



## **AURINKOSÄHKÖPANEELIEN KIERRÄTYS JA MATERIAALIN TALTEENOTTO**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2024

Väinö Jalava

Tarkastaja ja ohjaaja: Dosentti Kari Myöhänen

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Väinö Jalava

### **Aurinkosähköpaneelien kierrätys ja materiaalin talteenotto**

Energiatekniikan kandidaatintyö

2024

27 sivua, 7 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastaja: Dosentti Kari Myöhänen

Avainsanat: kierrätys, aurinkoenergia, aurinkosähkö, aurinkosähköpaneeli, kiertotalous, aurinkokenno, uusiutuva energia

Tämä tutkimus on kirjallisuuskatsaus aurinkopaneelien kierrätyksen menetelmistä ja kuinka näitä materiaaleja pystytään hyödyntämään laajemmassa yhteiskunnassa. Kierrätyksen ymmärtämiseksi työ tarjoaa teoreettista ja johdattelevaa pohjaa esitellessään aurinkopaneelien tekniikkaa ja tekijöitä kuten ilmastonmuutosta, jotka ajavat nykyisiä aurinkopaneeli investointeja. Työ myös selvitti, minkälaisia haasteita kierrätyksellä on ympäristön, terveyden ja taloudellisen kannattavuuden näkökulmista. Tutkielma pyrki myös arvioimaan Suomen nykyistä aurinkopaneelien kierrätystilannetta ja pohtii tulevia muutoksia esiteltyihin kierrätysmenetelmiin.

Tutkimus löysi neljä menetelmää, joilla pystytään kierrättämään aurinkopaneeleita korjaamisen lisäksi. Menetelmät hyödynsivät erilaisia ratkaisuja aurinkopaneelin tasojen erottamisessa kierrätystä varten kuten korkeaa lämpötilaa, happoja tai jättämällä erotuksen tekemättä ja suoraan murskaamalla paneelin. Vaihtoehtoisesti kierrätysprosesseja pystyttiin myös yhdistelemään. Tutkimus myös havaitsi useita sovelluskohteita kierrätyksestä saaduille materiaaleille. Kierrätyksestä saatua lasia esimerkiksi pystyttiin hyödyntämään lasitiilissä. Tutkimus havaitsi useita terveyteen sekä ympäristöön liittyviä ongelmia, mutta uskoo, että yhdistelmäratkaisut kierrätyksen suhteen pystyvät kompensoimaan näitä. Kierrätyksen taloudellinen kannattavuus perustui kierrätysmateriaalin saatavuuteen, prosessin pituuteen ja valittuun kierrätysmenetelmään. Tutkimus toteaa, että kierrätys on jo taloudellisesti kannattavaa nykyisten menetelmien rajoissa huomioiden, että kierrätettävää materiaalia on tarjolla. Suomessa kierrätys tapahtuu muun elektroniikkajätteen mukana eikä Suomessa ole aurinkopaneelien erikoistunutta kierrätystä. Tutkimus arvioi, että kierrätyksestä tulisi tehdä syvempää tutkimusta, kun suurempi osa Suomen aurinkopaneeleista saavuttaa niiden elinajanodotteen eli noin 15 vuoden päästä.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Väinö Jalava

### **Recycling of solar panels and recovery of materials**

Bachelor's thesis

2024

27 pages, 7 figures and 2 tables

Examiners: Adjunct professor Kari Myöhänen

Keywords: recycling, solar energy, solar power, solar panel, circular economy, solar cell, renewable energy

This study is a literature review on solar panel recycling methods and on how recycled materials can be reused in wider society. The thesis provides a theoretical and introductory basis by going through the technical aspects of solar panels and by explaining factors such as climate change that drive current investments in solar industry. The thesis also examined what challenges does recycling have from the perspectives of environment, health and economic feasibility. This study also aimed to review Finland's current solar panel recycling processes and to ponder what changes might happen to the current recycling methods in the future.

The study found four main methods that can be used to recycle solar panels along with panel restoration. The methods utilized different solutions for separating panel levels for recycling purposes. These methods included high temperature, acids or simply crushing the panel. Alternatively, the processes could also be combined to form the fourth method for recycling. The thesis also noticed several different applications for the materials gained through recycling. Recycled glass for example could be used in glass bricks. The study also noticed several problems with the mentioned recycling methods in relation to health and the environment. However, the study believes that combining different recycling methods may mitigate these negative aspects. The economic feasibility of recycling is dependent on the availability of the recycling materials, the length of the recycling process and on the chosen method. The study notes that recycling is already profitable with current methods while considering that recyclable material is available in the first place. Finland doesn't have its own specialized plant for recycling solar panels but recycles the panels along with other electronical waste. The thesis estimates that a secondary study should be conducted when greater part of Finland's solar panels reach their end of life phase in roughly 15 years.

## LYHENNELUETTELO

EVA Kapselointiaine aurinkopaneelin rakenteessa

PVF Polyvinylifluoridi

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	6
2	Aurinkoenergian kasvava kysyntä.....	8
3	Aurinkopaneelien tekniikka ja toiminta .....	10
3.1	Toimintaperiaatteet .....	10
3.2	Rakenne .....	10
3.3	Aurinkopaneeli sukupolvet .....	11
4	Aurinkopaneelien kestävä kierrätys .....	13
4.1	Valmistuksen ja huollon polkuriippuvuus .....	13
4.2	Nykyiset menetelmät .....	15
4.3	Kierrätyksen terveys- ja ympäristöhaitat .....	17
4.4	Kierrätyksen taloudellisuus.....	18
4.5	Kierrätys Suomessa.....	20
4.6	Tulevaisuuden toimintamallit .....	21
5	Materiaalin uudelleenkäyttö .....	23
6	Johtopäätökset .....	25
	Lähteet .....	27

# 1 Johdanto

Aurinko on ihmiskunnan ensisijainen energianlähde, joka säteilee maapallon pinnalle noin  $1,7 \cdot 10^{22}$  joulea energiaa puolentoista vuorokauden aikana. Tämä vastaa suunnilleen kolmen biljoonaa öljytynnyrin energiasisältöä. Ihmiskunta hyödyntää tällä hetkellä alle 0,1 prosenttia auringosta maahan saapuvasta energiasta sähkötuotannossaan. Trendi on kuitenkin muuttumassa, sillä aurinkoenergian hyödyntäminen aurinkopaneelien avulla on kasvanut tasaisesti 2000-luvun alusta lähtien. Vasta viime vuosina kasvu on kuitenkin saavuttanut eksponentiaalisen kiihtyvyyden. (Hayat et al., 2018)

Aurinkopaneelien hankintaa Euroopassa vauhdittaa erityisesti Euroopan unionin tuleva direktiivi, joka edellyttää lähes poikkeuksetta aurinkopaneelien asentamista uusien rakennusten katoille. Tämä asetus astuu voimaan vuonna 2026, ja sen odotetaan merkittävästi lisäävän aurinkoenergian integrointia rakenteilla oleviin kiinteistöihin. Aurinkopaneelien lisääntyminen Euroopassa tarkoittaa myös lisääntyvää tarvetta hyödyntää erilaisia menetelmiä aurinkopaneelien kierrätyksessä ja keksiä uusia tapoja soveltaa kierrätyksestä saatuja materiaaleja eri alojen tarpeiden mukaan. (SolarPower Europe, 2024)

LUT-yliopisto on teettänyt aiempaa tutkimusta aurinkopaneeleista, mutta Tommi Wäänäsen tutkimus *Kiertotalous aurinkoenergialiiketoiminnassa* käsitteli aihetta ensisijaisesti liiketoiminnan näkökulmasta, sivuten kysymyksiä esimerkiksi materiaalin soveltamisesta kierrätyksen jälkeen. Kyseinen tutkimus ei myöskään käynyt läpi syvällisesti kierrätysmenetelmiä. On myös todennäköistä, että aiheesta on tullut ilmi uutta tietoa vuosien varrella, joka luo tarpeen uudelle tutkimukselle. (Wäänänen, 2020)

Tämän tutkimuksen keskeinen tavoite on esitellä aurinkosähköpaneelien kierrätysmenetelmiä sekä mahdollisia tulevaisuuden toimintamalleja, ja arvioida kierrätyksestä saatujen materiaalien soveltamismahdollisuuksia eri aloilla. Työssä tarkastellaan kierrätysmenetelmien ympäristö- ja terveysvaikutuksia sekä kierrätyksen taloudellista kannattavuutta. Lisäksi työssä analysoidaan valmistus- ja huoltotoimien synnyttämiä polkuriippuvuuksia, jotka vaikuttavat paneelien elinajanodotteeseen ja täten kierrätykseen. Tutkimus pohtii myös Suomen nykytilannetta aurinkopaneelien kierrätyksessä ja vertailee sitä Saksaan. Työtä rajaa

keskittyminen pelkästään aurinkopaneeliin jättäen ulos aurinkopaneeleita tukevien komponenttien kierrätyksen kuten paneelin akkujen. Lisäksi tutkimus ei sisällä syvällistä analyysiä aurinkopaneelien elinkaaren aikaisista päästöistä, vaikka viittauksia aiheeseen esiintyy erityisesti polkuriippuvuuksia käsittelevässä osiossa. Työ keskittyy erityisesti ensimmäisen sukupolven aurinkopaneelien kierrätykseen, koska suurin osa alustavasta kierrätyksestä tulee olemaan ensimmäisen sukupolven paneeleita.

Tutkimus alkaa perustelemalla, miksi aurinkopaneelien kierrätyksen tutkiminen on ylipääntään tarpeellista kertomalla lyhyesti aurinkoenergian kasvun syistä. Tämän jälkeen työ etenee käsittelemään aurinkopaneelien rakennetta, toimintaperiaatteita ja eri paneelien sukupolvia. Kahden aloituskappaleen keskeisenä tavoitteena on luoda lukijalle kattava perusymmärrys tutkittavasta aihealueesta.

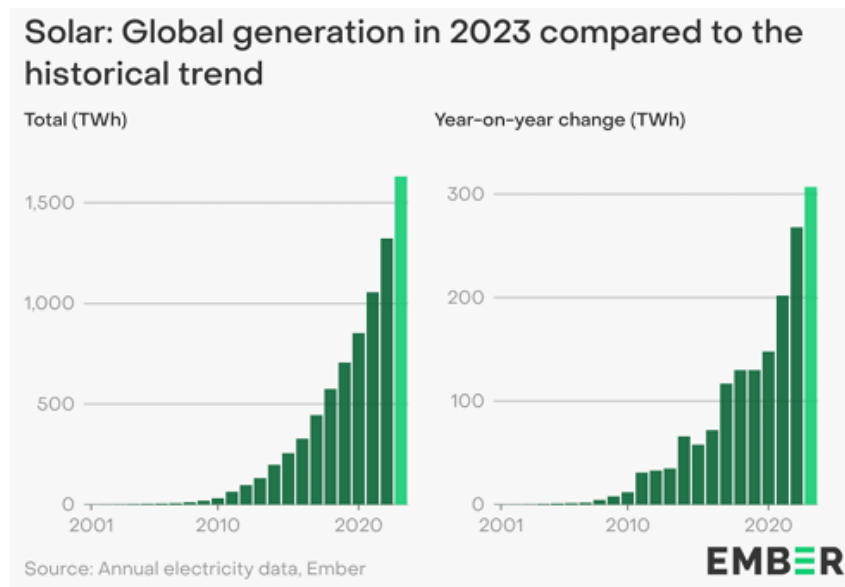
Aloituskappaleiden jälkeen tutkimuksessa tarkastellaan aurinkopaneelien valmistuksen ja huollon vaikutuksia kierrätysprosesseihin, minkä jälkeen siirrytään analysoimaan nykyisin käytössä olevia aurinkopaneelien kierrätysmenetelmiä. Näiden menetelmien käsittelyn jälkeen tutkimus syventyy tarkastelemaan niiden ympäristö- ja terveysvaikutuksia, minkä pohjalta arvioidaan myös yleisesti aurinkopaneelien kierrätyksen taloudellista kannattavuutta. Toiseksi viimeisessä osiossa analysoidaan aurinkopaneelien kierrätyksen tilannetta Suomessa vertaamalla sitä Saksaan. Lopuksi kestävän kierrätyksen osio päättyy pohdintaan aurinkopaneelien kierrätyksen tulevaisuuden näkymistä.

Työn toiseksi viimeinen pääkappale materiaalin uudelleenkäytöstä havainnollistaa, mitä materiaaleja saadaan kierrätysprosesseista ja kuinka näitä saatuja materiaaleja voidaan hyödyntää teollisuudessa. Tutkimuksen viimeinen kappale kokoaa saatua tietoa johtopäätöksiin ja arvioi, kuinka aurinkopaneelien kierrätyksen ja materiaalien uudelleenkäyttö tulee kehittymään tulevaisuudessa.

## 2 Aurinkoenergian kasvava kysyntä

Aurinkoenergiasta on tullut hyvin houkutteleva vaihtoehto monille maille niiden pyrkimyksissä saavuttaa energiasektorin osalta hiilineutraalisuus. Aurinkoenergia on helposti hyödynnettävä, uusiutuva ja käytännössä ehtymätön energianlähde, joka tarjoaa merkittäviä mahdollisuuksia kestäväan energiantuotantoon. Aurinkopaneelien kustannukset ovat viime vuosina laskeneet huomattavasti maailmanlaajuisesti, mikä on edistänyt niiden laajempaa käyttöä eri puolilla maailmaa. Alentuneiden kustannusten ansiosta aurinkopaneelit pystyvät olemaan entistä kilpailukykyisempiä ja haastamaan perinteisiä energialähteitä markkinoilla. Aurinkopaneelien modulaarinen rakenne mahdollistaa joustavan ja monipuolisen käytön erilaisissa ympäristöissä kuten rakennusten katoilla, samalla tarjoten helposti skaalautuvan ratkaisun energiantuotannon laajentamiseen tarpeiden kasvaessa. Kuvasta 1 voidaan nähdä, miten nopeasti aurinkoenergia on kasvanut 2000-luvun alusta.

(Goh et al., 2024)



Kuva 1. Globaali aurinkoenergian kasvu. (Wiatros-Motyka et al., 2024)

Aurinkoenergia edustaa merkittävää uusiutuvan energian vaihtoehtoa, mutta se ei ole täysin ongelmaton ratkaisu kaikkiin energiantuotannon tarpeisiin. Sen hyödyntäminen on luonnollisesti riippuvaista auringonvalon saatavuudesta, mikä luo tarpeen energiatehokkaalle varastoinnille. Lisäksi auringonvalon vaihtelu pilvisyyden vuoksi saattaa tehdä



energiantuotannosta ajallisesti epätasuaista ja täten haastavasti ennakoitavaa. Aurinkopaneelien valmistusprosesseihin myös liittyy väistämättä päästöjä, ja paneelien sijoittaminen isoihin aurinkopaneelipuistoihin voi vaikuttaa paikalliseen ympäristöön esimerkiksi maalueiden käytön kautta. Tämä tutkimus keskittyy erityisesti aurinkopaneelien elinkaaren loppupäähän, eli niiden kierrätykseen, joka aiheuttaa sekä ympäristöhaittoja, että merkittäviä taloudellisia kustannuksia. Kierrätysprosessi tarjoaa kuitenkin myös mahdollisuuden edistää vihreämpää tulevaisuutta yhdistämällä uusiutuvan energiantuotannon kiertotalouteen.

(Goh et al., 2024)

## 3 Aurinkopaneelien tekniikka ja toiminta

Aurinkopaneelien tehokas kierrätys edellyttää perusteellista ymmärrystä niiden rakenteesta ja toimintaperiaatteista, sillä nämä määrittävät käytetyt materiaalit sekä kierrätysprosessien toteutuksen. Tämä työ ei käsittele erityisesti kaikkien aurinkopaneelityyppien rakenteita, vaan keskittyy tarjoamaan teoreettisen perustan sekä kuvaamaan tyypillistä ensimmäisen sukupolven aurinkopaneelien rakennetta ja toimintamekanismeja.

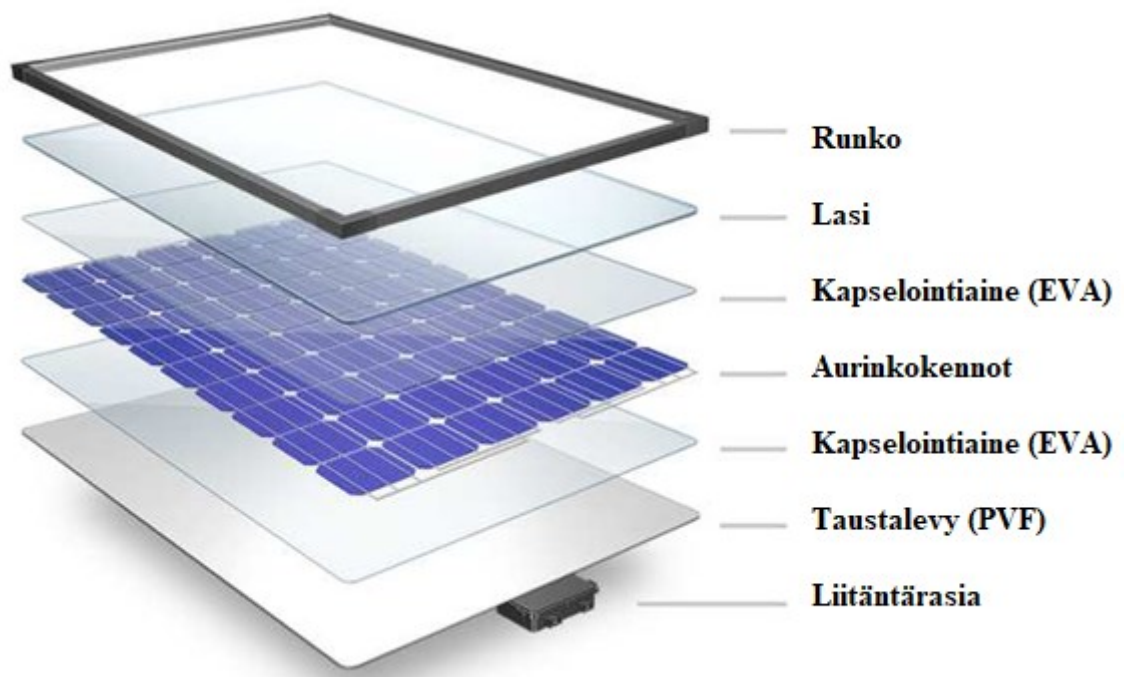
### 3.1 Toimintaperiaatteet

Aurinkosähköpaneelien toimintaperiaate perustuu uusiutuvan energian tuottamiseen auringon säteilyenergian hyödyntämisen kautta. Auringonsäteily koostuu fotoneista, jotka ovat mikroskooppisia hiukkasia, jotka kuljettavat säteilyenergiaa maapallolle. Kun nämä fotonit osuvat aurinkopaneelin kennojen materiaaliin, niiden energia siirtyy kennon atomien elektroneille. Tämä energiansiirto vapauttaa elektroneita, saaden ne liikkeelle ja synnyttäen näin sähkövirran. Syntynyt sähkövirta ohjataan aurinkokennon virtajohtimien kautta hyötykäyttöön. Aurinkopaneelit tuottavat tasasähköä, joka pitää muuttaa vaihtosuuntaajan avulla vaihtosähköksi, jos paneeleista saatua sähköä pyritään kuljettamaan sähköverkossa. Vaihtoehtoisesti tasavirta voidaan tarpeen mukaan varastoida suoraan akkuihin myöhempää käyttöä varten. (Mannerkivi, 2014; Nyman, 2019)

### 3.2 Rakenne

Aurinkosähköpaneelit koostuvat useista toisiinsa kytketyistä aurinkokennoista, jotka yhdessä muodostavat paneelin rakenteellisen ja toiminnallisen kokonaisuuden. Tyypillisesti yksi paneeli sisältää vähintään noin 60 aurinkokennoa, joiden koko vastaa suunnilleen CD-levyä. Kun aurinkokennot liitetään sarjaan riittävässä määrin, paneeli pystyy tuottamaan sähköä tehokkaasti. Yksittäinen aurinkokenno koostuu kahdesta litteästä puolijohdekerroksesta, joiden välissä on rajapinta. Toisessa kerroksessa on p-tyypin puolijohde ja toisessa n-tyypin puolijohde. Puolijohdeiden toiminta perustuu siihen, että ne toimivat eristeinä silloin, kun niihin ei kohdistu energiaa. Aurinkokennossa syntyy sisäinen sähkökenttä, kun fotonit

osuvat puolijohdekerrokseen, mikä aiheuttaa elektronien kasaantumisen n-tyypin puolijohdeeseen. Tyypillisesti aurinkopaneelien puolijohdeena käytetään piitä. Aurinkokennojen lisäksi aurinkopaneelijärjestelmä koostuu useista muista keskeisistä komponenteista kuten alumiinirungosta, karkaistusta lasista, liitântärsiasta, kapselointimateriaalista sekä taustalevystä. Kapselointimateriaali toimii pääasiassa kiinnitysmateriaalina rakenteessa pitäen komponentit yhdessä, kun taas PVF-taustalevy ja alumiinirunko tarjoavat paneelille kestävä ja tukevan rakenteen. Kapselointiainetta kutsutaan yleensä EVA:ksi, ja se on ulkonäöltään läpinäkyvää muovia. (Mannerkivi, 2014; Nyman, 2019; Xu et al., 2018)

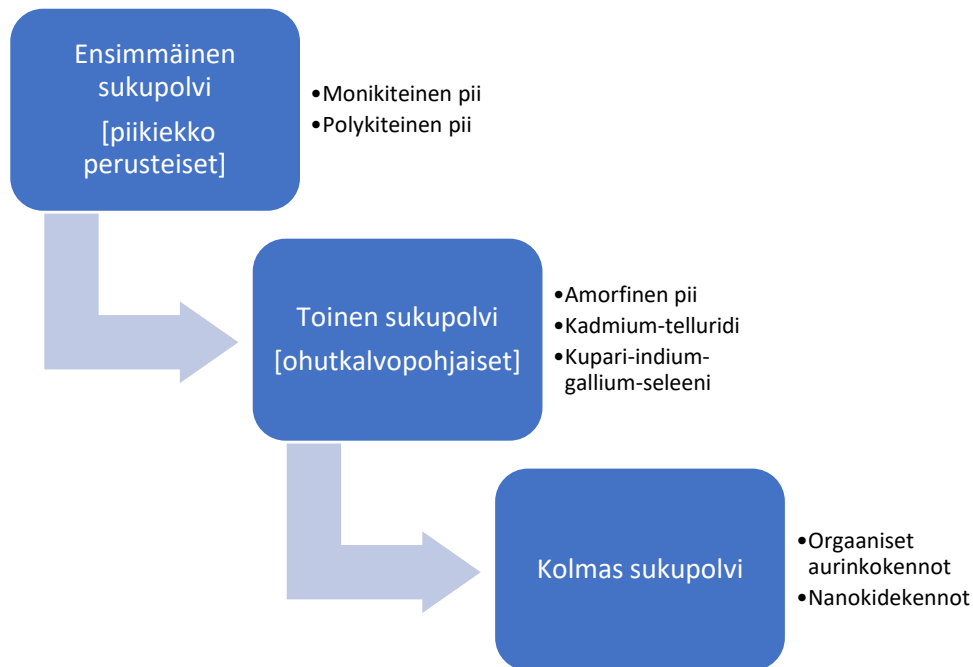


Kuva 2. Ensimmäisen sukupolven aurinkopaneelin tyypillinen rakenne. (Muokattu) (Divya et al., 2023)

### 3.3 Aurinkopaneeli sukupolvet

Aurinkopaneelit voidaan luokitella kolmeen sukupolveen. Ensimmäisen sukupolven paneelit koostuvat yksikiteisistä ja monikiteisistä piikennoista (mono-Si ja poly-Si), jotka ovat edelleen laajimmin käytössä niiden korkean hyötysuhteen vuoksi. Toisen sukupolven paneelit hyödyntävät ohutkalvoteknologiaa, jossa aurinkosähkökennojen materiaalikerrokset ovat huomattavasti ohuempia verrattuna perinteisiin piikennoihin. Kolmannen sukupolven paneelit sisältävät muun muassa orgaanisia aurinkokennoja ja edustavat näistä kolmesta

sukupolvesta teknologisesti kehittyneintä vaihtoehtoa. Kuva 3 sisältää yhteenvedon aurinkopaneeli sukupolvista. (Nyman, 2019; Xu et al., 2018)



Kuva 3. Aurinkopaneeli sukupolvet.

Kierrätyksen näkökulmasta eri sukupolvien aurinkopaneeleilla on merkittäviä eroja. Erityisesti kolmannen sukupolven paneelit on suunniteltu maksimoimaan energiantuotanto pienemmillä materiaalikustannuksilla, mikä vähentää niiden elinkaaripäästöjä ja muokkaa niiden kierrätysmenetelmiä. On kuitenkin huomattava, että kolmannen sukupolven aurinkopaneelit eivät ole vielä kaupallisessa käytössä. Ensimmäisen sukupolven paneelit, jotka ovat edelleen yleisimmin käytettyjä, todennäköisesti säilyttävät tämän aseman lähitulevaisuudessa. On kuitenkin tärkeää huomioida, että tulevaisuudessa uudet paneelityypit saattavat syrjäyttää ensimmäisen sukupolven, joka edellyttää kierrätysprosessien muokkausta. Nykyiset kierrätysmenetelmät eivät välttämättä sovellu yhtä tehokkaasti toisen tai kolmannen sukupolven kennojen käsittelyyn. (Nyman, 2019; Xu et al., 2018)

## 4 Aurinkopaneelien kestävä kierrätys

Käytettyjen aurinkopaneelien määrän ennakoidaan kasvavan noin 9,5 miljoonaan tonniin vuoteen 2050 mennessä. Kierrätyksen näkökulmasta merkittävin paneelityyppi tulee olemaan piipohjaiset eli ensimmäisen sukupolven paneelit, joiden osuus aurinkopaneelien markkinaosuudesta oli 92 % vuonna 2014. Kierrätysmenetelmien tarkastelu tulee siis kohdistumaan ensisijaisesti ensimmäisen sukupolven paneeleihin, sillä ne ovat ensimmäisiä kierrätykseen tulevia paneeleita ja niiden markkinaosuus on tällä hetkellä huomattavasti suurempi kuin muiden sukupolvien paneelityypit. (Xu et al., 2018)

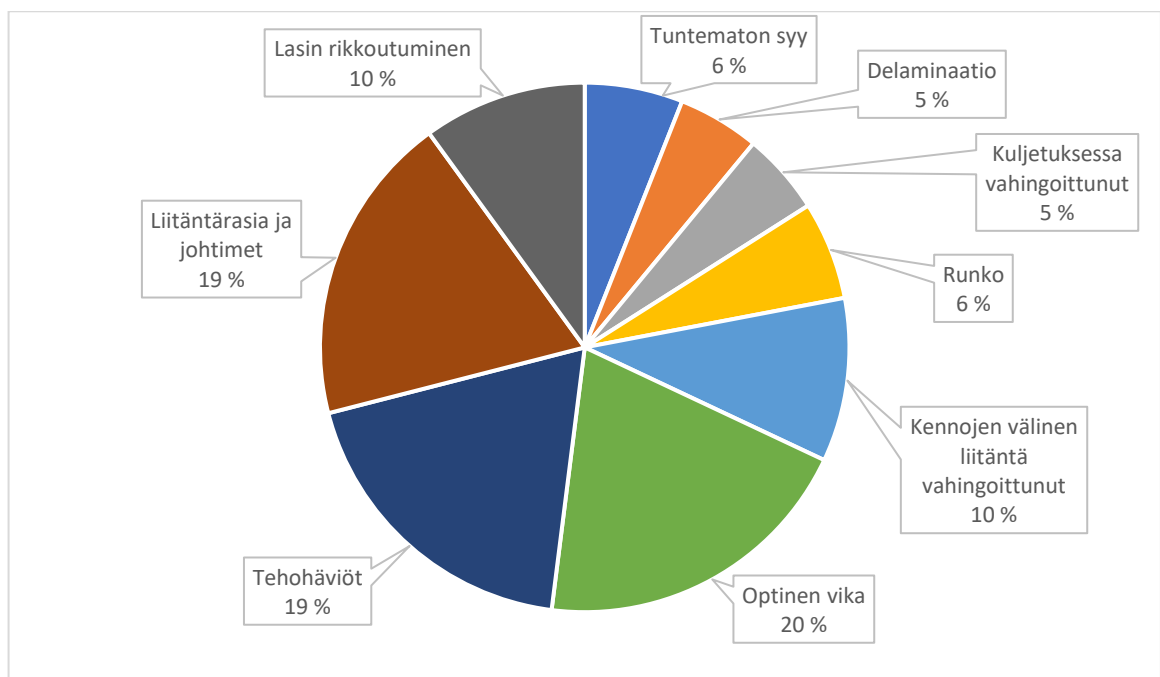
Tämä kappale pyrkii ensisijaisesti esittelemään erilaisia prosesseja, joita hyödynnetään aurinkopaneelien kierrätyksessä, sekä tarkastelemaan, kuinka taloudellisesti tehokkaita, ympäristöystävällisiä ja terveydelle haitallisia nämä prosessit ovat. Kappale tuo myös alussa esiin aurinkopaneelien valmistuksen ja huollon vaikutukset kierrätykseen. Kappaleen loppuosassa tarkastelee lyhyesti Suomen nykyistä aurinkopaneelien kierrätystilannetta ja vertailee tätä esimerkki maahan Saksaan. Kappaleen loppu myös pohtii mihin suuntaan aurinkopaneelien kierrätyksen toimintamallit tulevat kehittymään.

### 4.1 Valmistuksen ja huollon polkuriippuvuus

Aurinkopaneelien valmistusta tarkasteltaessa kierrätysnäkökulmasta on luontaista myös ajatella, mitä päästöjä syntyy elinkaaren alussa ja kuinka valmistus sekä huolto vaikuttaa paneelien elinajanodotteeseen. Tutkimus kuitenkin olettaa, että raaka-aineiden hankinnasta johtuvat päästöt korvautuvat paneelin materiaalien uudelleenkäytöllä ajan mittaan merkityksellömmiksi. Tällainen tarkastelutapa voi kuitenkin osaltaan johtaa siihen, että aurinkopaneelien koko elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset jäävät osittain huomioimatta, erityisesti kun otetaan huomioon, että kierrätys ei täysin poista alkuperäisten raaka-aineiden hankintaan liittyviä ympäristöhaitoista. Puhumattakaan päästöistä, jotka johtuvat raaka-aineiden ja aurinkopaneelien siirtämisestä ympäri maailmaa. Valmistuksen päästöt eivät myöskään johdu pelkästään vain materiaaleista tai kuljetuksesta vaan myös tuotantoon käytetystä energiasta. Aurinkopaneelien valmistuksen päästöt ovat siis hyvin maakohtaisia eli riippuvat maiden energiajärjestelmistä. Kiina esimerkiksi johtaa aurinkopaneelien valmistuksessa,

mutta sen sähköntuotanto on hyvin hiiliperusteista, joka vaikuttaa suoraan kasvattavana tekijänä paneelin elinkaaripestöissä. (Grant ja Hicks, 2020)

Aurinkopaneelien normaali elinajanodote sijaitsee noin 25–30 vuoden välillä. Aurinkopaneelien energiantuotantokyky on keskimäärin havaittu vähenevän noin 0,8 % vuodessa, mutta tämä heikkeneminen on voimakkaasti sidoksissa valmistajan laatuun sekä paneelien huolto- ja ylläpitökäytäntöihin. Aurinkopaneelien huoltotarpeet vaihtelevat merkittävästi alueellisten olosuhteiden mukaan, sillä esimerkiksi pöly ja hiekka voivat aiheuttaa huomattavia häviöitä aurinkopaneelin energiantuotannossa, mikä edellyttää säännöllistä puhdistamista. Aurinkopaneelien käytöstä poistamisen yleisin syy on fyysiset vauriot, jotka johtuvat pääasiassa sääolosuhteista kuten myrskyistä. Pitkäaikainen altistuminen ulkoisille ympäristötekijöille kuten voimakkaalle tuulelle, sateelle ja lämpötilavaihteluille myös vaikuttavat negatiivisesti paneelien rakenteellisiin komponentteihin, heikentäen niiden kestävyttä ja suorituskykyä ajan myötä. (Chowdhury et al., 2020; Grant ja Hicks, 2020)



Kuva 4. Asiakasraportteihin perustuvat aurinkopaneeli vika syyt prosentteina. (Muokattu) (Chowdhury et al., 2020)

## 4.2 Nykyiset menetelmät

Nykyiset aurinkopaneelien kierrätysmenetelmät voidaan jakaa 3 eri tyyppiin, jotka ovat mekaanisen, termisen ja kemikaalisen erotuksen menetelmät. Näiden kolmen lisäksi kierrätysmenetelmiä pystytään yhdistämään, vaikkakin nämä yhdistelmäratkaisut ovat vain laboratoriokäytössä eivätkä ole kaupallisessa käytössä vielä. Kierrätyksen ohella paneeleita voidaan myös pyrkiä korjaamaan. (Chowdhury et al., 2020)

Aurinkopaneelin kierrätys alkaa erottamalla aurinkopaneelista alumiinikehys, liitántärsiat ja upotetut kaapelit toisistaan eli ulkoiset komponentit. Aurinkopaneelin kehyksen alumiini saadaan talteen perinteisin toissijaisen metallurgian avulla. Aurinkopaneelien kierrätysprosessin teknisesti vaativin ja keskeisin vaihe on lasin, aurinkokennojen ja kapselointiaineen erottelu toisistaan. Kierrätysmenetelmien nimet tulevat niistä tavoista, joilla pyritään erottamaan näitä eri kerroksia toisistaan. Mekaaniseen erotteluun perustuva lähestymistapa näiden kerrosten käsittelyssä tarkoittaa sitä, että kerrosten erottelua ei tehdä lainkaan, vaan paneeli murskataan ja silputaan kokonaisuudessaan. Tämän jälkeen syntyneestä murskatusta materiaalista voidaan erilaisten prosessien avulla poistaa lasi ja metallit. Murskaamisella ja silpupumisella pystytään myös tarkastelemaan paremmin jääneen materiaalin myrkyllisyyttä hävittämistä varten. Lasimurskan erottelu mekaanisessa prosessissa on varsin edullista, vaikka saatava lasi sisältää epäpuhtauksia kuten jäänyttä kapselointiainetta ja ruuveja, joita pitää erotella murskatusta lasista. Murskattua ja puhdistettua lasia pystytään kierrättämään muun yhteiskuntajätteistä saadun lasin kanssa. Aurinkopaneelien johtimista talteen otettu hopea ja kupari voidaan kierrättää perinteisillä metallinkierrätysmenetelmillä. Lisäksi näiden metallien talteenotto on mahdollista toteuttaa myös kemiallisten menetelmien avulla, mikä tarjoaa vaihtoehtoisen lähestymistavan metallin kierrätysprosessiin. Jäänyt kapselointiaine pystytään käsittelemään jätteenpolttolaitoksissa. (Chowdhury et al., 2020; Nyman, 2019)

Mekaanisen erotuksen lisäksi. Eri aurinkopaneelin kerroksia pystytään myös erottelemaan hyödyntäen termisiä keinoja. Termisessä prosessissa aurinkopaneelin alumiinirunko lämmitetään noin 250 celsius asteeseen, jonka jälkeen se pystytään poistaa. Jääneet aurinkokennot kuumennetaan 480 celsius asteeseen nopeudella 15 °C/min, jotta eri kapselointiainekerrokset sulaisivat pois. Termisen prosessin jälkeen lasi, kaapelit ja kennot erotellaan toisistaan. Kennoista erotellaan vielä hopea, alumiini, kupari ja lyijy hyödyntäen erilaisia liuotusaineita. Termisen prosessin etu on kapselointiaineen eli EVA:n täydellinen poisto ja

piikiekkojen laadun säilyminen, mutta prosessi tuottaa vaarallisia päästöjä ja on energiain-  
tensiivinen korkean lämpötilan takia. Näitä asioita käsitellään enemmän seuraavassa 4.3  
kappaleessa. Erotetuista piikiekoista voidaan liuottaa kemikaaleja hyödyntäen harvinaisia  
metalleja pois korkean jälleenmyyntihinnan takia tai kiekkoja voidaan myydä suoraan uu-  
delleenkäyttöön. Aurinkopaneeleista saatujen materiaalien sovelluksia käsitellään syvem-  
min työn lopussa kappaleessa viisi. (Chowdhury et al., 2020; Divya et al., 2023)

Kemiallisilla erotusmenetelmillä pyritään pääsemään samaan lopputulokseen kuin termi-  
sessä prosessissa, eli EVA-kerroksen tehokkaaseen poistamiseen. Näiden menetelmien to-  
teutus ei perustu yhden ainoan kemikaalin käyttöön, vaan hyödyntää useita erilaisia kemial-  
lisiä yhdisteitä ja menetelmiä. Esimerkiksi yhdessä menetelmässä EVA-kerros liuotetaan  
typpihapolla, kun taas toisessa käytetään trikloorietyleeniä EVA kerroksen sulattamiseen.  
Kemiallisten prosessien etuna on niiden yksinkertaisuus ja kyky säilyttää piikiekot ehjinä,  
mikä mahdollistaa niiden tehokkaan kierrätyksen. Kuitenkin näillä menetelmillä on myös  
merkittäviä haittapuolia. EVA-kerroksen poistaminen voi olla aikaa vievä prosessi ja edel-  
lyttää usein erikoistunutta sekä kallista laitteistoa. Lisäksi käytettävät kemikaalit ovat ter-  
veydelle vaarallisia ja aiheuttavat haitallisia ympäristöpäästöjä. Epäorgaanisten happojen  
käyttö saattaa myös johtaa piikiekkojen vaurioitumiseen, mikä heikentää niiden jälleen-  
myyntiarvoa. EVA-kerroksen poistamisesta seuraa samanlainen prosessi kuten termisessä  
menetelmässä, jossa irti saaduista piikiekoista liuotetaan harvinaisia metalleja pois tai kiekot  
myydään suoraan eteenpäin. (Chowdhury et al., 2020)

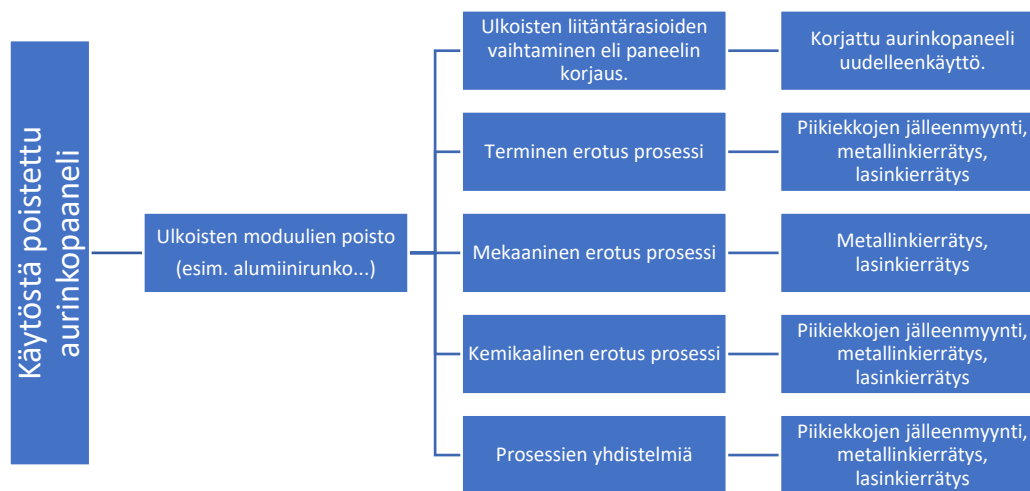
Kemiallisten ja termisten prosessien yhdistäminen on myös mahdollista, jotta voitaisiin  
kompensoida kummankin menetelmän yksittäisiä heikkouksia. On kuitenkin tärkeää huomi-  
oida, että tällaiset yhdistelmäratkaisut ovat toistaiseksi rajoittuneet laboratoriotutkimuksiin,  
eikä niitä ole vielä otettu käyttöön teollisessa mittakaavassa. Ainoastaan mekaaniset erotus-  
menetelmät ja kemikaaleihin perustuvat prosessit ovat saavuttaneet käytännön sovellusvai-  
heen. (Chowdhury et al., 2020; Xu et al., 2018)

Kierrätyksen lisäksi vanhoja aurinkopaneeleita pystytään myös korjata osittain. Aurinkopa-  
neelien korjaaminen on mahdollista vaihtamalla liitántärsasioita, mikä voi parantaa vanhojen  
paneelien energiantuotantokykyä. Tämä menetelmä on kuitenkin sovellettavissa vain aurin-  
kopaneelin ulkoisiin liitántärsasioihin, jotka sijaitsevat paneelin rungon ulkopuolella. Aurin-  
kopaneelien korjaamisen taloudellinen kannattavuus ei ole myöskään yksiselitteistä. Korjaus  
voi parantaa paneelin energiantuotantoa jossain määrin, mutta saavutettu hyöty ei useinkaan



riitä kilpailemaan uuden paneelin tarjoaman energiantuotanto tehokkuuden kanssa. Kuvasta 5 pystytään nähdä yhteenveto eri tavoista kierrättää aurinkopaneeli.

(Chowdhury et al., 2020; Xu et al., 2018)



Kuva 5. Aurinkopaneelin kierrätysprosessi.

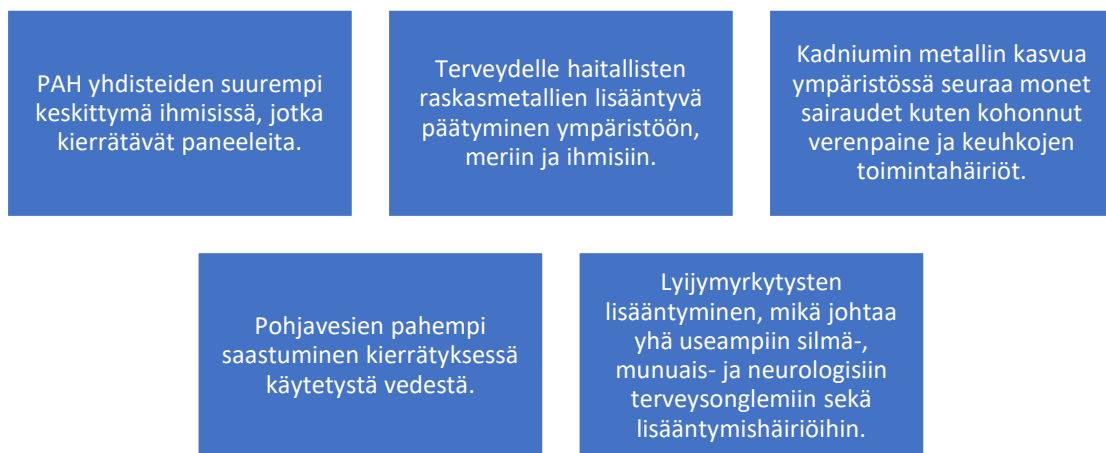
#### 4.3 Kierrätyksen terveys- ja ympäristöhaitat

Jokaisella kierrätysprosessilla on omat ympäristöhaittansa. Esimerkiksi mekaaninen erotusprosessi perustuu paneelin murskaamiseen ja pilkkomiseen, mikä tuottaa huomattavia määriä pölyä, joka sisältää muun muassa lasikuitupartikkeleita. Pöly siis aiheuttaa aurinkopaneelin mekaanisessa prosessoinnissa merkittävän terveysriskin työntekijöille ja tietysti ilman kunnollista suodatusta myös ympäristölle. Mekaanisesta prosessoinnista syntyy myös merkittävä määrä melua, joka voi olla ihmisten kuulolle haitallista ilman suojausta. (Xu et al., 2018)

Kemiallisiin prosesseihin perustuvat erotusmenetelmät toisaalta käyttävät epäorgaanisia happoja EVA-kerrosten poistamisessa, josta muodostuu typpioksideja ja muita ympäristölle sekä ihmisille haitallisia kaasuja. Näiden kaasujen takia työntekijöiden pitää käyttää hengityssuojaimia kaasuista johtuvien terveysriskien välttämiseksi. Prosessista jäävän nesteen hävittäminen on myös varsin haastavaa. Epäorgaanisten kemikaalien lisäksi voidaan myös hyödyntää orgaanisia liuottimia EVA-kerroksen sulattamisessa. Nämä prosessit vievät

huomattavasti enemmän aikaa, minkä takia prosessia usein nopeutetaan käyttämällä ultraääntä. Sivutuotteena prosessista syntyy kuitenkin suuri määrä epävakaata nestemäistä jätettä, jota on myös haastava käsitellä kuten epäorgaanisten happojen kanssa. (Xu et al., 2018)

Terminen menetelmä ei tuota valtavaa melua tai suurta määrää kemiallista jätettä, mutta prosessissa pyrolyysin aikana syntyy terveydelle haitallisia jätteenkaasuja ja menetelmä on myös erittäin energiantensiivinen. Energiantensiivisyys ei välttämättä ole kuitenkaan ongelma riippuen käyttääkö laitos uusiutuvaa energiaa vai ei. Jos laitos kuitenkin pyörii fossiilisilla polttoaineilla, niiden aiheuttamat päästöt pitää ottaa huomioon prosessin ympäristövaikutusten osalta. (Xu et al., 2018)



Kuva 6. Käytettyjen aurinkopaneeli aiheuttamat terveysvaikutukset. (Divya et al., 2023)

#### 4.4 Kierrätyksen taloudellisuus

Potentiaaliset tulot eri kierrätysmenetelmistä ovat vahvasti sidoksissa prosessien monimutkaisuuden tasoon. Yritykset kohtaavat haasteen tasapainotellessaan nopeasti toimeenpantavien, mutta hyötysuhteeltaan huonompien vaihtoehtojen välillä. Myös ympäristöystävällisempi kierrätysmenetelmä ei välttämättä ole taloudellisesta näkökulmasta järkevä vaihtoehto. Tämä vaatii huolellista harkintaa yritykseltä sekä lyhyen aikavälin operatiivisten tarpeiden, että pitkän aikavälin kestävä kehityksen tavoitteiden välillä. Kierrätyksen kannattavuus on myös riippuvainen siitä, kuinka pitkälle yritys haluaa kierrättää aurinkopaneeleita.

Nykyiset menetelmät mahdollistavat paneelien kierrättämisen niiden peruskomponentteihin kuten kupariin, alumiiniin ja piihin. Tämä toisaalta lisää kierrättämisen välivaihteita eli kasvattaa laitoksen kustannuksia. Yritys pystyy lyhentämään kierrätysprosessia jälleenmyymällä suurempia kokonaisuuksia kuten aurinkokennojen piikiekkoja. Nykyiset menetelmät ovat kuitenkin jo riittävän hyviä, että kierrätys on keskimäärin parempi vaihtoehto verrattuna uuden paneelin tekoon neitsyt materiaaleista. On kuitenkin huomioitava, että kierrätyksen kannattavuus on myös hyvin riippuvainen siitä, miten paljon kierrätysmateriaalia eli käytettyjä aurinkopaneeleita kyseisessä maassa on ja mitä esitellyistä kierrätysmenetelmistä käytetään. Ensimmäisen sukupolven paneelin kierrätyksen kokonaishinta liikkuu noin 8.8 €/m<sup>2</sup> ja 20.9 €/m<sup>2</sup> välillä huomioiden jätteiden jatkokäsittelyn ja kuljetuksen sekä olettaen, että paneelin paino on noin 16 kg/m<sup>2</sup>. (Divya et al., 2023)

Taulukko 1. Materiaalin talteenotosta saatava potentiaali tulo 2019. (Divya et al., 2023)

<b>Materiaali</b>	<b>Talteenotto (%)</b>	<b>Paino (kg &amp; g)</b>	<b>Hinta (\$/kg)</b>	<b>Arvo (\$/moduuli)</b>	<b>Kokonaisarvo (%)</b>
<b>Lasi</b>	100	13.5 kg	0.10	1.35	12.7
<b>Alumiini</b>	100	1.83 kg	0.95	1.74	16.4
<b>Polymeeri</b>	90	1.18 kg	-	0	0
<b>Pii</b>	100	0.56 kg	5.52	3.09	29.1
<b>Hopea</b>	100	6.5 g	574.23	3.73	35.2
<b>Kupari</b>	100	0.11 kg	5.00	0.55	5.2
<b>Lyijy</b>	100	18.3 g	1.10	0.02	0.2
<b>Tina</b>	100	21.9 g	0.13	0.13	1.2

Taulukko 1 havainnollistaa ensimmäisen sukupolven piikennosta talteen otettavien materiaalien maksimaalista tuottoa optimaalisten talteenottoprosenttien ja -olosuhteiden aikana. Hintasarake esittää materiaalien markkinahinnan suhteessa niiden painoon. Arvosarake osoittaa kunkin materiaalin hinta-arvon yhtä moduulia kohden. Kokonaisarvosarake puolestaan kuvaa yhden materiaalin osuuden moduulin kokonaisarvosta. Materiaalien yhteenlaskettu arvo on 10,61 dollaria per moduuli.

#### 4.5 Kierrätys Suomessa

Aurinkopaneelien kierrätys ei ole vielä Suomessa edennyt merkittävään tahtiin, mikä johtuu siitä, että käytöstä poistettuja paneeleja ei ole toistaiseksi kertynyt suuria määriä verrattuna moniin muihin maihin. Valtaosa asennetusta aurinkopaneelikapasiteetista on edelleen toiminnassa, joten niiden kierrättämiseksi ei ole syntynyt akuuttia tarvetta. Tällä hetkellä aurinkopaneeleita kierrätetään hyödyntämällä pitkälti samoja prosesseja kuin muiden elektroniikkatuotteiden kierrätyksessä eli mekaanisin erotusmenetelmin. Aurinkopaneelien kierrätys tapahtuu Suomessa Kuusakoskella, jonne *Solar Finland* toimittaa käytöstä poistettuja aurinkopaneeleita. Yleisradion toteuttamassa haastattelussa vuonna 2021 *Solar Finland*:in myyntijohtaja Anu Areva toteaa, että Suomessa ei tällä hetkellä ole merkittävää kysyntää aurinkopaneelien erilliselle kierrätykselle. *Naps Solar Systems*:in myyntijohtaja Markus Andersen puolestaan ennakoii, että muut Pohjoismaat saattavat käynnistää aurinkopaneelien kierrätyksen ennen Suomea. Tämä voisi tarjota mahdollisuuden siis ulkoistaa kierrätystä näihin maihin siinä tapauksessa, että Suomen oma kierrätyskapasiteetti ei tulevaisuudessa ole riittävä. Andersen arvioi, että kierrätyskysymys tulee ajankohtaiseksi vasta 15 vuoden päästä, kun Suomessa alkaa olla merkittävä määrä käytettyjä aurinkopaneeleita. (Aldhafer, 2023; Kiviranta, 2021)

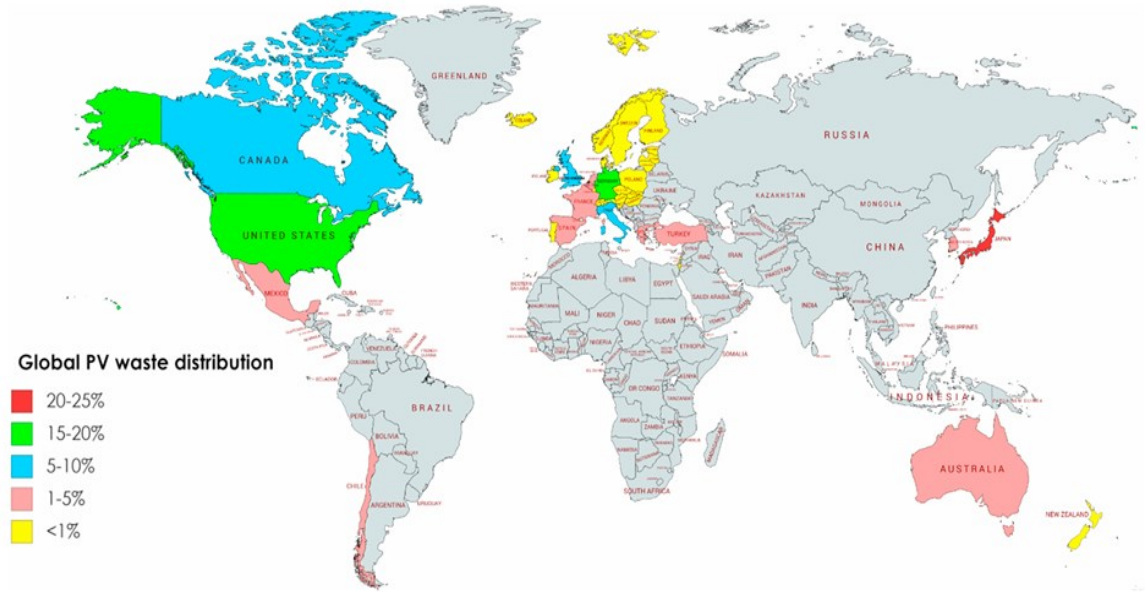
Kierrätys Suomessa on varsin alkeellista, jos sitä verrataan Saksaan. Saksassa aurinkopaneelien erikoistunut kierrätys on ehtinyt jo lähteä vauhtiin. Saksa on investoinut laitoksiin, jotka erityisesti kierrättävät aurinkopaneeleita. Kierrätys Saksassa on myös varsin tehokasta, koska laitokset hyödyntävät korkeaa teknologiaa esimerkiksi robotiikkaa paneelien purkamisessa. Saksan ainutlaatuinen osaaminen aurinkopaneelien kierrätyksen osalta globaalissa mittakaavassa tulee enemmän kuitenkin sen lainsäädännön ja globaalien sekä paikallisten toimijoiden yhteistyön kautta. Saksan hallinto esimerkiksi pyrkii lisäämään aurinkopaneelien kierrätystä tekemällä tiedotuskampanjoita, ylläpitämällä tiukkoja ympäristöstandardeja, tekemällä globaalista yhteistyötä kierrätyksessä ja lisäämällä käytettyjen aurinkopaneelien keräyspisteiden määrää Saksassa. Saksalaiset tutkimuslaitokset pyrkivät myös tiiviimpään yhteistyöhön teollisuuskumppaneiden ja eri tutkimuslaitosten kanssa aurinkopaneelien kierrätysteknologioiden edistämiseksi. (Goh et al., 2024)

#### 4.6 Tulevaisuuden toimintamallit

Kierrätysprosessien tutkimus jatkuu ja tulee todennäköisesti muuttumaan merkittävästi erityisesti, koska ensimmäisen sukupolven paneelit tulevat vaihtumaan muihin tehokkaampiin ja ympäristöystävällisempiin paneelityyppeihin. Toisen sukupolven aurinkopaneelit, erityisesti ohutkalvoteknologiaan perustuvat, ovat valmistusprosessien osalta huomattavasti materiaalihokkaampia verrattuna ensimmäisen sukupolven paneeleihin. Paneelien materiaalihokkuuden kasvaessa niiden valmistukseen tarvittava materiaalmäärä vähenee, mikä puolestaan vähentää kierrätettävän materiaalin määrää kokonaisuutena elinkaaren lopussa. Tulevaisuuden kierrätysmenetelmien on otettava huomioon erilaisten aurinkopaneelisukupolvien rakenteelliset ja materiaaliset erot. Esimerkiksi ohutkalvoisiin aurinkopaneeleihin happopohjaiset erotusmenetelmät eivät ole mahdollisia. (Chowdhury et al., 2020; Xu et al., 2018)

Suomen nykyinen aurinkopaneelien kierrätysprosessi eli paneelien kierrättäminen elektroniikka jätteen mukana kuvastaa suurta osaa maailmasta. On toisaalta huomioitava, että ne maat, jotka käyttävät eniten aurinkopaneeleita tällä hetkelle ovat alkaneet jo merkittävästi panostamaan paneelien kierrätykseen kuten Saksa, Kiina, Yhdysvallat ja Japani. Kuvasta 7 voi nähdä aurinkopaneelin jätteen jakautumisen globaalisti. Käytettyjen aurinkopaneelien kasvava määrä tulee myös luomaan muille maille kannustimen tulevaisuudessa ratkaisemaan heidän omien aurinkopaneelien kierrätysongelmat. (Goh et al., 2024)

Chowdhury et al. (2020) toteavat tutkimuksessaan, että kierrätys- ja uudelleenkäyttöstrategioita globaalissa mittakaavassa tullaan tarvitsemaan viimeistään vuoteen 2040 mennessä, mikäli aurinkopaneelien määrä kasvaa tutkimuksessa tehtyjen arvioiden mukaisesti. Tulevaisuuden aurinkopaneelien kierrätykseen liittyvä lainsäädäntö tulee luultavasti velvoittamaan paneelien valmistajia kehittämään ja tarjoamaan palveluita aurinkopaneelien kierrättämiseksi. Lisäksi uudet velvoitteet ja säädökset tulevat kannustamaan yrityksiä turvalliseen jätteiden poistamiseen, joita syntyy kierrätysprosesseissa. On toisaalta myös kriittistä, että uudet lait tulevat myös rankaisemaan yrityksiä välinpitämättömyydestä kierrätyksen suhteen. Yritysten läpinäkyvyyden lisääminen ja yritysten ympäristö datan julkinen levittäminen tulevat olemaan myös tärkeitä valvonnan kannalta. (Chowdhury et al., 2020; Xu et al., 2018)



Kuva 7. Aurinkopaneeli jätteen jakauma globaalisti. (Divya et al., 2023)

## 5 Materiaalin uudelleenkäyttö

Aurinkopaneeleista saatu materiaali ja sen laatu on hyvin riippuvainen kappaleessa 4 esitellyistä kierrätysprosesseista. Alumiinirunko, toisaalta on helppo kierrättää riippumatta prosessista, koska se on helposti sulatettavissa perinteisin menetelmin. Alumiinilla on myös merkittävä määrä kysyntää ja käyttöä, mikä tekee siitä houkuttelevan materiaalin kierrätettäväksi. Alumiinin irrottamiseen aurinkopaneelista ei myöskään vaadi monimutkaista prosessia. Alumiinirunkoa ei välttämättä edes tarvitse sulattaa vaan niitä pystyttäisiin suoraan käyttää uusissa aurinkopaneeleissa tai eri rakennusten ovissa, ikkunoissa ja erilaisina arkkitehtuurisina elementteinä. Alumiinilla on myös muita käyttökohteita rakennusalan ulkopuolella. Yleisesti kaikkia saatuja materiaaleja aurinkopaneelin kierrätyksestä voidaan aina sijoittaa uuden aurinkopaneelin tuottamiseen. Alumiinin lisäksi aurinkopaneelien kiinnitysmateriaalit tai kehykset saattavat sisältää terästä tai muita metalleja. Näitä voidaan hyödyntää myös rakennusalalla. Kierrätettyä terästä käytetään esimerkiksi tukipilareina tai rakenteen vahvistuksina. (Goh et al., 2024)

Rungon lisäksi tyypillisistä ensimmäisen sukupolven aurinkopaneeleista on mahdollista saada kierrätyksessä irti myös lasia, piitä ja pieniä määriä harvinaisia metalleja. Suurin osa kierrätetystä materiaalista on lasia ja runkometalleja. Aurinkopaneelin kierrätyksestä saatua karkaistua lasia, joka on normaalia vahvempaa, voidaan käyttää myös rakennusalalla ikkunoissa, lasiseinissä tai eri rakennusmateriaali sovelluksissa kuten lasitiilissä. Mekaanisessa kierrätyksessä saatuja lasin sirpaleita voidaan myös helposti kierrättää eteenpäin perinteisin lasin kierrätysmenetelmin tehtaissa, vaikka se on epäpuhtaampaa kuin normaali yhteiskuntajäte lasi. (Goh et al., 2024)

Pii on keskeinen materiaali erityisesti ensimmäisen sukupolven aurinkokennoissa, koska sitä hyödynnetään puolijohdeena. Vaikka piin kierrättäminen on mahdollista esitellyjen menetelmien avulla, se on huomattavasti monimutkaisempaa verrattuna esimerkiksi aurinkopaneelin rungon tai lasin kierrättämiseen. Piitä pystytään soveltaa tiivisteaineena, liimana ja tietyissä betoneissa. Piin lisäksi aurinkokennojen kierrättämisestä on mahdollista saada pieniä määriä harvinaisia metalleja kuten indiumia, galliumia, hopeaa ja seleeniä. Koska metallit ovat nimensä mukaan harvinaisia. Niillä on merkittävää jälleenmyyntiarvoa. Näillä metalleilla ei

ole suoranaista käyttökohdetta verrattuna esimerkiksi alumiiniin, mutta niillä on paljon ky-syntää korkeanteknologian yrityksissä eri sovelluksissa. (Goh et al., 2024)

Aurinkopaneelit sisältävät myös kuparia, jota käytetään sähkön johtamisessa paneelin si-sällä. Kierrätettyä kuparia pystytään käyttämään myös rakennusalalla sähköjohtojen tekemi-ässä, putkistojen tai kattojen rakentamisen yhteydessä. Kupari on helposti kierrätettävä ma-teriaali, mikä johtuu sen laajasta käytöstä erinomaisen sähkönjohtokykynsä ansiosta. Kupa-rijohdot voivat olla myös tinatut, jolloin tina pitää erottaa kuparista ja kierrättää. Aurinko-paneeleiden viimeinen merkittävä kierrätettävä osa on muovi, jota käytetään kapselointimate-riaalina ja liitännäsoissa. Aurinkopaneeleista saatua muovia pystytään kierrättää samalla tavalla kuin muuta muovijätettä tai kapselointiaineen kohdalla polttaa.

(Goh et al., 2024; Xu et al., 2018)

Taulukko 2. Tyypillinen ensimmäisen sukupolven aurinkopaneelin kierrätettävän materiaa-lin osuudet. (Xu et al., 2018)

Kierrätetty materiaali	Sisältö [%]
Runko	Al 12,77
Polykiteinen piikiekko	Si 3.10
Hopeajuova	Ag 0,03
Tinattu johto	Cu 0,45
Lasi	Lasi 54,72
Taustalevy	Muovi 17,09
Liimainen tiivistaine	10.00

Aurinkopaneelien materiaalien jälleenkäyttö tarjoaa mahdollisuuden kytkeä aurinkoenergi-antuotanto kiertotalous järjestelmään, joka vähentää paneelien lopullista ympäristöjalanjäl-keä. Nykyiset menetelmät pystyvät kierrättämään 90 % aurinkopaneelin piistä ja 90 % pa-neeelin lasista. Kierrätyksen lisäys vaikuttaa ilmastonmuutokseen vähentämällä tarvetta lou-hia uusia materiaaleja, mikä puolestaan vähentää energian kulutusta ja pienentää täten pääs-töjä. (Xu et al., 2018)



## 6 Johtopäätökset

Tutkimuksen päätavoite oli selvittää, miten aurinkopaneeleita kierrätetään ja kuinka paneeleista saatuja materiaaleja voidaan hyödyntää yhteiskunnassa. Tutkimus löysi kolme keskeistä menetelmää, joita hyödynnetään aurinkopaneelitasojen erotuksessa kierrätyksen aikana. Mekaanisen erotuksen menetelmä jättää huomioimatta tasojen erotuksen silpomalla sekä murskaamalla paneelin. Murskatun paneelin jäänteistä menetelmä pyrki erottelemaan kierrätettävät osat esimerkiksi hopean, kuparin ja lasin. Terminen prosessi hyödynsi korkeaa lämpötilaa tasojen liiman eli kapselointiaineen sulattamisessa, josta saatiin ehjiä piikiekkoja jälleenmyyntiin tai jatkoprosessointiin. Kemikaaliset menetelmät hyödynsivät orgaanisia sekä epäorgaanisia happoja kapselointiaineen sulattamisessa, josta saatiin useinmiten ehjiä piikiekkoja. Kaikilla menetelmillä oli erilaisia terveyteen sekä ympäristöön epätoivottavia vaikutuksia kuten korkea meluaste, terveydelle haitalliset kaasut tai ympäristölle haitallinen jäteneste. Tutkimus näkee prosessien yhdistämisen olevan mahdollinen ratkaisu ehkäistä joidenkin kierrätysmenetelmien tyypillisiä ja pahimpia haittoja.

Aurinkopaneelien kierrätyksestä saadaan lukuisia eri metalleja ja aineita kuten piitä, alumiinia ja muovia. Kappale 5 kävi läpi yksittäisesti merkittävimmät kierrätettävät materiaalit ja mihin niitä pystyttiin soveltaa. Kierrätettyä alumiinia esimerkiksi pystyttiin käyttää, joko uusissa aurinkopaneeleissa suoraan ilman sulattamista tai sulattamisen jälkeen esimerkiksi uusissa alumiini tölkeissä. Materiaalien käyttökohteita on lukuisia ja tulevaisuuden kannalta on hyvin merkittävää, että kasvava uusituvan energian järjestelmät ovat kytköksissä myös kiertotalouteen. Tulevaisuudessa prosessit tulevat todennäköisesti myös olemaan hyötysuhteeltaan parempia kierrättämään materiaaleja, vaikka nykyiset kierrätysasteet esimerkiksi lasille ovat jo korkeita.

Kierrätyksen kannattavuus oli myös työn yksi kiinnostuksen kohde. Taloudellinen kannattavuus riippui siitä, mitä prosessia yritys pyrki hyödyntämään, kuinka pitkälle kierrätystä pyrittiin viemään ja kuinka paljon aurinkopaneelijätettä valtiossa oli saatavilla. Tutkimus näkee, että aurinkopaneelin kierrätys on jo joissain maissa kannattavaa esimerkiksi Saksassa kovan aurinkopaneeli kapasiteetin takia, mutta Suomessa aurinkopaneelijätteen määrä ei ole vielä luonut suurta kysyntää aurinkopaneelisiin erikoistuneelle kierrätykselle. Tutkimus yhtyy suomalaisten aurinkopaneeli yritysten näkemykseen, että kierrätyksestä tulee Suomelle

myös ajankohtaista vasta noin 15 vuoden päästä. On myös mahdollista, että Suomi ulkoistaa kierrätyksen muihin pohjoismaihin, jos nykyinen elektroniikkajätelaitos ei ole riittävä paneelien kierrätykselle tulevaisuudessa. Tämän perusteella työ ehdottaakin, että Suomen aurinkopaneelin kierrätystä tutkittaisiin tulevaisuudessa uudestaan, kun asiasta tulee merkittävämpi

Työ myös selvitti lyhyesti juurisyitä, miksi aurinkopaneelit ovat kasvava uusiutuvan energian lähde globaalisti ja mitä sen kasvu tarkoittaa. Kasvun taustalla voidaan nähdä neljä keskeistä tekijää. Perimmäisenä syynä on ilmastonmuutos, joka luo painetta siirtyä kohti uusiutuvia energijärjestelmiä. Aurinkopaneelien vetovoima perustuu toisaalta niiden modulaariseen rakenteeseen, ehtymättömän energialähteen hyödyntämiseen sekä jatkuvasti aleneviin kustannuksiin. Voidaan olettaa, että aurinkopaneelien käyttö tulee kasvamaan tulevaisuudesta mittavasti, minkä takia on kriittistä saada luotu prosessit ja logistiikka paneelien kierrätykselle globaalisti.

Tutkimusta rajasi keskittyminen ensimmäisen sukupolven aurinkopaneelisiin, koska ne olivat ensimmäiset kierrätystä tarvitseva sukupolvi ja niiden markkinaosuus globaalisti oli suuri. Tulevaisuudessa toisaalta, kun suurin osa ensimmäisen sukupolvien paneeleista on kierrätetty. Kierrätysmenetelmien on muututtava huomioimaan toisen ja kolmannen sukupolven paneelien erityyppiset rakenteet ja materiaalit. On myös mahdollista, että kierrätyksen tarpeellisuus tulee vähenemään tulevaisuudessa paremman aurinkopaneelien elinajanodotteen avustuksella, joka tulee tehokkaampien tuotanto, kestävämpien materiaalien sekä optimaalisten huoltotapojen kautta. On toisaalta mahdollista, että paneelien kasvava määrä ja jatkuva ensimmäisen aurinkopaneelien käyttö tulee syrjäyttämään edellä mainitut tekijät, jotka mahdollisesti vähentäisivät kierrätettävän materiaalin määrää.

## Lähteet

Aldhafer K. 2023. Aurinkopaneelien kierrätyksen kehittäminen Suomessa ja muualla. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Chowdhury MS, Rahman KS, Chowdhury T, Nuthammachot N, Techato K, Akhtaruzzaman M, Tiong SK, Sopian K ja Amin N . 2020. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*. 27: 100431.

Divya A, Adish T, Kaustubh P ja Zade PS . 2023. Review on recycling of solar modules/panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 253: 112151.

Goh KC, Kurniawan TA, Goh HH, Zhang D, Jiang M, Dai W, Khan MI, Othman MHD, Aziz F, Anouzla A, et al. . 2024. Harvesting valuable elements from solar panels as alternative construction materials: A new approach of waste valorization and recycling in circular economy for building climate resilience. *Sustainable Materials and Technologies* 41: e01030.

Grant CA ja Hicks AL . 2020. Effect of manufacturing and installation location on environmental impact payback time of solar power. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 22(1): 187–196.

Hayat M, Ali D, Monyake C, Alagha L ja Ahmed N . 2019. Solar energy—A look into power generation, challenges, and a solar-powered future. *International Journal of Energy Research* 43: 1049–1067.

Kiviranta V. 2021 *Entistä useampi haluaa katolleen aurinkopaneelit, samaan aikaan pohditaan kuumeisesti, miten vältymme paneelien jätevuorelta*. [Viitattu 25.10.2024] [Saata-vissa: <https://yle.fi/a/3-12098524>].

Mannerkivi E. 2014. Aurinkoenergia Suomessa. Opinnäytetyö. Lahden Ammattikorkeakoulu.

Nyman M. 2019. Aurinkokennoteknologiat ja niiden kierrätys. Kandidaatintyö. Oulun Yliopisto.

SolarPower Europe. 2024 *Statement: European Parliament Agrees on the EU Solar Standard - SolarPower Europe*. [Viitattu 5.10.2024] [Saata-vissa: <https://www.solarpowereurope.org/press-releases/statement-european-parliament-agrees-on-the-eu-solar-standard>].

Wäänänen T. 2020. Kiertotalous aurinkoenergialiiketoiminnassa. Kandidaatintyö. LUT-Yliopisto.

Wiatros-Motyka M, Fulghum N ja Jones D. 2024. *Global Electricity Review 2024*. : Ember.

Xu Y, Li J, Tan Q, Peters AL ja Yang C . 2018. Global status of recycling waste solar panels: A review. *Waste Management*. 75: 450–458.