Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Valosähköisten aurinkopaneeleiden hyötysuhteet

Efficiencies of photovoltaic solar panels

Työn tarkastaja: Ahti Jaatinen-Värri

Työn ohjaaja: Ahti Jaatinen-Värri, Aki Grönman

Lappeenranta 1.12.2012

Joona Kauranen

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Joona Kauranen

Opinnäytteen nimi: Valosähköisten aurinkopaneeleiden hyötysuhteet

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2012

52 sivua, 7 kuvaa, 5 taulukkoa ja 1 liite

Hakusanat: aurinkokenno, aurinkopaneeli, hyötysuhde

Aurinkopaneeleiden hyötysuhde vaikuttaa niiden tuottaman sähköenergian määrään ja kilpailukykyyn. Aurinkopaneeleiden hyötysuhteeseen vaikuttaa monta tekijää kuten paneelin rakenne ja materiaalit, säteilyn spektri ja tulokulma sekä ympäristön lämpötila.

Aurinkopaneeleiden hyötysuhteet määritetään standardiolosuhteissa, jolloin niitä voidaan vertailla toisiinsa. Todellisissa olosuhteissa paneeleiden toiminta-arvot kuitenkin muuttuvat, joten tietyllä alueella energiantuottohyötysuhde voi poiketa suuresti standardiolosuhteissa määritetystä tehontuottohyötysuhteesta.

Kaupallisesti saatavilla olevissa aurinkopaneeleissa hyötysuhteet ovat parhaimmillaan noin 20 % luokkaa normaalin hyötysuhteen ollessa 13 - 16 % välillä. Ohutkalvoisilla aurinkopaneeleilla hyötysuhteet jäävät matalammiksi. Parhaat kennohyötysuhteet saavutetaan moniliitoskennoilla, jopa 44 %, mutta tällaisten järjestelmien hinnat ovat korkeita, ellei käytetä keskittäviä peilejä tai linssejä.

Viime vuosina kehitys on ollut nopeinta kolmannen sukupolven teknologioilla. Niihin kohdistuu suuria odotuksia ja niiden avulla voidaan ylittää aikaisemmille sukupolville asetetut rajat. Teollisessa tuotannossa näitä ei kuitenkaan toistaiseksi ole paljoa alhaisen hyötysuhteen vuoksi.

SISÄLLYSLUETTELO

Sisällysluettelo **2**

Symboli- ja lyhenneluettelo **4**

1 Johdanto **6**

2 Valosähköisen aurinkopaneelin toiminta **7**
2.1 Valo sisältää energia ... 7
2.2 Heijastuminen, läpäisy, absorptio ... 8
2.3 Valosähköinen ilmiö ... 8
2.4 Puolijohdemateriaalit ... 9
2.5 P-n -rajakerros ... 10
2.6 Jännite-ero hyötykäyttöön ... 10
2.7 Aurinkokennoista aurinkopaneeleihin ... 11

3 Aurinkokennojen valmistus ja raaka-aineet **12**
3.1 Ensimmäisen sukupolven piikennot ... 12
3.1.1 Yksikiteinen piikennomateriaali (m-Si) ... 12
3.1.2 Monikiteinen piikennomateriaali (p-Si) ... 13
3.1.3 III-V –kennot vaihtoehtona piille ... 14
3.1.4 Kennon valmistus ... 14
3.2 Toisen sukupolven ohutkalvoteknologiat ... 16
3.2.1 Amorfinen pii (a-Si) ... 16
3.2.2 II-VI – kennot (CdTe) ... 17
3.2.3 I-III-VI –kennot (CIGS) ... 18
3.3 Kolmas sukupolvi ... 18
3.3.1 Väriaineherkistetyt aurinkokennot (DSSC) ... 19
3.3.2 Orgaaniset aurinkokennot (OPV) ... 19
3.3.3 Kvanttikaivot ja –pisteet ... 20
3.3.4 Moniliitoskennot ... 20
3.4 Kennosta paneeliksi ... 21
3.5 Keskittävä aurinkosähkö CPV ... 22

4 Hyötysuhteen määrittäminen **24**
4.1 Standardi raportointi olosuhteet (SRC) ... 24
4.2 I–V –käyrä ... 26
4.3 Tehontuottohyötysuhde ... 27
4.4 Energiantuotantohyötysuhde ... 28
4.5 Aurinkopaneelin hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät ... 29
4.5.1 Energia-aukot ... 29
4.5.2 Kvanttihyötysuhde ... 30
4.5.3 Lämpötila ... 30
4.5.4 Kennojen rinnan- ja sarjankytkennät ... 31
4.5.5 Säteilyn intensiteetti ... 32
4.5.6 Spektrinen vastaavuus ja absorbtio ... 32
4.6 Teoreettinen maksimi hyötysuhde ... 32

5 Aurinkopaneeleiden hyötysuhteet 35
5.1 Kaupalliset aurinkopaneelit ... 35
5.1.1 Yksikiteisestä piistä valmistetut paneelit (m-Si) ... 36
5.1.2 Monikiteisestä piistä valmistetut paneelit (p-Si) ... 38
5.1.3 Amorfisesta piistä valmistetut ohutkalvopaneelit (a-Si) ... 39
5.1.4 CIGS ja CdTe paneelit ... 39
5.2 Kehitysvaiheessa olevat teknologiat ... 40
5.2.1 Orgaaniset ohutkalvopaneelit ... 40
5.2.2 Väriaineherkistetyt ohutkalvopaneelit ... 41
5.2.3 Kvanttitason ratkaisut ... 41
5.2.4 GaAs ohutkalvopaneelit ... 41
5.3 Parhaat laboratoriossa saavutetut kennohyötysuhteet ... 42

6 Yhteenveto 44

Lähdeluettelo 46

Liite 1. NREL parhaat tutkitut hyötysuhteet. Päivitetty 11/2012. 52

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

A	pinta-ala	[m^2]
E	energia, irradianssi	[eV], [W/m^2]
I	virta	[A]
P	teho	[W]
T	lämpötila	[K], [°C]
V	jännite	[V]

Kreikkalaiset aakkoset

η	hyötysuhde	[%]

Alaindeksit

c	carnot, kylmä
h	kuuma
max	maksimi-
mpp	maksimitehopiste
OC	avoin piiri
SC	oikosulkupiiri
tot	kokonais-

Lyhenteet

AM	ilmamassa (air mass)
a-Si	amorfinen pii
CdTe	kadmium-telluridi
CIGS	kupari-indium-gallium-diselenidi
CPV	keskittävä aurinkosähkö (concentrated photovoltaic)
DSSC	väriaineherkistetty aurinkokenno (dye sentisized solar cells)
FF	täyttökerroin (fill factor)
HIT	(heterojunction with intrinsic thin layer)
HOMO	korkein täyttymätön orbitaali (highest occupied molecular orbital)

LUMO	matalin täyttymätön orbitaali (lowest unoccupied molecular orbital)
m-Si	yksikiteinen pii (monocrystalline silicon)
NOCT	nimellistoimintalämpötila (nominal operating cell temperature)
p-Si	monikiteinen pii (polycrystalline silicon)
SRC ja STC	standardi raportointi olosuhteet
μc-Si	mikrokiteinen pii (microcrystalline silicon)

1 JOHDANTO

Lähes kaikki käytetyt energianmuodot pohjautuvat aurinkoon ydin- ja geotermistä energiaa lukuun ottamatta. Vesi, tuuli ja biovoimassa auringon energia kulkee pitkän matkan eri välivaiheiden kautta ennen kuin se voidaan hyödyntää sähkönä. Valosähköiseen ilmiöön pohjautuva aurinkoenergia onkin ainoa, jossa auringon energiaa muunnetaan suoraan sähköenergiaksi. Kappaleessa 2 on selvitetty valosähköisen ilmiön toimintaa.

Kappaleessa 3 on esitelty yleisimmät ja tunnetuimmat aurinkokennoteknologiat ja paneeleiden rakennetta. Jotta aurinkoenergia voisi olla kannattava ja varteenotettava vaihtoehto sähköntuotannossa, tulee paneeleiden hyötysuhteen olla mahdollisimman korkea ja hinnan suhteessa mahdollisimman matala. Tässä työssä päähuomio on kiinnitetty aurinkopaneeleiden hyötysuhteisiin. Hyötysuhteiden vertailun lisäksi on huomiota kiinnitetty hyötysuhteeseen vaikuttavien tekijöiden tunnistamiseen ja niiden merkitykseen. Hyötysuhteen määrittämistä ja hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä käsitellään kappaleessa 4.

Vaihtoehtoisten teknologioiden vertailu on toteutettu parhaita kaupallisesti tarjolla olevia paneeleita ja moduuleita vertailemalla. Vertailussa on käytetty valmistajien ilmoittamia tai valmistajan ilmoittamien tietojen perusteella laskettuja hyötysuhteita. Tulokset on esitetty kappaleessa 5. Paneeleiden vertailun lisäksi on myös tarkasteltu parhaita laboratoriossa saavutettuja kennohyötysuhteita.

2 VALOSÄHKÖISEN AURINKOPANEELIN TOIMINTA

Auringon valon sisältämää energiaa voidaan muuntaa aurinkokennoilla sähköksi. Tämä perustuu valosähköiseen ilmiöön. Jotta paneelin toimintaa ja hyötysuhteen rajoituksia voidaan ymmärtää paremmin, on valon luonnetta, valosähköistä ilmiötä ja puolijohdeteknologian toimintaa selvennetty tässä luvussa.

2.1 Valo sisältää energia

Valolla, kuten kaikella sähkömagneettisella säteilyllä, on oma aallonpituutensa. Valon sisältämiä eri aallonpituuksia kuvataan aallonpituusjakaumalla – valon spektrillä. Valon aallonpituusjakauma on riippuvainen säteilijän pintalämpötilasta, joka on auringolla noin 5778 K. Auringon säteilystä vain pieni osa kohdistuu maan pinnalle, suurimman osan hävitessä eri suuntiin avaruuteen. [Williams]

Säteilyn kaksoisluonteen vuoksi valoa voidaan myös käsitellä partikkeleina, valokvantteina eli fotoneina. Yksittäisen fotonin sisältämä energia määräytyy fotonin aallonpituuden mukaan. Mitä pienempi aallonpituus, sitä suurempi on fotonin energia. Fotonit voivat materiaan törmätessään hidastua tai absorboitua kokonaan. Tällöin fotonin energia siirtyy atomiin elektronivyöhykkeelle. Maahan kohdistuva säteily vaimenee ilmakehässä ilmakehän kaasujen absorboidessa fotoneja joilla on sopiva aallonpituus. Tästä johtuen maan pinnalla tarkasteltaessa on auringon säteilyspektrissä aukkoja tai kuoppia aallonpituuksilla, jotka vastaavat ilmakehän kaasuja kuten vesihöyryä ja hiilidioksidia. [Labouret & Villoz 2010, 31–32, 39–40]

Myös säteilyn tulokulma vaikuttaa säteilyn voimakkuuteen – intensiteettiin. Suoraan kohtisuoraan tuleva säteily kulkee lyhimmän matkan. Lähempänä napoja säteily joutuu kulkemaan pidemmän matkan ilmakehässä ja suurempi osa siitä absorboituu ilmakehän kaasuihin. Lisäksi kokonaisuudessaan matka on pidempi, joten vastaava säteilyteho jakautuu suuremmalle pinnalle. Hyötysuhteen määrityksessä käytettävissä standardisoiduissa spektreissä myös säteilyn keskimääräinen tulokulma on pyritty ottamaan huomioon ilmamassan (airmass) muodossa. [Labouret & Villoz 2010, 28-29]

2.2 Heijastuminen, läpäisy, absorptio

Pintaan kohdistuvaa säteilyä kutsutaan irradianssiksi. Kun säteily osuu aineen pintaan, se voi käyttäytyä kolmella tavalla: heijastua, läpäistä tai absorboitua. Aurinkopaneeleissa heijastuminen pyritään minimoimaan, jotta mahdollisimman suuri osa energiasta saadaan hyödynnettyä. Vastaavasti absorptio pyritään maksimoimaan, sillä vain absorboituneet fotonit luovuttavat energiaa kennoon. Absorptiossa fotonin energia imeytyy aineeseen ja muuttaa muotoaan. Valokvantti antaa elektroniin törmätessään sille energiaa lisäten lämpöliikettä eli kappaleen lämpötilaa. Tästä johtuen auringon valo tuntuu lämpimältä. [Labouret & Villoz 2010, 39-40]

2.3 Valosähköinen ilmiö

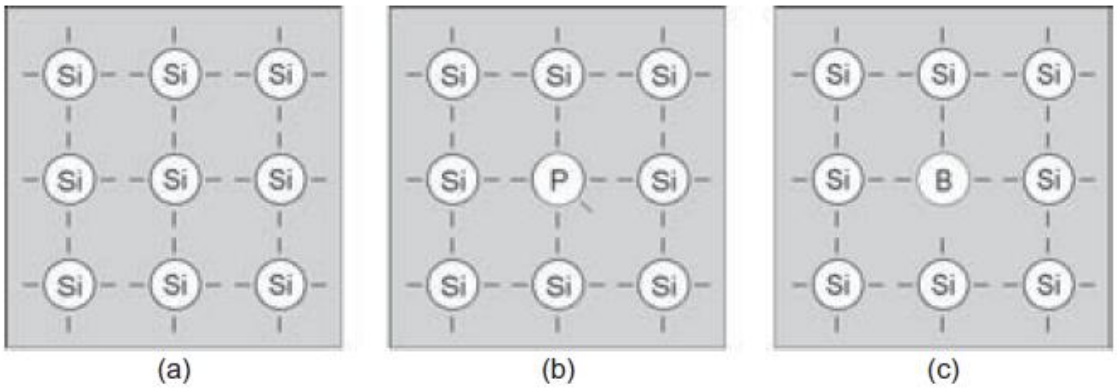
Mikäli fotonilla on tarpeeksi paljon energiaa, kykenee se absorboituessaan antamaan elektronille niin paljon energiaa, että se nousee atomin valenssivyöhykkeeltä johtavuusvyöhykkeelle synnyttäen elektroni–aukko parin. Atomin valenssivyöhykkeen ja johtavuusvyöhykkeen välissä on ns. kielletty vyöhyke jolla ei voi olla elektroneja. Energiaa, joka fotonin tulee vähintään luovuttaa elektronin nostamiseksi johtavuusvyöhykkeelle, kutsutaan irrotustyöksi tai energia-aukoksi (bandgap). Tätä ilmiötä kutsutaan valosähköiseksi ilmiöksi. Valosähköinen ilmiö toimii myös toiseen suuntaan, jolloin elektroni pudotessaan johtavuusvyöhykkeeltä valenssivyölle, saa aikaan valoa. [Labouret & Villoz 2010, 42–43, 45]

Johtavuusvyöhykkeellä elektroni ei enää ole sidoksissa atomiin, vaan on vapaa liikkumaan ja kuljettamaan energiaa. Näiden vapaiden negatiivisesti varautuneiden elektronien liikkuminen kohti positiivisen varauksen omaavia aukkoja synnyttää sähkövirran. Jotta elektroni ei heti täyttäisi syntynyttä aukkoa, tulee negatiivinen elektroni ja positiivinen aukko saada kulkemaan poispäin toisistaan. Tämä onnistuu puolijohteilla, joissa varaukset voivat kulkea vain yhteen suuntaan. [Labouret & Villoz 2010, 46]

2.4 Puolijohdemateriaalit

Puolijohdemateriaaleiksi kutsutaan IV -alkuaineryhmän aineita sekä III – V alkuaineryhmien alkuaineiden oikeanlaisia seoksia. Puolijohdemateriaaleilla on sekä johteiden että eristeiden ominaisuuksia ja niiden johtavuutta voidaan säädellä tarkasti, mikä tekee puolijohteista tärkeän materiaalin elektroniikkateollisuuteen. Yleisin puolijohdemateriaali on pii. Kiteisesti järjestäytynyt pii muodostaa kehikon, jossa atomi jakaa neljä valenssielektroniaan neljän muun vierekkäisen atomin kanssa. Näin jokaiselle atomille muodostuu neljä elektroniparia ja valenssivyöhyke tulee täytetyksi. Vastaavasti III-V -alkuaineryhmien materiaaleilla muodostuu kiderakenne jossa on kaksi lomittaista kehikkorakennetta. Näin järjestäytyneenä atomeiden johtavuusvyöllä ei ole yhtään elektronia eikä valenssivyöllä yhtään aukkoa tai ylimääräistä elektronia eli vapaita varauksenkuljettajia, joten tällaisen materiaalin johtavuus on todella huono. Johtavuutta parannellaankin douppaamalla eli lisäämällä puolijohdemateriaaliin epäpuhtauksia. [Labouret & Villoz 2010, 46–47]

Lisäämällä puolijohteeseen III -alkuaineryhmän atomeja saadaan materiaaliin elektronivajausta eli aukkoja, jotka pyrkivät täyttymään ylimääräisillä elektroneilla. Elektronivajauksesta johtuen materiaalilla on positiivinen varaus, joten sitä kutsutaan p-tyypin puolijohteeksi. Vastaavasti lisäämällä V -alkuaineryhmän atomeja, saadaan materiaaliin ylimääräisiä elektroneja, jotka jäävät vapaiksi johtavuusvyölle. Ylimääräisten elektronien synnyttämän negatiivisen varauksen vuoksi tällaista materiaalia kutsutaan n-tyypin puolijohteeksi. Eri tyypin puolijohteiden rakennetta on havainnollistettu kuvassa 1. Sekä aukot että ylimääräiset elektronit toimivat varauksen siirtäjinä. Aukot ovat kuitenkin hitaampia kuin elektronit. [Labouret & Villoz 2010, 47]



Kuva 1 Puolijohdemateriaali: (a) Puhdasta piitä. (b) N-tyypin piitä. (c) P-tyypin piitä. [Labouret & Villoz 2010, 46]

2.5 P-n -rajakerros

Kun n- ja p-tyypin puolijohteet yhdistetään, täyttävät n-tyypin ylimääräiset elektronit p-tyypin aukkoja. Tällöin liitoksen n-puolelle muodostuu positiivinen varaus, kun ytimien varaus on suurempi kuin elektronien. Vastaavasti p-puolelle muodostuu negatiivinen varaus, kun täyttyneiden valenssivöiden varaus ylittää ytimien varauksen. N- ja p-tyypin puolijohteiden liitoskohtaan pn-liitokseen muodostuu rajakerros, jonka sähkökenttä estää varauksia kulkemasta liitoksen yli toiseen suuntaan. Elektronit eivät pääse enää kulkemaan rajakerroksen yli p-puolelle. [Labouret & Villoz 2010, 47]

Aurinkokennoissa puolijohteiden rajakerrosta käytetään hyväksi yhdessä valosähköisen ilmiön kanssa. Kun absorptio tapahtuu rajakerroksessa tai sen läheisyydessä ja sähkökentän avulla syntyneet elektronit ja aukot saadaan kulkemaan eri suuntiin, saadaan kennon pintojen välille aikaan jännite-ero, jota voidaan käyttää hyödyksi sähköenergiana. [Labouret & Villoz 2010, 47]

2.6 Jännite-ero hyötykäyttöön

Aurinkokennon ylä- ja alapinnan välille saadaan siis aikaiseksi jännite-ero eli aurinkokennot ovat jännitelähteitä. Kun kennon ylä- ja alapinnoille lisätään johtavaa materiaalia ja kytketään näiden johteiden väliin kuormaa, syntyy suljettu piiri. Elektroni-aukko parit, jotka eivät kykene yhdistymään puolijohteen rajapinnan yli,

kulkevat johdinten kautta ja yhdistyvät. Näiden varauksenkuljettajien valosähköisessä ilmiössä saama irrotustyön energia saadaan käytettyä sähköenergiana hyödyksi. Suljetussa kierrossa myös puolijohdemateriaalin ominaisuudet pysyvät samoina, sillä jokainen syntynyt elektroni täyttää lopulta yhden syntyneen aukon. [Labouret & Villoz 2010, 46]

2.7 Aurinkokennoista aurinkopaneeleihin

Aurinkokennoilla on kyky tuottaa jännite-ero ja sähköenergiaa. Yksittäiset kennot ovat kuitenkin usein varsin pieniä, korkeintaan kymmeniä neliösenttimetrejä. Aurinkoisellakaan säällä ei yhdessä kennossa aikaan saatu jännite ole kovin suuri, joten tavallisesti kennoja kytketään sarjaan ja rinnan aurinkopaneeleiksi, jotta saadaan riittävä jännite-ero aikaiseksi. Jos aurinkoenergiaa halutaan tuottaa suuremmassa mittakaavassa, voidaan näitä aurinkopaneeleitakin vielä yhdistellä toisiinsa, jotta saadaan haluttu jännite ja virta aikaan.

3 AURINKOKENNOJEN VALMISTUS JA RAAKA-AINEET

Aurinkokennomarkkinoita hallitsevat erilaiset piipohjaiset aurinkokennot, joko yksikiteiset tai monikiteiset. Näitä kutsutaan ensimmäisen sukupolven aurinkokennoiksi. Piin sijaan voidaan myös käyttää III-V -yhdistepuolijohteita kuten Galliumarsenidia. Ohutkalvoiset kennot ovat aurinkokennojen toista sukupolvea ja niiden raaka-aineiden kirjo on laajempi sisältäen kuitenkin myös piipohjaisia ratkaisuja. Ohutkalvoisissa aurinkokennoissa kennon paksuus on vain joitakin mikrometrejä tai nanometrejä. Kolmas sukupolvi eroaa edellisistä huomattavasti toimintaperiaatteeltaan, sillä niissä ei välttämättä tarvita p-n liitosta.

3.1 Ensimmäisen sukupolven piikennot

Vaikka uusia teknologioita ja materiaaleja on tutkittu paljon, vielä nykyäänkin suurin osa aurinkokennoista valmistetaan kiteisestä piistä. Pii on maaperässä hyvin yleinen raaka-aine, mutta sen erottaminen ja puhdistaminen on työlästä ja kallista. Tarvittavan raaka-aine piin tulee olla kyllin puhdasta, sillä liialliset väärät epäpuhtaudet laskevat lopullisen kennon hyötysuhdetta.

3.1.1 Yksikiteinen piikennomateriaali (m-Si)

Yksikiteistä piitä valmistetaan kasvattamalla kidettä Czochralskin menetelmällä. Tässä menetelmässä sulaan piihin kastetaan siemenkide. Tämän jälkeen kidettä nostetaan hitaasti ja sula pii kiteytyy siemenkiteeseen. Tällä prosessilla saadaan yhdestä kiteestä muodostunut harkko tai tanko korkealaatuista puhdasta tai doupattua piitä. [Labouret & Villoz 2010, 55–56]

Noston yhteydessä kidettä pyöritetään hiljaa, jotta kiteytyminen olisi tasaista. Tästä johtuen tangosta tulee pyöreä. Valmiista tangosta leikataan ohuita (150–300 mikrometriä) halkaisijaltaan 100–300 mm kiekkoja. Levyjä leikattaessa materiaalihäviöt ovat huomattavat. P-n rajapinta saadaan aikaan diffusoimalla p-tyypin levyn pintaa V -

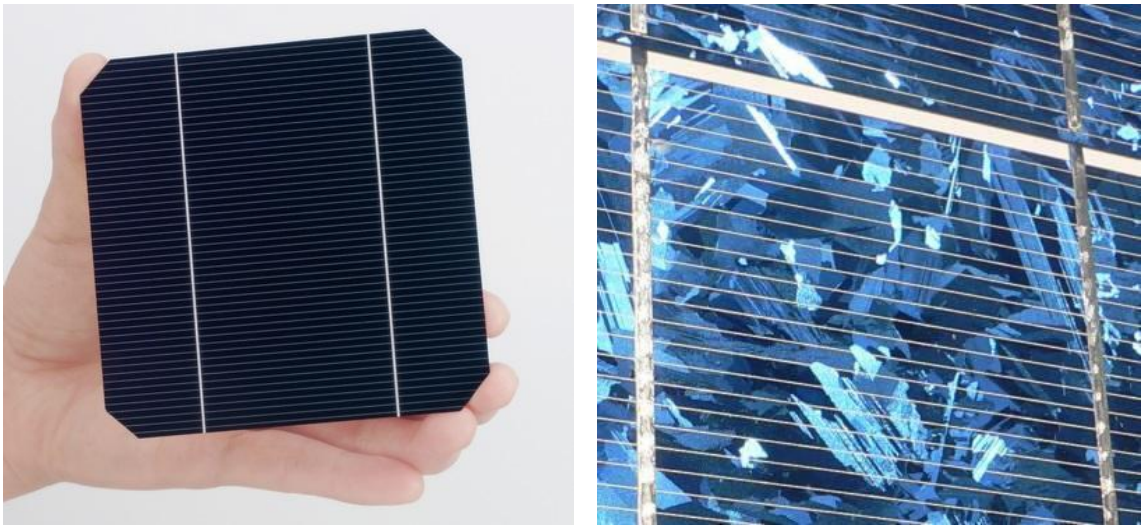
alkuaineryhmän epäpuhtauksia, jotta kiekon pinnalle saadaan ohut n-tyypin kerros. [Labouret & Villoz 2010, 55–56]

Yksikiteisten piikennojen valmistus on tarkkaa ja hidas prosessi, joka vaatii paljon energiaa. Tästä johtuen yksikiteiset kennot ovat melko kalliita. Myös harkosta leikattavien levyjen pyöreä muoto vaikeuttaa kennojen sijoittelua nelikulmaisissa paneeleissa ja väliin jätetäänkin usein tyhjää, mikä laskee paneelin hyötysuhdetta. Vaihtoehtoisesti voidaan pyöreästä levystä leikata nelikulmaisia kennoja, mikä kuitenkin lisää materiaalihäviöitä. Yksikiteiset kennot ovat kuitenkin toimintavarmimpia ja hyötysuhteeltaan hyviä. [Labouret & Villoz 2010, 57]

3.1.2 Monikiteinen piikennomateriaali (p-Si)

Monikiteisessä piissä on nimensä mukaisesti useita pieniä kiteitä. Kiderakenteet ovat sekaisia ja silmin nähtävissä mosaiikkimaisena kuviointina kennon pinnassa. Yksikiteisen ja monikiteisten piikennojen rakennetta on havainnollistettu kuvassa 2. Monikiteistä piitä valmistetaan sulattamalla raaka-ainepiitä astiassa noin 1500 °C lämpötilassa. Raaka-aineeksi käyvät myös jäämät levyn leikkausprosessista. Tämän jälkeen astiaa ja piitä jäähdytetään hiljalleen pinnalta alkaen. Jäähtyvä pii kiinteytyy muodostaen kiteitä. Kemiallisilla ja termodynaamisilla prosesseilla pyritään ohjaamaan epäpuhtaudet astian reunoille sekä vaikuttamaan kiteiden kokoon. Mitä suurempia yksittäiset kiteet ovat, sitä paremmin materiaali soveltuu käytettäväksi aurinkopaneeleiden raaka-aineeksi. [Labouret & Villoz 2010, 54, 57]

Prosessista saadusta nelikulmaisesta harkosta leikataan levyjä samaan tapaan kuin yksikiteisestä harkosta. Monikiteisillä kennoilla on etuna kennon nelikulmainen muoto sekä yksikiteistä halvemmat valmistuskustannukset. Kiteiden hajanaisuus kuitenkin huonontaa materiaalin ominaisuuksia ja hyötysuhdetta. [Labouret & Villoz 2010, 57]



(a) (b)

Kuva 2 (a) Yksikiteinen piikenno. (b) Monikiteisiä piikennoja. [Civicsolar]

3.1.3 III-V –kennot vaihtoehtona piille

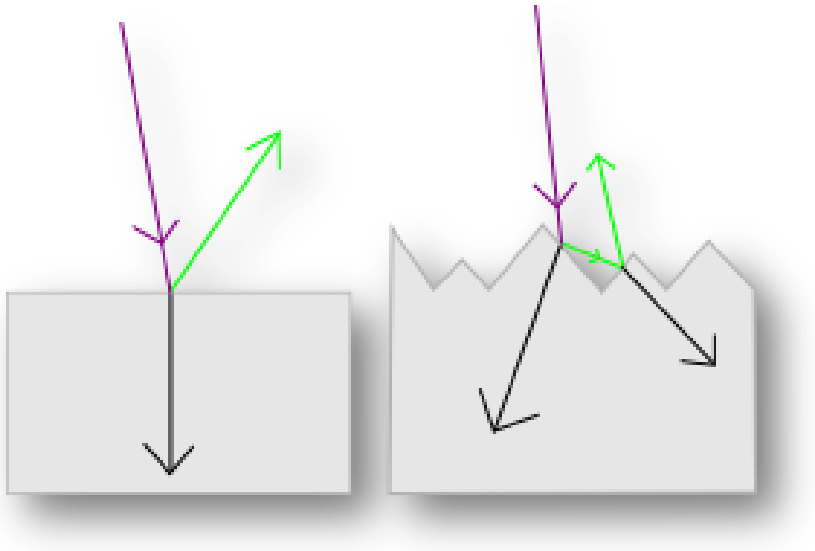
Yhdistelemällä III-V ryhmien alkuaineita saadaan aikaiseksi piitä vastaava kiderakenne, jossa III ja V ryhmän atomit vuorottelevat. Tällainen materiaali toimii puolijohteena puhtaan piin tapaan. Tähän tarkoitukseen käyvät parhaiten Gallium ja arseeni, jotka muodostavat GaAs –kennojen raaka-aineen. Gallium ja arseeni ovat kuitenkin huomattavasti piitä harvinaisempia ja myrkyllisiä, joten vaikka GaAs –kennoilla saavutetaan vastaavia piikennoja parempi hyötysuhde, ovat niiden käyttökohteet yleensä rajallisempia. GaAs materiaaleja käytetäänkin lähinnä keskittävissä moniliitosaurinkopaneeleissa, joissa kustannukset saadaan laskemaan, tai avaruussatelliiteissa, joissa korkea hyötysuhde suhteessa kennon painoon ja kokoon on tärkeää.

3.1.4 Kennon valmistus

Edellä kuvatuilla menetelmillä valmistetaan aurinkopaneeleihin solar-grade luokan piimateriaalia, joka ei ole aivan yhtä puhdasta ja hienoa kuin elektroniikassa käytettävä pii. Seuraavat valmistusvaiheet ovat hyvin samanlaiset sekä yksikiteisellä että monikiteisellä materiaalilla.

Kiekkojen sahauksen vuoksi rikkonainen pinta tasoitetaan. Pintaan etsataan haluttu pintarakenne, jolla pyritään vähentämään heijastusta, kun tuleva säteily osuu useammin pintaan. Lisäksi pintarakenne suuntaa säteilyä materiaalissa niin, että se kulkee mahdollisimman pitkän matkan. Pintarakenteen vaikutusta on havainnollistettu kuvassa 3. [Luque & Hegedus 2004, 269, 273]

Yksikiteisestä piistä valmistettaessa kiderakenteen vuoksi pintarakenteen pyramidit saadaan hyvin säännöllisiksi. Monikiteisen piikiekon pintaan aikaansaatu pintarakenne on vastaavasti epäsäännöllistä ja pinnat eivät ole niin suoria vaan jopa pyöreitä. Tämä heikentää monikiteisen piikennon absorbtiota. [Luque & Hegedus 2004, 285–287]



Kuva 3 Pintarakenteen vaikutus heijastavuuteen

Pn -rajakerros saadaan aikaiseksi fosforidiffuusiolla. Korkeassa lämpötilassa fosfori diffusoituu piikiekon pintaan muodostaen ohuen n-tyypin kerroksen. Kiekon reunoilta n-tyypin kerros tulee leikata pois, jotta se ei toimi rajapinnan ohittavana vastuksena. Kennon etupinnalle suihkutetaan myös heijastumista vähentävä kerros, jolla pienennetään pinnan taitekerrointa. [Luque & Hegedus 2004, , 268, 273–274]

Metalliset johteet lisätään molemmille pinnoille. Etupinnalla tärkeää on että johteen ja kennomateriaalin välinen kontaktivastus olisi mahdollisimman pieni. Johteen resistiivisyyden pitäisi olla pieni, jotta johteita ei tarvittaisi paljoa ja näin ollen ne

varjostaisivat kennoa mahdollisimman vähän. Johteet sisältävät usein hopeaa sen sopivien ominaisuuksien vuoksi. Takapinnalla hopeaan joudutaan kuitenkin seostamaan hieman alumiinia, sillä puhdas hopea muodostaa huonosti kontaktin p-tyypin piin kanssa. [Luque & Hegedus 2004, 274 – 275]

3.2 Toisen sukupolven ohutkalvoteknologiat

Ensimmäisen sukupolven piikennojen valmistuksessa materiaalihävikki on suurta. Tämä johtuu erityisesti sahausprosessista, jossa hävikin osuus on jopa yli puolet materiaalista. Materiaalitehokkuutta on pyritty parantamaan uusilla toisen sukupolven teknologioilla. Suurin hävikin aiheuttaja kiekkojen sahaus on poistettu – puolijohdemateriaali muodostetaan ja kasvatetaan suoraan tukirakenteena toimivan lasin tai pohjalevyn päälle koko kennon paksuuden jäädessä noin 1-3 µm. [Labouret & Villoz 2010, 81]

Ohutkalvoteknologia on mahdollistanut myös uusia raaka-aineyhdistelmiä, kuten kadmium-telluridi (CdTe) ja kupari-indium-gallium-diselenidiä (CIGS). Ohutkalvoteknologiassa käytettävä pii taas on useimmiten amorfista piitä (a-Si) tai mikrokiteistä piitä (µc-Si). Ohutkalvoisten kennojen hyötysuhteet ovat perinteisiä piikennoja matalampia, mutta niissä on suurta kehityspotentiaalia erityisesti jos käytetään useampia liitoksia. [Labouret & Villoz 2010, 81]

3.2.1 Amorfinen pii (a-Si)

Ohutkalvokennoissa käytettävä pii on usein amorfista, jolla on järjestymätön ja lasimainen rakenne, koska sitä on nopeampaa ja helpompaa valmistaa kuin kiteistä piitä. Amorfista piitä voidaan myös muodostaa suurillekin pinnoille. Amorfisesssa piissä kiderakenteet ovat korkeintaan 2-3 atomin mittaisia. Tällainen järjestäytymätön rakenne on epävakaa johtuen vapaista ja tyydyttymättömistä sidoksista, joten amorfisessa piissä pii-atomit muodostavat sidoksia myös vedyn kanssa. Prosessiin vety tulee prosessissa käytettävästä silaanikaasusta (SiH_4). [Razykov et al. 2011, 1585]

Vaikka vetysidokset vähentävät materiaalin virheiden määrää merkittävästi, lisäisi douppaus epäpuhtauksien määrää varsin suureksi vähentäen vapaiden

varauksenkuljettajien liikkumista. Tämä vuoksi amorfisesta piistä valmistetussa ohutkalvokennossa on kolme kerrosta p-i-n, perinteisten kennojen kahden p- ja n-kerrosten sijaan. Keskimmäisenä kerroksena on luontainen kerros jota ei ole doupattu. Tämän tarkoituksena on parantaa materiaalin johtavuutta ja toimia absorboivana kerroksena. Varauksenkeräämiseksi muodostetaan tämän kerroksen päälle ja alle ohuet n- ja p-kerrokset, joiden tarkoitus on aikaansaada tarvittava sähkökenttä ja pn -rajapinta. Nämä kerrokset pyritään pitämään mahdollisimman ohuina, noin 10 - 30 nm. [Razykov et al. 2011, 1585–1587]

Amorfisen piin etuna on sen epäjärjestäytyneestä rakenteesta johtuen tehokas absorptio. Absorptiota voidaan vielä parantaa säteilyn optisella ohjauksella paneelissa. Epäjärjestäytynyt rakenne on myös materiaalin heikkous, sillä sen hyötysuhde laskee materiaalin heikentyessä. Muutamien kuukausien käytön jälkeen hyötysuhde tasaantuu noin 30–40% alkuperäistä alhaisemmaksi. Hyötysuhdetta on pyritty parantamaan käyttämään useampia kerroksia ja pn-liitoksia. Amorfisen piin energia-aukon suuruus on välillä 1,7–1,8 eV. [Razykov et al. 2011, 1586–1587]

3.2.2 II-VI – kennot (CdTe)

Edellä käsitellyt kennot pohjautuvat piihin, joka on IV-ryhmän alkuaine sekä III-V alkuaineryhmien seoksiin. Puolijohteita voidaan kuitenkin valmistaa myös käyttämällä II-VI ryhmän aineiden seosta. Kadmiumin ja telluurin seos CdTe on tällainen puolijohde, joka muodostaa timanttimaisen kiderakenteen, jossa jokainen kadmiumatomi muodostaa sidoksen neljän telluuriatomin kanssa ja päinvastoin. CdTe:n energia-aukko on noin 1,45 eV. CdTe -kennossa p-tyypin kadmiumtelluridi toimii absorboijana ja ohut n-tyypin CdS ns. ikkunana jonka avulla saadaan rajapinta aikaiseksi ja varauksen kuljettajat liikkumaan haluttuun suuntaan. [Razykov et al. 2011, 1591–1592]

CdTe -kennot kasvatetaan lasin päälle hieman yli 400 °C lämpötilassa. Yläpinnan johteen tulee olla läpinäkyvää ja päästää mahdollisimman hyvin säteily läpi. CdTe –kennojen tuotantoa on hidastanut kadmiumin myrkyllisyys. CdTe –kennoja ei siis

luultavasti tulla koskaan valmistamaan suuressa mittakaavassa vaikka kennoissa kadmium onkin suhteellisen turvallisessa muodossa. [Razykov et al. 2011, 1591 – 1595]

3.2.3 I-III-VI –kennot (CIGS)

Aurinkokennoissa voidaan käyttää myös useita muita materiaaleja ja näiden ominaisuuksia voidaan säädellä tarkasti niiden sisältämien komponenttien mukaan. I-III-VI –kennoissa voidaan käyttää esim. kuparin, indiumin ja seleenin yhdistettä $CuInSe_2$, jonka energia-aukko on noin 1 eV. Varsinkin yksiliitoksisissa kennoissa tämä on kuitenkin matala ja seokseen lisätään usein galliumia jolloin muodostuu $Cu(In,Ga)Se_2$ eli CIGS kennoja. [Razykov et al. 2011, 1595]

CIGS –kennot vastaavat toimintaperiaatteeltaan CdTe –kennoja ja niissäkin käytetään n-tyypin puolijohteena useimmiten CdS –kerrosta. Kadmiumin myrkyllisyyden vuoksi vaihtoehtoisia materiaaleja on kokeiltu paljon hyvällä menestyksellä. [Razykov et al. 2011, 1596 – 1597]

3.3 Kolmas sukupolvi

Aurinkopaneeleiden ensimmäinen sukupolvi käsitti piistä valmistetut pii-kennot. Toinen paneeleiden sukupolvi pyrki ratkaisemaan ensimmäisen sukupolven ongelmat ja parantamaan paneeleiden materiaalitehokkuutta ja laskemaan valmistuskustannuksia lukuisilla erilaisilla ohutkalvoteknologioilla. Kolmas sukupolvi kuitenkin menee vieläkin pidemmälle ja laajemmalle.

Kolmannen sukupolven aurinkopaneeleihin lasketaan kuuluvaksi väriaineherkistettyjä, orgaanisia ja moniliitoksisia keskittäviä aurinkopaneeleita sekä ratkaisuja joissa käytetään nanoteknologiaa kuten kvanttipisteitä – eli varsin hajanainen ryhmä erilaisia ratkaisuja. Useimmat näistä ovat vielä laboratorio asteella, mutta potentiaali on paljon suurempi kuin aikaisemmilla sukupolvilla ja lupaavia tuloksia on jo saatu.

3.3.1 Väriaineherkistetyt aurinkokennot (DSSC)

Väriaineherkistetyssä aurinkokennossa (DSSC eli dye sentisized solar cells) johtavan lasipinnan alla on huokoinen titaanioksidikerros. Sen alapinnalla on hyvin ohut väriainekerros ja paksumpi kerros usein nestemäistä elektrolyyttiä sekä viimeisenä katodi. Elektrolyytin nestemäisyyden takia kennon ja paneelin tiiveyteen tulee kiinnittää erityistä huomiota. [Grätzel 2003, 146–147, 151]

Väriaineherkistetyssä aurinkokennossa absorptio ja varauksen kuljetus on erotettu eri materiaaleihin. Väriainemolekyylit varautuvat valon vaikutuksesta. Niistä elektroni siirtyy titaanioksidiin TiO_2, jossa tapahtuu varauksen kuljettaminen. Väriaineen alkutila palautuu elektrolyytin luovuttaessa sille elektronin. Väriaineen varaustilan energia pyritään mitoittamaan sopivaksi TiO_2:n kanssa, niin että häviöitä tulisi mahdollisimman vähän. Väriaineet kykenevät absorboimaan laajan spektrin, mikä lisää kennon hyötysuhdetta. Väriaine muodostaa yhdessä titaanioksidin kanssa puolijohtavan rakenteen, jossa elektronit liikkuvat aina väriaineesta titaanioksidiin päin. [Grätzel 2003, 145–146] [Savolainen & Luukko 2010, 35]

3.3.2 Orgaaniset aurinkokennot (OPV)

Orgaaniset aurinkokennot voivat olla rakenteeltaan ohutkalvokennojen tapaisia, johdekerrosten välissä on ensin p- ja sitten n-tyypin orgaaniset kerrokset. Yksinkertaisimmillaan johteiden välissä on kuitenkin vain yksi kerros orgaanista polymeeriä. Kennojen toimintaperiaate on erilainen, sillä amorfisesti järjestäytyneet orgaaniset molekyylit ovat huonompia johtavuudeltaan kuin puhtaan kristallirakenteen atomit. Merkitsevää on molekyylirakenteen matalin täyttymätön ja korkein täyttynyt orbitaali (lowest unoccupied molecular orbital eli LUMO ja highest occupied molecular orbital eli HOMO). Käytettävissä materiaaleissa nämä varaustasot tulee säätää sopiviksi, jotta varaus kulkisi mahdollisimman tehokkaasti orgaanisesta absorbaattorista johteisiin. Korkean absorptiokertoimen mahdollistamasta ohuesta kerrospaksuudesta, alle 100 nm, on hyötyä, sillä näin varauksen ei tarvitse kulkea pitkää matkaa orgaanisessa aineessa. [Hoppe & Sariciftci 2004, 1924, 1928–1929, 1935] [Razykov et al. 2011, 1603]

Orgaanisten aurinkokennojen etuna ovat alhaiset valmistuskustannukset, materiaalien erittäin hyvä saatavuus, mahdollisuus tuottaa kennoja rullatavarana sekä kennojen hyvä lämpötilakestävyys. Teknologian heikkoutena on kilpaileviin teknologioihin nähden matala hyötysuhde sekä orgaanisen materiaalin heikko vakaus, mistä johtuen kennojen elinikä lyhenee. Oikeilla materiaalivalinnoilla ja tandem tai moniliitos ratkaisuilla voidaan hyötysuhdetta kuitenkin nostaa kilpailukykyiseksi. [Hoppe & Sariciftci 2004, 1924, 1939–1940] [Razykov et al. 2011, 1603]

3.3.3 Kvanttikaivot ja –pisteet

Kennojen hyötysuhteita pyritään parantamaan nanoteknologian avulla kasvattamalla materiaaliin kvanttikaivoja tai kvanttipisteitä. Kvanttikaivo saadaan aikaiseksi sandwich –rakenteella, jossa ohutta matalan energia-aukon materiaalikerrosta ympäröi paksummat kerrokset korkeamman energia-aukon ainetta, jotka toimivat kuin kaivon seinämät. Välissä olevan kerroksen paksuutta säätelemällä voidaan vaikuttaa kennon absorptio-ominaisuuksiin. [ISIS] [Razykov et al. 2011, 1600–1601]

Kvanttipisteet ovat kuin elektroneilla täytettyjä pusseja. Materiaaliin luodaan pieniä aukkoja joihin elektronit jäävät jumiin. Kvanttipisteessä olevien elektronien lukumäärä määrittää sen ominaisuuksia ja kvanttipisteen kokoa säätelemällä voidaan tarkasti säätää myös energia-aukon kokoa. Kvanttipisteiden valmistus ei ole kovin vaikea prosessi, vaikkakin materiaalit maksavat. [Razykov et al. 2011, 1601–1602]

3.3.4 Moniliitoskennot

Yksiliitoksisella aurinkokennolla teoreettinen maksimihyötysuhde on noin 31%. Tämä johtuu siitä, ettei valon koko spektriä saada täysin hyödynnettyä. Yksiliitoksisella kennolla ideaali energia-aukon suuruus on noin 1,4 – 1,6 eV eli noin 770-890 nm. Mikäli energia-aukko on tätä suurempi, eivät matalaenergiset fotonit kykene irrottamaan elektronia. Jos energia-aukko on pienempi, jää suurempi osuus suurienergisten fotoneiden energiasta hyödyntämättä. [Razykov et al. 2011, 1600] [Savolainen & Luukko 2010, 35]

Parempia hyötysuhteita pyritään saavuttamaan moniliitoksisilla kennoilla, joissa aallonpituusspektriä pyritään jakamaan pienempiin osiin erilaisille materiaaleille, jotka niitä pystyvät parhaiten hyödyntämään. Tavallisesti korkeimman energia-aukon omaava aine on päällimmäisenä. Fotonit, joita se ei kykene absorboimaan, läpäisevät sen ja absorboituvat vasta seuraavissa kerroksissa. Moniliitoskennojen materiaalikirjo on laaja, sillä kaiken kokoisia energia-aukkoja tarvitaan, kuten IV-ryhmän Germanium (Ge, 0,7) eV tai gallium-indium-fosfidi yhdistelmäpuolijohde (GaInP, 1,9 eV). Yksiliitoksisiin kennoihin Ge tai GaInP eivät sopisi. [Savolainen & Luukko 2010, 35–36]

Moniliitoskennon valmistaminen on kuitenkin ohutkalvoteknologiasta tutusta kasvattamismenetelmästä huolimatta kallista ja vaikeaa, sillä valon spektri tulisi saada jaettua mahdollisimman tehokkaasti niin, että jokaisen liitoksen tuottama virta olisi yhtä suuri. Koska liitokset ovat sarjassa, määrää matalin virta koko kennon tuottaman virran. Rakenteeseen tulee myös kasvattaa tunneliliitoksia jotta sarjankytkentä saadaan aikaiseksi. [Savolainen & Luukko 2010, 35 - 36]

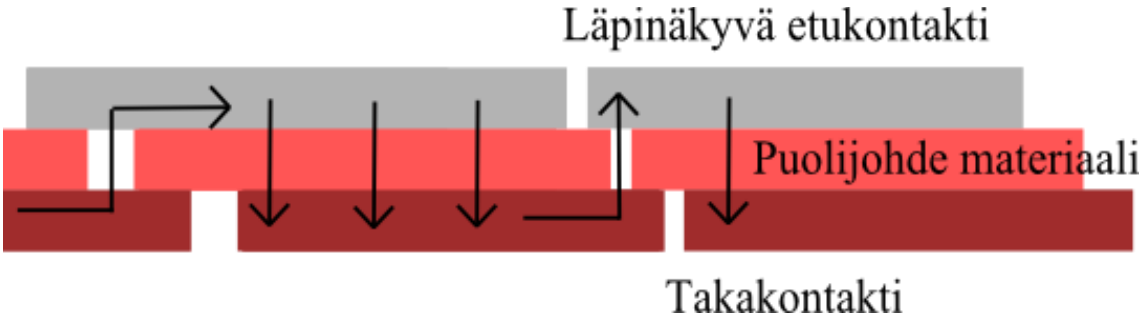
Liitoksissa käytettävät harvinaisemmat materiaalit lisäävät myös valmistuskustannuksia. Materiaalien saatavuuskaan ei ole yhtä varmaa kuin maaperässä yleisellä piillä tai orgaanisilla materiaaleilla. Moniliitoskennojen kilpailukyky perustuu kuitenkin suureen hyötysuhteeseen, jopa 45 – 50 %, mikä tekee niistä parhaan vaihtoehdon keskittävissä aurinkoenergiasovelluksissa. Tällöin materiaalin tarve vähenee ja valotehon lisäys jopa parantaa hyötysuhdetta entisestään, mikäli kennon lämpötila saadaan hallittua. [Razykov et al. 2011, 1600] [Luque & Hegedus 2004, 398] [Savolainen & Luukko 2010, 35, 37]

3.4 Kennosta paneeliksi

Aurinkokennoja voi, kuten edellä on kuvattu, valmistaa useilla eri menetelmillä ja erilaisista raaka-aineista. Yhden kennon tuottama jännite jää kuitenkin varsin pieneksi, joten kennoja liitetään sarjaan, jotta kennojen muodostaman kokonaisuuden jännite olisi tarpeeksi suuri. Kuluttajille myytävässä paneelissa on tavallisesti 40–100 kennoa liitetty sarjaan. [Luque & Hegedus 2004, 291 - 292]

Yksittäisten kennojen ominaisuudet, kuten niiden avoimen piirin jännite V_{OC} tai oikosulkuvirta I_{SC} vaikuttavat kennon sähköntuotantoon. Valmiit kennot mitataan ja lajitellaan näiden ominaisuuksien perusteella. Yhteen paneeliin pyritään valitsemaan kennoja joiden I_{SC} olisi mahdollisimman lähellä toisiaan. Mikäli paneeliin tulee yksikin kenno joka on muita heikompi, vaikuttaa se sarjaan kytkettynä myös muiden kennojen toimintaan laskien paneelin kokonaishyötysuhdetta. Vastaavasti yksittäinen parempi kenno ei tuota sen enempää sähköä kuin paneelin muutkaan kennot. [Labouret & Villoz 2010, 66–67]

Toisen ja kolmannen sukupolven teknologiat mahdollistavat kennojen kasvattamisen tai painamisen suuremmille pinnoille. Myös tällöin paneelin jännitteen kasvattamiseksi pyritään paneeliin kasvattamaan rakenteita jotka muodostavat sarjassa olevia osioita paneeliin. Tätä on havainnollistettu kuvassa 4. [Labouret & Villoz 2010, 90–91]



Kuva 4 Ohutkalvokennon sarjankytkentärakenne

Kennojen materiaali on haurasta ja herkkää luonnonolosuhteille. Paneelissa kennot suojataankin kapseloimalla ne ilmatiiviisti lasi- tai muovilevyjen väliin. Ilmatiiveydellä myös suojataan kennon materiaaleja hapettumiselta ja epäpuhtauksilta. Erityistä huomiota tulee kiinnittää kaapeleiden läpivienteihin. [Labouret & Villoz 2010, 67–69]

3.5 Keskittävä aurinkosähkö CPV

Aurinkokennojen suurimpia haasteita on niiden suhteellisen suuret tuotantokustannukset. Aurinkokennojen toinen ja kolmas sukupolvi pyrkivätkin ratkaisemaan tätä ongelmaa. Uusien esiinmarssia tekevien halpojen teknologioiden hyötysuhteet ovat kuitenkin toistaiseksi olleet matalampia kuin kalliimpien

ensimmäisen sukupolven tai moniliitoskennojen. Tällöin pinta-alaa tarvittaisiin siis enemmän vastaavan sähköenergian tuottamiseksi. Valinta joudutaan siis tekemään hinnan ja hyötysuhteen välillä. [Savolainen & Luukko 2010, 35]

Keskittävä aurinkosähkö pyrkii ratkaisemaan tämän asetelman tarjoamalla vaihtoehdon joka yhdistää korkean hyötysuhteen ja edullisen suurien pinta-alojen kattamisen. Keskittämällä auringonvalo halvoilla linsseillä tai peileillä, ei kallista kennomateriaalia tarvita kuin murto-osa. Tällöin kalliimpi 40 % hyötysuhteen moniliitoskenno on paljon kilpailukykyisempi, kun sen korkeaa hyötysuhdetta pystytään hyödyntämään suuremmalla valon intensiteetillä. Keskittämiskerroin on tavallisesti 100–500 jopa 1000. Kennon ominaisuuksista riippuen, voi keskittäminen lisäksi nostaa kennon hyötysuhdetta. [Savolainen & Luukko 2010, 35, 37]

Keskittävän aurinkosähkön hyötysuhde ja kustannustehokkuus ovat todella riippuvaisia sijainnista ja olosuhteista, koska keskittävissä järjestelmissä vain suora säteily kyetään tehokkaasti keskittämään. Tästä johtuen CPV –järjestelmissä käytetään usein yksi tai kaksi akselista seurantaa, jotta paneeli olisi aina kohtisuoraan aurinkoa vasten. Kokonaissäteilyn diffuusi osa jää kuitenkin suurelta osin hyödyntämättä. Tästä syystä selkeät ja aurinkoiset alueet ovat ihanteellisia ja pilvisillä alueilla tehokkuus heikkenee.

4 HYÖTYSUHTEEN MÄÄRITTÄMINEN

Hyötysuhteella kuvataan aurinkopaneelin tehokkuutta, kuinka hyvin paneeli tai kenno kykenee muuttamaan tiettyyn pinta-alaan kohdistuvan valon säteilyenergian sähkötehoksi. Koska säteily ei koskaan ole täysin samanlaista, vaan säteilyspektri ja säteilyn intensiteetti vaihtelevat vuodenajan, päivänajan, pilvisyyden ja pinnan suunnan mukaan, on aurinkopaneeleiden vertailtavuuden parantamiseksi kehitetty erilaisia standardispektrejä ja määritelty standardi raportointi olosuhteet (SRC eli Standard Reporting Conditions tai STC, Standard Test Conditions). Näiden standardin mukaisesti tehtyjen mittausten avulla saadaan paneelille määriteltyä hyötysuhde, jota voidaan verrata muihin paneeleihin. Ilman standardia ei vertailu olisi mahdollista sillä mittausolosuhteita voitaisiin muokata niin, että kennosta saataisiin paras mahdollinen hyötysuhde. [Luque & Hegedus 2004, 701–703]

Todellisuudessa olosuhteet eivät kuitenkaan ole tasaisia, kuten standardissa, vaan vaihtelevat. Huonompi standardihyötysuhteinen paneeli voi sopivissa olosuhteissa tuottaa enemmän sähköenergiaa, kuin toinen paneeli vastaavissa olosuhteissa. Tämä johtuu paneeleiden erilaisista ominaisuuksista. Pilvisellä säällä suoraan auringosta tuleva valo on vähissä ja heijastukset pilvistä saavat suuremman roolin. Tällöin paneeli joka on suunniteltu absorboimaan tehokkaasti suoraa säteilyä auringosta, ei toimikaan tehokkaimmillaan. Standardiolosuhteissa mitattu hyötysuhde ei siis kerro kaikkea, sillä hyötysuhde vaihtelee suuresti olosuhteiden mukaan. [Luque & Hegedus 2004, 712 – 714]

4.1 Standardi raportointi olosuhteet (SRC)

Toisessa luvussa käsiteltiin jo säteilyn voimakkuutta. Auringosta tuleva säteily on hyvin lähellä mustan kappaleen säteilyspektriä, mikäli havainnoidaan avaruudessa. Maan ilmakehän ulkopuolella satelliiteissa käytettävien aurinkopaneeleiden mitoittamiseksi määritellyn AM0 spektrin voimakkuudeksi on määritetty noin 1366 W/m^2. Eri lähteiden mittaustulokset vaihtelevat välillä 1353 – 1372 W/m^2. Tämä on lähes täysin suoraa säteilyä auringosta ja diffuusin säteilyn osuus on lähes olematon. [Luque & Hegedus 2004, 702 – 703]

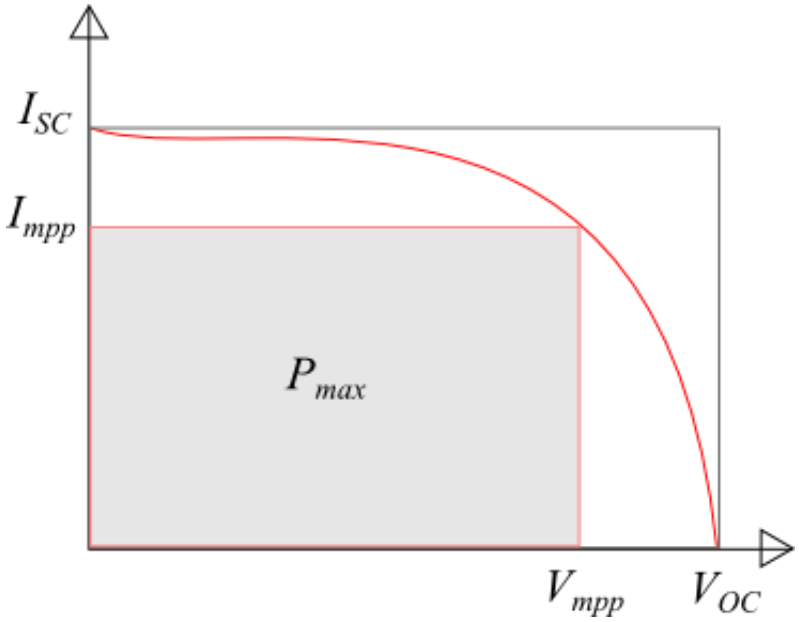
Maan pinnalla havainnoitaessa tuo säteily on kuitenkin vaimentunut. Myös erilaiset heijastukset maanpinnasta, pilvistä ja ilmakehän kaasuista ja hiukkasista ovat lisänneet diffuusin säteilyn osuutta. Säteilyn vaimentumista kuvataan ilmamassan kertoimella. AM1 tarkoittaa että säteily kulkee kerran ilmakehän läpi eli säteily tulee maanpintaan nähden kohtisuoraan ylhäältä. Yleisesti käytetty AM1,5 taas tarkoittaa sitä, että säteily tulee sellaisessa kulmassa, että se kulkee puolitoistakertaisen matkan maan ilmakehän ilmamassan läpi - käytännössä tämä tarkoittaa 41,8° kulmaa. [Labouret & Villoz 2010, 28 – 30] [Luque & Hegedus 2004, 702 – 703]

Tavallisten kennojen ja paneeleiden määrityksessä käytetään globaalia standardispektriä AM1,5G. Säteilyn tehoksi on valittu selkeä tasaluku 1000 W/m^2 vaikkakin todellisuudessa ilmamassan ollessa 1,5 spektrin säteilyteho integroitui noin 963 W/m^2:een. Toinen käytetty spektri AM1,5D (direct) ottaa huomioon vain suoran säteilyn jolloin diffuusi hajanaisempi säteily jätetään huomioimatta. AM1,5D spektrin irradianssi on noin 768 W/m^2 eli diffuusin säteilyn osuus standardispektin kokonaissäteilystä on noin viidennes. Tätä spektriä käytetään lähinnä keskittävien aurinkopaneeleiden mittauksessa, sillä keskittävät peilit tai linssit kykenevät kohdistamaan tarkasti vain suoraa säteilyä. Todellisuudessa pilvisinä päivinä diffuusin säteilyn osuus voi olla jopa suoraa säteilyä suurempi. [Luque & Hegedus 2004, 702 – 703] [Labouret & Villoz 2010, 29 – 30]

Spektrin ja säteilyn voimakkuuden lisäksi huomioon tulee ottaa myös lämpötila. Standardilämpötilassa kennon pintalämpötila on 25 °C. Juuri oikeaa lämpötilaa voi olla melko vaikeaa ylläpitää, sillä normaalissa toiminnassa kennon lämpötila kohoaa hieman ympäristön lämpötilaa korkeammaksi. Myös tarkalleen oikeanlaisen spektrin ja intensiteetin tuottaminen on vaikeaa. Siksi on kehitelty useita erilaisia kertoimia ja menetelmiä, joilla mittaustulokset voidaan muuntaa vastaamaan standardiolosuhteita. [Labouret & Villoz 2010, 29 – 30] [Luque & Hegedus 2004, 702 – 703, 714, 719 – 720,]

4.2 I–V –käyrä

Tavallisesti aurinkokennojen toimintaa kuvataan sen tuottaman virran ja jännitteen avulla. SRC olosuhteissa tehdyillä mittauksilla tai siihen muunnetuilla mittaustuloksilla saadaan aikaan virta-jännite (I-V) käyrä. Tältä käyrältä nähdään kennolle tai paneelille ominaisia toiminta-arvoja kuten oikosulkuvirta I_{SC}, avoimen piirin jännite V_{OC}, maksimitehopiste P_{max} ja maksimitehon virta I_{mpp} ja jännite V_{mpp}. P_{max} pisteessä virran ja jännitteen tulo on suurin. I-V –käyrää on havainnollistettu kuvassa 5 [Luque & Hegedus 2004, 731]



Kuva 5 Virta-Jännite käyrä

Käyrältä voi laskea täyttökertoimen FF (fill factor), joka kertoo kuinka ideaalisti kenno toimii. Mitä suurempi täyttökerroin, sitä vähemmän jännite laskee virran kasvaessa ja sitä vähemmän virta laskee jännitteen kasvaessa. Verrattaessa paneeleita, joilla on sama I_{SC} ja $V_{OC,}$ toisiinsa, saavuttaa paneeli jolla on suurin täyttökerroin myös suurimman tehon ja näin ollen suurimman hyötysuhteen. Täyttökertoimen saa laskettua yksinkertaisesti yhtälön (1) mukaisesti. [Luque & Hegedus 2004, 731]

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC} I_{SC}} \tag{1}$$

4.3 Tehontuottohyötysuhde

Paneelin valmistajat ilmoittavat yleensä edellä mainitut I-V käyrän arvot sekä kennon tai paneelin dimensiot. Tehontuottohyötysuhde voidaan laskea helposti näistä yhtälön (2) avulla. Se kuvaa paneelin kykyä muuttaa paneeliin kohdistuva säteilyenergia sähkötehoksi määritellyissä standardiolosuhteissa. Paneelin ostajalle tehontuottohyötysuhde yhdessä huipputehon kanssa antaa karkean arvion paneelilla tuotetun sähkön hinnasta vaikuttaen kennon valintaan. [Luque & Hegedus 2004, 702, 714]

$$\mu = \frac{P_{max}}{E_{tot}A} \tag{2}$$

jossa E_{tot} on paneeliin kohdistuva kokonaissäteily [W/m^2]

A on kennon tai paneelin pinta-ala, jolle säteily kohdistuu

Määritettäessä hyötysuhdetta näin on tärkeää huomioida koko säteilyä vasten kohtisuora paneelin pinta-ala eli myös paneelin reunat joihin säteily kohdistuu, vaikkeivät ne osallistuisikaan tehontuotantoon. Vastaavasti kennohyötysuhteessa otetaan huomioon vain yksittäisen kennon pinta-ala. Kennohyötysuhteet ovatkin parempia kuin paneelihyötysuhteet, kun kennojen väliset tyhjät alueet ja paneelin reunat jäävät pois jakajasta. Poikkeuksena edellisiin ovat keskittävät aurinkopaneelit, joissa säteily keskitetään osumaan vain kennon aktiiviselle alueelle. Tällöinkin mikäli halutaan vertailla tavallisiin aurinkopaneeleihin ja mitata koko järjestelmän hyötysuhdetta, otetaan huomioon koko peili- ja/tai linssi-järjestelmän pinta-ala tai käytetään vertailussa energiantuotantohyötysuhdetta. [Luque & Hegedus 2004, 713]

Vaikka tehontuottohyötysuhde onkin suhteellisen yksinkertainen ja nopea tapa vertailla aurinkopaneeleiden paremmuutta ja arvioida tuotanto-odotuksia, vaikuttavat tehdyt olosuhdevalinnat ja yksinkertaistukset tuloksiin. Todellisissa olosuhteissa hyötysuhde voikin olla aivan erilainen. Taulukossa 1 on vertailtu tehontuottohyötysuhteen määrityksessä käytettyjä SRC:n mukaisia olosuhteita todellisiin olosuhteisiin. [Luque & Hegedus 2004, 714–717]

Taulukko 1 Todellisten ja standardiolosuhteiden vertailu

	Standardi raportointi olosuhteet (SRC)	Todelliset olosuhteet	Vaikuttavat tekijät
Säteilyspektri	**AM1,5G**	Vaihtelee	Pilvisyys, aika, paikka
Säteilyteho	**1000 W/m^2**	≈ 0 - 1000 W/m^2	–//–
Säteilyenergia	8760 kWh/m^2/a	1000 - 2800 kWh/m^2/a	–//–
Säteilyn suunta	**Vakio/Kohtisuoraan**	Vaihtelee	Vuorokauden- ja vuodenaika
Kennon lämpötila	**25 °C**	≈ 40 - 60 °C	Ilman lämpötila, asennustapa, tuuli
Varjostus	**EI**	Mahdollista	Likaantuminen, esteet

Standardi raportointi olosuhteiden ja todellisten olosuhteiden suuresta erosta johtuen aurinkopaneelit eivät tavanomaisessa käytössä juuri koskaan saavuta tehontuottohyötysuhteen mukaisesti laskettua sähköenergiantuotantoa. Paneelin ominaisuuksista riippuen tästä voidaan jäädä huimastikin. Toisaalta ideaaleissa olosuhteissa se voidaan jopa ylittää. [Luque & Hegedus 2004, 716]

4.4 Energiantuotantohyötysuhde

Vaikka tehontuottohyötysuhde onkin melko hyvä ja yksinkertainen mittari aurinkopaneeleita vertailtaessa, ei sillä pystytä kuvaamaan paneeleiden toimintaa muuttuvissa olosuhteissa. Valmistajat ilmoittavat tavallisesti lämpötilakertoimia, jotka kertovat kuinka paljon paneelin ominaisuudet muuttuvat lämpötilan muuttuessa. Vaikuttavia tekijöitä on kuitenkin niin paljon, että todellista energiantuotantoa on vaikea arvioida. Todellisten olosuhteiden sähköntuotantohyötysuhdetta kuvaamaan voidaan määrittää energiantuotantohyötysuhde. [Luque & Hegedus 2004, 716]

Energiantuotantohyötysuhde voidaan määrittää kokeellisesti tietylle maantieteelliselle sijainnille mittaamalla paneelin energiantuotantoa vuoden verran kyseisessä sijainnissa. Tällöin energiantuotantohyötysuhde saadaan jakamalla tuotettu sähköenergia paneeliin kohdistuneella säteilyenergialla. Tällainen mittausmenettely on kuitenkin työläs ja aikaa

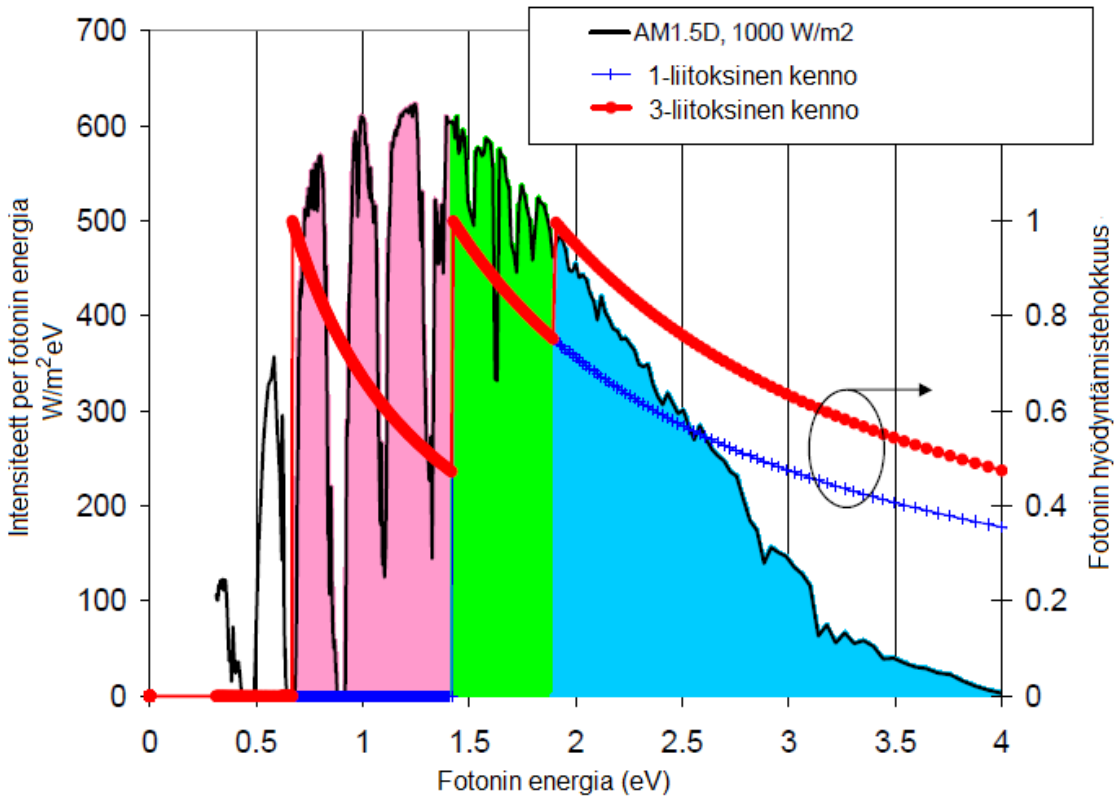
vievä, joten on kehitetty erilaisia metodeja joilla energiantuotantohyötysuhdetta voidaan arvioida ja määrittää standardipäivien avulla. Vaikka tällainen määritys ei olekaan sijainnista riippuvainen, antaa se tehontuottohyötysuhdetta realistisemman kuvan paneelin toiminnasta olosuhteissa, joissa valon määrä ja suunta sekä lämpötila vaihtelevat vuorokauden- ja vuodenajan sekä pilvisyyden mukaan. [Luque & Hegedus 2004, 716–717]

4.5 Aurinkopaneelin hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät

Kaikissa tilanteissa pätevän hyötysuhteen määrittäminen on mahdotonta, sillä hyötysuhteeseen vaikuttaa niin monta eri tekijää. Esimerkiksi lämpötilan vaikutus on niin suuri, että valmistajat ilmoittavat paneelin tiedoissa lämpötilakertoimia. Myös säteilyn intensiteetin vaikutusta ilmennetään I-V käyrillä eri irradiansseilla.

4.5.1 Energia-aukot

Absorboivan materiaalin energia-aukon koko vaikuttaa siihen kuinka tehokkaasti valon koko spektri kyetään hyödyntämään. Fotoneita joiden energiataso on pienempi kuin energia-aukko, ei kyetä hyödyntämään ja fotonin energia-aukon ylimenevä osa taas menee häviöksi lämpönä. Hyötysuhdetta voidaan parantaa jakamalla spektriä eri materiaaleille. Useammalla erikokoisella energia-aukolla voidaan auringon valon koko spektriä hyödyntää tarkemmin. Kuvassa 6 on havainnollistettu useamman energia-aukon tuomaa etua. Kolmannen sukupolven moniliitoskennoilla voidaankin saavuttaa parempia hyötysuhteita kuin yksiliitoksisilla kennoilla. [Luque & Hegedus 2004, 35–36] [Razykov et al. 2011, 1581]



Kuva 6 Säteilyspektrin hyödyntämistehokkuus 1- ja 3-liitoksisilla kennoilla [King 2009]

4.5.2 Kvanttihyötysuhde

Kvanttihyötysuhde kuvaa sitä kuinka monta elektroni-aukko -paria yksi fotoni saa aikaiseksi. Perinteisissä kennoissa kvanttihyötysuhde on alle yhden, sillä niissä fotoni kykenee muodostamaan vain yhden elektroni-aukko parin. Fotonin ylimääräinen energia menee hukkaan lämpönä. Pieni energiset fotonit taas eivät kykene muodostamaan elektroni-aukko -paria. Esimerkiksi kvanttitason ratkaisuilla voidaan vaikuttaa tähän niin että fotoni voi saada aikaiseksi useamman kuin yhden elektroni-aukko parin. Tällöin kvanttihyötysuhde voidaan saada yli yhteen. [Razykov et al. 2011, 1581]

4.5.3 Lämpötila

Kennon lämpötila vaikuttaa sen toimintaan. Lämpötilan noustessa kennon tuottama jännite laskee ja vastaavasti virta taas kasvaa. Jännitteen lasku on kuitenkin suurempaa

kuin virran kasvu ja näin ollen kennon tuottama teho pienenee. Paneeleiden valmistajat ilmoittavatkin kennojen tiedoissa erilaisia lämpökertoimia, joiden avulla voidaan arvioida paneelin toimintaa lämpötilan poiketessa standardiolosuhteista. Maksimitehon lämpötilakerroin on piipohjaisilla kennoilla luokkaa -0,4 - -0,5 %/°C ja ohutkalvokennoilla tätä pienempi.

Paneelit toimivat käytännössä harvoin SRC standardilämpötilassa 25 °C. Toiminnassa paneeli on aina ympäristöä lämpimämpi, ellei sitä erikseen jäähdytetä, joten aurinkoisena päivänä voi paneelin kennojen lämpötila nousta useisiin kymmeniin asteisiin. Lämpötilakertoimien erosta johtuen, voi lämpimissä olosuhteissa ohutkalvokenno saavuttaa paremman energiantuotantohyötysuhteen kuin piikenno, vaikka muutoin olosuhteet olisivat standardiolosuhteiden mukaiset. [Labouret & Villoz 2010, 63–64] [Luque & Hegedus 2004, 714]

Lämpötilakertoimien lisäksi voidaan paneelin lämpöominaisuuksia kuvata kennon nimellistoimintalämpötilalla NOCT (nominal operating cell temperature). Se on NOCT olosuhteissa (ilmanlämpötila 20 °C, kokonaisirradianssi 800 W/m^2, tuulen nopeus 1 m/s) määritelty kennon toimintalämpötila. Tavallisesti NOCT lämpötila on 40–50 °C. [Luque & Hegedus 2004, 714]

4.5.4 Kennojen rinnan- ja sarjankytkennät

Kytkemällä kennoja sarjaan saadaan paneelin tuottamaa jännitettä nostettua. Rinnankytkennällä vastaavasti nostetaan paneelin tuottamaa virtaa. Samanlaisten kennojen valinta on tärkeää, koska sarjankytkennässä kennojen tuottaman virran määrää sarjan heikoin kenno. Tarkastakaan valinnasta huolimatta paneeli ei voi täysin saavuttaa samaa hyötysuhdetta kuin yksittäiset kennot. [Labouret & Villoz 2010, 66–67]

Moniliitospaneeleissa tähän joudutaan kiinnittämään erityistä huomiota, sillä niissä liitokset voivat olla sarjankytkettyjä. Tällöin materiaalien ja energia-aukkojen sekä kerrospaksuuksienkin valintaan ja sovittamiseen tulee kiinnittää huomiota, jotta jokaisen kennon tuottama virta olisi samanlainen ja jokainen kennokerros toimisi optimaalisesti. Tätä optimointia kutsutaan virtasovitukseksi (current matching). [Savolainen & Luukko 2010, 36]

4.5.5 Säteilyn intensiteetti

Aurinkopaneeliin kohdistuvan säteilyn voimakkuus vaikuttaa myös paneelin toiminta-arvoihin. Kennon tuottama virta on suoraan verrannollinen säteilyn intensiteettiin. Vastaavasti jännitteeseen säteilyn voimakkuus vaikuttaa yksilöllisemmin. Säteilyn voimakkuuden vaikutusta paneeliin kuvataan I-V –käyrillä erilaisilla säteilyn voimakkuuksilla. Kiteisestä piistä valmistetuilla paneeleilla hyötysuhde laskee tasaisesti säteilyn vähentyessä. Alhaisissa valaistusolosuhteissa <200 W/m2 se kuitenkin romahtaa nopeasti jännitteen pienentyessä nopeasti. Tästä syystä sisätiloissa käytettävissä paneeleissa käytetään mieluiten esim. amorfista piitä jolla hyötysuhde säilyy melko hyvänä matalissa valaistusolosuhteissa. [Labouret & Villoz 2010, 62–63]

Luonnollisesti voimakkaampi säteily lisää kennojen tuottamaa tehoa, mutta myös kennon hyötysuhde voi parantua. Parhaat aurinkokennohyötysuhteet on saavutettu keskittävillä järjestelmillä, joissa keskityskerroin on ollut noin 400 auringon luokkaa. Vastaavalla kennolla SRC olosuhteissa hyötysuhde voi jäädä 7-10 % matalammaksi. [Razykov et al. 2011, 1582] [NREL 2012] [Savolainen & Luukko 2010, 37]

4.5.6 Spektrinen vastaavuus ja absorbtio

Spektrinen vastaavuus kertoo kuinka hyvin paneeli kykenee absorboimaan tietyn aallonpituuden omaavaa säteilyä. Edellä käsitellyn energia-aukon koon ja kvanttihyötysuhteen lisäksi tähän vaikuttavat myös paneelin pinnan ominaisuudet. Tasainen pinta heijastaa säteilyä voimakkaammin kuin epätasainen pinta. Mitä paremmin kenno on viritetty vastaamaan vallitsevia säteilyolosuhteita, sitä parempi hyötysuhde sillä voidaan saavuttaa. [Labouret & Villoz 2010, 51–52]

4.6 Teoreettinen maksimi hyötysuhde

Suurinta saavutettavissa olevaa hyötysuhdetta voidaan arvioida eri tavoin. Carnot hyötysuhde antaa ehdottoman teoreettisen maksimihyötysuhteen ideaalille lämpövoimakoneelle, joka toimii kahden eri lämpötilassa olevan lämpövaraston välillä. Aurinkopaneeleiden tapauksessa voidaan yksinkertaistaen aurinko ajatella kuumana ja

paneeli kylmänä lämpövarastona. Tällöin Carnot hyötysuhde saadaan laskettua yhtälön (3) avulla.

$$\mu_c = 1 - \frac{T_c}{T_h} \tag{3}$$

jossa T_c on paneelin lämpötila

T_h on auringon pintalämpötila

Auringon lämpötilan ollessa 5778 K ja paneelin lämpötilan noin 300 K, saadaan Carnot hyötysuhteeksi noin μ_c = 95 %. Näin korkean hyötysuhteen saavuttaminen on käytännössä kuitenkin mahdotonta sillä valon spektri tulisi kyetä hyödyntämään täydellisesti ja muuntamaan sähköenergiaksi häviöttömästi. Useampia liitoksia sisältävillä paneeleilla häviöt pienevät, kun valon spektriä kyetään hyödyntämään paremmin. Tällöin virtasovitus on kuitenkin vaikeaa ja häviöitä voi tulla muista lähteistä. [Luque & Hegedus 2004,] [Razykov et al. 2011, 1581–1582.]

Termodynaamiseen hyötysuhteeseen ei päästä perinteisillä kennoilla, sillä kvanttihyötysuhteen tulisi olla yli yhden. Ensimmäisen ja toisen sukupolven paneeleilla voidaankin yhden liitoksen kennoilla pitää rajana noin 30 % hyötysuhdetta. Taulukossa 2 on esitetty hyötysuhteen rajat ideaalille aurinkokennolle mustankappaleen säteilyllä, kun auringon lämpötilaksi on valittu 5762 K [Tobias & Luque 2002] sekä ”detailed balance” tasapainotilassa [De Vos 1980]

Taulukko 2 Hyötysuhteen teoreettiset rajat

Liitosten määrä	1 aurinko Tobias & Luque 2002	1 aurinko De Vos 1980	maksimi keskitys De Vos 1980
1	30,5	30	40
2	41,3	42	55
3	47,2	49	63
4	50,9	-	-

Käytännössä ei näinkään korkeisiin hyötysuhteisiin ole vielä päästy, vaikkakin ensimmäisen sukupolven kennot ovat jo varsin lähellä. NREL (National Renewable Energy Laboratory) listauksessa lokakuussa 2012 paras yksiliitoksinen GaAs kenno oli saavuttanut 28,8 % kennohyötysuhteen. Vastaavasti paras piikenno ylsi 25,0 % kennohyötysuhteeseen. Vastaavat kennohyötysuhteet keskittävillä järjestelmillä olivat 29,1 % ja 27,6 %. Kolmella liitoksella on saatu ilman keskittämistä 34,1 % joka jää jo paljon enemmän teoreettisesta 47–49 % hyötysuhteesta. [NREL 2012]

5 AURINKOPANEELEIDEN HYÖTYSUHTEET

Aurinkopaneeleissa tutkimus etenee kovalla vauhdilla ja kennojen hyötysuhteet paranevat uusien materiaalien ja teknologioiden myötä. Erityisesti kolmannen sukupolven kennojen hyötysuhteiden odotetaan parantuvan tulevaisuudessa, kun taas perinteisten piikennojen hyötysuhteet ovat jo päässeet melko lähelle niiden teoreettista maksimia. Kun kennoista valmistetaan aurinkopaneeleita, hyötysuhde pienenee erilaisten häviöiden johdosta hieman. Tässä luvussa on tarkasteltu tavallisten aurinkopaneeleiden hyötysuhteita ja keskittävät järjestelmät sekä korkean hyötysuhteen moniliitoskennot on jätetty tarkastelun ulkopuolelle.

5.1 Kaupalliset aurinkopaneelit

Aurinkopaneeleiden kysyntä ja tuotantomäärät ovat kasvaneet nopeasti, jopa 30–40% vuodessa. Kasvanut kysyntä ja tiukentunut kilpailu ovat edistäneet aurinkokennojen tutkimusta ja hyötysuhteiden parantamista. Globaaleilla aurinkopaneelimarkkinoilla myytävistä paneeleista suurin osa on kuitenkin edelleen ensimmäisen sukupolven piikennoja. Yksi- ja monikidepiikennoista koottujen aurinkopaneeleiden osuus oli vuonna 2009 noin 80 %. [Winneker et al. 2012] [Razykov et al. 2011, 1582–1583]

Valmistajat ilmoittavat valmistamistaan paneeleista usein standardiolosuhteissa (1000 W/m^2, 25 °C, AM1,5G) määritetyn tehontuottohyötysuhteen, maksimitehon ja maksimitehopisteen toiminta-arvot. Mikäli tehontuottohyötysuhdetta ei ole ilmoitettu suoraan, on se voitu laskea paneelille jakamalla ilmoitettu teho paneelin pinta-alalla ja standardiolosuhteiden irradianssilla 1000 W/m^2 luvussa 4.3 esitetyn yhtälön (2) mukaisesti. Paneeleita vertailtaessa otetaan kennojen pinta-alan lisäksi myös paneelin reunat ja kehikko huomioon, sillä tämän alan paneeli veisi asennettuna. [Luque & Hegedus 2004, 702, 713–714]

Tässä luvussa on koottu tietoa kaupallisesti saatavilla olevien aurinkopaneeleiden hyötysuhteista. Vain parhaat hyötysuhteet on mainittu, mutta samalta linjalta tulevista huonompilaatuisista kennoista valmistetaan vastaavia sisar-malleja joiden hyötysuhteet

ja tehontuotto ovat hieman matalampia, vaikkakin paneeli on muilta ominaisuuksiltaan samanlainen.

5.1.1 Yksikiteisestä piistä valmistetut paneelit (m-Si)

Yksikiteinen pii oli kauan lähes ainoa aurinkokennomateriaali. Siitä valmistetun paneelin hyötysuhde onkin jo saavuttanut rajan, jossa vain pieniä parannuksia voidaan saavuttaa tuotantoprosessia ja menetelmiä parantamalla ja optimoimalla. Suuria harppauksia ei ole odotettavissa kuten toisen ja kolmannen sukupolven kennojen kohdalla on mahdollista. Hyötysuhteen parantamisen sijaan suurimmat ponnistelut kohdistuvat nyt tuotannon kustannustehokkuuden parantamiseen ja tällä hetkellä Kiinalaiset valmistajat pärjäävät tässä suhteessa parhaiten. [Luque & Hegedus 2004, 255–256]

Kaupallisten yksikiteisten aurinkopaneeleiden hyötysuhteet ovat tällä hetkellä noin 15 - 16,5 % välillä paneelin tehon ollessa 200 – 350 W. Yksittäiset kennot vastaavasti saavuttavat jopa yli 20 % hyötysuhteen. Saksalaisten Solar Worldin (15,5%) ja Q.Cellsin (15,9%) sekä yhdysvaltalaisen Suntech Powerin (15,7) valmistamien melko perinteisten paneeleiden tehontuottohyötysuhde standardi olosuhteissa jää alle 16 %. Yhdysvaltalainen Suniva lupaa parhaille paneeleilleen 16,33 % hyötysuhdetta, joka on saavutettu tarkalla kennojen valinnalla. Kiinalaisen Trina Solarin kehittämällä menetelmällä yksikiteisestä harkosta saadaan neliömäisempi ja materiaalihukka on pienempi. Paneeliin saadaan enemmän kennopinta-alaa, kun kulmien pyöristyksiä ei ole. Trina Solarin 210 W paneelille luvataan 16,4 % hyötysuhdetta. Vastaavalla neliömäisistä ja korkealaatuisista kennoista kootulla paneelilla kiinalainen JA Solar on päässyt jopa 16,8 % hyötysuhteeseen.

Kolmas kiinalainen Yingly Solar, yksi suurimmista aurinkopaneeleiden valmistajista, valmistaa jopa 16,5 % hyötysuhteen paneeleita. Näissä parannus on saatu käyttämällä raaka-aineena tavallisen p-tyypin sijaan n-tyypin piitä, jolloin kennomateriaalista on saatu puhtaampaa ja tasaisempaa. Myös japanilaisen Sanyon paneeleissa on käytetty pohjana n-tyypin piitä, jonka yläpinnalle on muodostettu p-tyypin ja alapinnalle n-

tyypin luonnollinen amorfinen kerros. Tällä HIT rakenteella (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) on saavutettu 17,8 % hyötysuhde.

Yhdysvaltalainen Sunpower on pyrkinyt parantamaan paneeleidensa hyötysuhdetta käyttämällä takakontaktirakennetta, jossa paneelin etupinnalla ei ole ollenkaan metallisia kontakteja. Näin saavutetaan varjostuksen vähennystä ja aktiivisen kennopinta-alan kasvua. Laadukkaita Sunpower Maxeon jopa 22,5 % hyötysuhteen kennoja käyttämällä on paneelin tehontuottohyötysuhteeksi saatu huikeat 20,1 %. Yksikiteisten paneeleiden hyötysuhteet ja käytetyt lähteet on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3 Yksikiteisten aurinkopaneeleiden hyötysuhteet

Hyötysuhde	Valmistaja	Lähde
20,1 %	Sunpower (Yhdysvallat)	SunPower 2011
17,8 %	Sanyo (Japani)	Sanyo 2012
16,8%	JA Solar (Kiina)	JA Solar 2012a
16,5 %	Yingli Solar (Kiina)	Yingli Solar 2012a
16,4 %	Trina Solar (Kiina)	Trina Solar 2012a
16,3 %	Suniva (Yhdysvallat)	Suniva 2012a
15,9 %	Q.Cells (Saksa)	Q.Cells 2012
15,7 %	Suntech Power (Yhdysvallat)	Suntech 2012a
15,5 %	Solar World (Saksa)	Solarworld 2012

Tehontuottohyötysuhdetta voidaan vielä parantaa yksittäisten kennojen laatua parantamalla ja tarkentamalla kennojen valintaa. Laboratorio olosuhteissa on NREL:ssä mitattu jopa 25 % hyötysuhde. Tällaisilla kennoilla voidaan muut häviöt huomioiden saada aikaiseksi noin 23–24 % hyötysuhteella toimivia paneeleita. [NREL 2012]

5.1.2 Monikiteisestä piistä valmistetut paneelit (p-Si)

Monikiteinen pii on materiaalina heikompilaatuista kuin yksikiteinen, joten kennojen hyötysuhteet jäävät pienemmiksi. Kun kennoista rakennetaan paneeleita, soveltuu neliskanttiset monikiteiset harkot paremmin eikä hukkamateriaali tule. Myös paneelin pinta saadaan tehokkaammin täytettyä. Vaikka monikiteinen pii onkin hyötysuhteeltaan heikompaa, tekee kennojen neliskanttinen muoto sekä helppo ja halvempi valmistus siitä kilpailukykyisen vaihtoehdon. Monikiteisestä piistä valmistetaankin nykyään enemmän paneeleita kuin yksikiteisestä piistä. [Luque & Hegedus 2004, 255–256]

Monikiteisestä piistä valmistettujen aurinkopaneeleiden hyötysuhteet jäävät yksikiteisistä hieman ollen välillä 14–16 %. Tavallisia monikiteisiä paneeleita valmistavat esimerkiksi japanilainen Sharp (15,2 %), yhdysvaltalaiset Suntech Power (15,2 %) ja Suniva (15,4 %), saksalainen Schott Solar (15,3 %), norjalainen REC Group (15,8 %) sekä kiinalainen Yingly Solar (15,4 %). Kanadalaiskiinalainen Canadian Solar (15,85 %) sekä kiinalaiset Trina Solar (16,0 %) ja JA Solar (16,0 %) saavuttavat parhaat hyötysuhteet monikidepii aurinkopaneeleita verrattaessa. Monikidepiipaneeleiden hyötysuhteet ja käytetyt lähteet on esitetty taulukossa 4

Taulukko 4 Monikiteisten aurinkopaneeleiden hyötysuhteet

Hyötysuhde	Valmistaja	Lähde
16,0 %	Trina Solar (Kiina)	Trina Solar 2012b
16,0 %	JA Solar (Kiina)	JA Solar 2012b
15,9 %	Canadian Solar (Kanada/Kiina)	Canadian Solar 2012
15,8 %	REC Group (Norja)	REC Group 2012
15,4 %	Yingli Solar (Kiina)	Yingli Solar 2012b
15,4 %	Suniva (Yhdysvallat)	Suniva 2012b
15,3 %	Schott Solar (Saksa)	Schott Solar 2012
15,2 %	Suntech Power (Yhdysvallat)	Suntech 2012b
15,2 %	Sharp (Japani)	Sharp 2012

5.1.3 Amorfisesta piistä valmistetut ohutkalvopaneelit (a-Si)

Amorfisesta piistä valmistettuja paneeleita löytää helposti kuluttajaelektroniikasta, kuten aurinkokennokäyttöisistä laskimista tai rannekelloista. Näissä sovelluksissa a-Si kennojen etuna ovat niiden hyvät toiminta-arvot myös heikoissa valaistusolosuhteissa. Sähköntuotantoon käytettävät suuremmat paneelit ovat kuitenkin harvinaisempia johtuen kilpailevia teknologioita pienemmästä hyötysuhteesta. [Labouret & Villoz 2010, 85–86]

Kuluttajakäyttöön a-Si paneeleita tarjoavat yhdysvaltalaiset Uni-Solar ja Xunlight parhaimmillaan 7,1 % ja 6,2 % hyötysuhteilla. Näissä hyötysuhdetta on pyritty parantamaan kolmiliitosrakenteella. Japanilaisen Sharpin kennossa on amorfisesta ja mikrokiteisestä piistä muodostettu tandem rakenne, jolla on tehotuottohyötysuhteeksi saatu 10,0 %. Mikrokiteisessä piissä pii muodostaa mikroskooppisen pieniä kiteitä. Hyötysuhteet ja käytetyt lähteet on esitetty taulukossa 5. Amorfisesta piistä valmistettujen kennojen hyötysuhde ei juuri ole kehittynyt 90-luvun puolenvälin jälkeen, ennätyksen ollessa tällä hetkellä 13,4 %. [NREL 2012]

5.1.4 CIGS ja CdTe paneelit

Suurimmat ohutkalvoisten CIGS paneeleiden valmistajat, japanilainen Solar Frontier, yhdysvaltalaiset Nanosolar ja Stion sekä saksalainen Avacis, myyvät 12,8–13 % hyötysuhteen paneeleita. Kennojen rakenteet ovat melko samankaltaisia, eikä suuria eroja tehontuottohyötysuhteissa ole. Parannusta voidaan vielä saavuttaa, sillä laboratorio-olosuhteissa on parhaimmillaan saavutettu CIGS –kennolla jopa 20,3 % hyötysuhde, eli lähes yhtä korkea kuin monikidepiikennoilla. [NREL 2012]

CdTe kennojen suurin valmistaja on yhdysvaltalainen First Solar. First Solarin 90 W paneelin tehontuottohyötysuhde on hieman CIGS paneeleita matalampi, 12,5 % parhaan kennon yltäessä 17,3 % kennohyötysuhteeseen laboratoriossa. Ohutkalvokennojen hyötysuhteet ja käytetyt lähteet on esitetty taulukossa 5 [NREL 2012]

Taulukko 5 Toisen sukupolven ohutkalvopaneeleiden hyötysuhteet

Hyötysuhde	Rakenne	Valmistaja	Lähde
13,0 %	CIGS	Solar Frontier (Japani)	Solar Frontier 2012
13,0 %	CIGS	Nanosolar (Yhdysvallat)	Nanosolar 2012
12,9 %	CIGS	Stion (Yhdysvallat)	Stion 2012
12,8 %	CIGS	Avancis (Saksa)	Avancis 2011
12,5 %	CdTe	First Solar (Yhdysvallat)	First Solar 2012
10,0 %	a-Si/µc-Si tandem	Sharp (Japani)	Sharp 2009
7,1 %	a-Si kolmiliitoksinen	Uni-Solar (Yhdysvallat)	Uni-Solar 2011
6,2 %	a-Si kolmiliitoksinen	Xunlight (Yhdysvallat)	Xunlight 2011

5.2 Kehitysvaiheessa olevat teknologiat

Edellä esitettyjen jo laajasti kaupallisessa valmistuksessa olevien teknologioiden lisäksi on paljon kolmannen sukupolven vaihtoehtoja, jotka ovat vielä kehitysvaiheessa. Tyypillistä näille on, että vaikka laboratoriossa on saavutettu hyviä kennohyötysuhteita, ei tuotannossa ole päästy lähellekään näitä arvoja. Näistä lupaavimpia ovat väriaineherkistetyt ja orgaaniset aurinkokennot. Heikommasta hyötysuhteesta huolimatta niitäkin valmistetaan jo käyttökohteisiin joissa taipuisuus on tärkeää.

5.2.1 Orgaaniset ohutkalvopaneelit

Orgaanisissa kennoissa yhdysvaltalainen Konarka valmistaa mattomaisia taipuisia paneeleita, joita voi levittää katolle tai muille pinnoille. 27,2 W paneeli on mitoiltaan 676/2407 mm joten hyötysuhteeksi saadaan vain 1,7 %. Yksittäisillä kennoilla on kuitenkin saavutettu jopa 10 % hyötysuhde ja tandem rakenteella on päästy jopa 10,7 %.

Ero paneeli- ja kennohyötysuhteiden välillä tasoittunee tulevaisuudessa tuotantomenetelmien kehittyessä ja erityisesti rullalta rullalle painannan tehostuessa. [NREL 2012], [Konarka 2011]

5.2.2 Väriaineherkistetyt ohutkalvopaneelit

Väriaineherkistettyjen aurinkopaneeleiden tilanne vastaa orgaanisia paneeleita vaikkakin saavutetut hyötysuhteet eivät tuotannossa ole vielä yhtä korkealla. Brittiläinen G24 valmistaa pieniä 254 x 200 mm moduuleita joilla saavutetaan noin 1 % hyötysuhde ja 500 mW teho. Paneelista ei oikein voida puhua sillä piipohjaiset kennot ovat lähes yhtä suuria. Sony taas on saavuttanut vielä pienemmällä 150 mW tehoisella kennolla 8,4 % hyötysuhteen. Väriaineherkistetyllä kennolla on laboratoriossa saavutettu orgaanisia kennojakin suurempi 11,4 % hyötysuhde. [NREL 2012] [G24 Innovations] [Sony]

5.2.3 Kvanttitason ratkaisut

Kvanttipisteiden ja kvanttikaivojen mahdollisuudet ovat suuret. Toistaiseksi niiden tutkimus on kuitenkin vasta alussa. Lyijystä valmistetulla kvanttipistekennolla on saavutettu noin 7 % hyötysuhde. Kvanttitason ratkaisuja voidaan myös käyttää jo olemassa olevissa ratkaisuissa parantamaan hyötysuhdetta. Käytettäessä uusia materiaaleja kuten hiilinanoputkia, grafeenia tai fullereenia voidaan välttää kalliiden harvinaisten maametallien käyttö. [NREL 2012]

5.2.4 GaAs ohutkalvopaneelit

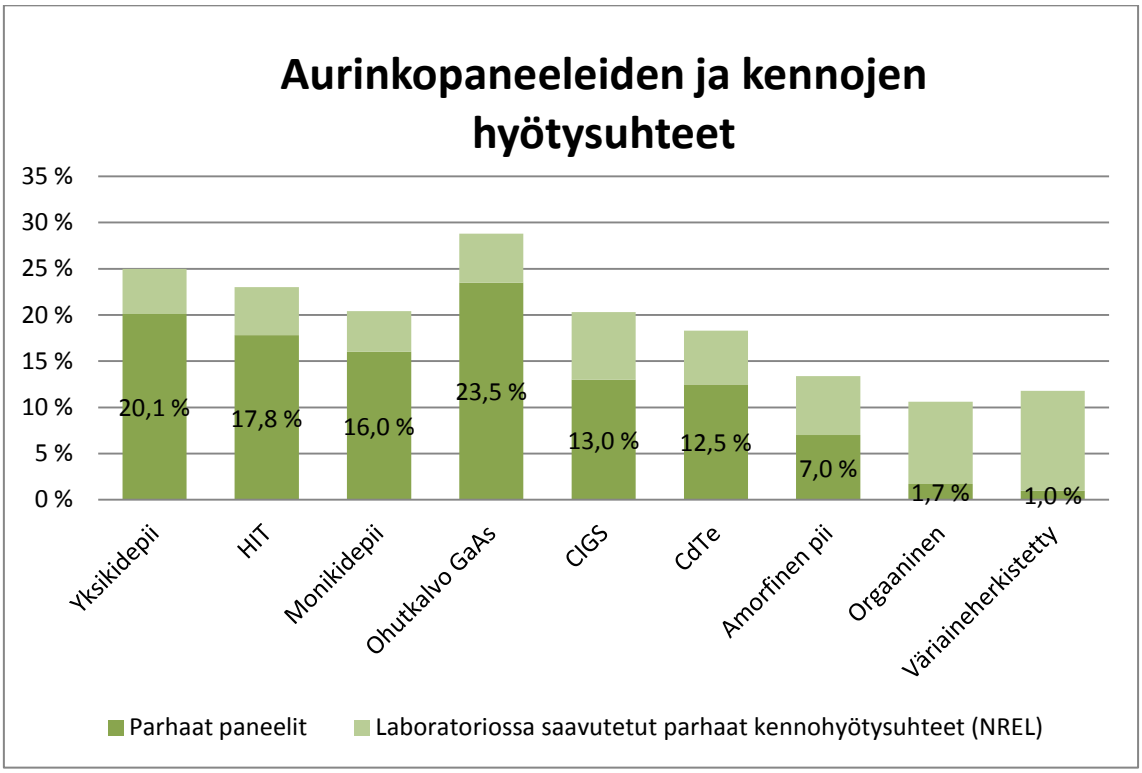
Ensimmäisen sukupolven gallium-arseeni kennoilla on saavutettu kaikkein parhaimpia hyötysuhteita. GaAs -materiaalin kalleudesta johtuen niiden käyttökohteet ovat kuitenkin rajoittuneet. Yhdysvaltalainen Alta Devices on kehittänyt menetelmän vain noin mikrometrin paksuisten ohutkalvokennojen valmistamiseksi, jolloin kallista raaka-ainetta tarvitaan vähemmän ja korkean hyötysuhteen GaAs kennoista saadaan kilpailukykyisempiä. NREL on varmentanut Alta Devices:n valmistaman paneelin hyötysuhteeksi 23,5 %, kennohyötysuhteen ollessa parhaimmillaan 28,8 %. Teollisessa

sarjatuotannossa valmistetun paneelin hyötysuhde voi olla hieman näitä matalampi. [NREL 2012] [Roeder-Johnson 2012]

5.3 Parhaat laboratoriossa saavutetut kennohyötysuhteet

Aurinkopaneeleiden tutkimuksessa yksi tärkeimpiä mittareita on kennohyötysuhde, joka määritetään standardiolosuhteissa. Tutkimusyksiköt ja laitokset pyrkivät parantamaan kennohyötysuhdetta eri menetelmillä. Hyötysuhteet ovat parantuneet jatkuvasti kuten National Renewable Energy Laboratory:n ylläpitämistä tiedoista käy ilmi (Liite 1). Huomattavaa kuitenkin ettei ensimmäisen sukupolven kennojen kohdalla ole enää saavutettu suurta parannusta pitkään aikaan. Niissä suurimmat tutkimuspanostuksen ovatkin keskittyneet tuotantoprosessin hiomiseen ja tuotantokustannusten laskemiseen. [NREL 2012]

Viimeisen viiden vuoden aikana kehitys on ollut suurinta kolmannen sukupolven kennojen kehityksessä. Erityisesti orgaanisten aurinkokennojen ja kvanttipistekennojen hyötysuhteet ovat parantuneet merkittävästi. Kun näissä riittävä kennohyötysuhde on saavutettu, pyritään valmistusteknologiaa siirtämään teollisuustuotantoon niin, että vastaavia kennoja ja niistä koottavia paneeleita kyettäisiin valmistamaan massatuotantona mahdollisimman tasalaatuisesti. Laboratoriossa saavutettuihin kennohyötysuhteisiin ei kuitenkaan päästä paneelihäviöistä johtuen. Parhaiden saavutettujen kennohyötysuhteiden ja tuotannossa olevien aurinkopaneeleiden hyötysuhteiden suhdetta on havainnollistettu kuvassa 7.



Kuva 7 Aurinkopaneeleiden ja kennojen hyötysuhteet

Kuten kuvasta 7 voidaan huomata, ovat ensimmäisen sukupolven teknologiat saavuttaneet aikuisiän, jossa kennohyötysuhteen ja paneelihyötysuhteen välinen ero on pieni. Toisen sukupolven ohutkalvokennoissa ero on suurempi ja kolmannen sukupolven kennoissa jo merkittävä. Ohutkalvoisten GaAs paneeleiden hyötysuhteesta massatuotannossa ei ole vielä tietoa, joten paneelin hyötysuhteeseen 23,5 % tulee kuvaajassa suhtautua pienellä varauksella.

6 YHTEENVETO

Aurinkopaneelit voidaan jakaa karkeasti kolmeen sukupolveen. Ensimmäinen sukupolvi käsittää lähinnä yksi- ja monikidepiistä valmistetut aurinkopaneelit. Ensimmäisen sukupolven paneeleilla on saavutettu taso, jossa ollaan jo melko lähellä hyötysuhteen teoreettista maksimia yksiliitoksisilla kennoilla. Suuria parannuksia ei siis odoteta vaan kehitys suuntautuu tuotantoprosessien optimointiin. Tehontuottohyötysuhteet piipohjaisilla paneeleilla ovat 15–17 % luokkaa ja parhaimmillaan hieman viritetymmillä kennorakenteilla saavutetaan jopa 20 % tehontuottohyötysuhde.

Ensimmäisen sukupolven suurin heikkous on kennojen kalleus. Aurinkopaneeleiden toinen sukupolvi pyrkii vastaamana tähän haasteeseen ohutkalvoteknologialla. Vain murto-osaan vähentynyt puolijohdemateriaalitarve leikkaa tuotantokustannuksia ja tekee toisen sukupolven paneeleista kilpailukykyisiä, vaikka niiden hyötysuhteet ovatkin hieman matalampia. Ohutkalvokennoja voidaan valmistaa useista eri materiaaleista kuten kiteettömästä amorfisesta piistä, II-VI- tai I-III-VI –alkuaineryhmien seoksista. Ohutkalvokennoilla tehontuottohyötysuhteet ovat 10–13 % luokkaa seospuolijohteilla ja 5–7 % amorfisella piillä. GaAs ohutkalvokennoihin perustuvilla paneeleilla on kuitenkin laboratoriossa saavutettu yli 23 % tehontuottohyötysuhde.

Aurinkopaneeleiden kolmas sukupolvi sisältää huomattavasti laajemman kirjon erilaisia teknologioita. Näillä pyritään edullisten tuotantokustannusten lisäksi ylittämään ensimmäisen sukupolven jo saavuttama hyötysuhderaja mahdollistamalla useamman kuin yhden elektroni-aukko parin syntyminen jokaista fotonia kohden ja käyttämällä säteilyspektri tarkemmin hyödyksi. Kolmannen sukupolven paneeleiden hyötysuhteet ovat kuitenkin toistaiseksi varsin matalia, alle 2 % kennohyötysuhteiden ollessa hieman yli 10 %. Hyötysuhteen kehitys on kuitenkin nopeaa ja suuria harppauksia odotetaan laajojen tutkimusten seurauksena. Moniliitoskennoilla on saavutettu parhaat hyötysuhteet, yli 35 %, mutta niiden kalleudesta johtuen teknologioita ei ole vielä kaupallistettu kunnolla.

Paneeleiden valmistajat ilmoittavat tavallisesti standardiolosuhteissa määritetyn tehontuottohyötysuhteen. Standardiolosuhteissa säteily noudattaa standardispektriä

AM1.5G säteilytehon ollessa 1000 W/m^2 ja kennon lämpötilan 25 °C. Olosuhteet vaikuttavat paneelin toimintaan merkittävästi, joten käytössä paneelin energiantuottohyötysuhde poikkeaa standardiolosuhteissa ilmoitetusta hyötysuhteesta. Kattavaa standardia energiantuotantohyötysuhteen määrittämiseksi ei ole eli se täytyisi määrittää tapauskohtaisesti. Tällainen olisi aivan liian työlästä ja aikaa vievää, joten paneeleita vertailtaessa on tyydyttävä standardiolosuhteissa ilmoitettuun tehotuottohyötysuhteeseen ja erilaisiin lämpökertoimiin sekä kennon puolijohdeominaisuuksien vertailuun.

Kokonaisuudessaan voidaan huomata valosähköisten aurinkopaneeleiden hyötysuhteiden kehittyvän tulevaisuudessa ja uusien teknologioiden ylittävän aikaisemmille sukupolville asetetut rajat. Hyötysuhteiden ja materiaalitehokkuuden parantumisen lisäksi myös tuotantokustannusten oletetaan pienentyvän tulevaisuudessa. Näiden yhteisvaikutuksesta voi aurinkoenergia olla tulevaisuudessa merkittävä osa ihmiskunnan energiantuotantoa.

LÄHDELUETTELO

Avancis 2011. Avancis PowerMax SMART sarjan paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.avancis.de/fileadmin/media/portal/produkt/Data_sheet_PowerMax_SMART_2012_03_EN.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Canadian Solar 2012. Canadian Solar CS6P paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.canadiansolar.com/dl.php?dir=datasheets&file=CS6P-P_en.pdf [viitattu: 31.10.2012]

De Vos, Alexis. 1980. Detailed Balance Limit of the Efficiency of Tandem Solar-cells. Journal of Physics D-applied Physics Vol. 13 Num. 5. 839–846.

First Solar 2012. First Solar FS Series 3 sarjan paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://dev.firstsolar.com/~/media/Files/Products%20and%20Services%20-%20Product%20Documentation/Technology/FS%20Series%203%20Datasheet%20-%20English%20Global.ashx [viitattu: 31.10.2012]

G24 Innovations. G24i Outdoor sarjan paneeleiden esite [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.g24i.com/filebase/G24i_Outdoor_Specification_Sheet.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Grätzel Michael, 2003. Review: Dye-sensitized solar cells. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 2003: Volume 4 Issue 2. 145-153. ISSN 1389-5567

Hoppe Harald, Sariciftci Niyazi Serdar, 2004. Organic solar cells: An overview. Journal of Materials Research, 19, 1924-1945 doi:10.1557/JMR.2004.0252

ISIS (Institute of Science in Society). Quantum Well Solar Cells. ISIS Report 20/07/09 [verkkosivu]. Saatavissa: http://www.i-sis.org.uk/quantumWellSolarCells.php [viitattu: 11.09.2012]

JA Solar 2012a. JA Solar JAM5(L) paneelin tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.jasolar.com/uploads/files/201210/20121018105345_r5ZcX3.pdf [viitattu: 31.10.2012]

JA Solar 2012b. JA Solar JAP6(T) paneelin tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.jasolar.com/uploads/files/201210/20121018110226_fEyOHK.pdf [viitattu: 31.10.2012]

King Richard R. 2009. Raising the Efficiency Ceiling in Multijunction Solar Cells. Stanford Photonics Research Center Symposium Sep. 14-16, 2009. Stanford, CA. [luentokalvot] Saatavilla: http://www.spectrolab.com/DataSheets/PV/pv_tech/msce.pdf [viitattu: 06.10.2012]

Konarka 2011. Konarka Power Plastic 40 Series sarjan paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.konarka.com/media/pdf/konarka_40series.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Labouret Anne, Villoz Michel, 2010. Solar photovoltaic energy. Institution of Engineering and Technology. 400. ISBN: 978-1-61344-316-3

Luque Antonio (toim.), Hegedus Steven (toim.), 2004. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons. 1164. ISBN: 978-1-59124-774-6

Luque Tobias, 2002. Ideal Efficiency of Monolithic, Series-Connected Multijunction, Solar Cells. Progress in photovoltaics: Research and applications, 2002: Volume 10, Issue 5. 323-329. DOI: 10.1002/pip.427

Nanosolar 2012. Nanosolar NSC-100B sarjan paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.nanosolar.com/wp-content/uploads/NSLR_Utility_Panel_DatasheetWEBRRs.pdf [viitattu: 31.10.2012]

NREL (National Renewable Energy Laboratory) 2012. Best Research-Cell Efficiencies [e-tilasto] National Center for Photovoltaics ylläpitämä tilastokuvaaja. Päivitetty 11/2012. Saatavissa: http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg [viitattu: 14.11.2012]

Q.Cells 2012. Q.Cells Q.Peak sarjan paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.q-cells.com/uploads/tx_abdownloads/files/Hanwha_QCELLS_GmbH_Data_sheet_QPEAK_2012-10_Rev01_EN.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Razykov T.M. et al. 2011. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. Solar Energy, 2011: Volume 85 Issue 8. 1580-1608. ISSN 0038-092X

REC Group 2012. REC Group Peak Energy sarjan paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.recgroup.com/PageFiles/2422/REC%20PE%20Series%20IEC%20ENG.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Roeder-Johnson 2012. Alta Devices solar panel receives NREL vertification of 23.5% efficiency. [verkkouutinen] Saatavissa: http://www.roeder-johnson.com/RJDocs/ALnrelverification0212.html [viitattu: 31.10.2012]

Sanyo 2012. Panasonic-Sanyo HIT Power 225A paneelin tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://us.sanyo.com/dynamic/LinkListingItems/Files/Panasonic%20HIT%20225A%20Data%20Sheet_WEB-1.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Savolainen Pekka, Luukko Tarja, 2010. Enemmän energiaa auringosta: Eri aallonpituudet talteen. Prosessori 32, 11. 35-37. [luettu verkkodokumenttina] Saatavissa: http://www.tekes.fi/fi/gateway/PTARGS_0_201_403_994_2095_43/http%3B/tekes-ali1%3B7087/publishedcontent/publish/programmes/materiaalit/documents/uutisia/aaltouutinen.pdf [viitattu: 30.08.2012]

Schott Solar 2012. Schott Perform Poly sarjan paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.schott.com/photovoltaic/english/download/schott_perform_poly_235-250_3bb_new_frame_data_sheet_en_0412.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Sharp 2009. Sharp NA-VxxxH5 sarjan paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://files.sharpusa.com/Downloads/Solar/Products/sol_dow_NA_V142H5_NAV135H5.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Sharp 2012. Sharp ND-RxxxA5 sarjan paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.sharp.eu/cps/rde/xtri/documents/documents/Marketing/Datasheet/Product_Flyer_ND-RxxxA5_-60cell-_10years_0412_eu.pdf?siteid=5&sitetype=1 [viitattu: 31.10.2012]

Solar Frontier 2012. Solar Frontier SF 140-160-S sarjan paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkosivu] Saatavissa: http://www.solar-frontier.com/eng/products/modules/S002210.html [viitattu: 31.10.2012]

Solarworld 2012. Solarworld quality: 2012 product overview for installers, planners and wholesalers. [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.solarworld.de/fileadmin/downloads_new/produkt/produktkatalog/produktkatalog_en.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Sony. Sony’s technology highlights: Dye-sensitized Solar Cells [verkkosivu] Saatavissa: http://www.sony.net/SonyInfo/technology/technology/theme/solar_01.html#block4 [viitattu: 28.10.2012]

Stion 2012. Stion STN-xxx paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.stion.com/wp-content/uploads/2012/05/STN_DataSheet_2012.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Suniva 2012a. Suniva Optimus 60 sarjan paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.suniva.com/documents/OPTXXX-60-4-100%2009%2005%2012.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Suniva 2012b. Suniva MVX 60 sarjan paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.suniva.com/documents/MV%20Series%20MVX-60-5-701%202012%2009%2007%20.pdf [viitattu: 31.10.2012]

SunPower 2011. SunPower E20/327 paneelin tekniset tuotetiedot. [verkkodokumentti] Saatavissa: http://us.sunpowercorp.com/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheadername1

=Content-Type&blobheadername2=ContentDisposition&blobheadervalue1=application%2Fpdf&blobheadervalue2=inline%3B+filename%3DSPR%2B327NE%2BWHT.pdf&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1300275586436&ssbinary=true [viitattu: 31.10.2012]

Suntech 2012a. Suntech STP255S-20/Wdb paneelin tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://am.suntech-power.com/images/stories/pdf/datasheets/jun2012/STP255S_Wdb_Mono_35mmFrame.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Suntech 2012b. Suntech STP295-24/Vd paneelin tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://am.suntech-power.com/images/stories/pdf/datasheets/jun2012/Datasheet_STP295_Vd_Poly_USA.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Trina Solar 2012a. Trina Solar TSM-DC80.08 paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.trinasolar.com/images/PDF/datasheets/eu/TSM-DC80.08_EU.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Trina Solar 2012b. Trina Solar TSM-PC14A paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.trinasolar.com/images/PDF/datasheets/eu/EN_datasheet_PC14A.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Uni-Solar 2011. Uni-Solar PowerBond PVL-144 paneelin tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.uni-solar.com/wp-content/uploads/2011/10/PB_PVL-144_Technical_Data_Sheet_EN_AA5-3636-04Rev1.pdf [viitattu: 31.10.2012]

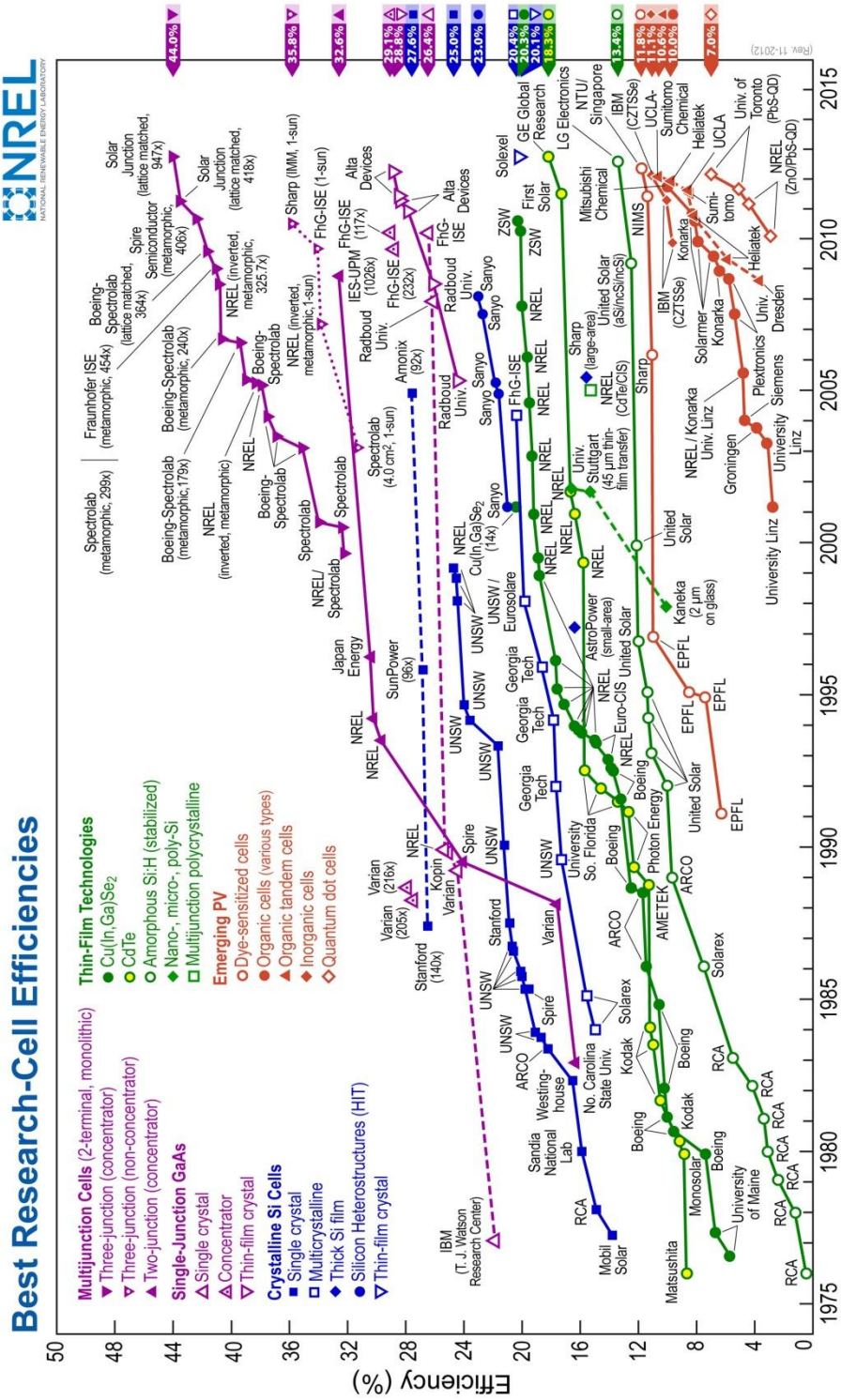
Williams David R. Sun Fact Sheet. National Space Science Data Center. NASA. [verkkosivu] Saatavissa: http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html [viitattu: 08.07.2012]

Winneker Craig (toim.) et al. 2012. Global market outlook for photovoltaics until 2016. European Photovoltaic Industry Association. [verkkojulkaisu] Saatavissa: http://files.epia.org/files/Global-Market-Outlook-2016.pdf [viitattu: 29.09.2012]

Xunlight Solar 2011. Xunlight Solar XR sarjan paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.xunlight.com/Documents/XR-R2.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Yingli Solar 2012a. Yingli Solar PANDA 60 Cell 40mm sarjan paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.yinglisolar.com/frontend/downloads/datasheets/PANDA_60_Cell_Series_EN.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Yingli Solar 2012b. Yingli Solar YGE 72 Cell NH sarjan paneeleiden tekniset tuotetiedot [verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.yinglisolar.com/frontend/downloads/datasheets/YGE_72_Cell_Series_EN.pdf [viitattu: 31.10.2012]

Civicsolar 2012. Monocrystalline vs. polycrystalline solar panels. [verkkoartikkeli] Saatavissa: http://www.civicsolar.com/resource/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels [viitattu: 2.12.2012]

LIITE 1. NREL PARHAAT TUTKITUT HYÖTYSUHTEET. PÄIVITETTY 11/2012.