



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Emma Kangas

Perovskiitti- ja piipohjaisten aurinkokennojen hyötysuhteiden ja ympäristövaikutusten vertailu

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Kandidaatintutkielma
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Emma Kangas		
Tutkielman nimi:	Perovskiitti- ja piipohjaisten aurinkokennojen hyötysuhteiden ja ympäristövaikutusten vertailu		
Tutkinto:	Tekniikan kandidaatti		
Oppiaine:	Sähkö- ja energiatekniikka		
Työn ohjaaja:	Anne Mäkiranta		
Valmistumisvuosi:	2025	Sivumäärä:	39

TIIVISTELMÄ:

Tässä tutkielmassa vertaillaan edistyneiden perovskiitti- ja perinteisten piipohjaisten aurinkokennojen hyötysuhteita ja ympäristövaikutuksia. Tutkielmassa tarkastellaan aurinkokennojen hyötysuhteita eri olosuhteissa, ja selvitetään, miten ympäristövaikutuksia voitaisiin pienentää. Tutkielmassa pohditaan aurinkokennojen haasteita ja tulevaisuuden kehityskohteita hyötysuhteiden ja ympäristövaikutusten näkökulmista.

Aihe on ajankohtainen, sillä hyötysuhteiden kehittyminen on keskeisessä roolissa aurinkokennojen kilpailukyvyyn parantamisessa, ja ympäristötekijät ovat tärkeässä roolissa kohti kestävämpää tulevaisuutta. Näiden lisäksi aurinkokennojen kysyntä on kasvamassa muun muassa Euroopan unionin ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi.

Perovskiittiaurinkokennot ovat uuden sukupolven aurinkokennoja, joiden potentiaali vaikuttaa lupaavalta. Perovskiittiaurinkokennoilla on alhaiset valmistuskustannukset ja korkeat hyötysuhteet verrattuna ensimmäisen sukupolven perinteisiin piipohjaisiin aurinkokennoihin. Perovskiitti soveltuu materiaalina erinomaisesti aurinkokennoihin, koska niiden kiderakenteella on kyky absorboida auringon säteilyä tehokkaasti eri aallonpituuksilla. Perovskiitin ominaisuudet tekevät siitä potentiaalisen kilpailijan perinteisten piipohjaisten aurinkokennojen rinnalle.

Piipohjaisilla aurinkokennoilla on vakiintunut rooli aurinkokennoteknologiassa, ja niiden tutkimus- ja valmistusmenetelmät ovat kehittyneet vuosikymmenien saatossa. Piipohjaiset aurinkokennot tarjoavat luotettavan suorituskyvyn, mutta niiden valmistuskustannukset ovat korkeat ja hyötysuhteet rajoittuneita. Piipohjaisilla aurinkokennoilla on edelleen markkinoiden johtava asema, mutta kehittyvät teknologiat haastavat niiden asemaa, ja luovat uusia mahdollisuuksia.

Ympäristövaikutukset ovat keskeinen osa aurinkokennojen kehitystä. On tärkeää tarkastella ympäristövaikutusten lähteitä, kuten valmistusmateriaaleja ja -menetelmiä. Materiaalien laatu ja turvallisuus vaikuttavat kaupalliseen käyttöön. Perovskiitilla on isoja haasteita kaupallistettavuudessa, sillä materiaali ei kestä kosteutta, ja sen sisältämä lyijy on myrkyllistä niin ympäristölle kuin ihmisille. Pii on materiaalina huomattavasti luotettavampaa, sillä se yhdistää vakaan suorituskyvyn, pitkän käyttöiän ja vähäiset ympäristövaikutukset.

Tutkielman johtopäätöksinä voidaan todeta, että perovskiittiaurinkokennoilla on korkeammat hyötysuhteet kuin piipohjaisilla aurinkokennoilla, mutta kuluttajille on saatavilla ainoastaan piipohjaisia aurinkokennoja. Perovskiittiaurinkokennojen kosteudenkestävyyden parantaminen ja lyijyn korvaaminen tarjoavat uusia tutkimusmahdollisuuksia, jotka saattavat ratkaista kennojen kaupallistamisen haasteet. On arvioitu, että aurinkokennojen ympäristövaikutukset tulevat pienentymään tulevaisuudessa.

AVAINSANAT: aurinkokennot, perovskiitti, pii, hyötysuhde, ympäristövaikutukset

Sisällys

1	Johdanto	6
1.1	Tutkielman tavoitteet ja tutkimuskysymykset	8
1.2	Tutkimusmenetelmä	9
2	Aurinkokennot	10
2.1	Perovskiitin edut ja haitat aurinkokennoteknologiassa	10
2.2	Yksi- ja monikiteisten piipohjaisten aurinkokennojen eroavaisuudet	11
3	Hyötysuhteiden vertailu	13
3.1	Perovskiittiaurinkokennojen hyötysuhteet laboratorio-olosuhteissa	13
3.2	Piipohjaisten aurinkokennojen hyötysuhteiden kehitys laboratorio-olosuhteissa	15
3.3	Hyötysuhteiden vertailua laboratorio-olosuhteissa olosuhteissa	17
3.4	Hyötysuhteiden vertailu kuluttajatuotteissa ja yksikiteisten piiaurinkokennojen hyötysuhteet eri olosuhteissa	18
4	Ympäristövaikutukset	21
4.1	Perovskiittiaurinkokennojen haasteet ja mahdollisuudet ympäristönäkökulmasta	22
4.2	Piipohjaisen aurinkokennojen ympäristövaikutukset	23
4.3	Ympäristövaikutusten vertailua	24
5	Pohdinta	27
6	Johtopäätökset	30
7	Yhteenveto	32
	Lähteet	34

Kuvat

- Kuva 1.** Kuutiomainen perovskiittikiderakenne, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ (Eames ja muut, 2015). 7
- Kuva 2.** Yksi- ja monikiteiset piiaurinkopaneelit. Huom. Kuva on luoto tekoälyä hyödyntäen kehotteella ”Luo yksi- ja monikiteiset piiaurinkopaneelit” (OpenAI, 2024). 12

Kuviot

- Kuvio 1.** Aurinkokennojen hyötysuhteet laboratorio-olosuhteissa (National Renewable Energy Laboratory, 2025). 18
- Kuvio 2.** Yksikiteisten piiaurinkokennojen hyötysuhteet (Aurinkopaneelikauppa, n.d.; Alma Solar, n.d.; Hintakaari, n.d.; Sun Gold Solar, 2025; Tuontitukku, n.d.; National Renewable Energy Laboratory, 2025). 20
- Kuvio 1.** Piipohjaisen aurinkokennon valmistusprosessi (mukaillen Ranjan ja muut, 2011, s 1440). 25

Taulukot

- Taulukko 1.** Perovskiittiaurinkokennojen hyötysuhteet (National Renewable Energy Laboratory, 2025). 15
- Taulukko 2.** Piipohjaisen aurinkokennojen hyötysuhteet (National Renewable Energy Laboratory, 2025). 17
- Taulukko 3.** Yksikiteisten piiaurinkokennojen hyötysuhteet kuluttajatuotteille (Aurinkopaneelikauppa, n.d.; Alma Solar, n.d.; Hintakaari, n.d.; Sun Gold Solar, 2025; Tuontitukku, n.d). 19
- Taulukko 4.** Perovskiitti- ja piipohjaisten aurinkokennojen elinkaaren vaiheet ja niiden ympäristövaikutukset (Bagher ja muut, 2015, s. 104; Ganesan & Valderrama, 2022, s. 1; Liu ja muut, 2021, s. 193; Llanos ja muut, 2020; Ren ja muut, 2024, s. 1; Ranjan ja muut, 2011, s. 1440; Tierno ja muut, 2024, s. 14; Winkless, 2020; Xakalash & Tangstad, 2012, s. 35). 26

Symbolit ja lyhenteet

A	Kationi yhdisteen keskellä
ABX_3	Yleinen perovskiittikiderakenteen kaava
B	Kationi oktaedrin keskellä
Bi	Vismutti
$CaTiO_3$	Kalsiumtitaanioksidi eli kalsiumtitanaatti
$CH_3NH_3^+$	Metyyliammoniumkationi
$CH_3NH_3PbI_3$	Metyyliammoniumlyijyjodidi
$CH_3NH_3PbX_3$	Metyyliammoniumlyijyhalogenidi
CIGS	Kupari-indium-gallium-seleeni
CO_2 -ekv/kWh	Hiilidioksidiekvivalenttia per kilowattitunti
Ge	Germanium
In	Indium
PbI_6	Lyijyjodidi-oktaedri
$P_{syöttö}$	Syötetty teho [W]
P_{tuotto}	Tuotettu teho [W]
Sb	Antimonia
Sn	Tina
TOPCon	Tunnel Oxide Passivated Contact
X	Ioni oktaedrin kulmassa
η	Hyötysuhde

1 Johdanto

Uusiutuvaa energiaa saadaan lähteistä, jotka eivät kulu loppuun tai uusiutuvat jatkuvasti. Uusiutuvia energialähteitä on pyritty kehittämään viime vuosina, sillä ne tarjoavat ympäristöystävällisemmän vaihtoehdon fossiilisille polttoaineille. Uusiutuvia energialähteitä ovat aurinko-, bio- ja geoterminen energia sekä tuuli- ja vesivoima. Uusiutuvat energialähteet ovat puhtaita ja ekologisia, ja niiden avulla pyritään hillitsemään ilmastonmuutosta. (U.S. Department of Energy, n.d.b)

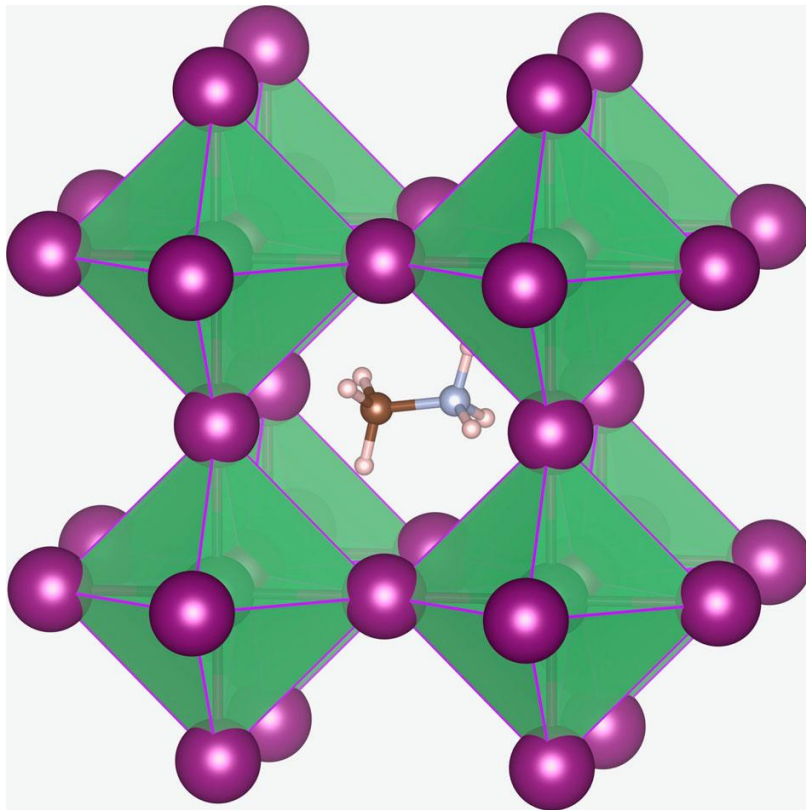
Tilastokeskuksen (2024) mukaan aurinkovoiman osuus Suomen sähkön hankinnasta ja kokonaiskulutuksesta vuonna 2023 on 0,9 %. Energiaviraston (2022) mukaan aurinkosähkön pientuotanto on kasvanut Suomessa voimakkaasti vuodesta 2015 lähtien, ja kapasiteetin lähes tuplaantuneen vuosien 2019 ja 2021 välillä.

Aurinkoenergia on tällä hetkellä nopeinten kasvava uusiutuvan energian lähde Euroopan unionin jäsenmaissa (European Commission, n.d.). Vuonna 2021 Euroopan unionissa sähkön bruttotuotannosta 5,5 % oli aurinkovoimalla tuotettua, ja tämän jälkeen tuotantokapasiteetti on jatkanut kasvuaan tasaisesti (European Commission, n.d.). Ennustetun kasvun myötä aurinkokennojen tutkimus on tullut entistä ajankohtaisemmaksi.

Aurinkokennojen hyötysuhteet ovat parantuneet ja kustannukset pienentyneet vuosien saatossa. Edistyneempiä aurinkokennotyyppejä on tullut markkinoille, ja perinteisiä piipohjaisia aurinkokennoja kehitetty entisestään. Ensimmäinen piipohjainen aurinkokenno julkaistiin vuonna 1954, jolloin sen hyötysuhde oli 4 % luokkaa. (Sahoo ja muut, 2018)

Perovskiiaurinkokennot ovat muuttaneet aurinkokennoteknologiaa. Ne tarjoavat yksinkertaisen valmistusprosessin, matalat valmistuskustannukset sekä kilpailukykyisen hyötysuhteen (Rong ja muut, 2018). Perovskiiaurinkokennot voivat parantaa aurinkokennoteknologian taloudellista kasvua, sekä mahdollistaa siirtymän tehokkaampiin ja edullisempiin vaihtoehtoihin, mikä tekee tutkimuksesta tärkeän ja ajankohtaisen.

Sanalla perovskiitti viitataan tiettyyn kiderakenteeseen, joka kuvataan yleisesti kaavalla ABX_3 , jossa A on yhdisteen keskellä sijaitseva kationi, B on oktaedrin keskellä oleva kationi ja X on oktaedrin kulman ioni (Moore & Wei, 2021). Kuvassa 1 on esitetty yhdisteen $CH_3NH_3PbX_3$ perovskiittikiderakenne (Eames ja muut, 2015). Kuvan 1 keskellä on metyylammoniumkationi $CH_3NH_3^+$, joka on ympäröity PbI_6 oktaedreilla (Eames ja muut, 2015).



Kuva 1. Kuutiomainen perovskiittikiderakenne, $CH_3NH_3PbX_3$ (Eames ja muut, 2015).

Perovskiittikiderakenne voidaan löytää esimerkiksi kalsiumtitaanioksidista eli kalsiumtitaanaattista $CaTiO_3$ (Sahoo ja muut, 2018). Kalsiumtitaanaatti on vanhin tunnettu perovskiittikiderakenteen omaava yhdiste, ja se löydettiin Ural-vuoristosta vuonna 1839 saksalaisen tiedemiehen Gustav Rosen toimesta (Yle, 2021). Mineralin tutkimista jatkoi mineralogi Lev Perovski, jonka mukaan perovskiitti on saanut nimensä (Yle, 2021). On ole-

massa useita muita yhdisteitä, joilla on samanlainen kiderakenne kuin kalsiumtitanaateilla, ja näiden kaikkien mineraalien kiderakenteita kutsutaan perovskiittikiderakenteiksi (Sahoo ja muut, 2018).

Perovskiittia alettiin hyödyntämään aurinkokennoteknologiassa 2000-luvulla. Vuonna 2009 Kojima ja hänen tiiminsä raportoivat ensimmäisestä perovskiittiaurinkokennosta, jonka hyötysuhde oli 3,8 %. Alhainen hyötysuhde ei aluksi herättänyt huomiota, mutta tutkimuksia päätettiin silti jatkaa. (Lee ja muut, 2020, s. 1)

1.1 Tutkielman tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tutkielmassa käsitellään aurinkokennojen toimintaa, jonka pohjalta voidaan syventyä hyötysuhteeseen ja ympäristövaikutuksiin. Tutkielman tavoitteena on vertailla edistyneiden perovskiittiaurinkokennojen hyötysuhteita ja ympäristövaikutuksia perinteisiin piipohjaisiin aurinkokennoihin nähden. Vertailu koskee sekä laboratorio-olosuhteissa valmistettuja aurinkokennoja että kaupallisia kuluttajatuotteita. Tutkielmassa selvitetään, ovatko perovskiittiaurinkokennojen hyötysuhteet parempia kuin perinteisten piipohjaisien aurinkokennojen hyötysuhteet, ja missä olosuhteissa. Tutkielmassa tarkastellaan myös aurinkokennojen ominaisuuksia hyötysuhteiden taustalla.

Ympäristövaikutukset ovat keskeinen osa kehittyvää yhteiskuntaa. Tämän vuoksi tutkielmassa vertaillaan aurinkokennojen ympäristövaikutuksia, kuten valmistusmenetelmiä ja -materiaaleja sekä aurinkokennojen elinkaarta. Tämän lisäksi pohditaan, miten aurinkokennojen ympäristövaikutuksia voitaisiin kehittää ja hallita, jotta ne tukisivat kestävämpää energiantuotantoa ja aiheuttaisivat mahdollisimman vähän ympäristön kuormittumista. Tavoitteena on selvittää, millaisia ympäristövaikutuksia aurinkokennoilla on, miten ne tulee ottaa huomioon käytännössä, ja millaisia jatkotutkimuksia ympäristövaikutuksille voidaan tehdä.

1.2 Tutkimusmenetelmä

Tämä tutkielma toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, jonka tarkoituksena on tarkastella ja koota yhteen aiempia tutkimuksia. Kirjallisuuskatsauksessa on tarkoituksena esitellä laajasti aiempia tutkimuksia ilman tiukkoja sääntöjä. Kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena ei ole testata hypoteeseja, vaan antaa selkeä kokonaiskuva aiheesta. Kirjallisuuskatsauksessa voidaan tarkastella aiheen historiaa ja kehitystä. Siinä voidaan myös yhdistellä eri näkökulmia ja tutkimuksia antaen laajan analyysin aiheesta. (Salminen, 2011, s. 9)

2 Aurinkokennot

Aurinkokennojen toiminta alkaa siitä, kun auringon sähkömagneettinen säteily osuu aurinkokennon pintaan. Säteily voi heijastua, absorboitua tai kulkea materiaalin läpi. Kun säteily absorboituu, se siirtää energiaa negatiivisesti varautuneisiin hiukkasiin eli elektroneihin. Tämä siirtynyt energia mahdollistaa elektronien sähkövirtauksen. Sähkövirta otetaan talteen aurinkokennojen johtavien metallikoskettimien avulla, ja siirretään verkkoon. (U.S. Department of Energy, n.d.a)

Aurinkokennot nimetään yleensä niissä käytetyn puolijohdemateriaalien mukaan. Aurinkokennot voidaan jakaa karkeasti kolmeen sukupolveen. Ensimmäisen sukupolven kennot ovat vanhimpia, ja ne valmistetaan yksi- tai monikiteisestä piistä. Toiseen sukupolveen kuuluvat ohutkalvokennot. Kolmannen ja samalla uusimman sukupolven kennot sisältävät edistyneempiä ohutkalvoteknologioita, ja esimerkiksi perovskiittiaurinkokennot kuuluvat tähän sukupolveen. (Bagher ja muut, 2015, s. 95)

2.1 Perovskiitin edut ja haitat aurinkokennoteknologiassa

Perovskiittiaurinkokennot ovat edullisia ja yksinkertaisia valmistaa. Valmistusprosessissa käytetään yksinkertaisia kemiallisia tekniikoita. Prosessi aloitetaan liuottamalla perovskiittiyhdiste liuottimeen. Tämän jälkeen liuos pinnoitetaan, jonka aikana perovskiitti alkaa kiteytymään ja muodostaa tiiviin kalvon. Kiteytyminen tapahtuu matalassa lämpötilassa, sillä perovskiittiyhdisteillä on vahvoja ionisia vuorovaikutuksia sekä matala kiteytymislämpötila. Kiteytyminen viimeistellään, jotta muodostuneet tyhjiöt ja mahdolliset virheet saadaan poistettua. Kennolle tehdään vielä liuotinuutto, jolla poistetaan alkuperäinen liuotin, ja näin jäljelle jää tasainen perovskiittikalvo. (Bagher ja muut, 2015, s. 104)

Perovskiittiaurinkokennojen ongelmana on materiaalin heikko stabiilisuus, sillä ne voivat hajota helposti tavallisissa ympäristöolosuhteissa, ja menettävät tehokkuuttaan ajan myötä. Perovskiittimateriaalit ovat herkkiä kosteudelle, ja yksikin pisara vettä voi tuhota materiaalin. Keskustelua on herättänyt myös perovskiittiaurinkokennojen lyijypitoisuus.

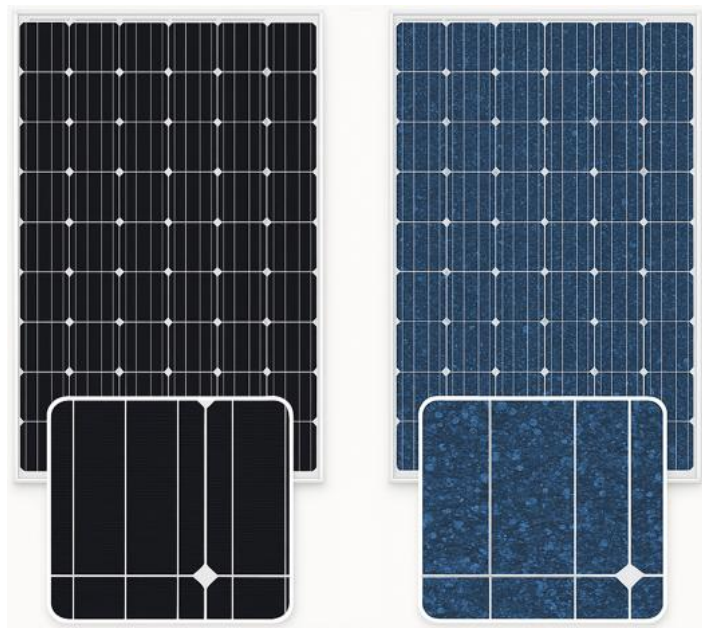
Yksi valmistuksessa käytettävä materiaali on lyijyhalidi, joka on haitallista ihmisille ja ympäristölle. (Bagher ja muut, 2015, s. 105)

Perovskitiin mineraalirakenteella on poikkeuksellisen hyvä kyky absorboida sähkömagneettista säteilyä, ja sen vuoksi se soveltuu erinomaisesti aurinkokennoihin (Sahoo ja muut, 2018). Positiivisena ongelmana on se, että perovskiteilla on jopa liian suuria kais-tavälejä, mikä tarkoittaa, ettei säteilyn kaikkea energiaa pystytä hyödyntämään optimaalisesti tehokkaasti (Chen ja muut, 2017).

2.2 Yksi- ja monikiteisten piipohjaisten aurinkokennojen eroavaisuudet

Piipohjaiset aurinkokennot ovat vanhimpia ja tunnetuimpia aurinkokennoja maailmassa, ja ne kattavat noin 90 % markkinoilla olevista aurinkokennoista. Piipohjaisia aurinkokennotyyppejä on erilaisia, ja ne luokitellaan yleensä joko yksi- tai monikiteisiin piiaurinkokennoihin. (Andreani ja muut, 2019)

Yksi- ja monikiteisen piiaurinkokennot eroavat toisistaan sekä ulkoisesti että ominaisuuksiltaan. Ulkoisesti yksikiteinen piiaurinkokenno on väriltään musta ja rakenteeltaan tasainen, kun puolestaan monikiteinen on väriltään sinertävän harmaa, ja sillä on epätasainen pinta (Dobrzański ja muut, 2013). Kuvassa 2 on vasemmalla yksikiteinen- ja oikealla monikiteinen piiaurinkopaneeli (OpenAI, 2024). Kuvasta 2 nähdään, että yksikiteinen piiaurinkopaneeli on hyvin tasainen ja yhtenäinen rakenteeltaan, mikä parantaa sen hyötysuhdetta ja kestävyyttä. Monikiteinen piiaurinkopaneeli sen sijaan on rakenteeltaan hyvin kiteinen, mikä heikentää sen hyötysuhdetta.



Kuva 2. Yksi- ja monikiteiset piiaurinkopaneelit. Huom. Kuva on luoto tekoälyä hyödyntäen kehoitteella ”Luo yksi- ja monikiteiset piiaurinkopaneelit” (OpenAI, 2024).

Piin olomuoto on huoneenlämmössä kiinteä ja sulamispiste $1414\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Royal Society of Chemistry, 2025). Monikiteiset piit valmistetaan kaatamalla nestemäistä piitä lohkoihin. Kun materiaali jähmettyy, syntyy monikiteisiä soluja. Monikiteisen piin pinta ei ole täydellinen, minkä vuoksi monikiteisillä piiaurinkokennoilla ei ole yhtä korkea hyötysuhde kuin yksikiteisillä piiaurinkokennoilla. Koska monikiteisten piiaurinkokennojen hyötysuhde on hieman matalampi kuin yksikiteisellä piillä, tuottavuutta pystytään kompensoimaan lisäämällä pinta-alaa. Tämä on huomioitava aurinkokennojen valinnassa, mikäli tilaa on rajoitetusti tarjolla. Monikiteiset piiaurinkokennot ovat kuitenkin yksinkertaisempia ja edullisempia valmistaa kuin yksikiteiset piikennot. (Sinovoltaics, 2020)

Monikiteisillä piiaurinkokennoilla on alhaisempi lämmönsietokyky kuin yksikiteisillä piiaurinkokennoilla, ja korkeiden lämpötilojen ennustetaan heikentävän monikiteisten piiaurinkokennojen käyttöikä. Mikäli valoa on saatavilla heikosti, monikiteisten piiaurinkokennojen tehokkuus laskee huomattavasti. Yksikiteisillä piiaurinkokennoilla odotetaan olevan yli 25 vuoden käyttöikä, ja ne toimivat paremmin niin korkeissa lämpötiloissa kuin heikossa valaistuksessa. (Geotherm, n.d.)

3 Hyötysuhteiden vertailu

Aurinkokennojen hyötysuhde lasketaan kennosta ulos tuotetun sähkön määränä verrattuna kennoon säteilevän sähkömagneettisen säteilyenergian määrään. Hyötysuhde osoittaa, kuinka tehokkaasti aurinkokenno pystyy muuntamaan auringonvalon sähköenergiaksi. Aurinkokennolla tuotetun sähkön määrä riippuu saatavilla olevan valon ominaisuuksista, kuten intensiteetistä ja aallonpituudesta sekä itse kennon suorituskykyominaisuuksista. (U.S. Department of Energy, n.d.a)

Hyötysuhde voidaan laskea kaavalla 1, jossa aurinkokennon tuottama teho jaetaan aurinkokennon pinnalle saapuvan auringon säteilyn teholla, ja kerrotaan sadalla. Hyötysuhde voidaan ilmoittaa prosentteina tai desimaalilukuna, esimerkiksi 20 % tai 0,20. Kaavan 1 tuloksena hyötysuhde ilmoitetaan prosentteina. (Sunpaneeli, 2023)

$$\eta = \frac{P_{\text{tuotto}} [\text{W}]}{P_{\text{syöttö}} [\text{W}]} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

Mikäli teoreettisessa ideaalitulossa laite pystisi muuntamaan kaiken syötetyn energian haluttuun muotoon, hyötysuhde olisi 100 %. Tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, sillä prosessissa syntyy aina hukkaenergiaa, joka voi johtua esimerkiksi lämpöhävikistä tai muista epäideaalisista tekijöistä. Energian muuntamisen hyötysuhde jää siis käytännössä aina alle ideaalitulon, eikä syntyvää hukkaenergiaa voida välttämättä hyödyntää. (Madhavan, 2021, s. 49)

3.1 Perovskiittiaurinkokennojen hyötysuhteet laboratorio-olosuhteissa

National Renewable Energy Laboratory (2025) on kerännyt ja ylläpitänyt dataa tutkimusaurinkokennojen hyötysuhteen kehittymisestä vuodesta 1976 lähtien. Hyötysuhteet on vahvistettu riippumattomien testilaboratorioiden toimesta, ja tulokset on raportoitu kansainvälisten standardien mukaisesti (National Renewable Energy Laboratory, 2025).

Perivskiittiaurinkokennojen hyötysuhde on kehittynyt nopeasti. Vuonna 2009 on mitattu ensimmäisen $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ -pohjaisen perovskiittiaurinkokennon hyötysuhteeksi 3,8 % (Kojima ja muut, 2009). Yli 10 % hyötysuhde saavutettiin vuonna 2013 (U.S. Department of Energy, n.d.a). Kesäkuussa 2024 LONGi Green Energy Technology Co. Ltd, jota kutsutaan nimellä LONGi, ilmoitti mitanneensa sertifioitun 34,6 % hyötysuhteen perovskiittipii-tandem-aurinkokennolla (LONGi, 2024).

Perovskiittiyhdisteiden monipuolisuuden vuoksi yksiselitteistä hyötysuhdemaksimia on vaikea määrittää, sillä perovskiittiaurinkokennojen rakenne ja materiaalit voivat vaihdella, ja erilaisia yhdistelmiä voidaan käyttää. Hyötysuhdetta voidaan tutkia ja kehittää laboratorio-olosuhteissa, jolloin on mahdollista saada korkeampia hyötysuhdelukemia kuin luonnollisessa ympäristössä tehdyissä mittauksissa.

Vuonna 2025 yksiliitosperovskiittiaurinkokennolla saavutettiin 26,7 % hyötysuhde, joka on National Renewable Energy Laboratoryn sertifioima. Tämän hyötysuhteen saavuttivat Kiinan tiede- ja teknologiayliopiston tutkijat, ja tulos on mitattu laboratorio-olosuhteissa. Yksiliitosperovskiittiaurinkokennojen hyötysuhteen kehittymistä on tarkasteltu vuodesta 2013 lähtien, ja se on kehittynyt tasaisesti vuosien aikana. (Baker, 2025)

Tutkijat ovat yhdistäneet perinteistä ja uutta teknologiaa luoden perovskiittipii-tandem-aurinkokennon. Pii tarjoaa aurinkokennolle vakaan ja luotettavan perustan, kun puolestaan perovskiitti tuo aurinkokennoon monipuolisuutta ja mukautuvuutta. Tandem-aurinkokennoilla pystytään kehittämään hyötysuhdetta teoreettisten maksimilukemien läheisyydessä. Tällä perovskiittipii-tandem-yhdistelmällä on pystytty mittaamaan 34,6 % hyötysuhde vuonna 2024. Tämän hyötysuhteen saavutti LONGi, ja se on National Renewable Energy Laboratoryn sertifioima mittaustulos. (Baker, 2025)

Taulukossa 1 tarkastellaan eri perovskiittiaurinkokennojen hyötysuhteita National Renewable Energy Laboratoryn ilmoittamien mittaustulosten mukaan (National Renewable Energy Laboratory, 2025). Mittaustuloksista on poimittu eri perovskiittiaurinkokennojen

uusimmat mittausennätykset, ja mittausvuosi on ilmoitettu suluissa tuloksen yhteydessä (National Renewable Energy Laboratory, 2025). Taulukosta 1 huomataan, että sertifioidut mittaustulokset ovat hyötysuhteiltaan 24,6 %–34,6 % välillä, ja mittaukset on suoritettu vuosien 2023–2025 aikana. Hyötysuhdelukemat ovat kilpailukykyisiä, ja viime vuosina tehdyt mittaukset kertovat siitä, että perovskiittiaurinkokennoille tehdään aktiivista tutkimus- ja kehitystyötä.

Taulukko 1. Perovskiittiaurinkokennojen hyötysuhteet (National Renewable Energy Laboratory, 2025).

Aurinkokennotyyppi (tarkennus)	Hyötysuhde [%] (mittausvuosi)	Mittausorganisaatio
Perovskiitti-pii (hybridi tandem)	34,6 (2024)	LONGi
Perovskiitti-tandem	30,1 (2023)	Nanjing University / Renshine Solar
Perovskiitti	27,0 (2025)	Soochow University / University of New South Wales
Yksiliitosperovskiitti	26,7 (2025)	University of Science and Technology China
Perovskiitti/CIGS (hybridi tandem)	24,6 (2025)	Helmholtz-Zentrum Berlin

3.2 Piipohjaisten aurinkokennojen hyötysuhteiden kehitys laboratorioolosuhteissa

1980-luvulla piipohjaisten aurinkokennojen kehitys on tuottanut onnistuneita mittauksia laboratorioolosuhteissa. Solu- ja testausmenetelmät kehittyivät, minkä vuoksi aurinkokennojen hyötysuhteita saatiin nostettua. Kustannukset olivat vielä 1980-luvulla kuluttajille hyvin korkeita, mikä vaikutti aurinkokennojen suosion vähyyteen. Kansainvälistä au-

rinkospektriä alettiin päivittämään, ja se saatiin valmiiksi vuoteen 2008 mennessä. Aurinkosäteilyn spektrin määritelmiä ja standardeja päivitettiin kansainvälisesti hyväksytyiksi. (Green, 2009)

Kiteisen piipohjaisen aurinkokennojen hyötysuhde saavutti 25,0 % rajan vuonna 2014 Australian New South Walesin yliopistossa, mikä oli historiallisesti merkityksellinen saavutus. Lähes samaan aikaan Japanissa ja USA:ssa päästiin myös 25 % hyötysuhteeseen. 25 % hyötysuhteen rajaa on pidetty merkittävänä saavutuksena aurinkokennoteknologiassa, ja sen saavuttaminen on osoittanut, että aurinkokennot pystyvät kilpailemaan muiden uusiutuvien energialähteiden kanssa. (Battaglia ja muut, 2016)

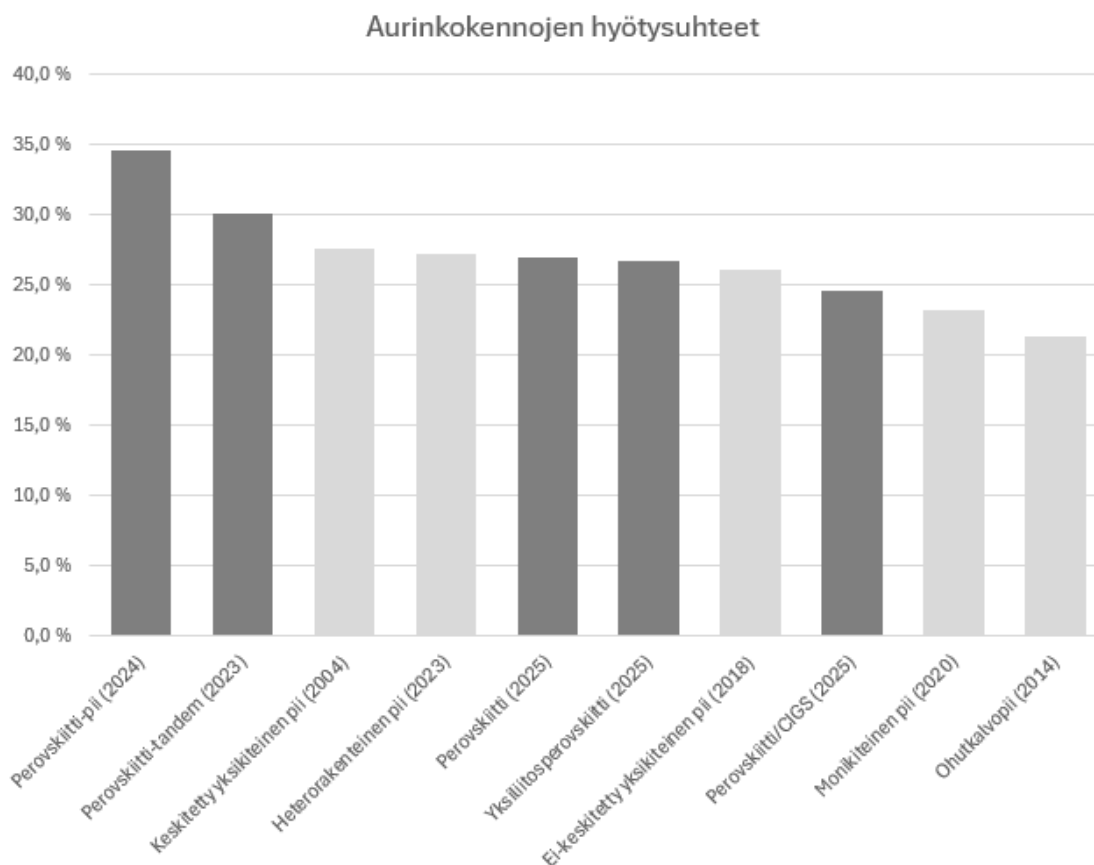
National Renewable Energy Laboratory on kerännyt dataa yksikiteisen piiaurinkokennojen hyötysuhteen kehittymisestä vuodesta 1976 alkaen. Taulukkoon 2 on koottu National Renewable Energy Laboratoryn ilmoittamien tulosten mukaan uusimmat sertifioidut hyötysuhteet piipohjaisille aurinkokennoille. Taulukosta 2 nähdään, että keskitetylle yksikiteiselle piille on viimeisin mittaustulos kirjattu vuonna 2004, jolloin hyötysuhteeksi on saatu 27,6 %. Puolestaan ei-keskitetylle yksikiteiselle piille on kirjattu vuonna 2018 hyötysuhde 26,1 %. Monikiteiselle piille on merkitty vuonna 2020 hyötysuhde 23,3 %. Heterorakenteiselle piille on mitattu hyötysuhde 27,3 % vuonna 2023, ja ohutkalvopiikennolle on mitattu 21,2 % hyötysuhde vuonna 2014. (National Renewable Energy Laboratory, 2025)

Taulukko 2. Piipohjaisen aurinkokennojen hyötysuhteet (National Renewable Energy Laboratory, 2025).

Aurinkokennotyyppi	Hyötysuhde [%] (mittausvuosi)	Mittausorganisaatio
Keskitetty yksikiteinen pii	27,6 (2004)	Amonix
Ei-keskitetty yksikiteinen pii	26,1 (2018)	Institute for Solar Energy Research
Monikiteinen pii	23,3 (2020)	JinkoSolar
Heterorakenteinen pii	27,3 (2023)	LONGi
Ohutkalvopii	21,4 (2014)	SolarFron

3.3 Hyötysuhteiden vertailua laboratorio-olosuhteissa olosuhteissa

Perovskiitti- ja piipohjaisten aurinkokennojen hyötysuhteissa on eroavaisuuksia sertifioiduissa laboratorio-olosuhteissa tehdyissä mittauksissa. Kuviossa 1 on esitetty National Renewable Energy Laboratoryn ilmoittamat sertifioidut hyötysuhteet, jotka on ilmoitettu myös taulukoissa 1 ja 2. Kuvioon 1 on merkitty tummanharmaalla perovskiittiaurinkokennojen hyötysuhteet ja vaaleanharmaalla piipohjaisen aurinkokennojen hyötysuhteet. Kuvioista 1 näemme, että kaksi korkeinta hyötysuhdetta on kirjattu perovskiittiaurinkokennoille, ja kaksi matalinta piipohjaisille aurinkokennoilla. Kuvioon 1 on merkitty sulkeisiin hyötysuhteen mittausvuosi. Kuvioista 1 käy ilmi, että perovskiittiaurinkokennojen hyötysuhteiden mittaukset ovat huomattavasti uudempia kuin piipohjaisten aurinkokennojen. Perovskiittiaurinkokennojen mittaukset on tehty vuosien 2023–2025 välillä, kun puolestaan piipohjaisten ilmoitetut hyötysuhteet on mitattu vuosien 2004–2023 välillä. Ilmoitetuilla mittaustuloksilla on jopa kahdenkymmenen vuoden ero.



Kuvio 2. Aurinkokennojen hyötysuhteet laboratorio-olosuhteissa (National Renewable Energy Laboratory, 2025).

3.4 Hyötysuhteiden vertailu kuluttajatuotteissa ja yksikiteisten piiaurinkokennojen hyötysuhteet eri olosuhteissa

U.S. Department of Energy (n.d.) toteaa, että perovskittiaurinkokennoilla on useita haasteita ratkaistavana ennen kuin ne voivat kehittyä kaupallisesti kilpaileviksi aurinkokennoiksi, ja sen vuoksi niitä ei ole vielä suurilla markkinoilla. Puolalaisella SAULE Technologies -yrityksellä on kuitenkin myynnissä perovskittiaurinkomoduuleja korkealla hyötysuhteella, jota ei ilmoiteta tarkkana lukuna (Saule Technologies, 2025).

Suomessa kuluttajille on myynnissä lähinnä piipohjaisia aurinkokennoja. Suomalaisissa verkkokaupoissa ei ole ilmoitettu myynnissä olevista perovskittiaurinkokennoista. Tuontitukku (n.d.) myy esimerkiksi yksikiteisiä piiaurinkokennoja hyötysuhteilla 22 %. Heillä

on myynnissä myös monikiteisiä aurinkokennoja, mutta niiden hyötysuhdetta ei ole ilmoitettu lukuna. Hintakaarella (n.d.) on myynnissä yksikiteisiä piiaurinkokennoja, joille luvataan hyötysuhteeksi 20,7 % (Hintakaari, n.d.). Aurinkopaneelikaupalla (n.d.) on myynnissä yksikiteisiä piiaurinkokennoja, joille hyötysuhteeksi on ilmoitettu 20,8–22,3 %. Aurinkopaneelikauppa tarjoaa myös monikiteisiä piiaurinkokennoja, mutta niiden hyötysuhdetta ei ole ilmoitettu.

Pääosin Euroopassa toimiva Alma Solar myy yksikiteisiä aurinkokennoja kuluttajille, ja he lupaavat hyötysuhteeksi yli 20–22,3 % (Alma Solar, n.d.). Kiinalainen Sun Gold Solar -yhtiö lupaa yksikiteisille piiaurinkokennoilleen yli 22,7 % hyötysuhteen (Sun Gold Solar, 2025).

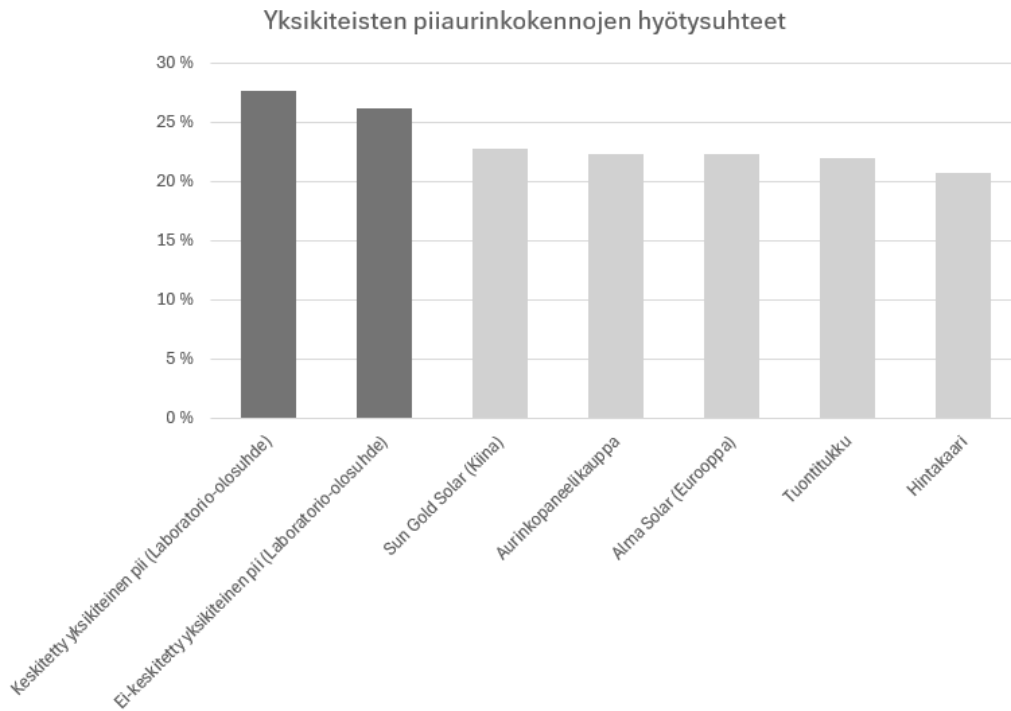
Taulukossa 3 on yksikiteisten piiaurinkokennojen kuluttajatuotteiden hyötysuhteet. Yrityksen nimen perässä on ilmoitettu suluissa yrityksen toiminta-alue, ellei se ole Suomi. Taulukosta nähdään, että kuluttajatuotteiden hyötysuhteet ovat noin 20 %–23 % välillä.

Taulukko 3. Yksikiteisten piiaurinkokennojen hyötysuhteet kuluttajatuotteille (Aurinkopaneelikauppa, n.d.; Alma Solar, n.d.; Hintakaari, n.d.; Sun Gold Solar, 2025; Tuontitukku, n.d.).

Yrityksen nimi (toiminta-alue)	Hyötysuhde
Sun Gold Solar (Kiina)	22,7 %
Aurinkopaneelikauppa	20,8–22,3 %
Alma Solar (Eurooppa)	20–22,3 %
Tuontitukku	22 %
Hintakaari	20,7 %

Kuvioon 2 on kerätty yritysten ilmoittamat yksikiteisten piiaurinkokennojen hyötysuhteet sekä kaksi laboratorio-olosuhteessa mitattua hyötysuhdetta. Kuviossa 2 vertaillaan kahta laboratorio-olosuhteessa tehtyä hyötysuhdelukemaa viiteen kuluttajatuotteen hyötysuhteeseen. Kuluttajatuotteista kolme lukemaa on ilmoitettu Suomen markkinoilla, yksi Euroopassa ja yksi Kiinassa. Kuvioon 2 on merkitty sulkuihin joko ilmoitus laboratorio-

olosuhteessa tehdystä mittauksesta tai kuluttajatuotteen toiminta-alueesta, ellei se ole Suomi. Kuluttajatuotteiden hyötysuhteet ovat hyvin samaa luokkaa, mutta laboratorio-olosuhteissa on saavutettu korkeampia hyötysuhteita.



Kuvio 3. Yksikiteisten piiaurinkokennojen hyötysuhteet (Aurinkopaneelikauppa, n.d.; Alma Solar, n.d.; Hintakaari, n.d.; Sun Gold Solar, 2025; Tuontitukku, n.d.; National Renewable Energy Laboratory, 2025).

Kuluttajien näkökulmasta markkinoita hallitsee selkeästi piipohjaiset aurinkokennot, joiden hyötysuhteeksi luvataan noin 20 %–23 %. Laboratorio-olosuhteissa piipohjaisille aurinkokennoille on mitattu korkeampia hyötysuhdelukemia, mutta erot eivät ole merkittäviä, kun otetaan huomioon kaikki piipohjaiset aurinkokennot yksikiteisten piiaurinkokennojen lisäksi.

4 Ympäristövaikutukset

Aurinkokennojen ympäristövaikutuksia on tärkeää tarkastella, jotta kehitystä voidaan viedä oikeaan suuntaan. Euroopan unioni on asettanut kunnianhimoisen tavoitteen vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 55 % vuoteen 2030 mennessä (Euroopan parlamentti, 2018). Toinen tavoite on saavuttaa ilmastonutraalisuus vuoteen 2050 mennessä (Euroopan parlamentti, 2018). Nämä tavoitteet kertovat nykyisestä ilmastotilasta ja tarpeesta siirtyä kohti kestävämpiä ratkaisuja.

Aurinkoenergia on uusiutuva energialähde, mutta sen tuotanto- ja valmistusmenetelmillä on ympäristövaikutuksia. Aurinkoenergian käytöstä syntyvät ympäristövaikutukset ovat yleensä pieniä, ja niihin pyritään löytämään aktiivisesti kestävämpiä ratkaisuja. Ympäristön kuormittuminen vaihtelee aurinkokennojen määrästä ja sijainnista riippuen. Suurimmat ympäristöhaitat arvioidaan olevan visuaalisia tai asennuksesta aiheuttavasta melusta johtuvia. (Tsoutsos ja muut, 2005)

Aurinkokennojen päästöt johtuvat pääosin kennojen valmistusprosesseista. Aurinkokennojen valmistusprosessissa tarkastellaan erityisesti niiden energiaintensiivisyyttä, jonka arvioidaan olevan suurin hiilidioksidipäästöjen aiheuttaja. Aurinkokennojen valmistusvaiheissa päästöt syntyvät pääosin sähkön kulutuksesta. Piipohjaisten aurinkokennojen valmistuksella on hyvin korkea energiaintensiivisyys, sillä piin sulamispiste on 1414 °C. (Mohamed ja muut 2016)

Perovskiittiaurinkokennojen valmistuksessa 80 % energiankulutuksesta on peräisin grafeenisista läpinäkyvistä elektrodeista. Grafeenipohjaisten elektrodien valmistusprosessi on energiaintensiivinen, ja sen vuoksi aurinkopaneelien kokonaishiilijalanjälki nousee. Yleisesti perovskiittiaurinkokennojen valmistus on kuitenkin vähemmän energiaintensiivistä verrattuna piipohjaisiin kennoihin, koska perovskiittiaurinkokennot voidaan valmistaa matalissa lämpötiloissa, kun piipohjaiset voivat vaatia jopa yli tuhannen celsiusasteen lämpötilan. (Cellura ja muut, 2023)

4.1 Perovskiittiaurinkokennojen haasteet ja mahdollisuudet ympäristönäkökulmasta

Perovskiittiaurinkokennoja ei ole kaupallistettu, koska niillä on haasteita turvallisuudessa ja vakaudessa. Keskeisin haaste on ollut perovskiiitin sisältämä lyijy. Lyijy on tärkeä osa perovskiittikiderakennetta, mutta se on myrkyllistä ja voi aiheuttaa vakavia ympäristö- ja terveyshaittoja. Lyijylle on pyritty löytämään korvaavia materiaaleja. Vaihtoehtoina on kokeiltu esimerkiksi tinaa (Sn), germaniumia (Ge), vismuttia (Bi), antimonia (Sb) ja indiumia (In). Lyijyä on koitettu korvata myös osittain, mutta sekään ei ole tuottanut toivottuja tuloksia. Tinapohjainen ja täysin lyijytön perovskiittiaurinkokenno on osoittanut hiukan potentiaalia, mutta sen saavuttama hyötysuhde on ollut hieman yli 6 %, joka ei ole kilpailukykyinen lukema. Täysin lyijyttömissä perovskiittiaurinkokennoissa on haasteeksi osoittautunut myös valmistusprosessi, sillä lyijyttömien perovskiittien kiteytymisen poikkeaa tavallisten lyijyhalidiperovskiittien kiteytymisestä. Poikkeuksellinen kiteytymisprosessi vaatii tarkempaa tutkimusta sekä valmistusprosessien soveltamista. (Zhang ja muut, 2018)

Uusien tutkimusten kohteena on ollut perovskiittiaurinkokennojen materiaalin vakauttaminen, mikä edistäisi aurinkokennojen kaupallistamista ja pienentäisi kierrätystarvetta. Perovskiittiaurinkokennot koostuvat ioneista, jotka kärsivät herkästi ionimigraatiosta (Nazir ja muut, 2022, s. 37). Ionimigraatio lyhentää aurinkokennojen käyttöikää ja heikentää vakautta. Toinen vakauttamisen haaste on ollut faasierottelu, jonka seurauksena aurinkokennojen rakenteet eriytyvät ja tasapaino heikentyy (Nazir ja muut, 2022, s. 37). Nämä vakauttamisen haasteet vaikuttavat aurinkokennojen suorituskyvyn alenemiseen, ja lyhentävät niiden käyttöikää. Tämä lisää tarvetta aurinkokennojen uusimiselle, ja uusien aurinkokennojen valmistaminen aiheuttaa lisää päästöjä.

Perovskiittiaurinkokennoilla on todettu olevan haasteita rajapintojen varaustenkuljetuksessa (Nazir ja muut, 2022, s. 2). Osa varaustenkuljettajista ei läpäise materiaalin rajapintaa, mikä vaikuttaa negatiivisesti aurinkokennon energiantuotantoon (Nazir ja muut, 2022, s. 2). Heikompi energiantuotanto vaatii enemmän aurinkokennoja, mikä nostaa

niiden valmistusmäärän tarvetta ja sen seurauksena myös ympäristövaikutuksia. Muita haasteita on ollut perovskiittiliuoksen tunkeutumisessa väriin kerrokseen. Tätä on tapahtunut erityisesti hiilipohjaisella perovskiittiaurinkokennolla. Liuoksen tunkeutuminen väriin kerrokseen heikentää aurinkokennojen rajapintojen toimintaa sekä rakenteita (Nazir ja muut, 2022, s. 4). Rakenteellisten haasteiden korjaaminen parantaisi sekä aurinkokennojen teknisiä ominaisuuksia että vähentäisi ympäristön kuormittumista.

Vaikka perovskiittiaurinkokennoilla on vielä paljon kehitettävää ennen tuotteen kaupallistamista, sillä on myös paljon potentiaalia tulevaisuuden energiaratkaisuna. Perovskiittiaurinkokennojen valmistus tapahtuu yleensä matalissa lämpötiloissa, mikä takaa edulliset tuotantokustannukset ja pienet ympäristövaikutukset. Perovskiittiaurinkokennoilla on laboratorio-olosuhteissa saavutettu keskimääräisesti korkeammat hyötysuhteet kuin piipohjaisilla aurinkokennoilla. On arvioitu, että tulevaisuudessa perovskiittiaurinkokennojen materiaalivalinnat tulevat kehittymään ja rakenteet parantumaan. Tutkimuksia on tehty esimerkiksi tandemrakenteisille perovskiiteille, ja ne ovat osoittaneet uusia mahdollisuuksia nostaa hyötysuhdetta ja kehittää aurinkokennoja. (Ahmed ja muut, 2015)

4.2 Piipohjaisen aurinkokennojen ympäristövaikutukset

Piipohjaisilla aurinkokennoilla on jo hyvin vakiintuneet teknologiat ja tuotantomenetelmät, jotka mahdollistavat laajan kaupallisen käytön. Nämä kennot ovat saavuttaneet kilpailukykyiset hyötysuhteet ja ovat taloudellisesti kannattavia. Kuitenkin kehitysmahdollisuuksia on edelleen ympäristönäkökulmasta. Piipohjaisten aurinkokennojen ympäristövaikutuksia on tutkittu suhteellisen vähän verrattuna muihin aurinkokennoihin, vaikka piipohjaiset aurinkokennot ovat vanhimpia kaupallisesti käytettyjä aurinkokennoja (Cellura ja muut, 2023).

Ympäristövaikutuksia voidaan pienentää parantamalla aurinkokennojen teknisiä ominaisuuksia ja näin ollen vähentää raaka-aineiden kulutusta ja kierrätystarvetta. Piipohjaisia aurinkokennoja voitaisiin kehittää muun muassa passivointimenetelmien ja soluraken-

teiden osalta. Passivointikerrosten hyödyntäminen on osoittautunut tutkimuksissa tehokkaaksi tavaksi kasvattaa hyötysuhdetta (Li ja muut, 2024, s. 1). Yleisellä tasolla passivointikerrosten käyttö parantaisi kantajaselektiivisyyttä ja vähentäisi pintarekombinaatiota (Li ja muut, 2024, s. 1). Tämä puolestaan nostaisi aurinkokennojen käyttöikää ja pidentäisi elinkaarta.

Dopanttien, kuten boorin ja fosforin, käyttöön liittyy ympäristöriskejä. Raaka-aineiden kaivaminen aiheuttaa ympäristöriskejä ja myrkyllisiä aineita voi vapautua luontoon. Dopantittomien kontaktien käyttöä on tutkittu, ja ne voisivat tarjota uuden tavan parantaa materiaalien optisia ja sähköisiä ominaisuuksia. Dopantittomien kontaktien käytön kehittämällä voi olla useita vaikutuksia ympäristöön, ja niiden avulla voidaan vähentää ympäristön kuormittumista. (Li ja muut, 2024, s. 2)

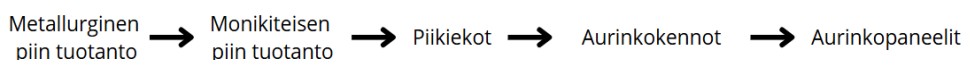
Hyötysuhdetta pystytään kehittämään TOPCon-solujen avulla (Li ja muut, 2024, s. 7). Hyötysuhteen kasvattaminen teoreettiseen maksimiin vähentäisi aurinkosähkön tuottamiseen käytettävien materiaalien määrää ja valmistusprosessin ympäristövaikutuksia, kuten hiilidioksidipäästöjä ja kaivostoiminnan vaikutuksia.

4.3 Ympäristövaikutusten vertailua

Perovskiitti- ja piipohjaisissa aurinkokennoissa on merkittäviä eroja käytetyissä materiaaleissa ja valmistustekniikoissa. Eri aurinkokennotyypeillä on myös erilaisia ympäristövaikutuksia, jotka voivat vaihdella hiilijalanjäljen, raaka-aineiden käytön ja valmistusprosessin mukaan.

Korkeat suorituskyvyt saavuttaneet perovskiittiaurinkokennot valmistetaan metyyliammoniumlyijyjodidista (Llanos ja muut, 2020). Piin pääraaka-aineet ovat puhdistettu kvartsi, hiilimusta ja erittäin puhtaat elektrodit (Xakalash & Tangstad, 2012, s. 35). Ympäristövaikutuksia näillä raaka-aineilla on lyijyn myrkyllisyys sekä kvartsin ja elektrodien louhinta.

Perovskii aurinkokennot valmistetaan matalissa lämpötiloissa, jolloin ympäristön kuormitus on vähäistä. Ne valmistetaan yleensä liuottamalla (Bagher ja muut, 2015, s. 104). Uutena menetelmänä on testattu lyhyitä infrapunasäteilypulsseja (Winkless, 2020). Piipohjaiset aurinkokennot valmistetaan kuvion 3 mukaisesti, jolloin lämpötilat ovat korkeita ja prosessi on energiaintensiivinen (Ranjan ja muut, 2011, s. 1440).



Kuvio 4. Piipohjaisen aurinkokennon valmistusprosessi (mukaiillen Ranjan ja muut, 2011, s. 1440).

Kiteisen piin tekninen käyttöikä on 25 vuotta, ja jotkut valmistajat takaavat 30 vuoden käyttöiän (Ganesan & Valderrama, 2022, s. 1). Todellinen käyttöikä piipohjaisille aurinkokennoilla on 0–50 vuotta (Ganesan & Valderrama, 2022, s. 1). Vakaiden perovskii aurinkokennojen käyttöikä on ollut yli 10 000 tuntia valaistuksessa, mutta kaupallisille tuotteille vaaditaan 20 vuoden käyttöikää (Ren ja muut, 2024, s. 1).

Perovskii aurinkokennojen materiaalit erotellaan liuottamalla ja erottelemalla, ja eri materiaalit kierrätetään erikseen (Liu ja muut, 2021, s. 193). Haasteena kierrätyksessä on erityisesti myrkyllinen lyijy (Liu ja muut, 2021, s. 193). Piipohjaiset aurinkokennot kierrätetään poistamalla metallit, ja eri materiaalit kierrätetään asianmukaisilla menetelmillä (Tierno ja muut, 2024, s. 14).

Taulukossa 4 vertaillaan perovskii- ja piipohjaisten aurinkokennojen ympäristövaikutuksia eri elinkaaren vaiheissa. Taulukossa 4 vertaillaan pääraaka-aineita, valmistusprosesseja, aurinkokennojen käyttöikää, kierrätysmenetelmiä, ja sulkuihin on merkitty niiden ympäristövaikutukset.

Taulukko 4. Perovskiitti- ja piipohjaisten aurinkokennojen elinkaaren vaiheet ja niiden ympäristövaikutukset (Bagher ja muut, 2015, s. 104; Ganesan & Valderrama, 2022, s. 1; Liu ja muut, 2021, s. 193; Llanos ja muut, 2020; Ren ja muut, 2024, s. 1; Ranjan ja muut, 2011, s. 1440; Tierno ja muut, 2024, s. 14; Winkless, 2020; Xakalashé & Tangstad, 2012, s. 35).

Elinkaaren vaihe	Perovskiittiaurinkokennot (ympäristövaikutus)	Piipohjaiset aurinkokennot (ympäristövaikutus)
Pääraaka-aineet	Metyyliammoniumlyijydidi (lyijyn myrkyllisyys)	Kvartsi, hiilimusta ja erittäin puhtaat elektrodit (kaivostoiminta)
Valmistusprosessi	Liuottaminen, lyhyt infrapunasäteilypulssi (matala lämpötila, matala energiaintensiivisyys)	Metallurginen piin tuotanto, monikristallisen piin valmistus, piikiekkujen valmistus (korkeat lämpötilat, korkea energiaintensiivisyys)
Käyttöikä	Yli 10 000 h (lyhytikäinen, kierrätyksen ja uusien aurinkokennojen tarve)	Tekninen: 25 vuotta Todellinen: 0–50 vuotta (pitkä elinkaari)
Kierrätys	Arvokkaiden materiaalien talteenotto ja myrkyllisten metallien kierrätys (lyijyn myrkyllisyys)	Useita menetelmiä, metallit erikseen (edistynyt kierrätys)

Aurinkokennojen ympäristövaikutukset tulevat alenemaan vuosien saatossa, ja tämä johtuu muun muassa kennojen hyötysuhteen kehittymisestä ja materiaalivalintojen parantumisesta. Ympäristövaikutuksia merkittävästi laskeva tekijä on oikeanlainen kierrätys ja elinkaarijärjestelmät. Kennojen pitkä käyttöikä parantaa niiden elinkaaren aikaisia ympäristöhöyötyjä, sillä pidempi toiminta-aika mahdollistaa suuremman energian tuotannon suhteessa alkuperäisiin ympäristövaikutuksiin. Tandem-kennot ovat ympäristön kannalta edullisia, mikäli niiden vuosittainen hyötysuhteen aleneminen ei ylitä 1 %, kun taas yksikiteisten kennojen osalta vastaava raja on 3 %. (van der Hulst ja muut, 2024)

5 Pohdinta

Tässä tutkielmassa on tavoitteena vertailla perovskiitti- ja piipohjaisten aurinkokennojen hyötysuhteita ja ympäristövaikutuksia kokoamalla yhteen aiempia tutkimuksia. Hyötysuhteista saatavilla olevia tutkimuksia on rajoitetusti, ja niissä viitataan usein National Renewable Energy Laboratoryn sertifioituihin tuloksiin. Lähteissä ei havaittu ristiriitoja keskenään, ja ne tarjosivat johdonmukaista tietoa aurinkokennojen hyötysuhteista ja niiden kehityksestä. Eri lähteistä saadut tiedot ja luvut tukivat toisiaan ja vahvistivat näin tutkimuksen tuloksia.

Piipohjaisten aurinkokennojen hyötysuhteista lähteitä oli paremmin saatavilla. Tämä johtuu siitä, että niitä on tutkittu ja kehitetty huomattavasti kauemmin kuin uuden sukupolven perovskiittiaurinkokennoja. Piipohjaisille aurinkokennoille on ilmoitettu hyötysuhteita niin kaupallisilta tahoilta kuin laboratorio-olosuhteista tehdyistä mittauksista, mitkä laajentavat tutkielman kokonaiskuvaa piipohjaisten aurinkokennojen osalta. Piipohjaisten aurinkokennojen hyötysuhde-ennätykset laboratorio-olosuhteissa on mitattu vuosien 2004–2023 välillä, mikä kertoo niiden kehityksen hidastumisesta. Laboratoriossa mitatut hyötysuhteet ovat sertifioituja, joten mittaukset ovat luotettavia. Kaupallisten tahojen ilmoittamia hyötysuhdelukemia ei voida vahvistaa, mutta ne asettuvat kaikki 20 %–23 % välille, joten tulokset ovat linjassa keskenään.

Perovskiittiaurinkokennojen hyötysuhteet pohjautuvat täysin sertifioituihin laboratorio-olosuhteissa tehtyihin mittauksiin, minkä vuoksi vertailu niiden osalta rajoittuu vain tiettyyn olosuhteeseen. Tutkielmassa kävi ilmi, että perovskiittiaurinkokennoilla on keskimääräisesti korkeammat hyötysuhteet kuin piipohjaisilla aurinkokennoilla, mikä oli odotusten mukaista. Perovskiittiaurinkokennoille täytyy tehdä jatkotutkimuksia, sillä kuluttajille ei ole vielä tarjolla luotettavaa tuotetta. Tämä puute estää perovskiittiaurinkokennojen vertailun kuluttajien näkökulmasta.

Laboratorio-olosuhteissa pystytään vaikuttamaan hyötysuhdemittauksien olosuhteisiin paremmin kuin luonnollisessa käyttöympäristössä. Olosuhteista pystytään muokkaamaan ihanteelliset säätämällä tilan lämpötilaa, kosteutta ja valon intensiteettiä. Nämä tekijät vaikuttavat aurinkokennojen suorituskykyyn, eivätkä vastaa todellisia käyttöolosuhteita. Laboratorio-olosuhteissa tehtyä hyötysuhdevertailua voidaan käyttää suuntaa antavana pohjana, mutta sitä ei voida hyödyntää suoraan käytäntöön, sillä käytännön olosuhteet ovat erilaiset. Tämän lisäksi aurinkokennojen tehokkuus saattaa heikentyä esimerkiksi pölyn, lian ja säätilan seurauksena.

Tutkielman tavoitteena on vertailla myös aurinkokennojen ympäristövaikutuksia. Aurinkokennoilla on yleisessä kuvassa hyvin vähän negatiivisia ympäristövaikutuksia, mutta niiden tutkimukset osoittautuvat suppeiksi, mikä rajoittaa laajan kokonaiskuvan luomista. Aurinkoenergia on uusiutuva energialähde, mutta aurinkokennojen valmistusprosesseilla ja materiaaleilla on ympäristövaikutuksia. Piipohjaisten- ja perovskiittiaurinkokennojen ympäristövaikutuksilla havaittiin joitakin eroja.

Piipohjaisten aurinkokennojen osalta tulokset ovat yhtenäisiä, ja tutkimuksissa todettiin, että niiden valmistusprosessi on hyvin energiaintensiivinen. Suuria haasteita ympäristövaikutusten näkökulmasta piipohjaisille aurinkokennoille ei muuten ilmennyt. Arvioidaan, että piipohjaisten aurinkokennojen ympäristövaikutuksia on tutkittu vähän suhteessa siihen, kuinka kauan niitä on valmistettu ja kehitetty.

Piipohjaisten aurinkokennojen materiaalit ovat kehittyneet ja niitä pystytään kierrättämään ympäristöystävällisesti. Piipohjaisten aurinkokennojen tutkimuksia olisi hyvä jatkaa energiaintensiivisyyden parissa, sillä valmistuslämpötilat ovat yleisesti korkeita jotta tuen piin korkeasta sulamispisteestä. Olisi hyvä tarkastella myös, miten päästöjä ja kairostoimintaa voitaisiin vähentää pitkällä aikavälillä, ja pystyttäisiinkö materiaaleja kierrättämään entistä tehokkaammin. Yleisesti piipohjaisten aurinkokennojen valmistusprosessi on tehokas ja ympäristövaikutukset ovat hallinnassa.

Perovskiittiaurinkokennoilla on ympäristönäkökulmasta sekä potentiaalia että haasteita, mikä oli odotettavaa. Keskeisimmiksi haasteiksi nousi lyijyn myrkyllisyys, heikko kosteudensietokyky, ionimigraatio ja faasierottelu. Nämä nousivat esille useissa eri tutkimuksissa, eikä potentiaalisia ratkaisuja ole vielä löydetty.

On tärkeää huomata, että perovskiittiaurinkokennoilla on myös valtavaa potentiaalia ympäristön näkökulmasta. Perovskiittiaurinkokennojen valmistus tapahtuu alhaisissa lämpötiloissa, mikä tekee valmistuksesta edullista ja energiatehokasta. On todettu, että perovskiittiaurinkokennojen laboratorio-olosuhteissa saavuttamat hyötysuhteet ovat aurinkokennoteknologian parhaimpia. Matalista valmistuslämpötiloista ja korkeista hyötysuhteista mainittiin useissa eri tutkimuksissa, ja havainnot ovat linjassa keskenään.

Tutkimusasetelmana oli, että perovskiittiaurinkokennoilla olisi korkeammat hyötysuhteet kuin piipohjaisilla aurinkokennoilla. Tämä asetelma ei kuitenkaan vaikuttanut lopputuloksiin, sillä useat eri lähteet tukivat perovskiittiaurinkokennojen korkeampia hyötysuhteita.

Ennen tutkielman aloittamista olisi voinut selvittää paremmin perovskiittiaurinkokennojen haasteita kaupallisten aurinkokennojen osalta, sillä niiden puute rajoitti tutkimusta etenkin hyötysuhteiden vertailussa. Tutkielmaan saatiin kuitenkin vertailua hyötysuhteista kuluttajien näkökulmasta piipohjaisten aurinkokennojen osalta.

Perovskiitti- ja piipohjaisilla aurinkokennoilla on ympäristönäkökulmasta omat haasteensa sekä mahdollisuudet, ja niiden suora vertailu ei ole yksiselitteistä. Yleisesti ympäristövaikutusten, kuten materiaalien ja valmistusprosessien, vertailu onnistui. Lähteitä ympäristövaikutuksista oli heikosti saatavilla, mikä rajoittaa tutkimusta.

6 Johtopäätökset

Tässä tutkielmassa vertaillaan perovskiitti- ja piipohjaisia aurinkokennoja niiden hyötysuhteiden ja ympäristövaikutusten näkökulmasta. Tutkielman keskeisenä löydöksenä voidaan todeta, että perovskiittiaurinkokennot ovat saavuttaneet laboratorio-olosuhteissa korkeampia hyötysuhteita kuin perinteiset piipohjaiset aurinkokennot. Tämän lisäksi tärkeä havainto on, ettei perovskiittiaurinkokennoja ole vielä saatavilla kuluttajille, vaan kuluttajamarkkinoilla on tarjolla ainoastaan piipohjaisia aurinkokennoja. Perovskiittimateriaalin monipuolisuus tarjoaa potentiaalia parantaa entisestään hyötysuhdetta, mikä voi tehdä niistä kilpailukykyisiä markkinoilla.

Ympäristövaikutuksia vertaillen perovskiittiaurinkokennojen valmistus on vähemmän energiantensiivistä kuin piipohjaisten aurinkokennojen. Ero johtuu pääosin valmistuslämpötiloista. Perovskiittiaurinkokennojen kaupallistamisen haasteena on lyijyn myrkyllisyys ja heikko kosteudensietokyky. Lyijyn korvaaminen on ollut useiden tutkimusten kohteena, mutta ne eivät ole tuottaneet odotettuja tuloksia hyötysuhteen kannalta. Näiden haasteiden ratkaiseminen parantaisi perovskiittiaurinkokennojen ympäristövaikutuksia ja mahdollistaisi niiden kaupallisen käytön.

Piipohjaiset aurinkokennot ovat ympäristön ja kaupallisuuden näkökulmista vakaita, mutta niiden hyötysuhteet eivät ole yhtä korkeita laboratorio-olosuhteissa kuin perovskiittiaurinkokennoilla. Piipohjaisten aurinkokennojen kehityksessä voidaan parantaa ympäristövaikutuksia esimerkiksi passivointikerroksilla ja dopantittomilla kontakteilla, mikä vähentäisi raaka-aineiden kulutusta ja valmistusprosessin ympäristövaikutuksia.

Perovskiittiaurinkokennojen tutkimus on vielä kesken, mutta niiden potentiaali korkeiden hyötysuhteiden ja matalan valmistusenergian kannalta ovat lupaavia. Näiden vuoksi perovskiittiaurinkokennojen tutkimus ja kehitys voivat tarjota merkittävän edistysaskelen aurinkokennoteknologiassa. Jos kaupallistamisen haasteet saadaan ratkaistua, perovskiittiaurinkokennot voivat tarjota huomattavia etuja ympäristön ja talouden näkökulmista.

Tämän tutkielman johtopäätöksiä voidaan todeta:

- Perovskiittiaurinkokennojen hyötysuhteet ovat laboratorio-olosuhteissa keskimääräisesti korkeampia kuin piipohjaisten aurinkokennojen.
- Piipohjaiset aurinkokennot tarjoavat kuluttajille kilpailukykyisen hyötysuhteen ja kohtuulliset ympäristövaikutukset.
- Kuluttajille ei ole saatavilla perovskiittiaurinkokennoja.
- Perovskiittiaurinkokennoissa käytetään myrkyllistä lyijyä, eikä materiaali kestä kosteutta, mitkä rajoittavat niiden kaupallistamista.
- Piipohjaisten aurinkokennojen valmistus on energiantensiivisempää kuin perovskiittiaurinkokennojen johtuen niiden valmistuslämpötilaeroista.
- Aurinkokennojen valmistusprosessin energiantensiivisyys lisää kasvihuonekaasupäästöjä sekä kuormittaa ympäristöä.
- Ennusteiden mukaan aurinkokennojen ympäristöhaitat tulevat pienenevän vuosien saatossa hyötysuhteiden ja teknologian kehittyessä.

7 Yhteenveto

Tutkielman tavoitteena on vertailla perovskiitti- ja piipohjaisten aurinkokennojen hyötysuhteita ja ympäristövaikutuksia. Tutkielmassa ei ollut tarkoituksena tehdä mittauksia, vaan vertailla hyötysuhteita ja ympäristövaikutuksia aiempien tutkimusten pohjalta, ja koota yhteen eri tutkimuksien tuloksia. Tutkielma toteutettiin kirjallisuuskatsauksena perustuen useisiin eri tutkimuksiin.

Perovskiitti- ja piipohjaisilla aurinkokennoilla on eroavaisuuksia hyötysuhteissa. Piipohjaiset aurinkokennot ovat vakiintuneet kaupallisessa käytössä, ja ne pystyvät tarjoamaan kilpailukykyisiä hyötysuhteita. Piipohjaisten aurinkokennojen valmistusprosessit ovat kuitenkin hyvin energiantensiivisiä sekä vaativat raaka-aineiden kaivamista ja käsittelyä, jotka aiheuttavat ympäristön kuormittumista.

Perovskiittiaurinkokennojen hyötysuhteet laboratorio-olosuhteissa ovat keskimääräisesti piipohjaisia aurinkokennoja korkeampia. Perovskiittiaurinkokennojen kaupallistaminen on vielä kesken, sillä aurinkokennoissa on tärkeitä puutteita turvallisuudessa. Tuotteen kaupallistaminen vaatii lyijyn korvaamista turvallisimmilla materiaaleilla sekä materiaalin vakauden kehittämistä.

Molemmat aurinkokennoteknologiat tarjoavat tulevaisuudessa mahdollisuuksia parantaa energiatehokkuutta ja alentaa ympäristövaikutuksia. Piipohjaisten aurinkokennojen osalta kehitystä olisi hyvä jatkaa hyötysuhteen parantamisella ja ympäristövaikutusten vähentämisellä esimerkiksi passivointikerroksilla ja dopantittomilla kontakteilla. Perovskiitti aurinkokennojen osalta tutkimusten olisi hyvä keskittyä materiaalien vakauden ja lyijyn korvattavuuden haasteisiin. Yhteisesti voidaan todeta, että molemmat aurinkokennot tarjoavat potentiaalia kohti kestävämpää energiantuotantoa.

Perovskiitti- ja piipohjaisten aurinkokennojen ympäristövaikutukset eroavat pääosin niiden valmistusprosessien ja käytettyjen materiaalien osalta. Piipohjaisten aurinkokenno-

jen valmistus on hyvin energiaintensiivistä piin korkean sulamispisteen vuoksi, mutta kehityksellä on saavutettu riittävän korkeat hyötysuhteet taloudellisesti kannattavaan massatuotantoon. Tämä tekee piipohjaisista aurinkokennoista kaupallisesti luotettavan vaihtoehdon. Piipohjaisten aurinkokennojen ympäristövaikutukset, kuten energiaintensiivisyys, kaivostoiminta ja materiaalien käyttö, voivat aiheuttaa ympäristöhaittoja.

Perovskiittiaurinkokennojen valmistus on vähemmän energiaintensiivistä verrattuna piipohjaisiin aurinkokennoihin, mutta sen kaupallistamisprosessi on vielä kesken. Lyijyä on pyritty korvaamaan vähemmän myrkyllisillä materiaaleilla, mutta tehokasta ratkaisua ei ole vielä löydetty. Perovskiittiaurinkokennojen osalta haasteet liittyvät myös materiaalin vakauden heikkenemiseen ja käyttöikänsä, mikä lisää tarvetta uusien aurinkokennojen tilalle.

Yhteenvetona voidaan todeta, että molemmat aurinkokennot tarjoavat mahdollisuuksia vähentää ympäristövaikutuksia, erityisesti hyötysuhteen parantamisen ja materiaalien kehittämisen avulla. Perovskiittiaurinkokennojen osalta lyijyn korvattavuus ja materiaalien vakauden parantaminen ovat keskeisiä kehityskohteita, kun taas piipohjaisissa aurinkokennoissa passivointimenetelmät ja dopanttien vähentäminen voivat pienentää ympäristövaikutuksia. Kestävän kehityksen kannalta on tärkeää, että kierrätysratkaisut ja elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset otetaan huomioon, jotta molempien aurinkokennojen ympäristöhaitat voidaan minimoida.

Lähteet

- Ahmed, M. I., Javaid, S. S., Habib, A., & Pang, S. (2015, 1. heinäkuuta). Perovskite Solar Cells: Potentials, Challenges, and Opportunities. *International journal of photoenergy*, (2015), 1–13. Noudettu 22.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1155/2015/592308>
- Alma Solar. (n.d.). *Solar panels*. Noudettu 21.3.2025 osoitteesta <https://www.alma-solarshop.com/235-solar-panels>
- Andreani, L. C., Bozzola, A., Kowalczewski, P., Liscidini, M., & Redorici, L. (2019). Silicon solar cells: Toward the efficiency limits. *Advances in physics: X*, 4(1), 1548305. Noudettu 18.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1080/23746149.2018.1548305>
- Aurinkopaneelikauppa. (n.d.). *Aurinkopaneelit*. Noudettu 21.3.2025 osoitteesta https://www.aurinkopaneelikauppa.fi/epages/aurinkopaneelikauppa.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/20120903-11092-142553-1/Categories/%22Aurinkos%C3%A4hk%C3%B6%C3%A4%20akkuun%2012/24V%22/Aurinkopaneelit
- Bagher, A. M., Vahid, M. M. A., & Mohsen, M. (2015, 21. elokuuta). Types of Solar Cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics*. Vol. 3, No. 5, 2015, s. 94–113. Noudettu 13.4.2025 osoitteesta https://barghnews.com/files/fa/news/1397/10/27/72825_110.pdf
- Baker, F. (n.d.). *Highest efficiency perovskite solar cells*. Noudettu 26.3.2025 osoitteesta <https://www.ossila.com/pages/highest-efficiency-perovskite-solar-cell>
- Battaglia, C., Cuevas, A., & De Wolf, S. (2016, 11. helmikuuta). *High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives*. *Energy & Environmental Science*. 9, s.1552–1576. Noudettu 26.3.2025 osoitteesta <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2016/ee/c5ee03380b>
- Cellura, M., Luu, L. Q., Guarino, F., & Longo, S. (2023, 20. lokakuuta). A review on life cycle environmental impacts of emerging solar cells. *The Science of the total environment*, 908, 168019. Noudettu 22.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168019>

- Chen, Z., Dong, Q., Liu, Y., Bao, C., Fang, Y., Lin, Y., . . . Huang, J. (2017, 1. joulukuuta). Thin single crystal perovskite solar cells to harvest below-bandgap light absorption. *Nature communications*, 8(1), 1890–7. Noudettu 19.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02039-5>
- Dobrzański, L. A., Szczesna, M., Szindler, M., & Drygała, A. (2013, 4. kesäkuuta). *Electrical properties mono-and polycrystalline silicon solar cells*, 59(2), 67–74. Noudettu 12.4.2025 osoitteesta http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol59_2/5922.pdf
- Eames, C., ja muut. (2015). *CH₃NH₃PbI₃ structure*. Noudettu 18.3.2025 osoitteesta https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CH3NH3PbI3_structure.png
- Euroopan parlamentti. (2018, 19. kesäkuuta). *Uusiutuva energia: Euroopan kunnianhimoiset tavoitteet*. Noudettu 22.3.2025 osoitteesta <https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20171124STO88813/uusiutuva-energia-euroopan-kunnianhimoiset-tavoitteet>
- European Commission. (n.d.). *Solar energy*. Noudettu 21.3.2025 osoitteesta https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/solar-energy_en
- Ganesan, K., & Valderrama, C. (2022, 13. tammikuuta). Anticipatory life cycle analysis framework for sustainable management of end-of-life crystalline silicon photovoltaic panels. *Energy (Oxford)*, 245, 123207. Noudettu 13.4.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123207>
- Geotherm. (n.d.). *Polycrystalline Solar Cells vs Monocrystalline: Which is Better?* Noudettu 26.3.2025 osoitteesta <https://www.geothermhvac.com/mono-vs-poly-better/>
- Green, M. A. (2009). The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution. *Progress in photovoltaics*, 17(3), 183–189. Noudettu 12.4.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1002/pip.892>
- Hintakaari. (n.d.) [Hakusana: Aurinkopaneeli]. Noudettu 21.3.2025 osoitteesta <https://www.hintakaari.fi/s/search/?keywords=aurinkopaneeli>

- Energiavirasto (2022, 20. kesäkuuta). *Aurinkosähkön kapasiteetti kasvoi Suomessa yli 100 megawattia vuonna 2021*. Noudettu 19.3.2025 osoitteesta <https://energia-virasto.fi/-/aurinkosahkon-kapasiteetti-kasvoi-suomessa-yli-100-megawattia-vuonna-2021>
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009, 6. toukokuuta). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the American Chemical Society*, 131(17), 6050. Noudettu 26.3.2025 osoitteesta <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja809598r>
- Lee, S.-W., Bae, S., Kim, D., & Lee, H.-S. (2020, 9. lokakuuta). Historical Analysis of High-Efficiency, Large-Area Solar Cells: Toward Upscaling of Perovskite Solar Cells. *Advanced materials (Weinheim)*, 32(51), e2002202-n/a. Noudettu 21.3.2025 osoitteesta <https://onlinelibrary-wiley-com.proxy.uwasa.fi/doi/epdf/10.1002/adma.202002202>
- Li, W., Xu, Z., Yan, Y., Zhou, J., Huang, Q., Xu, S., ... & Hou, G. (2024, 1. huhtikuuta). Passivating contacts for crystalline silicon solar cells: an overview of the current advances and future perspectives. *Advanced Energy Materials*, 14(18), 2304338. Noudettu 12.4.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1002/aenm.202304338>
- Liu, F., Biesold, G., Zhang, M., Lawless, R., Correa-Baena, J., Chueh, Y., & Lin, Z. (2021, maaliskuu). Recycling and recovery of perovskite solar cells. *Materials today (Kidlington, England)*, 43, 185–197. Noudettu 13.4.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.11.024>
- Llanos, M., Yekani, R., Demopoulos, G. P., & Basu, N. (2020, 3. elokuuta). Alternatives assessment of perovskite solar cell materials and their methods of fabrication. *Renewable & sustainable energy reviews*, 133, 110207. Noudettu 14.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110207>
- LONGi. (2024, 18. kesäkuuta). *34.6%! Record-breaker LONGi once again sets a new world efficiency for silicon-perovskite tandem solar cells*. Global News. Noudettu 19.3.2025 osoitteesta <https://www.longi.com/en/news/2024-snec-silicon-perovskite-tandem-solar-cells-new-world-efficiency/>

- Madhavan, G. (2021). Efficiency. *Science and Technology*, 37(2), 49. Noudettu 26.3.2025 osoitteesta <https://research-ebsco-com.proxy.uwasa.fi/c/slwlh3/viewer/pdf/g64ygpevgz?route=details>
- Mohamed, N. M., Zaine, S. N. A., & Ramli, R. M. (2016, 8. lokakuuta). Evaluation of CO₂ emission from dye solar cell panel production process. *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1778, No. 1). AIP Publishing. Noudettu 12.4.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1063/1.4965731>
- Moore, K., & Wei, W. (2021, 18 maaliskuuta). Applications of carbon nanomaterials in perovskite solar cells for solar energy conversion. *Nano materials science*, 3(3), 276–290. Noudettu 21.3.2025 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589965121000167#fig1>
- National Renewable Energy Laboratory. (2025, 3. huhtikuuta). *Best research-cell efficiency chart*. U.S. Department of Energy. Noudettu 13.4.2025 osoitteesta <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- Nazir, G., Lee, S. Y., Lee, J. H., Rehman, A., Lee, J. K., Seok, S. I., & Park, S. J. (2022, 9. marraskuuta). Stabilization of Perovskite Solar Cells: Recent Developments and Future Perspectives. *Advanced materials (Weinheim)*, 34(50), e2204380-n/a. Noudettu 12.4.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1002/adma.202204380>
- OpenAI. (2024). ChatGPT (10.4.2024) [Yksi- ja monikiteiset piiaurinkopaneelit]. Noudettu 13.4.2025 osoitteesta <https://chat.openai.com/chat>
- Ranjan, S., Balaji, S., Panella, R. A., & Ydstie, B. E. (2011, 10. elokuuta). Silicon solar cell production. *Computers & Chemical Engineering*, 35(8), 1439–1453. Noudettu 13.4.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.04.017>
- Ren, F., Lu, Q., Meng, X., Zhou, J., Chen, R., Wang, J., ... & Chen, W. (2024, heinäkuu). Accelerating the evaluation of operational lifetimes of perovskite solar cells and modules. *Journal of Energy Chemistry*, 94, 1–9. Noudettu 13.4.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2024.02.045>

- Rong, Y., Hu, Y., Mei, A., Tan, H., Saidaminov, M. I., Seok, S. I., ... & Han, H. (2018, 21. syyskuuta). Challenges for commercializing perovskite solar cells. *Science*, 361(6408), eaat8235. Noudettu 17.3.2025 osoitteesta <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.aat8235>
- Royal Society of Chemistry. (2025). Silicon. *Periodic Table*. Noudettu 26.3.2025 osoitteesta <https://www.rsc.org/periodic-table/element/14/silicon>
- Sahoo, S. K., Manoharan, B., & Sivakumar, N. (2018). Introduction: Why Perovskite and Perovskite Solar Cells? Teoksessa Sabu, T., Aparna, T., & Thankappan, A. Perovskite photovoltaics (s. 1–24). Academic Press. Noudettu 12.4.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812915-9.00001-0>
- Salminen, A. (2011). *Mikä kirjallisuuskatsaus?* University of Vaasa. Noudettu 21.3.2025 osoitteesta https://www.uwasa.fi/materiaali/pdf/isbn_978-952-476-349-3.pdf
- Saule Technologies. (2025). *PRODUCT CATALOG. PEROVSKITE PV MODULES FOR IOT DEVICES AND CONSUMER ELECTRONIC DEVICES*. Noudettu 21.3.2025 osoitteesta <https://sauletech.com/wp-content/uploads/2025/01/Product-Catalog-Saule.pdf>
- Sinovoltaics. (2020, 8. lokakuuta). *Polycrystalline silicon cells: Production and characteristics*. Noudettu 26.3.2025 osoitteesta <https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/polycrystalline-silicon-cells-production-and-characteristics/>
- Sun Gold Solar. (2025). *Product Specifications*. Noudettu 21.3.2025 osoitteesta https://www.sungoldsolar.com/flexible-solar-panel/tf/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA5eC9BhAuEiwA3CKwQsUmFVqedMdys-NKRWaxRqj8dhXLvwc0JKEmdAyrAmkFAE3I4maladhoCybQQAvD_BwE#
- Sunpaneeli. (2023, 12. syyskuuta). *Aurinkopaneelien hyötysuhde*. Noudettu 26.3.2025 osoitteesta <https://sunpaneeli.fi/aurinkopaneelien-hyotysuhde/>
- Tierno, M., Hernández Ruiz, J., Taboada, S., Díez, E., Rodríguez, A., Caballero, L. J., . . . del Cañizo, C. (2024-05-15). Validation of recycling processes for demetallisation and recrystallisation of silicon solar cells. *Solar energy*, 274, 112533. Noudettu 13.4.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112533>
- Tilastokeskus (2024). *Energia*. Noudettu 13.4.2025 osoitteesta https://stat.fi/tup/suoluk/suoluk_energia.html

- Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy policy*, 33(3), 289–296. Noudettu 22.3.2025 osoitteesta [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00241-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00241-6)
- Tuontitukku. (n.d.). *Aurinkopaneelit*. Noudettu 21.2.2025 osoitteesta <https://www.tuontitukku.fi/rakentaminen-ja-varastointi/sahkotarvikkeet/aurinkopaneelitarvikkeet/aurinkopaneelit/c/610101/>
- U.S. Department of Energy. (n.d.a). *Perovskite solar cells*. U.S. Department of Energy. Noudettu 10.4.2025 osoitteesta <https://www.energy.gov/eere/solar/perovskite-solar-cells>
- U.S. Department of Energy. (n.d.b). *Renewable Energy*. Noudettu 9.4.2025 osoitteesta <https://www.energy.gov/eere/renewable-energy>
- van der Hulst, M. K., Magoss, D., Massop, Y., Veenstra, S., van Loon, N., Dogan, I., ... Hauck, M. (2024). Comparing Environmental Impacts of Single-Junction Silicon and Silicon/Perovskite Tandem Photovoltaics-A Prospective Life Cycle Assessment. *ACS sustainable chemistry & engineering*, 12(23), 8860. Noudettu 22.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c01952>
- Winkless, L. (2020, maaliskuu). Breakthrough in rapid manufacturing of perovskite solar cells. *Materials today (Kidlington, England)*, 33, 1. Noudettu 14.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.01.016>
- Xakalashé, B. S., & Tangstad, M. (2012, huhtikuu). Silicon processing: from quartz to crystalline silicon solar cells. *Chem Technol*, (April), 32–7. Noudettu 13.4.2025 osoitteesta <https://www.pyro.co.za/Mintek/Files/2012Xakalashé.pdf>
- Yle. (2021, 24. maaliskuuta). *Tulostetaanko tehokasta aurinkopaneelia kohta seiniin, kattoihin ja ikkunoihin?* Noudettu 21.3.2025 osoitteesta <https://yle.fi/aihe/a/20-309378>
- Zhang, Q., Hao, F., Li, J., Zhou, Y., Wei, Y., & Lin, H. (2018). Perovskite solar cells: must lead be replaced—and can it be done? *Science and Technology of advanced Materials*, 19(1), 425–442. Noudettu 22.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1080/14686996.2018.146017>