

Ekologisempi rakennustuotanto 3D-tulostettavan betonin avulla

TkK-tutkielma
Turun yliopisto
Materiaalitekniikan laitos
Teknillinen tiedekunta
2024
Elli Harju

Kandidutkielma
Tekniikan laitos, teknillinen tiedekunta
Turun Yliopisto

Oppiaine: Materiaalitekniikka

Tekijä: Elli Harju

Otsikko: Ekologisempi rakennustuotanto 3D-tulostettavan betonin avulla

Ohjaajat: Tkt Touko Herranen ja FM Matilda Sipilä

Sivumäärä: 27 sivua

Päivämäärä: 15.4.2024

Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali, jota on lähes jokaisessa rakennuksessa. Tämä inertti komposiittimateriaali koostuu sementistä, sileästä ja karkeasta runkoaineesta, mineraalisekoituksesta ja vedestä. Betoniteollisuus on yksi suurimmista kasvihuonekaasujen aiheuttajista maapallolla: sen osuus on noin 7 % maailman hiilidioksidipäästöistä. Suurien hiilidioksidipäästöjen takana on betonin sisältämä kalkkikivi-klinkerit, jonka valmistuksessa vapautuu suuria määriä hiilidioksidia. Kasvihuonekaasujen lisäksi sen tuotantoon kuluu suuria määriä uusiutumattomia luonnonvaroja. Tavanomaiselle betonin valmistukselle pyritään jatkuvasti kehittämään korvaavia ekologisempia valmistustekniikoita. Lupaavana vaihtoehtona pidetään betonin 3D-tulostusta.

Tulostin pursottaa ohuita kerroksia laastia, kunnes lopullinen kolmiulotteinen betonikappale on valmis. Betonin 3D-tulostuksessa käytettävien sementtimäisten laastien ominaisuuksilla on suuri vaikutus tulostuksen onnistumiseen: 3D-tulostukseen soveltuvalla laastilla on oltava riittävä pursotettavuus, sen on oltava juoksevaa, rakennettavaa, stabiilista ja sillä on oltava riittävä kovettumisaika. Koska suurin osa betonin valmistuksesta tulevista päästöistä syntyy siihen valmistettavan kalkkikivipohjaisen sideaineen valmistuksesta, korvaavia vähähiilisiä sideaineita on kehitetty. Lupaavimmiksi ekologisemmiksi sidosaineiksi on todettu geopolymeerit, alkaliaktivoituneet materiaalit, alumiinisementit, magnesiumipohjaiset sementit, kipsimateriaalit sekä kalsinoituneet savet.

Tutkielmassa tarkastellaan betonin 3D-tulostuksen mahdollisuuksia luoda ekologisempaa betonituotantoa. Tavoitteena on tarkastella betonin aiheuttamia päästöjä, ja tutkia niiden vähentämistä tulostamisen ja vaihtoehtoisten raaka-aineiden avulla. Lisäksi kartoitetaan betonin tulostuksen mahdollisuuksia soveltaa rakennustuotantoon. Tutkielmaan haettiin tietoa tieteellisistä aikakausjulkaisusta sekä Volterista.

Tehdyn kirjallisuuskatsauksen perusteella, betonirakenteiden valmistaminen 3D-tulostaen on tehokasta, ja rakennusnopeus on parempi kuin perinteisillä rakennustekniikoilla. Rakenteet saadaan kerralla tulostettua lopulliseen muotoon, jolloin aikaa vievää muottien valmistamista ja valamista ei tarvita. Nopeampi rakentaminen mahdollistaa myös rakennusprojektien nopeamman rahallisen tuoton, kiinteiden kustannuksien vähentämisen, sekä nopeamman siirtymisen seuraavaan projektiin. 3D-tulostuksen ansiosta pystytään suunnittelemaan ja valmistamaan monimutkaisia rakenteita, joita on hankala tehdä perinteisin keinoin. Arviolta 30–60 % rakentamisen aikana syntyvästä rakennusjätteestä on pystytty vähentämään 3D-tulostuksen ansiosta. Kuitenkin, kuten missä tahansa teknologiassa myös 3DCP-tekniikassa on monta haastetta. 3DCP:n tulostimen suuri koko, hinta, geometrinen rajoittuvuus sekä kuljettaminen on arvioitu olevan yleistymisen este. Myös tekniikan puuttuvat standardit ja yleiset ennakkoluulot hidastavat yleistymistä. Nämä ongelmat ovat ratkaistava, jotta 3DCP saadaan soveltumaan rakennusteollisuuteen.

Avainsanat: 3D concrete printing, sustainability, eco-friendly, construction, environment-friendly manufacturing

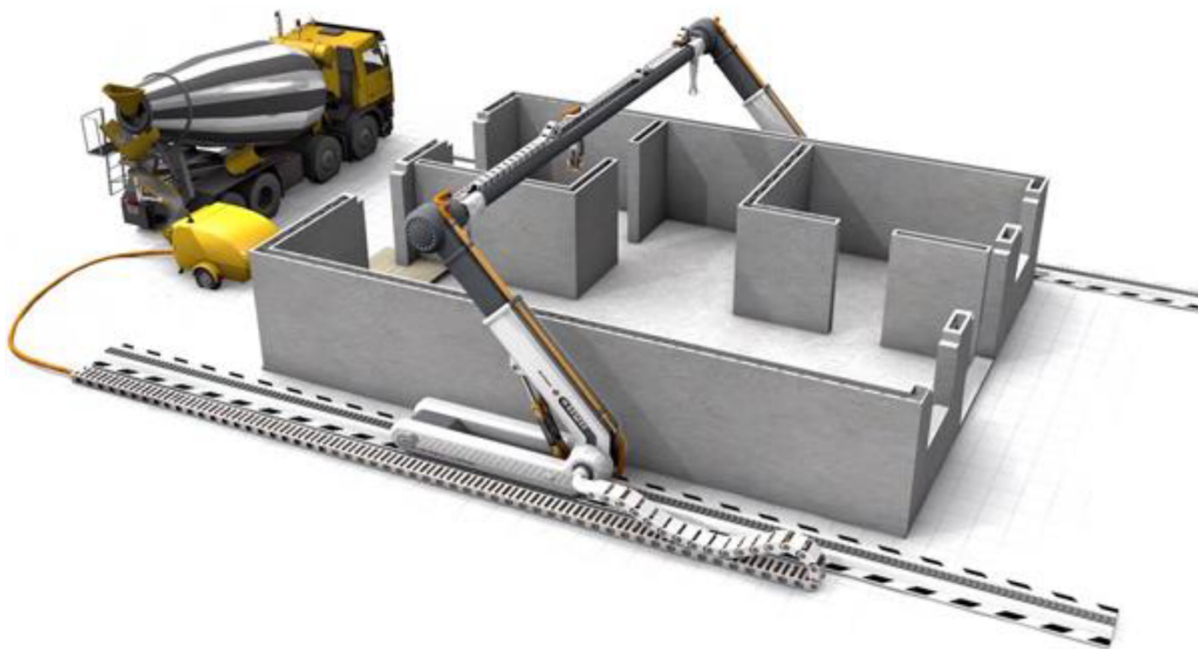
Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
1.1	Tutkielman tavoite, tutkimuskysymykset ja toteutustapa	5
1.2	Tutkimusmenetelmät ja rakenne	6
2	Taustaa	7
2.1	Betonin merkitys rakennusteollisuudessa	7
2.2	Betonin aiheuttamat ympäristöhaitat	7
2.3	Betonin 3D-tulostaminen	9
3	Materiaalit betonin 3D-tulostuksessa	12
3.1	Vähähiiliset sideaineet	12
3.1.1	Geopolymeerit ja alkaliaktivoitunut kuonat	12
3.1.2	Aluminaattisementit	13
3.1.3	Magnesiumpohjaiset sementit	14
3.1.4	Kipsipohjaiset materiaalit	14
3.1.5	Kalsinoidut savet	14
3.2	Sideaineiden ominaisuudet 3D-tulostuksessa	15
3.3	Vaihtoehtoiset runkoaineet	17
4	Betonin 3D-tulostaminen rakennustuotannossa	19
4.1	3DCP:n hyödyt rakennustuotannossa	19
4.2	3DCP:n haasteet rakennustuotannossa	21
5	Pohdintaa	24
6	Yhteenveto	26
	Lähteet	27

1 Johdanto

Maapallon väkiluvun on arvioitu kasvavan 9,7 miljardiin vuoteen 2050 mennessä. Jatkuvasti kasvava ihmiskunta luo suuren kysynnän asuinrakennuksille, sairaaloille, kouluille ja toimistoille. Lisääntyvä kysyntä vaatii rakennusosalta jatkuvaa kehitystä ja laajentumista. Rakennusteollisuuden kasvaessa ympäristöhaitat, terveyshaitat ja rakennustyömaiden turvallisuus sekä muut haitat, kuten rakentamisen kustannukset ja kesto kasvavat. [1] Rakennusteollisuuden käytetyin materiaali on betoni, ja siihen tarvittava sementti on maailman toiseksi eniten käytetty raaka-aine veden jälkeen. Betoniteollisuus aiheuttaa ympäristöhaittoja monella osa-alueella: raaka-aineisiin louhittavat materiaalit aiheuttavat luontokatoa, sementin valmistamisesta aiheutuu kasvihuonekaasuja sekä rakentamisesta ja purkamisesta syntyy jätettä. Betoni on korvaamaton materiaali nykyaikaisessa rakentamisessa, vaikka sen aiheuttamat ympäristöhaitat ovat tiedossa. On siis kehitettävä uusia tekniikoita, joilla saadaan betoniteollisuudesta ekologisempaa. [2]

3D-tulostettava betoni (eng. 3D concrete printing, 3DCP) on uusi teknologia, jonka odotetaan ratkaisevan osan rakennusteollisuuden ongelmista. 3DCP on rakennustekniikka, jossa muodostetaan elementtejä sementtimäisillä materiaaleilla digitaalisten rakennuspiirrosten pohjalta rakennustyömaalla robottiassistentin avulla. [3] Betonirakenteiden 3D-tulostuksesta on havainnollistettu kuvassa 1. 3D-tulostetun betonin käytön hyödyt voidaan jakaa kahteen luokkaan: rakennettavuuden hyötyihin ja kestävän kehityksen hyötyihin. Betonirakenteiden valmistaminen 3D-tulostamalla on paljon tavanomaista rakennusmenetelmää nopeampaa. Rakenteet saadaan kerralla tulostettua lopulliseen muotoon, jolloin aikaa vievää muottien valmistamista ja valamista ei tarvita. Nopeampi rakentaminen mahdollistaa rakennusprojektien nopeamman rahallisen tuoton, kiinteiden kustannuksien vähenemisen sekä nopeamman siirtymisen seuraavaan projektiin. 3D-tulostuksen ansiosta pystytään suunnittelemaan ja valmistamaan monimutkaisia rakenteita, joita on hankala tehdä perinteisin keinoin. 3D-tulostustekniikka vähentää myös rakennusmailla tapahtuvia tapaturmia. Rakennusjätettä on pystytty vähentämään arviolta 30–60 % 3D-tulostuksen ansiosta. Rakenteiden valmistuksessa kuluva materiaali pystytään tarkasti arvioimaan, jolloin valmistamisesta syntyvä jäte voidaan minimoida. Tämä mahdollistaa raaka-ainetehokkaan tuotannon, joka vähentää jätteiden ja päästöjen syntymistä ja ehkäisee maapallon resurssien kulutusta. [4]



Kuva 1: Rakennuksen rakentamista 3D-tulostamalla betonia. Tulostustelineet liikkuvat kiskoja pitkin mahdollistaen seinien tulostamisen yhdellä kertaa. Tekijänoikeus 2022, Lesovik ym. Julkaistu MPDI:ssä [5]

1.1 Tutkielman tavoite, tutkimuskysymykset ja toteutustapa

Tutkielman päätavoitteena on tarkastella 3D-tulostettavan betonin tuomaa helpotusta betonituotannosta aiheutuviin ympäristöongelmiin. Tekniikan ekologisuutta tarkastellaan selvittämällä tulostukseen käytettävistä materiaaleista syntyviä päästöjä, vertailemalla päästöjä perinteisen betonivalmistuksen aiheuttamiin päästöihin, arvioidaan tulostustekniikan tuomia hyötyjä sekä mahdollisuutta yleistyä rakennusteollisuudessa. Lisäksi tavoitteena on selvittää, millaisia ongelmia betonin 3D-tulostuksessa on, ja kuinka niitä voitaisiin ehkäistä. Tutkielmaa tavoitteet voidaan tiivistää seuraavien tutkimuskysymyksien pohjalta:

1. Mahdollistaako 3D-tulostaminen betonin ekologisemman tuotannon?
2. Mitkä ovat 3D-tulostetun betonin hyödyt?
3. Miten 3D-tulostettu betoni mahdollistaa ekologisemman rakennustuotannon?

1.2 Tutkimusmenetelmät ja rakenne

Tutkielma on kirjallisuuskatsaus. Tietoa tutkielmaan haettiin tieteellisistä aikakausjulkaisuista sekä Volterista. Katsaus aloitetaan kartoittamalla perinteisen betonin sisältämät materiaalit ja tuotannosta aiheutuvat ympäristöongelmat, perehdytään betonin 3D-tulostuksen tekniikkaan sekä sen tuomiin mahdollisuuksiin.

Tutkielman toisessa osiossa keskitytään tulostuksessa käytettäviin materiaaleihin, ja niiltä vaadittaviin ominaisuuksiin. Tässä osiossa kartoitetaan vähähiilisiä korvaajia sementille, sekä arvioidaan korvaavien sideaineiden toimivuutta 3D-tulostuksessa.

Viimeisessä osiossa vastataan viimeiseen tutkimuskysymykseen ja tutkitaan betonin 3D tulostamisen tuomia hyötyjä rakennustuotantoon sekä syitä, miksi tekniikka yleistyisi rakentamisessa. Osiossa tarkastellaan myös 3D tulostuksen haasteita rakennustuotannossa ja pohditaan niiden vaikutusta rakennusteollisuuteen.

2 Taustaa

2.1 Betonin merkitys rakennusteollisuudessa

Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali: sitä käytetään suurista pilvenpiirtäjistä aina veden alla oleviin rakennuksiin. Betoni on välttämätön osa rakennustuotantoa, joka on tärkeä tekijä valtioiden talouskasvulle. Sen mekaaniset ominaisuudet tekevät siitä erinomaisen materiaalin valmistaa erilaisia rakenteita, jotka altistuvat ympäristön aiheuttamille rasituksille. Betonin ominaisuuksia ovat rakenteellinen lujuus, kosteudensietokyky, äänieristävyys, palonkestävyys ja lämmöntasaamiskyky. Sen suuren käyttöasteen takana on myös materiaalin edullisuus. Betoni on inertti komposiittimateriaali, joka koostuu sideaineesta, sileästä ja karkeasta runkoaineesta, mineraalisekoituksesta ja vedestä. Betonissa yleisimmin käytetty sideaine on portlandsementti (eng. Portland cement, PC). Kovettumatonta betoniyhdistettä kutsutaan laastiksi. Sementin pohjamassa on jauhomaista materiaalia, jota kutsutaan klinkkeriksi. Klinkkeri valmistetaan kalkkikivestä niin, että louhittua kalkkikiveä kuumennetaan noin 1400 °C asteessa, jolloin kalkkikivi hajoaa kalsiumoksidiksi, eli poltetuksi kalkiksi ja hiilidioksidiksi. Polton jälkeen kalkki murskataan ja jauhetaan. Veden lisääminen jauheeseen aiheuttaa sementin hydraloitumisen, jolloin seoksesta muodostuu viskoosinen laasti. [6, 7] Laasti valetaan muottiin ja annetaan kovettua, valmiissa rakennuksissa kovettuneet elementit ovat kiinnitettyinä toisiinsa.

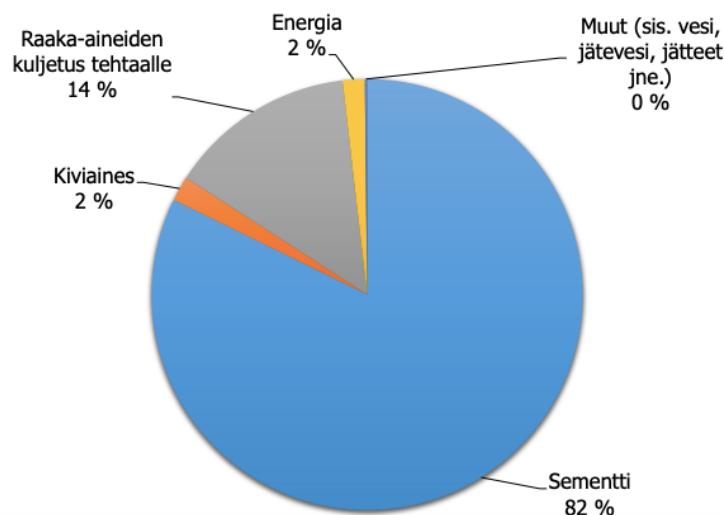
2.2 Betonin aiheuttamat ympäristöhaitat

Betoniteollisuus on yksi suurimmista kasvihuonekaasujen aiheuttajista maapallolla, sen osuus on noin 7 % maailman hiilidioksidipäästöistä [8]. Toisin sanoen, jos betoniteollisuus olisi valtio, se olisi kolmanneksi suurin kasvihuonekaasujen aiheuttaja vapauttaen 2,8 Gt hiilidioksidia vuosittain, Kiinan (10,18 Gt) ja USA:n (5,29) jälkeen [9]. Betonia tuotetaan vuosittain suurempia määriä, kun sen kysyntä lisääntyy maapallon väkiluvun ja kaupungistumisen lisääntyessä. Ilmaston muutoksen ehkäisyssä teollisuusyrityksiltä odotetaan hiilineutraalia tuotantoa vuoteen 2050 mennessä. Hiilineutraali tuotanto tarkoittaa, että tuotannossa syntyvät CO₂ päästöt ovat tasapainossa prosessissa poistuvien tai erikseen kompensoitujen CO₂ päästöjen kanssa. Vuosittaisen betonikysynnän kasvaessa, yrityksiä on keksittävä tehokkaita keinoja vähentää päästöjen syntymistä, jotta saavutetaan hiilineutraali tuotanto. [8, 10]

Betonin valmistamisesta aiheutuvien suurien CO₂ päästöjen merkittävin aiheuttaja on sen pääainesosa – sementti. Sementin tuotanto aiheuttaa 77 % ja käyttö teollisuudessa 8 % päästöistä, joita betonin elinkaaren aikana muodostuu. Hiilidioksidia vapautuu betonin valmistuksessa eri lähteistä: hiilidioksidista 50 % vapautuu, kun kalkkikivi (CaCO₃) kalsinoidaan CaO:ksi ja CO₂:ksi, 40 % prosenttia vapautuu sementin kuumentamiseen tarvittavista fossiilisista polttoainesta. Ja loput 10 % muodostuu logistiikasta ja sähkön kulutuksesta. Kalsinointi tarkoittaa veden poistoa kuumentamalla. [8, 10] Betoniteollisuudessa käytettävän sähkönmäärään on onnistuttu vähentämään huomattavasti uuden teknologian myötä. Kuitenkin lämpöenergian kulutus betonitehtaissa käytettävissä uuneissa ja lämmittimissä on 3,4 GJ/t luokkaa. Klinkkeri-sementtisuhteen ollessa 0,70 voidaan arvioida betonin valmistamiseen vuosittain kuluvan energian määräksi $1,4 \cdot 10^{10}$ GJ, joka vastaa noin 2–3 % koko maailman energian kulutuksesta. [9]

Kasvihuonekaasujen lisäksi betoniteollisuus kuluttaa suuria määriä uusiutumattomia luonnonvaroja. Yhden tonnin klinkkerin valmistamiseen tarvitaan 1,22 tonnia kalkkikiveä ja 0,31 tonnia savea. Sideaineiden valmistamisen lisäksi betonilaastissa käytettäviin runkoaineisiin käytetään luonnollisia raaka-aineita, kuten hiekkaa ja louhittua soraa. 46 % USA:n louhimasta hiekasta ja sorasta käytetään vuosittain yksinään betonin tuotantoon. Luonnonmateriaalien lisäksi betonin valmistukseen kuluu vettä. Vettä tarvitaan runkomateriaalien pesuun, sementin kovettumisen aiheuttamaan sidontareaktioon eli laastin joukkoon sekä betonin jälkihoitoon. Koko maailmassa betonin valmistukseen kuluu vuosittain puhdasta vettä arviolta 65,7 km³. Se on enemmän kuin vuosittainen kunnallinen vedenotto USA:ssa (58,4 km³). [9, 11] Kuvassa 2 on esitetty, miten betonin päästöt koostuvat tuotannon eri osa-alueista.

Betonin tuotannosta syntyvien suurien ympäristöongelmien vuoksi tavanomaisen betonin käyttöä pyritään vähentämään ja vaihtoehtoisia ekologisempia vaihtoehtoisia materiaaleja ja betonirakentamista kehitetään jatkuvasti. [6]

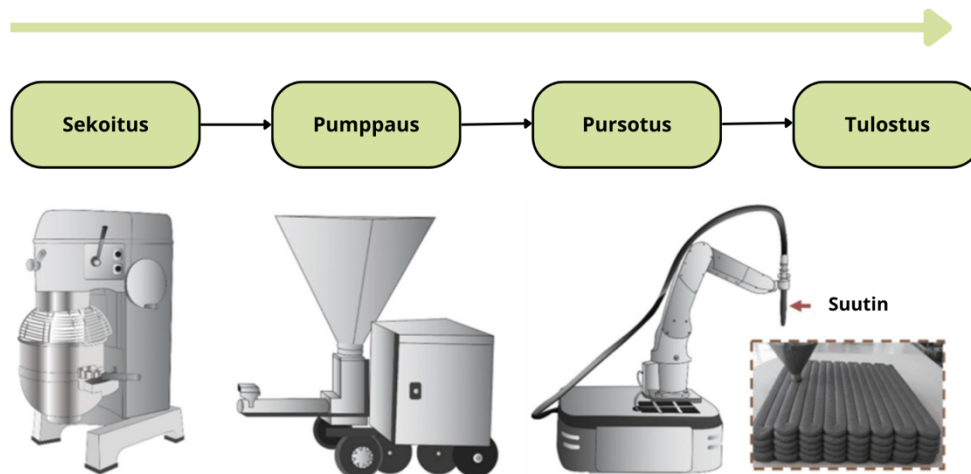


Kuva 2. Betonin hiilijalanjäljen muodostuminen. Kuvaajassa on esitetty betonin päästöjen jakautumisen eri tuotannon osa-alueille. [12]

2.3 Betonin 3D-tulostaminen

Tavanomaisen betonituotannon tuottamien ympäristöhaittojen vuoksi yritetään jatkuvasti löytää korvaavia ekologisesti kestävimpiä rakennusmenetelmiä, kuten 3D-tulostus eli materiaalia lisäävä valmistus (eng. additive manufacturing). Lisäävän valmistuksen hyödyntäminen rakennustuotannossa alkaa vähitellen kasvaa. Periaate 3D-tulostuksessa on sellainen, että tulostin pursottaa ohuita kerroksia materiaalia digitaalisten suunnittelupiirustuksien mukaisesti, kunnes lopullinen kolmiulotteinen kappale on valmis. [13] Tulostimen suutinta ohjaa tulostimen käyttöjärjestelmä [3]. Betonin 3D-tulostusprosessin vaihteita esitetään kuvassa 3.

Tulostustekniikasta riippumatta betonin tulostusprosessi alkaa ensimmäiseksi laastin sekoittamisesta. Seuraavaksi sementtimäinen laasti pumpataan suuttimeen, josta laasti pursottuu ulos yhtenä filamenttina. Kun suutin on pursottanut ensimmäisen kerroksen mallin mukaisesti, suutin nousee ja pursottaa uuden laastikerroksen edellisen päälle. Kolmiulotteinen betonielementti valmistuu kerros kerrokselta. [14]



Kuva 3. Havainnollistava kuva betonin 3D-tulostusprosessista. Ensimmäiseksi laasti sekoitetaan, jonka jälkeen se pumpataan tulostimen suuttimeen. Suutin pursottaa laastia haluttuun muotoon kerros kerrokselta. Tekijänoikeus 2023, Singh ym. Julkaistu MDPI:ssä [15]

Betonin 3D-tulostuksessa sementtimäisten laastien ominaisuuksilla on suuri vaikutus tulostuksen onnistumiseen. Tulostettavien betonirakenteiden tuotanto vaatii sementtimäisiltä laastiyhdisteiltä erityisiä ominaisuuksia. [6] Halutut ominaisuudet pyritään varmistamaan yhdistelemällä erilaisia materiaaleja. Tulostettavien kerrosten tulee kestää päällekkäisten kerrosten aiheuttamaa kuormitusta ja pysyä halutussa muodossa. Tulostettavan betonin rakennettavuuteen vaikuttavat staattinen ja dynaaminen murtolujuus, raakalujuus sekä tuoreen betonin kimmokerroin. Nämä parametrit muuttuvat altistuessaan erilaisille kovettumisolosuhteille ja ajan myötä tapahtuvalle sementin hydraatiolle. Tulostamisen onnistumiseen vaikuttavat betonimassan pumpattavuus ja pursotettavuus. Sementtisekoitusten tasaisuus, koossapysyvyys, kestävyys ja faasien erkaantumisen todennäköisyys pursottamisesta aiheutuvasta paineesta ovat merkittävimmät tekijät betonimassan pumpattavuuteen ja pursotettavuuteen. [15, 16] Betonilla on oltava halutut reologiset ominaisuudet eli virtaus- ja muodonmuutosominaisuudet, jotta saadaan tulostettua onnistuneesti kestäviä rakenteita. Betonin reologiaan vaikuttavat pääasiassa sen viskositeetti ja triksotropia eli lepojähmeys. [6] Analyttisillä malleilla voidaan ennustaa materiaalin luontaisia ominaisuuksia, kuten triksotropiaa ja murtolujuutta. Tulostuksessa vaarana on juuri tulostettujen kovettumattomien rakenteiden valuminen, koska muotteja ei käytetä. Rakenteiden valumista tulostusprosessin aikana voidaan ehkäistä parantamalla laastien rakennettavuutta. [14] 3DCP:n tuotanto ei ole vielä vakiintunutta, joten tarkkaa vakiokoostumusta laastille ei ole määritetty, vaan erilaisia laastiyhdisteitä on monia. Sementtimäiset yhdisteet koostuvat sideaineesta, karkeasta tai sileästä runkoaineesta, vedestä ja erilaisista kemikaali- tai mineraaliyhdisteistä.

Sementtiyhdisteen mekaanisiin ominaisuuksiin, työstettävyyteen, plastiseen muodonmuutokseen ja rakenteeseen pääasiallisesti vaikuttavat yhdisteen sisältävä sideaine ja veden määrä. [17]

Betonin 3D-tulostustekniikat voidaan jakaa kahteen kategoriaan: materiaalin pursottamiseen ja jauhepetitulostamiseen. Materiaalin pursottamistekniikoita ovat ääriviivamuotoilu (eng. contour crafting) ja betonin tulostus (eng. concrete printing). Ne ovat tekniikaltaan samankaltaisia, molemmissa laasti pursotetaan suuttimen kautta haluttuihin muotoihin. Jauhepetitulostustekniikan alle on jaoteltu seuraavat tulostustavat: D-muoto (eng. D-Shape), selektiivinen laastin muottiin pursotus (eng. selective paste intrusion) ja selektiivinen sideaineen aktivointi (eng. selective binder activation). Selektiivisessä laastin muottiin pursotustekniikassa käytetään kuivaa erittäin hienorakeista runkoainesta ja sideainetta. Sideaine aktivoidaan ruiskuttamalla se runkoaineen päälle haluttuun kohtaan, jolloin sideaine muodostaa laastimatriisin runkoaineen ympärille. Selektiivinen sideaineen aktivointitekniikka eroaa edellä mainitusta tekniikasta siten, että siinä sideaine pursotetaan ruiskuttamisen sijaan runkoaineen päälle, jolloin sideaine tukkii runkoainehiukkasten raot. Sideaineen on oltava tarpeeksi nestemäistä, jotta se pääsee valumaan hiukkasten väleistä ja muodostamaan tasaisen rakenteen. [18] D-muototekniikassa pursotetaan kiinteä hiekkakerros haluttuun muodon mukaisesti, hiekan päälle ruiskutetaan sideainekerros pitämään hiekka muodossaan sekä luomaan tarttuvan pinnan seuraavalle hiekkakerrokselle [17]. Hiekkaa ja laastia pursottavien suuttimien avulla tulostin rakentaa kappaleen kerros kerrokselta [18].

3 Materiaalit betonin 3D-tulostuksessa

3D-tulostettaessa betonia, materiaalivalinnassa tulee huomioida monta muuttujaa. Laastin mekaaniset ominaisuudet nestemäisessä ja kiinteässä olomuodossa vaikuttavat tulostuksen onnistumiseen. Myös tulostimen säädöt, kuten suuttimen koko, pursotuspaine ja tulostusnopeus on valittava laastin ominaisuuksien ja haluttujen tulosten mukaisesti. 3D-tulostukseen soveltuvan laastin on oltava pursotettavaa, joten sen pitää olla nestemäistä, mutta sillä on oltava riittävän nopea kovettumisaika. Laastin pitää olla riittävän jähmeää, jotta muodostuvat rakenteet olisivat stabiileja tulostuksen ajan. Kovettuneilla rakenteilla tulee myös olla tarpeeksi suuri mekaaninen lujuus, jotta niitä voidaan hyödyntää rakennuksissa. [19] Tulostettava laasti koostuu sideaineesta, karkea- tai hienorakeisesta runkoaineesta, vedestä sekä kemiallisesta- tai mineraaliseksi. Laastin sisältämä sideaine ja veden osuus ovat merkittävimmät tekijät laastin mekaanisiin ominaisuuksiin, tilavuuden pysyvyyteen sekä valmiin rakenteen kestävyys [17].

3D-tulostusprosessissa voidaan käyttää sideaineena portlandsementtiä, jota voidaan muokata erilaisilla raaka-aineilla vastaamaan haluttuja tulostettavuusominaisuuksia. Maailmanlaajuisesti portlandsementti on käytetyin sideaine. Sen massatuotanto ja -käyttö aiheuttaa suuria määriä kasihuonekaasuja. PC:n tuotannosta odotetaan tulevan kolmanneksi suurin hiilidioksidipäästöjen lähde fossiilisten polttoaineiden ja maankäytön jälkeen. Lisäksi PC:n tuotanto kuluttaa huomattavia määriä luonnonvaroja sekä käyttää 10–11 EJ energiaa vuodessa, mikä vastaa 2–3 % maailman energiankulutuksesta. Portlandsementin aiheuttamien ympäristöongelmien vuoksi ympäristöystävällisempien korvaavien sideaineiden kehittäminen ja käyttö on lisääntynyt. Vähähiiliset sideaineet voisivat korvata PC:n käytön kokonaan tai vähentää sen käyttöä, mikä takaisi ekologisemman betonituotannon. Lupaavimmiksi vaihtoehtoisiksi sideaineiksi on todettu geopolymeerit, alkaliaktivoitunut materiaalit, alumiinisementit, magnesiapohjaiset sementit, kipsimateriaalit sekä savet. [17]

3.1 Vähähiiliset sideaineet

3.1.1 Geopolymeerit ja alkaliaktivoitunut kuonat

Geopolymeerit eli metakaoliinipohjaiset sideaineet ovat tunnetuimpia vaihtoehtoisia sideaineita. Geopolymeerejä voidaan valmistaa erilaisista alumiinisilikaattien lähtöaineista, joiden laajan valikoiman vuoksi niistä voidaan tuottaa erilaisia ominaisuuksia omaavia geopolymeeriyhdisteitä. Yhdisteiden monipuolisuus tekee sideaineista monikäyttöisiä ja

olosuhteisiin sopeutuvia, mikä mahdollistaa ekologisemman ja vähäpäästöisemmän betonituotannon. [17, 20] Geopolymeerien hyöty sideaineena tulee esiin mahdollisuutena hyödyntää materiaaleissa rakennus- ja purkujätettä. Portlandsementin sijaan geopolymeerien käyttö tulostusmateriaalina laskee tulostusprosessin hiilijalan jälkeä noin 61 % [19].

Geopolymeerihin kuuluvat myös alkaliaktivoitut kuona-aineet, joita käytetään sideaineiden valmistamiseen [17]. Alkaliaktivoitu kuonapohjainen sementtimäinen sideaine muodostuu, kun vahva emäs reagoi lasimaisen tai amorfisen alumiinisilikaatin kanssa. Korkean konsentraation silikonidioksidia ja alumiinioksidia sisältävät materiaalit ovat hyviä lähtöaineita alkaliaktivoitujen sideaineiden tuotantoon. [21] Alkaliaktivoitujen sideaineiden tuotannossa syntyvät hiilidioksidipäästöt ovat noin 80–90 % pienemmät verrattuna portlandsementin tuotantoon [8].

3.1.2 Aluminaattisementit

Kalsiumalumiini sementti (eng. calcium aluminum cement, CAC) ja kalsiumsulfoaluminaattisementti (eng. calcium sulfoaluminate, CSA) ovat alumiinipohjaisia sideaineita. CAC-sideaine koostuu monokalsiumaluminaatti-, kalsiumdialuminaatti- ja dodekakalsiumhepta-aluminaattimineraaleista. [17] CSA-klinkerä tuotetaan polttamalla kalkkikiveä, savea, kipsiä ja bauksiittia [16].

Tavanomaiseen portlandsementtiin verraten CSA:n ja CAC:n tärkeimmät edut ovat materiaalien sementtiyhdisteiden parempi rakennettavuus ja tuotannon ympäristöystävällisyys. Tutkimukset ovat osoittaneet 3D-tulostettujen kappaleiden olevan tarkempia ja kestävimpiä, kun portlandsementti korvattiin CSA sideaineella. Tulostaessa pursottamisen aiheuttama segregatio eli seoksen raaka-aineiden eriytyminen on myös vähäisempää. [16, 17] CSA ja CAC muodostavat sideaineita, joilla on korkea resistanssi bakteeriselle happokorroosiolle ja hankaukselle/kulumiselle. Korkean lämmönkestävyyden takia, kalsiumaluminaatti laastin sideaineena luo kestäviä ja pitkäikäisiä elementtejä. [17]

CSA sideainetta tuotetaan polttamalla kalkkikiveä, savea, kipsiä ja bauksiittia 1200–1300 °C asteessa, joka on noin 100–150 °C matalampi kuin portlandsementin valmistuksessa käytettävä lämpötila. Matalampi valmistuslämpötila mahdollistaa polttoainekulutuksen vähentymisen, mikä laskee arvioltaan 15 % tuotannon hiilen kulutuksesta. Yhden kilon tuottaminen CSA:ta tuottaa 0,54 kg hiilidioksidia, mikä on 34 % matalampi kuin portlandsementin tuotossa syntyvät hiilidioksidipäästöt. [8]

3.1.3 Magnesiumpohjaiset sementit

Magnesiumpohjaiset sideaineet ovat lupaavia sementtimäisiä yhdisteitä betonin 3D-tulostuksessa. Näitä sideaineita on magnesiumfosfaatti sementti (eng. magnesium phosphate cement, MPC) ja reaktiivinen MgO-sementti (eng. reactive MgO-based cement, RMC). Magnesiumkarbonaattia ja muita magnesiumyhdisteitä, kuten $Mg(OH)_2$, merivettä tai suolavettä voidaan käyttää sideaineiden valmistuksessa. [16] RMC muodostuu, kun MgO reagoi veden kanssa muodostaen magnesiumhydroksidia [17]. MPC muodostuu MgO:n ja fosfaatin neutralointireaktiosta [16].

Magnesiapohjaisten sideaineiden ekologiset hyödyt tulevat vähäisistä muodostuvista hiilidioksidipäästöistä, sekä matalista reaktiolämpötiloista tuotantoprosessin aikana. Kideveden poistaminen tapahtuu 650–800 °C:ssä, mikä on paljon tavanomaisen sementin tuottoprosessia matalampi. Näillä sideaineilla on lyhyet kovettumisajat, korkeat kestävyudet sekä hyvä lämmön- ja sähkönresistanssi. Magnesiapohjaisilla sideaineilla on kyky sitoa hiilidioksidia ilmakehästä kovettumisprosessin aikana, mikä kompensoi tuotannon aikana syntyviä hiilidioksidi päästöjä.

3.1.4 Kipsipohjaiset materiaalit

Gypsumdihydraatti ($CaSO_4 \cdot 2 H_2O$) on kipsin yleisin muoto, jota saadaan luonnollisesta mineraaliaineesta, sekä sivutuotteena joistakin teollisista kemiallisista prosesseista. Kipsi on hyvien mekaanisten ominaisuuksiensa vuoksi yksi tärkeimmistä sementtimäisistä materiaaleista, jota hyödynnetään laajasti rakennustekniikassa, sekä 3DCP:ssä. Sen hyötyjä on edullisuus, päästöttömyys, palonkestävyys ja korkea lujuus. [22]

3.1.5 Kalsinoidut savet

Kalkkikivijauhetta käytetään täyteaineosana sementissä sideaineen lisäksi. Kalkkikivijauhetta lisätään tavanomaisen portlandsementin joukkoon parantamaan yhdisteen ominaisuuksia, kuten vähentämään sisempien partikkelien hankausta ja lisäämään veden adsorptiokykyä. Näillä on vaikutusta sementin mekaanisiin ominaisuuksiin. Tavanomainen portlandsementti voidaan korvata kalsinoidulla savella, joka on ekologisempi vaihtoehto. Tärkeimpänä puolena savisementissä pidetään saven esteettömät varannot. Kaoliniittisavi on teknisesti paras materiaali trooppisissa ja subtrooppisissa olosuhteissa.

Ekologisemman savisementistä tekee sen valmistuslämpötila, 700–800 °C. Yhden kilon valmistaminen savisementtiä muodostaa 0,25–0,37 kg hiilidioksidipäästöjä, kun taas saman määrän portlandsementin valmistamisesta muodostuu noin 1 kg hiilidioksidia. Kalkkikivestä, kalsinoidusta savesta ja klinkkeritiilestä muodostettuja yhdisteitä on tuotettu ja tutkittu. Yhdistettä on onnistuneesti tuotettu teollisissa kokeiluissa Kuubassa ja Intiassa. [16] Taulukossa 1 on listattu sideaineiden kilon valmistuksesta vapautuvat hiilidioksidipäästöt.

Taulukko 1. Sideaineiden valmistuksesta vapautuvat hiilidioksidipäästöt

Ensimmäisessä sarakkeessa on eritelty yhden kilon sideaineiden valmistamisesta syntyvät hiilidioksidipäästöt kilogrammoina. Toisessa sarakkeessa on verrattu sideaineiden valmistuksesta syntyviä hiilidioksidipäästöjä prosentteina portlandsementin valmistuksen hiilidioksidipäästöihin.

Sideaineet	CO ₂ Päästöt [kg]	CO ₂ Päästöt [%]	Lähde
Portlandsementti	1	100 %	[16]
Geopolymeerit	-	55 %	[8]
Alkaliaktivoidut kuonat	-	10–20 %	[8]
Aluminaattisementit	0,54	34 %	[8]
Kipsipohjaiset materiaalit	-	-	-
Magnesiapohjaiset sementit	-	-	-
Kalsinoidut savet	0,25–0,37	-	[16]

3.2 Sideaineiden ominaisuudet 3D-tulostuksessa

Erilaisia pitoisuuksia geopolymeeri-, magnesia-, alumiini-, kipsi- ja savipohjaisia sideaineita on testattu betonin 3D-tulostamisessa. Tulostettujen elementtien mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavat tulostuslaastiin käytettävät raakamateriaalit, tulostustekniikat ja betonin jälkihoidon olosuhteet. Rakenteiden mekaanisessa kestävydessä on suuria haasteita, joita pyritään parantamaan erilaisilla materiaaleilla ja lisäaineilla. Rakenteilta vaaditaan mekaanista kestävyttä ja pysyvyyttä, jotta niitä voidaan käyttää rakennuksissa. [17] Betonirakenteille, joissa on käytetty vähähiilisiä sideaineita, on ominaista hitaampi lujouden kehitys kuin tavanomaisella betonilla. Kuitenkin vähähiilisillä betonirakenteilla on yleensä korkeammat loppulujuudet. [12]

Geopolymeerejä hyödynnetään rakennustuotannossa suuren lujuuden ja pitkäikäisyyden vuoksi. Tulostetun geopolymeeribetonin lujuudet ovat verrattavissa tavanomaisen portlandsementin lujuuksiin, kun laastiseokseen lisätään emäksistä aktivointiainetta. Hyvän lämpöstabiilisuutensa ansiosta tulostettu geopolymeeribetoni on pitkäikäisempää kuin tavanomainen betoni. Suurista lujuuksista huolimatta geopolymeeribetonien veto- ja murtumisljuudet ovat alhaisia, joita pyritään parantamaan lisäämällä materiaalin joukkoon kuituja. Geopolymeerejä ja alkaliaktivoituja sideaineita sisältäville laasteille on ominaista kutistua kovettumisen aikana. Tulostetun kappaleen kutistuminen altistaa halkeamille ja korroosiota aiheuttaville ioneille, mikä heikentää materiaalihilan tiiviyttä. [17]

Magnesiumpohjaisten sideaineiden suurin hyöty verrattuna tavanomaiseen betoniin on niiden hiilidioksidin sitomiskyky, sekä kierrätettävyys ja uudelleen käytön mahdollisuudet. Magnesiumpohjaisten sideaineiden karbonatisoitumisprosessissa sitoutuu hiilidioksidia, joten ne voidaan luokitella ympäristöystävällisiksi sideaineiksi. Magnesiumpohjaisten betonien kovuus tulee karbonatisoitumisesta, jolloin oikeat olosuhteet betonin jälkikäsitteilylle on tärkeitä. RMC-laasteilla on nopeampi kovettumisaika nopean hydraation ansiosta kuin PC-sementillä, mikä on eduksi tehokkaassa rakenteiden tulostamisessa. Nopea kovettumisaika kuitenkin aiheuttaa tukkeumia tulostimen suuttimeen, mikä heikentää tulostuksen onnistumista. [17]

CAC- ja CSA-sideaineissa yhdistyvät magnesiumpohjaisten sideaineiden ja geopolymeerisideaineiden hyvät ominaisuudet, kuten ympäristöystävällisyys, kestävyys, lujuus sekä kyky vastustaa sulfaattihyökkäystä ja kulumista. CAC-sideaineilla on nopeat kovettumisaikat, mikä ehkäisee tulostettujen rakenteiden valumista. CSA:lla on hitaampi kovettumisaika, mutta sillä on suuret lujuudet heti betonin kovettua. CSA:n hitaan kovettumisaikan takia se laajenee helposti, jolloin juuri tulostetut rakenteet eivät ole stabiileja. Verrattuna CAC:in ja portlandsementtiin, CSA-yhdisteiden ominaisuuksia ovat hyvä rakennettavuus ja pursotettavuus, jotka ovat tärkeitä tekijöitä tulostettavien kerrosten välisen myötölujuuden kasvattamiseen. [17]

Kipsipohjaisten sideaineiden hyötyjä ovat korkea lujuus, palonkestävyys, stabiilisuus ja materiaalin keveys. Mekaanisten ominaisuuksiensa vuoksi sitä hyödynnetään monissa eri käyttökohteissa. Kipsipohjainen sementti ei kestä suurta ilmankosteutta, joka aiheuttaa lujuuden heikkenemistä ja huonoa vedenkestävyyttä. [17]

Vaihtoehtoisten sideaineiden kehittämisen tärkein syy on niiden mahdollisuus taata vähähiilinen betonituotanto. Vähähiilisten ominaisuuksien lisäksi, sideaineilla on oltava

vaadittavat mekaaniset ominaisuudet, jotta ne soveltuisivat betonin 3D-tulostukseen. Kuvassa 4 on taulukoituna vähähiilisten sideaineiden hyviä ja huonoja ominaisuuksia, sekä esitetty tarvittavia jatkotoimia sideaineiden kehitykseen. [17]

Sideaineet	Hyödyt	Haitat	Tarvittavat jatkotoimet
Geopolymeerit ja alkaliaktivoitunut sideaineet	Matala hydraatio lämpötila, hyvä lämmön, sulfaatin ja hapon resistiivisyys, jätteiden hyödyntämisen mahdollisuus	Syövyttävien aktivointiliuosten käyttö, haastava reologia, tilavuuden kutistuminen	Reologisten ominaisuuksien parantaminen vastaamaan 3D-tulostustekniikan vaatimuksia
MgO-pohjaiset sementit	Jättemateriaalien hyödyntäminen tuotannossa, hyvä lämmöneristys ja palonkestävyys, kyky vahvistua hiilen sitoutumisen ansiosta	Huono vedenkestävyys, liian nopea kovettuminen aiheuttaa tukkeumia suuttimeen, heikko tilavuuden vakaus, kestävyuden saavuttaminen vaatii karbonisaation lisäämistä	MgO-klinkkerin valmistusprosessin kehittäminen, Tulostamisen suorituskyvyn parantaminen
Alumiinaattisementit	Matalat CO ₂ päästöt tuotannon aikana, nopea vahvistuminen	Hydraattien muutos aiheuttaa lujuuksien heikentymistä, helposti laajentuva	Klinkkerin tuotannon kustannuksien laskeminen jättemateriaalin käytön avulla, kovettuneen materiaalin laajentumisen kontrollointia
Kipsipohjaiset materiaalit	Kevytrakenteiden, korkeat lujuudet, palonkestävä, hyvä tilavuuden vakaus	Huono vedenkestävyys	Vesi-stabiiliuden kehittäminen
Kalsinoidut savet	Hyvä raaka-aine tarjonta, matalat CO ₂ päästöt tuotannon aikana, edullinen, hyvä resistiivisyys kloorin imeytymiselle	Haastava reologia, kestävyyttä ei ole testattu	Reologisten ominaisuuksien parantaminen vastaamaan 3D-tulostustekniikan vaatimuksia, Kestävyuden lisätutkimuksia

Kuva 4. Viitekehys, jossa käydään 3D-tulostettujen vaihtoehtoisten sideaineiden hyötyjä, haittoja ja tarvittavia jatkotoimia rakennustuotannossa. [17]

3.3 Vaihtoehtoiset runkoaineet

Runkoaineiden osuus tavanomaisessa sementtiyhdisteessä on yli puolet. Runkoaineina on käytetty luonnonvaraisia koskemattomia materiaaleja, sillä niillä on voitu taata halutut mekaaniset ominaisuudet. Luonnollisten runkoaineiden käyttö kuitenkin kuormittaa maapalloa. Luonnonvarojen turvaamiseksi on alettu tutkia kierrätettyjen runkoaineiden käyttömahdollisuuksia. [23]

3D-tulostettavan betonin sementtilaastien tulostettavuudessa ja mekaanisissa ominaisuuksissa on vielä paljon puutteita, jotka vaikuttavat 3DCP:n käytettävyyteen ja ekologisuuteen. 3D-tulostettavan betonin ekologiseen kestävyteen vaikuttavat sementtiyhdisteen kovettuessa tapahtuvan kutistumisen aiheuttava halkeileminen, tulostuksen heikot välikerrokset, rakenteiden huono kantokyky ja betonirakenteiden käyttöikä. On huomattu, että karheen runkoaineiden käyttö tulostuskerrosten välissä parantavan rakenteiden vakautta, laskevan hydraatiolämpötilaa sekä vähentävän laastin kutistuvuutta kuivuessa.

3D-tulostuksen ekologiset hyödyt saadaan maksimoitua, kun runkoaineeksi käytetään kierrätys- ja jättemateriaaleja. Kierrätetty runkoaines (eng. recycled aggregates) koostuu luonnollisesta runkoaineesta ja kovettuneesta laastista, eli louhitusta tavanomaisesta betonista. Sitä saadaan rakennusten rakentamisessa ja purkamisessa syntyvästä jätteestä. Kierrätetyt runkoaineet voidaan jakaa kahteen luokkaan: kierrätetty karkeakiteinen runkoaines ja kierrätetty pienirakeinen runkoaines, joiden jaottelu määräytyy niiden raekoon mukaan. Kierrätettyjä runkoaineita käytetään korvaamaan luonnollisia suuri- ja pienirakeisia runkoaineita, joista yleisimmin käytettyjä ovat luonnon raakakivi ja jokihiekka. Kierrätetyllä runkoaineella on korkeampi veden absorption kyky ja suurempi huokoisuus kuin luonnollisella runkoaineella, sillä se koostuu kahdesta faasista: raakakivestä ja siihen kiinnittyneestä laastista. [24]

Karkean runkoaineen lisääminen betoniin parantaa betonin käyttökelpoisuuden lisäksi sen ekologisuutta. Laastiin lisättävä tai tulostuskerrosten väliin lisättävä runkoaines vähentää sideaineen käyttöä, jolloin betonin tulostamisesta aiheutuvat päästöt laskevat. Sideaineen käytön väheneminen on betonin ekologisuuden kannalta ratkaisevaa, sillä se on suurin vastuussa oleva tekijä betonin energian kulutuksessa ja hiilijalanjäljessä. [16]

Toinen kierrätetyn runkomateriaalin ilmastohyödyistä luonnonvarojen käytön vähenemisen lisäksi on sen kyky sitoa hiilidioksidia. Hiilidioksidin sidontaa tapahtuu, kun kovettuneessa sementissä oleva kalkki kalsinoituu eli reagoi hiilidioksidin kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia. Vanhoja rakennuksien purkamisesta aiheutuva betonijäte murskataan runkoainekseksi, jolloin kalsinointi pinta-ala kasvaa ja hiilidioksidin sidonta kasvaa.[25] On arvioitu, että kierrätetty runkoaines pystyisi sitomaan 8 Mt hiilidioksidia Euroopassa [26].

4 Betonin 3D-tulostaminen rakennustuotannossa

4.1 3DCP:n hyödyt rakennustuotannossa

Rakennustuotannossa kestävien rakenteiden suunnittelussa pyritään edistämään ekologisuutta, kehittämällä rakennettujen ympäristöjen laatua ja vähentämällä rakennuksien aiheuttamia negatiivisia vaikutuksia ympäristöön. [3] 3D-tulostusta pidetään ympäristöystävällisenä sekä taloudellisesti kannattavana rakennustekniikkana. 3DCP:n yleistyminen rakennustuotantoon toisi mahdollisuuden parantaa betonirakenteiden kestävyyttä, vähentää raaka-aineiden kulutusta ja jätteiden syntymistä, kasvattaa tuottavuutta sekä torjua rakennusalan työvoimapulaa. [27]

Vähähiilisten ja kierrätettyjen raaka-aineiden käytön mahdollisuus tulostusmateriaaleissa on yksi 3DCP:n kestävästä hyödyistä, raaka-aineiden käytön ja jätteiden vähenemisen lisäksi. Arvioiden mukaan 3D-tulostus vähentää rakennusjätteen määrää 30–60 %. Tavanomainen betonin valmistaminen valamalla luo suuria määriä materiaalin ylijäämäjätettä, kun kappaleet leikataan muotoonsa ja asennetaan yhteen. [3] Myös valmistuksen lopuksi tarpeettomiksi jäävät muotit ovat merkittävä jätelähde tavanomaisessa betonituotannossa [27]. 3D-tulostustekniikka laskee jätteiden syntymisen rakennusprosessin aikana lähes olemattomiin. Tulostuksessa käytettävä materiaali on mitoitettu lopullisen mallin tarpeen mukaisesti, jolloin ylijäämämateriaalia ei synny. Topologian optimoinnilla 3D-tulostuksessa pyritään rakenteiden keventämiseen samalla säilyttäen niiden mekaaniset ominaisuudet, jolloin rakenteiden painokuormat pienenevät rakennuksissa. Kevyempien rakenteiden tulostamiseen kuluu myös vähemmän raaka-aineita. Tuotantoprosessin hiilijalanjälki sekä maapallon resurssien kulutus laskee, kun rakentamiseen tarvitaan vähemmän materiaalia. [19]

Rakenteiden tulostaminen antaa suunnittelijoille ja arkkitehdeille mahdollisuuden vapaampaan rakenteiden suunnitteluun. Monimutkaiset piirustukset, joiden toteuttaminen tavanomaisin rakennusmenetelmin on työtä ja aikaa vievää, on helppo toteuttaa tulostamalla. Tulostaminen helpottaa käytännöllisten rakennusten rakentamista ja erilaisten moduulien valmistamista. [19] Moduuli-rakentamisessa ennalta valmistetut osat kuljetetaan rakennustyömaalle, jossa ne kootaan yhtenäiseksi rakennukseksi. Moduulirakentamisen etuja ovat nopeampi ja turvallisempi valmistus, parempi laadun valvonta sekä raaka-ainetehokkuus. Moduuleista rakentaminen voi lyhentää rakennusaikaa 50 % ja säästää kustannuksia 20 % tavanomaisiin rakennustekniikoihin verrattuna. [28] Tehokkaan rakentamisprosessin lisäksi se tarjoaa

järkevän purkusysteemin, joka vähentää purkujätteen syntymistä. 3D-tulostetut moduulit veisivät rakennustuotantoa kohti kiertotaloutta ja ekologisempaa teollisuutta. [19]

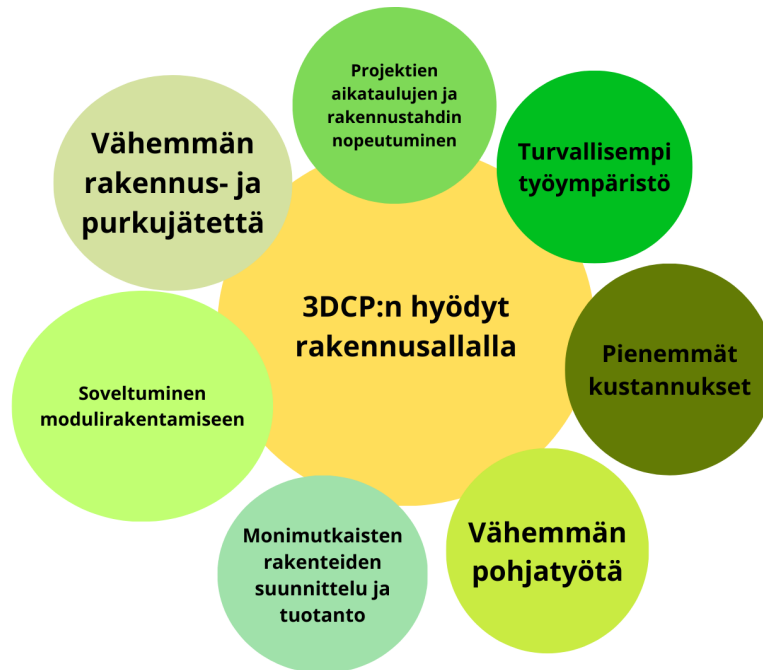
Rakentaminen 3D-tulostuksen avulla on kustannustehokasta, mikä johtuu monen tekijän summasta. Kustannuksiin vaikuttavat materiaalivalinta, tulostuskone, rakenteen sijainti ja tulostettavan elementin monimutkaisuus. Arviolta noin 35–60 % betonin rakentamisen hinnasta tulee muottien valmistamisesta, joita 3DCP-prosessissa ei käytetä ollenkaan. Vaikka 3D-tulostuksessa käytettävät materiaalit ovat kalliimpia, se on silti muotittoman tekniikan ansiosta edullisempi vaihtoehto. 3D-tulostetun betoniseinän valmistuksen kokonaiskustannukset ovat noin viidesosa tavanomaisin menetelmin valmistetun betoniseinän kokonaiskustannuksista. Betonikappaleiden valmistus 3D-tulostamalla vähentää kuluva materiaalia ja lyhentää rakenteiden toimitusaikaa. Rakennuksien kappaleet saadaan tulostettua automatisoidusti suoraan digitaalisista pohjapiirustuksista, ilman monimutkaisten muottien valmistamista. Kappaleiden tulostus tilauksesta vähentää välttämättömien materiaalien toimitusviiveitä. Nämä valmistushyödyt virtaviivaistavat rakentamisen toimitusketjua ja vähentävät logistista työtä. [3, 13] Lyhyemmän toimitusketjun ansiosta kuljetuksiin ja varastointiin menevät kulut laskevat. [18]

Aika on tärkeä tekijä kaikissa rakennusprojekteissa ja 3D-tulostustekniikalla rakennusaikaa voidaan lyhentää huomattavasti. Rakentaminen etenee nopeasti tulostamalla, ja mahdollistaa tehokkaan massatuotannon. Rakentaminen automatisoiduilla menetelmillä on todettu lisäävän tuottavuutta rakennusteollisuudessa. [18] Rakennusprojektien nopeammat aikataulut tuovat rakennusyriyksille monia etuja, kuten nopeammin saatavat tulot, yleiskustannusten pieneneminen sekä mahdollisuuden vapauttaa resurssit nopeammin seuraavaan rakennusprojektiin. [3]

3DCP-tekniikan yleistymisellä rakennustuotantoon odotetaan olevan positiivinen vaikutus rakennustyötapaturmien määrään työmailla. Työmaiden turvallisuus on suuri huolenaihe, sillä rakennusmaalla tapahtuvat loukkaantumiset ja kuolemat aiheuttavat suuria menetyksiä yksilö- ja organisaatiotasolla. Tulostimet pystyvät tekemään suurimman osan vaarallisista töistä, jolloin työntekijöiden altistuminen hankalille olosuhteille vähenee, kuten esimerkiksi korkealla työskentely. Rakenteiden rakentaminen tulostamalla vähentäisi myös työntekijöiden välistä vuorovaikutusta, jolloin työmaiden tungokset vähenisivät. [18, 27]

3DCP on uusi rakennusteknologia, jonka avulla on onnistuneesti valmistettu rakennuksia. Se on lupaava uusi tekniikka, jonka yleistyminen olisi hyödyllistä rakennusteollisuudelle. Se

mahdollistaisi nopeamman, tehokkaamman ja ekologisemman rakennustuotannon. Kuvaan 5 on kerätty 3DCP:n hyödyt rakennusteollisuudessa.



Kuva 5. Betonin 3D-tulostuksen hyödyt rakennusalalla.

4.2 3DCP:n haasteet rakennustuotannossa

Aiemmin mainittujen mekaanisten ominaisuuksien lisäksi 3D-tulostetun betonin tuotossa on vielä useita haasteita, jotka tulee ratkaista ennen sen yleistymistä rakennustuotantoon. Materiaali, kappaleen suunnittelu ja tulostin ovat 3DCP:n kolme pääkomponenttia, joiden yhteistoiminta tulisi optimoida. [29]

3D-tulostettujen betonirakenteiden mekaanisissa ominaisuuksissa on suuria haasteita, erityisesti kestävyudessa ja rakenteiden stabiilisuudessa. Merkittävin vaikuttaja mekaanisiin ominaisuuksiin on tulostukseen käytetty materiaali sekä erityisesti sen sisältämä sideaine. [17] Tulostusmateriaalien haasteita on tutkittu tarkemmin osiossa 3.2.

Osa 3DCP-prosessin haasteista johtuu siihen tarvittavasta tulostimesta, kuten sen skaalattavuudesta, suuresta koosta, hinnasta sekä tulostuksen geometrisistä rajoista [3]. Tulostimien koko rajoittaa rakennettävien kappaleiden suuruutta, joka on merkittävä este 3DCP

tekniikan yleistymiselle rakennusteollisuudessa. Tulostimen suutin voi olla kiinnitettynä rakennustelineeseen, jonka sisällä se voi liikkua ja pursottaa laastia. On olemassa myös tulostimia, joiden suuttimet ovat robottikäsisissä. Robottikäden pituus ja rakennustelineen koko rajoittavat tulostettavan kappaleen kokoa. [29] Vaikka 3D-tulostaminen tarjoaa vapaamman geometrisen suunnittelun, robottien tulostustarkkuus aiheuttaa ongelmia. Suorakulmaisia muotoja ei pystytä 3D-tulostamaan, vaan ne pitää valmistaa tavanomaisin tekniikoin. [3] Työmaa-alueiden ympäristöolosuhteet ovat hyvin vaihtelevia, joka tuottaa haasteita tulostuslaitteiden asentamiseen. Laitteet pitää saada mukautettua erilaisiin tasoihin, geometrioihin ja alustamateriaaliin. Tulostimien kuljettaminen on hankalaa ja kallista, niiden suuren kokonsa vuoksi. Tulostimien hinnat ja niiden kuljettamisesta aiheutuvat kulut ovat korkeat. [18]

3D-tulostustekniikka on vielä uutta varsinkin rakennustuotannossa, jonka takia säädöksiä ja standardeja ei ole vielä vakiinnutettu. Standardien puutteen vuoksi tulostettujen kappaleiden kokoa, muotoa ja mekaanisia ominaisuuksia säätelevät tulostimien ominaisuudet ja materiaalien laatu. Betonin tulostuksesta puuttuu vakio- tai standarditestit sekä niitä määrittävä komitea. Ilman määritettyjä säädöksiä on vaikea arvioida millaisia kuormituksia ja olosuhteita tulostetut rakenteet kestävät, mikä vaikeuttaa rakentamista. Standardien ja säädöksiä puuttuminen betonin tulostamisesta estää tekniikan yleistymistä rakennustuotantoon. [3]

3DCP:n haasteita löytyy myös itse tekniikan ulkopuolelta sosiaalisista syistä, kuten työpaikkojen vaarantumisesta ja ennakkoluuloista. Betoni rakenteiden valmistaminen 3D-tulostamalla vähentää rakennustyöntekijöiden määrää, erityisesti niiden, joiden työtehtävänä on valaa laastia ja asentaa teräsrunkoja. Vaikka työntekijöiden määrän vähentäminen laskee valmistuskuluja, tämä voi aiheuttaa rakennustuotannon tarjoamista työpaikasta riippuvaisia oleville alueille yhteiskunnallisia ongelmia. [18] Suunnittelijat, urakoitsijat ja asiakkaat suhtautuvat 3D-tulostuksen mahdollisuuksiin rakennusteollisuudessa varauksin. Teknologian tietämyksen puute on este sen yleistymiselle. [3] Kuvassa 6 on eritelty haasteita 3DCP:n yleistymiselle rakennustekniikkana.



Kuva 6. Haasteita 3D-tulostettavan betonin yleistymiselle rakennustekniikkana.

5 Pohdintaa

Betonin 3D-tulostaminen on uusi rakennustekniikka, jossa betonirakenteita tulostetaan kerroskerrokselta laastia pursottavan suuttimen ohjautuessa digitaalisten piirustusten mukaisesti. 3DCP ei ole vielä vakiintunut rakennustekniikka, eikä sille ole standardoituja laasteja, laitteistoja tai säätöjä. Tällä hetkellä kehitetään sopivia laasteja, joiden mekaaniset ominaisuudet toimivat tulostusvaiheessa ja tulostettujen elementtien kovettuessa. Tulostetuilla rakenteilla tulee olla vaatimusten mukaiset lujuudet ja kestävyudet, jotta niitä voidaan käyttää.

3D-tulostetut rakenteet ovat vielä kehitysvaiheessa, eivätkä niiden mekaaniset ominaisuudet ole tavanomaisen betonin tasolla. Suurin haaste on kovettumattomien tulostuskerrosten välinen heikko myötölujuus. Ylimmäiset tulostuskerrokset painavat alimmaisista kasaan, jolloin tulostetun rakenteen lopullinen muoto ei vastaa haluttua. Tämä on suuri ongelma, joka pitää ratkaista, ennen kun rakennuksien 3D-tulostaminen betonilla voi yleistyä. Ongelman korjaamisesta hankalan tekee se, ettei tulostamisen peruseriaate ole muuttumassa. Kuitenkin tulostuskerrosten välistä myötölujuutta voitaisiin parantaa runkoaineksen lisäksi erilaisilla tukirakenteilla. Tukirakenteissa voisi käyttää kierrätettyjä materiaaleja lisäämään betonituotannon kiertotaloutta ja ekologisempaa tuotantoa.

3D-tulostimen kuljettaminen rakennustyömaalle on kallista ja haastavaa, sen suuren koon vuoksi, sekä sen soveltuvuus erilaisille työmaaympäristöille on vaihtelevaa. 3D-tulostaminen erillisessä paikassa, jossa olosuhteet voidaan vakioida olisi edullisempaa ja helpompaa. Standardiolosuhteissa olisi mahdollista luoda betonirakenteiden automatisoitua massatuotantoa. Rakennustyömaan ulkopuolella tulostetut moduulit kuljetetaan rakennustyömaalle, jossa ne kiinnitetään toisiinsa. Moduuleilla rakentaminen on nopea ja tehokas rakennustekniikka. Se voisi tuoda ratkaisun luonnonkatastrofien ja sodan tuhoamille alueille, sekä seuduille, jossa asuinrakennuksista on pulaa. Rakennuksia saataisiin valmiiksi nopeasti sekä tuhoutuneihin rakennuksiin voitaisiin tulostaa tarvittavia osia, joka nopeuttaisi restaurointia. Köyhille ja syrjäisille seuduille pienempiä rakennuksia saataisiin rakennettua edullisesti ja nopeasti 3D-tulostettujen betonimoduulien avulla. Pienten asuntojen 3D-tulostaminen voisi olla ratkaisu parantamaan asumisolosuhteita vähävaraisilla seuduilla. Moduulirakentaminen voisi olla betonin 3D-tulostamisen tulevaisuus.

Rakennusalan ammattilaisten ennakkoluulot ja huoli rakentajien työpaikoista ovat myös esteenä tekniikan yleistymiselle. Olisi tärkeää lisätä tietoutta 3D-tulostamisen

mahdollisuuksista rakennusalalla. Tulostaminen rakennustekniikkana luo uusia mahdollisia työtehtäviä, kuten huolto-, suunnittelu- ja laadunvalvontatehtäviä. Parhaimmassa tapauksessa työpaikkojen määrä voi lisääntyä 3D-tulostamisen yleistymisen myötä. Tulostamisen nopea rakennustahti takaa yrityksille myös mahdollisuuden tehdä useampia rakennusprojekteja nopeammalla aikataululla, ja tämän ansiosta mahdollisuuden kasvattaa työvoimaansa.

3DCP on ekologisempaa kuin tavanomainen betonin valmistaminen, sillä muotteja ei tarvita, sekä ylijäämä materiaalia syntyy hyvin vähän. Tavanomaisen betonin suurimmat päästöt aiheutuvat kuitenkin käytettävän sideaineen eli sementin valmistuksesta, eikä muoteista tai ylijäämä materiaaleista. Parhaimmat tulokset hiilipäästöissä on 3D-tulostaessa saatu, kun tulostuslaastissa on käytetty jotain muuta sideainetta sementin sijasta. Betonin 3D-tulostamisessa on vielä paljon haasteita, kuten missä tahansa muussakin uudessa teknologiassa. Haasteiden ratkaiseminen vie aina oman aikansa. Betoniteollisuuden aiheuttaessa 7 % maailman hiilidioksidipäästöistä, olisi kuitenkin tärkeää saada ekologisempia vaihtoehtoja nopeasti. Korvaavat vähähiiliset sideaineet mahdollistavat ekologisen betonin, ja ovat ratkaisu sementin aiheuttamiin hiilidioksidipäästöihin. Tulostustekniikoita ja tulostimia kehitettäessä vähähiiliset sideaineet voitaisiin ottaa käyttöön jo tavanomaisessa betonirakenteiden valmistustekniikassa. Tämä vähentäisi valmistuksesta aiheutuvien päästöjen syntymistä huomattavasti. Ilmastonmuutosta torjuttaessa pienistäkin päästöjen vähennyksistä on suuria hyötyjä.

Betonimaisten laastien korvaaminen täysin jollain muulla materiaalityypillä on hankalaa, sen hyvien mekaanisten ominaisuuksien vuoksi. Edullisuutensa ja lujuutensa ansiosta se soveltuu täydellisesti rakentamiseen. Rakennusprojekteissa pyritään pitämään kustannukset pieninä, mikä vaikuttaa materiaalivalintoihin. Puu, muovit ja metallit ovat hyviä rakennusmateriaaleja, mutta eivät ole ominaisuuksiltaan yhtä monipuolisia kuin erilaiset betoniyhdisteet.

6 Yhteenveto

Tavanomaiseen betonituotantoa pyritään jatkuvasti kehittämään ekologisempaan suuntaan, sillä sementin valmistuksen aiheuttamat ilmastohaitat ovat merkittäviä. 3D-tulostustekniikan oletetaan vakiintuvan betonituotantoon sen tuomien hyötyjen vuoksi. Tavanomaiseen betonin valmistukseen verraten, se on kustannustehokkaampi, nopeampi sekä huomattavasti ympäristöystävällisempi vaihtoehto. 3DCP:ssä rakennukset valmistuvat kerros kerrokselta suuttimen pursottaessa laastia halutun muodon mukaisesti.

Tulostettava laasti valmistetaan sideaineesta, karkeasta- tai hienorakeisesta runkoaineesta, vedestä sekä kemiallisesta- tai mineraalisekoituksesta, kuten tavallinen betonilaastikin. Betonin sideaineella on merkittävin vaikutus valmistuksessa syntyviin hiilidioksidipäästöihin. Kun laastiin valitaan vähähiilinen sideaine ja korvataan luonnollinen runkoaine kierrätettyyn runkoaineeseen, saadaan betonirakenteen hiilijalanjälki merkittävästi pienemmäksi. Vähähiilisiä tulostettavia sideaineita ovat geopolymeerit, alumiinisementit, magnesiapohjaiset sementit, kipsimateriaalit sekä savet. Sideaineilla on myös merkittävä vaikutus tulostettujen rakennusten mekaaniseen kestävyYTEEN. Rakenteilla tulee olla vaaditut lujuudet ja kestävyudet, jotta korvaavat vähähiiliset sideaineet saadaan vakiintumaan betoniteollisuuteen. Sideaineiden soveltuvuutta kestävien rakennusten valmistukseen on vielä parannettava.

Rakennusteollisuudessa betonin 3D-tulostuksen hyödyiksi katsotaan nopea rakennustahti, kustannustehokkuus, turvallisempi työympäristö ja rakentamisen geometrinen vapaus. Rakentaminen tulostamalla vähentää syntyvää rakennus- ja purkujätettä, mikä katsotaan suureksi hyödyksi, kun rakennusyrietykset pyrkivät ekologisempaan tuotantoon. Betonirakenteiden valmistaminen tulostamalla vähentää rakentamisesta syntyvän jätteen määrää arvioltaan 30–60 %.

Suurimmiksi haasteiksi 3DCP:ssä on todettu mekaanisen kestävyuden lisäksi tekniikan standardien ja säädöksiEN puuttumisen, joita ilman sillä ei ole mahdollisuutta vakiintua yhteiskunnalliseen rakennustuotantoon. Rakenteiden valmistamisessa käytettävät tulostimet tuovat myös omat haasteensa, kuten niiden soveltuvuuden suurien rakenteiden valmistukseen sekä erilaisiin työympäristöihin. Tulostimet ovat suuria, ja niiden kuljettaminen on haastavaa ja kallista. Haasteista huolimatta, parhaimmillaan betonin 3D-tulostaminen mahdollistaisi taloudellisesti ja ekologisesti kestäväN betonituotannon, jonka vuoksi sen haasteet tulisi ratkaista.

Lähteet

- [1] M. Batikha, R. Jotangia, M. Y. Baaj, ja I. Mousleh, "3D concrete printing for sustainable and economical construction: A comparative study", *Autom. Constr.*, vsk. 134, s. 104087, helmi 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2021.104087.
- [2] K. Heywood ja P. Nicholas, "Sustainability and 3D concrete printing: identifying a need for a more holistic approach to assessing environmental impacts", *Archit. Intell.*, vsk. 2, nro 1, s. 12, kesä 2023, doi: 10.1007/s44223-023-00030-3.
- [3] S. El-Sayegh, L. Romdhane, ja S. Manjikian, "A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks", *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vsk. 20, nro 2, s. 34, maaliskuu 2020, doi: 10.1007/s43452-020-00038-w.
- [4] G. H. Ahmed, "A review of "3D concrete printing": Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability", *J. Build. Eng.*, vsk. 66, s. 105863, touko 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.105863.
- [5] V. Lesovik, A. Tolstoy, R. Fediuk, M. Amran, M. Ali, ja A. R. G. de Azevedo, "Improving the Performances of a Mortar for 3D Printing by Mineral Modifiers", *Buildings*, vsk. 12, nro 8, Art. nro 8, elo 2022, doi: 10.3390/buildings12081181.
- [6] S. A. Khan, M. Koç, ja S. G. Al-Ghamdi, "Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures: A systematic review for built environmental applications", *J. Clean. Prod.*, vsk. 303, s. 127027, kesä 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127027.
- [7] R. Dilawar Riaz, M. Usman, A. Ali, U. Majid, M. Faizan, ja U. Jalil Malik, "Inclusive characterization of 3D printed concrete (3DPC) in additive manufacturing: A detailed review", *Constr. Build. Mater.*, vsk. 394, s. 132229, elo 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132229.
- [8] Supriya, R. Chaudhury, U. Sharma, P. C. Thapliyal, ja L. P. Singh, "Low-CO2 emission strategies to achieve net zero target in cement sector", *J. Clean. Prod.*, vsk. 417, s. 137466, syys 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137466.
- [9] D. Coffetti, E. Crotti, G. Gazzaniga, M. Carrara, T. Pastore, ja L. Coppola, "Pathways towards sustainable concrete", *Cem. Concr. Res.*, vsk. 154, s. 106718, huhti 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106718.
- [10] A. Gangotra, E. Del Gado, ja J. I. Lewis, "3D printing has untapped potential for climate mitigation in the cement sector", *Commun. Eng.*, vsk. 2, nro 1, Art. nro 1, helmi 2023, doi: 10.1038/s44172-023-00054-7.
- [11] H. Varshney, R. A. Khan, ja I. K. Khan, "Sustainable use of different wastewater in concrete construction: A review", *J. Build. Eng.*, vsk. 41, s. 102411, syys 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102411.
- [12] "Betoni", *Betoni*. Viitattu: 12. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://betoni.com/>
- [13] T. Tabassum ja A. Ahmad Mir, "A review of 3d printing technology-the future of sustainable construction", *Mater. Today Proc.*, vsk. 93, ss. 408–414, tammi 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.08.013.
- [14] V. Nguyen-Van, S. Li, J. Liu, K. Nguyen, ja P. Tran, "Modelling of 3D concrete printing process: A perspective on material and structural simulations", *Addit. Manuf.*, vsk. 61, s. 103333, tammi 2023, doi: 10.1016/j.addma.2022.103333.
- [15] N. Singh, F. Colangelo, ja I. Farina, "Sustainable Non-Conventional Concrete 3D Printing—A Review", *Sustainability*, vsk. 15, nro 13, Art. nro 13, tammi 2023, doi: 10.3390/su151310121.
- [16] S. Bhattacharjee ym., "Sustainable materials for 3D concrete printing", *Cem. Concr. Compos.*, vsk. 122, s. 104156, syys 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104156.
- [17] Y. Peng ja C. Unluer, "Development of alternative cementitious binders for 3D printing applications: A critical review of progress, advantages and challenges", *Compos. Part B Eng.*, vsk. 252, s. 110492, maaliskuu 2023, doi: 10.1016/j.compositesb.2022.110492.
- [18] M. Bazli, H. Ashrafi, A. Rajabipour, ja C. Kutay, "3D printing for remote housing: Benefits and challenges", *Autom. Constr.*, vsk. 148, s. 104772, huhti 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2023.104772.
- [19] R. Robayo-Salazar, R. Mejía de Gutiérrez, M. A. Villaquirán-Caicedo, ja S. Delvasto Arjona, "3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector", *Autom. Constr.*, vsk. 146, s. 104693, helmi 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104693.

- [20] I. Giannopoulou, P. M. Robert, M. F. Petrou, ja D. Nicolaidis, "Mechanical behavior of construction and demolition waste-based alkali activated materials exposed to fire conditions", *Constr. Build. Mater.*, vsk. 415, s. 134994, helmi 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134994.
- [21] E. Kravchenko, G. Lazorenko, X. Jiang, ja Z. Leng, "Alkali-activated materials made of construction and demolition waste as precursors: A review", *Sustain. Mater. Technol.*, vsk. 39, s. e00829, huhti 2024, doi: 10.1016/j.susmat.2024.e00829.
- [22] X. Ding, W. Huang, Y. Li, Z. Hu, ja Z. Shan, "Study on retarding feature and retardation mechanism of various retarding materials on gypsum as a construction material: A review", *J. Build. Eng.*, vsk. 72, s. 106569, elo 2023, doi: 10.1016/j.jobbe.2023.106569.
- [23] G. Bai, L. Wang, G. Ma, J. Sanjayan, ja M. Bai, "3D printing eco-friendly concrete containing under-utilised and waste solids as aggregates", *Cem. Concr. Compos.*, vsk. 120, s. 104037, heinä 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104037.
- [24] J. Xiao, Z. Lv, Z. Duan, ja S. Hou, "Study on preparation and mechanical properties of 3D printed concrete with different aggregate combinations", *J. Build. Eng.*, vsk. 51, s. 104282, heinä 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104282.
- [25] Z. Zhao *ym.*, "A critical review on reducing the environmental impact of 3D printing concrete: Material preparation, construction process and structure level", *Constr. Build. Mater.*, vsk. 409, s. 133887, joulu 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133887.
- [26] L. Rosa, V. Becattini, P. Gabrielli, A. Andreotti, ja M. Mazzotti, "Carbon dioxide mineralization in recycled concrete aggregates can contribute immediately to carbon-neutrality", *Resour. Conserv. Recycl.*, vsk. 184, s. 106436, syys 2022, doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106436.
- [27] M. Adaloudis ja J. Bonnin Roca, "Sustainability tradeoffs in the adoption of 3D Concrete Printing in the construction industry", *J. Clean. Prod.*, vsk. 307, s. 127201, heinä 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127201.
- [28] H.-T. Thai, T. Ngo, ja B. Uy, "A review on modular construction for high-rise buildings", *Structures*, vsk. 28, ss. 1265–1290, joulu 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.09.070.
- [29] P. S. Ambily, S. K. Kaliyavaradhan, ja N. Rajendran, "Top challenges to widespread 3D concrete printing (3DCP) adoption – A review", *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vsk. 28, nro 2, ss. 300–328, tammi 2024, doi: 10.1080/19648189.2023.2213294.