

LUT-YLIOPISTO
School of Energy Systems
Energiatekniikka

KIERTOTALOUS
AURINKOENERGIALIIKETOIMINNASSA
Kandidaatintyö

Helsingissä 2020
Tommi Wäänänen

TIIVISTELMÄ

LUT-yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Tommi Wäänänen

Kiertotalous Aurinkoenergialiiketoiminnassa

Kandidaatintyö 2020

Tarkastaja: Tapio Ranta

Ohjaaja: Mika Laihanen ja Antti Karhunen

24 sivua, 1 taulukko

Hakusanat: aurinkosähkö, aurinkoenergia, aurinkosähköliiketoiminta, aurinkopaneelijäte, kierrätöus, kierrätys

Aurinkoenergian kasvu, niin investointien, asennetun kapasiteetin kuin tutkimuksenkin saralla on ollut voimakasta viimeisen parinkymmenen vuoden aikana. Sen myötä aurinkopaneelien kierrätystarve on noussut yhteiskunnalliseen keskusteluun, tutkimuskohteeksi ja aurinkoenergialiiketoimijoiden tietoisuuteen. Samaan aikaan kierrätöus on niin poliitikkojen, ajatuspajojen, tutkijoiden kuin yritystenkin puheissa ja tulevaisuuden näkymissä. Aurinkosähköliiketoimijat tarvitsevat tietoa tehokkaasta lähestymistavasta kierrätöuteen ja aurinkopaneelien kierrätöukseen.

Kandityö on toteutettu kirjallisuustyönä ja sen tavoite on yhdistää tietoa kierrätöudesta, aurinkoliiketoiminnasta ja aurinkopaneelien kierrätöyksestä siten, että lukija ymmärtää miltä aurinkoliiketoiminta näyttää kierrätöuden näkökulmasta nyt ja miten niitä voisi lähentää, miten kierrätöus liittyy kierrätöuteen sekä miltä aurinkopaneelien kierrätöus näyttää nyt ja tulevaisuudessa. Työssä perehdytään ensin edellä mainittuihin aiheisiin omina kokonaisuuksinaan ja lopuksi tehdään johtopäätöksiä ja esitetään esimerkinomaisia toimia, joilla aurinkosähköliiketoimijat ja sidosryhmät voivat osaltaan edistää kierrätöuteen siirtymistä ja aurinkopaneelien tehokasta kierrätöystä.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

JOHDANTO.....	1
1 Kiertotalous.....	2
1.1 Määritelmät ja kuvaukset.....	2
1.2 Kiertotalouden liiketoimintamallit.....	4
2 Aurinkosähköliiketoiminta.....	7
2.1 Liiketoimintamallien perustyytit.....	7
2.2 Aurinkosähköliiketoimintamallit kiertotalouden näkökulmasta.....	9
3 Aurinkopaneelit ja niiden kierrätys.....	10
3.1 Tyypit ja markkinaosuudet.....	10
3.2 Rakenne.....	11
3.3 Kierrätysprosessit.....	14
3.4 Kierrätyksen toimintaympäristö.....	16
4 Johtopäätökset.....	18
5 Yhteenveto.....	21
LÄHTEET.....	22

JOHDANTO

Kiertotalous on 2000-luvulla noussut kuumaksi puheenaiheeksi niin politiikassa, tutkimuksessa kuin yritysmaailmassakin. Tietoisuus maapallon resurssien rajallisuudesta, niiden ylikulutuksesta sekä tuhlaavan kulutuskulttuurin vaikutuksesta koko maapallon biosfäärin hyvinvointiin on saavuttanut tason, missä yhteiskunnan eri osapuolet ovat alkaneet yhteistyössä etsiä ratkaisuja. Yksi keskeisimmistä on kiertotalous, jolla tavoitellaan kestävän kehityksen mukaista liiketoimintaympäristöä ja ihmiskunnan resurssijalanjäljen pienentämistä.

Ihmisen toiminnallaan, erityisesti fossiilisia polttoaineita kuluttamalla, aiheuttama ilmastonmuutos on myös ongelma, joka uhkaa ihmiskuntaa ja koko biosfääriä. Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi on jo pitkään etsitty ratkaisuja ja niistä merkittävin on fossiilisten polttoaineiden korvaaminen uusiutuvilla energianlähteillä, kuten tuuli- ja aurinkovoimalla. Viime vuosikymmenten aikana tehtyjen tutkimus- ja tuotekehityspanostusten, sekä erilaisten uusiutuvan energiantuotannon tukiohjelmien avulla tuuli- ja aurinkovoima ovat saavuttaneet kustannustasot, joilla ne ovat suuressa osassa maailmaa kilpailukykyisiä fossiilisten polttoaineiden kanssa. Kustannusten laskiessa vuosittainen asennettu kapasiteetti on ollut vahvalla kasvu-uralla ja on syytä odottaa kasvun jatkuvan vielä pitkään.

Asennusmäärien kasvaessa keskusteluun on noussut huoli näiden asennusten käytöstä poistamisesta. Erityisesti aurinkovoima on suurelta osin pienistä yksiköistä koostuvaa hajautettua energiantuotantoa, jolloin myös sen käytöstä poisto näyttää hyvin erilaiselta, kuin perinteisillä suurilla voimalaitoksilla. Aurinkopaneelien keskimääräinen odotettu elinikä on noin kolmekymmentä vuotta, minkä jälkeen ne pitäisi saada kierrätettyä.

Tämän työn tavoite on tarkastella aurinkosähköliiketoimintaa kiertotalouden näkökulmasta sekä selvittää miltä aurinkopaneelien kierrätys näyttää nyt ja tulevaisuudessa. Ensiksi selvitetään mitä kiertotalous käsitteenä tarkoittaa ja miten sitä voi käytännössä lähestyä. Seuraavaksi otetaan selvää miltä aurinkoliiketoiminta nykypäivänä näyttää ja millainen suhde sillä on kiertotalouteen. Kolmanneksi tutkitaan yleisimpien aurinkopaneelityyppien rakennetta ja materiaalikoostumusta, minkä pohjalta voidaan tarkastella aurinkopaneelien kierrätystä, sen toimintaympäristöä ja haasteita. Lopuksi tehdään johtopäätöksiä ja pohditaan millä keinoilla eri toimijat voivat edistää koko aurinkosähköliiketoiminnan siirtymistä kiertotalouteen.

1 KIERTOTALOUS

Kiertotalouden käsite on monimuotoinen, eikä sille ole tarkkaa yleisesti hyväksyttyä määritelmää. Jotkin tahot sisällyttävät kiertotalouden käsitteeseen useampia osakokonaisuuksia kuin toiset. Käsitteen ytimessä on kuitenkin talouden materiaaliavirtojen lineaarimallin, raaka-aine - tuotanto - käyttö - jäte, korvaaminen useilla syklisillä elinkaarilla, missä kaikki käytöstä poistuvat tuotteet ja niiden materiaalit nähdään arvokkaina resursseina tai raaka-aineina seuraavalle elinkaarikierrokselle. Tämän ydinajatuksen lisäksi kiertotalouteen usein liitetään elinkaarikonseptit uudelleenkäyttö, uudelleenvalmistus, kierrätys, sekä siihen sopivia liiketoimintamalleja, kuten tuote palveluna, tuotteiden kunnostus ja uudelleenkäyttö tai uudenlaisia tehokkaampia kulutustapoja, kuten jakamistalous. (Korhonen et al., 2018a)

Yksi ongelma tehokkaiden kiertotaloutta tukevien lakien ja tukiohjelmien säätämisessä on yleisesti hyväksytyjen mittareiden puuttuminen. Tähän etsivät ratkaisua mm. (García-Barragán et al., 2019), kehittämällä matemaattisen mallin, jolla voidaan kuvata lineaarista taloutta, kiertotaloutta ja kiertotalouden kasvua. Tässä työssä ei kuitenkaan syvennytä tähän matemaattiseen malliin.

1.1 Määritelmät ja kuvaukset

Sitra (2019) kuvaa kiertotaloutta muun muassa seuraavasti: ”Kyse on perustavanlaatuisesta muutoksesta siinä, miten yhteiskunta toimii. Kyse ei ole vain kierrätyksestä, vaan myös raaka-aineiden tuotannosta, materiaalien prosessoinnista, tuotteiden valmistuksesta, jakelusta, kaupasta ja kuluttamisesta.”

Tuoreessa julkaisussa, jossa paneudutaan kiertotalouden eri käsitteisiin, (Korhonen et al., 2018b) esittää seuraavaa kattavampaa määritelmä kiertotaloudelle: “Kiertotalous on kestävä kehityksen aloite, jonka tavoite on vähentää yhteiskunnallisten tuotanto-kulutus järjestelmien lineaarisia materiaalien ja energian läpivirtauksia soveltamalla materiaalikiertoja sekä uusiutuvia ja vesiputousmallisia energiavirtoja lineaarisiin systeemeihin. Kiertotalous korostaa korkean arvon materiaalikiertoja perinteisten kierrätysjärjestelmien rinnalla sekä kehittää systeemilähestymistapoja tuottajien, kuluttajien ja muiden yhteiskunnallisten toimijoiden yhteistyöhön kestävä kehityksen työssä.”

Määritelmä tunnustaa, että ei ole mahdollista täysin irrottautua pohjimmaisesta lineaarisesta mallista, jossa luonnosta saatavat materiaalit ja energia lopulta palaavat takaisin luontoon. Kiertotalouden tavoite on syklisillä kierroilla maksimoida materiaalien ja energian arvo yhteiskunnallisessa merkityksessä ennen niiden paluuta luontoon. Kestävän kehityksen tavoitteet voidaan saavuttaa minimoimalla neitsytmateriaalivirtoja luonnosta, mutta se vaatii yhteiskunnallisten toimijoiden tiivistä yhteistyötä. Yksi yhteistyön muoto, joka korostaa sekä kestävän kulutuksen että kestävän tuotannon merkitystä on jakamistalous. (Korhonen et al., 2018b)

Jakamistolouden kannalta merkityksellistä on kulutuskulttuurin muuttuminen yksilöiden omistajuudesta ja tuotteiden kuluttamisesta yhteisölliseen omistamiseen ja jaettuun kuluttamiseen. Tällä jaetulla mallilla saadaan tuotteiden käyttöastetta nostettua ja sitä kautta vähennettyä neitsytraaka-aineiden kysyntää ja lisättyä niiden yhteiskunnallista arvoa. Jakamistaloudessa piilee myös uusia liiketoimintamahdollisuuksia ja liiketoimintamalleja. (Korhonen et al., 2018b)

Kiertotalouden tavoitteiden saavuttamisen kannalta on olennaista tarkastella potentiaalisia ratkaisuja kokonaisvaltaisesti. Jokin ratkaisu tietyllä tuotannon osa-alueelle voi helposti näyttää parantavan tilannetta, mutta saattaakin aiheuttaa muualla tuotantoketjussa ylimääräisiä haittavaikutuksia tai siirtää haitat suoraan toiseen tuotantoketjun osaan, jolloin kokonaiskuvassa hyötyä ei saavuteta lainkaan tai jopa lisätään haittaa, jos esimerkiksi ympäristölainsäädäntö on toisessa osassa heikommalla tasolla. (Korhonen et al., 2018b)

Usein yritysten ympäristöprojekteissa tehdään investointeja saavuttamaan joitain lyhyen tähtäimen tavoitteita. Sen sijaan investointeja kestävän kehityksen näkökulmasta pitäisi tehdä pitkän tähtäimen laajempaa kokonaiskuvaa silmällä pitäen eli vaikuttaa rakenteisiin, jotka ohjaavat muita investointeja ja toimia vuosia tai vuosikymmeniä tulevaisuuteen, esimerkiksi investoiminen uusiutuvaa energiantuotantoa tukevaan infrastruktuuriin. (Korhonen et al., 2018b)

Korhonen korostaa fyysisten materiaalivirtojen tarkkailun merkitystä, kun lähdetään suunnittelemaan kiertotalouden periaatteiden toteuttamista. Vaikka varakkaissa valtioissa onnistuttaisiin tuotannon puolella nopeasti ottamaan käyttöön tehokkaat käytännöt uudelleenkäyttöön, uudelleenvalmistukseen ja kierrätykseen, fyysiset materiaalivirrat tulisivat silti

kasvamaan mm. kehittyvien maiden kasvavan populaation ja nousevan elintason takia. Tämän vuoksi kulutuskulttuurin muutos yksityisomistamisesta jakamistalouteen on ensiarvoisen tärkeää. Yritysten ja muiden kiertotaloustoimijoiden välisen yhteistyön verkottuminen fyysisten materiaalivirtojen hallinnassa on myös tärkeä näkökulma kokonaiskuvaa tarkastellessa. Yksittäisen yrityksen investoinnit jätevirtojensa minimointiin ei ole välttämättä toivottu tai optimaalinen ratkaisu, jos muut verkostossa olevat yritykset voisivat hyödyntää jätevirtoja omassa toiminnassaan ja korvata omia neitsytmateriaalitarpeitaan. Fyysisten materiaalivirtojen suhteen hyvin verkottuneessa toimijaympäristössä voi siis jossain tilanteessa olla kestävä kehityksen näkökulmasta kannattavampaa maksimoida kuin minimoida jätevirtoja. (Korhonen et al., 2018)

1.2 Kiertotalouden liiketoimintamallit

Stahel (2016) jakaa kiertotalouden liiketoimintamallit kahteen kategoriaan: niihin, jotka pidentävät tuotteen elinikää uudelleenkäyttämällä, korjaamalla, uudelleenvalmistamalla ja parantamalla, sekä niihin, jotka raaka-aineet kierrättämällä luovat uusia tuotteita. Erityisesti ensimmäisen kategorian toiminta luo uusia paikallisia työpaikkoja ja yrityksiä. Stahelin (2016) mukaan kiertotaloudessa yritysten jätteenhallinnan tavoite tulisi olla kulujen minimoinnin sijaan arvon maksimointi jokaisessa tuotteen elinkaaren vaiheessa. Kiertotaloudessa tarvitaan uusia keräyspisteitä ja kauppapaikkoja, joissa tuotteiden käyttäjät ja yritykset voivat palauttaa, ottaa vastaan, myydä ja ostaa käytettyjä tuotteita, jonka jälkeen ne tarpeen mukaan käsitellään ja palautetaan uudestaan kiertoön joko samana tuotteena tai raaka-aineiksi kierrätettynä.

Myös Stahel (2016) korostaa yritysten ja valmistajien vastuuta kiertotalouden toteutumisessa. Nykyisessä osta-ja-omista mallissa yritykset pitkälti irtisanoutuvat vastuusta tuotteisiin ja niiden elinkaaren myöhempiin vaiheisiin, lakisääteisiä tuotevastuita lukuunottamatta. Siirryttäessä pois tuotteiden osta-ja-omista mallista esimerkiksi vuokra- tai käytön mukaan maksettaviin malleihin, yritysten tulee ottaa vastuu tuotteen koko elinkaaresta. Näissä malleissa tuotteiden pitkäikäisyydestä, huollettavuudesta, korjattavuudesta ja lopulta purettavuudesta ja kierrätettävyydestä tulee voimakas kilpailukykyetu.

Lainsäätäjät voivat vaikuttaa muuttamalla lainsäädäntöä kannustamaan yrityksiä ottamaan vastuu tuotteiden koko elinkaaresta. Yksi Stahelin (2016) ehdotus on tarjota

arvonlisäverovähennystä, kun arvoa ei lisätä lisäämällä neitsytraaka-aineiden käyttöä, vaan säilyttämällä materiaalin arvo aiemmin mainituilla kiertotalouden toiminnoilla.

Urbinati et al. (2017) pyrkivät tarkastelemaan kiertotaloutta yritysten liiketoimintamallien näkökulmasta. He jakavat kiertotalouden liiketoiminnallisesti kahteen dimensioon, asiakassuuntaiseen markkinointiin ja arvonluontiin sekä tuotantoketjun arvoverkostoon. Yritys voi toteuttaa kiertotalouden periaatteita joko jommassakummassa dimensiossa tai molemmissa. Kiertotaloutta voi toteuttaa molemmissa dimensioissa eri asteisesti.

Asiakassuuntaista arvonluonnin kiertotalousastetta voidaan arvioida sekä tarjottavan tuotteen hinnoittelun, että markkinoinnin näkökulmasta. Vähiten kiertotalouden periaatteita hinnoittelun osalta toteuttaa perinteinen tuotteen myynti. Kiertotaloudellista astetta voi lisätä myymällä samalla tukipalveluita, kuten huoltosopimuksia ja takaisinotto-ohjelmia. Leasing ja vuokraus ovat astetta korkeammalla ja korkeimmalle asteelle päästään, kun hinnoitellaan tuote käytön mukaan eli myymällä tuotteen funktio. Markkinoinnin näkökulmasta alhaisin aste on passiivinen markkinointi esimerkiksi kertomalla tuotteen kiertotalouspuolesta vain nettisivuilla ja muissa staattisissa kohteissa. Myymälämarkkinointi ja henkilöstön kautta markkinointi on hieman korkeammalla, mutta hyvä taso vaatii asiakkaan aktiivista sitouttamista esimerkiksi erilaisten kiertotalousyhteisöjen rakentamisen ja kannustinohjelmien kautta. Korkein aste saavutetaan kommunikoimalla tuotteen kiertotalouspuolesta kaikissa edellä mainituissa kanavissa. (Urbinati et al., 2017)

Tuotantoketjun arvoverkostossa kiertotalouden alhaisin toteuttamisaste käsittää painotuksen energiataloudellisuuteen, päästövähennyksiin ja ympäristöystävällisyyteen. Materiaalivalintoja painottamalla uusiutuviin, kestäviin, kierrätettäviin ja helposti erotettaviin materiaaleihin voidaan kiertotalousastetta korottaa. Pelkkiä materiaalivalintoja tehokkaampaa on kuitenkin tuotteen suunnittelu alusta alkaen kierrätettäväksi, uudelleenvalmistettavaksi, purettavaksi ja ympäristöystävälliseksi ottaen huomioon myös materiaalivalinnat. Suositeltavia suunnittelulähtökohtia ovat esimerkiksi modulaarisuus, standardoitujen komponenttien käyttö, helppo purettavuus ja korkea kierrätettävyys. Näin toimimalla voidaan lisätä toimittajien määrää tuotantoketjussa ja luoda nostopainetta muiden arvoverkoston toimijoiden kiertotalousasteille. (Urbinati et al., 2017)

Urbinati et al. (2017) mukaan yritykset, jotka omaksuvat kiertotalouden periaatteet pääasiassa asiakassuuntaisen arvonluonnin dimensiossa, hakevat etulyöntiasemaa markkinaosuuden ja tulovirtojen kasvattamisesta. Tällaisia yrityksiä ovat esimerkiksi erilaisten jakamisalustojen ja tai kauppapaikkojen tarjoajat sekä jälleenmyyjät. Tuotantoketjun arvoverkoston dimensiossa kiertotalouden periaatteita omaksuvat yritykset taas saavat etua kulurakenteen ja kustannustehokkuuden kautta. Monet valmistusteollisuuden yritykset kuuluvat tähän kategoriaan, eikä heidän kiertotaloustoimintansa välttämättä näy selkeästi asiakkaalle päin. Molemmista dimensioista kiertotalousperiaatteita omaksuvat yritykset luovat tiiviitä suhteita sekä tuotantoketjun arvoverkostossa, että asiakasrajapinnassa. Ne voivat tehokkaasti kommunikoida ja markkinoida kiertotaloustoimintojensa toteutusta asiakkailleen.

2 AURINKOSÄHKÖLIIKETOIMINTA

Burger ja Luke (2017) tarkastelevat 144 eri liiketoimintamallia energianhallintajärjestelmien, sähkö- ja lämpövarastojen sekä aurinkosähköliiketoiminnan sektoreilta, joista 50 on aurinkosähköliiketoiminnan sektorilta pääosin Pohjois-Amerikasta ja Euroopasta. Otoksen liiketoimintamalleista he seuloivat esiin viisi perustyyppiä, joilla on erilaiset tulovirrat, asiakassegmentit ja tarjottujen palveluiden laajuus. Seuraavassa osiossa käydään läpi liiketoimintamallien perustyyppit, jotka ovat: “Hajautetun aurinkosähkön rahoitus ja asennus, suuren mittakaavan aurinkosähkön rahoitus ja asennus, yhteisöllisen aurinkosähkön tarjoaminen, aurinkosähkö ja varastointi optimoiden loppukäyttäjälle ja sähköverkolle sekä aurinkosähkö ja varastointi optimoiden loppukäyttäjälle.”

2.1 Liiketoimintamallien perustyyppit

Hajautetun aurinkosähkön rahoitus ja asennus on suurin perustyypeistä. Siinä asiakkaalle tarjotaan aurinkosähköjärjestelmän suunnittelu, asennus ja rahoitussopimus yhtenä pakettina. Asennus ja rahoitus voivat olla yrityksen sisäistä toimintaa tai ulkoistettua. Myös itse aurinkopaneelien valmistus on mahdollista hoitaa sisäisesti, mutta se on harvinaista. Rahoitus toteutetaan yleensä velka-, vuokra- tai leasingsopimuksella. Myyjä sopimuksia voidaan arvopaperistaa joukkovelkakirjoiksi ja laskea sitä kautta yrityksen pääoman tarvetta. Keskeinen vaade on kuitenkin tarjota asiakkaalle tuote, joka tuotannon arvollaan oikeuttaa investointikustannukset. Asiakkaalle tuotettu energia laskee tarvittavan ostosähkön määrää ja sitä kautta asiakkaan toimintakuluja. Asiakkaat voivat olla kuluttajia, kaupallisia, institutionaalisia tai kunnallisia toimijoita tai teollisuusyrityksiä. (Burger ja Luke, 2017)

Suuren mittakaavan aurinkosähkön rahoitus ja asennus on toimintaa, jossa yritykset suunnittelevat ja rakentavat suuria aurinkosähkövoimaloita ja joko myyvät voimalan heti valmistuksen jälkeen tai solmivat pitkäaikaisia sähkön ostosopimuksia (PPA, power purchase agreement) ja myyvät päästöhyvityksiä. Myös tässä mallissa käytetään hyväksi arvopaperistamista. Jotkin yritykset voivat olla erikoistuneita kohteiden etsintään, PPA -sopimusten solmimiseen ja urakoitsijoiden hankintaan, toiset taas tekniseen suunnitteluun, materiaalihankintaan ja puistojen rakentamiseen. Asiakkaat ovat yleensä teollisuusyrityksiä, sähkönmyyjiä tai sähköverkkoyhtiöitä. (Burger ja Luke, 2017)

Yhteisöllisen aurinkosähkön tarjoajat antavat kuluttajille mahdollisuuden osallistua ja tukea aurinkosähkön tuotantoa, vaikka heillä ei olisi varaa tai mahdollisuutta hankkia aurinkosähkölaitteita omalle katolle. Tässä mallissa kuluttaja voi ostaa osuuden toisaalle rakennetusta aurinkosähkövoimalan sähköntuotannosta tai jopa osuuden itse voimalasta ja sen tuotoista. Yritys voi saada tulovirtaa välityspalkkioista ja myymällä voimalan tuotannon PPA -sopimuksilla. Asiakkaina ovat sekä kuluttajat, että sähköpörsseissä toimivat sähkönsaajat. (Burger ja Luke, 2017)

Aurinkosähkö ja varastointi optimoiden loppukäyttäjälle ja sähköverkolle tarkoittaa mallia, jossa itse energiantuotannon lisäksi asiakkaalle myydään sähkövarasto, jota voidaan käyttää myös verkon tukemiseen esimerkiksi taajuussäädössä, kysyntäjoustossa tai reservinä. Näistä verkkoa tukevista toiminnoista asiakas voi saada tulovirtoja ja yritys välityspalkkioita järjestelmän myynnin lisäksi. Sähkövarastolla varustettu järjestelmä voi myös vähentää merkittävästi asiakkaan verkosta ottamaa tehoa ja siten myös verkolle aiheutuvaa rasitetta. Tämän tyyppisiä yhdistelmiä kutsutaan usein virtuaalisiksi voimalaitoksiksi. (Burger ja Luke, 2017)

Aurinkosähkö ja varastointi optimoiden loppukäyttäjälle on malli, jossa sähkövarasto ei osallistu verkon tukemiseen, vaan optimoinnin kohde on hinta ja luotettavuus asiakkaalle. Tavoitteena on siis kasvattaa asiakkaan omaan käyttöön tuotettu aurinkosähkön osuus kokonaiskulutuksesta mahdollisimman suureksi ja minimoida verkosta ostetun sähkön tarve. Samalla sähkövarasto voi toimia varavoimanlähteenä esimerkiksi sähkökatkon sattuessa. Asiakassegmentit, rahoitusmallit ja tulovirrat ovat pitkälti samoja kuin hajautetun aurinkosähkön mallissa. (Burger ja Luke, 2017)

Näiden liiketoimintamallien kannattavuus ja suhteellinen suosio riippuu erittäin paljon poliittisesta ilmapiiristä, käytetyistä tukimalleista, verotussäännöistä ja sähköverkon integraatiosäännöistä. Esimerkiksi yhteisöllisen aurinkosähkön kannattavuus voi riippua siitä sallivatko säädökset kaukana tuotetun sähkön hyvittämisen kuluttajan sähkölaskusta nettomittarointina. Teknologian hinnan laskiessa ja säännösten muuttuessa liiketoimintamallit voivat muuttua hyvinkin erilaisiksi ja uusia liiketoimintamalleja todennäköisesti syntyy. (Burger ja Luke, 2017)

2.2 Aurinkosähköliiketoimintamallit kiertotalouden näkökulmasta

Edellisen kappaleen liiketoimintamallien kuvauksissa voidaan nähdä joitain merkkejä kiertotalouden näkökulmasta positiivisista malleista, erityisesti leasing-sopimusten ja PPA-sopimusten käytössä. Kokonaiskuvassa liiketoimintamallien kiertotalouden omaksuminen on ensimmäisen luvun huomioihin peilaten hyvin vähäistä. Liiketoimintamallien kuvauksissa ei mainita esimerkiksi kiertotaloutta, kierrätystä, uudelleenkäyttöä tai arvoverkostoja millään tavalla. Tässä luvussa tarkastellaan mahdollisuuksia ja keinoja sovittaa aurinkosähköliiketoimintamalleja kiertotalouteen paremmin sopiviksi.

Kiertotalouden keskiössä olevat materiaalikierrot vaativat eri toimijoiden välistä monipuolista verkostoitumista ja uudenlaisia yhteistoiminta-alustoja. Alkaen aurinkopaneelivalmistajien ja niiden tuotteiden valinnasta, aurinkosähkötoimijoiden tulisi kiinnittää huomiota uudelleenkäytettävyyteen ja kierrätyksen helppouteen. Näitä ominaisuuksia korostavat aurinkopaneelit oletettavasti ovat myös kalliimpia, ainakin varhaisessa vaiheessa, mutta hankinnoissa tulisi huomioida koko elinkaaren kokonaiskuva.

Paneelien myynnissä ja markkinoinnissa tulisi korostaa välittömien taloudellisten lukujen ja ympäristöarvojen lisäksi kiertotalouden tuomia etuja, kuten jälleenmyyntiarvoa, kierrätettävyyttä sekä neitsytraaka-ainetarpeen pienenemistä. Aurinkosähkötoimijoiden tulisi pyrkiä esittämään itsensä palveluntarjoajina ja myydä lopputuotetta eli aurinkopaneeleilla paikallisesti tuotettua sähköä sitä tuottavan laitteiston sijaan. Näin laitteiston omistus ja siitä huolehtiminen jää palveluntarjoajan vastuulle ja asiakkaan riskit ja ostokynnys madaltuvat, mitä voi käyttää markkinoinnissa. Tällä liiketoimintamallilla aurinkosähkötoimijat voivat myös varmistaa laitteistojen jäännös- tai jälleenmyyntiarvon hyödyntämisen liiketoiminnan kannalta optimaaliseen aikaan, kun järjestelmien käytöstä poiston ajankohta ja tapa eivät ole kuluttajan vastuulla. Käytöstä poiston ajankohta voi siis hyvinkin olla eri kuin laitteiston rikkoutumisen ajankohta, riippuen esimerkiksi muiden kiertotalousmarkkinoiden toimijoiden muodostamasta kysynnästä tai teknologian kehityksen tuomista eduista.

Aurinkopaneelien ja laitteistojen tullessa yhden elinkaarensa päähän, tulisi pyrkiä etsimään toimijoita, jotka ovat valmiina ostamaan käytettyjä paneeleita sekä kunnostamaan tai käyttämään niitä alhaisemman arvon kohteissa. Viimesijaisesti tulisi paneelit ja niiden materiaalit erotella ja kierrättää raaka-aineiksi täysin uusille tuotteille.

3 AURINKOPANEELIT JA NIIDEN KIERRÄTYS

Aurinkopaneelien kierrätyksen tutkimuksen ja kehityksen merkitys on kasvanut vasta viime vuosina, kun ensimmäisen suuremman kaupallisen aallon paneelit ja asennukset alkavat saavuttaa elinkaarensa pään. Kierrätyksen tärkeys korostuu, kun huomioidaan viimeisen 10-15 vuoden asennettu kapasiteetti, joka on kasvanut euroopassa vuoden 2005 2 gigawatista vuoden 2019 126 gigawattiin (Schmela et al., 2019) ja vuoden 2008 16 gigawatista vuoden 2018 513 gigawattiin maailmanlaajuisesti, josta 54 % viimeisen 3 vuoden aikana (Philipps et al., 2019) (Masson et al., 2019). Arviot vuosittaisen elinkaarensa pään saavuttavien paneelien määrästä ovat nousseet 9.57 miljoonasta tonnista (Monier ja Hestin, 2011) jopa 78 miljoonaa tonniin 2050 mennessä (Weckend et al., 2016).

Jotta saadaan käsitys aurinkopaneelien kierrätyksen vaatimuksista ja mahdollisuuksista, on tärkeää ensin ymmärtää erilaisten paneelitekniikoiden yleisyys markkinoilla sekä minkälaisista komponenteista ja raaka-aineista nämä paneelityypit rakentuvat. Erilaisten paneelityyppien kierrätys voi vaatia hyvinkin erilaisia prosesseja. Tässä kappaleessa selvitetään ensin minkä tyyppisiä paneeleita markkinoilta löytyy ja mitkä ovat niiden markkinaosuudet. Sitten tarkastellaan yleisimpien paneelityyppien rakennetta ja raaka-ainesisältöä ja viimeiseksi tarkastellaan paneelityyppien kierrätettävyyttä ja käytettyjä kierrätysmenetelmiä.

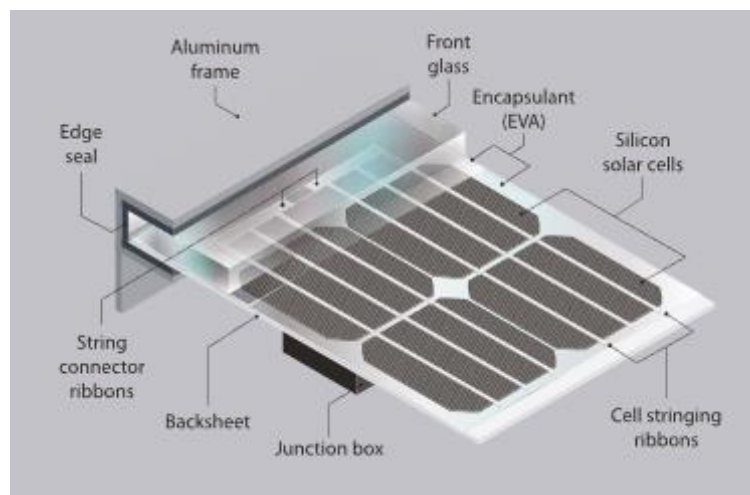
3.1 Tyypit ja markkinaosuudet

Useimmat aurinkopaneelityypit voidaan luokitella kolmeen pääluokkaan: piikidepaneelit, ohutkalvopaneelit sekä kokoelma kehittyviä paneeliteknologioita. Vuonna 2017, noin 93 %:n tuotettujen paneelien (GWp) markkinaosuudellaan, ylivoimaisesti yleisimpiä ovat piikidepaneelit; 60,8 % monikidetekniikkaa ja 32,2 % yksikidetekniikkaa. Ohutkalvopaneelien osuus oli 4,5 %; CdTe 2,3 %, CIGS 1,9 % ja a-Si 0.3 % osuuksilla. (Philipps et al., 2019) Muita ohutkalvotekniikoita ovat esimerkiksi Gallium Arsenidi (GaAs) Germanium substraattilla, jolla saavutetaan tavallista korkeampia, jopa 25 %-30 % hyötysuhteita, mutta käytetään korkean hintansa vuoksi lähinnä keskittämissä- ja avaruusjärjestelmissä. Kehitteillä olevia teknologioita ovat myös orgaaniset ohutkalvopaneelit ja perovskiitti-kiderakenteiset paneelit, joiden osuuden odotetaan kasvavan tulevaisuudessa, mutta eivät ole vielä valmiita laajamittaiseen kaupalliseen tuotantoon. Viime vuosina piikidepaneelien osuus on kasvanut entisestään jopa 97 %:iin markkinoista. (Masson et al., 2019) (Weckend et al., 2016)

3.2 Rakenne

Aurinkopaneelijärjestelmät koostuvat yleensä muutamasta pääkomponentista: paneeleista, telineestä, johdotuksista ja invertteristä sekä mahdollisesti latauscontrollerista ja akustosta. Erilaisia järjestelmäkokonaisuuksia on lukuisia; katolle, maalle tai veden päälle asennettavia, rakennusten tai kulkuvälineiden rakenteisiin integroituvia, sähköverkkoon liitettyjä tai omavaraisia. Esimerkiksi verkkoon liitetyissä järjestelmissä ei välttämättä tarvita latauscontrollereita ja akustoja ja joissain verkosta irrallisissa järjestelmissä ei välttämättä tarvita kallista invertteriä, jos akustosta saatavaa virtaa voidaan käyttää sellaisenaan. (Masson et al., 2019)

Piikidepaneelien ylivoimaisen markkinaosuuden takia on perusteltua keskittyä pääasiassa niiden ominaisuuksiin ja kierrätettävyyteen. Piikidepaneelin rakenne, joka on kuvattu kuvassa 1 sisältää tyypillisesti alumiinisen kehyksen, suojalasin, kapselointiainekerroksia, piikidekennot, johtimet, taustalevyn ja haaroitusrasian (Schneller et al., 2016) (Ndiaye et al., 2013). Kehys toimii pääasiassa mekaanisena tukena, mutta tarjoaa myös järjestelmän tarvitsemat kiinnitys- ja käsittelypinnat asennukseen, jotta muut komponentit joutuisivat mahdollisimman pienelle rasitukselle. (Schneller et al., 2016)



Kuva 1. Piikidepaneelin yleinen rakenne. (Weckend et al., 2016)

Suojalasi toimii paneelin ensisijaisena suojana ympäristön rasitteilta, kuten sateelta, tuulelta, lumikuormalta, kosteudelta, rakeilta ja muilta fyysistä rasitetta aiheuttavilta iskemiltä. Sen lisäksi sen tulee läpäistä hyvin auringon säteily spektri, omata alhainen heijastuskerroin laajalla skaalalla säteilykulmia sekä kapselointiaineeseen sopiva taitekerroin. Vähän rautaa

sisältävä kalkkilasi on yleisin materiaali suojalasinä, erityisesti piikidepaneeleissa. Joustavissa ohutkalvopaneeleissa tai esimerkiksi rakenteisiin integroiduissa paneeleissa joustavammat materiaalit, kuten erilaiset polymeerikalvot voivat tulla tarpeeseen. Polymeerikalvojen toinen etu on särkymiskestävyys, mutta tyypillisiä haasteita ovat mm. valonläpäisyominaisuuksien lyhytikäisyys ja suurempi kosteuden läpäisevyys. (Schneller et al., 2016)

Taustalevyssä ei yleensä ole tarvittu valonläpäisyominaisuuksia, joten siinä on käytetty erilaisia polymeerikalvoyhdistelmiä, kuten polyetyleenitereftalaattia (PET), polyamidia (PA) ja polyvinylyfluoridia (PVF). Eri polymeerikalvot antavat erilaisia toivottuja ominaisuuksia, kuten kosteuden kestävyttä, sähköistä eristävyttä tai mekaanista kestävyttä. Toisaalta muovit läpäisevät lasia enemmän kosteutta sekä kaasuja, mistä voi aiheutua kennoille haittaa. Myös lasia voidaan käyttää takalevynä ja se onkin yleistynyt kaksisuuntaisten paneelien myötä. Lasia on pyritty perinteisesti takalevyissä välttämään sen tuoman painonlisäyksen ja mahdollisen mekaanisen lämpörasituksen takia. (Schneller et al., 2016)

Takalevyyn kiinnittyvän haaroitusrasian pääasiallinen tehtävä on yhdistää paneelin sisäisten kennojen virtapiirit ulkoiseen sähköverkkoon. Haaroitusrasian tulee myös tarjota riittävä sähköinen eristys paneelin komponenteista sekä estää kosteuden pääseminen komponentteihin. Yleisesti käytettyjä materiaaleja haaroitusrasioissa on Noryyli tai PET. (Schneller et al., 2016)

Kapselointiaineella on useita funktioita; sen tulee tarjota hyvä optinen kytkentä piikennon ja suojalasin välille, toimia sähköisenä eristeenä komponenteille, mekaanisena tukena eli pitää kennot paikoillaan ja toimia liimana paneelin kerrosten välillä, fyysisenä eristeenä eli erottaa kennot ja johtimet toisistaan, suojata kennoja ulkoilman haittatekijöiltä, kuten kosteudelta ja epäpuhtauksilta sekä toimia lämmönjohtimena. Käytetyin kapselointiaine jo monen vuosikymmenen ajan on ollut eteeni-vinyyliasettaatti (EVA), jonka ominaisuuksia voidaan hienosäätää lisäaineilla, kuten UV-stabilisaattoreilla tai -absorbenteilla, tartunnanestäjillä ja kovetusaineilla. Tulevaisuudessa erilaisia kapselointiaineita ja paketoitintekniikoita tullaan luultavasti kehittämään, kun tavoitellaan yhä pidempää paneelien käyttöikää. Yksi mahdollisuus on ilmatiivis lasi-lasi paketointi ilman kapselointiainetta, joka voisi poistaa useimmat kapselointiaineen aiheuttamat pitkäikäisyyden esteet kuten UV-säteilyn aiheuttama rappeutuminen ja värjäytyminen. Tämän tyyppinen paketointi voisi myös mahdollistaa helpomman kierrätyksen. (Pern, 2008) (Schneller et al., 2016)

Tyypillisessä piikidepaneelin rakenteessa pohjalevyn päälle on levitetty kerros kapselointiainetta hartsina, jonka päälle on ladottu piikidekennot sekä niitä yhdistävät johtimet. Piikennokerroksen päälle on asetettu toinen kerros kapselointiainetta ja lopuksi päällä on suojalasi. Kerrosten yhdistämiseen käytetään laminoititekniikkaa, jossa sopivan lämpötilan ja paineen avulla kapselointiainekerrokset saadaan pehmenemään ja luomaan sidoksia muihin materiaaleihin. (Pern, 2008)

Paneelien materiaalikoostumukset vaihtelevat valmistajan ja paneelimallin mukaan, mutta suuntaa antavan kuvan piikidepaneeleille saa taulukon 1 jaottelusta. Suojalasi on paneelin rakenteessa ylivoimaisesti painavin komponentti jopa 80 % osuudella ja yhdessä kehyksen kanssa ne kattavat jopa 90 % paneelin painosta. Kapselointikerroksen osuus on noin 6,5 %, taustalevyn osuus 3,6 % - 4,3 % ja itse piikidekennojen osuus on vain 3,5 % - 4,7 % (Notarnicola, 2013) (Monier and Hestin, 2011). Ohutkalvotekniikalle, jossa taustalevynä toimii lasi, vastaavat suuntaa antavat luvut on esitetty taulukon 1 viimeisessä sarakkeessa ja siitä nähdään, miten aktiivinen kerros on vain 1 % kokonaispainosta, kun lasiset etu- ja takalasi sekä kehys vievät jopa 96 % (Sander, 2007).

Taulukko 1. Piikidekennojen materiaalikoostumus komponentteittain (Notarnicola, 2013) (Monier ja Hestin, 2011). Ohutkalvotekniikan materiaalikoostumus komponentteittain (Sander, 2007).

Komponentti	(Notarnicola, 2013)	(Monier ja Hestin, 2011)	(Sander, 2007)
Kokonaispaino	22 kg	18 kg	-
Lasi	74,16 %	80,10 %	51 %
Kehys	10,30 %	9,80 %	12 %
Kapselointiaine	6,55 %	-	3 %
Taustalevy	3,60 %	4,30 %	33 %
Piikennot / Aktiivinen kerros	3,48 %	4,70 %	1 %

3.3 Kierrätysprosessit

Aurinkopaneelijätteen suhteellisen pieni määrä ei ole vielä mahdollistanut laajamittaista erikoistunutta kierrätystoimintaa, vaan jätteet käsitellään pääsääntöisesti yleisen jätteen tai elektroniikkajätteen mukana jätteenkäsittelylaitoksissa. Tämä voi kuitenkin muuttua nopeasti lähivuosina, kun jätteen määrä alkaa kasvamaan, mikä mahdollistaa aurinkopaneelisiin erikoistuneiden kierrätyslaitosten taloudellisen kannattavuuden (Weckend et al., 2016). Elinkaaritarkastelun näkökulmasta kierrätys kaksivaiheisesti toisi suurimmat ympäristöedut. Ensimmäisessä vaiheessa pienemmissä paikallisissa laitoksissa eroteltaisiin aurinkopaneelista kehykset, johdotukset ja haaroitusrasia. Erilliset komponentit lähetettäisiin suoraan lähimpään erikoistuneeseen kierrätyslaitokseen. (Latunussa et al., 2016)

Yleisjätteen käsittelylaitoksissa voidaan saavuttaa painon mukaan hyvä yli 85 % kierrätysaste, koska alumiinikehys, suojalasi ja johdotukset kattavat yhdessä yli 90 % paneelin painosta ja ne ovat verrattain helppo erottaa ja kierrättää tunnetuilla ja laajasti käytössä olevilla menetelmillä. Pienemmissä määrin esiintyvien kalliiden, harvinaisten tai ongelmallisten metallien, kuten pii, hopea, sinkki, indium, kadmium ja lyijy, osalta kierrätysaste voi kuitenkin jäädä alhaiseksi tai olemattomaksi niiden erottamisen ollessa vaikeampaa. Toinen merkittävä ongelmakohta paneelien kierrättämisessä yleisjätteen käsittelylaitoksissa on alhaisen arvon kierrätys, missä esimerkiksi vain alumiinikehys ja kuparijohdot kierrätetään uudelleenkäytettäväksi, mutta lasi kierrätetään alhaisemman arvon lasivillan tai lasikuidun

valmistamiseen ja muut materiaalit murskataan asfaltin tai muun rakennusaineen täyteaineeksi tai ohjataan kaatopaikalle. Tällöin suuri osa paneelin materiaalien taloudellisesta potentiaalista menee hukkaan. (Weckend et al., 2016) (Latunussa et al., 2016)

Aurinkopaneelisiin erikoistuneissa jätteenkäsittelylaitoksissa voidaan käyttää erikoistuneempia prosesseja, joilla saadaan materiaalit tarkemmin eroteltua, mikä mahdollistaa korkean arvon kierrätyksen ja materiaalien taloudellisen arvon hyödyntämisen. Esimerkiksi alumiinikehykset, kupari, hopea ja muut metallit voidaan erottaa paneelista ja piikenoista erilaisilla prosesseilla ja myydä tavallisia maailmanlaajuisia raaka-aine kanavia pitkin uudelleenkäytettäväksi. (Weckend et al., 2016)

Yksi merkittävimmistä haasteista paneelien kierrätyksessä on laminoinnin purkaminen ja kapselointiaineen kierrätys. Yleisesti käytettyä EVAa ei voi esimerkiksi sulattaa ja siten erottaa pii-, kapselointiaine-, ja lasikerroksia toisistaan. Tutkittuja metodeja kapselointiaineen erottamiseen muista komponenteista ovat esimerkiksi mekaaninen murskaus ja siivilöinti, lämpökäsittely, orgaaniset liuottimet, happokäsittelyt, pyrolyysi ja ultraäänikäsittely (Weckend et al., 2016) (Dias et al., 2016).

Näistä yhdeksi parhaiten toimivaksi on osoitettu pyrolyysi, jossa kapselointiaineen rakenne ja sidokset saadaan tehokkaasti hajotettua, minkä jälkeen muut kerrokset ovat valmiina käsiteltäväksi erikseen. Noin 500 °C pyrolyysilämpötila riittää hajottamaan EVA-kapselointiaineen täysin, jolloin esimerkiksi lasi voidaan kierrättää puhtaampana, sillä siinä ei ole liimaa tai muovijäämiä. (Dias et al., 2016) (Latunussa et al., 2016) (Xu et al., 2018) Piikenoista voidaan pyrolyysin jälkeen puhdistaa suurimmat muiden metallien jäänteet ja muut epäpuhtaudet esimerkiksi selektiivisillä etsausprosesseilla, minkä jälkeen pii voidaan uudelleen käyttää piikiekkoihin (Park J. ja Park N., 2014). Pyrolyysin jälkeen voidaan käyttää myös hydrometallurgisia prosesseja, joilla voidaan saavuttaa erittäin suuret puhtaudet eroteltavista materiaaleista, kuten piistä, alumiinista ja hopeasta. Pyrolyysimenetelmän haittapuolena on sen korkea energiankulutus. (Dias et al., 2016)

Myös muilla prosesseilla voidaan saavuttaa hyviä lopputuloksia, mutta niillä on usein omat haittapuolensa; liuotinprosesseissa tai happoprosesseissa käytetyistä aineista muodostuu omat jätevirtansa ja ne voivat olla hitaita prosesseja, mekaanisella murskauksella ja siivilöinnillä ei saavuteta yhtä tarkkaa erottelua materiaalien kesken, kuin esimerkiksi

hydrometallurgialla. Millään edellä mainitulla menetelmällä ei ole saatu kapselointiainetta tyydyttävästi kierrätettyä. Tulevaisuudessa olisikin toivottavaa sellaisen kapselointiaineen yleistymisen, joka olisi helposti kierrätettävissä tai kapselointiaineeton paneelirakenne, joka helpottaisi kierrättämistä. (Dias et al., 2016)

3.4 Kierrätyksen toimintaympäristö

EU on maailmanlaajuisesti aurinkopaneelien kierrätyksen edelläkävijä. Vuoden 2012 sähkö- ja elektroniikkajätteen WEEE-direktiivin (Waste Electrical and Electronic Equipment) myötä aurinkopaneelit luokitellaan EU alueella elektroniikkajätteeksi ja niiltä vaaditaan korkeita kierrätysprosentteja. Vuoden 2018 jälkeen keräysasteen tulee vastata vähintään 65 % vuosittain markkinoille tuotetusta aurinkopaneelien määrästä tai vähintään 85 % vuosittaisen aurinkopaneelijätteen määrästä. Lisäksi kerätystä materiaalista 80 % tulee saada kierrätettyä. (Weckend et al., 2016)

WEEE-direktiivi perustuu laajennettuun tuottajan vastuuseen, mikä tarkoittaa, että aurinkopaneelien markkinoille tuojat tai tuottajat ovat itsenäisesti tai kollektiivisesti vastuussa jätteenkeräilystä, -käsittelystä ja kierrätyksestä elinkaaren lopussa ja niistä aiheutuvista kuluista. Tuottajien tulee siis järjestää tuotteilleen asianmukaiset keräyspisteet sekä jätteenkäsittely sekä raportoida myytyjen, kerättyjen sekä jatkokäsittelyyn toimitettujen paneelien määrä sekä jätteenkäsittelyssä käsiteltyjen paneelien määrät materiaaliluokittain. WEEE velvoittaa tuottajat myös kertomaan asiakkaille jätteenkäsittelykäytännöistä ja tarjoamaan jätteenkäsittelylaitoksille tietoa paneelien käsittelystä ja materiaalisisällöstä, kuten vaarallisista aineista. (Weckend et al., 2016)

EU:n WEEE-direktiivi asettaa myös vaatimuksia, jotka edesauttavat korkean arvon kierrätyksen toteuttamista, kuten vaatimus arvokkaiden raaka-aineiden kierrättämisestä, suuren valmistusenergian materiaalien kierrättämisestä, vaarallisten aineiden erottamisesta ja käsittelystä, sekä kierrättämisen tuotteiden laadusta tai puhtaudesta. WEEE-direktiivi asettaa EU tasolla minimivaatimuksia, joita jäsenmaat voivat omassa lainsäädännössään tiukentaa tai laajentaa lisävaatimuksilla. Esimerkiksi Saksassa on perustettu itsenäinen toimielin, joka hallinnoi keräystä ja kierrätyksen kustannusten jakamista. Tuottajien pääsy markkinoille vaatii rekisteröitymisen toimielimen kanssa ja mm. myytyjen tuotteiden määrän raportoinnin. Toimielin jakaa kunkin tuotetyypin keräyksen ja kierrätyksen kustannukset

markkinoilla olevien tuottajien kesken markkinaosuuksien suhteessa. Tällä järjestelyllä huolehditaan myös vanhojen tuotteiden kierrätyksen kustannuksista, vaikka niiden tuottajat olisivat jo poistuneet markkinoilta. Kaikki markkinoilla olevat tuottajat maksavat myös vuosittaista vakuutusmaksua sitä tilannetta varten, että markkinoilla ei olisi enää yhtään toimijaa jäljellä. (Weckend et al., 2016)

Suomen lainsäädäntö noudattelee pitkälti EU:n WEEE-direktiivin asettamia linjauksia. Suomessa on 1.1.2019 alkaen voimassa sähkö- ja elektroniikkajätteelle 65 painoprosentin keräysvaatimus, 85 % hyödyntämisvaatimus ja 80 % uudelleenkäyttö- ja kierrätysvaatimus. Lainsäädäntö linjaa, että tuotteiden suunnittelulla ja valmistusmenetelmillä ei saa tarkoituksellisesti vaikeuttaa uudelleenkäyttöä, korjaamista, purkamista tai kierrättämistä. Tuottajilla on vastuu vastaanottopisteiden järjestämisestä kotitalouksille ja muille käyttäjille, sekä vastuu keräyksen, varastoinnin ja kierrätyksen järjestämisestä aurinkopaneelijätteelle. Tuottajien on rekisteröidyttävä tuottajarekisteriin ja raportoitava esimerkiksi markkinoille tuodut sekä kerätyt, hyödynnetyt ja kierrätetyt määrät. Raportointia hallinnoi Pirkanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus ja velvoitteiden toteuttamista valvoo Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. (Edita Publishing Oy, 519/2014)

EU:n ulkopuolella ei millään valtiolla ole kattavaa kierrätyslainsäädäntöä aurinkopaneelille. Aurinkopaneelit ovat useimmiten yleisen jätelainsäädännön piirissä tai joissain tapauksissa luokitellaan vaaralliseksi jätteeksi ja käsitellään sen mukaisesti. Edistyneemmät kierrätystoiminnot perustuvat pitkälti tuottajien ja toimijoiden vapaaehtoisuuteen, mutta niiden kattavuus ei yllä samalle tasolle EU:n WEEE-direktiivin vaatimusten kanssa. (Weckend et al., 2016)

Aurinkopaneelijätteen raaka-ainekierrätyksen markkina-arvon odotetaan olevan 450 miljoonaa dollaria vuonna 2030 ja kierrätettyjen raaka-aineiden riittävän 60 miljoonan uuden paneelin valmistukseen. Vastaavat ennusteet vuodelle 2050 ovat 15 miljardia dollaria ja 2 miljardia uutta paneelia. Aurinkopaneelien kierrätys tulee siis olemaan suuri teollisuudenala, jonka tutkimukseen ja koulutukseen tulisi kohdistaa varoja ja osaamista. Kierrätyksen lisäksi aurinkopaneelien korjauksen ja uudelleenkäytön ympärille odotetaan kasvavaa liiketoimintasektoria. (Weckend et al., 2016)

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn alkupuolella keskityttiin kiertotalouden käsitteen ja aurinkoenergialiiketoiminnan nykytilan hahmottamiseen. Katsauksen perusteella nykyisessä aurinkoenergialiiketoiminnassa kiertotalouden ajatukset, arvot, toiminnot ja liiketoimintamallit toteutuvat erittäin suppeasti. Alkaen aurinkopaneelien valmistajista aina loppukäyttäjiin saakka, kaikki toimitusketjun asteet toimivat pitkälti perinteisen lineaarisen mallin mukaan. Aurinkopaneelijärjestelmän elinkaaren lopussa vain EU-alueella, sen WEEE-direktiivin myötä, pyritään saavuttamaan korkean arvon materiaalikiertoja edistyneemmillä kierrätysprosesseilla. Näiden kierrätysprosessien kehitys on kuitenkin reaktiivista suhteessa aurinkopaneelien valmistusprosesseihin ja käytettyihin materiaaleihin, paljolti minkä johdosta ne kuluttavat valtavasti energiaa tai tuottavat omia haitallisia jätevirtojaan.

Lähtien liikkeelle elinkaaren alkupäästä, aurinkopaneelien ja aurinkopaneelijärjestelmien suunnittelun yhdeksi tärkeimmäksi lähtökohdaksi tulisi ottaa niiden kierrätettävyys, kierrätyksen taloudellisuus ja ympäristöystävällisyys. Esimerkiksi helposti kierrätettävän kapselointiaineen tai kapselointiaineettoman paneelin kehittäminen voisi parantaa kierrätysprosessia merkittävästi. Muita suunnittelussa huomioon otettavia arvoja ovat korjattavuus, uudelleenkäytettävyys, uudelleenvalmistus ja modulaarisuus. Aurinkopaneelin tai aurinkopaneelijärjestelmän yksittäisen komponentin rikkoutuessa se tulisi olla mahdollisuuksien mukaan korjattavissa muut komponentit säilyttäen tai ehjien komponenttien tulisi olla uudelleenkäytettävissä. Esimerkiksi alumiinikehykset tai suojalasin voisi uudelleenkäyttää tai uudelleenvalmistaa, jos ne ovat mekaanisesti riittävän hyvässä kunnossa tai kunnostettavissa. Kierrätys-, korjaus- ja uudelleenkäyttöprosessit tulisi siis olla alusta asti mukana kokonaisvaltaisessa suunnittelussa yhdessä materiaalivalintojen ja valmistusprosessien kanssa, ja tavoitteena tulisi olla tuotteen koko elinkaaren aikaisen arvon maksimointi. Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi valmistajien tulisi pyrkiä aktiiviseen yhteistyöhön esimerkiksi yliopistojen, tutkimuslaitosten sekä kierrätyslaitosten kanssa jo tuotekehitysvaiheessa.

Aurinkosähköjärjestelmien myyjien ja jälleenmyyjien tulisi valikoida tuotteensa kiertotalouden raamit huomioon ottaen; tuotteen valinnassa ei voi painaa pelkästään myyntivoitto, vaan on otettava huomioon koko elinkaaren arvo, mm. uudelleenkäytettävyys, jäännösarvo, kierrätyskustannukset, ympäristöarvot ja markkinoitavuus. Heillä on mahdollisuus luoda valmistajille kysyntäpainetta tuotteisiin, jotka on suunniteltu kiertotalouden ehdoilla ja siten

kiihdyttää kiertotalouteen siirtymistä. Jälleenmyyjät voivat myös tarjota oman panoksensa tuotekehitykseen ja yhteyden paikallisiin kiertotalousverkostoihin.

Jälleenmyyjien on myös tärkeä kehittää uudenlaisia liiketoimintamalleja, joilla he voivat maksimoida aurinkopaneelien arvon niiden koko elinkaaren aikana. Yksi esimerkki tällaisesta liiketoimintamallista on lopputuloksen myyminen tuotteen sijaan eli paneeleilla tuotetun aurinkosähkön myyminen aurinkopaneelijärjestelmän sijaan. Aurinkopaneelijärjestelmän kanssa asennettavia sähkövarastoja yritykset voisivat käyttää sekä lisäturvan tarjoamiseen asiakkaalle, että aggregoituna virtuaalisena voimalaitoksena sähköverkon tukemiseen. Tämä liiketoimintamalli pitää järjestelmän omistuksen yrityksellä, jolloin se voi optimoida sitä koskevat toimenpiteet, kuten yhteistoiminnan verkon kanssa tai huollot. Lisäksi se laskee asiakkaalta vaadittua pääomaa ja riskinottoa, millä voisi olla merkittävä kasvattava vaikutus kysyntään. Jälleenmyyjien on myös tärkeää markkinoida tuotteiden kiertotalousnäkökulmaa ja tiedottaa loppukäyttäjiä tuotteiden elinkaari-vaikutuksista. Toinen esimerkki on kauppapaikan luominen, missä toimijat voisivat tehokkaasti verkostoitua ja käydä kauppaa sekä uusien, että käytettyjen aurinkosähköjärjestelmien komponenteilla, varaosilla tai palveluilla. Tehokas kauppapaikka auttaisi nostamaan esille kiertotalouteen paremmin sopivat tuotteet korkeamman jälleenmyyntiarvon tai halvempien korjauskustannusten kautta.

Lainsäätäjien ja viranomaisten tehtävä on luoda kiertotaloutta tukevat yhteiskunnalliset ja lailliset viitekehykset, missä markkinatoimijat voivat vapaasti, mutta reilusti kilpailla toistensa kanssa ja toteuttaa kiertotaloutta tukevia liiketoimintamalleja. Yhtenä esimerkkinä pelisäännöt, kun katolle asennetun aurinkopaneelijärjestelmän omistaa muu kuin rakennuksen omistaja. Lisäksi viranomaiset valvovat, että markkinatoimijoiden toiminta on kestävä kehityksen mukaista ja täyttää esimerkiksi kierrätysvaatimukset. Lainsäätäjät voivat myös yhdessä alan toimijoiden ja sidosryhmien kanssa kehittää kiertotaloutta edistäviä tukiohjelmia; esimerkiksi kierrätysasteen maksimoimiseksi voisi aurinkopaneelijärjestelmiin soveltaa panttijärjestelmää.

Aurinkopaneelien kierrätys on maailman mittakaavassa ottanut vasta ensiaskeleensa. Aurinkopaneelijätteeseen erikoistuneita kierrätyslaitoksia on vasta vähän ja parempia prosesseja kehitetään jatkuvasti. Korkeamman arvon kierrätystavoitteet tuovat omat haasteensa, kun eri rakenteiset ja eri materiaaleista valmistetut paneelit vaativat erilaistuneita prosesseja. Erikoistuneita kierrätyslaitoksia tullaan todennäköisesti perustamaan sinne, missä

aurinkopaneelijätteen määrä ensimmäiseksi kasvaa merkittävästi eli esimerkiksi Euroopassa Saksaan ja Etelä-Euroopan maihin. Maissa kuten Suomessa, missä kierrätystarve on lähitulevaisuudessakin verrattain pientä, voi olla taloudellisesti järkevintä suorittaa paneelien helposti tehtävä ensimmäisen vaiheen purku paikallisesti ja toimittaa eritelty aurinkopaneelijäte muiden EU-maiden erikoistuneisiin kierrätyslaitoksiin.

5 YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli selvittää, miten aurinkosähköliiketoiminta tällä hetkellä suhteutuu kiertotalouteen, miltä aurinkosähköliiketoiminta kiertotaloudessa voisi näyttää ja erityisesti miten aurinkosähköliiketoiminnan tuottama aurinkopaneelijäte tulisi tehokkaasti kierrättää kiertotalouden ehdoilla.

Työn toisessa osassa selvitettiin kiertotalouden määritelmää, merkitystä, tavoitteita, arvoja ja toimintamalleja. Kiertotalous ponnistaa maapallon resurssien rajallisuuden hyväksymisestä ja kestäväen kehityksen aatteista. Sen keskiössä ovat materiaalikierrot, joilla pyritään maksimoimaan jo käytöön otettujen materiaalien arvo ja minimoimaan neitsytraaka-aineiden tarve.

Työn kolmannessa osassa tarkasteltiin aurinkosähköliiketoiminnan nykytilaa ja yleisimpiä liiketoimintamalleja sekä todettiin kiertotalousajatuksen vähäinen esiintyvyys nykyisissä liiketoimintamalleissa. Lisäksi pohdittiin lyhyesti, miten aurinkosähköliiketoiminta voisi paremmin sopeutua kiertotalouteen uusilla liiketoimintamalleilla ja yhteistoiminta-alustoilla.

Työn neljännessä osassa tutustuttiin eri aurinkopaneelityyppien markkinaosuuksiin, rakenteisiin ja materiaaleihin, sekä luotiin katsaus niiden kierrätyksen nykytilaan, tulevaisuuden näkymiin, toimintaympäristöön ja haasteisiin. Yleisimpien paneelityyppien, piikidepaneelien ja ohutkalvopaneelien, materiaaleista voidaan perinteisillä kierrätysmenetelmillä kierrättää jopa 90 % painosta, mutta suurta osa arvokkaista materiaaleista ei saada kierrätettyä. Korkean arvon kierrätysmenetelmät, joilla arvokkaat ja pienissä määrissä esiintyvät materiaalit saadaan kierrätettyä, vaativat erikoistuneita kierrätyslaitoksia ja prosesseja, joita on viime vuosina tutkittu ja kehitetty yhä enemmän.

Lopuksi työn viidennessä osassa pohdittiin joitain keinoja, miten aurinkosähköliiketoiminnan eri sidosryhmät voisivat omilla sektoreillaan kiihdyttää kiertotalouteen siirtymistä. Kokonaisvaltainen elinkaariajattelun täytyy olla mukana valmistajan suunnittelupöydältä kunakin materiaalikierron liiketoimijoille ja loppukäyttäjille, aina kierrätykseen saakka. Lainsäätäjillä on suuri vastuu kiertotalouteen siirtymisen kiihdyttämisessä kehittämällä esimerkiksi tukiohjelmia ja asettamalla kierrätysvaatimuksia.

LÄHTEET

Burger, S.P., Luke, M., 2017. Business models for distributed energy resources: A review and empirical analysis. *Energy Policy* 109, 230–248. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.07.007>

Dias, P.R., Benevit, M.G., Veit, H.M., 2016. Photovoltaic solar panels of crystalline silicon: Characterization and separation. *Waste Manag Res* 34, 235–245. <https://doi.org/10.1177/0734242X15622812>

Edita Publishing Oy, FINLEX ® - Ajantasainen lainsäädäntö: Valtioneuvoston asetus sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta 519/2014 [verkkoaineisto]. [viitattu 13.6.2020]. Saattavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140519>

García-Barragán, J.F., Eyckmans, J., Rousseau, S., 2019. Defining and Measuring the Circular Economy: A Mathematical Approach. *Ecological Economics* 157, 369–372. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.003>

(a) Korhonen, J., Nuur, C., Feldmann, A., Birkie, S.E., 2018. Circular economy as an essentially contested concept. *Journal of Cleaner Production* 175, 544–552. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.111>

(b) Korhonen, J., Honkasalo, A., Seppälä, J., 2018. Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics* 143, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>

Latunussa, C.E.L., Mancini, L., Blengini, G.A., Ardente, F., Pennington, D., European Commission, Joint Research Centre, 2016. Analysis of material recovery from photovoltaic panels. Publications Office, Luxembourg.

Masson, G., Kaizuka, I., Bosch, E., Detollenaere, A., Neubourg, G., Van Wetter, J., Jaeger-Waldau, A., Breyer, C., 2019. Trends in Photovoltaic Applications 2019. IEA.

[verkkoaineisto]. [viitattu 19.4.2020]. Saatavissa: <https://iea-pvps.org/research-tasks/strategic-pv-analysis-outreach/trends/>

Monier, V., Hestin, M., 2011. Study on Photovoltaic Panels Supplementing the Impact Assessment for a Recast of the WEEE Directive Final Report. European Commission DG ENV: Brussels, Belgium.

Ndiaye, A., Charki, A., Kobi, A., Kébé, C.M.F., Ndiaye, P.A., Sambou, V., 2013. Degrations of silicon photovoltaic modules: A literature review. *Solar Energy* 96, 140–151. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.07.005>

Notarnicola, I.S., 2013. Recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita. *Speciale Tecnico Qualenergia* 29.

Park, J., Park, N., 2014. Wet etching processes for recycling crystalline silicon solar cells from end-of-life photovoltaic modules. *RSC Advances*, 4(66), pp. 34823-34829. doi:10.1039/c4ra03895a

Pern, J., 2008. Module encapsulation materials, processing and testing. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States). [verkkoaineisto]. [viitattu 5.5.2020]. Saatavissa: <https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/44666.pdf>

Philipps, D.S., Ise, F., Warmuth, W., Conferences, P., GmbH, C., 2019. Photovoltaics Report 48. [verkkoaineisto]. [viitattu 19.4.2020]. Saatavissa: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>

Schmela, M., Rossi, R., Beauvais, A., Chevillard, N., Paredes, M., Heisz, M., 2019. Global Market Outlook for Solar Power 2019-2023. *Solar Power Europe*.

Schneller, E.J., Brooker, R.P., Shiradkar, N.S., Rodgers, M.P., Dhere, N.G., Davis, K.O., Seigneur, H.P., Mohajeri, N., Wohlgemuth, J., Scardera, G., Rudack, A.C., Schoenfeld, W.V., 2016. Manufacturing metrology for c-Si module reliability and durability Part III:

Module manufacturing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59, 992–1016.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.215>

Sitra [verkkoaineisto]. [viitattu 12.8.2019]. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/aiheet/kiertotalous/>

Stahel, W.R., 2016. The circular economy. *Nature News* 531, 435.

<https://doi.org/10.1038/531435a>

Urbanati, A., Chiaroni, D., Chiesa, V., 2017. Towards a new taxonomy of circular economy business models. *Journal of Cleaner Production* 168, 487–498.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.047>

Weckend, S., Wade, A., Heath, G.A., 2016. End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels (No. NREL/TP-6A20-73852, 1561525). <https://doi.org/10.2172/1561525>

Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters, A.L., Yang, C., 2018. Global status of recycling waste solar panels: A review. *Waste Management* 75, 450–458. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.036>

