



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**PEROVSKIITTAURINKOKENNOJEN
ELINKAAREN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET**

Milla Hänninen

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Kandidaatintutkielma

Maaliskuu 2022

TIIVISTELMÄ

Perovskiittiaurinkokennojen elinkaaren ympäristövaikutukset

Milla Hänninen

Oulun yliopisto, Prosessi- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintutkielma 2022, 40 s.

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Ari Vuokila

Kandidaatintutkielmani tavoitteena oli selvittää perovskiittiaurinkokennojen elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia. Työ suoritettiin kirjallisuuskatsauksena aiheeseen liittyvään kirjallisuuteen sekä elinkaariarviointeja tehneisiin tutkimuksiin perustuen. Kirjallisuuteen pohjautuen selvitettiin aurinkokennoteknologioiden nykytila sekä tulevaisuuden suuntaukset. Erityistä huomiota kiinnitettiin perovskiittiaurinkokennojen ominaisuuksiin, valmistusmenetelmiin ja -materiaaleihin sekä vallitseviin elinkaaren ympäristövaikutusten arviointimenetelmiin ja erityisesti elinkaariarviointiin.

Työssä tarkasteltiin lähemmin tyypillisten rakenteiden ja tandemkennojen elinkaariarviointeja kyseisen menetelmän eri vaiheiden avulla, jotka ovat tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, inventaarioanalyysi, vaikutustenarviointi ja tulosten tulkinta. Lisäksi keskeisimmät tulokset koottiin yhteen ja pohdittiin tehtyjen rajausten merkityksiä lopputulemiin. Tärkeimpinä tuloksina voitiin todeta elinkaariarviointien toteuttamisen olevan varsin haastavaa. Lisäksi arviointia varten tehdyt rajaukset voivat vaikuttaa merkittävästi tuloksiin ja niiden vertailtavuuteen. Varsinaisista tuloksista voitiin sanoa perovskiittiaurinkokennojen ympäristövaikutusten kohdistuvan erityisesti veden ehtymiseen, ilmastonmuutokseen, ekotoksisuuteen ja maankäyttöön.

Perovskiittikennojen stabiilisuutta ja siihen liittyviä materiaalivalintoja tulisi kehittää, jotta asetetut tavoitteet saavutettaisiin. Lisäksi elinkaariarviointi menetelmien tulisi yhdenmukaistua, jotta tulosten luotettavuus ja vertailtavuus paranisi.

Asiasanat: perovskiittiaurinkokenno, elinkaariarviointi, ympäristövaikutukset

ABSTRACT

A life cycle assessment of perovskite solar cells

Milla Hänninen

University of Oulu, Degree Programme of Process and Environmental Engineering

Bachelor's thesis 2022, 40 pp.

Supervisor(s) at the university: Ari Vuokila

The purpose of this bachelor's thesis was to investigate the environmental impacts of perovskite solar cells. It was carried out as a literature review based on the relevant literature and life cycle assessments. The current state and future trends in solar cell technologies was identified based on the literature. Particular attention was paid to the characteristics of perovskite solar cells, their manufacturing methods and materials, and the prevailing life cycle environmental impact assessment methods, especially life cycle assessment.

The life cycle assessments of typical perovskite solar cell structures and tandem cells were investigated more thoroughly. The main conclusions of reviewed life cycle assessments were aggregated, and the effects of used definitions imposed on the results were considered. The primary findings were that life cycle assessments can be quite challenging to carry out. Furthermore, the boundaries set for the LCA can have significant impacts on the results and their comparability. The results indicated that the environmental impacts of perovskite solar cells increase water depletion, climate change, ecotoxicity, and land use potentials.

The stability of the perovskite solar cells and the material choices related to stability should be improved to achieve set objectives. In addition, life cycle assessment methods should be standardized to improve the reliability and comparability of results.

Keywords: perovskite solar cells, life cycle assessment, LCA, environmental impacts

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	8
2 AURINKOKENNOTEKNOLOGIAT	10
2.1 Yksi- ja monikidekennot	10
2.2 Ohutkalvokennot	11
2.3 Nanokidekennoteknologiat	11
2.4 Aurinkopaneelien toimintaperiaate	13
2.5 Energian talteenotto ja varastointi.....	13
3 PEROVSKIITTIAURINKOKENNOT	14
3.1 Perovskiitti	14
3.2 Tekniset ominaisuudet	15
3.3 Kennojen rakenteet.....	15
3.4 Materiaalit	16
3.5 Valmistusmenetelmät	17
3.5.1 Kehruupinnoitus	17
3.5.2 Rullalta rullalle -menetelmät	17
3.5.3 Kemiallinen höyrypinnoitus	18
3.5.4 Fysikaalinen höyrypinnoitus.....	18
3.5.5 Kapselointi	18
3.6 Kaupallistamisen haasteet	19
4 ELINKAAREN YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ARVIOINTI.....	20
4.1 Elinkaariajattelu	20
4.2 Elinkaariarviointi.....	20
4.3 Lainsäädäntö	21
5 PEROVSKIITTIAURINKOKENNOJEN ELINKAARIARVIOINNIT	22
5.1 Elinkaariarviointi tyypillisille perovskiittirakenteille	24
5.1.1 Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely	24
5.1.2 Inventaarioanalyysi.....	24

5.1.3 Vaikutustenarviointi	25
5.1.4 Tulokset	25
5.2 Elinkaariarviointi perovskiitti tandemkennoille.....	28
5.2.1 Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely	28
5.2.2 Inventaarioanalyysi	28
5.2.3 Vaikutustenarviointi	29
5.2.4 Tulokset	29
5.3 Johtopäätökset ja suositukset	31
6 YHTEENVETO	34
LÄHDELUETTELO	

MERKINNÄT JA LYHENTEET

AC	happamoituminen
ADP	abioottinen ehtymispotentiaali
AP	happopotentiaali
AZO	alumiinilla seostettu sinkki oksidi
CC	ilmastonmuutos
CEN	kumulatiivinen uusiutumaton energia
CER	kumulatiivinen uusiutuva energia
EF	rehevöitymispotentiaali makeassa vedessä
EM	rehevöitymispotentiaali merissä
EP	rehevöitymispotentiaali
ET	rehevöitymispotentiaali maanpäällisessä ympäristössä
ETF	ekotoksisuuspotentiaali makeassa vedessä
ETL	elektroninsiirtokerros
ETP	ekotoksisuuspotentiaali
FA	formamidinium
FTO	fluoritinaoksidi
GWP	ilmaston lämpenemispotentiaali
HTC	syöpää aiheuttava myrkyllisyys ihmisille
HTL	aukkojen kuljetuskerros
HTN	syöpää aiheuttamaton myrkyllisyys ihmisille
HTP	myrkyllisyys ihmisille
IR	ionisoiva säteily
ITO	indiumtinaoksidi
LCA	elinkaariarviointi
LCI	inventaarioanalyysi
LCIA	vaikutustenarviointi
LU	maankäyttö
MA	metyyliammonium
OD	otsonikato

PM	hiukkaset/hengitystievaikutukset
POCP/POF	fotokemiallinen otsoninmuodostumispotentiaali
RDM	mineraalien, fossiilisten ja uusiutuvien resurssien ehtyminen
RDW	veden ehtyminen
RI	hengitysteiden epäorgaaniset partikkelit
TCO	läpinäkyvä johtava oksidi

1 JOHDANTO

Euroopan Unionin pitkän aikavälin tavoitteena on hiilineutraalin energijärjestelmän saavuttaminen vuoteen 2050 mennessä. Huomattava osa EU:n kasvihuonepäästöistä on peräisin energiantuotannosta ja sen käytöstä. Tavoitteiden saavuttamisen kannalta uusiutuvat energianlähteet ovat keskeisessä asemassa ja päivitettyssä uusiutuvaa energiaa kokevassa direktiivissä ehdotetaan niiden osuuden olevan 40 prosentin tasolla vuoteen 2030 mennessä. (Euroopan komissio, 2021)

Aurinkoenergia on ehtymätön uusiutuvan energian lähde, jota säteilee maanpinnalle jo yhden tunnin aikana $4,3 \times 10^{20}$ J eli suunnilleen yhtä paljon kuin ehdimme sitä vuodessa kuluttamaan. Maanpinnalle päätyy säteilyenergiaa keskimäärin 350 W/m^2 , vaikka osa säteilyenergiasta heijastuu takaisin avaruuteen tai absorboituu ilmakehässä. Säteilyenergia kohdistuu maanpinnalle vaihtelevasti ja eri kulmissa riippuen maantieteellisestä sijainnista. Luonnollisesti säteily määrä on korkeampi päiväntasaajan ympäristössä (vuotuinen summa noin 2100 kWh/m^2), missä aurinko paistaa kohtisuorasti, kuin pohjoisessa (noin 1100 kWh/m^2), missä aurinko säteilee loivemmassa kulmassa ja kulkee täten pidemmän matkan ilmakehässä. Etelä-Suomessa aurinkoenergiaa on saatavissa käytännössä saman verran kuin Pohjois-Saksassa, eli vuosittainen säteily määrä on keskimäärin 1100 kWh/m^2 , vaikka Suomi sijaitseekin huomattavasti pohjoisempana. (Hölttä M., 2017; Perälä, 2017; Hotakainen, 2020)

Auringon säteily havaitaan pääosin näkyvänä valona, ultravioletti- ja infrapunasäteilynä. Sitä voidaan hyödyntää lämpö- tai sähköenergiana suorasti aurinkokeräimillä ja -kennoilla tai epäsuorasti höyryn tuottamiseen. Vaikka auringon säteilyenergiaa on osattu hyödyntää jo monia vuosikymmeniä, sen tehokas hyödyntäminen sähkönä on edelleen haastavaa. (Perälä, 2017; Hotakainen, 2020)

Perovskii aurinkokennojen energian muunnostehokkuus on noussut lyhyessä ajassa merkittävästi, jonka takia niitä pidetään potentiaalisina tulevaisuuden aurinkokennoteknologioina. Tässä kandidaatintutkielmassa tarkastellaan perovskii aurinkokennojen elinkaaren ympäristövaikutuksia kirjallisuuskatsauksen

muodossa. Vaikka aurinkoenergia mielletäänkin usein puhtaaksi energianlähteeksi, on elinkaaren ympäristövaikutusten arviointi tärkeää etenkin kysynnän kasvaessa.

Tässä kandidaatintutkielmassa tarkastellaan aluksi nykyisiä aurinkokennoteknologioita ja niiden ominaisuuksia. Lisäksi perehdytään kolmannen sukupolven aurinkokennoteknologioihin, jotka edustavat tulevaisuuden kennoteknologioiden suuntauksia. Kolmannessa luvussa perehdytään tarkemmin perovskiittiaurinkokennoihin ja niiden ominaisuuksiin, mutta myös kaupallistamisen haasteisiin. Ennen varsinaista ympäristövaikutusten tarkastelua perehdytään ympäristövaikutusten arviointi menetelmiin ja vallitsevaan ympäristölainsäädäntöön. Työn tavoitteena on kartoittaa valittujen perovskiittiaurinkokennojen elinkaareen liittyviä ympäristövaikutuksia, joita tarkastellaan viidennessä luvussa kahden elinkaariarvioinnin avulla.

2 AURINKOKENNOTEKNOLOGIAT

Aurinkosähkökennoteknologiat voidaan jakaa kolmeen sukupolveen. Ensimmäisen sukupolven aurinkokennoja ovat yksi- ja monikidekennot, jotka on yleisimmin valmistettu piistä. Ne ovat keskeisessä roolissa markkinoilla, koska teknologia on vakiintunutta ja kokemusta on kertynyt jo useiden vuosikymmenten ajalta. Toisen sukupolven kennoja ovat ohutkalvotekniikkaa käyttävät aurinkokennot, joiden etuja ovat joustavuus ja halvemmat valmistuskustannukset. Kolmannen sukupolven aurinkokennoihin kuuluvat kaikki aurinkokennotyypit, jotka eivät sovi kahteen ensimmäiseen sukupolviluokitukseen, kuten esimerkiksi nanokideaurinkokennot sekä joustavat aurinkokennot. Kolmannen sukupolven aurinkokennot ovat pääasiassa vielä tutkimusasteella, mutta niiden yhteinen päämäärä on saavuttaa vakaa, kustannustehokas ja ekologinen aurinkokenno. (Perälä, 2017; Haegel *et al.*, 2019; Motiva, 2021b).

2.1 Yksi- ja monikidekennot

Yksikiteisissä aurinkokennoissa käytetään lähes täysin puhdasta piitä, joka kuuluu maankuoren yleisimpiin alkuaineisiin, joten sen saatavuus on hyvä. Pyöreistä piikiekoista muotoillaan mahdollisimman isoja suorakaiteisia kappaleita hukkapinta-alan minimoimiseksi. Kun ne yhdistetään kuparijohtimien välityksellä yhdeksi aurinkopaneeliksi, yksittäisten aurinkokennojen väliin jää paneelille tyypillinen salmiakkikuvio. Yksikiteisten aurinkokennojen muunnostehokkuus on 26,7 %. (Käpylehto, 2016; Perälä, 2017; Ramamurthy Rao *et al.*, 2021)

Monikiteinen pii on rakenteeltaan huokoisempi kuin yksikiteinen pii, koska se koostuu useista pienemmistä piikiteistä. Aurinkokennot ovat neliskanttisia ja niiden pinnassa erottuu kiteiden rajat. Muuten monikiteiset aurinkokennot ovat samanlaisia rakenteeltaan kuin yksikiteiset aurinkokennot. Monikiteisten aurinkokennojen höytysuhde on hieman huonompi kuin yksikiteisten aurinkokennojen, keskimäärin 21,9 % luokkaa. Tämä johtuu siitä, että monikiderakenne ei ole yhtenäinen. Toisaalta epäyhtenäisyys on hyöty hajasäteilyn keräämisessä. Täten osittainen varjostus alentaa monikideaurinkopaneelien höytysuhdetta

vähemmän kuin yksikidepaneelien. Lisäksi monikidepaneelit ovat hieman edullisimpia kuin yksikiteiset paneelit. (Käpylehto, 2016; Perälä, 2017; Ramamurthy Rao *et al.*, 2021)

Aurinkokennot sijoitetaan komposiittilevyille. Lasilevy ja etyyli-vinyyli-asetaatikalvo suojaavat paneelia ympäristötekijöiltä, kuten kosteudelta ja ultraviolettisäteilyltä. Lisäksi paneelit reunustetaan alumiinilistoilla. Tämä kokoonpano tekee aurinkopaneeleista painavia ja jäykkiä, mikä taas rajoittaa niiden sovelluskohteita. Etuna on pitkä käyttöikä, joka takaa yksi- ja monikideaurinkopaneelien pysyvän toimintakykyisinä useita vuosikymmeniä. (Perälä, 2017)

2.2 Ohutkalvokennot

Ohutkalvotekniikkaa hyödyntävissä aurinkokennoissa käytetään yleensä amorfista piitä, mutta niitä voidaan myös valmistaa muista materiaaleista. Muita yleisesti käytettyjä materiaaleja ovat kadmium ja telluuri CdTe-kennoissa sekä kupari, indium, gallium ja seleeni CIGS-kennoissa. CIGS kennojen hyötysuhde on 20,1 % ja CdTe kennoilla hyötysuhde on noin 21 %. Kennojen materiaalikustannukset ovat matalammat kuin ensimmäisen sukupolven kennoilla, koska piitä käytetään huomattavasti vähemmän. (Perälä, 2017; Ananthakumar, Kumar and Babu, 2019; Ramamurthy Rao *et al.*, 2021)

Amorfisesta eli kiteettömästä piistä valmistetun ohutkalvopaneelin hyötysuhde (noin 10 % tasolla) on kiteisiä piipaneeleja huonompi. Ohutkalvopaneelin käyttöikä on noin 5 vuotta eli selvästi lyhyempi kuin yksi- ja monikidepaneeleilla. Ohutkalvotekniikkaa hyödyntävien paneelien toiminta hämärässä on tehokkaampaa ja lämpötilan vaikutus sähköntuottoon on pienempi kuin kiteisillä paneeleilla. Amorfisesta piistä valmistetut ohutkalvopaneelit soveltuvat hankaliin asennuskohteisiin murtumattoman taivutuskykyensä vuoksi. (Perälä, 2017)

2.3 Nanokidekennoteknologiat

Aiemmista sukupolvista poiketen, kolmannen sukupolven aurinkokennojen toimintaperiaate ei välttämättä liity p- ja n-kerrosten väliseen valosähköiseen ilmiöön, vaan kemiallisiin reaktioihin. Kolmannen sukupolven aurinkokennotyyppeihin

kuuluvat muun muassa väriaineherkistetyt (DSSC), orgaanisen aurinkosähkön (OPV) ja kvanttipisteherkistetyt aurinkokennot (QDSSC) sekä myös perovskiiittiaurinkokennot (PSC). (Hänninen, 2017; Ananthakumar, Kumar and Babu, 2019; Motiva, 2021b)

Hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä ovat loukkutilat, aktiivisen kerroksen morfologia ja liukoisuus. Loukkutiloilla on tärkeä rooli varauksen rekombinaatiossa, sillä ne estävät elektronien kulkeutumista. Aktiivisen kerroksen morfologiaan vaikuttavat esimerkiksi liuottimet, lisäaineet ja muut fysikaaliset tekijät. Lisäksi joidenkin kennotyyppien, kuten perovskiiittiaurinkokennojen, aktiivisen kerroksen materiaalit ovat riippuvaisia liuotinpohjaisista valmistusmenetelmistä. (Ananthakumar, Kumar and Babu, 2019)

Väriaineherkistetyistä aurinkokennoista tunnetuimpia ovat Michael Grätzelin kehittämät aurinkokennot, joiden toimintaperiaate perustuu keinotekoiseen fotosynteesiin. Ne koostuvat fotoanodista (nanokiteinen TiO_2), joka on päällystetty johtavalle lasisubstraatille (platinapäällysteinen fluoritinaoksidi eli FTO), herkistimestä eli väriaineesta, elektrolyytistä ja vastaelektronista (platinapäällysteinen FTO). Luonnolliset väriaineet ovat suorituskyvyltään alhaisia verrattuna ruteenipohjaisiin molekyyliväreihin. Kennojen stabiilisuutta heikentävät organometallisten väriaineiden ja elektrolyyttien hajoaminen ja desorptoituminen lyhyessä ajassa. Väriaineherkistettyjen kennojen hyötysuhde on 14,5 %. (Salminen, 2010; Ananthakumar, Kumar and Babu, 2019)

Orgaanisten aurinkokennojen materiaaleina käytetään erilaisia orgaanisia puolijohtavia polymeerejä, joiden tärkeimmät ominaisuudet ovat korkea optinen absorptiokerroin ja säädettävä kaistaväli koko näkyvällä alueella. Tyypillinen rakenne koostuu läpinäkyvästä johtavasta oksidisubstraatista (yleensä indiumtinaoksidi eli ITO), aukkojen kuljetuskerroksesta eli HTL:sta, aktiivisesta kerroksesta, elektronikuljetuskerroksesta eli ETL:sta ja katodista. Kenno on epästabiili ja sen hyötysuhde on noin 10 % tasolla. Orgaanisia kennoja pidetään potentiaalisina vaihtoehtoina tandemkennoissa perovskiiittikennojen kanssa. (Ananthakumar, Kumar and Babu, 2019)

Kvanttipisteherkistetyt aurinkokennot ovat absorptiokykyisiä myös infrapuna-alueella ja ne ovat suhteellisen vakaita. Kenno koostuu koe-elektrodista, kvanttipisteestä, elektrolyytistä ja vastaelektrodista. Hyötysuhde on kuitenkin vain hieman vajaan 10 % luokkaa. (Ananthakumar, Kumar and Babu, 2019)

2.4 Aurinkopaneelien toimintaperiaate

Aurinkopaneelit koostuvat useista aurinkokennoista, jotka on yleensä kytketty sarjaan. Aurinkokennot keräävät auringonsäteilyä fotoneja eli hiukkasia, jotka kuljettavat auringon säteilyenergiaa. Kun auringon lämpö- tai valoenergiaa absorboituu kennoon, tapahtuu valosähköinen ilmiö, jossa osa puolijohteen pn-liitoksen elektroneista irtautuu sidoksestaan ja kulkeutuu n-tyyppin puolijohteeseen. Muodostaakseen elektroniaukkoparin, elektronit pyrkivät kulkeutumaan takaisin p-tyyppin puolijohteeseen. Rajapintaan muodostuneen sähkökentän vuoksi elektronit voivat kulkea vain tiettyyn suuntaan (p-puolelta n-puolelle), jolloin ne kulkeutuvat pakosti ulkoisen johtimen kautta takaisin p-tyyppin puolijohteeseen. (Perälä, 2017; Motiva, 2021a)

2.5 Energian talteenotto ja varastointi

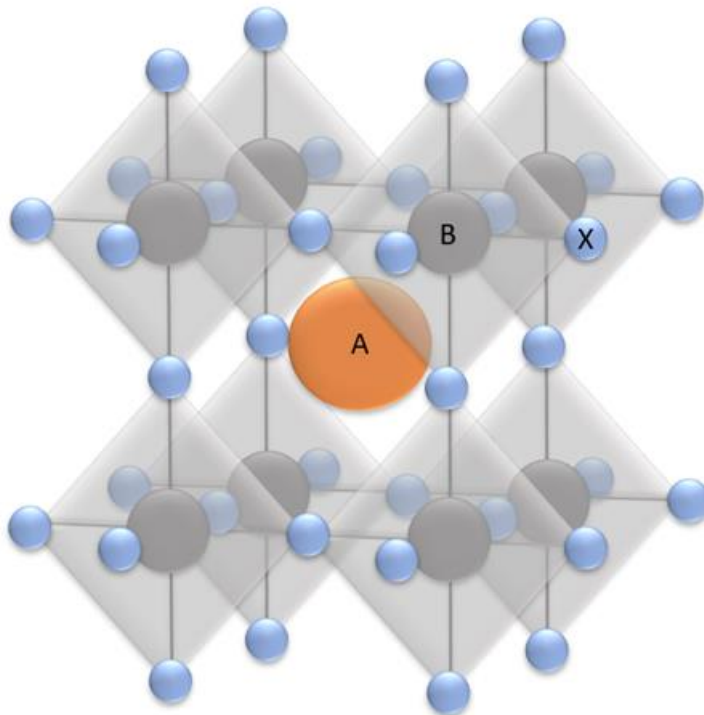
Aurinkopaneelijärjestelmät voidaan kytkeä joko sähköverkkoon tai jättää sen ulkopuolelle itsenäiseksi sähköjärjestelmäksi. Sähköverkkoon kytkettynä paneelit tuottavat energiaa ensisijaisesti omaan kulutustarpeeseen ja mikäli ylijäämää kertyy, voidaan se myydä sähköverkkoon. Sähköverkon ulkopuolella paneelien tuottama energia voidaan varastoida esimerkiksi akkuihin. (Käpylehto, 2016)

3 PEROVSKIITTIAURINKOKENNOT

3.1 Perovskiitti

Perovskiitti on kalsiumtitaanioksidista koostuva mineraali, jota esiintyy pääasiassa maan vaippakerroksessa. Se löydettiin vuonna 1856 Uralin vuoristosta ja on nimetty venäläisen mineralogin Lev Perovskin mukaan. Mineraalille tyypilliseen kiderakenteeseen voidaan myös viitata perovskiittinä ja se voidaan valmistaa synteettisesti nanoteknistä materiaaliosuamista hyödyntäen esimerkiksi lyijyhalidista. (Hänninen, 2014; Hotakainen, 2020; Katz, 2020)

Perovskiitin kemiallinen rakenne ABX_3 on esitetty kuvassa 1. Rakenteessa A on yksiarvoinen orgaaninen tai epäorgaaninen kationi, B kaksiarvoinen epäorgaaninen kationi (yleensä lyijy) ja X on halogenidianioni (yleensä kloori, bromi tai jodi). (Alberola-Borràs, Vidal and Mora-Seró, 2018)



Kuva 1. Perovskiitin ABX_3 rakenne, jossa A on oranssi, B harmaa ja X sininen. (mukaillen Grätzel, 2014)

3.2 Tekniset ominaisuudet

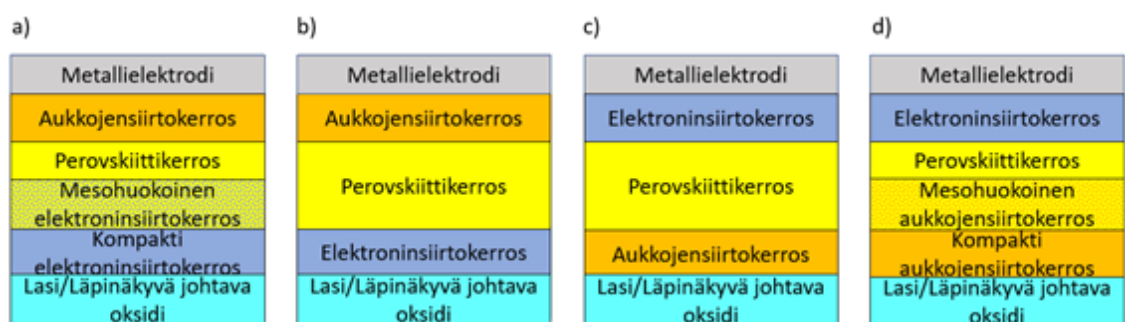
Perovskiittiaurinkokennojen hyötysuhde nousi lyhyessä ajassa 3,8 %:sta 22,1 %:n tasolle. Korkein saavutettu muunnostehokkuus, 25,8 %, on saavutettu α -formamidinium-lyijytrijodidi (FAPbI₃) -perovskiitilla, jossa koherentti välikerros muodostui SnO₂-elektroninkuljetuskerroksen ja halogenidiperovskiittikerroksen välille. (Mohan, 2018; Min *et al.*, 2021).

Perovskiittiaurinkokennoilla on useita ominaisuuksia, jotka tekevät niistä potentiaalisia tulevaisuuden aurinkokennoja. Perovskiitilla on hyvin laaja absorptiospektri, pitkä varauskantoaallon diffuusiopituus ja suuri varauskantajan liikkuvuus. Lisäksi perovskiitti on ambipolaarinen eli se voi käyttäytyä sekä aukko- että elektronijohtimena. (Hänninen, 2017; Mohan, 2018; Liu *et al.*, 2021)

3.3 Kennojen rakenteet

Tyypillisesti perovskiittiaurinkokennon rakenne koostuu elektroninsiirtokerroksesta, perovskiitti-absorptiokerroksesta ja aukkojen kuljetuskerroksesta. Ne kerrostetaan läpinäkyvän sähköä johtavan oksidikerroksen päälle, joka on kerrostettu lasisubstraatille ja joka toimii etuelektrodina. Näiden kaikkien kerrosten päälle tulee takaelektrodi. Tämä kerrosrakenne ja kerrosten järjestys vaihtelee eri kennotyyppien välillä. (Liu *et al.*, 2021)

Kuvassa 2 on esitetty tyypilliset perovskiittikennojen rakenteet, jotka voidaan jakaa neljään tyyppiin: mesohuokoinen, planaarinen eli tasomainen ja niiden käänteiset rakenteet, joissa ETL- ja HTL-kerrokset ovat käänteisessä järjestyksessä. (Liu *et al.*, 2021)



Kuva 2. (a) mesohuokoinen, (b) tasomainen, (c) käänteinen tasomainen ja (d) käänteinen mesohuokoinen. (mukaillen Liu *et al.*, 2021)

Mesohuukoisessa kennossa elektroninsiirtokerroksen ja perovskiittikerroksen väliin muodostuu niiden seoskerros eli mesohuukoinen elektroninsiirtokerros. Aukkojen kuljetuskerros on näiden kerrosten päällä. Vastaavasti käänteisessä mesohuukoisessa rakenteessa muodostuu seoskerros, mutta elektronin- ja aukkojen kuljetuskerroksien käänteisestä järjestyksestä johtuen se on mesohuukoinen aukkojen kuljetuskerros. Tasomaiset rakenteet eivät sisällä mesohuukoista kerrosta lainkaan. (Liu *et al.*, 2021)

3.4 Materiaalit

Perovskiittikerroksen rakenteessa, ABX_3 , A:na käytetään usein Cesiumia (Cs), metyyliammoniumia eli lyhennetyksi MA tai formamidiniumia eli FA, B:nä lyijyä, tinaa tai germaniumia (Ge) ja X:nä klooria, bromia tai jodia. Aukkojen kuljetuskerroksessa käytetään joko orgaanisia materiaaleja, hiilipohjaisia rakenteita ja yksiseinäisiä hiilinanoputkia (SWNT) tai metallioksiedeja. Yleisesti käytettyjä materiaaleja ovat spiro-OMeTAD, hiili, NiO_x ja CrO_x . Elektroniensiirtokerroksessa käytetään yleisesti metallioksiedeja, kuten TiO_2 , SnO_2 , ZnO ja Zn_2SnO_4 ja joitakin hiilipohjaisia materiaaleja. Läpinäkyvänä johtavana oksidina (TCO) käytetään usein ITO:a ja FTO:a. Takaelektrodina on yleisimmin erittäin johtava metalli, kuten kulta, hopea, kupari, alumiini tai nikkeli. (Liu *et al.*, 2021)

Kriittisten materiaalien määritelmät ja luokitukset ovat hieman erilaisia, mutta pääpiirteittäin kriittiset materiaalit ovat materiaaleja, jotka ovat taloudellisesti merkittäviä, mutta niiden saatavuuteen liittyy riskejä ja niille on vain vähän korvaavia aineita. Perovskiittiaurinkokennojen läpinäkyvänä johtavana oksidina käytetty indium on määritetty maailmanlaajuisesti kriittiseksi materiaaliksi, koska se on arvokas ja sitä on niukasti saatavilla. Perovskiittikennossa ITO onkin pyritty korvaamaan FTO:lla. Fluoritinaoksidin sisältämä tina taas on määritelty Euroopassa kriittiseksi materiaaliksi sen alhaisen korvattavuuspotentiaalinsa vuoksi, koska sillä on vähän tuottajamaita ja nekin sijaitsevat Euroopan ulkopuolella. Lisäksi tinaa käytetään myös lyijyn korvaajana aurinkokennoissa. (Liu *et al.*, 2021)

3.5 Valmistusmenetelmät

Valmistusmenetelmät jaetaan yleisesti liuos- ja höyrypohjaisiin tekniikoihin, joista liuospohjaiset ovat yleisemmin käytettyjä. Esimerkiksi kehrupinnoitus ja rullalta rullalle -menetelmät kuuluvat liuospohjaisiin tekniikoihin. Yleisesti ne ovat nopeita ja kustannustehokkaita menetelmiä, mutta niiden heikkoutena ovat yhtenäisyys- ja vakausongelmat. Höyrypohjaiset tekniikat jaetaan edelleen fysikaalisiin ja kemiallisiin tekniikoihin ja ne soveltuvat hyvin teollisen mittakaavan tuotantoon. Tekniikalla saadaan hyvin kiteytyneitä, yhtenäisiä, tasapaksuisia ja puhtaita perovskiihtikerroksia. Höyrypohjaiset tekniikat ovat kalliimpia ja hitaampia kuin liuospohjaiset tekniikat, koska tasaisen ja erityisen puhtauden saavuttaminen vaatii aikaa ja alipaineisen ympäristön. (Kajal, Ghosh and Powar, 2018)

3.5.1 Kehrupinnoitus

Kehrupinnoitus (eng. spin-coating) on yksinkertainen ja kustannustehokas liuospohjainen menetelmä. Sitä käytetään pääasiassa pienikokoisten aurinkokennojen valmistukseen, koska muodostuvan kerroksen yhtenäisyys kärsii suurien pinta-alojen käsittelyssä. Pienikokoisten kennojen valmistuksessa morfologian hallinta on hyvä, joten menetelmällä saavutetaan korkea muunnostehokkuus. Muodostuvan perovskiihtikerroksen paksuutta ja laatua voidaan optimoida linkousnopeuden, kiihtyvyyden, lämpötilan ja ajan avulla. Esimerkiksi lämmittämällä kerroksen kiteytyminen tehostuu. Toisaalta menetelmä on hidas ja materiaalihävikkiä muodostuu runsaasti verrattuna muihin valmistusmenetelmiin. (Kajal, Ghosh and Powar, 2018)

3.5.2 Rullalta rullalle -menetelmät

Rullalta rullalle -menetelmät sisältävät useita pinnoitusmenetelmiä, kuten spraypinnoituksen ja mustetulostuksen. Menetelmiä pidetään potentiaalisina valmistusmenetelminä, koska ne soveltuvat suuren mittakaavan tuotantoon ja joustavien kennojen valmistukseen. Prosessi on jatkuvatoiminen, jonka etuna on pitkien puolijohdekiekkosten käyttäminen, mikä taas mahdollistaa kennojen nopean, skaalautuvan ja kustannustehokkaan massatuotannon. (Kajal, Ghosh and Powar, 2018)

Urapinnoitus (eng. slot-die coating) on yksi suosituimmista menetelmistä aktiivisten HTL- ja ETL-kerrosten pinnoitukseen, koska muodostuneesta kerroksesta tulee yhtenäinen ja tasainen. Menetelmän etuina ovat skaalautuvuus suureen mittakaavaan ja vähäinen materiaalihävikki. (Kajal, Ghosh and Powar, 2018)

Spraypinnoitus on suhteellisen nopea, kustannustehokas muihin valmistusmenetelmiin verrattuna. Lisäksi menetelmä soveltuu teollisen mittakaavan tuotantoon. Menetelmää voidaan hyödyntää niin joustaville kuin lasialustaisille aurinkokennoille. Menetelmällä saadaan korkeampi lämpöstabiilisuus ja paremmat optoelektroniset ominaisuudet kuin kehrupinnoitus menetelmällä, mutta pisaroista aiheutuu epähomogeeninen pinta. (Kajal, Ghosh and Powar, 2018)

3.5.3 Kemiallinen hörypinnoitus

Kemiallinen hörypinnoitus on lupaava menetelmä, koska sillä saavutetaan korkea materiaalitehokkuus ja se on menetelmänä skaalautuva. Perovskiittikerros kerrostetaan haihduttamalla kahta erilaista lähtöainetta eli prekursoria, jotka siirretään esilämmitetylle lasisubstraatille kantokaasun avulla. Jotta muodostuneiden kerrosten pinnoista saavutetaan tasalaatuisia ja pintahuokoistumattomia, menetelmä vaatii korkean alipaineen ja tasaisen materiaalin haihtumisen. (Kajal, Ghosh and Powar, 2018)

3.5.4 Fysikaalinen hörypinnoitus

Fysikaalinen hörypinnoitus on prosessina yksinkertaisempi kuin kemiallinen hörypinnoitus, koska se ei ole reaktiivinen. Menetelmällä voidaan hallita liuos pohjaisia tekniikoita paremmin muodostuvan kerroksen laatua, tiheyttä ja morfologiaa. Prosessissa muodostuu tiheä kerros, joka peittää täydellisesti substraatin ja se on suhteellisen stabiili kosteudelle. Lisäksi kyseistä menetelmää voidaan käyttää massatuotannossa. (Kajal, Ghosh and Powar, 2018)

3.5.5 Kapselointi

Kapseloinnilla pyritään suojaamaan aurinkopaneelia sääolosuhteilta ja niistä johtuvalta kemialliselta hajoamiselta. Se siis lisää aurinkokennon vakautta ja käyttöikää huomattavasti. Kapselointitekniikat voidaan jakaa kolmeen menetelmään: ohutkalvo-,

polymeeri- ja lasi-lasikapselointi. Ohutkalvopohjaisten kapseleiden valmistukseen käytetään useita seostusmenetelmiä, kuten esimerkiksi kemiallista höyrypinnoitusta, atomikerrospinnoitusta tai fysikaalista höyrypinnoitusta. Polymeerikapseloinnissa käytetään liuos pohjaisia tekniikoita, kuten rullalta rullalle -menetelmää tai laminointimenetelmää. Lasi-lasikapseloinnissa aurinkokenno kapseloidaan kahden lasilevyn väliin ja saumat peitetään kapselointiliimalla tai tiivistäineellä, kuten eteenivinyliasetaatilla tai butyylikumilla. (Liu *et al.*, 2021)

3.6 Kaupallistamisen haasteet

Kaupallistamisen keskeisimpiä haasteita ovat kennon epävakaas ja hystereesi. Kennon rakenne hajoaa sen altistuessa lämpötilan- tai kosteudenvaihtelulle, ultraviolettisäteilylle tai hapelle. Erityisesti titaanidioksidista valmistetut kennot ovat erityisen herkkiä auringon ultraviolettisäteilylle. Täten aurinkokennojen käyttöikä on vaikea määrittää, mikä ei ole kaupallistamista ajatellen otollista. (Liu *et al.*, 2021)

Vakautta ja muunnostehokkuutta parantavat tekniikat lisäävät usein kennon myrkyllisyyttä ja täten haitallisia ympäristövaikutuksia, mikä on myös ristiriidassa kolmannen sukupolven aurinkokennojen päämäärien saavuttamiselle. Esimerkiksi halogenidiperovskiittikennojen korkean tehonmuuntosuhteen saavuttamisessa lyijy on avaintekijänä. Täten kaupallistumisen myötä aiheutuu ongelmia, kun myrkyllisten, kriittisten ja arvokkaiden materiaalien käyttömäärät sekä myös jätteen määrät kasvavat. Lisäksi arvokkaiden materiaalien käyttö heijastuu tuotteen hintaan korottavasti, mikä ei vastaa tavoitteisiin edullisesta aurinkokennosta. (Mohan, 2018; Hotakainen, 2020; Liu *et al.*, 2021)

4 ELINKAAREN YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ARVIOINTI

4.1 Elinkaariajattelu

Elinkaariajattelu on tullut osaksi kansainvälisen ympäristöpolitiikan linjauksia. Standardoitu elinkaariarviointi (ISO 14040-sarja) on saanut ohelleen muitakin menetelmiä, kuten esimerkiksi vesi-, hiili- ja fosforijalanjäljet, jotka ovat yksinkertaistettumpia. Elinkaariajattelun periaatteena on tarkastella tuotteen tai palvelun ympäristövaikutuksia elinkaaren eri vaiheissa. Nämä vaiheet ovat valmistusprosessi, käyttö ja hävittäminen. (Ympäristö.fi Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu, 2013)

4.2 Elinkaariarviointi

Elinkaariarviointi eli lyhemmin LCA kuuluu kansainväliseen ISO 14040 ja 14044-sarjoihin. Se tarkastelee materiaalia, tuotetta tai palvelua neljän vaiheen avulla, jotka ovat tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, inventaarioanalyysi eli LCI, vaikutustenarviointi eli LCIA ja tulosten tulkinta. Elinkaariarvioinnissa arvioidaan raaka-aineiden, prosessimenetelmien, käytön ja loppukäsittelyn ympäristövaikutuksia eri parametrein. (Suomen ympäristökeskus, 2017; Liu *et al.*, 2021)

Ensimmäisessä vaiheessa määritellään, mitä tarkoitusta LCA palvelee. Sen perusteella voidaan määrittää arvioinnin laajuus ja rajaukset, kuten tarkasteluajanjakson, sekä raportoinnin vaatimukset. Inventaarioanalyysissä kerätään tarvittavat tiedot koko tuotejärjestelmästä. Keskeisimpinä ovat yksikköprosessit, joita yhdistävät materiaali- ja energiavirrat. LCI:n perustana on toiminnallinen yksikkö, jonka suhteen analyysiin tarvittavat tiedot lasketaan. Vaikutustenarvioinnissa inventaariotiedot lajitellaan eri keskipisteindikaattoreihin eli vaikutusluokkiin, joita ovat potentiaaliset yleisesti määritetyt ympäristövaikutukset. Niitä ovat esimerkiksi happamoitumien, ilmastonmuutos, elottomien luonnonvarojen eheytyminen, rehevöityminen ja humanitoksisuus. Ympäristövaikutukset jaetaan edelleen niiden kohdistumisen perusteella loppupisteindikaattoreihin eli suurempiin kokonaisuuksiin, joita ovat ihmisten terveys, luonnonympäristö ja luonnonvarat. Tulosten tulkintaan sisältyy johtopäätösten tekeminen

saatujen tulosten perusteella huomioiden tuloksiin ja luotettavuuteen vaikuttavat tekijät, kuten valitut rajaukset ja käytetyt menetelmät. (Suomen ympäristökeskus, 2017)

4.3 Lainsäädäntö

Euroopan Unioni on asettanut direktiivin 2012/19/EU sähkö- ja elektroniikkalaiteromun (WEEE) käsittelystä ja sääntelystä. Se edellyttää tuottajia vastaamaan tuottamiensa laitteiden jätteiden keräämisestä, kierrättämisestä ja mahdollisesta uudelleen hyödyntämisestä sekä niiden rahoituksesta. Direktiivin tarkoituksena on suojella niin ympäristöä kuin ihmisten terveyttä ja säästää raaka-aineita kannustamalla suunnittelemaan laitteita, jotka ovat helposti kierrätettäviä tai koostuvat kierrätetyistä materiaaleista. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/19/EU, annettu 4 päivänä heinäkuuta 2012, sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta ETA:n kannalta merkityksellinen teksti, 2012; Liu et al., 2021)

5 PEROVSKIITIAURINKOKENNOJEN ELINKAARIARVIOINNIT

Perovskiittiaurinkokennojen elinkaariarvioita on tehty useissa tutkimuksissa, joista kaksi ((Zhang *et al.*, 2017) ja (Tian, Stranks and You, 2020)) valikoitui tarkempaan tarkasteluun ja niistä on koostettu taulukko 1. Tutkimukset on jaettu lähteiden perusteella ja niistä on poimittu vertailukelpoisia arvoja.

Inventaarioanalyseissä selvitettiin perovskiittiaurinkokennojen elinkaarien aikaisten energian- ja materiaalienkulutusten lisäksi myös kasvihuonekaasupäästöjä sekä energian takaisinmaksuaikaa. Tarkastelluissa elinkaariarvioinneissa perovskiittiaurinkokennojen elinkaaren kuljetus- ja käyttövaiheet yleistettiin olevan samankaltaisia kuin muidenkin kennojen, joten ne mitätöitiin.

Tarkastelluissa elinkaariarvioinneissa käytettiin seuraavia ympäristöluokkia: happopotentiaali (AP), happamoituminen (AC), ilmaston lämpenemispotentiaali (GWP), ilmastonmuutos (CC), ekotoksisuuspotentiaali (ETP) yleisesti sekä erikseen makeassa vedessä (ETF), rehevöitymispotentiaali (EP) maanpäälliseen ympäristöön (ET), makeaan veteen (EF) ja meriin (EM), valokemiallinen otsoninmuodostuspotentiaali (POCP/POF), otsonikato (OD), maankäyttö (LU), kumulatiivinen uusiutuvan energian (CER) ja uusiutumattoman energian (CEN) tarve, resurssien ehtyminen; vesi (RDW) ja mineraalit, fossiiliset ja uusiutuvat (RDM), abioottinen ehtymispotentiaali (ADP), myrkyllisyys ihmisille (HTP) syöpään vaikuttavat (HTC) ja vaikuttamattomat (HTN), ionisoiva säteily (IR), hengitysteiden epäorgaaniset partikkelit (RI), hiukkaset/hengitystievaikutukset (PM).

Taulukko 1. Kooste elinkaariarviointeja tehneiden tutkimusten tuloksista.

Lähde ja vuosi	Valmistusmenetelmä ja LCA:n toiminnallinen yksikkö	Rakenteet	Energiankulutus [kWh]	Materiaalin kulutus [kg]	Ympäristöluokat	Kasvihuonekaasupäästöt [kg CO ₂ eq/kWh]	Takaisinmaksuaika [a]	Muunnostehokkuus [%]
(Zhang <i>et al.</i> , 2017), 2017	Kehruupinnoitus 1 cm ²	MASnl _{3-x} Br _x	0,42	83,8	3.25E-04 (AP), 4.94E-02 (GWP), 4.82 (ETP), 1.49E-04 (EP), 9.41E-09 (HTP), 1.55E-09 (ODP), 1.75E-05 (RI), 2.07E-04 (POCP), 1.32E-05 (ADP)	6,75	-	5,73
		MAPbl ₃	0,56	118,9	4.29E-04 (AP), 6.72E-02 (GWP), 4.88 (ETP), 1.52E-04 (EP), 1.00E-08 (HTP), 2.07E-09 (ODP), 2.41E-05 (RI), 2.85E-04 (POCP), 8.72E-06 (ADP)	2,63	-	20,0
		FAPbl ₃	0,54	131,7	3.82E-04 (AP), 6.31E-02 (GWP), 4.89 (ETP), 1.51E-04 (EP), 9.90E-09 (HTP), 2.78E-09 (ODP), 2.37E-05 (RI), 2.71E-04 (POCP), 8.11E-06 (ADP)	3,18	-	15,56
		CsPbBr ₃	0,36	98,0	2.81E-04 (AP), 4.16E-02 (GWP), 4.82 (ETP), 1.47E-04 (EP), 9.30E-09 (HTP), 1.98E-09 (ODP), 1.63E-05 (RI), 1.71E-04 (POCP), 7.13E-06 (ADP)	6,78	-	4,88
		MAPbl ₂ Cl	0,41	83,3	3.25E-04 (AP), 4.95E-02 (GWP), 4.82 (ETP), 1.49E-04 (EP), 9.40E-09 (HTP), 1.51E-09 (ODP), 1.74E-05 (RI), 2.07E-04 (POCP), 1.28E-05 (ADP)	3,56	-	10,9
(Tian, Stranks and You, 2020), 2020	Seulapainanta 1 m ²	(Cs, FA, MA) Pb (I, Br) ₃ - (FA, MA) (Sn, Pb) I ₃	61,65	3,28	-	0,01	0,35	23,1
		(Cs, FA) Pb (I, Br) ₃ – pii heteroliitos	28,88	952,96	Cu, C ₆₀ , etanoli, FAb ja FAI; MgF ₂ sputterointi yksikiteinen piikiekkko ja Ag; hydratun amorfisen piin plasma tehostettu kemiallinen höyrypinnoitus	0,05	1,44	25,2

5.1 Elinkaariarviointi tyypillisille perovskiittirakenteille

5.1.1 Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely

Tutkimuksen tavoitteena oli tunnistaa ja vertailla 5 tyypillisen perovskiittiaurinkokennon ympäristövaikutuksia elinkaariarvioinnin avulla. Tutkitut perovskiittikerrokset olivat $\text{MASnI}_{3-x}\text{Br}_x$, MAPbI_3 , FAPbI_3 , CsPbBr_3 (epäorgaaninen) ja MAPbI_2Cl . Aurinkokennojen rakenteet olivat keskenään samanlaiset, jotka koostuivat FTO-kerroksesta, kompaktista kerroksesta, mesohuokoisesta kerroksesta, perovskiittikerroksesta, HTL-kerroksesta ja kultakerroksesta. Kennojen muunnostehokkuudet olivat seuraavat: 5,73 %, 20 %, 15,56 %, 4,88 % ja 10,9 %. (Zhang *et al.*, 2017)

Tutkimuksessa käytettiin kahta rajausta. Vaiheet raaka-aineen louhinnasta kokoonpanoon (eng. cradle-to-gate) sisälsi louhinnan, komponenttien valmistuksen ja siitä aiheutuvien jätteiden käsittelyn sekä kennon kokoonpanon. Komponenttien valmistuksesta aiheutuneet jätteet sisälsivät kehrupinnoituksesta muodostuneet liuottimet, joiden oletettiin kulkeutuvan jätevedenpuhdistamoon. Koko elinkaari (eng. cradle-to-grave) koostui yllä mainittujen vaiheiden lisäksi käytöstä, purkamisesta ja hävittämisestä joko kaatopaikalle tai energiapolttoon. Kuljetukseen liittyvät tekijät jätettiin huomioimatta, koska niiden oletettiin olevan samanlaiset kuin muiden aurinkokennoteknologioiden. Lisäksi käyttövaiheen ympäristövaikutusten oletettiin olevan olemattomia, koska päästöjen päätyminen ympäristöön oletettiin tapahtuvan vain paneelin hajoamisen seurauksena. (Zhang *et al.*, 2017)

Komponenttien valmistusta, kennon kokoonpanoa ja purkamista käsittelevät tiedot olivat peräisin tutkimuksen tekijöiden laboratoriokokeista ja muut tiedot avoimesta kirjallisuudesta. (Zhang *et al.*, 2017)

5.1.2 Inventaarioanalyysi

Inventaarioanalyysi jaettiin edellä kuvattuihin elinkaaren vaiheisiin ja siinä tarkasteltiin elinkaaren aikaista energian- ja materiaalinkulutusta. Energiankulutus komponenttien

valmistuksessa arvioitiin laitteiden käyttöajan, tehon ja käyttökertoimen tulona, jossa käyttökerroin oli määritelty valmistusmateriaalien määränä jaettuna laitteen maksimi kapasiteetilla. Materiaalien kulutus arvioitiin kunkin prosessissa käytetyn materiaalin pitoisuuden tai tilavuuden perusteella. Inventaarioanalyysiin käytetyt tiedot perustuivat kirjallisuuteen. (Zhang *et al.*, 2017)

5.1.3 Vaikutustenarviointi

Elinkaariarvioinnin toiminnallinen yksikkö oli pinta-alaltaan 1 cm² kokoinen aktiivinen alue, joka oli vaihdettavissa kennon tuottamaan 1 kWh energiaa tietyin määritelmin, jotka olivat auringon säteilyteho 1700 kWh/m² vuodessa, suorituskysyysuhde 0.75, käyttöikä 1 vuosi ja aktiivisen alueen suhde 60 %. Valitut ympäristöluokat olivat happopotentiaali (AP), ilmaston lämpenemispotentiaali (GWP), ekotoksisuuspotentiaali (ETP), rehevöitymispotentiaali (EP), otsonikatopotentiaali (ODP), valokemiallinen otsoninmuodostuspotentiaali (POCP), abiottinen ehtymispotentiaali (ADP), myrkyllisyys ihmisille (HTP) ja hengitysteiden epäorgaaniset partikkelit (RI). (Zhang *et al.*, 2017)

5.1.4 Tulokset

Taulukkoon 2 on koottu primäärienergiankulutus kennon elinkaaren aikana kaatopaikka skenaariossa. Taulukon perusteella voidaan todeta kokonaisenergiankulutuksen olevan merkittävästi MAPbI₃ ja FAPbI₃ kennoilla. Elinkaaren kokonaisenergiankulutuksesta yli 95 % kului kennon valmistukseen ja loput lähinnä materiaalien talteenottoon ja purkuun.

Taulukossa 2 on lisäksi eritelty merkittävimpien komponenttien valmistukseen tarvittavan energian osuus kokonaisvalmistusenergiasta. MASnI_{3-x}Br_x ja MAPbI₂Cl kennojen komponenteista FTO-lasikerroksen ja kultakerroksen valmistus olivat selkeästi eniten energiaa kuluttavia prosesseja. Kultakerroksen energiankulutus voitiin selittää kerrostamiseen käytetyllä lämpöhähdutusprosessilla. Erityisesti FAPbI₃ kennon perovskiittikerroksen valmistus oli keskeinen tekijä kennon energiankulutuksen kannalta verrattuna sen muihin komponentteihin. Perovskiittikerrosten energiankulutus voitiin selittää

kerroksen materiaalien puhdistamiseen käytettyjen liuottimien (isopropani ja metanoli) valmistukseen käytetyllä energialla. (Zhang *et al.*, 2017)

Taulukko 2. Primäärienergiankulutus elinkaaren aikana (kaatopaikkasijoitus) megajouleina ja eriteltyt prosenttiosuudet valmistukseen käytetystä energiasta merkittävimmille komponenteille. (Zhang *et al.*, 2017)

Kennotyyppi	Kokonaisenergiankulutus [MJ]	FTO [%]	Perovskiitti [%]	Kulta [%]
MASn _{1-3-x} Br _x	1,5	60,49	-	30,08
MAPbI ₃	2,01	46,38	30,02	21,19
FAPbI ₃	1,96	19,40	53,34	22,72
CsPbBr ₃	1,28	12,78	45,03	35,49
MAPbI ₂ Cl	1,46	61,64	-	30,24

Taulukkoon 3 on koottu vastaavasti tulokset materiaalikulutukseen liittyen. Myös materiaalikulutuksen voitiin osoittaa olevan merkittävintä MAPbI₃ ja FAPbI₃ kennoilla muihin kennotyypeihin verrattuna. Materiaalia tarvittiin eniten valmistuksessa, joka kattoi yli 91 % kokonaismateriaalin tarpeesta. Kullan louhinta vaatii paljon raaka-aineita, mikä osaltaan selitti tuloksia. FTO-lasin ja perovskiittikerroksen valmistuksessa käytettyjen orgaanisten liuottimien, kuten asetoni, isopropanoli ja metanoli, valmistusmateriaalit selittivät myös suuren materiaalikulutuksen. (Zhang *et al.*, 2017)

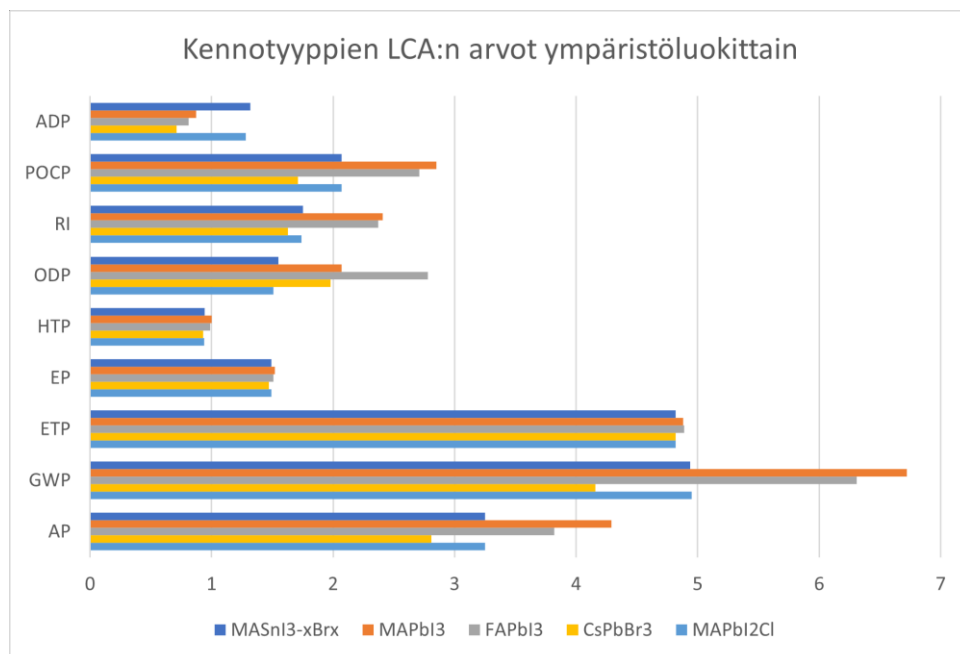
Taulukko 3. Primäärimateriaalikulutus elinkaaren aikana kaatopaikka skenaariossa kilogrammoina ja eriteltyt prosenttiosuudet valmistukseen käytetyistä materiaaleista merkittävimmille komponenteille. (Zhang *et al.*, 2017)

Kennotyyppi	Kokonaismateriaalikulutus [kg]	FTO [%]	Perovskiitti [%]	Kulta [%]
MASn _{1-3-x} Br _x	83,8	19,42	-	72,85
MAPbI ₃	118,9	-	33,79	49,92
FAPbI ₃	131,7	-	43,70	44,79
CsPbBr ₃	98,0	-	30,25	61,3
MAPbI ₂ Cl	83,3	19,81	-	73,3

Kuvassa 3 on esitetty elinkaariarvioinnin ympäristöluokituksiin jaetut normalisoidut arvot. Sen perusteella voidaan sanoa, että MAPbI₃ ja FAPbI₃ kennoilla oli suurimmat ympäristövaikutukset useimmissa ympäristövaikutusluokissa, jotka johtuivat muun

muassa valmistuksen suurista orgaanisten liuottimien käyttömääristä sekä FTO- ja perovskiihtikerrosten puhdistuksesta. Lisäksi liuottimien käytöllä todettiin olevan merkittävä vaikutus ilmastonlämpenemispotentiaaliin ja esimerkiksi FAPbI_3 kenno sisälsi kaksinkertaisen perovskiihtikerroksen tehokkuuden parantamiseksi. $\text{MASnI}_{3-x}\text{Br}_x$ kennossa käytetty sinkki lisäsi abioottisen eheytyksen potentiaalia ja raskasmetallien käyttö vaikutti esimerkiksi humaanitoksisuus potentiaaliin. Kullan käyttäminen takaelektrodina osoitettiin vaikuttavan ekotoksisuuspotentiaaliin, rehevöitymispotentiaaliin, abioottiseen ehtymispotentiaaliin ja myrkyllisyyteen ihmisille. (Zhang *et al.*, 2017)

Kaikkien kennojen ympäristövaikutukset kohdistuivat pääasiassa ilmastonlämpenemiseen, happamoitumiseen ja ekotoksisuuteen. Kennojen valmistuksen todettiin aiheuttavan yli 95 % ympäristövaikutuksista. Lisäksi muunnostehokkuudella osoitettiin olevan merkittävä vaikutus ympäristövaikutuksiin, koska kennon käyttöikä on lyhyt. Täten alhaisen muunnostehokkuuden kennojen, $\text{MASnI}_{3-x}\text{Br}_x$ ja CsPbBr_3 , ympäristövaikutukset olivat suhteellisen korkeat muihin verrattuna, kun tuotettiin 1 kWh energiaa. (Zhang *et al.*, 2017)



Kuva 3. Elinkaariarvioinnin tulokset kennotyypeittäin ja ympäristöluokittain. (Zhang *et al.*, 2017)

5.2 Elinkaariarviointi perovskiitti tandemkennoille

5.2.1 Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely

Tutkimuksen tavoitteena oli arvioida ja vertailla kaksiterminaalisten monoliittisten perovskiitti-perovskiitti ja perovskiitti-pii tandemkennojen energiankulutusta ja ympäristövaikutuksia. Perovskiitti-perovskiitti tandemkennon tehokkuus oli 23,1 % ja perovskiitti-pii tandemin 25,2 %. Tandemkennot koostuivat matalakaistaisesta kennosta, rekombinaatiokennosta ja laajakaistaisesta kennosta. Perovskiitti-perovskiitti tandemkennossa matalakaistainen kenno oli perovskiitti, jossa ABX_3 rakenne oli $(FA, MA)(Sn, Pb)I_3$, ja perovskiitti-pii tandemissa oli pii heteroliitoskenno. Rekombinaatioliitos molemmissa kennoissa oli alumiinilla seostettu sinkki oksidi eli AZO. Laajakaistainen kenno oli perovskiitti-perovskiitti tandemissa $(CS, FA, MA)Pb(I, Br)_3$ ja perovskiitti-pii tandemissa $(Cs, FA) Pb(I, Br)_3$ perovskiittikenno. Takaelektrodina yleisesti käytetty kulta oli korvattu kuparilla ja hopealla. (Tian, Stranks and You, 2020)

Elinkaariarvioinnissa kennon elinkaari kehdestä hautaan sisälsi neljä vaihetta, jotka olivat raaka-aineen hankinta, moduulien kokoaminen, käyttö ja hävittäminen. Kennojen hävittämistapa elinkaariarvioinnissa oli kaatopaikkasijoitus. Perovskiittipohjaisten tandemaurinkokennojen käyttöiän oletettiin olevan 15 vuotta ja piikennon 30 vuotta. Perovskiittikerrokset ja orgaaniset varauksen siirtokerrokset kerrostettiin seulapainannalla (eng. screen-printing), joka kuuluu rullalta rullalle -menetelmään. Epäorgaaniset toiminnalliset kerrokset kerrostettiin sputteroimalla. (Tian, Stranks and You, 2020)

5.2.2 Inventaarioanalyysi

Inventaarioanalyysissä tarkasteltiin materiaalin- ja energiankulutusta, hiilijalanjälkeä, energian takaisinmaksuaikaa ja kasvihuonekaasupäästöjä. Inventaarioanalyysi kattoi sekä raaka-ainesynteesin että laitteen valmistukseen. Primäärienergiankulutus sisälsi energian, joka tarvittiin raaka-aineisiin ja kulutettiin prosessivaiheissa. Hiilijalanjälki perustui raaka-aineisiin ja niiden prosessointiin liittyvään ilmaston lämpenemispotentiaaliin suhteessa muodostuneisiin hiilidioksidipäästöihin elinkaaren aikana. Tiedot perustuivat Ecoinvent (versio 3.6;2019) tietokantaan sekä kirjallisuuteen. (Tian, Stranks and You, 2020)

5.2.3 Vaikutustenarviointi

Elinkaariarvioinnissa käytettiin toiminnallisena yksikkönä pinta-alaltaan 1 m² aktiivista aluetta. Ympäristöluokiksi valikoitui 17 keskipisteindikaattoria, jotka olivat ilmastonmuutos (CC), otsonikato (OD), humanitoksisuus, syöpään liittyvä (HTC) ja syöpään liittymätön (HTN), hiukkas- ja hengitysvaikutus (PM), ionisoiva säteily, ihmisten terveys (IR), fotokemiallinen otsonin muodostus (POF), happamoituminen (AC), maanpäällinen (ET), makean veden (EF) ja meren (EM) rehevöityminen, ekotoksisuus, makea vesi (ETF), maankäyttö (LU), luonnonvarojen ehtyminen; vesi (RDW) ja mineraali, fossiilinen, uusiutuva (RDM), sekä uusiutuvan (CER) ja uusiutumattoman (CEN) kumulatiivisen energian kysyntä. (Tian, Stranks and You, 2020)

5.2.4 Tulokset

Inventaarioanalyysin perusteella energiankulutus oli 61,65 kWh perovskiitti-perovskiitti tandemkennolle ja 28,88 kWh perovskiitti-pii tandemille toiminnallista yksikköä kohden. Inventaarioanalyysissä otettiin huomioon vain matala- ja laajakaistaisten kennojen valmistukseen liittyvä energiankulutus eli esimerkiksi materiaalien hankintaan liittyvää energiaa ei huomioitu. Materiaalinkulutuksessa sen sijaan huomioitiin valmistamisen lisäksi myös raaka-aineiden hankinta ja kaatopaikkasijoitus. Vastaavasti materiaalin tarve oli 3,28 kg perovskiitti-perovskiitti tandemille ja 952,96 kg perovskiitti-pii tandemille. Perovskiitti-pii tandemien materiaalinkulutuksesta noin 99 % oli deionisoitua vettä, jota tarvittiin pii kennoon. Jos tämä vesimäärä vähennetään kokonaismassasta jäljelle jää noin 1,56 kg. Energian takaisinmaksuajan arvioitiin olevan perovskiitti-perovskiitti tandemilla 0,35 vuotta ja perovskiitti-pii tandemilla 1,44 vuotta. Kasvihuonekaasupäästökerroin perovskiitti-perovskiitti tandemille oli 10,69 g CO₂ eq/kWh ja perovskiitti-pii tandemille 46,38 g CO₂ eq/kWh. Erityisesti käyttöiän ja muunnostehokkuuden osoitettiin olevan vahvasti sidoksissa kasvihuonekaasupäästökertoimeen, joista käyttöikä oli oletettu kennoille varsin korkeaksi vaikuttaen positiivisesti tulokseen. (Tian, Stranks and You, 2020)

Ympäristövaikutusluokkien arvioinnin tulokset oli esitetty pelkästään perovskiitti-pii tandemille. Tulokset oli jaettu erikseen perovskiitti- ja piikennolle ja vielä edelleen niiden materiaaleihin ja prosessivaiheisiin, josta on koottu taulukko 4. Perovskiittikennon materiaaleista (LiF, AZO, CsBr, Spiro-TTB, MgF₂, IZO, SnO₂, kupari, fullereeni (C₆₀), etanoli, PbI₂, FABr ja FAI) merkittävimpiä vaikutuksia oli kuparilla, fullereenillä, etanolilla, FABr ja FAI materiaaleilla. Suurimmat vaikutukset kohdistuivat uusiutumattoman ja uusiutuvan energian kysyntään, veden ehtymiseen, maankäyttöön, makean veden ekotoksisuuteen, maanpäälliseen rehevöitymiseen, ionisoivan säteilyn aiheuttamaan ihmisten terveyteen ja ilmastonmuutokseen, jotka johtuivat pääasiassa metallintuotantoon liittyvään huomattavaan materiaalin- ja energiantarpeeseen sekä kaivostoimintaan. Prosessivaiheista merkittävin oli MgF₂ sputterointi, joka oli jokaisen vaikutusluokan merkittävin tekijä. Prosessi vaatii esimerkiksi paljon tehoa ja on suhteellisen aikaa vievä. Merkittävimmät vaikutukset aiheutuivat samoihin ympäristöluokkiin kuin materiaaleissa. (Tian, Stranks and You, 2020)

Pii heteroliitoskennon materiaaleista (ITO, HF, deionisoitu vesi, NaOH, H₂O₂, HCl, NH₃, paineilma, H₂, NF₃, SiH₄, hopea, O₂, N₂, C₃H₄, yksikiteinen piikiekko) merkittävimmät vaikutukset olivat yksikiteisellä piikiekolla kaikissa muissa ympäristöluokissa, paitsi mineraalien, fossiilisten sekä uusiutuvien luonnonvarojen ehtymisessä, makean veden ekotoksisuudessa ja syöpään liittymättömässä humaanitoksisuudessa. Yllä mainituissa kolmessa ympäristöluokassa keskeisin tekijä oli hopea. Materiaaleista aiheutuvat suurimmat ympäristövaikutukset kohdistuivat kumulatiivisen energian kysyntään, veden ehtymiseen, maankäyttöön, makean veden ekotoksisuuteen, ihmisten terveyteen vaikuttavan ionisoivan säteilyn potentiaaliin ja ilmastonmuutokseen. Prosessivaiheista merkittävin oli hydratun amorfisen piin plasmalla tehostettu kemiallinen höyrypinnoitus (eng. PECVD of a-Si:H), joka oli keskeisin tekijä jokaisessa ympäristöluokassa. Prosessien vaikutukset olivat merkittävimpiä seuraaviin ympäristöluokkiin: kumulatiivinen energian kysyntä, veden ehtyminen, maankäyttö, makean veden ekotoksisuus, maanpäällinen rehevöityminen ja ilmastonmuutos. (Tian, Stranks and You, 2020)

Taulukko 4. Perovskiitti-pii tandemien kerrosten merkittävimpien materiaalien ja valmistusprosessien vaikutukset merkittävimpiin ympäristövaikutusluokkiin.

	merkittävät ympäristöluokat	merkittävät materiaalit	merkittävät prosessit
(Cs, FA) Pb (I, Br) ₃	CEN, CER, RDW, LU, ETF, ET, IR ja CC	Cu, C ₆₀ , etanoli, FABr ja FAI	MgF ₂ sputterointi
pii heteroliitoskenno	CEN, CER, RDW, LU, ETF, IR, CC ja ET	yksikiteinen piikiekkö, Ag	hydratun amorfisen piin plasma tehostettu kemiallinen höyrypinnoitus

5.3 Johtopäätökset ja suositukset

Elinkaariarvioinneille ei ole yhtenäistä standardoitua menettelytapaa, joten niiden välillä voi olla merkittäviä eroavaisuuksia. Tässä työssä tarkasteltujen elinkaariarviointien vertailtavuuteen vaikuttivat elinkaariarviointeja varten tehdyt rajaukset, jotka poikkesivat toisistaan ja joista yksi merkittävimmistä oli elinkaaren määrittäminen. Esimerkiksi energiankulutusta käsittelevä inventaarioanalyysi Zhang ym. (2017) elinkaariarvioinnissa kattoi koko elinkaaren louhinnasta hävitykseen, kun taas Tian ym. (2020) elinkaariarvioinnissa vain valmistukseen liittyvät vaiheet. Tämä sai Tian ym. (2020) elinkaariarvioinnin perovskiitti tandemkennojen energiankulutuksen tulokset näyttämään hyvin alhaisilta toisen elinkaariarvioinnin tuloksiin verrattuna. Lisäksi toinen merkittävä tekijä oli oletetut kennojen käyttöiät, jotka olivat huomattavasti pidempiä Tian ym. (2020) elinkaariarvioinnissa kuin Zhang ym. (2017). Tämän johdosta esimerkiksi kasvihuonekaasupäästökerroin, joka on kääntäen verrannollinen kennon käyttöikäen, oli hyvin positiivinen tandemkennoja käsitelleen Tian ym. (2020) elinkaariarvioinnissa.

Tian ym. (2020) elinkaariarvioinnissa oli käytetty perovskiitin kerrostamiseen seulapainantaa (rullalta rullalle -menetelmä, liuos pohjainen) ja sputterointia (fysikaalinen höyrypinnoitus). Rullalta rullalle -menetelmät soveltuvat usein teolliseen tuotantoon ja ovat kustannustehokkaita. Zhang ym. (2017) tyypillisten perovskiittirakenteiden elinkaariarvioinnissa käytetty kehrupinnoitus (liuos pohjainen) sen sijaan ei sovellu suurien pinta-alojen käsittelyyn, koska kerroksen yhtenäisyys kärsii skaalattaessa.

Seulapainanta ja sputterointi menetelmät eivät olleet avainasemassa Tian ym. (2020) elinkaariarvioinnin suureen materiaalin kulutukseen, joka johtui piikennon hydratun amorfisen piin plasmalla tehostetusta kemiallisesta höyrypinnoituksesta sekä sen muiden komponenttien puhdistukseen käytetystä deionisoidusta vedestä. Kehruupinnoitus menetelmästä materiaalihävikkiä, etenkin liuotinhävikkiä, muodostuu merkittävästi muihin menetelmiin verrattuna, joka näkyi Zhang ym. (2017) elinkaariarvioinnissa.

Vertailulle otollista oli, että molemmissa elinkaariarvioinneissa oli käytetty elinkaaren loppuvaiheen skenaariona kaatopaikkasijoitusta. Menetelmänä kaatopaikkasijoitus ei ole kestävä ratkaisu, mikä varmasti vaikutti osaltaan kennojen vaikutuksiin tiettyihin ympäristöluokkiin, kuten ilmastonlämpenemiseen, humaanitoksisuuteen ja otsonikatoon, kun kaatopaikkasijoituksessa muodostuneet kemialliset päästöt vapautuvat ympäristöön. Zhang ym. (2017) elinkaariarvioinnissa pohdittiin hieman polttamista vaihtoehtoisena tapana kennon hävittämiselle, mutta ainoa hyöty oli lähinnä polttoprosessista saatavan lämmön hyödynnysmahdollisuus. Myös polttamisella on merkittäviä ympäristövaikutuksia, kun muodostuneet päästöt, kuten haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC) ja typpioksidit (NO_x), lisäävät fotokemiallisen otsonin muodostumista vapautuessaan ilmakehään.

Elinkaariarviointien vertailua jokseenkin hyödyttävää oli myös samankaltaiset materiaalivalinnat perovskiittirakenteiden osalta. Toisaalta vertailtavuutta heikensi vastaavasti muiden kerrosten erilaiset materiaalivalinnat ja aiemmin mainitut eriävät määritelmät elinkaareissa, joten materiaalien ympäristövaikutuksia ei sen tarkemmin voitu vertailla. Zhang ym. (2017) elinkaariarvioinnissa käytettiin materiaaleja, jotka ovat kalliita ja luokiteltu kriittisiksi materiaaleiksi, kun taas Tian ym. (2020) elinkaariarvioinnissa näitä materiaaleja oli pyritty korvaamaan paremmin teolliseen tuotantoon soveltuvilla materiaaleilla. Esimerkiksi Zhang ym. (2017) elinkaariarvioinnissa oli käytetty takaelektrodina kultaa, kun Tian ym. (2020) elinkaariarvioinnissa se oli korvattu kuparilla ja hopealla. Kullan louhinta ja sen kerrostamiseen käytetty terminen höyrystämismenetti ovat merkittävä tekijä energian- ja materiaalikulutuksessa sekä keskeinen tekijä ympäristön toksisuuspotentiaaleihin. Lisäksi esimerkiksi läpinäkyvänä johtavana oksidina

Zhang ym. (2017) elinkaariarvioinnissa käytettiin fluoritinaoksidia ja Tian ym. (2020) alumiinisinkkioksidia.

Ympäristöluokituksiin jaettuja tuloksia on vaikea vertailla, koska tulokset oli esitelty hyvin eri tavoin ja ympäristöluokatkin riippuvat tehdyistä määrittelyistä. Esimerkiksi Zhang ym. (2017) elinkaariarvioinnissa oli vain 9 ympäristöluokkaa, kun Tian ym. (2020) arvioinnissa niitä oli 12 ja jotka oli jaettu edelleen tarkentaviin luokkiin. Tian ym. (2020) elinkaariarvioinnissa ei ollut esitetty ympäristöluokitustuloksia lukuarvoina, mikä vaikeutti vertailtavuutta. Tuloksista voidaan kuitenkin sanoa perovskiittikenttien vaikuttavan erityisesti seuraaviin ympäristövaikutuspotentiaaleihin: ilmastolämpeneminen/ilmastomuutos, erityisesti makean veden ekotoksisuus, veden ehtyminen, happamoituminen ja maankäyttö.

Tarkasteltujen elinkaariarvointien johtopäätökset päätyivät samaan lopputulemaan, että sopivien materiaalien ja valmistusmenetelmien skaalautuvuudessa teolliseen mittakaavaan on vielä kehitettävää, eikä elinkaariarvioinneissa käytetyt materiaalit ja menetelmät täytä asetettuja tavoitteita. Lisäksi kenttien stabiilisuus on yksi avaintekijöistä ympäristövaikutuksiin ja sen paranemisella tulee olemaan merkittäviä muutoksia tämänhetkisiin tuloksiin ympäristövaikutusten arvioinnissa.

Tulevaisuuden kannalta mielenkiintoisia kehityskohteita voisi olla myös kierrätettyjen komponenttien käyttäminen aurinkokennoissa, koska kaupallistumisen myötä materiaalien tarve kasvaa. Arvokkaiden materiaalien talteenotto ja kierrätys saattaisivat tehostaa ympäristövaatimusten toteutumista, mikäli kierrätetyt komponentit onnistuvat vastaamaan puhtausvaatimuksiin ja säilyttämään kennon muunnostehokkuuden sekä stabiilisuuden.

Elinkaariarvointimenetelmien tulisi tulevaisuudessa yhtenäistyä, jotta niiden vertailtavuus helpottuisi. Sitä kautta myös elinkaariarvointien käyttökelpoisuus erilaisiin sovelluksiin paranisi ja antaisi paremman vastineen arviointiin käytettyihin resursseihin.

6 YHTEENVETO

Auringon säteilyenergia jakaantuu maapallolle vaihtelevasti riippuen maantieteellisestä sijainnista. Sitä on hyödynnetty jo pitkään, vaikka aurinkokennojen muunnostehokkuudet eivät ole olleet korkeita. Perovskiiittiaurinkokennot ovat osoittautuneet potentiaalisiksi ratkaisuisiksi muunnostehokkuuden parannuttua merkittävästi lyhyessä ajassa. Kandidaatintutkielmani tarkoitus oli selvittää perovskiiittiaurinkokennojen ympäristövaikutuksia elinkaariarvontien avulla kirjallisuuskatsauksen muodossa.

Tuotteiden elinkaariarvioinnit yleistynevät tulevaisuudessa lainsäädännön muuttuessa. Elinkaariarviointi on monivaiheinen prosessi ja sen toteuttaminen voi olla hyvin monimutkaista, koska menetelmä ei ole standardisoitu. Tässä kandidaatintutkielmassa nostettiin esille kaksi perovskiiittiaurinkokennojen elinkaariarviointia, joista pyrittiin kokoamaan keskeisiä vertailukelpoisia tuloksia.

Ensimmäisessä elinkaariarvioinnissa tarkasteltiin tyypillisiä perovskiiittirakenteita, jotka olivat $\text{MASnI}_{3-x}\text{Br}_x$, MAPbI_3 , FAPbI_3 , CsPbBr_3 ja MAPbI_2Cl . Merkittävimmät ympäristövaikutukset olivat MAPbI_3 ja FAPbI_3 kennoilla. Materiaalin- ja energiankulutuksen kannalta kennojen komponenteista ja niiden valmistusmenetelmistä vaikutusten avaintekijöinä esiin nousivat fluoritinalla seostettu oksidilasi, perovskiiittikerros ja kulta takaelektrodi. Ympäristöluokituksissa yksittäisistä materiaaleista esimerkiksi sinkin todettiin lisäävään abioottisen eheytyksen potentiaalia ja raskasmetallien vaikuttavan erityisesti humanitoksisuuspotentiaaliin. Merkittävimmät ympäristövaikutukset kaikkien 5 kennon osalta kohdistuivat ilmastonlämpenemis-, happo- ja ekotoksisuuspotentiaaleihin.

Tandemkennoja tarkastelleessa elinkaariarvioinnissa tandemkennot olivat perovskiiitti-perovskiiitti $[(\text{FA}, \text{MA})(\text{Sn}, \text{Pb})\text{I}_3 - (\text{Cs}, \text{FA}, \text{MA})\text{Pb}(\text{I}, \text{Br})_3]$ tandem ja pii heteroliitos-perovskiiitti $(\text{Cs}, \text{FA}) \text{Pb} (\text{I}, \text{Br})_3$ tandem. Kennoissa oli käytetty rekombinaatioliitoksena alumiinilla seostettua sinkkioksidia ja takaelektrodeina hopeaa ja kuparia. Inventaarioanalyysin perusteella perovskiiitti-perovskiiitti tandemkennon energiankulutus

oli huomattavasti suurempi kuin perovskiitti-pii tandemin. Materiaalinkulutus taas oli toisin päin eli perovskiitti-pii tandemin materiaalinkulutus oli merkittävämpi, mutta toisaalta siitä suurin osa oli deioinisoitua vettä. Lisäksi energian takaisinmaksuaika oli perovskiitti-perovskiitti tandemkennolla huomattavasti lyhyempi, kuten myös kasvihuonepäästökerroin matalampi kuin perovskiitti-pii tandemkennolla. Ympäristövaikutusluokkien arvioinnin tulokset oli esitetty ainoastaan perovskiitti-pii tandemille, eikä lukuarvoja ollut esitetty. Tuloksista voitiin kuitenkin todeta, että perovskiittiaurinkokennon materiaaleista kuparilla, fullereenilla, etanolilla, FABr:lla sekä FAI:lla ja prosessivaiheista MgF_2 sputteroinnilla olivat merkittävimmät ympäristövaikutukset. Ne kohdistuivat etenkin energian käytön-, veden ehtymis- ja ekotoksisuus-, maankäyttö- ja ilmastonmuutosympäristöluokkiin. Nämä vaikutukset aiheutuivat pääasiassa metallien tuotannosta. Pii heteroliitoskennon merkittävimmät materiaalit olivat yksikiteinen piikiekko ja hopea. Prosessivaiheista merkittävin oli hydratun amorfisen piin plasmalla tehostettu kemiallinen höyrypinnoitus, jonka vaikutukset olivat merkittävimmät jokaisessa ympäristöluokassa. Kokonaisuudessaan piikennon suurimmat vaikutukset kohdistuivat resurssien ehtymiseen, veden ekotoksisuuteen, maankäyttöön ja ilmastonmuutokseen.

Tarkasteltujen elinkaariarviointien perusteella kennojen ympäristövaikutukset aiheutuivat pääasiassa valmistukseen liittyvien materiaalien hankintaan sekä materiaalien- ja energiankulutukseen prosessivaiheissa. Kolmannessa kappaleessa todettiin valmistusmenetelmiä olevan useita ja että ne voidaan jakaa liuos- ja höyrypohjaisiin tekniikoihin. Menetelmät ovat yleisesti ottaen nopeita ja kustannustehokkaita, mutta monien menetelmien haasteina ovat soveltuminen teolliseen mittakaavan niin, että kennojen stabiilisuus ja hyötysuhde säilyvät hyvänä. Esimerkiksi kehrupinnoitus ei ole skaalautuva menetelmä, mutta monet rullalta rullalle -menetelmät soveltuvat usein teolliseen tuotantoon. Tarkastelluissa elinkaariarvioinneissa käytettyjä menetelmiä olivat kehrupinnoitus, sputterointi ja seulapainanta. Kehrupinnoitus ja seulapainanta ovat liuospohjaisia menetelmiä ja sputterointi fysikaalinen höyrypinnoitusmenetelmä. Orgaanisten liuottimien, kuten asetonin ja metanolin, valmistus ja käyttömäärät

komponenttien puhdistamisessa tunnistettiin valmistusprosessien keskeisimmäksi ympäristötekijäksi liuos pohjaisten menetelmien hävikkinä.

Materiaalivalinnat nousevat esiin etenkin, kun mietitään kaupallistamisen vaikutuksia. Erityisesti formamidinium, metyyliammonium ja kulta nostettiin esille ympäristövaikutusten taustalta. Kriittisiä materiaaleja tarkasteltiin myös kolmannessa luvussa. Katselmoiduissa elinkaariarvioinneissa oli käytetty esimerkiksi indiumia, joka luokitellaan maailmanlaajuisesti kriittiseksi materiaaliksi. Kriittisten materiaalien korvaaminen yleisimmillä materiaaleilla on keskeinen kehityskohde. Yleisesti läpinäkyvänä johtavana oksidisubstraattina käytetty indiumtinaoksidi oli korvattu tarkastelluissa elinkaariarvioinneissa fluoritinaoksidilla ja alumiinilla seostetulla sinkkioksidilla.

Vaikka tarkasteltujen elinkaariarviointien vertaileminen oli haastavaa, merkittävimmät ympäristövaikutukset osoitettiin kohdistuvan veden ehtymiseen, ekotoksisuuteen, happamoitumiseen, maankäyttöön ja ilmastonlämpenemiseen. Yhteinen lopputulema oli, ettei nykyiset käytetyt materiaalit ja valmistusprosessit sovellu sellaisenaan kaupallistamisen vaatimuksiin tai laajaan teolliseen tuotantoon. Lisäksi perovskiittiaurinkokennojen stabiilisuuden ja siten myös käyttöiän nouseminen ovat keskeisiä kehityksen kohteita, joiden osoitettiin olevan myös vahvasti sidoksissa ympäristövaikutuksiin.

Kriittisten materiaalien korvaaminen muilla materiaaleilla tai jopa kierrettyillä komponenteilla voisivat olla aiheita, joita tulee vielä ratkoa ennen kennojen kaupallistamista. Lisäksi komponenttien valmistusmenetelmät ja materiaalien talteenotto tulisivat soveltua teolliseen mittakaavaan, niin että kennojen puhtausvaatimukset toteutuisivat ja siten myös stabiilisuus sekä muunnostehokkuus pysyisivät korkeana. Nähtäväksi jää, täyttyvätkö kennolle asetetut tavoitteet tulevaisuudessa vai joudutaanko jostakin tavoitteesta luopumaan.

LÄHDELUETTELO

Alberola-Borràs, J.-A., Vidal, R. & Mora-Seró, I., 2018. Evaluation of multiple cation/anion perovskite solar cells through life cycle assessment [verkkolehti]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2 (7), S. 1600–1609. Saatavissa: doi:10.1039/C8SE00053K [viitattu 11.10.2021].

Ananthakumar, S., Kumar, J.R. & Babu, S.M., 2019. Third-Generation Solar Cells: Concept, Materials and Performance - An Overview [verkkolehti]. *Environmental Chemistry for a Sustainable World*, Springer, Cham, 23 S. 305–339. Saatavissa: doi:10.1007/978-3-030-04474-9_7 [viitattu 26.10.2021].

Euroopan komissio, 2021. KOMISSION TIEDONANTO EUROOPAN PARLAMENTILLE, NEUVOSTOLLE, EUROOPAN TALOUS- JA SOSIAALIKOMITEALLE JA ALUEIDEN KOMITEALLE Valmiina 55:een: Vuoden 2030 ilmastotavoitteesta totta matkalla kohti ilmastoneutraaliutta [verkkodokumentti]. Bryssel: COM/2021/550 final. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550> [viitattu 4.9.2021].

2012. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/19/EU, annettu 4 päivänä heinäkuuta 2012, sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta ETA:n kannalta merkityksellinen teksti [verkkodokumentti]. Euroopan unionin virallinen lehti. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:32012L0019> [viitattu 10.1.2022].

Haegel, N.M., Atwater H., Barnes T., Breyer C., Burrell A., Chiang Y.M., De Wolf S., Dimmler B., Feldman D., Glunz S., Goldschmidt J.C., Hochschild D., Inzunza R., Kaizuka I., Kroposki B., Kurtz S., Leu S., Margolis R., Matsubara K., Metz A., Metzger W.K., Morjaria M., Niki S., Nowak S., Peters I.M., Philipps S., Reindl T., Richter A., Rose D., Sakurai K., Schlatmann R., Shikano M., Sinke W., Sinton R., Stanbery B.J., Topic M., Tumas, W., Ueda Y., Van De Lagemaat J., Verlinden P., Vetter M., Warren E., Werner M., Yamaguchi M. & Bett A.W., 2019. Terawatt-scale photovoltaics:

Transform global energy Improving costs and scale reflect looming opportunities [verkkolehti]. Science, 364 (6443), S. 836–838. Saatavissa: doi:10.1126/SCIENCE.AAW1845 [viitattu 3.9.2021].

Grätzel, M., 2014. The light and shade of perovskite solar cells [verkkolehti]. Nature Materials, 13 (9), S. 838–842. Saatavissa: doi:10.1038/nmat4065 [viitattu 15.3.2022].

Hänninen, V., 2014. Perovskiitit, Nanobittejä [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.nanobitteja.fi/katsausartikkelit/30> [viitattu 21.9.2021].

Hänninen, V., 2017. Kolmannen sukupolven aurinkokennot [verkkolehti]. Uusiteknologia.fi, huhtikuu (1), S. 30–34. Saatavissa: <https://www.uusiteknologia.fi/2017/04/24/kolmannen-sukupolven-aurinkokennot-tassa-uusimmat-tulokset/> [viitattu 21.9.2021].

Hölttä, M., 2017. Auringon ja tuulen tallettajat [verkkolehti]. Aalto University Magazine, 20, S. 24–26. ISSN 1799-9324 Saatavissa: https://issuu.com/aaltouniversity/docs/aum_20_fi/24 [viitattu 26.10.2021].

Hotakainen, M., 2020. Aurinkopaneeleja printteinä [verkkolehti]. Tieteessä tapahtuu, 38 (2), S. 63–65. Saatavissa: <https://journal.fi/tt/article/view/91558> [viitattu 6.9.2021].

Kajal, P., Ghosh, K. & Powar, S., 2018. Manufacturing Techniques of Perovskite Solar Cells [verkkolehti]. Energy, Environment, and Sustainability, Springer Nature, S. 341–364. Saatavissa: doi:10.1007/978-981-10-7206-2_16 [viitattu 9.1.2022].

Käpylehto, J., 2016. Auringosta sähköt kotiin, kerrostaloon ja yritykseen. Helsinki: Into Kustannus Oy, 207 s. ISBN 978-952-264-528-9

Katz, E.A., 2020. Perovskite: Name Puzzle and German-Russian Odyssey of Discovery [verkkolehti]. *Helvetica Chimica Acta*, 103 (6). Saatavissa: doi:10.1002/hlca.202000061 [viitattu 11.10.2021].

Liu, F.W., Biesold G., Zhang M., Lawless R., Correa-Baena J.P., Chueh Y.L. & Lin Z., 2021. Recycling and recovery of perovskite solar cells [verkkolehti]. *Materials Today*, 43, S. 185–197. Saatavissa: doi:10.1016/J.MATTOD.2020.11.024 [viitattu 23.10.2021].

Min, H., Lee D.Y., Kim J., Kim G., Lee K.S., Kim J., Paik M.J., Kim Y.K., Kim K.S., Kim M.G., Shin T.J & Il Seok S., 2021. Perovskite solar cells with atomically coherent interlayers on SnO₂ electrodes [verkkolehti]. *Nature*, 598 (7881), S. 444–450. Saatavissa: doi:10.1038/S41586-021-03964-8 [viitattu 7.1.2022].

Mohan, M., 2018. Perovskite Photovoltaics. Teoksessa: Thomas S. & Thankappan A. (toim.) *Perovskite Photovoltaics - Basic to Advanced Concepts and Implementation* [verkkojulkaisu]. Kerala: Elsevier, S. 447–480. Saatavissa: doi:10.1016/B978-0-12-812915-9.00014-9 [viitattu 9.10.2021].

Motiva, 2021a. Auringosta sähköä [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringosta_sahkoa [viitattu 7.9.2021].

Motiva, 2021b. Aurinkosähköteknologiat [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat [viitattu 7.9.2021].

Perälä, R., 2017. Aurinkosähköä. Helsinki: Alfamer/Karisto Oy, 152 s. ISBN 978-952-472-273-5

Ramamurthy Rao H.K., Gemechu E., Thakur U., Shankar K. & Kumar A., 2021. Life cycle assessment of high-performance monocrystalline titanium dioxide nanorod-based perovskite solar cells [verkkolehti]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 230 (111288). Saatavissa: doi:10.1016/J.SOLMAT.2021.111288. [viitattu 14.1.2022].

Salminen, J., 2010. Miljoonan euron Millennium-palkinto: Joka kodin aurinkokenno marjamehusta? [verkkodokumentti]. *Suomen kuvalehti*. Saatavissa: <https://suomenkuvalehti.fi/jutut/kotimaa/talous/miljoonan-euron-millennium-palkinto-joka-kodin-aurinkokenno-marjamehusta/> [viitattu 27.12.2021].

Suomen ympäristökeskus, 2017. Tietoa elinkaariarvioinnista (LCA) ja elinkaariklinikka-toimintamallista pk-yrityksille [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.syke.fi/download/noname/%7B032490FA-19DF-4E5A-A40F-88E22B86DA20%7D/132057> [viitattu 10.1.2022].

Tian, X., Stranks, S.D. & You, F., 2020. Life cycle energy use and environmental implications of high-performance perovskite tandem solar cells [verkkolehti]. *Science Advances*, 6 (31). Saatavissa: doi:10.1126/SCIADV.ABB0055/SUPPL_FILE/ABB0055_SM.PDF [viitattu 3.2.2022].

Ympäristö.fi Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu, 2013. Elinkaariajattelu [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ja_tuotanto/Resurssitehokkuus/Elinkaariajattelu [viitattu 14.9.2021].

Zhang, J., Gao X., Deng Y., Zha Y. & Yuan C., 2017. Comparison of life cycle environmental impacts of different perovskite solar cell systems [verkkolehti]. *Solar Energy Material & Solar Cells*, 166, S. 9–17. Saatavissa: doi:10.1016/j.solmat.2017.03.008 [viitattu 24.1.2022].