

Ympäristöystävällisen rakennusmateriaalin 3D-tulostamisen jäljillä

Toim. Leena Turunen & Tanja Minkkinen

Ympäristöystävällisen rakennusmateriaalin 3D-tulostamisen jäljillä

Julkaisija

Jyväskylän ammattikorkeakoulu, SOMA -projekti

Kustantaja

Jyväskylän Ammattikorkeakoulu - SOMA-projekti
Euroopan unionin Euroopan aluekehitysrahasto

Toimittajat

Leena Turunen, asiantuntija, Jyväskylän ammattikorkeakoulu
Tanja Minkkinen, viestinnän asiantuntija, Jyväskylän ammattikorkeakoulu

Kirjoittajat:

Leena Turunen, Jaakko Seppänen, Jukka Kontinen, Miia Jämsén ja Kalle Jaakkola
Jyväskylän ammattikorkeakoulu

Taitto ja kuvitus

Tanja Minkkinen, Jyväskylän ammattikorkeakoulu
Valokuvat ovat projektihenkilöstön ottamia, ellei kuvissa erikseen muuta mainita.

Julkaisuvuosi 2023

Copyright © Tekijät ja Jyväskylän ammattikorkeakoulu

ISBN 978-951-830-746-7

Ympäristöystävällisen rakennusmateriaalin 3D-tulostamisen jäljillä

Toim. Leena Turunen & Tanja Minkkinen



KESKI-SUOMEN LIITTO

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

jamk | Jyväskylän
ammattikorkeakoulu

Sisällys

Ympäristöystävällisen rakennusmateriaalin 3D-tulostamisen jäljillä	5
Betonin ja geopolymeerin 3D-tulostaminen sekä sementittömän tulostusmassan kehittäminen.....	6
Betonin ja geopolymeerin 3D-tulostaminen.....	7
Käytännön havaintoja onnistuneeseen tulostamiseen.....	9
Sekoituksen vaikutus massan notkeuteen.....	9
Biopohjaisten raaka-aineiden soveltuvuus betonin 3D-tulostukseen.....	10
Sementitön ja 3D-tulostettava massa.....	12
Koekappaleiden puristuslujuuden määrittäminen.....	13
Sementin korvaaminen masuunikuonalla ja soodasakalla.....	13
Hienoaineksen korvaaminen soodasakalla.....	14
Sementittömät massat.....	14
Aktivaattorimäärän optimointi.....	15
Vesilasi aktivaattorina.....	16
Sementittömän massan tulostaminen robotilla.....	17
Masuunikuona, biopohjainen lentotuhka ja soodasakka sideaineena.....	18
3D-tulostuksessa käytetyt raaka-aineet.....	24
Soodasakka.....	24
Biopohjainen lentotuhka.....	25
Masuunikuona.....	25
Vertico 3D-tulostusmassajauhe.....	26
Muut käytetyt aineet.....	26
Lähteet.....	27
Projektissa tuotetut opinnäytetyöt.....	27

Ympäristöystävällisen rakennusmateriaalin 3D-tulostamisen jäljillä

Leena Turunen, asiantuntija, Jyväskylän ammattikorkeakoulu

SOMA – Rakennusmateriaalin 3D-tulostaminen -hankkeessa syvennyttiin betonin ja betonin kaltaisen materiaalin (geopolymeerin) 3D-tulostamiseen. Betonin valmistuksessa käytettävä sementti tuottaa runsaasti hiilidioksidipäästöjä, joten hankkeessa haluttiin selvittää ympäristöystävällisempiä ja kiertotalouteen pohjautuvia ratkaisuja.

Perinteisen betonin raaka-aineiden lisäksi hankkeessa tulostettu materiaali sisälsi erilaisia teollisuuden sivuvirta- ja jätejakeita, kuten biotuhkaa, masuunikuonaa ja soodasakkaa. Erilaisista raaka-aineista valmistettiin useita erilaisia seoksia, joista valmistetuista koekappaleista määritettiin puristuslujuus. Puristuslujuus on yksi betonin tärkeimmistä ominaisuuksista. Eri massojen puristuslujuudet vaihtelivat suuresti ja saatiin myös lupaavia tuloksia. 3D-tulostettujen kappaleiden testaus jäi vähäiseksi. Lisäksi hankkeen aikana kehitettiin kokonaan sementitön 3D-tulostukseen soveltuva massa.

Betonia ja geopolymeeria 3D-tulostettiin projektin puitteissa hankitulla laitteella. Laittekokonaisuus koostui Verticon toimittamasta ABB 1600 -robotista, pumppausyksiköstä sekä viipalointihelmasta, jolla luotiin CAD-mallista tulostusohjelma robotin ohjaamiseen.

Hankkeessa selvitettiin 3D-tulostamisen etuja ja mahdollisuuksia Suomen olosuhteissa sekä valmiuksia ottaa kyseinen valmistusmenetelmä käyttöön rakennusteollisuudessa. Valmistusmenetelmän 3D-tulostaminen herätti runsaasti mielenkiintoa, ja siinä nähdään positiivista lisäarvoa betonirakentamiseen, mm. työturvallisuuden ja työergonomian näkökulmasta sekä monimutkaisten ja geometrinen rakenteiden valmistamisessa. Menetelmän käyttöönottoa hidastaa teknologian kalleus. Kokemukset betonin 3D-tulostamisesta ovat yleisesti vielä vähäiset ja menetelmä onkin vasta kehityskaarensa alussa.

Hankkeen tuloksena havaittiin, kuinka teollisuuden sivu- ja jätevirtoja voidaan hyödyntää rakentamisessa huomioiden vähähiilisyystavoitteet sekä ympäristön kuormituksen väheneminen.

Hankkeen rahoittajana toimi Euroopan Unionin aluekehitysrahasto.



KESKI-SUOMEN LIITTO

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Betonin ja geopolymeerin 3D-tulostaminen sekä sementittömän tulostusmassan kehittäminen

Leena Turunen, asiantuntija, Jyväskylän ammattikorkeakoulu

SOMA – rakennusmateriaalien 3D-tulostaminen -hankkeessa tulostettiin betonia ja betonin kaltaista materiaalia (geopolymeeriä). Hankkeen yhtenä tavoitteena oli tuoda esille 3D-tulostamisen etuja ja mahdollisuuksia rakennusteollisuudessa. Toisena tavoitteena oli kokonaan sementittömän massan 3D-tulostaminen valmiiksi kappaleeksi.

Perinteisen betonin raaka-aineiden lisäksi hankkeessa tutkittava tulostettava materiaali on sisältänyt erilaisia teollisuuden sivuvirta- ja jätejakeita, kuten biopohjaista lentotuhkaa, masuonikuonaa ja soodasakkaa.

Hankkeessa valmistettiin useita erilaisia koemassaseoksia, joita jatkokehitettiin edelleen. Massoista testattiin mm. puristuslujuutta. Betonia ja geopolymeeriä 3D-tulostettiin hankkeen puitteissa hankitulla laitteella. Laittekokonaisuus koostui Verticon toimittamasta tulostuslaittekokonaisuudesta, johon sisältyi ABB 1600 -robotti, pumppausyksikkö sekä viipalointiohjelma. Viipalointiohjelmalla luotiin CAD-mallista tulostusohjelma robotin ohjaamiseen.

Hanke hyödynsi Kestävä bioresiduaalibetoni (KBB) -aikana kertynyttä kokemusta ja saatuja havaintoja soodasakan käyttäytymisestä betonin kaltaisissa seoksissa.

Tässä julkaisussa tuodaan esille hankkeessa tehtyjä havaintoja betonin ja betonin kaltaisen materiaalin 3D-tulostamisesta. Lisäksi kerrotaan tulostettavan massan kehitystyöstä sekä eri aineiden soveltuvuudesta geopolymeerin raaka-aineeksi. Julkaisusta hyötyvät niin lisäävästä valmistuksesta kiinnostuneet kuin betonialan toimijatkin uusia massoja kehittäessään.



Betonin ja geopolymeerin 3D-tulostaminen

Jaakko Seppänen, projektiasiantuntija & Leena Turunen, asiantuntija, Jyväskylän ammattikorkeakoulu

Projekti käynnistyi hankkimalla hollantilaisen Verticon toimittama betonin 3D-tulostuslaittekokonaisuus. Kokonaisuuteen kuului ABB 1600 -robotti, itävaltalainen Mai-pumppu sekä viipalointiohjelma, jolla saatiin luotua CAD-mallista tulostusohjelma robotin ohjaamiseen. Laitteisto saapui Jamkille syksyllä 2021 (kuvat 1 ja 2).

Tulostusradan luontiin, viipalointiin sekä robottiohjelman luontiin käytetään Rhinoncheros 7-ohjelmaa sekä siinä olevaa Grasshopper -lisäosaa. Ohjelma ei kuulunut laitteiston toimituspakettiin, vaan se hankittiin erikseen. Ohjelmasta on käytössä oppilaitoskäyttöön tarkoitettu lisenssi, joka mahdollistaa 30 yhtäaikaista käyttäjää.



Kuva 1. 3D-tulostusrobotti.

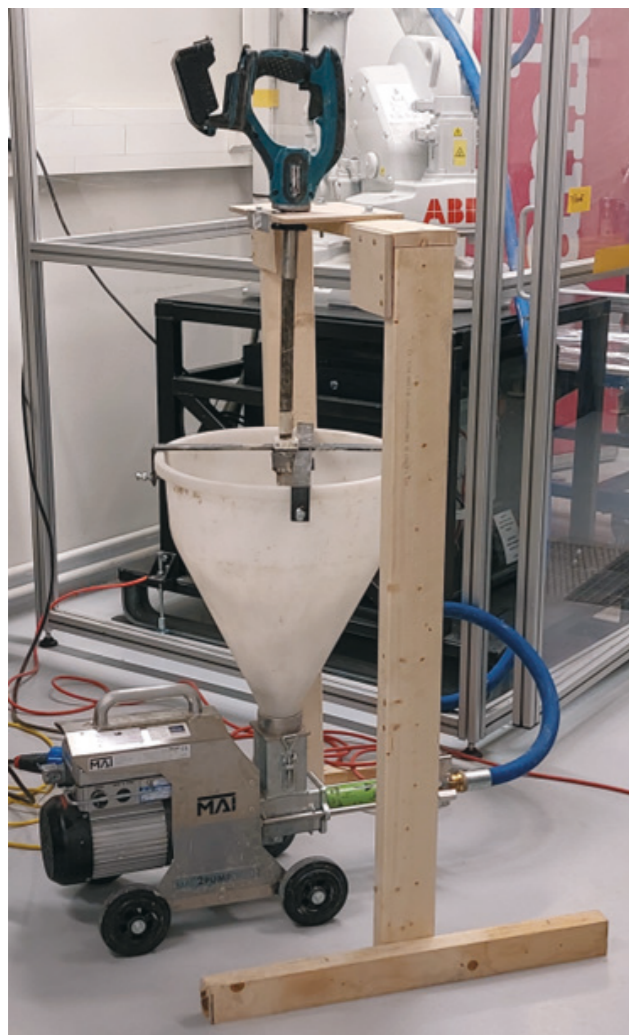


Kuva 2. Tulostuspää.

Rhinoncheros 7 -ohjelma tulee asentaa ohjeiden mukaisesti tietokoneelle lisäosineen. Tulostuksissa käytettiin sekä valmiita että Jamkilla Rhinolla tehtyjä tulostusratoja ja niiden pohjalta tehtyjä robottiohjelmaa.

Laitteiston mukana tullut pumppu (kuva 3.) on alun perin tarkoitettu laastipumpuksi, toisinaan se on suunniteltu piehirakeisen ja notkean massan pumppaamiseen. Tulostettava massa on kuitenkin paksumpaa kuin laasti, jolloin se ei kulje niin helposti syöttökaukalossa olevan kuristuksen läpi. Tulostusmassa holvaantuu helposti, eli jää kiinni syöttökaukalon reunoihin va-

lumatta syöttöruuviin asti. Aluksi massaa syötettiin manuaalisesti alaspäin syöttöruuville. Tämä aiheutti tulostukseen pätkimistä, kun massa ei kulkenut tasaisesti pursotussuuttimelle asti. Tämä korjattiin asentamalla akkukäyttöinen betonin sauvatärytin (betonivibra) syöttökaukaloon. Sauvatäryttimen avulla massa saatiin liikkumaan niin, ettei sitä tarvinnut enää pakottaa käsin liikkeelle.



Kuva 3. Massan syöttöpumppu, syöttökaukalo ja betonin sauvatärytin

Massan koostumuksessa ei havaittu vaikutusta täryttimen käytön seurauksena ja syöttö sujui ongelmitta suuttimelle asti. Tulostuksista tuli tasalaatuisempia sekä esteettisempiä, kun massa saatiin syötettyä tasaisena virtana robotille.

Syöttöpumpun kokohaasteesta keskusteltiin myös pumpun valmistajan kanssa, mutta käytössä olevaan pumppumalliin ei ole saatavilla isompaa syöttöruuvia, joka mahdollistaisi yli 2 mm raekoon käytön.

Isommalle raekoolle tarkoitetut pumput olisivat olleet liian suuria hankkeen budjetti huomioiden, joten tulostukset tehtiin 2 mm raekoolla. Myös käytettävissä oleva työskentelytila on rajallinen, joten pumpun tulisi olla myös fyysisesti pienikokoinen, jotta sitä mahtuisi operoimaan laboratoriotiloissa. Yleisesti tulostusmateriaaleissa käytetään pientä raekokoa.

Rakennuslaboratorion tiloihin sijoitettuun tulostussoluun on tehty turvallistamistoimia, jotta tulostaminen olisi turvallista. Turvallistamisessa oviin on asennettu rajakytkimet, jotka keskeyttävät robotin liikkeen, mikäli ovet avataan kesken tulostuksen. Tämä estää työskentelyalueella liikkumisen työkierron aikana. Robottiin on saatavilla jälkiasennuksena ABB:n safe move -toiminto, jolla robotin liikealuetta voidaan rajoittaa ohjelmallisesti.

Tämä aiheuttaisi kuitenkin lisäkustannuksia.

Käytännön havainnot onnistuneeseen tulostamiseen

Tulostusmassaa valmistettaessa havaittiin, että massassa tulee olla juuri oikeanlainen fyysinen koostumus. Massa on erittäin tarkka esimerkiksi käytettävän veden määrästä; massa ei saa mennä liian kosteaksi, jolloin se ei enää pysy koossa tulostettaessa. Usean tulostuskerran jälkeen oppii aistinvaraisesti huomaamaan, milloin massa on oikeanlaista.

Ennen varsinaisen tulostusmassan läpiajoa pumpun ja letkun läpi on laskettava vettä, millä varmistetaan massan tasalaatuinen syöttö.

Valmiin Verticon massan käyttöaika on jopa yli kaksi tuntia, eikä massan koostumuksessa havaittu muutosta useammankaan pumppauksen jälkeen. Betonitulostusrobotia käytettiin tilassa, jossa ei ole vakioitua ilmankosteutta. Tämä aiheutti pieniä vaihteluita tarvittavan nesteen määrässä sekä kuivumisajoissa. Mikäli massaa tulostetaan ulkona, on ilmankosteus huomioitava massan valmistuksessa. Tulostusalustan tulee olla tasainen hyvän ja tasalaatuisen tulostuksen aikaansaamiseksi.

Sekoituksen vaikutus massan notkuteen

Massan valmistuksessa sekoitusajalla havaittiin olevan merkitystä. Kun kuiva-aineet ovat sekoittuneet kunnolla nesteisiin ja massa on yhtenäistä, on sekoituksessa pidettävä noin viiden minuutin tauko. Tauon jälkeen massaa sekoitettaessa massan ominaisuudet tulevat kunnolla esiin ja massan todellinen notkeus tulee näkyviin. Tekeytymisvaiheessa massa notkistuu hieman, joten sekoittamisella on suuri merkitys, jottei seokseen tule lisätyksi liikaa vettä. Tämä on huomioitava etenkin uusien reseptien kehitysvaiheessa.



Biopohjaisten raaka-aineiden soveltuvuus betonin 3D-tulostukseen

Miia Jämsén, tutkija & Jukka Konttinen, vanhempi asiantuntija, Jyväskylän ammattikorkeakoulu

Kun betonin 3D-tulostukseen kehitetään biopohjaista lentotuhkaa, masuunikuonaa ja soodasakkaa sisältäviä tulostusmassoja, on käytettäessä huomioitava, että seosaineet ovat kuivia jauheita, joiden koostumus on kauttaaltaan tasalaatuista. Tällä on merkitystä 3D-tulostusprosessin tulostusmassan laatuun ja laadun vakioitumiseen sekä tulostuksen toistettavuuteen.

Tasalaatuisuuden lisäksi tulostusmassan raaka-aineiden tulee olla CE-hyväksytyjä sekä Reach-asetuksen mukaisesti hyväksytyjä ja täyttää CLP-asetus (1272/2008), ennen kuin niitä voidaan käyttää betonin seosaineena kaupallisessa käyttötarkoituksessa. Lisäksi raaka-aineiden hyödyntämistä määrittävät lainsäädäntö kuten maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999), ympäristönsuojelulaki (527/2014) ja jätelaki (646/2011), valtioneuvostojen ja ympäristöministeriön antamat asetukset ja määräykset, annetut rakennusnormit, suositukset, ohjeet ja oppaat sekä betonin valmistamista velvoittavat standardit.

Tässä hankkeessa käytetyistä teollisuuden sivutuotteista ainoastaan masuunikuona on saanut hyväksynnän betonin seosaineeksi ja sitä voidaan käyttää sellaiseen 3D-tulostuksessa. Masuunikuonalla on hyvät ominaisuudet ja oikeanlaisella 3D-tulostusmassaseoksella voidaan sementti jopa korvata kokonaan masuunikuonalla. Tällaista massaa ei kuitenkaan voida hyödyntää kantavissa rakenteissa, joihin on säädetty rasisitusluokat.

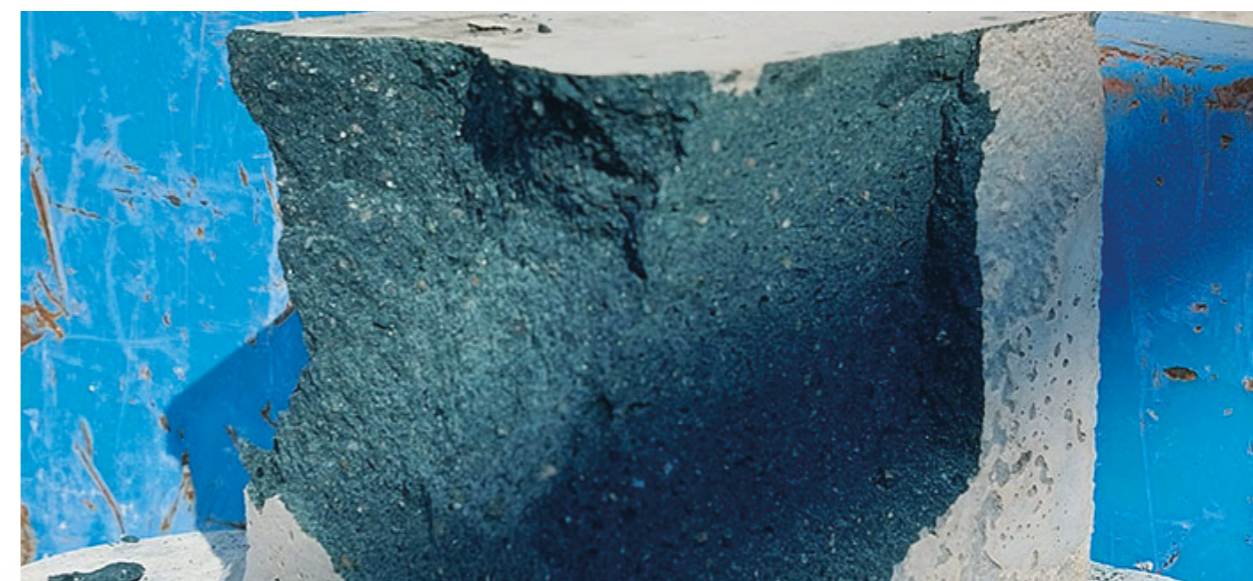
Testeissä käytetty lentotuhka ja soodasakka eivät olleet kaupallisia tuotteita. KBB-hankkeen pohjalta oli tiedossa, että näistä raaka-aineista tehty betonikappaleet erilaisilla valmistusresepteillä täyttivät MARA-asetuksen (VNA 843/2017) vaatimukset ympäristölle haitallisten liukoisten aineiden osalta.

Soodasakan soveltuvuutta betonin korvaajaksi, seosaineeksi tai hienoksi runkoaineeksi oli testattu KBB-hankkeessa. Aiemmin saatujen tulosten pohjalta tiedettiin, että sellukeitossa syntyvää, jätteenä luokiteltua alkalista viherlipeää voidaan tietyn ehdoin hyödyntää betonin valmistuksessa. Näin ollen kaatopaikalle ohjautuva jäte voitaisiin hyödyntää teollisuuden sivuvirtana. Tutkimuksissa huomattiin, että sementin korvaaminen soodasakalla heikensi betonin lujuutta suoraviivaisesti soodasakkapitoisuuden funktiona. Toisin sanoen soodasakka ei toiminut betonin seosaineena. Kun vastaavasti korvattiin betonin hienoin runkoaine eli filleri soodasakalla, betoni saavutti saman lujuuden, kuin ”normaali” betoni. Testien perusteella myös havaittiin, että pakkasen kesto-ominaisuudet hieman parantuivat, vaikka täysin kattavia Båros-testejä ei tehty. KBB-hankkeen tuloksien pohjalta näytti siltä, että hienonnettu/jauhettu soodasakka sopisi fillerin korvaajaksi.

Edellä kuvattuja aikaisempia kokemuksia soodasakan käyttämisestä betonivalmistuksessa hyödynnettiin, kun siirryttiin kehittämään sementtiä korvaavaa geopolymeeristä 3D-tulostusmassaa. Sementin korvaajaksi valittiin masuunikuona, jonka olisi reagoitava niin, että se ko-

vettuisi nopeasti, sillä 3D-tulostus vaatii massalta lyhyttä sitoutumisaikaa ja kovettumisaikaa. Soodasakkaa voidaan käyttää maksimissaan 10 % tulostusmassasta eli sitä voidaan hyödyntää 3D-tulostusmassassa alkaliaktivaattorina. Tuekseen soodasakka tarvitsee muita alkaliaktivaattoreita, kun sitä seostetaan masuunikuonan kanssa, jotta syntynyt geopolymeerimassa sopii tulostukseen ja on riittävän lujaa. Erityisesti hyvin emäksinen ja alkalinen soodasakka on toimiva 3D-tulostusmassassa. Eri tehtaiden sekä jopa toimituserien välillä soodasakan koostumus vaihtelee kuitenkin suuresti, minkä vuoksi soodasakan koostumuksen vakiointi ja standardisointi olisi käytettävyyden kannalta olennaista. Hankkeessa käytettiin samaa soodasakkaa koko hankkeen ajan, jolloin laatu pysyi vakiona.

Yleisesti tiedetään (Raiko et al. 2002), ettei sähkön- ja lämmöntuotannossa palaminen ole koskaan niin puhdasta, etteikö lentotuhkaan kulkeutuisi savukaasujen mukana palamattomia orgaanisia hiukkaspartikkeleita. Palamattomien orgaanisten yhdisteiden eli hehkutushäviön määrään vaikuttavat sekä poltto- ja savukaasujen puhdistustekniikat että käytetyt polttoaineet. Puuperäisen lentotuhkan hehkutushäviö on tyypillisesti alhaisempi kuin turve- tai hiilituhkan, mutta betonin valmistusprosessissa puupohjainen tuhka on epäorgaanisiltaan ominaisuusiltaan hiili- ja turvetuhkaa köyhempi. Biopohjaisen lentotuhkan epäorgaanisten yhdisteiden koostumukseen vaikuttavat polttotekniikka sekä poltossa käytetyt polttoaineet ja niiden koostumus, että näiden seossuhteet. (Raiko et al. 2002, Gango ja Kuokkanen 2018, Kotajärvi 2018) Toisin sanoen lentotuhkaa käytettäessä on tuhkan alkuperä ja tuhkan koostumus selvitettävä ja huomioitava betonin 3D-tulostusprosessissa, jolloin vältetään laadunvaihtelusta syntyviä ongelmia. Optimaalista olisi käyttää tulostusmassan valmistukseen koostumukseltaan optimoitua lentotuhkaa, jolloin laatu pysyy vakiona. Hankkeessa toteutetuissa testeissä käytettiin samaa materiaalia koko hankkeen ajan, jolloin biopohjaisen lentotuhkan laatu kyettiin vakioimaan. Käytännössä biopohjainen lentotuhka soveltuu 3D-tulostusmassan filleriksi, mutta seosaineena se ei ole käyttökelpoinen sementin eikä masuunikuonan korvaajana.



Sementitön ja 3D-tulostettava massa

Kalle Jaakkola, projektityöntekijä, Jyväskylän ammattikorkeakoulu

Hankkeen yhtenä päätavoitteena oli kehittää kokonaan sementitön 3D-tulostettava massa. Tässä osiossa kerrotaan massan kehitysvaiheista, kuinka eri aineiden seossuhteita muuttamalla ja eri ainesosia lisäämällä tai poistamalla valmistetun massan ominaisuudet muuttuvat. Tavoiteltavia ja seurattavia ominaisuuksia olivat massan 3D-tulostettavuus sekä massasta valmistetun kappaleen puristuslujuus. Raaka-aineina käytettiin soodasakkaa, biopohjaista lentotuhkaa ja masuunikuonaa, sekä erilaisia alkaliaktivaattoreita.

Ensimmäisissä 3D-tulostuksissa käytettiin laitetoimittajan kuivasäkeissä toimittamaa Verticon valmistetta (3D print base mix), johon lisättiin vain tarvittava määrä vettä. Aluksi tulosteissa ja käsipurutuksissa käytettiin ainoastaan Verticon massaa, jotta saatiin tuntumaa, miltä tulostettavan massan pitäisi näyttää. Myös oikeanlaisen notkeuden saavuttaminen vaati useita kokeiluja Verticon valmismassalla. Tämä sementtiä sisältävä massa toimi vertailumassana, jonka perusteella tulostettavien massojen koostumusta lähdettiin muokkaamaan sementittömään ja ympäristöystävällisempään suuntaan.

Tulostukseen soveltuvan massan hakemiseksi seulottiin Verticon valmista jauhetta ja tämän seulonnan tuloksen pohjalta kehitettiin betoniteollisuuden käytössä olevilla kiviaineksilla sopiva sekoitussuhde alle 2 mm kiviainekselle. Rajoitteen kiviaineksen raekoolle aiheutti käytössä olevan pumpun sallittu raekoko.

Tulosteet valmistettiin aluksi käsipuruttimella palko kerrallaan toistensa päälle pursottaen. Käsipurotin sekä käsin tulostettu koetuloste ovat kuvassa 4. Käsipuruttimella saatiin testattua pienten koe-erien ominaisuuksia ennen robottitulostimen käyttöönottoa.



Kuva 4. Käsipurotin ja sillä pursotettu koetulostuskappale.

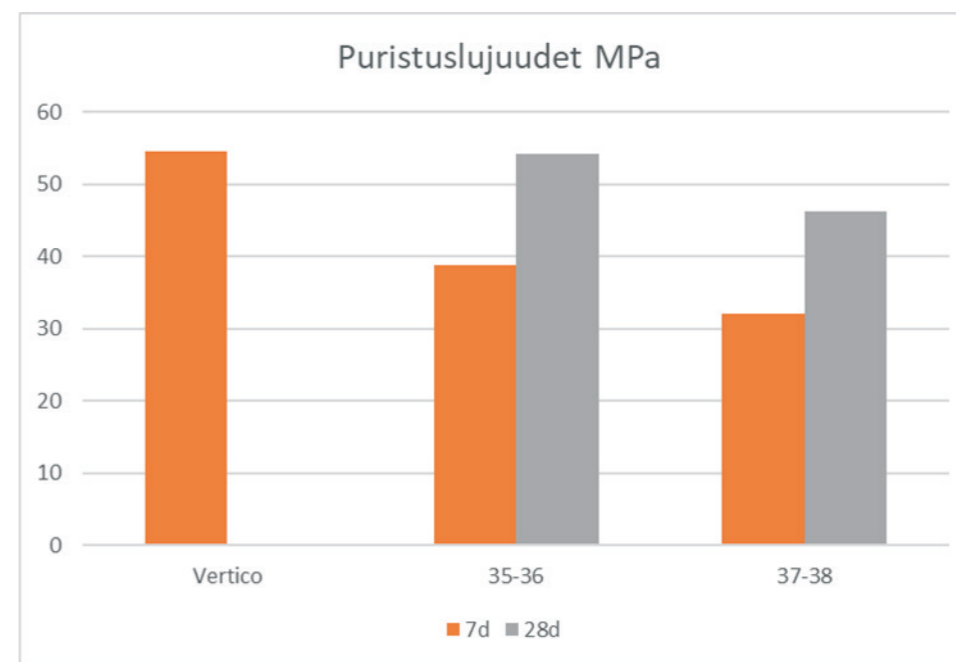
Koekappaleiden puristuslujuuden määrittäminen

Erilaisille massoille määritettiin puristuslujuudet ja niiden tulostusominaisuuksia testattiin käsipuruttimella. Kun haluttu puristuslujuus oli saavutettu ja tulostusominaisuudet olivat käsin pursottaen lupaavia, voitiin kokeilla tulostamista robotin avulla.

Koekappaleiden puristuslujuuden määrittämiseksi eri resepteistä valmistettiin 100 mm x 100 mm x 100 mm koekuutioita metallimuoteissa. Muotit täytettiin valmistetulla massalla ja tämän jälkeen tärytettiin sauvatäryttimellä. Täryttämisen jälkeen ylimääräinen massa tasoitettiin muotin yläpinnan tasolle ja peitettiin lasilevyllä. Kappaleet poistettiin muoteista 16 tunnin – 3 vuorokauden ikäisinä ja joko puristettiin välittömästi tämän jälkeen tai laitettiin vesisäilytykseen, riippuen puristusikästä. Vesisäilytys tapahtui huoneenlämmössä olevassa vesiastiassa. Vesisäilytyksen jälkeen kappaleet punnittiin vaa’alla ja puristettiin kalibroidulla puristimella. Molemmat toimenpiteet suoritettiin Jamkin akkreditoidussa rakennuslaboratoriossa.

Sementin korvaaminen masuunikuonalla ja soodasakalla

Aluksi osa sementin määrästä korvattiin masuunikuonalla. Tavoitteena oli korvata sementti kokonaan masuunikuonalla ja lisätä seokseen soodasakkaa, säilyttäen kuitenkin tulostukseen soveltuvat ominaisuudet. Koesarjassa 35 – 36 sementin määrästä 50 m-% korvattiin masuunikuonalla ja koesarjassa 37 – 38 sementistä 10 m-% korvattiin soodasakalla. Koesarjalla tarkoitetaan samasta reseptistä valmistettuja koekappaleita, jotka on puristettu eri ikäisinä.



Kuvio 1. Koesarjassa 35 – 36 sementin määrästä 50 m-% on korvattu masuunikuonalla ja koesarjassa 37 – 38 sementistä 10 m-% korvattu soodasakalla.

Puristuslujuus 7 vuorokauden iässä koekappaleella 35 oli 38,8 MPa ja koekappaleella 37 tulos oli 32,1 MPa. Puristuslujuus 28 vuorokauden ikäisenä koekappaleella 36 oli 54,2 MPa ja koekappaleella 38 vastaavasti 46,2 MPa. Kuviossa 1 koesarjojen puristuslujuuksia verrattuna Verticon massaan, jonka puristuslujuus seisemän vuorokauden iässä oli 54,6 MPa. Vertailumassan puristusikästä käytettiin seitsemää vuorokautta, koska 3D –tulostamisella pyritään nopeampaan rakentamiseen kuin muotteilla. Koesarjoja on puristettu yhden, seitsemän ja 28 vuorokauden ikäisinä.

Hienoaineksen korvaaminen soodasakalla

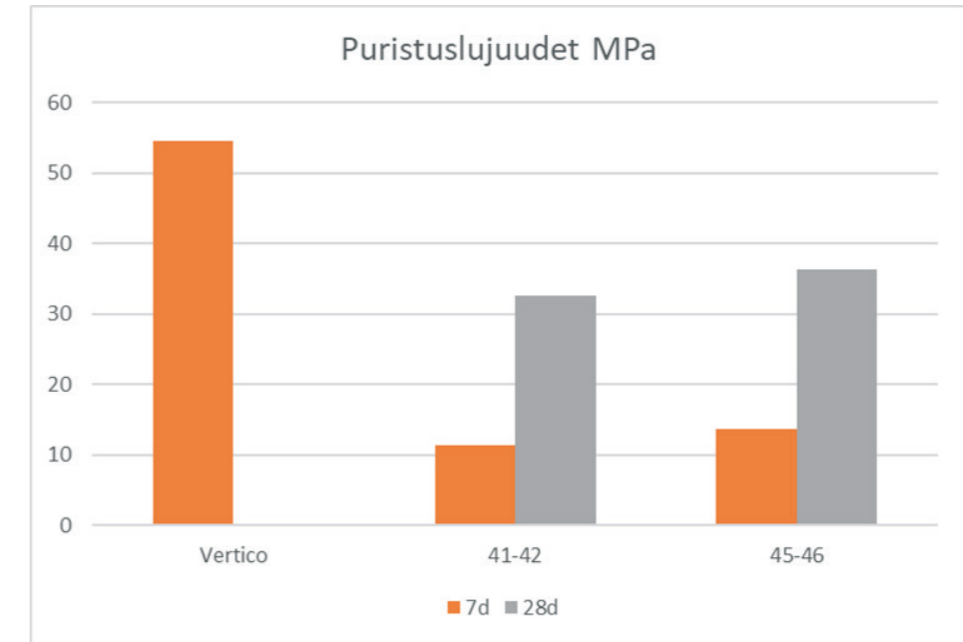
Soodasakalla korvattiin myös osa hienoaineksesta, jolla pyritään säästämään neitseellisen kiviaineksen käyttöä massassa ja näin lisätä kierrätettävien ainesosien määrää. Soodasakan prosentuaalisen osuuden kasvattaminen kuitenkin lisäsi merkittävästi veden tarvetta, joka aiheutti massan leviämisen ja näin ollen tämä ei sovellu tulostettavaan massa. Vesimäärän nostaminen aiheutti myös vesi/sideaine –suhteen kasvua, mikä heikensi huomattavasti massan kovettumista. Tulostettavalla massalla kovettumisen on suotavaa olla suhteellisen nopeaa, koska muotteja ei ole ja massan tulee kestää päälle tulostuvat kerrokset. Massan ollessa liian löysää alimmat kerrokset painuvat ja leviävät, kun kerroksia tulostetaan aiempien kerrosten päälle.

Sementittömät massat

Sementittömässä geopolymeerissä, jossa sideaineena toimii masuunikuona, kovettuminen tapahtui hitaasti. Runsas veden tarve yhdistettynä alkaliaktivaattorin määrän ja suhteiden hakeamiseen aiheutti kovettumisen suhteen haasteita. Alkaliaktivaattorina (myöhemmin aktivaattori) käytettiin natriumhydroksidin (NaOH) ja vesilasin seosta, millä aktivoitiin masuunikuonan piilevät hydrauliset ominaisuudet elikytoimiasementinkorvikkeen sideaineena itsenäisesti. Kun masuunikuonaa käytetään yhdessä sementin kanssa, veden ja sementin reaktiotuote kalsiumhydroksidi aktivoi nämä ominaisuudet. (Masuunikuona n.d.)

Ensimmäinen sementittömän massa, koesarja 41–42, sisälsi 10 % kokonaismassasta soodasakkaa, eikä tämä koesarja kestänyt kunnolla muotista purkamista. Koekuutiot olivat vielä käsin muovattavissa seuraavana päivänä ja niistä jäi palasia muotteihin kiinni. Tämän sarjan käsin tulostetut kappaleet hajosivat käsiin, eivätkä tulostetut palot pysyneet kiinni toisissaan 16 tunnin jälkeenkään koetulostuksesta.

Sarjassa 45–46 soodasakan osuutta pudotettiin 5 %:iin kokonaismassasta. Nämä kappaleet kestivät muotista purkamisen hieman paremmin, mutta koetulosteet eivät pysyneet vielääkään kasassa 16 tunnin jälkeen. Puristustulokset olivat myös parempia verrattuna sarjaan 41–42 (kuvio 2). Puristustulokset jäivät kuitenkin selvästi alle Verticon massan tuloksista. Puristuslujuus seitsemän vuorokauden iässä koekappaleella 41 oli 11,4 MPa ja koekappale 45 kesti 13,7 MPa puristuslujuuden. Puristuslujuus 28 vuorokauden ikäisenä koekappaleella 42 oli 32,6 MPa ja koekappaleella 46 tulos oli 36,3 MPa.



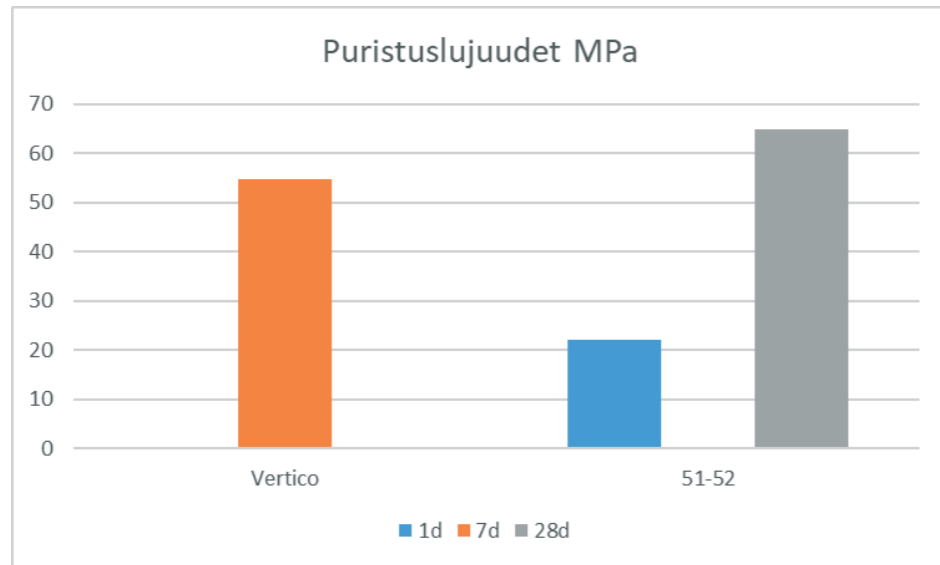
Kuvio 2. Puristuslujuudet soodasakkaa sisältäville kappaleille. Koesarja 41–42 sisälsi 10 % kokonaismassasta soodasakkaa, koesarjassa 45–46 soodasakan osuus oli 5 %.

Soodasakan määrää pudotettiin noin 2 % tuntumaan reseptin kokonaismassasta, jotta veden tarvetta saatiin pienennettyä. Tämä tehtiin kahdesta syystä, ensinnäkin massa levisi pursottamisen jälkeen ja toiseksi vesi/sideaine –suhde saataisiin riittävän pieneksi. Myös masuunikuonan määrää päätettiin pienentää ja runkoaineen osuutta kasvattaa kokeiden perusteella. Näillä muutoksilla tulostettavuus saatiin paremmaksi. Muutetuilla runkoaineen ja masuunikuonan määrällä lisäkokeita tehtäessä soodasakan määrä nostettiin noin 5 % kokonaismassasta, joka oli suurin määrä, mitä voitiin käyttää, jotta tulostusominaisuudet säilyisivät.

Aktivaattorimäärän optimointi

Aktivaattorin seossuhteisiin apuja löytyi artikkelista (Nematollah ja muut 2018), jossa kerrottiin tulostettavan geopolymeerin valmistamisesta käytettäessä sideaineena lentotuhkaa. Tällä parannellulla aktivaattori –seoksella koetulokset alkoivat olla lupaavia kovettumisen suhteen. Käsin pursotetut koetulosteet pysyivät koossa ilmaan nostettaessa, päällimmäisestä kerroksesta kiinni pitäen, jo alle 2 tunnin ikäisinä. Kyseinen massa alkoi jähmettyä jo 15 minuutin jälkeen sekoittamisesta. Tulostustarkoitukseen tämä kovettuminen oli kuitenkin aivan liian nopeaa, sillä massa olisi kovettunut jo pumppuun tai putkeen ennen tulostuksen valmistumista. Nopean kovettumisen vuoksi toinen kappaleista puristettiin jo seuraavana päivänä. Toinen kappaleista puristettiin 28 vuorokauden ikäisenä, jotta saataisiin selville lujuuskehitystä

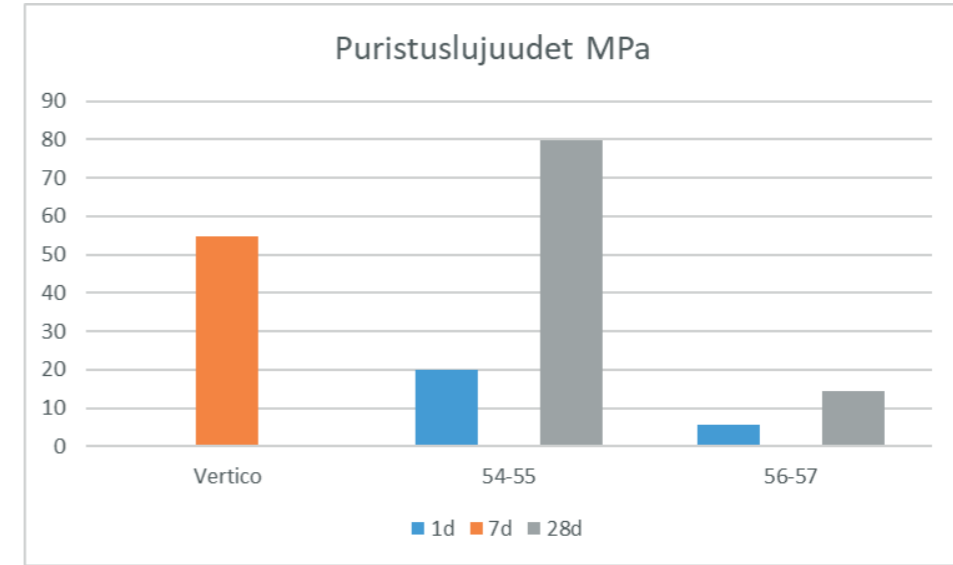
hieman pidemmältä ajalta. Tästä alkoi sopivan suhteen hakeminen aktivaattorille, jolla saavutettiin riittävän pitkä käsittelyaika tulostusta varten. Puristuslujuus yhden vuorokauden iässä koekappaleella 51 oli 22,1 MPa ja puristuslujuus 28 vuorokauden ikäisenä koekappaleella 52 oli 64,8 MPa (kuvio 3).



Kuvio 3. Koesarja 51-52 sementitön resepti erittäin nopeasti kovettavalla aktivaattoriseoksella.

Vesilasi aktivaattorina

Natriumhydroksidi-vesilasisuhdetta kokeiltiin ääripäästä toiseen. Ilman vesilasia valmistettujen kappaleiden tiheydet olivat alempia (kuvio 4), luokkaa 1950 kg/m³ (56-57), ja puristustulos todella alhainen verrattuna vesilasia sisältäviin koekappaleisiin. Esimerkiksi suhteen ollessa 1:1 tiheys oli 2182 kg/m³ (54-55) ja NaOH/vesilasin suhteen ollessa 5:1 oli tiheys 2143 kg/m³. Suhteen ollessa toisin päin, 1:5, kappale mureni käsiin. NaOH/vesilasi -suhteen ollessa 5:1 saatiin reseptille paras tulostettavuus ja työskentelyaika. Puristuslujuus yhden vuorokauden iässä koekappaleella 54 oli 19,9 MPa ja koekappaleella 56 5,7 MPa. Puristuslujuus 28 vuorokauden ikäisenä koekappaleella 55 oli 79,9 MPa ja koekappaleella 57 14,5 MPa.



Kuvio 4. Puristuslujuudet erilaisilla aktivaattoreilla. Koesarjassa 54-55 NaOH/vesilasi -suhde 1:1 verrattuna koesarjaan 56-57, missä aktivaattori pelkästään natriumhydroksidia. Aktivaattorin kokonaismassa pidetty samana.

Sementittömän massan tulostaminen robotilla

Reseptin 64 koepursotukset käsin antoivat lupaavia tuloksia varsinaista 3D-tulostamista varten ja tästä reseptistä valmistettiin isompi erä. Resepti 64 sisältää seuraavia aineita: seulottu kiviaine, 0,5-2 mm: 19,8 % seulottu kiviaine, 0-0,5 mm: 34,6 %, masuunikuona: 24,7 %, NaOH (5 M): 11,3 %, vesi: 1,8 %, uppobetoni: 0,7 %, soodasakka 4,9 % ja vesilasi: 2,3 %. Poikkeuksena ensimmäinen robottiavusteinen 3D-tulostuskerta tällä reseptillä, jossa runkoaineena on ollut leikkihiekkä.

Ensimmäisellä robotin avulla suoritettavalla sementittömän massan tulostuskerralla valmistettiin ympyrän muotoinen kukkaruukku (kuva 5). Tässä runkoaineena käytettiin leikkihiekkä, sillä tämä oli isona määränä helposti saatavilla ja rakeisuus oli pumpulle sopiva. Tämä tulostus osoitti sementittömällä massalla olevan samankaltaiset tulostusominaisuudet kuin sementillisellä massalla. Olennaisimpana erona sementilliseen massaan verrattuna havaittiin lyhyempi työstettävyyssäika.



Kuva 5. Ensimmäinen sementitön, reseptillä 64 valmistettu, robottiavusteinen 3D-tuloste.

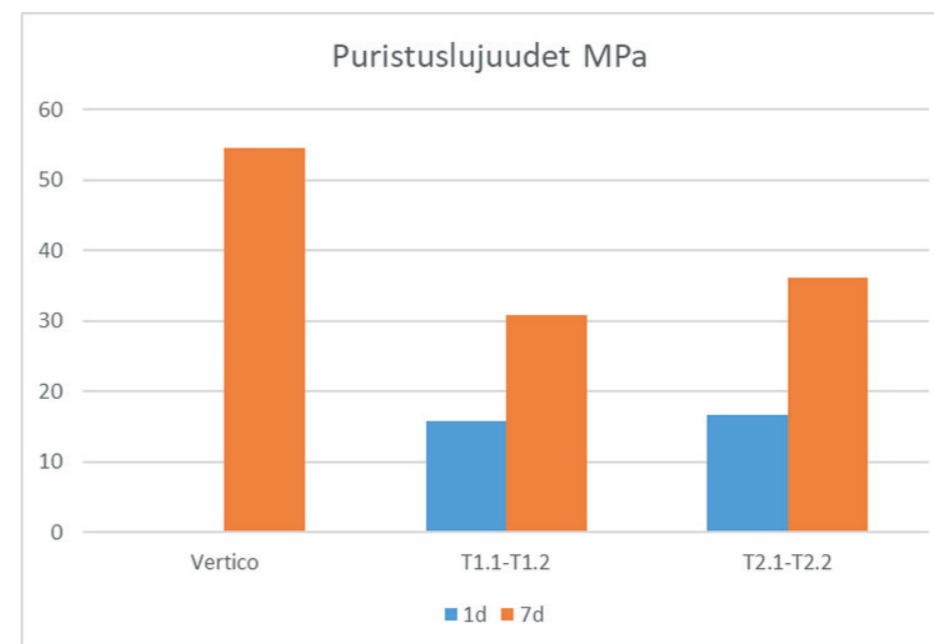
Toisella robotin avulla suoritettavalla 3D-tulostuskerralla, reseptin 64 mukaisella massalla, valmistettiin kirjain m (kuva 6). Tässä runkoaineena käytettiin 0–8 mm sorasta käsin seulottua kiviainesta. Tällä tulostuskerralla lyhyempi työstettävyyssäikä sekä massan erittäin nopea kovettuminen lämmön seurauksena konkretisoitui. Massan valmistamisen jälkeen tulostuksen aloitus viivästyi hieman ja tämän seurauksena pumpu ei työntänyt massaa kunnolla putkesta läpi. Tätä koetettiin korjata pumpun kierrosnopeutta nostamalla, mikä aiheutti massan jähmettymisen letkuun. Letku korvattiin varaletkulla ja massa lisättiin noin kaksi desilitraa vettä massan notkistamiseksi. Näiden toimenpiteiden jälkeen tulostus saatiin aloitettua ja kirjain m valmiiksi. Veden lisäyksestä huolimatta massa pysyi hyvin kasassa, eivätkä alimmat kerrokset painuneet kasaan. Kirjaimen tulostettiin seitsemän kerrosta.

Näiltä kahdelta eri tulostuskerralta valmistettiin koekuutioita, joiden massa on kulkenut ensin pumpun läpi ja pursotettu muottiin sen jälkeen. Massat tiivistettiin muottiin ainoastaan lastalla, muotin yläpinnan tasalta painaen, eikä sauvatärytintä käytetty kappaleen tiivistämisessä. Koekuutiot puristettiin yhden ja seitsemän vuorokauden iässä. Sauvatäryttimellä tiivistäminen jätettiin pois, jotta puristustulos vastaisi enemmän itse tulosteen puristuslujuutta. Puristuslujuus yhden vuorokauden iässä tulostuskoekappaleella T1.1 oli 15,7 MPa ja tulostuskoekappaleella T2.1 oli lähes sama, 16,7 MPa (kuvio 5). Puristuslujuus seitsemän vuorokauden ikäisenä koekappaleella T1.2 oli 30,9 MPa ja koekappaleelle T2.2 saatiin 36,1 MPa tulos. Kappaleet T1.1 ja T1.2 ovat ensimmäiseltä robottiavusteiselta sementittömän massan tulostuskerralta valmistettuja koekuutioita ja kappaleet T2.1 ja T2.2 ovat toiselta tulostuskerralta.

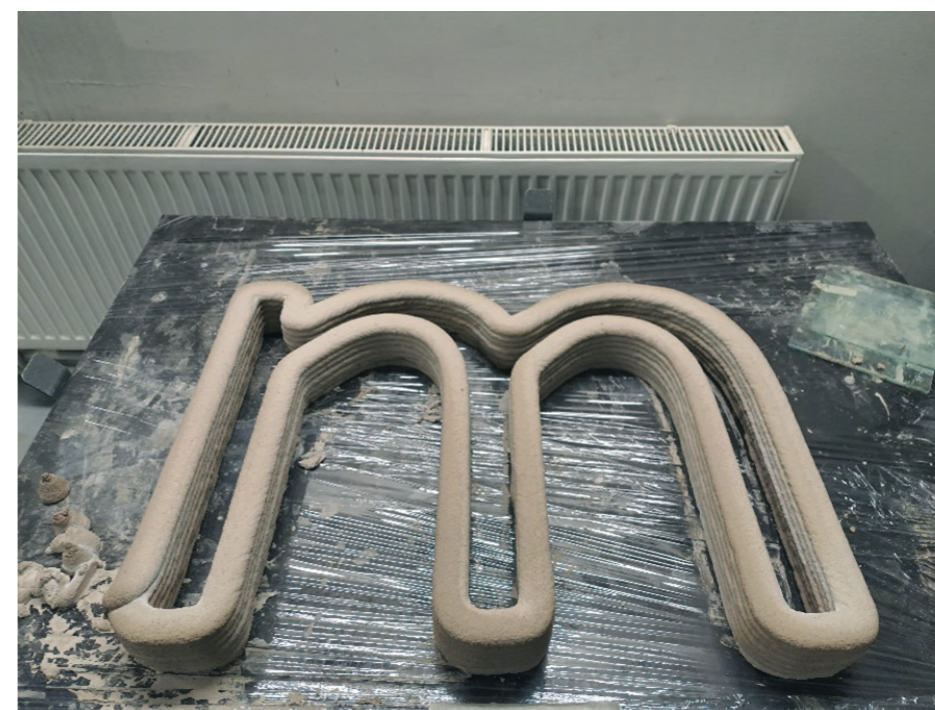
Masuunikuona, biopohjainen lentotuhka ja soodasakka sideaineena

Biopohjaisen lentotuhkan käyttöä kokeiltiin myös sideaineena, mutta nämä tulokset jäivät todella alhaisiksi ja toimivaa aktivaattoriseosta ei löytynyt, mikä parantaisi näiden kappaleiden kovettumista. Osasyynä on huomattavasti suurempi vedentarve kuin masuunikuonalla ja sementillä, vaikka sitoutumiseen tarvittavia yhdisteitä olisikin. Kokeiden perusteella suuntaa antava vedentarpeen lisäys masuunikuonaan verrattuna oli 10 % biopohjaisen lentotuhkan massasta.

Sementistä, masuunikuonasta, biopohjaisesta lentotuhkasta ja soodasakasta valmistettiin koekappaleita eri sideaineen lujuuden selvittämiseksi, standardin SFS-EN 196-1:2016 kohtaa 6.1 soveltaen, muilta osin testaus poikkeaa standardista. Standardi määrittelee massaosuudet seuraavasti: 1 osa sementtiä, 3 osaa standardihiekkaa ja puoli osaa vettä. Näillä suhteilla valmistettiin 100 mm x 100 mm x 100 mm koekuutioita, jotka puristettiin yhden ja seitsemän vuorokauden ikäisinä. Tällä testillä selvitettiin eri aineiden soveltuvuutta sideaineeksi, verrattuna sementtiin. Masuunikuonaa, soodasakkaa ja biopohjaista lentotuhkaa sideaineena käyttävien kappaleiden vesiosuutta jouduttiin soveltamaan, sillä vesi ei näissä kappaleissa aktivoi kovettumisreaktiota. Näissä kappaleissa käytettiin reseptin 64 sideaine/aktivaattori -suhdetta ja vettä lisättiin ottaen huomioon natriumhydroksidin ja vesilasin sisältämä vesimäärä. Vesimäärä yritettiin pitää mahdollisimman lähellä 1:2 sideaineen määrästä, mutta soodasakka ja biopohjainen lentotuhka vaativat lisävettä, jotta massa tuli yhtenäiseksi, eikä ollut muovailuominaisuudeltaan kuivan hiekan omaista.



Kuvio 5. Robotilla 3D-tulostettujen, sementittömien kappaleiden tulostetusta massasta valmistettujen koekappaleiden puristuslujuudet. Vertailumassana Vertico.



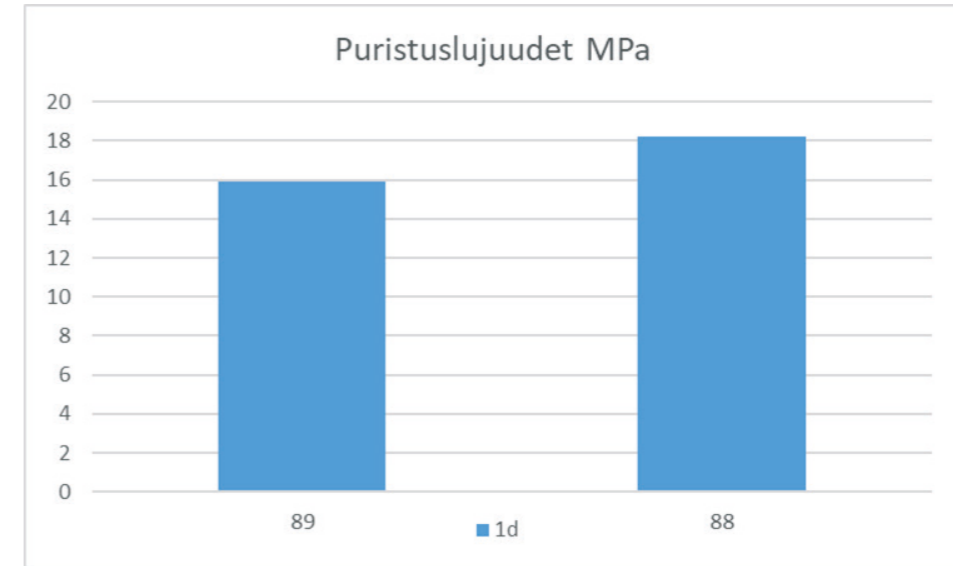
Kuva 6. Toinen reseptillä 64 valmistettu robottiavusteinen 3D-tuloste.

Masuunikuonaa sisältävästä kappaleesta jätettiin 11,7 % vettä pois verrattuna sementtiä sisältävään koekappaleeseen, sillä tämän vedentarve on pienempi kuin sementillä ja notkeutta haluttiin pitää samankaltaisena tulostusominaisuutta silmällä pitäen. Soodasakkaa sisältävään kappaleeseen lisättiin 15 % enemmän vettä ja biopohjaista lentotuhkaa sisältävään kappaleeseen lisättiin 9 % enemmän vettä kuin sementtiä sisältävään koekappaleeseen. Koekappaleiden vesi/sideaine -suhde oli seuraava: sementtiä sideaineena käyttävä 0,50, masuunikuonaa sideaineena käyttävä 0,44, biopohjaista lentotuhkaa sideaineena käyttävä 0,55 ja soodasakkaa sideaineena käyttävä 0,58.

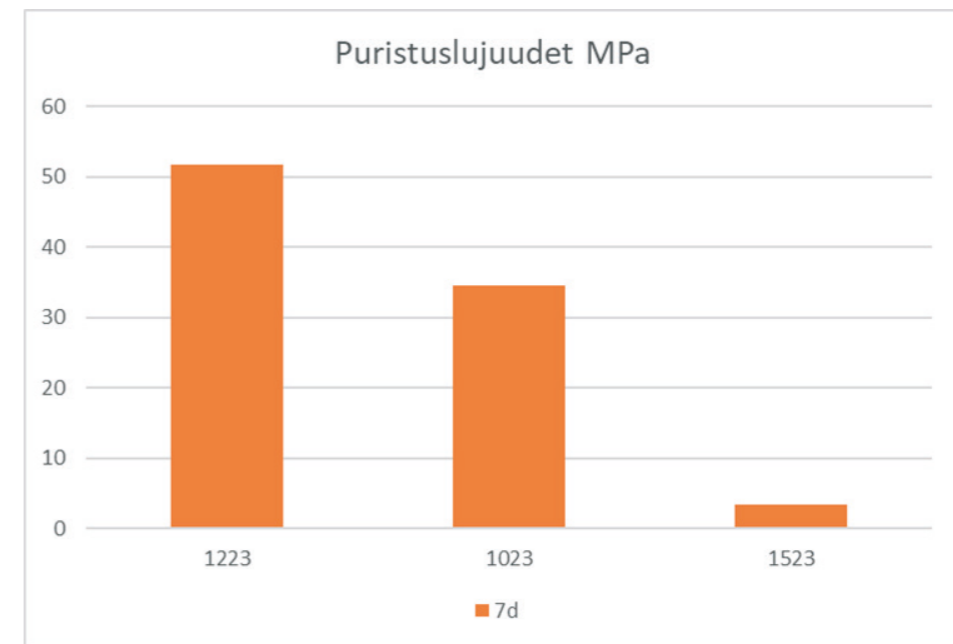
Eri sideaineilla tehtyjä koekappaleita puristettaessa selvisi näiden käyttökelpoisuus sideaineeksi ainekohtaisesti. Kuviossa 6 on esitetty puristuslujuudet masuunikuonaa sideaineena käyttävälle kappaleelle (88; 18,2 MPa) ja sementtiä sideaineena käyttävälle kappaleelle (89; 15,9 MPa) yhden vuorokauden ikäisenä. Biopohjaista lentotuhkaa ja soodasakkaa sideaineena käyttävät kappaleet eivät kestäneet puristamista laisinkaan yhden vuorokauden ikäisinä. Seitsemän vuorokauden iässä puristettaessa soodasakkakappale ei kestänyt puristusta laisinkaan ja biopohjainen lentotuhkakappale 1523 antoi puristimessa 3,4 MPa tuloksen (kuvio 7). Biopohjainen lentotuhkakappale kuitenkin alkoi puristumaan kasaan heti sitä puristettaessa ja mureni pieniksi palasiksi murtumatta kunnolla. Sementtiä ja masuunikuonaa sideaineena käyttävät koekappaleet puristettiin myös seitsemän vuorokauden ikäisenä. Sementtiä sideaineena käyttävän koekappaleen 1223 puristustulos oli 51,7 MPa ja masuunikuonaa sideaineena käyttävän koekappaleen 1023 puristustulos oli 34,5 MPa seitsemän vuorokauden iässä.

Biopohjaisen lentotuhkan turpoaminen havaittiin valmistettaessa koekappaleita, mitkä sisälisivät ainoastaan standardihiekkan ja sideaineen nesteiden lisäksi. Valamista seuraavana päivänä 100 mm x 100 mm x 100 mm koekappaleista mitattiin turpoamista jopa 5 mm ylitse hierretyn muottipinnan (kuva 7). Tämä ominaisuus on erittäin ongelmallinen, sillä se aiheuttaa koekappaleissa sisäisiä vaurioita turpoamisen aiheuttamien rasitusten vuoksi kovettumisvaiheessa. Tämä tuli erityisesti ilmi reseptistä 64 valmistetussa koekappaleessa, jossa alle 0,5 mm kiviaines korvattiin kokonaan biopohjaisella lentotuhkalla. Tässä kokeilussa ilmeni runsas lisäveden tarve verrattuna alkuperäiseen kokeeseen. Kuiva-aineiden kokonaismassan pysyessä samana nousi veden prosentuaalinen osuus kokonaismassasta 1,8 prosentista 9,0 prosenttiin, eli noin 5,5-kertainen määrä lisättyä vettä alkuperäiseen nähden.

Turpoamiseen kokeiltiin löytää ratkaisu kastelemalla biopohjainen lentotuhka siten, että se muuttui liejumaiseksi. Tämän jälkeen seosta kuivatettiin uunissa (60 °C) niin kauan, ettei sen massa enää muuttunut lainkaan vuorokaudessa. Tätä kasteltua ja kuivatettua biopohjaista lentotuhkaa sideaineena käyttävä koekappale ei turvonnut läheskään yhtä paljoa kuin aikaisemmat koekappaleet, vain noin 0,5 mm. Voisiko syynä olla poistunut kidevesi, joka kastelun jälkeen palaa takasin tuhkaan ja aiheuttaa turpoamisen? Edellä kuvatulla tavalla esikäsitellystä tuhkasta valmistetun koekappaleen (1623) puristustulos seitsemän vuorokauden ikäisenä oli 1,5 MPa. Muiden biopohjaista lentotuhkaa sideaineena käyttävien kappaleiden puristuslujuus seitsemän vuorokauden iässä oli 3 MPa tuntumassa: 1323 2,9 MPa, 1423 3,2 MPa ja 1523 3,4 MPa. Kappaleet 1423 ja 1523 valmistettiin samasta sekoituserästä. Alhaisempaa puristuslujuutta kappaleelle 1623 selittää tämän vaatima lisävesi, jotta massa saatiin pysymään yhtenäisenä ja vas-



Kuvio 6. Koekappaleiden 89 (sideaineena sementti) ja 88 (sideaineena masuunikuona) puristuslujuudet yhden vuorokauden iässä.



Kuvio 7. Puristuslujuuksien vertailu seitsemän vuorokauden iässä, kun sideaineena on sementti (koekappale 1223), masuunikuona (1023) ja biopohjainen lentotuhka (1523).

taamaan käsiteltävyydeltään muita koekappaleita. Tällä koekappaleella vesi/sideaine -suhde oli 0,71 verrattuna muiden biopohjaisten lentotuhkakappaleiden kappaleiden vesi/sideainesuhteeseen 0,55. Koekappaleissa 1322, 1423, 1523 ja 1623 käytettiin 10 M natriumhydroksidia 5 M natriumhydroksidin sijaan, pitäen natriumhydroksidin kokonaismassa samana. Tällä kokeiltiin väkevämmän liuoksen vaikutusta kovettumiseen.



Kuva 7. Muottipinnan yläpuolelle turvonnut kappale, joka käyttää biopohjaista lentotuhkaa sideaineena.

Lähteet

Masuunikuona. N.d. Betonitieto. Viitattu 8.11.2023

<https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/masuunikuona.html>

Nematollahi, B., Vijay, P., Sanjayan, J., Nazari, A., Xia, M., Nerella, V. N. & Mechtcherine, V. 2018. Effect of Polypropylene Fibre Addition on Properties of Geopolymers Made by 3D Printing for Digital Construction. *Materials* 2018, 11, 2352.

Resepteissä käytetyt raaka-aineet ja niiden seossuhteet

Reseptin ainesosat	Koesarja 35-36 (m-%)	Koesarja 37-38 (m-%)	Koesarja 41-42 (m-%)	Koesarja 45-46 (m-%)	Koesarja 51-52 (m-%)	Koesarja 54-55 (m-%)	Koesarja 56-57 (m-%)	Resepti 64 (m-%)
Runkoaine 1 0,5-2 mm	18,8 %	18,8 %	17,9 %	19,0 %	19,7 %	19,4 %	19,7 %	19,8 %
Runkoaine 2 < 0,5 mm	35,0 %	35,0 %	32,6 %	35,4 %	39,5 %	38,9 %	39,5 %	34,6 %
Masuuni-kuona	15,8 %	15,8 %	20,4 %	22,3 %	19,7 %	19,4 %	19,7 %	24,7 %
NaOH (5 M)	-	-	2,0 %	2,0 %	5,3 %	6,7 %	13,5 %	11,3 %
Vesi	14,1 %	14,1 %	11,3 %	10,0 %	1,9 %	3,3 %	1,9 %	1,8 %
Uppobetoni	0,7 %	0,7 %	0,7 %	0,7 %	0,8 %	0,7 %	0,8 %	0,7 %
Soodasakka	-	3,2 %	9,5 %	5,0 %	4,9 %	4,9 %	4,9 %	4,9 %
Vesilasi	-	-	5,6 %	5,7 %	8,2 %	6,7 %	-	2,3 %
Sementti	15,8 %	12,6 %	-	-	-	-	-	-
Biotuhka	-	-	-	-	-	-	-	-
Reseptin ainesosat	Koekappale 88 (m-%)	Koekappale 89 (m-%)	Koekappale 1023 (m-%)	Koekappale 1223 (m-%)	Koekappale 1323 (m-%)	Koesarja 1423-1523 (m-%)	Koekappale 1623 (m-%)	Koekappale 1723 (m-%)
Runkoaine 3 0-2 mm	66,0 %	66,7 %	66,0 %	66,7 %	63,0 %	63,0 %	61,0 %	62,6 %
Masuuni-kuona	22,0 %	-	22,0 %	-	-	-	-	-
NaOH (5 M)	10,0 %	-	10,0 %	-	9,6 % *	9,6 % *	9,3 % *	9,5 %
Vesi	-	11,1 %	-	11,1 %	1,6 %	1,6 %	4,8 %	2,2 %
Uppobetoni	-	-	-	-	-	-	-	-
Soodasakka	-	-	-	-	-	-	-	20,9 %
Vesilasi	2,0 %	-	2,0 %	-	4,8 %	4,8 %	4,6 %	4,8 %
Sementti	-	22,2 %	-	22,2 %	-	-	-	-
Biotuhka	-	-	-	-	21,0 %	21,0 %	20,3 %	-

* Näissä kappaleissa natriumhydroksidin vahvuus 10 M

Taulukko 1. Näissä kappaleissa natriumhydroksidin vahvuus 10 M.

3D-tulostuksessa käytetyt raaka-aineet

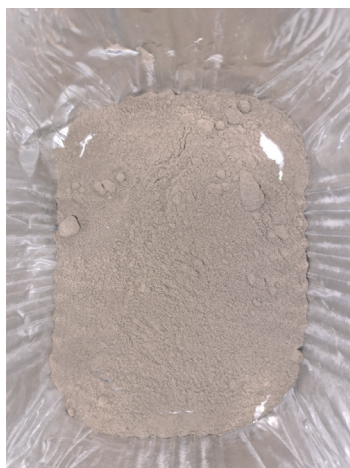
Miia Jämsén, tutkija, Jyväskylän ammattikorkeakoulu

Betonimaisten sekä sementittömien kappaleiden tulostamisessa ja massojen tuotekehityksessä käytettiin niin perinteisiä betoniteollisuuden käyttämiä raaka-aineita kuin teollisia sivu- ja jätemateriaaleja. Tässä osiossa on kerrottu tarkemmin käytetyistä aineista ja niiden ominaisuuksista.

Soodasakka

3D-tulostusmassaraaka-aineeksi valittu soodasakka perustui Kestävä bioresiduaali (KBB)-hankkeessa tehtyihin testeihin ja soodasakkojen koostumusanalyseihin. Näiden pohjalta 3D-tulostusmassassa käytettiin ominaisuuksiltaan soveltuvinta soodasakkaa (kuva 8). Käytetty soodasakka oli peräisin selluteollisuudesta. KBB-hankkeessa soodasakka oli kuivattu (105 °C), jauhattu ja seulottu (< 0,063 mm). Jauhettua soodasakkaa on varastoitu suljetuissa astioissa huoneenlämmössä.

Massan valmistukseen valitun soodasakan (viherlipeäsakan) määritettyjä ominaisuuksia on esitetty taulukossa 2. Soodasakka myös sisälsi runsaasti alkali- ja maa-alkalimetalleja, kuten kalsiumia, magnesiumia ja kaliumia, sekä niukasti piitä, alumiinia ja rautaa.



Kuva 8. 3D-tulostuksessa käytetty soodasakka.

Ominaisuus	Määrittystulos	Huomiot
Kuiva-ainepitoisuus	98,3 m-%, d	SFS-EN ISO 18134
Tuhkapitoisuus	94,5 m-%, d	SFS-EN 18122, 550 °C
Hehkutushäviö	3,8 m-%, d	laskennallinen
pH	12,85	SFS-EN 15933
Kloridi (Cl ⁻)	0,015 m-%, d	EN 16192
Alkalisuus	51,87 mmol/l, d	SFS 3500
Kokonaisalkalipitoisuus Na ₂ O _{eq}	33,9 m-%, d	SFS-EN ISO 11885, laskennallinen
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	5,5 m-%, d	SFS-EN ISO 11885
K ₂ O	0,20 m-%	SFS-EN ISO 11885
Na ₂ O	33,8 m-%	SFS-EN ISO 11885
CaO	51,0 m-%	SFS-EN ISO 11885
MgO	3,1 m-%	SFS-EN ISO 11885
P ₂ O ₅	2,2 m-%	SFS-EN ISO 11885

Taulukko 2. 3D-tulostuksessa käytetyn soodasakan ominaisuudet.

Biopohjainen lentotuhka

Biopohjainen lentotuhka (kuva 9) oli peräisin selluteollisuuden kuorikattilasta. Tuhka varastoitettiin suljetuissa astioissa huoneenlämmössä. Tuhkaa käytettiin 3D-tulostusmassan valmistuksessa saapumistilaisena.

Biopohjaiselle lentotuhkalle määritettyjä ominaisuuksia on esitetty taulukossa 3. Ominaisuuksiltaan lentotuhka oli köyhänlainen raaka-aine betonin 3D-tulostusmassan valmistukseen.



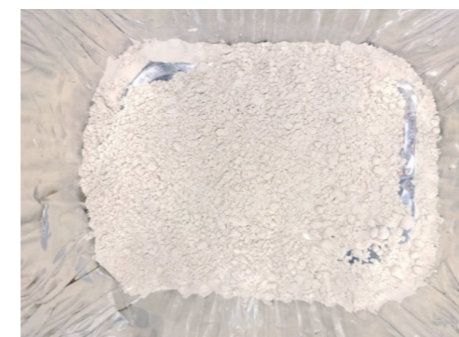
Kuva 9. Biopohjainen lentotuhka.

Ominaisuus	Määrittystulos	Huomiot
Kuiva-ainepitoisuus	99,9 m-%, d	SFS-EN ISO 18134
Tuhkapitoisuus	98,8 m-%, d	SFS-EN 18122, 550 °C
Hehkutushäviö	1,14 m-%, d	laskennallinen
pH	12,79	SFS-EN 15933
Kloridi (Cl ⁻)	0,014 m-%, d	SFS-EN 14629, Volhardin menetelmä
Alkalisuus	13,32 mmol/l, d	SFS 3500
Kokonaisalkalipitoisuus Na ₂ O _{eq}	4,6 m-%, d	XRF, laskennallinen
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	65,5 m-%, d	XRF
K ₂ O	3,2 m-%, d	XRF
Na ₂ O	2,5 m-%, d	XRF
CaO	17,0 m-%, d	XRF
MgO	3,0 m-%, d	XRF
P ₂ O ₅	2,6 m-%, d	XRF

Taulukko 3. Tulostuksessa ja testauksissa käytetyn lentotuhkan ominaisuudet.

Masuunikuona

Masuunikuonajauhe (kuvassa 10) on kaupallista tuotetta, tuotenimeltä Finnsementti KJ400. Valmistajan ilmoittamat masuunikuonajauheen ominaisuudet on esitetty taulukossa 4.



Kuva 10. Masuunikuona.

Chemical Properties

CaO	36–42%
SiO ₂	36–40%
Al ₂ O ₃	8–10%
MgO	10–12%
S	1.5–2%
Ti	0.9–1.3%
K ₂ O	0.5–1.0%
Na ₂ O	0.5–1.0%

Technical Data

Colour	52–56% (ISO4270)
State	fine powder
Absolute density	2 900 kg/m ³
Bulk density	1 200 kg/m ³
Fineness (Blaine)	400 m ² /kg

Taulukko 4. Masuunikuonajauheen, Finnsementti KJ400, ominaisuudet (Finnsementti 2019).

Vertico 3D-tulostusmassajauhe

Vertico 3D-tulostusmassajauhe (Vertico 3D print base mix, kuva 11) on Verticon toimittama valmiste, jota käytetään raaka-aineena betonielementtien valmistuksessa 3D-betonitulostuksessa. (Vertico 2021) Kyseessä on seos, josta voidaan valmistaa suoraan tulostettavaa massaa.

Toimittajan mukaan jauhe koostuu seuraavista ainesosista:

- 40,13 % Portland sementti CEM I 52,5 R
- 59,07 % teollisesti kuivattu hiekka
- 0,80 % P50 uppobetonin lisäaine



Kuva 11. Vertico-tulostusmassajauhe.

Vertico oli alkaliteetiltaan moninkertainen verrattuna soodasakkaan ja biopohjaiseen lentotuhkaan, toisin sanoen puskurointikyky oli äärimmäisen hyvä. Jauhe sisälsi suurimmaksi osaksi piitä ja kalsiumia. Runsas piipitoisuus häytti käytössä olevaa määritysmenetelmää, joten tarkempaa alkuainekoostumusta ei määritetty. Jauheseoksen pH oli 11,35 ja kloridipitoisuus (Cl-) 0,0014 m-% kuiva-aineessa (SFS-EN 14629, Volhardin menetelmä).

Muut käytetyt aineet

Betonin 3D-tulostusmassan runkoaineena käytetty sorakiviaines oli joko homogeenisestä (0-8 mm) seulottua kiviainesta (0-2 mm) tai valmiiksi 3D-tulostusmassaan raekooltaan sopivaa luonnonhiekkaa (kvartsi, 0-2 mm, Leikkihiekkä LH, Fescon).

Betonin 3D-tulostusmassassa käytetty sideaine oli kaupallisesti saatavaa sementtiä (pikase-mentti CEM I 52,5 R, Finnsementti).

Alkaliaktivaattoreina käytettiin kiinteistä rakeista valmistettua natriumhydroksidin vesiliuosta (NaOH 5 mol/l, Merck) ja vesilasia (tekninen natriumsilikaatti (aq), VWR Chemicals). Vesilasi myös toimii 3D-tulostusmassan tiivistäjänä.

3D-tulostusmassan sitkeyttä ja koossapysymistä haettiin lisäaineen avulla. Tähän valittiin kaupallinen uppobetoni (Uppo-Parmix, Finnsementti). Valmistajan mukaan (Finnsementti) Uppo-Parmix sisälsi n. 50 % silikajauhetta.

Lähteet

Gango, A. ja Kuokkanen, E. 2018. Biopohjaisen lentotuhkan hyötykäyttö lannoitteena: Erotustekniikan tutkimuskeskus -hankkeen loppuraportti. Xamk Kehittää 45. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Kotka.

Finnsementti. 2019. KJ400 - Ground Granulated Blast Furnace Slag. Safety data sheet.

Finnsementti. 2015. Uppo-Parmix. Safety data sheet.

Kotajärvi L. 2017. Leijupetipolton lentotuhkat ja niiden käyttömahdollisuudet. Kandidaatintyö. Oulun yliopisto, teknillinen tiedekunta, prosessitekniikka. Oulu. s. 37.

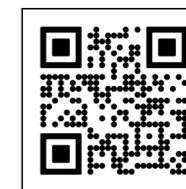
Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M., & Kurki-Suonio, I. (Toimittajat) 2002. Poltto ja palaminen. Toinen täydennetty painos. International Flame Research Foundation (IFRF), Suomen kansallinen osasto. Helsinki.

Vertico. 2021. Vertico 3D print base mix. Safety data sheet.

Projektissa tuotetut opinnäytetyöt

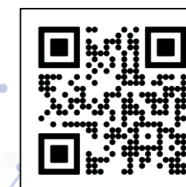
3D-tulostettavan geopolymeerin reseptin kehitys, Jaakkola Kalle (2023)

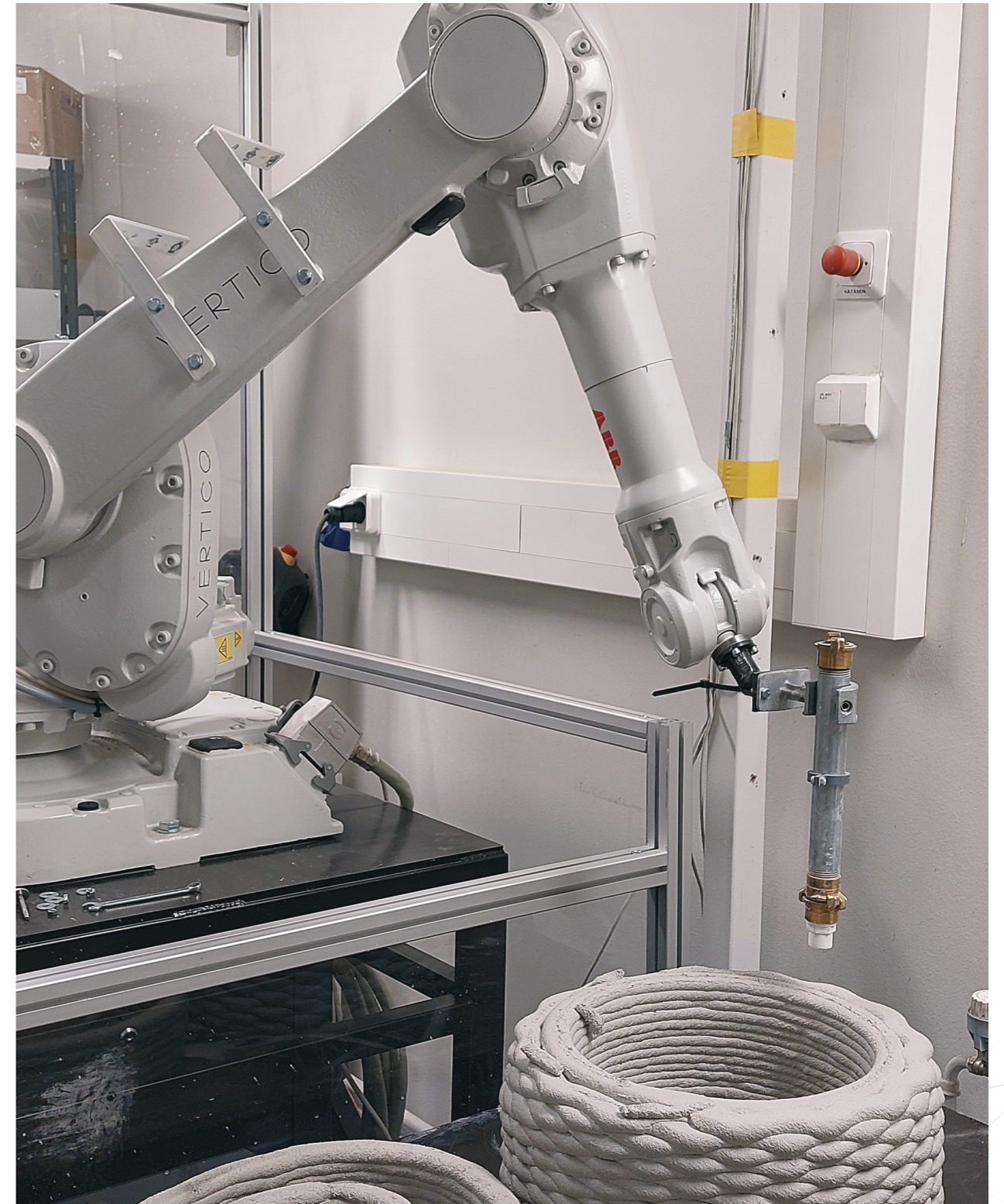
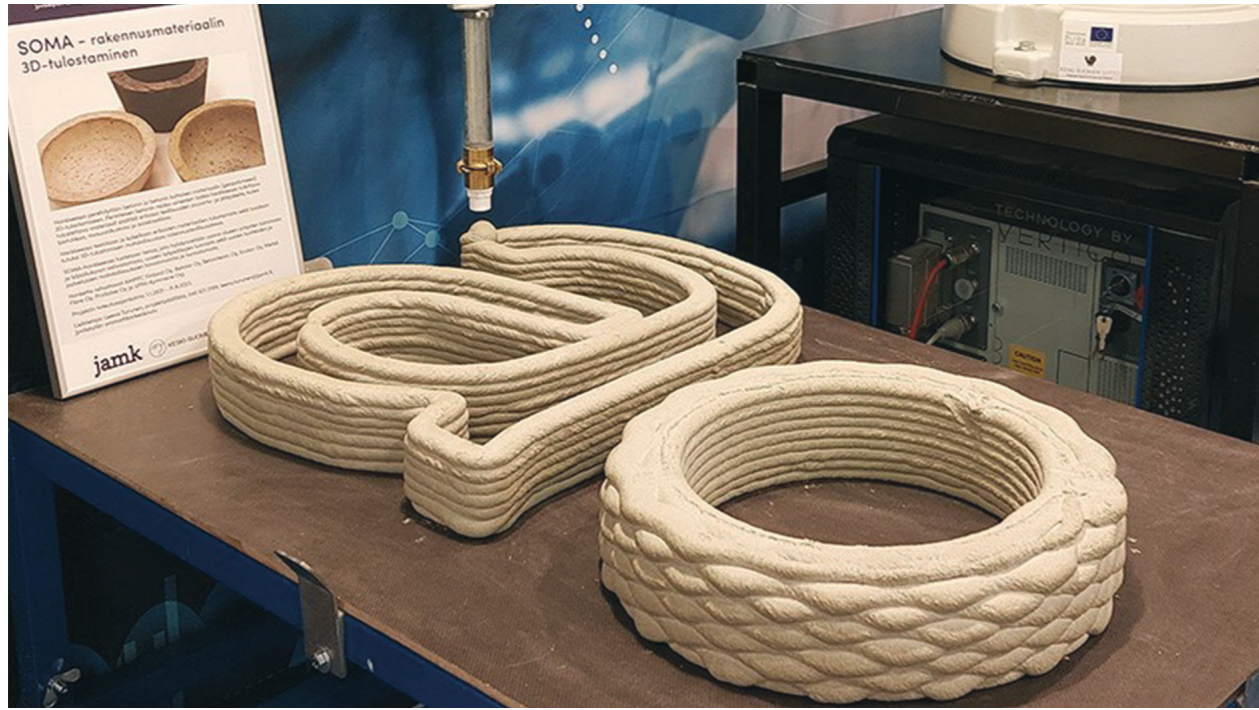
<https://www.theseus.fi/handle/10024/813915>



Betonin 3D-tulostus: Menetelmän soveltuvuus betonirakentamiseen, Reinikka Toni (2021)

<https://www.theseus.fi/handle/10024/502269>





Ympäristöystävällisen rakennusmateriaalin 3D-tulostamisen jäljillä

Toim. Leena Turunen & Tanja Minkkinen

SOMA – Rakennusmateriaalin 3D-tulostaminen -hankkeessa syvennyttiin betonin ja betonin kaltaisen materiaalin (geopolymeerin) 3D-tulostamiseen. Betonin valmistuksessa käytettävä sementti tuottaa runsaasti hiilidioksidipäästöjä. Hankkeessa haluttiin selvittää ympäristöystävällisempiä ja kiertotalouteen pohjautuvia ratkaisuja sementin korvaamiseksi. Perinteisen betonin raaka-aineiden lisäksi hankkeessa tulostettu materiaali sisälsi erilaisia teollisuuden sivuvirta- ja jätejakeita. Julkaisussa kerromme kokemuksia betonin- ja betonin kaltaisten kappaleiden 3D-tulostamisesta.

jamk | Jyväskylän
ammattikorkeakoulu



KESKI-SUOMEN LIITTO

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto