

Himmi Korhonen

AURINKOENERGIAN HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖT

AURINKOENERGIAN HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖT

Himmi Korhonen
Opinnäytetyö
Kevät 2018
Energiatekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikka

Tekijä: Himmi Korhonen
Opinnäytetyön nimi:
Työn ohjaaja: Jukka Ylikunnari
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2018
Sivumäärä: 32

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin aurinkoenergian todellisia hiilidioksidipäästöjä. Aurinkoenergia on uusiutuvaa ja sitä kutsutaan päästöttömäksi energiaksi. Aurinkokennojen ja paneelien valmistamiseen käytetään luonnonvaroja ja energiaa, joita ei ole otettu huomioon päästöttömyydestä puhuttaessa. Työn tarkoituksena on selvittää piipohjaisten paneelien ja orgaanisten painettavien kennojen valmistuksesta syntyvät hiilidioksidipäästöt.

Työn keskeisin tavoite oli löytää vastaus kysymykseen, onko orgaanisten painettavien kennojen valmistuksesta syntyvät hiilidioksidipäästöt pienemmät kuin piistä tehdyissä paneeleissa, kun näitä verrataan koko elinkaaren aikana tuotettuun sähköön. Työn tilaaja on kiinnostunut tietämään, voiko orgaanista aurinkokennoteknologiaa nimittää vihreäksi ja ympäristöystävälliseksi.

Pohjana on käytetty erinäisiä tieteellisiä tutkimuksia ja julkaisuja, joiden tuloksien perusteella tämä työ on laadittu. Pääasiassa työssä on keskitytty valmistusprosessiin ja käyttöaikaan, mutta myös käytön jälkeinen aika on otettu huomioon kokonaisvaltaisen kuvan saamiseksi.

Opinnäytetyön lopputulos oli se, että piipohjaisten aurinkopaneelien valmistaminen vie enemmän energiaa ja siten tuottaa enemmän hiilidioksidia kuin orgaaniset painettavat kennot. Orgaaniset kennot ovat kuitenkin lyhytikäisempiä ja toimivat matalammalla hyötysuhteella, mikä eliniän aikana tuotettuun sähköön suhteutettuna nostaa kWh kohden syntyvien hiilidioksidipäästöjen määrän piipohjaisia korkeammalle.

Orgaaniset kennot ovat vielä kehitysvaiheessa, joten tulokset voivat muuttua tulevien vuosien saatossa. Tämä opinnäytetyö on katsaus tämänhetkiseen tilanteeseen, mutta jatkotutkimukset voivat olla tarpeen tulevaisuudessa.

Asiasanat: aurinkoenergia, OPV, orgaaninen elektroniikka, painettavat aurinkokennot

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Energy technology

Author: Himmi Korhonen

Title of thesis: Carbon dioxide emissions of solar power

Supervisor: Jukka Ylikunnari

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2018

Pages: 32

This thesis concentrates to the true carbon dioxide emissions of solar power. Solar power is a renewable source of energy and said to have no emissions. This doesn't take in to account the production part of solar cells and solar panels. In this thesis we dive in to the production of silicon based solar panels and printable organic solar cells and find the carbon dioxide emissions of these processes.

The main point is to find the answer to the question, are organic printable cells more environmental friendly than silicon solar panels when it comes to carbon dioxide. The emissions of the production process are divided in to the assumed electricity output during its lifetime. The client was interested in knowing if it is correct to call these printable organic solar cells more environmentally friendly than traditional solar panels.

The base of this thesis comes from different research papers and publications. The main focus is in the production process, but also the end-of-life is briefly discussed.

In this thesis the conclusion came to be, that the production of silicon solar panels does produce more carbon dioxide than printable solar cells. Organic solar cells have a significantly lower lifetime and efficiency, which makes its total carbon dioxide emissions per kWh higher than silicon solar panels. Organic photovoltaics is still new and developing, which must be taken in to account. The results of this thesis may not be permanent, so similar investigation could be interesting in future.

Keywords: solar power, OPV, organic electronics, printable solar cells, organic solar cells

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	6
2 AURINKOKENNON TOIMINTAPERIAATE	7
2.1 Ensimmäinen sukupolvi	9
2.2 Kolmas sukupolvi	10
3 ENSIMMÄISEN SUKUPOLVEN KENNOT	12
3.1 Historiaa	12
3.2 Piin pelkistys	13
3.2.1 Yksikiteiset piikennot	13
3.2.2 Monikiteiset piikennot	13
3.3 Harkosta kennoksi	14
4 KOLMANNEN SUKUPOLVEN KENNOT	16
4.1 Historiaa	16
4.2 Rakenne	16
4.3 Painotekniikka	17
4.3.1 Rullalta rullalle	17
4.3.2 Silkkipaino	18
4.3.3 Syväpaino	19
4.4 Musteista kennoksi	20
4.5 Spin coating	21
5 ENERGIANKULUTTAJAT VALMISTUSPROSESSISSA	22
5.1 Piikennot	22
5.2 Orgaaniset kennot	23
6 KIERRÄTYS	26
6.1 Ensimmäinen sukupolvi	26
6.2 Kolmas sukupolvi	26
7 TULOKSET	28
8 YHTEENVETO	30
LÄHTEET	31

1 JOHDANTO

Aurinkoenergiaa pidetään päästöttömänä ja ympäristöystävällisenä tapana tuottaa sähköä. Aurinkopaneelien valmistamiseen kuitenkin kulutetaan energiaa, mitä ei ole otettu huomioon lainkaan päästöttömästä energiantuotannosta puhuttaessa.

Aurinkoenergiasta puhuttaessa useimmilla on mielessä ensimmäisenä yleisimmin käytetyt piipohjaiset paneelit (käytetään myös sanaa moduuli), joita näkee rakennusten katoilla. Nämä eivät ole kuitenkaan ainoita tapoja valjastaa auringosta saatavaa energiaa käyttöön, vaan on myös useita erilaisia ja uudempia tekniikoita. Näitä ovat muun muassa orgaaniset painettavat kennot, joihin tässä opinnäytetyössä perehdytään piipohjaisten ohella.

Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää aurinkoenergian tuotannosta tulevat hiilidioksidipäästöt ensimmäisen sukupolven paneelien sekä orgaanisten aurinkokennojen välillä ja vertailla niitä keskenään. Mielenkiinnon kohteena on erityisesti päästöt jaettuna aurinkokennon eliniän aikana tuotetulle energialle. Työssä on valittu toiseksi vertailun kohteeksi orgaaniset painettavat kennot, sillä opinnäytetyön tilaaja halusi tietää voiko orgaanisia kennoja väittää puhtaammiksi tai vihreämmäksi kuin piipohjaisia paneeleita. Piihin perustuvat paneelit valittiin, koska ne hallitsevat nykyisellään aurinkoenergiamarkkinoita.

2 AURINKOKENNON TOIMINTAPERIAATE

Aurinkokennot jaetaan kolmeen eri sukupolveen. Ensimmäiseen sukupolveen kuuluvat perustuvat kiteiseen piihin, ja ne jaetaan vielä yksikiteiseen ja monikiteiseen piihin. Ensimmäisen sukupolven paneelit ovat edelleen yleisimmin käytettyjä ja ulkonäöltään kaikille tuttuja (kuva 1). (1, s. 12.)



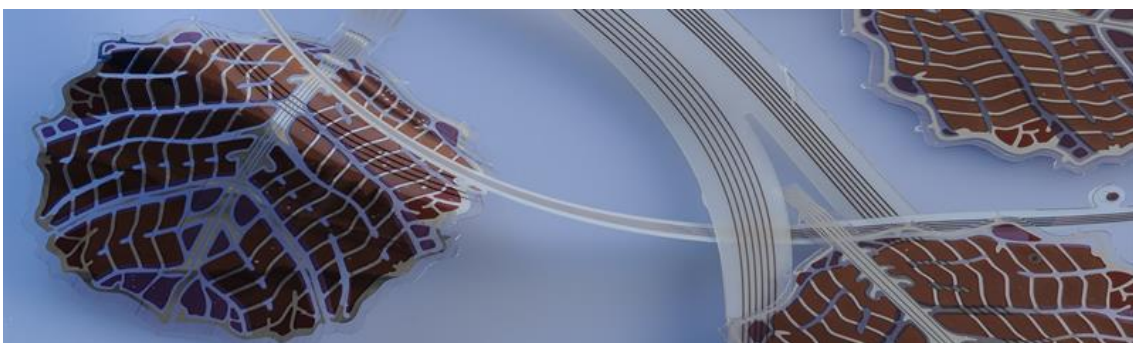
KUVA 1. Ensimmäisen sukupolven aurinkopaneeleita (2)

Toiseen sukupolveen kuuluvat myös piihin perustuvat kennot, joissa on pyritty ratkaisemaan ensimmäisen sukupolven ongelmia, kuten materiaalihävikki. Toisen sukupolven kennoiksi lasketaan erilaiset ohutkalvoteknologiat, jotka ovat tuttuja esimerkiksi laskimien energianlähteenä (kuva 2). (1, s. 16.)



KUVA 2. Toisen sukupolven aurinkokennoja (3)

Kolmas sukupolvi sisältää laajan kirjon erilaisia vaihtoehtoja, joista useat ovat vasta laboratoriotutkimuksen tasolla. Näitä ovat muun muassa orgaaniset kennot, väriaineherkistetyt kennot ja erilaiset nanoteknologian ratkaisut (kuva 3). (1, s. 18.) Työssä keskitytään ensimmäisen sukupolven paneeleihin sekä kolmannen sukupolven orgaanisiin kennoihin. Aurinkokenno on se, missä valon muuttaminen sähköksi tapahtuu ja paneeli on useista kennoista muodostettu kokonaisuus (4).

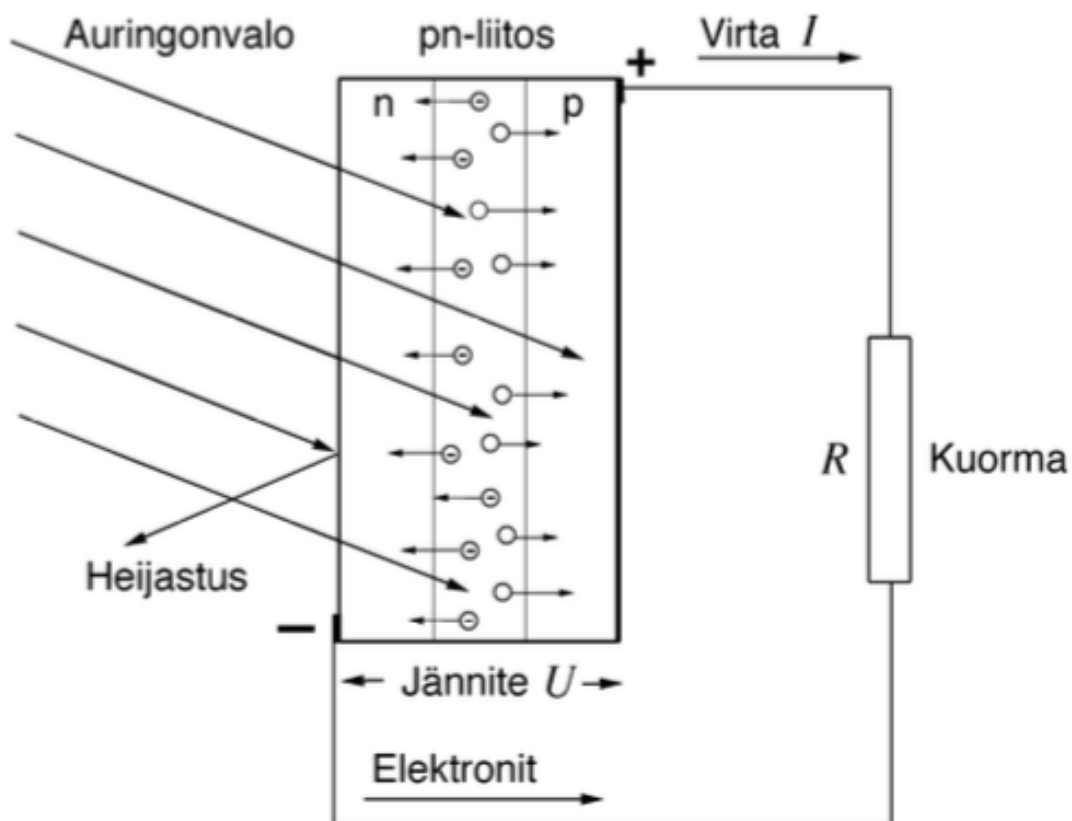


KUVA 3. Kolmannen sukupolven painettuja orgaanisia kennoja (5)

2.1 Ensimmäinen sukupolvi

Aurinkokenno muuttaa auringonsäteilyn sähköksi eli elektronien liikkeeksi. Aurinkokennot valmistetaan puolijohteista, yleisimmin piistä (Si). Puolijohteessa sidoselektroni voi poistua paikaltaan elektronikuorellaan, jolloin syntyy aukko. Elektroni ei kuitenkaan poistu aineesta, joten aineeseen syntyy vain paikallinen positiivinen varaus, jota kutsutaan elektroniaukkopariksi. Elektroniaukko voi ottaa vastaan elektronin ja syntyy liikkuva paikallinen positiivinen varaus. (6; 7.)

Aurinkokennoissa on aina n- ja p-typin puolijohteet. N-typillä on sidoksissa yksi ylimääräinen elektroni ja siitä tulee sähkön kuljettaja. P-typillä taas on elektronien vajausta eli elektroniaukkoja. Auringonvalossa olevilla fotoneilla (valohiukkasilla) on niin suuri energia, että ne pääsevät pinnan läpi pn-liitokseen ja muodostavat elektroni-aukkoparin. Kun pareja syntyy lähellä pn-liitosta, elektronit siirtyvät n-puolelle ja aukot p-puolelle. Tähän rajapintaan syntyy sähkökenttä. Sähkökentän takia elektronit pääsevät siirtymään vain yhteen suuntaan eli ulkoista johdinta pitkin yhdistyäkseen aukkojen kanssa (kuva 4). (6; 7.)



KUVA 4. Aurinkokennon toimintaperiaate (6)

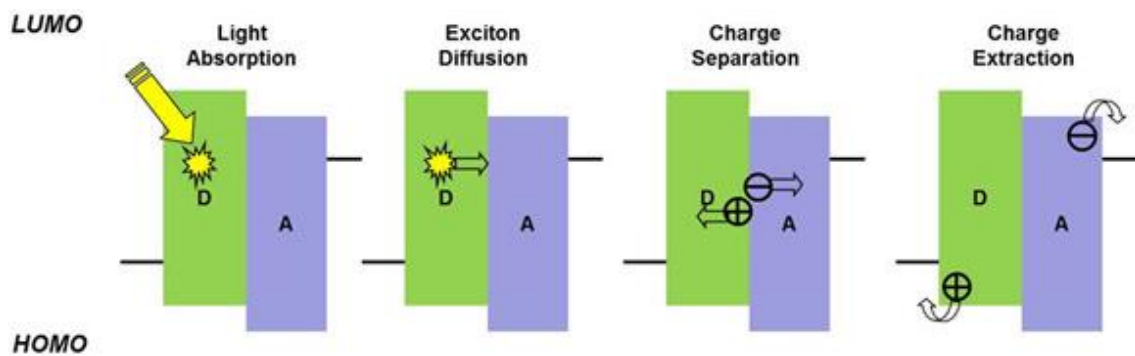
2.2 Kolmas sukupolvi

Kolmannen sukupolven kennoja on useita erilaisia, ja tämän työn tarkoituksen vuoksi keskitytään orgaaniseen kennoon. Orgaanisessa kennossa valo absorboituu aktiivisessa kerroksessa, jota kutsutaan valoaktiiviseksi kerrokseksi. Valoaktiivinen kerros muodostuu elektronin luovuttajasta (orgaaninen p-tyyppi) ja elektronin vastaanottajasta (orgaaninen n-tyyppi). Sen lisäksi orgaanisessa kennossa on myös kaksi elektrodia, anodi ja katodi, sekä kerros avustamassa elektronien ja aukkojen siirtoa, joka voi olla orgaaninen tai epäorgaaninen. (8, s.12–17.)

Toimintaperiaate perustuu molekyylien energiatasoihin, joissa virittynyt elektroni luovuttajan LUMO-tilalta (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) siirtyy vastaanottajan LUMO-tilalle. Samanaikaisesti myös virittymätön eli perustilan elektroni siirtyy vastaanottajan HOMO-tilalta (Highest Occupied Molecular

Orbital) luovuttajan HOMO-tilalle. Luovuttajamateriaaleina käytetään yleensä matalan taajuusalueen polymeerejä (low band gap polymers) ja vastaanottajana esimerkiksi fullereenijohdannaisia. Nämä elektronin liikkeitä tapahtuvat erittäin nopeasti. (8, s. 12.)

Orgaanisten kennojen toiminta voidaan jakaa neljään vaiheeseen: (1) fotonien absorptio ja eksitonien (elektroni-aukkoparien) muodostuminen, (2) eksitonien diffuusio luovuttaja-vastaanottajapinnalle, (3) eksitonien hajoaminen varausten kuljettajaksi ja (4) varausten kuljettajien kulkeutuminen lopulta elektrodeille (kuva 5). Eksitonien liikkua positiivisesti varautuneet aukot siirtyvät luovuttaja-aineelle tai pysyvät siellä, ja negatiiviset elektronit siirtyvät vastaanottajafaasille. Näiden ulottuessa elektrodeille asti aurinkokenno toimii. (8, s. 12.)



KUVA 5. Orgaanisen aurinkokennon toimintaperiaatteen 4 vaihetta (9)

3 ENSIMMÄISEN SUKUPOLVEN KENNOT

Ensimmäisen sukupolven paneeleiksi kutsutaan kiteiseen piihin (crystalline silicon) perustuvia aurinkopaneeleja. Uusiakin teknologioita ja mahdollisia materiaaleja auringon energian valjastamiseen on, mutta piipohjaiset kennot ovat silti hallitsevassa asemassa aurinkoenergiamarkkinoilla. Nämä voidaan jakaa kahteen ryhmään valmistustavan perusteella, yksikiteiseen (mono-Si) ja monikiteiseen (poly-Si tai multi-Si) kennoon. (1, s. 12–13.)

3.1 Historiaa

Ranskalainen tiedemies Edmond Becquerel havaitsi valosähköisen ilmiön vuonna 1839. Valosähköisessä ilmiössä materiaali absorboi valoa ja muodostaa jännitteen. Muutama vuosikymmen myöhemmin vuonna 1873 englantilainen sähköinsinööri Willoughby Smith havaitsi, että kun seleeni altistetaan valolle, se alkaa johtaa sähköä. Tästä havainnosta meni enää 10 vuotta ensimmäisen aurinkokennon valmistamiseen. Ensimmäisen aurinkokennon valmisti yhdysvaltalainen keksijä Charles Fritts New Yorkissa. Se oli tehty päällystämällä seleeniä ohuesti kullalla. Ensimmäinen suuri läpimurto oli saavutettu ja tämän aurinkokennon hyötysuhde oli 1–2%. (10.)

Vuonna 1953 Bell Laboratoriesilla fyysikot havaitsivat piin olevan seleeniä tehokkaampaa ja ensimmäinen 6% hyötysuhteella toimiva kenno valmistettiin piistä. Kolme vuotta myöhemmin Western Electric aloitti myymään kaupallisia lisenssejä valosähköisiin laitteisiin, mutta piin hinta esti toistaiseksi tuotteiden laajan kaupallistumisen 1970-luvulle asti. Öljyn hinnan nousu kasvatti myös kiinnostusta aurinkoenergiaa kohtaan, jolloin Exxon Corporationin rahoittamassa tutkimuksessa valmistettiin aurinkokennoja epäpuhtaammasta piistä ja edullisemmista materiaaleista. Näillä muutoksilla aurinkoenergian hinta saatiin laskemaan ja aurinkoenergian käyttö on siitä lähtien yleistynyt niin kaupallisesti käytettynä kuin yksityiskäytössä. (10.)

3.2 Piin pelkistys

Pii on maankuoren toiseksi yleisin alkuaine, mutta se ei esiinny luonnossa puhtaana vaan piioksidina kvartsiittisoran tai -hiekan seassa, josta se on pelkistettävä käyttöä varten. Piin pelkistys ja puhdistus on kallista ja työlästä, sillä väärät epäpuhtaudet huonontavat kennon hyötysuhdetta. Pelkistysprosessi alkaa laittamalla piitä sisältävä sora hiilen kanssa valokaariuuniin. Valokaaren kuumuus (1500–2000 °C) sulattaa materiaalit, jossa hiekka reagoi hiilen kanssa. Tämä prosessi kestää kuudesta kahdeksaan tuntiin, ja prosessissa syntyy hiilidioksidia sekä sulaa piitä. Epäpuhtaudet ovat suurimmaksi osaksi kalsiumia ja alumiinia, jotka poistetaan syöttämällä kattilaan happea. Tämän jälkeen pii on vähintään 98,5-prosenttisen puhdasta, ja epäpuhtaudet ovat pääasiassa kalsiumia, alumiinia ja rautaa. Sula massa kaadetaan astioihin jäähtymään, ja jäähtyttyään kiinteäksi se rikotaan seuraavia vaiheita varten. Tätä kutsutaan raakapiiksi. Aurinkokennoissa käytettävä pii ei tyypillisesti ole yhtä puhdasta kuin muuhun elektroniikkaan käytettävä. (11.)

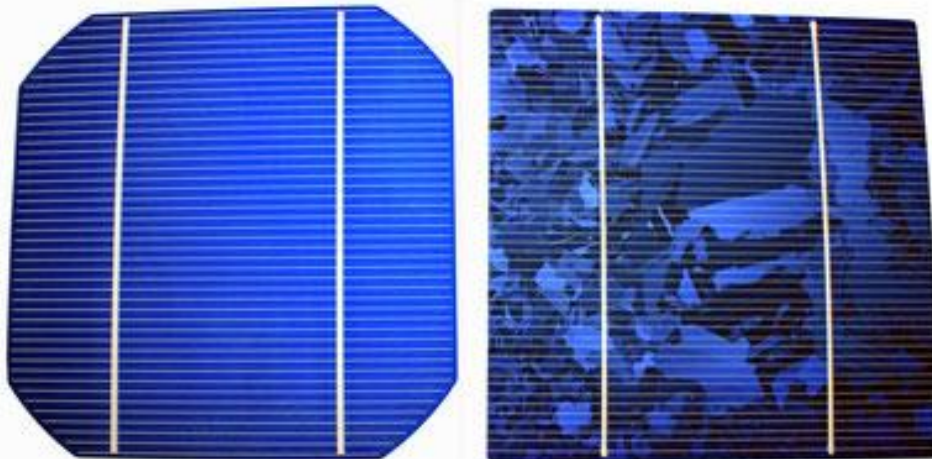
3.2.1 Yksikiteiset piikennot

Yksikiteiset (monocrystalline) kennot tehdään nimensä mukaisesti yhdestä suuresta piikiteestä (harkosta), jonka prosessia kutsutaan Czochralskin menetelmäksi. Czochralsin menetelmässä saadaan kasvatettua siemenkiteellä yksi iso harkko tai tanko puhdasta piitä. Siemenkide kastetaan piisulaan, joka on positiivisen varauksen saamiseksi seostettu yleensä boorilla. Siemenkidettä aletaan nostaa hitaasti pyörittäen ylöspäin ja sula kiteytyy tasaisesti siemenen ympärille samanlaisella kiderakenteella. Jäähdyttämisen jälkeen harkko on valmis leikattavaksi. Leikkausprosessissa on suuret materiaalihäviöt, joiden minimoimiseksi yksikiteisillä kennoilla on tunnistettava muoto (kuva 3). Leikkaustavan takia paneeliin jää paljon tyhjää aluetta, joka huonontaa paneelin hyötysuhdetta kokonaisuudessaan. (1, s. 12–13; 12.)

3.2.2 Monikiteiset piikennot

Monikiteisessä (polycrystalline) piikennossa on useita kiteitä, jotka erottuvat helposti paljaalla silmällä erilaisina kuvioina (kuva 6). Tässä menetelmässä

raaka pii sulatetaan astiassa yhdeksi isoksi massaksi, johon lisätään booria. Sulan annetaan jäähtyä astiassa tai se kaadetaan toiseen astiaan jäähdytysprosessia varten, jossa jäädyttäminen toteutetaan hallitusti pinnalta alkaen. Pii muodostaa kiteitä jäähtyessään, jonka aikana erilaisilla kemiallisilla ja termodynaamisilla prosesseilla ohjataan epäpuhtauksia reunoille ja pyritään saamaan yksittäisistä kiteistä mahdollisimman suuria. Jäähdytyksen tuloksena saadaan yksi suuri neliskulmainen harkko, josta leikataan ohuita levyjä. Neliskulmaisilla piikennoilla on helppo täyttää koko paneelin alue, joka kompensoi kiteiden hajanaisuudesta johtuvaa huonompaa hyötysuhdetta. Valmistuskustannukset ovat monikiteisellä paneelilla halvemmat kuin yksikiteisellä johtuen kustannustehokkaammasta materiaalin käytöstä sekä hyödyntämisestä. (1, s. 13–15.)



KUVA 6. Yksikiteinen (vas.) ja monikiteinen (oik.) aurinkokenno (13)

3.3 Harkosta kennoksi

Seuraavat prosessit ovat hyvin samanlaiset molemmille kennotyypeille. Valmis piitanko tai -harkko leikataan ohuiksi kennoiksi, paksuudeltaan 150–300 mikrometriä. Leikkaamiseen käytetään metallilankaa tai timanttisaha. Sahaamisen takia leikkausprosessissa materiaalihäviöitä on jopa puolet. Yksikiteisten kennojen kanssa materiaalihäviöitä on jopa enemmän, koska

pyöreästä harkosta tasoitetaan reunat paneelin pinta-alan käytön optimoimiseksi. Leikkauspinta saatetaan kiillottaa, mutta viimeaikaisten tutkimusten mukaan kiillottamaton pinta kerää paremmin auringonsäteitä, joten osa valmistajista jättää kyseisen vaiheen tekemättä. (1, s. 14–16; 14.)

Kennoissa on jo valmiina positiivinen varaus aiemmassa vaiheessa lisätyn boorin vuoksi. Jotta pn-liitos pystyy toimimaan, vaatii se negatiivisen varauksen toiselle puolelle. Negatiivinen varaus saadaan aikaiseksi fosforidiffuusiolla. Kennot altistetaan fosforikaasulle lähellä sulamispistettä. Lämpötilaa ja aikaa säätämällä varmistetaan, että fosforia on ohut yhtenäinen kerros. Reunoille päässyt fosfori leikataan pois ja etupuoli käsitellään heijastamista estävällä pinnoitteella. Kaupallisissa kennoissa käytetään tyypillisesti heijastumisen estoon piinitriittiä (silicon nitride). (1, s. 15; 14.)

Pinnoituksen jälkeen molemmille puolille lisätään johteet. Johteina käytetään hopeaa tai hopeaa sisältäviä seoksia sen erinomaisen johtuvuuden takia, jotta johteet veisivät mahdollisimman vähän pinta-alaa varjostamasta kennoa. Kuvassa 6 näkyvät vaakasuuntaiset vaaleat raidat ovat näitä johteita. Kennon takapinnalla hopeaan seostetaan alumiinia, sillä puhdas hopea ei muodosta yhtä hyvää liitosta p-tyypin piin kanssa. (1, s. 14–16 ja s. 21–22; 14.)

4 KOLMANNEN SUKUPOLVEN KENNOT

Ensimmäisen ja toisen sukupolven aurinkokennot perustuvat piihin. Kolmannessa sukupolvessa on menty pidemmälle erilaisten puolijohdemateriaalien kanssa. Kolmannen sukupolven kennoilla ei ole mitään tiettyä yhdistävää tekijää, vaan kolmas sukupolvi käsittää käytännössä kaikki muut jotka eivät sovi ensimmäiseen tai toiseen ryhmään, kuten väriaineherkistetyt, nanoteknologiaan perustuvat, orgaaniset kennot ja muut. (1, s. 18.) Työn tarkoitusta varten keskitytään painettaviin orgaanisiin kennoihin.

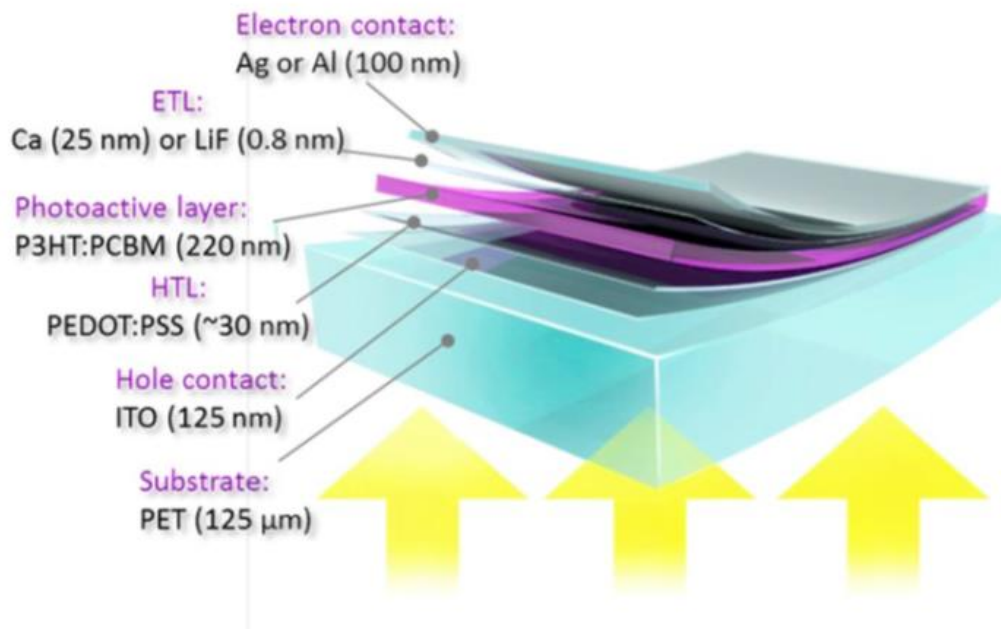
4.1 Historiaa

Ensimmäisen toimivan orgaanisen kaksikerroksisen kennon valmisti Ching W. Tang vuonna 1986. Tämän havainnon jälkeen tutkimuksissa alettiin keskittyä muunnoshyötysuhteen parantamiseen. Laboratoriotutkimuksissa on havaittu jopa yli 10 %:n hyötysuhteita, mutta niitä ei ole vielä pystytty toteuttamaan suuremman skaalan laitteissa (15, s. 16.) Orgaaniset puolijohteet ovat kiinnostavia ominaisuuksiensa takia, ne ovat helppoja ja edullisia valmistaa, taipuisia ja kevyitä (16, s. 3). Materiaalin ominaisuuksia pystytään myös muokkaamaan erilaisin kemiallisin menetelmin huomattavasti enemmän kuin perinteisiä piipohjaisia (16, s. 345).

4.2 Rakenne

Orgaaniset kennot painetaan läpinäkyvälle pohjalle (substanssille), kuten ohuelle ja taipuisalle PET-muoville, joka on kennon rakenteen paksuin osa. Sen päällä on yleensä kerros ITO:a (indiumtinaoksidia) joka painetaan substanssille prosessin alussa. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää substanssia, joka on kauttaaltaan päällystetty ITO:lla ja siitä etsataan haluttu kuvio prosessin alussa. Etsauksen jälkeen toivottu alue peitetään PEDOT:PSS (poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate)) välikerroksella, joka parantaa aukkojen siirtymistä elektrodille. Seuraavaksi painetaan aktiivinen kerros orgaanisella musteella, jossa on seos n- ja p-typin musteita, kuten P3HT (poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) ja PCBM (methanofullerene [6,6]-phenyl C₆₁ butyric acid methyl ester). Aktiivisen kerroksen päälle painetaan Ca (kalsium) tai

LiF (litiumfluoridi) kerros suojaamaan aktiivista kerrosta ja parantamaan elektronien siirtymistä päällimmäiselle kerrokselle. Viimeinen kerros on tyypillisesti hopeaa, ja se toimii toisena elektrodina. Kuvassa 7 on esitelty tarkasteltavan kennon rakenne ja kerrosten tyypilliset paksuudet. (15, s. 28–29.)



KUVA 7. Orgaanisen aurinkokennon rakenne (15, s. 43)

4.3 Painotekniikka

Painaminen tarkoittaa kopioimista tai jäljentämistä, missä musteen avulla siirretään esimerkiksi kirjaimia tai kuvia pinnalle. Painamisen historia alkaa Lähi-Idästä jo 3000 vuotta eaa, mutta suurin askel otettiin vuonna 1439 kun saksalainen Johannes Gutenberg keksi ensimmäisen painokoneen. Painotekniikka on kehittynyt siitä eteenpäin monenlaisiin sovellutuksiin, joista yksi on elektroniikka. Painettavan elektroniikan hyöty on siinä, että se voidaan toteuttaa nopeasti ja edullisesti joustaville materiaaleille. (15, s. 31; 17, s. 10.)

4.3.1 Rullalta rullalle

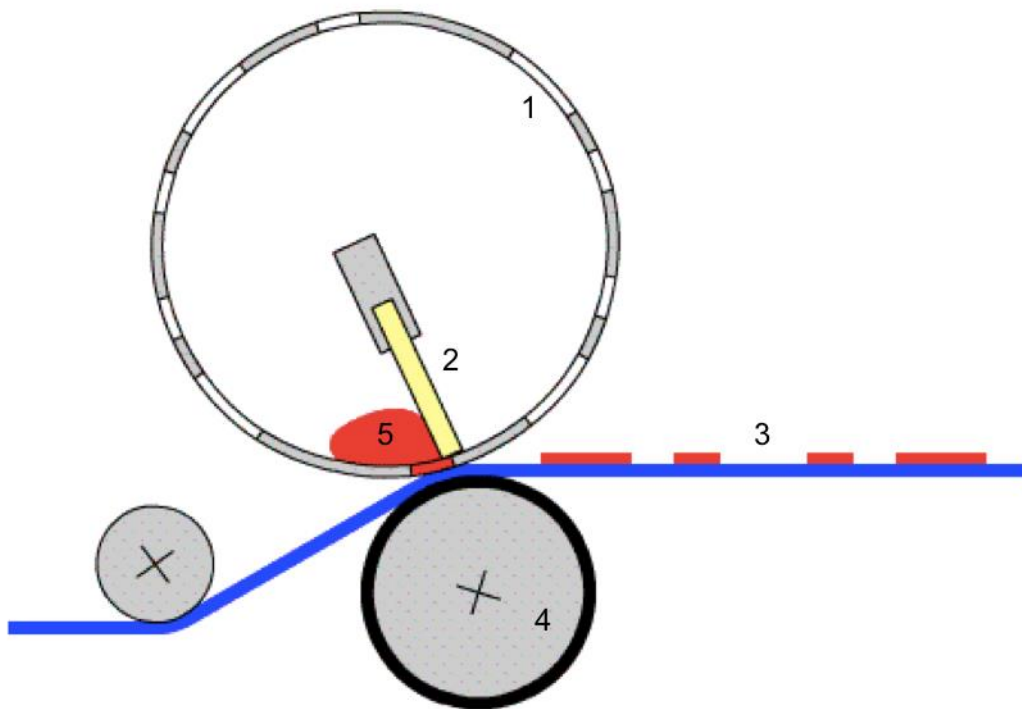
R2R- eli rullalta rullalle (roll to roll) -painomenetelmää voidaan käyttää painettavassa elektroniikassa. Substanssi on rullalla, ja sitä syötetään painoprosessiin ja sen jälkeen toiselle rullalle. Rullalta rullalle -

painomenetelmässä voidaan käyttää useita erilaisia painotyypppejä, kuten silkkipaino (screen printing), syväpaino (gravure printing) ja kohopaino (flexo printing). Työssä tarkasteltavassa kennotyypissä käytetään vain silkkipainoa ja syväpainoa. (17, s. 10–11; 18.)

4.3.2 Silkkipaino

Silkkipaino on yksi vanhimmista painomenetelmistä, ja sitä käytetään nykyään useissa eri sovellutuksissa. Silkkipainossa käytetään sapluunaa, jossa on aukko tai aukkoja halutussa muodossa. Sapluunan päälle kaadetaan mustetta, jota painetaan lastalla aukkojen läpi. Tämä voidaan toteuttaa joko tasolla (flat bed) tai rullalla (rotary). (15, s. 31; 17, s. 11–12.)

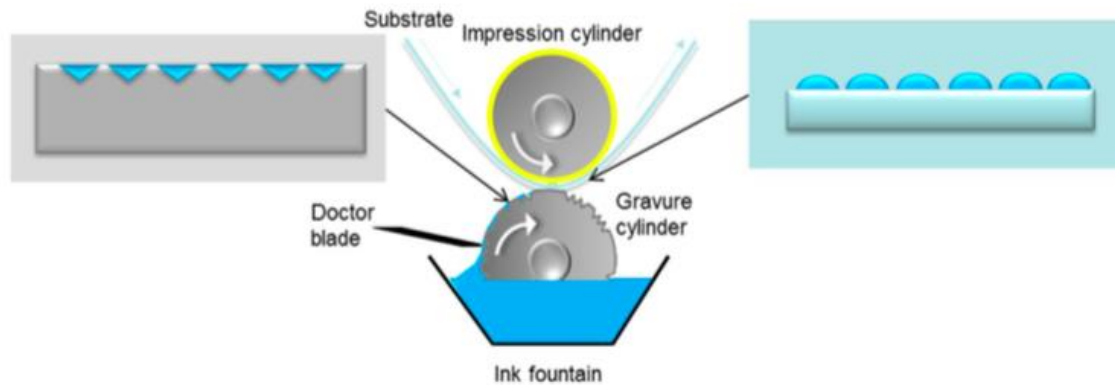
Silkkipainoa käytetään R2R-menetelmässä musteilla (5), joilla on korkea viskositeetti. Painossa käytetään rullamaista sapluunaa (1), jolloin painolasta (2) pysyy paikoillaan, kun sapluuna pyörii vastapainosylinteriä (4) vasten painettavan substanssin (3) kulkiessa välissä. Lopuksi muste kuivataan uunissa. (17, s. 11–12.) (Kuva 8.)



KUVA 8. Pyörivän silkkipainon periaatekuva (kuivausvaihe puuttuu) (19)

4.3.3 Syväpaino

Syväpainossa haluttu muoto on kaiverrettu pyörivään sylinteriin (gravure cylinder), jota painossa käytetään. Painosylinterin alla on musteallas (ink fountain), josta muste tarttuu sylinterin koko pinnalle, myös kaivertamattomalle alueelle. Ylimääräinen muste poistetaan kaavinterällä (doctor blade), jolloin vain pintaan kaiverrettuihin ”kuppeihin” jää mustetta. Painettava substanssi (substrate) kulkee kuviosylinterin ja vastapainosylinterin (impression cylinder) välissä, jolloin muste tarttuu painettavaan materiaaliin. Tämän jälkeen se syötetään uuniin kuivumaan. (15, s. 32–33.) (Kuva 9.)



KUVA 9. Syväpainon prosessikuva (kuivausvaihe puuttuu) (15, s. 32)

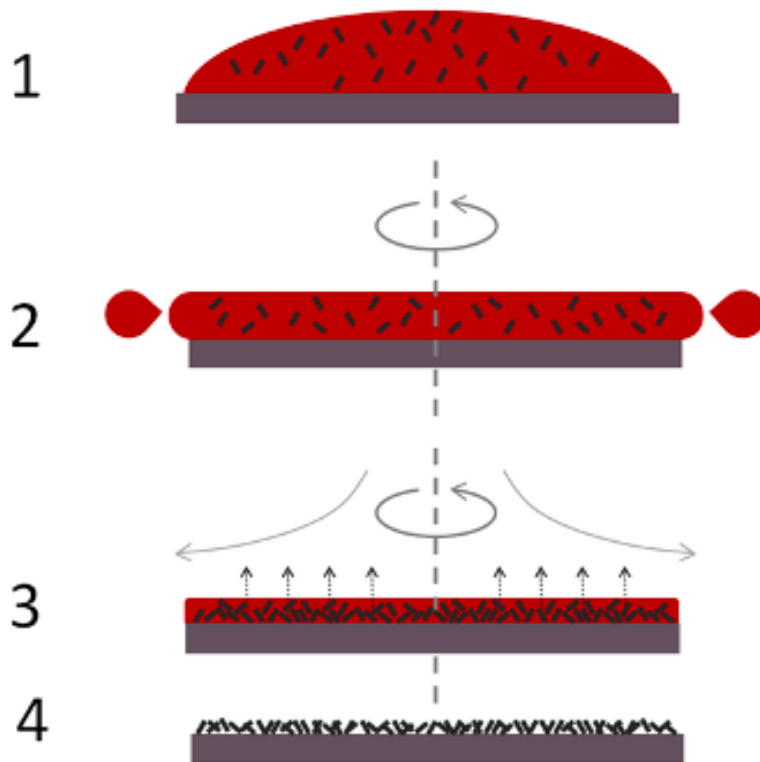
4.4 Musteista kennoksi

PET-muovi on kauttaaltaan pinnoitettu ITO:lla. Kuviointia varten ylimääräinen ITO puhdistetaan pois etsaamalla hapolla. Syväpainolla painetaan PEDOT:PSS ja aktiivinen orgaaninen P3HT:PCMB-kerros painetaan myös syväpainolla ja kuivatetaan uunissa. Silkkipainolla painetaan elektronien siirtoa avustava kerros sekä päällimmäinen elektrodi. Tämän kerroksen jälkeen kenno on valmis päällystettäväksi ja käyttöön. (15, s. 43–44; 18.) Päällystäminen on tärkeää kahdesta syystä; Se estää hapen ja veden pääsyn kennoon, mikä lyhentäisi käyttöikä. Toisekseen päällystäminen suojaa pintaa mekaaniselta hankaukselta. (16, s. 580.) Aktiivinen kerros on herkkä hapelle ja kosteudelle, joten osa prosessista tehdään tyypellä täytetyssä ilmatiiviissä ympäristössä (20).

4.5 Spin coating

Spin coating on yksi yleisimmistä tavoista ohuiden kerrosten levittämiseen erilaisten aineiden päälle. Prosessi on yksinkertainen, ja sitä käytetään paljon orgaanisessa elektroniikassa sekä nanoteknologiassa. (21.)

Spin coating toimii yksinkertaisella periaatteella. Substanssi päällystetään musteella, joka on liuotettuna haihtuvaan liuokseen (1). Alustaa pyöritetään, jotta muste leviää tasaisesti ja ylimääräinen tippuu reunoilta yli (2). Ilmavirta haihduttaa musteen liuottimen (3) jättäen toivotut molekyylit substanssin pinnalle (4). (21.) (Kuva 10.)



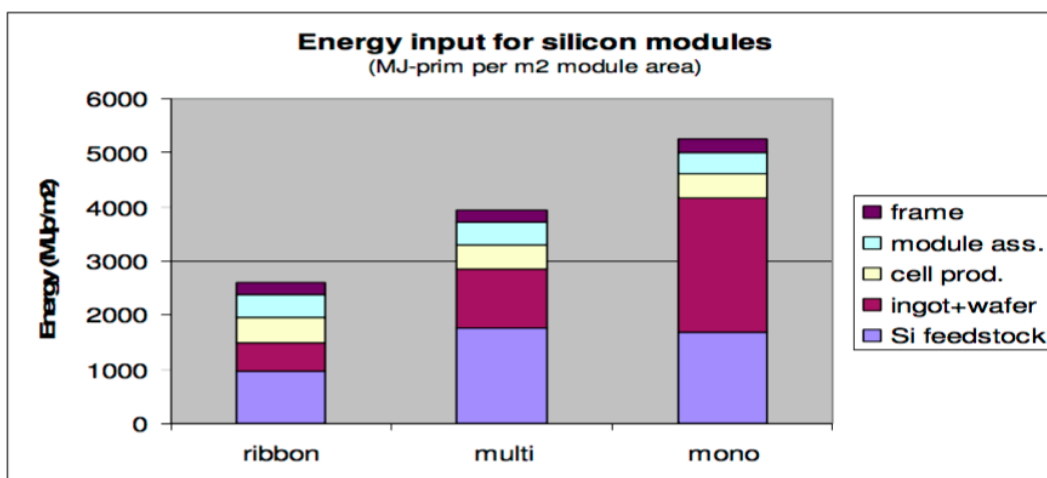
KUVA 10. Spin coatingin teoriakuva (21)

5 ENERGIANKULUTTAJAT VALMISTUSPROSESSISSA

5.1 Piikennot

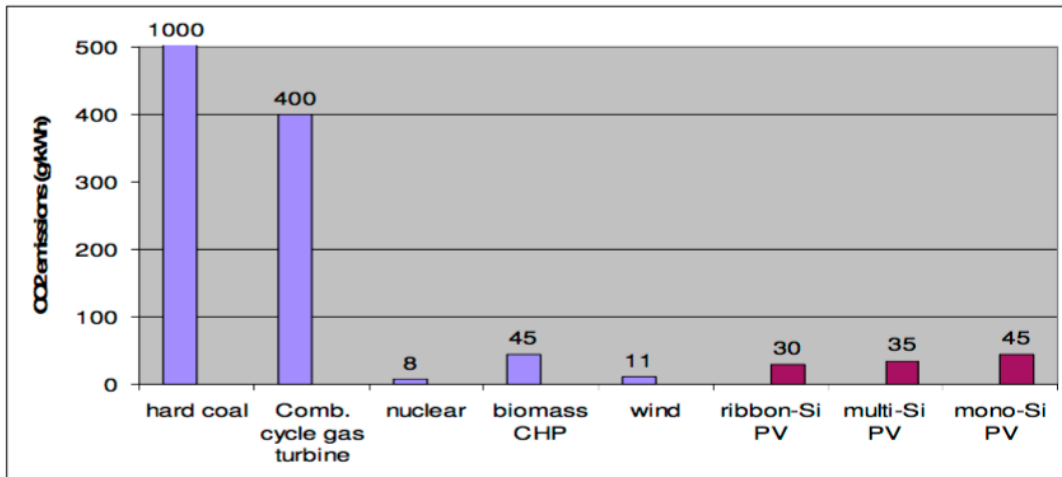
Tutkimuksessa (22) tehtiin tulosten vertailun helpottamiseksi seuraavia oletuksia: yhdessä paneelissa oletettiin olevan 72 kennoa ja yhden kennon pinta-alaksi oletettiin 125 x 125 mm ja paksuudeksi 270–300 mikrometriä. Paneeleita tutkittiin laminoituina ja lasipäällysteisinä sekä alumiinitelineellä asennettuna ja ilman telinettä. Hyötysuhteet arvioitiin kaupallisesti saatavilla olevien paneelien perusteella. Käyttöiäksi arvioitiin 30 vuotta ja invertterille 15 vuotta, minkä uusiminen kerran on huomioitu laskuissa. Multi-si:n hyötysuhteeksi saatiin 13,2 % ja mono-si 14 %. (22, s. 1.)

Kuvassa 11 esitellään eriteltynä nauhapiin, monikiteisen ja yksikiteisen piimoduulin valmistamiseen kulunut primäärienergia megajouleina (MJ) verrattuna moduulin pinta-alaan neliömetreinä (m²). Monikiteisellä ja yksikiteisellä piillä muut valmistuksen osat harkon tekemistä ja sahaamista levyiksi lukuun ottamatta vievät yhtä paljon energiaa, sillä prosessit ovat samanlaisia. Yksikiteisen suurempi osuus johtuu suuresta määrästä energiaa, joka kuluu harkon kasvattamiseen. On kuitenkin mahdollista, että tulevaisuudessa (tutkimus tehty 2004) tästä kiteen kasvattamisesta saadaan energiatehokkaampaa paremmalla laitteistolla. (22, s. 4.)



KUVA 11. Moduulin valmistamiseen käytetty primäärienergia (22, s. 3)

Hiilijalanjälkeä määritettäessä on otettava huomioon muutakin kuin pelkästä valmistuksesta tulevat päästöt. Kuten on aiemmin todettu yksikiteisellä kennolla olevan parempi hyötysuhde, hiilidioksidipäästöt tasoittuvat, kun vertaillaan niiden tuottamaa energiaa. Kuvassa 12 näkyy, kuinka ero tasoittuu. Multi-si kennolla päästöt ovat 35 g/kWh ja mono-si:llä 45 g/kWh. Kuvassa 12 on vertailun vuoksi myös muita energiantuotantomuotoja. (22, s. 4–6.)



KUVA 12. Aurinkopaneeleiden hiilidioksidipäästöt verrattuna muihin energiantuotantomuotoihin (22, s. 5)

Kuvan 12 tulokset on laskettu Etelä-Euroopan säteilylle (1700 kWh/m²/a) 30 vuoden eliniällä. (14.) Suorituskykyä todellisen ja teoreettisen tuotannon suhteen on käytetty kerrointa 0,75, jossa on otettu huomioon esimerkiksi lämpenemisestä aiheutuvat häviöt (14; 24, s. 2.) Pohjois-Euroopassa säteilyn määrä on noin 1000 kWh/m²/a, jolloin tulokset muuttuvat. Pelkkä säteilyn määrä ei ole kuitenkaan suoraan verrannollinen tuotetun energian määrään, sillä kylmänä aurinkoisena talvipäivänä paneelien hyötysuhteet kasvavat ja lumen heijastavien ominaisuuksien vuoksi vastaanotettu säteilyn määrä kasvaa. (23.)

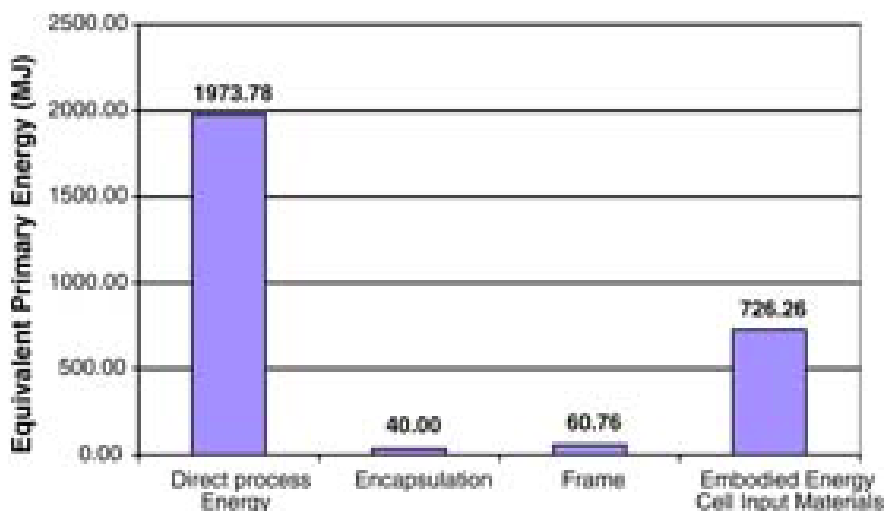
5.2 Orgaaniset kennot

Tutkimuksessa (20) käydään läpi orgaanisten kennojen tyypillinen tuotantoprosessi laboratorio-olosuhteissa. Näiden tulosten perustella voidaan päätellä ja laskea suuremman mittakaavan prosessia. Tässä työssä on

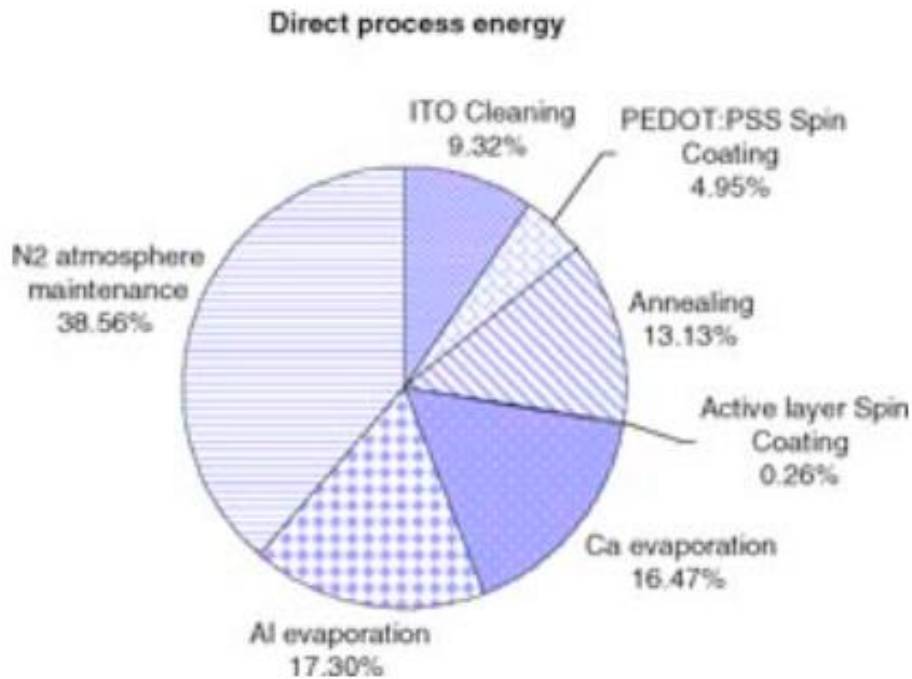
sovellettu valmistusprosessia hieman aiemmin työssä kuvailusta rullalta rullalle -menetelmästä, sillä kenno on tehty lasialustalle spin coatingilla. Prosessi on kuitenkin muutoin hyvin samankaltainen. Lasin päällä on käytetty ITO:a, etuelektrodina PEDOT:PSS, aktiivisena kerroksena P3HT:PCMB ja takaelektrodina kalsiumia ja alumiinia. Laskuissa on otettu huomioon se, että 1 cm² kennon valmistamisessa laitteistoa ei ole käytetty maksimikapasiteetillaan. (20.)

Tutkimuksessa käytetyssä laboratoriossa oli mahdollista valmistaa 1 cm²:n kokoisia kennoja spin coatingilla. Tämä menetelmä on skaalattavissa 100 cm² kokoon. Spin coating on epätehokas valmistustapa verrattuna esim. rullalta rullalle -prosessiin, joten energiankulutusta voitaisiin saada alemmaksi todellisuudessa. Kokonainen moduuli olisi 1 m², jonka pinta-alasta 90% olisi aktiivista aluetta. (20.)

Kuvassa 13 on esitelty yhden moduulin neliömetrin kokoisen (90% aktiivista aluetta) moduulin valmistamiseen käytetty primäärienergian määrä megajouleina (MJ). Kokonaisuudessaan yhteen moduuliin on siis kulunut noin 2800 MJ tai 777,77 kWh primäärienergiaa. Kuvassa 14 on eritelty yksityiskohtaisemmin valmistusprosessin kulutuskohteet. (20.)



KUVA 13. Moduulin valmistamiseen käytetty primäärienergian määrä (20)



KUVA 14. Prosessin energiankuluttajat eriteltynä (20)

Hiilijalanjälkeä laskettaessa on orgaanisen moduulin eliniäksi odotettu 15 vuotta ja hyötysuhteina käytettiin 5%:a ja 10%:a. Säteilynä käytettiin Etelä-Euroopalle tyypillistä arvoa 1700 kWh/m²/a. Hiilidioksidipäästöjen laskemisessa käytettiin Euroopan sähköntuotannon hiilidioksidipäästöjen keskiarvoa, joka on 411,44 g/kWh (vuonna 2006). (20.) Suorituskykynä teoreettisen ja todellisen tuotannon suhteen käytettiin 0,8 (häviöinä esim. lämmön aiheuttama suorituskyvyn heikentyminen), joka on korkea mutta mahdollinen (24, s. 2.) Näillä arvoilla saatiin 5% hyötysuhteen moduulille hiilidioksidipäästöiksi elinaikana 109,84 g/kWh ja 10% hyötysuhteella 54,92 g/kWh (20).

6 KIERRÄTYS

Aurinkosähköisiä laitteita, kuten muitakaan sähkölaitteita ei saa EU:n alueella heittää kaatopaikalle, vaan ne tulee hävittää elektroniikkajätteenä (25, s. 453.) Tässä luvussa käsitellään lyhyesti, mitä käytöstä poistamisen jälkeen tapahtuu.

6.1 Ensimmäinen sukupolvi

Aurinkopaneelien kierrätys ei ole toistaiseksi ollut kovin suuressa tarpeessa, sillä oletettu elinikä on vähintään 25 vuotta. Aurinkopaneelit alkoivat yleistyä 1990-luvulla, joten silloin käyttöönotetut paneelit alkavat hiljalleen tulla elinikänsä päähän. Vuodesta 2002 alkaen käytöstä poistettujen laitteiden kierrätyksen parantamista on tutkittu Saksassa Freibergissä valtion rahoittamana, missä nykyinen tekniikka mahdollistaa jopa 95 % kierrätyksen. Kyseisessä prosessissa ensimmäisenä poistetaan muoviosat ja sen jälkeen poistetaan kehykset ja lasiosat, jotka lajitellaan ja kierrätetään. Toisessa vaiheessa rikkiäiset ja kokonaiset kennot otetaan talteen ja etsataan. Tämä pii voidaan sulattaa ja käyttää uudelleen, mikä säästää valtavia määriä energiaa täysin uusiin osiin verrattuna. (26.)

Käytöstä poistettujen paneelien kerääminen ja kierrätys on kannattavaa ekologisesta ja rahallisesta näkökulmasta, sillä jopa yli 95% materiaaleista on kierrätettäviä ja uudelleenkäytettäviä. Tämä muuttaa koko aurinkoenergian käytön energiatasapainoa, sillä näistä kierrätetyistä materiaaleista tehdyt aurinkopaneelit tuottavat kolmasosassa ajasta valmistamiseen käytetyn energian takaisin verrattuna uusiin laitteisiin. Ne tulevat myös halvemmaksi. (26.)

6.2 Kolmas sukupolvi

Suurin osa orgaanisen kennon painosta muodostuu kierrätettävästä PET-muovista. Toistaiseksi orgaaniselle elektroniikalle ja siinä esiintyville materiaaleille ei ole varinaista kierrätys suunnitelmaa. Kierrättäminen saattaa vaatia erilaisia orgaanisia liuottimia yksittäisten aineiden erottamiseksi, mitkä voivat olla ympäristölle myrkyllisiä sellaisenaan. Tällä hetkellä paras ratkaisu

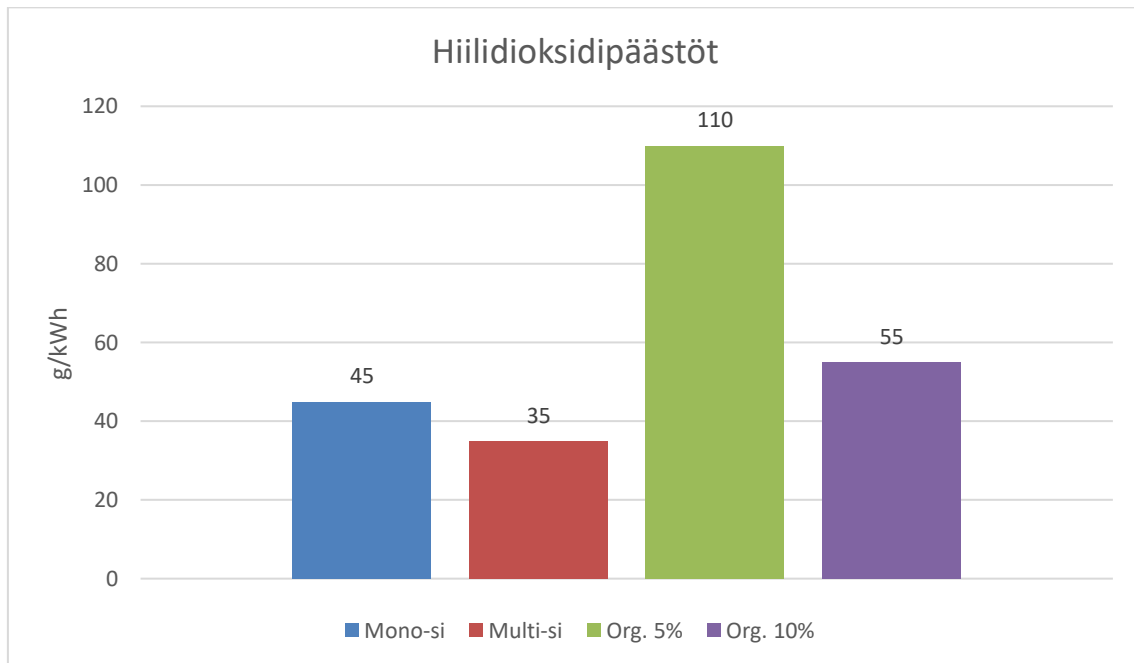
vaikuttaisi olevan hallitusti toteutettu polttaminen. Polttamisen jälkeen metallit voidaan kerätä ja haitallisten aineiden pääsy luontoon estää. Loput osat poltettuna tuottavat lämpöä, josta voidaan edelleen tuottaa sähköä. Väärin hävittäminen, kuten kaatopaikalle vieminen, voi vapauttaa erilaisia ympäristömyrkyjä ja raskasmetalleja luontoon niillä alueilla joissa tarpeeksi korkeatasoisia polttolaitoksia ei ole. (25, s. 452–454.)

7 TULOKSET

Taulukkoon 1 on koottu edellisissä luvuissa saavutetut tulokset ja kuvaan 15 pylväskaavio vertailun visualisoimiseksi.

TAULUKKO 1. Primäärienergiankulutus ja hiilidioksidipäästöt

	MJ/m ²	g/kWh
Mono-si 14%	5500	45
Multi-si 13,2%	4000	35
Orgaaninen 5%	2800	110
Orgaaninen 10%	2800	55



KUVA 15. Erialaisten kennotyyppien elinkaaren hiilidioksidipäästöt

Tuloksien perusteella piipohjaisten paneelien hiilidioksidipäästöt ovat elinkaaren aikana matalammat kuin orgaanisilla kennoilla. Primäärienergiankulutuksessa tulleet erot tasoittuvat hyötysuhteen ja eliniän myötä. Tuloksia tulkittaessa täytyy ottaa huomioon se, että orgaanisissa kennoissa on käytetty spin coatingia energiatehokkaamman rullalta rullalle -tekniikan sijaan. Todellinen hyötysuhde on nykyisillä kennoilla kuitenkin lähempänä 5 %:a kuin 10 %:a. Tuotantomenetelmiä ja raaka-aineita on useita erilaisia valmistajasta riippuen. Tässä työssä oli tutkimuksen alla vain yksi tyyppi ja valmistaja.

Piipohjaisissa paneeleissa materiaalit ovat hyvin pitkälti kierrätettäviä, mikä antaa tulevaisuuden kannalta ison etulyöntiaseman hiilidioksidipäästöissä orgaanisiin kennoihin verrattuna. Uusienkin valmistuksessa jatkuvatoiminen kiteen kasvattaminen voisi vähentää energiankulutusta jopa 30 % nykyisestä, jossa yhden kiteen valmistuksen jälkeen uuni on jäähdytettävä ja ladattava uudelleen. (27.)

8 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli vertailla erilaisten aurinkokennotyyppien valmistamisesta syntyvien hiilidioksidipäästöjen määrää ja jakaa se tuotettua energiaa kohden elinkaaren ajalle. Aurinkoenergiaa kutsutaan päästöttömäksi, mitä se toki on energiantuotantovaiheessa, mutta valmistuksesta aiheutuvaa energiankulutusta ja hiilidioksidipäästöjä ei oteta huomioon lainkaan.

Orgaaninen aurinkoenergia kuulostaa vihreältä ja ekologiselta energiantuotannolta, mutta todellisuudessa se häviää vertailussa reilusti piipohjaisille paneeleille. Orgaaninen aurinkokennotekniikka on suhteellisen uutta ja vielä mahdollisesti paljon kehittyvää, eli tässä opinnäytetyössä saavutetut tulokset saattavat muuttua tulevien vuosien aikana huomattavan paljon. Puhtaasti hiilidioksidipäästöjen kannalta orgaaninen tekniikka häviää, mutta se ei ota huomioon taipuisuuden ja keveyden tuomia mahdollisuuksia erilaisiin käyttökohteisiin. Tulevaisuudessa käyttökohteita voivat olla esimerkiksi ikkunat ja tekstiilit.

Opinnäytetyön lopputulos oli odotuksien vastainen. Suurimmat erot aiheuttivat yksinkertaiset syyt, elinikä ja hyötysuhde. Piipohjaiset paneelit ovat pitkäikäisiä ja toimivat korkeammalla hyötysuhteella, eivätkä ohuet orgaaniset kennot toistaiseksi pääse samoihin lukemiin.

LÄHTEET

1. Kauranen, Joonas 2012. Valosähköisten aurinkopaneelien hyötysuhteet. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energiatekniikan koulutusohjelma.
2. What are the most efficient solar panels on the market? Energysage. 1.1.2018. Saatavissa: <https://news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/>. Hakupäivä 2.3.2018.
3. Dim Light Amorphous Thin Film Solar Cell. Xiamen Mars Rock Science Technology Co., Ltd. Saatavissa: <http://marsrock.company.weiku.com/item/Dim-Light-Amorphous-Thin-Film-Solar-Cell-5581358.html>. Hakupäivä 2.3.2018.
4. The difference between solar cells and solar panels. RGS ENERGY. 2015. Saatavissa: <https://rgsenergy.com/how-solar-panels-work/the-difference-between-solar-cells-and-solar-panels/>. Hakupäivä 11.3.2018.
5. Organic Solar Cells. VTT. Saatavissa: <http://www.vttresearch.com/services/digital-society/wearable-technology/autonomy-of-energy/printed-solar-cells>. Hakupäivä 2.3.2018.
6. Aurinkopaneelin toimintaperiaate. 2010. Suntekno Oy. Saatavissa: <http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>. Hakupäivä 7.9.2017.
7. Printing Organic solar cells at VTT's pilot factory. Video. VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, 2015. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=sGbAVkkn9Os>. Hakupäivä 15.11.2017.
8. Lehtonen, Elina 2012. Peryleeni-imidi-fullereenidyadin synteesi ja toiminta orgaanisessa aurinkokennossa. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Luonnontieteiden ja ympäristötekniikan tiedekunta.

9. Organic photovoltaics. Sigma-Aldrich. Saatavissa: <http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/organic-electronics/opv-tutorial.html>. Hakupäivä 2.10.2017.
10. Baker, Alyssa 2016. A History of Solar Cells: How Technology Has Evolved. Saatavissa: <https://www.solarpowerauthority.com/a-history-of-solar-cells/>. Hakupäivä 5.3.2018.
11. Silicon. How products are made. Saatavissa: <http://www.madehow.com/Volume-6/Silicon.html>. Hakupäivä 13.9.2017.
12. Solar energy 101. How we make solar panels. Solar World global. Saatavissa: https://www.solarworld-usa.com/solar-101/making-solar-panels#Step_1:_Crystal_growing. Hakupäivä 13.9.2017
13. Monocrystalline vs. polycrystalline solar panels. SolarQuotes. Saatavissa: <https://www.solarquotes.com.au/panels/photovoltaic/monocrystalline-vs-polycrystalline/>. Hakupäivä 14.9.2017.
14. Solar cell. How products are made. Saatavissa: <http://www.madehow.com/Volume-1/Solar-Cell.html>. Hakupäivä 18.9.2017
15. Apilo, Päivi 2015. Roll-to-roll printing of organic photovoltaic cells and modules. Väitöskirja. Oulu: Oulun yliopisto ja VTT.
16. Brabec, Christoph – Dyakonov, Vladimir – Scherf, Ullrich, 2008. Organic Photovoltaics: Materials, Device Physics, and Manufacturing Technologies. Toinen painos. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
17. Väänänen, Ari J 2015. Konenäkö painettavassa elektroniikassa R2R-painokoneella. Opinnäytetyö. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, Tietotekniikan koulutusohjelma.

18. Printing Organic solar cells at VTT's pilot factory. Video. VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, 2015. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=sGbAVkkn9Os>. Hakupäivä 15.11.2017.
19. Screen printing press. Gif. Nippon Bunkaseiko Co., Ltd. 2015. Saatavissa: <http://www.npt-print.co.jp/main/animation/SC-ROT01.gif>. Hakupäivä 18.1.2018.
20. García-Valverde, Rafael – Cherni, Judith A. – Urbina, Antonio 2010. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Life cycle analysis of organic photovoltaic technologies. 18. painos. Sivut 535 – 558. New York: John Wiley & Sons, Ltd.
21. Spin coating general theory. Ossila. Saatavissa: <https://www.ossila.com/pages/spin-coating>. Hakupäivä: 18.2.2018.
22. Alsema, Erik – de Wild-Scholten, Mariska 2006. Environmental Impacts of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production. Saatavissa: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.491.3389&rep=rep1&type=pdf>. Hakupäivä 16.1.2018.
23. Kavadias, Kosmas 2017. 5G00BI39, Aurinkoenergia 3 op. Opintojakson luennot keväällä 2017. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu.
24. Performance Ratio. SMA Solar Technology AG. Saatavissa: <http://files.sma.de/dl/7680/Perfratio-TI-en-11.pdf>. Hakupäivä 16.2.2018.
25. Nisto, Giovanni – Lupo, Donald – Ganz, Simone. 2016. Organic and Printed Electronics: Fundamentals and Applications. Sivut 452–454. Singapore: Pan Stanford.
26. Conradi, Kerstin. 2010. Recycling Photovoltaic Modules. Saatavissa: http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Englische_Infos/projekt_0210_engl_internetx.pdf. Hakupäivä 11.3.2018.

27. Fickett, Bryan – Mihalik, G 2001. Multiple batch recharging for industrial CZ silicon growth. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022024801009563>. Hakupäivä 16.1.2018.