

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

2021

Toivo Koskinen

AURINKOPANEELIEN KIERTOTALOUSPROSESSIT

– Selvitystyö Salo Tech Oy:lle



Toivo Koskinen

AURINKOPANEELIEN KIERTOTALOUSPROSESSIT

– Selvitystyö Salo Tech Oy:lle

Työn tavoitteena oli selvittää, mitä menetelmiä aurinkopaneelien kierrättämiseen on kehitetty ja miten paneelit kierrätetään Suomessa. Tuotantovaiheessa syntyy vähän rejektiä, jonka asianmukainen kierrätystapa tulee selvittää. Lisäksi tavoitteena oli tehdä taustatyötä, jota toimeksiantaja voi hyödyntää valitessaan soveltuvaa tuottajayhteisöä hoitamaan valmistajan tuottajavastuun.

Työssä esitellään piikidepaneelien rakenne ja jätemäärät. Keskiössä on piikidepaneeli, sillä toimeksiantajalla ei kirjoitushetkellä ole ohutkalvopaneeleja markkinoilla. Kierrätysmenetelmiä koskevien tutkimusten perusteella valikoitiin merkittävimmät ja kehityskelpoisimmat menetelmät lähempää tarkastelua varten.

Kierrättämisessä piikidepaneelien ongelmakohtaksi ilmeni aurinkopaneelin komponentteja suojaava kapselointikalvo, joka on vaikea erotella muista materiaaleista. Menetelmien tehokkuuteen ja kannattavuuteen vaikuttaa jätevirtojen suuruus. Kirjoitushetkellä jätevirrat ovat edelleen hyvin pieniä. Painetta menetelmien kehittämiseksi tuovat kuitenkin ennusteet jätemäärien merkittävästä kasvusta lähivuosina.

Tuottajayhteisön valinta vaati aurinkopaneelivalmistajan tuottajavastuun laajuuden selvittämisen, yhteisöjen käyttämän kierrätysmenetelmän selvittämisen ja hintavertailun. Tuottajayhteisön valinnassa painotettiin hinnan lisäksi kestäväntä kierrätysmenetelmää. Selvisi, että tuottajayhteisöt käyttävät ulkopuolisia palveluntoimittajia, joiden käyttämät kierrätysmenetelmät eivät toistaiseksi merkittävästi poikkea toisistaan. Aikataulusyistä tuottajayhteisöiltä ei saatu vielä hintatarjousta. Salo Tech Oy jatkaa kuitenkin prosessia työn jälkeen.

Tuloksena syntyi käsitys aurinkopaneelien kierrätyksen tilasta ja arvio taloudellisesti kannattavimmasta kierrätystavasta Suomen pienillä jätemäärillä. Aurinkopaneelin lasin uudelleenkäyttö paneelituotannossa olisi helpoin toteuttaa ja aiheuttaisi vähiten kustannuksia. Jätteiden lähettämistä eurooppalaiseen aurinkopaneelien kierrätyslaitokseen tarkasteltiin, mutta ongelmaksi muodostui kuljetuksen hinta, hiilijalanjälki ja jätelait. Tuotannossa syntyvän piikennorejektin määrä saatiin selville seurantalomakkeen avulla. Kennot eivät kuulu tuottajavastuun piiriin, mutta ne voidaan kierrättää elektroniikkajätteen mukana. Tämä työ on osa toimeksiantajan tavoitetta kehittää toimintaansa entistä kestävämpään suuntaan.

ASIASANAT:

Aurinkopaneeli, kiertotalous, jätelaki, raaka-aineet

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Energy and environmental technology

2021 | 64 pages

Toivo Koskinen

THE CIRCULAR ECONOMY PROCESSES OF SOLAR PANELS

– Research for Salo Tech Oy

The goal of this thesis was to find out which methods have been developed for the recycling of solar panels and to find out which methods are being used in Finland. The production line quality control also results in silicon cell and panel reject which need to be taken care of. In addition, the aim was to search and select a suitable producer responsibility organization for a Finnish solar panel manufacturer Salo Tech. The producer responsibility organization would then take care of the company's producer responsibilities.

The thesis presents the structure of a c-Si solar panel and the amount of waste being generated from its production. The work focused on crystalline silicon panels as the commissioner did not have thin film panels on the market at the time of writing. Recycling methods have already been studied extensively, so the most significant and viable methods were chosen for closer examination.

The study revealed that the encapsulation film that protects the solar panel components was the most difficult part of the recycling process. The film is difficult to separate from other materials after it has been laminated. The efficiency and profitability of the methods are affected by the volume of the waste streams. At the time of writing, the waste streams were still minor. However, the development of recycling methods will be under pressure from forecasts of inevitably increasing waste volumes in the coming years.

The selection of the producer responsibility organization required determining the extent of the producer responsibility of a solar panel manufacturer. The process involved clarifying the recycling methods used by the organizations. The aim was not only to emphasize the price but also the most sustainable recycling method used. It turned out that the organizations use external service providers, whose recycling methods do not seem to differ significantly. For schedule reasons, no price offer had been received from the producer organizations. Salo Tech will continue the process after the finalization of this thesis.

The result of the work was a clearer picture of the methods used in recycling of solar panels and an estimate of the most economically viable way of recycling the current small amounts of waste currently in Finland. Reusing recycled solar panel glass in the production would be the easiest to implement and least costly. The thesis was part of the thesis commissioner's goal towards improving its sustainability.

KEYWORDS:

Solar panel, circular economy, waste act, raw material resources

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO	8
1 JOHDANTO	9
2 KIERRÄTYKSEN TILA	10
2.1 Aurinkopaneelien rakenne	10
2.1.1 Piikidekennot	11
2.1.2 Johtimet	12
2.1.3 Lasi ja laminointi	13
2.1.4 Kehykset	16
2.2 Jätteen määrä ja sen kasvu	16
2.2.1 Kierrätettävän materiaalin määrä	18
2.2.2 Eri materiaalien osuudet jätteestä	21
2.3 Lainsäädäntö	22
2.3.1 Euroopan WEEE-direktiivi	23
2.3.2 RoHS-direktiivi	24
3 KIERRÄTYSMENETELMÄT	25
3.1 Hajonneen paneelin korjaus	25
3.2 Ehjän lasin talteenotto	28
3.3 Paneelin mekaaninen murskaus	30
3.4 Sähköhydraulinen paineaaltohajotus (Electro-hydraulic fragmentation)	34
3.5 Kemialliset menetelmät	37
3.6 Ultraääni	39
3.7 Piikennojen kierrätys	40
3.8 Kierrätetyn piikidekennon käyttö uudessa paneelissa	41
3.9 Kierrättämisen taloudellinen näkökulma	43
4 YHTEENVETO KIERRÄTYSMENETELMISTÄ	45
4.1 Käytettyjen paneelien markkinat	45
4.2 Lasin kierrätys	46
4.3 Mekaaninen murskaus	46
4.4 Sähköhydraulinen murskaus	48
4.5 Kemialliset menetelmät	48

4.6 Taloudellisesti kannattavin menetelmä	49
5 KIERRÄTYSYHTEISÖÖN LIITTYMINEN	50
5.1 Salo Tech Oy:n kierrätettävän materiaalin määrä	50
5.2 Tuottajayhteisöt	52
5.2.1 SER-Tuottajayhteisö ry	52
5.2.2 SELT ry	52
5.2.3 ERP Finland ry	53
5.2.4 Kuusakoski Oy	53
5.2.5 PV Cycle	53
5.3 Jätteiden kansainväliset siirrot	54
6 LOPPUTULOKSET JA POHDINTA	55
6.1 Tulokset	55
6.1.1 Kierrättäminen	55
6.1.2 Tuottajayhteisö	57
6.1.3 Jatkotutkimusaiheita	58
6.2 Pohdinta	58
6.2.1 Ajatuksia käytettyjen paneelien markkinoista	58
6.2.2 Opinnäytetyön onnistuminen	59
LÄHTEET	60

KUVAT

Kuva 1 Piikidekennoja Salo Tech Oy:n tuotantolaitoksella.	12
Kuva 2 Salo Tech Oy:n käyttämää tinapäälysteistä johdinlankaa.	13
Kuva 3 Tasolasia Salo Tech Oy:n tuotantolinjalla.	14
Kuva 4 Piikennopaneelin rakenne (Mertens ym. 2014).	14
Kuva 5 Kennojen ympärille sulavaa eva-kapselointikalvoa Salo Tech Oy:n tuotantolinjalla.	15
Kuva 6 Paneelin kolmikerroksista taustakalvoa Salo Tech Oy:n tuotantolinjalla.	15
Kuva 7 Kehyksen rakenne (Vanek ym. 2017).	16
Kuva 8 Eri tavoin vaurioituneita taustakalvoja (Eder ym. 2019).	27
Kuva 9 Lukittuvan kiinnitysmekanismin takia Salo Techin käyttämiä kehyksiä ei saa rikkomatta irti	28
Kuva 10 Havainnekuva vasaramyllyn toiminnasta (Stedman Machine Company 2019).	30
Kuva 11 Terä/rengasmurskain (Ulster Shredders).	31
Kuva 12 Monikidepaneelimurskaa terä- ja lämpökäsittelyn jälkeen. a) <i>alle 8 mm</i> b) <i>5-8 mm</i> c) <i>1-5 mm</i> d) <i>0,4-1 mm</i> e) <i>0,08-0,4 mm</i> f) <i>alle 0,08 mm</i> (Granata ym. 2014).	32
Kuva 13 Monikidepaneelimurskaa terä- ja vasarakäsittelyn jälkeen. a) <i>alle 8 mm</i> b) <i>5-8 mm</i> c) <i>1-5 mm</i> d) <i>0,4-1 mm</i> e) <i>0,08-0,4 mm</i> f) <i>alle 0,08 mm</i> (Granata ym. 2014).	33
Kuva 14 Sähköhydraulisen murskaimen toimintaperiaate. (Nevala ym. 2019.)	35
Kuva 15 Kuusakosken kierrätyslaitoksen pienellä rengasmurskaimella murskattu Salo Solar Oy:n paneeli (Nevala ym. 2019).	36
Kuva 16 Saksalaisen ImpulsTec:n EHF-laitteella murskattu Salo Solar Oy:n paneeli (Nevala ym. 2019).	37
Kuva 17 Mikroskoopilla kuvattu piikenno EVA-kalvon polton jälkeen. a) kennon etupuoli, jossa heijastusta vähentävä pinta ja hopeajohtimia. b) kennon takapuoli. c) etsattu etupuoli d) etsattu takapuoli (Kang ym. 2012.)	38
Kuva 18 Mikrokuplan elinkaari (Kim ym. 2012).	39
Kuva 19 Tärkeimmät askeleet kohti kestäväää paneelituotantoa (Deng ym. 2019).	44
Kuva 20 Salo Tech Oy:n tuotannossa hylättyjä piikennoja	51

KUVIOT

Kuvio 1 Aurinkosähkön kapasiteetin kumulatiivinen kasvuennuste (Weckend ym. 2016.)	17
Kuvio 2 Suomeen asennettu aurinkosähköteho (MW) (Nyman 2020)	17
Kuvio 3 Arvio paneelijätteen määrän kumulatiivisesta kasvusta (Weckend ym. 2016).	19
Kuvio 4 Paneelijätteen määrä suhteessa asennuksiin. Early-loss ylempänä ja regular-loss alempana (Weckend ym. 2016).	20
Kuvio 5 Materiaalien suhteellisten osuuksien kehitysennuste 2030-luvulle (Weckend ym. 2016).	22
Kuvio 6 Murskan kokojakauma terä- ja lämpökäsittelyiden jälkeen (Granata ym. 2014).	31
Kuvio 7 Murskan kokojakauma terä-, vasara- ja lämpökäsittelyjen jälkeen (Granata ym. 2014).	
Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.	
Kuvio 8 Vasemmalla EHF-menetelmällä murskatun paneelin materiaalityyppi, oikealla terämenetelmällä murskattu (Nevala ym. 2019.)	36

Kuvio 9 Kennojen kulku jätteestä uusiutuotantoon (Klugmann-Radziemska ym. 2020).	40
Kuvio 10 Esimerkki 1000 kg paneelijätteen kierrätyksestä (Klugmann-Radziemska ym. 2020).	41

TAULUKOT

Taulukko 1 Gdanskin yliopiston LCA-tutkimus yhden piikennokilon tuottamisesta uudella tai kierrätetyllä materiaalilla (Klugmann-Radziemska ym. 2020).	42
Taulukko 2 Arvioita kierrätyksen kustannuksista ja myyntivoitoista (Deng ym. 2019).	44
Taulukko 3 Yhden neliön (1m ²) kokoisen paneelikappaleen laminointikerroksen poiston vaatimat energia- tai kemikaalimäärät, lopputuotteet, edut ja haittapuolet (Maani ym. 2020).	47

KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

a-Si	Amorfinen pii
CdTe	Kadmium-Telluuri-ohutkalvokenno
CIGS	Kupari-indium-gallium-selenidi-ohutkalvokenno
c-Si	Piikidekenno
EVA-kalvo	etyyli-vinyyli-asetaatikalvo (kennon kapselointiin)
Hydrometallurgia	Metallien valmistus/kierrätysmenetelmä, joka sisältää vesike- miasa
LCA	Life cycle assessment (elinkaariarviointi)
RoHS	Restriction of Hazardous Substances – Vaarallisten aineiden rajoittaminen
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment (elektroniikkajäte)

1 JOHDANTO

Aurinkopaneelit ovat tärkeä tekijä käynnissä olevassa energiamurroksessa. Ne tuottavat väsymättä päästötöntä energiaa kymmeniä vuosia. Aurinkopaneelien asennusmäärät ovat lisääntyneet voimakkaasti, pääasiassa reilusti alentuneiden hintojen johdosta. Kehittyvät valmistustekniikat ja kasvaneet tuotantomäärät laskevat hintoja edelleen, ja siten kiihdyttävät asennusten lisääntymistä. (Weckend ym. 2016)

Vanhoja aurinkopaneeleja päätyy elektroniikkaromuun toistaiseksi hyvin vähän. Yksittäiset paneelit voivat toimia jopa yli 40 vuotta, joskaan varhaisimpien aurinkopaneelien valmistusmenetelmät eivät olleet aivan yhtä kehittyneitä kuin nyt. Uudet paneelit kestävät siis todennäköisesti kauemmin kuin varhaisimmat yksilöt. (Weckend ym. 2016)

Pitkästä eliniästä huolimatta aurinkopaneelikin päätyy joskus jätteeksi. Paneeli voi päätyä poistoon ehjänä tai jollain tapaa rikkoutuneena. Jätelaissa on määritelty etusijajärjestys, jonka mukaan jätteen syntymisen ehkäiseminen on etusijalla ja uudelleenkäyttö seuraavana vaihtoehtona (SYKE 2020). Näin ollen ehjät paneelit olisi ympäristöystävällisintä myydä eteenpäin second hand -markkinoille. Jotkut vioista ovat myös helposti korjattavissa. Toiseksi paras kierrätystapa olisi erotella ja hyödyntää kaikki paneelin raaka-aineet uudelleen. Se säästäisi luonnonvaroja. Kolmantena vaihtoehtona on esimerkiksi paneelimurskeen käyttö eristemateriaalina tai esimerkiksi sementin lisäaineena.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimivaa suomalaista aurinkopaneelivalmistajaa Salo Tech Oy:tä kiinnostaa aurinkopaneelin koko elinkaari. Opinnäytetyön yhtenä tavoitteena on valita ja esitellä merkittävimmät aurinkopaneelin kierrätysmenetelmät. Työssä selvitetään myös, miten paneelijätettä käsitellään Suomessa. Aurinkopaneelivalmistajana Salo Tech Oy:llä on velvollisuus vastaanottaa heille toimitettua paneelijätettä ja raportoida siitä Pirkanmaan ELY-keskukselle tai tuottajayhteisölle. Työssä tarkastellaan tuottajayhteisöjen eroja, jotta toimeksiantajayritys Salo Tech Oy voi valita parhaiten itselleen soveltuvan tuottajayhteisön. Tuottajayhteisöjen hinta ja kestävin kierrätysmenetelmä ovat tärkeimpiä valintakriteerejä.

2 KIERRÄTYKSEN TILA

Aurinkopaneelit eivät ole mikään uusi asia. 1990-luvulla paneeleja asensivat vain innokkaimmat kokeilijat ja satunnaiset mökkeilijät. Aurinkopaneeli oli jo silloin varsin toimiva apuväline verkkovirran ulottumattomissa oleville kiinteistöille. Hinta oli kuitenkin monikymmenkertainen ja teho vain joitakin kymmeniä watteja. Tänä päivänä yhden aurinkopaneelin teho voi yltää yli 600 Wattiin (Svarc 2021). Ympäristökysymykset ovat nykyisin kuitenkin entistä merkittävämpi hankintasyy. Aurinkopaneelilta toivotaan muun muassa kevennystä sähkölaskuihin. Aurinkopaneelin asentanut tuntee myös osallistuneensa ilmastotalkoisiin. Sähköautojen yleistyminenkin lisää aurinkopaneelien houkuttelevuutta. Aurinkopaneeleja asennetaan pimeässä Suomessakin omakotitaloihin, kerrostaloihin, yritysikiinteistöihin sekä maa-asennuksina muun muassa pelloille. Kasvaneet asennusmäärät alkavat pian vaikuttamaan myös poistoon menevien aurinkopaneelien määrään.

Aurinkopaneelit maksavat valmistuksesta aiheutuneen hiilijalanjälkensä takaisin 1,5–6 vuodessa, riippuen aurinkovoimalan sijainnista. Valmistuksesta aiheutuneet hiilipäästöt saadaan siis lähes poikkeuksetta moninkertaisesti kuitattua paneelin yli 25 vuoden elinkaaren aikana (The Renewable Energy Hub 2020). Hiilipäästöt eivät kuitenkaan ole ainoat ympäristöhaitat, joita varsinkin piikennojen valmistamisessa syntyy. Raaka-aineiden hankinta kuormittaa ympäristöä, joten kierrättäminen vähentää uuden materiaalin louhinnan tarvetta. (Stolz ym. 2017.)

2.1 Aurinkopaneelien rakenne

Aurinkopaneelien ja niiden sisältämien piikennojen kierrättäminen ei ole helppo tehtävä. Aurinkopaneelit ovat teknisesti melko yksinkertaisia, mutta ne sisältävät silti useita eri materiaaleja tiukasti yhteen laminoituna. Kierrättämisen haasteisiin johdattelu vaatii paneelien rakenteen ja materiaalien tarpeen ymmärtämisen. Paneelien rakenne on pysynyt pitkään pääpiirteittäin samana. Muutoksia tulee pääosin materiaalien määresuhteisiin, esimerkiksi kennojen valmistustekniikan parantuessa. Kehittyneet valmistustekniikat mahdollistavat entistä ohuempia kennoja. Aurinkopaneelien yleisimmät kennorakenteet jakautuvat karkeasti piikidekennoihin ja ohutkalvokennoihin. Piikidekennot käsittävät n. 90 % kaikista asennetuista aurinkopaneeleista. (Weckend ym. 2016) Työssä

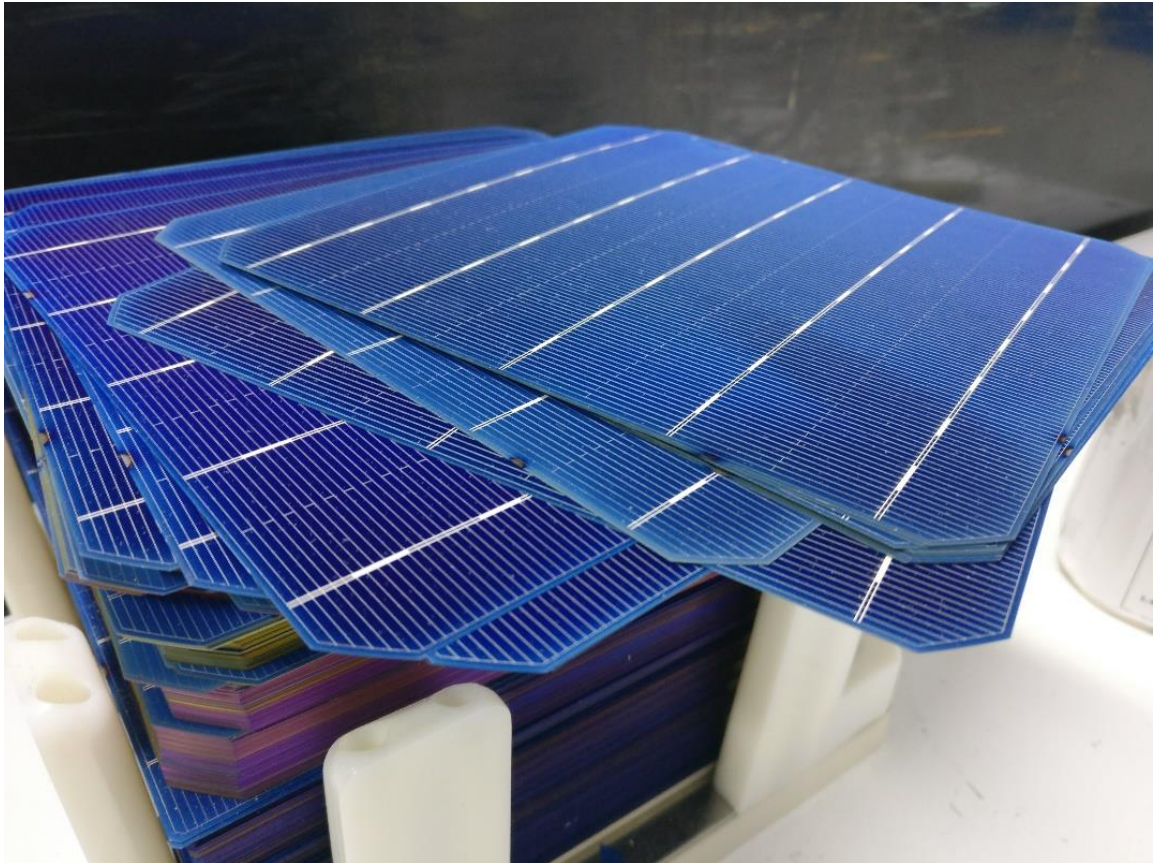
tarkastellaan lähinnä piikidekennoja, sillä toimeksiantajalla ei ole kirjoitushetkellä ohutkalvokennoja markkinoilla.

Perinteisen paneelin mitat ovat n. 980 mm x 1650 mm, jolloin kennoja mahtuu paneeliin 60. Valmistajien kilpailu keskittyi aiemmin pääasiassa hyötysuhteeseen, mutta nykyisin kilpaillaan teholla. Hyötysuhteet eivät ole kuitenkaan niin merkittävästi kasvaneet, että paneelin tehot olisivat kaksinkertaistuneet parissa vuodessa. Paneelien kokoa on alettu kasvattamaan niin, että suurimmat paneelit ovat jo 1300 mm x 2400 mm kokoisia. Suurimpia paneeleja ei kuitenkaan vielä suunnata kuluttajamarkkinoille. Suurissa paneeleissa voi olla jopa 156 kennoa. Tällöin käytetään puoliksi leikattuja kennoja. (Svarc 2021.)

2.1.1 Piikidekennot

Aurinkokenno vaatii toimiakseen puolijohdemateriaalin, joka muuttaa auringon valoenergiaa sähköksi. Puolijohteessa valon energia irrottaa elektroneja atomeistaan, jolloin elektronin paikalle jää aukko. Aukko voi saada uuden elektronin naapuriatomilta. Piitä seostetaan boorilla ja fosforilla niin, että kennon pohjapuolella on enemmän aukkoja (p-tyyppi, seostettu boorilla) ja pintapuolella enemmän elektroneja (n-tyyppi, seostettu fosforilla). Tällöin sattumanvaraisesti poukkoilevat elektronitkin saavat keskimääräisen suunnan ja kulkevat rajapinnan kautta vain yhteen suuntaan. Elektronit kuljettavat siirtyessään negatiivista varausta ja saavat aikaan virran. Elektronit vaeltavat materiaalin läpi kohti johtimia, joista virta saadaan siirrettyä eteenpäin. (Perälä 2017.)

Pii on aurinkopaneelin sydän ja toimii perustana valtaosaan maailman puolijohteista. Pii esiintyy maaperässä yleisimmin piidioksidina, eli kvartsina. Kvartsi on sellaisenaan eriste, joten kvartsi prosessoidaan piiksi, joka seostetaan boorilla ja fosforilla niin, että siitä tulee puolijohde. Aurinkokennossa piin puhtausasteen täytyy olla vähintään 99,999 %. Puhtaasta piistä valmistetaan monikiteistä tai yksikiteistä piitä, joka leikataan n. 0,2 mm paksuiksi levyiksi, yksittäisiksi kennoiksi. (Mertens ym. 2014.) Uusia piikidekennoja kuvassa 1.

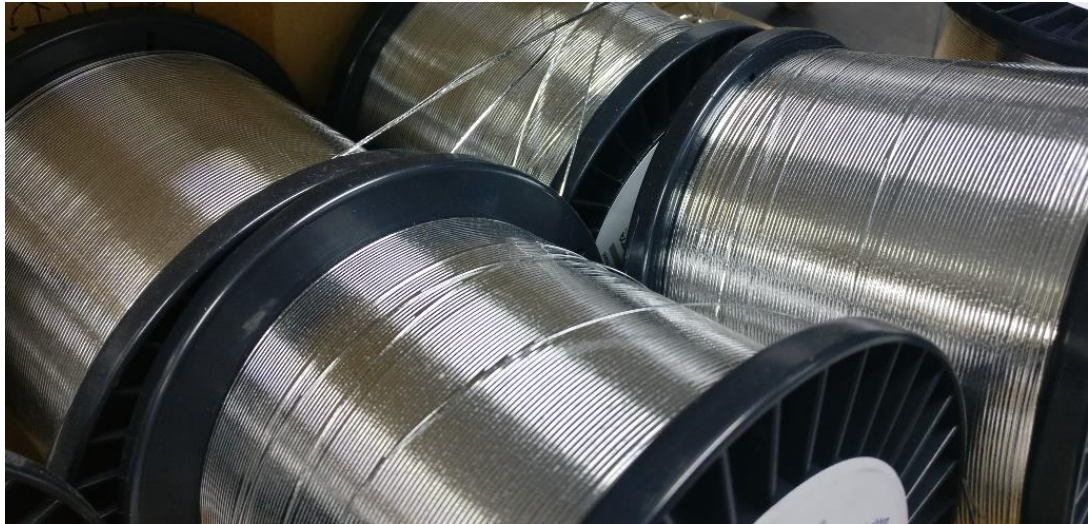


Kuva 1 Piikidekennoja Salo Tech Oy:n tuotantolaitoksella.

2.1.2 Johtimet

Piikidekenno ei toimisi ilman keinoa kuljettaa sähkövirtaa eteenpäin. Valmistusvaiheessa kennon pintaan asetetaan silkkipainoseula, joka on rei'itetty asennettavan johdinverkon kohdilta. Sapluunan läpi kennon pintaan painetaan hopeatahnaa, jolla saadaan erinomainen kontakti kennon pintaan. Hopeatahnaan juotetaan verkkomainen kerros erittäin pieniä ja ohuita johtimia, jotka kerätään muutaman sentin välein leveämpiin keruujohtimiin. (Mertens ym. 2014.) Kennoissa käytetään usein lyijypitoista juotetta, sillä se laskee juotoksen vaatimaa lämpötilaa, ja siten suojelee kennoa lämpörasitukselta. Lyijyttömiä paneeleja on mahdollista valmistaa, mutta kustannukset nousevat. (Fuhs 2019.) Myös kennon takapuolella on johtimia, jotka kerätään yhteen. Nämä leveämmät keruujohtimet yhdistetään seuraavaan kennoon tinapäälysteisellä kuparijohtimella (kuva 2), jolloin yksittäisestä kennosta saadaan paneeli. (Perälä 2017.)

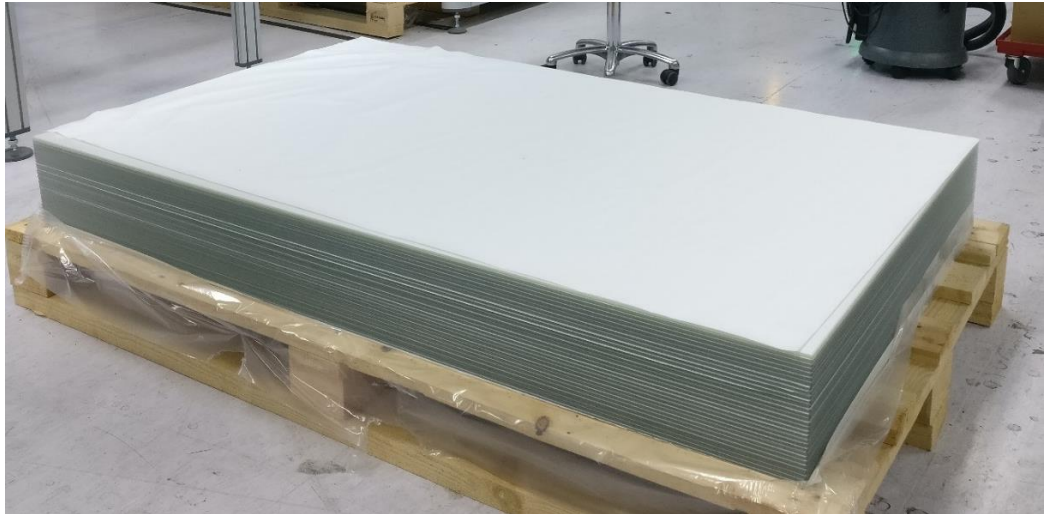
Yksi kenno tuottaa keskimäärin 0,6 V jännitteen. Paneelin kennot kytketään tyypillisesti sarjaan, jotta saadaan paneelin jännite nostettua halutulle tasolle. Sarjaan kytketyt johtimet tuodaan paneelin taustakalvosta läpi. Johtimiin kytketään vesitiivis jakorasia, josta lähtee paneelin johdot. (Perälä 2017.)



Kuva 2 Salo Tech Oy:n käyttämää tinapäällysteistä johdinlankaa.

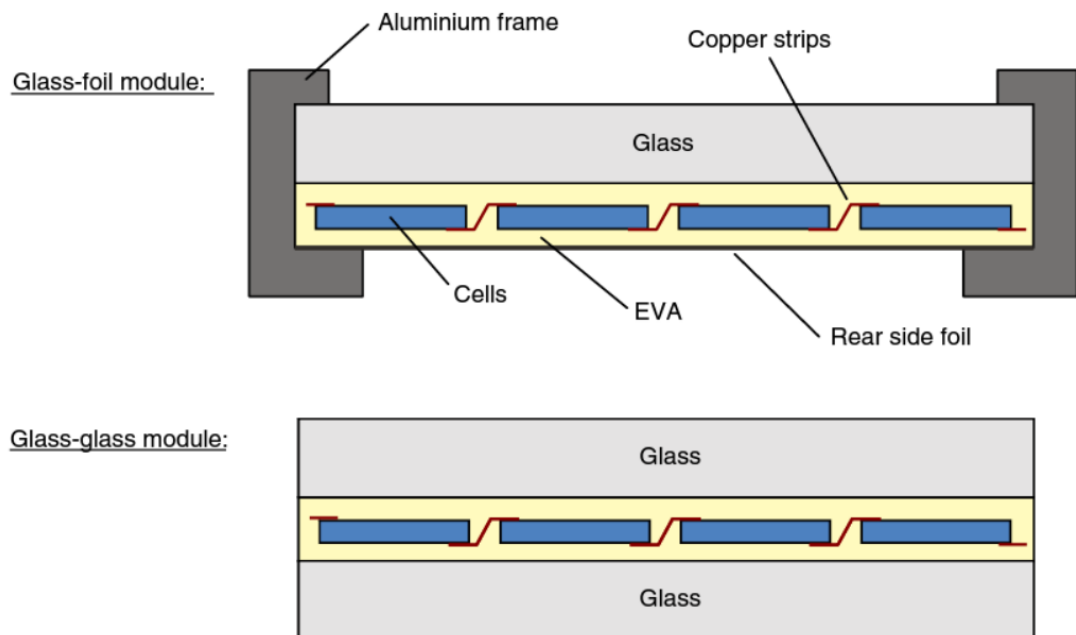
2.1.3 Lasi ja laminointi

Piikennot ovat ohuutensa vuoksi äärimmäisen hauraita, niinpä ne pitääkin suojata säältä ja luonnonilmiöiltä. Kenno pitää suojata niin fyysiseltä rasitukselta kuin kosteudelta ja hapeltakin. Jos kenno pääsee hapettumaan, sen hyötysuhde ja käyttöikä laskee. (Mertens ym. 2014.) Piikennot kapseloidaan ilma- ja vesitiiviiksi paketiksi lasin, taustakalvon ja kahden läpinäkyvän muovikalvon väliin (kuvat 4 ja 5). Paneelin pintaa suojaa yleisimmin 3,2 mm tai 2 mm paksuinen karkaistu lasi (kuva3). Karkaistu lasi kestää raekuurot ja paksummankin lumikuorman ja on silti hajotessaan turvallinen. Lisäksi vähärautainen erikoislasi vähentää valon heijastumista paneelin pinnasta. Lasi on materiaalina kestävämpi kuin esimerkiksi polykarbonaattilevy. (Mertens ym. 2014.)



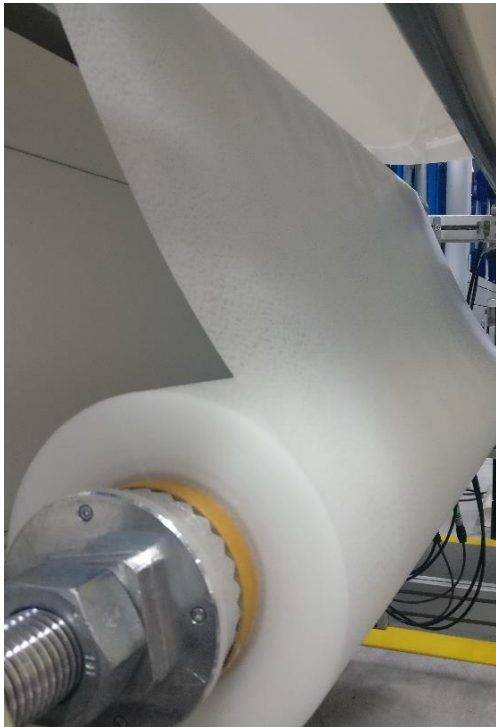
Kuva 3 Tasolasia Salo Tech Oy:n tuotantolinjalla.

Yleisimmin kapselointikalvona käytössä on etyleeni-vinyyli-asetaattikalvo (eva-kalvo). (Perälä 2017.) Kalvot sulavat tiiviisti kennojen ympärille vakuamilaminaattorissa ja kovettuvat jäätyessään. Laminaattorissa on alipaine, joka imee ilman pois kalvojen välistä. Tällöin kennot eivät pääse kosketuksiin hapen kanssa. Kalvot auttavat myös kestämään lievää taivutusta. (Mertens ym. 2014.)

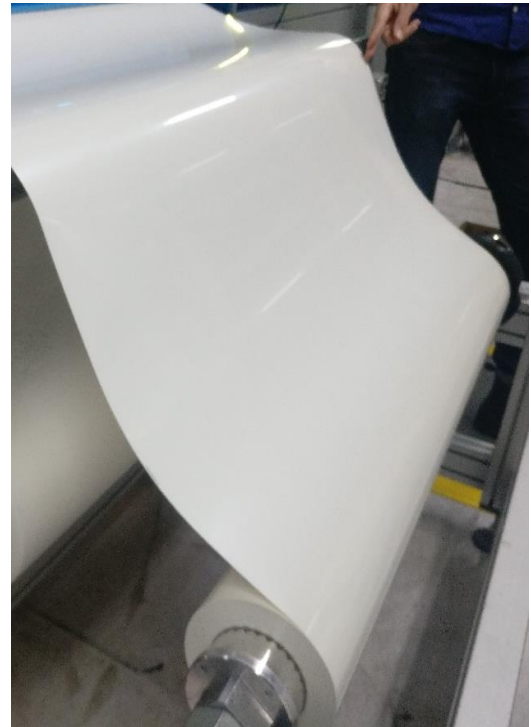


Kuva 4 Piikennopaneelin rakenne (Mertens ym. 2014).

Muovilaadut saattavat samentua ajan kuluessa, jolloin aurinkopaneelin teho laskee (Perälä 2017). Yhden lasikerroksen paneeleissa takapintaan laminoidaan erityinen kolmikerroksinen taustakalvo (kuva 6), joka toimii eristeenä ja suojaa kosteudelta. Lasi ja taustakalvo laminoidaan paneeliin samassa vaiheessa kapselointikalvon kanssa. Yleensä lasi on vain pintapuolella, mutta ulkonäkökeskeisissä asennuksissa lasi voidaan laminoida myös molemmin puolin paneelia. Paneelissa voi myös kaksipuolisia kennoja, jolloin tarvitaan myös lasi molemmin puolin kennoa. Lasi-lasi asennuksissa käytetään usein ohuempaa 2 mm lasia, jolloin kahden lasin pakettiin ei mene juuri sen enempää lasia kuin yhden lasin paneeliinkaan. Taustamateriaalina lasi on kestävämpää kuin taustakalvo. Jotkin valmistajat antavat lasi-lasi -paneeleille jopa pidemmän takuun kuin perinteisille paneeleille. (Mertens ym. 2014.)



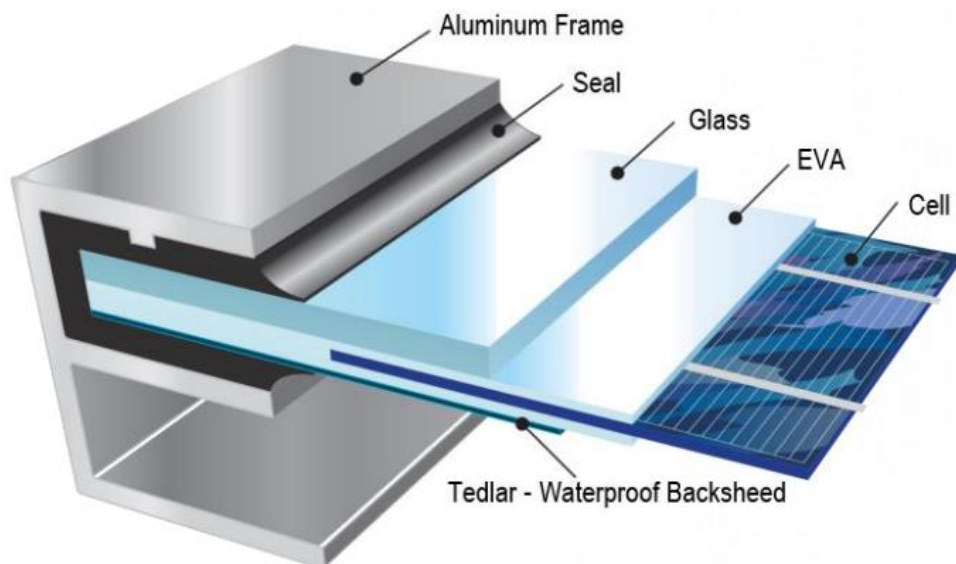
Kuva 5 Kennojen ympärille sulavaa evakapselointikalvoa Salo Tech Oy:n tuotantolinjalla.



Kuva 6 Paneelin kolmikerroksista taustakalvoa Salo Tech Oy:n tuotantolinjalla.

2.1.4 Kehykset

Perinteinen lasilla ja taustakalvolla varustettu paneeli vaatii tuekseen alumiinisen kehyksen. Kehyksen tehtävänä on muun muassa suojata paneelia fyysiseltä rasitukselta, mahdollistaa tukeva asennus telineisiin, luoda luotettava maadoitus ja tiivistää paneelin reunat kosteudelta. Kehyksessä on ura, johon laminoitu paneelipaketti upotetaan (kuva 7). Urat täytetään kaksikomponenttisella liimalla tai silikonipohjaisella massalla tiiveyden varmistamiseksi. Kehyksiä ei asennuksen jälkeen pysty enää irrottamaan liiman ja kulmien liitostavan vuoksi. Lasi-lasi-paneelin reunat tulee tiivistää huolellisesti, jos kehystä ei käytetä. (Frantti 2021.)

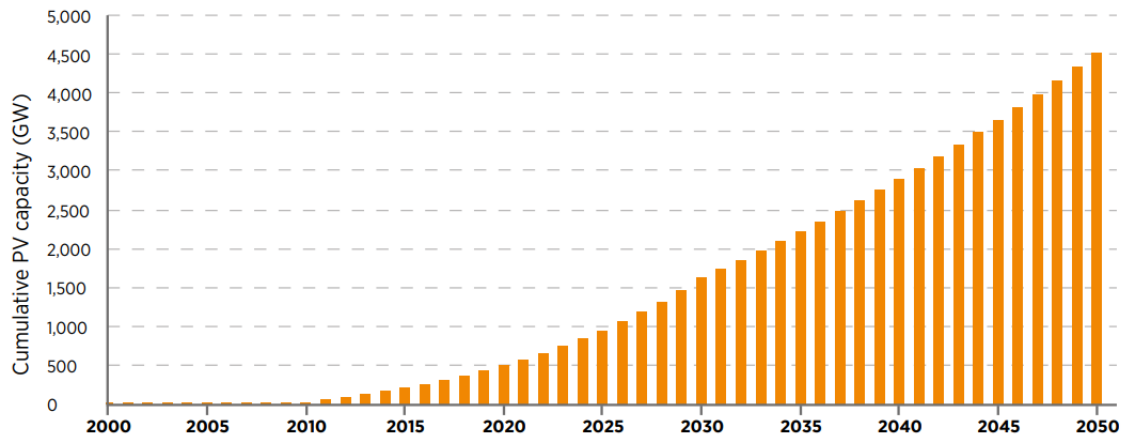


Kuva 7 Kehyksen rakenne (Vanek ym. 2017).

2.2 Jätteen määrä ja sen kasvu

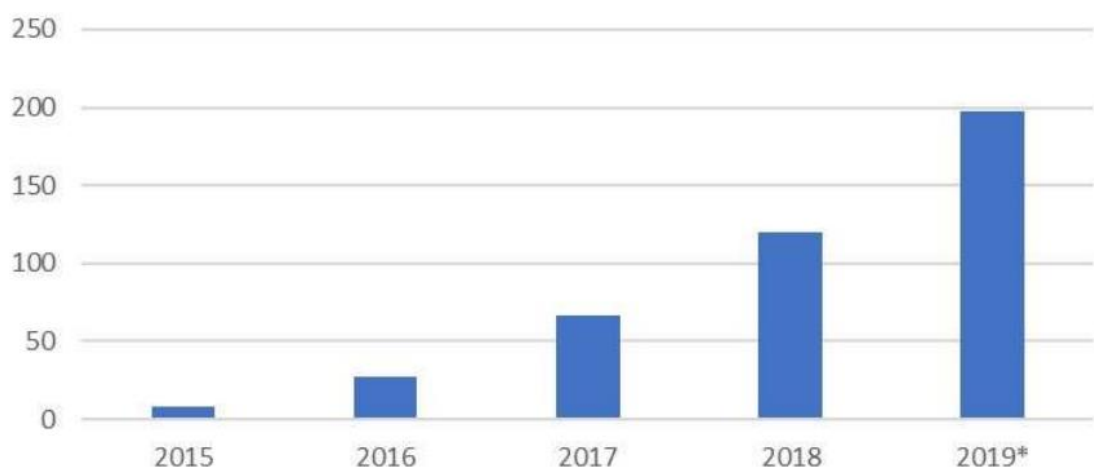
Taloudelliset tekijät ja ilmastopolitiikka ajavat energiamurrosta eteenpäin. Aurinkopaneelien asennusmäärät ovat ennennäkemättömässä kasvussa, sillä vaadittavien komponenttien hinta on pudonnut jopa 90 % viimeisen kymmenen vuoden aikana (Vakkuri 2020). Keskimääräiseksi aurinkotuotannon vuotuiseksi kasvuksi on laskelmoitu n. 8,9 %. Maailmanlaajuinen tuotantokapasiteetti on 2019 lopussa n. 580 GW (Bellini 2020).

Kasvun lisääntyessä ennustetusti, olisi vuoteen 2050 mennessä kapasiteettia jo n. 4500 GW (kuvio 1). Asennettujen aurinkopaneelien määrä vaikuttaa tietysti viiveellä suoraan tulevaisuuden paneelijättemääriin. (Weckend ym. 2016.)



Kuvio 1 Aurinkosähkön kapasiteetin kumulatiivinen kasvuennuste (Weckend ym. 2016.)

Suomessakin aurinkopaneelien asennusmäärät ovat lähteneet kovaan nousuun (kuvio 2). Aurinkosähkötehoa oli Suomessa vielä 2016 vain 37 MW. Vuonna 2017 teho oli jo 80 MW, vuonna 2018 140 MW ja vuonna 2019 198 MW (LUT yliopisto 2019). Kasvu ei ole hyytynyt, sillä vuoden 2020 asennetuksi tehoksi on ennustettu jopa 320 MW. (Nyman 2020)



Kuvio 2 Suomeen asennettu aurinkosähköteho (MW) (Nyman 2020)

Paneelien hyötysuhde ja sitä kautta teho ovat kasvaneet vuosien saatossa merkittävästi. Tällä hetkellä asennettavien paneelien piikkiteho on keskimäärin 300 W, kun vielä vuonna 2010 yleisin teho oli noin 200 W (Sendy 2021). Suomeen asennettujen paneelien lukumäärää ei ole tiedossa, mutta siitä voidaan tehdä karkeita päätelmiä käyttämällä teholumemia. Karkeasti voidaan sanoa Suomen paneelien keskitehoksi noin 250 W. Koko maan aurinkosähköteho on 320 MW. Kokonaisteho voidaan jakaa yksittäisen paneelin keskimääräisellä teholla ($320\,000\,000\text{ W} / 250\text{ W} = 1\,280\,000$). Erittäin karkealla laskutavalla Suomessa olisi siis jo yli miljoona asennettua aurinkopaneelia. Yksi paneeli painaa karkeasti noin 20 kiloa, joten Suomeen asennettujen paneelien yhteenlaskettu paino voi olla jo noin 25 000 tonnia. Nykyisen kaltaisella kasvulla paneelimäärä ylittäisi kaksi miljoonaa kappaletta jo vuonna 2021.

2.2.1 Kierrätettävän materiaalin määrä

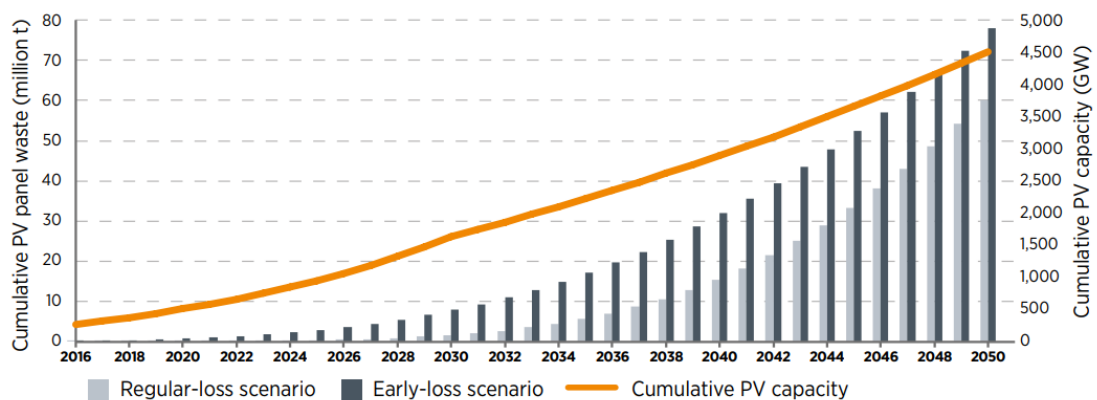
Valmistajat antavat tuotteilleen keskimäärin 25 vuoden takuuajan, jonka aikana teho saisi laskea korkeintaan 20 %. Takuu aika annetaan yleensä merkittävällä turvamarginaalilla, jotta valmistajat eivät joutuisi pulaan ennenaikaisesti hajonneiden paneelien kanssa. Paneelien tehon lasku on siis pääosin merkittävästi vähäisempää, ja järkevä käyttöikä paneeleille voi lähennellä jopa 40 vuotta. Paneelin elinikä voi siis olla yhtä pitkä kuin keskimääräisen rakennuksen elinikä (Vakkuri 2020). Paneelien todellista elinikää ei vielä voida edes tietää, sillä teknologia on kehittynyt, eikä nykyisen kaltaisia paneeleja ole ollut käytössä vielä tarpeeksi pitkää aikaa. Käytännössä paneeleja ei vielä päädy poistoon asti juuri yhtään, sillä asennusmäärät 1900-luvun puolella olivat mitättömiä. Syy paneelien poistoon ei toistaiseksi liene niinkään rikkoutuminen, vaan uusien paneelien merkittävästi kasvanut teho ja taloudelliset intressit. Joissain tapauksissa on taloudellisesti kannattavaa vaihtaa tehokkaammat paneelit vanhojen tilalle reilusti ennen kuin niiden käyttöikä olisi täynnä. (Weckend ym. 2016.)

Paneelin rikkoutuminen johtuu yleensä lasin hajoamisesta, valmistusvirheestä tai taustakalvon ja/tai kapselointikalvon hapertumisesta auringon säteilyn vaikutuksesta. Kapselointikalvon hapertuminen johtaa mahdollisesti piikennon altistumiseen hapelle, joka ajan saatossa heikentää kennon tehoa (Kang, Yoo et al. 2012). Aurinkopaneeli voi myös menettää tehoaan kennojen ja kehyksen välillä kulkevan sähkövirran aiheuttaman

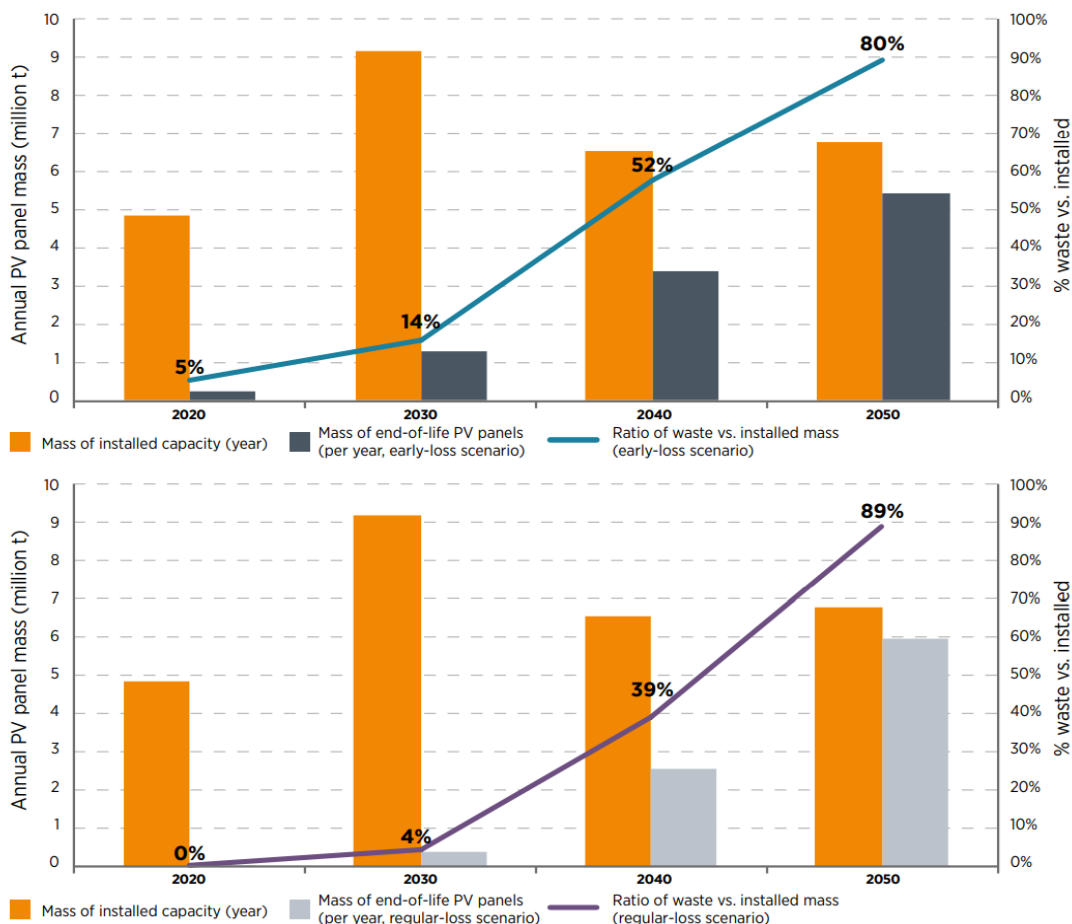
rappeutumisen eli PID:n seurauksena (Potential-Induced Degradation). (Kwembur, Crozier McClelland et al. 2020)

IRENA (International Renewable Energy Agency) on laatinut kaksi eri ennustetta paneelijätteen kasvulle. Ensimmäisessä (regular-loss) skenaariossa poistoon päätyvät 30–40-vuotiaat paneelit, eikä yksittäisten paneelien ennen aikaista hajoamista huomioida. Toisessa (early-loss) skenaariossa huomioidaan asennus/kuljetusvahingot ja mahdolliset valmistusvirheistä johtuneet hajoamiset ennen 40 vuoden ikää. (Weckend ym. 2016.)

Kumulatiiviseksi maailmanlaajuiseksi paneelijätteen määräksi on arvioitu 2016 mennessä noin 43 000 tonnia (regular-loss), joka olisi vasta alle 0,11 % yhden vuoden elektroniikkajätteen määrästä (41,8milj. tonnia / vuosi (Balde 2015)). Edellä mainituista syistä jätteen määrä on siis toistaiseksi verrattain pieni, mutta jo 2030 mennessä käytöstä olisi poistettu arvioiden mukaan noin 1,7 miljoonaa tonnia paneeleita (regular-loss). Paneelien kiihtynyt asennustahti on vasta aluillaan, joten 2050-luvulle mennessä paneelijätteen määrän arvioidaan olevan jopa 60–80 miljoonaa tonnia (kuvio 3). (Weckend ym. 2016.)



Kuvio 3 Arvio paneelijätteen määrän kumulatiivisesta kasvusta (Weckend ym. 2016).



Kuvio 4 Paneelijätteen määrä suhteessa asennuksiin. Early-loss ylempänä ja regular-loss alempana (Weckend ym. 2016).

Molempien ennusteiden huippu tasoittuu 2050-luvun jälkeen suunnilleen samalle tasolle, mutta "early-loss" ennusteessa jätettä tulee enemmän jo aikaisemmassa vaiheessa. 2050-luvulle mentäessä paneelijätteen määrä lähentelee 90 % asennettujen paneelien määrästä (kuvio 4). Voidaan olettaa, että käytöstä poistettujen ja asennettujen paneelien määrät tasoittuvat myöhemmin tulevaisuudessa. (Weckend ym. 2016.)

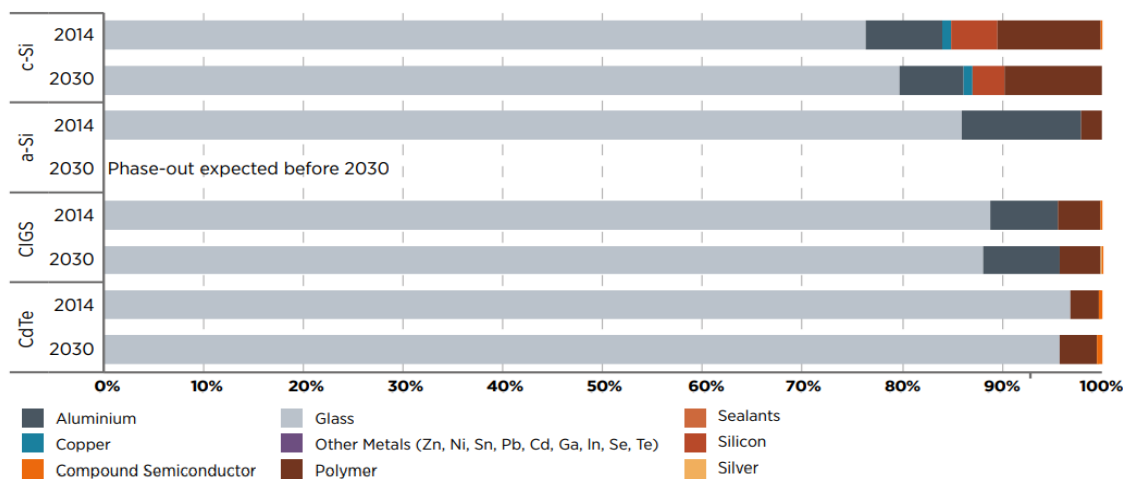
2.2.2 Eri materiaalien osuudet jätteestä

Aurinkopaneelin rakenne käsiteltiin jo aiemmin kappaleessa 2.1, mutta kierrätyksen kannattavuuden ja prosessien kannalta on tärkeää tietää kuinka paljon mitäkin materiaalia paneelista irtoaa. Tavanomaisen 60 kennoisen piikidepaneelin paino on noin 18–20 kg ja paino muodostuu (Wambach ym. 2009):

- 76 % lasista (paneelin pinta)
- 10 % muoveista (eva- ja taustakalvot)
- 8 % alumiinista (kehys ja johtimet)
- 5 % piistä (kennot)
- 1 % kuparista (johtimet)
- alle 0,1 % hopeaa, tinaa ja lyijyä (kennon virranjohtimet)

Vaikka arvometallien osuus näyttää prosentteina pieneltä, on esimerkiksi hopeaa noin 600 grammaa tonnissa paneelijätettä. Se on jo hyvin lähellä kannattavaa hopean louhinnan määritelmää, jossa hopeaa tulee olla 700 g tonnissa maata (Dias ym. 2016). On ennustettu, että paneelituotanto vaatii 2050 mennessä jopa 10 % kaikesta maailman hopeasta, mikäli hopean käyttö ei laskisi (Nevala ym. 2019). Hopean hinta on kovassa nousussa ja onkin keväällä 2021 jo noin 700 € / kilo (K.A Rasmussen). Kuparikin on suhteellisen arvokasta ja sille on kova kysyntä. Tonnista paneelijätettä saadaan noin kilo kuparia. (Wambach ym. 2009). Kuparin hinta on yli 4 € / kg. (Aurek Oy 2021).

Lasi-lasi paneelissa materiaalien osuudet ovat tietysti erilaiset, sillä kehyksiä ei tarvita ja lasia on yhteensä enemmän kuin yhden lasin paneelissa. Muovien ja lasin osuuden odotetaan kasvavan tulevaisuudessa kennojen kehityksen seurauksena (kuvio 5). Hopean ja muiden arvometallien osuutta pyritään pienentämään nousevien hintojen vuoksi. (Weckend ym. 2016.)



Kuvio 5 Materiaalien suhteellisten osuuksien kehityssennuste 2030-luvulle (Weckend ym. 2016).

2.3 Lainsäädäntö

Aurinkopaneeli luetaan EU:ssa ja maailmalla elektroniikkajätteeseen. Elektroniikkajätteen kierrätyskustannuksista vastaa yleensä vaihtelevin osuuksin yhteiskunta, kuluttaja ja tuottaja. Suomessa elektroniikkajätteiden keräystä rahoitetaan tuottajayhteisöjen keräämillä maksuilla (SER-kierrätys 2021). Elektroniikkajäte on hankala kierrätettävä, mutta siitä huolimatta sen luovuttamisen on oltava maksutonta, jotta romu päätyy varmemmin viralliseen keräykseen. Kuluttajien ja yritysten vastuulla on viedä romu asiallisesti kierrätettäväksi. Maailmalla on myös valtioita, joissa kierrätyskustannukset lankeavat kokonaan kuluttajalle. Tämä johtaa usein asiallisen kierrättämisen laiminlyöntiin. (Weckend ym. 2016.) Valmistajan olisi mahdollista sisällyttää kierrätyksen hinta tuotteisiinsa, jolloin heidän olisi taloudellisesti kannattavampaa hoitaa kierrättäminen itse. Ilman tasavertaistavia lakeja kierrätysmaksun lisääminen tuotteen hintaan saattaa kuitenkin ohjata kuluttajan kilpailijalle, joka ei kierrätysmaksua peri.

Elektroniikkalaitteen tuottajalla on Suomessa ja EU:ssa velvollisuus ottaa vastaan elektroniikkajätettä ja saattaa se asiallisesti elektroniikkajätekeräykseen tai kierrättää se itse. Kyseessä on tuottajavastuu. Sähkö- tai elektroniikkalaitteen tuottaja on valmistaja, maahantuoja tai myyjä, joka myy laitteita omalla tuotemerkillään. Tuottajan on kierrätyksen järjestämisen lisäksi liityttävä joko Pirkanmaan ELY-keskuksen tuottajarekisteriin tai

tuottajayhteisöön. ELY-keskukselle on raportoitava myydyt, kerätyt ja kierrätetyt tuotteet. Tämän lisäksi on raportoitava, miten paljon eri materiaaleja on saatu talteen kierrätysprosessissa. (Ympäristöhallinto 2019.)

Tuottajan velvollisuudet ovat niin suuret, että usein yrityksen kannattaakin liittyä tuottajayhteisöön, jonka useampi alan tuottaja on perustanut. Tuottajayhteisölle voidaan ulkoistaa tuottajavastuun alaiset tehtävät. Tuottajayhteisö on liittynyt tuottajarekisteriin ja hoitaa tuottajien puolesta kommunikoinnin ELY-keskuksen kanssa. (Ympäristöhallinto 2019.) Kierrättämiselle on tehty luokat, jotka määrittelevät karkeasti miten suuri osuus tuotteen materiaaleista tulisi kierrättää. Aurinkopaneeli kuuluu kierrätysluokkaan 4. Luokan 4 romusta on hyödynnettävä 85 % ja valmistettava uusiokäyttöä/kierrättämistä varten 70 % materiaaleista. (Valtioneuvoston asetus sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta 2014/519. 2014.)

2.3.1 Euroopan WEEE-direktiivi

Elektroniikkajätteen määrä on räjähtänyt EU-alueella 2000-luvulla. WEEE- direktiivi laadittiin yhtenäistämään jäsenmaiden välisiä jätelakeja. Ilman yhteistä linjausta, olisi tuotanto ja jätevirrat väistämättä valuneet maihin, joissa on löysimmät vaatimukset jätteiden käsittelylle. WEEE-direktiivi toimii pohjana suomalaisellekin jätelaille. Direktiivillä on maailmanlaajuisia vaikutuksia, sillä jokainen elektroniikkalaitteiden tuottaja, joka mieli myydä tuotteitaan EU-alueella, on tasavertaisesti vastuussa jätteiden kierrätyksestä. Vuonna 2012 jätedirektiiviä uudistettiin niin, että se sisältää erikseen maininnat aurinkopaneeleista. Jokaisen jäsenvaltion on siten otettava paneelijäte huomioon. (Weckend ym. 2016.)

Suomen jätelaki vastaa hyvin lähelle WEEE-direktiiviä elektroniikkajätteen osalta. Se muun muassa määrää tuottajan liittymään tuottajayhteisöön tai kierrättämään jätteet itse. Jos tuottajayhteisöön ei liity, on raportoitava suoraan kunkin maan ELY-keskusta vastaavalle taholle (Weckend ym. 2016). Tuottajilla on myös vastuu merkitä tuotteisiinsa WEEE-direktiivin mukaiset tiedot. Paneeleissa on luettava, että ne on vietävä kierrätyspisteeseen, eikä paneelia saa laittaa muun jätteen sekaan. Tekstin on myös kerrottava, ettei kierrätyspisteeseen jättäminen maksa mitään. (European Parliament 2008.) Paneelivalmistajan on lisäksi informoitava kierrättävää tahoa oikeasta tavasta käsitellä

paneeleita kuljetuksessa, säilytyksessä ja kierrätysprosessissa. Tämä siksi, että paneelit saattavat sisältää myrkyllisiä aineita, kuten lyijyä. Lisäksi väärin käsiteltynä paneelista voi saada sähköiskun. (Weckend ym. 2016.)

EU:n tavoitteena on säätää kierrättämistä niin, että arvokkaat materiaalit päätyvät mahdollisimman usein uudelleen hyötykäyttöön. Esimerkiksi haitalliset aineet on kerättävä pois kierrosta. Harvinaisemmat raaka-aineet tulisi saada mahdollisimman puhtaina talteen, jotta niitä voitaisiin käyttää sellaisenaan uusiin laitteisiin. Lasi, pii ja muovi olisi myös syytä saada takaisin uusiokäyttöön. Linjauksella on merkitystä, sillä esimerkiksi elektroniikkamurskeen käyttäminen tien pohjaksikin voidaan laskea kierrätykseksi. Tien pohjana materiaalit eivät kuitenkaan päädy takaisin uusiin paneeleihin tai laitteisiin, jolloin uutta materiaalia joudutaan louhimaan yhtä paljon kuin ennenkin. Maan täytön tulisi olla viimeinen keino kierrätyksessä. (Weckend ym. 2016.)

Lainsäädännöllä on mahdollista kiihdyttää kierrättämisen suosiota. Valitettavasti lainsäädännön on vaikea kuitenkin tarjota yrityksille porkkanaa, joten suostuttelu tapahtuu useimmiten kepin muodossa, esimerkiksi kaatopaikkamaksuja nostamalla ja tuottajavollisuuksia kiristämällä.

2.3.2 RoHS-direktiivi

RoHS-lainsäädännön tehtävänä on rajoittaa vaarallisten aineiden käyttöä sähkö- ja elektroniikkalaitteissa. Tavoitteena on suojella ihmistä ja ympäristöä vähentämällä jätteiden haitallisuutta. RoHSia sovelletaan kaikkiin sähkö- ja elektroniikkalaitteisiin. RoHS rajoittaa muun muassa kadmiumin, lyijyn, elohopean kromin ja useiden muovin pehmentimien käyttöä. Laite saa sisältää enintään 0,01 p-% kadmiumia ja 0,1 p-% muita rajoitettuja aineita. Rajoitettujen aineiden käyttöön on annettu poikkeuksia tilanteissa, joissa korvaavia aineita ei tieteellisistä tai teknisistä syistä ole saatavilla. On valmistajan vastuulla selvittää vaatimukset ja tarkastettava, että laite täyttää ne. (Tukes 2021.)

Aurinkopaneeli sisältää lyijyä alle 0,1 p-%, mutta sillä on silti vapautus RoHS-lainsäädännöstä lyijyn osalta. Lyijyä käytetään kennojen juotoksissa. Lyijyn avulla juotoksen lämpötila saadaan pidettyä alempana. Väitetään, että korkeammalla lämpötilalla juottaminen vahingoittaisi kennoja. (Fuhs 2019.)

3 KIERRÄTYSMENETELMÄT

Kierrätysmenetelmien kehittäminen ei ole tähän mennessä ollut kovinkaan korkealla yritysten asialistalla vähäisen jätemäärän takia. Kehitystyö vie kuitenkin paljon aikaa, ja jätemäärät ovat vasta alkamassa kasvaa. IEA-PVPS (International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme) on tehnyt selvitystä paneelijätteen kierrätysmenetelmiin liittyvistä patenteista. Patenttien määrästä voidaan hieman päätellä, kuinka paljon kierrätykseen liittyvää kehitystyötä tehdään. Selvitys julkaistiin vuonna 2018. Vuosilta 1976–2016 löytyi 178 paneelijätteeseen liittyvää patenttia, joista suurin osa on peräisin Kiinasta. (Komoto ym. 2018) On yllättävää, että paneelijätteen kierrättämistä tutkitaan eniten Kiinassa, sillä Kiinassa ei vielä toistaiseksi ole lakisääteisiä velvoitteita paneelijätteen käsittelyyn liittyen. (Weckend ym. 2016.)

Merkittävin osa patenteista koskee EVA-kalvon tai piimateriaalin erottelua. EVA-kalvo tuottaa eniten haasteita, sillä se sulatetaan muiden komponenttien ympärille valmistusvaiheessa. Sen poistaminen on siis ensiarvoisen tärkeää muiden materiaalien talteenottoa ajatellen. (Komoto ym. 2018.) Patenttidatasta selviää, että yritykset suosivat materiaalien erottelua niin, että ne pysyvät mahdollisimman puhtaina. Puhdas materiaali on helpompi myydä eteenpäin, jolloin toiminnasta tulee kannattavampaa.

Jotta aurinkopaneeliteollisuuden ympäristövaikutuksia pystytään laskemaan entisestään, on jatkuvasti kehitettävä kolmea peruseriaatetta. Vähennä, käytä uudelleen ja kierrätä. Aurinkopaneeleissa käytetään raaka-aineita, joiden louhiminen kuormittaa ympäristöä. Pyrkimys esimerkiksi hopean käytön vähentämiseen on tärkeää. Onkin ennustettu, että paneelien materiaaleista lasin osuus kasvaa muiden osuuksien pienentymisen seurauksena. Lasi on helposti kierrätettävissä, joten sen suhteellisen osuuden kasvu ei ole ongelma. (Wambach ym. 2009.)

3.1 Hajonneen paneelin korjaus

Jätelaki ohjaa kierrättämistä etusijaperiaatteella. Etusijaperiaatteen mukaan jätteen tuottamisen vähentämisen jälkeen tärkeimpänä kierrätyskeinona on uudelleenkäyttö. Laitteita tulee käyttää niin kauan, kun se on vielä järkevää. Lain mukaan etusijajärjestyksen voi ohittaa vain tilanteessa, jossa toinen kierrätysmenetelmä on kokonaisuudessaan ympäristöstävällisempi. Etusijajärjestystä noudatettaessa otetaan kuitenkin huomioon

myös tekniset ja taloudelliset edellytykset. (Ympäristöministeriö 2021.) Esimerkiksi aurinkopaneeleilta ei voida vielä vaatia 100 % materiaalien kierrätysastetta teknisten ja taloudellisten haasteiden vuoksi.

Aurinkopaneelien uudelleenkäyttö tarkoittaa käytettyjen paneelien asentamista kohteisiin, joihin alemman hyötysuhteen paneelit vielä kelpaavat. Paneelien second hand -markkinat ovat vasta avautumassa. Suurien aurinkovoimaloiden paneeleja vaihdetaan usein heti, kun ne ovat tuottaneet tavoitellun liikevaihdon. Uudet paneelit saavuttavat tavoitteet entistä nopeammin, tai tavoitteita voidaan nostaa. Yhdestäkin aurinkovoimalasta voi riittää paneeleja kymmeneen, ellei satoihin pienasennuksiin. Käytetyn paneelin hinta voi olla noin puolet uuden paneelin hinnasta, jolloin kysyntää riittää aina. Alle kymmenvuotiaiden paneelien hyötysuhde on edelleen korkea, joten asentaminen on järkevää. Kysyntää löytyy etenkin kehittyvistä maista, kuten Lähi-idän, Afrikan ja latinalaisen Amerikan maista. Kehittyvissä maissa ei välttämättä ole sähköverkkoa kaikkialla, joten aurinkopaneeleja kaivataan esimerkiksi maataloille. (Schmid 2021.)

Jotta paneeli voidaan myydä eteenpäin, on sen oltava myyntikunnossa. Paneeleista suurin osa poistetaan käytöstä taloudellisista syistä, eikä niinkään siksi, että kaikki aurinkovoimalan paneelit olisivat hajonneet samanaikaisesti. Käytöstä poistetut paneelit ovat kuitenkin pääasiassa vanhoja, jolloin ne ovat väkisinikin altistuneet UV-säteilylle ja muille luonnon olosuhteille. Paneelit hajoavat usein taustakalvostaan. Taustakalvon vaurion voi aiheuttaa esimerkiksi kumentunut kenno, uv-säteily tai ympäröivät olosuhteet. Ajan kuluessa taustakalvo hapertuu, halkeilee tai kalkkiutuu (kuva 8). Itse taustakalvon hajoaminen ei vielä sellaisenaan johda paneelin toimimattomuuteen, mutta silloin kosteus ja happi pääsevät aiheuttamaan korroosiota metallisiin johtimiin. Korroosio aiheuttaa aluksi suuremman paneelinsisäisen vastuksen eli heikomman tehon. Myöhemmin johtimet voivat katketa korroosion seurauksena. (Eder ym. 2019.)



Kuva 8 Eri tavoin vaurioituneita taustakalvoja (Eder ym. 2019).

Vanhallekin paneelille tulee voida antaa jonkinlainen takuu sitä myydessä. Paneelin ikää kasvattaisi huomattavasti taustakalvon uusiminen. Taustakalvo voidaan uusia tilanteissa, joissa johtimet eivät ole palaneet eva-kalvon ja taustakalvon läpi. Jos taustakalvo on vain hapertunut ja halkeillut, voidaan se päällystää uudelleen. Korjausprosessi alkaa taustan puhdistamisella, jonka jälkeen halkeamat voidaan täyttää ohuella, vettä hylkivällä aineella. Halkeamien täytön jälkeen pintaan voidaan levittää vahva, säätä kestävä liima. Liiman päälle asetetaan uusi taustakalvo, joka pitää vettä ja toimii sähköeristeenä. (Eder ym. 2019.)

Paneeleja voidaan korjata myös kentällä, jolloin erillisen liiman sijaan on helpompaa käyttää liimapintaista taustakalvoa. Korjaustoimenpide tulee kuitenkin todennäköisemmin kyseeseen, kun koko voimalaitos on purettu. Taustakalvon korjaus ja uusiminen on helppo, nopea ja halpa toimenpide silloin, kun tarkoituksena on myydä käytettyjä paneeleja takuun alaisina uuteen käyttökohteeseen. Korjaukset ovat kuitenkin aina yksilöllisiä, joten korjattujen sähkölaitteiden on läpäistävä sarja testejä ennen käyttöä. (Eder ym. 2019.)

3.2 Ehjän lasin talteenotto

Paneelin uusiokäytöstä ja korjaamisesta seuraava vaihtoehto on kierrättää se materiaaleina. Lasin talteenotto on tällä hetkellä helpoin ratkaisu. Monet suunnitteilla olevista kierrätysmenetelmistä vaativat paljon energiaa tai kemikaaleja ja aiheuttavat siten paljon rasitusta ympäristölle. Tällä hetkellä maailmalla etsitäänkin mahdollisimman hyvää kompromissia materiaalien talteenottotehokkuuden, kierrätyksen hinnan ja ympäristövaikutusten välille. Käynnissä on kymmeniä, ellei satoja tutkimuksia erilaisista aurinkopaneelien kierrätysmenetelmistä, joten tässä työssä ei voida käsitellä niitä kaikkia. Esiteltävänä on tällä hetkellä lupaavimpia menetelmiä.

Kierrätysprosessi alkaa perinteisen piikidekennon tapauksessa aina johtorasian ja alumiinikehysten irrottamisella. Kehys on rakennettu niin, ettei sitä saa irti rikkomatta sen rakennetta (Kuva 9). Kehys saadaan irrotettua esimerkiksi hydrauliiikan avulla, hydrauliset kynnet painavat kehukset väkisin irti paneelistä. Kun paine jakautuu tasaisesti joka puolelle kehystä, on se mahdollista saada irti rikkomatta lasia. Irrotuksen jälkeen kehys on melko puhdas, liimajäämiä lukuun ottamatta, joten se voidaan myydä suoraan alumiinia kierrättävälle taholle. Alumiinijätteen kierrättäminen on helppoa ja arkipäivää kaikkialla maailmassa. (Komoto ym. 2018)



Kuva 9 Lukittuvan kiinnitysmekanismin takia Salo Techin käyttämiä kehyksiä ei saa rikkomatta irti

Kehyksen irrottamisen jälkeen tulee kysymykseen, mitä paneelista halutaan ensisijaisesti kerätä talteen, lasi, pii, muovit vai arvometallit? Lähes kaikki materiaali on mahdollista saada talteen, mutta sen vaatimat resurssit ovat suuret. Tällä hetkellä enemmistö kierrätyksestä kohdistuu lasiin, sillä sen massa on suurin ja kierrätyskanavat ovat jo valmiita.

Lasin valmistaminen on energiasaastainen prosessi. Lasin valmistaminen vaatii muun muassa kalkin, soodan ja piikiennojenkin raaka-aineena tutun kvartsihiekan sulattamisen (Pilkington 2021). Lasi muodostaa myös merkittävimmän osan aurinkopaneelin massasta, ja muodostaa siten noin 20–30 % paneelin valmistuskustannuksista. Lasin hinta on myös kysynnän johdosta kovassa kasvussa, joten sen kierrättäminen on jatkuvasti kiinnostavampaa. (Murtaugh ym. 2020.)

Lasi voidaan ottaa talteen joko ehjänä tai murskana. Ehjää lasia tavoiteltaessa pii- ja suojamuovikerrokset voidaan raaputtaa lasin pinnasta irti, jolloin saadaan puhdasta lasia. Toho Kasei on kehittänyt menetelmää, jossa raaputetaan ensin taustakalvo muusta paneelista, jotta se voidaan käsitellä suoraan muovijätteenä. Taustakalvon poiston jälkeen kaavitaan kapselointikalvo piikennoineen irti lasista. Lasi jää tällöin virheettömäksi. Toho Kasein menetelmässä piikennot sisältävästä paketista sulatetaan kemiallisesti muovit pois. (Komoto ym. 2018.)

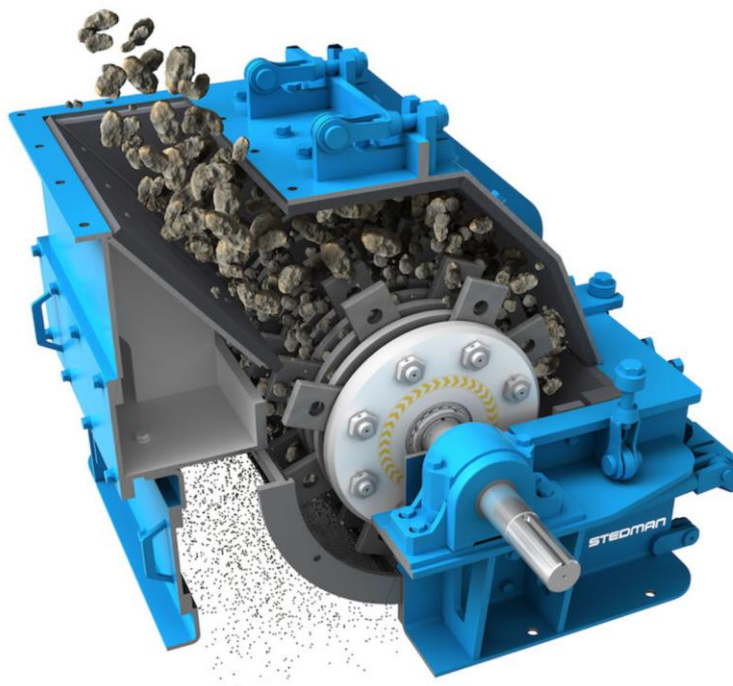
Mitsubishi Materials Corporation on kehittänyt päinvastaista menetelmää, jossa lasi rouhitetaan paneelin pintapuolelta. Lasi rouhitetaan melkein kapselointimuoviin asti. Menetelmällä saadaan talteen puhdasta lasimurskaa, joka voidaan suoraan hyödyntää lasituotannossa. Laminoidun paketin pintaan jää pieni määrä lasia. Loppumateriaali voidaan käsitellä metallinjalostuslaitoksella, jossa tavoitellaan mm. hopean talteenottoa. Lasin rouhintakone pystyy tällä hetkellä käsittelemään yhden paneelin minuutissa. (Komoto ym. 2018.)

Hamada Corporation on yhdessä NPC:n kanssa kehittänyt menetelmää, jossa lasi voidaan leikata irti muusta materiaalista, käyttäen kuumaa terää. Kehysten irrotuksen jälkeen kuuma terä kohdennetaan lasin ja muovikalvon väliin. Terä on suunnattu niin, ettei se vahingoita lasia. Muovikerrokset voidaan tämän jälkeen sulattaa kennoista kemiallisesti tai kuumentamalla. Liuottamalla irrotettu muoviliuos voidaan käyttää esimerkiksi polttoaineena. Paneelit ovat standardikokoisia, joten ehjänä irrotettua lasia voitaisiin käyttää uudessa paneelissa. (Komoto ym. 2018.)

3.3 Paneelin mekaaninen murskaus

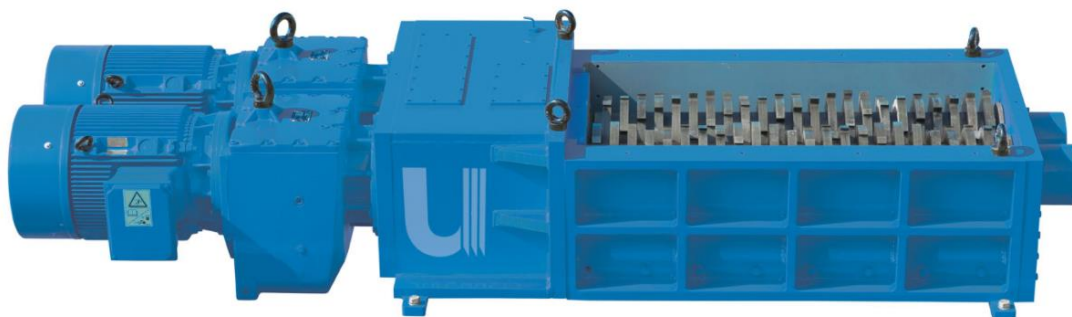
Lasin irrottaminen ehjänä ei kuitenkaan ole ajallisesti tai taloudellisesti kannattavaa, joten useimmissa tapauksissa paneelin kierrättämisessä keskitytään tehokkuuteen. Paneeli voidaan murskata pieneksi muruksi, josta saadaan eroteltua eri materiaalit. Murskaamisella voidaan päästä EU:n tavoitteisiin kierrättää 85 % paneelijätteen massasta raaka-aineena. (Granata ym. 2014.)

Ensin paneelistä irrotetaan jälleen kehykset. Tämän jälkeen paneeli murskataan. Murskaimen koosta riippuen paneeli leikataan sopivan kokoisiksi paloiksi, jonka jälkeen siitä voidaan jyrsiä taustamuovi pois, tai se voidaan syöttää sellaisenaan murskaimeen. Murska voidaan tuottaa joko terä/rengasmurskaimella (kuva 11) tai vasaramyllyllä (kuva 10). Hieno muru voidaan sen jälkeen lajitella erikokoisiksi jakeiksi seulomalla. Muun muassa Rooman Sapienزان yliopisto on tutkinut murskausmenetelmiä ja niin saavutettavaa materiaalin talteenottoa. Tutkimuksessa kokeiltiin paneelin murskaamista sekä rengasmurskaimella että vasaramyllyllä. Parhaat tulokset saatiin murskaamalla paneeli ensin rengasmurskaimella, sitten vasaramyllyllä ja tämän jälkeen lämpökäsittelmällä murska. (Granata ym. 2014.)



Kuva 10 Havainnekuva vasaramyllyn toiminnasta (Stedman Machine Company 2019).

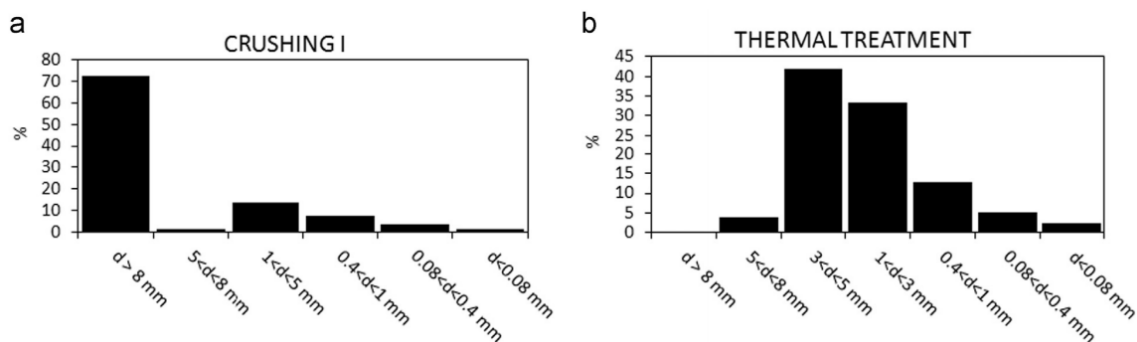
Vasaramyllyn toiminta perustuu teräsrumpuun ja nopeasti pyöriviin vasaroihin. Vasara iskee kappaleet teräsrumpua vasten, jolloin ne joko hajoavat ja tulevat halutun tiheästä sihdistä läpi tai päätyvät uudelle kierrokselle. Sihdin silmäkoko on valittavissa ja siten myös haluttu raekoko murskalle. (Saintytec 2021.)



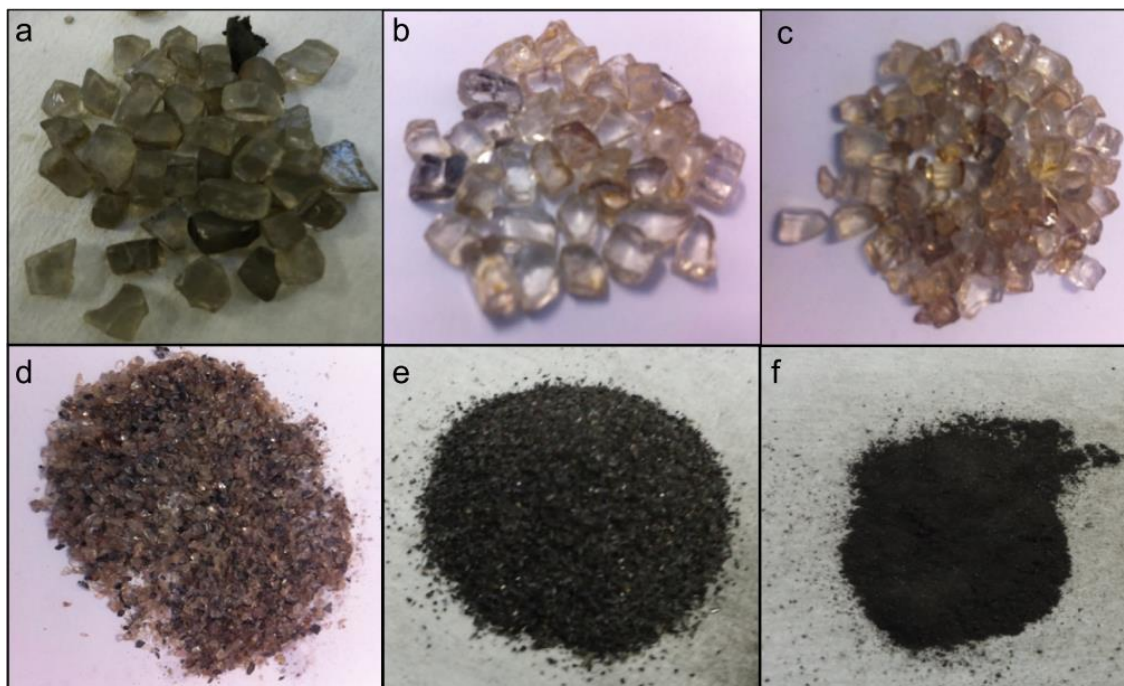
Kuva 11 Terä/rengasmurskain (Ulster Shredders).

Kaksiroottorisessa terä/rengasmurskaimessa (kuva 11) on kaksi hitaasti pyörivää teräpakkaa. Terät on aseteltu lomittain niin, että ne mahtuvat juuri ja juuri pyörimään koskettamatta toisiaan. Terät pakottavat kappaleen pakkojen välistä. Terät ovat erittäin lujia. (Vimelco 2019.)

Kuviossa 6 on nähtävissä, kuinka rengasmurskaimen jäljiltä suurin osa murskasta on yli 8 mm halkaisijaltaan. Se sisältää pääasiassa lasia ja eva-kalvoa. Kuvion 6 b- kohdassa sama murska on kokenut lämpökäsittelyn 650 asteessa, jolloin eva-kalvo on palanut pois. Eva-kalvon poltto hävitti suurimman osan isoista muruista. Poltto hävitti myös noin 10 % murskan massasta savukaasuiksi. Jäljelle jäi lähinnä puhdasta lasia ja pienempää murua, joka sisältää metalleja ja piitä (kuva 12). (Granata ym. 2014.)

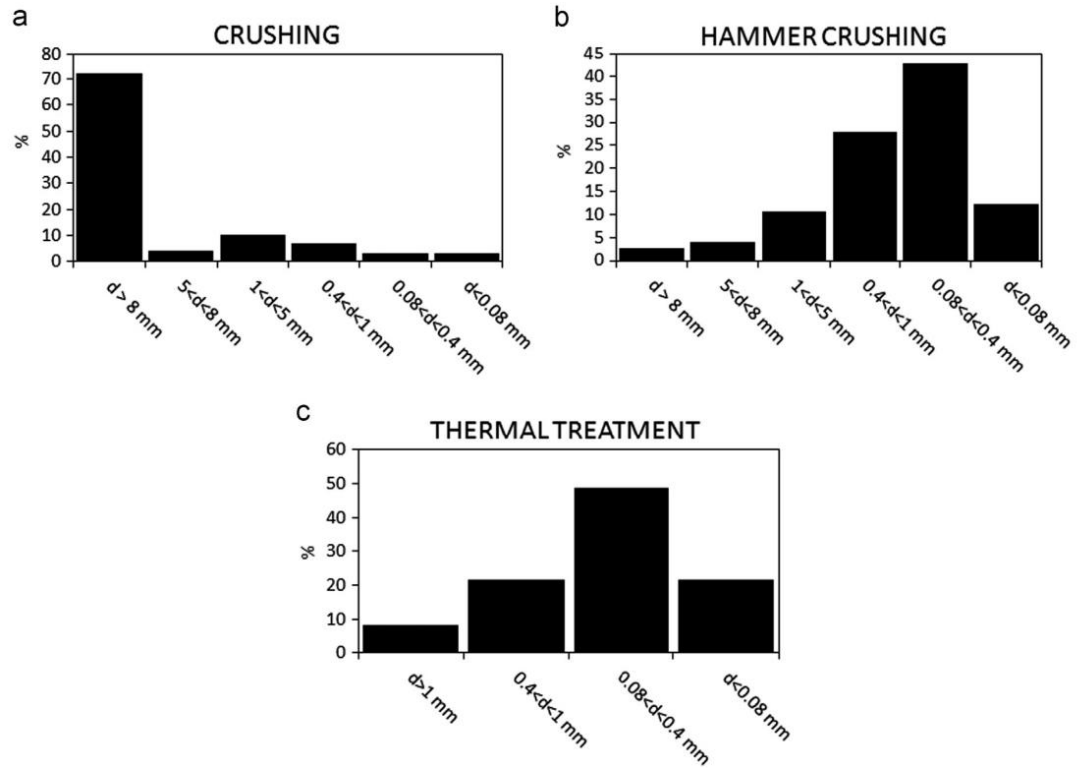


Kuvio 6 Murskan kokojakauma terä- ja lämpökäsittelyiden jälkeen (Granata ym. 2014).

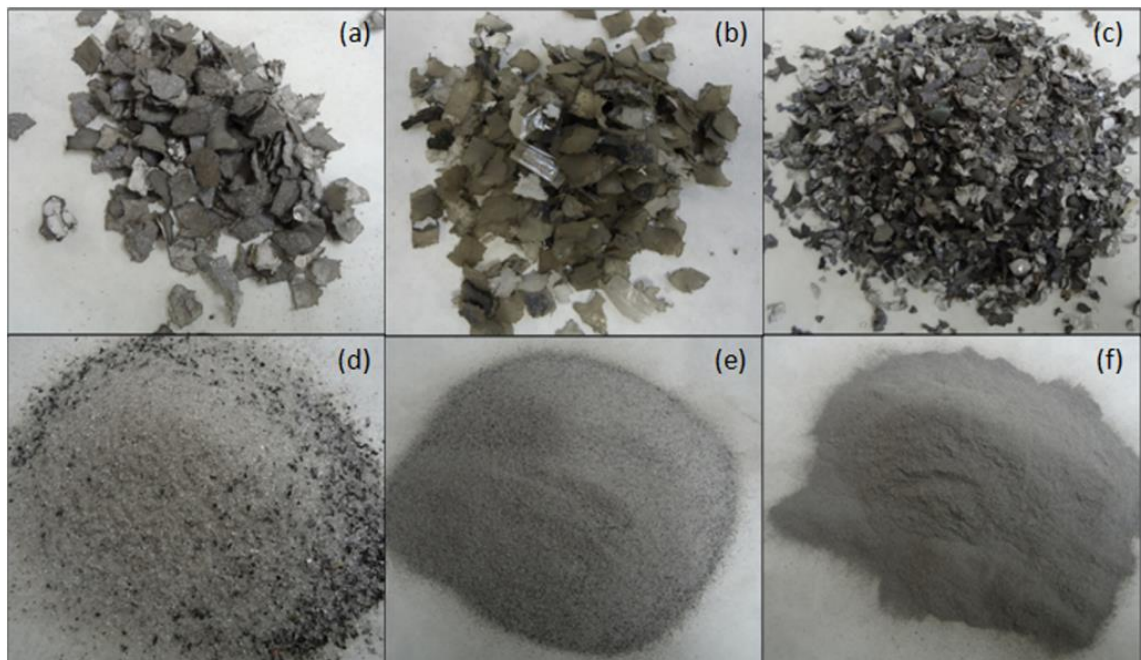


Kuva 12 Monikidepaneelimurskaa terä- ja lämpökäsittelyn jälkeen. a) *alle 8 mm* b) *5-8 mm* c) *1-5 mm* d) *0,4-1 mm* e) *0,08-0,4 mm* f) *alle 0,08 mm* (Granata ym. 2014).

Vasaramenetelmän käyttäminen terän jälkeen pienentää raekokoa huomattavasti, kuten kuviosta 7 ja kuvasta 13 näkee. Yli 1 mm rakeet lämpökäsitellään vasaran jälkeen, jolloin eva-kalvon sitomat isommat rakeet hajoavat pienemmiksi. Jäljelle jää enää pääasiassa hyvin pientä murua. Analysointi paljastaa, että kaikki yli 0,08 mm rakeet voidaan lukea lasiksi. Sitä pienempi muru sisältää piitä ja metalleja. Metallit voidaan saada osittain talteen murusta hydrometallurgisin menetelmin. Piitä saadaan lopulta myös talteen, mutta sen puhtaus ei riitä uusiokäyttöön puolijohdetekniikassa. (Granata ym. 2014.)



Kuvio 7 Murskan kokojakauma terä-, vasara- ja lämpökäsittelyjen jälkeen (Granata ym. 2014).



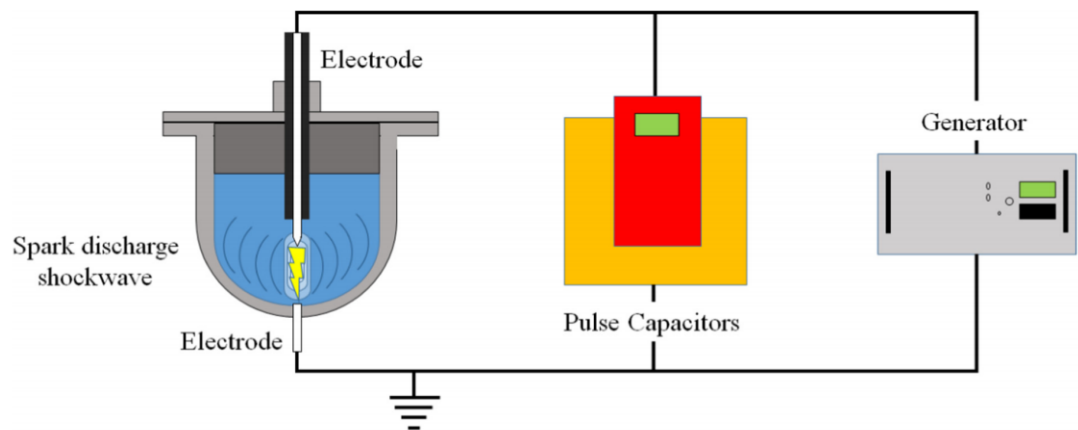
Kuva 13 Monikidepaneelimurskaa terä- ja vasarakäsittelyn jälkeen. a) *alle 8 mm* b) *5-8 mm* c) *1-5 mm* d) *0,4-1 mm* e) *0,08-0,4 mm* f) *alle 0,08 mm* (Granata ym. 2014).

Termisesti käsitelty murske on yksi tapa täyttää EU:n vaatimukset materiaalien talteenotosta. Se ei sisällä kemiallisia toimenpiteitä, ja lasi on puhtaudeltaan käypää jopa lasipulloihin tai muihin lasiesineisiin. Ilman lämpökäsittelyä lasi sopisi lähinnä lasivillaan, sillä uusiolasi ei saa sisältää yhtään polymeerejä (Granata ym. 2014). Muun muassa eurooppalainen tuottajayhteisö PV Cycle käyttää terämurskainta ja lämpökäsittelyä aurinkopaneelien kierrätyslaitoksellaan. PV Cycle on päässyt jopa 96 % kierrätysasteeseen. (PV Cycle 2021.)

Monet kierrätysyritykset kierrättävät paneelijätteen tällä hetkellä tasolasin kanssa samassa prosessissa. Kierrätyksen tavoitteena on täyttää EU:n vaatimukset, joihin lasin ja alumiinin talteenotto riittää toistaiseksi. Talteen saatu lasi on heikkolaatuisempaa kuin mitä se oli aikaisemmin, joten menetelmää kutsutaan downcyclingiksi. Muu jäännösmateriaali menee hukkaan ilman jatkokäsittelyä. (Deng ym. 2019.)

3.4 Sähköhydraulinen paineaaltohajotus (Electro-hydraulic fragmentation)

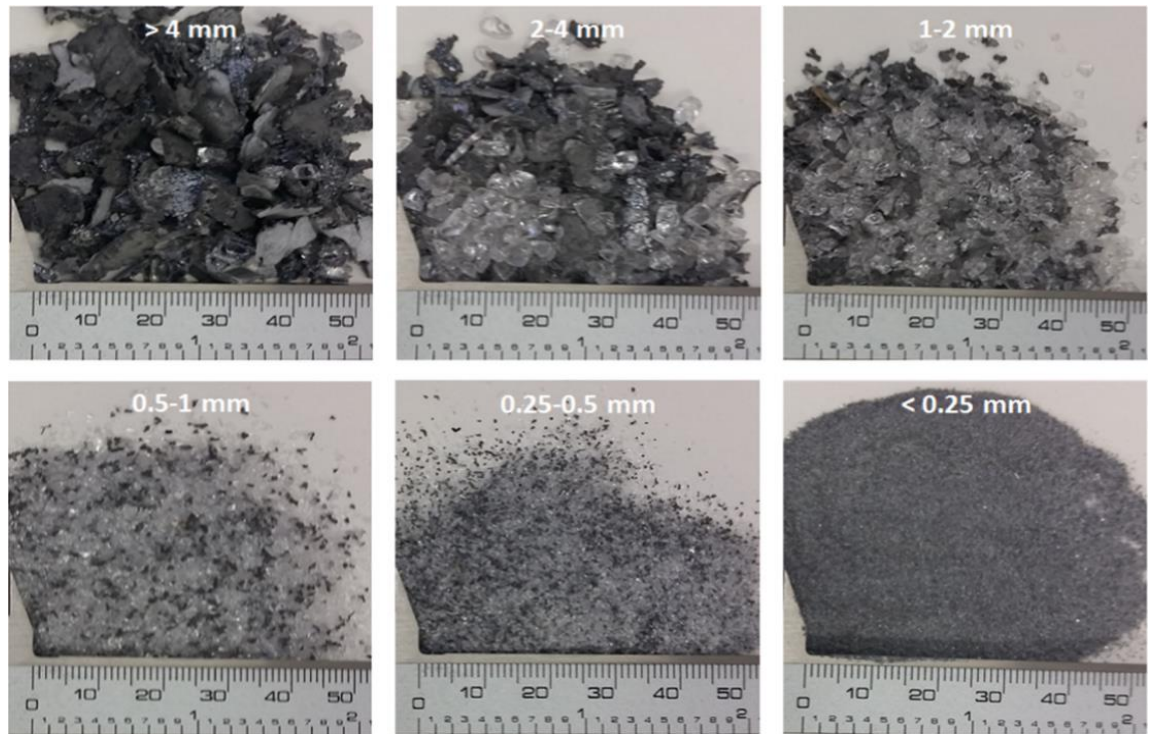
Aalto-yliopistossa on tutkittu paneelin sähköhydraulista (EHF) paineaaltohajotusta. Paineaaltohajotusta on käytetty aiemmin mm. piirilevyjen ja nestekidenäyttöjen kierrätyksessä. EHF-menetelmä tarkoittaa sitä, että kondensaattorien varaama suuri energia vapautetaan kahden veteen tai muuhun nesteeseen upotetun elektrodin välissä (kuva 14). Kipinä aiheuttaa nesteessä paineaallon, joka iskee nesteeseen upotettuun kappaleeseen. Isku hajottaa eri materiaalien välisen liitoksen, joka on yleensä kappaleen heikoin lenkki. EHF:n etuna on mm. kontaktittomuus ja pölyttömyys. Kontaktittomuus edesauttaa kappaleen hajoamista nimenomaan eri materiaalien liitoksista. (Nevala ym. 2019)



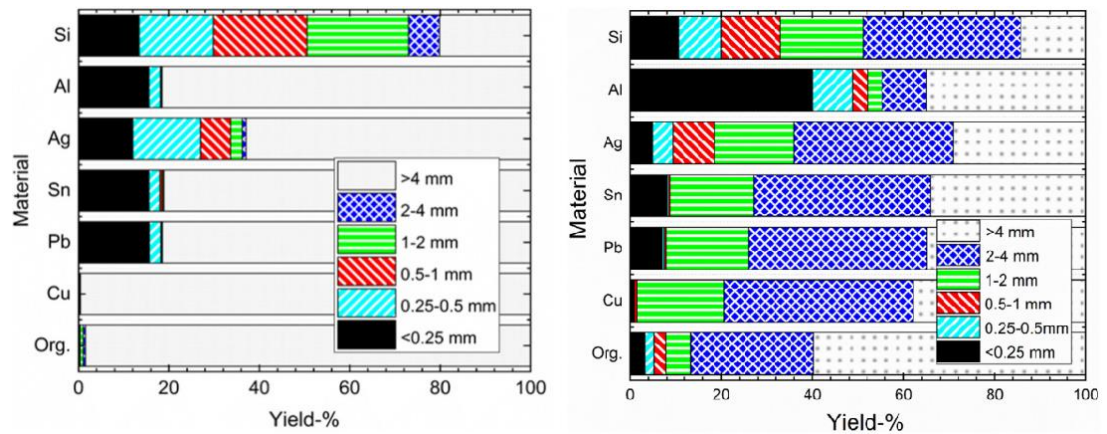
Kuva 14 Sähköhydraulisen murskaimen toimintaperiaate. (Nevala ym. 2019.)

EHF-menetelmästä saadut tutkimustulokset tukevat hypoteesia toisesta kontaktittomuuden tuomasta edusta. Eri materiaalit eivät siirry yhtä helposti raekoosta toiseen, kun ne eivät pääse kulkeutumaan vasaran tai terän mukana. Tuloksista selviää, että metallit ja orgaaniset materiaalit keskittyvät pääasiassa yli 4 mm ja alle 0,5 mm rakeisiin. Materiaalien jakauma on EHF-menetelmällä selkeämpi, kuin mekaanisella murskauksella. Metallit ja pii ovat täten helpommin eroteltavissa (kuva 15 ja 16 + kuvio 8). (Nevala ym. 2019.)

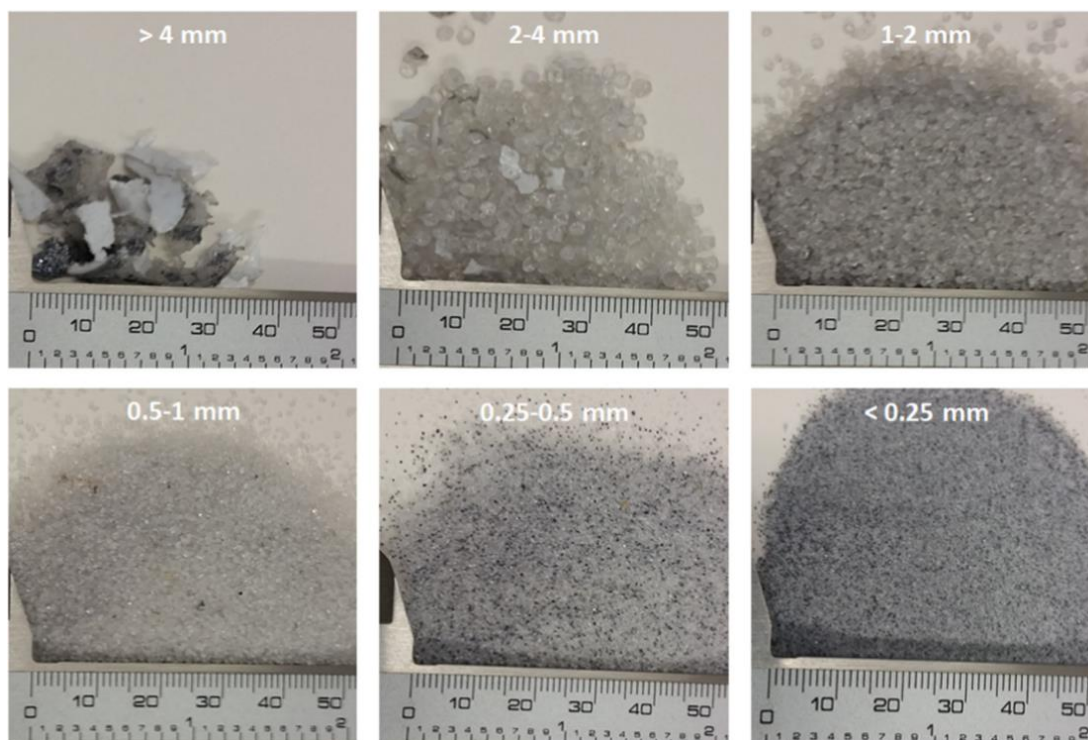
EHF-menetelmä on toistaiseksi tutkimusvaiheessa, sillä menetelmä on hitaampi kuin mekaaninen murskaus. EHF-murskaimet eivät ole tarpeeksi suuria kattamaan tulevaisuuden suurta jätemäärää. Menetelmä vaatii myös murskan kuivattamisen käsittelyn jälkeen. Murskaamisen lisäksi myös EHF-menetelmä hyötyisi huomattavasti lämpökäsittelyvaiheesta. Tutkimuksessa huomattiin eva-kalvon pysyvän erittäin tiukasti piimateriaalissa kiinni, eikä pelkkä EHF-menetelmä riitä irrottamaan kalvoa luotettavasti. Menetelmässä on kuitenkin potentiaalia ja se auttaisi keräämään suuremman osan metalleista talteen. (Nevala ym. 2019.)



Kuva 15 Kuusakosken kierrätyslaitoksen pienellä rengasmurskaimella murskattu Salo Solar Oy:n paneeli (Nevala ym. 2019).



Kuvio 8 Vasemmalla EHF-menetelmällä murskatun paneelin materiaali-jakauma, oikealla teräsmenetelmällä murskattu (Nevala ym. 2019.)



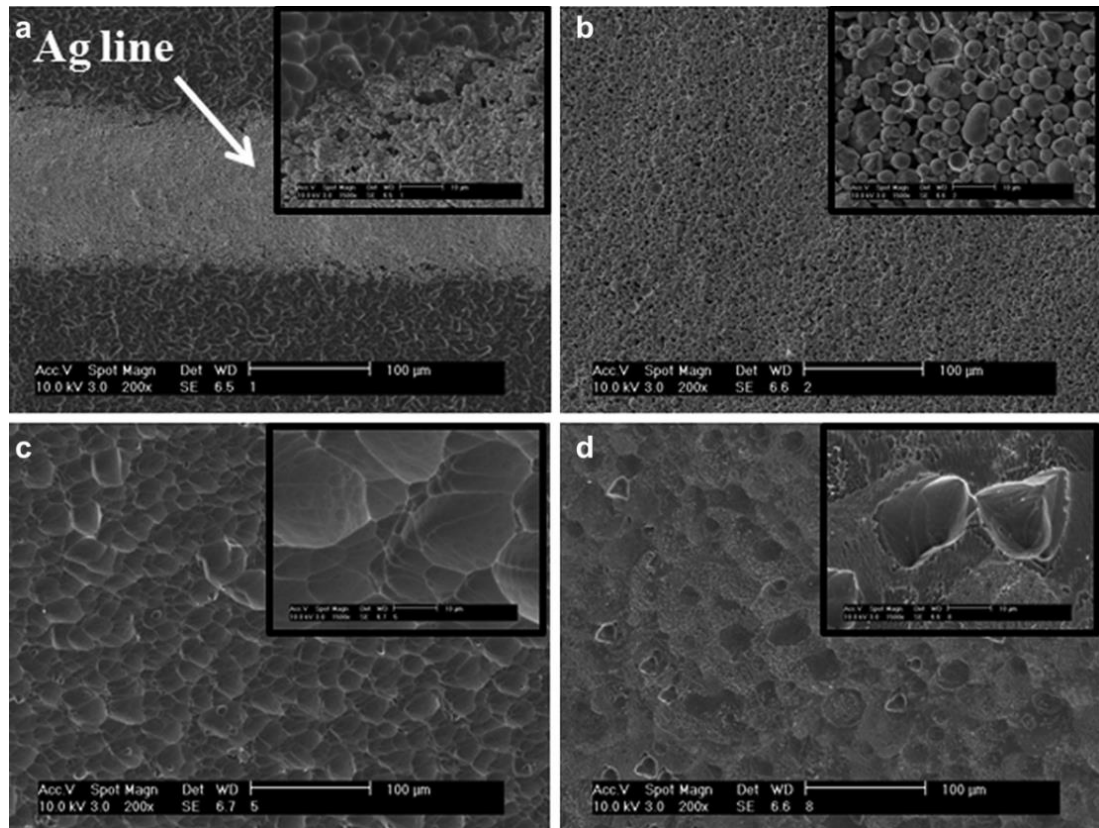
Kuva 16 Saksalaisen ImpulsTec:n EHF-laitteella murskattu Salo Solar Oy:n paneeli (Nevala ym. 2019).

3.5 Kemialliset menetelmät

Kun tarkoituksena on saada talteen mahdollisimman paljon piimateriaalia, tarvitaan kemiallisia menetelmiä. Korealainen Energy Materials Research Center tutki mahdollisuutta ottaa talteen sekä ehjää lasia että puhdasta piitä. Heidän menetelmässään kehyksistä riisuttu paneeli upotettiin 90 °C asteiseen tolueeniin kahdeksi päiväksi. Toluenei turvottaa EVA-kalvoa niin, että lasi saadaan irrotettua kennoista. Toluenei jättää EVA-kalvoa kuitenkin piikennon pintaan sen verran, että se täytyy vielä polttaa pois. Optimaalinen poltto argonkaasulla ei aiheuta hiilteymiä, ja kalvo palaa kennosta puhtaasti 650°C asteessa. Piikennon pinnassa on valon heijastumista ehkäisevä kerros, joka saadaan poistettua etsaamalla pinta kemiallisesti. Tulokseksi Energy Materials Research Center sai 99,999 % puhdasta piitä, joka siis kelpaisi sulatuksen jälkeen uuden kennon valmistamiseen. Kuvassa 17 näkyy piikennon pinnan puhdistuminen etsauksessa. Menetelmä mahdollistaisi lasin ja piin kierrättämisen, mutta jättää arvometallien keräykseen toivomisen varaa, sillä metallit liukenevat etsaukseen käytettyihin

liuoksiin. Liuoksista on mahdollista saada osa metalleista talteen, mutta se vaatii lisää kemikaaleja. (Kang ym. 2012.)

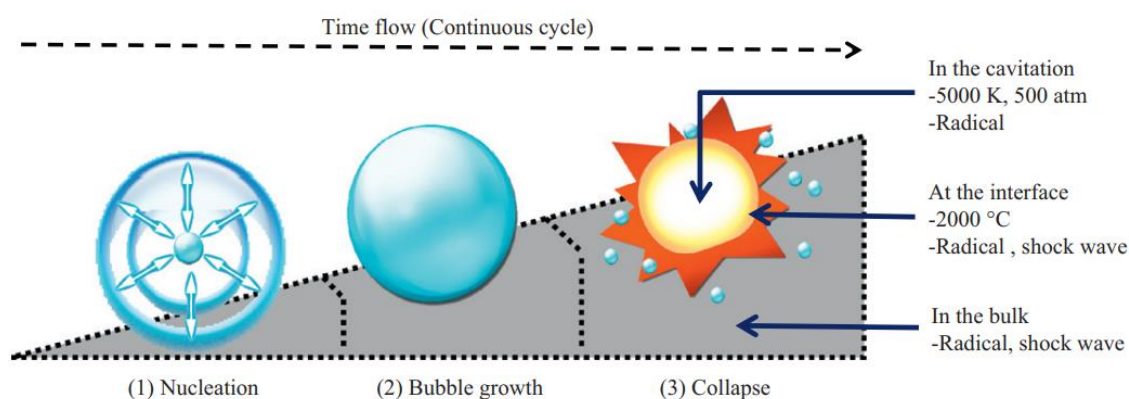
Kemiallisten menetelmien ympäristövaikutukset ovat toistaiseksi suuremmat kuin muiden menetelmien. Ympäristövaikutuksia syntyy mm. käytettyjen kemikaalien tuotannosta. Kemikaalien tuotanto vaatii jälleen muita kemikaaleja ja kuluttaa energiaa. Esimerkiksi typpihapon tuotannossa käytetyt kemikaalit ovat herkästi haihtuvia ja aiheuttavat siten ongelmia ilmakehässä. Kemikaalituotanto voi aiheuttaa paikallisia ympäristöhaittoja, kuten savukaasuja, jotka vaikuttavat lähialueen ihmisiin. Hiilidioksidi, typen oksidit ja vesihöyry ovat taas kasvihuonekaasuja. Kemikaalituotanto voi päästää myös rikkidioksidia. (Maani ym. 2020.)



Kuva 17 Mikroskoopilla kuvattu piikenno EVA-kalvon polton jälkeen. a) kennon etupuoli, jossa heijastusta vähentävä pinta ja hopeajohtimia. b) kennon takapuoli. c) etsattu etupuoli d) etsattu takapuoli (Kang ym. 2012.)

3.6 Ultraääni

Koreassa (Kangwon National University) on tutkittu myös mahdollisuutta irrottaa EVA-kalvo piikennosta hyödyntämällä ultraääntä ja orgaanista liuotinseosta. Ultraääni toimii liuottimen apuna, sillä ultraääni aiheuttaa nesteessä kavitaatiota. Kavitaatio tuottaa mikrokuplia, jotka luhistuvat ja tuottavat paikallisesti jopa tuhansien asteiden lämpötilan ja satojen baarien paineen (kuva 18). Kuplat ovat kuitenkin niin pieniä, ettei lämpötila oikeastaan välity nesteeseen. Luhistuminen aiheuttaa kuitenkin mekaanisen iskun, joka tehostaa liuottimen vaikutusta. (Kim ym. 2012.)



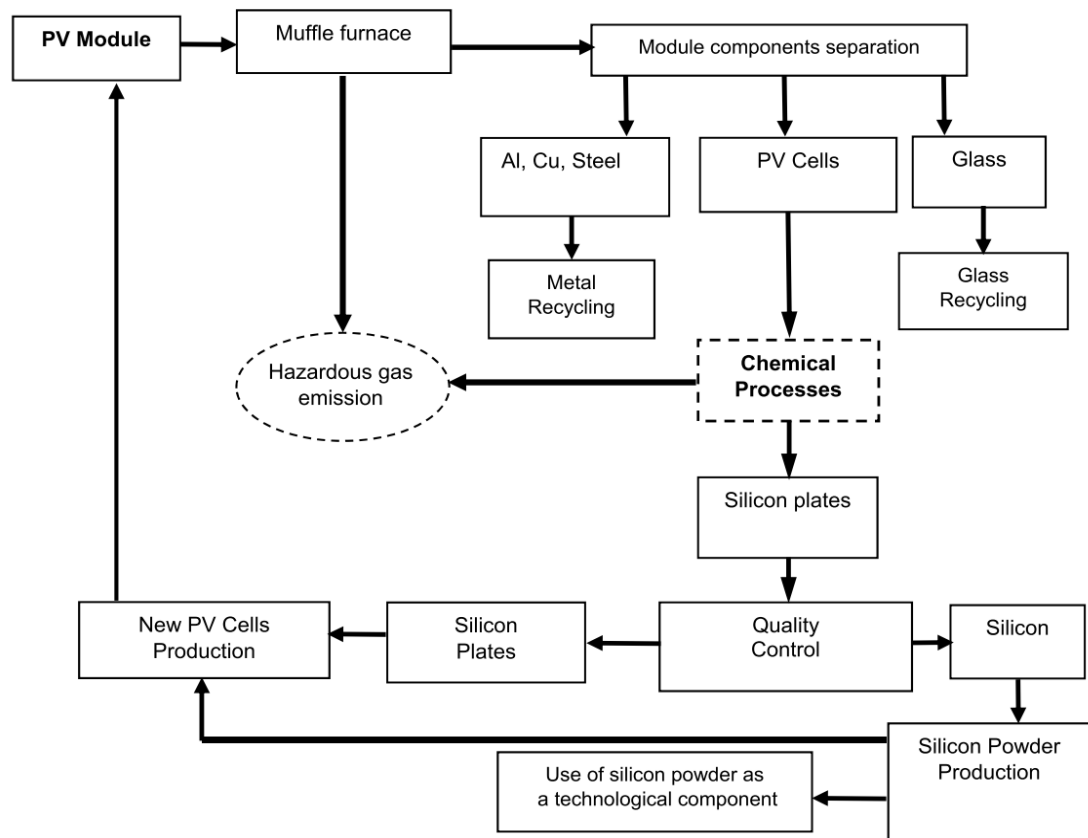
Kuva 18 Mikrokuplan elinkaari (Kim ym. 2012).

Tutkimuksen tavoitteena oli saada talteen ehjiä piikennoja, joita voitaisiin käyttää suoraan uusissa paneeleissa. Käytössä oli ultraäänilaitte, joka kykeni sekä 450 W että 900 W tehoon. Tutkimuksessa kokeiltiin useita eri liuottimia, kuten bentseeniä, diklooribentseeniä ja tolueenia. Kaikkia vaihtoehtoja kokeiltiin eri lämpötiloissa ja parhaat tulokset saatiin diklooribentseenillä, 70°C asteen lämpötilassa, 900 W teholla ja n. 30 min ajassa. Kenno säästy halkeamilta, mutta vaurioitui kuitenkin käyttökelvottomaksi. (Kim ym. 2012.)

Ultraäänen käyttö kennojen kierrättämistarkoituksessa vaatisi lisää kehitystyötä. Menetelmä vaatii erittäin myrkyllisiä liuottimia, joita tarvitsisi olla kokonaisten paneelien liuottamisessa satoja litroja. Tutkimuksessa ultraääntä kohdistettiin vain 55 x 25 x 1 mm kokoiseen kennokappaleeseen ja aikaa kului puoli tuntia. Kokonaista paneelia käsiteltäessä ultraäänilaitteen olisi oltava kymmenien kilowattien tehoinen. Menetelmä on tois-
taiseksi liian hidas suurten määrien käsittelyyn. (Kim ym. 2012.)

3.7 Piikentöjen kierrätys

Pii voidaan kierrättää joko suoraan hyödyntämällä vanhoja kennoja, tai tekemällä jauhe-
tusta piistä uusia piikiteitä. Suurin energiasäästö saadaan aikaan hyödyntämällä vanhoja
kennoja, sillä piikiteen muodostaminen vaatii jauheen sulattamisen, joka kuluttaa jälleen
paljon energiaa. Piikentö on mahdollista irrottaa paneelista ehjänä, haasteista huoli-
matta. Kennojen irrottaminen vaatii sekä lämpökäsittelyn että kemiallisen käsittelyn. Ke-
mialliseen käsittelyyn kuuluu kennon pinnassa olevien metallien ja heijastusta vähentä-
vän kerroksen poisto. Jäljelle jää pelkkää piitä. Kemiallisen käsittelyn jälkeen kennot käy-
vät laadunvalvonnan läpi. Rikkiäiset kennot päätyvät jauhatukseen ja hyväksi todetut
takaisin pintakäsiteltäväksi (kuvio 9). (Klugmann-Radziemska ym. 2020.)



Kuvio 9 Kennojen kulku jätteestä uusiutuotantoon (Klugmann-Radziemska ym. 2020).

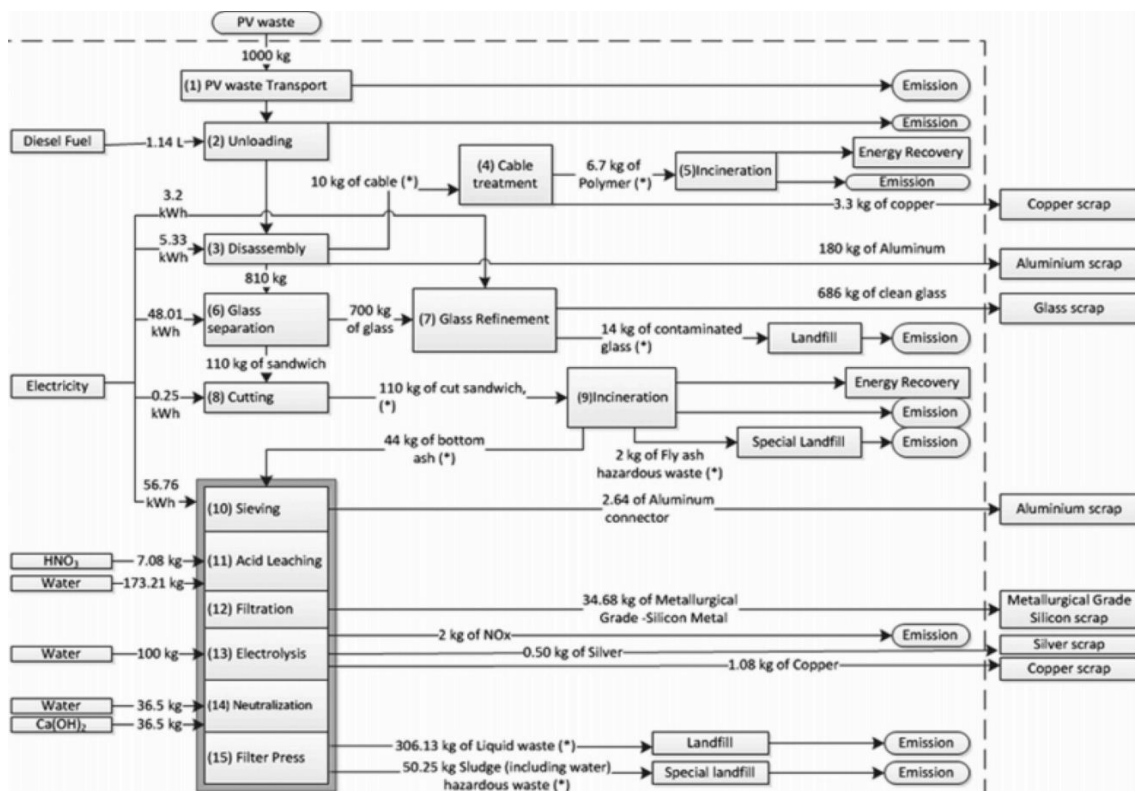
Gdanskin yliopiston tutkimuksessa saatiin jopa 85 % kennoista uusiokäyttöön, jolloin energiasäästöä tulisi laskelmien mukaan jopa 70 % uusiin raaka-aineisiin verrattuna. Kierrätettyjen kennojen hyötysuhde on n. 13–16 %. Hyötysuhde jää n. 5–9 % uusista

huippupaneeleista. (Klugmann-Radziemska ym. 2020.) Tutkimuksessa ei kuitenkaan mainita, onko kierrätetyn paneelin iällä merkitystä hyötysuhteen kannalta.

3.8 Kierrätetyn piikidekennon käyttö uudessa paneelissa

Pii on materiaalina erittäin yleinen, mutta piikennon valmistaminen vaatii runsaasti energiaa. Energiankulutuksen kannalta piin kierrättäminen olisi siis tärkeää, mutta onko kierrättämisen kokonaisvaikutukset ympäristölle alemmat kuin uuden piin tuotannossa?

Gdanskin yliopiston LCA-tutkimuksen perusteella kierrätetyn kennon uudelleen käytössä päästään 58 % alempiin ympäristövaikutuksiin verrattuna uuteen kennoon. Ympäristövaikutuksia arvioitaessa, on välttämätöntä ottaa huomioon koko tuotantoketju. Tutkimuksen pohjana on käytetty kierrättämisen osalta seuraavaa laskelmaa (kuvio 10). (Klugmann-Radziemska ym. 2020.)



Kuvio 10 Esimerkki 1000 kg paneelijätteen kierrätyksestä (Klugmann-Radziemska ym. 2020).

LCA-tutkimuksessa (taulukko 1) eri ympäristövaikutukset on muutettu samalle asteikolle niin, että vaikutukset ovat vertailukelpoisia.

Taulukko 1 Gdanskin yliopiston LCA-tutkimus yhden piikennokilon tuottamisesta uudella tai kierrätetyllä materiaalilla (Klugmann-Radziemska ym. 2020).

Impact category	c-Si cells at plant (Pt)	c-Si cells using recycled materials (Pt)
Carcinogens	0.0757	0.0636
Respiratory organics	0.00165	0.000674
Respiratory inorganics	0.66	0.339
Climate Change	0.603	0.242
Radiation	0.0016	0.00148
Ozone layer	0.000611	0.000406
Ecotoxicity	0.0226	0.0183
Acidification/ Eutrophication	0.0829	0.037
Land use	0.0421	0.03
Minerals	0.0139	0.0107
Fossil fuels	3.82	1.49
Total	5.33	2.23

Vaikka kennon talteenotto vaatii myrkyllisiä kemikaaleja, on niiden hallittu käyttö ympäristölle pienempi paha kuin uuden tuotanto (Deng ym. 2019). Kennon kierrättäminen vähentää kaikkia ympäristövaikutuksia, mutta kaikkein merkittävimmin fossiilisten polttoaineiden käyttöä (Klugmann-Radziemska ym. 2020). Maat, jotka tuottavat raaka-aineita paneeleihin, luottavat pääasiassa kokonaan fossiilisiin polttoaineisiin. Useimmat kaivokset sijaitsevat kehittyvissä maissa, joissa yritysten vastuullisuus saattaa olla kyseenalaista.

Kennon uudelleenkäyttö olisi ideaalitilanne, mutta sen toteutuminen vaatii erittäin toimivan prosessin, uutta kennoa edullisemman hinnan ja kierrätetyistä kennoista kiinnostuneita valmistajia. Valmistajan voi olla vaikea luottaa kierrätettyyn kennoon niin, että uskaltaa antaa saman takuun kuin uusille. (Deng ym. 2019.)

3.9 Kierrättämisen taloudellinen näkökulma

Piin kierrättäminen olisi ympäristön kannalta erittäin tavoiteltavaa, mutta talous määrää myös aurinkopaneeliteollisuudessa. Onko siis kannattavaa kierrättää paneeleja lainkaan? Jos on, niin millä tasolla? Australialainen *School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering* on tutkinut aurinkopaneelien kierrätystä taloudellisesta näkökulmasta.

Eri kierrätysmenetelmien kustannusarvioinnit eivät ole helppoja, sillä täydellä teholla toimivia kierrätyslaitoksia ei vielä ole olemassa. Tutkimustulokset perustuvat valistuneisiin arvauksiin ja muista tutkimuksista saatuihin lukuihin. Mekaanisella murskausmenetelmällä syntynyttä kontaminoitunutta piijauhetta ei voida suoraan käyttää elektroniikassa tai aurinkopaneeleissa, vaan se myytäisiin metalliteollisuuden käyttöön. Piitä tarvitaan muun muassa alumiinin valmistuksessa. Kemiallisella- ja lämpökäsittelyllä aikaansaadut puhtaat piikennot voidaan sen sijaan myydä takaisin aurinkopaneeliteollisuuden käyttöön. Arvokkaimpien materiaalien talteenotto vaatii huomattavasti monimutkaisempia prosesseja, joka taas nostaa kustannuksia. Lisäksi uuden paneelin hinta on niin edullinen, että kierrätyksen tulisi olla hyvin halpaa. (Deng ym. 2019.)

Elektroniikkajätteen kasaaminen kaatopaikoille on kielletty osassa maita, kuten Suomessa. Useassa maassa se on kuitenkin mahdollista. 28 EU-maan keskiarvohinta elektroniikkajätteen läjittämiselle on n. 90–130 euroa tonnilta. Maailmalla päästään kuitenkin jopa alle 10 euroon tonnilta. Halpa hinta johtaa helposti laittomaan kuljettamiseen halvimpiin maihin. (Deng ym. 2019.) Hinta on edullinen ja vaikea päihittää kierrättämällä. Kaatopaikalle läjittämisen hinnan voi kuitenkin odottaa nousevan tulevaisuudessa, kiristyvien määräysten seurauksena.

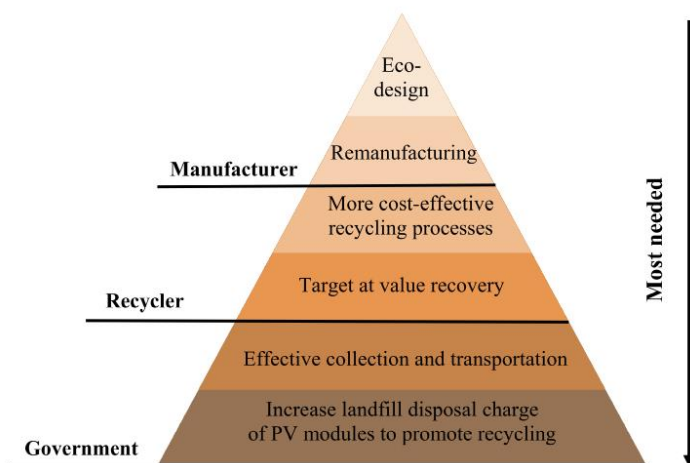
Edullisin kierrätysmuoto on ottaa lähinnä pelkkä lasi talteen. Arvioitu mediaanihinta lasin kierrätykselle on n. 330 € / tonni (taulukko2). Lasi voidaan kuitenkin myydä eteenpäin. Sekalasin myydyin lasin hinnan mediaani on n. 270 € / tonni, jolloin alijäämäksi tulisi n. 65 € / tonni. Mekaanisella kierrättämisellä saadaan suuremmat myyntitulot, mutta kustannukset lähentelevät jo 1000 € / tonni, jolloin jäätäisiin tappiolle keskimäärin jopa 230 euroa tonnilta. Huolellinen lämpökäsittelyä ja kemiallisia menetelmiä hyödyntävä kierrätys on kallein toteuttaa, eikä sen myyntituloja voida kunnolla vielä laskea puuttuvan kysynnän vuoksi. Kierrätetyn piin hintaa on vaikea arvioida toistaiseksi. Kierrätyksen tasoja on myös niin paljon, ettei yhtä lukua ole helppo antaa. (Deng ym. 2019.)

Taulukko 2 Arvioita kierrätyksen kustannuksista ja myyntivoitoista (Deng ym. 2019).

Summary of the median, 10th and 90th percentile values from 50,000 iterations.

End-of-life Scenario	Net Recycling Cost (\$/tonne)	Cost (\$/tonne)	Revenue (\$/tonne)
A: Landfill	64 (10–407)	64 (10–407)	0
B: Glass Recycling	76 (–77 to –273)	393 (279–573)	313 (234–421)
C: Mechanical Recycling	269 (51–522)	922 (748–1153)	650 (542–787)
D: Thermal Recycling	235 (–172–549)	1200 (1034–1420)	962 (742–1339)

Termistä ja mekaanista menetelmää hyödyntämällä saataisiin talteen lähes kaikki tärkeimmät raaka-aineet. Jotta lämpökäsittelymenetelmästä saataisiin yhtä kannattavaa kuin mekaanisesta menetelmästä, tarvitsisi kierrätetystä piistä saada n. 300 € tonnilta (Deng ym. 2019). Jos kierrätetyn piin laatu olisi lähelläkään uuden piin puhtautta, olisi sille varmasti oma markkinansa. Maaliskuun 2021 lopulla uuden piin hinta on kovassa nousussa, jopa 1310 eurossa tonnilta (Bernreuter Research 2021). Piin hinta kuitenkin heittelee, eikä aina ole välttämättä yhtä korkealla kuin keväällä 2021. Hinnan kilpailukykyyn vaikuttaa myös sijainti, sillä lähes kaikki piikentöjä valmistavat tehtaat sijaitsevat Kiinassa. Kierrätyksen olisi hyvä tapahtua lähellä materiaalin käyttökohdetta. Toisaalta alumiinia ja lasia voidaan kierrättää myös EU:ssa ja Suomessa. Tällöin kuljetuksen paino tippuu murto-osaan siitä, että Kiinaan vietäisiin kokonaisia paneeleja. Maailmanlaajuisesti tärkeintä olisi nostaa kaatopaikkojen hintoja paneeleille, jolloin kierrätykselle annettaisiin edes mahdollisuus (kuva 19). (Deng ym. 2019.)



Kuva 19 Tärkeimmät askeleet kohti kestävä paneelituotantoa (Deng ym. 2019).

4 YHTEENVETO KIERRÄTYSMENETELMISTÄ

Aurinkopaneelien kierrättämiseen on kehitetty useita toinen toistaan tehokkaampia tapoja, eikä kehityksen voi odottaa hidastuvan. Kaikkiin menetelmiin liittyy kuitenkin omat etunsa ja heikkoutensa. Elektroniikkajätteen läjittäminen kaatopaikoille on kielletty EU-alueella, joten sitä ei voida pitää edes vaihtoehtona. Kaatopaikkaläjittämisen hintaa käytettiin kuitenkin taloudellisen tarkastelun vertailuarvona, sillä läjittäminen on edelleen maailmalla sallittua. Läjittäminen ei myöskään vaadi erillistä kierrätyslaitosta tai järjestelmää. Taloudelliset tekijät ajavat kierrätysmenetelmienkin edistymistä. Vaivattomimmat menetelmät ovat toistaiseksi kannattavimpia, sillä jätevirrat ovat niin pieniä.

4.1 Käytettyjen paneelien markkinat

Ensisijaisesti tehokkain menetelmä olisi käyttää vanha paneeli uudelleen. Voimalahankkeista puretaan usein toimintakuntoisia paneeleja ennen niiden teknisen käyttöiän loppua. Voimalahankkeista purettujen paneelien etuna on suuri määrä samoja, samoissa olosuhteissa olleita paneeleja. Eri kohteista kerättyjen paneelien alkuperäisissä tehoissa voi olla eroja ja lisäksi olosuhteet sekä ikä ovat voineet kuluttaa niitä eri tavoin. Useita aurinkopaneeleja käytettäessä ne kytketään sarjaan ja/tai rinnan. Yhteen kytkettynä heikoin lenkki määrittelee koko voimalan tehon. Siksi saman tehoisia paneeleja käyttämällä päästään parhaaseen lopputulokseen. (Pop 2021.)

Käytetyillä aurinkopaneeleilla ei ole vielä markkinapaikkaa Suomessa. Käytettyjen paneelien hyödyntäminen vaatisi toimijan, joka keräisi poistettuja paneeleja koko maasta ja tarkistaisi niiden kunnon. Käytettyjen paneelien määrä on edelleen niin pieni, että keskitetty toiminta olisi tarpeen. Kuntotarkastuksen ja tehomittauksen jälkeen paneelit voitaisiin asettaa myyntiin tai lähettää kierrätettäväksi. Taustakalvovialliset paneelit voitaisiin yrittää korjata. Kaikkien käytöstä poistettujen paneelien järjestelmällinen kuntotarkastus säästäisi huomattavasti luonnonvaroja, sillä on kohteita, joissa ne riittäisivät vielä hyvin.

Kierrätetyistä piikennoista on myös mahdollista valmistaa uusia paneeleja. Kierrätettyjen kennojen käyttö uusissa paneeleissa vaatisi kuitenkin sen, että prosessi olisi halvempi kuin uudet materiaalit. Käytetyistä kennoista koostuvat paneelit pitäisi mahdollisesti

myös myydä halvemmalla, ellei niiden tehoa ja toimivuutta voida taata samalle tasolle uusien kanssa. Tämä asettaa taas painetta kierrätysprosessille.

4.2 Lasin kierrätys

Lasi on yksi aurinkopaneelin arvokkaimmista materiaaleista, johtuen sen suuresta massasuudesta paneelissa. Lasin ja alumiinikehikon talteenotto on yksi helpoimpia, ja pienissä määrissä kannattavimpia kierrätysmenetelmiä. Lasin keräämiseen on EU-alueella käytössä useita menetelmiä. (Komoto ym. 2018.)

Ehjän lasin talteenotto on nykyisillä jätevirroilla kannattavin menetelmä. Laitteen ei tarvitse olla monimutkainen, sen energiankulutus on alhainen, eikä se vaadi merkittävästi kemikaaleja. Lisäksi ehjälle lasille on olemassa markkinat (Deng ym. 2019). Hamada Corporationin kehittämä kuumaa veistä hyödyntävä lasin irrotusmenetelmä olisi suhteellisen edullinen toteuttaa pienitehoisen ja yksinkertaisen laitteen vuoksi. Suomeen sopisi myös metodi, jossa muu laminoitu materiaali rouhitaan lasin pinnasta, sillä laitteen ei tarvitsisi olla monimutkainen ja lasi jäisi jälleen ehjäksi. (Komoto ym. 2018.) Piitä ja metalleja sisältävä rouhe voitaisiin sitten toimittaa SER-keräykseen. Rouheesta ei tällöin saada juurikaan lisäarvoa. Rouhitulle tai murskatulle lasillekin löytyy käyttöä, mutta sen rahallinen arvo jää ehjää lasia pienemmäksi.

4.3 Mekaaninen murskaus

Kehyksiä ja sähkörasiaa lukuun ottamatta kokonaisten paneelien mekaaninen murskaaminen on yksi tutkituimpia kierrätysmenetelmiä. Kennot muovikalvoineen voidaan joko leikata ensin pienemmiksi paloiksi tai murskata sellaisenaan. Murskaukseen voidaan käyttää joko leikkaavaa terämurskainta tai vasaramyllyä (Granata ym. 2014). Rengas- ja vasaramurskaimet ovat jätteenkäsittelylaitoksilla yleisiä ja niitä on Suomessakin käytössä muun muassa Kuusakoski Oy:n kierrätyslaitoksilla. Kuusakoskella on Heinolan rengasmurskaimen lisäksi kolme vasaramurskainta eri toimipisteillä. (Nevala 2021.)

Aurinkopaneelimurska sisältää niin montaa raaka-ainetta, että niiden erottelu vaatii tarkkaa eri raekokojen seulontaa (Granata ym. 2014). Rengasmurskain on tehokas murskaamaan, mutta se ei yksin riitä hajottamaan muovikalvoa rakeista. Murskeen puhtaaksijauhatusaste jää alhaiseksi sitkeän muovin takia. Piin, hopean, kuparin ja muiden materiaalien erottelu on siten haastavaa. (Nevala 2021.)

Pelkällä murskauksella saadaan talteen enimmäkseen polymeerein kontaminoitunutta lasia. Paneeleissa käytetty kapselointikalvo on niin sitkeää, että murskain ei sitä kykene erottamaan esimerkiksi piistä. Murskauksen lisäksi tarvitaankin lähes poikkeuksetta terminen käsittely yli 600 celsiusasteessa. (Granata ym. 2014.)

Murskaimet ovat tehokkaita, joten ne kuluttavat paljon sähköenergiaa. Sen lisäksi tarvitaan uuni, jonka lämmittäminen kuluttaa sekin paljon energiaa. Muovikalvojen polttaminen aiheuttaa myös jonkin verran päästöjä. Energiatavokkain lämpökäsittelytapa on lämmittää paneelit uunissa ja polttaa muovit pois. Paneelit voitaisiin lämmittää myös sähkötermisesti tai pyrolyysillä, jolloin päästöjä ei syntyisi. Pyrolyysissä kappale lämmitetään hapettomassa tilassa, jolloin muovit sulavat eikä pala. Menetelmä on kuitenkin sen verran hidas, että se vahingoittaa lasia. (Maani ym. 2020.)

Taulukko 3 Yhden neliön (1m^2) kokaisen paneelikappaleen laminointikerroksen poiston vaatimat energia- tai kemikaalimäärät, lopputuotteet, edut ja haittapuolet (Maani ym. 2020).

	Step of recycling	Recycling processes and their status	Materials	Inputs (per m ²)	Outputs	Advantages	Disadvantages
c-Si	Delamination	Nitric acid dissolution* (Bruton, 2020)	HNO ₃ Electricity	46.2 kg 0.45 kWh	Glass, metal compounds, wafers and EVA	Complete removal of EVA and metal coating on the wafer. – Possible to recover intact cells Complete removal of EVA	-Causes cell defects due to inorganic acid. – Generates harmful emissions and wastes
		Solvent and ultrasonic irradiation* (Kim and Lee, 2012)	C ₆ H ₄ Cl ₂ Electricity	46.2 kg 7.14 kWh	Glass, metal compounds, wafers and EVA		-Expensive process and produces harmful emissions and wastes.
		Solvent dissolution* (Doi et al., 2001)	C ₂ HCl ₃	46.2 kg	Glass, metal compounds, wafers and EVA	Complete removal of EVA, recovery of glass and less cell damage compared to HNO ₃ dissolution	-Produces harmful emissions and wastes
		Thermal treatment* (Wang et al., 2012)	Electricity	0.45 kWh	Glass, cell chips and metal ribbons	Full removal of EVA, possible recovery of intact cell and direct reuse of wafers, simple and low-cost process.	Requires high energy inputs and produces harmful emissions.
	Material separation	Electrothermal heating* (Doni and Dughiero, 2012)	Electricity	4.17 kWh	Glass, metal compounds, wafers and EVA	Ensures easy removal of glass and does not generate emissions from EVA burning.	Slow process.
		Pyrolysis * (Frisson et al., 2000)	Electricity	25 kWh	Glass, metal compounds, wafers and EVA	EVA burns with practically no residues.	Slow process and thermal stress lead to glass breakage.
		Chemical etching* (Klugmann-Radziemska et al., 2010)	HNO ₃ HF CH ₃ COOH Br gas	5208 ml 3125 ml 3125 ml 62.5 ml	Glass, Metal compounds, Si- cells	Recovery of high purity materials and it is also a simple and efficient process.	Uses chemicals thus produces liquid wastes.

4.4 Sähköhydraulinen murskaus

Sähköhydraulisessa murskauksessa kappale sijoitetaan nesteeseen. Nesteeseen johdetaan sähköimpulssi, joka aiheuttaa nesteessä paineiskun. Paineisku murskaa kappaleen. Murskaaminen vaatii useamman paineiskun. Sähköhydraulisen menetelmän etuna on kontaktittomuus paneelin ja iskun välillä. Näin syntyvän murskeen materiaalijakaumat ovat selkeämmät, kun eri jakeet eivät pääse sekoittumaan esimerkiksi vasaran mukana. (Nevala ym. 2019.)

Sähköhydraulisen menetelmän huonot puolet ovat hitaus ja käsittelyn jälkeinen murskeen kuivattaminen. Uuden sähköimpulssin lataaminen kondensaattoreihin kestää n. sekunnin. Murskaaminen tapahtuu nesteessä, joten se on kuivattava ennen kuin murska voidaan lajitella eri raekokoihin. Lajittelu tapahtuu yleensä värisyttämällä murskaa sihtien läpi. Sähköhydraulista menetelmää käytetään jo muun muassa nestekidenäyttöjen murskaamiseen, mutta aurinkopaneeleille se on toistaiseksi liian hidas. Lisäksi olemassa olevat laitteet ovat sen verran pieniä, että paneeli pitää ennen käsittelyä pilkkoa pieniksi paloiksi. (Nevala ym. 2019.)

4.5 Kemiaalliset menetelmät

Pelkkä kemiallinen käsittely ei ole saavuttanut suosiota aurinkopaneelien kierrättämisessä. Kemiaalliset menetelmät vaativat vahvoja kemikaaleja, joiden valmistaminen ja käyttö ovat ympäristölle haitallisia. Menetelmät aiheuttavat myös myrkyllisiä kaasuja, jotka tulee käsitellä ennen vapauttamista ilmakehään. Etuna kemiallisissa menetelmissä on oikein tehtynä ehjien materiaalien talteenotto. Paneelistä voidaan saada sekä lasi että piikennot ehjänä talteen, sitten piikennosta voidaan irrottaa hopea. Kemiaalliset menetelmät ovat kuitenkin huomattavasti muita menetelmiä hitaampia. Muovikalvojen hajottaminen kemikaaleilla vie jopa vuorokauden, ollen siten liian hidasta massakierrättämiseen. (Komoto ym. 2018.)

Muiden menetelmien lisänä kemiaalliset menetelmät ovat hyviä. Esimerkiksi mekaanisesti erotellusta lasista jäljelle jääneen materiaalin sulattamiseen. Laminoitu kennopaketti on mahdollista saada ehjänä irti lasista, jolloin voidaan kemiallisesti pyrkiä ottamaan ehjiä kennoja talteen. Kennot voidaan erotella ehjänä myös lämpökäsittelemällä, mutta silloin

riskinä on niiden vaurioituminen liiasta kuumuudesta. Kemiaalliset menetelmät ovat yleensä tarpeen myös hopean ja muiden metallien erottelussa.

4.6 Taloudellisesti kannattavin menetelmä

Kaikkien aurinkopaneelin materiaalien kierrättäminen on mahdollista ja siihen on olemassa keinot. Taloudellisesti se ei kuitenkaan vielä ole kannattavaa, sillä muun muassa piikennot erittelevä huolellinen kierrättäminen on vaativaa ja uudet kennot ovat edullisia. Ympäristökysymykset ovat kuitenkin jatkuvasti enemmän esillä, joten kierrätettyjä materiaaleja käyttämällä voidaan saada markkinointietua tulevaisuudessa.

New South Walesin tutkimuksen mukaan kierrätyslasin kauppahinta olisi n. 270 € / tonni, ja kierrättämisen kustannukset n. 330 € / tonni (Deng ym. 2019). Kehittämällä kierrätysmenetelmää tehokkaammaksi, olisi mahdollista päästä pienempiin kustannuksiin. Lasin hinta on nousussa kasvaneen kysynnän myötä, joten markkinahinta voi olla jo aiempia lukuja suurempi. Ehjän lasin kauppahinnan voidaan olettaa olevan mursketta korkeampi.

Tämän hetken pienillä jätevirroilla taloudellisesti kannattavimmaksi menetelmäksi osoittautuu lasin uudelleen käyttö tuotannossa, sillä aurinkopaneeleissa käytetään lähes standardikokoisia erikoislaseja. Eri valmistajien lasien mitoissa voi kuitenkin olla heittoa, ja ne pitää leikata tuotantolinjaan sopivaksi. Ehjän lasin kierrätyskustannusten voidaan olettaa olevan hieman murskaamista korkeammat ja prosessin hitaampi. Uuden mittatilatun lasin hinta on kuitenkin aina korkeampi kuin kierrätetyn lasin markkinahinta, joten kierrätetyn tasolasin uudelleenkäyttö paneelituotannossa voisi olla taloudellisesti kannattavaa. Lasin kierrättäminen ja sen käyttö paneelituotannossa tulee kannattavaksi, kun kierrätyskustannukset ovat alemmat kuin uuden lasin hinta. Uutta lasia ostaessa myyjä saa aina katteensa ja kuljetuksellakin on hintansa.

Lasin kannattava irrottaminen vaatii riittävästi kierrätykseen päätyneitä paneeleita ja tuotantolinjan, joka voi hyödyntää saman kokoista tasolasia. Keskitetty paneelijätteen kerääminen tulee jälleen tärkeäksi. Lasin irrotuslaite ei kuitenkaan ole kovin monimutkainen, joten sen valmistaminen ei ole yhtä kallista kuin monimutkaisempien kierrätysmenetelmien vaatimien laitteiden valmistaminen. Tällöin lasia voidaan kierrättää ja sijoittaa tuotantoon myös pienempiä määriä uusien lasien sekaan.

5 KIERRÄTYSYHTEISÖÖN LIITTYMINEN

Opinnäytetyön tehtävänä on kierrätysmenetelmien selvittämisen lisäksi tutustua paneelijätteen kierrättämisen tilaan Suomessa. Opinnäytetyön toimeksiantajana on suomalainen aurinkopaneeleja valmistava Salo Tech Oy. Aurinkopaneelit kuuluvat elektroniikkalaitteisiin, joten paneelivalmistajana Salo Tech:llä on tuottajavastuu. Suurta elektroniikkaromua vastaanottavia hyväksyttyjä tuottajayhteisöjä on Suomessa kolme. SER-Tuottajayhteisö ry (SERTY), Selt ry ja ERP Finland ry (European Recycling Platform). (Ympäristöhallinto 2019) Tarkoituksena oli selvittää kaikkien kolmen tuottajayhteisön hinnastot, sekä paneelin kierrättämiseen mahdollisesti käytetty menetelmä. Kaikkia tietoja ei kuitenkaan ehditä työn aikamääreiden takia hankkia, mutta kierrätysjärjestelmään liittyminen saadaan kuitenkin alulle. On SaloTech Oy:n etujen mukaista voida kertoa asiakkaalle tarkkaan mitä poistetulle paneelille tapahtuu. Kierrätisyhteisö valitaan hinnan ja parhaan kierrätysmenetelmän perusteella.

5.1 Salo Tech Oy:n kierrätettävän materiaalin määrä

Salo Tech Oy:n tuottajavastuunalaisen jätteen määrä on toistaiseksi hyvin pieni. Tuottajavastuunalaista jätettä on vain kentältä yritykselle palautuva jäte. Asiakkaat voivat siis jättää veloitusetta vanhat paneelit Salo Techille ostaessaan heiltä uudet paneelit. Vanhat paneelit saa myös tuoda Salo Techille, vaikka ei uusia ostaisikaan. Kuten aikaisemminkin todettu, käytöstä poistuvia paneeleja on toistaiseksi hyvin vähän. Monet asiakkaista vievät paneelit myös suoraan SER-keräyspisteeseen. Toistaiseksi Salo Techille ei ole saapunut tuottajavastuunalaisia paneeleja asiakkailta ja syynä tähän on vasta 2015 alkanut paneelien valmistaminen, sekä paneelien pitkä ikä (Frantti 2021). Salo Techillä halutaan kuitenkin olla valmiita tulevaisuudessa kasvaville jätemäärille.

Tuotannossa syntyy laadunvalvonnan seurauksena jonkin verran rejektiä. Heti alkuvaiheessa huomataan, jos piikidekennoissa on fyysistä vikaa, jonka jälkeen ne päätyvät varastoon odottamaan siirtoa eteenpäin. Kokonaisia paneeleja voidaan hylätä elektroluminenssikuvauksessa huomattujen virheiden takia. Kokonaisia paneeleja joutuu hylkyyn erittäin harvoin, mutta silloinkin niitä voidaan yleensä käyttää B-luokan paneeleina esimerkiksi yhtiön omissa voimalahankkeissa. (Frantti 2021.) Tuotannossa syntyvää rejektiä ei lasketa tuottajavastuuseen. Tuotantolinjalta poistettujen paneelien ja piikennojen

käsittelyyn tehdään erillinen sopimus SER-jätettä vastaanottavan tahon kanssa. (Puumalainen 2021.)

Työssä luotiin Salo Tech Oy:n tuotantolinjalle seurantalomake, johon operaattorit kirjaa-
vat rejektiksi päätyneet kennot. Opinnäytetyön selvitystä varten kennojätteen määrää
ehdittiin seuraamaan kuukauden ajan. Kuukauden seurantajaksolle osui ainakin yksi
tuotantokatko, eikä kuukauden seurannan perusteella voida vielä olla varmoja pidem-
män aikavälin hävikistä. Eri kennoerät ja valmistajat vaikuttavat tuloksiin pidemmällä ai-
kavälillä. Seurantalomakkeen kennomääriä verrattiin samalla aikavälillä valmistuneisiin
72- kennoisiin paneeleihin. Suhteutettuna valmistusmääriin saatiin selville, kuinka suuri
osuus paneeleja varten ostetuista kennoista on rikkiäisiä jo uutena. Rejektia syntyy tuo-
tannossa n. yksi piikenno paneelia kohden, joka tarkoittaa 72 kennon paneeleissa n.
1,25 % hävikkiä. Kennojätteen määrää voidaan myös verrata kuukauden aikana valmis-
tuneeseen tehokapasiteettiin. Rejektikennoja keraantyi n. 2,4 kpl / kWp.

Rejektikennot (kuva 20) ovat hankalaa jätettä niiden sisältämien materiaalien vuoksi. Ne
ovat kuitenkin helpommin kierrätettävissä, kuin jo laminoidut kennot. Työn aikana tehty
selvitystyö osoittaa, että toistaiseksi kennoille ei Suomessa ole tahoa, joka voisi niitä
suoraan hyödyntää. Haastateltavana oli useita kierrättämiseen erikoistuneita yrityksiä.
Kennot on kierrätettävä muun SER-jätteen mukana. Piikennot voitaisiin lähettää maail-
malla sijaitseviin aurinkopaneeleihin erikoistuneisiin kierrätyslaitoksiin, mutta tällöin kul-
jetuksen aiheuttamat kulut ja päästöt saattavat kääntää hyödyt pääläelleen.



Kuva 20 Salo Tech Oy:n tuotannossa hylättyjä piikennoja

5.2 Tuottajayhteisöt

Yritys voi hoitaa tuottajavastuun itsekin liittymällä Pirkanmaan ELY-keskuksen tuottajarekisteriin, mutta helpommin velvoite täyttyy liittymällä sähkölaitevalmistajien perustamaan tuottajayhteisöön (Ympäristöhallinto 2019). Tuottajayhteisöt hoitavat yrityksen velvollisuuden huolehtia myymiensä tuotteiden elinkaaren loppupäästä. Tuottajayhteisölle tulee raportoida myytyjen laitteiden lukumäärä ja paino. Hinta muodostuu liittymismaksusta, vuosimaksusta ja myytyjen laitteiden määrästä. Kaikki kierrätyskustannukset jaetaan jäsenille myytyjen laitteiden mukaan. (SELT ry.)

5.2.1 SER-Tuottajayhteisö ry

SERTY ry on perustettu vuonna 2001 hoitamaan jäsenyritystensä lakisääteiset velvoitteet. SERTYn toimialaa on sähkö- ja elektroniikkajäte. SERTY on voittoa tavoittelematon valvottu organisaatio. Lakisääteisten velvoitteiden hoitamisen lisäksi SERTY neuvoo asiakkaitaan kierrätykseen liittyvissä asioissa. SERTY:llä ei ole omia kierrätyslaitoksia, vaan se käyttää ulkopuolisten operaattoreiden, kuten Kuusakoski Oy:n tai Stena Recycling Oy:n tarjoamia palveluita. (SERTY ry.)

5.2.2 SELT ry

SELT ry on perustettu hoitamaan muun muassa lämmitys- ja jäähdytyslaitteiden, valaisimien, sähkö- ja elektroniikkatyökalujen ja erilaisten automaattien kierrätykseen. SELT ry ottaa vastaan isompia sähkölaitteita, kuten myös aurinkopaneeleja. Aurinkopaneelit eivät kuitenkaan ole SELT ry:n ydintoimintaa. SELT ry on yhdessä FLIP ry:n ja ICT-tuottajaosuuskunnan kanssa perustanut palveluyhtiö Elker Oy:n. Elker Oy hoitaa käytännön järjestelyt. (SELT ry.)

Elker Oy järjestää muun muassa jätteiden keräyksen ja pitää huolen tavoitteiden täyttymisestä. Elker Oy hoitaa myös jätemäärien raportoinnin tuottajayhteisöjen puolesta. Se on SELT ry:n tavoin voittoa tavoittelematon organisaatio. Elker Oy käyttää ulkopuolisia toimijoita jätteiden käsittelyyn. (Elker Oy.)

5.2.3 ERP Finland ry

ERP Finland ry on suomalainen sähkö- ja elektroniikkajätteitä käsittelevä tuottajayhteisö. Sen palvelut tuottaa ERP Services Finland Oy, joka taas on ERP SAS:n tytäryhtiö. ERP, eli European Recycling Platform kuuluu Landbell Groupiin. ERP on suuri toimija alalla. ERP Finland ry pystyy hoitamaan tuottajavastuun myös monessa muussa Euroopan maassa, sillä sen palveluyhtiö ERP on kansainvälinen yritys. (ERP Finland.)

5.2.4 Kuusakoski Oy

Kuusakoski Oy on monialainen kierrättäjä, joka toimii monen kierrätysyhteisön yhtenä palveluntoimittajista. Yrityksellä on keräys- ja kierrätystoimipisteitä ympäri Suomen. Kuusakoskella on Lahdessa tutkimuskeskus ja laboratorio, jossa tutkitaan uusia kierrätysmenetelmiä. Kuusakoski kierrättää muun muassa elektroniikkaa, metalleja, rakennus- ja purkujätettä sekä autoja. (Kuusakoski Oy.)

Kuusakosken asiakaspäällikkö Sanna-Mari Nevalan mukaan aurinkopaneeleja päätyy heidän kierrätyslaitokselleen, mutta hyvin vähän. Yritys on kiinnostunut paneelijätteen kierrättämisen tutkimisesta, mutta mielekäs tutkiminen vaatisi tasaisemmat jätevirrat. Aurinkopaneelit murskataan muun elektroniikkajätteen mukana tehokkaassa rengasmurskaimessa. Aurinkopaneelien kierrättämistä olisi mahdollista tutkia jo olemassa olevilla laitteilla, mutta jätemäärien pitäisi olla riittävän suuret optimien asetusten ja prosessien hakemiseen. Alkuun tutkimus vaatisi murskaimen puhdistamisen muusta SER-jätteestä. (Nevala 2021.)

5.2.5 PV Cycle

PV Cycle on eurooppalainen voittoa tavoittelematon aurinkopaneelien kierrätykseen erikoistunut tuottajayhteisö. EU:n elektroniikkajätedirektiivit yltävät lähes jokaiseen jäsenmaahan samoin kuin Suomeenkin. PV Cycle toimii jo yli 20 Euroopan maassa tuottajayhteisönä, joka hoitaa lain vaatimat velvollisuudet. PV Cyclen ainutlaatuisuus piilee siinä, että se keskittyy lähes pelkästään aurinkopaneelijätteeseen. Aurinkopaneelien

ohella se käsittelee myös akkuja, jotka voivat olla osa aurinkopaneelijärjestelmää. (PV Cycle)

Tuottajayhteisö on perustettu vuonna 2007 usean alan yrityksen toimesta. PV Cyclen ajatuksena on kerätä mahdollisimman monelta toimijalta kaikki jätteet yhteen pisteeseen, jolloin jätteenkäsittelylaitos on kannattavaa rakentaa. Paneelijätettä tulee tois- taiseksi niin vähän, ettei pienempiä laitoksia ole järkevää rakentaa. PV Cyclellä on yli 350 keräyspistettä, joihin tuottajat voivat tuoda jätteensä. (Meza 2014.)

Suurten resurssiensa ansiosta PV Cyclen kierrätysmenetelmät ovat huippuluokkaa. PV Cycle julkaisi vuonna 2016 ennätystuloksen paneelin komponenttien kierrättämisessä. Jopa 96 % piikennopaneelin materiaaleista on saatu talteen. Loput neljä prosenttia ovat eva-kalvoa tai muita energiaksi soveltuvia jätteitä. Muiden kuin piikennopaneelien kier- rätyslukemat ovat vielä parempia, jopa 98 %. PV Cycle hyödyntää sekä lämpökäsittelyä että mekaanista murskausta. Murskauksen jälkeen silppu lajitellaan joko laserin tai väri- nän avulla. Lopuksi materiaalit pyritään puhdistamaan ja jalostamaan erillisiksi raaka- aineiksi. PV Cyclen kierrätysmenetelmät ylittävät EU:n vaatimukset kirkkaasti. (Kenning 2019.)

5.3 Jätteiden kansainväliset siirrot

Elektroniikkajäte mukaan lukien jätteiden siirto ulkomaille on luvanvaraista. Kaiken, paitsi vaarattoman jätteen siirtoon EU-alueella vaaditaan lupa. Luvatta tehty jätteensiirto voi aiheuttaa maastaviejälle rangaistuksen. Muihin kuin EU-maihin siirrettäessä on otettava huomioon myös kohdemaan säädökset. (SYKE 2021.)

Tietyt jätteet voidaan muuttaa muotoon, jossa niitä ei enää luokitella jätteeksi. Esimer- kiksi kokonainen rikkiäinen aurinkopaneeli on jätettä, mutta siististi irrotetut kehykset voidaan luokitella alumiiniksi, joka on sellaisenaan raaka-aine. Kuitenkin kehyksetön la- minoitu aurinkopaneelipaketti luokitellaan elektroniikkajätteeksi. Tuotannossa syntyvä sivutuote voidaan luokitella muuksi kuin jätteeksi, jos se täyttää jätelain pykälän 5 § koh- dat. Oikein käsiteltynä esimerkiksi piikennot voitaisiin mahdollisesti luokitella raaka-ai- neeksi. Suomen ympäristökeskus SYKE on jätteen kansainvälisten siirtojen valvontaan erikoistunut viranomainen. SYKE myös käsittelee jätesiirotulvat ja tekee niistä päätökset. (SYKE 2021.)

6 LOPPUTULOKSET JA POHDINTA

Salo Tech Oy tutkii mahdollisuuksia kehittää toimintaansa kestävämmäksi, joten tavoitteena oli löytää ja esitellä merkittävimmät paneelien kierrätysmenetelmät. Kierrätysmenetelmien heikkoudet ja vahvuudet tuli myös selvittää. Kierrätysmenetelmiä tutkiessa selvitettiin myös mikä paneelien kierrättämisen tila on tällä hetkellä Suomessa sekä maailmalla. Työssä selvisi, että tutkimusta on tehty jätevirtoihin nähden kattavasti niin Suomessa kuin maailmallakin. Useampaan menetelmään tutustuu selvisi myös eri menetelmien vahvuuksia ja heikkouksia.

6.1 Tulokset

Aurinkopaneelien kierrättämisen vaikeus selvisi työn aikana. Positiivista oli kuitenkin jo tehdyn tutkimuksen määrä ja laatu. Yliopistoissa ympäri maailman on tehty useita tutkimuksia eri menetelmiin liittyen. Myös ympäristöllisiä ja taloudellisia näkökulmia on tarkasteltu laajasti. Kaikkia tutkimustuloksia yhdistää yhteinen ongelma: jätevirrat ovat edelleen niin pieniä, ettei laitosten rakentaminen kannata. Ilman tehokasta toimivaa laitosta on vaikea arvioida todellisia kierrätyksen kuluja ja vaikutuksia.

Työssä selvitettiin myös aurinkopaneelivalmistajan lainsäädännöllisiä velvoitteita, sekä tarkasteltiin tapoja, jolla ne voitaisiin täyttää. Lain velvoitteiden lisäksi tarkasteluun liittyi markkinoinnin ja ympäristön kannalta kiinnostavimman kierrätysyhteisön etsiminen.

6.1.1 Kierrättäminen

Käytettyjen aurinkopaneelien markkinat ovat vielä alussa, mutta paneeleille voidaan odottaa suurta kysyntää. Aurinkopaneelien ennustettu elinikä kasvaa vuosi vuodelta tekniikoiden kehittyessä, joten vielä esimerkiksi 15 vuotta vanhan paneelin ostaminen voi kannattaa yli 20 vuodeksi. Käytetyille paneeleille löytynee kysyntää kaikkialta maailmasta. Käytettyjen paneelien markkinat tulevat luomaan uuden kasvavan liiketoimintamallin.

Kierrätyksestä saatavien materiaalien markkina-arvoa on vielä vaikea määritellä, sillä nykyisillä jätemäärillä kierrätettyjen materiaalien hinta jää edelleen uusien vastaavien

yläpuolelle. Painetta kierrätyslaitosten pikaiselle kehittämiselle kuitenkin on, sillä jätemäärät tulevat kasvamaan pian merkittävästi. Lainsäädäntö ei vielä tarpeeksi vahvasti ohjaa kierrättämään materiaaleja, joiden louhiminen aiheuttaa eniten ympäristöhaittaa. Kierrättämisen tulisi kestävyyskannalta perustua materiaalien ”upcyclingiin”, eli hyödyttömän materiaalin muuttamiseen arvokkaampaan muotoon. Tällä hetkellä taloudellisesti kannattavimmaksi kierrätysmenetelmäksi osoittautuu lasin kierrättäminen.

Paneelit ovat lähes standardikokoisia, joten ehjänä irrotetut lasit olisi mahdollista käyttää uudelleen. Paneelin mitoissa oleville lasille ei välttämättä löydy sellaisenaan ulkopuolista kysyntää, eikä kierrätyslasin markkinahinta vastaa paneelin vaatiman uuden karkaistun lasin hintaa. Sen sijaan Salo Tech Oy:n kaltaiselle aurinkopaneelivalmistajalle kierrätetyt tasolasit voisivat olla hyvinkin kiinnostavia, kun lasi otettaisiin talteen omalla linjastolla. Uudelleen käytetyn lasin hinta voitaisiin tällöin vähentää sähkön kulutusta lukuun ottamatta suoraan uuden paneelin valmistuskustannuksista. Lasin arvo olisi itse käytettynä suurempi kuin myytynä. Kierrätetyn lasin käytöllä on myös markkinointiarvoa.

Opinnäytetyön aikana tehty selvitystyö osoittaa, että lasimurskeellekin olisi kysyntää. Lasin kierrätettävyyden on hyvä, ja sitä voidaan käyttää moneen kohteeseen. Lasimurskeesta voidaan tehdä lasiesineitä, uutta tasolasia ja kontaminoituneesta lasista esimerkiksi eristettä. Lasin omatoiminen talteenotto murskeena ei kuitenkaan ole aurinkopaneelivalmistajalle yhtä kannattavaa kuin ehjänä. Mikäli lasia ei ole mahdollista ottaa talteen ehjänä, voitaisiin lasi toimittaa ulkopuoliselle toimijalle, joka keräisi lasin talteen ja myisi sen uusiokäyttöön. Jos lasimurskeelle riittäisi markkinoita, voisi Salo Tech Oy säästää jätteenkäsittelykustannuksissa toimittamalla jätetä paneelit niitä käsittelevälle operaattorille.

Paneeli- ja kennorejektiin liittyviä kysymyksiä tuotiin esiin keskusteluissa muun muassa SERTY ry, ERP Finland ry:n ja Kuusakoski Oy:n kanssa. Ainakin tarkastelujakson aikana tilatuista kennoista n. 1,25 % päätyi hylkyyn, joten niille olisi tärkeää löytää pian paikka ja käyttökohde. Kuusakoski Oy:ltä löytyi kiinnostunut yhteyshenkilö, jonka kanssa voidaan jatkaa neuvotteluja kennoihin ja paneelisiin liittyvistä tutkimuksista. Lisäksi selvitettiin mahdollisuutta käyttää aurinkopaneeleja esimerkiksi lasista valmistetun eristeen raaka-aineena.

6.1.2 Tuottajayhteisö

Aurinkopaneelivalmistajan lainsäädännöllisten velvoitteiden selvittämien oli osa työtä. Selvityksessä varmistui, että jätelainsäädännön mukaan aurinkopaneelit lukeutuvat sähkölaitteisiin. Sähkö- ja elektroniikkalaittevalmistajilla on tuottajavastuu. Tuottajavastuuseen kuuluu velvoite raportoida myydyt laitteensa joko suoraan Pirkanmaan ELY-keskukselle tai kotimaiselle hyväksytylle tuottajayhteisölle. Lisäksi sähkölaittevalmistajan on otettava vastaan asiakkaan palauttamia vanhoja sähkölaitteita. Selvisi, että on yksinkertaisempaa liittyä tuottajayhteisöön kuin hoitaa raportointia itse.

Tuottajayhteisöön liittymisessä on raportoinnin helpottumisen lisäksi etuna jätteenkäsittelysopimus, jonka yhteisö hoitaa yrityksen puolesta. Tuottajayhteisö pitää huolen, että jätteet kuljetetaan asianmukaiseen kierrätyslaitokseen. Kierrätisyhteisöjen vuosimaksuilla sekä tuotantomääriin perustuvalla kierrätysmaksulla ylläpidetään Suomen kierrätyslaitoksia ja keräyspisteitä.

Tuottajayhteisöön kuulumisen voi tuoda yritykselle etua asiakkaiden kysyessä kierrättämisestä. Tavoitteena olikin selvittää, kuinka monta tuottajayhteisöä Suomesta löytyy ja miten he hoitaisivat tehtävän. Suomessa on viisi sähkö- ja elektroniikkalaitteiden kierrättämiseen hyväksyttyä tuottajayhteisöä. Kolme niistä soveltuu aurinkopaneelien kierrättämiseen, sillä kaksi muuta keskittyvät pienempään elektroniikkaan, kuten valaisimiin. Jäljelle jäivät SELT ry, SERTY ry ja ERP Finland ry.

Yhteydenotot yhdistykseen paljastivat kaikkien käyttävän ulkopuolisia toimijoita konkreettisen kierrättämisen järjestämiseen. Käytetyt toimijat riippuvat sijainnista. Yhdistykset olivat kiinnostuneita aurinkopaneeleista ja niiden kierrättämisestä. Tuttu ongelma kuitenkin nousi esiin jätevirtojen pienuudesta. Paneelit otettaisiin mieluusti vastaan, mutta erillistä kierrätyslaitosta ei ole. Tuottajayhteisöiltä paneelijäte päätyisi esimerkiksi Kuusakoski Oy:n tai Stena Recyclingin elektroniikkaromun kierrätyslaitokselle.

Tuottajayhteisöjen toiminnassa jätteen kanssa ei ole merkittävästi eroa. Valitsemalla toista yhteisöä toisen sijasta ei siis saavuteta tällä hetkellä merkittävää markkinointietua. Jatkon kannalta oli kuitenkin selvittää nykytilanne. Elektroniikan tai tasolasin ohella kierrättäminen ei ole missään nimessä huono vaihtoehto, joten asiakkaalle voidaan nyt kertoa pitkälti mitä paneeleille tapahtuu.

Tarkoituksena oli selvittää myös tuottajayhteisöjen hinnastot ja niiden erot. Hintoja ja kierrätysmenetelmiä vertailemalla valitaan sopiva yhteisö. Selvisi, että kierrätysmenetelmissä ei ole merkittäviä eroja, joten paino kääntyy hintaan ja muihin palveluihin. Opin- näytetyön aikamääreiden takia kierrätysyhteisöjen tarjouksia ei vielä ehditty saamaan. Työ kuitenkin sai aikaan alkusysäyksen ja Salo Tech Oy aikoo jatkaa tuottajayhteisöön liittymisprosessia ja selvittää muita kierrätykseen liittyviä kehittymismahdollisuuksia.

6.1.3 Jatkotutkimusaiheita

Piikenneja ja rejektipaneeleja tulee jatkossakin. Rejektipaneeleja ja kennoja voisi jatkosakin tarjota korkeakouluille tutkittavaksi. Korkeakoulujen kanssa voisi yhteistyössä kehittää mahdollisia kustannustehokkaita tapoja hyödyntää jätepaneelit paremmin. Salo Tech Oy:n intressiyhtiö Salo Automation Oy valmistaa itse tuotantolinjoja, joten jonkinlaisen yksinkertaisen kierrätyslaitteen valmistaminen voisi olla mahdollista.

Keskusteluyhteys Kuusakoski Oy:n ja tuottajayhteisöjen kanssa on kesken. Kaikilta osapuolilta tuntuisi löytyvän kiinnostusta aurinkopaneelien kierrättämiseen. Mielenkiintoinen ajatus olisikin, että Salo Tech Oy toimisi edelläkävijänä Suomen aurinkopaneelijäte ongelmassa. Keskitetyn paneelijätekeräyksen avulla pienimuotoinen kierrätysyksikkö voisi olla kannattava, varsinkin jos lasia pystyttäisiin käyttää uudelleen omassa tuotannossa. Yhteistyössä kierrätysalan toimijoiden kanssa paneelijätettä voitaisiin saada kerättyä ympäri Suomen, jolloin toiminnasta tulisi kannattavampaa.

6.2 Pohdinta

6.2.1 Ajatuksia käytettyjen paneelien markkinoista

Aurinkopaneeli pitäisi ensisijaisesti kierrättää myymällä se käytettynä eteenpäin. Suurin käytettyjen paneelien markkina löytyy kehittyvistä maista. Ongelmana kehittyvissä maissa on niiden mahdollisesti heikotasoisen kierrätysjärjestelmän, jossa sähkö- ja elektroniikkalaitteille ei välttämättä ole lainkaan erillistä keräystä. Käytettyjen aurinkopaneelien myynti kehittyviin maihin voidaan nähdä nopeasti jalona toimena, mutta taustalla kytkee bisnesmaailmassa aina raha. Kehittyvässä maassa myyjällä ei välttämättä ole mitään velvoitteita huolehtia kierrätyksestä. Kierrätysjärjestelmäkin voi pohjautua lähinnä

kaatopaikkoihin. Tällöin valmistaja ja myyjä siirtävät kierrätysongelman eteenpäin. Uusiokäyttö on tärkeä vaihe ennen kierrätystä, mutta sekin vaatii vielä kehittämistä.

6.2.2 Opinnäytetyön onnistuminen

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää kierrätysmenetelmien tämänhetkinen tila Suomessa ja maailmalla. Tämän jälkeen tuli selvittää voitaisiinko Salo Tech Oy:n piikennorejektiä hyödyntää sellaisenaan. Tuottajayhteisöjen vertailu ja sellaiseen liittyminen oli myös aluksi tavoitteena.

Kierrätysmenetelmistä tehtyjen tutkimusten määrä yllätti positiivisesti. Oletus oli, että menetelmien tutkiminen olisi vasta alussa. Tutkimusta on tehty kuitenkin jo edellisillä vuosikymmenilläkin, koko ajan kiihtyvällä tahdilla. Lisäksi aurinkopaneelien kierrätyslaitoksiakin on Euroopassa ja Yhdysvalloissa. Kierrätysmenetelmiä tutkiessa ongelmaksi muodostuikin runsaudenpula. Perusajatuksia eri menetelmissä on usein samat, mutta pieniä variaatioita on paljon. Onkin hyvä, että menetelmiä on kehitetty jo paljon, vaikka jätemäärät ovat edelleen pieniä. Työhön onkin pyritty löytämään merkittävimmät ja edistyneimmät menetelmät. Mukaan mahtui myös pienempiä kokeiluja, kuten ultraäänimenetelmä.

Tuottajayhteisöön liittyminen vaati lainsäädännön ja yhteisöjen eroavaisuuksien selvittämistä. Oletuksena oli, että tuottajayhteisöillä olisi käytössä keskenään eri menetelmiä. Selvitystyössä ei varmasti tullut esiin kaikki mahdolliset tavat, joilla paneelijätettä Suomessa käsitellään, mutta yleisimmät menetelmät selvisivät. Paneelijäte päättyy tasolasin tai elektroniikan kanssa yleensä samaan murskaimeen, riippuen kierrättäjäyrityksestä. Selvityksen tulos riittää siihen, että Salo Tech voi kertoa mitä paneeleille tehdään, jos asiakas palauttaa käytetyn paneelin heille. Tavoitteena oli myös kilpailuttaa tuottajayhteisöt, mutta aikataulusyistä tulokset eivät ehtineet työhön. Salo Tech Oy jatkaa kuitenkin prosessia.

LÄHTEET

Aurek Oy 2021. Kuparin hinta, messingin, rosterin ja romuraudan hinta. Viitattu 11.4.2021. Saatavilla: <https://www.kultajametallitrahaksi.fi/kuparin-hinta/>

Balde ym. 2015. The global e-waste monitor 2014: quantities, flows and resources. Viitattu 20.2.2021. <https://i.unu.edu/media/unu.edu/news/52624/UNU-1stGlobal-E-Waste-Monitor-2014-small.pdf>

Bellini E. 6.4.2020. World now has 583.5 GW of operational PV. Viitattu 23.2.2021. Saatavilla: <https://www.pv-magazine.com/2020/04/06/world-now-has-583-5-gw-of-operational-pv/>

Bernreuter Research 31.3.2021. Polysilicon Price: Chart, Forecast. Viitattu 20.4.2021. Saatavilla: <https://www.bernreuter.com/polysilicon/price-trend/>

Deng R ym. 2019 A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119302321?via%3Dihub>

Dias P ym. 2016. Recycling WEEE: Extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon photovoltaic modules. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X16301015?via%3Dihub>

Eder G ym. 2019. *Possible repair strategies for PV- modules with cracked backsheets*. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/333895201_Possible_repair_strategies_for_PV-_modules_with_cracked_backsheets

Elker Oy 2021. Näin kierrätämme SER:n - Elker. Viitattu 21.4.2021. Saatavilla: <http://www.elker.fi/laitteiden-kasittely/kerays-kasittely/nain-kierratamme-SERn>

ERP Finland 2021. European Recycling Platform. Viitattu 21.4.2021. Saatavilla: <https://erp-recycling.org/fi-fi/>

Euroopan Parlamentti 2008. *Regulation (EC) No 1272/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures, amending and repealing Directives 67/548/EEC and 1999/45/EC, and amending Regulation (EC) No 1907/2006*.

Frantti M. 2021. *Design & Project Engineer, Solar Finland, tuotantolaitoksen esittelykierros 21.1.2021*.

Fuhs M. 2019. The weekend read: Taking the lead. Viitattu 9.5.2021. Saatavilla: <https://www.pv-magazine.com/2019/12/07/the-weekend-read-taking-the-lead/>

Granata G ym. 2014. Recycling of photovoltaic panels by physical operations. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092702481400018X?via%3Dihub>

K.A Rasmussen 2021. Hopean viiden vuoden hintahistoria. Viitattu 3.4.2021. Saatavilla: <https://sijoitakultaan.fi/sijoita-hopeaan/faktoja-hopeasta/hopean-hinta-kaavio/>

Kang S ym. 2012. Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148112002716?via%3Dihub>

Kenning T. 2019. PV Cycle achieves record 96% recycle rate for silicon-based PV modules. Viitattu 21.4.2021. Saatavilla: <https://www.pv-tech.org/pv-cycle-achieves-record-96-recycle-rate-for-silicon-based-pv-modules/>

Kim Y ym. 2012. Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024811006362?via%3Dihub>

Klugmann-Radziemska E ym. 2020. The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production - A life cycle assessment of environmental impacts. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024819305884?via%3Dihub>

Komoto K ym. 2018. End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies. International Energy Agency (IEA). Saatavilla: <https://www.osti.gov/biblio/1561523>

Kuusakoski Oy 2021. Kuusakoski Recycling - Suomi. Viitattu 26.4.2021. Saatavilla: <https://www.kuusakoski.com/fi/finland/>

Kwembur I.R ym. 2020. Detection of Potential Induced Degradation in mono and multi-crystalline silicon photovoltaic modules. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092145261930818X?via%3Dihub>

LUT Yliopisto 2019. Aurinkoenergia ja aurinkosähkö Suomessa. Viitattu 11.4.2021. Saatavilla: https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/aurinkoenergia-ja-aurinkosahko-suomessa

Maani T. ym. 2020. Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-Si) and cadmium telluride (CDTE) solar panels. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720323445>

Mertens K ym. 2014. *Photovoltaics*. New York: John Wiley & Sons, Incorporated.

Meza E. 2014. PV Cycle collects first 10,000 tons of discarded PV modules in Europe. Viitattu 21.4.2021. Saatavilla: https://www.pv-magazine.com/2014/11/05/pv-cycle-collects-first-10000-tons-of-discarded-pv-modules-in-europe_100017067/

Murtaugh D ym. 2020. Glass Shortage Threatens Solar Panels Needed for Climate Fix. Viitattu 8.5.2021. Saatavilla: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-11-05/a-glass-shortage-is-threatening-china-s-solar-power-ambitions>

Nevala S. 2021. *Puhelinkeskustelu Kuusakoski Oy:n asiakaspääällikkö Sanna-Mari Nevalan kanssa* 13.4.2021.

Nevala S ym. 2019. Electro-hydraulic fragmentation vs conventional crushing of photovoltaic panels – Impact on recycling. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19300534?via%3Dihub>

Nyman C. 2020. Aurinkoenergia: Suomi 2020. Viitattu 28.3.2021. Saatavilla: https://www.sil.fi/site/assets/files/2527/esitys_6_aurinkoenergia_2020_aty_christer_nyman.pdf

Perälä R. 2017. *Aurinkosähköä*. Espoo: Alfamer / Karisto Oy.

Pilkington Oy 2021. Lasin koostumus. Viitattu 8.5.2021. Saatavilla: <http://www.pilkington.com/fi/tietoa-yhtiosta/mita-lasi-on/lasin-koostumus>

Pop L. 2021. *Mixing solar panels – Dos and Don'ts*. Viitattu 30.4.2021. Saatavilla: <https://solarpanelsvenue.com/mixing-solar-panels/>

Puumalainen A. 2021. Sähköpostikeskustelu SERTY ry:n toiminnanjohtaja Arto Puumalaisen kanssa 25.4.2021.

PV Cycle 2021. PV Cycle homepage. Viitattu 21.4.2021. Saatavilla: www.pvcycle.org

Saintytec 2021. The Working Principle of Hammer Mills. Viitattu 1.5.2021. Saatavilla: <https://www.saintytec.com/working-principle-hammer-mills/>

Schmid D. 2021. Think before trashing: The second-hand solar market is booming. Viitattu 11.4.2021. Saatavilla: <https://www.solarpowerworldonline.com/2021/01/think-before-trashing-the-second-hand-solar-market-is-booming/>

SELT ry 2021. Liittyminen SELT ry:hyn – Elker Oy. Viitattu 12.4.2021. Saatavilla: <http://www.elker.fi/tuottajalle/tuottajayhteisot/selt/liittyminen-selt>

Sendy A. 2021. How much energy does a solar panel produce?. Viitattu 11.4.2021. Saatavilla: <https://www.solarreviews.com/blog/how-much-electricity-does-a-solar-panel-produce>

SER-kierrätys 2021. Mitä kerätyille laitteille tapahtuu? Viitattu 19.5.2021. Saatavilla: <http://www.serkierratys.fi/fi/kuluttajille/mihin-vanhan-laitteen-voi-palauttaa>

SERTY ry 2021. Liity tuottajayhteisöön – SERTY | SER-tuottajayhteisö. Viitattu 21.4.2021. Saatavilla: <https://serty.fi/toiminta/liity-tuottajayhteisoon/>

Stedman Machine Company 2019. Versatile Hammer Mills for Reducing Medium Hard or Fibrous Materials. Viitattu 1.5.2021. Saatavilla: <https://bulkinside.com/versatile-hammer-mills-for-reducing-medium-hard-or-fibrous-materials/>

Stolz P ym. 2017. Life Cycle Assessment of Current Photovoltaic Module Recycling. IEA International Energy Agency. Saatavilla: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Life_Cycle_Assesment_of_Current_Photovoltaic_Module_Recycling_by_Task_12.pdf

Svarc J. 2021. Most efficient solar panels 2021. Viitattu 24.2.2021. Saatavilla: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels>

Suomen ympäristökeskus 2021. Jätteiden kansainväliset siirrot. Viitattu 29.4.2021. Saatavilla: https://www.ymparisto.fi/fi-fi/asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Jatteiden_kansainvaliset_siirrot

The Renewable energy hub 2020. Solar Panels Carbon Payback. Viitattu 8.5.2021. Saatavilla: <https://www.renewableenergyhub.co.uk/main/solar-panels/solar-panels-carbon-analysis/>

Tukes 2021. RoHS - Vaaralliset aineet sähkö- ja elektroniikkalaitteissa. Viitattu 9.5.2021. Saatavilla: <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/sahkolaitteet/sahkolaitteiden-vaatimuksia/vaaralliset-aineet-sahko-ja-elektroniikkalaitteissa-rohs>

Ulster Shredders 2021. U-150SB Shredding Machine from Ulster Shredders. Viitattu 1.5.2021 Saatavilla: <https://www.ulstershredders.com/products/u-150sb/>

Vakkuri I. 2020. Aurinkopaneelit elinkaaren lopussa – kiertotaloutta parhaimmillaan vai vuori vaarallista jätettä? Viitattu 23.2.2021. Saatavilla: <https://www.korkia.fi/aurinkopaneelit-elinkaaren-lopussa-kiertotaloutta-parhaimmillaan-vai-vuori-vaarallista-jatetta/>

Valtioneuvoston asetus sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta 2014/519. Annettu Helsingissä 3.7.2014. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140519>

Vanek J. ym. 2017. Effect of the Frame Sealing on the Functionality of a Photovoltaic Module. Saatavilla: <https://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?paper=41664>

Vimelco 2019. Ulster Shredders - Leikkaavat Jättemurskaimet. Viitattu 1.5.2021. Saatavilla: <https://www.vimelco.fi/ulster-shredders-leikkaavat-jattemurskaimet/>

Wambach K. ym. 2009. Photovoltaics Recycling Scoping Workshop,” 34th PV Specialists Conference. Saatavilla: https://www.bnl.gov/pv/files/PRS_Agenda/3_4_PV-Module-RecyclingWambach.pdf

Weckend S ym. 2016. End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels. IRENA. Saatavilla: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf

Ympäristöhallinto 2019. Sähkö- ja elektroniikkalaitteiden tuottajavastuu. Viitattu 1.3.2021. Saatavilla: https://www.ymparisto.fi/fi-fi/kulutus_ja_tuotanto/jatteen_ja_jatehuolto/tuottajavastuu/Sahko_ja_elektroniikkalaitteet

Ympäristöministeriö 2021. Etusijajärjestys ohjaa jätehuoltoa. Viitattu 19.5.2021. Saatavilla: <https://ym.fi/jatteen>