksi Chalmersin teknisessä korkeakoulussa ja Aalto yliopistossa on tehty tutkimuksia, joissa puukuitutulosteen yhtenä raaka-aineena käytettiin pääosin vettä sisältävää hydrogeeliä. Tällä tavoin saadut tulosteet ovat kuitenkin olleet vielä todella pieniä eivätkä siksi sovellu rakennusteollisuuden käyttöön. Myös näiden tulosteiden heikko lujuus ja suuri taipumus kutistua tulostamisen jälkeen on ongelma, johon etsitään ratkaisuja. (Chalmers tekniska högskola 2015; Klar et al. 2017, 86; Klar et al. 2018, 94)

Puukuitu on ekologista ja halvempaa kuin muovi, joten puukuidun lisääminen muovisiin tulosteisiin on kannattavaa. (Lamm et al. 2020, 1–4; Krapež Tomec & Kariž 2022, 1) Puukuitumateriaali voi olla esimerkiksi paperiteollisuuden valmistamaa sellua tai puuteollisuuden jätteestä saatavaa sahanpurua. (Ipland 2020; Krapež Tomec & Kariž 2022, 1–4)

Tällä hetkellä markkinoilla olevia puukomposiitti-3D-tulostusmateriaaleja ovat muun muassa UPM-Formi sekä Stora Enson valmistama Dura sense. Näissä puukuidun osuus on 20–50 %. (Alonen 2020; AJ tuotteet)

2.1 Ekologisuus

Koska yleisimmissä 3D-tulostettavissa puukomposiiteissa on seassa muovia, on niiden ekologisuus ja kierrätettävyys mielestäni tärkeä kysymys. Yleisintä puukomposiitteihin lisättävää muovia PLA:ta markkinoidaan biohajoavana. Tämä on kuitenkin hieman harhaanjohtava termi, sillä PLA:n biohajoavuus vaatii oikeat olosuhteet ja oikean kompostointikäsitteilyn. Luonnossa PLA hajoaa huonosti. (Luhtala 2018; Euroopan komissio 2018, 13; Toivanen 2019)

Muovia pidetään yleisesti saastuttavana materiaalina, jonka käyttöä olisi syytä vähentää. Euroopan komissio on julkaissut strategian muovijätteen vähentämiseksi. Tavoitteena on muun muassa parantaa muovien kierrätystä sekä luoda uusia, kestäviä ja innovatiivisia materiaaleja ja raaka-aineita muovin valmistukseen. (Euroopan komissio 2018, 5-

6) PLA-muovia voidaan valmistaa jätemuovista kierrättämällä. Jos lopputuote aikanaan myös kierrätetään oikein ilman, että muovia päätyy luontoon, voidaan PLA-muovin ajatella olevan ekologisempaa (Alonen 2018; Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus 2020).

PLA-muovin ekologisuutta voidaan parantaa entisestään, kun muovitulosten sekaan lisätään paperiteollisuuden jättevirrasta saatavaa ligniiniä (Anugwom et al. 2019). Ligniini on yksi puun kolmesta pääraakeneaineesta ja muodostaa 20–30 prosenttia puun painosta. Se on luonnossa yleisesti esiintyvä polymeeri, joka toimii kasveissa tukimateriaalina. (Lamm et al. 2020, 6; Stora Enso) Puurakennusteollisuudessa ligniinin käyttöä on tutkittu enemmänkin. Sillä voidaan esimerkiksi korvata puuliimoissa käytetty fenoli. Ligniini on fenolia ympäristöystävällisempi ja halvempi vaihtoehto. Puuliimaa käytetään esimerkiksi vanerin ja laminaattien tuotannossa. (Uusi puu 2017) Verrattuna täysin muoviin tulosteisiin ligniinin lisääminen sellusta ja PLA-muovista valmistetun puukuidun sekaan parantaa lopputuotteen vetolujuutta ja keventää sitä (Anugwom et al. 2019; Tanase-Opedal 2019).

PLA muovin valmistuksessa käytetään raaka-aineena luonnonmateriaaleja kuten maisia, tärkkelystä tai sokeriruokoa. Nämä raaka-aineet voitaisiin korvata kokonaan metsäteollisuuden sivutuotteista saatavalla sahanpurulla ja kuitulietteellä. (Chydenius 2021, 6) Kuten muovi ja puu, myös niistä 3D-tulostettu puukomposiitti on kierrätettävissä. Esimerkiksi VTT:n tutkimuksessa kehitetty puukomposiitti pystytään käytön jälkeen jauhamaan osiksi ja tulostamaan uudestaan ainakin seitsemän kertaa. Kyseinen puukomposiitti myös pystyttiin valmistamaan jo olemassa olevilla teknologioilla. Tämä säästää kustannuksissa, koska uuteen teknologiaan ei tarvitse investoida. (Kangas et al. 2022)

Löysin myös lähteitä, joissa puukomposiitin ekologisuus kyseenalaistetaan. Esimerkiksi puukomposiitin kierrättäminen vaatii enemmän työtä kuin pelkän muovin tai puun kierrättäminen yksistään. (Krapež Tomec & Kariž 2022, 16) Myös puu- ja paperiteollisuuden jätteiden sahanpurun ja ligniinin käytössä puukomposiitin raaka-aineena on ongelmansa. Molemmat raaka-aineet täytyy nimittäin ensin jatkojalostaa ennen kuin niitä voidaan käyttää 3D-tulostusmateriaalina. Sahanpuru täytyy ensin jauhaa jauheeksi ja tähän kuluu energiaa. Ligniini täytyy myös käsitellä kemiallisesti ennen kuin sitä voidaan käyttää ja tämä ei välttämättä ole ekologista. Myös 3D-tulostaminen itsessään kuluttaa energiaa. Olisikin tärkeää arvioida, onko näin valmistettuna puukomposiitista syntyvät kasvihuonepäästöt suuremmat kuin mitä puiseen 3D-tulosteeseen sitoutuu hiiltä. (Chydenius 2021; Gewirtz 2021)

2.2 Ominaisuudet

3D-tulostettu puukomposiitti vastaa ominaisuuksiltaan hyvin paljon oikeaa puuta. Se tuoksuu ja tuntuu puulta ja värikin on samankaltainen (3DWithUS 2020). Kuitenkin esimerkiksi puun syyt, oksat ja muu pintatekstuuri eivät tule 3D-tulostuksessa näkyviin. Kuten puuta, puista 3D-tulostetta voi myös hioa ja maalata (Quinn).

Puukuidun vahvuudesta löytyy ristiriitaista tietoa. Verrattuna muovisiin tulosteisiin näyttäisi siltä, että pienissä määrin puukuitu saattaa parantaa tulosteen vahvuutta. Kun puukuidun määrä puukomposiitissa ylitti 20 prosenttia, tuli tulostetuista materiaaleista kuitenkin hauraita. (Lamm et al. 2020, 2–7, 16) Puukuidun lisääminen PLA muoviin tekee siitä nopeammin biohajoavaa (Krapež Tomec & Kariž, 2022, 16). Ligniinin lisääminen paransi tulosteen vetolujuutta ja teki siitä kevyempää (Anugwom et al. 2019; Tanase-Opedal 2019). Joissakin lähteissä mainittiin haasteeksi puukuidun tulostamisessa se, että puukuitutulosteet kutistuvat tulostuksen jälkeen. (Aalto-yliopisto 2015; Turunen 2017, 114).

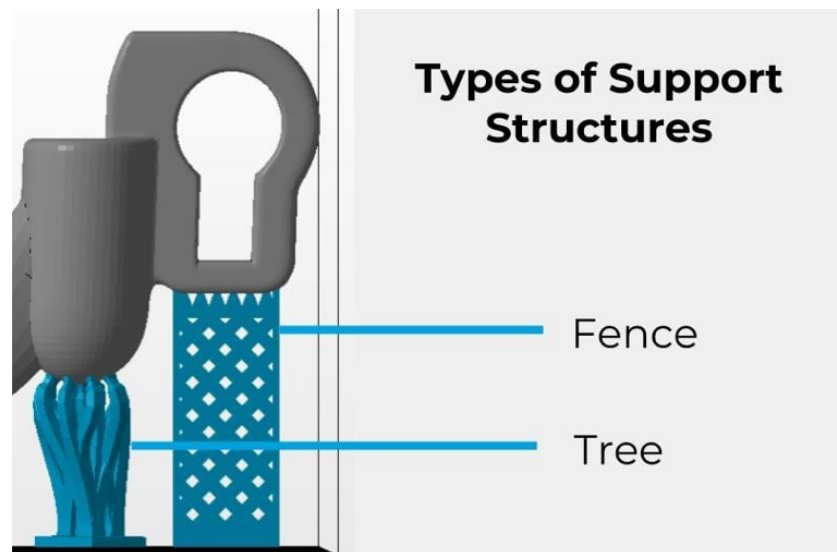
Savonia-ammattikorkeakoulun tutkimuksissa havaintoja puukuidun vahvuutta parantavista ominaisuuksista ei pystytty todentamaan. Testitulostuksissa puukuitua sisältävät tulosteet olivat huomattavasti heikompia verrattuna täysin muovisiin tulosteisiin. Tähän saattoi vaikuttaa se, että tutkimuksessa käytetyt tulostusparametrit eivät olleet optimoituja puukuidun tulostamiseen. Vaikutusta oli myös sillä, että tulostusmateriaalia oli säilytetty huoneolosuhteissa useita kuukausia, mikä heikentää tulostusmateriaalia johtuen sen taipumuksesta sitoa ilmankosteutta itseensä. Testeissä todettiin myös, että markkinoilta saatavan puukomposiittitulosteen UPM-formin ilmoitetut vetolujuus- ja elastisuusmoduulien arvot on todennäköisesti mitattu muottiinvaletuista testikappaleista, jotka ovat vahvempia kuin mitä 3D-tulostamalla saadaan aikaiseksi. Tämä johtuu muun muassa siitä, että muottiin valettuna puukomposiitista tulee tiiviimpää kuin 3D-tulostettuna. (Aloinen 2020)

Puukomposiitin ja muovisten 3D-tulosteiden ongelma on niiden huono kestävyys ulkoilmassa. (Krapež Tomec & Kariž 2022, 15). Ulkoilman kestävyuden parantamista on tutkittu esimerkiksi tulostamalla varsinaisen tulosteen päälle säätä paremmin kestävä pinoite. Tähän käytettiin tulostinta, jolla pystyy tulostamaan monta tulostemateriaalia samanaikaisesti. (Afshar & Wood 2020) Säänkestävyyttä voi ehkä myös parantaa esimerkiksi uusilla ligniinijohdannaisilla tulostemateriaaleilla. Normaaliin puuhun verrattuna puukomposiitin etu on se, että se ei ole niin herkkää esimerkiksi lahoamiselle. (Gkartzou et al. 2017, 1)

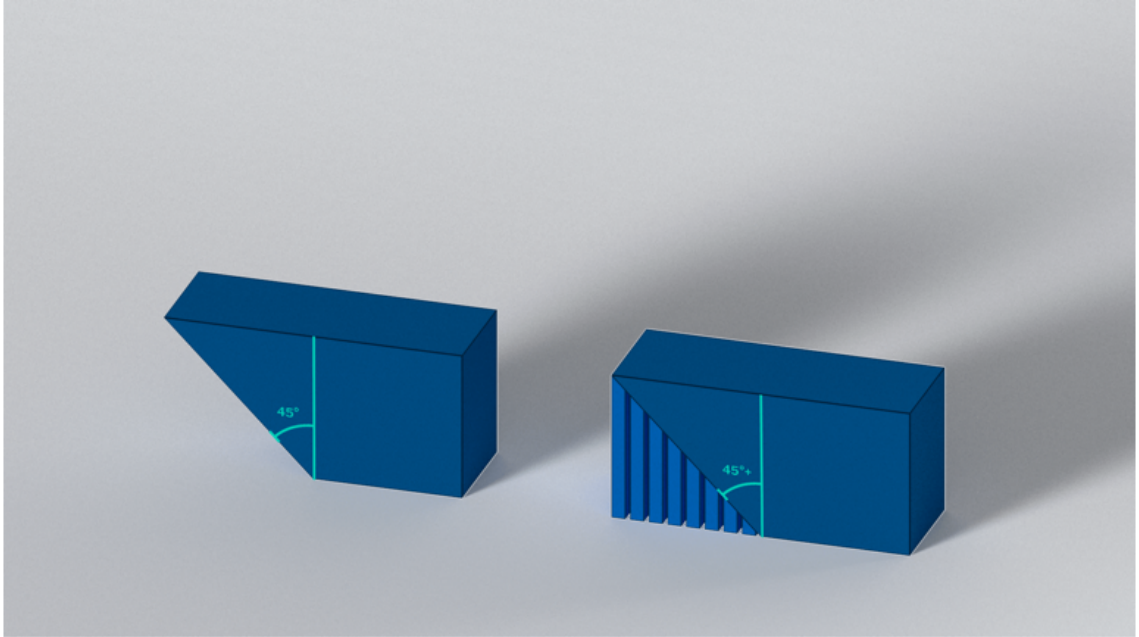
3. PERUSTIETOA 3D-TULOSTAMISESTA

Yleisesti 3D-tulostus mielletään teknologiana, jonka avulla kuka tahansa voi helposti tulostaa minkä tahansa muotoisen kappaleen. Tämä ei kuitenkaan aivan pidä paikkaansa. 3D-tulostamisessa on tärkeää ymmärtää teknologian reunaehdot ja rajoitteet, muuten tulosteet herkästi epäonnistuvat. 3D-tulosteen suunnittelulla on ratkaiseva merkitys lopputuotteen vahvuudelle. Esimerkiksi 3D-tulostimen parametreilla eli syöttönopeudella, lämpötilalla, materiaalivahvuudella jne. on vaikutusta tulosteen laatuun. Myös esimerkiksi täysin terävät kulmat ovat heikompia kuin pyöristetyt kulmat. (Fast radius)

Ehkä tärkein 3D-tulostamista rajoittavista tekijöistä on se, että tyhjän päälle ei voi tulostaa. Tällaisissa tilanteissa tarvitaan erillinen väliaikainen tuki tai sitten on käytettävä tukimateriaalia. Tukimateriaali on jälkikäteen poistettava tulostettu rakenne, jonka päälle varsinainen tulostus tehdään. Tukimateriaali on yleensä ristikkomainen ja rakenteeltaan heikompi, kuin varsinainen tulostus, joten se on jälkikäteen helppo leikata pois. Tukimateriaaleja ei tarvitse itse osata suunnitella, vaan 3D-tulostusohjelmat suunnittelevat ne automaattisesti kohtiin, joissa sitä tarvitaan. Kuvassa 1 on tyypillisiä tukirakennetyyppejä. Yleisesti suurin kulma, johon 3D-tulostusta voidaan tehdä, on 45 astetta. Tätä suuremmat kulmat vaativat tukirakenteen kuten kuvassa 2 on esitetty. Suurissa 3D-tulostuskohteissa kuten betonista valmistetuissa rakennuksissa on käytetty ulkopuolisia puusta tai metallista valmistettuja tukia niissä kohdissa, joissa täytyy tulostaa tyhjän päälle. Näitä kohtia ovat esimerkiksi ikkunoiden ja ovien aukot. Tällainen esimerkki näkyy kuvassa 3.



Kuva 1. 3D-tulostukseen lisättävien jälkikäteen poistettavien tukimateriaalien malleja (Fast radius)



Kuva 2. Jos 3D-tuloste tulostetaan yli 45 asteen kulmaan, on siihen lisättävä jälkikäteen poistettava tukimateriaali (Fast radius)



Kuva 3. Betonista 3D-tulostetussa rakennuksessa ikkuna- ja oviaukkojen kohdille rakennettuja väliaikaisia tukia, joiden päälle 3D-tulostin tulostaa. (Apis Cor)

Tukimateriaalin käyttöä olisi syytä välttää, koska sen poistaminen vie aikaa ja se on hukkamateriaalia. Joissakin tapauksissa tukimateriaalin poistaminen on myös vaikeaa esimerkiksi, jos tukimateriaali jää sellaisen geometrian taakse, josta sitä ei pääse työkalulla poistamaan. (Gaynor & Guest 2016; Fast radius)

3D-tulostusohjelmat suunnittelevat tukimateriaalien paikat ja tulostimen liikeradat automaattisesti. Joskus ohjelmat kuitenkin tekevät virheitä. Näin saattaa käydä, jos lähtöparametrit on asetettu väärin tai tulostus on esimerkiksi mallinnettu tulostusohjelmassa tulostusalustalle epäloogiseen asentoon. Parametrit ovat aina tapauskohtaisia ja eri tulostusmateriaaleille erilaisia. Usein 3D-tulostusprojektit vaativatkin muutamia testitulostuksia ennen kuin parametrit saadaan toimimaan. Suunnitteluun on varattava riittävästi aikaa, jotta tulosteesta saadaan virheetön ja materiaalin käyttö optimoitua. Yleisesti, mitä tarkemman tulostuksen haluaa, sitä pienempää kerrospaksuutta ja nopeutta on käytettävä. Tämä taas pidentää tulostusaikaa.

4. 3D-TULOSTAMINEN RAKENNUSTEOLLISUUDESSA

Jotta 3D-tulostaminen olisi käytettävissä koko laajuudessaan rakennusteollisuudessa, se vaatii aivan uudenlaista suunnitteluajattelua sekä uusien suunnitteluohjelmien opetelmista. Esimerkiksi, jos halutaan valmistaa kokonainen vapaamuotoinen rakennus yhdellä tulosteella, on se vaikeaa suunnitella nykyisillä arkkitehtuuriohjelmilla. Perinteisissä arkkitehtuurisuunnitteluohjelmissa vapaita muotoja on hankala mallintaa. Myös seinät, katot, lattiat, portaat jne. ajatellaan niissä usein erillisinä rakennusosinaan. 3D-tulostusta mallinnettaessa ne olisi mahdollista ajatella yhdeksi kappaleeksi. Vapaamuotoisten kappaleiden suunnitteluun on kuitenkin jo olemassa uusia ohjelmia kuten esimerkiksi Rhinoceros 3D. 3D-tulostaminen myös mahdollistaa sen, että rakennuksen rakennesuunnittelu, arkkitehtuuri ja sisustussuunnittelu yhdistettäisiin yhdeksi isoksi kokonaisuudeksi. Olisi siis periaatteessa mahdollista tulostaa koko rakennus sisustuksineen kerralla valmiiksi. Kuitenkin todennäköisesti aluksi 3D-tulostaminen tulee käyttöön elementtiteollisuudessa ja siihen yhdistetään myös perinteisiä rakennusmenetelmiä. 3D-tulostamisen käyttökohteita rakennusteollisuudessa ja arkkitehtuurissa tutkii muun muassa Barcelonalainen The Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) (2022).

Koska 3D-tulostus on mahdollista toteuttaa paikan päällä rakennustyömaalla riittää että paikalle tuodaan vain 3D-tulostin ja sitä varten tulostusmateriaali. Tällöin poistuvat esimerkiksi nykypäivänä rakennusteollisuudessa olevat tieliikenteen aiheuttamat elementtien kokorajoitteet. Nämä rajoitteet aiheutuvat siitä, että teille ja rekkoihin mahtuu vain tietynkokoisia puutavara- ja elementtikuljetuksia.

Kysymykseen, ”Onko puukuidusta 3D-tulostamalla valmistettu rakennuksia ja rakennuksen osia samassa mittakaavassa kuin perinteisesti esimerkiksi betonista, savesta ja muovista on valmistettu”, vastaan tarkastelemalla yleisesti toteutuneita 3D-tulostettuja rakennusprojekteja. Itse arkkitehtuurin ja rakentamisen kannalta puukuitu ei sinällään eroa muista 3D-tulostettavista materiaaleista. Oleellista on sen sijaan tulostusmateriaalin tekniset ominaisuudet kuten paino, puristuskestävyys, murtolujuus sekä lämmön eristävyys.

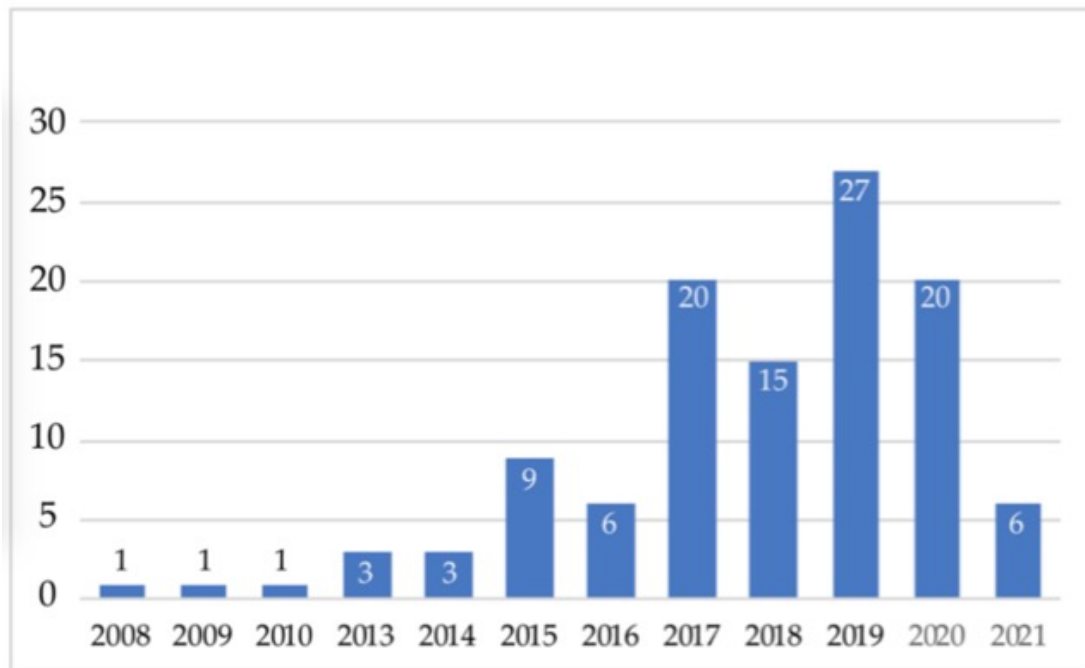
4.1 3D-tulostettujen rakennusten arkkitehtoniset mahdollisuudet

Tutkimuksessa (García-Alvarado et al. 2021) on dokumentoitu ja analysoitu maailmanlaajuisesti noin sata rakennusta, jotka on toteutettu 3D-tulostuksella. Käytän tämän artikkelin tutkimusaineistoa ja havaintoja 3D-tulostuksen antamien arkkitehtonisten mahdollisuuksien kuvaamisessa. Kyseinen tutkimusaineisto on kerätty marraskuusta 2020 tammikuun 2021 loppuun internetin hakukoneilla hakusanoilla “3D-printed construction”, “3D-printed building”, “3D-printed home”, “3D-printed house” ja “additive manufacturing construction”. Tämän haun tuloksista tutkimukseen valittiin vain sellaiset projektit, joissa suunniteltu rakennus oli oikeasti valmistettu ja dokumentoitu. Valitun aineiston perusteella tutkimuksessa dokumentoitiin käytetyt 3D-tulostusmenetelmät ja arvioitiin 3D-tulostuksen mahdollistamia arkkitehtonisia ominaisuuksia verrattuna perinteiseen rakentamiseen. Näiden tulosten perusteella on myös mahdollista ennustaa 3D-tulostuksen tulevaisuuden sovelluksia.

Seuraavaksi lainaan mainittua tutkimusta ja käytän siinä esitettyjä kuvia. Puukuidun 3D-tulostaminen on ilmeisesti vielä niin uusi ja kehittyvä menetelmä, ettei näinkään uudessa tutkimusaineistossa ollut käytössä yhtään puukuitupohjaista tulostusmenetelmää. Käsitelen puukuidun tulostusta rakentamisessa tarkemmin alaluvussa 4.2.

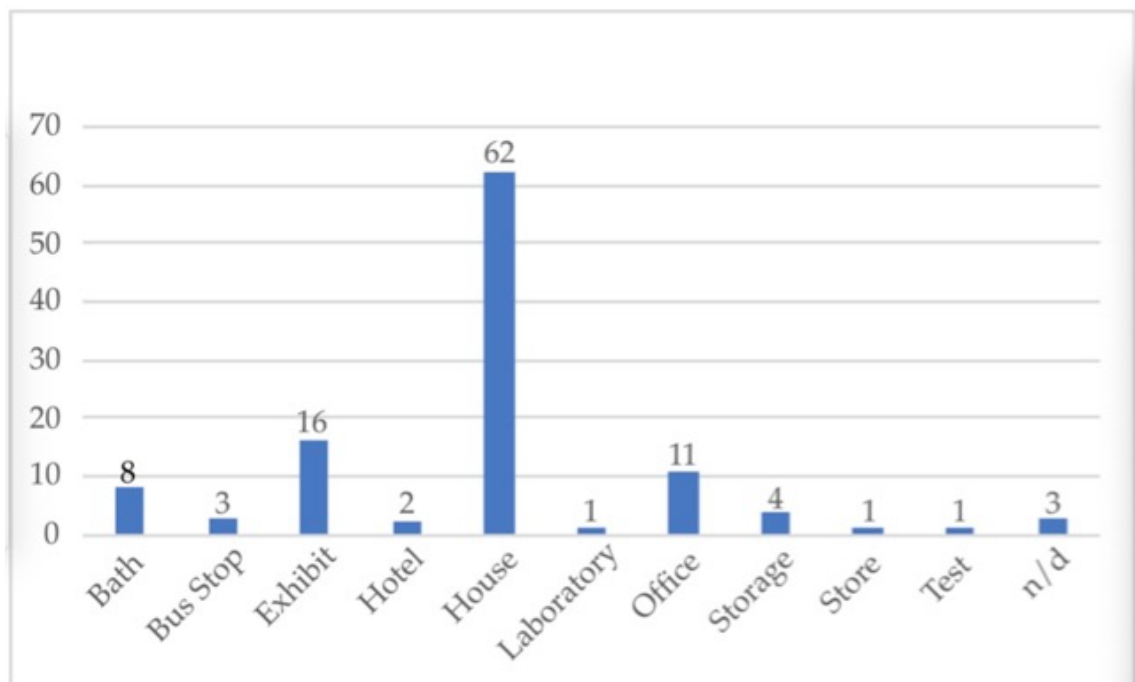
4.1.1 3D-tulostettujen rakennusten yleispiirteitä

Tammikuun 2021 loppuun mennessä tehdyssä internethaussa (García-Alvarado et al. 2021) löydettiin 112 esimerkkiä 3D-tulostetuista rakennuksista, jotka sisälsivät kuvauksen niiden 3D-tulostusprosessista sekä valokuvia. Aineiston projektien määrä kasvoi vuoteen 2019 saakka jyrkästi, mutta vuonna 2020 uusien rakennusten määrä väheni (kuva 4). Todennäköisesti syynä oli silloin alkanut Covid-19 pandemia.



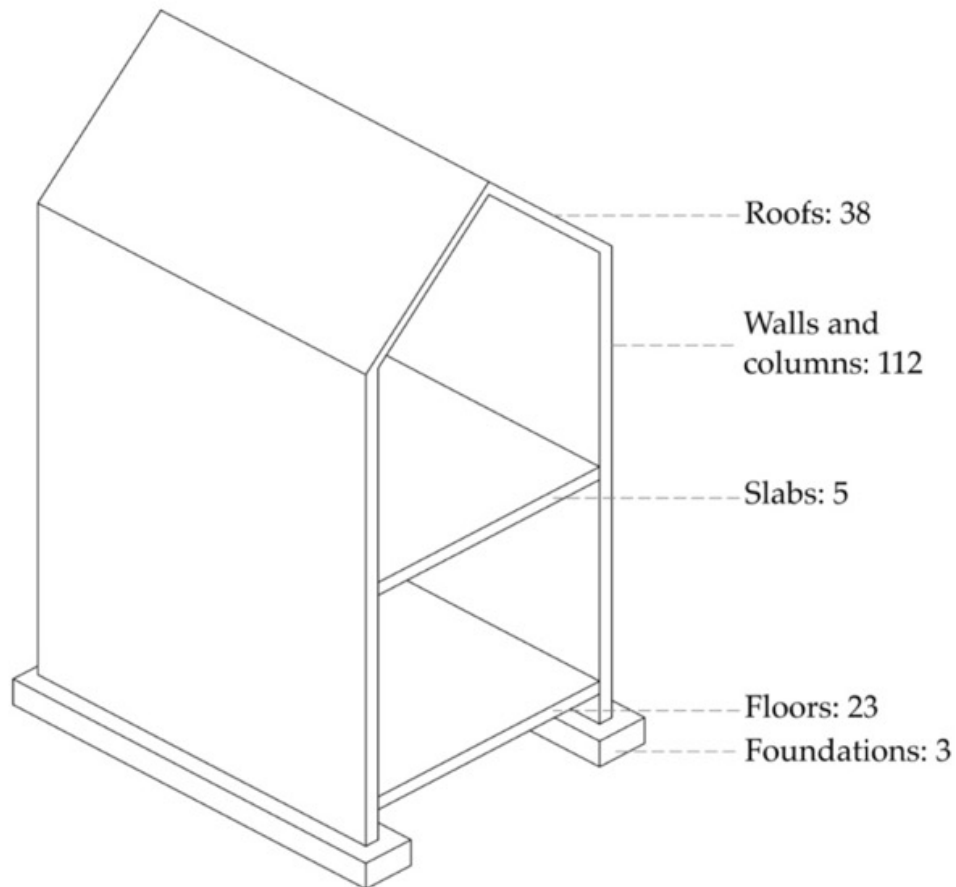
Kuva 4. 3D-tulostettujen rakennusprojektien määrä vuosittain (García-Alvarado et al. 2021)

Kerätyssä aineistossa omakotitalot olivat selvästi hallitsevia (62%). Toinen merkittävä käyttötarkoitus oli näyttelyitä varten toteutetut rakennukset ja rakennelmat (16%). Muita käyttökohteita olivat toimistot, kylpyhuoneet, hotellit, bussipysäkit, vajat tai pandemian hoitopaikat (kuva 5).



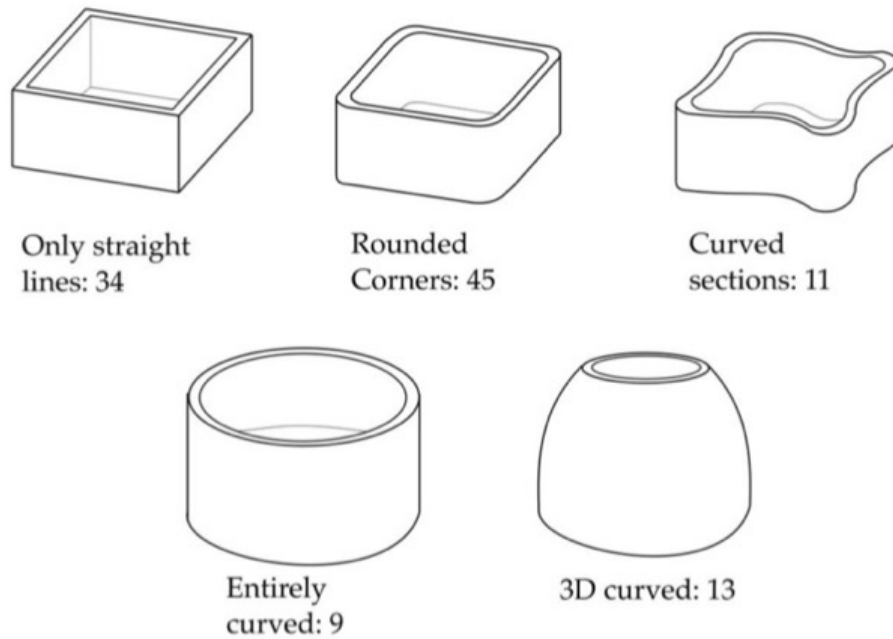
Kuva 5. Tutkimusaineiston rakennusten käyttötarkoitukset (García-Alvarado et al. 2021)

3D-tulostetut elementit olivat pääasiassa seiniä. Kaikissa projekteissa (100 %) pystysuorat rakenteet luotiin 3D-tulostustekniikalla. Myös sisäseiniä tai pylväitä toteutettiin 3D-tulostamalla ja joissakin tapauksissa myös kattoja ja lattioita (kuva 6).



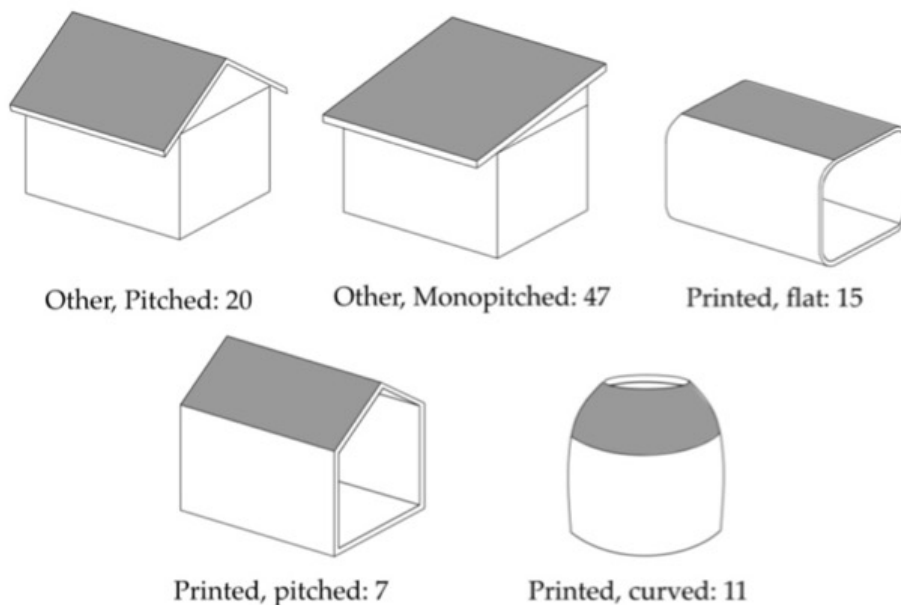
Kuva 6. 3D-tulostetut rakennusten osat (García-Alvarado et al. 2021)

Aineistossa tähän mennessä 3D-tulostettujen rakennusten geometria jäljitteli pääosin tavanomaisia rakennuksia. Joissakin oli täysin suoraviivainen geometria, mutta osassa oli pyöristetyt reunat. Täysin kaarevia geometrioita oli kuitenkin lähes kolmasosa, mikä kuvasti 3D-tulostuksen antamia joustavampia suunnittelumahdollisuuksia (kuva 7).



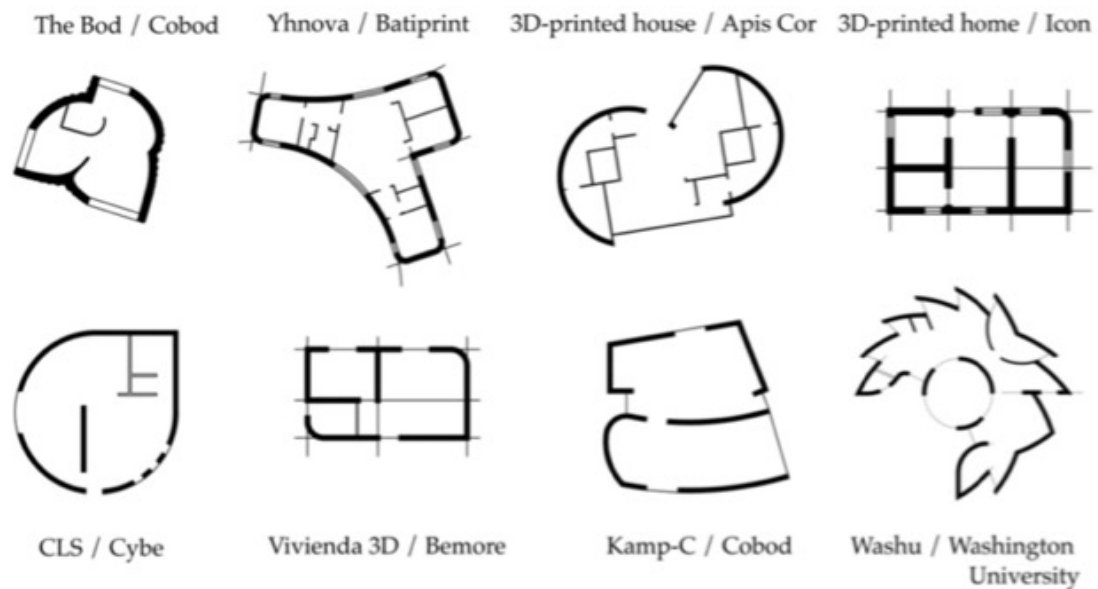
Kuva 7. 3D-tulostetut geometriat (García-Alvarado et al. 2021)

Yli puolessa aineiston rakennuksista oli muilla tavoin kuin 3D-tekniikalla tehdyt katot. Useissa ei ollut kattoa siksi, että rakenteet oli valmistettu näyttelytarkoitusta varten sisätiloihin. Katot olivat enimmäkseen yksikerroksisia ja puusta, betonista tai esivalmistetuista laatoista valmistettuja (kuva 8).



Kuva 8. Rakennusten kattorakenteet (García-Alvarado et al. 2021)

Tutkimusaineistossa muotojen monimuotoisuus jakautui ajankohdan, toteuttajien ja tekniikoiden mukaan, mikä näyttäisi viittaavan menetelmän uutuuteen ja jatkuvaan etsintään. Robottikäsivarsilla toteutetut 3D-tulosteet olivat yleensä vapaamuotoisempia. Nostureista roikkuvilla tulostimilla taas tehtiin enemmän ortogonaalisia tulosteita. Sisätiloissa 3D-tulosteissa oli yleensä ulkopintoja enemmän säännöllisiä ja kohtisuoria pintoja. Kuitenkin suoria pintoja oli vähemmän kuin perinteisissä rakennuksissa (kuva 9).



Kuva 9. Esimerkkejä tutkimusaineiston rakennusten pohjapiirroksista (García-Alvarado et al. 2021)

4.1.2 3D-tulostetun rakennuksen jaottelu eri osiin

Tutkimusaineistosta löydettyt arkkitehtoniset ja rakenteelliset ominaisuudet jaoteltiin seuraavien kriteerien perusteella:

1. Rakennuselementit – perustukset, lattiat, seinät, laatat tai katot
2. Elementtien tulostusrakenne – eli olivatko ne umpinaisia vai osittain tai kokonaan onttoja
3. Tulostettujen osien ulkopuoliset vahvistukset – eli käytettiinkö tulostuksen aikana tulosteen sisään lisättäviä ulkopuolisia vahvikkeita
4. Pinnan viimeistely – käsiteltiinkö 3D-tulostettu pinta tulostuksen jälkeen
5. Aukotukset – esimerkiksi toteutukset pysty- tai vaakasuuntaan
6. Katon muoto – joko kalteva, tasainen tai kaareva
7. Rakennuksen geometriset ominaisuudet – kuten suorat tai pyöristetyt kulmat, kaarevat tai aaltoilevat osat

Joissakin tapauksissa yksi tai useampi edellä mainituista ehdoista puuttui, esimerkiksi rakennuksessa ei ollut kattoa tai aukkoja. Tutkimusaineiston perusteella saatiin yhteen- vetona seuraavat havainnot:

1. Rakennuselementit

Kaikissa rakennuksissa oli joko paikan päällä tai muualta työmaalle kuljetetut 3D-tulostetut seinät. Hyvin harvoissa oli tulostettu välipohja tai perustukset.

2. Elementtien tulostusrakenne

Monissa rakennuksissa seinät oli tulostettu yhtenä umpinaisena rakenteena. Useissa seinissä oli myös ontto sisus, jonka sisään on tulostettu ristikkorakennetta tai kohtisuoria vahvikkeita (kuva 10). Muutamissa kohteissa seinissä oli ontto sisus ilman vahvikkeita tai sitten sisus oli täytetty muulla materiaalilla, kuten eristeellä.

3. Tulostettujen osien ulkopuoliset vahvistukset

Useassa rakennuksessa oli seiniä vahvistettu tulosteen sisään tulostuksen aikana lisä- tyillä vaakasuuntaisilla tangoilla. Muutamassa rakennuksessa seinien sisään oli lisätty pystypalkkeja kahden pinnan ja täytteen väliin.

4. Viimeistely

Useimmiten 3D-tulostettua pintaa ei viimeistely. Joissakin kohteissa pinnat oli viimeis- teltty sileiksi. Joissakin kohteissa 3D-tulostetut pinnat pinnoitettiin kokonaisuudessaan piiloon.

5. Aukotukset

Useimmiten rakennuksissa oli yhtenäiset seinät ilman aukkoja. Monissa rakennuksissa oli pystysuorat aukot. Joissakin oli nelikulmaiset aukot. Vaakasuorat ikkunat olivat harvi- naisia. Aukkojen kohdilla käytettiin usein puisia tukia. Suurimmissa aukoissa saatettiin tarvita myös tulosteen lisävahvistusta, jonka lisäämisen ajaksi tulostus oli pysäytettävä.

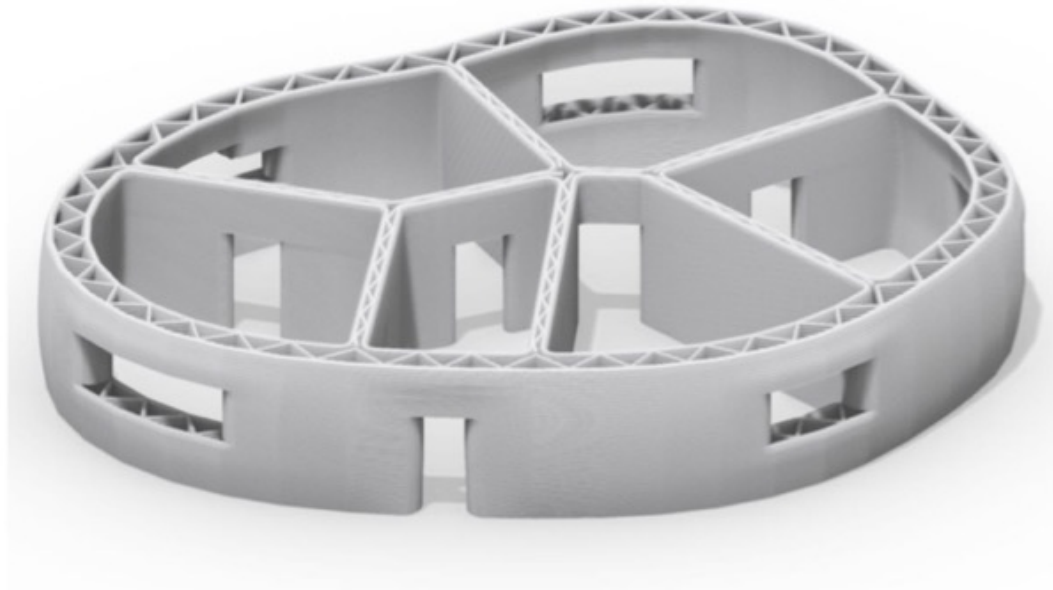
6. Katon muoto

Rakennuksissa oli pääosin kaltevat katot, jotka oli toteutettu muilla kuin 3D-tekniikoilla. Joissakin rakennuksissa oli litteät tai kaltevat katot, jotka oli tulostettu seinien yhtey- dessä. Muutamissa tulosteissa oli kaarevat tulostetut katot.

7. Rakennuksen geometriset ominaisuudet

Suurin osa rakennuksista oli muodoiltaan suoraviivaisia ja niissä oli pyöristetyt nurkat. Vajaassa kolmasosassa käytettiin kaarevia seiniä, joista osa oli pallomaisia.

Tutkimusaineiston perusteella havaittiin, että uusimmissa toteutuksissa suosittiin yhdistettyjä muotoja, joissa perinteinen ortogonaalisuus oli yhdistetty kaareviin pintoihin. Tämän lisäksi 3D-tulostus mahdollisti 3D-suunnitteluohjelmilla mallinnettavien vaativien ja monipuolisten arkkitehtonisten ratkaisujen toteuttamisen.



Kuva 10. Mallinnus 3D-tulostetusta rakennuksesta, jossa on ortogonaaliset sisäseinät ja kaarevat ulkoseinät. Seinät ovat onttoja ja niiden sisälle tulostetaan ristikkomainen vahvistava rakenne. (García-Alvarado et al. 2021)

4.2 Puukuidun 3D-tulostaminen rakennusteollisuudessa

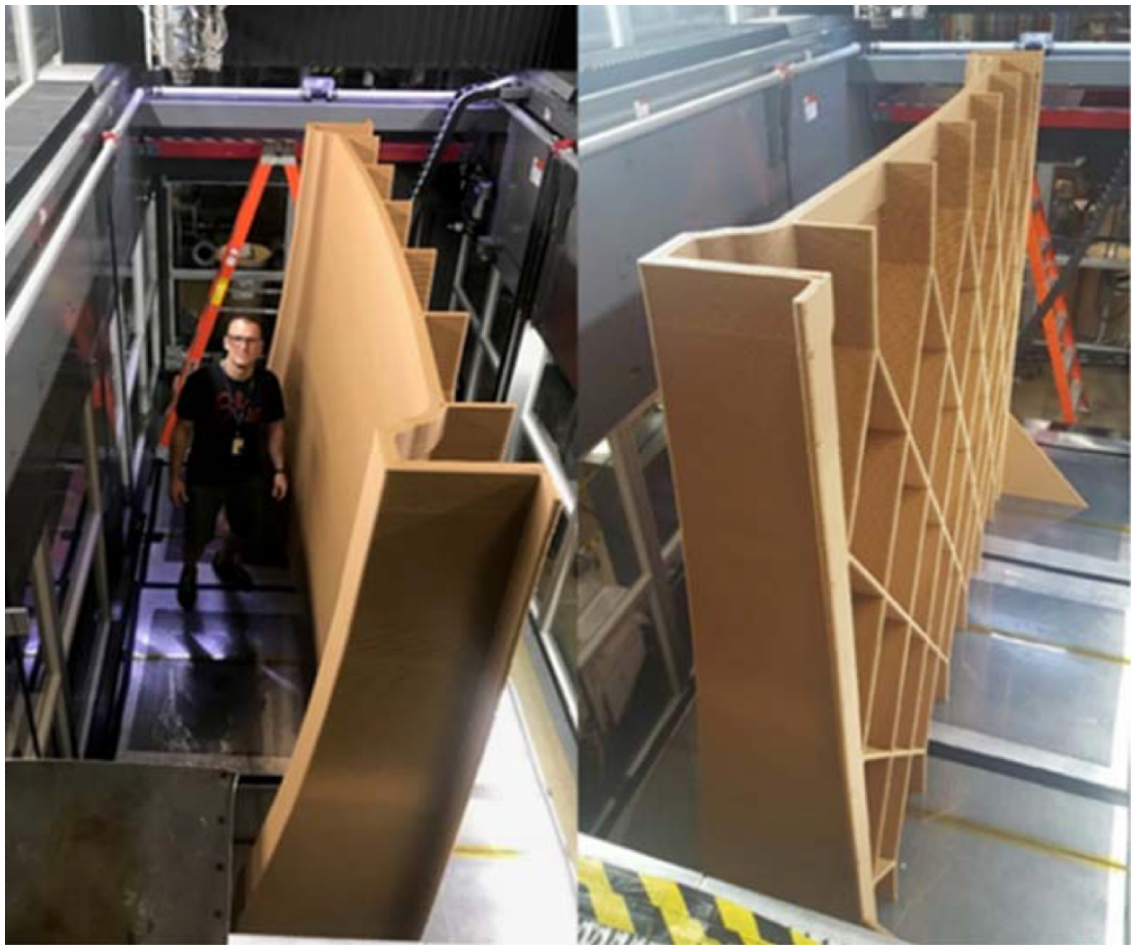
Rakennustekniikassa puusta 3D-tulostetut kohteet ovat vasta kokeiluasteella enkä löytänyt rakennuskohteita, joissa puukomposiittia olisi jo käytetty. Kuitenkin puun 3D-tulostamisesta on meneillään monta tutkimusta. Esimerkiksi vuonna 2021 Idahon yliopistolle on annettu neljän miljoonan dollarin tuki puun 3D-tulostuksen kehittämiseen rakennusteollisuutta varten. Tutkimuksessa on tarkoitus selvittää erilaisia menetelmiä siihen, miten puuteollisuuden puujätettä voitaisiin käyttää rakennusten 3D-tulostamiseen. Tarkoitus on muun muassa tutkia puisen 3D-tulostusmateriaalin ominaisuuksia ja kestävyyttä sekä esimerkiksi sitä, miten voitaisiin parantaa sen veden- ja palonkestävyyttä. Tutkimuksen päätavoitteena on valmistaa puisia seinä-, lattia- ja kattomoduuleita rakennusteollisuuden käyttöön. (University of Idaho 2021)

Useimmat puun 3D-tulostamisesta löytämäni tutkimuslähteet ovat vielä pitkälti yhteen-
vetoja ja kirjallisuustutkimuksia siitä, mitä aiheesta on jo tutkittu sekä näiden tutkimusten
kommentointia. Tämä johtunee siitä, että kyseessä on vielä varsin uusi teknologian ala.
Tulevaisuudessa teknologialle löytyy todennäköisesti vielä paljon uusia käyttömahdollii-
suuksia, joita ei vielä pystytä näkemään. Alkuvaiheessa 3D-tulostukseen käytetyt tekno-
logiat myös muistuttavat ja toistavat perinteisiä rakennusmetodeja.

Lamm et al. käsittelevät julkaisussaan (2020) puisten 3D-tulosteiden tämänhetkistä ti-
lannetta. He käyvät läpi, mitkä ovat tämän hetken tärkeimmät menetelmät ja miten niitä
pitäisi jatkossa kehittää.

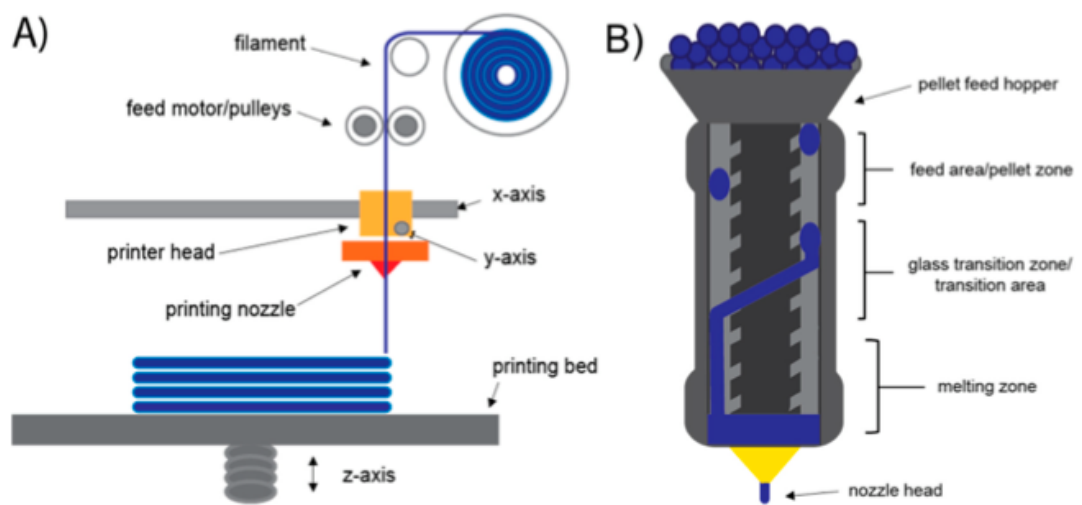
Krapež Tomec ja Kariž (2022) ovat käyneet laajassa kirjallisuustutkielmassaan läpi eri
lähestymistapoja puun 3D-tulostamiseen. Menetelmät ja viitteet ovat hyvin listattuina hei-
dän tutkimusartikkelissaan. Seuraava tärkeä askel puun 3D-tulostamisessa olisi puu-
määrän lisääminen tulostemateriaaleissa. Jatkotutkimusta tarvitaan myös lisää esimer-
kiksi siitä, miten puiset tulosteet kestävät aikaa.

Kuvassa 11 on 20% puukuitua sisältävästä PLA-puukomposiitista tulostettu suurikokoi-
nen veneen katto.



Kuva 11. Puukomposiitista 3D-tulostettu veneen katto (Lamm et al. 2020)

Puukomposiitille soveltuvia 3D-tulostusmenetelmiä ovat Fused Filament Fabrication (FFF), josta käytetään myös nimeä Fused Deposit Modeling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS) sekä Liquid Deposition Modeling (LDM). Näistä yleisin puukomposiitille käytetty menetelmä on tulostusmateriaalin pursottamiseen perustuva FFF. Siinä tulostusmateriaali eli filamentti johdetaan lankana tai rakeina tulostimen suuttimelle, jossa se sulatetaan ja tulostetaan kerros kerrokselta haluttuun muotoon (kuva 12). (Lamm et al. 2020, 2)



Kuva 12. Fused filament fabrication menetelmässä tulostusmateriaali syötetään suuttimelle joko filamenttilankana (A) tai rakeina (B) (Lamm et al. 2020)

Myös muovittomien puutulosteiden tulostamiseen käytetään samanlaista pursottavaa tulostustekniikkaa sillä erolla, että niitä ei sulateta suuttimessa. Muovittomissa puutulosteissa käytetään nestemäistä geeliä puukuidun sideaineena, jolloin lämmitystä ei tarvita. Muovittomat puutulosteet ovat vielä niin pieniä, että niitä ei voi käyttää rakennusteollisuudessa. (Lamm et al. 2020, 2)

5. YHTEENVETO

Puukuidusta ei ole vielä tulostettu rakennuksia samassa mittakaavassa kuin betonista, savesta tai muovista. Puun käyttöä rakennusten 3D-tulostuksessa kuitenkin tutkitaan ja se nähdään ekologisuuden ja kestävä kehityksen kannalta tärkeäksi aiheeksi. Muun muassa vuonna 2021 Idahon yliopistolle on annettu neljän miljoonan dollarin tuki puun 3D-tulostuksen kehittämiseen rakennusteollisuutta varten. Tutkimuksessa on tarkoitus kehittää puisia lattia-, katto- ja seinämoduuleita rakennusteollisuuden käyttöön. Raaka-aineena tulosteissa käytettäisiin puuteollisuuden jätettä. Myös puisen tulosteen ominaisuuksia kuten vahvuutta ja säänkestävyyttä tutkitaan ja kehitetään.

Näyttäisi siltä, että puun 3D-tulostaminen tulee aluksi käyttöön elementtiteollisuudessa. Puusta voidaan valmistaa kevyitä elementtejä ja samalla säästetään materiaali- ja työvoimakustannuksissa. 3D-tulostamiseen tullaan todennäköisesti myös yhdistämään perinteisiä rakennusmenetelmiä. Jo nyt esimerkiksi 3D-tulostettuja betonisia elementtejä vahvistetaan tulostuksen aikana lisätyillä ulkopuolisilla vahvikkeilla kuten metallitangoilla. Puu on heikompaa kuin betoni, joten näkisin, että näiden ulkopuolisten vahvikkeiden rooli on puutulosteilla vielä tärkeämpi.

Tulevaisuudessa on vielä tehtävä jatkotutkimusta siitä, miten 3D-tulostamisen koko potentiaali saataisiin hyödynnettyä rakennusteollisuudessa. 3D-tulostamiselle on ominaista, että sillä pystytään tulostamaan vapaamuotoisia kappaleita ja hankalia geometrioita. Kuitenkin tällä hetkellä perinteisillä arkkitehtisuunnitteluohjelmilla on hankala suunnitella vapaamuotoisia kappaleita. Suunnitteluohjelmat kuitenkin kehittyvät jatkuvasti.

Tämänhetkiset puiset 3D-tulostusmateriaalit ovat yleisimmin puukomposiittia, joka sisältää muovia. Yleisimmin käytetty muovi PLA on biohajoavaa, kun se kompostoidaan oikeissa olosuhteissa. Muovin raaka-aineena voidaan käyttää kierrätettyä muovia. Nämä tekevät muovin käytöstä puukomposiiteissa hieman ekologisempaa. Puukomposiitti on myös mahdollista kierrättää. Kun puuta lisätään muovin sekaan, lisääntyy ekologisuus entisestään. Puumateriaali on mahdollista ottaa puu- ja paperiteollisuuden jätteestä ja sivuvirroista, mikä on kestävä kehityksen kannalta kannattavaa. Puulla ja sen rakenneaineella ligniinillä on havaittu olevan myös pienissä määrin käytettynä puukomposiitin vetolujuutta parantavia ominaisuuksia verrattuna kokonaan muovisiin tulosteisiin. Toisaalta, kun puumateriaalin osuus puukomposiitissa ylitti 20 prosenttia, muuttuivat tulos-

teet hauraammiksi. Puukuitu tekee puukomposiitista nopeammin biohajoavaa. Puukuituisen 3D-tulosteen haasteena on myös sen heikohko säänkestävyys – UV-säteily, ilmankosteus ja suuret lämpötilat heikentävät tulostetta. Tämän takia puukuituiset tulokset soveltuvat parhaiten sisäkäyttöön. Tutkimuksia tarvitaan vielä lisää siitä, miten puun osuutta voitaisiin lisätä puukomposiiteissa ja miten niiden säänkestävyyttä parannettaisiin.

Aiemmissa opinnoissani tutustuin eri hitsausmenetelmiin ja jatkossa olisi mielenkiintoista myös tutkia, kuinka esimerkiksi kitkatappihitsaus (engl. friction stir welding, FSW) soveltuisi puukomposiitista tulostettujen rakennuselementtien liittämiseen. Kitkatappihitsauksessa liitos syntyy, kun suurella nopeudella pyörivä tappi ajetaan kahden liitettävän kappaleen liitoskohdan läpi. Prosessissa syntyvä kitka pehmentää materiaalit ja pyöriminen sekoittaa niiden ainerakenteen keskenään. Tällöin syntyy todella vahva ja joissakin tapauksissa myös näkymätön liitos. Koska puutulostusmateriaali sulaa ja pehmenee, kun sitä lämmitetään, pitäisin mahdollisena, että puukomposiitista tulostamalla valmistetut materiaalit voitaisiin myös liittää tällä teknologialla yhteen. Rakennusteollisuudessa ja arkkitehtuurissa tämä voisi luoda uusia ratkaisuja, kun esimerkiksi ruuveja ja pultteja ei enää tarvittaisi. Tekniikka voisi toimia esimerkiksi talotehtaalla siten, että 3D-tulostamalla valmistetut elementit kitkatappihitsattaisiin yhteen. Sitä voitaisiin ehkä käyttää myös pilareiden ja palkkien tai portaiden ja välipohjien liittämiseen. Kitkatappihitsausta käytetään jo yleisesti metalleille, esimerkiksi Applen iMac tietokoneiden alumiinisissa rungoissa, kuparisissa ydinjätteen loppusijoituskapseleissa sekä avaruusrakettien kokoamisessa.

LÄHTEET

- 3DWithUs, 2020. Wood Filament Review. [verkkosivu] Saatavissa: <https://3dwithus.com/wood-filament> [Noudettu 9.4.2022].
- Aalto-yliopisto, 2015. Selluloosaa voidaan jo tulostaa 3D-tekniikalla. [verkkosivu] Saatavissa: <https://www.aalto.fi/fi/uutiset/selluloosaa-voidaan-jo-tulostaa-3d-tekniikalla> [Noudettu 9.4.2022].
- AJ tuotteet, Biokomposiitti ja 3D-tulostus osana kestäväää kalustesuunnittelua. [verkkosivu] Saatavissa: <https://www.ajtuotteet.fi/blogi-etusivu/aj-uutiset/biokomposiitti-ja-3d-tulostus-osana-kestavaa-kalustesuunnittelua> [Noudettu 16.4.2022].
- Alonen, A., 2020. UPM Formi: biokomposiittigranulaasta 3D-tulostusfilamentiksi – värjäys ja mekaaninen suorituskyky. Savonia blogi [verkkosivu] Saatavissa: <https://blogi.savonia.fi/3dtulostus/2020/12/17/upm-formi-biokomposiitti/> [Noudettu 9.4.2022].
- Alonen, A., 2018. Jätemuovista ja kotimaisesta puusta 3D-tulostusmateriaaleiksi. Savonia blogi [verkkosivu] Saatavissa: <https://blogi.savonia.fi/3dtulostus/2018/10/31/jatemuovista-ja-kotimaisesta-puusta-3d-tulostusmateriaaleiksi/> [Noudettu 9.4.2022].
- Anugwom, I., Lahtela, V., Kallioinen, M. & Kärki, T., 2019. Lignin as a functional additive in a biocomposite: Influence on mechanical properties of polylactic acid composites. *Industrial Crops and Products*, vol. 140
- Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus, 2020. Hyvä – paha muovi rakentamisessa. [verkkosivu] Saatavissa: [https://www.ara.fi/fi-FI/Tietopankki/ARAviesti/ARAviestin_verkkoartikkelit/Hyva_paha_muovi_rakentamisessa\(53959\)](https://www.ara.fi/fi-FI/Tietopankki/ARAviesti/ARAviestin_verkkoartikkelit/Hyva_paha_muovi_rakentamisessa(53959)) [Noudettu 13.4.2022].
- Chalmers tekniska högskola, 2015. Cellulosa från trä fungerar i 3D-skrivare. [verkkosivu] Saatavissa: <https://www.chalmers.se/sv/institutioner/chem/nyheter/Sidor/Cellulosa-fran-ved-fungerar-i-3D-skrivare.aspx> [Noudettu 9.4.2022].
- Chandler, D., 2017. 3-D printing offers new approach to making buildings, Massachusetts institute of technology [verkkosivu] Saatavissa: <https://news.mit.edu/2017/3-d-printing-buildings-0426> [Noudettu 9.4.2022].
- Chydenius, 2021. Green bioraff solutions - Popular science report. Saatavissa: <https://www.chydenius.fi/fi/soveltava-kemia/tutkimus/green-bioraff-solutions/gbs-popular-science-report.pdf> [Noudettu 26.1.2022].
- Euroopan komissio, 2021. *Uusi EU:n metsästrategia 2030*, COM(2021) 572 final, Bryssel.
- Euroopan komissio, 2018. *EU:n strategia muoveista kiertotaloudessa*, COM(2018) 28 final, Strasbourg.

Fast radius. Additive manufacturing support structures: Why they matter and how to design for them. [verkkosivu] Saatavissa: <https://www.fastradius.com/resources/support-structures-why-they-matter-and-how-to-design-for-them/> [Noudettu 16.4.2022].

García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G. & Banda-Pérez, P., 2021. Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings. *Buildings*, 11, 254.

Gaynor, A. & Guest, J., 2016. Topology optimization considering overhang constraints: Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. Springer Nature. Vol. 54(5).

Gewirtz, D., 2021. Desktop Metal introduces Forust as a sustainable, wood waste upcycling 3D printing process, but is it really? [verkkosivu] Saatavissa: <https://www.zdnet.com/article/desktop-metals-introduces-forust-as-a-sustainable-wood-waste-upcycling-3d-printing-process-but-is-it-really/> [Noudettu 9.4.2022].

Gkartzou, E., Koumoulos E., & Charitidis, C., 2017. Production and 3D printing processing of bio-based thermoplastic filament. *Manufacturing Review*, Vol. 4(1)

H., A., 2022. The Role of Construction 3D Printing in Humanitarian Aid, 3Dnatives [verkkosivu] Saatavissa: <https://www.3dnatives.com/en/the-role-of-construction-3d-printing-in-humanitarian-aid-080620214/> [Noudettu 26.1.2022].

Immonen, K., Metsä-Kortelainen, S., Nurio, J., Tribot, A., Turpeinen, T., Mikkelsen, A., Kalpio, T., Kaukoniemi, O., & Kangas, H., 2022. Recycling of 3D printable thermoplastic cellulose composite, *Sustainability*, Vol. 14(5), 2734.

Ipland, S., 2020. Kierrätys: 3D-tulostin tekee taloja paperitehtaan jätteistä, *Tieteen kuvalehti*, Bonnier Publications, [verkkosivu] Saatavissa: <https://tieku.fi/luonto/ymparisto/kierratys-3d-tulostin-tekee-taloja-paperitehtaan-jatteista> [Noudettu 9.4.2022].

Kangas, H., Immonen, K., Metsä-Kortelainen, S., Kalpio, T. & Staccioli, L., 2022. *3Dprint.com*. AMS Speaker Spotlight: Recyclable Thermoplastic Cellulose-based Composite for 3D Printing. [verkkosivu] Saatavissa: <https://3dprint.com/288673/ams-speaker-spotlight-recyclable-thermoplastic-cellulose-based-composite-for-3d-printing/> [Noudettu 13.4.2022].

Kate, P., Lopez-Botello, O., Lafferty, A., Todd, I. & Mumtaz, K., 2017. Investigation into the material properties of wooden composite structures with in-situ fibre reinforcement using additive manufacturing, *Composites science and technology*, Vol.138.

Klar, V., Kärki, P., Orelma, H., Pere, J., Tenhunen, T. & Ivanova, A., 2018. 3D printing of solid objects. Teoksessa: Kataja, K. & Kääriäinen, P., 2018. *Designing cellulose for the future – Design-driven value chains in the world of cellulose (DWOC) 2013-2018*, Helsinki. Saatavissa: https://cellulosefromfinland.fi/wp-content/uploads/2018/09/DWoC_Loppuraportti_FINAL_s%C3%A4hk%C3%B6inen.pdf [Noudettu 13.4.2022].

Klar, V., Kärki, P., Orelma, H. & Kuosmanen, P., 2017. Analysis of drying deformation of 3D printed nanocellulose structures. Aalto University, School of Engineering, Department of Mechanical Engineering. Teoksessa: *Cellulose Materials Doctoral Students Conference 2017*, 2017. Graz University of Technology.

Krapež Tomec, D. & Kariž M., 2022. Use of Wood in Additive Manufacturing: Review and Future Prospects. *Polymers*. 14(6), 1174.

Lamm, M., Wang, L., Kishore, V., Tekinalp, H., Kunc, V., Wang, J., Gardner, D. & Ozcan, S., 2020. Material Extrusion Additive Manufacturing of Wood and Lignocellulosic Filled Composites, *Polymers*, Vol. 12(9), 2115.

Luhtala, M., 2018. Ovatko biomuovit vastaus merten roskaantumiseen?, Plasthouse blogi, [verkkosivu] Saatavissa: <https://plasthouse.fi/ovatko-biomuovit-vastaus-merten-roskaantumiseen/> [Noudettu 9.4.2022].

Mölsä, S., 2021. Sementin ja teräksen ilmastopäästöt tulevat jo valmistusprosessista – teräs puhdistuu joskus 2030-luvulla vetypelkistyksellä. Saatavissa: <https://www.rakennuslehti.fi/2021/04/sementin-ja-teraksen-ilmastopaastot-tulevat-jo-valmistusprosessista-teras-puhdistuu-pian-vetypelkistyksella/> [Noudettu 26.1.2022].

Puuinfo, 2020. Puurakenteissa hiili säilyy pitkään. [verkkosivu] Saatavissa: <https://puuinfo.fi/puutieto/ymparistovaikutukset/puurakenteissa-hiili-sailyy-pitkaan/> [Noudettu 26.1.2022].

Salmijärvi, M., 2019. 3D-tulostaminen arkkitehtuurissa. Valmistusmenetelmän mahdollisuudet ja vaikutus arkkitehdin työhön. Diplomityö, Tampereen yliopisto, Rakennetun ympäristön tiedekunta, Arkkitehtuuri.

Sevenson, B., 2015, Shanghai-based WinSun 3D Prints 6-Story Apartment Building and an Incredible Home. [verkkosivu] Saatavissa: <https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/> [Noudettu 26.1.2022].

Stora Enso. Ligniini – luonnon oma sideaine, jolla voidaan korvata fossiilisia materiaaleja. [verkkosivu] Saatavissa: <https://www.storaenso.com/fi-fi/products/lignin> [Noudettu 13.4.2022].

Tanase-Opedal, M., Espinosa, E., Rodríguez, A. & Chinga-Carrasco, G., 2019. Lignin: A Biopolymer from Forestry Biomass for Biocomposites and 3D Printing. *Materials*, 12(18), 3006.

The Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC), 2022. Postgraduate in 3D Printing Architecture (3DPA). [verkkosivu] Saatavissa: <https://iaac.net/educational-programmes/applied-research-programmes/otf-3d-printing-architecture/> [Noudettu 17.4.2022].

Tiede, 2015, Ruotsalaiset: Sellusta voi 3d-biotulostaa vaikka vaatteita. [verkkosivu] Saatavissa: https://www.tiede.fi/artikkeli/uutiset/ruotsalaiset_sellusta_voi_3d_biotulostaa_vaikka_vaatteita [Noudettu 9.4.2022].

Toivanen, P., 2019. SYKE selvitti: Yleinen biopohjainen muovi PLA ei hajonnut vuoden aikana meressä lainkaan, Yle uutiset, [verkkosivu] Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-11068310> [Noudettu 9.4.2022].

Turunen, H., 2017. Future Vision: 3D printing Cellulose for Architecture. Teoksessa: Kääriäinen, P. & Tervinen, L., 2017. *Lost in the Wood(s)- The new biomateriality in Finland*. Aalto ARTS Books.

University of Idaho, 2021. U of I Earns \$4M to Build 3D-Printing Technology, Furthering Sustainable Building Construction Techniques. [verkkosivu] Saatavissa: <https://www.uidaho.edu/news/news-articles/news-releases/2021-fall/093021-woodwaste> [Noudettu 16.4.2022].

Uusi puu, 2017. CatLignin – Biopohjaisia liimoja selluteollisuuden ligniinistä. [verkkosivu] Saatavissa: <https://www.uusipuu.fi/ratkaisut/biopohjaisia-liimoja-ligniinista/> [Noudettu 9.4.2022].

Quinn, S., 3D printing with wood PLA. Blogi [verkkosivu] Saatavissa: <https://www.steven-quinndesign.com> [Noudettu 9.4.2022].

KUVALÄHTEET

Kuva 1. Fast radius. Additive manufacturing support structures: Why they matter and how to design for them. [verkkosivu] Saatavissa: <https://www.fastradius.com/resources/support-structures-why-they-matter-and-how-to-design-for-them/> [Noudettu 16.4.2022].

Kuva 2. Fast radius. Additive manufacturing support structures: Why they matter and how to design for them. [verkkosivu] Saatavissa: <https://www.fastradius.com/resources/support-structures-why-they-matter-and-how-to-design-for-them/> [Noudettu 16.4.2022].

Kuva 3. Apis Cor. [valokuva]. Teoksessa: Block, I., 2019. *World's largest 3D-printed building completes in Dubai*. [verkkosivu] Saatavissa: <https://www.dezeen.com/2019/12/22/apis-cor-worlds-largest-3d-printed-building-dubai/> [Noudettu 16.4.2022].

Kuva 4. García-Alvarado et al. 2021. *Amount of 3D-printed constructions recorded by year of execution or dissemination*. [valokuva]. Teoksessa: García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G. & Banda-Pérez, P., 2021. Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings. *Buildings*, 11, 254. s. 6.

Kuva 5. García-Alvarado et al. 2021. *Number of 3D-printed constructions by functions (n/d: no data)*. [valokuva]. Teoksessa: García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G. & Banda-Pérez, P., 2021. Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings. *Buildings*, 11, 254. s. 8.

Kuva 6. García-Alvarado et al. 2021. *Number of cases in which the indicated building elements is printed*. [valokuva]. Teoksessa: García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G. & Banda-Pérez, P., 2021. Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings. *Buildings*, 11, 254. s. 10.

Kuva 7. García-Alvarado et al. 2021. *Types of architectural shape of 3D-printed constructions*. [valokuva]. Teoksessa: García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G. & Banda-Pérez, P., 2021. Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings. *Buildings*, 11, 254. s. 14.

Kuva 8. García-Alvarado et al. 2021. *Types of roofs in the 3D-printed constructions recorded*. [valokuva]. Teoksessa: García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G. & Banda-Pérez, P., 2021. Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings. *Buildings*, 11, 254. s. 13.

Kuva 9. García-Alvarado et al. 2021. *Plans of some 3D-printed constructions recorded*. [valokuva]. Teoksessa: García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G. & Banda-Pérez, P., 2021. Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings. *Buildings*, 11, 254. s. 14.

Kuva 10. García-Alvarado et al. 2021. *Model of a 3D-printed construction with identified architectural features*. [valokuva]. Teoksessa: García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G. & Banda-Pérez, P., 2021. Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings. *Buildings*, 11, 254. s. 15.

Kuva 11. Lamm et al. 2020. Large scale 3D printed boat roof tooling mold made from 20 wt.% wood flour and 1 wt.% cellulose nanofibrils (CNF) in a poly lactic acid (PLA) matrix. [valokuva]. Teoksessa: Lamm, M., Wang, L., Kishore, V., Tekinalp, H., Kunc, V., Wang, J., Gardner, D. & Ozcan, S., 2020. Material Extrusion Additive Manufacturing of Wood and Lignocellulosic Filled Composites, *Polymers*, Vol. 12(9), 2115. s. 15.

Kuva 12. Lamm et al. 2020. (A) Process of fused filament fabrication (FFF) 3D printing. (B) Single-screw extrusion printer head on a pellet-fed materials extrusion system. [valokuva]. Teoksessa: Lamm, M., Wang, L., Kishore, V., Tekinalp, H., Kunc, V., Wang, J., Gardner, D. & Ozcan, S., 2020. Material Extrusion Additive Manufacturing of Wood and Lignocellulosic Filled Composites, *Polymers*, Vol. 12(9), 2115. s. 3.