

Jukka Saarensilta

Aurinkosähkön hyödyntäminen

Teknisten ratkaisujen kartoitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

19.12.2012

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Jukka Saarensilta Aurinkosähkön hyödyntäminen Teknisten ratkaisujen kartoitus 61 sivua + 2 liitettä 19.12.2012
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	rakennusten sähkö- ja tietotekniikka
Ohjaajat	lehtori Matti Sundgren projekti-insinööri Harri Hahkala
<p>Tässä insinööriyössä perehdyttiin aurinkosähköteknologioihin ja niiden hyötykäyttöön tällä hetkellä sekä niiden tulevaisuuden mahdollisuuksiin. Työssä suunniteltiin myös Metropolia Ammattikorkeakoulun aurinkoenergialaboratorion käyttöön sopivia aurinkosähköteknologioita sekä esiteltiin testauslaitteistoja ja testausta tukevia käytäntöjä. Valittavien teknologioiden tulee luonnollisesti soveltua mahdollisimman hyvin Suomen olosuhteisiin.</p> <p>Tutkimus aloitettiin tutustumalla aurinkosähköjärjestelmien eri sukupolviin ja valosähköiseen ilmiöön perustuvan tekniikan käsitteisiin. Ensimmäisen sukupolven aurinkokennoissa käytetään kiteistä piitä raaka-aineena. Tällaisten kennojen hyötysuhde on hyvä, mutta niiden valmistuskustannukset ovat suuret. Toisen sukupolven tuotteet perustuvat ohutkalvotekniikkaan. Näiden hyötysuhde on huonompi kuin kiteiseen piihin perustuvilla kennoilla. Valmistuskustannukset ovat kuitenkin alhaisemmat, joten lopulliset kustannukset muodostuvat kohtuullisiksi. Lähes kaikki kolmannen sukupolven tuotteet ovat vielä tuotekehitysvaiheessa. Seuraavien 5–10 vuoden aikana tullaan näkemään, mitkä uudet tuotteet tulevat olemaan kilpailukykyisiä tällä hetkellä markkinoilla olevien tuotteiden kanssa. Ainoa kolmannen sukupolven tuote, joka on jo saatavilla kaupallisesti, on niin sanottu väriaineherkistetty aurinkokenno. Insinööriyössä tutkittiin myös keskittäviä aurinkosähköjärjestelmiä ja rakennuksiin integroitavia järjestelmiä. Tutkimuksen perusteella näyttää siltä, että molemmat järjestelmät tulevat olemaan tärkeitä aurinkosähkön tuottajia tulevaisuudessa.</p> <p>Tutkimuksen tuloksena todettiin, että saatavilla on paljon erilaisia aurinkosähköjärjestelmiä. Testauslaboratorioon kannattaa valita toisen sukupolven ohutkalvotekniikkaan perustuvia laitteita, koska niiden hajavalon hyödyntämiseen liittyvät ominaisuudet ovat hyvät. Suomen ilmasto-olosuhteista johtuen hajasäteily on täällä hyvin yleistä. Lisäksi rakennuksiin integroitavat järjestelmät, kuten aurinkosähköä tuottavat ikkunat, tulisi ottaa mukaan testaukseen. Edellä mainittujen järjestelmien rinnalla tarvitaan myös ensimmäisen sukupolven tuotteita, koska niiden käytöstä on pitkäaikaista kokemusta. Tämä mahdollistaa niiden käyttämisen testauksessa luotettavana vertailukohtana.</p>	
Avainsanat	aurinkosähkö, aurinkokenno, aurinkopaneeli, photovoltaic, ohutkalvo

Author Title Number of Pages Date	Jukka Saarensilta Utilization of Solar Power Mapping of technical solutions 61 pages + 2 appendices 19 December 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	Electrical Engineering for Building Services
Instructors	Matti Sundgren, Senior Lecturer Harri Hahkala, Project Manager
<p>In this thesis different photovoltaic technologies and utilization of those was studied. The aim was to study which would be the most appropriate technologies to be tested in Metropolia University of Applied Sciences solar laboratory. Technologies that will be selected should be suitable for demanding Finnish climatic conditions.</p> <p>The study was started by exploring photovoltaic systems of different generations and the concept of photoelectric effect. In the first generation solar cells crystalline silicon is used as raw material. The efficiency of these cells is good, but their manufacturing costs are high. The second generation products are based on thin-film technology. The efficiency of these cells is lower than crystalline silicon-based cells efficiency is. Manufacturing costs are lower, so the final cost is competitive with the products of the first generation. Almost all of the third generation products are still in development phase. During the next 5–10 years we will see which new products will be competitive with the product currently at the market. The only third generation product, which is already commercially available, is so-called dye sensitized solar cell. The thesis also examined concentrated solar power systems and building integrated systems. Based on the study it appears that both systems will be important in solar electricity generation in the future.</p> <p>As a result of this study, it was found that there are a wide range of solar power systems available. For the testing laboratory one should select a second generation thin film based devices, as these scattered light utilization characteristics are good. Due to Finnish climatic conditions the scattered radiation is very common in Finland. In addition, building integrated systems, such as solar electricity generating windows, should be utilized in testing. Together with the above-mentioned systems the first generation products are needed in testing, because we have a long-term experience of their usage. Thus we can use the first generation products as a reliable reference point for testing purposes.</p>	
Keywords	solar power, solar cell, photovoltaic, wafer, thin film, crystalline silicon, amorphous silicon, BIPV

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Aurinkoenergiaprojektin tavoitteet	1
3	Aurinkosähköjärjestelmän rakenne	2
3.1	Aurinkokenno	3
3.1.1	Aurinkokennojen sukupolvet	4
3.1.2	Ensimmäinen sukupolvi	4
3.1.3	Toinen sukupolvi	6
3.1.4	Kolmas sukupolvi	7
3.1.5	Perinteisen aurinkokennon toimintaperiaate	8
3.1.6	Aurinkokennon ominaiskäyrä ja hyötysuhde	12
3.2	Lataussäädin	16
3.3	Akku	17
3.4	Vaihtosuuntaaja	17
3.5	Kaapelointi ja suojaus	18
4	Aurinkopaneelien asennus	20
5	Testausympäristö	27
5.1	Testausstrategia	27
5.2	Testauslaitteistoa	30
5.3	Etäyhteys	32
6	Aurinkokennojen markkinat, tuotanto ja kustannukset	32
6.1	Markkinatilanne ja asennukset	32
6.2	Tuotanto	38
6.3	Kustannukset	39
7	Teknologian eri vaihtoehtoja maailmalla	41
7.1	Keskittävä aurinkosähköjärjestelmä	41
7.2	Rakennuksiin integroidut järjestelmät	42
7.3	Tuotekehitysnäkymiä	45
8	Yhteenveto	49

Liitteet

Liite 1. Maakohtaisia aurinkosähköjärjestelmien asennusmääriä

Liite 2. Kymmenen suurinta aurinkosähköpuistoa

1 Johdanto

Hiilidioksidipäästöjen jatkuva lisääntyminen ja maapallon energiavarojen väheneminen johtavat vääjäämättä tilanteeseen, jossa meidän on pakko etsiä uusia ratkaisuja, joiden avulla pystymme tuottamaan tarvitsemaamme energiaa tehokkaasti ja ympäristöystävällisesti. Metropolia Ammattikorkeakoulu perustaa aurinkoenergian testaus- ja tutkimuslaboratorion Leppävaaran toimipisteeseen. Tämän insinööriyön tavoitteena on kartoittaa käytettävien aurinkosähköteknologioiden vaihtoehtoja ja tulosten perusteella suositella, millaisia laitteistoja laboratorioon kannattaisi hankkia.

EU:n energiapolitiikan keskeisenä tavoitteena on "20–20–20-tavoite". Tavoitteena on vähentää 20 % kasvihuonekaasupäästöjä, lisätä 20 % energiatehokkuutta sekä 20 % uusiutuvien energialähteiden käyttöä. Tavoite tulisi saavuttaa vuoteen 2020 mennessä. Toteutuessaan tämä tavoite tulee vaikuttamaan merkittävästi sähkön käyttöön ja tuotantoon. [1, s. 8.]

Aurinkoenergia on erittäin hyvä vaihtoehto energiaongelmien ratkaisuun globaalista näkökulmasta, mutta myös Suomessa auringosta maanpinnalle tulevaa säteilyä on saatavilla kohtuullinen määrä. Suomen maantieteellinen asema aiheuttaa kuitenkin rajoituksia, mikä näkyy käytännössä tuotannon epätasaisena jakautumisena kesä- ja talvikauden välillä.

Aurinkolämpö- ja aurinkosähköjärjestelmien asennuksia on viime vuosien aikana tehty kiihtyvällä vauhdilla. Vuoden 2010 lopussa asennettujen aurinkosähköjärjestelmien tuottama kokonaisteho maapallolla oli noin 35 GW [2].

2 Aurinkoenergiaprojektin tavoitteet

Vuoden 2012 alussa Metropolia Ammattikorkeakoulun Leppävaaran toimipisteessä käynnistettiin aurinkoenergian hyödyntämiseen liittyvä projekti. Projektin tavoitteena on suunnitella ja rakentaa Metropoliaan aurinkoenergian testaus- ja tutkimuslaboratorio. Laboratoriossa tullaan testaamaan ja tutkimaan rinnakkain sekä perinteisiä aurin-

koenergiajärjestelmiä että tuotekehityksen viimeisimpiä ratkaisuja. Näin pystytään vertaamaan eri laitteistojen suorituskykyarvoja keskenään ja saamaan luotettavia tuloksia.

Suomessa olosuhteet aurinkosähkön hyödyntämisen kannalta eivät ole optimaaliset. Kesä- ja talvikausi ovat auringon säteilymäärien kannalta täysin eriarvoisia. Lisäksi Etelä- ja Pohjois-Suomen välillä on suuri ero maanpinnalle tulevassa säteilymäärässä. Tärkeä tavoite Metropolian aurinkoenergiaprojektin tutkimuksissa onkin etsiä sopivia aurinkoenergiaratkaisuja juuri Suomen olosuhteita ajatellen. Tutkimus- ja testaustulosten avulla voidaan verrata eri tuotteiden todellisia mitattuja arvoja valmistajien antamiin arvoihin. Näin ei olla enää ainoastaan tuotevalmistajien ja myyntimiesten antamien, ehkä hieman subjektiivisten, teknisten tietojen armoilla.

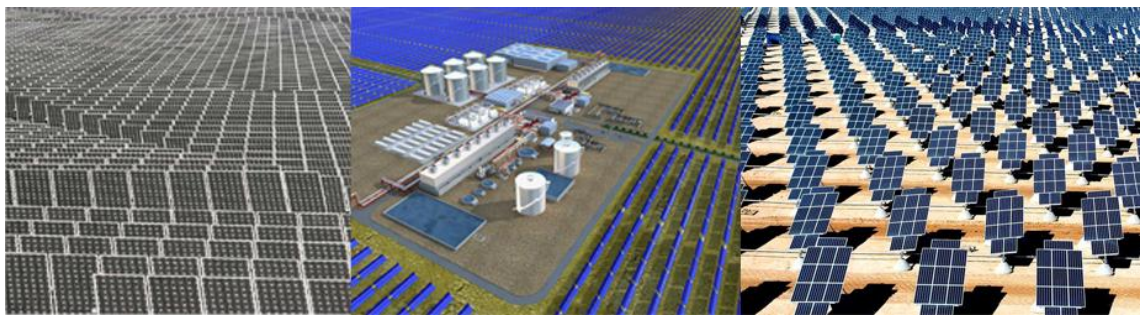
Tämä aurinkoenergiaprojekti sisältää sekä aurinkolämpöön että aurinkosähköön liittyvät laitteistot. Laboratorioon hankittavien laitteistojen määrittely on yksi projektin tärkeimmistä tehtävistä. Testaussuunnittelu on toinen keskeinen tehtävä, koska ilman selkeää testausstrategiaa saadut testitulokset voivat olla lähes hyödyttömiä. Aurinkoenergialaitteistojen ja testauslaitteistojen hankinta on myös haasteellinen osa projektia. Esimerkiksi kolmannen sukupolven laitteistojen saatavuus on huono. Myös laitteistojen asennuksen suunnittelu ja toteutus sekä laboratoriotilojen rakennustekniset haasteet vaativat huolellista suunnittelua, jotta saadaan rakennettua toimiva kokonaisuus.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään aurinkosähköjärjestelmiin, niiden teknisiin ratkaisuihin sekä erityyppisten järjestelmien testaukseen. Lisäksi tutustutaan aurinkosähköjärjestelmien markkinatilanteeseen sekä paneelien tuotantoon ja kustannuksiin.

3 Aurinkosähköjärjestelmän rakenne

Aurinkosähköjärjestelmä voi olla joko itsenäinen tai verkkoon liitetty. Itsenäinen aurinkosähköjärjestelmä tarkoittaa sitä, että kaikki aurinkopaneeleista syntyvä energia säilötään akkuihin. Tällöin akuista on saatavissa tasasähköä (DC). Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä tarkoittaa nimensä mukaisesti sitä, että syntyvä energia voidaan ohjata sähköverkkoon muidenkin käytettäväksi. Tällöin kyseessä on vaihtosähkö (AC). Aurinkosähköjärjestelmä voi olla myös sellainen, jossa käytetään akkuja mutta se on lisäksi liitetty verkkoon. Tällaisen järjestelmän etuna on se, että syntyvä sähkön ylikä-

pasiteetti voidaan hyödyntää myymällä se yleiseen jakeluverkkoon. Pienet aurinkosähköjärjestelmät, kuten yleensä kesämökeillä käytettävät järjestelmät, ovat yleensä itsenäisiä akkuihin sähköenergiaa kerääviä järjestelmiä. Toki tällaisista järjestelmistä saadaan myös vaihtosähköä vaihtosuuntaajan eli invertterin avulla. Tällöin vaihtosähköä syötetään yleensä vain jollekin tietylle laitteelle, esimerkiksi televisiolle. Suuret aurinkosähköjärjestelmät ovat lähes pääsääntöisesti verkkoon kytkettyjä järjestelmiä. Tämä ei sinänsä ole yllätys, koska uudet aurinkosähköpuistot (kuva 1) ovat teholtaan pienen ydinreaktorin luokkaa. Esimerkiksi Intiassa on rakenteilla aurinkosähköpuisto, jonka teho tulee olemaan 600 MW [3].

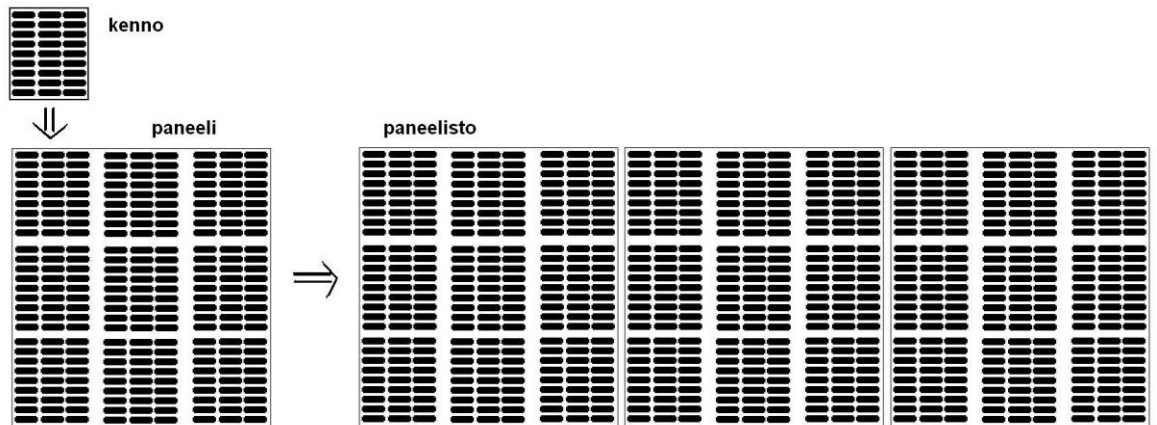


Kuva 1. Aurinkosähköpuistoja.

Aurinkopuiston rakentaminen vaatii erittäin suuren maa-alueen. Yleensä tällaiset puistot rakennetaan autiomaahan, jossa maan hinta on halpaa ja auringon säteily määrä on suuri.

3.1 Aurinkokenno

Aurinkokenno (solar cell) on aurinkosähköjärjestelmän keskeisin osa. Aurinkopaneeli eli aurinkosähköpaneeli (solar panel) muodostuu useammasta aurinkokennosta. Tavallisissa aurinkosähköjärjestelmissä käytetään aurinkopaneeleja, joiden teho on muutamasta kymmenestä wattiin satoihin watteihin. Aurinkopaneelia ei pidä sekoittaa aurinkokeräimeen, joka on aurinkolämpöjärjestelmän osa. Kun useita aurinkopaneeleita yhdistetään, niistä muodostuu aurinkopaneelisto (array). Suuria aurinkosähkön keräyslaitoksia kutsutaan aurinkosähköpuistoiksi (solar power plant). Noin 1 kW:n tehoisen aurinkopaneelin koko on noin 5–20 m² paneelin tyypistä riippuen. Esimerkiksi aurinkokenno, jonka koko on 10 cm x 10 cm, tuottaa noin 0,5 V:n tasajännitteen. [2; 4, s. 15.]



Kuva 2. Aurinkosähköjärjestelmän modulaarinen rakenne.

Kuten kuvasta 2 havaitaan, aurinkosähköjärjestelmän paneelisto muodostuu useasta paneelista ja ne puolestaan kennoista. Rakenne on modulaarinen ja siten helposti laajennettavissa.

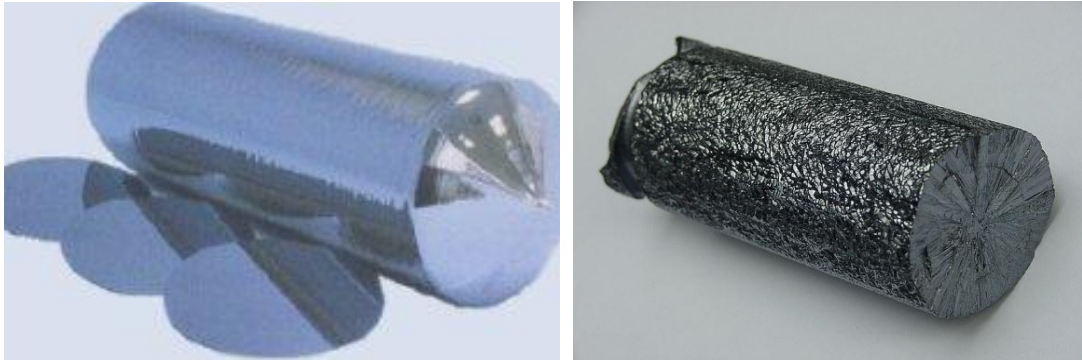
3.1.1 Aurinkokennojen sukupolvet

Aurinkokennot jaotellaan yleensä kolmeen eri sukupolveen. Tämä jaottelu on hieman teennäinen, mutta toisaalta se kuvaa hyvin kennojen kehityksen etenemistä ja niiden käytettävyyttä todellisessa käyttöympäristössä. Ensimmäinen sukupolvi tarkoittaa nykyään valta-asemassa olevia piikennoja, joiden markkinaosuus on lähes 90 %. Toinen sukupolvi tarkoittaa pääasiassa taipuisia ohutkalvopaneeleita (thin film). Monet niistä ovat jo tavallisten kuluttajien saatavilla, ja ne ovat suhteellisen nopeasti valtaamassa lisää markkina-alaa, joka on tällä hetkellä noin 10 %. Kolmannen sukupolven aurinkokennot ovat vielä laboratoriotasolla. Niiden tulo kuluttajien saataville kestää vähintään kymmenen vuotta.

3.1.2 Ensimmäinen sukupolvi

Nykyään käytössä olevat aurinkokennot ovat puolijohdekennoja, joiden perusraaka-aine on pii (Si). Raaka-aine voi olla joko yksikiteistä tai monikiteistä. Visuaalisesti näiden kahden materiaalin eron huomaa siitä, että yksikiteisen pinta on hyvin tasaisen ja sileän näköinen. Monikiteisen kennon pinta näyttää muodostuvan epämääräisistä hiuta-

leista. Näiden kennojen toiminnallisen osan paksuus on 100–300 μm [5]. Kuvassa 3 on piisauvoja, joista valmistetaan ensimmäisen sukupolven aurinkokennoja.



Kuva 3. Aurinkokennon piiaihioita – yksikiteinen ja monikiteinen.

Yksikiteisellä ja monikiteisellä materiaalilla on monia hyviä puolia. Ensinnäkin nämä materiaalit ovat hyvin pitkäikäisiä. Tällaisia aurinkokennoja on ollut käytössä jo pitkään, joten meillä on saatavilla todellista näyttöä niiden kestävydestä. Ne voivat tuottaa sähköä jopa 50 vuoden ajan. Toki niiden hyötysuhde heikkenee vähitellen ajan kuluessa. Näiden kennojen valmistajat lupaavat tyypillisesti 25 vuoden takuun valmistamiensa tuotteiden hyötysuhteelle. [5.]

Piistä valmistetut yksikiteiset aurinkokennot ovat hyötysuhteeltaan parhaimpia. Monikiteisellä kennolla on jonkin verran huonompi hyötysuhde. Niiden hyötysuhde on yleensä noin 70–80 % yksikiteisen hyötysuhteesta. Kennon lämpötilan kasvaessa sen hyötysuhde heikkenee. Yksikidemateriaalilla tämä heikkeneminen on vähäisempää kuin monikidemateriaalilla. [5.]

Piikeno on myös ympäristöystävällinen. Vanhoja piikennoja kierrätettäessä ei vapaudu ympäristölle myrkyllisiä aineita, toisin kuin esimerkiksi kadmiumia käyttävistä ohutkalvopaneeleista [5].

Huonona puolena yksikidekennossa on sen raaka-aineen valmistuksen monimutkaisuus. Raaka-aineen tulee olla erittäin puhdasta, ja sen valmistus on teknisesti erittäin haastavaa ja hidasta, joten valmistuskustannukset ovat suhteellisen suuret. Kun otetaan huomioon koko tuotteen elinkaari, yksikidekenno saattaa kestäväyytensä vuoksi kuitenkin olla kilpailukykyinen vaihtoehto. [5.]

Monikidekennon valmistus on huomattavasti yksinkertaisempaa kuin yksikidekennon. Erityisesti monikiteisen raaka-aineen valmistuksessa käydään maailmalla kovaa kilpailua. Kuluttajan kannalta tämä on hyvä asia, koska näin tuotteiden hinnat pysyvät kohtuullisemmalla tasolla. Esimerkiksi kiinalaiset pankit ovat sijoittaneet vuoden 2012 alussa 240 miljoonaa dollaria (USD) LDK Solarin valmistaman monikiteisen piin tuotantoon [6]. Kokonaisuutena katsoen monikidekennot ovatkin yleensä edullisempia verrattuna yksikidekennoihin. Tämä ero korostuu varsinkin pienemmissä paneeleissa. [5.]



Kuva 4. Monikiteisen piin tuotantolaitoksia Kiinassa.

Kuvassa 4 on LDK:n ja GCL:n tuotantolaitoksia Kiinassa. Myös Qatariin ollaan aloittamassa rakentamaan miljardiluokan monikiteisen piin tuotantolaitosta [7].

3.1.3 Toinen sukupolvi

Ensimmäisen sukupolven kennojen valmistuskustannusten suuruus on johtanut siihen, että on alettu etsiä uusia kustannustehokkaampia tapoja valmistaa aurinkokennoja. Ensimmäisenä ratkaisuna päädyttiin amorfisen piin käyttöön. Tällaisessa kennossa on etuna se, että kallista raaka-ainetta tarvitaan vain murto-osa verrattuna ensimmäisen sukupolven kennoihin. Toisen sukupolven kennojen toiminnallisen osan paksuus on vain noin 10 μm . Ne ovatkin saaneet kuvaavan nimen ohutkalvokenno (thin film). Ohutkalvotekniikkaan perustuvat kennot voidaan valmistaa useista eri materiaaleista. Kolme yleisintä materiaalia ovat amorfinen pii (a-Si), kadmium-telluuri (CdTe) ja kupari-indium-(gallium)-diselenidi (CIS/CIGS). [8, s. 9.]

Ohutkalvopaneelien etuna on niiden monikäyttöisyys. Ne ovat joustavia, eivätkä ne erotu rakenteista kuten paksut ensimmäisen sukupolven kiteiset aurinkopaneelit, joten niitä on helppo asentaa erilaisille alustoille. Lisäksi niiden hyviin ominaisuuksiin kuuluu

suhteellisen hyvä toimivuus myös hajavalossa. Ohutkalvopaneelit eivät myöskään menetä hyötysuhdetta kuumissa olosuhteissa, mikä on kiteisillä paneeleilla iso ongelma.

Ohutkalvotekniikkaan perustuvien kennojen huono puoli on se, että niiden hyötysuhde on vain noin puolet yksikidekennojen hyötysuhteesta. Lisäksi on havaittu, että paneelien ikääntyminen heikentää paneelien hyötysuhdetta jopa 15–35 %. Koska tämä tekniikka on uutta, ei vielä ole käytännön kokemusta ja tietoa ohutkalvopaneelien todellisesta käyttöiästä. On myös huomattava, että koska ohutkalvopaneelien hyötysuhde on puolet huonompi kuin yksikidekennojen, niin ohutkalvopaneeleita täytyy asentaa määrältään kaksinkertainen pinta-ala, jotta paneeleista saadaan ulos vastaava teho kuin yksikidekennoista valmistetuista paneeleista. On myös huomioitava asennustyön kustannukset, eli käytännössä on syytä optimoida asennettavien paneelien määrän ja laitteistokustannusten välillä. [8, s. 9–10.]

Nykyään ohutkalvopaneeleita käytetäänkin usein pienissä kohteissa, esimerkiksi veneissä. Niitä käytetään myös sellaisissa kohteissa, joissa tarvitaan aurinkopaneelin muokautumista pinnan muotoihin. Monissa rakennuskohteissa niitä on voitu hyödyntää esimerkiksi kaarevilla seinäpinoilla. Tällaisista talojen rakenteisiin integroiduista aurinkopaneelijärjestelmistä käytetään nimitystä Building Integrated Photovoltaic (BIPV).

Nykyisten ohutkalvotekniikkaan perustuvien aurinkopaneelien ongelma on niihin käytettävän telluurin (Te) vähyys maapallolla. Toinen ongelma on se, että niissä käytettävä kadmium on sekä ympäristölle että terveydelle vaarallinen raskasmetalli. Eräiden muidenkin, ihmisille erittäin myrkyllisten, aineiden yhdistelmillä saadaan valmistettua suhteellisen hyvän hyötysuhteen omaavia aurinkopaneeleja. Esimerkiksi galliumarsenadi (GaAs) -pohjaisten kennojen hyötysuhde on jopa 40 %. Tällaisia kennoja ei ole luvallista käyttää normaaleissa maanpäällisissä aurinkosähköjärjestelmissä, mutta niitä käytetään yleisesti avaruustekniikassa, esimerkiksi satelliiteissa ja Marsin pinnalla liikkuvissa laitteissa. [8; 9.]

3.1.4 Kolmas sukupolvi

Kolmas sukupolvi tarkoittaa sellaisia aurinkosähköratkaisuja, jotka ovat vielä tutkimuslaboratorioissa tuotekehitysvaiheen alkumetreillä. Muutamista tällaisista kehitysprojek-

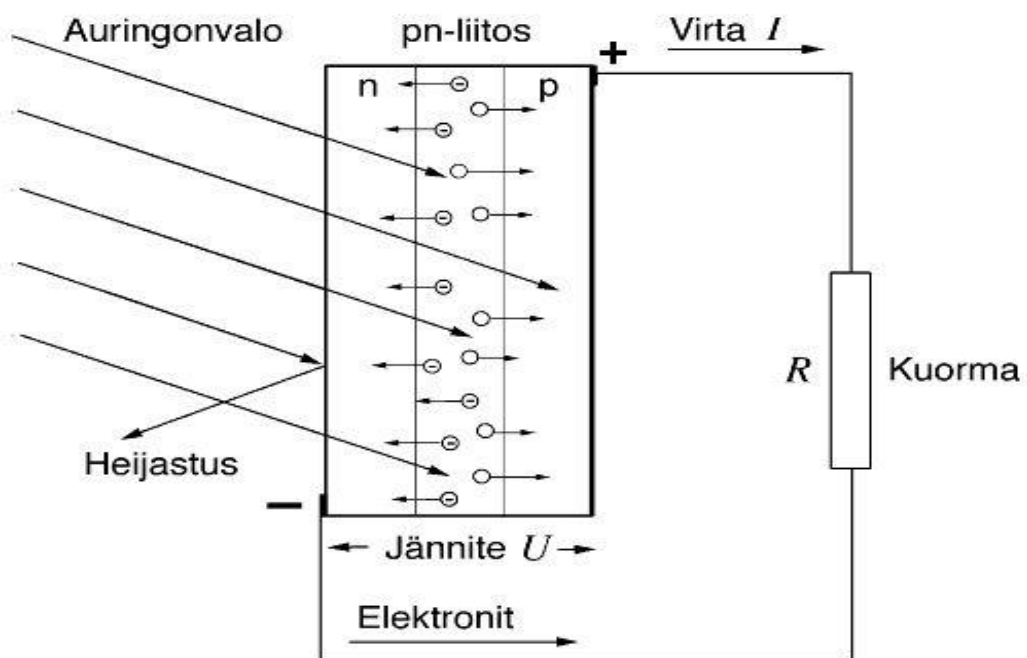
teista on saatavilla tietoa, mutta useimmat niistä ovat tarkoin varjeltuja salaisuuksia, jotta kilpailevat tutkimuslaboratoriot eivät voisi hyödyntää niihin liittyviä tutkimustuloksia.

Yksi julkisuuteen tulleista uusista tuotteista on väriaineherkistetty Dye Sensitized Solar Cell (DSC) -aurinkokenno. Michael Gärtzel on merkittävin tutkija, joka on ollut kehittämässä tätä uutta innovaatiota. DSC-kennon toiminta-ajatus perustuu keinotekoiseen fotosynteesiin. [8, s. 11–12.]

Toinen tunnettu kolmannen sukupolven tuote on kvanttipistekenno. Siinä käytetään hyväksi valosähköistä ilmiötä, kuten perinteisissäkin kennoissa. Erona on se, että kvanttipistekennoissa käytetään puolijohtavia nanopartikkeleita. Laboratorioolosuhteissa tällä tekniikalla on pystytty demonstroimaan sähkön muodostuminen. [8, s. 11–12.]

3.1.5 Perinteisen aurinkokennon toimintaperiaate

Aurinkokennon yksinkertaistettu toimintaperiaate esitellään kuvassa 5. Kennossa on p- ja n-tyyppin puolijohdekerrokset ja niiden välissä pn-liitos. Pn-liitokseen syntyy auringon säteilyn vaikutuksesta sähkövirta [10, s. 1.]



Kuva 5. Aurinkokennon toimintaperiaate [10, s. 1].

Aurinkokenno tuottaa sähköä auringon säteiden osuessa siihen. Tapahtumaa, jossa aineen pintaan osuva valo irrottaa siitä elektroneja, kutsutaan valosähköiseksi ilmiöksi. Sähkö syntyy valosähköisen ilmiön tuloksena. Aurinkosähköön liittyvässä kirjallisuudessa käytetään termiä photovoltaic (PV), jolle ei ole suoraa käännöstä suomen kielelle. Käytännössä se viittaa aurinkokennoihin ja siihen, että sähköä syntyy suoraan auringon säteilystä. Valosähköinen ilmiö havaittiin 1800-luvun alkupuolella ja Heinrich Hertz alkoi tutkia sitä tarkemmin vuodesta 1887 alkaen. Albert Einstein esitti ilmiölle vuonna 1905 matemaattisen selityksen teoksessaan "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt". [11, s. 2.]

Einstein havaitsi, että tuleva valo absorboituu kvantteina ja vain tietyn energian ylittävä valopaketti, foton, pystyy irrottamaan elektronin metallista. Fotonit ovat niin kutsuttuja bosoneja, eli sähkömagneettista voimaa välittäviä alkeishiukkasia, kvanttielektrodynamiikan (QED) mukaisesti. Valosähköisessä ilmiössä energia välittyy yhden kvantin, fotonin, kokoisina annoksina yksittäiselle elektronille. Fotonin energia voidaan laskea yhtälöstä 1.

$$E = h \cdot f = h \cdot c / \lambda \quad (1)$$

E on fotonin energia (eV)

h on Planckin vakio $6,626 \times 10^{-34}$ Js

f on fotonin taajuus 1/s

c on valonnopeus $2,99792 \times 10^8$ m/s

λ on fotonin aallonpituus (m).

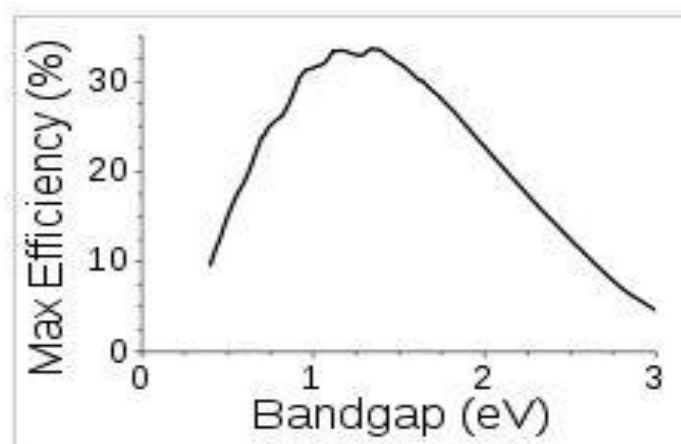
Fotoni siis luovuttaa energiansa aineen elektronille eli absorboituu. Tällöin elektroni irtoaa ja siirtyy pois alkuperäiseltä paikaltaan, jolloin elektronista tulee varauksenkuljettaja. Elektronin siirryttyä johtavuusvyölle, jää valenssivyölle tyhjä aukko, joka toimii positiivisena varauksenkuljettajana. Elektroni ei siis voi kerätä irtoamiseen tarvitsemaansa energiaa useilta fotoneilta, vaan sen on saatava se yhtenä pakettina. Jos fotonin energia on suurempi kuin irrotustyö, loput fotonin energiasta muuttuu irronneen elektronin liike-energiaksi ja lämmöksi. [11, s. 9–10.]

Valosähköisen ilmiön tutkimuksissa havaittiin, että katodilta irronneen elektronin suurin liike-energia on riippumaton tulevan valon intensiteetistä (intensiteetin (G) yksikkö on W/m^2 eli teho pinta-alayksikköä kohden). Kun valon intensiteettiä lisätään, fotonien törmäysten lukumäärä metallipinnalle aikayksikössä lisääntyy, jolloin pinnalta irtoaa enemmän elektroneja. Elektronien energia ei kuitenkaan kasva. Elektronin suurin liike-energia saadaan yhtälöstä

$$K_{\max} = h \cdot f - \phi, \quad (2)$$

jossa ϕ on energia, joka vaaditaan irrottamaan elektroni metallista. Tätä energiaa vastaa kynnystaajuus f_t , joka fotonilla pitää olla, jotta elektroni irtoaisi pinnalta. Esimerkiksi violetin valon (400 nm) fotonin energia on 3,1 eV ja punaisen valon (700 nm) on 1,8 eV. [12, s. 303.]

Aurinkokennojen puolijohdemateriaalina käytetään sellaisia aineita ja ainesekoituksia, joiden atomeissa elektronikuorilla eli energiatiloilla on auringonsäteilyä ajatellen sopiva ja toisaalta riittävän suuri energiaero. Energiaerolla tarkoitetaan valenssivyön maksimin ja johtovyön minimin erotusta (bandgap) [12, s. 43–44]. Parhaimmat hyötysuhteet saavutetaan, kun energiaero on 1,3–1,5 eV. Esimerkiksi indium-fosfidi (1,27 eV), gallium-arsenidi (1,35 eV) ja kadmium-telluuri (1,44 eV). Yleisesti käytetyllä kiteisellä piillä energiatilojen ero on suhteellisen pieni eli noin 1.124 eV. Kuvassa 6 nähdään hyötysuhteen ja energiatilaeron yhteys käytettäessä normaalia auringon säteily spektriä ja perinteistä aurinkokennorakennetta. [13, s. 207–208.]



Kuva 6. Energiaeron vaikutus hyötysuhteeseen [13, s. 208].

Jotta absorptio voi tapahtua, fotonin aallonpituuden pitää olla sopiva. Tuon aallonpituuden voi laskea yhtälöstä 3, kun tiedetään aineen energiaero (bandgap) ja tietenkin päinvastoin.

$$E_{\text{gap}} = (h \cdot c / q) / \lambda \quad (3)$$

E_{gap} on aineen energiaero (eV)

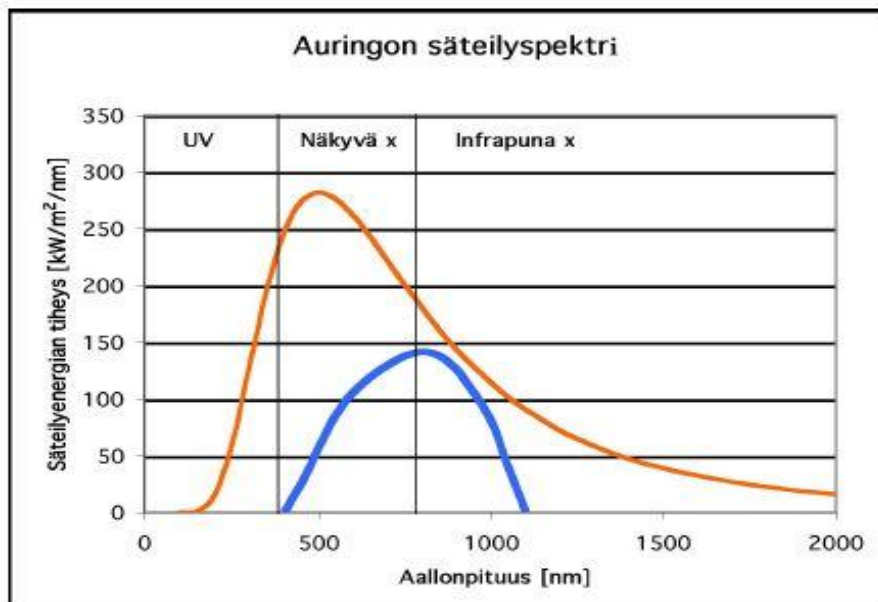
h on Planckin vakio $6,626 \times 10^{-34}$ Js

c on valon nopeus $2,99792 \times 10^8$ m/s

q on elektronin varaus $1,6021 \times 10^{-19}$ As

λ on fotonin aallonpituus (m).

Yhtälöstä 2 voidaan laskea, että kiteiselle piille absorptio on mahdollista vain aallonpituuksilla $\lambda < 1,1 \times 10^{-6}$ m. Vastaavasti absorptio on mahdollista amorfiselle piille $\lambda < 0,729 \times 10^{-6}$ m. Täten amorfisen pii ei voi hyödyntää infrapunasäteilyä. Se osittain selittääkin amorfisen piin huonon hyötysuhteen. Tähän voidaan kuitenkin vaikuttaa esimerkiksi lisäämällä amorfiseen piihin germaniumia. [13, s. 208.]

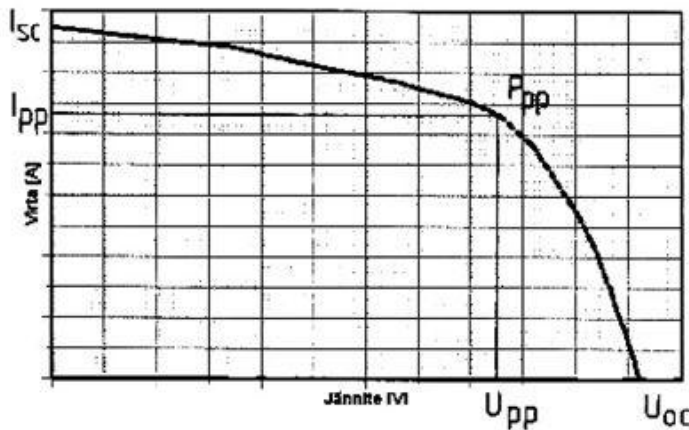


Kuva 7. Auringon spektri ja piikennon absorptioalue [10, s. 2].

Kuvassa 7 nähdään auringon säteilyn spektrikäyrä (punainen) ja perinteisen piikennon absorptiokäyrä (sininen). Parhaimmillaan tämä kenno toimii näkyvän valon ja infrapunasäteilyn rajalla.

3.1.6 Aurinkokennon ominaiskäyrä ja hyötysuhde

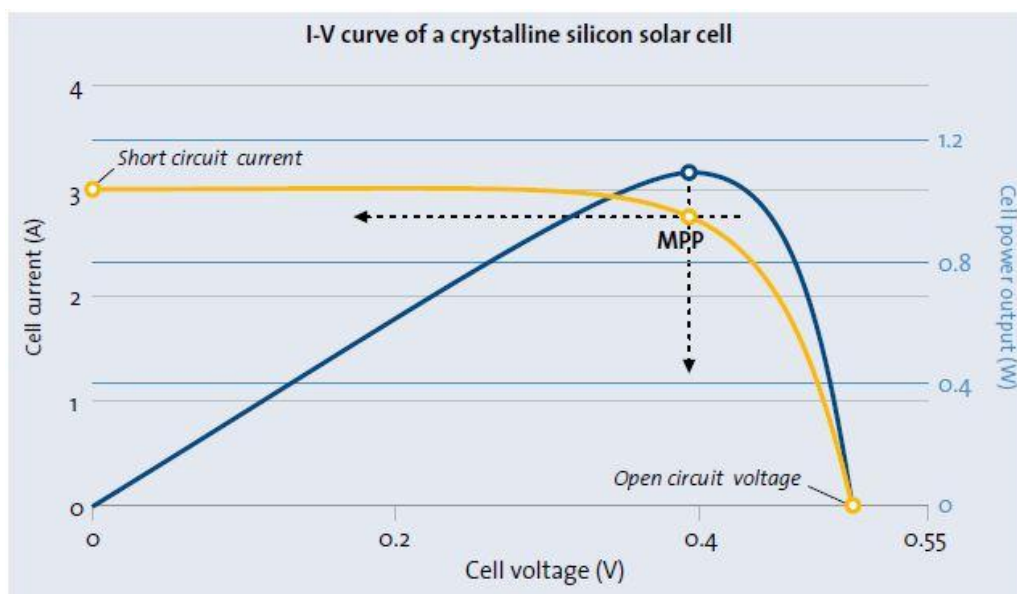
Aurinkokennoon liittyy virta-jännite-käyrä (I-U-käyrä) eli kennon ominaiskäyrä. Se kuvaa virran (I) ja jännitteen (U) yhteyden kennossa (kuva 8). Suurin mahdollinen jännite on pisteessä U_{OC} . Sitä kutsutaan tyhjäkäyntijännitteeksi. Siinä pisteessä virta I on nollassa. Käyrän toisesta päästä löytyy suurin mahdollinen virta I_{SC} eli oikosulkuvirta. [14, s. 130–134; 15, s. 4–6.]



- 1) oikosulkuvirta I_{sc}
(sc = short circuit = oikosulku)
- 2) tyhjäkäyntijännite U_{oc}
(oc = open circuit = avoin piiri)
- 3) tehopiste P_{pp}
- 4) virta tehopisteessä I_{pp}
- 5) jännite tehopisteessä U_{pp}

Kuva 8. I-U-käyrä eli ominaiskäyrä.

Kuvan tehopiste P_{PP} tunnetaan myös nimellä maksimitehopiste (MPP). Kuvassa 9 on erään piikennon tehokäyrä ja maksimitehopiste. Keltainen käyrä on I-U-käyrä, ja sininen käyrä kuvaa I-U-käyrän arvoilla syntyvää tehoa.



Kuva 9. Erään piikennon tehokäyrä ja maksimitehopiste [4, s. 20].

P_{pp} piste on noin 80 % tyhjäkäyntijännitteestä ja 95 % oikosulkuvirrasta. P_{pp} saadaan laskettua yhtälöllä 4. [15, s. 5.]

$$P_{pp} = f * V_{OC} * I_{SC} \quad (4)$$

f on kennokohtainen täyttökerroin ($f < 1$)

V_{OC} on tyhjäkäyntijännite (V)

I_{SC} on oikosulkuvirta (A).

Täyttökerroin f voidaan laskea yhtälöllä 5. Täyttökertoimen arvo on yleensä noin 0,6–0,85. [15.]

$$f = \frac{(U_{PP} * I_{PP})}{(U_{OC} * I_{SC})} \quad (5)$$

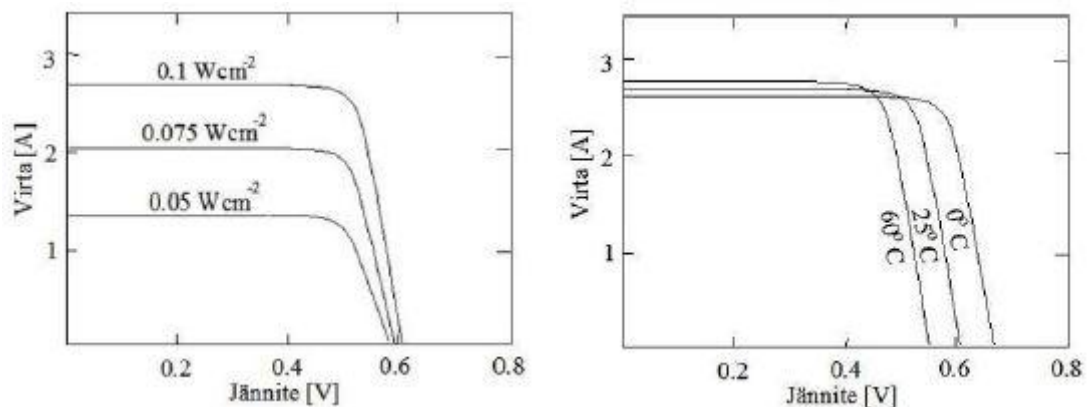
U_{PP} on jännite maksimitehopisteen kohdalla (V)

I_{PP} on virta maksimitehopisteen kohdalla (A)

U_{OC} on tyhjäkäyntijännite (V)

I_{SC} on oikosulkuvirta (A).

Nimellisteholtaan 50 W:n paneelin tyypillinen virta-arvo on 3 A. Kennon todelliset virta- ja jännitearvot ovat riippuvaisia valointensiteetistä ja lämpötilasta. Valointensiteetin lisäys kasvattaa virran suuruutta, ja lämmön lisäys vähentää jännitteen suuruutta kuten kuvasta 10 näkyy. [14, s. 130–135.]









Kuva 10. Valointensiteetin ja lämpötilan vaikutus virtaan ja jännitteeseen [15, s. 10].

Aurinkokennon hyötysuhde tarkoittaa kennosta saatavan sähkötehon ja kennolle tulevan säteilytehon suhdetta. Aurinkokennon maksimi hyötysuhde η voidaan laskea yhtälöllä 6, kun tiedetään maksimitehopiste (P_{pp} , MPP), kennon pinta-ala (A) ja säteilyintensiteetti (G) [13, s. 210].

$$\eta = \frac{P_{pp}}{A \times G} \quad (6)$$

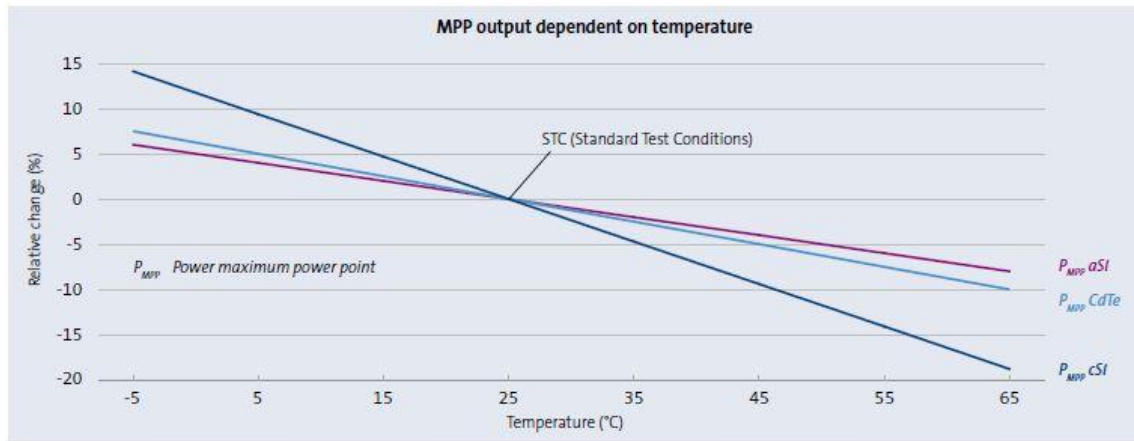
Erityyppisten kennojen hyötysuhteissa on huomattavia eroja. Perinteisten kiteisten pii-kennojen hyötysuhde on noin 11–19 %, kun taas ohutkalvotekniikkaan perustuvien kennojen hyötysuhde on vaatimattomampi eli noin 5–12 %. [13, s. 203.] Kuvasta 11 nähdään erityyppisten paneelien hyötysuhteet ja pinta-alatarve, kun tehon tarve on 1 kWp. 1 kWp:n tehoinen paneelisto pystyy tuottamaan Pohjois-Euroopan ja Kanadan korkeudella noin 1 000 kWh energiaa vuodessa. Vastaavasti Välimeren maissa, Pohjois-Afrikassa ja Yhdysvaltojen eteläosissa voidaan 1 kWp:n laitteistolla saada jopa 2 000 kWh energiaa vuodessa. [4, s. 15; 16.]

CELL MATERIAL	MODULE EFFICIENCY	SURFACE AREA NEED FOR 1 kWp
Monocrystalline silicon	13–19%	5–8 m ² 
Polycrystalline silicon	11–15%	7–9 m ² 
Micromorphous tandem cell (a-Si/μc-Si)	8–10%	10–12 m ² 
Thin film copper-indium/gallium-sulfur/diselenide (CI/GS/Se)	10–12%	8–10 m ² 
Thin-film cadmium telluride (CdTe)	9–11%	9–11 m ² 
Amorphous silicon (a-Si)	5–8%	13–20 m ² 

Kuva 11. Erityyppisten paneelien hyötysuhde ja tarvittava neliömäärä per 1 kWp [4, s. 15].

Aurinkokennojen hyötysuhteeseen vaikuttaa myös kennon ja sen ympäristön lämpötila. Kun lämpötila nousee, hyötysuhde laskee lineaarisesti. Jotkut kennotyytit reagoivat lämpöön herkemmin kuin toiset. Yksi- ja monikiteisten (cSi) kennojen herkkyys on noin 0,45 %/°C. CIS, CIGS ja CdTe kennojen herkkyys on noin 0,36 %/°C ja amorfisesta

piistä (aSi) valmistettujen kennojen herkkyys on noin $0,13 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. [17; 13, s. 228–230.] Lämpötilan vaikutus erityyppisiin kennoihin esitellään kuvassa 12. Perinteiset kiteiset piikennot ovat paljon herkempiä lämpötilan vaihteluille kuin ohutkalvokennot.



Kuva 12. Lämpötilan vaikutus kennon hyötysuhteeseen [4, s. 16].

Perinteisten aurinkokennojen hyötysuhdetta rajoittaa materiaalikohtainen johto- ja valenssivyön välillä olevan energiaeron suuruus. Se määrää elektronin irrotukseen tarvittavan kynnysenergian, jonka aallonpituiset fotonit pystyvät irrottamaan elektronin kennon materiaalin atomien ulkokehältä. [18, s. 13–14.] Mitä suurempi johtavuus- ja valenssivoiden välinen etäisyys on, sitä pidempiä aallonpituuksia materiaali pystyy absorboimaan. [18, s. 22.]

Auringon spektrin aallonpituuksista johtuen perinteisen aurinkokennon hyötysuhteen teoreettinen maksimi on noin 44 %, koska korkeampienergistien fotonien energia muuttuu pääasiassa lämmöksi. [13, s. 207.] USA:ssa aurinkokennojen valmistaja SunPower on vuonna 2010 onnistunut valmistamaan yksikiteisiä piikkenoja, joiden hyötysuhde on jopa 24,2 %. Tämä on tällä hetkellä maailmanennätys. Useiden tutkijoiden mukaan kiteisellä piillä ei ole käytännössä mahdollista saavuttaa suurempaa hyötysuhdetta kuin 29 %. [5.]

On myös huomattava, että osa säteilystä heijastuu kennon lasipinnasta, vaikka uusimmat paneelit pyritäänkin pinnoittamaan heijastamattomalla lasilla. Lisäksi kennon yläpinnalla olevat metalliset virtakontaktit peittävät kennoa ja näin pienentävät aktiivista pinta-alaa. Paneeleissa käytettävien materiaalien kidevirheissä tapahtuu rekombinaatio-

ta, eli niissä aukot ja johtavat elektronit yhdistyvät. Tämä aiheuttaa myös osaltaan hyötysuhteen heikkenemistä. [15, s. 10.]

Järjestelmän kokonaistehoon vaikuttavat järjestelmän muutkin komponentit. Verkkoon kytketyssä järjestelmässä vaihtosuuntaaja on yksi merkittävä järjestelmän häviöihin vaikuttava komponentti. Myös säädin, kaapelointi ja energian varastointi akkuun aiheuttavat häviöitä ja vaikuttavat näin järjestelmän hyötysuhteeseen (η_{sys}). Järjestelmän hyötysuhde on yleensä noin 50–80 %. [14, s. 159.]

3.2 Lataussäädin

Lataussäädin eli ohjausyksikkö on laite, joka huolehtii akun sopivasta lataamisesta. Se rajoittaa latausvirtaa ja suojaa näin akkua ylilatautumiselta ja mahdollisesti kytkee akun kokonaan irti paneelista. Säätimen toiminta perustuu esimerkiksi jännitteen mittaukseseen, pulssileveyden modulaatioon tai lämpötilan kompensointiin. Toiminta voi perustua myös edellä mainittujen yhdistelmiin. Yleensä säätimen ominaisuuksiin kuuluu myös kuorman irrottaminen akun tyhjentyessä. Näin pystytään estämään niin sanottu syväpurkautuminen. Joissain säätimissä kuormien irrottaminen voi tapahtua myös prioriteettijärjestyksessä. [19, s. 41–42.]

Uusimmat lataussäätimet on ohjelmoitu lataamaan akkuja oikealla tekniikalla riippumatta siitä, onko käytössä avoin tai suljettu lyijyakku (AGM) tai geeliakku. Lisäksi lataussäätimen tulisi pystyä hallitsemaan latauksen kolme erilaista vaihetta: tehollinen lataus (0–80 %), varauslataus (80–100 %) ja lepolataus, eli lataus silloin kun akku on käyttämättömänä. Nämä erityiset latausohjelmat kasvattavat akkujen elinkaarta huomattavasti. [4, s. 23–25.]

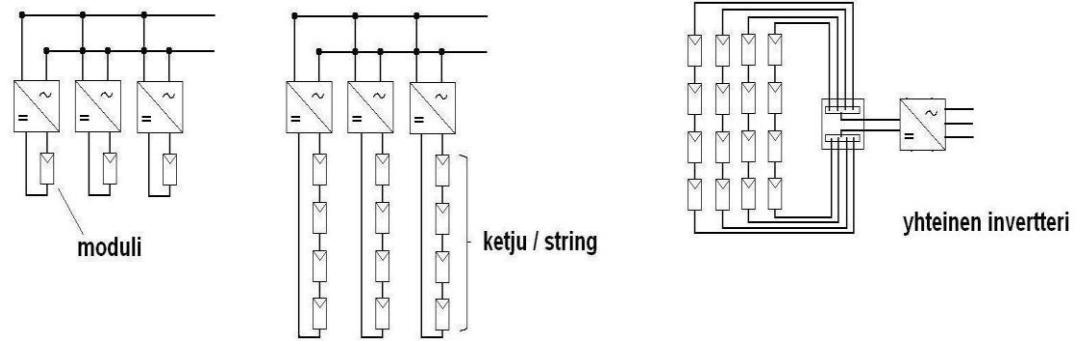
Pulssileveyden modulaatioon (PWM) perustuva säädintekniikka soveltuu erinomaisesti aurinkosähköjärjestelmän akuille. Tällainen säädin pulssittaa akkuun jatkuvasti latausvirtaa, jolloin varsinkin käytetty akku latautuu lähes täydellisesti. Maksimitehopisteen seuraaja (MPPT) on laite, joka säätää paneelin ulostulojännitteen toimimaan maksimitehopisteessä. Se säätää kuorman vastaamaan tuotantoa, ja näin päästään parempaan hyötysuhteeseen myös matalilla säteilytehoilla. Sen avulla saadaan maksimaalinen hyöty aurinkopaneelista. [14, s. 139–141; 20; 21.]

3.3 Akku

Itsenäisten aurinkosähköjärjestelmien yhteydessä käytetään akkuja, joihin varastoidaan se sähkömäärä, joka tarvitaan sinä aikana, kun auringosta ei saada sähköä. Akut voidaan rakenteen puolesta jakaa kolmeen ryhmään: avoimet lyijyakut, suljetut lyijyakut ja geeli- eli hyytelöakut. Aurinkosähköjärjestelmissä käytetään yleensä akkuja, jotka kestävät toistuvia syväpurkauksia. Syväpurkaus tarkoittaa sitä, että akun varaus-tila laskee alle 30 %:n. Syväpurkauksen jälkeen akun lyijykennojen pinnalle alkaa muodostua sulfidikerros, joka jatkossa estää akun täydellisen latautumisen. Lyijyakkuteknikka on yleisesti käytössä, koska sen hinta–suorituskyky-suhde on edullisin. Lyijy-akku ei kuitenkaan kestä syväpurkautumista. Geeliakut ja nikkeli-kadmiumakut kestävät huomattavasti paremmin syväpurkauksia ja ovat pitkäikäisempiä. Syväpurkausakut kestävät 200–1 000 latauskertaa. Se on kuitenkin myös kalliimpi akkutyyppeihin valinta onkin aina tapauskohtainen. Akku on järjestelmän keskeinen osa ja muodostaa merkittävän osan sen hinnasta. Hyvälaatuinen lataussäädin voi pidentää akkujen käyttöikää huomattavasti. [22.]

3.4 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaaja eli invertteri muuntaa aurinkokennosta tulevan tasasähkön (yleensä 12 V DC) vaihtosähköksi (esimerkiksi 230 V AC). Pienimmät vaihtosuuntaajat ovat teholtaan 50-100 W ja suurimmat jopa 100 kW. Invertterin hyötysuhteella on myös merkitystä. Yleensä se on 80–90 %, kun kuorma on 25–100 % vaihtosuuntaajan tehosta. [14, s. 141.] Jopa yli 90 %:n hyötysuhteella toimivia inverttereitä on saatavilla [13, s. 201]. Mitä pienempi invertteri on, sitä huonompi on yleensä sen hyötysuhde. Pienissä järjestelmissä invertteri voi olla vaikka jokaisen paneelin perässä, mutta usein invertteri kuitenkin sijaitsee sarjaan kytkettyjen paneelien ketjun (string) perässä. Kytkennät voidaan tehdä myös siten, että yhteen invertteriin tulee kaapeloinnit useammalta sarjaan kytketyltä ketjulta. [13, s. 202.] Kuvassa 13 esitellään erilaisia invertterien kytkentämahdollisuuksia.



Kuva 13. Erityyppisiä invertterien kytkentöjä [13, s. 202-203].

Hyvässä vaihtosuuntaajassa on myös MPPT-ominaisuus, kuten hyvässä lataussäätimesäkin. Invertterin elinikä on noin 10–15 vuotta. [4, s. 25.]

3.5 Kaapelointi ja suojaus

Aurinkosähköjärjestelmän kokonaishyötysuhteen kannalta on tärkeää, että kaapelointi ja kaikki liitännät suunnitellaan ja toteutetaan erittäin huolellisesti. Johtimien resistanssin tulisi olla mahdollisimman pieni eli johtimien pitäisi olla riittävän paksuja ja hyvin sähköä johtavia.

Tehohäviöt aurinkoenergia järjestelmissä muodostuvat helposti suuriksi, koska jännitteet ovat pieniä. Yleensä johtimet mitoitetetaan niin, että häviöt eivät ylitä 5 %:a. Kuparikaapelin tehohäviöt voidaan laskea yhtälöllä 7. [10, s. 8–9.] Ursula Eicker suosittelee enimmillään 1 %:n häviöitä kaapeleissa [13, s. 231].

$$\text{Häviö (\%)} = 3,4 * I * l / A / U \quad (7)$$

I on virta (A)

l on johtimen pituus (m)

A on johtimen poikkipinta-ala (mm²)

U on jännite (V).

Paneelilta säätimelle tulevan johtimen minimipinta-ala lasketaan yhtälöllä 8 [23].

$$A = (I * I) / 32 \quad (8)$$

I on johtimen pituus (m)

I on virta (A).

Säätimeltä kulutuslaitteelle tulevan johtimen minimipinta-ala lasketaan yhtälöllä 9 [23].

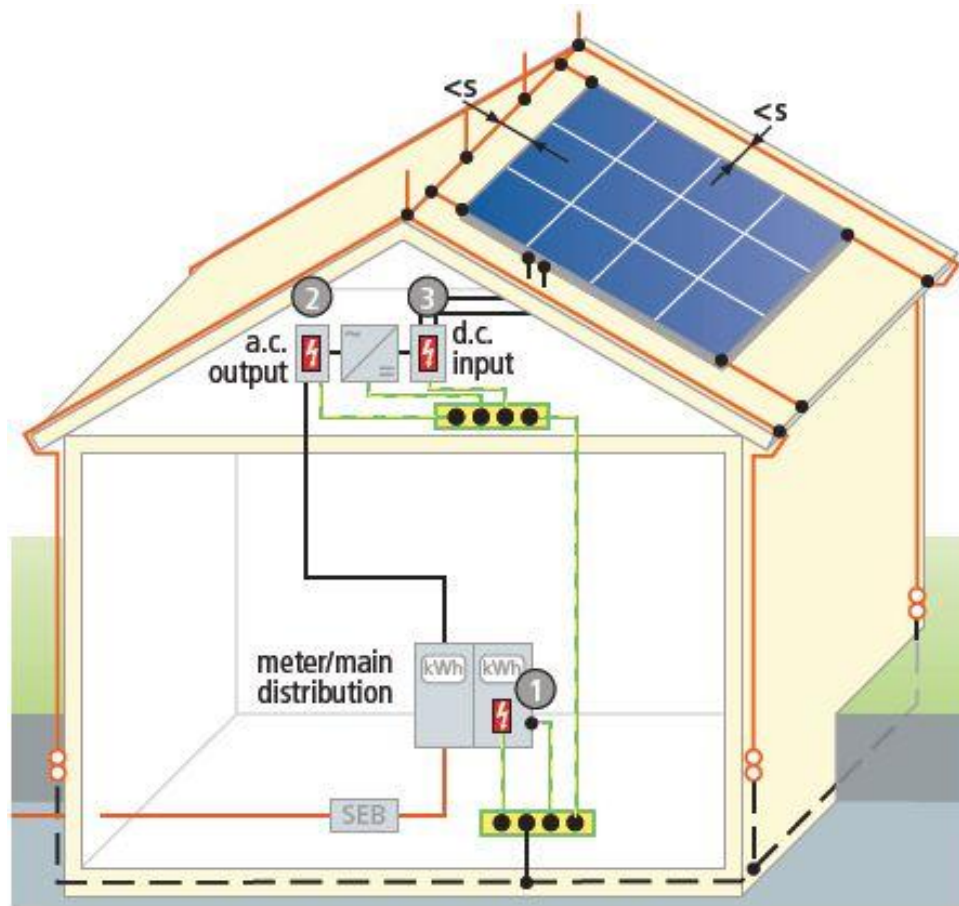
$$A = (I * I) / 16 \quad (9)$$

I on johtimen pituus (m)

I on virta (A).

Aurinkosähköjärjestelmän ylijännitesuojaus on yksi tärkeimmistä järjestelmän suunnitteluun liittyvistä tehtävistä. Ylijännitehäiriöt aiheutuvat yleensä ilmastollisista tekijöistä, kuten salamoinnista tai verkossa suoritettavista kytkentätoimenpiteistä. Ylijännitepiikit rikkovat yleensä vaihtosuuntaajan, lataussäätimen tai paneelin. Tästä aiheutuu ylimääräisiä kustannuksia, esimerkiksi laitteiden korjauskustannuksia ja tulonmenetyksiä järjestelmän ollessa käyttämättömänä. [24, s. 298.]

Lataussäädin ja vaihtosuuntaaja tulee suojata ylijännitteeltä. Suojaus tehdään sekä paneelilta tulevan tasasähkösyötön (DC) puolelta että vaihtosuuntaajalta lähtevän vaihtosähkön (AC) puolelta [25]. Kun johdonsuojakatkaisin asennetaan kennon ja lataussäätimen väliin, voidaan kenno erottaa muusta järjestelmästä ja huoltotyöt pystytään suorittamaan turvallisesti. Paneeli tulee maadoittaa kytkemällä se maadoitusjohtimella rakennuksen päämaadoituskiskoon. Jos paneelisto täyttää lähes koko kattopinnan ja rakennuksessa on asennettu ukkossuojausjärjestelmä katolle, paneelisto ja ukkossuojausjärjestelmä tulee kytkeä suojajohtimilla toisiinsa (kuva 14). [24, s. 300–302.]



Kuva 14. Paneeliston kytkeminen ukkossuojajärjestelmään.

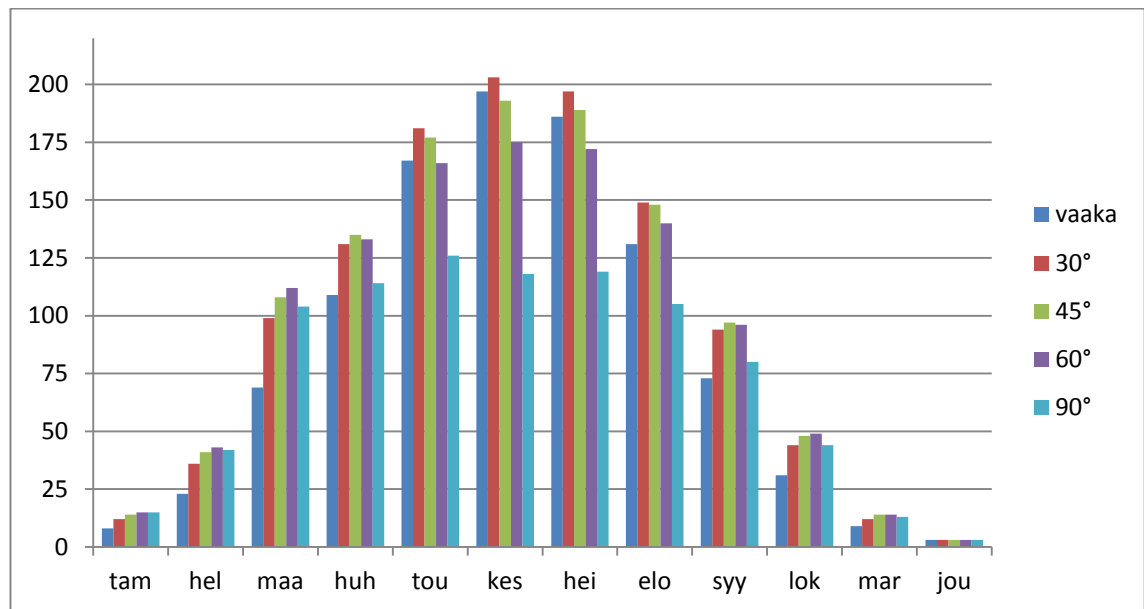
Kaikki pienetkin hajautetut sähköntuotantojärjestelmät täytyy kytkeä sähköverkkoon siten, että toiminta on täysin turvallista myös silloin, kun energiavirta kohti verkkoa täytyy katkaista huoltoa varten tai itse verkossa ilmenee vika. Vikaantuneen verkon tilanteessa puhutaan saarekekäytöstä (Loss of Mains, LoM). Tällöin pienvoimala jää syöttämään verkon osaa yksin. Nopea erotus on ensisijaisen tärkeää, jotta voidaan välttää sähköverkon parissa työskenteleviin ihmisiin kohdistuvat vaaratilanteet. Tällainen suojaus voidaan saada aikaan automaattisella seurantalaitteella, joka pystyy välittömästi havaitsemaan verkossa olevat viat. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi jännite- ja taajuusreleet. [26; 27, s. 61–62.]

4 Aurinkopaneelien asennus

Aurinkopaneelin tuottamaan tehoon vaikuttaa säteilyn voimakkuus, paneelin suuntaus, ympäristön- ja paneelin lämpötila sekä säteilyn heijastuminen paneelin pinnasta. Pa-

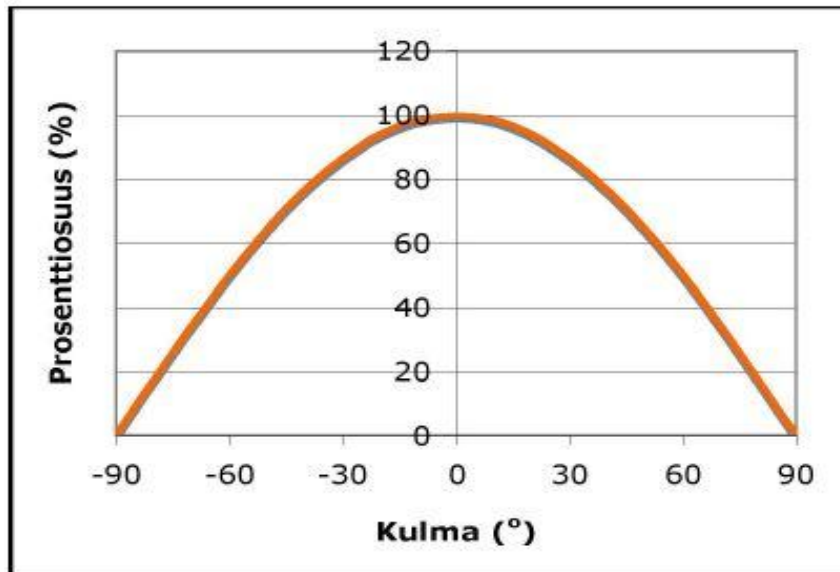
nealien asennuksen suunnittelussa voidaan vaikuttaa lähinnä suuntaukseen ja osittain myös asennusympäristön lämpötilaan.

Aurinkopaneelien asennuksessa on erittäin tärkeää ottaa huomioon auringosta tulevan säteilyn suunta. Yleensä paneelit ovat kiinteästi asennettuja. Tällöin niiden asennuksessa kallistuskulma tulee optimoida mahdollisimman hyvän säteilymäärän saavuttamiseksi. Kesällä (huhti-syyskuu) sopiva kulma Suomessa on noin 30° vaakatasosta ja talvella noin 80°, joten optimoitu kulma on noin 40–45°. Kuvassa 15 on säteilymäärien mittaustulokset Helsingissä eri kallistuskulmilla. Mittaus on tehty suoraan etelään suuntaan. Tässä mittauksessa kulmalla 45° saatiin vuoden kokonaissäteilymääräksi 1167 kWh/m². [14, s. 206.]



Kuva 15. Säteilymäärät Helsingissä eri kulmilla mitattuna suoraan etelästä.

Huomioitavia kulmia on kaksi, vaakasuunta ja pystysuunta. Kun molempien suuntien tulokulmat kerrotaan keskenään saadaan kerroin, joka määrää yhteisvaikutuksen. Esimerkiksi, jos kummassakin suunnassa tulokulma on 30°, niin $\cos 30^\circ \times \cos 30^\circ = 0,75$. Tällöin säteilyteho pienenee 25 % verrattuna optimaaliseen suuntaukseen. Kiinteässä asennuksessa atsimuuttikulma, eli poikkeama etelästä, tulisi olla noin 0° eli suuntaus kohti etelää. [29, s. 88–89.] Kuvassa 16 nähdään tulokulman vaikutus tehoon. Pienillä tulokulmilla vaikutus ei ole suuri, mutta jo 60°:n tulokulmalla säteilyteho putoaa puoleen.



Kuva 16. Tulokulman vaikutus tehoon [10, s. 8].

Vinosti paneelin pinnalle tulevan auringonsäteilyn teho saadaan yhtälöllä 10 [10, s. 8].

$$P_s = S * A * \cos \alpha \quad (10)$$

S on auringonsäteilyn voimakkuus (W/m^2)

A on paneelin pinta-ala (m^2)

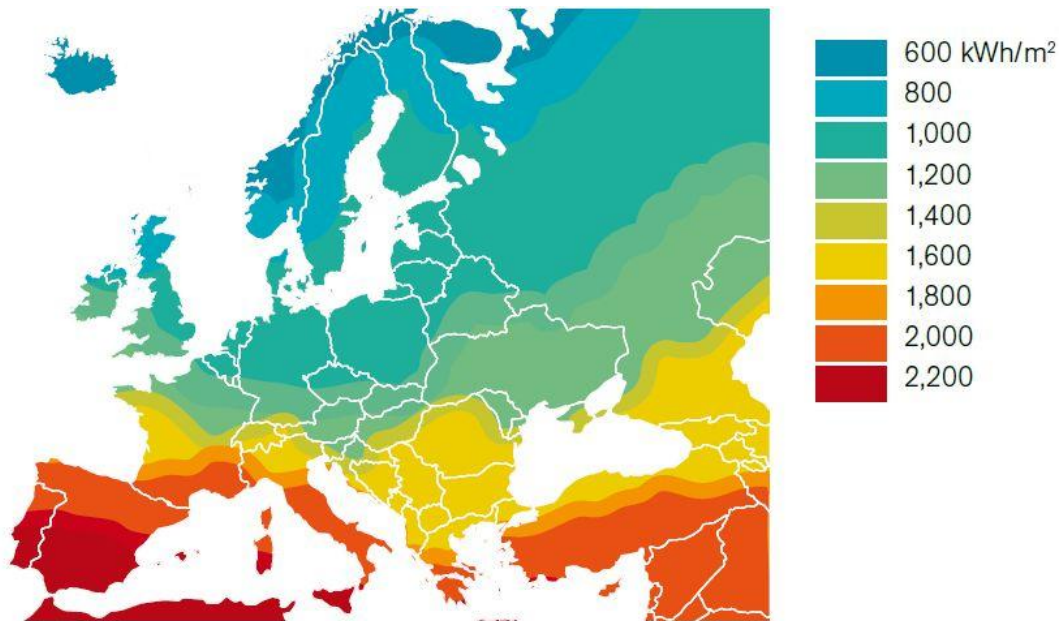
α on paneelin normaalin ja auringonsäteiden välinen kulma.

Huomattavasti paremman hyötysuhteen saavuttamiseksi tulee käyttää laitteistoa, jonka kallistuskulmia voi säätää automaattisesti. Tällöin puhutaan auringon seurantajärjestelmästä. Tällaisen laitteiston teoreettinen hyöty on kymmeniä prosentteja. [29, s. 89.] On kuitenkin huomioitava, että laitteisto itse kuluttaa energiaa toimiessaan, mikä pienentää kokonaishyötysuhdetta. Seurantajärjestelmästä saatu hyöty pienenee myös pilvisellä säällä, koska tällöin suurin osa säteilystä on hajasäteilyä. [14, s. 153.]

Ilmakehän yläosiin saapuvan auringonsäteilyn intensiteetti maapallon keskietäisyydellä auringosta on $1\,367\, W/m^2$. Tätä kutsutaan aurinkovakioksi. [30, s. 4; 31.] Ilmakehän heijastavasta ja absorboivasta vaikutuksesta johtuen säteily määrä maan pinnalla on huomattavasti pienempi, yleensä enimmillään noin 80 % aurinkovakiosta [32, s. 13].

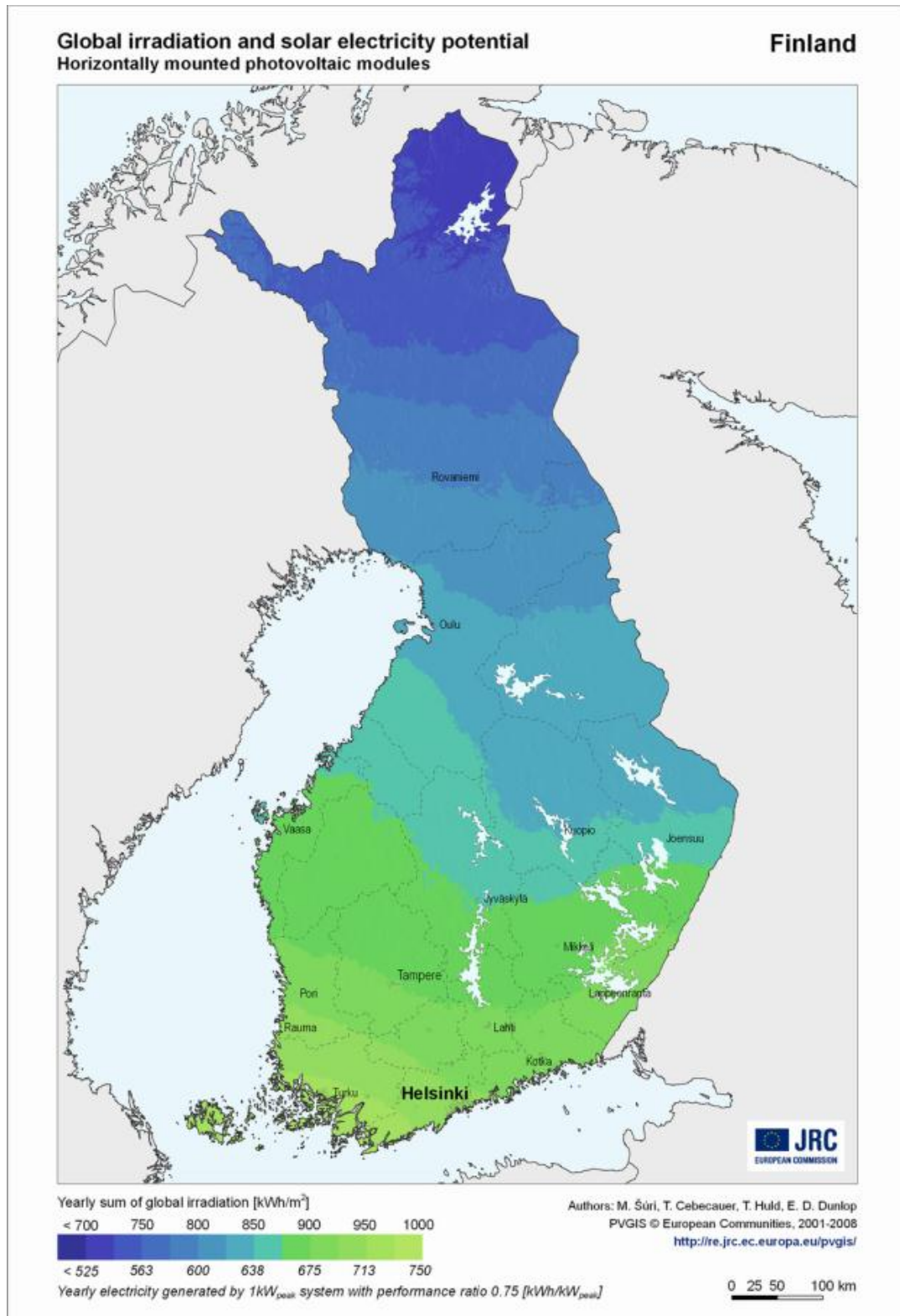
Asennuskulmalla on suuri merkitys aurinkopaneelin hyötysuhteeseen, kuten EU:n tutkimus osoittaa. Suomen etelä- ja länsirannikolla vuositasolla aurinkosäteily on 1 300 kWh/m², Keski-Suomessa 1 100 kWh/m² ja Lapissa 1 000 kWh/m², kun käytetään optimoitua asennuskulmaa. Vaakatasossa oleva paneeli pystyy tuottamaan energiaa noin 200 kWh/m² vähemmän eli vain noin 80–85 % optimoidun asennuskulman tehosta. [33.]

Euroopan komission Institute for Energy and Transport (IET) ylläpitää verkkopalvelua, josta löytyy säteilytietoja Euroopan alueelta. Palvelun nimi on Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) ja se on osa Euroopan Unionin SOLAREC-toimintaa, joka osaltaan tukee uusiutuvan energian käyttöönottoa unionin maissa. [33.] Kuvassa 17 nähdään yleiskuvaus Euroopan alueen vuotuisista säteilyenergian määristä.

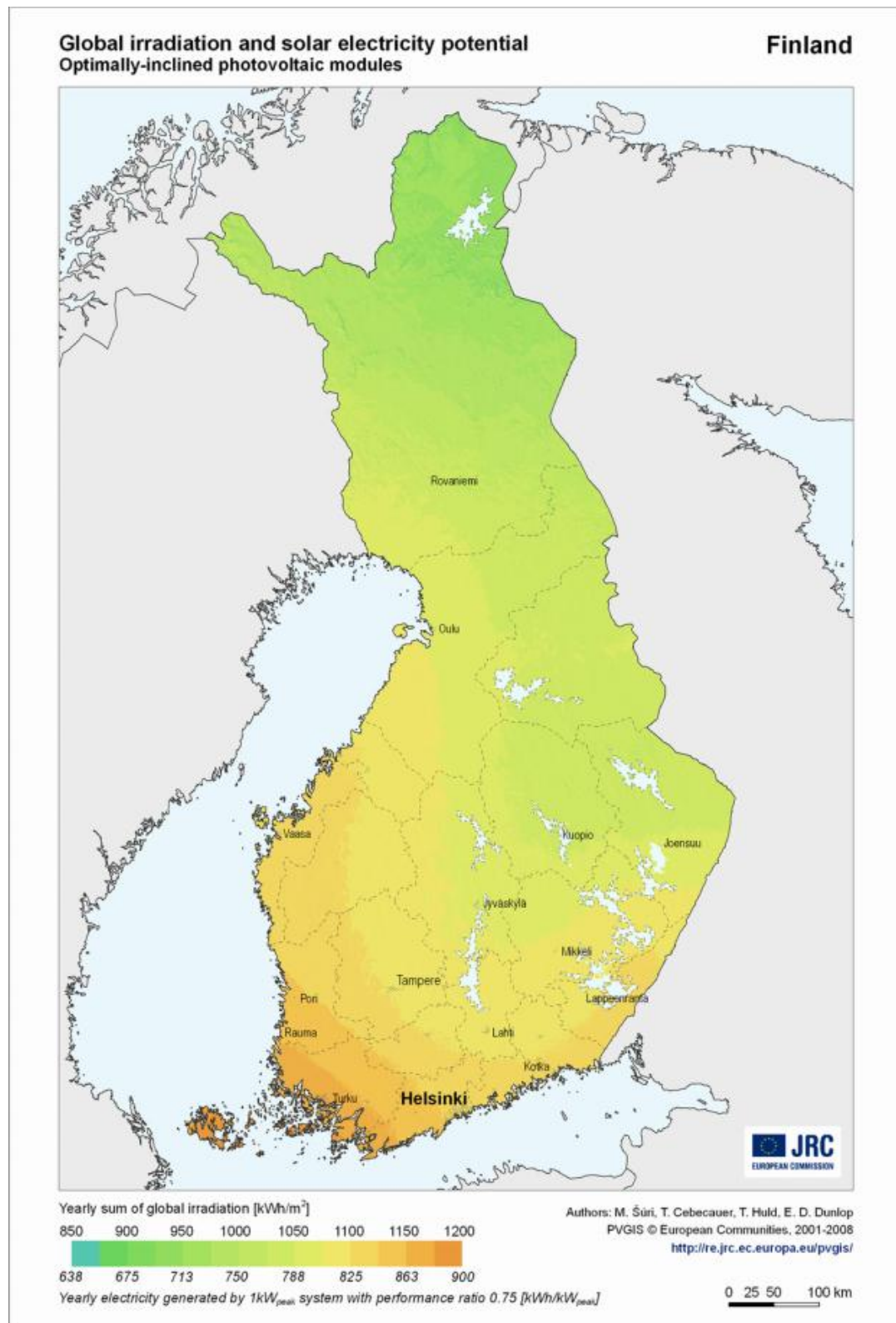


Kuva 17. Vuotuisia säteilyenergian määriä Euroopassa [33; 34].

Kuvassa 18 on PVGIS:n karttapohjainen kuva Suomen säteilyoloista, kun mitataan vaakatasoon tulevaa säteilyä. Tällöin säteilyarvot ovat 700–1 000 kWh/m² vuodessa. Kuvassa 19 nähdään säteilyarvot, kun käytetään optimaalista tulokulmaa. Säteilyarvot vaihtelevat tällöin 800–1 200 kWh/m² vuodessa. Nämä arvot ovat säteilyn maksimiarvoja.



Kuva 18. Hyödynnettävä säteily määrä, kun paneeli on asennettu vaakatasoon [33].



Kuva 19. Hyödynnettävä säteily määrä, kun käytetään optimikulmaa [33].

Taulukossa 1 on esitetty kallistuskulman vaihtelun vaikutukset kuukausittain. Mittaukset on suoritettu Helsingissä, ja suuntaus on mittauksissa ollut suoraan etelään.

Taulukko 1. Säteily kWh/m² / vrk eri kulmilla Helsingissä (suuntaus etelään) [14, s. 16].

Kuukausi	30°	45°	90°
Tammikuu	0,4	0,5	0,5
Helmikuu	1,5	1,8	1,9
Maaliskuu	3,1	3,4	3,2
Huhtikuu	4,4	4,5	3,4
Toukokuu	5,9	5,7	3,7
Kesäkuu	6,6	6,3	3,9
Heinäkuu	5,7	5,5	3,6
Elokuu	5,0	5,0	3,6
Syyskuu	3,3	3,5	3,0
Lokakuu	1,6	1,8	1,7
Marraskuu	0,5	0,5	0,5
Joulukuu	0,4	0,5	0,6

Taulukossa 2 on esitetty keskimääräisiä auringonpaistetunteja kuukausittain eri paikkakunnilla Suomessa.

Taulukko 2. Keskimääräiset auringonpaistetunnit kuukausittain [14, s. 25].

Kuukausi	Helsinki	Vaasa	Joensuu	Utsjoki
Tammikuu	39	29	30	1
Helmikuu	72	72	69	36
Maaliskuu	130	131	131	116
Huhtikuu	183	190	174	168
Toukokuu	275	277	259	203
Kesäkuu	298	303	264	232
Heinäkuu	275	283	265	239
Elokuu	222	220	197	142
Syyskuu	135	131	114	84
Lokakuu	90	85	62	48
Marraskuu	37	40	24	7
Joulukuu	28	21	17	0

Taulukon 2 arvoista voidaan laskea, että noin 80 % auringonpaisteesta saadaan huhtikuun ja syyskuun välisenä aikana (Helsingissä 78 % ja Utsjoella 84 %). Mittaukset on tehty vuosina 1961–1990 [14, s. 25].

Paneelien suuntauksen lisäksi asennuksen suunnittelussa tulisi ottaa huomioon myös asennusympäristö. Asennusympäristössä on tärkeää huomioida lämpöolosuhteet, koska aurinkopaneelit ovat melko herkkiä yllämpenemiselle. Asennuspaikan tulisi olla sellainen, että tuuli pääsee jäädyttämään paneeleja ja asennuspaikkaan tulee valita materiaaleja, jotka eivät kuumene auringonsäteilyn vaikutuksesta. Musta huopakatto on erityisen huono vaihtoehto asennuspaikan materiaaliksi. Vaaleat pinnat sopivasti sijoitettuna ovat hyvä vaihtoehto myös siinä mielessä, että niiden kautta voi mahdollisesti hyödyntää myös heijastuvaa säteilyä. Talvella lumesta heijastuvan säteilyn hyödyntäminen on myös mielenkiintoinen mahdollisuus. Lumihan heijastaa takaisin noin 90 % siihen osuvasta säteilystä.

5 Testausympäristö

5.1 Testausstrategia

Metropolia AMK:n aurinkoenergian testaus- ja tutkimuslaboratorion tavoitteena on tarjota aurinkoenergian käyttöön liittyviä testaus- ja tutkimuslaboratorion tiloja ja palveluja. Laboratorion tärkein tavoite aurinkosähköjärjestelmien osalta on tutkia ja testata erilaisten aurinkosähköjärjestelmien soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin. Päättutkimuskohteena on erityyppisten aurinkopaneelien teknisten ominaisuuksien vertailu. Toisena tärkeänä tutkimuskohteena ovat BIPV-ratkaisut. Lisäksi tutkitaan ja testataan erilaisten lataussäätimien, vaihtosuuntaajien ja akkujen toimintaa. Yksi mielenkiintoisista tutkimuskohteista on keskittävien järjestelmien toimintamallin hyödyntäminen varsinkin hajavaloo-olosuhteissa. Tämä on Suomessa hyvin yleinen tilanne sääoloista ja keskimäärin suhteellisen matalasta säteilyn tulokulmasta johtuen.

Aurinkopaneelien testausjärjestelyt tulee toteuttaa siten, että saadut mittaustiedot pyydytään tallentamaan myöhempää analysointia ja tarkastelua varten. Testausjärjestelyissä on varauduttava myös mahdollisten virhetilanteiden varalle. Lisäksi tavoitteena

on rakentaa etäyhteys testattaviin laitteisiin, jolloin pystytään tarjoamaan helppo seurantamahdollisuus kaikille asiasta kiinnostuneille.

Metropolia AMK:n Leppävaaran testauslaboratoriossa paneelityyppien vertailevan testauksen kohteena tulisi olla ainakin kolme erityyppistä paneelia: yksikiteinen, monikiteinen ja ohutkalvopaneeli. Testeissä verrataan esimerkiksi hyötysuhdetta, paneelin lämpenemistä ja lämpenemisen vaikutusta hyötysuhteeseen. Myös BIPV-tuotteiden testaus olisi erittäin tärkeää. Ne tulevat olemaan jatkossa todennäköisesti erittäin keskeisessä roolissa energiatehokkaiden rakennusten suunnittelussa ja toteutuksessa. Lisäksi olisi mielenkiintoista saada testattavaksi myös jokin kolmannen sukupolven tuote, mutta todennäköisesti se ei ole mahdollista ainakaan projektin ensimmäisessä vaiheessa.

Paneelien asennuskulmien muutosten vaikutusta hyötysuhteeseen tulee myös testata. Asennuskulmien tulisi vastata käytännön asennuksissa toteutuvia kulmia. Testattavaksi voidaan valita esimerkiksi optimikulma ja 90°:n kulma eli normaali seinäasennus. Näissä testeissä olisi hyvä käyttää saman valmistajan tekemiä saman tehoisia paneeleita. Tällöin paneelit voisi asentaa rinnakkain eri kulmiin. Näin varmistettaisiin, että säteilyteho on kaikille sama ja saadaan täysin luotettava testitulos.

Auringonseurantajärjestelmän vaikutusta sähköenergiantuottoon olisi myös mielenkiintoista testata. Suomen olosuhteissa seurantajärjestelmän käyttö voi kuitenkin olla haasteellista. On vaikeaa ennakoida, miten laitteisto toimii talvella, kun on pakkasta ja lunta. Lämmitys- ja sulatusjärjestelmän asentaminen seurantalaitteeseen ei todennäköisesti ole taloudellisesti kannattavaa.

Suomessa hajavalon osuus säteilystä on suhteellisen suuri, joten tulisi testata hajavaloa hyödyntäviä materiaaleja, esimerkiksi CIGS-materiaaleja. Vaaleiden pintojen heijastaman ja lumesta heijastuvan valon hyödyntämistä kannattaisi myös tutkia ja testata. Jos hajavalon osuus on suuri, herää kysymys, auttaako keskittävä järjestelmä lisäämään energian tuotantoa? Samoin olisi mielenkiintoista selvittää, millaisilla peilijärjestelmillä hajavalo pystytään tehokkaimmin hyödyntämään sekä kuinka suuri vaikutus keskittävilla järjestelmillä on sähköenergiantuottoon ja ovatko ne taloudellisesti kannattavia.

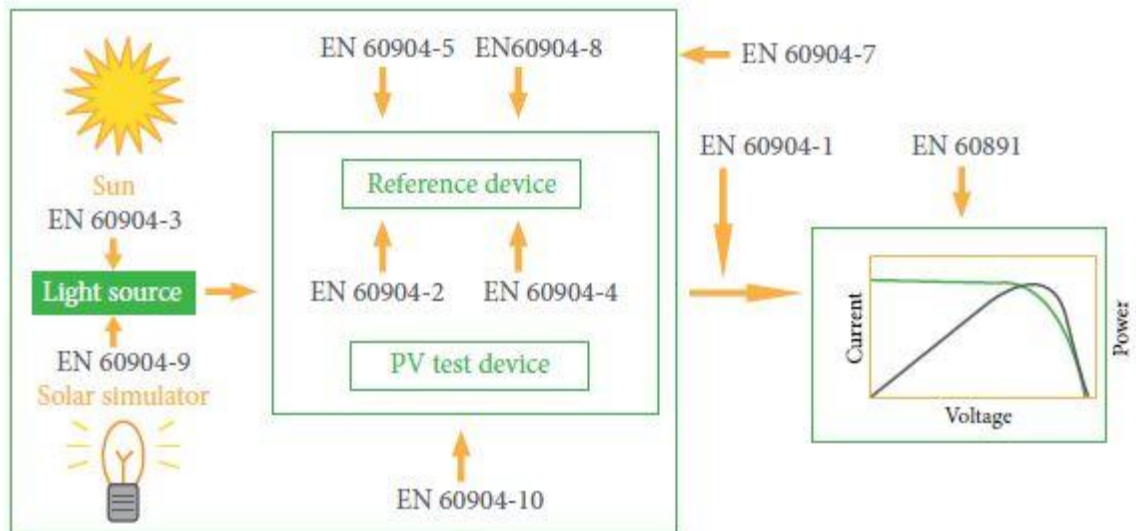
Jos testauslaboratoriossa olisi käytettävissä aurinkosimulaattori, jolla pystytään tuottamaan standardimittausolosuhteiden (STC) mukaista säteilyä $1\ 000\ \text{W/m}^2$, useat mittaukset olisi erittäin helppo toteuttaa sisätiloissa. Tällainen järjestelmä lisäisi huomattavasti testauslaboratorion käytettävyyttä.

Osa laitteistosta tulisi keskittää pitkäkestoista testausta varten. Sen avulla pystytään seuraamaan esimerkiksi sään vaihtelujen vaikutusta energiantuotantoon. Samalla tuotettu sähkö tulisi hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti.

Kaikesta suoritetusta testauksesta ja yleensäkin eri paneelien käytöstä on keskeistä pitää tarkkaa seurantakirjaa. Tämä on tärkeää, jotta jokaisen paneelin historia on tiedossa. Näiden tietojen avulla voidaan seurata paneelien ikääntymiseen liittyviä muutoksia. Tällaisia muutoksia ovat esimerkiksi hyötysuhteen heikkeneminen ja kosteuden pääsy paneelin rakenteiden sisään.

Aurinkopaneelien testaukseen liittyviä IEC-standardeja on useita (kuva 20). Esimerkkinä voidaan mainita seuraavat keskeiset standardit:

- IEC 60904 PV-laitteiden mittaukset ja vaatimukset
- IEC 61215 Suunnittelukriteerit ja tyyppihyväksyntä, kiteinen pii
- IEC 61646 Suunnittelukriteerit ja tyyppihyväksyntä, ohutkalvo
- IEC 61853 Kennon suorituskykytestaus
- IEC 62108 Suunnittelukriteerit ja tyyppihyväksyntä, keskittävä järjestelmä [30, s. 12].



Kuva 20. Aurinkopaneelien testaukseen liittyviä IEC-standarddeja [35, s. 11].

Standardien mukainen aurinkopaneelien testaus tulee tapahtua standardimittausolosuhteissa. Testauksen standardimittausolosuhteissa (Standard test condition, STC) säteilyteho (irradiance) on $1\ 000\ \text{W/m}^2$ ja kennon lämpötila on $25\ ^\circ\text{C}$ sekä auringon spektri normitetulle ilmassalle on 1,5 (AM1,5) eli aurinko on $41,81^\circ$ horisontin yläpuolella (määritelty standardissa IEC 60904-3). [13, s. 205; 10, s. 5.]

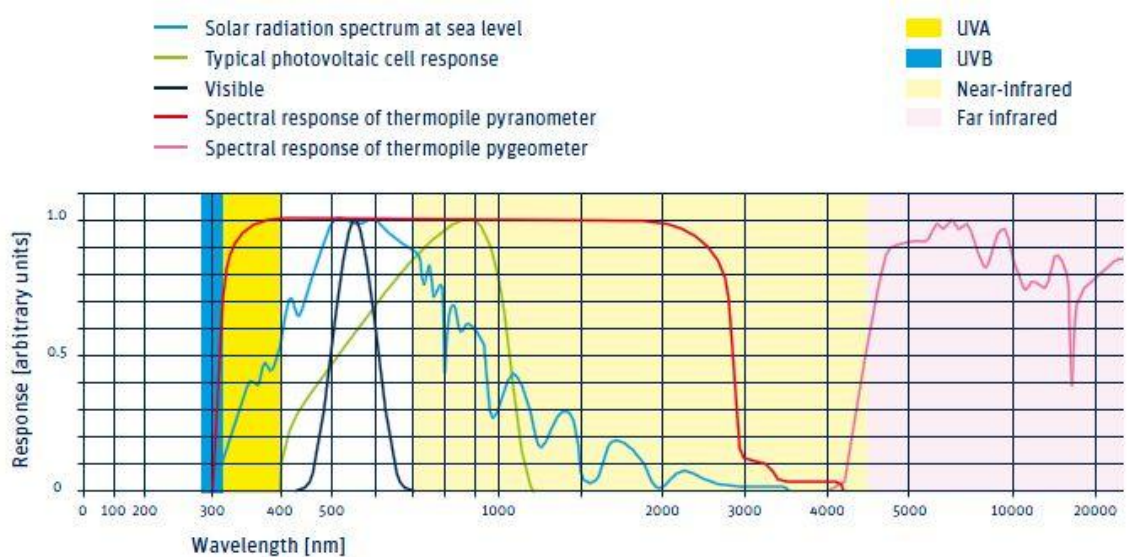
Euroopan komission alainen Institute for Energy and Transport (IET) on perustanut jo vuonna 1977 European Solar Test Installation (ESTI) -laitoksen, joka nimensä mukaisesti testaa ja ohjeistaa PV-laitteiden ja -järjestelmien testaamiseen liittyviä asioita. ESTI on esimerkiksi julkaissut ohjekirjan "Monitoring Guidelines for Photovoltaic Systems". [36.]

5.2 Testauslaitteistoa

Jotta eri paneelit ovat vertailtavissa toisiinsa, tulisi testauslaitteiden olla samat jokaiselle paneelille. Tämä vaatimus aiheuttaa sen, että käytössä tulee olla useita samanlaisia testilaitteita. Lisäksi olisi hyvä olla olemassa sääasema, jotta voidaan tutkia sään vaikutusta (lämpötila, tuuli, kosteus ja niin edelleen) paneelien toimintaan.

Jotta paneelin suorituskyvystä saadaan vertailukelpoinen mittaustulos, täytyy olla tiedossa todellinen säteilyintensiteetin arvo. Tähän tarkoitukseen käytetään pyranometriä, jolla voidaan mitata tasolle tulevaa säteilyvirtaa. Se mittaa siis säteilyn intensiteettiä

(W/m^2). Pyranometri mittaa säteilyä, jonka aallonpituus on noin 300–3 000 nm (kuva 21). Normaalilla pyranometrillä mitattavan säteilytehon maksimi on noin $2000 W/m^2$, mikä onkin riittävä taso Suomen olosuhteissa. Jotkin kalliimmat versiot mittaavat myös auringonpaistetunteja. Pyrradiometri mittaa kokonaissäteilyä. Tällaiset laitteet ovat suhteellisen kalliita, joten niitä ei kannata hankkia pienimuotoista testausta varten. Aurinkoautografissa auringonsäteet polttavat piirturipaperille jälkeä auringon paistaessa. [30, s. 28–29.]



Kuva 21. Auringonsäteilyn aallonpituuksia [30, s. 5].

Mittaustulokset kerätään esimerkiksi FieldPoint-laitteistoon. Siihen on saatavissa sekä digitaalisia- että analogisia moduuleita. Saatuja tuloksia voidaan jatkokäsitellä esimerkiksi LabView-ohjelmiston avulla. [37, s. 20.]

Tietojen analysointiin on saatavilla myös ilmaisia ohjelmistoja, esimerkiksi normaalissa kotitietokoneessa toimiva saksalaisen SMA:n Sunny Explorer. Siinä on myös mahdollisuus kytkeä laitteita tietokoneeseen Bluetooth yhteyden avulla. [38.]

Koska Suomessa sääolosuhteet ovat haastavia, lisäksi aurinkosimulaattorin käyttö testausmahdollisuuksia laboratoriossa. Aurinkosimulaattori tuottaa sähkömagneettista säteilyä, jonka teho ja spektraaliset ominaisuudet vastaavat auringon keskimääräistä säteilyä maanpinnalla. Simulaattoreita on erityyppisiä. Laitteen valontuotto voi olla jatkuvaa, flash- tai pulssityyppistä. [39.]

5.3 Etäyhteys

Testauslaboratorion käytettävyyttä ja mainosarvoa lisää huomattavasti testausjärjestelmään kytketty etäyhteys. Etäyhteys on käytettävissä vain lukumoodissa. Tämän yhteyden kautta on mahdollista seurata eri aurinkopaneelien tilannetta. Etäyhteyden kautta avautuvassa yleisnäkymässä on hyvä näkyä esimerkiksi seuraavia tietoja:

- paneelin tämän hetkinen latausteho
- auringon säteilyteho (pyranometrillä)
- tämän päivän energiatuoton kehitys (diagrammi)
- viimeisten seitsemän päivän energiatuoton kehitys (diagrammi)
- energiatuoton kehitys kuukausitasolla (diagrammi)
- säätilanne (sääasemasta).

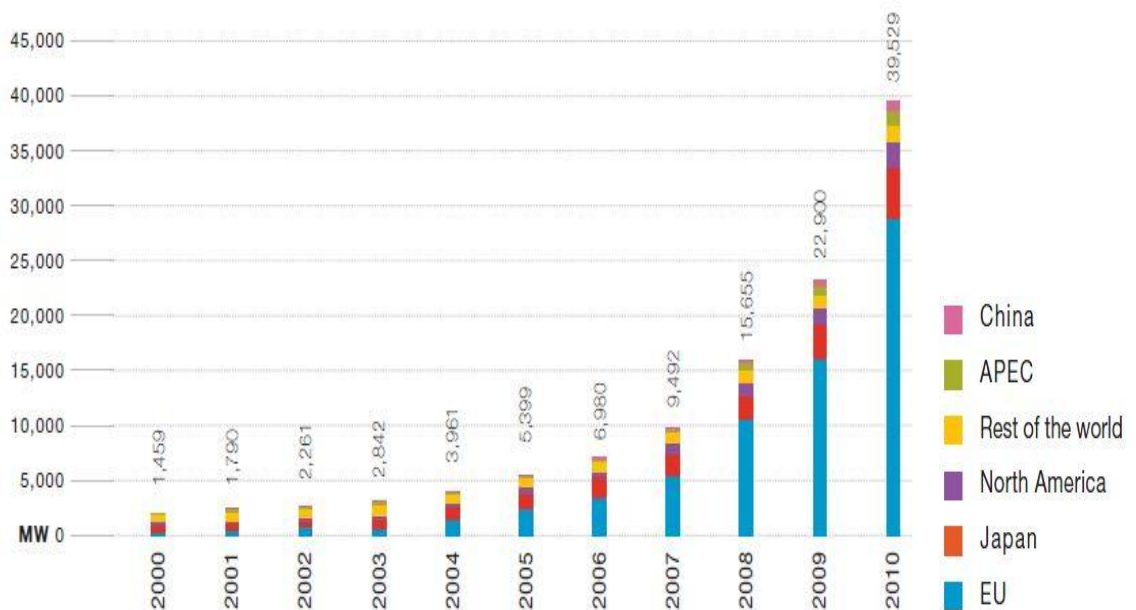
6 Aurinkokennojen markkinat, tuotanto ja kustannukset

6.1 Markkinatilanne ja asennukset

Perinteisten kiteiseen piihin perustuvien aurinkokennojen markkinaosuus on tällä hetkellä noin 80–90 %. Loput 10–20 % on ohutkalvotekniikkaan perustuvia kennoja. [13, s. 203.]

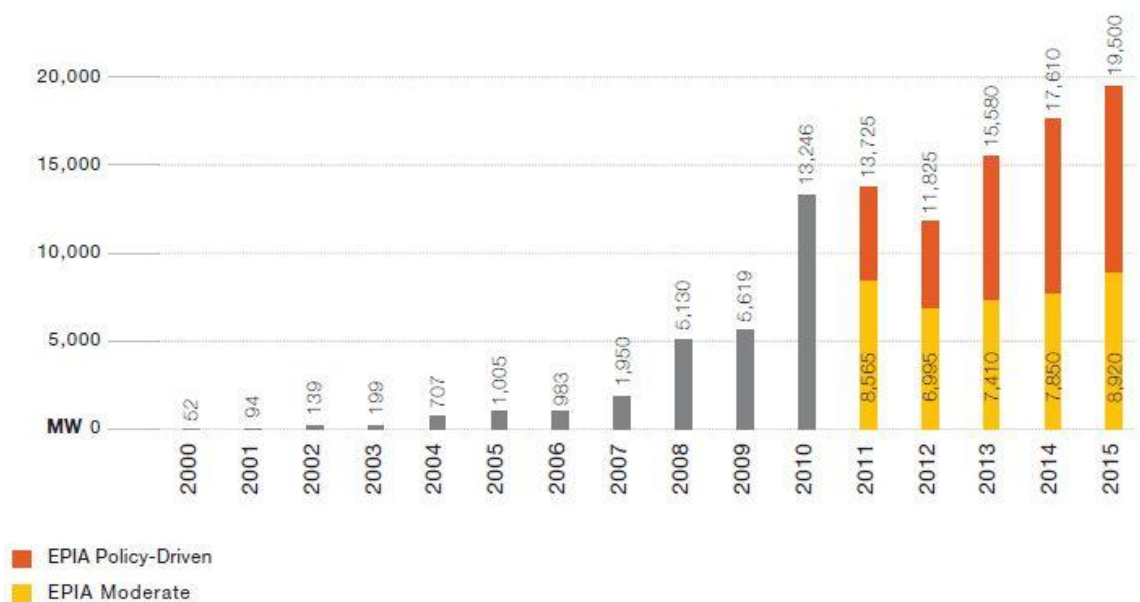
PV-aurinkosähköjärjestelmien asennusmäärä on kasvanut viime vuosina merkittävästi. Maailmanlaajuisesti mitattuna vuonna 2000 asennetun kapasiteetin määrä oli noin 1500 MW. Vuonna 2010 vastaava luku oli noin 40000 MW eli 40 GW. Tällä kapasiteetilla pystyttiin tuottamaan 50 TWh energiaa vuodessa. Saksan osuus tästä oli noin 12 TWh. Vertailun vuoksi voi mainita, että sähköenergian vuosikulutus Suomessa on noin 90 TWh. Vuonna 2010 uusia asennuksia tehtiin Euroopassa noin 13 GW ja muissa maissa noin 3 GW. [40, s. 4.] Saksassa tuotettiinkin vuoden 2012 ensimmäisellä puoliskolla aurinkosähkön avulla 5.3 % koko maan sähköstä. Eurooppalaisilla valtioilla onkin ollut suuri rooli aurinkosähköjärjestelmien käytössä. Euroopassa noin 99 % asennuksista on verkkoon kytkettyjä järjestelmiä. USA:ssa tämä vastaava luku on noin 90 %. Kuvassa 22 näemme kaikkien maiden PV-aurinkosähköjärjestelmien asennusten

yhteismäärän vuosilta 2000–2010 European Photovoltaic Industry Associationin (EPIA) raportoimana.



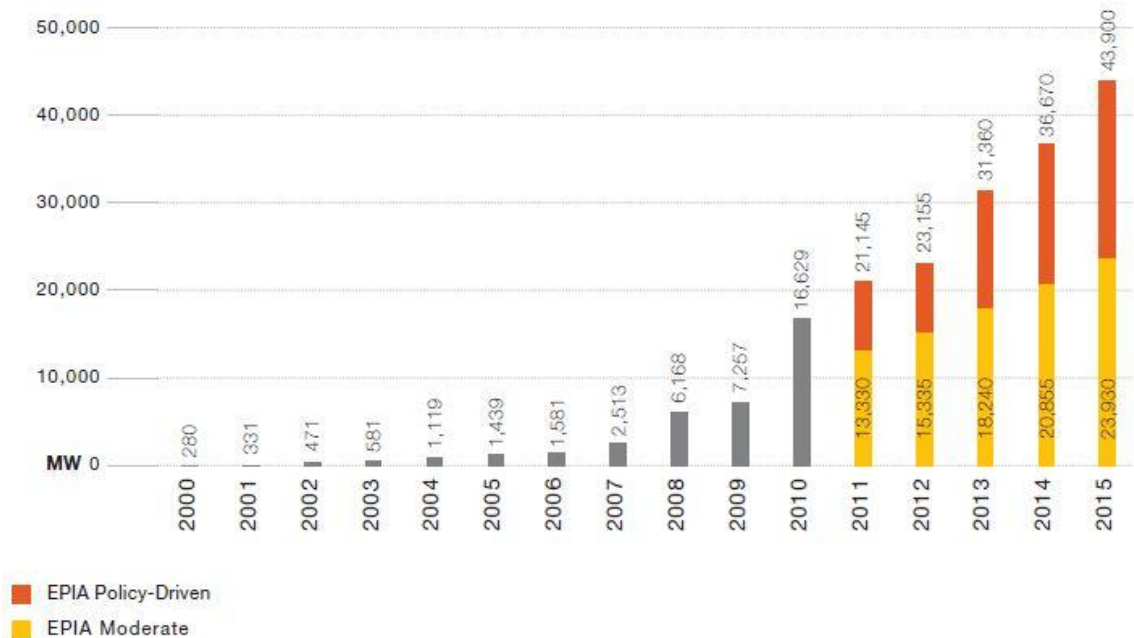
Kuva 22. PV asennusten historia globaalisti (EPIA) [40, s. 9].

Kuvassa 23 nähdään Euroopan osalta PV-aurinkosähköjärjestelmien markkinaennuste, jonka European Photovoltaic Industry Association (EPIA) on tehnyt vuonna 2011. Kuvissa 23 ja 24 historiatieto on merkitty harmaalla värillä. Vuosien 2011–2015 arvioiduissa määrissä on merkitty keltaisella värillä maltillinen kehitys ja punaisella asetettujen tavoitteiden mukainen kehitys.



Kuva 23. EPIA:n markkinaennuste uusille asennuksille Euroopassa (vuodelta 2011) [40, s. 25].

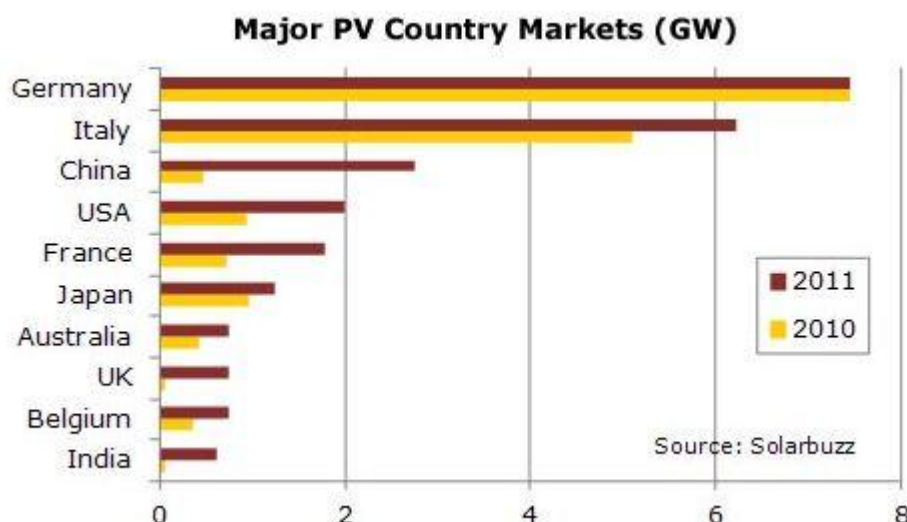
Kuvassa 24 nähdään vastaava markkinaennuste kaikkien maiden osalta. Tämän ennusteen perusteella voidaan arvioida, että vuonna 2015 kokonaiskapasiteetti tulee olemaan noin 131–196 GW. Sadan gigawatin raja voidaan saavuttaa jo vuonna 2013. [40, s. 35.]



Kuva 24. EPIA:n globaali markkinaennuste uusille asennuksille (vuodelta 2011) [40, s. 35].

Globaalisti katsottuna voidaan nähdä kolme tärkeää aluetta, joissa PV-aurinkosähköjärjestelmien asennuksia toteutetaan. Eurooppa johtaa selkeästi ja perässä tulee Aasian ja Tyynenmeren alue Japanin ja Kiinan vetämänä. On hyvin todennäköistä, että Kiina tulee olemaan erittäin merkittävä tekijä markkinoilla lähivuosina. Pohjois-Amerikka ja Kanada tulevat kolmantena tärkeänä alueena. Noin 60 % Pohjois-Amerikan asennuksista on Kalifornian alueella. Edellä mainittujen alueiden ulkopuolella olevia potentiaalisia alueita ovat Lähi-idän alueet ja Pohjois-Afrikka. [40, s. 8–9.] Liitteessä 1 on EPIA:n tekemä taulukko aurinkosähköjärjestelmien maakohtaisista asennusmääristä.

Vuosi 2011 oli ennätysellinen kun, tarkastellaan PV-aurinkosähköjärjestelmien asennusmääriä. Globaalisti vuonna 2011 järjestelmiä asennettiin noin 27 GW, mikä oli 40 % enemmän kuin edellisellä vuonna. Kuvassa 25 esitellään asennusmäärien kehitystä vuosina 2010 ja 2011. Esimerkiksi Kiinassa kasvuvauhti on ollut räjähdysmäistä. [41.]



Kuva 25. PV aurinkosähköjärjestelmien asennusmäärien kehitys eräissä maissa vuosina 2010 ja 2011 [41].

Euroopassa vuonna 2010 raportoidut maakohtaiset kasvutavoitteet vuodelle 2015 ovat hyvin maltillisia. Poikkeuksina ovat Saksa, Espanja ja Kreikka, joiden tavoitteet ovat EPIA:n ennusteiden mukaisia. [40, s. 14–24.] Kiinan tavoitteet sitä vastoin ovat erittäin merkittävät. Kiinan kansallisen energiahallinnon julkaiseman kahdennentoista viisivuotissuunnitelman mukaan Kiina tulee investoimaan aurinkoenergian hyödyntämiseen 39,5 miljardia dollaria (USD) vuosina 2011–2015. Tavoitteena on rakentaa suuria aurinkovoimaloita, joiden yhteisteho olisi 10 GW. Lisäksi tavoitteena on rakentaa saman verran hajautettua PV-kapasiteettia. Näiden lisäksi suunnitelmissa on rakentaa 1 GW:n keskittävää järjestelmää. [42.]

Yksiselitteistä arviota PV-aurinkosähköjärjestelmien asennusmäärästä ei pysty saamaan selville, koska eri lähteistä saatavat tiedot eroavat huomattavastikin toisistaan. Monien raporttien ja analyysien lähdemateriaalia ei mainita selkeästi, joten on vaikeaa selvittää todellista asennusmäärää. Huomattavia eroja näissä luvuissa saattaa aiheuttaa myös se, että otetaanko niissä huomioon vain asennusten määrä vai myös verkkoon kytkennät. Esimerkiksi Saksassa asennettujen PV-aurinkosähköjärjestelmien kokonaismääräksi mainitaan 26,99 GW. Tähän on huomioitu asennukset, jotka on tehty ennen 30.4.2012, ja arvion on laatinut German Federal Network Agency. [43.] Toisaalta International Energy Agency (IEA) ilmoittaa Saksan asennuskannaksi vuoden 2011 lopussa 24,82 GW. Ero noissa luvuissa on noin 2 GW, eli vuoden 2012 neljän ensimmäisen

kuukauden aikana olisi Saksassa asennettu tällainen määrä uusia PV-aurinkosähköjärjestelmiä. [44.]

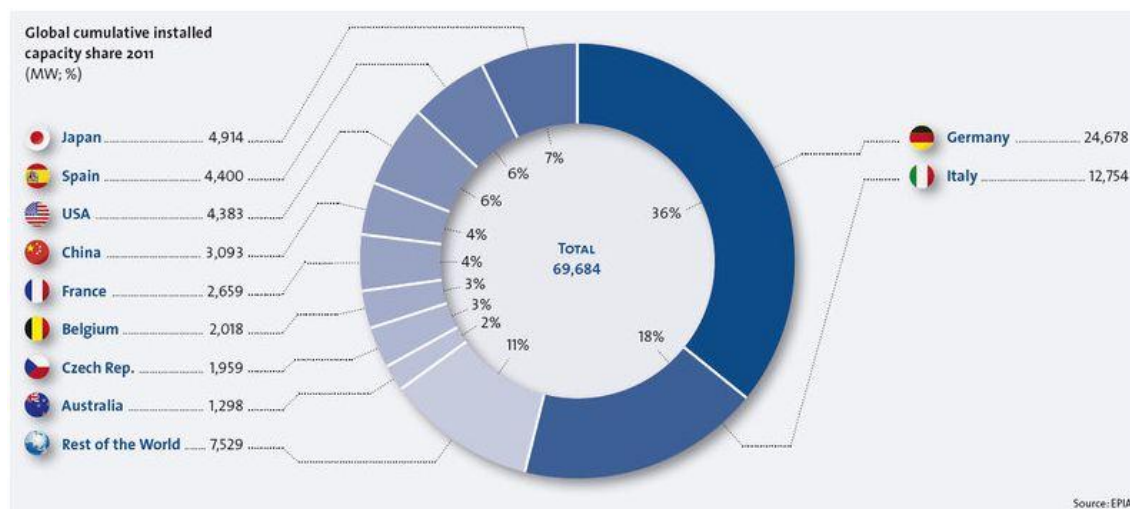
IEA:n raportin mukaan vuoden 2011 lopussa asennuksia on globaalisti yhteensä noin 63,3 GW. Tämä luku sisältää kaikki merkittävät PV-aurinkosähköjärjestelmien asennuksia tehneet maat. Kuvassa 26 nähdään kaikki IEA:n jäsenmaiden asennusmäärät vuonna 2011 sekä kumulatiivinen kokonaismäärä. Kuten kuvasta näkyy, Saksa on asennusmäärässä aivan omassa luokassaan. Italia on yhtä selkeästi toisella sijalla. Italiassa asennusmäärä on noin puolet Saksassa asennetuista. Japani, Espanja ja USA ovat seuraavina huomattavasti pienemmillä asennusmäärillä. [44.]

PVPS Country	PV installed in 2011 (MW)	Cumulative installed capacity (MW)
Australia	837	1408
Austria	92	187
(Belgium)	958	1997
Canada	278	559
China	2200	3000
Denmark	10	17
France	1634	2831
Germany	7500	24820
Israel	120	190
Italy	9301	12803
Japan	1296	4914
Korea	157	812
Malaysia	1	14
Mexico	7	37
Netherlands	42	130
Norway	<1	9
Portugal	13	144
Spain	345	4260
Sweden	4	16
Switzerland	100	211
(Thailand)	50	100
Turkey	1	7
UK	899	976
USA	1867	3966
Estimated totals	27713	63349

Kuva 26. PV-aurinkosähköjärjestelmien asennukset vuoden 2011 lopussa IEA:n raportoimana [44].

Kuvassa 27 nähdään vastaavanlaiset tiedot EPIA:n raportoimana. Tässä kokonaismääräksi saadaan yli 69 GW. Huomionarvoista on, että vastaava luku EPIA:n aikaisempien arvioiden mukaan olisi noin 60 GW. Tähän on vaikuttanut osaltaan se, että monet Euroopan maat ovat ylittäneet tavoitteensa huolimatta Euroopan huonosta taloudellisesta

tilanteesta. Erittäin suuri vaikutus on ollut Kiinan, Japanin ja USA:n merkittävällä asennusmäärien kasvulla. [45.]



Kuva 27. PV-aurinkosähköjärjestelmien asennukset vuonna 2011 EPIA:n raportoimana [46, s. 42].

Tulevaisuuden ennustaminen on tietenkin vaikeaa. Euroopan maissa yhä jatkuva talouskriisi vaikuttaa kuitenkin lähivuosien investointeihin. Kuvassa 28 nähdään eräitä arvioita vuosille 2012 ja 2016. Nämä arviot on tehnyt IHS iSuppli Market Research. [47].

COUNTRY	2010	2011*	2012*	2016*	CAGR 2015 VS. 2010 (%)
Germany	7,408	7,503	5,500	7,500	0%
Italy	3,577	6,900	2,500	4,563	4%
United States	915	2,551	3,646	7,116	41%
China	537	1,856	2,867	6,350	51%
worldwide	17,856	26,522	23,266	61,343	23%

Kuva 28. Arvio tulevasta asennusmääristä eräissä maissa [4, s. 13].

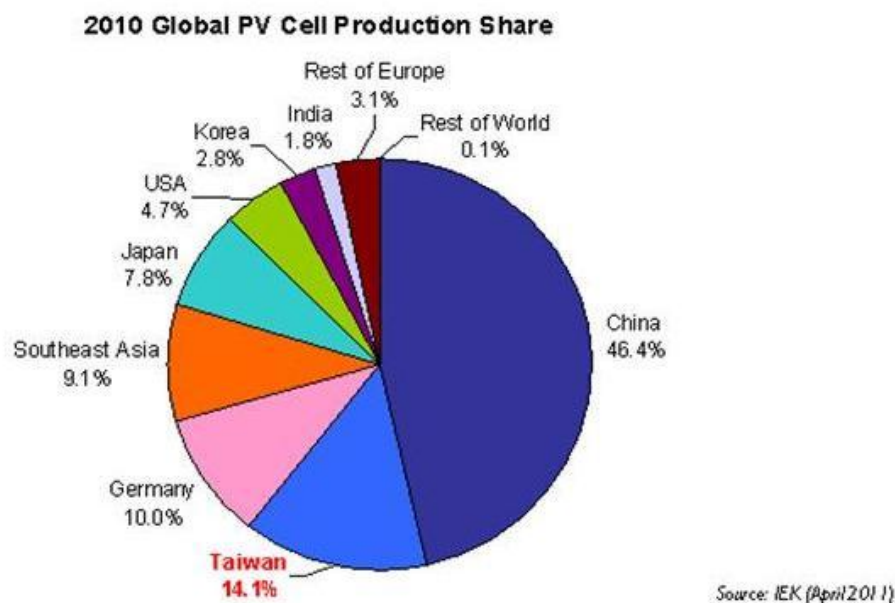
Aurinkosähkö on sekä taloudellisesta näkökulmasta että ympäristön kannalta erittäin perusteltu vaihtoehto etenkin päiväntasaajan maissa. Siellä aurinkosähköjärjestelmä pystyy jo nyt kilpailemaan dieselgeneraattoreiden kanssa, kun sitä käytetään huippukulutuspiikkien tasaamiseen. On arvioitu, että vuonna 2020 näissä maissa asennettua

aurinkosähkökapasiteettia olisi noin 60–250 GW. [40, s. 28.] Liitteessä 2 on lueteltu maapallon kymmenen suurinta aurinkosähköpuistoa.

6.2 Tuotanto

Kiteisen piin valmistus aurinkokennojen raaka-aineeksi tapahtuu pääasiassa Kiinassa, mutta myös esimerkiksi Saksassa on paljon aurinkokennoihin käytettävän piin tuotantoa. Piin kokonaistuotanto vuonna 2011 oli noin 370 000 tonnia. Kilpailu tälläkin alalla on kovaa, ja moni pieni tuotantolaitos on joutunut lopettamaan toimintansa suurten tuotantolaitosten kasvattaessa tuotantomääriään. [40, s. 37.]

Vuonna 2011 kiteiseen piihin perustuvien aurinkokennojen tuotanto maailmanlaajuisesti kasvoi ennätyskellisesti saavuttaen 29,5 GW:n tason. Vastaava luku vuonna 2010 oli 23 GW. Suurin tuotannon kasvu tapahtui Kiinassa ja Taiwanissa. [48.] Kiinassa valmistetaankin noin puolet kaikista perinteisistä aurinkokennoista. Ohutkalvotekniikkaan perustuvien kennojen tuotanto oli vuonna 2011 noin 5 GW. Niistä CIGS-kennoja valmistettiin noin 15 %, ja loput tuotannosta jakaantui tasan CdTe:n ja amorfisen piin kesken. Suurin ohutkalvopaneelien valmistusmaa on USA. [40, s. 37–38.] Vuonna 2012 kennojen tuotannon kasvu tulee olemaan varmasti huomattavasti hitaampaa Euroopan huonon taloustilanteen vuoksi. Eurooppa on kuitenkin suurin vaikuttaja uusien PV-aurinkosähköjärjestelmien asennusten kannalta. (Kuva 29.)



Kuva 29. PV-tuotannon jakautuminen maittain vuonna 2010 [49].

Aurinkokennojen tuotanto on suhteellisen monimutkainen ja hidas prosessi. Tämä koskee varsinkin kiteisten piikkeennojen valmistusta. Yksikiteinen pii valmistetaan kasvattamalla Czochralski-prosessin avulla. Siinä piikide muodostetaan höyrykasvatuksella noin 1 100 °C:n lämpötilassa. Monikiteinen pii valmistetaan yleensä sulatusmenetelmällä. Syntyneestä materiaalista leikataan ohuet piikkeennot. Jotta piikkeenno olisi mahdollisimman tehokas, se pitää seostaa (doping) jollain sopivalla aineella. Yleensä tähän käytetään fosforia (n-tyyppinen) ja booria (p-tyyppinen). Seostaminen tapahtuu noin 800–900 °C:n lämpötilassa. Yksi kennovalmistajien tärkeä kilpailuvaltti onkin uusien tuotantoprosessien kehittäminen. [50; 51, s. 13.]

Tuotantoprosessin pitkälle viety automatisointi ja erittäin yksityiskohtainen laadun varmistus takaavat tuotteille tasaisen ja hyvän laadun. Monet aurinkosähköpaneelien valmistajat antavat tuotteilleen 25 vuoden tehotakuun, mikä tarkoittaa, että laitteen hyötysuhde pysyy luvattulla tasolla vähintään tuon ajan. Itse laite asiallisesti hoidettuna kestää vielä huomattavasti pitempään. Pitää kuitenkin muistaa, että toisen sukupolven paneelien käyttöiästä ei ole vielä todellista käytännön kokemusta. Monissa testeissä on todettu, että nämä kennot voivat olla melko herkkiä ympäristötekijöille.

6.3 Kustannukset

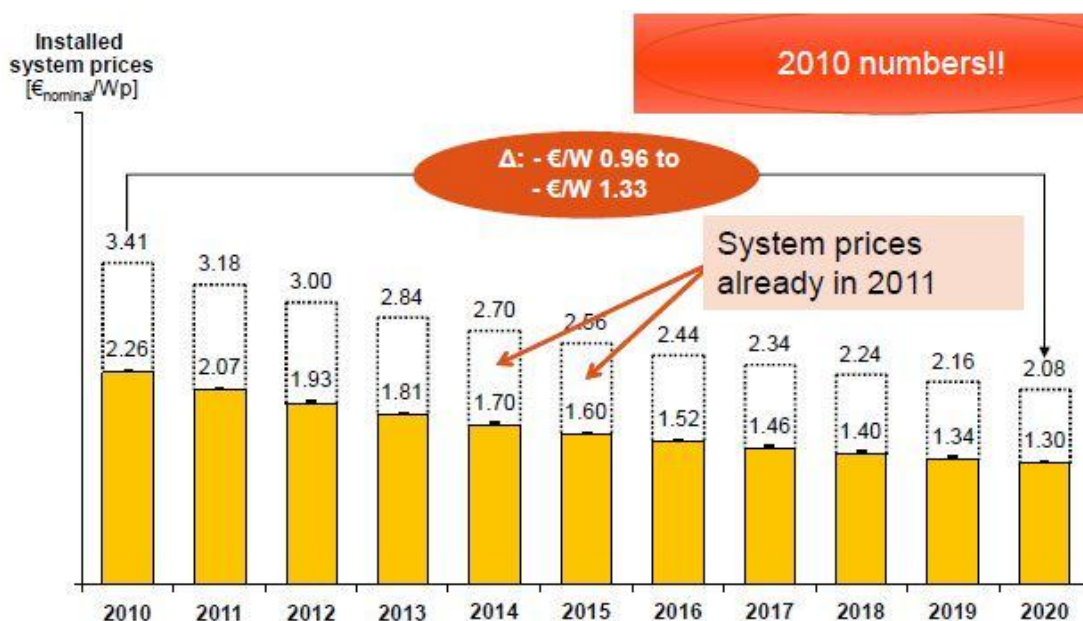
1990-luvun alkupuolella katolle asennettavan normaalin aurinkosähköjärjestelmän hinta oli noin 12 500 euroa/kW. 2000-luvun alkupuolella vastaava hinta oli noin 7000 euroa/kW. Nykyinen hintataso on noin 2000 euroa/kW. (Kuva 30.) Aurinkosähköpaneelin osuus kokonaiskustannuksesta on noin 35–40 %. [52.]



Kuva 30. Hintakehitys vuosina 2002–2011 [52].

Seuraavassa on esimerkki kustannuksista todellisessa rakennuskohteessa Espanjassa vuonna 1995. Rakennuksen seinään asennetun aurinkosähköpaneeliston kokonaispinta-ala oli 245 m². Paneelisto koottiin 2,5 m²:n kokoisista paneeleista, jotka kiinnitettiin alumiiniprofiileihin. Paneelit muodostuivat kahden lasipinnan väliin tehdystä kennosta, jossa takalasi oli kaksinkertainen. Rakenne oli takaa tuulettuva. Kun lasketaan yhteen paneelit ja muut tarvittavat komponentit sekä asennustyö, päädytään kokonaishintaan 1 167 euroa/m². Kustannusjakaumassa paneelien osuus oli 58 %, ja asennustyön osuus oli 23 %. [13, s. 204.] Samaan rakennukseen asennettiin myös kattopinnoitteeksi aurinkopaneelit 325 m²:n alalle. Tässä materiaalien ja työn yhteiskustannukseksi tuli 1 051 euroa/m². [13, s. 205.]

Kuvassa 31 nähdään arvio asennettujen järjestelmien hintakehityksestä. Keltaisella pohjalla on merkitty laitteiston hinta ja valkoisella asennuksen kokonaishinta. Arvio on tehty vuonna 2010.



Kuva 31. Arvio asennettujen järjestelmien kustannuksista (eur/W) vuoteen 2020 [53, s. 9].

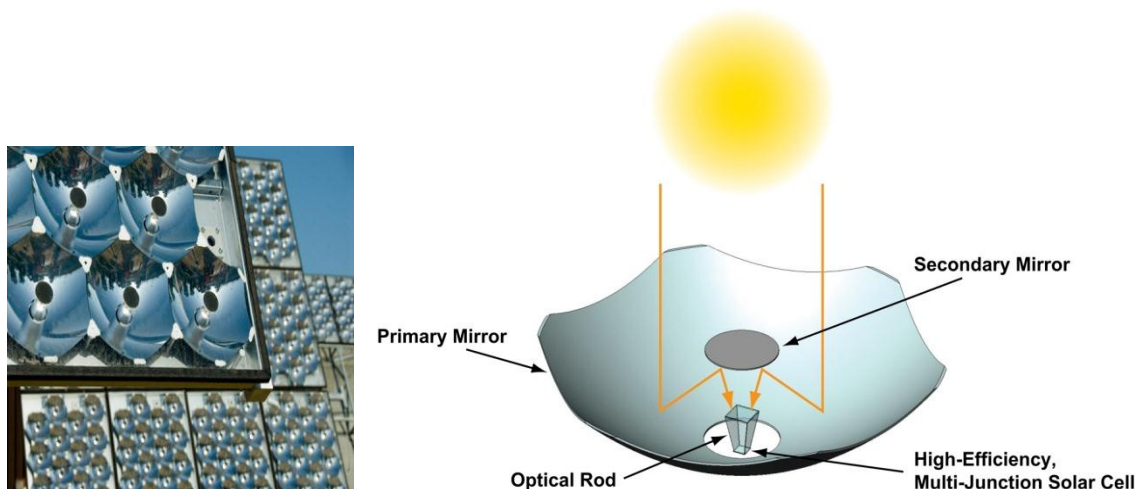
IHS iSuppli -tutkimuslaitoksen mukaan kiteiseen piihin perustuvien paneelien osalta saavutetaan pian 1 euro/W hintataso. Kesällä 2012 hintataso IHS:n mukaan on seuraava:

- kiteinen pii (c-Si) 1,264 USD/W
- amorfisen pii (a-Si) 1,063 USD/W
- CdTe 0,905 USD/W
- CIGS 1,251 USD/W [52].

7 Teknologian eri vaihtoehtoja maailmalla

7.1 Keskittävä aurinkosähköjärjestelmä

Keskittävän aurinkosähköjärjestelmän perusajatus on se, että auringon säteily ohjataan peilijärjestelmien avulla pienelle alueelle. Tällöin aurinkokennoon pystytään kohdistamaan mahdollisimman suuri säteily määrä ja saadaan kennosta mahdollisimman suuri teho ulos. Keskittäviä aurinkosähköjärjestelmäteknologioita on kahta eri tyyppiä. Suoraan valosähköteknikkaa (CPV) hyödyntävä teknologia muuttaa nimensä mukaisesti auringon säteilyenergian sähköksi, kuten luvussa 3.1.5 on esitetty. Tällaisessa keskittävässä järjestelmässä ideana on se, että aurinkopaneelille saadaan suurempi valoteho keskittämällä säteily peilin avulla jokaiseen aurinkokennoon erikseen, kuten kuvassa 32 voi nähdä. Ongelmana CPV-järjestelmissä on se, että säteilyn keskittäminen kuumentaa aurinkokennoa huomattavasti, mikä heikentää hyötysuhdetta. Tämän vuoksi joudutaan käyttämään jäähdytysjärjestelmiä, jotka lisäävät laitteiston kustannuksia. [54, s. 20; 18, s. 23; 55, s. 8.]



Kuva 32. Keskittävä aurinkosähköteknologia CPV.

Uudempi tekniikka (CSP) perustuu nesteen kuumentamiseen ja höyrystämiseen auringon säteilystä saatavan lämmön avulla. Suuret CSP-järjestelmät ovat niin sanottuja torniratkaisuja. Niissä tasopeileillä suunnataan auringon säteily korkean tornin yläosassa olevaan nestesäiliöön, jolloin neste kuumenee. Peilejä ohjataan auringonseuranta-järjestelmällä, jolloin niistä saadaan mahdollisimman suuri hyöty. Torniratkaisuissa nesteenä käytetään yleensä vettä, koska se on edullista ja suhteellisen tehokasta höyrystykseen. Syntynyt ylipaineinen höyry ohjataan höyryturbiiniin. Turbiini puolestaan pyö-

rittää generaattoria, kuten normaalissa höyryvoimalassakin. Näin generaattorista saadaan sähköä, jota voidaan syöttää esimerkiksi jakeluverkkoon tai käyttää paikallisesti. Nykyään tällaisia järjestelmiä on käytössä esimerkiksi Majovan autiomaassa Yhdysvalloissa ja Espanjassa. CSP-järjestelmässä voidaan myös käyttää kuperia kourumaisia peilejä, joilla säteily suunnataan peilin edessä olevaan viivamaiseen lämmönjohtimeen. (Kuva 33.) [56; 18, s. 23.]



Kuva 33. Keskittäviä CSP-aurinkosähköjärjestelmiä – torni- ja kourutyypinen.

Amonix on yritys, jonka päätoimiala on keskittävät aurinkoenergiajärjestelmät. Yrityksellä on nimissään piikennojen hyötysuhteen maailmanennätys. Se on huima: 27,6 %. Tämä tulos saavutettiin keskittämällä 92-kertainen säteily piikennoon. [57.]

Vuonna 2009 selvitettiin, kuinka paljon CSP-järjestelmät mahdollisesti tuottavat sähköenergiaa maapallolla tulevaisuudessa. Tulokseksi saatiin, että maltillisellakin arviointimenetelmällä laskettuna CSP-kapasiteetti vuonna 2050 olisi 830 GW, eli se kattaisi noin 12 % maapallon energiatarpeesta. Tutkimuksen tekivät Greenpeace International, the European Solar Thermal Electricity Association ja IEA. [58.]

7.2 Rakennuksiin integroidut järjestelmät

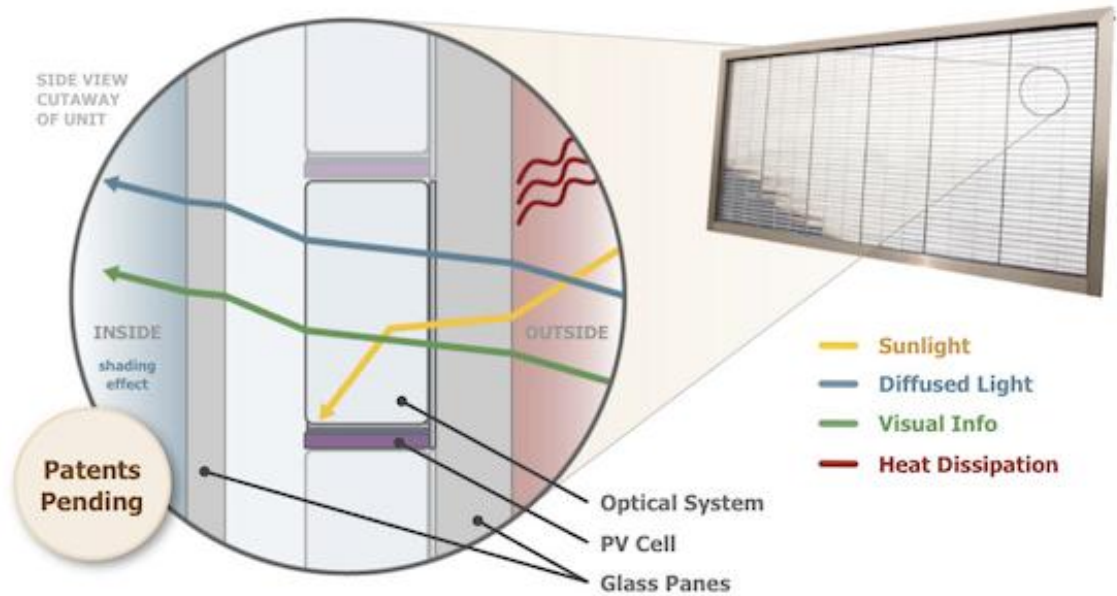
Tällä hetkellä yksi nopeasti kehittyvistä aurinkosähkön hyödyntämisen muodoista on rakennuksiin integroidut aurinkosähköjärjestelmät (Building Integrated Photovoltaic, BIPV). Ajatuksena on korvata osa normaaleista rakennusmateriaaleista aurinkopaneelilla. Aurinkopaneelit voivat korvata esimerkiksi kattotiilet, ulkoseinäateriaalit, parvekkeiteet, katokset tai jopa ikkunat (kuva 34).



Kuva 34. BIPV-ratkaisuja.

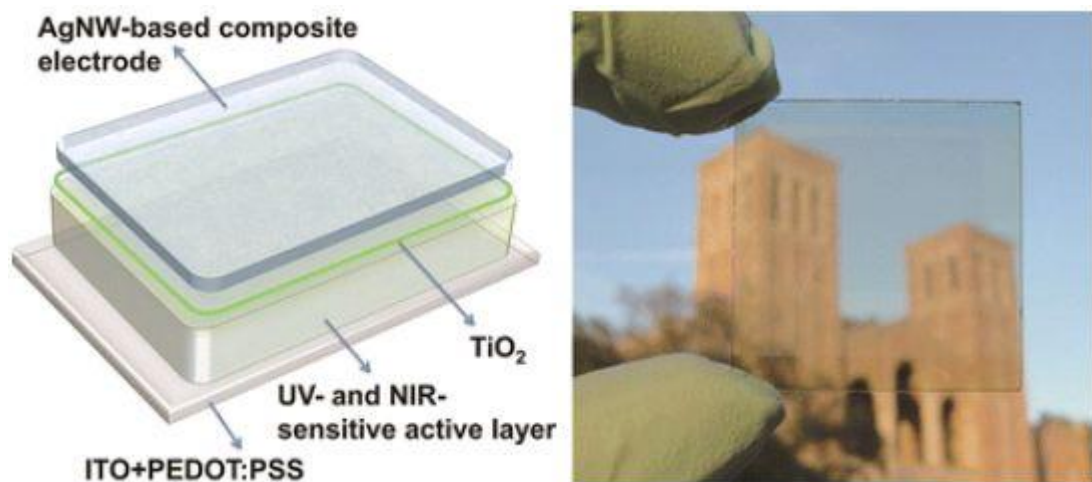
Rakennusten julkisivuilla voidaan käyttää lasipintoihin integroitua aurinkopaneeleja. Ohutkalvomateriaaleihin perustuvien kennojen muoto ja väri on lähes rajattomasti valittavissa. [13, s. 201.] ”Julkisivujen valjastaminen aurinkosähkön tuotantoon on nyt helppoa ja tyylikästä” mainostaa esimerkiksi Ruukki. Ruukin aurinkoenergiajulkisivukasettiin yhdistettiin sekä lasi- että aurinkopaneeli. Tällainen ratkaisu on paljon esteettisempi kuin perinteinen alumiiniprofilielementti, joka kiinnitetään seinäpintaan. Samalla saadaan tietenkin aurinkosähköä rakennuksen tarpeisiin. Ruukin ratkaisussa käytetään ohutkalvotekniikkaan perustuvia aurinkopaneeleja. [59.]

Rakennusten ikkunat voidaan korvata aurinkoenergiaa keräävillä ikkunoilla. Kuvassa 35 on kuvattu tällaisen ikkunan rakenne. Siinä on ikkunalasin sisällä pieniä aurinkokennoja, joihin auringon säteily ohjataan. Ongelmana tällaisissa ratkaisuissa on se, että ikkunan läpinäkyvyys heikkenee.



Kuva 35. Aurinkosähköikkuna [60].

Aurinkoenergiaa keräävän ikkunan vaihtoehtoinen tekninen ratkaisu on läpinäkyvä polymeerikenko. Sen avulla on pystytty kehittämään lähes läpinäkyviä ratkaisuja, kuten kuvassa 36 nähdään. Tällaisia ratkaisuja ovat kehittäneet ainakin University Of California (UCLA) sekä Massachusetts Institute of Technology (MIT). Näiden polymeerikentöjen hyötysuhde on tällä hetkellä varsin vaatimaton noin 4 %. Tutkijoiden tavoitteena on saavuttaa noin 12 %:n hyötysuhde.



Kuva 36. Läpinäkyvä polymeerikenko [61].

Myös väriaineaurinkokennotekniikkaan (DSC) perustuvia ikkunaratkaisuja ollaan kehittämässä. Dyesol Inc on jo julkistanut ensimmäiset versiot tällaisista ikkunoista, mutta niitä ei ole vielä kaupallisesti saatavilla. [62.]

Sähköautojen määrä on vähitellen lisääntymässä, ja niiden yleisiä latauspisteitä tarvitaan yhä enemmän. Aurinkosähkö tulisikin valjastaa myös tähän käyttöön. Suomessa kesälomien aikaan ihmiset autoilevat paljon. Tällöin on yleensä myös aurinkoenergiaa saatavilla. Esimerkiksi ostoskeskusten pysäköintialueet ovat usein ainakin osittain katettuja. Tällaisissa katoksissa voitaisiin käyttää aurinkopaneeleja ja niihin liitettyjä latauspisteitä, kuten kuvassa 37.

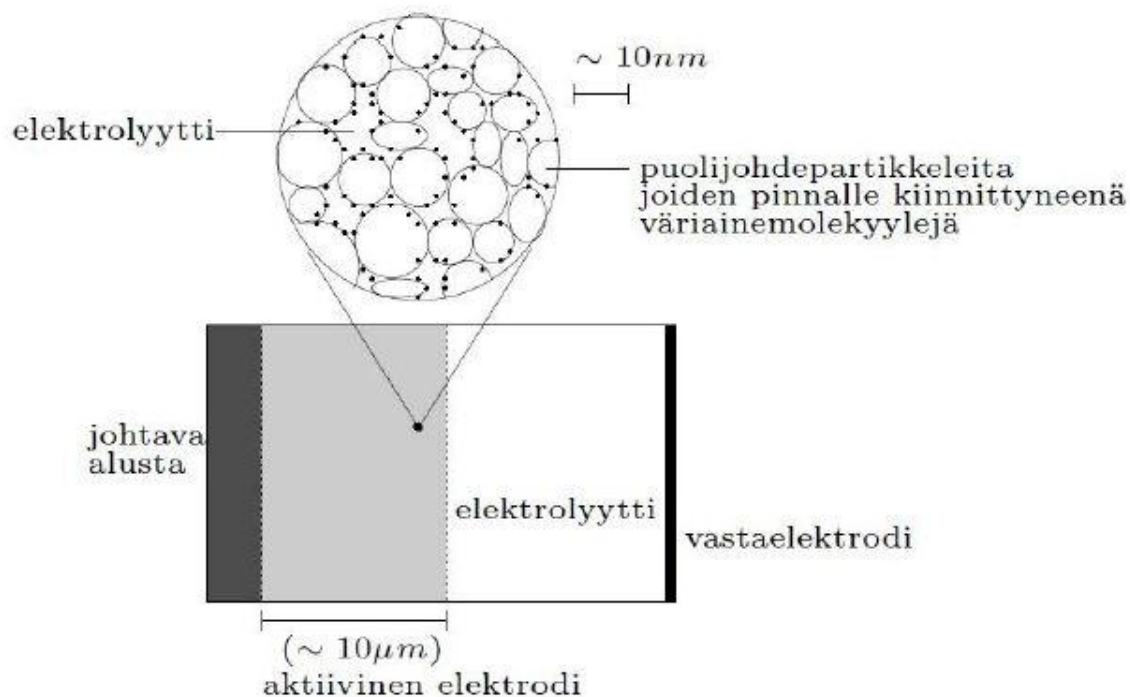


Kuva 37. Aurinkopaneeleista rakennettu autokatos.

7.3 Tuotekehitysnäkymiä

Väriainekenno (DSC) on ollut viime vuosina paljon esillä mediassa. DSC on lyhenne sanoista Dye Sensitized Solar Cell. Väriainekennoissa on neljä osaa. Sen ulkolaidoilla

ovat johtava alusta ja vastaelektrodi. Niiden välissä ovat aktiivinen elektrodi ja elektrolyytti, kuten kuvasta 38 nähdään. [63, s. 4.]



Kuva 38. Väriainekennon rakenne [63, s. 4.].

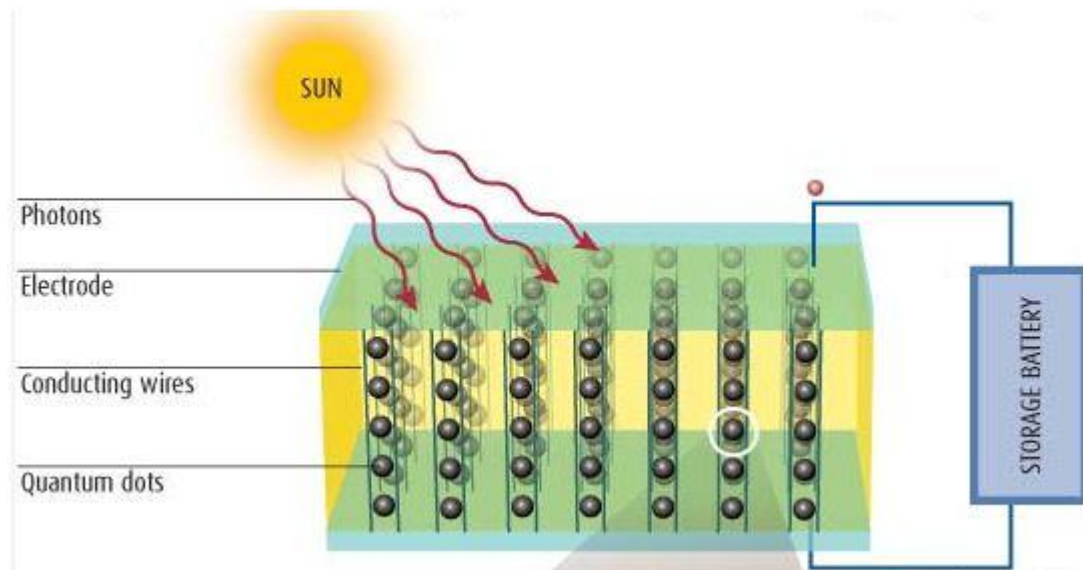
Kennon puolijohde on nanopartikkelimuodossa. Näiden puolijohdepartikkelien pinnalle on kiinnittynyt väriainemolekyylejä ja nestemäinen elektrolyytti on nanopartikkeliverkoston huokosissa. Väriaineaurinkokennon toiminta perustuu kemiallisiin hapettumis- ja pelkistymisreaktioihin. Fotonien absorptio tapahtuu väriainemolekyyleissä. Tällöin elektroni irtoaa väriainemolekyylistä ja siirtyy nanopartikkeliverkostoa pitkin johtavaan alustaan ja edelleen sen kautta ulkoiseen sähköpiiriin. Vastaelektrodilta kennon palautuvat elektronit siirtyvät elektrolyyttiin ja sen kautta väriainemolekyyleihin. Elektrolyytissä tapahtuu jatkuva hapettumis-pelkistymisreaktio. Elektrolyytti siis hapettuu sen reagoiessa väriaineeseen, josta on irronnut elektroni ja toisaalta pelkistyy kun uusia elektroneja saapuu vastaelektrodilta. Koska väriainekennon toiminta perustuu kemiallisiin reaktioihin, on haasteena saada kennon sisällä olevien aineiden kemiallinen koostumus pysymään muuttumattomana vuodesta toiseen. Laboratorio-olosuhteissa DSC-kennon hyötysuhteeksi on saatu enimmillään noin 11 %. Tällaisten kennojen valmistuskustannukset ovat kuitenkin suhteellisen alhaiset verrattuna perinteisiin aurinkokennoihin, joten tuotetun tehon hinta (W/euro) on melko kilpailukykyinen. Nykyisten DSC-kennojen käyttöä arvioidaan olevan noin kymmenen vuotta. [63, s. 12; 64.]

Orgaaniset aurinkokennot (OPVC) rakentuvat valoa läpäisevien elektrodien väliin asennetuista polymeerisistä ohutkalvoista. Tällaiset kennot ovat keveitä ja joustavia. Orgaanisten kennojen valmistaminen on huomattavasti halvempaa kuin perinteisten piikennojen. Hyötysuhteeltaan nämä kennot kuitenkin jäävät reilusti jälkeen piikennoista. Orgaanisten aurinkokennojen hyötysuhteen maailmanennätys on ainoastaan 8,3 %. [65; 66.]

Amerikkalainen National Renewable Energy Laboratory (NREL) tekee merkittävää aurinkoenergian hyödyntämiseen liittyvää tutkimustyötä. Yhdessä Natcore-nimisen yrityksen kanssa he ovat kehittäneet niin sanotun mustan aurinkokennon. Nimi johtuu siitä, että aurinkokennon pinnoite muuttaa sen näyttämään täysin mustalta, kun yleensä kennot ovat tummansinisiä. Tämän uuden pinnoitteen avulla saadaan lähes kaikki säteily absorboitua aurinkokennoon. Tavalliset kennot absorboivat noin 90–95 % säteilyä. [67.]

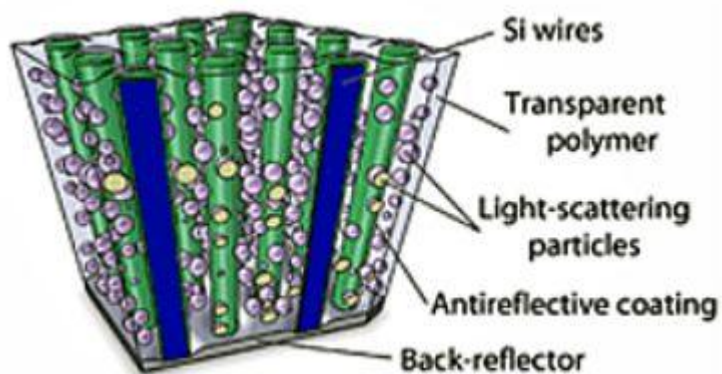
NREL tekee yhteistyötä New Energy Technologies-nimisen yrityksen kanssa kehittäessään BIPV-sovellutuksia rakennusten ikkunoiksi. Tutkijoiden mukaan kehitystyön tuloksena on syntynyt täysin läpinäkyvä ikkunarakenne, jolla pystytään keräämään aurinkoenergiaa. [68.]

Yksi mielenkiintoisimmista tutkimuskohteista on niin sanottu kvanttipistearinkokenno (Quantum Dot Solar Cell). Kvanttipistekkenno rakentuu nimensä mukaisesti kvanttipisteistä. Kvanttipisteet ovat pallomaisia puolijohderakenteita, läpimitaltaan vain muutamia nanometrejä. Jotta kokoluokan ymmärtäisi paremmin, on sitä hyvä verrata johonkin konkreettiseen esineeseen, esimerkiksi hiukseen, jonka paksuus on noin 50 000 nanometriä. Kvanttipisteistä voidaan tehdä erikokoisia ja näin säädellä energiatilojen energiaeroja. Näin pystytään hyödyntämään suurempi- tai pienempienergisiä fotoneja. UV- ja infrapunasäteilyn hyödyntäminen lisää huomasti kennon käytettävyyttä. On myös pystytty todentamaan, että esimerkiksi lyijy-selenidikennossa voidaan yhdellä fotonilla saada vapautettua useita elektroneja. [69; 18, s. 22.] Kuvassa 39 on kvanttipistekennon periaatekuva.



Kuva 39. Kvanttipistekenno [70].

Professori Atwater tutkijaryhmineen on kehittänyt uuden piikennorakenteen. Siinä piistä valmistetut ohuet tikut on kiinnitetty joustavaan alustaan. Tutkijat itse kutsuvat tätä nimellä "Silicon Wire PV Cell". Tällainen kenno näyttää mikroskooppisen pieneltä harjalta, kuten kuvassa 40 näkyy. Tähän uudentyyppiseen rakenteeseen tarvitaan kallista piitä vain 1–2 % siitä määrästä, mitä perinteiseen piikennoon tarvitaan. Tästä piin vähyydestä voisi kuvitella, että myös hyötysuhde olisi huono. Professori Atwaterin mukaan näin ei kuitenkaan ole. Kennon rakenteesta johtuen fotonit, jotka eivät heti absorboitu, jatkavat matkaansa törmäillen heijastaviin pintoihin kennon sisällä ja vähitellen absorboituvat. Näin pystytään hyödyntämään lähes koko kennoon tuleva säteily. [71.]



Kuva 40. Silicon Wire PV Cell [71].

Professori Kamal Alamehin ryhmä Australiassa on kehittänyt täysin läpinäkyvän BIPV-ikkunan. Professori Alameh sanoo, että he ovat onnistuneet valjastamaan nanopartik-

keleiden optiset ominaisuudet aurinkosähkön tuotannossa. Tällaisessa ikkunassa he käyttävät nanopartikkelikerrosta, jonka näkyvä valo läpäisee, mutta UV- ja infrapunasäteily ei läpäise. Näiden kahden säteilyn energia ohjataan lasin reunoille, jossa aurinkokennot sijaitsevat. [72.]

Kaikki uudet innovaatiot eivät liity pelkästään erityyppisten aurinkokennojen kehittämiseen. Hyvä esimerkki uudelta ajattelulta on aurinkopaneelien automaattinen puhdistusjärjestelmä, joka kehitettiin alun perin avaruustutkimusta varten. Nykyään vastaava tekniikka on otettu käyttöön esimerkiksi muutamissa hiekka-aavikoilla toimivissa aurinkopuistoissa. Järjestelmä toimii hyvin pienellä energialla, joka otetaan kyseisestä aurinkosähköjärjestelmästä. [73.]

EU tukee monia aurinkoenergian hyödyntämiseen liittyviä projekteja. Suoraan aurinkosähkön hyödyntämiseen liittyviä projekteja on tuettu vuodesta 2002 lähtien. Rahalliselta arvoltaan tuki on ollut noin 110 MEUR. [74.] Luettelo tällä hetkellä käynnissä olevista projekteista löytyy Euroopan Komission verkkosivulta [75]. USA:ssa vastaavanlaisia tutkimustyön koordinoitua hoitaa U.S. Department of Energy. Heilläkin on menossa suuri määrä erilaisia aurinkoenergian hyödyntämiseen liittyviä tutkimusprojekteja. [76.]

8 Yhteenveto

Aurinkosähköjärjestelmien kehitys etenee tällä hetkellä erittäin nopeasti. Esimerkiksi Euroopassa, USA:ssa ja Kiinassa tehdään erittäin paljon tutkimustyötä. Jatkuvasti etsitään uusia aurinkokennoteknologioita, joista hyvänä esimerkkinä ovat väriaineherkistetyt DSC-aurinkokenno ja kvanttipistekenno. Tulevaisuuden näkymät tällä alueella ovatkin todella hyvät. Ensimmäisen- ja toisen sukupolven kennoja kehitetään edelleen hyötysuhteen parantamiseksi ja kennojen tuotantoteknisiä ratkaisuja parannetaan valmistuskustannusten minimoimiseksi.

Monet erilaiset rakennuksiin integroitavat aurinkosähköjärjestelmät ovat saavuttamassa yhä suurempaa suosiota. Yksi syy tähän on uusien materiaalien mukanaan tuoma monipuolisuus, joustavuus ja esteettisyys. Laitteet eivät ole enää pelkästään ankeita levyjä, jotka on kiinnitetty rakennuksen katolle. Nyt on saatavilla monia erivärisiä aurinkopaneeleja ja löytyy joustavia ohutkalvopaneeleita, joita voidaan asentaa kaareville pin-

noille. Perinteisten ikkunoiden tilalle voidaan asentaa aurinkosähköä kerääviä lasipintoja, joista näkee läpi yhtä hyvin kuin normaalistakin ikkunasta.

Suuret aurinkosähköpuistot tulevat olemaan tärkeässä roolissa tulevaisuudessa uusiutuvan energian lähteenä. Tutkimustyö keskittävien järjestelmien osalta on käynnissä monissa tutkimuslaitoksissa joka puolella maailmaa, ja uusia järjestelmien hyötysuhdetta parantavia ratkaisuja otetaan käyttöön jatkuvasti.

Onko Suomessa kuitenkaan järkevää panostaa aurinkoenergian käyttöön? Valtio ei sitä tue ainakaan tällä hetkellä. Käytännössä asuntojen aurinkoenergiajärjestelmien asennuksiin ei ole saatavilla minkäänlaista tukea. Suomessa ei ole myöskään syöttötariffijärjestelmää aurinkoenergialle. Useissa muissa maissa syöttötariffijärjestelmä toimii, esimerkiksi Saksassa. Saksa onkin maailman ykkösmaa aurinkoenergian hyödyntämisessä. Suomessa monilla yksityishenkilöillä ja yrityksillä olisi kiinnostusta aurinkoenergian hyödyntämiseen, mutta ilman ulkopuolista tukea järjestelmien asennukset etenevät hitaasti. Suomessa tuetaan tuulienergiaa, jonka hyödyntäminen pienessä mittakaavassa on lähes mahdotonta. Aurinkoenergian hyödyntäminen taas onnistuu erinomaisesti. Tällaiset pienet ympäristöystävälliset teot olisivatkin tärkeitä askeleita kohti hiilidioksidipäästöjen vähentämistä ja uusiutuvien energiamuotojen käyttöä. Auringosta maapalolle saapuva energia on sekä ilmaista että puhdasta, ja sitä pitäisi riittää vielä noin viideksi miljardiksi vuodeksi.

Aurinkoenergian hyödyntämiseen tulee panostaa myös Suomessa, vaikka vallalla tunnetaan olevan käsitys, että Suomessa ei kannata yrittää hyödyntää aurinkoenergiaa. Kuitenkin nykyaikaiset järjestelmät mahdollistavat hyvin suunniteltuina ja toteutettuina toimivia ja kustannustehokkaita ratkaisuja. Maailmanlaajuisesti tarkasteltuna odotukset aurinkoenergian hyödyntämiseen ovat suuret. Aika näyttää sen, missä määrin tämän päivän visiot ja tulevaisuuden todellisuus kohtaavat. Metropolia Ammattikorkeakoulun aurinkoenergiaprojektin avulla voidaan osaltaan edesauttaa visioiden saavuttamista tuottamalla tutkittua tietoa ja toimivia käytäntöjä.

Lähteet

- 1 Sähkömarkkinavisio 2030. 2011. Verkkodokumentti. Energiategollisuus. <<http://energia.fi/kalvosarjat/sahkomarkkinavisio-2030-esittelykalvot-pitkasarja>>. Päivitetty 31.8.2011. Luettu 1.8.2012.
- 2 Trends Report 2010. 2011. Verkkodokumentti. International Energy Agency. <<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=92#c145>>. Päivitetty 9.11.2011. Luettu 1.8.2012.
- 3 Gujarat Solar Park: Asia's largest solar power park opens. 2012. Verkkodokumentti. The Economic Times. <http://articles.economictimes.indiatimes.com/2012-04-19/news/31367545_1_gujarat-solar-park-solar-project-solar-power-policy>. Päivitetty 19.4.2012. Luettu 1.10.2012.
- 4 Energy industry guides; Inverter and PV System Technology. 2012. Verkkodokumentti. Renewables Insight. <http://www.pv-system-tech.com/fileadmin/user_upload/material2012/InSyst2012_Screen.pdf>. 2012. Luettu 10.8.2012.
- 5 8 Good Reasons Why Monocrystalline Solar Panels are the Industry Standard. 2012. Verkkodokumentti. Solar facts and advice. <<http://www.solar-facts-and-advice.com/monocrystalline.html>>. Luettu 20.7.2012.
- 6 Chinese banks to take 18,5% stake in LDK polysilicon unit. 2011. Verkkodokumentti. Recharge. <http://www.rechargenews.com/business_area/finance/article240518.ece>. Päivitetty 3.1.2011. Luettu 25.7.2012.
- 7 Billion Dollar Poly-silicon Manufacturing Plant To Be Build In Qatar. 2011. Verkkodokumentti. DIY Solar Power. <<http://solarpowerdiy.info/new-billion-dollar-poly-silicon-manufacturing-plant-to-be-built-in-qatar/>>. Päivitetty 12.10.2011. Luettu 5.9.2012.
- 8 Montonen, Juho. 2011. Aurinkosähkötekniikan tilannekatsaus. Kandidaatintyö. Lappeenranta University of Technology.
- 9 The competition between solar and nuclear energy moves to Mars. 2011. Verkkodokumentti. Green. <<http://green.blogs.nytimes.com/2011/11/23/the-competition-between-solar-and-nuclear-energy-moves-to-mars/>>. Päivitetty 23.11.2011. Luettu 1.9.2012.
- 10 Aurinkopaneelin toimintaperiaate. 2010. Verkkodokumentti. Suntekno. <<http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki//paneelit.pdf>>. Päivitetty 15.4.2010. Luettu 27.7.2012.
- 11 Keskinen, Jarno. 2009. Sähköenergian tuotantoon soveltuvat aurinkokennoteknologiat ja niiden kehittyminen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- 12 Modernia fysiikkaa. Verkkodokumentti. Teknillinen korkeakoulu. <<http://tfy.tkk.fi/kurssit/Tfy-3.109/luennot/luento15.pdf>>. Luettu 3.9.2012.

- 13 Eicer Ursula. 2003. Solar technologies for buildings. Great Britain: Antony Rowe Ltd.
- 14 Erat Bruno. 2001. Aurinko-opas; Aurinkoenergiaa rakennuksiin. Helsinki: Kustantajat Sarmala Oy.
- 15 Aurinkosähkö. 2011. Verkkodokumentti. Tampereen teknillinen yliopisto. <<http://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/SMG-4450/2012/luento3.pdf>>. Päivitetty 21.9.2011. Luettu 28.7.2012.
- 16 Components and outputs. 2012. Verkkodokumentti. Solarbuzz. <<http://www.solarbuzz.com/going-solar/understanding/components-output>>. Luettu 20.7.2012.
- 17 Power per unit area. 2012. Verkkodokumentti. Onyx Solar. <<http://www.onyxsolar.com/power-per-unit-area.html>>. Luettu 10.9.2012.
- 18 Viitanen, Janne. 2010. Aurinkosähköjärjestelmän yhdistäminen LED-valaistukseen tasajännitteellä. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.
- 19 Batteries and Charge Control in Stand-alone Photovoltaic Systems. 1997. Verkkodokumentti. Sandia National Laboratories. <<http://www.localenergy.org/pdfs/Document%20Library/Fundamentals%20of%20batteries%20and%20charge%20control.pdf>>. Päivitetty 15.1.1997. Luettu 4.9.2012.
- 20 Aurinkoenergiaopas. Verkkodokumentti. Eurosolar. <<http://www.eurosolar.fi/aurinkoenergiaopas/7s.pdf>>. Luettu 20.7.2012.
- 21 Lataussäätimet. 2012. Verkkodokumentti. Akkupojat. <<http://www.akkupojat.fi/index.php/site/aurinkopaneelit/lataussaeatimet>>. Luettu 20.7.2012.
- 22 Akut. 2012. Verkkodokumentti. Akkupojat. <<http://www.akkupojat.fi/index.php/site/aurinkopaneelit/akut-3>>. Luettu 21.7.2012.
- 23 Aurinkoenergiaopas. Verkkodokumentti. Eurosolar. <<http://www.eurosolar.fi/aurinkoenergiaopas/6s.pdf>>. Luettu 1.8.2012.
- 24 Lightning and surge protection for PV systems and solar power plants. Verkkodokumentti. Dehn. <http://www.dehn.de/pdf/blitzplaner/Chapters/BBP_E_Chapter_09_18.pdf>. Luettu 18.10.2012.
- 25 Lataussäätimet. 2012. Verkkodokumentti. Suntekno. <<http://suntekno.bonsait.fi/fi/page/33>>. Luettu 2.8.2012.
- 26 Aurinkosähköjärjestelmien (PV) pienjännitetuotteet – suojaus. 2012. Verkkodokumentti. ABB. <<http://www.abb.com/industries/ap/db0003db002813/3fcbe6b29020afd6c12579b4003e922d.aspx%5D>>. Luettu 1.10.2012.

- 27 Mikrotuotannon liittäminen yleiseen sähköjakeluverkkoon. 2009. Verkkodokumentti. Teknillinen korkeakoulu. <<http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100081.pdf>>. Päivitetty 1.10.2009. Luettu 1.10.2012.
- 28 PV Power Plants 2012. Verkkodokumentti. <<http://www.pv-power-plants.com/industry/technology/>>. Luettu 1.10.2012.
- 29 Laitinen Jussi. 2010. Pieni suuri energiakirja. Tallinna: Kolofon Baltic.
- 30 Solar energy guide. Verkkodokumentti. Kipp & Zonen. <<http://www.kippzonen.com/energy>>. Luettu 29.7.2012.
- 31 Säteilymäärät. 2012. Verkkodokumentti. Suntekno. <<http://suntekno.bonsait.fi/fi/page/22>>. Luettu 22.8.2012.
- 32 Aurinkosähkö. 2011. Verkkodokumentti. Tampereen teknillinen yliopisto. <<http://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/SMG-4450/2012/luento1.pdf>>. Päivitetty 31.8.2011. Luettu 28.7.2012.
- 33 Šúri M., Huld T.A., Dunlop E.D. Ossenbrink H.A., 2008. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. Verkkodokumentti. <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>>. Päivitetty 20.11.2008. Luettu 1.9.2012.
- 34 SAPA Building Systems. 2012. Verkkodokumentti. SAPA. <<http://www.sapagroup.com/fi/company-sites/sapa-building-system-ab/sapa-rakennusjarjestelmat/broschyter/sapa-solar-bipv1/>>. Luettu 2.10.2012.
- 35 Testing Guidelines for PV Power Measurement in Industry. 2010. Verkkodokumentti. European Commission Joint Research Centre. <<http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/15103/1/eur-24359-en.pdf>>. Luettu 28.8.2012.
- 36 European Solar Test Installation. 2012. Verkkodokumentti. European Commission Joint Research Centre. <http://re.jrc.ec.europa.eu/esti/index_en.htm>. Päivitetty 2.2.2012. Luettu 3.9.2012.
- 37 Tanninen, Ari. 2009. Aurinkopaneelien testausjärjestelmä. Opinnäytetyö. Savonia ammattikorkeakoulu.
- 38 Sunny Explorer. Verkkodokumentti. SMA. <<http://www.sma.de/en/products/monitoring-systems/sunny-explorer.html>>. Luettu 23.9.2012.
- 39 Solar Simulators. 2012. Verkkodokumentti. Newport. <<http://www.newport.com/Oriel-Sol3A-Class-AAA-Solar-Simulators/842468/1033/info.aspx>>. Luettu 2.10.2012.
- 40 Global Market Outlook for Photovoltaics until 2015. 2012. Verkkodokumentti. European Photovoltaic Industry Association. <http://www.epia.org/index.php?eID=tx_nawsecured1&u=0&file=fileadmin/EPIA_docs/publications/epia/EPIA-Global-Market-Outlook-for-Photovoltaics-until-

- 2015.pdf&t=1351064832&hash=67d19252f267025b233e3858a26cf256>. Luettu 1.10.2012.
- 41 Solar Market Research and Analysis. 2012. Verkkodokumentti. Solarbuzz. <<http://www.solarbuzz.com/>>. Luettu 27.7.2012.
 - 42 China to invest US\$ 39.5 billion in PV during 2011-15. 2012. Verkkodokumentti. PCTECH. <http://www.pv-tech.org/news/china_to_invest_us39.5_billion_in_pv_during_2011_15>. Päivitetty 17.9.2012. Luettu 1.10.2012.
 - 43 Performance of photovoltaics (PV) in Germany. Verkkodokumentti. SMA. <<http://www.sma.de/en/company/pv-electricity-produced-in-germany.html>>. Luettu 1.9.2012.
 - 44 Statistic reports. 2012. Verkkodokumentti. International Energy Agency. <<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=92#c145>>. Luettu 20.8.2012.
 - 45 PV power plants 2012; Industry guide. 2012. Verkkodokumentti. <<http://www.pv-power-plants.com/index.php?id=1115>>. Luettu 2.10.2012.
 - 46 Global Market Outlook for Photovoltaics Until 2016. 2012. Verkkodokumentti. European Photovoltaic Industry Association. <<http://files.epia.org/files/Global-Market-Outlook-2016.pdf>>. Luettu 1.10.2012.
 - 47 Photovoltaics analysts. 2011. Verkkodokumentti. IHS iSupply. <<http://www.isuppli.com/Photovoltaics/Pages/Analysts.aspx>>. Luettu 1.9.2012.
 - 48 World Solar PV Market Grew Considerably in 2011. 2012. Verkkodokumentti. Clean Technica. <<http://cleantechnica.com/2012/03/19/worldwide-solar-pv-market-grew-in-2011/>>. Päivitetty 19.3.2012. Luettu 1.9.2012.
 - 49 Asia's share of PV cell production to reach 85% in 2011. 2011. Verkkodokumentti. SEMI. <<http://www.semi.org/en/node/38346?id=sgurow0811>>. Päivitetty 2.8.2011. Luettu 1.8.2012.
 - 50 Crystalline silicon solar cells. 2012. Verkkodokumentti. Koyo Thermo Systems. <<http://www.crystec.com/klldope.htm>>. Luettu 1.9.2012.
 - 51 Aurinkosähkö. 2011. Verkkodokumentti. Tampereen teknillinen yliopisto. <<http://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/SMG-4450/2012/luento8.pdf>>. Päivitetty 12.10.2011. Luettu 28.7.2012.
 - 52 Module Pricing. 2012. Verkkodokumentti. Solarbuzz. <<http://www.solarbuzz.com/facts-and-figures/retail-price-environment/module-prices>>. Luettu 2.8.2012.
 - 53 PV today...and in the future. Verkkodokumentti. Applied Solar Expertice. <http://www.tekes.fi/fi/gateway/PTARGS_0_201_403_994_2095_43/http%3B/tekes-ali%3B7087/publishedcontent/publish/programmes/groove/documents/seminaa>

- riaineistot/aurinkoenergia_081211/081211_winfriedhoffmann.pdf>. Luettu 20.8.2012.
- 54 Oportunities and Challenges for Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry. 2012. Verkkodokumentti. National Renewable Energy Laboratory. <<http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/43208.pdf>>. Luettu 25.7.2012.
- 55 SCHOTT Solar Memorandum on Concentrated Solar Power Plant Technology. Verkkodokumentti. SCHOTT Solar. <http://www.schott.com/newzealand/english/download/schott_solar_csp_memorandum_en_medium_resolution.pdf>. Luettu 1.8.2012.
- 56 Concentrating Solar Power Research. 2012. Verkkodokumentti. National Renewable Energy Laboratory. <<http://www.nrel.gov/csp/>>. Luettu 8.8.2012.
- 57 CPV Technology. 2012. Verkkodokumentti. Amonix. <<http://amonix.com/content/seven-generations>>. Luettu 8.8.2012.
- 58 Concentrated solarpower could generate quarter of world's energy. 2009. Verkkodokumentti. The Guardian. <<http://www.guardian.co.uk/environment/2009/may/26/solarpower-renewableenergy>>. Päivitetty 26.5.2009. Luettu 20.7.2012.
- 59 Aurinkosähköä vaivattomasti ja edullisesti. 2011. Verkkodokumentti. Ruukki. <<http://www.ruukki.fi/Uutiset-ja-tapahtumat/Uutisarkisto/2011/Inline-Aurinkosahkoa-vaivattomasti-ja-edustavasti>>. Päivitetty 4.3.2011. Luettu 20.7.2012.
- 60 Reinventing Building Integrated Photovoltaics. Verkkodokumentti. Pythagoras Solar. <<http://www.pythagoras-solar.com/technology-solutions/technology-overview-energy-efficient-windows/>>. Luettu 20.7.2012.
- 61 UCLA researchers create highly transparent solar cells for windows that generate electricity. 2012. Verkkodokumentti. University of California UCLA. <<http://newsroom.ucla.edu/portal/ucla/ucla-researchers-create-highly-236698.aspx>>. Päivitetty 20.7.2012. Luettu 27.7.2012.
- 62 Dyesol builds large BIPV modules, installs DSC windows in Korea. 2012. Verkkodokumentti. Solar Server. <<http://www.solarserver.com/solar-magazine/solar-news/current/2012/kw12/dyesol-builds-large-bipv-modules-installs-dsc-windows-in-korea.html>>. Päivitetty 24.3.2012. Luettu 5.10.2012.
- 63 Aurinkosähkö. 2011. Verkkodokumentti. Tampereen teknillinen yliopisto. <<http://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/SMG-4450/2012/luento4.pdf>>. Päivitetty 27.9.2011. Luettu 2.10.2012.
- 64 Dyesol Product Catalogue. 2012. Verkkodokumentti. Dyesol. <www.dyesol.com>. Luettu 28.9.2012.
- 65 Orgaaniset aurinkokennot kiinnostavat tutkijoita. 2007. Verkkodokumentti. Tekniikka & Talous. <<http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article25929.ece>>. Päivitetty 19.4.2007. Luettu 28.9.2012.

- 66 Organic Photovoltaics. Verkkodokumentti. Fraunhofer. <<http://www.comedd.fraunhofer.de/en/applications/photovoltaics.html>>. Luettu 28.9.2012.
- 67 Black Solar Cell Produces More Power. 2012. Verkkodokumentti. Solar facts and advice. <<http://www.solar-facts-and-advice.com/black-solar-cell.html>>. Luettu 20.8.2012.
- 68 BIPV Breakthrough: 'Invisible Wires' Transport Electricity on Glass Windows. 2012. Verkkodokumentti. Solar Novus Today. <http://www.solarnovus.com/index.php?option=com_content&view=article&id=4617:bipv-breakthrough-invisible-wires-transport-electricity-on-glass-windows&catid=52:applications-tech-research&Itemid=247>. Päivitetty 28.3.2012. Luettu 15.9.2012.
- 69 Two for one: Quantum dot solar cells boost power. 2011. Verkkodokumentti. CNET. <http://news.cnet.com/8301-11386_3-57344421-76/two-for-one-quantum-dot-solar-cells-boost-power/>. Päivitetty 17.12.2011. Luettu 16.9.2012.
- 70 Self Powered Laser Pistol Revolutionizes Warfare. 2011. Verkkodokumentti. Nerd Trek. <<http://nerdtrek.com/self-powered-laser-pistol-revolutionizes-warfare/>>. Päivitetty 17.6.2011. Luettu 15.9.2012.
- 71 Integrated Photovoltaics – A New Future for Silicon Solar Cells. 2012. Verkkodokumentti. Solar facts and advice. <<http://www.solar-facts-and-advice.com/integrated-photovoltaics.html>>. Luettu 14.9.2012.
- 72 Solar windows could cut building energy use by half. 2012. Verkkodokumentti. Reneweconomy. <<http://reneweconomy.com.au/2012/solar-windows-could-cut-building-energy-use-by-half-96073>>. Päivitetty 26.3.2012. Luettu 22.9.2012.
- 73 Self-Cleaning Technology from Mars Can Keep Terrestrial Solar Panels Dust Free. 2010. Verkkodokumentti. Science Daily. <<http://www.sciencedaily.com/releases/2010/08/100822150641.htm>>. Päivitetty 23.8.2010. Luettu 22.9.2012.
- 74 EU support for photovoltaics. 2010. Verkkodokumentti. European Commission. <http://ec.europa.eu/research/energy/eu/research/photovoltaics/support/index_en.htm>. Luettu 23.9.2012.
- 75 Projects. Verkkodokumentti. European Commission. <http://ec.europa.eu/research/energy/eu/projects/index_en.cfm#results>. Luettu 23.9.2012.
- 76 Program Review Meeting. 2010. Verkkodokumentti. U.S. Department of Energy. <http://www1.eere.energy.gov/solar/review_meeting/program_review_meeting_2010.html>. Luettu 23.9.2012.
- 77 Large-scale photovoltaic power plants. 2012. Verkkodokumentti. PVRESOURCES. <<http://www.pvresources.com/PVPowerPlants/Top50.aspx>>. Päivitetty 30.9.2012. Luettu 18.10.2012.

Maakohtaisia aurinkosähköjärjestelmien asennusmääriä [40, s. 41].

Country	Scenario	2006	2007	2008	2009	2010	2011	a2012	2013	2014	2015
EU											
Austria	Moderate Policy-Driven	26	28	33	53	103	160 180	220 280	300 410	400 570	520 770
Belgium	Moderate Policy-Driven	4	23	94	379	803	1,000 1,100	1,200 1,425	1,520 1,775	1,870 2,175	2,270 2,675
Bulgaria	Moderate Policy-Driven	0	0	1	7	18	120 170	220 370	320 620	445 920	595 1,320
Czech Republic	Moderate Policy-Driven	1	4	65	463	1,953	2,100 2,200	2,250 2,550	2,450 2,950	2,650 3,400	2,850 3,900
France	Moderate Policy-Driven	30	41	87	306	1,025	2,000 2,300	2,600 3,100	3,100 4,600	3,600 6,600	4,100 9,100
Germany	Moderate Policy-Driven	2,899	4,170	5,979	9,785	17,193	20,200 22,200	23,200 27,200	26,200 32,200	29,200 37,200	32,200 42,200
Greece	Moderate Policy-Driven	7	9	20	56	206	360 460	535 760	735 1,110	960 1,510	1,210 1,960
Italy	Moderate Policy-Driven	47	117	456	1,173	3,494	6,500 8,500	8,000 11,500	9,500 16,500	11,000 21,500	13,000 26,500
Portugal	Moderate Policy-Driven	3	15	59	114	130	230 280	330 430	480 630	630 880	780 1,180
Slovakia	Moderate Policy-Driven	0	0	0	0	145	350 450	400 550	470 750	570 1,050	770 1,450
Spain	Moderate Policy-Driven	148	690	3,398	3,415	3,784	4,200 4,300	4,700 4,900	5,200 5,600	5,700 6,450	6,200 7,450
United Kingdom	Moderate Policy-Driven	1	5	11	21	66	180 370	400 770	770 1,520	1,275 3,020	1,975 5,020
Rest of the EU	Moderate Policy-Driven	141	155	185	235	333	480 580	780 1,100	1,200 1,800	1,800 2,800	2,600 4,100
Total	Moderate Policy-Driven	3,307	5,257	10,387	16,006	29,252	37,880 43,090	44,835 54,935	52,245 70,465	60,100 88,075	69,070 107,625
ASIA PACIFIC											
Australia	Moderate Policy-Driven	75	87	105	184	504	600 750	850 1,250	1,200 1,850	1,700 2,550	2,275 3,350
China	Moderate Policy-Driven	80	100	145	373	893	1,600 1,900	3,100 3,900	5,100 6,900	7,600 11,400	10,600 18,400
Japan	Moderate Policy-Driven	1,708	1,919	2,149	2,632	3,622	4,700 4,900	5,950 6,400	7,450 8,150	9,200 10,150	11,200 12,650
South Korea	Moderate Policy-Driven	36	81	357	524	655	760 810	980 1,110	1,220 1,430	1,480 1,770	1,760 2,130
Taiwan	Moderate Policy-Driven	2	4	6	12	24	40 40	60 70	100 130	170 250	300 490
Total	Moderate Policy-Driven	1,901	2,191	2,761	3,725	5,698	7,700 8,400	10,940 12,730	15,070 18,460	20,150 26,120	26,135 37,020
NORTH AMERICA											
USA	Moderate Policy-Driven	624	831	1,173	1,650	2,528	4,000 5,500	7,000 9,500	11,000 15,500	16,000 22,500	22,000 31,500
Canada	Moderate Policy-Driven	21	26	33	95	200	450 700	800 1,400	1,200 2,200	1,650 3,100	2,150 4,100
Total	Moderate Policy-Driven	645	856	1,205	1,744	2,727	4,450 6,200	7,800 10,900	12,200 17,700	17,650 25,600	24,150 35,600
REST OF THE WORLD											
Total	Moderate Policy-Driven	1,127	1,188	1,303	1,427	1,854	2,900 3,100	4,600 5,400	6,900 8,700	9,400 12,200	11,900 15,700
TOTAL WORLD	Moderate Policy-Driven	6,980	9,492	15,657	22,902	39,531	52,930 60,790	68,175 83,965	86,415 115,325	107,300 151,995	131,255 195,945

Kymmenen suurinta PV-aurinkosähköpuistoa [77].

NIMI	MAA	MÄÄRÄ (MW)	KÄYTTÖÖN
Agua Caliente Solar Project	USA	250	2012
Charanka Park	Intia	214	2012
Perovo I-V	Ukraina	100	2011
Sarnia	Kanada	97	2009-2010
Solarpark Briest	Saksa	91	2011
Solarpark FinowTower I,II	Saksa	84,7	2010
Montalto di Castro	Italia	84,2	2009-2010
Solarpark Senftenberg II,III	Saksa	82	2011
Solarpark Finsterwalde I,II,III	Saksa	80,245	2009-2010
Solarpark Eggebek	Saksa	80	2011