



**TURUN
YLIOPISTO**

3D-tulostuksen hyödyntäminen aurinkokennojen valmistuksessa

Materiaalitekniikan
kandidaatin -tutkielma

Laatija(t):
Tatu Koistinen

19.05.2024
Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu
Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidutkielma

Oppiaine: Materiaalitekniikka

Tekijä(t): Tatu Koistinen

Otsikko: 3D-tulostuksen hyödyntäminen aurinkokennojen valmistuksessa

Ohjaaja(t): Aapo Poskela

Sivumäärä: 22 sivua

Päivämäärä: 19.05.2024

Aurinkoenergian merkityksen kasvaessa aurinkokennojen kehittäminen on edennyt usein eri tavoin. Aurinkokennojen valmistukseen käytetään uusia materiaaleja, kuten perovskiiattia ja titaanioksidia. Materiaalien lisäksi aurinkokennojen valmistustavat ovat kehittyneet, joista viimeisimpiä on lisäävä valmistus eli 3D-tulostus. 3D-tulostuksen edut, kuten materiaalihukan vähentäminen ja valmistuksen joustavuus, mahdollistavat pienillä erillä tehokkaampien aurinkokennojen valmistamisen halvemmalla.

3D-tulostamalla on mahdollista valmistaa aurinkokennojen eri komponentteja, kuten aktiivisia kerroksia ja elektrodeja. Mustesuihkutulostuksen avulla pystytään valmistamaan kolmikationiperovskiihtikerroksia perovskiiattiaurinkokennoihin. Kaksifotonipolymeroinnin avulla pystytään taas tulostamaan titaanioksidi ohutkalvoja, joiden valonsirontaa tuottavat rakenteet parantavat aurinkokennon valovirtaa 25 %: a. Elektrodeja pystytään taas valmistamaan FDM-tulostustekniikalla, joka mahdollistaa monipuolisten elektrodirakenteiden tekemisen. Poikkeavat elektrodirakenteet kasvattavat elektrodipinta-alaa ja näin ollen myös aurinkokennojen tehokkuutta.

Aurinkokennojen 3D-tulostuksella on sekä etuja että haasteita. 3D-tulostamalla pystytään valmistamaan monipuolisia ja kevyempiä rakenteita, jotka mahdollistavat laajemmat käyttömahdollisuudet. Valmistusprosessin helppo muokattavuus mahdollistaa aurinkokennojen kustomoinnin ja tilaustuotannon, jolloin aurinkokennoja voidaan muokata vastaamaan käyttökohteen vaatimuksia. 3D-tulostuksen tulostustarkkuus, valmistuksen skaalattavuus ja aurinkokennojen vakaus kuuluvat taas haasteisiin. Huono pinnanlaatu heikentää aurinkokennojen hyötysuhdetta, ja mahdolliset kiderakenteen muutokset heikentävät tulostettujen aurinkokennojen kestävyyttä.

3D-tulostuksen avulla kehitetään myös uudenlaisia innovaatioita aurinkoenergia-alalle. Tulostamalla valmistettavat valonkeskittäjät ottavat talteen suuremman määrän auringon valoa ja keskittävät sen pienemmälle alueelle. Lisäksi niillä on mahdollista ottaa talteen sironnutta valoa. 3D-tulostetut aurinkokennoppuut varastoivat aurinkoenergian lisäksi myös muita energianlähteitä, kuten tuulesta syntyvää kineettistä energiaa ja ulkotilan lämpötilan lämpöenergiaa. 3D-tulostettujen aurinkokennojen kehittäminen edistyy jatkuvasti, mutta käyttölaajuus on toistaiseksi melko vähäinen.

Avainsanat: 3D-tulostus, aurinkokenno, lisäävä valmistus, aurinkoenergia

Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Aurinkokennojen toimintaperiaate ja rakenne	5
3	Lisäävän valmistuksen eli 3D-tulostuksen perusteet	7
3.1	3D-tulostusteknologian peruseriaatteet	8
3.2	Yleisimmät 3D-tulostusteknologiat	9
4	3D-tulostuksen hyödyntäminen aurinkokennojen valmistuksessa	11
5	3D-tulostuksen edut ja haasteet kappaleiden valmistuksessa	14
5.1	3D-tulostuksen edut aurinkokennojen valmistuksessa	14
5.2	3D-tulostuksen haasteet aurinkokennojen valmistuksessa	16
6	3D-tulostuksen hyödyntäminen uusissa aurinkoenergiainnovaatioissa	17
7	Yhteenveto	20
	Lähteet	21

1 Johdanto

Aurinkoenergia on noussut yhdeksi merkittävimmistä energianlähteistä kestävämmän energiantuotannon yleistyttyä. Jatkuvasti kasvava energiantarve sekä uusiutumattomien energialähteiden korvaaminen vaativat kehittymistä myös aurinkokennoilta, jotta niistä saadaan valmistettua tehokkaampia, kestävämpiä ja pitkäikäisempiä nykyistä edullisemmin. Aurinkokennoteknologia on kehittynyt merkittävästi viime vuosikymmeninä muun muassa uusien valmistusmateriaalien myötä, mutta uusia innovaatioita tarvitaan nykyisten haasteiden ratkaisemiseksi.[1]

Aurinkokennojen valmistusprosessia pyritään kehittämään jatkuvasti tehokkuuden lisäämiseksi ja kustannusten alentamiseksi, mihin 3D-tulostus tarjoaa ainutlaatuisen tavan. 3D-tulostus mahdollistaa monimutkaisten rakenteiden luomisen sekä joustavuutta ja kestävyyttä aurinkokennojen valmistusprosessiin. [2] Se on myös yksi nopeimmin kehittyvistä ja kasvavista valmistustekniikoista maailmassa. 3D-tulostusta hyödynnetään jo monilla muilla aloilla, kuten autoteollisuudessa, lääketieteessä ja elintarvikealalla.[1] Kattava tulostusmateriaalien määrä mahdollistaa 3D-tulostamisen käytön lähes mihin tahansa valmistusprosessiin. Se voi olla tulevaisuudessa avainasemassa myös aurinkokennojen valmistuksessa.

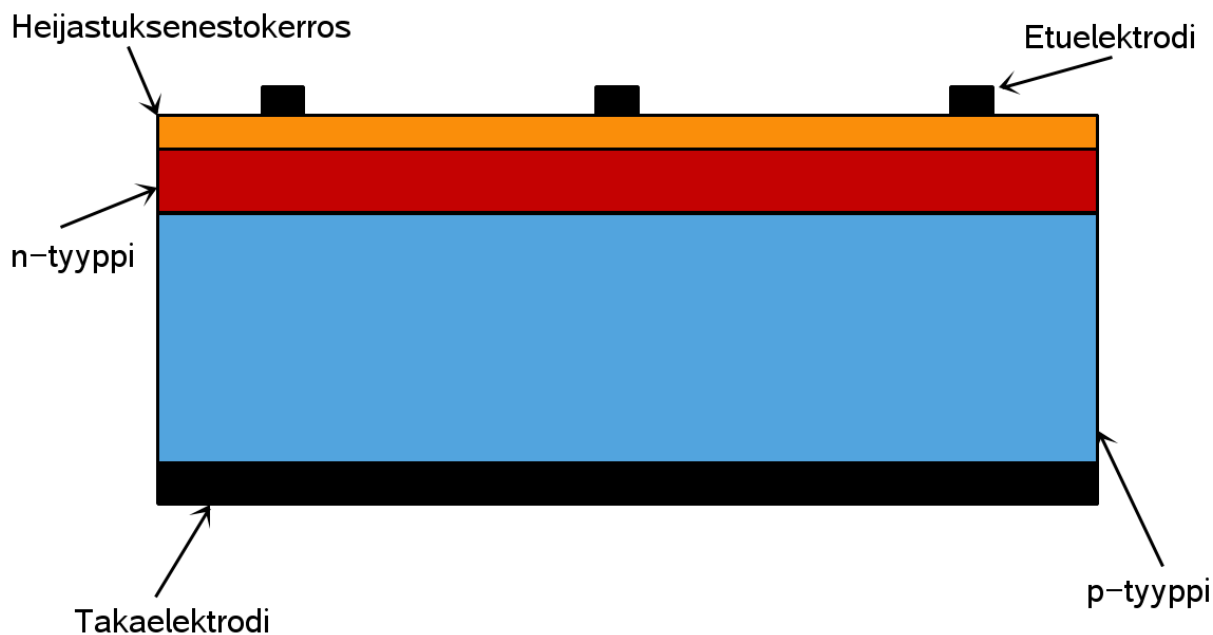
3D-tulostuksen hyödyntäminen kappaleiden valmistamisessa edellyttää investointeja uuden laitteiston hankkimiseen, johon kaikilla yrityksillä ei ole tarvittavia resursseja. Pitkällä aikavälillä ja pienien valmistuserien tekemisessä 3D-tulostus on kuitenkin kannattava investointi, sillä sen muokattavuus on helppoa eikä sen ylläpito vaadi suuria resursseja. Lisäävän valmistuksen takia myös materiaalikustannukset pienenevät, sillä kappaleiden valmistamiseen käytetään ainoastaan tarvittava määrä materiaalia.[2] Tutkielmassa käsitellään 3D-tulostuksen hyödyntämisen mahdollisuuksia aurinkokennojen niin perinteisten kuin uusien innovatiivisten aurinkokennosovellusten valmistuksessa sekä arvioidaan sen etuja ja haasteita perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna.

2 Aurinkokennojen toimintaperiaate ja rakenne

Aurinkokennojen toiminta perustuu auringon säteilyenergian muuttamiseen sähkövirraksi. Säteilyenergia koostuu fotoneista eli pienistä hiukkasista, jotka imeytyvät aurinkokennoissa käytettävään puolijohdemateriaaliin siihen osuessaan. Fotonit irrottavat puolijohteen elektronit atomeistaan, jolloin elektronit pääsevät liikkumaan vapaasti puolijohdemateriaalissa varauksenkuljettajina. Elektronit virittyvät perustilasta aktiiviseen tilaan, jolloin ne voivat liikkua kerrosten läpi. Tämä liike muodostaa sähkövirtaa aurinkokennojen virtajohtimiin, joka voidaan kerätä sähköenergian tuottamiseen. [3, 4]

Aurinkokennojen rakenne muodostuu useammasta erilaisesta kerroksesta, joilla on omat tehtävänsä aurinkokennon toiminnassa. Kerroksia ovat heijastuksenestokerros, kontaktikerrokset, aktiiviset kerrokset ja mahdollinen pohjakerros. Heijastuksenestokerros on aurinkokennojen ylimmäinen kerros, jonka tarkoituksena on minimoida aurinkokennon pinnasta heijastuvan valon määrä. Näin aurinkokennot absorboivat enemmän niihin saapuvaa valoa. Heijastuksenestopinnoitukseen käytetään tyypillisesti piioksidia tai titaanioksidia. Seuraava kerros aurinkokennossa on etukontaktikerros eli aurinkokennon pinnassa olevat elektrodit.[4] Pinnan elektrodit muodostavat ohuen, verkkomaisen rakenteen aurinkokennojen pintaan, jotta valo pystyy absorboitumaan kennoon. Niiden tarkoituksena on johtaa muodostunut sähkövirta pois kennosta, jotta se voidaan kerätä talteen. Aurinkokennon pohjalla on myös toinen levymäinen kontaktikerros, mikä kerää kennon läpi kulkeneet elektronit. Elektrodit valmistetaan johtavuuden takia metalleista, etuelektrodit ovat yleisesti hopeaa ja takaelektrodit alumiinia. [3, 4]

Aktiiviset kerrokset ovat edellä mainittujen kontaktikerrosten välissä, jotka absorboivat kennoon saapuvan valon. Perinteisessä piiaurinkokennossa on kaksi aktiivista kerrosta, n-tyyppin ja p-tyyppin kerrokset, jotka muodostavat pn-liitoksen. P-tyyppin ja n-tyyppin kerrosten liitoskohta muodostaa alueen, missä sähkökenttä kuljettaa elektronit eli negatiiviset varauksenkuljettajat kohti n-tyyppin kerrosta ja elektroniaukot eli positiiviset varauksenkuljettajat kohti p-tyyppin kerrosta. [3] Molemmat kerrokset dopataan eli niihin lisätään pieniä määriä vieraita atomeja sähkönjohtavuuden muuttamiseksi. P-tyyppin kerrokseen lisätään tyypillisesti booria, joka luo siihen ylimäärin aukkoja. N-tyyppin kerrokseen lisätään taas tyypillisesti fosforia, joka luo siihen ylimäärin vapaita elektroneja. Aurinkokennojen aktiivisissa kerroksissa käytetään puolijohdemateriaaleja, kuten piitä ja galliumarsenidia, koska ne absorboivat erityisen hyvin saapuvaa valoa.[4]



Kuva 1. Piiaurinkokennon rakenne. Aurinkokennon pinnassa oleva heijastuksenestokerros minimoi aurinkokennon pinnasta heijastuvan valon. Pinnassa ja pohjassa olevat etu- ja takaelektrodit, jotka keräävät syntyneet elektronit. Elektrodien välissä ovat n- ja p-tyyppin puolijohdeet, jotka muodostavat pn-liitoksen.

Aurinkokennojen valmistus on kehittynyt viimeisten vuosikymmenien aikana niin teknologialtaan kuin valmistustavoiltaan ja -materiaaleiltaan. Niiden teknologinen kehitys luokitellaankin usein neljään eri sukupolveen. Ensimmäisen sukupolven aurinkokennoihin kuuluu yleisimmin aurinkokennoissa käytetty puolijohdemateriaali – yksi- tai monikiteinen pii. Piitä käytetään aurinkokennoissa erityisesti sen hyväksi koettujen ominaisuuksien ja laajan saatavuuden takia, pii on maankuoren toiseksi yleisin alkuaine hapen jälkeen. Piipohjaisten aurinkokennojen tehokkuus säilyy myös pitkään, mikä on monen muun materiaalin kohdalla yksi suurimmista haasteista. Toisen sukupolven aurinkokennoihin kuuluvat ohutkalvoteknologiaa käyttävät aurinkokennot, joiden valmistus on huomattavasti ensimmäisen sukupolven aurinkokennoja edullisempaa. Ensimmäisten aurinkokennojen kehittyissä versioissa hyödynnetään niiden tavoin piitä. Amorfisesta ja mikrokiteisestä piistä valmistetut aurinkokennot valmistetaan kerrostamalla hydrattua amorfista piitä eristekerroksella päällystetylle ohuelle metalliarkille. Piin lisäksi toisen sukupolven aurinkokennomateriaaleihin kuuluvat muun muassa kadmiumtelluridi (CdTe), kadmiumsulfidi (CdS) ja kupari-indium-gallium-selenidi (CIGS), joista valmistetuilla aurinkokennoilla on päästy jopa lähelle perinteisen piiaurinkokennon hyötysuhdetta. [5, 6]

Kolmannen sukupolven aurinkokennoihin kuuluvat esimerkiksi perovskiitti aurinkokennot, väriaineherkistetyt aurinkokennot ja orgaaniset aurinkokennot, joiden tarkoituksena on kasvattaa aurinkokennojen hyötysuhdetta suuremmaksi. Halvemman vaihtoehdoisen puolijohdemateriaalin etsintä toi esille perovskiitin, mikä on Ural-vuoristosta löydetty kalsiumtitanaatista koostuva mineraali. Sen on tutkittu saavuttavan korkeamman tehokkuuden ja edullisemman valmistuksen kuin piipohjaisilla aurinkokennoilla, mutta niiden käyttöönotossa on myös haasteita. Suurimmaksi ongelmaksi perovskiittimateriaaleille on muodostunut niiden lyhyt elinikä, jota pyritään jatkuvasti kasvattamaan suuremmaksi. Väriaineherkistettyjen aurinkokennojen toiminta perustuu sen hybridirakenteeseen ja elektronien johtimena käytettävään, elektrolyyttiin kosketuksissa olevaan titaanioksidikerrokseen. Orgaanisista materiaaleista valmistetut aurinkokennot ovat alhaisten kustannusten ja orgaanisten puolijohdeiden etujen takia hyödyllisiä erilaisissa sovelluksissa, mutta niiden hyötysuhde on huomattavasti piistä valmistettuja aurinkokennoja pienempi. Neljännen sukupolven aurinkokennojen kehityksen ajatellaan olevan käynnissä tällä hetkellä, ja niissä yhdistetään aiempien sukupolvien aurinkokennojen ominaisuuksia hybridiaurinkokennoiksi. [1, 5, 6]

3 Lisäävän valmistuksen eli 3D-tulostuksen perusteet

Lisäävä valmistus (AM) on valmistusmenetelmä, jossa valmistetaan tietokoneavusteisesti kolmiulotteisia kappaleita kerros kerrokselta liittämällä niitä toisiinsa. Siitä käytetään kuitenkin tyypillisesti nimitystä 3D-tulostus. Perinteisistä valmistusmenetelmistä, kuten sorvauksesta ja jyrsinnästä, poiketen 3D-tulostuksessa lisätään materiaalia halutun kappaleen saavuttamiseksi. Tämä mahdollistaa monimutkaisten rakenteiden ja yksilöllisten kappaleiden valmistamisen, joita ei pystytä valmistamaan muilla tekniikoilla. 3D-tulostusmenetelmiä on useita erilaisia, mutta jokaisen niistä ajatellaan muodostuvan neljästä eri vaiheesta: suunnittelusta, viipaloinnista, tulostuksesta ja jälkikäsittelystä.[7]

3.1 3D-tulostusteknologian peruseriaatteet

Tietokoneavusteinen suunnittelu (CAD) on 3D-tulostuksen ensimmäinen vaihe, jossa luodaan digitaalinen malli valmistettavasta kappaleesta. Suunnittelussa käytetään CAD-ohjelmistoa, minkä avulla voidaan valmistaa, muokata tai analysoida mallia erilaisten työkalujen avulla. Näitä työkaluja ovat muun muassa piirto-, mitta- ja muotoilutyökalut. Tulostettavan kappaleen mallin piirtämisen ja muotoilun jälkeen siihen lisätään mahdolliset tukirakenteet mallin geometrian mukaan joko manuaalisesti tai automaattisesti. CAD-ohjelmistoon määritetään myös halutut tulostusparametrit, kuten tulostusnopeus ja kerrospaksuus, mitkä vaikuttavat sekä tulosteen laatuun että tulostukseen tarvittavaan aikaan. Tietokoneavusteisen suunnittelun avulla pystytään kasvattamaan tuottavuutta, parantamaan suunnitelman laatua ja nopeuttamaan suunnitteluprosessia. [8, 9]

Toinen vaihe 3D-tulostuksessa on viipalointi eli suunnitellun 3D-mallin jakaminen ohuiksi, tulostettaviksi kerroksiksi. Suunniteltu 3D-malli muutetaan stereolitografia eli STL-tiedostomuotoon, jossa mallin pinnan geometriat muodostetaan tasokolmioiden avulla. STL-muodossa oleva malli tuodaan viipalointiohjelmaan, mikä jakaa sen ohuiksi kerroksiksi. Ohjelma luo tarkan tiedoston jokaisesta kerroksesta ja niiden kohdista, joihin materiaalia tulee lisätä. Viipaloinnilla on huomattava merkitys kappaleen tulostukseen, sillä tulostettavien kerroksien määrä vaikuttaa negatiivisesti tulostuksen kestoan. Kerrosten paksuuden lisääminen eli tulostettavien kerrosten määrän vähentäminen vaikuttaa taas negatiivisesti tulosteen laatuun. Viipalointi tulee siis optimoida jokaisen kappaleen kohdalla vastaamaan sille asetettuja vaatimuksia. [7]

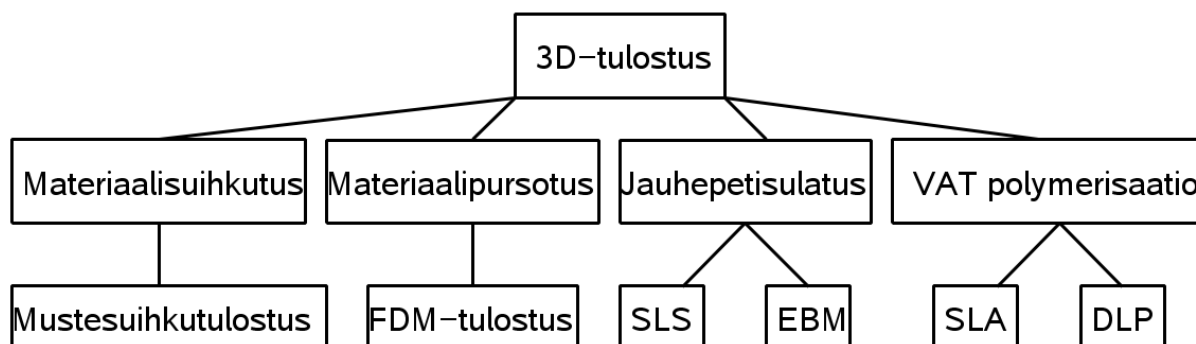
Tulostusvaiheessa suunniteltu CAD-malli muutetaan fyysiseksi kappaleeksi viipaloinnin pohjalta muodostettujen kerrosten mukaisesti. Tulostus aloitetaan kappaleen alimmasta kerroksesta, jonka päälle tulostetaan seuraava kerros suunnitelman mukaisesti. Kerrokset kiinnittyvät toisiinsa tyypillisesti tulostetun kerroksen sulettua kiinni alempaan kerrokseen. Prosessi toistuu niin kauan, kunnes kaikki kerrokset ovat tulostettu ja kappaleesta on muodostunut mallin mukainen. [2] Mahdolliset tukimateriaalit tulostetaan kerroksien mukana, mikäli kerrokset tulostuisivat tyhjän päälle. Tyypillisesti tulostusvaihe kestää muutamista tunneista muutamiin päiviin, johon vaikuttaa sekä tulostettava kappale että käytetty tulostustapa.

Viimeinen vaihe 3D-tulostusprosessia on tulostetun kappaleen mahdollinen jälkikäsittely. Koska tulostetun kappaleen geometriat on joissakin tapauksissa muodostettu tasokolmioiden

avulla, pintaa tai kaarteita ei saada täysin tasaisiksi. Mikäli tulostettu pinnanlaatu ei täytä standardeja, kappaletta voidaan muun muassa hioa tai koneistaa tasaisemmaksi. Muita mahdollisia jälkikäsittelyjä ovat tukien poistaminen, muu pintakäsittely ja kokoaminen. [2] Esimerkiksi kappaleen suuri koko voi edellyttää sen tulostamista pienemmistä osista, joista kappale kootaan halutuksi kokonaisuudeksi. Haluttu ulkonäkö tai tietynlainen käyttöympäristö voivat taas edellyttää kappaleen maalaamista tai pinnoittamista esimerkiksi ruostumisen ehkäisemiseksi. Vaikka jälkikäsittelyllä saadaan paranneltua tulosteiden ominaisuuksia, ne eivät ole välttämättömiä kaikille kappaleille.

3.2 Yleisimmät 3D-tulostusteknologiat

3D-tulostuksen kehityksen myötä on syntynyt useita erilaisia tulostustekniikoita. Niiden erot syntyvät käytettävistä materiaaleista, kerroksien muodostamistavoista ja käyttökohteista. Yleisimpiin 3D-tulostustekniikoihin lukeutuvat muun muassa materiaalisuihkutus, materiaalipursotus, jauhepetisulatus ja VAT fotopolymerisaatio. [2, 7]



Kuva 2. 3D-tulostusteknologiat: materiaalisuihkutus, materiaalipursotus, jauhepetisulatus ja VAT polymerisaatio.

Materiaalisuihkutus (engl. material jetting) on tulostustekniikka, jossa ultraviolettivalo kovettaa valoherkää materiaalista jaettuja pisaroita kerros kerrokselta. Tasaisten kerrosten saavuttamiseksi ylimääräinen materiaali poistetaan jokaisen tulostetun kerroksen jälkeen. Materiaalisuihkutuksella pystytään tulostamaan eri materiaaleja samaan kappaleeseen saman prosessin aikana. [2, 10] Tämä mahdollistaa säätelemään materiaalin ominaisuuksia

paikallisesti kappaleen sisällä. Mahdollisia tulostettavia materiaaleja ovat esimerkiksi polymeerit ja komposiitit.

Yksi materiaalisuihkutustavoista on mustesuihkutulostus (engl. inkjet printing), jonka toiminta on tuttu erityisesti tavallisista kotikäyttöisistä tulostimista. Tekniikkaa on kuitenkin kehitetty niin, että kyseisellä menetelmällä voidaan tulostaa kolmiulotteisia kappaleita. Mustesuihkutulostusta hyödynnetään esimerkiksi erilaisten ohuiden kerroksien ja kalvojen tulostamisessa sekä pinnoittamisessa. [1]

Materiaalipursotus (engl. material extrusion) on tulostustekniikka, jossa sulatettua materiaalia pursotetaan kerroksittain halutun muodon mukaisesti. Tulostuspään läpi pursotetaan korkean lämpötilan takia lähes sulanutta filamenttia kerroksen määritettyjä kohtia pitkin. Kiinteä kappale muodostuu filamentin jäähtyttyä ja jähmetyttyä haluttuun muotoon.

Materiaalipursotus on yksi yleisimmistä 3D-tulostustekniikoista, ja sillä voidaan tulostaa useita eri materiaaleja, kuten metallia, muovia ja betonia.[2]

FDM-tulostus (engl. Fused Deposition Modeling) on kenties tunnetuin 3D-tulostustapa, jota käytetään niin ammatti- kuin harrastelijakäytössä. FDM-tulostuksessa voidaan käyttää filamentin lisäksi myös granulaatteja eli pieniä materiaalirakeita, jotka sulatetaan filamentin tavoin. Niitä käytetään filamenttien sijasta pääsääntöisesti niiden halvemmän hinnan takia. Erityisesti FDM-tulostuksen alhaiset käyttökustannukset ja kustannustehokkuus houkuttelevat sen hyödyntämistä monissa sovelluksissa. Erityisesti polymeereihin keskittyvä tulostustapa onkin yksi nopeimmin kehittyvistä tulostustavoista. [2, 7]

Jauhepetisulatus (engl. powder bed fusion) perustuu materiaalijauheen sulattamiseen yhteen joko laseria tai elektronisädettä hyödyntämällä. Materiaalijauhe levitetään ohueksi kerrokseksi alustan päälle, jonka esimerkiksi laser sulattaa määritetyistä kohdista. Alusta laskeutuu kerrosta vastaavan matkan, jonka päälle levitetään uusi materiaalijauhekerros. Prosessi jatkuu, kunnes suunniteltu kappale on saatu tulostettua, jonka jälkeen ylimääräiset jauheet poistetaan jälkikäsittelyssä esimerkiksi puhaltamalla. Jauhepetisulatustapoja ovat muun muassa selektiivinen lasersintraus ja elektronisuihkusulatus. [11]

Selektiivinen lasersintraus eli SLS (engl. Selective Laser Sintering) hyödyntää lasersädettä materiaalijauheen sulattamisessa, kun taas elektronisuihkusulatus eli EBM (engl. Electron Beam Melting) elektronisuihkua. Molempia tekniikoita voidaan hyödyntää sekä polymeerien että metallien tulostamisessa, mutta korkeamman lämmöntuoton takia

elektronisuihkusulatuksella on laajempi käyttömahdollisuus metalleissa.[7] Korkeat kustannukset kuitenkin rajoittavat tekniikoiden laajaa hyödyntämistä.

VAT polymerisaatio (engl. VAT photopolymerization) on tulostustekniikka, jossa kovetetaan fotopolymeeriä valonlähdettä hyödyntämällä. Nestemäisiin polymeereihin kohdistetaan valoa tiettyyn pisteeseen, jolloin kovettunut materiaali muodostaa viipaloinnin mukaisen kerroksen. Prosessi toistetaan jokaiselle kerrokselle laskemalla alustaa, kunnes kappale on tulostunut kokonaan. Kyseinen tekniikka edellyttää jälkikäsittelyä, jossa ylimääräinen nestemäinen materiaali poistetaan ja kappale jälkikovetetaan. Yleisimpiä VAT fotopolymerisaatiotapoja ovat stereolitografia ja digitaalinen valokäsittely. [2, 7]

Stereolitografia eli SLA (engl. stereolithography) tunnetaan ensimmäisenä 3D-tulostustekniikkana. Tekniikassa käytetään valonlähteenä suuritehoista laseria, sillä jotkin materiaalit vaativat sitä kovettuakseen. [12] Digitaalinen valokäsittely eli DLP (engl. Digital Light Processing) käyttää taas vilkkuvaa valoprojektia polymeerien kovettamiseen, joka mahdollistaa suuremmat valmistuserät. Tämä johtuu valonlähteen kohdistamisesta koko kerrokseen samalla kertaa, kun stereolitografiassa valonlähde seuraa kappaleen poikkileikkauksen radan.[2]

4 3D-tulostuksen hyödyntäminen aurinkokennojen valmistuksessa

Monien muiden sovellusten tavoin myös aurinkokennojen valmistuksessa hyödynnetään nykyään automaatiota ja robotiikkaa, joilla saadaan kasvatettua valmistusprosessin tarkkuutta ja tehokkuutta. Robotiikan ja automaation käyttäminen aurinkokennojen valmistuksen eri vaiheissa on tuonut esille ajatuksen myös 3D-tulostustekniikoiden hyödyntämisestä aurinkokennojen valmistuksessa. 3D-tulostuksella pystytään säästämään sekä aikaa että resursseja jatkuvan tuotannon avulla. 3D-tulostusta voidaan hyödyntää useissa eri aurinkokennojen valmistusvaiheissa, sillä sitä voidaan hyödyntää niin aktiivisten kerrosten kuin elektrodienkin valmistuksessa. Aurinkokennojen aktiivisten kerrosten ja elektrodien lisäksi 3D-tulostusta voidaan hyödyntää muiden aurinkopaneelien osien valmistamisessa, kuten kehysten tulostamisessa.[1]

3D-tulostettavat materiaalit muodostuvat pääsääntöisesti polymeereistä ja metalleista, vaikka monia muitakin materiaaleja on mahdollista tulostaa. Aurinkokennojen kerrokset sisältävät esimerkiksi puolijohdemateriaaleja, metalleja ja polymeerejä, joista suurinta osaa on

mahdollista valmistaa 3D-tulostamalla. Aktiivisten kerrosten valmistuksessa 3D-tulostustekniikoiden hyödyntäminen keskittyy perinteisten kiteisten piiaurinkokennojen sijaan pääsääntöisesti ohutkalvo- ja perovskiiittiaurinkokennoihin sekä väriaineherkistettyihin aurinkokennoihin. Aktiivisten kerrosten 3D-tulostuksesta on muutamia käytännön sovelluksia, mutta käyttöaste ei ole vielä kovin laaja. [1, 3]

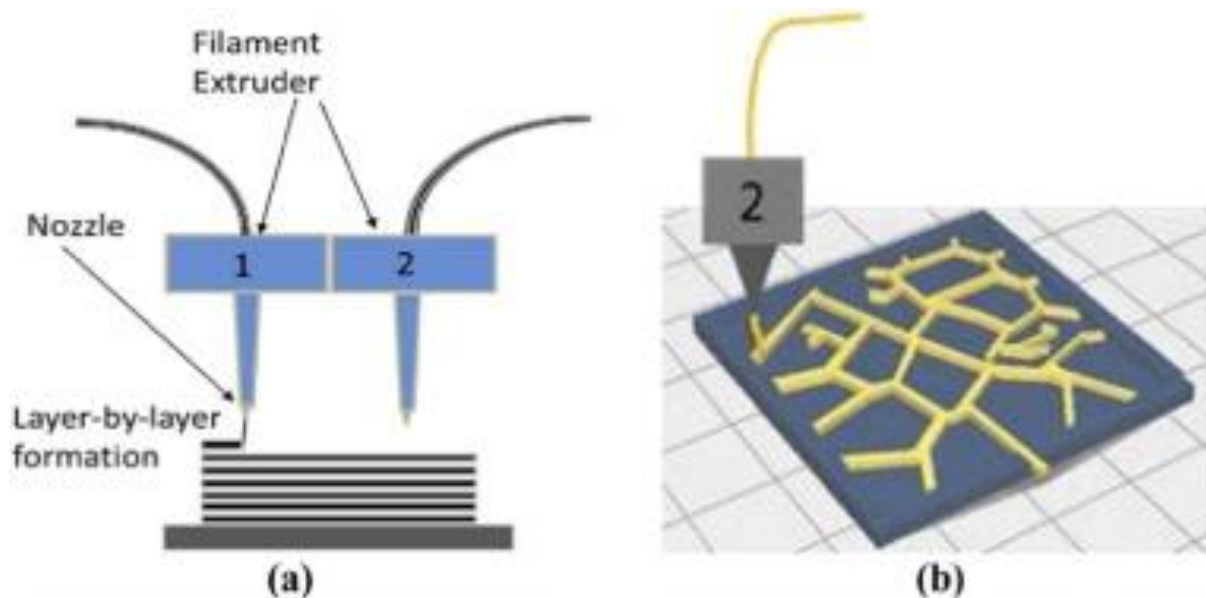
Väriaineherkistettyjen aurinkokennojen valmistamisessa on hyödynnetty kaksifotonipolymerointia, mikä on yksi VAT fotopolymerisaation tulostusmenetelmistä. Kahden fotonin samanaikaiseen absorptioon perustuvaa menetelmää hyödynnetään alle 100 nanometrin resoluution rakenteisiin. Menetelmällä on valmistettu optimoituja titaanioksidi (TiO₂) ohutkalvoja, joihin on toteutettu valonsirontaa tuottavia rakenteita. Kyseisillä rakenteilla saatiin parannettua aurinkokennon valovirtaa 25 %:a tavallisiin ohutkalvoaurinkokennoihin verrattuna. [1, 13]

Aktiivisten kerrosten 3D-tulostusta on hyödynnetty myös perovskiiittiaurinkokennojen valmistamisessa mustesuihkutulostustavalla. Mustesuihkutulostuksella on saatu tulostettua tasaisia kolmikationiperovskiiittikerroksia aurinkokennoihin. Kerrokset muodostuvat komposiittiyhdisteestä, mikä mahdollistaa korkeissa lämpötiloissa ja kosteudessa stabiilien aurinkokennojen valmistamisen. Tulostetut kerrokset johtivat aurinkokennon 12,9 %:in hyötysuhteeseen, joka on muutaman prosenttiyksikön pienempi kuin kaupallisilla aurinkokennoilla. Tulokset kuitenkin osoittavat, että mustesuihkutulostus on toimiva valmistustapa käyttökelpoisten aurinkokennojen valmistamiseen tulevaisuudessa. [1, 13]

3D-tulostusta voidaan hyödyntää aurinkokennojen valmistusprosessissa myös elektrodien valmistamisessa. Aurinkokennojen etuelektrodikerrokset valmistetaan tyyppillisesti painamalla, kun taas takaelektrodikerrokset levitetään aurinkokennojen pohjaan. 3D-tulostus on hyödyllinen valmistustapa erityisesti etuelektrodien valmistamiseen, sillä se voidaan tehdä koskematta aurinkokennojen pintaan. [1, 4]

Aurinkokennoissa olevia hopeaelektrodinauhoja on pystytty tulostamaan pursotustekniikalla aurinkokennojen pinnalle, jolla on saatu optimoitua elektrodinauhojen koko. Kyseistä 3D-tulostustekniikkaa on uskottu pystyvän hyödyntämään myös indiumtinaoksidin (ITO) tulostamisessa, jota käytetään pinnoitteena aurinkokennojen elektrodeille. Sen on väitetty parantavan hyötysuhdetta 1 %:n kaupallisiin piiaurinkokennoihin verrattuna. FDM-tulostustekniikan avulla on pystytty myös valmistamaan perinteisestä suorakulmaisesta elektrodirakenteesta poikkeavia muotoja. CAD-ohjelmistolla suunniteltu kamelian eli erään

aasialaisen kasvin lehtää muistuttavan rakenteen pohjalta toteutettu väriaineherkistetty aurinkokenno paransi laitteen hyötysuhdetta sen korkeamman elektrodipinta-alan takia. [13, 14, 15, 16]



Kuva 3. FDM-tulostustekniikalla aurinkokennon pintaan valmistettu etuelektrodi. Elektrodirakenne muistuttaa japanilaisen kamelia kasvin lehtisuonien järjestystä. [1]

Aktiivisten kerrosten ja elektrodien lisäksi 3D-tulostusta käytetään suunnitteluvaiheessa prototyyppien valmistamiseen. Uusien aurinkokennojen kehittäminen vaatii useita kokeita ja testikappaleiden valmistamista. 3D-tulostus on oivallinen tapa valmistaa erilaisia prototyyppijä, sillä kennojen rakennetta, materiaaleja ja muita tekijöitä voidaan muuttaa helposti parhaimpien parametrien löytämiseksi. Tämä nopeuttaa huomattavasti kehitysprosessia, koska mahdolliset muutokset voidaan tehdä CAD-ohjelmistolla heti mahdollisen ongelman ilmetessä. 3D-tulostamalla pystytään valmistamaan aurinkokennojen lisäksi myös muita aurinkopaneelien osia, kuten kehyksiä ja tukirakenteita. [1]

5 3D-tulostuksen edut ja haasteet kappaleiden valmistuksessa

3D-tulostus on kehittynyt yhdeksi käytetyimmistä valmistustekniikoista, joka johtuu sen tuomista eduista muihin valmistustekniikoihin verrattuna. Monipuolisuus, joustavuus ja hukan vähentäminen ovat haasteita monille perinteisille valmistusmenetelmille, jotka 3D-tulostus päinvastoin ratkaisee. 3D-tulostuksen monipuolisuus tulee esille erityisesti monipuolisten rakenteiden ja materiaalien tulostuksessa. Samalla tulostimella on mahdollista tulostaa eri materiaaleja, joten valmistettavat kappaleet eivät rajoitu ainoastaan yhdenlaisiksi. Lisäksi tulostettavien kappaleiden rakenteita voidaan muuttaa nopeasti uudelleenlaisiksi sekä niistä voidaan tehdä muotoja, jotka eivät ole muilla valmistustekniikoilla mahdollisia.

Materiaalihukkaa saadaan vähennettyä 3D-tulostuksen lisäävällä valmistustavalla, sillä materiaalia ei tarvitse poistaa kappaleesta. Näin tarvittavan materiaalin määrä saadaan optimoitua jokaiselle kappaleelle. Vaikka 3D-tulostus ratkaisee joitakin perinteisten valmistustekniikoiden ongelmia, se ei ole vielä täydellinen valmistustapa. [2]

Hyödyistä huolimatta 3D-tulostuksella on myös haasteita, joita pyritään ratkaisemaan sen kehittämiseksi. Erityisesti tulostusnopeudet, tulostustarkkuudet ja tiettyjen tulostustapojen käytettävien materiaalien rajoitukset ovat esimerkkejä näistä. Kappaleiden hidaskäyttönopeus vaikuttaa suoraan tulostusaikaan, jolloin yksittäisten kappaleiden tulostamiseen voi kulua todella paljon aikaa. Huono tulostustarkkuus voi myös aiheuttaa epätasaisuuksia tulosteiden pintaan, minkä takia kappaleelle täytyy tehdä jälkikäsitteily. Tulostuksessa käytettävät materiaalit rajoittuvat myös tulostustekniikoiden toiminnan mukaan, eikä kaikkia materiaaleja ole mahdollista tulostaa kaikilla tulostustekniikoilla. [1, 7]

5.1 3D-tulostuksen edut aurinkokennojen valmistuksessa

3D-tulostuksen yleiset hyödyt näkyvät myös aurinkokennojen valmistuksessa, sillä se mahdollistaa aurinkokennojen rakenteiden monipuolisemman valmistamisen. Aurinkokennoja pyritään liittämään erilaisiin käyttökohteisiin, kuten rakennuksiin ja kannettavaan elektroniikkaan, jotka edellyttävät aurinkokennoilta hyvin erilaisia rakenteita. Näiden toteuttaminen on kuitenkin 3D-tulostamalla mahdollista, sillä CAD-ohjelmistolla voidaan optimoida kappaleiden geometrioita. 3D-tulostamalla pystytään valmistamaan myös ominaisuuksiltaan samanlaisia, mutta rakenteeltaan kevyempiä kappaleita, tekemällä niistä osittain onttoja. [17] Monipuolisilla geometrisilla rakenteilla voidaan parantaa huomattavasti

energian talteenottoa, ja näin ollen siis myös aurinkokennojen hyötysuhdetta. 3D-tulostettujen aurinkokennojen uskotaan voivan olla jopa 20 prosenttia tehokkaampia kuin tavallisten aurinkokennojen. [1]

Toinen mahdollinen etu 3D-tulostetuissa aurinkokennoissa on erilaisten prototyyppien tulostaminen. Aurinkokennoja kehitetään jatkuvasti parempien hyötysuhteiden saavuttamiseksi, mikä edellyttää useiden erilaisten aurinkokennojen valmistamista ja testaamista. Prototyyppien suunnittelu- ja valmistusprosessia pystytään nopeuttamaan huomattavasti 3D-tulostuksen avulla, sillä tarvittavat muutokset voidaan tehdä muuttamalla CAD-suunnitelmaa tai tulostuslaitteen parametreja. [2] Näin aurinkokennoja pystytään testaamaan käytännössä ennen suurempien valmistuserien aloittamista, ja ilman suuria investointeja perinteisten aurinkokennojen valmistuksessa käytettävien laitteiden muokkaukseen.

Aurinkokennojen 3D-tulostaminen vähentää myös niiden valmistuksesta syntyvää materiaalihukkaa, sillä kennoista ei tarvitse poistaa materiaalia leikkaamalla tai muilla materiaalia poistavilla tavoilla. Materiaalin hävikin vähentäminen alentaa valmistuskustannuksia, sillä tällöin aurinkokennojen valmistamiseen käytetään ainoastaan siihen tarvittava materiaali. Kustannusten alentamisen lisäksi materiaalihukan minimointi on ympäristön kannalta kestävämpää, koska näin valmistuksen ympäristövaikutukset ovat pienemmät kuin perinteisillä valmistustavoilla. [1, 2] Lisäyksen valmistuksen ympäristövaikutukset eivät kuitenkaan ole ainoastaan positiivisia, sillä se kuluttaa usein enemmän energiaa kuin vaihtoehtoiset valmistustavat.

3D-tulostus mahdollistaa prototyyppien valmistamisen lisäksi myös aurinkokennojen kustomoinnin, mikä mahdollistaa niiden valmistamisen tilaustuotantona. Aurinkokennojen valmistus tilaustuotantona laajentaa niiden käyttökohteita, sillä niiden rakenteet voidaan muokata vastaamaan kohteiden vaatimuksia paremmin kuin perinteisten aurinkokennojen. Kustomoinnin mahdollistaa 3D-tulostuksen lähes täysi geometrinen vapaus, jota muut valmistustavat eivät pysty tarjoamaan.[7] Myös geometrioiden helppo muokattavuus CAD-ohjelmiston avulla mahdollistaa kustomoinnin ja tilaustuotannon, eikä se vaadi suuria investointeja valmistusprosessiin.

5.2 3D-tulostuksen haasteet aurinkokennojen valmistuksessa

Hyötyjen lisäksi 3D-tulostuksella on myös omat haasteensa aurinkokennojen valmistuksessa. Yksi aurinkokennojen valmistuksen haasteista on tulostuksen korkeat valmistuskustannukset. Aurinkokennojen valmistukseen käytettävät materiaalit ovat perovskiitin löytämisen jälkeen nykyisin melko edullisia, mutta niiden valmistaminen 3D-tulostamalla ei ole vielä kovin kustannustehokasta. [1] 3D-tulostaminen vaatii paljon aikaa ja energiaa, jotka eivät tee siitä kilpailukykyistä valmistustapaa suurien valmistuserien tekemiseen. Pienemmällä valmistuserillä 3D-tulostaminen voi kuitenkin vähentää kustannuksia, sillä sen käyttö ja muokkaaminen on sekä nopeaa että yksinkertaista.

Materiaalien lisäksi myös tulostustavat ja -tarkkuudet ovat joissakin tapauksissa haasteita aurinkokennojen 3D-tulostamisessa. Esimerkiksi mustesuihkutulostuksella tulostettava liuos voi kiteytyä tulostuksen aikana, ja aiheuttaa huonon pinnanlaadun ja -tasaisuuden valmistetulle aurinkokennolle. [1, 13] Huono pinnanlaatu heikentää aurinkokennon tehokkuutta tai voi jopa estää täysin sen toiminnan. Huonon pinnanlaadun lisäksi 3D-tulostetun aurinkokennon heikko kerrostaminen voi aiheuttaa niihin häviöitä, jotka voivat pahimmassa tapauksessa aiheuttaa oikosulun aurinkokennoon. [18] Pinnanlaatua pystytään parantamaan optimoimalla tulosteen syöttönopeus koko valmistusprosessin ajan.

Aurinkokennojen 3D-tulostuksen haasteisiin kuuluu myös valmistuksen skaalattavuus. 3D-tulostaminen on hyödyllinen valmistuskeino pienien valmistuserien tai erilaisten prototyyppien valmistamiseen, joiden valmistaminen ei ole muilla valmistustavoilla kannattavaa. Suurilla valmistuserillä 3D-tulostaminen ei ole vielä kovin kannattavaa, sillä sen kustannustehokkuus ja tuotantonopeus eivät pysty ainakaan vielä vastaamaan perinteisiä valmistustapoja. [1] Suurien valmistuserien tuotanto vaatisi kalliita investointeja useampien 3D-tulostimien hankkimiseksi, mikä ei ole mahdollista suurelle osalle yrityksistä. Valmistuksen skaalattavuus vaatiikin uusia kehitysinnovaatiota ollakseen taloudellisesti järkevää.

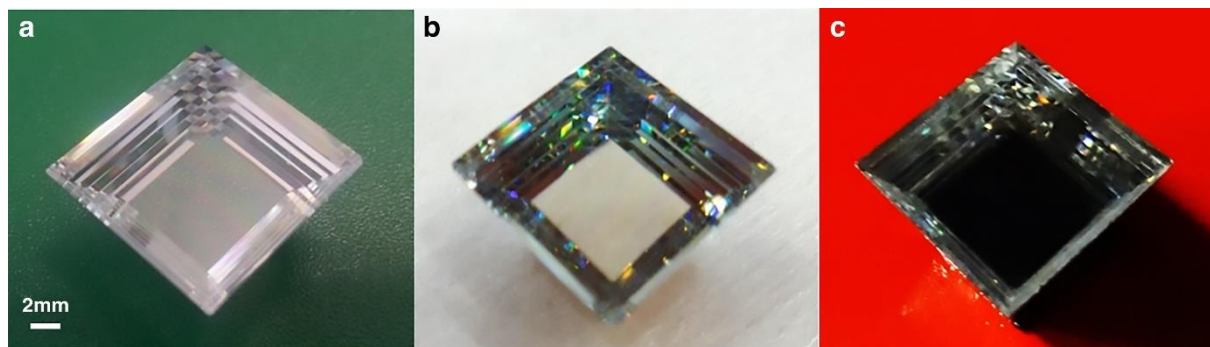
Aurinkokennojen vakaus ja kestävyys ovat yksiä suurimpia haasteita erityisesti perovskiittiaurinkokennojen valmistuksessa, joka on hidastanut niiden yleistymistä aurinkokennomarkkinoilla. Ne ovat ongelmina myös 3D-tulostetuissa aurinkokennoissa, sillä tulostuksen aikana aurinkokennoissa tapahtuvat mahdolliset kiderakenteen muutokset voivat aiheuttaa perovskiittikalvoihin kidevirheitä tai katkeamia. [18] Perovskiittikerrosten vakautta ja kestävyyttä pystytään parantamaan erilaisilla pinnoitteilla, mutta ne eivät suojaa

aurinkokennoja täydellisesti. Kerrosten pinnoittaminen lisää myös valmistuksen kustannuksia. Perovskiittiaurinkokennojen valmistusprosessi vaatii siis suuria kehityksiä, ennen kuin valmistetut aurinkokennot olisivat käyttöikänsä vaadittavalla tasolla.

6 3D-tulostuksen hyödyntäminen uusissa aurinkoenergiainnovaatioissa

3D-tulostuksen hyödyntäminen ei rajoitu ainoastaan perinteisten aurinkokennojen valmistukseen, vaan sen avulla on pystytty valmistamaan myös uusia innovaatioita aurinkoenergia-alalla. 3D-tulostuksen avulla on pystytty esimerkiksi valmistamaan ulkoisia rakenteita aurinkokennojen pintaan sekä tekemään puuta muistuttavia rakenteita. Näillä innovaatioilla pyritään laajentamaan aurinkoenergian käyttömahdollisuuksia täysin uudenvälisin tavoin, joiden perustana on juuri 3D-tulostuksen hyödyntäminen. [17, 18]

Yksi uusista aurinkoenergian innovaatioista on ulkoinen valonkeskittäjä eli AGILE (Axially Graded Index LENS). Valonkeskittäjät ovat lasista ja polymeereistä 3D-tulostamalla kerrostettuja, ylösalaisia pyramideja, jotka valmistetaan aurinkokennon pintaan. Kokoluokaltaan valonkeskittäjät ovat muutamia millimetrejä. Pyramidimainen rakenne mahdollistaa valon heijastumisen niiden pinnasta normaalia pienemmälle alueelle ja normaalia kirkkaampana. Keskitetyn valon kirkkaus on kolminkertainen tulevaan valoon verrattuna, mikä parantaa aurinkokennojen tehokkuutta. Valonkeskittäjiin saapuvasta valosta pystytään ottamaan talteen yli 90 %:a, joka tekee niistä myös huomattavasti tehokkaampia kuin muista aurinkoa seuraavista valonkeskittäjistä. [18]



Kuva 4. Lasista ja polymeereistä 3D-tulostamalla valmistettu AGILE-valonkeskittäjä pystyy ottamaan talteen yli 90 %: saapuvasta valosta ja keskittämään sen 3 kertaa kirkkaampana pienemmälle alueelle. [18]

Valonkeskittäjien muoto mahdollistaa valon talteen ottamisen kaikista tulokulmista [18]. Ne poikkeavat toiminnaltaan jo käytössä olevista, aurinkoa seuraavista aurinkokennoista, sillä AGILE-valonkeskittäjät pystyvät ottamaan valon talteen ilman liikkuvia osia. Tämä yksinkertaistaa sen toimintaperiaatetta, sillä aurinkokennot pysyvät koko ajan samassa asennossa. Aurinkokennoon ei tarvitse myöskään tällöin lisätä ylimääräisiä osia, jotka saattavat vaatia huoltoa. AGILE-valonkeskittäjät mahdollistavat myös sironneen eli suuntaansa esteestä muuttaneen valon ottamisen talteen. Valonkeskittäjät voivat siis absorboida esimerkiksi ilmankehän tai pilvien takia sironnutta valoa, mikä kasvattaa talteen otettavan valon määrää. [18]

Valon keräämisen lisäksi AGILE-valonkeskittäjillä on myös muita hyötyjä aurinkokennoille. AGILE-valonkeskittäjät toimivat auringon keräämisen lisäksi myös aurinkokennojen kapselointina. Ne vähentävät myös aurinkosähkömateriaalien määrää, jolloin pystytään alentamaan valmistuksen kustannuksia ja tekemään kevyitä rakenteita. [18] Olennaisin hyöty AGILE-valonkeskittäjillä on niiden valmistamisen mahdollisuus 3D-tulostamalla.

Toinen innovaatio aurinkoenergia-alalla on 3D-tulostettavat aurinkokennoppuut. VTT:n eli valtion teknologian tutkimuskeskuksen kehittämät aurinkokennoppuut valmistetaan kokonaisuudessaan 3D-tulostamalla. Puun lehdet valmistetaan 3D-tulostustekniikalla, ja jotka toimivat aurinkokennoina. Tämän lisäksi kaikkiin lehtiin lisätään myös muuntajat. Aurinkokennojen elektrodit kuvioidaan muistuttamaan kasvien lehtisuonia. Myös aurinkokennoppuun runko valmistetaan massatuotantona 3D-tulostamalla. Tulostuksessa käytetään puupohjaisia biomateriaaleja, joiden avulla valmistettu laite muistuttaa läheisesti puuta. [17]



Kuva 5. VTT:n 3D-tulostamalla valmistettu aurinkokennopuu, jonka lehdet toimivat valoa absorboivina aurinkokennoina. Lehtien lisäksi myös puun runko on 3D-tulostettu puupohjaisista biomateriaaleista. Muokattu kuvasta. [17]

Aurinkokennopuu on toiminnaltaan monilähteinen energianvarastoija. Se pystyy ottamaan aurinkoenergian lisäksi talteen myös muita energialähteitä, kuten esimerkiksi tuulesta syntyvää kineettistä energiaa sekä ulkotilan lämpötilan lämpöenergiaa. Aurinkokennopuu kerää energiaa lehtiinsä, joten puussa olevien aurinkokennolehtien määrää kasvattamalla saadaan otettua enemmän energiaa talteen. Tällä hetkellä yksittäiseen aurinkokennopuuhun varastoidulla energialla pystytään tuottamaan tarpeeksi virtaa pienten sähkölaitteiden, kuten puhelinten, lataamiseen. Puiden määrää kasvattamalla pystytään tulevaisuudessa todennäköisesti tuottamaan siis huomattavasti enemmän energiaa. [17]

7 Yhteenveto

Aurinkokennoja pyritään kehittämään tehokkaammiksi ja kestävämmiksi 3D-tulostusta hyödyntämällä. 3D-tulostustekniikoiden monipuolisuus ja helppo muokattavuus tekevät aurinkokennojen valmistamisesta joustavaa sekä mahdollistavat niiden kustomoinnin. Niiden avulla pystytään myös helposti tekemään prototyyppejä aurinkokennoista, joka on tärkeää kehitystyössä. [1]

3D-tulostusta käytetään useissa eri aurinkokennojen valmistusvaiheissa, joihin kuuluvat niin aktiivisten kerrosten kuin elektrodinauhojen tulostaminen monipuolisten tulostustekniikoiden avulla. [16] Perinteisten aurinkokennojen osien lisäksi 3D-tulostuksen avulla kehitetään uudenlaisia innovaatioita, kuten valokeskittäjiä ja aurinkokennopuita, joilla aurinkokennojen käyttömahdollisuuksia saadaan laajennettua. [17, 18] Näillä innovaatioilla saadaan myös tutkitusti parannettua aurinkokennojen vastaanottaman valon määrää, ja näin ollen myös niiden hyötysuhdetta.

3D-tulostettujen aurinkokennojen valmistukseen kuuluu sekä etuja että haasteita. Lisäävän valmistuksen avulla aurinkokennojen valmistuksen materiaalia hävikkiä saadaan vähennettyä ja niille pystytään tekemään poikkeavia geometrisiä rakenteita kevyemmän massan saavuttamiseksi. [2, 17] Heikko kustannustehokkuus ja skaalattavuuden vaikeus kuitenkin rajoittavat niiden käytön ainakin toistaiseksi pääsääntöisesti tutkimus- ja kehityskäyttöön. Tulevaisuudessa 3D-tulostetut aurinkokennot voivat kuitenkin olla laajemmin käytössä, kun niiden valmistus saadaan kannattavammaksi.

Lähteet

- [1] B.R. Hunde, A.D. Woldeyohannes, 3D printing and solar cell fabrication methods: A review of challenges, opportunities, and future prospects, *Results in Optics*, vol. 11, 100385, (2023), doi: 10.1016/j.rio.2023.100385
- [2] N. Shahrubudin, T.C. Lee, R. Ramlan, An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications, *Procedia Manufacturing*, vol. 35, s. 1286-1296, (2019), doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.089
- [3] A.S. Al-Ezzi, M.N.M. Ansari, Photovoltaic Solar Cells: A Review, *Appl. Syst. Innov.*, (2022), doi: 10.3390/asi5040067
- [4] S.J. Fonash, R.T. Fonash, S. Ashok, Solar Cell, *Britannica.com/technology/solar-cell*, muokattu 2024
- [5] A.M. Bagher, M.M.A. Vahid, M. Mohsen, Types of Solar Cells and Application, *American Journal of Optics and Photonics*, (2015), s. 94-113, doi: 10.11648/j.ajop.20150305.17
- [6] J. Pastuszak, P. Wegierek, Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development, *Materials*, (2022), doi: 10.3390/ma15165542
- [7] A. Jandyal, I. Chaturvedi, I. Wazir, A. Raina, M.I. Ul Haq, 3D printing – A review of processes, materials, and applications in industry 4.0, *Sustainable Operations and Computers*, vol. 3, s. 33-42, (2021), doi: 10.1016/j.susoc.2021.09.004
- [8] K. Lalit Narayan, K. Mallikarjuna Rao, M.M.M. Sarcar, *Computer Aided Design and Manufacturing*, Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi, (2008), s. 3-19
- [9] S. Deokar, A. Pathak, R. Warghane, *Computer Aided Design and Manufacturing*, *JETIR*, vol. 6, (2019)
- [10] Y.U. Tee, P. Tran, M. Leary, P. Pille, M. Brandt, 3D Printing of polymer composites with material jetting: Mechanical and fractographic analysis, *Additive Manufacturing*, vol. 36, 101558, (2020), doi: 10.1016/j.addma.2020.101558
- [11] D. D. Singh, T. Mahender, A. R. Reddy, Powder bed fusion process: A brief review, *Materialstoday: Proceedings*, vol. 46, (2021), s.350-355, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.415
- [12] J. Huang, Q. Qin, J. Wang, A Review of Stereolithography: Processes and Systems, *Processes*, (2020), doi: 10.3390/pr8091138
- [13] A. Tarancón, V. Esposito, *3D Printing for Energy Applications*, John Wiley & Sons, (2021), s. 249-272

- [14] M.N. Nagagouda, M. Ginn, V. Rastogi, A review of 3D printing techniques for environmental applications, *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 28, (2020), s. 173-178, doi: 10.1016/j.coche.2020.08.002
- [15] J. Sagil, C. Rinkesh, Study on Nature-inspired Fractal Design-based Flexible Counter Electrodes for Dye-Sensitized Solar Cells Fabricated using Additive Manufacturing, *Scientific Reports*, vol. 8, (2018)
- [16] Y. Jiang, Y. Chen, M. Zhang, Y. Qiu, Y. Lin, F. Pan, 3D-printing Ag-line of front-electrodes with optimized size and interface to enhance performance of Si solar cells, *RSC Adv.*, vol. 6, (2016), doi: 10.1039/c6ra08985b
- [17] A. El-Shahat, 3D printing Makes Solar Power Less Expensive, Gives Wider Range, *Natural Gas & Electricity*, vol. 33, (2017), s. 20-24, doi: 10.1002/gas.21962
- [18] N. Vaidya, O. Solgaard, Immersion graded index optics: theory, design, and prototypes, *Microsystems & Nanoengineering*, vol. 8, (2022)