Tampereen yliopisto

Turkka Ylitolonen

MUUTTUVAT RAKENTEET 4D-TULOSTUKSESSA: MALLINNUS JA SOVELLUKSET

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Mikko Vanhatalo
Toukokuu 2026

TIIVISTELMÄ

Turkka Ylitolonen: Muuttuvat rakenteet 4D-tulostuksessa: mallinnus ja sovellukset
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2026

4D-tulostus on 2010-luvun alussa kehittynyt valmistusmenetelmä, jolla pystytään valmistamaan muuttuvia rakenteita. Tämä tutkimus tarkastelee 4D-tulostusta: muodonmuutosten mahdollistajia, kappaleen suunnittelua ja sovelluskohteita. Tutkimus on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Työn alussa esitellään 4D-tulostuksen perusteet, jonka jälkeen tarkastellaan 4D-tulostuksen mahdollistajia (ärsykkeet ja älykkäät materiaalit). Lopuksi tutkitaan kappaleen suunnittelua 4D-tulostuksessa, sekä tekniikan sovelluskohteita.

4D-tulostus perustuu älykkäiden materiaalien ja tiettyjen ärsykkeiden käyttöön. Työssä tarkasteltiin erilaisten ärsykkeiden ja älykkäiden materiaalien toimintatapoja. Kappaleen suunnittelusta tarkasteltiin suunnittelun periaatteita 4D-tulostuksen näkökulmasta, mallintamista sekä haasteita. 4D-tulostuksen sovelluskohteista käsiteltiin lääketiedettä, pehmeää robotiikkaa ja elektroniikkaa.

Työn aikana havaittiin, että 4D-tulostettavien kappaleiden suunnittelu ja mallinnus on vielä hankalaa. Tarvittavia ohjelmistoja kappaleiden muodonmuutoksien ennustamiseen ei ole vielä olemassa. Lisäksi haasteita tuo valitun tulostustekniikan materiaalin pursotuksen epäluotettavuus.

4D-tulostus on nopeasti kehittyvä teknologia, jolla on merkittävä potentiaali useilla aloilla. Tekniikan laajempi käyttöönotto edellyttää kuitenkin uusia materiaaleja, valmistusprosessien parantamista sekä parempia mallinnusmenetelmiä.

Avainsanat: 4D-tulostus, 4D printing, ärsyke, stimuli, 3D-tulostus, SMP

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

☐ Ei
☒ Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia: ChatGPT, Scopus AI

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: [ChatGPT (GPT-5.3), Scopus AI]

Käyttötarkoitus:

ChatGPT:tä on käytetty tekstin oikolukuun ja tekstin muuttamiseen sujuvammaksi.
Scopus AI:ta on käytetty tässä tutkielmassa lähteiden etsimiseen.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty:

Tekoälyä on käytetty kaikkien kappaleiden oikolukuun.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. 4D-TULOSTUS 3
3. ÄRSYKKEET 4
    3.1 Valo 4
    3.2 Lämpö 5
    3.3 Kosteus 5
4. MATERIAALIT 7
    4.1 Hydrogeelit 7
    4.2 Muotomuistipolymeerit 8
    4.3 Nestekide-elastomeerit 9
    4.4 Muistimetallit 9
5. SUUNNITTELU JA MALLINNUS 11
    5.1 Suunnittelun periaatteet 11
    5.2 Mallinnus 13
    5.3 Suunnittelun ja mallinnuksen haasteet 13
6. SOVELLUKSET 14
    6.1 Lääketiede 14
    6.2 Pehmeä robotiikka 15
    6.3 Elektroniikka 17
7. JOHTOPÄÄTÖKSET 18
LÄHTEET 20

LYHENTEET JA MERKINNÄT

DED	engl. Direct energy deposition, suorakerrostusmenetelmä
DLP	engl. Digital light processing, tulostustekniikka
FEM	engl. Finite element method, elementtimenetelmä
LCE	engl. Liquid crystal elastomer, nestekide-elastomeeri
PBF	engl. Powder bed fusion, jauhepetisulatusmenetelmä
SLA	engl. Stereolithography, stereolitografia
SLM	engl. Selective laser melting, selektiivinen lasersulatus
SLS	engl. Selective laser sintering, selektiivinen lasersintraus
SMA	engl. Shape memory alloy, muistimetalli
SMP	engl. Shape memory polymer, muotomuistipolymeeri
T_g	lasittumislämpötila, lasisiirtymälämpötila

1. JOHDANTO

3D-tulostus on mullistanut tapaa, jolla tuotteita voidaan valmistaa. 3D-tulostus, tunnettu myös nimellä lisäävä valmistus, on viime vuosikymmeninä teollisuudessa ja kotitalouksissakin nopeasti lisääntynyt valmistustekniikka. 3D-tulostuksessa valmistettava rakenne tulostetaan kolmiulotteisen digitaalisen mallin perusteella lisäämällä materiaalia kerros kerrokselta. Tämän tekniikan historia alkoi 1980-luvun puolivälistä, jolloin Chuck Hull keksi ensimmäisen 3D-tulostustekniikan, stereolitografian (SLA). Stereolitografia hyödyntää kohdennettua UV-valoa kovettaakseen nestemäistä fotopolymeeriä ja näin tuottaa kappaleen. Vuosikymmenien kuluessa teknologia on kehittynyt, ja nykyään on useita erilaisia tulostustekniikoita, kuten jauhepetisulatus (PBF), suorakerrostus (DED) ja selektiivinen lasersintraus (SLS). (Bandyopadhyay & Bose 2025)

Teknologian kehittyminen on tuonut myös lisäyksiä tulostuksessa käytettäviin materiaaleihin. 3D-tulostuksessa voidaan käyttää nykypäivänä useita erilaisia materiaaleja. Erilaiset muovit, kuten polylaktidi (PLA) ja akryliinitriilibutadieenistyreeni (ABS), ovat käytetyimpiä materiaaleja, sillä ne ovat yhteensopivia monien eri tulostustekniikoiden kanssa. Muovien lisäksi tulostuksessa voidaan käyttää metalleja sekä komposiitti- ja keraamimateriaaleja. (Ngo et al. 2018)

Yksi uusimmista ja mielenkiintoisimmista lisäävän valmistuksen tulostustekniikoista on 4D-tulostus. 4D-tulostuksella voidaan tuottaa älykkäitä rakenteita, jotka on ohjelmoitu muuttamaan muotoaan, ominaisuuksia tai toimintaansa ajan kanssa ärsykkeille altistettaessa. 4D-tulostus nimi tulee siis lisätystä neljännestä ulottuvuudesta: ajasta. (Bodaghi & Zolfagharian 2022)

Tässä työssä tarkastellaan, kuinka 4D-tulostuksessa suunnitellaan ja mallinnetaan rakenteiden muodonmuutos hyödyntäen älykkäitä materiaaleja, joilla voidaan luoda muotoa muuttavia kappaleita. Lisäksi tarkastellaan tämän tekniikan nykyisiä käyttökohteita ja tekniikan kohtaamia haasteita. Tämä työ vastaa seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

-Kuinka kappaleen muodonmuutokset saadaan aikaan?

-Miten 4D-tulostuksessa suunnitellaan ja mallinnetaan muotoa muuttavat kappaleet?

-Mitkä ovat tekniikan käyttökohteet?

-Mitä haasteita on 4D-tulostuksessa?

Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Aineistoa työhön etsittiin Andor-hakupalvelusta sekä Scopus-viittaustietokannasta. Hakutermejä lähteiden etsimiseen oli muun muassa ”4D printing”, ”stimuli” ja ”smart material”.

Toisessa luvussa käydään lyhyesti läpi mitä 4D-tulostus on. Kolmannessa luvussa käsitellään erilaisia ärsykkeitä, jotka voivat laukaista rakenteiden muodonmuutoksia. Luvussa käsitellään tarkemmin muutamaa yleisimmin käytettyä ärsykettä ja kerrotaan niiden toimintatavasta. Neljännessä luvussa käsitellään materiaaleja, joita voidaan käyttää 4D-tulostuksessa. Luvussa kerrotaan tärkeimpien materiaalilajien hyötyjä ja haittoja sekä esitellään niille yhteensopivia ärsykkeitä. Viidennessä luvussa käsitellään 4D-tulostusta suunnittelun näkökulmasta. Luvussa tarkastellaan, miten voidaan suunnitella ja mallintaa etukäteen rakenteiden muodonmuutoksia. Kuudennessa luvussa käsitellään 4D-tulostuksen tämänhetkisiä sovelluskohteita eri aloilla.

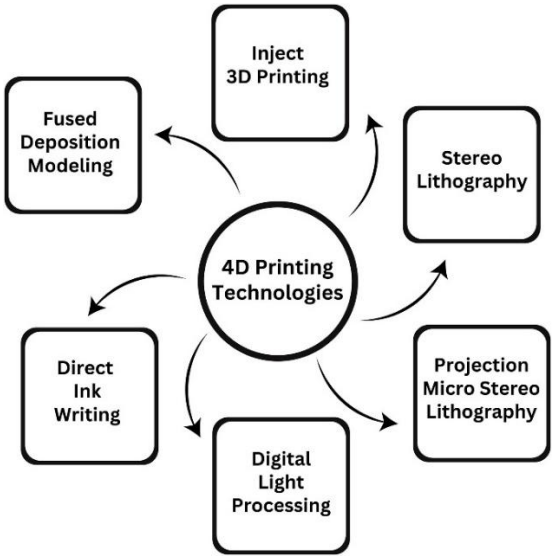
2. 4D-TULOSTUS

4D-tulostus on lisäävän valmistuksen tulostustekniikka, joka hyödyntää älykkäitä materiaaleja. Älykkäät materiaalit mahdollistavat rakenteen tai muiden ominaisuuksien muuttumisen vasteena tietylle ärsykkeelle. 4D-tulostus-termin neljäs ulottuvuus viittaa aikaan: tulostettu kappale ei ole staattinen, vaan se reagoi ympäristöönsä ja kykenee muuttamaan muotoaan. Nämä dynaamiset rakenteet ovat herättäneet paljon mielenkiintoa eri aloilla. (Sajjad et al. 2024)

4D-tulostus nousi laajemmin esiin vuonna 2013 Skylar Tibbitsin TED-puheen myötä. Vuonna 2014 Tibbits julkaisi tutkimusartikkelin, jossa tarkasteltiin älykkäiden materiaalien käyttöä esineiden valmistuksessa. (Sajjad et al. 2024)

4D-tulostus perustuu älykkäiden materiaalien, kuten muotomuistipolymeerien käyttöön. Prosessissa materiaali ohjelmoidaan jo tulostusvaiheessa siten, että sillä on kyky muuttaa rakennettaan hallitusti. Tämän saavuttamiseksi hyödynnetään materiaalien ominaisuuksia, kuten siirtymälämpötiloja tai turpoamiskäyttäytymistä sekä suunnittelemalla kappaleen geometria huolellisesti. (Ma et al. 2020; Sajjad et al. 2024) Älykkäistä materiaaleista kerrotaan tarkemmin luvussa 4 ja ärsykkeistä luvussa 3.

4D-tulostus hyödyntää monia samoja tekniikoita kuin 3D-tulostus itse tulostukseen, mutta toisin kuin 3D-tulostuksessa, 4D-tulostuksessa käytetään älykkäitä materiaaleja. Tulostustekniikoista 4D-tulostuksessa on käytössä muun muassa SLA, SLS ja DLP. (Sajjad et al. 2024) Kuva 1 esittelee 4D-tulostukseen sopivia tulostustekniikoita.



Kuva 1. *4D-tulostuksessa käytettyjä tulostusmenetelmiä* (Sajjad et al. 2024).

3. ÄRSYKKEET

Ärsykkeet ovat oleellinen osa 4D-tulostusta, sillä niiden avulla käynnistetään 4D-tulostettujen kappaleiden muodonmuutokset. Ärsykkeitä on useita erilaisia, ja jokaisella niistä on oma toimintatapansa. Ärsykkeen valinta riippuu paljon käyttökohteesta ja suunnitellun kappaleen rakenteesta. (Sajjad et al. 2024) Ärsykkeet voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan: sisäisiin ja ulkoisiin ärsykkeisiin. Lajittelu perustuu siihen, onko ärsyke luotu itse vaikutuspaikassa vai sen ulkopuolella. Ulkoisia ärsykkeitä ovat esimerkiksi magneettikenttä, valo ja sähkö, kun taas sisäisiä ärsykkeitä voivat olla lämpötila ja pH-taso. (Moheb Afzali et al. 2024)

Ärsykkeet ovat joko kemiallisia tai fysikaalisia. Esimerkiksi pH-taso on kemiallinen ärsyke, kun taas paine ja magneettikenttä ovat fysikaalisia ärsykkeitä. (Sajjad et al. 2024) Tässä luvussa käsitellään muutamaa yleisesti 4D-tulostuksessa käytettäviä ärsykkeitä: valoa, lämpöä ja kosteutta.

3.1 Valo

Yksi yleisimmistä ärsykkeistä, jota käytetään 4D-tulostuksessa, on valo. Valo voi toimia ärsykkeenä fototermisesti tai fotokemiallisesti. Fototermisessä tavassa valon energia lämmittää kappaleeseen sisällytettyä lämpöä johtavaa materiaalia, mikä aiheuttaa rakenteen muuttumisen. Fotokemiallisesti valo aiheuttaa materiaalissa olevia valoherkkiä molekyylejä muuttamaan sidoksiaan, mikä johtaa rakenteen muodonmuutokseen.

Esimerkiksi atsobentseeni on yhdiste, jonka molekyylirakenne voi muuttua suorasta (trans) taipuneeksi (cis) UV-valon vastaanottamisen seurauksena. Tämä trans–cis-isomerisaatioon perustuva muodonmuutos palautuu näkyvän valon absorboituessa. Kaikki valon aallonpituudet eivät kuitenkaan pysty aiheuttamaan muodonmuutosta, vain tietty aallonpituus pystyy sen aiheuttamaan. Tarvittu aallonpituus riippuu kappaleessa käytettävistä materiaaleista. (Jeong et al. 2022)

Valo on hyvä ärsyke useasta eri syystä. Valolla pystytään valikoivasti aiheuttamaan muodonmuutosta kappaleeseen kohdentamalla valoa vain tiettyyn osaan kappaletta. Valon sijainti, aallonpituus ja polarisaatio voidaan valita, jolloin monimutkaisissakin rakenteissa saadaan aikaan hyvin tarkkoja ja vaiheittain eteneviä liikkeitä tai muodonmuutoksia. Tämän lisäksi valo pystyy etäältä aiheuttamaan muodonmuutoksia, joka on tietyissä tilanteissa tarvittava ominaisuus. (Jeong et al. 2022)

Valon käyttöön liittyy myös rajoittavia tekijöitä. Valoenergian muuntaminen mekaaniseksi energiaksi, jotta saadaan muodonmuutoksia aikaan, on haastavaa. Lisäksi rajoitteena toimii valon riittämätön tunkeutumissyvyys, joka korostuu erityisesti läpinäkymättömien materiaalien kanssa. (Ji et al. 2022)

3.2 Lämpö

Lämpö on yksi käytetyimmistä ärsykkeistä 4D-tulostetuille rakenteille. Rakenteiden muoto muuttuu, kun lämpötilaa nostetaan tai lasketaan (Sajjad et al. 2024). Lämmön käytöllä ärsykkeenä on tietyille materiaaleille hyödyllisiä vaikutuksia. Muotomuistipolymeereillä (SMP) luodut ja lämmöllä aktivoidut rakenteet palautuvat alkuperäiseen muotoon, kun kappaletta lämmitetään yli lasittumislämpötilan T_g. Palautuminen tapahtuu entropisen elastisuuden takia. (Sajjad et al. 2024; Sondagar et al. 2024) Tästä syystä lämpö ärsykkeenä on ollut tutkijoiden mielenkiinnon kohteena.

Ärsykkeenä lämmöllä on useita hyötyjä, kuten edellä mainittu muotomuistipolymeerien kokema palautuvuus. Lisäksi lämpö voi käynnistää materiaalin itsekorjautumisprosessin (Ryan et al. 2021). Lämpöä on hyödynnetty monissa sovelluskohteissa, näihin sisältyy muun muassa lääkeaineiden annostelu, pehmeä robotiikka sekä räätälöidyt tukirakenteet (Thakur et al. 2023).

3.3 Kosteus

Kosteus toimii ärsykkeenä kolmen päämekanismin avulla. Yksi päämekanismi on vetysidosten katkaiseminen ja samaisten sidosten uudelleenmuodostaminen. Tällä tavalla polymeerin ja vesimolekyylien väliset vetysidokset vähentävät polymeerin makromolekyylien välisiä vuorovaikutuksia, joka johtaa lasittumislämpötilan T_g alenemiseen sekä vapauttaa mekaanista energiaa, joka aiheuttaa rakenteen muodonmuutoksen. Toinen mekanismi perustuu materiaalin kykyyn absorboida vettä, mikä alentaa materiaalin lasittumislämpötilaa ja johtaa muodonmuutokseen. Viimeinen mekanismi on materiaalin kyky imeä vettä itseensä aiheuttaen rakenteen anisotrooppisen tai isotrooppisen tilavuuden muutoksen. Materiaaleista esimerkiksi hydrogeelit omaavat tämän kyvyn. (Ryan et al. 2021)

Toisin kuin monet muut ärsykkeet, kosteus mahdollistaa toimintatavalta yksinkertaisen ja turvallisen muodonmuutoksen, joka ei vaadi lisäenergiaa aktivoituakseen. Tämän takia se on herättänyt kiinnostusta erityisesti biotulostuksen käyttökohteissa. (Mandal & Chatterjee 2023)

Kosteuden hyödyntämisessä on myös useita haasteita. Aikaansaadut muodonmuutokset ovat vielä liian yksinkertaisia ja tapahtuvat liian suuressa mittakaavassa kuin mitä tarvitaan biologisissa rakenteissa. Lisäksi materiaalien mekaaniset ominaisuudet heikkenevät turpoamisen seurauksena, mikä rajoittaa rakenteiden kestävyyttä. (Mandal & Chatterjee 2023)

4. MATERIAALIT

Älykkäät materiaalit ovat 4D-tulostuksen keskeisimpiä osatekijöitä. Älykkäät materiaalit ovat materiaaleja, jotka reagoivat ärsykkeisiin ja pystyvät muuttamaan ominaisuuksiaan ajan kuluessa. Näillä materiaaleilla voi olla itsenäisiä toimintoja, kuten muistinvarainen muodon palautuminen, värin muuttuminen ja itsensä korjaaminen. Kaikki älykkäät materiaalit eivät kuitenkaan sovi tulostamiseen, vaikka niitä on käytetty monissa eri sovelluksissa. 4D-tulostuksen näkökulmasta tärkeimmät ominaisuudet materiaalille ovat ärsykeherkkyys ja tulostettavuus. (Bodaghi & Zolfagharian 2022) Tässä luvussa keskitytään älykkäisiin materiaaleihin, joita hyödynnetään 4D-tulostamisessa.

Materiaalin valinta riippuu vahvasti käyttötarkoituksesta ja tulostusmenetelmästä, siksi tässä luvussa esitellään eri materiaalien ominaisuuksia, ärsykkeitä sekä hyötyjä ja haittoja.

4.1 Hydrogeelit

Kosteudelle reagoivat materiaalit ovat olleet suurena mielenkiinnon kohteena niiden laajan käyttöpotentiaalin takia. Hydrogeelit ovat kosteudelle reagoivia materiaaleja, jotka koostuvat useista ristisidoksilla toisiinsa liittyneistä polymeeriketjuista. Hydrogeelien tilavuus voi kasvaa jopa 200 % alkuperäisestä tilavuudesta niiden altistuessa kosteudelle. (Ahmed et al. 2021) Kosteuden lisäksi hydrogeelit pystyvät reagoimaan myös lämpötilan ja pH-arvon muutoksiin, jonka takia ne sopivat hyvin 4D-tulostussovelluksiin (Ryan et al. 2021). Hydrogeelejä on kahdenlaisia, synteettisiä ja luonnollisia. Luonnollisiin hydrogeeleihin sisältyy esimerkiksi fibriini, kollaageeni sekä agaroosi. Synteettisiä hydrogeelejä ovat muun muassa polyetyleeniglykoli (PEG) sekä polyvinyylialkoholi (PVA). (Sadraei & Naghib 2025)

Ongelmana hydrogeeleissä on niiden hidas palautuminen alkuperäiseen tilaan. Niiden kutistumista ja kuivumista voi joutua odottamaan jopa tunteja. (Ahmed et al. 2021) Hitaus ei kuitenkaan ole hydrogeelien ainoa heikkous. Hitauden lisäksi hydrogeelien mekaaniset ominaisuudet rajoittavat niiden käyttöä, sillä ne ovat yleisesti varsin heikot (Sadraei & Naghib 2025).

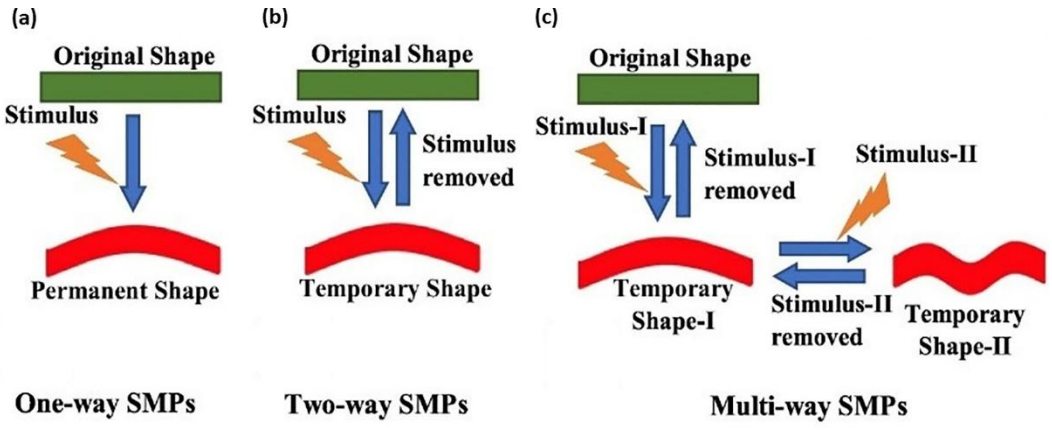
4.2 Muotomuistipolymeerit

Muotomuistipolymeerit (engl. shape memory polymer, SMP) ovat polymeerimateriaaleja, jotka kykenevät palauttamaan ennalta määritellyn muotonsa tai muuttamaan muotoaan väliaikaisesti ärsykkeen vaikutuksesta. Muotomuistipolymeerejä on monia, eivätkä ne kaikki reagoi samoihin ärsykkeisiin. Lämpö, valo, pH-arvon muutos ja sähkökentät ovat kuitenkin sellaisia ärsykkeitä, joita voidaan käyttää SMP:ihin. (Ma et al. 2020)

Muotomuistipolymeerit jaetaan kolmeen eri luokkaan: yksisuuntaisiin, kaksisuuntaisiin sekä monisuuntaisiin SMP:ihin, riippuen niiden kyvystä palautua ja reagoida ärsykkeisiin. Yksisuuntaiset SMP:t eivät pysty palautumaan alkuperäiseen muotoonsa, vaan säilyttävät uuden muotonsa. Kaksisuuntaiset sekä monisuuntaiset pystyvät palautumaan alkuperäiseen muotoonsa, mutta monisuuntaiset pystyvät vielä lisäksi reagoimaan toiseen ärsykkeeseen ja muuttua sen mukaisesti. (Sondagar et al. 2024) Kuva 2 havainnollistaa eri SMP-tyyppien toimintatavat.

Muotomuistipolymeereistä valmistettujen rakenteiden muodonmuutoskäyttäytyminen koostuu kolmesta vaiheesta. Ensin rakenne muotoillaan haluttuun väliaikaiseen muotoon ulkoisen voiman avulla sopivan ärsykkeen alaisena. Tämän jälkeen ärsyke poistetaan ja kuormitus vapautetaan, jolloin väliaikainen muoto lukittuu. Lopuksi SMP-rakenne altistetaan uudelleen ärsykkeelle, jolloin se palautuu alkuperäiseen muotoonsa. (Ma et al. 2020)

Muotomuistipolymeerien suurena etuna on niiden kyky mahdollistaa ja kestää suuria muodonmuutoksia. Lisäksi SMP:t ovat kevyitä verrattuna muihin materiaaleihin, kuten muistimetalleihin. Muita hyötypuolia SMP:iden käytössä on mahdollisuus muuttaa käytettävän polymeerin kiteisyyttä, jota voidaan hyödyntää siirtymälämpötilan ohjelmoimiseen halutunlaiseksi. (Ma et al. 2020; Ryan et al. 2021)



Kuva 2. *Erilaisten SMP-tyyppien toimintatavat* (Sondagar et al. 2024).

4.3 Nestekide-elastomeerit

Nestekide-elastomeerit (LCE) ovat polymeerejä, jotka koostuvat ristisidoksin toisiinsa liittyneistä pääketju- tai sivuketju nestekidemolekyyleistä. LCE:t yhdistävät elastomeerien kumimaisuuden ja nestekiteiden järjestäytyneen rakenteen. Nestekiteiden järjestäytyneisyys mahdollistaa materiaalin reagoimisen ärsykkeisiin, kuten lämpöön tai valoon. Nestekide-elastomeereillä on joustava rakenne ja alhainen ristisilloitustiheys. (Ma et al. 2020; Korley & Ware 2021)

Nestekide-elastomeerimateriaalien muodonmuutos ominaisuudet riippuvat siitä, miten niiden faasikäyttäytymistä voidaan muokata sekä miten nestekiteet saadaan ohjattua haluttuun järjestykseen ja suuntaan. Esimerkiksi nemaattiset LCE:t siirtyvät nemaattisesta faasista isotrooppiseen faasiin, kun niitä lämmitetään. Tämän siirtymän aikana molekyyliketjut kutistuvat, mikä näkyy makroskooppisesti rakenteen muodonmuutoksena. (Ma et al. 2020; Korley & Ware 2021)

Nestekide-elastomeerien palautuminen alkuperäiseen muotoon tapahtuu hyvin nopeasti verrattuna esimerkiksi hydrogeeleihin (Ryan et al. 2021). Nopea palautuminen on käytännön sovelluksia ajatellen tärkeä ominaisuus. Nestekide-elastomeerien käyttöä rajoittavat vielä aikaansaadun muodonmuutoksen lyhyt kesto sekä rajallinen määrä vaihtoehtoisia LCE-materiaaleja (Ma et al. 2020).

4.4 Muistimetallit

Kuten muotomuistipolymeerit, myös muistimetallit (engl. shape memory alloy, SMA) kykenevät palauttamaan ennalta määritellyn muotonsa ärsykkeen vaikutuksesta. Muistimetallien muodonmuutoksen palautumisprosessi liittyy metalliseoksen kahteen faasiin: martensiittifaasiin ja austeniittifaasiin. Muistimetallin muotoa muokataan, kun se on martensiittifaasissa. Tämän jälkeen, kun lämpötila nousee austeniittifaasin alueelle, rakenne palautuu takaisin alkuperäiseen muotoonsa. (Ryan et al. 2021) Ärsykkeistä lämpö ja magneettikentät aiheuttavat muistimetallien muodonmuutoksia (Kumar et al. 2024).

Muistimetallit ovat hyvien lämpö- ja mekaanisten ominaisuuksiensa vuoksi sopivia vaativiin olosuhteisiin. Näiden ominaisuuksien takia muistimetalleja voidaan käyttää esimerkiksi ilmailu- tai biolääketiedesovelluksissa. (Ryan et al. 2021) Merkittävä haaste muistimetallien käytössä on uusien dislokaatioiden ja muiden epätäydellisyyksien muodostuminen hilarakenteeseen faasimuutosten aikana (Kumar et al. 2024). Dislokaatiot heikentävät muistimetallien muodonpalautumista aiheuttamalla pysyvää muodonmuutosta ja väsymistä.

Muistimetalleja voidaan tulostaa eri menetelmillä, joista yleisimmät ovat SLS ja SLM. Kyseiset menetelmät soveltuvat hyvin metallirakenteiden valmistamiseen. (Ryan et al. 2021)

5. SUUNNITTELU JA MALLINNUS

4D-tulostuksessa rakenteiden suunnittelu ja mallinnus on keskeinen vaihe. Toisin kuin perinteisessä suunnittelussa, tavoitteena ei ole ainoastaan lopullinen geometria, vaan myös rakenteen muodonmuutoksen hallinta ja sen vaste erilaisiin ärsykkeisiin. Tämä edellyttää esimerkiksi materiaalin ominaisuuksien huomioimista jo suunnitteluprosessin alkuvaiheessa.

Tässä luvussa tarkastellaan, miten 4D-tulostettujen rakenteiden toiminnallisuutta voidaan ennakoida ja ohjata toimimaan halutulla tavalla. Aluksi käydään läpi suunnittelun periaatteita 4D-tulostuksen näkökulmasta. Lisäksi käsitellään yleisellä tasolla mallinnusta 4D-tulostuksessa sekä mallinnuksen ja suunnittelun haasteita.

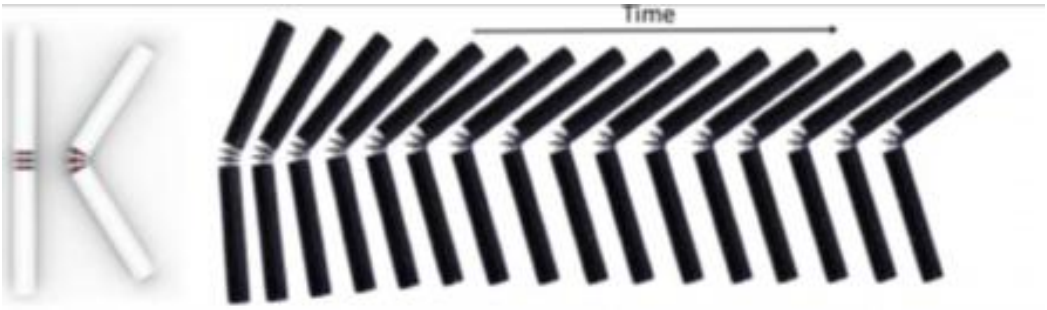
5.1 Suunnittelun periaatteet

4D-tulostus koostuu lisäävän valmistuksen tekniikoista, älykkäistä materiaaleista ja tavoista ohjelmoida 3D-tulostettu rakenne muuttamaan muotoaan hallitusti. Suurin ero 3D- ja 4D-tulostuksen välillä on se, että 4D-tulostus vaatii väliaikaisen muutoksen ohjelmoinnin itse 3D-tulostettuun rakenteeseen. Ennen kuin tällainen rakenne saadaan tulostettua, tulee materiaalin olla valittuna ja rakenteen muoto suunniteltu. Nämä ovatkin kriittisiä vaiheita ennen itse tulostusta. (Shen et al. 2020)

Materiaalin valinta riippuu merkittävästi suunniteltavan objektin käyttötarkoituksesta. Tulostusmenetelmä määräytyy yleensä valitun materiaalin perusteella, sillä kaikki tulostustekniikat eivät ole yhteensopivia kaikkien materiaalien kanssa. Yleinen tapa luoda 4D-tulostettu rakenne on joko käyttää aktiivisia materiaaleja, jotka voivat laajentua tai vapauttaa heterogeenisesti jakautunutta jännitystä tulostetun kappaleen sisältä. (Shen et al. 2020)

Jotta muodonmuutos saadaan aikaan hallitusti, tulee materiaali ohjelmoida. Materiaalin ohjelmointi voi tapahtua kolmessa eri vaiheessa: ennen tulostusta, tulostuksen aikana tai tulostuksen jälkeen. Ohjelmointi ennen tulostusta perustuu kappaleen geometriseen rakenteeseen ja materiaalien sijoitteluun rakenteessa. (Shen et al. 2020) Esimerkiksi Raviv et al. (2014) suunnittelivat saranan jäykistä materiaaleista ja hydrofiilisestä akrylaattipolymeeristä, joka absorboi vettä. Kyseisen polymeerin turpoaminen aiheutti sisäisen jännityksen epätasapainon nivelessä, minkä seurauksena nivel taittui aktiivisesta polymeeristä poispäin. Rakenne koostui palkeista ja levyistä, joista levyt pystyivät pysäyttämään taipumisen koskiessaan toisiinsa, mikä johtaa tiettyyn taipumiskulmaan.

Kuvassa 3 näkyy saranan rakenne, joka koostuu kahdesta palkista, levyistä sekä polymeeristä (kuvassa punaisella).



Kuva 3. *Saranan rakenne ja reaktio ärsykkeeseen ajassa* (Muokattu lähteestä Raviv et al. 2014).

Tulostuksen aikaiseen rakenteen ohjelmointiin voidaan käyttää muutamaa yleistä menetelmää: täyteaineen orientaation muokkaaminen, sisäisen jännityksen lisääminen ja pintojen mikrorakenteiden ohjelmointi (Shen et al. 2020).

Tulostettu esine hyvin suunnitellulla ja anisotrooppisella rakenteella suorittaa yleensä halutun muodonmuutoksen vapauttamalla ärsykkeen aiheuttamaa sisäistä jännitystä. Sisäistä jännitystä voidaan tuottaa suoraan tulostusprosessin aikana, tarkan ohjauksen avulla. Sisäisen jännityksen relaksaatio mahdollistaa ennalta määritellyn muodonmuutoksen. (Shen et al. 2020)

Esimerkiksi PLA-materiaalin sisäistä jännitystä, joka syntyi tulostuksen aikana, hyödynnettiin ohjatun muodonmuutoksen aikaansaamiseksi sitä kuumennettaessa. Tulostetut filamenttikerrokset jäähtyivät nopeasti, jähmettyivät ja kiinnittyivät joko tulostusalustaan tai aiemmin tulostettuihin kerroksiin. Toistuvat kuumennus- ja nopean jäähtymisen syklit johtivat sisäisen jännityksen kertymiseen, koska alusta ja olemassa olevat kerrokset rajoittivat materiaalin liikkumista. Sisäinen jännitys säilyi rakenteessa, koska polymeeriketjut eivät päässeet palautumaan lasisiirtymälämpötilan alapuolella. Säilötty jännitys voitiin vapauttaa lämmittämällä rakenne lasisiirtymälämpötilan yläpuolelle, jolloin polymeeriketjut vapautuivat aiheuttaen kutistumista. Sisäisen jännityksen suuruutta voitiin hallita säätämällä tulostusparametreja, kuten alustan lämpötilaa, pursotusnopeutta ja suuttimen lämpötilaa. (Shen et al. 2020, Zhang et al. 2015 mukaan)

Kun älykäs rakenne on suunniteltu ja tulostettu, seuraava vaihe on halutun muodonmuutoksen aikaansaaminen tiettyjen ärsykkeiden avulla. Tässä kohtaa ärsykkeiden valinta,

niiden soveltamistapa ja aktivointijärjestys ovat kaikki keskeisiä tekijöitä tulostuksen jälkeisessä ohjelmoinnissa. (Shen et al. 2020) Ärsykkeiden toimintatapoja käytiin läpi luvussa 3.

5.2 Mallinnus

Kun materiaali, tulostustekniikka ja rakenteen ohjelmointitavat on valittu, seuraava looginen askel on mallintaa rakenne ja ennustaa rakenteen muodonmuutoskäyttäytyminen. Tätä varten on kehitelty monia erilaisia mallinnusmenetelmiä erilaisille materiaaleille ja rakenteille. Jokainen mallinnusmenetelmä toimii kuitenkin vain samanlaisille järjestelmille, joita varten se on luotu. Universaalin mallin luominen usean materiaalin järjestelmille on vielä hyvin hankalaa. (Shen et al. 2020)

Universaalia mallia on kuitenkin yritetty luoda. Shenin et al. (2020) mukaan on ehdotettu ”Design for 4D printing” -viitekehystä, jonka tavoitteena on helpottaa 4D-tulostettujen rakenteiden mallinnusta. Viitekehyksessä rakenne jaetaan vokseleihin, jotka yhdistetään palkkielementeillä. Vokseleista jokainen voi edustaa erilaista aktiivista materiaalia. Materiaalien ominaisuuksien avulla rakenteen muodonmuutoksia voitiin simuloida skinning-tekniikan avulla. Menetelmän toimivuutta kokeiltiin erilaisilla simulaatioilla. (katso Sossou et al. 2019)

Tutkimuksissa mallintamiseen ja sopivan geometrian löytämiseen yleisesti käytetään numeerisia työkaluja, kuten elementtimenetelmää (engl. finite element method, FEM) ja yksinkertaisempien geometrioiden mallintamiseen voidaan käyttää analyyttisiä laskelmia (Bodaghi & Zolfagharian 2022b).

5.3 Suunnittelun ja mallinnuksen haasteet

Muotoa muuttavien materiaalien käytön ja lisäävän valmistuksen yhdistelmän takia 4D-tulostetun systeemin mallintamisessa on useita merkittäviä haasteita. Ensimmäinen haaste on älykkään materiaalin muodonmuutoksen simuloiminen, joka vaatii monifysiikkasimulointia. FEM:in lisäksi simuloimiseen tarvitaan fysiikanala, joka riippuu valitusta ärsykkeestä. Näitä aloja ovat esimerkiksi lämpöoppi ja sähköoppi. Yhtä soveltuvaa työkalua tällaiseen simulointiin ei vielä ole olemassa. (Shen et al. 2020; Bodaghi & Zolfagharian 2022b)

Toinen haaste on tulostettujen rakenteiden heterogeenisyys. Tietyt tulostustekniikat voivat materiaalin pursotuksen aikana jättää aukkoja vierekkäisten filamenttien väliin ja aiheuttaa anisotropiaa rakenteessa.(Shen et al. 2020) Lisäksi aiemmin mainittu universaalin mallinnusmenetelmän puuttuminen hidastaa suunnitteluprosessia.

6. SOVELLUKSET

4D-tulostus on lupaava tekniikka, joka voi mahdollistaa tulevaisuudessa uudenlaisia ratkaisuja moniin ongelmiin. Tekniikka voi tarjota ratkaisuja monilla aloilla, kuten lääketieteessä ja ilmailussa.

Tässä luvussa tarkastellaan mielenkiintoisia sovelluskohteita, joissa voidaan hyödyntää 4D-tulostusta. Merkittävimpänä sovelluskohteena on lääketiede, jossa 4D-tulostaminen voi mahdollistaa yksilöllisesti räätälöityjä ratkaisuja. Lisäksi luvussa käsitellään 4D-tulostuksen soveltamista pehmeän robotiikan ja elektroniikan saralla.

6.1 Lääketiede

Lääketieteessä 4D-tulostuksella on useita sovelluskohteita, koska sillä voidaan tuottaa dynaamisia ja monimutkaisia rakenteita. 4D-tulostamista voidaan käyttää lääketieteessä esimerkiksi lääkeaineiden annostelussa, lääkinnällisissä laitteissa sekä ortopediassa. (Sajjad et al. 2024)

Lääkeaineiden annostelu on yksi alue, jossa 4D-tulostamista on tutkittu ja käytetty. Lääkkeenannostelujärjestelmien toimivuus edellyttää tarkkaa suunnittelua, jotta lääkkeen vapautuminen tapahtuu hallitusti. 3D- ja 4D-tulostaminen mahdollistavat monimutkaisten annostelujärjestelmien valmistamisen, joiden valmistaminen perinteisillä menetelmillä olisi ollut haastavaa. 4D-tulostamisen hyödyntäminen lääkeaineiden annostelussa pyrkii tehostamaan lääkeaineiden vaikutusta hallitsemalla lääkeaineiden jakautumista, imeytymistä ja metabolisia vaikutuksia kehossa. (Sajjad et al. 2024)

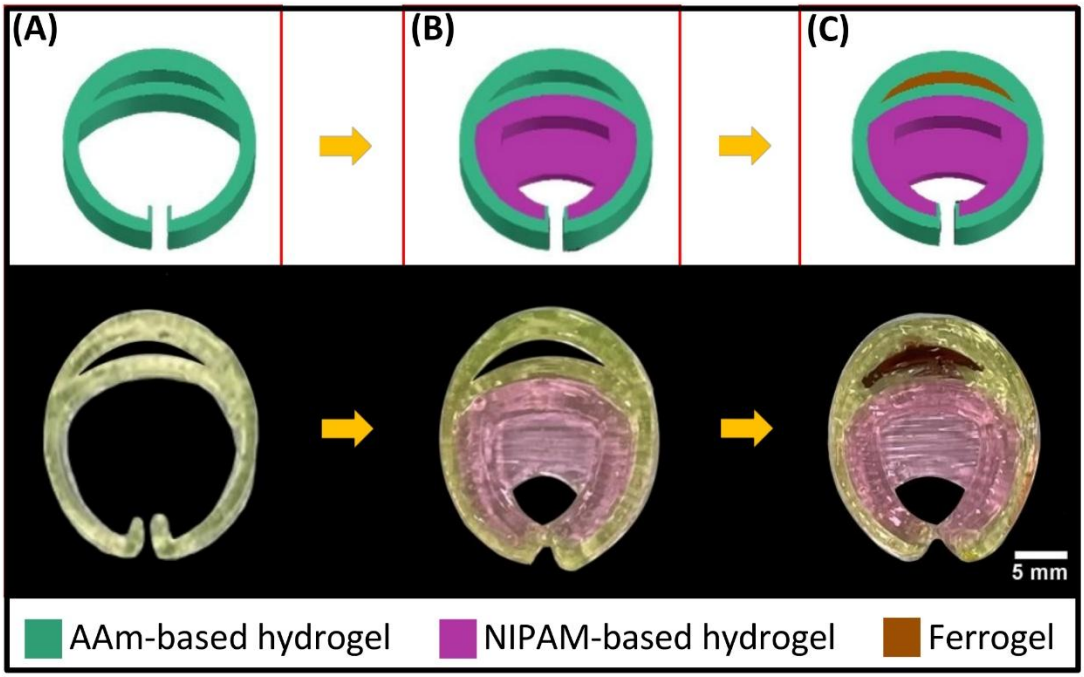
4D-teknologiaa hyödynnettiin parantamaan lääkeannostelulaitteen pysyvyyttä kudoksessa. Tutkimuksessa valmistettiin PVA:sta annostelulaite, jonka tarkoituksena oli mahdollistaa lääkkeiden pitkäaikainen intravesikaalinen annostelu. Tulokset osoittivat, että laite pystyi muuttamaan muotoaan onnistuneesti ja säilytti muotonsa hyvin. Lisäksi tulokset osoittivat, että PVA-pohjaiset annostelulaitteet voivat tarjota lupaavan lähestymistavan virtsarakkosairauksien hoitoon. (Sajjad et al. 2024, Melocchi et al. 2019 mukaan)

6.2 Pehmeä robotiikka

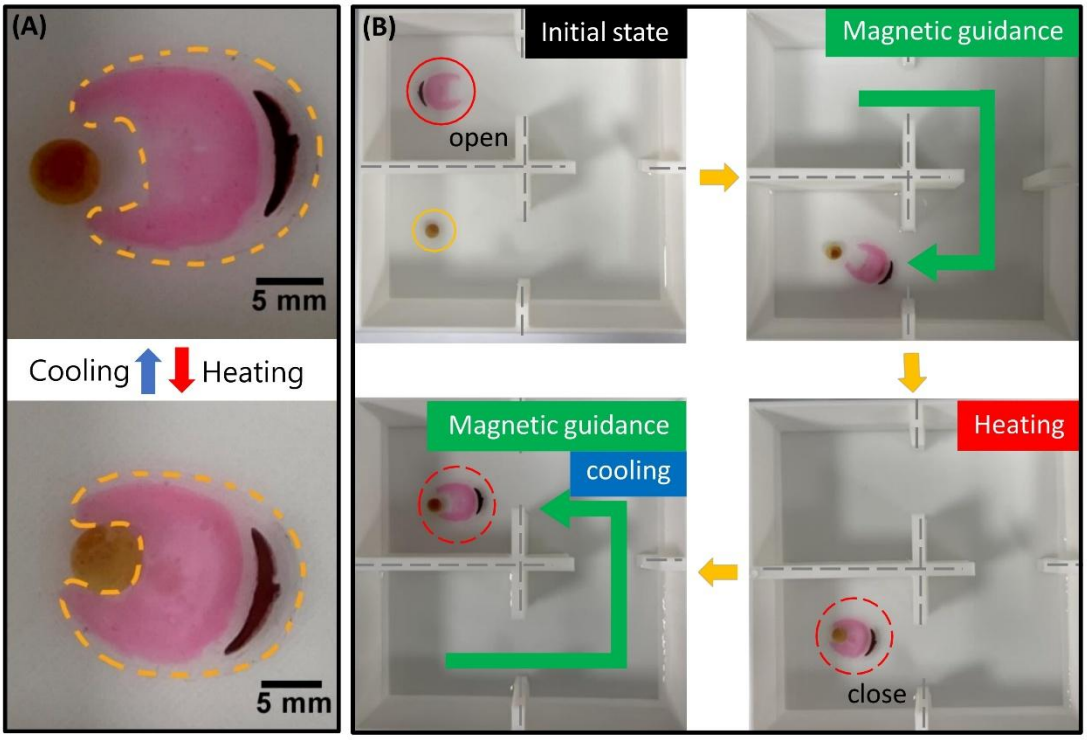
Pehmeä robotiikka on yksi merkittävimmistä 4D-tulostuksen sovelluskohteista. Perinteisessä robotiikassa käytetään erilaisia kovia materiaaleja, kuten metalleja ja muoveja, minkä vuoksi ne eivät kykene suorittamaan tehtäviä, jotka vaativat joustavuutta. Lisäksi perinteiset robotit ovat suunniteltu kestämään vain tietyt olosuhteet. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on tutkittu mahdollisuutta luoda robotteja pehmeistä materiaaleista, jotka pystyvät sopeutumaan ympäristöönsä, ja ovat yhtä joustavia kuin ihmiset. Pehmeä robotiikka voidaan jakaa pehmeisiin toimilaitteisiin (engl. soft actuator), antureihin sekä pehmeisiin säätimiin (engl. soft controller). (Ahmed et al. 2021; Ryan et al. 2021)

Pehmeä robotiikka perustuu pehmeiden älykkäiden materiaalien käyttöön. 4D-tulostuksella voidaan luoda rakenteita, jotka joustavat, reagoivat ympäristöönsä ja muuttavat muotoaan, minkä vuoksi se soveltuu hyvin pehmeän robotiikan valmistusmenetelmäksi. Pehmeän robotiikan avulla voidaan käsitellä esimerkiksi herkkiä esineitä, jotka voisivat vahingoittua perinteisten robottien vuorovaikutuksesta. (Ahmed et al. 2021)

Lee et al. (2023) loivat pehmeän tarttujan kolmesta eri hydrogeelistä. Yksi hydrogeeleistä oli akryyliamidi-pohjainen hydrogeeli, joka ei reagoi ärsykkeisiin. Toinen hydrogeeli oli N-isopropyyliakryyliamidi-pohjainen (NIPAM), joka reagoi lämpöön. Kolmas hydrogeeli oli ferrogeeli, joka on magneettisesti reagoiva hydrogeeli. Kuvassa 4 näkyy tarttujan muoto ja valmistusvaiheet. Tutkimuksessa tarttujaa testattiin yksinkertaisella poiminta- ja sijoitustehtävällä. Tarttujan poimintamekanismi perustui lämmön aiheuttamaan muodonmuutokseen, jossa tarttujan nokat sulkeutuvat. Nokat avautuvat, kun lämpötila laskee. Kuvassa 5 näkyy tarttujan poimintamekanismi, sekä tutkimuksessa suoritettu poiminta- ja sijoitustehtävä.



Kuva 4. *Tarttujan muoto, materiaalit ja valmistusvaiheet* (Lee et al. 2023).



Kuva 5. *Tarttujan toiminta ja tutkimuksessa suoritettu tehtävä* (Lee et al. 2023).

6.3 Elektroniikka

4D-tulostetut rakenteet voivat reagoida moniin ärsykkeisiin, kuten kosteuteen, lämpöön ja valoon, minkä vuoksi ne soveltuvat hyvin elektroniikan, kuten anturien, kehittämiseen. Tämän takia 4D-tulostettuja rakenteita voidaan käyttää myös itse ärsykkeiden havaitsemiseen. Lisäksi 4D-tulostetut rakenteet ovat kevyitä, tarkkoja ja hyvin reagoivia, mikä mahdollistaa entistä kehittyneempien antureiden valmistamisen. (Ahmed et al. 2021)

4D-tulostusta voidaan käyttää myös sähköpiirien luomiseen. Esimerkiksi 4D-tulostuksella on luotu PLA-pohjainen elektroninen kytkin, joka sulkee virtapiirin muuttamalla muotoaan, kun sitä lämmitetään yli sulamispisteen. Kytkin tulostettiin käyttämällä SLA-tulostustekniikkaa. Tämänkaltaisia lämpöön reagoivia kytkimiä voidaan käyttää myös avoimissa sähköpiireissä, jotta oikosulkujen aiheuttamia vaurioita voidaan ehkäistä. (Sondagar et al. 2024, Zarek et al. mukaan)

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä selvitettiin, kuinka voidaan suunnitella ja mallintaa muotoa muuttava kappale ja kuinka muodonmuutos voidaan saada aikaan. Työssä käsiteltiin ärsykkeitä ja materiaaleja, jotka mahdollistavat muodonmuutoksen, lisäksi käsiteltiin 4D-tulostettavan kappaleen suunnittelua ja mallinnusta. Lopuksi tutkittiin, millä aloilla ja millaisiin käyttötarkoituksiin 4D-tulostusta on hyödynnetty.

Työssä käsiteltiin 4D-tulostusta, valmistustekniikkaa, joka mahdollistaa muotoa muuttavien rakenteiden valmistamisen. 4D-tulostus hyödyntää samoja tulostustekniikoita kuin 3D-tulostus, mutta erona näiden välillä on 4D-tulostuksessa käytetyt älykkäät materiaalit ja niiden antama vaste ärsykkeeseen. Muodonmuutos perustuu ärsykkeen aiheuttamaan materiaalin reaktioon, joka laukaisee rakenteen muodonmuutoksen. Ärsykkeitä on monia erilaisia, kuten valo, lämpö ja kosteus. Työssä käsiteltiin erilaisia älykkäitä materiaaleja, kuten hydrogeelejä, muotomuistipolymeerejä ja muistimetalleja. Materiaaleista kartoitettiin niiden toimintaperiaatteita, ärsykkeitä sekä hyötyjä ja haittoja.

4D-tulostuksessa käytettyjen materiaalien lisäksi, myös kappaleen suunnittelu ja mallinnus eroaa 3D-tulostuksesta. Jotta saadaan tuotettua hyödyllinen muotoa muuttava kappale, tulee kappaleen materiaali ohjelmoida niin, että kappaleen muoto muuttuu halutunlaisesti. Työssä huomattiin, että kappaleen materiaalin voi ohjelmoida kolmessa eri vaiheessa: ennen tulostusta, tulostuksen aikana tai tulostuksen jälkeen. Materiaalin ohjelmoinnin pystyy toteuttamaan erilaisin keinoin, kuten sisäisen jännityksen lisäämisen ja materiaalien sijoituksien avulla.

4D-tulostus on suhteellisen uusi tekniikka, jolla on vielä omat haasteensa. Kappaleiden suunnittelu ja mallinnus on vielä hankalaa tarvittavien ohjelmistojen puutteen vuoksi. 3D-tulostukseen käytetyistä materiaaleista, monet ovat sellaisia, joita ei voi käyttää 4D-tulostukseen. 4D-tulostuksen materiaalivalikoima on yhä vähäinen, mikä rajoittaa sen käyttöä esimerkiksi biolääketieteessä (Kumar et al. 2024). Jotta 4D-tulostusta voitaisiin ottaa laajemmin käyttöön, tarvitaan parempia työkaluja sekä enemmän 4D-tulostukseen soveltuvia materiaaleja.

4D-tulostuksen käyttöä on tutkittu jo monissa sovelluskohteissa, kuten elektroniikassa, lääketieteessä ja jopa vaatteissa (Ahmed et al. 2021). Teknologian kehittyminen mahdollistaa 4D-tulostuksen hyödyntämisen uusissa sovelluskohteissa sekä parantaa sen toimivuutta nykyisissä käyttökohteissa. 4D-tulostus voi tarjota uusia ratkaisuja erilaisiin

ongelmiin. Tulevaisuudessa esimerkiksi 4D-tulostettuja rakenteita voidaan käyttää avaruudessa satelliittien osiin (Ahmed et al. 2021). Lisäksi tulevaisuudessa 4D-tulostus voi pienentää tuotteiden kokoa, vähentää pääomatarvetta sekä lyhentää markkinoilletuontiaikaa (Ahmed et al. 2021).

LÄHTEET

Ahmed, A., Arya, S., Gupta, V., Furukawa, H. & Khosla, A. (2021). “4D printing: Fundamentals, materials, applications and challenges,” *Polymer*, 228, p. 123926. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123926.

Bandyopadhyay, A. & Bose, S. (eds.) (2025). *ADDITIVE MANUFACTURING*. BOCA RATON: CRC PRESS. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1201/9781003343868.

Bodaghi, M. & Zolfagharian, A. (eds.) (2022a). *Smart materials in additive manufacturing. Volume 1: 4D printing principles and fabrication*. Amsterdam, Netherlands ; Cambridge, MA, United States: Elsevier (Additive manufacturing materials and technologies series).

Bodaghi, M. & Zolfagharian, A. (eds.) (2022b). *Smart materials in additive manufacturing. Volume 2, 4D printing mechanics, modeling, and advanced engineering applications*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

Jeong, H.Y., An, S.-C. & Jun, Y.C. (2022). “Light activation of 3D-printed structures: from millimeter to sub-micrometer scale,” *Nanophotonics*, 11(3), pp. 461–486. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0652.

Ji, Z., Jiang, P., Guo, R., Hossain, K.R. & Wang, X. (2022). “4D-printed light-responsive structures,” *Smart Materials in Additive Manufacturing, Volume 1 : 4D Printing Principles and Fabrication*. Elsevier, pp. 55–105. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824082-3.00017-9.

Korley, L.T.J. & Ware, T.H. (2021). “Introduction to Special Topic: Programmable liquid crystal elastomers,” *Journal of Applied Physics*, 130(22), p. 220401. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1063/5.0078455.

Kumar, P., Suryavanshi, P., Kumar Dwivedy, S. & Banerjee, S. (2024). “Stimuli-responsive materials for 4D Printing: Mechanical, Manufacturing, and Biomedical Applications,” *Journal of Molecular Liquids*, 410, p. 125553. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125553.

Lee, Y., Choi, J., Choi, Y., Park, S.M. & Yoon, C. (2023). “Four-Dimensional Printing of Stimuli-Responsive Hydrogel-Based Soft Robots,” *Journal of Visualized Experiments*, (191), p. 64870. Available at: https://doi.org/10.3791/64870.

Ma, S., Zhang, Y., Wang, M., Liang, Y., Ren, Le. & Ren, Lu. (2020). “Recent progress in 4D printing of stimuli-responsive polymeric materials,” *Science China Technological Sciences*, 63(4), pp. 532–544. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1007/s11431-019-1443-1.

Mandal, A. & Chatterjee, K. (2023). “Emerging trends in humidity-responsive 4D bioprinting,” *Chemical Engineering Journal*, 455, p. 140550. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140550.

Moheb Afzali, A., Kheradmand, M.A. & Naghib, S.M. (2024). “Bioreactor design-assisted bioprinting of stimuli-responsive materials for tissue engineering and drug delivery applications,” *Bioprinting*, 37, p. e00325. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1016/j.bprint.2023.e00325.

Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q. & Hui, D. (2018). “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Composites Part B: Engineering*, 143, pp. 172–196. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012.

Raviv, D., Zhao, W., McKnelly, C., Papadopoulou, A., Kadambi, A., Shi, B. et al. (2014). “Active Printed Materials for Complex Self-Evolving Deformations,” *Scientific Reports*, 4(1), p. 7422. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1038/srep07422.

Ryan, K.R., Down, M.P. & Banks, C.E. (2021). “Future of additive manufacturing: Overview of 4D and 3D printed smart and advanced materials and their applications,” *Chemical Engineering Journal*, 403, p. 126162. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126162.

Sadraei, A. & Naghib, S.M. (2025) “4D Printing of Physical Stimuli-Responsive Hydrogels for Localized Drug Delivery and Tissue Engineering,” *Polymer Reviews*, 65(1), pp. 104–168. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1080/15583724.2024.2427184.

Sajjad, R., Chauhdary, S.T., Anwar, M.T., Zahid, A., Khosa, A.A., Imran, M. & Sajjad, M.H. (2024). “A review of 4D printing – Technologies, shape shifting, smart polymer based materials, and biomedical applications,” *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 7(1), pp. 20–36. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.08.002.

Shen, B., Erol, O., Fang, L. & Kang, S.H. (2020). “Programming the time into 3D printing: current advances and future directions in 4D printing,” *Multifunctional Materials*, 3(1), p. 012001. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1088/2399-7532/ab54ea.

Sondagar, H.D., Kumar, S. & Sharma, V.S. (2024). “A state-of-the-art review of 4D printing techniques, stimuli activated materials and future perspectives,” *Materials Today: Proceedings*, 113, pp. 345–352. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.01.006.

Thakur, V., Singh, R., Kumar, R., & Gehlot, A. (2023). “4D printing of thermoresponsive materials: a state-of-the-art review and prospective applications,” *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17(5), pp. 2075–2094. Saatavissa (viitattu 7.5.2026): https://doi.org/10.1007/s12008-022-01018-5.