

Petteri Välimäki

Aurinkopaneelit tansanialaisessa oppimisympäristössä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

4.6.2013

Tekijä Otsikko	Petteri Välimäki Aurinkopaneelit tansanialaisessa oppimisympäristössä
Sivumäärä Aika	52 sivua + 2 liitettä 4.6.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	lehtori Katriina Schrey-Niemenmaa tekniikan tohtori Jyrki Louhi
<p>Tekes-rahoitteisessa SunEdu-projektissa pilotoidaan Tansanian maaseudulla oppimisympäristöä, jossa lukulaitteiden, matkapuhelimien ja valaisimien sähköenergia tuotetaan aurinkopaneeleilla. Insinööriyön tarkoituksena oli kirjallisuus- ja markkinakatsauksen sekä sähköisten mittausten avulla tutkia erilaisia aurinkokennoteknologioita ja valita teknistä-luodellisesti sopivin aurinkopaneeliratkaisu pilottiprojektiin.</p> <p>Kirjallisuuskatsauksessa tutkittiin perinteisten piikiderakenteisten aurinkopaneelien lisäksi uusia ohutkalvoteknologiaan perustuvia paneeleja. Piikidepaneeleja kevyempinä ja kestävämpinä ohutkalvopaneelit soveltuvat paremmin projektissa suunniteltuun koululaisten käyttöön. Ohutkalvopaneelien energiantuoton suorituskyky on kidepaneeleja matalampi, mutta kestävyuden ja käytettävyyden katsottiin olevan SunEdu-projektissa suorituskykyä tärkeämpiä ominaisuuksia. Keskiarvoihin perustuvalla mitoituksella määrätettiin riittävälle suorituskyvylle karkea alaraja.</p> <p>Markkinakatsauksen perusteella sähköisiin mittauksiin valittiin neljä ohutkalvopaneelia ja vertailukohteiksi kolme kiderakenteista paneelia. Uusimpia väriaineherkistettyjä ulkoilmaan tarkoitettuja ohutkalvopaneeleja ei selvityksen aikaan ollut tarjolla kohtuulliseen hintaan.</p> <p>Mittauksissa aurinkopaneelien tehontuottojen havaittiin olevan vahvasti riippuvaisia valonlähteen spektristä. Paneelien tehot vaaleassa keinovalossa jäivät noin puoleen tehoista voimakkuudeltaan vastaavassa, mutta spektriltään erilaisessa auringonvalossa. Täydessä auringonvalossa havaittiin useiden kymmenien prosenttien eroja mitattujen ja valmistajien ilmoittamien maksimitehoarvojen välillä. Paneelien kallistuskulmalla auringon suhteen ei ollut erityisen dramaattista vaikutusta paneelien tehontuottoon.</p> <p>Sopivin paneeli SunEdu-projektin tarpeisiin oli edullisen hintaluokan SolarPlate SP-W300 -ohutkalvopaneeli, jonka maksimiteho auringonvalossa jäi 25–30 % mitoituksellisen minimirajasta. Käytännössä paneelin suorituskyky voi hyvinkin riittää projektissa määritellyn oppimisympäristön sähköntuottoon ulkona auringonvalossa.</p>	
Avainsanat	aurinkopaneeli, aurinkokenno, SunEdu, Tansania

Author Title	Petteri Välimäki Solar Panels In Tanzanian Learning Environment
Number of Pages Date	52 pages + 2 appendices 4 June 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Katriina Schrey-Niemenmaa, Senior Lecturer Jyrki Louhi, Doctor of Science in Technology
<p>In Tekes funded SunEdu project a learning environment is piloted in rural areas of Tanzania. The learning environment involves e-paper readers, cell phones and luminaires powered by solar panels. The aim of this bachelor's thesis was to investigate different kinds of solar cell technologies by means of literature study, market analysis and electrical measurements and choose the techno-economically most suitable solar cell solution for the pilot project.</p> <p>In the literature study panels based on new thin film technology were investigated along with traditional silicon crystal panels. Being lighter and more durable than silicon crystal panels thin film panels are more suitable for the hard use of school children. The performance of the thin film panels to produce energy is lower than the silicon crystal panels', but in the context of the SunEdu project durability and usability are valued higher than performance. A proximal minimum level for useful performance was defined by dimensioning calculations.</p> <p>Based on the market analysis four thin film panels and for comparison three silicon crystal panels for comparison were chosen to electrical measurements. Dye solar panels, the newest kind of thin film panels were not available for outdoor use at a reasonable price at the moment of the study.</p> <p>In the measurements the energy producing capacity of the panels was observed to be strongly dependent on the spectrum of the light source. The power of the panels in the cool white light was only about a half of the power in the sunlight of equal illuminance but a different spectrum. In full sunlight differences of tens of percent were observed between the maximum power values measured in this study and announced by the manufacturers. The effect of the tilt angle of the panels in relation to the position of the sun was not dramatic.</p> <p>The most suitable solar panel for the SunEdu project was budget-class thin film panel SolarPlate SP-W300. Its performance in full sunlight fell short of the minimum limit of the dimensioning calculations by 25–30 percent. In real circumstances the performance may well be sufficient for generating electricity outdoors for the learning environment defined in the project.</p>	
Keywords	solar panel, solar cell, SunEdu, Tanzania

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	Aurinkopaneelin toimintaperiaate	2
3	Aurinkopaneelin valinta	6
3.1	Aurinkopaneelin valintakriteerit	6
3.2	Aiempien aurinkopaneelihankkeiden ratkaisuja	8
3.3	Aurinkopaneelin tehon mitoituslaskelma	10
3.4	Aurinkokennon ja lukulaitteen liitto	11
4	Aurinkopaneelien nykytyypit	13
4.1	Kiderakenteiset paneelit	13
4.2	Ohutkalvopaneelit	19
4.3	Väriaineherkistetyt paneelit	24
5	Tulevaisuuden aurinkokennot	26
5.1	Läpinäkyvät kennot	27
5.2	Moniliitosaurinkokennot	29
5.3	Kvanttipisteet	29
5.4	Nestemäiset aurinkokennot	30
5.5	Aurinkokankaat	31
6	Aurinkopaneelien mittaukset	32
6.1	Aurinkopaneelien mittaukset monimetallilampun valossa	32
6.2	Aurinkopaneelien mittaukset loistelampun valossa	38
6.3	Aurinkopaneelien mittaukset auringonvalossa	39
7	Yhteenveto	45

Liite 1. Yhteenveto valintakriteereistä ja aurinkopaneelien ominaisuuksista

Liite 2. Aurinkopaneelien mittaustulokset numeerisina

Lyhenteet ja käsitteet

a-Si	<i>amorphous Silicon</i> ; amorfinen pii; ohutkalvoteknologiassa käytetty kennomateriaali
CIGS	<i>Copper indium gallium (di)selenide</i> ; kupari-indium-gallium-diselenidi; ohutkalvoteknologiassa käytetty kennomateriaali
cSi	<i>crystalline-Silicon</i> ; kiteinen pii; piipaneeleissa käytetty kennomateriaali
CSP	<i>Concentrating Solar Power</i> ; keskittävä aurinkovoimateknologia, jossa auringon säteet kohdennetaan peileillä hyvin pienen pinta-alan alueelle
GaAs	<i>Gallium-Arsenide</i> ; galliumarsenidi; aurinkopaneeleissa käytetty kennomateriaali
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i> ; Massachusettsin teknillinen korkeakoulu; kuuluisa tekniikan alan korkeakoulu Yhdysvaltain Cambridgesa Massachusettsin osavaltiossa
OLPC	<i>One Laptop Per Child</i> eli <i>Kannettava tietokone jokaiselle lapselle</i> ; voittoa tavoittelematon amerikkalainen järjestö, jonka tavoitteena on tarjota ensisijaisesti kehitysmaiden lapsille halpa tietokone
poly-cSi	<i>poly-crystalline-Silicon</i> ; monikiteinen pii; piipaneeleissa käytetty kennomateriaali
Tekes	Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus; Suomen valtion virasto, joka aktivoi ja rahoittaa yritysten, yliopistojen ja korkeakoulujen sekä tutkimusyksikköjen tutkimus- ja kehitysprojekteja
Wysips	<i>What You See Is Photovoltaic Surface</i> eli <i>Se, mitä näet on aurinkokennopinta</i> ; Ranskalaisen Sunpartner Group -yhtiön kehittämä läpinäkyvä aurinkokennoteknologia

1 Johdanto

Yhteenveto

SunEdu-projektissa Metropolian Electria-tutkimusyksikkö pyrkii suomalaisten pienyritysten kanssa kehittämään oppimisympäristöä kehitysmaiden sähköverkottomiin olosuhteisiin. Oppimisympäristön sähkönsyöttöjärjestelmäksi on suunniteltu aurinkopaneeleja. Digitaalisten lukulaitteiden lisäksi paneeleilla olisi tarkoitus ladata perheiden matkapuhelimia ja pienitehoisten valaisimien akkuja. Tämän insinööriyön tarkoituksena on kirjallisuus- ja markkinakatsauksen sekä sähköisten mittausten avulla tutkia erilaisia aurinkokennoteknologioita ja valita teknis-taloudellisesti sopivin aurinkopaneeliratkaisu SunEdu-projektin oppimisympäristön sähkönsyöttöjärjestelmäksi Tansanian maaseudulle.

Tekes-rahoitteisessa SunEdu-projektissa Metropolian Electria-tutkimusyksikkö pyrkii yhdessä suomalaisten pienyritysten kanssa kehittämään oppimisympäristöä kehitysmaiden sähköverkottomiin olosuhteisiin. Projekti kestää 18 kuukautta, ja sen yhtenä tavoitteena on pilotoida digitaalisiin lukulaitteisiin pohjautuva oppimisympäristö Iringan kaupunkia ympäröivällä Tansanian maaseudulla.

Pilottiprojektissa koululaisten digitaalisiin lukulaitteisiin jaetaan oppimateriaalia tietoverkon pilvipalvelun kautta. Lukulaitteiden käyttöä pyritään laajentamaan myös oppilaiden perheisiin tarjoamalla lukulaitteisiin monipuolista kansallista ja kansainvälistä sisältöä.

Oppimisjärjestelmän tulisi toimia Tansanian maaseudun sähköverkottomassakin ympäristössä, joten opettajan ja oppilaiden laitteiden sähkönsyöttöjärjestelmäksi on suunniteltu aurinkopaneeleja. Lukulaitteiden lisäksi paneeleilla olisi tarkoitus ladata perheiden matkapuhelimia ja pienitehoisten valaisimien akkuja.

Tämän insinööriyön tarkoituksena on kirjallisuus- ja markkinakatsauksen sekä sähköisten mittausten avulla tutkia erilaisia aurinkokennoteknologioita ja valita teknis-taloudellisesti paras aurinkopaneeliratkaisu SunEdu-projektin lukulaitteiden, matkapuhelimien ja valaisimien akkujen lataukseen.

2 Aurinkopaneelin toimintaperiaate

Yhteenveto

Aurinkopaneeli muuntaa auringon säteilyn energiaa käyttökelpoiseksi sähköenergiaksi hyödyntämällä epäpuhtauksilla paranneltujen puolijohdeiden kykyä absorboida eli vastaanottaa auringon säteilyn fotonien energiaa. Fotonilla on oltava vähintään puolijohteelle tai puolijohdeiden yhdisteelle ominaisen energia-aukon verran energiaa, jotta elektroni vapautuu ja sähkövirtaa syntyy positiivisen p- ja negatiivisen n-tyypin puolijohdeiden muodostamassa pn-liitoksessa.

Suoran energia-aukon puolijohteissa (amorfinen pii, gallium-arseni) elektronin irrottamiseen vaaditaan vain energia-aukon suuruinen energia. Epäsuoran energia-aukon puolijohteissa (kiteinen pii) fotonin täytyy tämän lisäksi luovuttaa energiaa elektronin liikemäärän kasvattamiseksi. Erilaisilla energianluovutusmekanismeilla on käytännön seurauksensa aurinkopaneelien rakenteeseen: Suoran energia-aukon puolijohteista valmistetut paneelit ovat ohuita, mutta epäsuoran energia-aukon puolijohteista valmistettavat paneelit täytyy rakentaa paksuiksi.

Aurinkopaneeli muuntaa auringon säteilyn energiaa käyttökelpoiseksi sähköenergiaksi. Muuntaminen tapahtuu aurinkopaneelin peruskomponenteissa, aurinkokennoissa, jotka vastaanottavat auringon lähettämiä valokvantteja eli fotoneja. Kullakin fotonilla on tietty energia ja sitä vastaava aallonpituus kvanttifysikaalisen aalto-hiukkasdualismin mukaisesti. Aurinko ei säteile kaikkia energioita ja aallonpituuksia tasaisesti yhtä paljon, vaan energiat ja aallonpituudet jakautuvat auringon intensiteettijakauman eli spektrin mukaan. Spektrin yksityiskohtainen muoto riippuu auringon säteiden läpäisemän ilmakehän koostumuksesta ja kulmasta, jossa säteet läpäisevät ilmakehän. Kulman suuruus vaihtelee auringon nousujen ja laskujen tahdissa. Spektrin intensiteetin maksimi on noin 500 nm:n aallonpituuden kohdalla. Tämä vastaa fotonin 2,5 eV:n energiaa yhtälön 1 mukaisesti. [1, s. 371.]

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

E on fotonikvantin energia

h on Planckin vakio

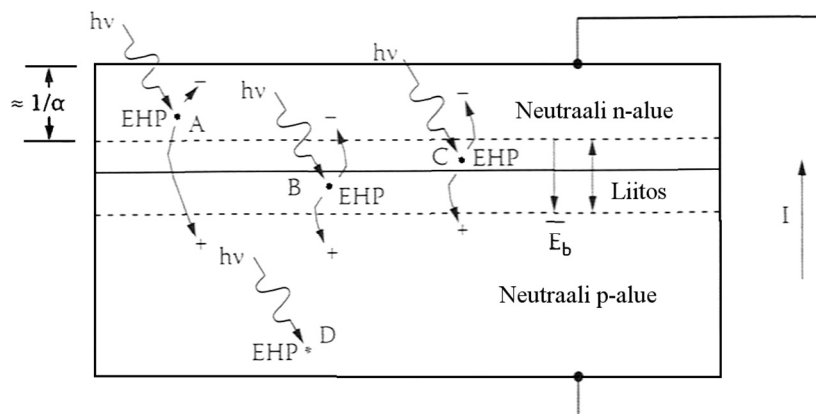
ν on fotonin taajuus

c on valon nopeus tyhjiössä

λ on fotonin aallonpituus.

Aurinkokennojen perusraaka-aine on puolijohde. Puhtaassa puolijohdteessa ei ole paljoa vapaita varauksenkuljettajia, minkä vuoksi sen sähkönjohtavuus on melko heikko, suuruudeltaan eristeen ja johteen välissä. Istuttamalla puolijohdteeseen epäpuhtauksia sen sähkönjohtavuutta voidaan parantaa. Istuttamalla puolijohdteeseen atomeja, joiden uloimmilla energiakuorilla on vähemmän elektroneja kuin puolijohdteen atomien uloimmilla kuorilla, voidaan luoda p-tyyppin positiivisia puolijohdteita. [1, s. 379.]

Vastaavasti istuttamalla puolijohdteeseen atomeja, joiden uloimmilla energiakuorilla on enemmän elektroneja kuin puolijohdteen uloimmalla kuorella, voidaan luoda n-tyyppin negatiivisia puolijohdteita. Liittämällä kuvan 1 mukaisesti p- ja n-tyyppin puolijohdteet yhteen voidaan muodostaa aurinkokennon perustana oleva pn-liitos, jonka ympärille muodostuu sähkökenttä.



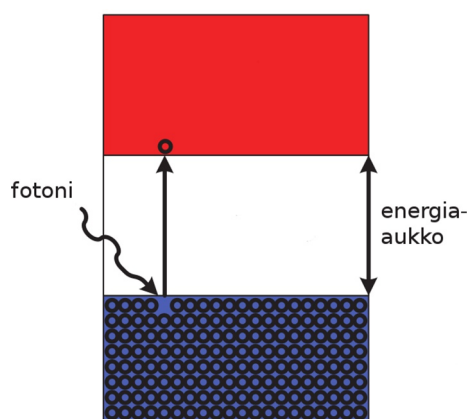
Kuva 1. Elektroni-aukko-parien (EHP) muodostuminen aurinkokennon pn-liitoksessa fotonien $h\nu$ törmätessä puolijohdteen elektroneihin [1, s. 382.]

Aurinkokennon kyky muuntaa auringon säteilyn energiaa sähköenergiaksi perustuu puolijohdteiden kykyyn absorboida eli vastaanottaa auringon säteilyn fotonien energiaa. Usein absorptiossa fotonin energia muuntuu aineessa lämmöksi, mutta puolijohdteessa fotonin energia voi absorptiossa myös vapauttaa elektronin puolijohdeatomista liikkuvaksi varauksenkuljettajaksi. Kun auringon säteilyn fotoni $h\nu$ törmää riittävän

suurella energialla puolijohteen ylimmällä energiatasolla olevaan elektroniin aurinkoaurinkokennon pn-liitoksessa tai sen välittömässä läheisyydessä (kuvan 1 pisteet A, B ja C, ks. ed. sivu), se irrottaa elektronin vapaaksi varauksenkuljettajaksi. Samalla syntyy positiivinen aukko, joka voi elektronin tavoin kuljettaa varausta. [1, s. 382.]

Sähkökenttä E_b kuljettaa negatiiviset elektronit puolijohteen n-alueelle ja positiiviset aukot puolijohteen p-alueelle. Suuri määrä vastaavalla tavalla synnetyistä ja kuljetetuista elektroni-aukko-pareja muodostaa jännite-eron kennoon yhdistettyjen johtojen välille. Yhdistämällä johdot osaksi suljettua virtapiiriä puolijohteesta irrotetut elektronit synnyttävät johtimissa kulkevan sähkövirran. Kytkemällä kennoja sarjaan voidaan määrittää aurinkopaneelin syöttämä maksimijännite. Kytkemällä kennoja rinnan ja säätämällä kennojen pinta-alaa voidaan määrittää aurinkopaneelin syöttämä maksimivirta.[1, s. 382.]

Elektronin irrottamiseksi fotonilla on oltava vähintään puolijohteelle tai puolijohteiden yhdisteelle ominaisen energia-aukon verran energiaa (kuva 2). Yksi fotoni kykenee kuitenkin irrottamaan vain yhden elektronin. Irrottamistyöstä ylitse jäävä energia ei muunnu sähköenergiaksi vaan poistuu aurinkokennosta lämpönä. Auringon säteilyn fotonien energiajakauma huomioiden ideaalinen energia-aukon arvo on noin 1,4 eV [2, s. 34]. Tällöin teoriassa korkeintaan hieman alle 34 % auringon säteilyenergiasta voidaan muuntaa sähköenergiaksi [3]. Tämä teoreettinen maksimi tunnetaan Shockley-Queisser-rajana [4].



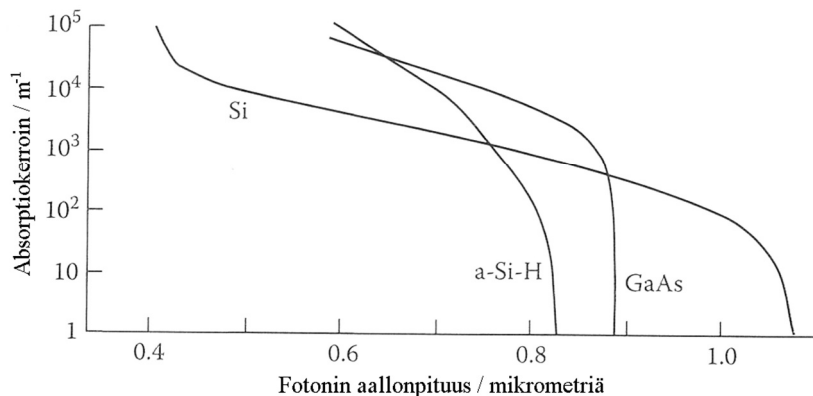
Kuva 2. Auringon säteilyn fotoni irrottaa puolijohteen ylimmällä energiatasolla olevan elektronin vapaaksi varauksenkuljettajaksi, kun fotonin energia on vähintään yhtä suuri kuin puolijohteen energia-aukon suuruus [5].

Suoran energia-aukon puolijosteissa elektronin irrottamiseen vaaditaan vain energia-aukon suuruinen energia. Epäsuoran energia-aukon puolijosteissa fotonin täytyy tämän lisäksi luovuttaa energiaa elektronin liikemäärän kasvattamiseksi. Erilaisilla energianluovutusmekanismeilla on käytännön seurauksensa aurinkopaneelien rakenteeseen: Suoran energia-aukon puolijosteista valmistetut paneelit ovat ohuita, mutta epäsuoran energia-aukon puolijosteista valmistettavat paneelit täytyy rakentaa paksuiksi.

Yhtälö 2 kuvaa paneeleilta vaadittavaa paksuutta matemaattisesti. Siinä auringon valon fotonijoukon luovuttaman energian määrä ilmaistaan fotonien kulkeman matkan funktiona. Kullekin aineelle ominainen absorptiokerroin α määrittää energian luovuttamiseen vaadittavan matkan. Mitä suurempi absorptiokerroin on, sitä ohuemmassa ainekerroksessa fotonien energia absorboituu. Kuvassa 3 esitetään graafisesti eri aineiden absorptiokertoimet fotonien aallonpituuden funktiona. [1, s. 373.]

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2)$$

I on valon intensiteetti aineessa syvyydellä x
 I_0 on valon intensiteetti aineen pinnalla
 α on absorptiokerroin.



Kuva 3. Puolijosteiden ja yhdistepuolijosteiden absorptiokertoimet α riippuvat sekä itse aineesta että absorboitavan fotonin aallonpituudesta [1, s. 373].

Epäsuoran energia-aukon kiteisellä piillä (Si) absorptiokerroin on suuri vain fotonien lyhyillä aallonpituuksilla eli suurilla energioilla, jotka muodostavat vain pienen osan auringon spektristä. Auringon fotonin ideaalisten aallonpituuksien alueella kiteisen piin absorptiokerroin on pieni, joten absorptioon kuluva matka on pitkä ja kiteisen piipaneelin on oltava useita mikrometrejä paksu.

Suoran energia-aukon aineilla (amorfinen pii (a-Si-H), GaAs) absorptiokertoimien maksimiarvot ovat paljon lähempänä auringon fotonien ideaalisia aallonpituuksia, joten absorptioon vaadittava matka on huomattavasti lyhyempi. Suoran energia-aukon puolijohdeissa tai puolijohdeyhdisteissä fotonin energia absorboituu jo muutaman mikrometrin matkalla [6, s. 34]. Näin ollen amorfisesta piistä ja galliumarsenidista voidaan valmistaa muutaman mikrometrin paksuisia paneeleja. Eri alkuaineiden ja yhdisteiden energia-aukon arvoja ja aukkojen mekanismeja esitetään taulukossa 1.

Taulukko 1. Alkuaineiden ja yhdisteiden energia-aukkojen arvoja ja aukkojen mekanismeja [6, s. 28; 1, s. 375].

aine	energia-aukko	energia-aukon mekanismi
kiteinen pii	1,12	epäsuora
amorfinen pii	noin 1,75	Suora
CdS	2,42	suora
CdTe	1,45	suora
GaAs	1,42	suora
InP	1,34	suora
Ge	0,67	suora
CuInSe ₂	1,05	suora

3 Aurinkopaneelin valinta

3.1 Aurinkopaneelin valintakriteerit

Yhteenveto

Aurinkopaneeliratkaisun tekninen kestävyys on ensiarvoisen tärkeää aurinkopaneelia valittaessa, koska paneelit joutuvat oletettavasti kokemaan melko koviakin mekaanisia iskuja koululaisten käytössä. Paneelin tulisi olla myös helppo kantaa ja vaivaton käyttää sekä hinnaltaan edullinen. Paneelin suorituskyvystä voidaan tarvittaessa tinkiä,

mutta paneelin täytyisi kuitenkin kyetä tarjoamaan riittävästi sähköenergiaa lukulaitteen, matkapuhelimen ja valaisimen normaaleihin päivittäisiin käyttöihin.

Aurinkopaneeliratkaisun tekninen kestävyys on ensiarvoisen tärkeää aurinkopaneelia valittaessa. Ei ole järkevää eikä mielekästäkään käyttää vuotta pilotin suunnitteluun ja valmisteluun, jos paneelit rikkoutuvat viikossa ja pilotin käyttäjäkokemukset jäävät hankkimatta. Paneeliratkaisut joutuvat oletettavasti kokemaan melko koviakin mekaanisia iskuja koululaisten käytössä. Englantilaisessa koulussa 11–12-vuotiaille jaetuista Applen iPad-tablettitietokoneista rikkoutui noin puolet vuoden seurantajakson aikana [7]. Paneelien on kestettävä mahdollisimman hyvin myös kosteutta ja kuumuutta.

Paneelia valittaessa myös helppokäyttöisyys on merkittävä ominaisuus. Paneelin pitäisi olla riittävän kevyt, jotta sen kantaminen ei rasittaisi liikaa käyttäjiä, joista nuorimmat ovat pieniä koululaisia. Paneeli ei saa olla liian kookaskaan kannettavaksi repussa tai laukussa. Lisäksi paneelin käytön pitäisi olla vaivatonta eikä paneelin suuntaaminen saisi varastaa liikaa huomiota, energiaa tai aikaa lukulaitteen käytöltä ja itse opiskelulta.

Koska SunEdu-projektin yhtenä pitkän aikavälin tavoitteena on kehitettyjen ratkaisujen kaupallistaminen, paikallinen elintaso on tärkeää ottaa huomioon. Materiaalinen elintaso tansanialaisessa kylässä on hyvin alhainen, joten paneeliratkaisun hinta on erittäin painava valintakriteeri. Tansanian valtio panostaa julkisten koulujen koulukirjoihin vain parikymmentä senttiä (Yhdysvaltain dollareissa) oppilasta kohden vuodessa [8]. Tähän suhteutettuna paneeliratkaisun hankinta-, asennus- ja huoltokustannusten tulisi olla ehdottomasti hintajakauman halvimhasta päästä.

Aurinkopaneelien suorituskykyjä kuvataan yleisesti hyötysuhteella, joka on paneelin sähköksi muuttaman energian suhde auringon paneelin pinnalle säteilemään energiaan. Hyötysuhteen mittaolosuhteet on standardoitu lämpötilan, säteilyn spektrin ja säteilyn tehon suhteen. Standardiolosuhteissa säteilyn teho vastaa auringon lähes maksimaalista säteilytehoa maan pinnalla.

Paneelin hyötysuhteesta voidaan tarvittaessa tinkiä. Tehokas paneeli ei ole käyttökelpoinen SunEdu-projektissa, jos sen hinta on korkea tai kestävyys on heikko.

Hyötysuhde vaikuttaa kuitenkin välillisesti varsinkin käytettävyyteen, sillä jos hyötysuhde on suuri, paneelin koko on vastaavasti pienempi. Paneelin koko voi myös kasvaa liian suureksi, jos hyötysuhde on liian pieni.

Valittavan paneelin täytyisi kuitenkin kyetä tarjoamaan riittävästi sähköenergiaa lukulaitteen, matkapuhelimen ja valaisimen normaaleihin päivittäisiin käyttöihin. Lukulaitteeksi on suunniteltu Leia Median kehittämää energiatehokasta lukulaitetta, jossa on noin 2 Wh:n akku. Matkapuhelimet Tansanian maaseudulla ovat lähes poikkeuksetta melko vanhoja peruspuhelimia, joiden akkukapasiteetti on noin 3,5 Wh. Perheissä käytettäviksi valaisimiksi on kaavailtu korkeintaan muutaman watin tehoisia LED-valaisimia.

Kirjallisuus- ja markkinakatsauksen perusteella valitaan kymmenkunta aurinkopaneelia laboratoriomittauksiin. Valittavien paneelien tulisi edustaa monipuolisesti eri teknologioita. Yhteenveto valintakriteereistä ja markkinoilla olevien aurinkopaneelien ominaisuuksista esitetään liitteessä 1.

3.2 Aiempien aurinkopaneelihankkeiden ratkaisuja

Yhteenveto

Aiemmissa SunEdu-projektia vastaavissa kansainvälisissä hankkeissa on pyritty kehittämään kehitysmaiden koululaisille aurinkopaneeleilla ladattavia tablettitietokoneita, joissa aurinkokennot olisivat olleet integroituina laitteiden runkoihin. Toistaiseksi hankkeissa on kuitenkin päädytty lataamaan laitteita kaikille käyttäjille yhteisellä isolla aurinkopaneelilla.

Maailmanlaajuisesti tunnetuimmat SunEdu-projektia vastaavat hankkeet ovat olleet *One Laptop Per Child (OLPC)* -järjestön (*kannettava tietokone jokaiselle lapselle*) ajatus valmistaa aurinkoenergialla toimiva tablettitietokone sähköverkon ulkopuolisille alueille ja Houstonin ja Singaporen Nanyangin yliopistojen yhteisprojekti *I-Slaten (sähkötaulu)* tavoite kehittää aurinkoenergialla toimiva tablettitietokone Intian maaseudun koululaisille.

OLPC-järjestö ilmoitti kesällä 2011 kehittävänsä järjestön tulevaan XO-3-tablettitietokoneeseen kumisia suojakuoria, jotka integroituina aurinkopaneeleina samalla lataisivat tietokoneen akkua (kuva 4) [9]. Aurinkokennojen tehoksi ilmoitettiin 4 W/m² [10]. Tablettitietokoneen arvioitu hinta oli alle sata dollaria, ja sen piti tulla myyntiin alkuvuonna 2012. Tietokoneen kehitystyö kuitenkin keskeytettiin marraskuussa 2012 [11]. Osana tablettitietokoneen kehitystyötä järjestö teki Etiopiassa kenttätutkimuksen, jossa lapsille jaettiin itseopiskeluun tavallisia kaupallisia tablettitietokoneita. Tietokoneiden lataamiseksi kaupunkiin rakennettiin maja, jonka katolle oli asennettu aurinkopaneeleja. [12.]



Kuva 4. OLPC-järjestön XO-3-tablettitietokoneen prototyypissä tietokoneen lataamisen piti olla mahdollista taipuisaan kumiseen suojakuoreen upotetuilla aurinkokennoilla [13].

I-Slate-projektissa on vuodesta 2009 alkaen kehitetty hyvin pienen virrankulutuksen prosessorilla varustettua tablettitietokonetta Intian maaseudun koululaisille. Tietokoneen on suunniteltu toimivan 3 W:n tehonkulutuksella ja saavan sähkövirtansa taskulaskimista tutuilla laitteen runkoon upotetuilla integroiduilla aurinkokennoilla. Elokuuhun 2012 mennessä tietokoneita oli jaettu kyliin, mutta niitä ladattiin laitteen runkoon upotettujen kennojen asemesta koulurakennuksen katolle asennetulla pienellä yhteisellä aurinkopaneelilla. [14; 15.]

3.3 Aurinkopaneelin tehon mitoituslaskelma

Yhteenveto

Jos arvioidaan tansanialaisen perheen kuluttavan päivässä 4 Wh energiaa valaistukseen ja matkapuhelimen ja lukulaitteen käyttöön, mitoituslaskelman mukaan keskimääräinen päivittäinen latausaika reilun 2 W:n aurinkopaneelilla olisi realistiselta vaikuttava 2,7 tuntia.

SunEdu-projektin realistisuuden ja aurinkopaneeliratkaisulta vaadittavien ominaisuuksien arvioimiseksi hankkeesta tehtiin paikalliset aurinko-olosuhteet huomioiva mitoituslaskelma. Tarkkojen mittaustulosten puuttuessa laskelmien pohjatieloina käytettiin osittain karkeita arvioita.

Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallinto NASA:n tekemien mittausten mukaan aurinko säteilee päivittäin horisontaalisesti keskimäärin $5,48 \text{ kWh/m}^2$ energiaa Tansanian Iringaan. Jakamalla tämä energiamäärä Iringan valoisan ajan pituudella eli 13 tunnilla saadaan keskimääräiseksi horisontaaliseksi tehoksi Iringassa 422 W/m^2 . [16.]

Valitaan aurinkopaneelin suurimmaksi sallituksi kooksi A4-paperin koko $0,297 \text{ m} \times 0,210 \text{ m} = 0,0624 \text{ m}^2$. Tällaisen paneelin pinnalle säteilee optimikulmassa Iringassa keskimäärin teho $0,0624 \text{ m}^2 \times 422 \text{ W/m}^2 = 26,3 \text{ W}$. Jos oletetaan paneelin hyötysuhteeksi kohtalaisen vaatimaton 8 %, paneeli tuottaa sähköä optimikulmassa auringon suhteen teholla $0,08 \times 26,3 \text{ W} = 2,10 \text{ W}$. Paneelin todellinen kulma auringon suhteen on täysin riippuvainen paneelin käyttäjän aktiivisuudesta paneelin suuntaamisessa. Karkea arvio todellisen käyttökulman vaikutukselle voidaan johtaa tutkimuksesta, jossa vertailtiin kiinteästi asennetun aurinkopaneelin tehoa optimaalisesti aurinkoa seuraavaan paneeliin. Kiinteästi asennetun paneelin teho oli tutkimuksessa noin 70 % optimipaneelin tehosta [17]. Tätä arvo soveltaen laskelman paneeli tuottaisi todellisuudessa tehon $1,47 \text{ W}$.

Jos arvioidaan tansanialaisen perheen kuluttavan päivässä 3 Wh energiaa valaistukseen ja 1 Wh matkapuhelimen ja lukulaitteen käyttöön, tarvittava päivittäinen latausaika aurinkopaneelilla olisi 2,7 tuntia. Näin jo keskimääräisillä arvoilla laskettuna latausaika vaikuttaa realistiselta. Asetelma näyttää entistä paremmalta, kun huomioidaan auringon säteilytehon olevan keskipäivän tunteina noin kaksinkertainen keskimääräiseen tehoon verrattuna.

3.4 Aurinkokennon ja lukulaitteen liitto

Yhteenveto

Aurinkokennojen hyötysuhteet ovat toistaiseksi olleet liian pieniä, jotta aurinkokennojen integroiminen tablettitietokoneisiin olisi ollut mielekästä. Integroitujen aurinkokennojen käyttö on melko rajoitettua, sillä Integroitujen aurinkokennojen asentokulma riippuu täysin laitteen käyttöasennosta ja -paikasta. Ladattaessa aurinko lämmittää integroidun paneelin lisäksi myös itse laitetta, mikä on usein hyvin haitallista digitaalisen laitteen toiminnalle ja käyttöäälle.

Kaikille käyttäjille yhteisten latausasemien ongelma on järjestelmän käytettävyyden heikkeneminen pitkien etäisyyksien vuoksi. Toisaalta varkauksien ja vandalismin riskit synnyttävät merkittäviä vartiointikustannuksia. Käyttäjien mukana liikkuvina kannettavat erilliset aurinkopaneelit ovat paremmin käytettävissä ja helpommin ja edullisemmin suojattavissa. Kannettava paneeli voidaan myös helpommin asetella optimaaliseen kulmaan ja sijaintiin auringon suhteen. Ladattavaa laitetta voidaan samaan aikaan pitää varjossa. Erillisillä paneeleilla voidaan myös ladata useampia laitteita tarpeiden mukaan ajoitettuina.

Aurinkopaneelimarkkinat ovat toistaiseksi keskittyneet lähinnä rakennusten ja sähköverkkojen sähköntuotantoon. Noin viiden voltin jännitteellä toimivien kannettavien laitteiden paneeliratkaisuja on kehitetty selvästi vähemmän. Länsimaissa sähköenergia on edelleen liian halpaa pienten aurinkopaneelien hankintahintaan verrattuna, jotta pienten aurinkopaneelien käyttö olisi taloudellisesti kannattavaa normaaliolosuhteissa. Länsimaissa pieniä aurinkopaneeleja onkin kehitetty lähinnä retkeilykäyttöön. Sen sijaan vähemmän kehittyneissä maissa pienille aurinkopaneeleille on enemmän kysyntää, koska sähköverkko voi olla harvinainen ylellisyys eikä toimi luotettavasti, mutta erityisesti matkapuhelimien käyttö voi silti olla hyvin yleistä. Aurinkopaneelien hinta saattaa kuitenkin usein olla niiden hankinnan este vähemmän kehittyneissä maissa. Kaiken kaikkiaan pieniä aurinkopaneeleja on markkinoilla verraten vähän, joten tarjonnan runsaus ei vaikeuta valintaa.

Aiempien SunEdu-projektia vastaavien hankkeiden ratkaisut osoittavat, että aurinkokennojen integroiminen eli kiinteä liittäminen laitteiden runkoihin ei ole yksinkertaista. Molemmissa edellä mainituissa hankkeissa on suunniteltujen laitteisiin integroitujen kennojen sijasta toistaiseksi päädytty kaikille käyttäjille yhteisiin keskitettyihin latauspisteisiin. Taskulaskimissa kennojen integroiminen on ollut menestyksellistä, koska yksinkertaisimpien laskinten tehonkulutus on riittävän pientä. Nykyaurinkokennojen hyötysuhteet ovat toistaiseksi olleet liian pieniä kehittyneempien taskulaskimien tehonkulutukseen verrattuna. Myös tehonkulutukseltaan pienimpien tablettitietokoneiden tehonkulutus on suurempaa kuin yksinkertaisten taskulaskimien, joten aurinkokennojen integroiminen tablettitietokoneisiin merkitsisi teknologian läpimurtoa uusille käyttöalueille. Läpimurto edellyttää joko tietokoneen tehonkulutuksen riittävää pienenemistä tai aurinkokennojen hyötysuhteen riittävää paranemista tai molempia.

Aurinkokennojen hyötysuhteen riittävä taso on kuitenkin melko suhteellista. Tablettitietokonetta voidaan ladata myös pienillä tai tehottomilla kennoilla, mutta tällöin vastavasti latausaikojen täytyy olla pitkiä tai tietokoneen käyttöaikojen lyhyitä. Järjestelmän käytettävyyttä heikkenee tällöin. Integroiduilla aurinkokennoilla varustettujen tablettitietokoneiden käytettävyyttä ei ole yleisesti pidetty niin hyvänä, että aurinkokennojen integroiminen olisi arvioitu kannattavaksi.

Mahdollisesti taloudellisista syistä edellä mainituissa projekteissa ei ole päädytty kannettavienkaan aurinkopaneelien hankintaan, vaan on perustettu yhteinen aurinkolatausasema kaikille käyttäjille. Jos etäisyydet latausasemalle ovat pitkiä, maaseutujen pitkät matkat ja vaatimattomat kulkuyhteydet heikentävät järjestelmän käytettävyyttä. Ainakin afrikkalaisessa kyläympäristössä myös varkauksien ja vandalismin riskit ovat niin suuria, että latausaseman ympärivuorokautinen vartiointi olisi tarpeellinen ja tulisi ajan mittaan kalliiksi myös alhaisten työvoimakulujen Tansaniassa.

Kannettavat aurinkopaneelit ovat käyttäjien mukana liikkuvina paremmin käytettävissä ja helpommin ja edullisemmin suojattavissa. Kaikkein helpoiten kokonaisuus on hallittavissa, jos paneeli on integroitu laitteeseen. Tällöin ei ole paneelin kadottamisvaaraa eikä paneeli todennäköisesti joutuisi vahingossa talloksi yhtä helposti. Toisaalta erillisellä kannettavalla paneelilla laitteen lataaminen helpottuisi ja tehostuisi huomattavasti. Paneeli voitaisiin asetella optimaaliseen kulmaan ja sijaintiin auringon suhteen. Integroituna aurinkokennon asentokulma riippuisi täysin laitteen lukuasennosta ja -paikasta. Suorassa auringonvalossa aurinko lämmittäisi integroidun paneelin lisäksi myös itse

laitetta, mikä on usein hyvin haitallista digitaalisen laitteen toiminnalle ja käyttöille. Koko pilottiprojektia ei liene järkevää riskeerata luottamalla sokeasti laitteen kestävyteen. Sen sijaan erillinen paneeli voitaisiin pitää auringossa, samalla kun lukulaitetta voitaisiin käyttää varjossa. Erillisillä paneeleilla voitaisiin ladata useampiakin laitteita tarpeiden mukaan ajoitettuina.

Toisaalta erilliseen kannettavaan paneeliin päädyttäessä kennojen integroimiseen ei tarvitsisi uhrata suunnittelua eikä tarvikkeita. Myös paneelin korjaaminen ja huoltaminen helpottuisivat. Integroidussa järjestelmässä koko laite jouduttaisiin lähettämään huoltoon tai korjattavaksi. Erillisen paneelin järjestelmässä tarvitsisi lähettää pelkkä paneeli ja laitetta voitaisiin käyttää keskeytyksettä lataamisen jatkuessa toisella paneelilla.

4 Aurinkopaneelien nykytyypit

4.1 Kiderakenteiset paneelit

Yhteenveto

Kiteiden pii on yksi parhaista aurinkokennomateriaaleista, koska sen energia-aukon arvo on melko lähellä ideaalista energia-aukon arvoa. Sen jalostaminen kuluttaa kuitenkin paljon energiaa ja synnyttää suuria määriä CO₂-päästöjä.

Kiteisen piin energia-aukot absorboivat fotonien energiaa epäsuorasti, minkä vuoksi kiteisestä piistä valmistettujen aurinkopaneelien täytyy olla paksuja. SunEdu-projektin näkökulmasta kiteisten piipaneelien paksuus ja hauraus ovat merkittäviä käytettävyysoongelmia, koska iso koko ja massa sekä hauraus ovat vaikeuttavat paneelien liikkuvaa käyttöä koulumaailmassa. Piipohjaisten kiderakenteisten kennojen hyötysuhde on korkea, noin 20 %.

Kiderakenteisia aurinkokennoja kutsutaan yleisesti ensimmäisen sukupolven aurinkokennoiksi. Ne rakennetaan puhdistetusta piistä, joka kasvatetaan kiteiseen muotoon. Pii on yksi runsaimmin maapallolla esiintyvä alkuaine, mutta se esiintyy happeen sitoutuneena piioksidina (SiO₂). Puhdasta piitä jalostettaessa happi poistetaan piioksidista

polttamalla sitä hiilen kanssa uunissa. Tässä kuluu paljon energiaa ja syntyy CO₂-päästöjä, mikä tekee piipohjaisista aurinkopaneeleista ekologisesti ongelmallisempia muihin aurinkopaneeleihin verrattuna. [1, s. 409.]

Puhdas pii on puolijohde, jossa ei ole paljoa vapaita varauksenkuljettajia ja jonka sähkönjohtavuus on näin ollen melko heikko. Boori- ja fosforiatomeja istuttamalla piihin voidaan luoda vapaiden positiivisten ja negatiivisten varauksenkuljettajien pysyvä epätasapaino, joka parantaa piin sähkönjohtavuutta merkittävästi.

Puhtaan kiteisen piin työstäminen aurinkokennoksi aloitetaan sauvan muotoisesta raaka-ainekappaleesta. Kiteisestä piisauvasta leikataan ohuita kiekkoja, joiden toiselle puolelle istutetaan booriatomeja ja toiselle puolelle fosforiatomeja. Kiekon booriatomien puolesta tulee positiivisesti varautunut p-tyyppin materiaali ja fosforiatomien puolesta negatiivisesti varautunut n-tyyppin materiaali. Kun yhdessä kiekossa on sekä positiivinen että negatiivinen puoli, piikiekon sisään muodostuu pn-liitos ja sen ympärille sähkökenttä.

Kiteisen piin energia-aukon arvo 1,1 eV on melko lähellä Shockley-Queisser-rajaa vastaavaa ideaalista energia-aukon arvoa. Yhden pn-liitoksen piikennolla voidaan teorias-
sa muuntaa korkeintaan 29 % auringon säteilyenergiasta sähköenergiaksi. [18.]

Kiteisen piin energia-aukot absorboivat fotonien energiaa epäsuorasti, minkä vuoksi kiteisestä piistä valmistettujen aurinkopaneelien täytyy olla paksuja. Tavallisen, lasipäällysteisen paneelin paksuus on yleensä 1,5–2,0 cm. SunEdu-projektin näkökulmas-
ta kiteisten piipaneelien paksuus on merkittävä käytettävyysohjelma, koska iso koko ja massa hankaloittavat paneelin liikkuvaa käyttöä.

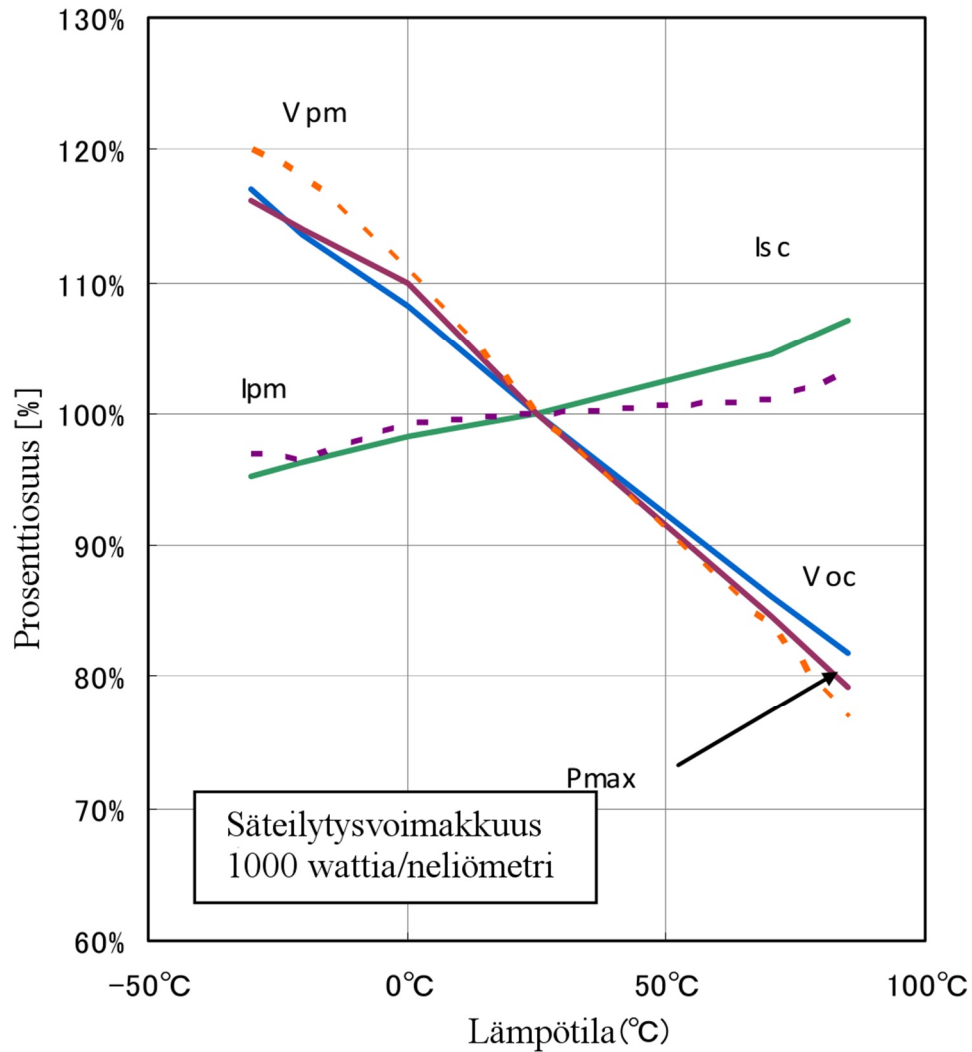
Piipohjaisten kiderakenteisten kennojen hyötysuhde on parhaimmillaan noin 20 %. Ot-
tamalla huomioon kaikki sähköiset häviöt järjestelmän kokonaishyötysuhde on noin 15
%. Tehokkuuteen ei ole odotettavissa enää suuria parannuksia, koska teknologiaa on
kehitetty jo pitkään ja intensiivisesti. Tämä on osaltaan siirtänyt kehityssponnisteluja
muiden teknologioiden suuntaan. [19, s. 188]

Kiderakenteiset paneelit ovat yleisesti melko hauraita. Päällystämätön paneeli ei kestä
kovaa käsittelyä. Tällaisen moduulin käyttöohjeissa varoitetaan moduulin pudottami-
sen, siihen kohdistuneen iskun tai moduulin päälle asetetun massan voivan rikkoa

kennon hartsipäällysteen tai itse kennon. Kovat esineet voivat naarmuttaa ja vahingoittaa moduulin takapinnan päällystettä, mikä saattaa synnyttää pysyviä sähköisiä häiriöitä ja heikentää moduulin suojaa ympäristön rasituksilta. Moduuli kehoitetaan laskemaan alas varovasti, sillä varomaton laskeminen pintaa vasten voi aiheuttaa tärähdyksen, joka voi halkaista kennon tai aiheuttaa pysyviä sähköisiä häiriöitä. [20.]

Kennot päällystetään yleensä muutamien millimetrin paksuisella lasipäällysteellä, joka on herkkä rikkoutumaan iskusta tai paineesta. Hauraus on kiderakenteisen paneelin merkittävin ongelma SunEdu-projektin näkökulmasta. Paneelin täytyisi kestää myös nuorten koululaisten mahdollista kovaa käsittelyä. Riittävän vahvalla koteloinnilla kiderakenteinen paneeli on mahdollista saada erittäin kestäväksi, mutta tällöin paneelin koko ja paino kasvavat vastaavasti. Wired-lehden testissä kiderakenteinen Solar Joos Orange -aurinkopaneelilaturi kesti yliajaneen moottoripyörän painon, mutta paneelia moitittiin painavaksi [21]. Hyviä kokemuksia on myös kidepaneelin rakentamisesta lasikuituvahvistetun epoksilaminaattilevyn päälle [22].

Kiderakenteisten paneelien kennojen teho laskee lineaarisesti lämpötilan noustessa. Kuvassa 5 (ks. seur. sivu) esitetään tyyppiesimerkkinä 300 mW:n Sharp LR0GC02 -paneelin lämpötilakäyrä. Teho laskee 20 %, kun lämpötila nousee 25 asteesta 80 asteeseen.



Kuva 5. Kiderakenteisen Sharp LR0GC02 -paneelin teho (P_{max}) laskee lähes lineaarisesti ympäröivän lämpötilan funktiona. Lämpötilassa 25°C mitattu paneelin nimellisteho 300 mW vastaa kuvaajassa 100 %:n tehoa. [23.]

Vertailukohtaksi paneelien mittauksiin valittiin kolme kiderakenteista aurinkopaneelia: A-Solar AP100, Suntrica SS-W100 ja FWS-1. Ne edustavat kooltaan ja hintaluokaltaan erilaisia kidepaneelien tyyppisiä. Yhteenveto valintakriteereistä ja markkinoilla olevien aurinkopaneelien ominaisuuksista esitetään liitteessä 1.



Kuva 6. A-Solar-yhtiön valmistamassa AP100-aurinkopaneelissa paneelipinta-ala on jaettu kahteen osaan. Paneeli voidaan kuljetusta ja säilytystä varten taittaa kahtia paneelin keskelle asennetun saranan avulla. [24.]

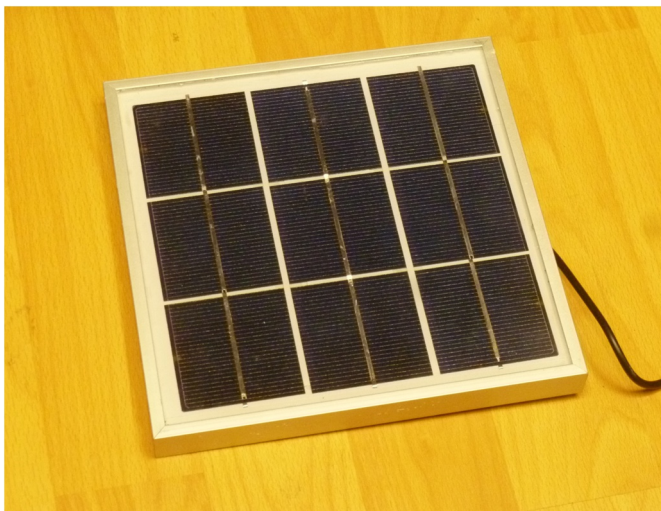
Hollantilainen A-Solar-yhtiö on tuonut markkinoille 4 W:n teholla toimivan kiderakenteisen AP100-paneelin kannettavien laitteiden lataamiseen (kuva 6). Tuote on paksuudeltaan kiderakenteisten paneelien ohuinta luokkaa eli 1,5 cm, ja sen koko on 17,5 cm x 13 cm. Kokoonsa nähden se on kiderakenteiseksi paneeliksi melko kevyt, 272 g. Paneelin teho-pinta-ala-suhde on kiderakenteisille paneeleille tyypillisen korkea, noin 135 W/m². Laitte on tarkasti viimeistelty tuote, joten sen kuluttajahinta on kiderakenteiselle paneelille kohtalaisen korkea, 17 €/W, tuotteen kuluttajahinnan ollessa 68 €. [24.]

Suomalaisen Suntrican SS-W100 on pieni, 85 g painava ja 20,6 x 12,4 cm:n kokoinen kiderakenteinen paneeli matkapuhelinten perusmallien lataamiseen 1,3 W:n teholla (kuva 7, ks. seur. sivu). Sen aktiivialueen koko on 13 x 8 cm, ja kiderakenteiseksi paneeliksi se on erittäin ohut. Paneeli on kiinnitetty pehmeään raamiin, jonka tarranauhalla paneeli voidaan kiinnittää esimerkiksi olkalaukun hihnaan. Myös SS-W100 on tarkasti viimeistelty tuote, mutta pienen kokonsa vuoksi se on hinnaltaan huomattavasti edullisempi kuin AP100. [25.]



Kuva 7. Suntrican kiderakenteinen SS-W100-paneeli [25]

FWS-1 on kehyksillä ja lasipinnalla vahvistettu melko järeä ja edullinen kiderakenteinen paneeli (kuva 8). Sen aktiivialueen koko on 16 x 16 cm, ja valmistajan ilmoittama nimellisteho on 3,6 W, kun jännite on 4,5 V.



Kuva 8. FWS-1-aurinkopaneeli on metallilla kehystetty ja päällystetty lasipinnalla.

4.2 Ohutkalvopaneelit

Yhteenveto

Piin jalostamiseen soveltuvien piivarantojen on ennustettu ehtyvän niukoiksi lähitulevaisuudessa, mikä on vauhdittanut vaihtoehtoisen ohutkalvoteknologian kehittämistä. Kiteisen piin sijasta kaupallisissa ohutkalvoissa käytetään amorfista piitä, kupari-indium-gallium-diselenidiä (CIGS) ja kadmium-telluridia (CdTe). Ne ovat suoran energia-aukon puolijohteita ja niiden yhdisteitä, jotka mahdollistavat ohuen, 1–2 µm paksuisen rakenteen. Niitä pystytään valmistamaan painokoneissa tehokkaalla rullalta rullalle -tekniikalla (roll-to-roll).

Ohuutensa vuoksi ohutkalvopaneelisiin tarvitaan vain vähän kalliita raaka-aineita ja niiden valmistusprosessi on kiteisten piipaneelien prosessia edullisempi, joten niitä on mahdollista valmistaa halvemmalla. Mekaanisen taipuisuutensa ja yleisen kestävyytensä vuoksi ohutkalvopaneelit kestävät SunEdu-projektin vaativia olosuhteita paremmin kuin kiteiset aurinkopaneelit. Ohutkalvopaneelien hyötysuhde on kaupallisissa järjestelmissä parhaimmillaan 10 %, joka on riittävä SunEdu-projektin tarpeisiin.

Maapallon puhtaan piin jalostamiseen soveltuvien piivarantojen on arveltu ehtyvän niukoiksi lähitulevaisuudessa, minkä on ennustettu nostavan piistä valmistettujen kiderakenteisten paneelien hintoja. Odotettu hintakehitys ja piiteknologian tekninen pysähtyneisyys ovat kasvattaneet kiinnostusta ohutkalvoista rakennettuja toisen sukupolven aurinkokennoja kohtaan. Kiteisen piin sijasta kaupallisissa ohutkalvoissa käytetään amorfista piitä, kupari-indium-gallium-diselenidiä (CIGS) ja kadmium-telluridia (CdTe). [19, s. 190-191.] Muista aineista kuin kiteisestä piistä valmistettujen aurinkokennojen markkinaosuus on 5–10 % vuosimyynnistä. Pula puhtaasta piistä saattaa nostaa tätä osuutta tulevaisuudessa. [19, s. 188, 190-191.]

Ohutkalvopaneelien hyötysuhde on kaupallisissa järjestelmissä parhaimmillaan noin 10 %, mutta laboratorioympäristössä on päästy 20 %:n tehokkuuksiin [19, s. 191]. Koska ohutkalvopaneelit absorboivat leveämmän kaistan säteilyn spektrin aallonpituuksista, myös infrapuna- ja ultraviolettisäteilyä, ohutkalvojen hyötysuhde on kuitenkin

kiderakenteisia paneeleja parempi varjoisissa, sumuisissa ja ilmansaasteiden vallitsemissa olosuhteissa [26].

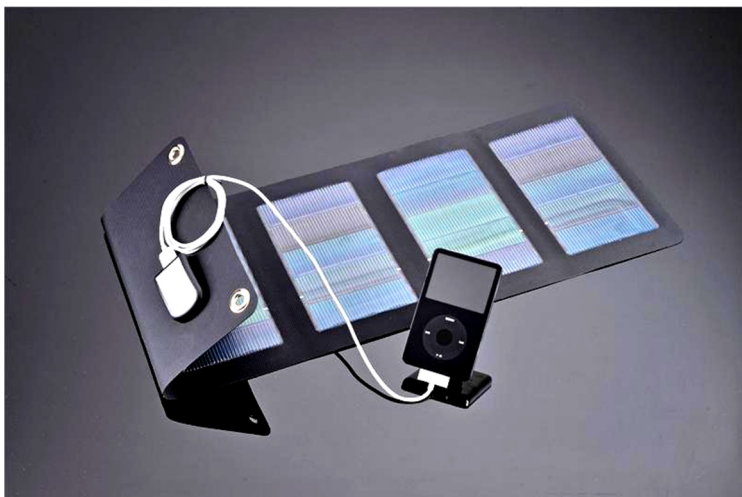
Ohutkalvopaneelien valmistusaineet ovat kiteisestä piistä poiketen suoran energia-aukon puolijohteita ja niiden yhdisteitä, jotka mahdollistavat ohuen, 1–2 µm paksuisen rakenteen [1, s. 408]. Niitä pystytään valmistamaan tehokkaalla automaattisella rullalta rullalle -tekniikalla (*roll-to-roll*), jossa isot painokoneet sylkevät ulos ohutkalvonauhoja, joissa kennot ovat valmiiksi kytkeytyneinä toisiinsa [6, s. 62].

Ohuutensa vuoksi ohutkalvopaneelisiin tarvitaan vähemmän kalliita raaka-aineita ja kalvojen automaattinen valmistusprosessi on kiteisten piipaneelien prosessia edullisempi, joten ohutkalvotekniikan on arveltu laskevan aurinkopaneelien hintoja perinteisiin paneeleihin verrattuna. Vallitsevassa markkinatilanteessa erityisesti Kiina on kuitenkin polkenut kiderakenteisten paneelien hintoja alas, mikä on vaikeuttanut ohutkalvovalmistajien tilannetta. Hyvin moni ohutkalvovalmistaja aurinkoenergian mahtimaissa Saksassa ja Yhdysvalloissa onkin ajautunut konkurssiin parin viime vuoden aikana. Nykyisessä markkinatilanteessa ohutkalvojen ajatellaan kuitenkin olevan vahvoilla keveyttä ja kestävyyttä vaativissa erikoissovellutuksissa kiderakenteisten paneelien hallitessa sähköntuotannon ja rakennusten paneelimarkkinoita.

Ohutkalvopaneeli kestää SunEdu-projektin vaativia olosuhteita paremmin kuin kiderakenteinen paneeli. Sen teho heikkenee korkeissa lämpötiloissa puolet vähemmän kuin kiderakenteisen kennon. Ohutkalvokennon teho laskee 10 %, kun lämpötila nousee 25°C:sta 80°C:een. Ensimmäiset laajat ohutkalvojen kestävyystutkimukset väittävät, että ohutkalvopaneelien pidempiaikainen kestävyys kuumissa aavikko-olosuhteissa olisi parempi kuin kiderakenteisten paneelien, koska kuumat olosuhteet saattavat kiihdyttää kiderakenteisten paneelien lasipäällysteen halkeamien muodostumista. Myös aavikon hiekan on alustavissa tutkimuksissa todettu heikentävän kiderakenteisten paneelien toimintaa. Helpomman puhdistettavuutensa vuoksi hiekka ei häiritse ohutkalvopaneeleja yhtä pahasti. Ohutkalvokenno kestää myös taivuttelua parhaimmillaan erinomaisesti. Taivuttelunsietokyky vaihtelee eri valmistajien kennoissa. [27.]

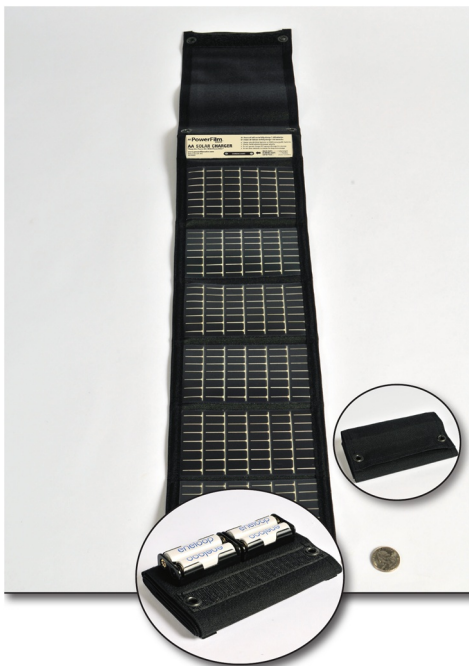
Toisaalta ohutkalvot ovat vielä melko uutta teknologiaa, ja niiden pitkän aikavälin (25–30 vuotta) kestävyys on vielä arvoitus. SunEdu-projektiin liittyviin tarpeisiin riittää kuitenkin tuotteen lyhyempikin elinkaari, esimerkiksi 10 vuotta, joten ohutkalvopaneelien pitkän aikavälin kestävyys on tuskin merkittävä ongelma.

Paneelien mittauksiin valittiin neljä ohutkalvoteknologiaan perustuvaa aurinkopaneelia: Global Solar Sunling 2, PowerFilm AA, SolarPlate SP-W300 ja Suntrica SolarStrap SS-W205. Yhteenveto valintakriteereistä ja markkinoilla olevien aurinkopaneelien ominaisuuksista esitetään liitteessä 1.



Kuva 9. Global Solar -yhtiön Sunling 2 -ohutkalvopaneelin aurinkokennot on jaettu neljään osaan. Osien välisten taitekohtien avulla paneeli voidaan taitella neljäsosaan käyttökoosta kuljettamista ja varastoimista varten. [29.]

Ohutkalvopaneelien valikoimassa amerikkalaisilla Global Solar- ja PowerFilm-yhtiöillä on kannettavien laitteiden lataamiseen ulkoisesti melko samantyyppiset tuotteet (kuva 9; kuva 10, ks. seur. sivu), jotka sisäisesti kuitenkin eroavat monin tavoin. Global Solarin paneelin pääraaka-aine on CIGS, kun taas PowerFilmin paneeli on valmistettu amorfisesta piistä. PowerFilmin paneelin alusta, substraatti on polyimidimuovia. Rakente mahdollistaa paneelin äärimmäisen 0,22–1,22 mm ohuuden ja paneelin kiertämisen säteeltään 2,5 cm pitkän sauvan ympäri [28]. Molemmat paneelit ovat taiteltavia malleja, mutta teholtaan erikokoisia. Global Solarin Sunling 2 -paneeli on teholtaan 4 W, ja PowerFilmin AA-paneelin teho on 2,2 W. Paneelin teho-pinta-ala-suhteet ovat molemmilla noin 25–30 W/m². Lukemat ovat siis noin viidesosa vastaavista kiderakenteisten paneelien teho-pinta-ala-suhteista. Valmistajien ilmoittamat vastaavat hyötysuhteet ovat noin 5 % ja 7–9 %.



Kuva 10. PowerFilmin AA-ohutkalvopaneeli koostuu kuudesta pienestä paneelista ja on tarkoitettu AA-kokoisten paristojen lataamiseen. Se voidaan taittaa kahdeksasosaan käyttökoostaan pienten paneelien välien kohdista kuljettamista ja säilyttämistä varten. [28.]

Global Solarin paneelien ilmoitetaan syöttävän virtaa myös harmaan pilvisenä päivänä, kun auringon säteily on laskenut noin 20 %:iin maksimista. Paneelin teho on tällöin vastaavasti noin 20 % ilmoitetusta nimellistehosta [29]. Kummankin taiteltavan paneelin kuluttajahinta on noin 70 euroa, joten kuluttajahinnat/W ovat melko lailla samaa tasoa kuin kiderakenteisen A-Solar AP100:n vastaava hinta eli 17 €/W. [28; 29.]

SolarPlate SP-W300 (kuva 11, ks. seur. sivu) on CIGS-paneeli, jonka nimellisteho on valmistajan ilmoituksen mukaan 1,6 W, kun jännite on 5,4 V. Paneelin aktiivialueen koko on 13 x 14 cm. Paneeli on hinnaltaan edullinen, mistä viestii myös viimeistelyltään karun yksinkertainen ulkomuoto.



Kuva 11. SolarPlate SP-W300 -ohutkalvopaneeli

SolarStrap SS-W205 on suomalaisen Suntrica-yhtiön ohutkalvopaneeli, jonka kennot on valmistettu amorfisesta piistä (kuva 12). Valmistaja ei ole julkaissut paneelin nimelistehoa, mutta jännitetasoksi on ilmoitettu 5 V. Paneelin aktiivialueen koko on 7 x 8 cm. Paneeli on kiinnitetty pehmeään kehukseen, jonka tarranauhalla paneeli voidaan kiinnittää esimerkiksi olkalaukun hihnaan. Kehykseen on kiinnitetty aurinkosähköä varastoiva 5,5 Wh:n akku, jota voidaan ladata myös verkkovirralla.



Kuva 12. Suntrican ohutkalvopaneeli SolarStrap SS-W205 [30]

4.3 Väriaineherkistetyt paneelit

Yhteenveto

Väriaineherkistetyt aurinkopaneelit ovat kolmannen sukupolven ohutkalvopaneeleita. Puolijohde on niissä valolle herkän väriaineanodin ja elektrolyytin välissä. Väriainekennoissa on kaikki ohutkalvokennojen hyödyt, ja lisäksi niiden hinta-teho-suhde on arvioitu ohutkalvokennoja paremmaksi isoissa valmistuserissä. Teknologian suurimpana ongelmana on ollut kennojen käyttämä nestemäinen elektrolyytti. Korvaavasta kiinteästä elektrolyytistä on julkaistu ensimmäisiä lupaavia tutkimustuloksia. Väriainepaneelit ovat vasta murtautumassa markkinoille, joten niiden saatavuus on vielä heikkoa ja hinnat korkeita.

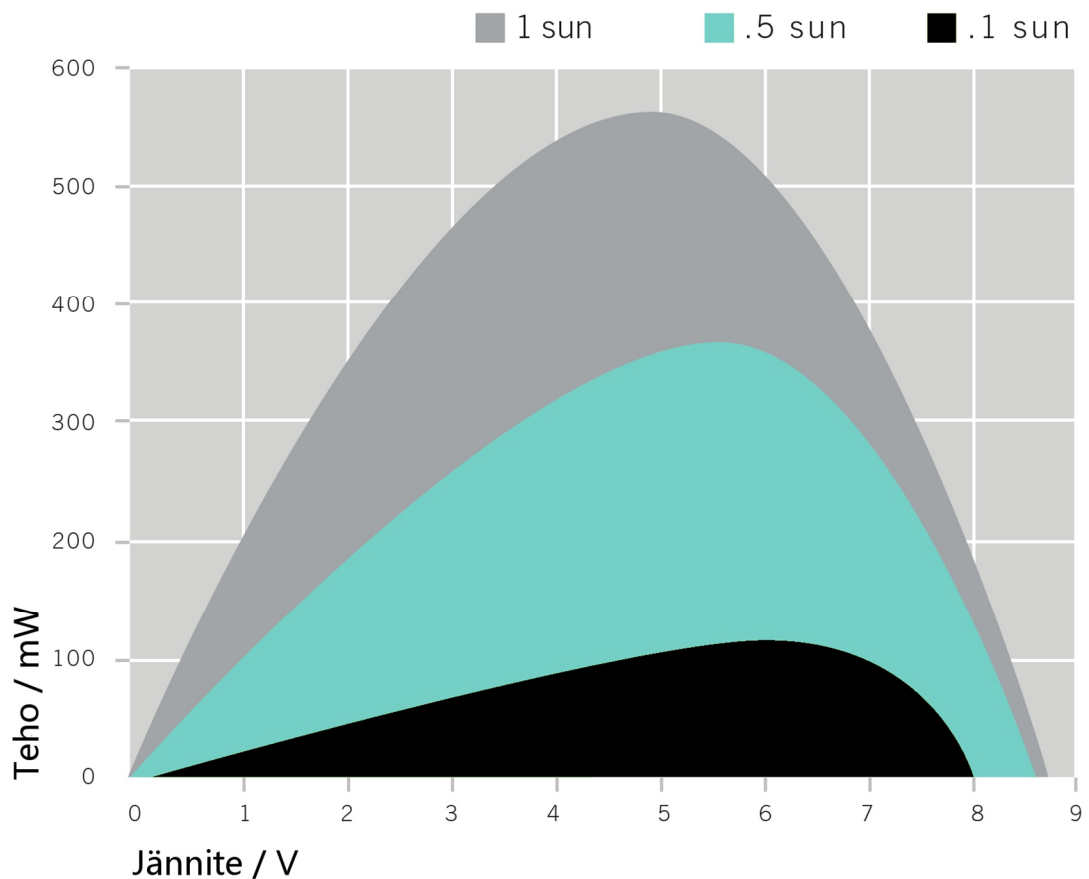
Väriaineherkistetyt aurinkopaneelit luokitellaan rakenteellisesti ohutkalvopaneelisiin, mutta yksityiskohdiltaan niiden rakenne poikkeaa ohutkalvopaneeleista ja ne luokitellaan kolmannen sukupolven paneelisiin. Puolijohde on niissä valolle herkän väriaineanodin ja elektrolyytin välissä. Modernin väriaineherkistetyn aurinkokennon toisena keksijänä pidetään suomalaisella Millenium-tekniologiapalkinnolla vuonna 2010 palkittua sveitsiläistä Michael Grätzeliä. Tämän vuoksi kennoa kutsutaan myös nimellä *Grätzel-kenno*.

Väriaineherkistetyillä paneeleilla on periaatteessa kaikki ohutkalvoteknologian hyödyt: keveys, taipuisuus, osittainen läpinäkyvyys, teollinen rullalta rullalle -valmistusprosessi ja edullinen hinta. Vaikka valmistuksessa tarvittavien rutheniumin, platinan ja lasin tai muovin hinnat ovat suhteellisen korkeita ja paneelien hyötysuhde jää hieman muiden ohutkalvopaneelien hyötysuhdetta alhaisemmaksi, niiden hinta-teho-suhteen on arvioitu isoissa valmistuserissä muodostuvan paremmaksi kuin muiden ohutkalvopaneelien.

Väriaineherkistettyjä paneeleja valmistamaan ja myymään perustettu walesilainen G24i-yhtiö ilmoittaa testanneensa paneeliensa taipuisuutta eikä havainnut paneelien suorituskyvyn laskua, vaikka niitä kierrettiin 10 000 kertaa 2,5 cm säteisen sylinterin ympäri. Koska G24i:n paneeleissa ei käytetä lasia, paneelit ovat käytännössä rikkoutumattomia. Paneelien paksuus on luottokortin luokkaa, ja 20 x 25 cm kokoisen paneelin massa on 50 g. Paneelien mainitaan olevan myös vesitiiviitä, erityisen hyvin korkeissa lämpötiloissa toimivia ja valoa erilaisissa auringonvalo-olosuhteissa hyvin kaappaavia. G24i:n kenno on kuitenkin parhaimmillaan pilvisinä päivinä ja sisäolosuhteissa,

joissa sen hyötysuhde 26 % on maailmanennätysluokkaa [31]. Kennon tehon- ja jännitteentuotot erilaisissa auringon säteilyolosuhteissa esitetään kuvassa 13.

Vastaavantyyppisiä paneeleja myyvä Solaronix ilmoittaa paneelien hyötysuhteeksi standardoiduissa ulkoilmaolosuhteissa 8 %. Solaronixin myymien 10 x 10 cm:n ja 30 x 30 cm kokoisten prototyyppipaneelien hinnat ovat 400 ja 1 500 euroa, mikä kuvastaa uuden teknologian vaikeuksia vallata markkinoita. Kun tuotantomäärät ovat alussa pieniä, tuotteiden yksikköhinnat ovat korkeita. Uuden teknologian alkuhankaluuksia heijastaa myös G24i:n paneeleille lupaama vuoden takuu aika perinteisten kiderakenteisten paneelien valmistajien luvatta yleisesti 25 vuoden takuu aika.



Kuva 13. Walesilaisen aurinkopaneelivalmistajan G24i:n väriaineherkistetyn kennon tehon- ja jännitteentuotto erilaisissa auringonvalo-olosuhteissa; 1 sun vastaa säteilyvoimakkuutta 1 000 mW/m²; .5 sun on puolet tästä ja .1 sun kymmenesosa [32]

Väriaineherkistettyjen kennojen ongelmana on ollut kennojen käyttämä nestemäinen elektrolyytti, joka saattaa jäättyä alhaisissa lämpötiloissa ja laajentua liikaa korkeissa

lämpötiloissa. Nesteen laajentuminen tuo suuria haasteita ulkokäyttöön tarkoitettujen paneelien tiivistämiselle. Elektrolyytti myös sisältää terveydelle ja ympäristölle vaarallisia kemikaaleja, mikä korostaa entisestään paneelien tiivistämisen merkitystä [33].

Taloudellisten vaikeuksien vuoksi G24i:n omistuspohja vaihtui maaliskuussa 2013, ja sen tuotteiden myynti keskeytyi. Tämän vuoksi G24i:n väriaineherkistettyjen ulkokäyttöön tarkoitettujen paneelien mittauksia ei voitu toteuttaa.

5 Tulevaisuuden aurinkokennot

Yhteenveto

Tulevaisuuden kennoteknologioissa suorituskykyä yritetään parantaa useammalla pn-liitoksella hyödyntämällä materiaalfysiikan ja -tekniikan uusimpia keksintöjä, kvanttipisteitä ja nanohiukkasia. Parempaan käytettävyyteen pyritään pienemmän koon, vaivattomamman asennuksen sekä paremman kestävyuden kautta.

Aurinkokennojen suurin tulevaisuuden haaste on tuottaa Shockley-Queisser-ajan hyötysuhteen (noin 34 %) ylittäviä aurinkokennoja taloudellisesti kannattavaan hintaan. Shockley-Queisser-raja koskee vain yhdellä liitoksella varustettuja kennoja, jotka kaappaavat fotonien energiaa vain yhden energia-aukon kokoisina paketteina. Tulevaisuuden kennot yrittävät murtaa rajaa kaappaamalla fotonien energiaa usealla liitoksella, joiden energia-aukot ovat kattavasti erisuuruisia. Erisuuruisia energia-aukkoja voidaan muodostaa perinteisten alkuaineiden ja niiden yhdisteiden lisäksi hyödyntämällä materiaalfysiikan ja -tekniikan uusimpia keksintöjä, kvanttipisteitä ja nanohiukkasia. Myös kokonaan uudentyypisiä materiaaleja puolijohteiden ulkopuolelta, orgaanisia polymeerimuoveja on kehitelty viime vuosina aurinkokennojen raaka-aineeksi.

Aurinkokennojen tehokkuuden parantamisen lisäksi tulevaisuuden kennoilta odotetaan entistä parempaa käytettävyyttä pienemmän koon, vaivattomamman asennuksen sekä paremman kestävyuden muodoissa. Uusien teknologioiden yhteinen nimittäjä on niiden soveltuvuus massatuotantoon, halpojen ja runsaasti saatavilla olevien raaka-aineiden sekä yleisesti saatavilla olevilla välineillä synnyttävien rakenteiden käyttö. Uusiin käsitteisiin liittyvä teknologia on yksinkertaista, mutta tiede niiden taustalla on monimutkaista. Monilla uusilla teknologioilla on laboratorio-olosuhteissa päästy jo yli 10

%.n tehokkuuksiin, mutta makroskooppisissa moduuleissa tehokkuus putoaa noin 5 %:iin. Myös pitkäkestoista stabiiliutta täytyy vielä parantaa. Kolmannen sukupolven aurinkokennot saattavat kuitenkin saavuttaa aurinkopaneeliteknologian laajan käyttöönoton ehtona pidetyn kustannustehokkuuden tason [19, s. 190-191].

5.1 Läpinäkyvät kennot

Yhteenveto

Eri puolilla maailmaan on kehitteillä mm. tarratekniikkaan perustuvia ja elektroniikkalaitteiden näyttöjen alle ja päälle asennettavia paneeliratkaisuja. Paneelien julkaistut hyötysuhteet vaihtelevat suuresti vajaasta 2 %:sta 9 %:iin läpinäkyvyyden ollessa 65-90 %. Läpinäkyvyyden parantaminen heikentää paneelin hyötysuhdetta.

Kennojen integroiminen voisi olla huomattavasti helpompaa viime vuosina kehitetyillä läpinäkyvillä aurinkokennoilla. Yhdysvaltalaisen Stanfordin yliopiston tutkijat ilmoittivat joulukuussa 2012 kehittäneensä tarrojen tapaan liimattavan ja irrotettavan läpinäkyvän aurinkokennotyyppin [34]. Läpinäkyvyyden lisäksi tarrapaneelilla on toinenkin mullistava ominaisuus: Se voidaan liimata mihin tahansa pintaan, eikä se tarvitse työlästä valmistusprosessia vaativaa erityistä alustaa, substraattia (kuva 14) [35]. Tarrapaneelin hyötysuhde on silti lähes yhtä suuri kuin perinteisillä ohutkalvopaneeleilla eli 7,1 % [36]. Paneelia ei ole kuitenkaan vielä tuotu kaupallisille markkinoille.



Kuva 14. Stanfordin yliopistossa kehitetty läpinäkyvä tarra-aurinkopaneeli voidaan liimata käyttötarpeen mukaan erilaisille pinoille. Keksinnön julkistamisen yhteydessä esimerkkipintoina esiteltiin matkapuhelin, käyntikortti ja rakennuksen ikkuna [37].

Massachusetts Institute of Technology (MIT) esitteli huhtikuussa 2011 uuden teknologian, jota ei vaivaa aiempien läpinäkyvien kennoteknologioiden ongelmat: alle 1 %:n hyötysuhde ja heikko läpinäkyvyys. MIT:n kenno on ensisijaisesti kehitetty rakennusten

ikkunoiden pintoihin asennettaviksi. Kenno muuntaa sähköenergiaksi ihmissilmälle näkymättömän infrapunasäteilyn ja päästää lävitseen 65 % näkyvästä valosta. Kennon hyötysuhde on 1,7 %, mutta tutkijat odottavat saavuttavansa 12 %:n hyötysuhteen tulevaisuudessa. [38.]

Ranskalainen Sunpartner Group -yhtiö on kehittänyt elektroniikkalaitteiden näyttöjen päälle tai alle asennettavia hyvin tehokkaita läpinäkyviä Wysips-aurinkokennoja (*What You See Is Photovoltaic Surface* eli Se, mitä näet, on aurinkokennopinta). Maaliskuussa vuonna 2011 esitellyt mikroskooppisilla linssillä varustetut kennot päästävät läpi parhaimmillaan jopa 90 % näkyvästä valosta. Tällöin kennon hyötysuhde on noin 3 %. Kennojen hyötysuhde paranee 9 %:iin, jos kennon läpinäkyvyyttä heikennetään 65 %:iin. Stanfordin tarrapaneeleihin verrattuna Wysips-kennojen asentaminen on kuitenkin paljon työläämpää, eikä teknologiaa ole vielä tuotu kaupallisille markkinoille. Kuvassa 15 havainnollistetaan kennon vaihtoehtoiset asennustavat kosketusnäytölliseen älypuhelimeen. [39.]



Kuva 15. Kosketusnäytöllisessä laitteessa Wysips-kenno voidaan asentaa joko laitteen kosketusnäytön alle tai päälle [40].

5.2 Moniliitosaurinkokennot

Yhteenveto

Moniliitosaurinkokennoissa erilaisia alkuaineiden tai niiden yhdisteiden liitoksia asetetaan päällekkäin moniliitokseksi. Moniliitosaurinkokennot ovat hyvin kalliita, mikä on rajoittanut niiden käytön lähinnä avaruusteknologiaan ja keskittävään aurinkovoimaan.

Eri alkuaineista valmistetut pn-liitokset vastaanottavat auringonsäteilyn fotonien erisuuruisia energioita eri tavoin. Yksittäinen liitos kykenee vastaanottamaan vain tietyn suuruisia fotonien energioita. Perinteinen keino parantaa aurinkokennon hyötysuhdetta yli Shockley-Queisser-ajan on asettaa erilaisia alkuaineiden tai niiden yhdisteiden liitoksia päällekkäin moniliitokseksi. Eri alkuaineiden tai niiden yhdisteiden erisuuruiset energia-aukot kykenevät vastaanottamaan laajemman valikoiman fotonien energioita ja kaappaamaan talteen suuremman osuuden auringon säteilemästä energiasta [1, s. 402–403]. Kahdella peräkkäisellä liitoksella voidaan teoriassa saada talteen 50 % auringon säteilemästä energiasta. Kolmella liitoksella saavutetaan teoriassa 56 % ja 36 liitoksella 72 % auringon säteilyenergiasta. [41.]

Moniliitospaneelit ovat hyvin kalliita, mikä on rajoittanut niiden käytön lähinnä avaruusteknologiaan ja keskittävään aurinkovoimaan (CSP, Concentrating Solar Power). Avaruusteknologisissa ratkaisuissa hinta ei ole ratkaiseva tekijä, vaan tärkeintä on hankkia mahdollisimman tehokas, kevyt ja luotettava paneeli avaruuteen lähetettävän laitteen sähkönsyöttöön. Keskittävässä aurinkovoimassa auringon säteet kohdennetaan peileillä hyvin pienelle pinta-alalle. Tällöin voidaan suuria auringon energiamääriä muuntaa sähköenergiaksi pienellä paneelilla ja pitää aurinkosähkön hinta kohtuullisena.

5.3 Kvanttipisteet

Yhteenveto

Kvanttipisteet ovat pieniä nanometriluokan puolijohdehiukkasia, joita voidaan levittää aurinkokennon substraatin pinnalle. Niillä voidaan säätää kennon absorptio-ominaisuuksia moniliitosten tapaan, mutta säätäminen tapahtuu täysin portaattomasti kvanttipisteiden kokoa muuttamalla.

Kvanttipisteet ovat pieniä nanometriluokan puolijohdehiukkasia, joita voidaan levittää aurinkokennon substraatin pinnalle. Niillä voidaan kennon absorptio-ominaisuuksia säätää samaan tapaan kuin moniliitoksilla, mutta kvanttipisteiden energia-aukkojen suuruudet ovat vapaasti säädettävissä, eivätkä ne ole rajoittuneita käytettyjen materiaalien energia-aukkojen arvoihin. Kvanttipisteiden energia-aukon suuruus riippuu kvanttipisteen koosta. Kokoa säätämällä voidaan siten absorboida vapaasti valitut aallonpituudet auringon säteilyspektristä. Se mihin aiemmin on pyritty eri alkuaineiden ja alkuaineyhdistelmien avulla, voitaisiin tulevaisuudessa saavuttaa kvanttipisteiden kokoa muuttamalla vaihtamatta materiaaleja tai valmistusprosesseja. Lisäksi harvinaisten ja kalliiden puolijohdeiden asemesta kvanttipistekennojen valmistuksessa voitaisiin hyödyntää entistä edullisempia puolijohdemateriaaleja.

5.4 Nestemäiset aurinkokennot

Yhteenveto

Nestemäisten aurinkokennojen perushaasteena on kehittää aurinkokennojen tapaan toimivia partikkeleja stabiiliin liuokseen, joka samalla johtaisi sähköä.

Liuosta maalaamalla tai tulostamalla materiaalin pintaan voidaan australialaisten tutkijoiden mukaan lähivuosina tuottaa energiaa halvemmalla kuin hiilivoimaloissa.

Nestemäisten aurinkokennojen perushaasteena on kehittää aurinkokennojen tapaan toimivia partikkeleja stabiiliin liuokseen, joka samalla johtaisi sähköä ja jota voitaisiin maalata tai tulostaa materiaalin pintaan. Aiemmin nanokiteiden stabiloimiseksi ja niiden yhteenliimautumisen estämiseksi niihin liitettiin orgaanisia ligandeja. Ligandit kuitenkin samalla eristivät kiteitä ja heikensivät niiden sähkönjohtavuutta oleellisesti. Etelä-Kalifornian yliopiston tutkijat ratkaisivat ongelman käyttämällä synteettistä ligandityyppiä, joka stabiloimisen lisäksi muodostaa sähköä johtavia tunneleita päällystettyjen kadmium-selenidi-nanokiteiden välille. Huhtikuussa 2012 he arvelivat teknologian kaupallistamisen olevan kuitenkin vielä vuosien päässä. [42.]

Yhdysvaltalaisen Notre Damen yliopiston aurinkokennotutkijat kehittävät nestemäistä aurinkokennoa titaanioksidi-nanopartikkeleista, jotka päällystetään kadmium-sulfidilla

tai kadmium-selenidillä ja suspendoidaan vesi-alkoholiliuokseen. Sähkön tuottaminen vaatii lisäksi lasilevyt nestekerroksen molemmille puolille. Kennojen valmistaminen on teknisesti hyvin yksinkertaista eikä vaadi vetokaappia monimutkaisempaa teknologiaa. Laboratorio-olosuhteissa kennolla on saavutettu 1 %:n hyötysuhde, mutta teknologia ei tutkijoiden mukaan ole vielä valmis minkäänlaiseen kaupalliseen- tai kotitalouskäyttöön. [43.]

Australialaisessa Newcastle'n yliopistossa nestemäisiä aurinkokennoja on kehitetty puolijohtavista polymeeri-muoveista. Vaikeasti säädeltävässä prosessissa polymeerit hajotettiin hiukkasiksi ja suspendoitiin veteen. Vuoden 2013 loppuun mennessä on määrä valmistua ensimmäinen painokone, jolla aurinkomaalia voidaan tulostaa muovikalvoille. Newcastle'n yliopiston tutkijat lupaavat talojen katoille asennetun aurinkokalvon hinnaksi kymmenesosan perinteisten kiderakenteisten kennojen hinnasta. Tuotteen luvataan olevan kaupallisesti kannattava vuoteen 2016 mennessä ja maksavan \$7/m². Katolle levitetyn 150 m²:n muovikalvon uskotaan tuottavan riittävästi sähköä koko talon tarpeisiin. Tutkijat arvioivat kennojen pian tuottavan energiaa halvemmalla kuin hiilivoimalat ja muuttavan vuoteen 2018 mennessä dramaattisesti ihmisten koko ajattelutavan energiasta. [44.]

5.5 Aurinkokankaat

Yhteenveto

Kankaiden muodossa päälle puettavat aurinkopaneelit ovat yksi kiehtovimmista tulevaisuuden aurinkopaneelisovelluksista. Kehitteillä on myös valokuiduista valmistettavia langanmuotoisia, hiusta ohuempia aurinkokennoja, joita voitaisiin käyttää vaatteiden neulomiseen.

Kankaat ovat suuria toiveita herättänyt sovelluskohde aurinkokennoille. Exotic Solar -yhtiö myy ultrakevyitä ja taipuisia aurinkokennokankaita, joiden luvataan kykenevän lataamaan mobiililaitteen kolmessa tunnissa 700 milliampeerin virralla. Utahin yliopiston nanoteknologiseen tutkimukseen perustuvat tehokkaat aurinkokennot on päällystetty lasikuidulla ja grafeenilla ja lopuksi vielä istutettu pehmeään polymeeri-muoviin riittävän järeän mutta taipuisan rakenteen aikaansaamiseksi. [45.]

Läpinäkyviä kennoja kehittäneen MIT:n tutkimusryhmän menetelmää voidaan soveltaa myös kankaisiin. Kangas pinnoitetaan aurinkokennoilla suljetussa kammiossa kemiallisella höyrydepositiomenetelmällä. Pinnoitteena käytetään raskasmetallien tai harvinaisten alkuaineiden sijasta edullisia orgaanisia molekyylejä. Kennojen hyötysuhde on kuitenkin vasta 2 %:n tasolla. [46.]

Kansainvälisen tutkimusryhmän jäsenet ovat vieneet kankaisiin liittyvän aurinkokennojen kehityksen entistä pienimpiin mittasuhteisiin luomalla valokuiduista langanmuotoisia, hiusta ohuempia aurinkokennoja. Aurinkokennot valmistetaan istuttamalla lasisten valokuitujen sisään piiliitoksia korkeassa paineessa kemiallisella höyrydepositiomenetelmällä. Toimintaperiaatteeltaan aurinkolangat vastaavat näin ollen täysin perinteisiä aurinkokennoja, mutta aurinkolangat absorboivat auringon energiaa kolmiulotteisesti eivätkä ole auringon suunnasta yhtä riippuvaisia kuin normaalit kaksiulotteiset kennot. Tutkijoiden mukaan lankoja voidaan taivuttaa suoraan kulmaan, ja ne kestävät normaaleja vaatteisiin kohdistuvia vetorasituksia, joten aurinkolankaa voitaisiin käyttää vaatteiden neulomiseen. [47.]

6 Aurinkopaneelien mittaukset

6.1 Aurinkopaneelien mittaukset monimetallilampun valossa

Yhteenveto

Aurinkopaneeleja mitattiin ensin keinovalossa, koska mittausolosuhteista haluttiin mahdollisimman stabiilit ja hallitusti säädeltävät. Valonlähteenä käytettiin viileän valkoista monimetallilamppua.

Kaikkien mitattujen paneelien tehot laskivat hyvin samaan tapaan valaistusvoimakkuutta pienennettäessä. Vertailu paneelien toimintaan auringonvalossa paljasti paneelien tuottavan käytetyssä keinovalossa parhaimmillaan vain noin puolet paneelien tehosta auringonvalossa samassa valaistusvoimakkuudessa.

Paneelit olivat yleisesti hyvin lämpötilariippuvaisia. Suntrican ohutkalvopaneelia lukuun ottamatta paneelien tehot putosivat noin 7 % lämpötilan noustessa 10°C.

Paneelit päätettiin ensin mitata sisäolosuhteissa keinovalolla, koska haluttiin mahdollisimman stabiilit ja hallitusti säädeltävät olosuhteet. Ulkona auringonvalossa mitattaessa epätarkkuuksia aiheuttaa erityisesti valaistusvoimakkuuden hallitun muuttamisen ongelmat. Vertailun vuoksi kahden paneelin tehontuotto mitattiin kuitenkin myös pilvetömältä taivaalta paistaneen auringon valossa, jossa valaistusvoimakkuudeksi mitattiin 110 000 lx.

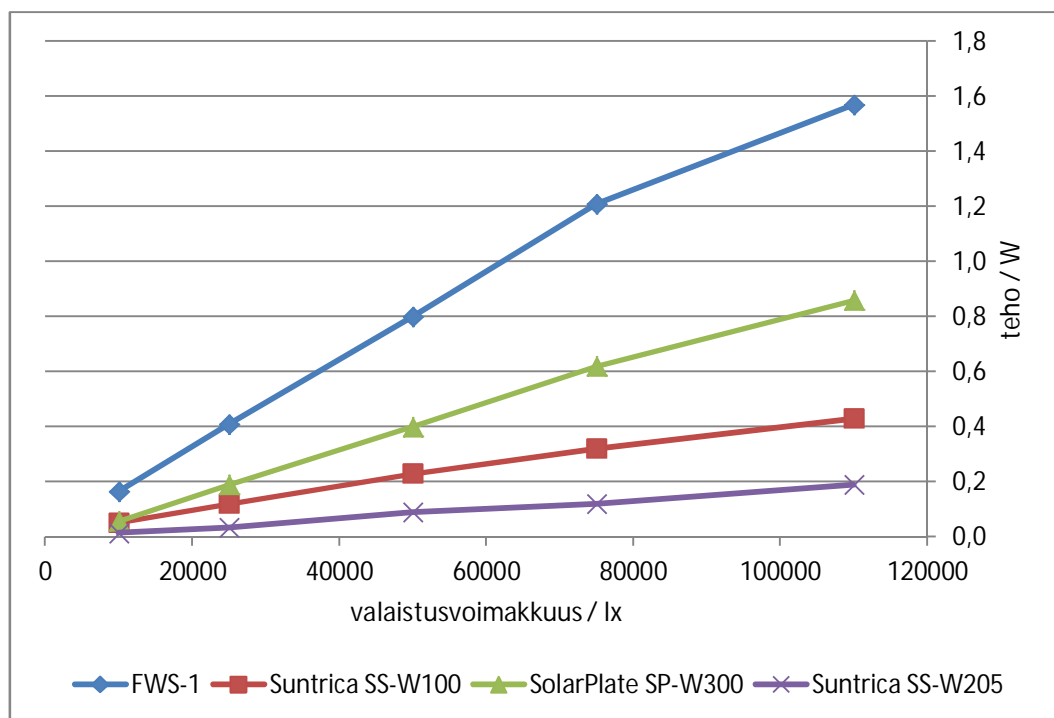
Metropolia AMK:n sähkötekniikan koulutusohjelma tarjosi perusvälineistön mittauksia varten. Valonlähteenä käytettiin keskileveän valonjaon Philips Decoflood MVF606 MB -valonheitintä, johon oli asennettu Philipsin MasterColour CDM-T 150W/942 -monimetallilamppu. Purkauslampun väriämpötila oli viileän valkoinen 4 200 K. Sen valon spektri esitetään kuvassa 19 (ks. sivu 36). Valaistusvoimakkuuksia paneelien pinnoilla säädettiin muuttamalla valonheittimen ja mitattavan paneelin pinnan etäisyyttä. Etäisyyden muuttamisen helpottamiseksi mittaukset suoritettiin vaakatasossa (kuva 16). Oikea valaistusvoimakkuustaso varmistettiin Minolta T-10 -valaistusvoimakkuusmittarilla. Koska aurinkopaneelien toiminnan oletettiin riippuvan lämpötilasta, lämpötiloja paneelien pinnalla seurattiin Fluke 61 -infrapunalämpömittarilla ja pyrittiin pitämään eri paneelien pintalämpötilat mahdollisimman vakioina kullakin valaistusvoimakkuustasolla.



Kuva 16. Aurinkopaneelien ominaisuuksia keinovalossa mitattiin vaakatasossa. Valaistusvoimakkuutta pystysuoraan levyyn kiinnitetyn paneelin pinnalla säädettiin muuttamalla paneelin ja valonheittimen välistä etäisyyttä.

Valonheittimen keila näytti silmämääräisesti riittävän leveältä mittauksia varten, mutta tarkastelu valonvoimakkuusmittarilla osoitti keilan valaistusvoimakkuuden muuttuvan melko jyrkästi erityisesti lyhyemmillä etäisyyksillä. Esimerkiksi auringonvalon valaistusvoimakkuutta vastaavalla 110 000 lx:n voimakkuudella valonheittimen etäisyys aktiivialueeltaan 13 cm leveästä Suntrican kidepaneelista oli 1,27 m. Tällöin valaistusvoimakkuus paneelin nurkissa oli 40 % pienempi kuin paneelin keskellä, johon valonheittimen keilan keskipiste oli kohdistettu.

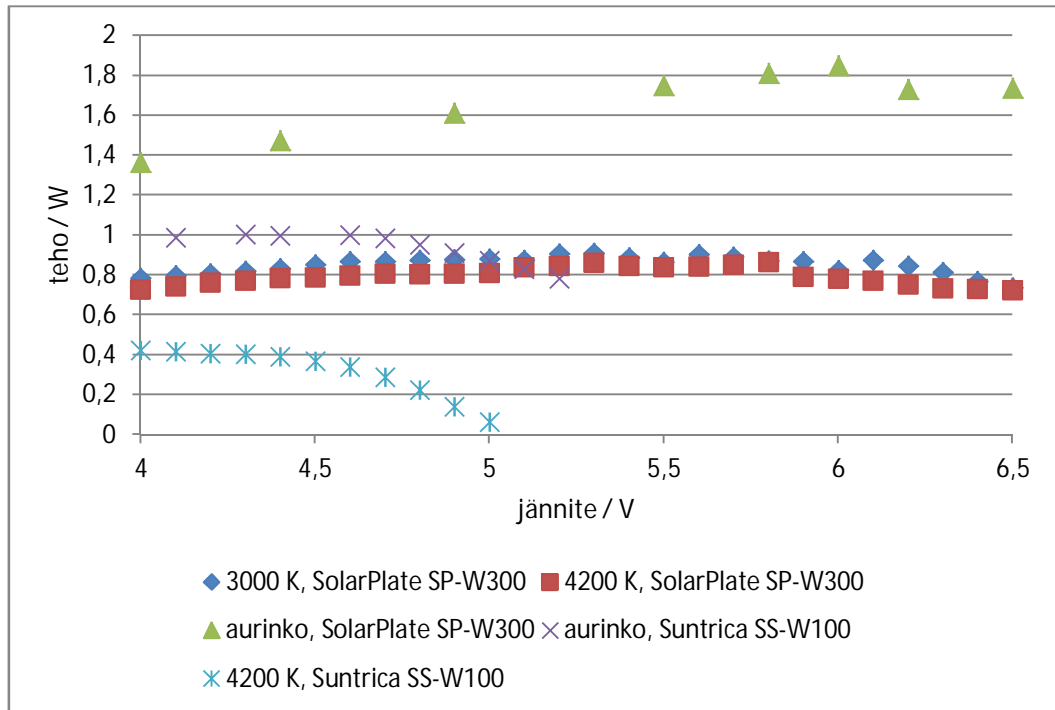
Keilan voimakkuuden vaihtelun ongelmaa lievitettiin asettamalla etäisyys siten, että paneelin maksimi- ja minimivalaistusvoimakkuuksien keskiarvo vastasi tavoiteltua valaistusvoimakkuutta. Suntrican kidepaneelin tapauksessa valaistusvoimakkuus paneelin reunalla oli 78 000 lx ja valaistusvoimakkuus paneelin keskellä oli 132 000 lx. Näiden keskiarvona saatiin haluttu valaistusvoimakkuus 110 000 lx. Kaikkein suurikokoisimpien paneelien mittauksista sisätiloissa luovuttiin keilan kapeuden vuoksi. Mittaustulokset numeerisessa muodossa esitetään liitteessä 2.



Kuva 17. Paneelien tehot valaistusvoimakkuuden funktiona keinovalossa

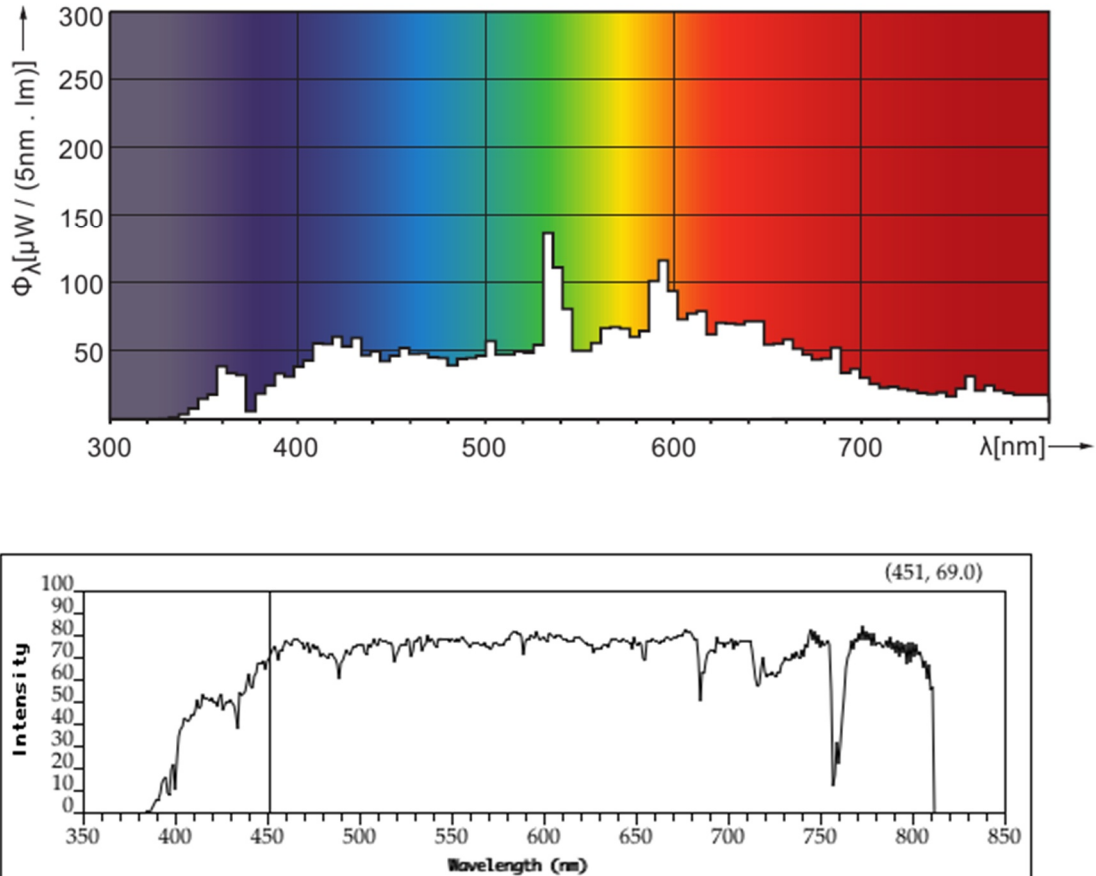
Paneelien tuottamien maksimitehojen mittaamiseksi paneelien kuormaksi kytkettiin säätövastus. Säätövastuksen arvoa muuttamalla pyrittiin löytämään piirin resistanssi,

jolla aurinkopaneelin tuottama teho saavuttaa maksiminsa. Tehon arvoa seurattiin tehoanalysaattorilla, jonka ruudulta voitiin maksimitehon löydyttyä lukea myös aurinkopaneelin tuottaman jännitteen ja virran arvot. Paneeleille eri valaistusvoimakkuustasoilla mitatut maksimitehot on esitetty kuvassa 17 (ks. ed. sivu). Kaikkien mitattujen paneelien tehot laskivat hyvin samaan tapaan valaistusvoimakkuutta pienennettäessä.



Kuva 18. Paneelien tehot laadultaan erilaisissa valaistuksissa, kun valaistusvoimakkuus pidettiin vakiona (110 000 lx)

Vertailu paneelien toimintaan auringonvalossa paljasti paneelien tuottavan käytetyssä keinovalossa parhaimmillaan vain noin puolet paneelien tehosta auringonvalossa (kuva 18). Vaikka käytetty valaistusvoimakkuus oli sama kuin auringonvalon valaistusvoimakkuus, käytetyn lampun valon spektri erosi kuitenkin sen verran paljon auringonvalon spektristä (kuva 19, ks. seur. sivu), että keinovalon fotonien sähköntuotto paneelissa jäi selvästi pienemmäksi. Valmistajien ilmoittamiin arvoihin ja teoreettisiin ennusteisiin verrattuna tulokset keinovalossa olivat oikeansuuntaisia: Paneelit tuottivat tehoa keinovalossa likimain valmistajien ilmoittamien nimellistehojen suhteissa, ja tehontuotot laskivat valaistusvoimakkuuden pudotessa likimain lineaarisesti, kuten oli ennustettavissa.

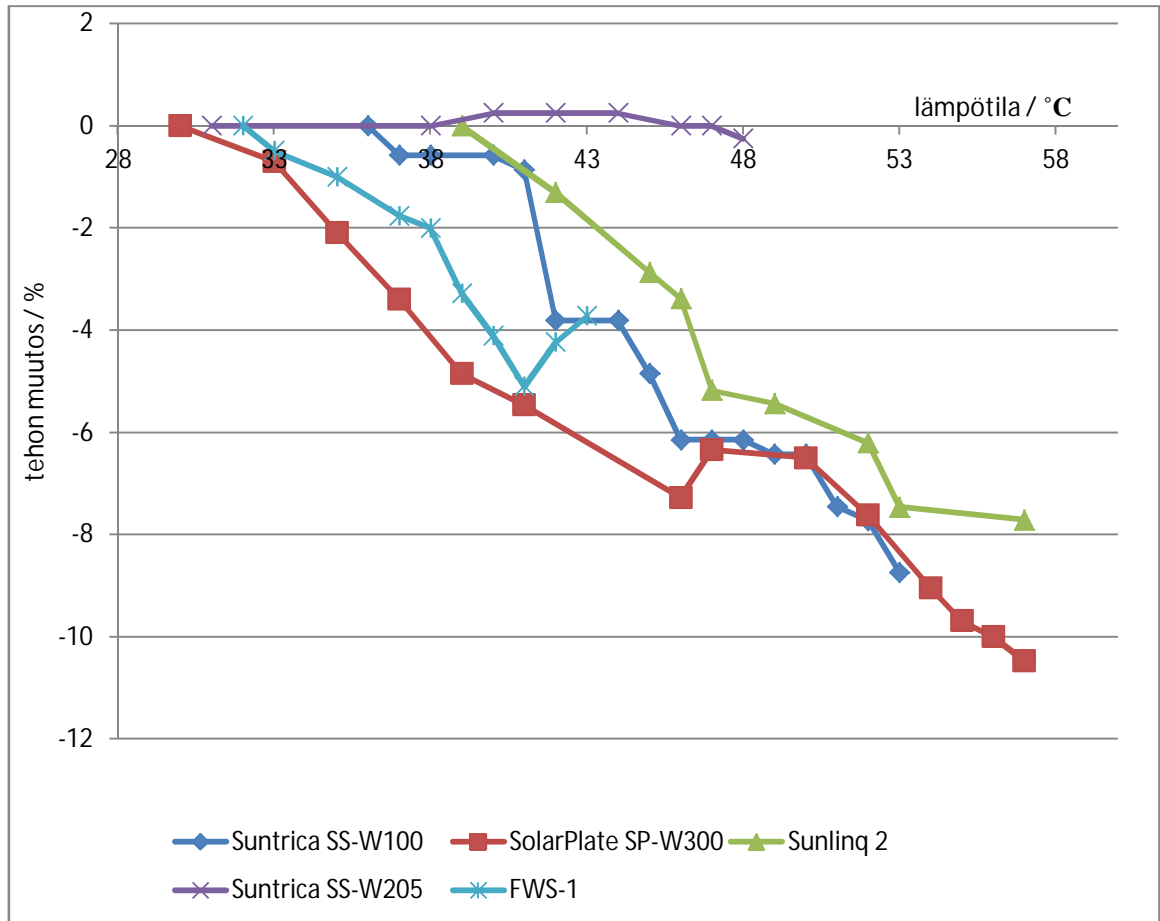


Kuva 19. Mittauksissa käytetyn Philips MasterColour CDM-T 150W/942 -monimetallilampun spektri (ylhäällä) ja auringon valon spektri (alhaalla); X-akselilla valon aallonpituus

Mittaustuloksia keinovalossa on pidettävä suuntaa-antavina, ja ne on vahvistettava mittauksilla auringonvalossa, varsinkin kun isokokoisten taiteltavien ohutkalvopaneelien mittauksista jouduttiin luopumaan käytetyt valokeilan kapeuden vuoksi. Paneelien toimintaa kokeiltiin myös keltaisemmalla 3 000 K:n valolla, mutta tehontuotto sen valossa oli samaa suuruusluokkaa kuin valkoisella valolla (kuva 18, ks. ed. sivu).

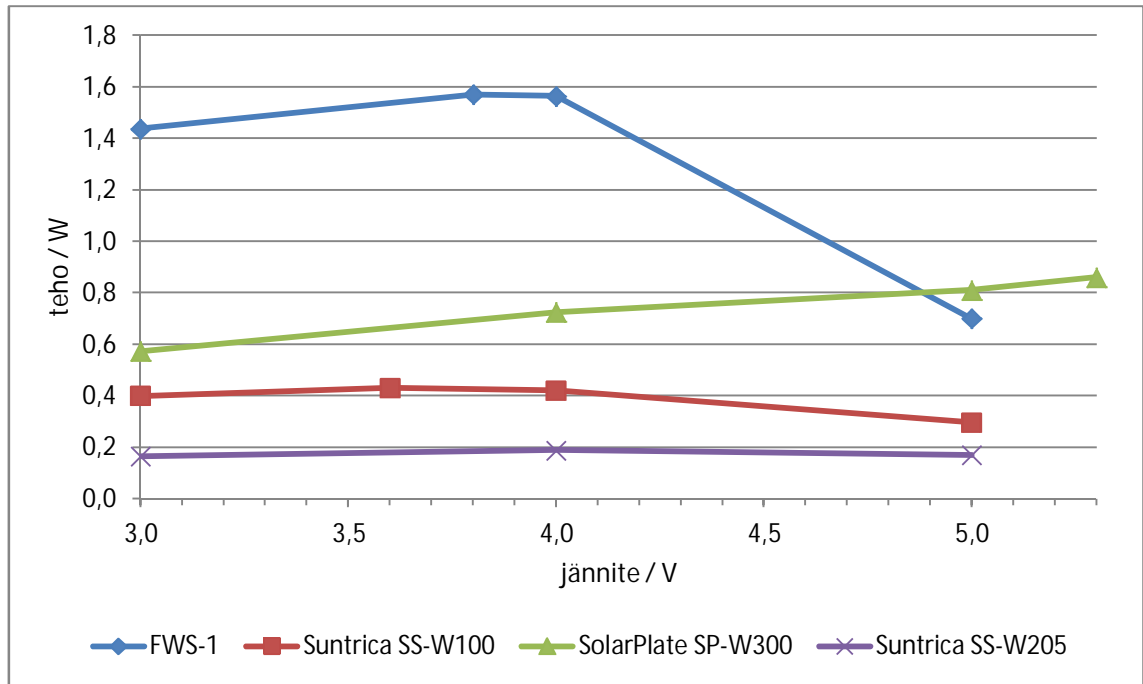
Paneelit olivat yleisesti hyvin lämpötilariippuvaisia. Suntrican ohutkalvopaneelia lukuun ottamatta paneelien tehot putosivat noin 5 % lämpötilan noustessa 10°C (kuva 20, ks. seur. sivu). Suntrican lämmönsietokyky oli poikkeuksellinen. Sen tehontuotto ei laskeutunut yhtään lämpötilan noustessa 30°C:sta valmistajan ilmoittamaan 50°C maksimilämpötilaan. Kiderakenteisen FWS-1-paneelin teho laski lineaarisesti hyvin samaan tapaan kuin muillakin paneeleilla, mutta sen lasipinnan lämpötila nousi 110 000 lx:n valaistusvoimakkuudessa vain 43°C lämpötilaan. Vahva lämpötilariippuvuus synnytti saman

verran epätarkkuutta mitattuihin tehojen arvoihin mitattaessa 110 000 lx:n valaistusvoimakkuudessa. Pienemmillä valaistusvoimakkuuksilla paneelien pintalämpötila pysyi vakiona, mutta vakiolämpötila vaihteli eri valaistusvoimakkuuksilla.



Kuva 20. Mitattujen aurinkopaneelien tehojen muutokset lämpötilan funktiona; Tehoja verrattiin tehokemaan mittaussarjan alimmassa lämpötilassa.

Paneelien suorituskykyä eri jännitteiden arvoilla verrattiin mittaamalla paneelien tehontuottoa 3, 4 ja 5 voltin jännitetasoilla, jotka vastaavat mobiililaitteissa yleisesti käytettyjä jännitetasoja (kuva 21, ks. seur. sivu). Tehontuotto pysyi FWS-1-paneelia lukuun ottamatta vakiona noin 20 %:n tarkkuudella koko jännitealueella. Maksimitehonsa 3,8 V:n jännitteellä saavuttaneen FWS-1-paneelin tehontuotto romahti 5 V:ssa noin puoleen maksimitehosta.



Kuva 21. Paneelien tehontuotto yleisimmillä mobiililaitteiden jännitetasoilla 110 000 lx:n valaistusvoimakkuudessa; Kaavioon on 3, 4 ja 5 voltin jännitetasojen tehojen lisäksi merkitty eri paneelien maksimitehot.

6.2 Aurinkopaneelien mittaukset loistelampun valossa

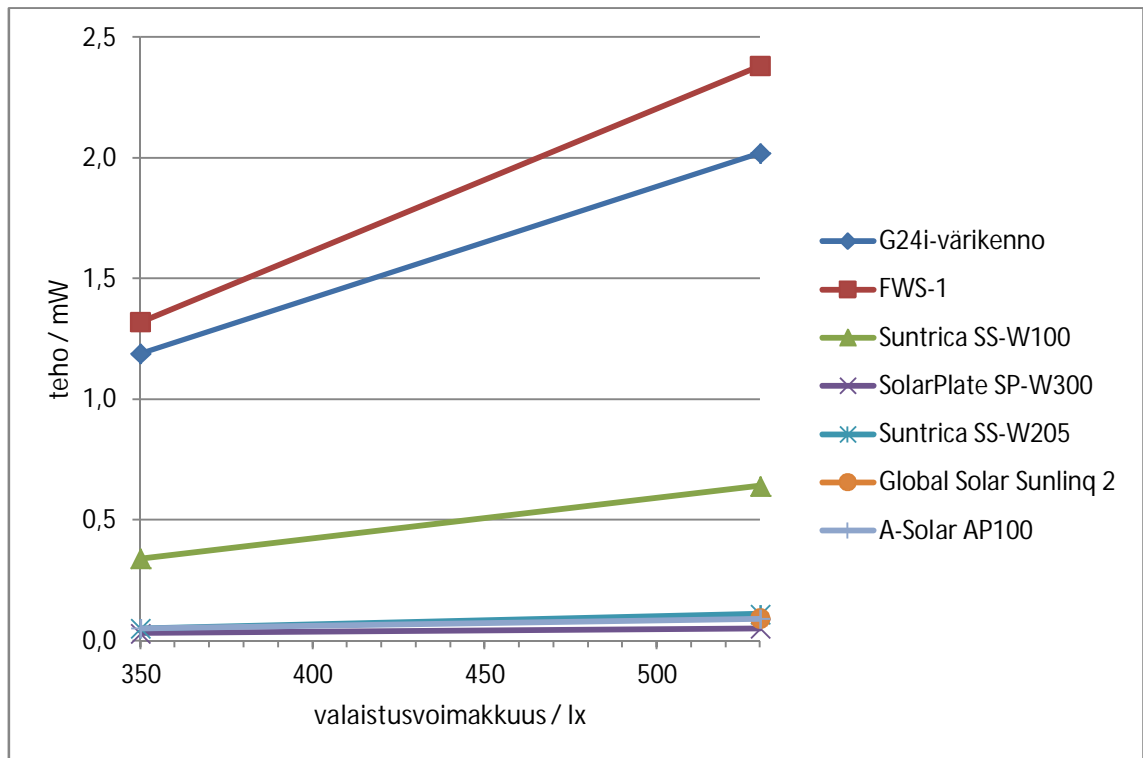
Yhteenveto

Aurinkopaneelien tehontuottoja verrattiin erityisesti keinovalaistukseen suunnitellun väriaineherkistetyn paneelin tehontuottoon toimistolosuhteissa loistelampun valossa. Edullinen kiderakenteinen paneeli FWS-1 tuotti yllättäen 10–20 % väriainepaneelia suurempia tehoja.

Mittausajanjakson lopussa väriaineherkistettyjen kennojen valmistaja G24i toimitti testattavaksi sisätilojen keinovalaistukseen suunnitellun värikenno-paneelin, jonka mitat olivat 20 x 15 cm. Aurinkopaneelien loistelamppuvasteen tutkimiseksi kaikkien paneelien tehontuotto mitattiin toimistotilan loisteputkivalaistuksessa 350 lx:n ja 530 lx:n valaistusvoimakkuuksissa (kuva 22). Mittauslaitteisto oli sama kuin mittauksissa monimetallilampun valossa. Koska G24i:n paneeli on suunniteltu kannettavien laitteiden virransyöttöön erityisesti tällaisissa olosuhteissa, sen jännitetaso oli 4–6 V. Sen sijaan ulko käyttöön suunniteltujen aurinkopaneelien jännitetaso oli 0,5–2,8 V. Mitatut tehot ovat

kuitenkin vertailukelpoisia. Mittaustulokset numeerisessa muodossa esitetään liitteessä 2.

Väriainepaneelia hieman pienemmästä koostaan huolimatta edullinen kiderakenteinen paneeli FWS-1 tuotti yllättäen 10–20 % väriainepaneelia suurempia tehoja. Myös Suntrican SS-W100-paneeli oli tehokas tässä valaistuksessa. Sen sijaan Global Solarin Sunling 2 -paneelin tehontuotto romahti verrattuna sen tehontuottoon vastaavissa valaistusvoimakkuuksissa auringonvalossa.



Kuva 22. Aurinkopaneelien tehontuotot toimistotilan loisteputkivalaistuksessa valaistusvoimakkuuden funktiona

6.3 Aurinkopaneelien mittaukset auringonvalossa

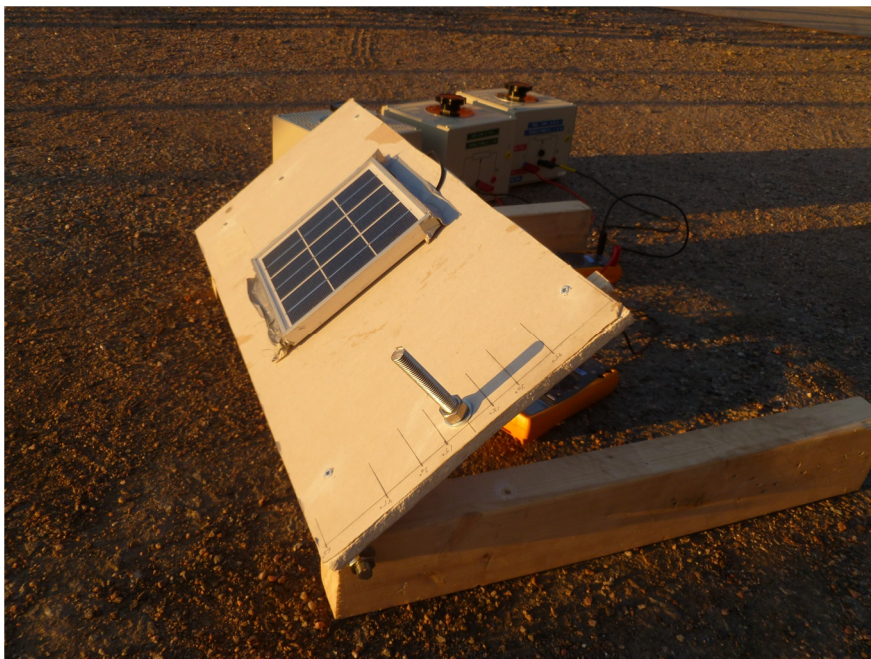
Yhteenveto

Pääasiassa tehot laskivat lineaarisesti valaistusvoimakkuuden pienetessä täydestä auringonvalosta (115 000 lx) 28 000 lx:iin.

Valaistusvoimakkuuden puolittuessa täydestä auringonpaisteesta paneelien tehot laskivat noin 50–60 %:iin maksimista. Alle 28 000 lx:n valaistusvoimakkuuksissa tehonlasku oli jyrkempää, koska sähköisten häviöiden suhteellinen osuus kokonaistehosta kasvoi.

Mitattujen ja valmistajien ilmoittamien maksimitehojen eroissa esiintyi suurta hajontaa. Erot selittynevät ainakin osittain auringonvalon spektrin vaihtelusta. Tansanialaisten luokkahuoneiden istumapaikkojen valaistusvoimakkuuksia vastaavissa valaistusolosuhteissa mitatut aurinkopaneelien tehot olivat hyvin vaatimattomia. Paneelien kallistuskulmien vaikutukset eivät olleet kovin dramaattisia. Kallistuskulmalla 30 paneelien tehot putosivat pääasiassa vain noin 90 %:iin nollakulman tehosta. Kallistuskulmalla 60 paneelien tehot putosivat noin puoleen nollakulman tehoista.

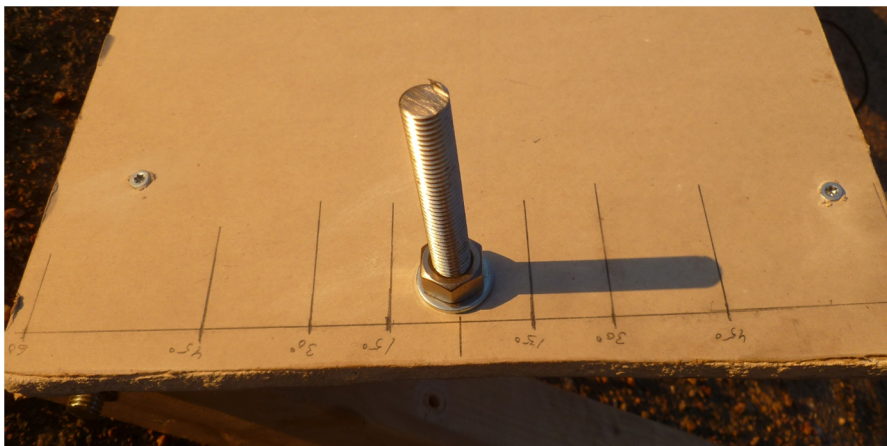
Koska mittaustulokset keinovalossa poikkesivat suuresti vertailutuloksista auringonvalossa, paneeleja päätettiin mitata vielä auringonvalossa, jotta tulokset olisivat paremmin sovellettavissa Tansanian olosuhteisiin.



Kuva 23. Portaattomasti säädettävä mittausalusta auringonvalomittauksia varten

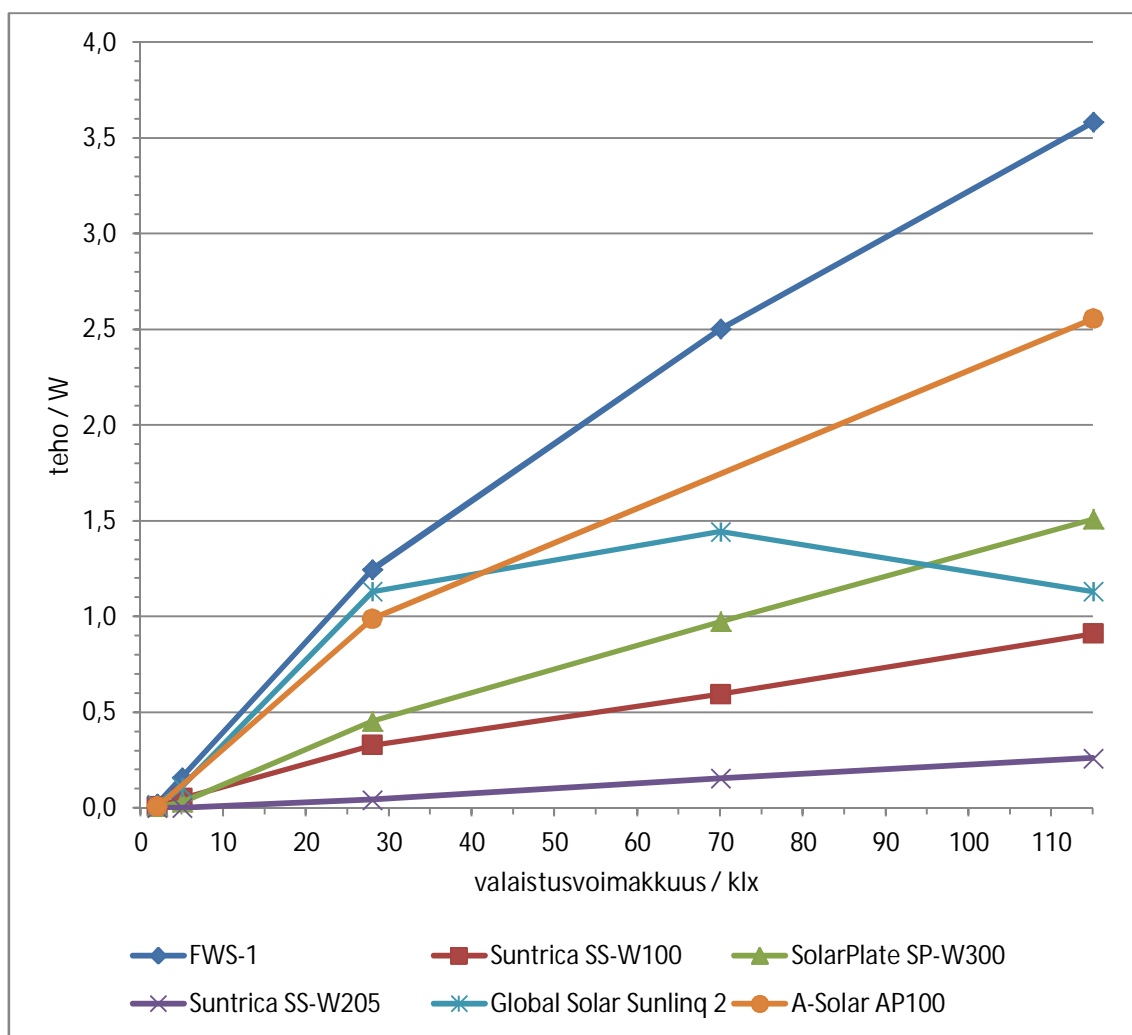
Mittauksia varten rakennettiin mittausalusta, jonka kulmat auringon suhteen voitiin säätää portaattomasti (kuva 23, ks. ed. sivu). Kulmien suuruudet määritettiin määrämittaisen kansipultin varjon suunnasta ja pituudesta (kuva 24).

Koska tehoanalysointia ei ollut käytössä ulkona kenttäolosuhteissa maksimitehon etsimiseen, tehot mitattiin kiinteillä 3, 4 ja 5 V:n jännitteillä yleismittareita käyttämällä. Muutoin mittauslaitteisto oli sama kuin mittauksissa keinovalossa. Suurin teho valittiin kuvaamaan paneelin tehoa kussakin mittausasetelmassa. PowerFilmin AA-paneelin säätöelektroniikkaa ei kyetty purkamaan siten, että suora paneelin mittaaminen olisi onnistunut. Mittaustulokset numeerisessa muodossa esitetään liitteessä 2.



Kuva 24. Mittausalustan kallistuskulmat auringon suhteen voitiin määrittää kansipultin varjon pituuteen perustuvalla asteikolla. Kuvassa aurinko on 45 asteen kulmassa mittausalustan pintaan nähden.

Aurinkopaneelien tuottamat tehot valaistusvoimakkuuden suhteen esitetään kuvassa 25 (ks. seur. sivu). Valaistusvoimakkuudet 70 000 lx ja 28 000 lx mitattiin ilta-auringossa, jossa valaistusvoimakkuuden lasku oli melko nopeaa. Näin ollen paneeleja ei päästy mittaamaan täysin vakioidussa valaistusvoimakkuudessa. Valaistusvoimakkuuksien vaihtelu oli maksimissaan noin $\pm 15\%$. Yksityiskohtaisemmat valaistusvoimakkuustiedot esitetään liitteessä 2. Pilvettömissä olosuhteissa keskipäivän ympärillä mitattaessa valaistusvoimakkuus pysyi hyvin vakiona 115 000 lx:ssa.



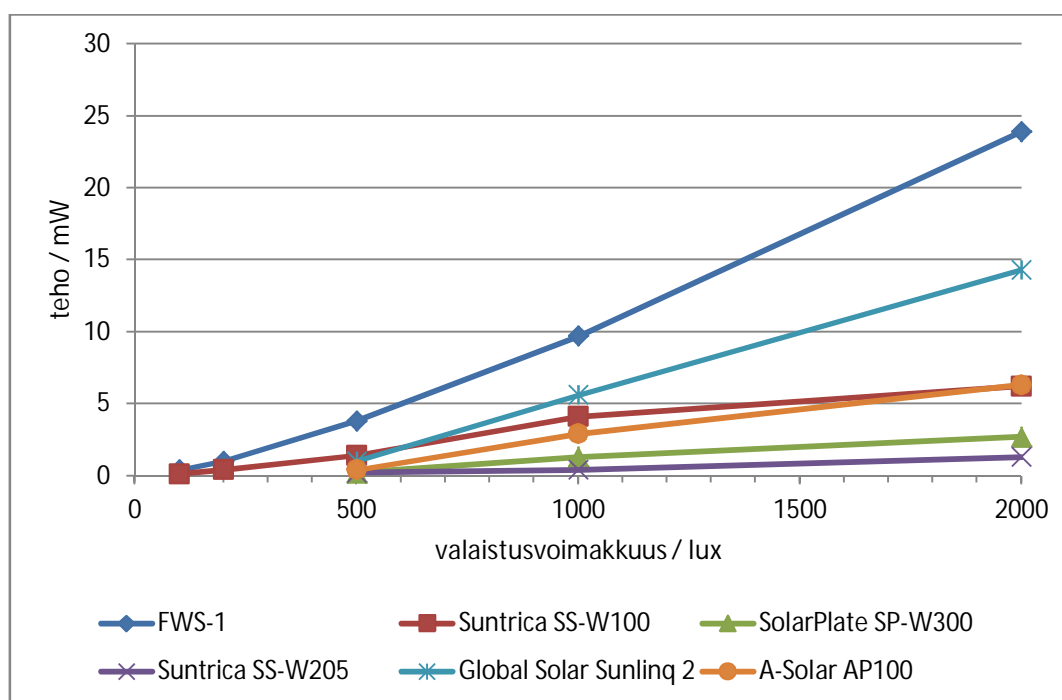
Kuva 25. Aurinkopaneelien tuottamat tehot valaistusvoimakkuuden suhteen auringonvalossa

Pääasiassa tehot laskivat lineaarisesti valaistusvoimakkuuden pienetessä täydestä auringonpaisteesta (115 000 lx) 28 000 lx:iin. Valaistusvoimakkuuden puolittuessa täydestä auringonpaisteesta paneelien tehot laskivat noin 50–60 %:iin maksimista. Alle 28 000 lx:n valaistusvoimakkuuksissa tehonlasku oli jyrkempää, koska sähköisten häviöiden suhteellinen osuus kokonaistehosta kasvoi.

Global Solarin Sunling 2 -paneeli käyttäytyi hyvin erikoisesti. Paneelin tehontuotto romahti 28 000 lx valaistusvoimakkuuden jälkeen muiden paneelien tehontuottoon verrattuna, ja sen tehokäyrä jopa kääntyi laskuun täydessä auringonpaisteessa. Valmistajan ilmoittamasta maksimitehosta jäätin alle kolmasosaan. Paneelin käyttäytyminen varmennettiin vielä tarkistusmittauksin, joissa kaikkien neljän osapaneelin lisäksi todettiin tuottavan samansuuruisia virtoja. Kyse ei siten ollut yksittäisten osapaneelien vioista.

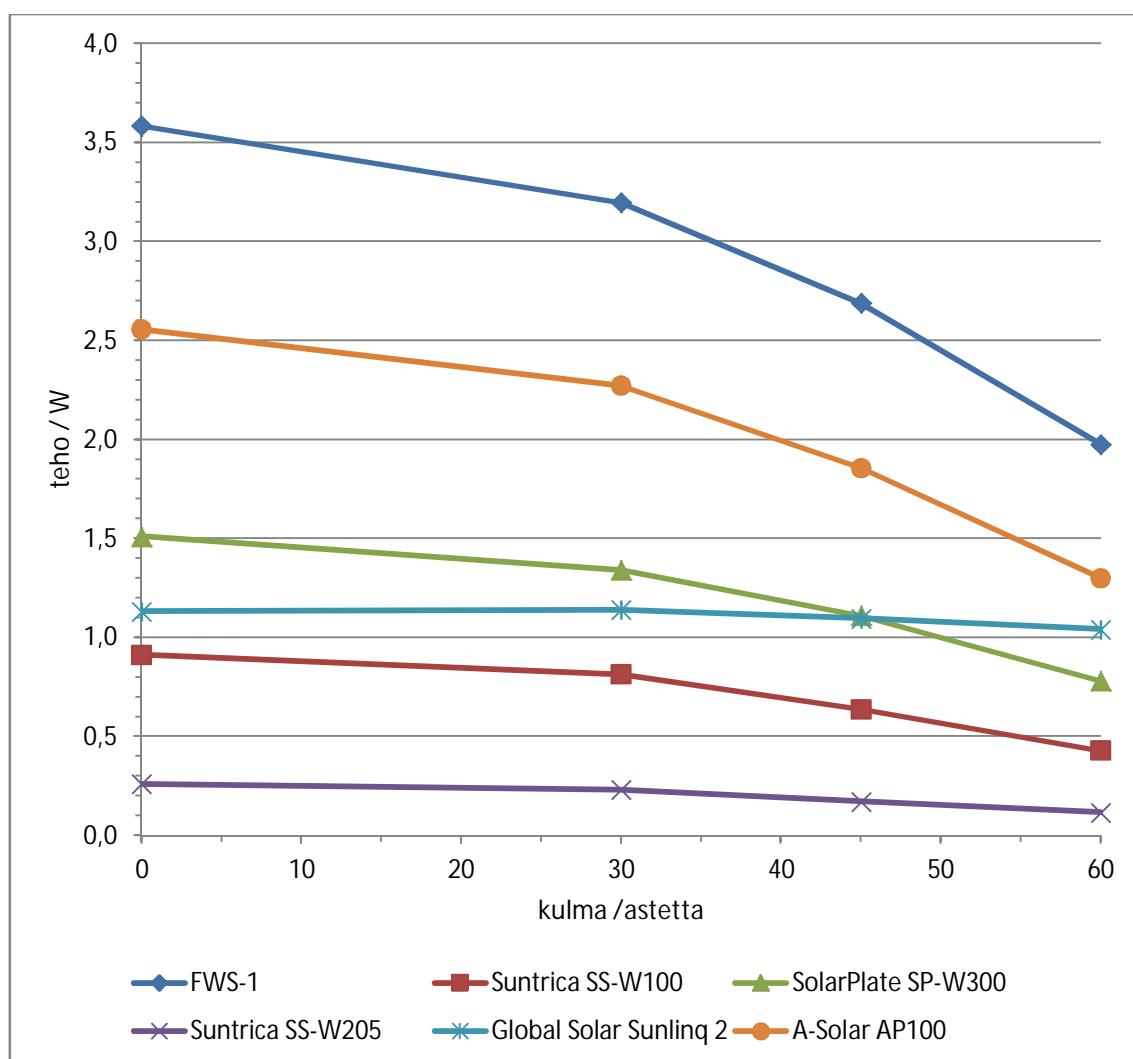
Maksimitehojen suhteen esiintyi muutenkin melkoista hajontaa. FWS-1- ja SolarPlate SP-W300 -paneelit saavuttivat valmistajien ilmoittamat maksimitehot Suomen auringon alla lähes täysin. Suntrican kiderakenteinen paneeli tuotti 70 % valmistajan ilmoittamasta maksimitehosta ja A-Solarin AP100-paneeli tuotti 64 % maksimitehosta. Erot selittynevät ainakin osittain auringonvalon spektrin vaihtelusta. Esimerkiksi SolarPlate SP-W300:n maksimiteho oli klo 11:n aikaan mitattuna (kuva 18, ks. sivu 35) yli 20 % suurempi kuin klo 14:n aikaan mitattuna (kuva 25, ks. ed. sivu), vaikka valaistusvoimakkuus oli 5 000 lx matalampi.

Myös matalat valaistustasot ovat kiinnostavia SunEdu-projektin pilotin toteutuksen kannalta. Koululaiset viettävät päivän aurinkoisimman ajan suurimmaksi osaksi luokkahuoneissa, joissa valaistus muodostuu lasittomista ikkuna-aukoista säteilevästä auringonvalosta. SunEdu-projektin työntekijöiden tansaniaalaisten luokkahuoneiden istumapaikoilla mitaamat valaistusvoimakkuudet olivat 20 – 1 200 lx riippuen etäisyydestä ikkuna-aukkoihin.



Kuva 26. Tansaniaalaisten luokkahuoneiden istumapaikkojen valaistusvoimakkuuksia vastaavissa valaistusolosuhteissa mitatut aurinkopaneelien tehot

Luokahuoneiden istumapaikkojen valaistusvoimakkuuksia vastaavissa valaistusolosuhteissa mitatut aurinkopaneelien tehot on esitetty kuvassa 26 (ks. ed. sivu). Paneelien tehontuotot suhteessa valaistusvoimakkuuksiin ovat pienillä valaistusvoimakkuuksilla suhteellisesti huomattavasti heikompia kuin suurilla valaistusvoimakkuuksilla. Absoluuttiset tehojen arvot ovat käytännössä melko vaatimattomia. Tehokkain FWS-1-paneeli lataisi 1 200 lx:n valaistusvoimakkuudessa lukulaitteen tyhjän akun täyteen noin 166 tunnissa. Ohutkalvopaneeli SolarPlate SP-W300:lla vastaava lataus kestäisi noin kuusi kertaa kauemmin. Vastoin ohutkalvoin yleisesti liitettyjä lupauksia pienet ohutkalvopaneelit osoittautuivat erityisen tehottomiksi heikossa valaistuksessa [26]. Sen sijaan Global Solarin Sunling 2 -paneeli toimi poikkeuksellisen hyvin tässä valaistuksessa.



Kuva 27. Aurinkopaneelien tuottamat tehot paneelien kallistuskulmien suhteen aurin-
gonvalossa; Nollakulma vastaa säteilyä suorassa kulmassa paneelin pintaan.

Aurinkopaneelien tuottamat tehot paneelin asennon suhteen on esitetty kuvassa 27 (ks. ed. sivu). Nollakulmassa aurinko säteili suorassa kulmassa paneelien pintoihin. Kallistuskulmalla 30 astetta paneelien tehot putosivat pääasiassa vain noin 90 %:iin nollakulman tehosta. Suuremmilla kulmilla tehot alkoivat pudota kiihtyvällä tahdilla kallistuskulman asteiden suhteen. Kallistuskulmalla 60 paneelien tehot olivat pudonneet noin puoleen nollakulman tehoista. Global Solarin Sunling 2 käyttäytyi poikkeavasti myös tässä mittausasetelmassa: Kallistuskulmalla ei ollut juurikaan vaikutusta paneelin tuottamiin tehoihin.

7 Yhteenveto

Aurinkopaneelin valinnassa tansanialaiseen maaseutu ympäristöön käytettävyys ja hinta ovat ensisijaisia kriteerejä. Paneelin suorituskyvystä voidaan tinkiä paneelin kestävyden, helpon liikuteltavuuden ja taloudellisten realiteettien eduksi.

Paneelien hintojen tarkkaa vertailua vaikeutti merkittävästi paneelien erilaiset hankintaväylät. Toiset paneelit ostettiin normaaleilta kuluttajamarkkinoilta, kun taas toiset paneelit hankittiin kuluttajahintoja edullisempaan hintaan osana isoja hankintaeriä.

Mitoituslaskelman ja ulkomittausten perusteella vain kiderakenteisten FWS-1- ja A-Solarin AP100-paneelien teho riittäisi suunniteltuun käyttöön. Kiderakenteiset piipaneelit ovat kuitenkin nuorten koululaisten vaativiin olosuhteisiin ja liikkuvaan käyttöön joko liian herkkiä rikkoontumaan tai kestäviksi rakennettuina liian järeitä. Koululaisia vahvempien aikuisten ihmisten rauhallisempaan ympäristöön kiderakenteiset paneelit voisivat olla varteenotettava vaihtoehto.

Ohutkalvopaneelit ovat sekä keveydeltään ja kestävyydeltään selkeästi kiderakenteisiä paneeleja parempia. Isokokoiset taiteltavat paneelit, kuten PowerFilm AA ja Global Solar Sunling 2 soveltuisivat konseptiltaan erinomaisesti projektissa suunniteltuun käyttöön, mutta korkeahko hinta rajoittaa käytännössä niiden hankintaa. Lisäksi mittauksissa ilmeni isoja ongelmia Sunling 2 -paneelin tehontuottokyvyn ja Powerfilm AA -paneelin elektroniikan kanssa. Testattu Sunling 2 -paneeli osoittautui erittäin alitehoiseksi valmistajan lupaamaan tehoon verrattuna. Powerfilm AA -paneelia ei saatu toimimaan paneelin säätöelektroniikan purkamisen jälkeen.

Pienet ei-taiteltavat ohutkalvopaneelit, kuten SolarPlate SP-W300, ovat suurin piirtein samanhintaisia kuin pinta-alaltaan vastaavat kiderakenteiset paneelit. SolarPlate SP-W300 jää teholtaan 25–30 % keskiarvoihin perustuvasta mitoituksen minimivaatimuksesta. Vastaavasta paneelimateriaalista hieman isompana valmistettu paneeli olisi kestävyydeltään ja hinnaltaan ideaalinen suunniteltuun käyttöön. Kohdentamalla laitteiden lataaminen keskipäivän tunteihin, jolloin auringon säteilyteho on parhaimmillaan kaksinkertainen keskiarvoon nähden, SolarPlate SP-W300 voi hyvinkin riittää suunniteltuun käyttöön.

Riittävä tehotaso voitaisiin tarvittaessa varmistaa hankkimalla perhettä kohden kaksi SolarPlate SP-W300 -paneelia. Tällöin hankintakustannukset kaksinkertaistuisivat, mutta toisaalta käytettävyys paranisi paneelien hajautetun käytön myötä. Paneeleilla voitaisiin syöttää virtaa samanaikaisesti kahteen eri laitteeseen kahdessa eri paikassa.

Valaistusvoimakkuus tansaniaalaisten luokahuoneiden istumapaikoilla on liian matala lukulaitteen lataamiseen kohtuullisessa ajassa. Aurinkopaneelin sijoittaminen mahdollisimman lähelle ikkuna-aukkoa riittävän pitkän latauskaapelin päähän voi mahdollistaa laitteen latauksen ja virransyötön myös luokkatiloissa.

Aurinkopaneelien tehon riippuvuus paneelien kallistuskulmasta auringon suhteen ei osoittautunut mittauksissa kovin dramaattiseksi. Vielä 50 asteen kallistuskulmassa optimiasentoon nähden paneelit tuottivat noin 70 % maksimitehoistaan. Tämä on paneelien käytettävyyden kannalta merkittävää: Käyttäjän ei tarvitse huolehtia erityisen tarkasti paneelin asennosta esimerkiksi liikkuessaan.

Mittaukset erilaisissa valaistusolosuhteissa osoittivat, ettei valmistajien spesifikaatioihin tai alan julkaisujen viljelemiin yleisiin totuuksiin voi luottaa kaikissa tapauksissa. Eroavuudet valaistuksen spektreissä saattavat ainakin osittain selittää spesifikaatioiden ja tässä työssä tehtyjen mittausten eroja. Mittaukset erityyppisillä valonlähteillä osoittivat paneelien tehontuottojen olevan hyvin riippuvaisia valonlähteiden spektreistä.

Mobiililaitteisiin integroitavat aurinkokennot ovat läpimurtonsa kynnyksellä. Niiden suorituskyky alkaa olla riittävällä tasolla, mutta hintatason on vielä arvoitus, koska ainoatakaan ei ole vielä tuotu markkinoille. Myös laitteiden ylikuumeneminen auringossa on estettävä ennen lopullista läpimurtoa.

Kehitteillä oleviin nestemäisiin aurinkokennoihin on liitetty odotuksia koko energiantuotannon mullistamisesta lähivuosina. Sähköenergiaa tehokkaasti tuottava aurinkokennomaalilla maalattu pinta ratkaisisi myös monien mobiililaitteiden virransyöttöongelmat.

Lähteet

- 1 Messenger, Roger A. & Ventre, Jerry. 2010. Photovoltaic Systems Engineering. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press.
- 2 McEvoy, Agustin & Grätzel Michael. 2010. Nanotechnology in Dye-Sensitized Photoelectrochemical Devices. Teoksessa Garcia-Martinez (toim.). Nanotechnology for the Energy Challenge. Weinheim: Wiley.
- 3 Johnson, Dexter. 2013. Nanowires Could Enable Solar Cells to Surpass the Shockley-Queisser Limit. Verkkodokumentti. IEEE Spectrum. <http://spectrum.ieee.org/nanoclast/green-tech/solar/nanowires-could-enable-solar-cells-to-surpass-the-shockleyqueisser-limit> . 26.3.2013. Luettu 17.5.2013.
- 4 Shockley, William & Queisser, Hans J. 1961. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. J. Appl. Phys. Vol. 32, s. 510-519.
- 5 DeMeo, D., MacNaughton, S., Sonkusale, S. & Vandervelde, T. 2011. Electrodeposited Copper Oxide and Zinc Oxide Core-Shell Nanowire Photovoltaic Cells. Teoksessa Hashim, A. (toim.). Nanowires - Implementations and Applications. Verkkodokumentti. InTech. <http://www.intechopen.com/books/nanowires-implementations-and-applications/electrodeposited-copper-oxide-and-zinc-oxide-core-shell-nanowire-photovoltaic-cells> . 18.7.2011. Luettu 17.5.2013.
- 6 Markvart, Tomas. 2001. Solar Electricity. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons.
- 7 Roberts, Hannah. 2013. School that spent £500,000 giving its pupils iPads admits that HALF are now broken. Verkkodokumentti. Daily Mail. <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2255546/School-spent-500-000-giving-pupils-iPads-admits-HALF-broken.html> .1.1.2013. Luettu 28.3.2013.
- 8 Sampo Nurmentaus. 2013. Tutkimuspäällikkö, Metropolia Electria, Vantaa. Keskustelu 23.5.2013.
- 9 OLPC Plans Solar Charging, Satellite Internet for XO-3. 2011. Verkkodokumentti. PCWorld. <http://www.pcworld.com/article/236008/article.html> . 19.7.2011. Luettu 28.3.2013.
- 10 XO-3. 2013. Verkkodokumentti. OLPC Foundation. <http://wiki.laptop.org/go/XO-3> . 11.1.2013. Luettu 28.3.2013.

- 11 Shah, Agam. 2012. OLPC cancels XO-3 tablet, downplays need for new hardware. Verkkodokumentti. Network World. <http://www.networkworld.com/news/2012/112912-olpc-cancels-xo-3-tablet-downplays-264647.html> .29.11.2012. Luettu 28.3.2013.
- 12 Biggs, John. 2012. OLPC Project Puts Tablets In The Hands Of Formerly Illiterate Children With Amazing Results. Verkkodokumentti. TechCrunch. <http://techcrunch.com/2012/11/01/olpc-project-puts-tablets-in-the-hands-of-formerly-illiterate-children-with-amazing-results/> . 1.11.2012. Luettu 28.3.2013.
- 13 OLPC XO-3. Verkkodokumentti. Wikipedia. http://en.wikipedia.org/wiki/OLPC_XO-3 .21.3.2013. Luettu 2.4.2013.
- 14 Bourzac, Katherine. 2011. Low-Cost Tablet Runs on Three Watts of Power. Verkkodokumentti. MIT Technology Review. <http://www.technologyreview.com/news/425680/low-cost-tablet-runs-on-three-watts-of-power/#> . 7.10.2011. Luettu 28.3.2013.
- 15 Sivakumar ,P. V. 2012. Revolution through an I-slate in AP village. Verkkodokumentti. The Hindu. <http://www.thehindu.com/news/national/andhra-pradesh/revolution-through-an-islite-in-ap-village/article3770591.ece> 14.8.2012 . Luettu 28.3.2013
- 16 Iringa, Tanzania - Sunrise, sunset, dawn and dusk times. Verkkodokumentti. Gaisma. <http://www.gaisma.com/en/location/iringa.html> . Luettu 24.5.2013.
- 17 Mousazadeha, H., Keyhania, A., Javadib, A., Moblia, H., Abriniac, K. & Sharifib, A. 2009. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 13, s. 1800–1818.
- 18 Heiser, G., Aberle, A., Wenham, S. & Green, M. 1995. Two-dimensional numerical simulations of high-efficiency silicon solar cells. Microelectronics Journal. Vol. 26, s. 273–286.
- 19 VTT. 2009. Energy visions 2050. Helsinki: Edita.
- 20 Small Solar Panels. Verkkodokumentti. Sharp. <http://www.sharp.net.nz/articles/components/microelectronics/small-solar-panels/> . Luettu 28.3.2013.
- 21 George, Alexander. 2012. Sun on the Run: 4 Portable Solar Chargers Tested. Verkkodokumentti. Wired. http://www.wired.com/reviews/2012/01/reviews_roundup_solarchargers/?pid=2119 . 31.1.2012. Luettu 28.3.2013.

- 22 Jouko Häyrynen. 2013. Toimitusjohtaja, Suntrica Oy, Salo. Keskustelu 21.5.2013.
- 23 Specifications. 2009. Verkkodokumentti. Sharp.
<http://www1.futureelectronics.com/doc/SHARP/LR0GC02.pdf> . 27.11.2009. Luettu 2.4.2013.
- 24 Product sheet AP100. Verkkodokumentti. A-Solar.
<http://www.a-solar.eu/DugOut-ext/shop/Resources/Public/docs/AP100SolarBooster4Wattpanel-EN.pdf> . Luettu 3.5.2013.
- 25 Suntrica SolarStrap Basic. Verkkodokumentti. Suntrica.
http://www.suntrica.com/brochures/Brochure_SS-W100_EN.pdf . Luettu 3.5.2013.
- 26 Grover, Sami. 2009. Thin-Film vs Crystalline Solar: Parallel Installation. Verkkodokumentti. TreeHugger. <http://www.treehugger.com/solar-technology/thin-film-solar-goes-head-to-head-with-crystalline.html> . 20.5.2009. Luettu 28.3.2013.
- 27 Pearson, Natalie Obiko. 2012. Solar Thin-Film Panels May Outperform Rival Technology in India. Verkkodokumentti. Bloomberg.
<http://www.bloomberg.com/news/2012-04-18/solar-thin-film-panels-may-outperform-rival-technology-in-india.html> . 18.4.2012. Luettu 28.3.2013.
- 28 Frequently Asked Questions. Verkkodokumentti. PowerFilm Solar.
<http://www.powerfilmsolar.com/faq> . Luettu 28.3.2013.
- 29 Portable Solar Chargers. Verkkodokumentti. Global Solar Energy.
<http://www.globalsolar.com/products/retail/> . Luettu 25.3.2013.
- 30 Suntrica SolarStrap Freedom. Verkkodokumentti. Suntrica.
http://www.suntrica.com/brochures/Brochure_SS-W205_EN.pdf . Luettu 3.5.2013.
- 31 Czyzewski, Andrew. 2012. Dye-based organic PVs could remove need for batteries. Verkkodokumentti. The Engineer.
<http://www.theengineer.co.uk/sectors/energy-and-environment/news/dye-based-organic-pvs-could-remove-need-for-batteries/1012299.article> . 11.4.2012. Luettu 28.3.2013.
- 32 Outdoor applications. Verkkodokumentti. G24i Power.
<http://www.g24i.com/pages,outdoor-applications,64.html> . Luettu 3.5.2013.
- 33 Henderson, Sandra. 2012. Leaky Grätzel Cell Problem May be Solved. Verkkodokumentti. Solar Novus Today.

- <http://www.solarnovus.com/index.php?view=article&id=5086> . 11.6.2012. Luettu 24.5.2013.
- 34 Willington, Ray. 2012. Stanford Researchers Develop Flexible Thin Film Solar Cell Stick-On Decals. Verkkodokumentti. Hot Hardware. <http://hothardware.com/News/Stanford-Researchers-Develop-Flexible-Thin-Film-Solar-Cell-StickOn-Decals/> . 24.12.2012. Luettu 28.3.2013.
- 35 Decal-like application process allows thin, flexible solar panels to be applied to virtually any surface. 2012. Verkkodokumentti. PhysOrg. <http://phys.org/news/2012-12-decal-like-application-thin-flexible-solar.html> . 20.12.2012. Luettu 28.3.2013.
- 36 Anthony, Sebastian. 2012. Stanford creates flexible, high-efficiency peel-and-stick solar cells. Verkkodokumentti. Extreme Texh. <http://www.extremetech.com/extreme/144027-stanford-creates-flexible-high-efficiency-peel-and-stick-solar-cells> . 24.12.2012. Luettu 25.3.2013.
- 37 Decal-like application process allows thin, flexible solar panels to be applied to virtually any surface. 2012. Verkkodokumentti. PhysOrg. <http://phys.org/news/2012-12-decal-like-application-thin-flexible-solar.html> . 20.12.2012. Luettu 28.3.2013.
- 38 Chandler, David L. 2011. Turning windows into powerplants. Verkkodokumentti. MIT News. <http://web.mit.edu/newsoffice/2011/transparent-solar-windows-0415.html> . 15.4.2011. Luettu 28.3.2013.
- 39 Martin, Laurence. Yield and transparency : a twofold challenge. Verkkodokumentti. Sunpartner Group. <http://sunpartnergroup.com/yield-and-transparency/> . Luettu 22.3.2013.
- 40 Wysips Crystal. Sunpartner Group. http://sunpartnergroup.com/wp-content/uploads/2012/08/doctech_wysips_crystal.pdf . Luettu 2.4.2013.
- 41 Barber, D. A. 2012. IMM and the Advance of Multi-Junction PVs. Verkkodokumentti. EnergyTrend. http://pv.energytrend.com/research/research_solar_20120403.html . 3.4.2012. Luettu 28.3.2013.
- 42 Liquid Solar Cells Can Be Painted Onto Surfaces. Verkkodokumentti. Science-Daily. <http://www.sciencedaily.com/releases/2012/04/120425140455.htm> . 25.4.2012. Luettu 14.5.2013.
- 43 Heaton, Brian. 2012. Paint-On Solar Cells Developed by Notre Dame Researchers. Verkkodokumentti. Government Technology. 4.1.2012. Luettu 24.5.2013.

- 44 Kelly, Matthew. 2013. Newcastle Uni's solar paint printing. Verkkodokumentti. Newcastle Herald. 18.3.2013. Luettu 24.5.2013.
- 45 Meinhold, Bridgette. 2012. Exotic Solar's "PowerCloth" Turns Clothing Into Energy Generators. Verkkodokumentti. Eccouterre. <http://www.ecouterre.com/exotic-solars-powercloth-turns-clothing-into-energy-generating-powerhouses/> 23.7.2012. Luettu 14.5.2013.
- 46 Tozzi, John. 2012. Miles Barr: Printing Solar Cells on Paper and Clothes. Verkkodokumentti. Bloomberg Businessweek. <http://www.businessweek.com/articles/2012-04-19/miles-barr-printing-solar-cells-on-paper-and-clothes> . 19.4.2012. Luettu 14.5.2013.
- 47 Anthony, Sebastian. 2012. The first flexible, fiber-optic solar cell that can be woven into clothes. Verkkodokumentti. Extreme Texh. <http://www.extremetech.com/computing/142755-the-first-flexible-fiber-optic-solar-cell-that-can-be-woven-into-clothes> . 7.12.2012. Luettu 14.5.2013.

Taulukko 1. Yhteenvedo valintakriteereistä ja aurinkopaneelien ominaisuuksista

paneeli	paneelin kennon tyyppi	paneelin massa / g	paneelin kokonaismitat /cm	paneelin aktiivialueen mitat /cm	paneelin hintataso (1 = halvin, 5 = kallein)	ilmoitettu suorituskyky	mitattu suorituskyky
A-Solar AP-100	kidepaneeli, Si	272	25,5 x 17,5 x 1,5	22,7 x 13	3	4 W	2,6 W
FWS-1	kidepaneeli, cSi	466	18,5 x 18,5 x 1,7	16 x 16	2	3,6 W	3,6 W
Suntrica SS-W100	kidepaneeli, poly-cSi	85	16,3 x 11,2 x 0,7	13 x 8	1	1,3 W	0,9 W
Global Solar Sunling 2	ohutkalvokenno	174	63 x 23 x 0,1	46,5 x 17,5	3	4 W	1,1 W
Powerfilm AA	ohutkalvokenno, aSi	109	54 x 14 x 0,15	47,5 x 11,9	3	2,2 W	-
Suntrica SS-W205	ohutkalvokenno, aSi	20	10,8 x 9,5 x 0,7	8 x 7	2	-	0,3 W
SolarPlate SP-W300	ohutkalvokenno, CIGS	65	17,8 x 17,8 x 0,7	13 x 14	2	1,6 W	1,9 W
G24i	väriainekalvo	50	20 x 25		4	0,55 W	-
Solaronix Serio 1010W11	väriainekalvo		11,4 x 11,4	10 x 10	5	-	-
Solaronix Serio 3030W31	väriainekalvo		32 x 32	30 x 30	5	-	-

Taulukko 1. Suntrica SS-W100:n lämpötilariippuvuuden mittaustulokset

lämpötila / °C	jännite / V	virta / mA	teho / W	tehon muutos / %
36	3,47	130	0,451	0,0
37	3,45	130	0,449	-0,6
38	3,45	130	0,449	-0,6
40	3,45	130	0,449	-0,6
41	3,44	130	0,447	-0,9
42	3,39	128	0,434	-3,8
44	3,39	128	0,434	-3,8
45	3,38	127	0,429	-4,8
46	3,36	126	0,423	-6,1
47	3,36	126	0,423	-6,1
48	3,36	126	0,423	-6,1
49	3,35	126	0,422	-6,4
50	3,35	126	0,422	-6,4
51	3,34	125	0,418	-7,4
52	3,33	125	0,416	-7,7
53	3,32	124	0,412	-8,7

Taulukko 2. Global Solar Sunling 2:n lämpötilariippuvuuden mittaustulokset

lämpötila / °C	jännite / V	virta / mA	teho / W	tehon muutos / %
30	6,30	144	0,907	0,0
33	6,30	143	0,901	-0,7
35	6,30	141	0,888	-2,1
37	6,26	140	0,876	-3,4
39	6,21	139	0,863	-4,9
41	6,17	139	0,858	-5,5
46	6,14	137	0,841	-7,3
47	5,86	145	0,850	-6,3
50	5,85	145	0,848	-6,5
52	5,82	144	0,838	-7,6
54	5,77	143	0,825	-9,0
55	5,77	142	0,819	-9,7
56	5,75	142	0,817	-10,0
57	5,72	142	0,812	-10,5

Taulukko 3. Suntrica SS-W205:n lämpötilariippuvuuden mittaustulokset

lämpötila / °C	jännite / V	virta / mA	teho / W	tehon muutos / %
31	4,00	47	0,1880	0,0
38	4,00	47	0,1880	0,0
40	4,01	47	0,1885	0,2
42	4,01	47	0,1885	0,2
44	4,01	47	0,1885	0,2
46	4,00	47	0,1880	0,0
47	4,00	47	0,1880	0,0
48	3,99	47	0,1875	-0,2

Taulukko 4. FWS-1:n lämpötilariippuvuuden mittaustulokset

lämpötila / °C	jännite / V	virta / mA	teho / W	tehon muutos / %
32	4,10	380	1,558	0,0
33	4,08	380	1,550	-0,5
35	4,07	379	1,543	-1,0
37	4,06	377	1,531	-1,8
38	4,05	377	1,527	-2,0
39	4,04	373	1,507	-3,3
40	4,06	368	1,494	-4,1
41	4,13	358	1,479	-5,1
42	4,00	373	1,492	-4,2
43	4,00	375	1,500	-3,7

Taulukko 5. SolarPlate SP-W300:n lämpötilariippuvuuden mittaustulokset

lämpötila / °C	jännite / V	virta / mA	teho / W	tehon muutos / %
30	6,30	144	0,907	0,0
33	6,30	143	0,901	-0,7
35	6,30	141	0,888	-2,1
37	6,26	140	0,876	-3,4
39	6,21	139	0,863	-4,9
41	6,17	139	0,858	-5,5
46	6,14	137	0,841	-7,3
47	5,86	145	0,850	-6,3
50	5,85	145	0,848	-6,5
52	5,82	144	0,838	-7,6
54	5,77	143	0,825	-9,0
55	5,77	142	0,819	-9,7
56	5,75	142	0,817	-10,0
57	5,72	142	0,812	-10,5

Taulukko 6. Mittaustulokset monimetallilampun valossa ja auringonvalossa

jännite / V	3000 K, SolarPlate SP-W300		4200 K, SolarPlate SP-W300		aurinko 110 000 lx, SolarPlate SP-W300		aurinko 110 000 lx, Suntrica SS-W100		4200 K, Suntrica SS-W100	
	virta / mA	teho / W	virta / mA	teho / W	virta / mA	teho / W	virta / mA	teho / W	virta / mA	teho / W
4,0	196	0,78	181	0,72	341	1,36			105	0,42
4,1	194	0,80	181	0,74			240	0,98	101	0,41
4,2	192	0,81	181	0,76					96	0,40
4,3	190	0,82	179	0,77			233	1,00	93	0,40
4,4	189	0,83	178	0,78	335	1,47	226	0,99	88	0,39
4,5	189	0,85	175	0,79					81	0,36
4,6	188	0,86	173	0,80					73	0,34
4,7	184	0,86	171	0,80			209	0,98	61	0,29
4,8	182	0,87	167	0,80			198	0,95	46	0,22
4,9	179	0,88	164	0,80	329	1,61	185	0,91	28	0,14
5,0	176	0,88	162	0,81			174	0,87	12	0,06
5,1	171	0,87	164	0,84			162	0,83		
5,2	174	0,90	162	0,84			150	0,78		
5,3	171	0,91	162	0,86						
5,4	164	0,89	158	0,84						
5,5	157	0,86	154	0,84	318	1,75				
5,6	161	0,90	150	0,84						
5,7	156	0,89	149	0,85						
5,8	150	0,87	149	0,86	312	1,81				
5,9	147	0,87	134	0,79						
6,0	137	0,82	130	0,78	308	1,85				
6,1	143	0,87	126	0,77						
6,2	136	0,84	121	0,75	279	1,73				
6,3	129	0,81	116	0,73						
6,4	120	0,77	114	0,73						
6,5	113	0,73	111	0,72	267	1,74				

Taulukko 7. Mittaustulokset vakiojännitteillä ja maksimiteholla keinovalossa

jännite / V	FWS-1		Suntrica SS-W100		SolarPlate SP-W300		Suntrica SS-W205	
	virta / mA	teho / W	virta / mA	teho / W	virta / mA	teho / W	virta / mA	teho / W
3,0	479	1,4	133	0,40	191	0,57	55	0,17
3,6			120	0,43				
3,8	418	1,6						
4,0	391	1,6	105	0,42	181	0,72	47	0,19
5,0	140	0,7	59	0,30	162	0,81	34	0,17
5,3					162	0,86		

Taulukko 8. Mittaustulokset eri valaistusvoimakkuuksissa keinovalossa

		FWS-1	Suntrica SS-W100	SolarPlate SP-W300	Suntrica SS-W205
110 000 lx	jännite / V	3,8	3,6	5,3	4,0
	virta / mA	418	120	162	47
	teho / W	1,57	0,43	0,86	0,19
75 000 lx	jännite / V	3,7	3,5	5,0	3,9
	virta / mA	327	92	123	31
	teho / W	1,21	0,32	0,62	0,12
50 000 lx	jännite / V	3,4	3,7	5,0	3,9
	virta / mA	234	63	79	23
	teho / W	0,80	0,23	0,40	0,09
25 000 lx	jännite / V	3,4	3,7	4,9	3,8
	virta / mA	120	32	38	9
	teho / W	0,41	0,12	0,19	0,034
10 000 lx	jännite / V	3,3	3,7	3,8	3,0
	virta / mA	50	14	15	5
	teho / W	0,17	0,052	0,057	0,015

Taulukko 10. Mittaustulokset aurinkopaneelien eri kallistuskulmissa auringonvalossa

aurinkopaneeli	suure	kulma / astetta			
		0	30	45	60
FWS-1 (107 000 lx)	jännite / V	4,0	4,0	4,0	4,0
	virta / mA	896	799	672	494
	teho / W	3,6	3,2	2,7	2,0
	jännite / V	4,0	4,0	4,0	4,0
Suntrica SS-W100 (115 000 lx)	virta / mA	228	203	159	107
	teho / W	0,9	0,8	0,6	0,4
	jännite / V	5,0	5,0	5,0	5,0
	virta / mA	302	268	222	156
SolarPlate SP-W300 (114 000 lx)	teho / W	1,5	1,3	1,1	0,8
	jännite / V	5,0	5,0	5,0	4,0
	virta / mA	52	46	34	29
	teho / W	0,3	0,2	0,2	0,1
Suntrica SS-W205 (115 000 lx)	jännite / V	4,0	4,0	4,0	4,0
	virta / mA	283	285	274	260
	teho / W	1,1	1,1	1,1	1,0
	jännite / V	4,0	4,0	4,0	4,0
Global Solar Sunling 2 (114 000 lx)	virta / mA	639	568	464	325
	teho / W	2,6	2,3	1,9	1,3
	virta / mA				
	teho / W				
A-Solar AP100 (114 000 lx)	virta / mA				
	teho / W				
	virta / mA				
	teho / W				

Taulukko 11. Mittaustulokset loistelampun valossa ja auringonvalossa

	530 lx loistelamppu			350 lx loistelamppu		1 000 lx aurinko	
	jännite / V	virta / mA	teho / mW	virta / mA	teho / mW	virta / mA	teho / mW
G24i-värikenno	4,1			0,29	1,19		
	5,6	0,36	2,02				
	6,5					0,91	5,92
FWS-1	1,0	1,54	1,54	1,00	1,00	3,10	3,10
	2,0	1,19	2,38	0,66	1,32	4,83	9,66
	2,8	0,23	0,64				
	3,0					3,10	9,30
Suntrica SS-W100	1,0	0,33	0,33	0,18	0,18	1,50	1,50
	2,0	0,30	0,60	0,17	0,34	1,41	2,82
	2,8	0,23	0,64				
	3,0					1,36	4,08
	4,0					0,30	1,20
SolarPlate SP-W300	0,5			0,05	0,03		
	0,7	0,07	0,05				
	1,0					1,26	1,26
Suntrica SS-W205	0,9			0,05	0,05		
	1,0	0,11	0,11			0,40	0,40
	2,0					0,13	0,26
Global Solar Sunlinq 2	1,0	0,09	0,09			2,98	2,98
	2,0					2,81	5,62
	3,0					0,24	0,72
A-Solar AP100	0,7			0,07	0,05		
	1,0	0,09	0,09			2,94	2,94
	2,0					0,69	1,38