



Elias Lainonen

Aurinkokennojen toimintaperiaate ja kennotyyppien tarkastelu perovskiiattiaurinkokennoihin painottuen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

15.9.2025

Tiivistelmä

Tekijä:	Elias Lainonen
Otsikko:	Aurinkokennojen toimintaperiaate ja kennotyyppien tarkastelu perovskiittiaurinkokennoihin painottuen
Sivumäärä:	26 sivua
Aika:	15.9.2025
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine:	Energiantuotantomenetelmät
Ohjaaja:	Lehtori Kari Salmi

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella perovskiittiaurinkokennojen ominaisuuksia, toimintaperiaatetta ja kehityssuuntia kirjallisuustutkimuksen muodossa. Työn tarkoituksena oli selvittää, miksi perovskiittimateriaalit ovat nousseet aurinkosähkön tutkimuksessa merkittävään asemaan ja millaisia mahdollisuuksia ne tarjoavat tulevaisuuden energiantuotannossa. Työ on osa energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelmaa, ja sitä voidaan hyödyntää opetuksessa antamalla ajankohtainen kokonaiskuva nopeasti kehittyvästä aurinkokennoteknologiasta.

Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena käyttäen tuoreimpia tieteellisiä julkaisuja, opinnäytetöitä ja alan artikkeleita. Työssä käsiteltiin perovskiittiaurinkokennojen rakenteita, käytettyjä materiaaleja, toimintaperiaatteita sekä erilaisia perovskiittityyppejä, kuten yksinkertaiset ja tandemrakenteet. Lisäksi analysoitiin näiden teknologioiden etuja ja haasteita sekä valmistuksen, kestävyuden ja ympäristövaikutusten näkökulmia.

Työn merkitys on siinä, että se kokoaa yhteen keskeisimmän tiedon perovskiittiaurinkokennoista ja tarjoaa opetukseen sekä jatkotutkimukseen perustan, jonka avulla voidaan arvioida teknologian todellista potentiaalia suhteessa muihin aurinkokennotyyppeihin. Tulosten perusteella voidaan todeta, että perovskiittitekniikka tarjoaa lupaavia näkymiä aurinkosähkölaitteiden kehityksessä, mutta sen rooli riippuu siitä, kuinka hyvin kestävyteen ja turvallisuuteen liittyvät haasteet kyetään ratkaisemaan.

Avainsanat: perovskiittiaurinkokennot, aurinkoenergia, tandemkennot, hyötysuhde, stabiilius, valmistusmenetelmät, ympäristövaikutukset

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Elias Lainonen
Title: Operating Principles of Solar Cells and Review of Cell Types with Emphasis on Perovskite Solar Cells
Number of Pages: 26 pages
Date: 15 September 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Energy and Environmental Technology
Professional Major: Energy production methods
Supervisor: Kari Salmi, Senior Lecturer

The aim of this thesis was to examine the properties, operating principles, and development trends of perovskite solar cells through a literature review. The purpose of the study was to clarify why perovskite materials have gained a significant role in solar energy research and what opportunities they may provide for future energy production. The thesis was commissioned by the Degree Program in Energy and Environmental Engineering and can be utilized in teaching by providing an up-to-date overview of rapidly developing photovoltaic technology.

The research was carried out as a literature review using recent scientific publications, theses, and articles in the field. The thesis addresses the structures, materials, and operating principles of perovskite solar cells as well as different device types, such as single-junction and tandem structures. Furthermore, the advantages and challenges of these technologies were analyzed, including aspects of manufacturing, stability, and environmental impacts.

The significance of the thesis lies in compiling key knowledge on perovskite solar cells and providing a foundation for teaching and further research. This makes it possible to evaluate the actual potential of technology in comparison with other types of solar cells. On the basis of the findings, perovskite technology shows promising prospects for the development of photovoltaic systems, but its role will depend on how effectively the challenges related to durability and safety can be resolved.

Keywords: perovskite solar cells, solar energy, tandem cells, efficiency, stability, fabrication methods, environmental impacts

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Aurinkokennojen toimintaperiaate	2
2.1	Valosähköinen ilmiö	4
2.2	Aurinkoenergian fysikaaliset ilmiöt ja energiakaavat	5
2.3	Kennon hyötysuhde ja energiantuotto	6
3	Aurinkokennotyyppien vertailu	8
3.1	Piipohjaiset kennot	8
3.2	Ohutkalvokennot	9
3.3	Orgaaniset aurinkokennot	9
3.4	Sovelluskohteet ja markkinatilanne	10
4	Perovskiiittiaurinkokennot	11
4.1	Toimintaperiaate	12
4.2	Rakenne ja materiaalit	14
4.3	Eri perovskiiittityypit	16
4.4	Kehitysvaihe ja tutkimustilanne	18
5	Aurinkokennotyyppien vertailu ja arviointi	20
5.1	Perovskiiittien edut ja haasteet	20
5.2	Kestävyys, valmistus ja ympäristövaikutukset	21
5.3	Tulevaisuuden näkymät ja kehityssuunnat	22
6	Yhteenveto	24
	Lähteet	26

Lyhenteet

- BIPV: Building Integrated Photovoltaics. Rakennuksiin integroidut aurinkosähköjärjestelmät.
- CsPbI₃: Cesium Lead Iodide. Epäorgaaninen perovskiitti, jolla parannetaan kennon stabiilius.
- EQE: External Quantum Efficiency. Ulkoinen kvanttihyötysuhde, kuvaa kuinka monta fotonia muunnetaan elektroneiksi.
- ETM: Electron Transport Material. Elektronien kuljetusmateriaali, joka siirtää negatiivisia varauksia aurinkokennossa.
- FAPbI₃: Formamidinium Lead Iodide. Toinen yleisesti käytetty perovskiittimateriaali.
- FF: Fill Factor. Kennon hyötysuhteen osa, joka kuvaa MPP:n ja Voc–Jsc-suhteen tehokkuutta.
- FTO: Fluorine-doped Tin Oxide. Fluorilla seostettu tinaoksidi, käytetty myös läpinäkyvänä johteena.
- HTM: Hole Transport Material. Aukkojen kuljetusmateriaali, joka siirtää positiivisia varauksia aurinkokennossa.
- IPCE: Incident Photon-to-Current Efficiency. Samanlainen suure kuin EQE, ilmoittaa fotonien muuntumisen sähköksi.
- ITO: Indium Tin Oxide. Indium-tinaoksidi, yleinen läpinäkyvä johde aurinkokennoissa.

- Jsc: Short Circuit Current Density. Oikosulkuvirran tiheys, kennon tuottama virta oikosulkutilanteessa.
- MAPbI₃: Methylammonium Lead Iodide. Yksi tutkituimmista perovskiittimateriaaleista, joka sisältää lyijyä ja jodia.
- MPP: Maximum Power Point. Kennon toimintapiste, jossa saadaan ulos suurin mahdollinen teho.
- PCE: Power Conversion Efficiency. Tehollinen hyötysuhde, aurinkokennon suorituskyvyn tärkein mittari.
- PSC: Perovskite Solar Cell. Perovskiittiaurinkokenno.
- PV: Photovoltaic. Aurinkosähköjärjestelmät, joissa valo muutetaan sähköksi aurinkokennojen avulla.
- Tandem: Aurinkokenno, jossa yhdistetään useampi valoa absorboiva kerros (esim. perovskiitti + pii).
- TCO: Transparent Conductive Oxide. Läpinäkyvä johtava oksidi, jota käytetään kennon etuelektrodina (esim. ITO, FTO).
- Voc: Open Circuit Voltage. Avoimen piirin jännite, kennon maksimijännite ilman kuormaa.

1 Johdanto

Aurinkoenergia on viime vuosikymmeninä noussut yhdeksi merkittävimmistä uusiutuvan energian lähteistä. Sen etuina ovat rajaton saatavuus, ympäristöystävällisyys ja mahdollisuus hajautettuun energiantuotantoon. Perinteiset piipohjaiset aurinkokennot ovat hallinneet markkinoita pitkään, mutta niiden valmistusprosessit ovat energiaintensiivisiä ja materiaalikustannukset suhteellisen korkeat. Tämä on lisännyt kiinnostusta uusiin aurinkokennoteknologioihin, jotka voisivat tarjota paremman kustannustehokkuuden, yksinkertaisemman valmistuksen ja korkeamman hyötysuhteen.

Perovskiittiaurinkokennot (perovskite solar cells, PSC) ovat yksi lupaavimmista uusista teknologioista. Ne perustuvat perovskiittirakenteisiin materiaaleihin, jotka pystyvät tehokkaasti absorboimaan auringonvaloa ja muuntamaan sen sähköenergiaksi. Ensimmäiset tutkimukset perovskiittien käytöstä aurinkokennoissa tehtiin 2000-luvun alussa, ja jo vuodesta 2009 lähtien niiden hyötysuhteet ovat nousseet vain muutamasta prosentista yli 26 %:iin laboratoriotesteissä. Tämä nopea kehitys on ollut huomattavasti nopeampaa kuin monissa muissa aurinkokennoteknologioissa.

Perovskiittiaurinkokennojen kiinnostavuutta lisää myös niiden monipuolisuus. Niitä voidaan valmistaa kevyille ja joustaville alustoille, jolloin sovelluskohteet eivät rajoitu pelkästään perinteisiin aurinkopaneeleihin. Valmistusmenetelmät, kuten liuos pohjaiset pinnoitustekniikat (solution processing), mahdollistavat potentiaalisesti kustannustehokkaan massatuotannon. Näiden etujen ansiosta perovskiittiaurinkokennot ovat nousseet yhdeksi aurinkoenergiatutkimuksen keskeisistä painopisteistä.

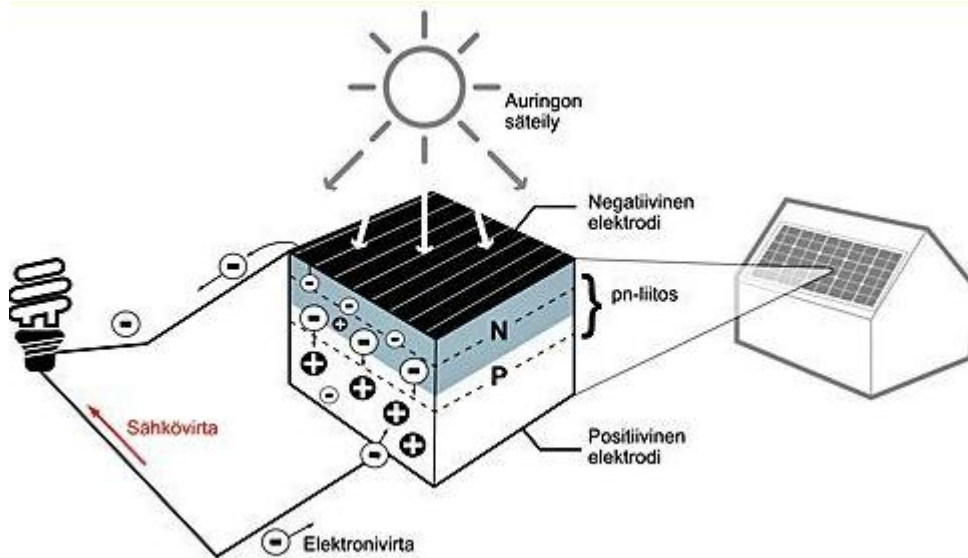
Tässä työssä tarkastellaan perovskiittiaurinkokennojen rakennetta, toimintaperiaatetta, eri perovskiittityyppejä sekä niiden kehitysvaiheita ja tutkimustilannetta. Arvioidaan kestävyteen, valmistukseen ja ympäristövaikutuksiin liittyviä haasteita sekä pohditaan tulevaisuuden näkymiä ja kehityssuuntia. Tavoitteena on muodostaa kokonaiskuva perovskiittiaurinkokennojen nykytilasta ja niiden potentiaalista osana tulevaisuuden energiantuotantoa.

Tekoälyä on hyödynnetty opinnäytetyön suunnittelussa, rakenteen jäsentelyssä ja kieliasun tarkistuksessa. Työssä on käytetty OpenAI:n ChatGPT-versiota 3.5. Opinnäytetyön tekijä on vastuussa kaikesta opinnäytetyön sisällöstä ja muotoilusta.

2 Aurinkokennojen toimintaperiaate

Aurinkokennon (solar cell) toiminta perustuu auringon säteilyn muuntamiseen sähköenergiaksi valosähköisen ilmiön (photovoltaic effect) avulla. Kun auringon valo osuu puolijohdemateriaaliin, fotonit voivat virittää elektroneja johtavuusvyöhykkeelle, jolloin materiaaliin syntyy varauksenkuljettajia: elektroneja ja aukkoja. Näiden liikkeen ohjaaminen sähkökentän avulla mahdollistaa sähkövirran tuottamisen ulkoiseen piiriin. [1, s. 2–3; 2, s. 16–18.]

Aurinkokennon ydinosaa muodostuu valoa absorboivasta puolijohdeesta, jonka sisällä on p-n-liitos. Siinä p-tyyppin (positiivinen) ja n-tyyppin (negatiivinen) puolijohdeet kohtaavat, ja rajapintaan syntyy sisäinen sähkökenttä. Tämä kenttä erottaa syntyneet elektronit ja aukot toisistaan: elektronit ohjautuvat n-tyyppin puolelle ja aukot p-tyyppin puolelle. Kun kennon elektrodeihin liitetään ulkoinen kuorma, syntynyt jännite ja varauksenkuljettajien liike alkaa tuottaa sähkövirtaa (kuva 1). [3, s. 19–20.]



Kuva 1. p-n-liitos.[4]

Aurinkokennon toiminta voidaan jakaa kolmeen päävaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa tapahtuu valon absorptio, kun fotonit imeytyvät puolijohdemateriaaliin ja virittävät elektroneja korkeammalle energiatasolle. Tämän jälkeen varauksenkuljettajien erotus toteutuu p–n-liitoksen sisäisen sähkökentän vaikutuksesta, joka ohjaa elektronit ja aukot liikkumaan vastakkaisiin suuntiin. Lopuksi seuraa varauksien keräys, jossa elektronit ja aukot johdetaan elektrodien kautta ulkoiseen piiriin, mikä mahdollistaa sähkövirran muodostumisen ja energian hyödyntämisen.

Aurinkokennon toimintaa voidaan kuvata sähköisenä virtapiirinä, jossa valon absorptio toimii virtalähteenä ja puolijohdemateriaalin sisäiset ominaisuudet määrittävät jännitteen, virran ja hyötysuhteen [1, s. 3–4]. Käytännössä toiminta riippuu monista tekijöistä, kuten absorboivan kerroksen paksuudesta, kaistavälisestä (bandgap) ja varauksenkuljettajien eliniästä.

Aurinkokennon toimintaperiaate on yhteinen kaikille aurinkokennotyypeille, mutta eri teknologiat, kuten piipohjaiset, ohutkalvo- ja perovskiittikennot eroavat toisistaan erityisesti käytettyjen materiaalien, valmistustapojen ja hyötysuhteen osalta. Näiden erojen tarkastelu antaa pohjan ymmärtää myös perovskiittikennojen ominaisuuksia ja niiden tuomia etuja. [3, s. 19–20.]

2.1 Valosähköinen ilmiö

Aurinkokennon toiminnan perusta on valosähköinen ilmiö (photovoltaic effect), jossa valo saa aikaan sähköisen jännitteen ja virran materiaalissa. Ilmiö havaittiin ensimmäisen kerran jo 1800-luvulla metallipinnoilla, mutta sen merkitys aurinkokennojen kannalta ymmärrettiin vasta myöhemmin, kun tutkimus siirtyi puolijohteisiin ja puolijohdeteknologian kehitys mahdollisti käytännön sovellukset. [1, s. 4–5.]

Valosähköinen ilmiö syntyy, kun fotonit osuvat puolijohdemateriaaliin ja sen energia ylittää materiaalin kaistavälin. Tällöin elektroni siirtyy valenssivyöhykkeeltä johtavuusvyöhykkeelle, jättäen jälkeensä aukon (positiivinen varauksenkuljettaja). Näin muodostuu elektroni–aukko-pari. Aurinkokennon rakenteessa p-n-liitoksen sähkökenttä erottaa nämä varauksenkuljettajat: elektronit ohjautuvat n-typin puolelle ja aukot p-typin puolelle. Tämä varauksenkuljettajien suuntautunut liike synnyttää jännitteen, ja kun ulkoinen kuorma kytketään, sähkövirta alkaa kierrä. [2, s. 27–30; 3, s. 20–21.]

Valosähköisen ilmiön tehokkuuteen vaikuttavat monet tekijät, kuten materiaalin kaistaväli, fotonien energia sekä varauksenkuljettajien elinikä ja liikkuvuus. Mikäli fotonin energia on pienempi kuin materiaalin kaistaväli, se ei irrottaa elektronia ja jää hyödyntämättä. Toisaalta, jos energia on huomattavasti suurempi, ylimääräinen energia häviää lämmöksi, mikä rajoittaa hyötysuhdetta. [1, s. 5.]

Tämä ilmiö on universaali kaikille aurinkokennotyypeille, mutta käytetty materiaali määrää sen, millä aallonpituuksilla valoa voidaan tehokkaasti hyödyntää ja kuinka suuri jännite kennosta voidaan saada ulos. Siksi aurinkokennoteknologioiden kehitys keskittyy pitkälti sopivien materiaalien ja rakenteiden etsimiseen, jotka optimoivat valosähköisen ilmiön hyödyntämisen. [3, s. 21.]

2.2 Aurinkoenergian fysikaaliset ilmiöt ja energiakaavat

Aurinkokennon sähköistä toimintaa voidaan kuvata fysiikan perusilmiöiden ja matemaattisten mallien avulla. Aurinkokennoa valaistaessa fotonit absorboituvat puolijohteeseen ja synnyttävät varauksenkuljettajia, joiden liike vaikuttaa kennon jännite- ja virtakäyttäytymiseen. Näiden prosessien ymmärtäminen on keskeistä hyötysuhteen arvioimiseksi. [1, s. 8–9.]

Aurinkokennon toimintaa havainnollistaa virta–jännitekäyrä (I–V-käyrä). Ilman valoa kenno toimii diodin tavoin, ja sen läpi kulkee vain pieni vuotovirta. Kun kennoon kohdistuu säteilyä, syntyy fotovirta, joka voidaan kuvata yhtälöllä 1:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (1)$$

I on kennon kokonaisvirta

I_L on valovirta

I_0 on kyllästysvirta

q on alkeisvaraus

V on jännite

n on idealiteettitekijä (ideality factor)

k on Boltzmannin vakio

T on lämpötila [3, s. 20–21].

Aurinkokennosta saatava maksimiteho määrittyy maksimaalisen tehon pisteen (Maximum Power Point, MPP) perusteella. Tämä saavutetaan jännitteen ja virran yhdistelmässä, jossa sähköteho $P = I \times V$ on suurimmillaan. Kennon suorituskykyä arvioidaan usein täytekertoimen (fill factor, FF) avulla (yhtälö 2):

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2)$$

V_m on jännite maksimitehopisteessä

I_m on virta maksimitehopisteessä

V_{oc} on avoimen piirin jännite

I_{sc} on oikosulkuvirta [3, s. 9–10].

Näiden kaavojen avulla voidaan arvioida aurinkokennon teoreettista ja käytännön suorituskykyä. Käytännön toteutuksessa häviöitä syntyy esimerkiksi fotonien heijastumisesta, varauksenkuljettajien rekombinaatiosta ja vastuksista kennon rakenteessa. Tämä selittää, miksi todellinen hyötysuhde jää matalammaksi kuin ideaalinen teoreettinen arvo. [2, s. 21–23.]

2.3 Kennon hyötysuhde ja energiantuotto

Aurinkokennon hyötysuhde kuvaa sitä, kuinka tehokkaasti kenno kykenee muuntamaan auringon säteilyn sähköenergiaksi. Hyötysuhde määritellään kennon tuottaman sähkötehon ja siihen kohdistuvan säteilytehon suhteena. Tätä voidaan kuvata yhtälöllä 3:

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \times 100 \% \quad (3)$$

η on hyötysuhde

P_{out} on ulos saatava sähköteho

P_{in} on kennon pinnalle tuleva säteilyteho [3, s. 21–23].

Hyötysuhdetta rajoittavat useat fysikaaliset tekijät. Näitä ovat muun muassa fotonien heijastuminen kennon pinnalta, materiaalin kaistavälin epäsopivuus aurinkospektriin, varauksenkuljettajien rekombinaatio sekä vastushäviöt. Näiden vuoksi aurinkokennojen käytännön hyötysuhde jää merkittävästi alle teoreettisen maksimihyötysuhteen (Shockley–Queisser-raja), joka yksiliitoskennoille (single junction) on noin 33 %. [1, s. 10–11.]

Aurinkokennon sähköntuotanto voidaan arvioida virta–jännitekäyrän avulla. Avoimen piirin jännite (V_{oc}), oikosulkuvirta (I_{sc}) ja täytekertoimen (FF) arvo määrittävät yhdessä hyötysuhteen seuraavan yhtälö 4:n mukaisesti:

$$\eta = \frac{(V_{oc} \times I_{sc} \times FF)}{P_{in}} \quad (4)$$

V_{oc} on avoimen piirin jännite

I_{sc} on oikosulkuvirta

FF on täytekertoimen arvo

P_{in} on kennon pinnalle tuleva säteilyteho

Yhtälö 4 osoittaa, että korkean hyötysuhteen saavuttamiseksi tarvitaan suuri V_{oc} , suuri I_{sc} ja mahdollisimman hyvä täytekertoimen arvo. [3, s. 21–22.]

Eri aurinkokennoteknologioilla on tyypillisiä hyötysuhteita. Esimerkiksi kaupalliset yksikiteiset piikennojen hyötysuhteet ovat nykyisin noin 20–23 %, monikiteisillä hieman alhaisempia, kun taas laboratoriossa on saavutettu jo yli 26 %:n hyötysuhteita. Perovskiittikennojen hyötysuhteet ovat viime vuosina nousseet nopeasti yli 25 %:n tasolle, ja tandemrakenteilla on raportoitu yli 30 %:n hyötysuhteita. [3, s. 21–22.; 5, s. 5–6.]

Näiden lukujen valossa voidaan todeta, että aurinkokennoteknologian kehitys etenee kohti yhä korkeampia hyötysuhteita, mikä parantaa aurinkosähkön kilpailukykyä muihin energiantuotantomuotoihin nähden.

3 Aurinkokennotyyppien vertailu

Aurinkokennot voidaan jaotella useisiin eri tyypeihin niiden valmistusmateriaalien ja rakenteiden perusteella. Teknologiat eroavat toisistaan erityisesti hyötysuhteen, valmistuskustannusten, käyttöiän, ympäristövaikutusten ja sovelluskohteiden näkökulmasta. Tällä hetkellä markkinoita hallitsevat piipohjaiset kennot, mutta rinnalle on noussut myös ohutkalvoteknologioita ja uusia lupaavia materiaaleja, kuten perovskiitteja.

3.1 Piipohjaiset kennot

Yksikiteinen pii (monocrystalline silicon, c-Si)

Yksikiteiset piikennot valmistetaan korkealaatuisesta, yhtenäisestä piikiteestä. Niiden etuna on korkea hyötysuhde, joka kaupallisissa tuotteissa on yleensä 20–23 %:a, ja laboratoriotutkimuksissa on saavutettu jopa yli 25 %. [3, s. 21–22.] Ne ovat kestäviä ja pitkäikäisiä, usein yli 25 vuotta käytössä, mutta valmistusprosessi on energiaintensiivinen ja kustannuksiltaan korkea. [1, s. 11–12.] Tästä syystä ne soveltuvat erityisesti sovelluksiin, joissa tehokkuus ja pitkä käyttöikä ovat ratkaisevia, kuten aurinkovoimaloihin ja kattoasennuksiin tiheästi rakennetuilla alueilla.

Monikiteinen pii (polycrystalline silicon, mc-Si)

Monikiteiset piikennot valmistetaan sulattamalla ja kiteyttämällä piimateriaali suurempina lohkoina. Niiden valmistus on yksikiteisiä edullisempaa, mutta kiteiden rajapinnat lisäävät elektronihäviöitä, minkä vuoksi hyötysuhde jää alemmaksi, tyypillisesti 17–20 %:iin. [2, s. 16–18.] Ne ovat kuitenkin edelleen

suosittuja suuren mittakaavan aurinkosähköjärjestelmissä, joissa hinta ratkaisee enemmän kuin maksimaalinen tehokkuus.

Amorfinen pii (amorphous silicon, a-Si)

Amorfinen pii kuuluu ohutkalvoteknologioihin, ja sen etuna on valmistuksen edullisuus ja joustavuus alustan suhteen. Sen hyötysuhde on kuitenkin matala, vain noin 6–10 %:a. Näin ollen a-Si-kennoja käytetään pääasiassa pienitehoisissa sovelluksissa, kuten laskimissa ja siirrettävissä laitteissa. [1, s. 12.]

3.2 Ohutkalvokennot

Kadmium-telluridi (CdTe)

CdTe-kennot ovat yksi yleisimmistä ohutkalvoteknologioista. Niiden hyötysuhde on kaupallisissa tuotteissa 15–18 %:a ja laboratoriossa yli 22 %. [8, s. 19–20, s. 26–27.] Etuina ovat a30–31en valmistuskustannus ja hyvä suorituskyky hajavalossa. Haittapuolena on kuitenkin kadmiumin myrkyllisyys ja telluridin harvinaisuus, mikä aiheuttaa ympäristö- ja saatavuushaasteita. [6, s. 2–3.]

Kupari-indium-gallium-selenidi (CIGS)

CIGS-kennoilla on saavutettu kaupallisissa ratkaisuisissa 15–20 %:n hyötysuhdetta ja laboratoriossa jopa yli 23 %:n. Niiden valmistus mahdollistaa myös joustavat alustat, mikä laajentaa sovelluskohteita esimerkiksi integroituihin rakennusratkaisuihin. Valmistusprosessi on kuitenkin monimutkainen, ja materiaalien saatavuus (erityisesti gallium ja indium) voi rajoittaa niiden yleistymistä. [7, s. 2.]

3.3 Orgaaniset aurinkokennot

Perovskiittiaurinkokennot

Perovskiitit ovat nousseet viime vuosina merkittäväksi tutkimuskohteeksi, sillä niiden hyötysuhde on noussut vajaassa vuosikymmenessä alle 10 %:sta yli 25

%.iin. Tandem-rakenteilla yhdessä piin kanssa on raportoitu jo yli 30 %:n hyötysuhteita. [5, s. 7–8.] Perovskiittien valmistus voidaan toteuttaa matalissa lämpötiloissa ja potentiaalisesti edullisilla prosesseilla, mutta niiden suurimmat haasteet liittyvät kestävyyteen, kosteudenkestoon ja pitkäikäisyyteen.

Kvanttipiste- ja orgaaniset kennot

Kvanttipisteisiin (quantum dots) perustuvat kennot voivat periaatteessa hyödyntää valoa laajalla aallonpituusalueella, mikä tarjoaa mahdollisuuden korkeaan hyötysuhteeseen. Toistaiseksi ne ovat tutkimusvaiheessa ja hyötysuhteet jäävät alle 15 %:n. Orgaaniset aurinkokennot (organic photovoltaics, OPV) mahdollistavat kevyitä, joustavia ja jopa läpinäkyviä rakenteita, mutta niiden hyötysuhde ja käyttöikä ovat edelleen rajallisia, tyypillisesti alle 15 vuotta ja 10–15 %:n hyötysuhteita. [1, s. 5–6; 3, s. 30–31.]

3.4 Sovelluskohteet ja markkinatilanne

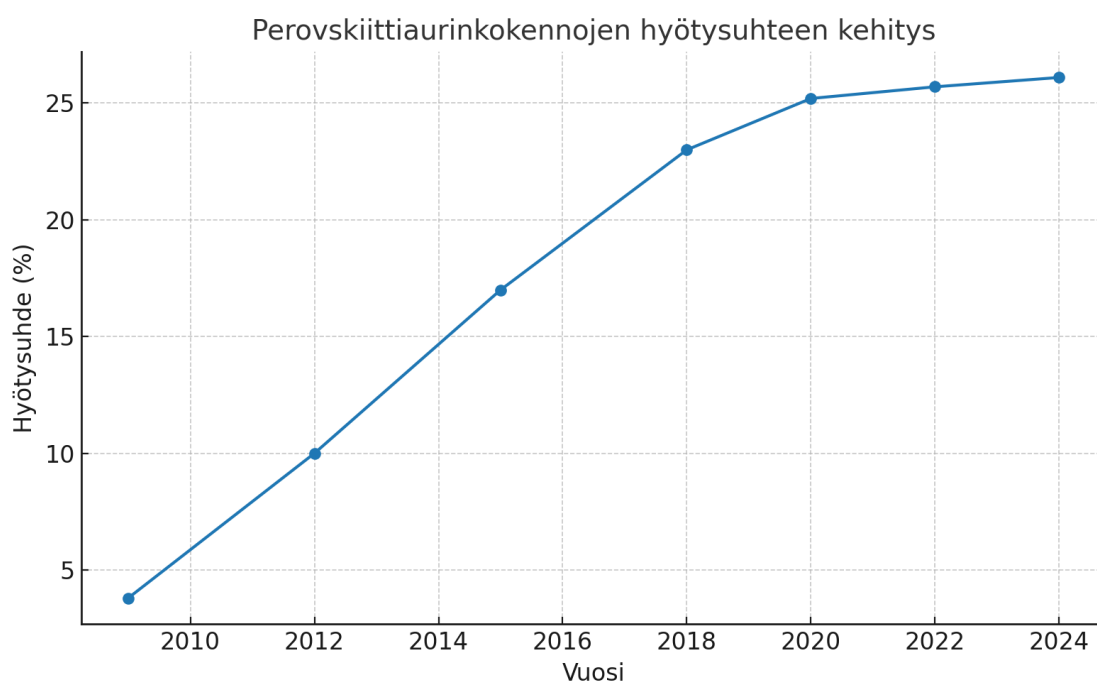
Aurinkokennotyyppien valintaan vaikuttavat sovelluskohde ja markkinatilanne. Piipohjaiset kennot hallitsevat edelleen yli 90 % maailman markkinoista, ja erityisesti yksikiteinen pii on vallitseva ratkaisu asuinrakennusten ja aurinkopuistojen energiantuotannossa. [3, s. 30–31.] Monikiteinen pii on menettänyt osuutensa yksikiteisille kennoille, mutta on edelleen tärkeä vaihtoehto kustannuserkillä markkinoilla. Ohutkalvokennot, kuten CdTe ja CIGS, ovat löytäneet erikoistuneita sovelluksia erityisesti suurissa aurinkopuistoissa sekä kohteissa, joissa tarvitaan kevyempiä ja joustavampia ratkaisuja. CdTe on erityisen merkittävä Yhdysvalloissa, jossa sitä käytetään laajasti aurinkosähkövoimaloissa.

Uudemmat teknologiat, kuten perovskiittit, eivät vielä ole laajassa kaupallisessa käytössä, mutta niiden nopea kehitys ja korkea hyötysuhde tekevät niistä potentiaalisia tulevaisuuden ratkaisuja. Erityisen lupaavia ne ovat tandemrakenteissa, joissa voidaan yhdistää piin pitkä käyttöikä ja perovskiittien erinomainen valonabsorptiokyky. [8, s. 222–223.]

4 Perovskiittiaurinkokennot

Perovskiittiaurinkokennot ovat nousseet tutkimuksessa esiin mahdollisena vaihtoehtona, jota voidaan tarkastella seuraavan sukupolven aurinkosähköjärjestelmien kehittämisen yhteydessä. Nimensä mukaisesti kennot perustuvat perovskiittirakenteisiin materiaaleihin, joilla on kaava ABX_3 , jossa A ja B ovat kationeja ja X on anioni, tavallisesti halogeeni. Perovskiittien ainutlaatuiset sähköiset ja optiset ominaisuudet tekevät niistä erinomaisia valonabsorboijia aurinkokennosovelluksissa. [1, s. 2–4; 2, s. 27–30.]

Teknologian kehitys on ollut poikkeuksellisen nopeaa verrattuna muihin aurinkokennomateriaaleihin. Ensimmäinen raportti perovskiittiaurinkokennosta julkaistiin vuonna 2009, jolloin hyötysuhde oli alle 4 %. Vain hieman yli vuosikymmenen aikana hyötysuhteet ovat nousseet yli 25 %:iin yksittäisissä kennoissa ja tandemrakenteissa yli 30 %:iin. [5, s. 9–10.] Tämä tekee perovskiiteista vakavasti otettavan vaihtoehdon piipohjaisille ja ohutkalvoteknologioille (kuva 2).



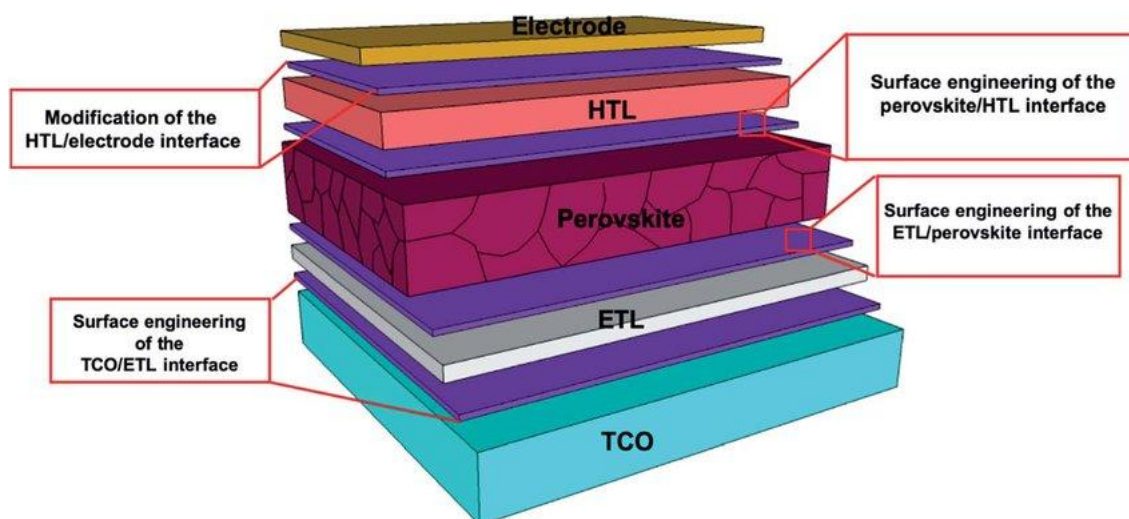
Kuva 2. Hyötysuhteen kehitys 2009–2024. (kuva: Elias Lainonen) [1, s. 5–6].

Perovskii aurinkokennojen keskeinen vahvuus on niiden valmistettavuus matallisissa lämpötiloissa ja yksinkertaisilla menetelmillä, kuten liuospinnoituksella (solution processing), mikä mahdollistaa kustannustehokkaan tuotannon. Kennoja voidaan valmistaa joustaville ja läpinäkyville alustoille, mikä laajentaa niiden sovelluskohteita esimerkiksi ikkunoihin integroituihin aurinkosähköjärjestelmiin ja kannettaviin elektroniikkalaitteisiin. [7, s. 4.]

Perovskii aurinkokennot ovat tällä hetkellä vielä tutkimus- ja kehitysvaiheessa, eikä niitä ole vielä kaupallisessa käytössä. Tutkimuksen nopea edistyminen ja kasvava määrä kansainvälisiä yhteistyöhankkeita kuitenkin osoittavat, että teknologia on etenemässä kohti kaupallistamista. Erityisen lupaavia ovat tandemkennorakenteet, joissa perovskiiitit yhdistetään piikennon päälle hyötysuhteen nostamiseksi piikkenojen teoreettisen rajan yli (Shockley–Queisser-raja, n. 29 %). Tandem- ja moniliitosrakenteilla on laboratoriokokeissa saavutettu jo yli 33–35 %:n hyötysuhteita, ja niiden valmistus voidaan sovittaa olemassa olevaan piikkenojen tuotantoinfrastruktuuriin. Jos käyttöikä saadaan nostettua kymmenien tuhansien tuntien tasolle, teknologia voi merkittävästi laskea aurinkoenergian tasoitettuja energiakustannuksia (LCOE) ja tehdä aurinkosähköstä aiempaa kilpailukykyisempää suhteessa fossiilisiin energialähteisiin. Näistä syistä tandem-perovskiiitikennot nähdään potentiaalisena tekijänä aurinkoenergian tuotannon mullistuksessa tulevana vuosikymmeninä. [1, s. 10–11; 5, s. 11–12; 6, s. 5–6; 7, s. 5.]

4.1 Toimintaperiaate

Perovskii aurinkokennon toimintaperiaate perustuu valon absorptioon, varauksenkuljetukseen ja sähkövirran muodostumiseen samalla tavoin kuin muissakin aurinkokennoissa. Perovskiiimateriaalien erityispiirteet tekevät kuitenkin prosessista tehokkaan ja muokattavissa olevan. Rakenteellisesti perovskiiitikenno koostuu useista kerroksista, joilla jokaisella on oma tehtävänsä: läpinäkyvä elektrodikerros, elektroninsiirtokerros (electron transport layer, ETL), valoabsorptiokerros, aukon siirtokerros (hole transport layer, HTL) sekä taustaelementti, yleensä metallielektrodi (kuva 3) [1, s. 11–12].



Kuva 3. Perovskiittiaurinkokennon rakenne. [9]

Kun auringonvalo osuu perovskiittikerrokseen, fotonit absorboituvat ja synnyttävät elektronin ja aukon muodostaman parin eli eksitonin. Toisin kuin monissa muissa puolijohdemateriaaleissa, perovskiiteissa eksitonien sitoutumisenergia on matala, mikä tarkoittaa, että ne hajoavat helposti vapaiksi varauksenkuljettajiksi huoneenlämpötilassa. Tämä ominaisuus parantaa kennon tehokkuutta, sillä lähes kaikki absorboitu valo voidaan muuttaa sähköiseksi energiaksi. [7, s. 6.]

Seuraavassa vaiheessa vapautuneet elektronit ja aukot kulkeutuvat omiin kerroksiinsa: elektronit siirtyvät elektroninsiirtokerrokseen, joka on usein valmistettu titaanidioksidista (TiO_2) tai tinadioksidista (SnO_2), ja aukot puolestaan siirtyvät aukonsiirtokerrokseen, jota varten käytetään orgaanisia yhdisteitä, kuten spiro-OMeTADia, tai epäorgaanisia vaihtoehtoja, kuten kupari- tai nikkelioksideja. Lopulta elektronit ja aukot johdetaan ulkoiseen piiriin elektrodien kautta, jolloin syntyy sähkövirta. Tätä tilaa, jossa aurinkokenno tuottaa maksimitehonsa, kutsutaan maksimitehopisteeksi (maximum power point, MPP). [2, s. 21–23.]

Perovskiittimateriaalien toiminta voidaan näin ollen hahmottaa kolmena perusvaiheena. Ensimmäisessä vaiheessa auringonvalo absorboituu perovskiittikerrokseen ja synnyttää elektronin ja aukon muodostamia pareja eli eksitoneja. Toisessa vaiheessa nämä varauksenkuljettajat erottautuvat ja kulkeutuvat elektronin- ja aukonsiirtokerrosten kautta, mikä minimoi niiden ennenaikaisen

yhdistymisen eli rekombinaation. Kolmannessa vaiheessa elektronit ja aukot kulkeutuvat elektrodien kautta ulkoiseen piiriin muodostaen sähkövirran [1, s. 6–7].

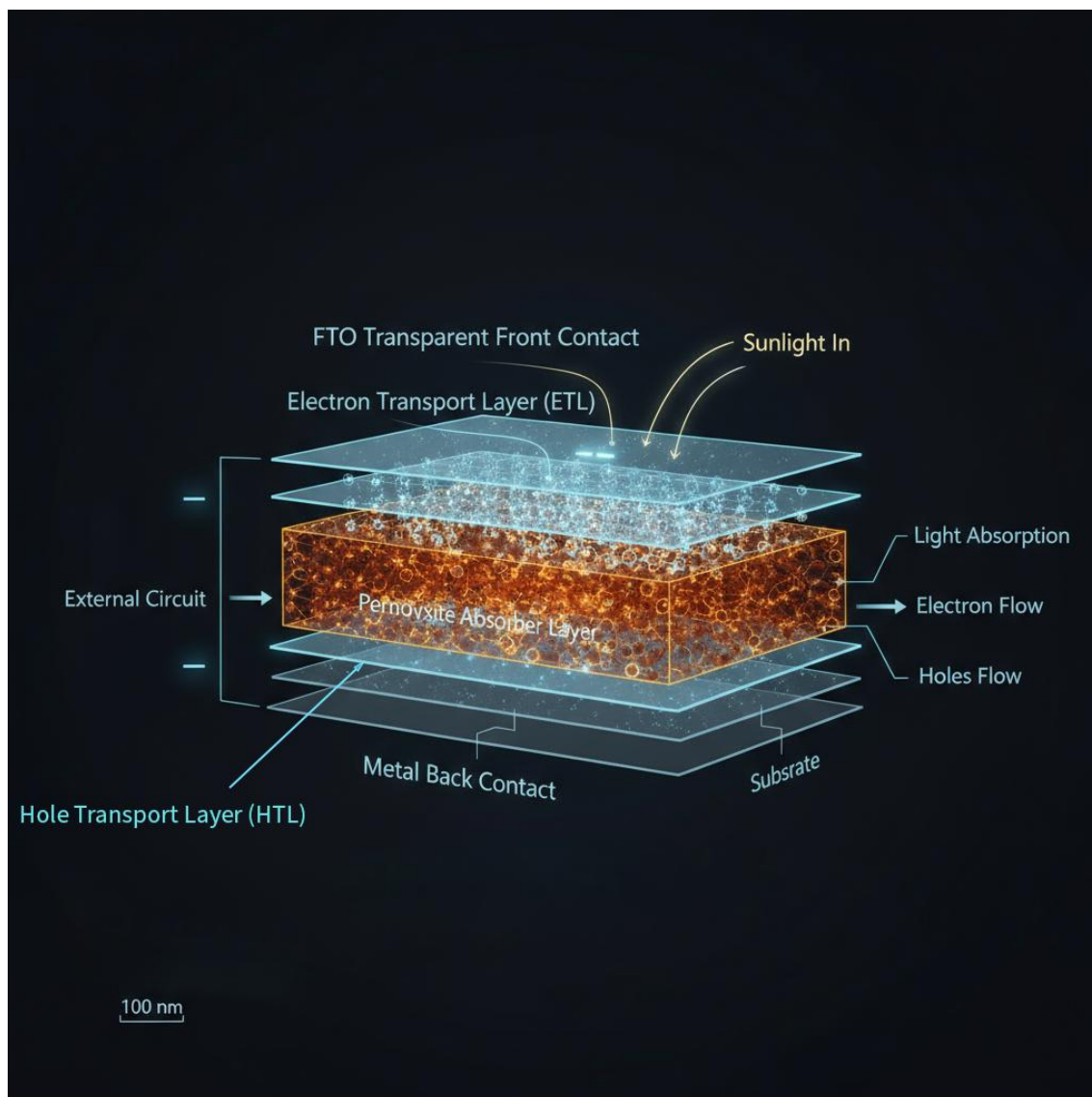
Näiden prosessien korkea tehokkuus ja muokattavuus tekevät perovskiiattiaurinkokennoista houkuttelevan vaihtoehdon seuraavan sukupolven aurinkosähköjärjestelmiin. Perovskiittimateriaalien erityinen vahvuus on niiden kyky absorboida valoa laajalla aallonpituusalueella, noin 300–800 nm, mikä kattaa suuren osan näkyvästä spektristä ja niiden kaistaväli (band gap) on säädettävissä noin 1,2–2,3 eV materiaaikoostumusta muokkaamalla, mikä mahdollistaa optimaalisen hyötysuhteen sovittamisen erilaisiin kennorakenteisiin. Tämä joustavuus on merkittävä etu verrattuna piihin, jonka kiinteä kaistaväli on noin 1,1 eV ja absorptioalue ulottuu hieman laajemmalle, noin 300–1100 nm. Perovskiihtien pitkä varauksenkuljettajien elinaika yhdessä edellä mainittujen ominaisuuksien kanssa on johtanut laboratorioissa saavutettuihin hyötysuhteisiin, jotka ovat ylittäneet 26–27 %:a, kun taas piikennojen teoreettinen maksimi yksittäisrakenteessa on noin 26 %. Tandem-kennoissa, joissa perovskiihti yhdistetään piihin, on jo saavutettu yli 33 %:n hyötysuhteita. [5, s. 12–13.]

4.2 Rakenne ja materiaalit

Perovskiiattiaurinkokennot koostuvat useista kerroksista, joilla jokaisella on oma tehtävänsä kennon toiminnan kannalta. Tyypillinen perovskiihtikkenno rakentuu läpinäkyvästä elektrodista, elektroninsiirtokerroksesta (electron transport layer, ETL), perovskiihtipohjaisesta valoabsorptiokerroksesta, aukonsiirtokerroksesta (hole transport layer, HTL) sekä metallielektrodista. [1, s. 8–9; 3, s. 29–31.] Näiden kerrosten optimointi ja yhteensopivuus ovat ratkaisevia tekijöitä kennon suorituskyvylle, ja aurinkokennon yleinen rakenne on esitetty kuvassa 4.

Läpinäkyvä elektrodi muodostaa kennon etupinnan, jonka läpi valo pääsee absorptiokerrokseen. Yleisin materiaali on indium-tina-oksidi (ITO) tai fluorilla seostettu eli dopattu tinaoksidi (FTO), sillä ne yhdistävät hyvän sähkönjohtavuuden ja läpinäkyvyyden [1, s. 7–8].

Elektroninsiirtokerros (ETL) ohjaa elektronit kohti elektroodia ja estää samalla aukkojen takaisinvirtauksen. Yleisesti käytettyjä materiaaleja ovat titaanidioksidi (TiO_2) ja tinadioksidi (SnO_2), jotka tarjoavat hyvän stabiilisuuden ja soveltuvat matalalämpöisiin valmistusprosesseihin. [7, s. 7.]



Kuva 4. FTO-, ETL- ja HTL-kerrokset kuvattuna toiminnan kannalta. Kuva on laadittu Adoben Firefly image 4 ultralla. [10.]

Perovskiittikerros on kennon ydin, joka vastaa valon absorptiosta ja varauksenkuljettajien synnystä. Perovskiittimateriaaleilla on yleinen kaava ABX_3 , jossa A on orgaaninen tai epäorgaaninen kationi (esim. metyylikationi CH_3NH_3^+ eli MA tai formamidinium FA^+), B on metalli-ionina tyypillisesti lyijy (Pb^{2+}) tai tina (Sn^{2+})

ja X on halogenidi-ioni (Cl^- , Br^- , I^-). Koostumusta muuttamalla voidaan säätää kaistaväliä ja optisia ominaisuuksia. Erityisen lupaavia ovat lyijyttömät vaihtoehdot, kuten tina- ja vismuttipohjaiset perovskiiitit, jotka voivat pienentää ympäristöriskejä. [6, s. 7.]

Aukonsiirtokerros (HTL) mahdollistaa aukkojen siirtymisen kohti vastakkaista elektrodiä. Orgaaniset materiaalit, kuten spiro-OMeTAD, ovat olleet laajassa käytössä korkean hyötysuhteen yhteydessä, mutta niiden kosteusherkkyys ja korkea hinta rajoittavat käyttöä. Tämän vuoksi tutkimuksessa on kehitetty epäorgaanisia vaihtoehtoja, kuten kupari- ja nikkelioksideja, jotka parantavat kennon stabiilisuutta. [5, s. 14.]

Metallielektrodi muodostaa kennon takapinnan ja toimii sähköisen virtapiirin suljijana. Yleisesti käytettyjä metalleja ovat kulta, hopea ja alumiini, mutta kustannusten pienentämiseksi tutkitaan myös hiilipohjaisia ratkaisuja.

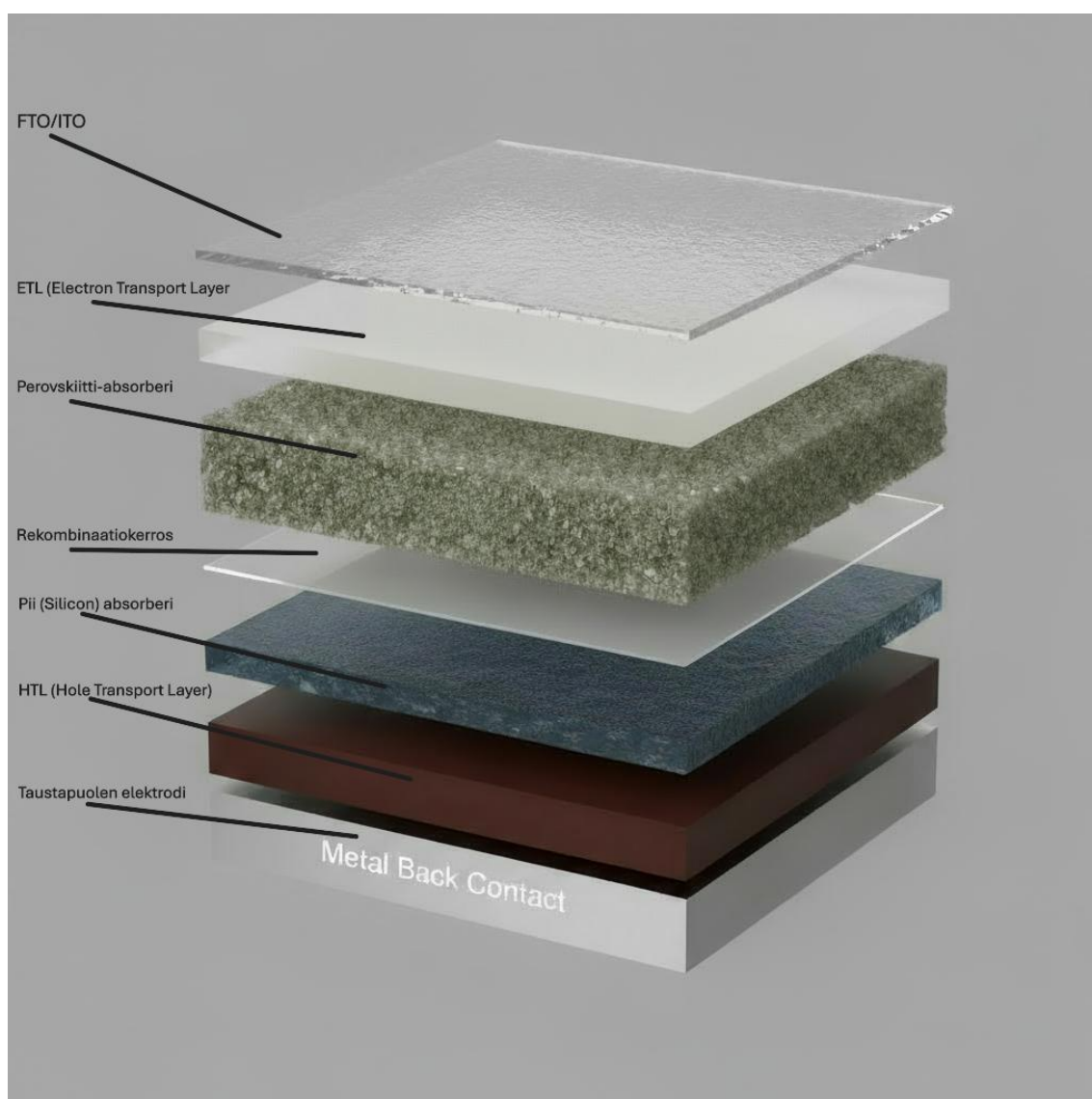
Kokonaisuutena perovskiiittiaurinkokennon rakenne on yksinkertainen verrattuna moniin muihin aurinkokennoteknologioihin, mutta materiaalivalinnat ja rajapintojen hallinta ovat ratkaisevia tekijöitä hyötysuhteen, stabiilisuuden ja kaupallisen skaalautuvuuden kannalta.

4.3 Eri perovskiiittityypit

Perovskiiittiaurinkokennot voidaan jakaa rakenteensa ja toimintaperiaatteensa perusteella kahteen päätyyppiin: yksinkertaisiin kennoihin ja tandemrakenteisiin. Näiden kehityslinjat kuvastavat koko tutkimusalan nopeaa etenemistä ja kaupallisia tavoitteita.

Yksinkertaiset perovskiiittikennot perustuvat yhden perovskiiittikerroksen käyttöön valon absorboijana. Ne olivat ensimmäinen askel teknologian kehityksessä, ja niiden hyötysuhde on kasvanut nopeasti muutamasta prosentista yli 25 %:iin vain reilussa vuosikymmenessä. [3, s. 6–7; 5, s. 2–3.] Hyötysuhteen kehitys on ollut poikkeuksellisen nopeaa verrattuna moniin muihin

aurinkokennoteknologioihin, mikä viittaa perovskiittimateriaalien tutkimukselliseen potentiaaliin. Yksinkertaisten rakenteiden etuna on niiden valmistuksen helppous ja alhaiset kustannukset: ohuita perovskiittikerroksia voidaan valmistaa liuosohjaisilla menetelmillä jopa joustaville alustoille, mikä avaa mahdollisuuksia kevyille ja muunneltaville sovelluksille. [1, s. 7–8; 7, s. 8.] Haasteina ovat kuitenkin pitkäaikainen stabiilisuus sekä ympäristöriskit, jotka liittyvät erityisesti lyijypohjaisiin yhdisteisiin. [2, s. 30–31; 6, s. 3–4.] Näiden vuoksi tutkimuksessa keskitytään myös lyijyttömiin vaihtoehtoihin, kuten tina- ja vismuttiperovskiitteihin.



Kuva 5. Perovskiitti-Pii-tandemkennon rakenne. Kuva on laadittu Adoben Firefly Image 4 Ultralla. [10.]

Tandem-perovskiittikennot rakentuvat kahdesta tai useammasta kerroksesta, joissa yhdistetään perovskiitti muihin aurinkokennomateriaaleihin, tyypillisimmin piihin. Ideana on hyödyntää kahden eri materiaalin optisia ominaisuuksia siten, että kumpikin absorboi eri osia aurinkospektristä: perovskiitti kerää tehokkaasti näkyvän valon ja osan infrapuna-alueesta, kun taas pii hyödyntää pitkäaaltoisia infrapuna-aallonpituuksia. [3, s. 6–7; 8, s. 223–224.] Tämä vähentää energiahävikkiä ja nostaa hyötysuhdetta. Tandem-perovskiittikennoilla on jo saavutettu yli 33 %:n hyötysuhteita laboratoriossa, mikä on lähellä piikennon teoreettista maksimiarvoa (Shockley–Queisserin raja). [3, s. 6–8; 7, s. 9.] (kuva 5)

Tandem-rakenteiden merkittävä etu on niiden yhteensopivuus olemassa olevien piikennojen valmistusteknologian kanssa. Tämä mahdollistaa siirtymisen kaupalliseen tuotantoon vaiheittain ja tarjoaa kustannustehokkaan tavan parantaa piipohjaisten aurinkosähköjärjestelmien hyötysuhdetta. [1, s. 18–19; 5, s. 3–4.] Samalla ne tarjoavat mahdollisuuden ohittaa perinteisten yksittäisten kennojen teoreettiset rajat ja saavuttaa huomattavasti korkeampia hyötysuhteita.

Haasteita kuitenkin riittää. Tandem-rakenteiden valmistuksessa keskeisiä ongelmia ovat kerrosten rajapintojen hallinta, ionivaeltaminen (ion drift) ja kosteusherkkyys, jotka voivat heikentää suorituskykyä ja käyttöikä. Perovskiittimateriaalien lyijypohjaisuus herättää huolta ympäristövaikutuksista, mikä on kiihdyttänyt lyijyttömien vaihtoehtojen kehitystyötä. [6, s. 4–5.]

Kehityksen kokonaiskuva osoittaa, että yksinkertaiset perovskiittikennot toimivat alustana nopealle innovoinnille ja materiaalien tutkimukselle, kun taas tandem-rakenteet mahdollistavat hyötysuhteiden merkittävän parantamisen. Pitkällä aikavälillä niiden suorituskyky voi ylittää perinteisten aurinkokennoteknologioiden rajat. [8, s. 223–224; s. 236–237.]

4.4 Kehitysvaihe ja tutkimustilanne

Perovskiittiaurinkokennojen kehitys on ollut poikkeuksellisen nopeaa verrattuna muihin aurinkokennoteknologioihin. Ensimmäiset raportit

perovskiittimateriaaleista aurinkoenergiakäytössä julkaistiin vuonna 2009, jolloin hyötysuhteet olivat vain 3–4 %:a ja kennojen kestoikä rajoittui muutamiin minuutteihin [2, s. 5]. Jo muutamassa vuodessa tapahtui merkittävä harppaus: vuonna 2012 saavutettiin 10 %:n hyötysuhde, ja vuonna 2015 ylitettiin 20 %. [1, s. 18–19; 3, s. 6–7.] Nykyisin yksinkertaisilla perovskiittikennoilla on päästy yli 25 %:iin, ja tandemrakenteilla jopa yli 33 %:iin. [5, s. 3–4; 7, s. 9–10.]

Tutkimuksen keskiössä on ollut erityisesti materiaalien optimointi ja rakenteiden parantaminen. Lyijypohjaiset perovskiitit ovat tuottaneet parhaat hyötysuhteet, mutta niiden ympäristöriskit ovat johtaneet laajaan tutkimukseen lyijyttömien vaihtoehtojen, kuten tina-, vismutti- ja germaniumperovskiittien osalta. [6, s. 5.] Samalla on kehitetty rajapintojen muokkausta ja passivointitekniikoita, joilla voidaan vähentää ionivaeltamisesta ja rekombinaatiosta johtuvia häviöitä. [3, s. 7–8.]

Stabiilisuus on yksi merkittävimmistä tutkimuksen haasteista. Perovskiittimateriaalit kärsivät kosteuden, hapen, UV-säteilyn ja lämpötilan vaihteluiden aiheuttamista muutoksista, jotka heikentävät käyttöikää. Vaikka laboratoriossa saavutetut hyötysuhteet ovat erittäin korkeita, monet kennot menettävät tehokkuutensa kuukausissa tai jopa viikoissa, mikä rajoittaa kaupallistamista. [2, s. 23–24; 8, s. 231–233.] Tutkimuksessa on kuitenkin kehitetty pinnoitus- ja kapselointimenetelmiä, jotka lupaavat pidempää käyttöikää.

Kansainvälisesti tutkimus on erittäin aktiivista: vuosittain julkaistaan tuhansia artikkeleita, ja useat tutkimuslaitokset sekä yritykset kehittävät rinnakkain uusia ratkaisuja. Esimerkiksi Oxford PV (Englantilainen perovskiittiaurinkokenno yritys) on ilmoittanut pilottilinjasta tandem-perovskiittipiikennojen valmistukseen, ja useat kiinalaiset tutkimusryhmät ovat raportoineet yli 30 %:n hyötysuhteen ylittäviä tuloksia. [5, s. 5–6.]

Perovskiittiaurinkokennot ovat siirtyneet alkuvaiheen kokeellisesta tutkimuksesta kohti esikaupallista kehitystä. Suurimmat haasteet liittyvät edelleen stabiilisuuteen, valmistusmenetelmien skaalautuvuuteen ja ympäristönäkökohtiin.

Samaan aikaan saavutetut hyötysuhteet ja nopea tutkimuksen edistyminen tekevät yhden lupaavimmista teknologioista aurinkosähkön tulevaisuudessa.

5 Aurinkokennotyyppien vertailu ja arviointi

5.1 Perovskiittien edut ja haasteet

Perovskiittiaurinkokennot ovat nousseet nopeasti yhdeksi lupaavimmista aurinkosähköteknologioista, sillä ne tarjoavat useita merkittäviä etuja verrattuna perinteisiin ratkaisuihin. Suurin etu on korkea hyötysuhde: ensimmäisistä kokeiluista, joissa päästiin vain muutaman prosentin hyötysuhteisiin, on edetty nykyisiin yksinkertaisiin kennoihin, jotka yltyvät jo yli 25 %:n hyötysuhteeseen, sekä tandemrakenteisiin, joissa on saavutettu yli 33 %:n hyötysuhteita. [3, s. 7–8; 5, s. 6–7.] Tämä kehitys on ollut nopeampaa kuin millään muulla aurinkokennoteknologiolla. Perovskiittimateriaalien kaistaväliä (band gap) voidaan muokata materiaalikoostumusta muuttamalla, mikä tekee niistä erityisen houkuttelevia tandemrakenteisiin yhdessä muiden materiaalien, kuten piin, kanssa. [7, s. 11.]

Valmistuksen osalta perovskiittien etuna on, että ne voidaan tuottaa liuos pohjaisilla menetelmillä matalissa lämpötiloissa, mikä alentaa kustannuksia ja mahdollistaa kennorakenteiden valmistuksen myös joustaville alustoille. Tämä avaa mahdollisuuksia esimerkiksi rakennusten integroituihin aurinkopaneeleihin sekä kannettaviin laitteisiin, joissa keveys ja muunneltavuus ovat tärkeitä. [1, s. 18; 2, s. 25–27; 6, s. 5–6.] Näin ollen perovskiittien sovellusmahdollisuudet ovat huomattavan monipuoliset verrattuna moniin muihin teknologioihin.

Haasteita on kuitenkin useita, ja ne liittyvät sekä teknisiin että ympäristöllisiin näkökulmiin. Suurin yksittäinen ongelma on kennon stabiilisuus: perovskiittimateriaalit hajoavat herkästi kosteuden, hapen, UV-säteilyn ja lämpötilavaihteluiden vaikutuksesta, mikä lyhentää merkittävästi niiden käyttöikää [8, s. 236–237]. Tämä estää vielä toistaiseksi teknologian kaupallisen läpimurron. Toinen merkittävä haaste liittyy lyijyn käyttöön, sillä suurin osa parhaista hyötysuhteista on saavutettu lyijypohjaisilla perovskiiteilla. Lyijyn myrkyllisyys aiheuttaa

ympäristöriskejä ja edellyttää toimivia kierrätys- ja hallintaratkaisuja. Lyijyttömiä vaihtoehtoja, kuten tina- ja vismuttipohjaisia yhdisteitä, tutkitaan aktiivisesti, mutta niiden hyötysuhteet ja stabiilisuus eivät vielä vastaa lyijyperustaisia ratkaisuja [6, s. 7–8].

Myös valmistuksen skaalaaminen laboratoriosta teolliseen mittakaavaan on haaste. Suurissa paneeleissa ongelmaksi muodostuu kerrosten tasalaatuisuus, rajapintojen hallinta ja ionivaeltaminen, jotka voivat heikentää suorituskykyä ja lyhentää käyttöikää. [2, s. 18–20; 7, s. 11.] Perovskiittikenttien pitkäaikainen luotettavuus ei vielä yllä piikentien tasolle, joiden käyttöikä on tyypillisesti 25–30 vuotta. [3, s. 6–8.]

Perovskiittiaurinkokennot yhdistävät korkean hyötysuhteen, muokattavat ominaisuudet ja alhaiset valmistuskustannukset, mutta niiden stabiilisuus, ympäristöriskejä ja valmistuksen skaalaus muodostavat edelleen keskeiset esteet kaupallistamiselle.

5.2 Kestävyys, valmistus ja ympäristövaikutukset

Perovskiittiaurinkokennojen kaupallistamisen kannalta yksi keskeisimmistä kysymyksistä on niiden kestävyys. Vaikka laboratoriossa saavutetut hyötysuhteet ovat erinomaisia, perovskiittimateriaalien stabiilisuus on edelleen merkittävä haaste. Kennot altistuvat kosteudelle, hapelle, lämpötilan vaihteluille ja UV-säteilylle, jotka voivat hajottaa perovskiittikerroksen rakenteen ja heikentää suorituskykyä. Monet kennot menettävät tehokkuutensa jo viikkojen tai kuukausien käytön jälkeen, mikä ei ole riittävää verrattuna piikentien tyypilliseen 25–30 vuoden käyttöikänsä. [2, s. 28–30; 3, s. 6–7; 8, s. 233–234.] Ionivaeltamisen hallinta ja rajapintojen passivointi ovat keskeisiä keinoja pidentää käyttöikää [6, s. 6–7].

Valmistuksen osalta perovskiittien vahvuus on niiden yksinkertainen ja kustannustehokas tuotantoprosessi. Materiaalikerroksia voidaan valmistaa liuos pohjaisilla menetelmillä, kuten pyöröpäällystyksellä ja mustesuihku, jotka eivät vaadi

korkeita lämpötiloja. Tämä mahdollistaa myös valmistuksen joustaville alustoille ja potentiaalisen soveltamisen esimerkiksi rakennusten integroituihin aurinkopaneelisiin ja kannettaviin laitteisiin. [1, s. 19; 7, s. 12.] Suurimittainen valmistus on kuitenkin vielä kehitysvaiheessa, ja haasteena on erityisesti tasalaatuisten, virheettömien suurten pinta-alojen tuottaminen. Valmistusprosessien toistettavuus ja pitkäaikainen suorituskyky vaativat lisäkehitystä. [5, s. 13–14.]

Ympäristövaikutusten osalta eniten huolta herättää lyijyn käyttö, sillä suurin osa tehokkaimmista perovskiittimateriaaleista perustuu lyijy-yhdisteisiin. Lyijyn myrkyllisyys ja sen mahdollinen vuotaminen ympäristöön rikkoutuneista tai hylätyistä kennoista voivat muodostaa merkittävän riskin, mikäli asianmukaisia kierrätys- ja hallintaratkaisuja ei kehitetä. Tämä on johtanut aktiiviseen tutkimukseen lyijyttömien vaihtoehtojen, kuten tina- ja vismuttipеровskiittien, kehittämiseksi. Niiden suorituskyky ei kuitenkaan vielä yllä lyijypohjaisten materiaalien tasolle. [6, s. 7–8; 8, s. 234.] Perovskiittien valmistuksessa käytetään orgaanisia liuottimia ja muita kemikaaleja, jotka voivat aiheuttaa ympäristökuormitusta, ellei prosesseja optimoida ympäristöystävällisemmiksi [7, s. 12].

Perovskiittiaurinkokennojen valmistus tarjoaa merkittäviä mahdollisuuksia alhaisiin kustannuksiin ja joustaviin sovelluksiin, mutta kestävyys ja ympäristövaikutuksiin liittyvät haasteet on ratkaistava ennen kuin teknologia voi yleistyä kaupallisessa mittakaavassa. Tämä edellyttää sekä uusien materiaalien kehittämistä että tehokkaita kierrätys- ja suojaratkaisuja, jotta perovskiittien potentiaali voidaan hyödyntää turvallisesti ja kestävästi.

5.3 Tulevaisuuden näkymät ja kehityssuunnat

Perovskiittiaurinkokennojen tulevaisuuden näkymät ovat erittäin lupaavat, sillä teknologia yhdistää korkean hyötysuhteen, kustannustehokkaan valmistuksen ja laajat sovellusmahdollisuudet. Viime vuosien kehitys osoittaa, että perovskiitit voivat nousta merkittäväksi kilpailijaksi ja täydentäjäksi piipohjaisille aurinkokennoille.

Tutkimuksessa keskeinen painopiste on ollut hyötysuhteen nostaminen. Tandem-rakenteilla, joissa yhdistetään perovskiitti ja pii, on saavutettu yli 33 %:n hyötysuhteita, ja useat tutkimusryhmät arvioivat, että tulevaisuudessa voidaan ylittää 35–40 %:n taso. [3, s. 29–31; 5, s. 13–14.] Tämä avaa mahdollisuuden ohittaa nykyiset piikkenojen teoreettiset rajat ja nostaa aurinkosähkön tuotannon tehokkuutta merkittävästi.

Toinen keskeinen kehityssuunta liittyy kestävyuden parantamiseen. Vaikka nykyiset kennot kärsivät kosteuden, hapen ja lämmön aiheuttamista hajoamisilmiöistä, tutkimuksessa keskitytään erityisesti pinnoitusratkaisuihin ja rajapintojen passivointitekniikoihin, joiden avulla voidaan hidastaa materiaalien rappeutumista ja pidentää käyttöikä. [2, s. 32–33; 8, s. 234–235.] Pitkän aikavälin tavoitteena on saavuttaa käyttöikä, joka vastaa piikkenojen 25–30 vuotta, mikä on edellytys laajamittaiselle kaupallistamiselle.

Ympäristönäkökulmasta tutkimuksen on ratkaistava lyijyn käyttöön liittyvät ongelmat. Lyijyttömien vaihtoehtojen, kuten tina- ja vismuttiperovskiittien, kehittäminen on aktiivista, mutta niiden hyötysuhde ja stabiilisuus eivät vielä vastaa lyijypohjaisia ratkaisuja. [6, s. 8.] Tulevaisuudessa ratkaisevaa on, voidaanko kehittää materiaaleja, jotka yhdistävät korkean suorituskyvyn ja ympäristöystävällisyyden. Tehokkaat kierrätys- ja materiaalinhallintaratkaisut tulevat olemaan välttämättömiä, mikäli teknologia otetaan laajasti käyttöön.

Perovskiittien sovellukset voivat tulevaisuudessa ulottua laajasti rakennusten integroiduista aurinkopaneeleista kannettaviin laitteisiin ja jopa avaruussovelluksiin. Kevyet, joustavat ja muokattavat rakenteet mahdollistavat käyttöä koh-teissa, joissa perinteiset piipaneelit eivät ole tarkoituksenmukaisia. Esimerkiksi ohutkalvoratkaisut ja läpinäkyvät aurinkokennot voivat avata täysin uusia markkinoita. [1, s. 19; 7, s. 12.]

Kaupallistamisen osalta useat yritykset, kuten Oxford PV, ovat jo käynnistäneet pilottilinjoja perovskiitti–pii-tandemkennojen valmistukseen. Mikäli valmistusteknologian skaalaushaasteet ratkaistaan, ensimmäiset kaupalliset tuotteet voivat tulla markkinoille lähivuosina. [5, s. 14–15.] Tämä voi vauhdittaa aurinkosähkön

leviämistä entisestään ja tukea siirtymistä kohti hiilineutraalia energiantuotantoa.

Perovskiittiaurinkokennot ovat edenneet nopeasti kokeellisesta tutkimuksesta kohti kaupallistamisen mahdollisuuksia. Jatkokehityksen kannalta keskeisiä kysymyksiä ovat stabiilisuuteen, lyijyn käyttöön ja valmistuksen skaalaamiseen liittyvät haasteet. Näiden ongelmien ratkaisemisen onnistuminen määrittää, millaisen roolin perovskiittiteknologia voi saada osana aurinkosähkön tulevaisuutta.

6 Yhteenveto

Perovskiittiaurinkokennot ovat viime vuosien aikana nousseet yhdeksi aurinkoenergian tutkimuksen merkittävimmistä aiheista. Niiden houkuttelevuus perustuu erityisesti korkeaan hyötysuhteeseen, yksinkertaiseen ja kustannustehokkaaseen valmistusprosessiin sekä laajoihin sovellusmahdollisuuksiin. Laborioritasolla saavutetut hyötysuhteet ovat jo ylittäneet monien perinteisten aurinkokennotyyppien tason, ja tandemrakenteissa on ylitetty myös piikkenojen teoreettinen hyötysuhderaja.

Teknologian kehityksessä merkittäviä edistysaskeleita on otettu erityisesti materiaalitutkimuksessa ja valmistustekniikoissa. Liuospohjaiset ja matalalämpöiset menetelmät mahdollistavat perovskiittien valmistuksen joustaville ja läpinäkyville alustoille, mikä avaa täysin uusia käyttöalueita esimerkiksi rakennusten integroidussa aurinkosähkössä. Tutkimukset ovat osoittaneet, että perovskiitit soveltuvat hyvin tandemkennoihin piin kanssa, mikä voi vauhdittaa kaupallistamista lähivuosina.

Haasteina ovat kuitenkin edelleen kestävyys ja ympäristövaikutukset. Perovskiittimateriaalien stabiilisuus on toistaiseksi riittämätön verrattuna piikkenoihin, sillä kosteus, happi ja lämpötilavaihtelut heikentävät rakenteen luotettavuutta. Lyijyn käyttö tehokkaimmissa perovskiittiyhdisteissä aiheuttaa ympäristöriskin, mikä edellyttää kierrätysratkaisuja tai vaihtoehtoisten materiaalien kehittämistä.

Tulevaisuuden tutkimus keskittyy ennen kaikkea käyttöiän pidentämiseen, lyijytömien vaihtoehtojen löytämiseen sekä valmistuksen skaalaamiseen teolliseen mittakaavaan. Jos nämä haasteet ratkaistaan, perovskiittiaurinkokennoilla on potentiaalia nousta merkittäväksi osaksi globaalia aurinkosähkömarkkinaa ja vauhdittaa siirtymää kohti kestävämpää energiantuotantoa.

Lähteet

- 1 Duan, Leiping; Cui, Xin; Xu, Cheng; Chen, Zhong & Zheng, Jianghui. 2025. Monolithic Perovskite/Perovskite/Silicon Triple-Junction Solar Cells: Fundamentals, Progress, and Prospects. Springer, Shanghai University.
- 2 Kangas, Emma. 2025. Perovskiitti- ja piipohjaisten aurinkokennojen hyötysuhteiden ja ympäristövaikutusten vertailu. Opinnäytetyö. Vaasan yliopisto.
- 3 Nurmesjärvi, Antti. 2018. Perovskiitti-aurinkokennoissa käytettävät orgaaniset materiaalit. Opinnäytetyö. Oulun yliopisto.
- 4 Ahoranta, J. Aurinkokenno. Alustava oppikirjamateriaali. Verkkoaineisto. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiak>. 31.1.2024. Luettu 20.8.2025.
- 5 Klaavo, Heikki. 2023. Perovskiittiaurinkopaneelien valmistus. Opinnäytetyö. Oulun yliopisto.
- 6 Lee, Hyeonseok; Moon, Taeho; Lee, Younghyun & Kim, Jinhyun. 2024. Structural Mechanisms of Quasi-2D Perovskites for Next-Generation Photovoltaics. Springer, Shanghai University.
- 7 Ma, Mengen; Zhang, Cuiling; Ma, Yujiao; Li, Weile; Wang, Yao; Wu, Shaohang; Liu, Chong & Mai, Yaohua. 2024. Efficient and Stable Perovskite Solar Cells and Modules Enabled by Tailoring Additive Distribution According to the Film Growth Dynamics. Springer, Shanghai University.
- 8 Priya, Panneerselvam & Stonier, Albert Alexander. 2025. Emerging innovations in solar photovoltaic (PV) technologies: The perovskite solar cells and more. Elsevier Ltd, Vellore.
- 9 Mahapatra, Ajay; Prochowicz, Dominik; Tavakoli, Mohammad Massoud; Trivedi, Saumil; Kumar, Pranav & Yadav, Pankaj. 2020. A review of aspects of additive engineering in perovskite solar cells. Journal of Materials Chemistry A, 8, 27–54. Royal Society of Chemistry. Verkkoaineisto. <<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ta/c9ta07657c>>. 5.12.2019. Luettu 25.8.2025.
- 10 Firefly Image 4 Ultra. 2025. Adobe.