

Jussi Åman

Aurinkoenergian mahdollisuudet Suomessa syys-, talvi- ja kevätolosuhteissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

7.3.2015

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Jussi Åman Aurinkoenergian mahdollisuudet Suomessa syys-, talvi- ja kevätolosuhteissa 54 sivua + 2 liitettä 7.3.2015
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	yliopettaja Jukka Yrjölä projekti-insinööri Harri Hahkala
<p>Insinööriyössä oli tavoitteena tutkia aurinkosähköenergian tuotantoon vaikuttavia asioita Suomessa syys-, talvi- ja kevätaikaan sekä selvittää, millä keinoilla tuotantoa olisi mahdollista parantaa. Raportti pohjautuu osittain työskentelyyn Metropolian Ammattikorkeakoulu Oy:n Leppävaaran toimipisteeseen toteutetun MetroSol-aurinkoenergielaboratorion rakentamis- ja käyttöönottovaiheissa sekä RYM Oy:n Sisäympäristötutkimusohjelman Metropolian Ammattikorkeakoulun osuudessa tekijän saavuttamiin tutkimustuloksiin.</p> <p>Projekti aloitettiin kirjallisuusselvityksillä, minkä jälkeen analysoitiin, laskettiin sekä vertailtiin erilaisia tilanteita aurinkosähköntuottoon talviolosuhteissa. Työssä hyödynnetyt mittaustulokset ja analysoinnit on osittain saatu Metrosol-laboratoriossa. Työssä käytettiin myös useita aurinkoenergian verkkopohjaisia laskentaohjelmia.</p> <p>Insinööriyö lisäsi tietoa aurinkosähköenergian tuotannon mahdollisuuksista Suomessa talviaikana. Tehostamiskeinoja ovat mm. aurinkopaneelien kallistuskulmien jyrkentäminen talvikuukausien ajaksi sekä aurinkosähköjärjestelmien suunnittelun aikana huomioitavat asiat, kuten paneelien sijainti ja varjostukset. Pinnoitemateriaalien kehittyminen tarjoaa lupaavia näkymiä, mutta toistaiseksi paneelien asentaminen riittävään kallistuskulmaan lienee käyttökelpoisin keino vähentää lumen tarttumista keräinpinnalle ja pysymistä siinä. Projektissa tehtyjen havaintojen ja selvityksen perusteella voidaan osoittaa, ettei Suomessa ole taloudellisesti kannattavaa panostaa aurinkosähköenergian talviaikaisen tuotannon tehostamiseen.</p> <p>Säteilymäärät talviaikaan ovat Suomessa pieniä ja aurinkotuntien määrä vähäinen, minkä vuoksi aurinkopaneelien talviaikaan tuottama lisäenergia jää vuotuisen tuotantoon nähden lähes olemattomaksi. Kokonaissäteilymäärät marraskuulta helmikuulle ovat Etelä-, Keski- ja Pohjois-Suomessa noin 5, 4 ja 2 % koko vuoden säteilystä ja vastaavat auringonpaistetunnit 176, 141 ja 44 tuntia. Keväällä maaliskuulta huntikuulle vastaavat arvot ovat 18, 19 ja 22 % sekä 313, 313 ja 284 tuntia.</p>	
Avainsanat	aurinkosähkö, aurinkopaneeli, auringonsäteily

Author Title	Jussi Åman Possibilities of Solar Energy in Finland during Winter Time
Number of Pages Date	54 pages + 2 appendices 7 March 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC engineering, Design Orientation
Instructors	Jukka Yrjölä, Principal Lecturer Harri Hakala, Project-engineer
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to find ways to improve the energy production of PV (photovoltaic) systems in Finland during autumn, winter and spring time. Another important goal was to determine all the key factors affecting the performance of PV systems.</p> <p>The project started with an extensive literary research on solar radiation, PV systems and Finnish weather conditions. Different analysis, calculations and measurements were made to compare tilt angles, irradiation values and snow conditions. Some of these measurements were based on the data collected from MetroSol solar research laboratory, others rely on various web based calculation programs.</p> <p>The research improves the knowledge about the PV systems' possibilities during the winter time. The production of solar energy can be increased by setting the solar panels to steeper tilt angles for the winter time and optimizing the location of the panels to avoid any possible shading.</p> <p>The project shows that the modifications made to the PV systems during the winter time have very little economical effect. While the study proves it is possible to improve the production of a PV system during winter time, the benefits are only minor due to low irradiation and short daylight hours.</p>	
Keywords	solar energy, solar panel, solar cell, solar irradiation

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Aurinkoenergia	2
2.1	Aurinko	2
2.2	Auringon kierto ja korkeus taivaalla	2
2.3	Auringon säteily	5
2.4	Auringon säteily Suomessa	8
2.5	Auringonvalon heijastuminen, taittuminen ja absorptio	13
3	Sääolot Suomessa	16
3.1	Auringonpaiste	16
3.2	Sään vaikutus auringonsäteilyyn	18
3.3	Lumen vaikutukset aurinkopaneeleihin	19
4	Aurinkosähkö	20
4.1	Aurinkopaneelit	22
4.1.1	Aurinkopaneelien toiminta	24
4.1.2	Aurinkopaneelin ominaiskäyrä	26
4.1.3	Aurinkopaneelien tuottama teho	27
4.1.4	Lämpötilan vaikutus paneelien tehon tuottoon	30
4.1.5	Aurinkopaneelin suuntauksen vaikutus tehontuottoon	31
4.2	Aurinkosähköjärjestelmät	33
4.3	Aurinkosähköjärjestelmien muut laitteet	34
4.3.1	Invertteri	34
4.3.2	Akusto	36
4.3.3	Lataussäädin	36
4.3.4	Aurinkopaneelien kiinnikkeet	37
4.3.5	Automaattiset suuntausjärjestelmät	37
4.4	Aurinkosähköjärjestelmän takaisinmaksuaika	39
5	Metrosol-aurinkoenergialaboratorio	42
5.1	Aurinkosähköjärjestelmä	42
5.2	Seurantaohjelmat	43
5.3	Mittausdatan analysointi ja havainnot	44

6	Energiantuoton mahdollisuudet vuoden epäedullisina aikoina	45
6.1	Energiantuotantoon vaikuttavat tekijät	46
6.1.1	Asennuskulmat	46
6.1.2	Sijainti	47
6.1.3	Aurinkopaneelien puhtaus ja pinta-ominaisuudet	47
6.2	Energiantuoton laskentavertailua talviaikana	48
7	Yhteenveto	50
	Lähteet	52
	Liitteet	
	Liite 1. Aurinkopaneelin SolarWATT M250-60 AC 05 tekniset tiedot	
	Liite 2. Aurinkopaneelin Innotech Solar - ITS EcoPlus 240W tekniset tiedot	

Esipuhe

Kiitokset opinnäytetyön ohjauksesta ja ideoinnista MetroSol-aurinkoenergiaprojektin vetäjälle projekti-insinööri Harri Hahkalalle, yliopettaja Jukka Yrjölälle sekä kurssitoverilleni Lari Tapaniselle, jotka mahdollistivat tämän työn valmistumisen.

Järvenpäässä 7.3.2015

Jussi Åman

1 Johdanto

Aurinkoenergian hyödyntämisestä on tehty lukuisia tutkimuksia ja selvityksiä. Valtaosassa näistä tutkimuksista keskitytään ainoastaan kesäaikaan. Tämän vuoksi katsottiin aiheelliseksi selvittää aurinkoenergian hyödyntämistä kesäajan ulkopuolella Suomen olosuhteissa.

Tämä insinöörityö kuuluu RYM Oy:n sisäympäristötutkimusohjelman työpaketin Energy Efficient Control of Indoor Environment Metropolian osuuteen. Työssä hyödynnetään AMK Metropolia Oy Leppävaaran yksikköön vuonna 2013 rakennettua aurinkoenergiaboratoriota, jonka avulla kerättyä mittaustulosta käytetään hyväksi työn edetessä. Kyseisessä MetroSol-aurinkoenergiaboratoriossa on mahdollista tutkia sekä aurinkolämpöjärjestelmän että aurinkosähköpaneelien toimintaa. Tässä työssä tarkastelu rajataan ainoastaan aurinkosähköpaneelien tuottamaan energiaan. Aurinkolämpöä ei käsitellä.

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia aurinkoenergian optimaalista hyödyntämistä Suomen sääolosuhteissa syys-, talvi- ja kevät aikaan. Tutkimuksessa on tarkoitus selvittää ja havainnollistaa aurinkopaneelien suuntauksen, sijainnin, puhtaanapidon, sääolosuhteiden aiheuttamien muutosten ja muiden aurinkoenergian talteenottoon vaikuttavien asioiden vaikutusta energiantuotantoon. Lisäksi tarkoituksena on pohtia laskennallisin keinoin, kuinka Suomen haastavissa syys-, talvi- ja kevätolosuhteissa voitaisiin parantaa aurinkopaneelien tuottoa ja toimintaa.

Lisäksi työssä käytetään laajalti eri kirjallisuuslähteitä ja aurinkoenergiaan liittyvää laskentaa. Selvitystyön ja mittaustulosten analysoinnin pohjalta mietitään lopuksi, voidaanko aurinkoenergian tuottoa parantaa Suomessa talviaikaan ja kuinka suuri hyöty eri keinojen avulla on saavutettavissa.

2 Aurinkoenergia

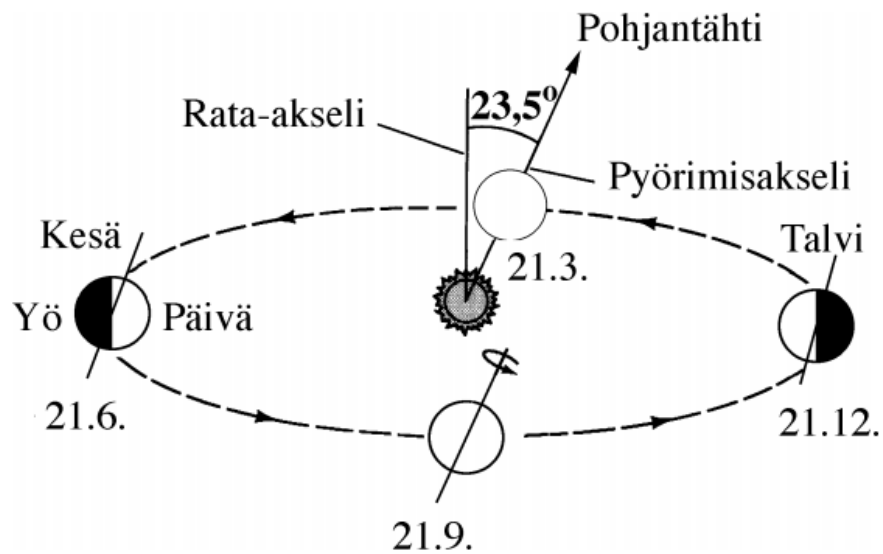
2.1 Aurinko

Aurinko on tähti, jota maapallo kiertää keskimäärin 149 600 000 km:n etäisyydellä. Auringon halkaisija on 1 392 000 km, eli se on 109-kertainen verrattuna maapallon halkaisijaan. Auringon massa on $1,9891 \times 10^{30}$ kg, joka puolestaan on 332 946 kertaa suurempi kuin maapallon massa. Auringon ytimen lämpötila on noin 13,6 miljoonaa astetta. Pintalämpötila on huomattavasti alhaisempi, noin 5517 astetta. Pintakerros koostuu vedystä (71 %), heliumista (27 %) sekä muista aineista kuten happi, hiili, rauta, neon ym. (2 %). [1.]

Atomivoimaloissa energia tuotetaan fission avulla, jossa raskaita atomeja sisältävä uraani U-235 hajotetaan. Auringon energia syntyy puolestaan fuusiosta (lämpöydinreaktio), joka on päinvastainen tapahtuma. Fuusiossa neljästä vetyatomista muodostuu 10 miljoonan asteen lämpötilassa yksi heliumatomi. Auringossa fuusioituu 600 miljoonaa tonnia vetyä 596 miljoonaksi tonniksi heliumia joka sekunti. Loput neljä miljoonaa tonnia massaa muuttuvat energiaksi, joka antaa auringolle $3,846 \times 10^{23}$ kW:n tehon. Energia säteilee valonnopeudella avaruuteen sähkömagneettisen säteilyn kaikilla aallonpituuksilla. Enimmäkseen säteily on näkyvää valoa ja infrapunasäteilyä, ultraviolettisäteilyn jäädessä vähäisemmäksi. Kaikki maapallolla käytetty energia ydinvoimaa, geotermistä ja vuorovesienergiaa lukuun ottamatta on lähtöisin auringon fuusioreaktioista. [1; 2.]

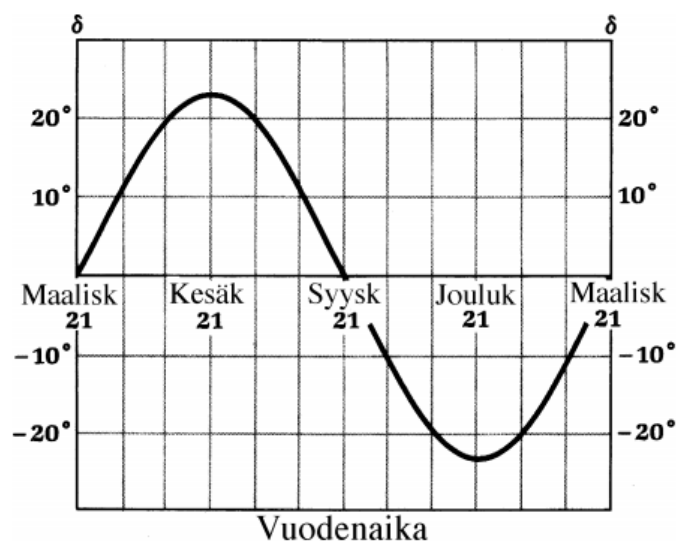
2.2 Auringon kierto ja korkeus taivaalla

Maapallon kiertorata auringon ympäri on hieman ellipsin muotoinen. Tästä johtuen maapallo on lähimpänä aurinkoa tammikuussa ja kauimpana kesäkuussa. Maapallon pyörimisakseli on kallistunut $23,5^\circ$ sen rata-akseliin nähden, jonka seurauksena aiheutuvat vuodenaikojen vaihtelut. Kallistuksen vuoksi kesäisin pohjoinen pallonpuolisko saa enemmän auringonsäteilyä kuin eteläinen ja talvisin asia on päin vastoin. Kuvassa 1 on havainnollistettu asiaa tarkemmin.



Kuva 1. Maapallon kierto auringon ympäri sekä tasaus- ja seisauspäivät [8].

Koska maapallo kiittää aurinkoa ja pyörii kallistuneen pyörimisakselinsa ympäri, vaihtuu auringon korkeus taivaalla eri vuodenaikoina. Tätä ilmiötä kuvataan auringon deklinaatiolla, joka on auringon korkeuskulma maapallon päiväntasaajan tasoon nähden. Kevät- ja syyspäivän tasauksen aikaan (21.3. ja 21.9.) aurinko paistaa kohtisuoraan päiväntasaajalle, jolloin deklinaatio on 0° . Kesäpäivän seisausena 21.6. aurinko paistaa kohtisuoraan Kravun kääntöpiirille, jolloin deklinaatio on $+23,5^\circ$. Vastaavasti talvipäivän seisausena 21.12. aurinko paistaa Kauriin kääntöpiirille antaen deklinaatiolle arvon $-23,5^\circ$. Kuvasta 2 nähdään auringon deklinaatiot vuoden eri aikoina.



Kuva 2. Auringon deklinaatiot eri vuodenaikoina [8].

Auringon deklinaatio saadaan laskennallisesti myös kaavalla 1.

$$\delta = 23,45 * \sin(\omega * (284 + t)) \quad (1)$$

jossa

δ auringon deklinaatio (°)

ω maapallon kulmanopeus radalla (°/d)

t tutkittavan päivän järjestysluku esim. 1. tammikuuta = 1, 1. helmikuuta = 32 (d)

Koska maapallon kierto auringon ympäri (360°) kestää yhden vuoden, voidaan kulmanopeus ilmoittaa muodossa $360^\circ/365 \text{ d} = 0,9863^\circ/\text{d}$.

Kun tiedetään auringon deklinaatio, voidaan laskea auringon korkeus horisontista kyseisenä päivänä halutulla leveyspiirillä kaavalla 2.

$$\alpha_{max} = 90^\circ + \delta - \varphi \quad (2)$$

jossa

α_{max} auringon korkeuskulma suurimmillaan (°)

δ auringon deklinaatio (°)

φ leveyspiirin asteluku (°) [7;8.]

Kaavoja 1 ja 2 hyödyntäen lasketaan esimerkkilaskuna auringon maksimikorkeusasema Espoossa lokakuun, joulukuun ja helmikuun viimeisinä päivinä. Espoon leveyspiiri on 60,2°. Tarkasteltavien päivien järjestysluvut ovat 304, 365 ja 59.

Lokakuun 31. päivänä auringon deklinaatio on

$$\delta = 23,45 * \sin(0,9863 * (284 + 304)) = -15,1^\circ$$

ja suurin korkeuskulma

$$\alpha_{max} = 90^\circ + (-15,1^\circ - 60,2^\circ) = 14,7^\circ.$$

Joulukuun 31. päivänä auringon deklinaatio on

$$\delta = 23,45 * \sin(0,9863 * (284 + 365)) = -23,1^\circ$$

ja suurin korkeuskulma

$$\alpha_{max} = 90^\circ + (-23,1^\circ - 60,2^\circ) = 6,7^\circ.$$

Helmikuun 31. päivänä auringon deklinaatio on

$$\delta = 23,45 * \sin(0,9863 * (284 + 59)) = -6,9^\circ$$

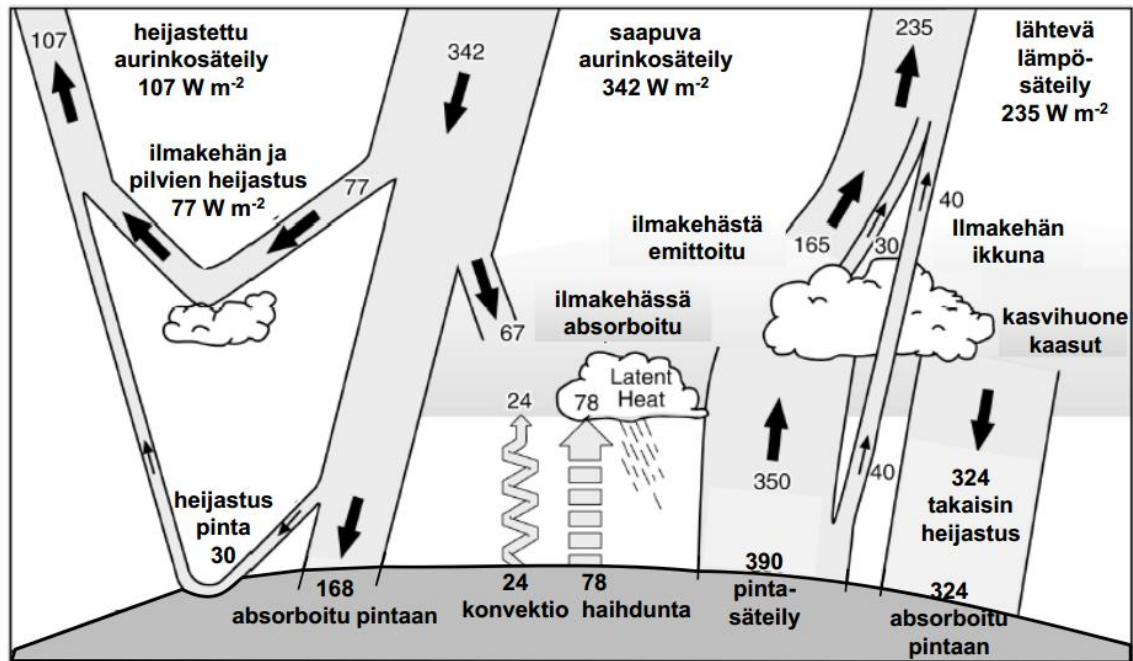
ja suurin korkeuskulma

$$\alpha_{max} = 90^\circ + (-6,9^\circ - 60,2^\circ) = 22,9^\circ.$$

2.3 Auringon säteily

Vaikka vain murto-osa auringon säteilystä osuu maapallolle ($1,7 \times 10^{14}$ kW), on säteilyn määrä 20 000-kertainen ihmiskunnan tämänhetkiseen energiankulutukseen verrattuna. Maapallon ilmakehän ulkopuolella 1 m^2 :n suuruiselle pinnalle, joka on auringonsäteilyä vastaan kohtisuorassa, saapuu 1,35–1,39 kW:n säteilyteho. Tätä arvoa kutsutaan aurinkovakioksi. Aurinkovakio voidaan ajatella myös energiamääränä (1,35–1,39 kJ), jonka aurinko säteilee sekunnissa ilmakehän rajalle 1 m^2 :n kokoiselle alueelle. Aurinkovakio vaihtelee maapallon ja auringon etäisyysvaihteluiden vuoksi +/- 3,5 %.

Maapallon pinnalla aurinkovakio alenee noin 60 %:iin ilmakehän heijastuksen ja absorption vuoksi. Maapallon pinnalle saapuvaa säteilyä kutsutaan välittömäksi aurinkovakioksi. Tämä arvo on noin 0,8–1,0 kW/m² kirkkaana päivänä. Näin ollen säteilytehon ollessa tasaisesti 1 kW tunnin ajan saadaan energiamääräksi 1 kWh.



Kuva 3. Auringonsäteily ilmakehässä ja maanpinnalla. Luvut ovat W/m^2 [15].

Kuvassa 3 on esitetty auringonsäteilyn käyttäytymistä ilmakehässä ja maanpinnalla, Ilmakehä vaikuttaa auringonsäteilyyn merkittävästi. Ilmakehä muodostuu vesihöyrystä ja erilaisista molekyyleistä. Lisäksi ilmakehässä on saasteita ja pölyä, jotka heikentävät auringonsäteiden kulkeutumista maanpinnalle. Välitön aurinkovakio pienenee myös sitä enemmän, mitä pidemmän matkan säteily kulkee ilmakehän läpi. Näin ollen pienemmässä kulmassa tuleva säteily menettää huomattavasti enemmän tehoa kuin kohtisuoraan tuleva säteily. Tästä johtuen keskipäivällä aurinkoteho on suurempi kuin aamulla tai illalla. Samoin talviaikaan saatava aurinkoteho on paljon vähäisempää kuin kesäisin.

Maanpinnalle tuleva säteily voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin ilmakehän vaikutuksen vuoksi. Suora auringonsäteily (I_A) on suoraan ilmakehän läpi tulevaa säteilyä. Hajasäteily (I_D) on pilvien ja ilmakehän molekyyliden heijastamaa säteilyä. Lisäksi maasta heijastunut säteily katsotaan kuuluvaksi hajasäteilyyn. Kolmantena on ilmakehän vastasäteily (I_V), joka johtuu ilmakehän vesihöyrystä, hiilidioksidista ja otsonista, jotka heijastavat lämpöä takaisin maanpinnalle. Tämä ilmiö tunnetaan myös nimellä kasvihuonevaikutus. Joissain tapauksissa vastasäteily lasketaan kuuluvaksi hajasäteilyyn.

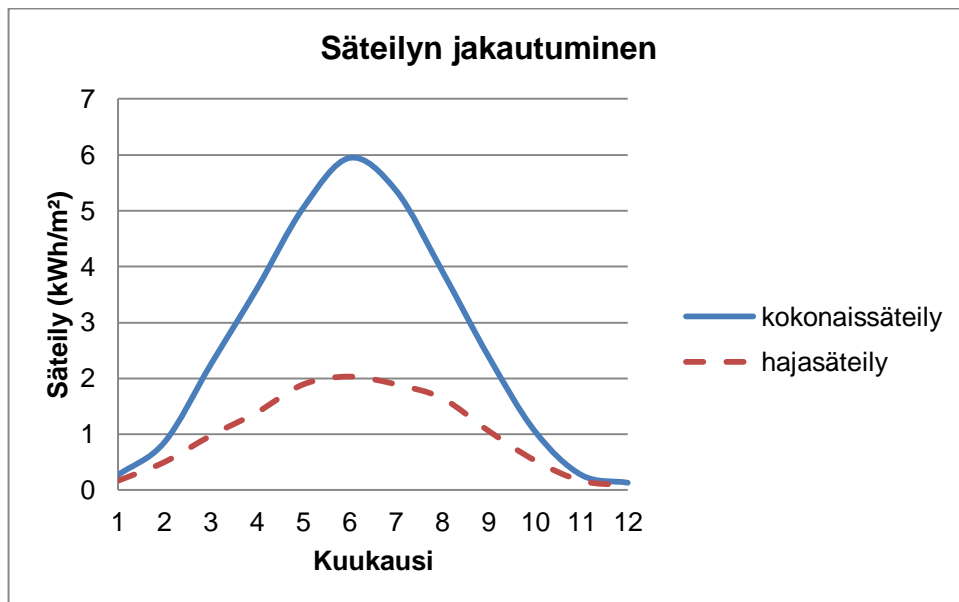
Tarkasteltaessa maanpinnalle tulevaa kokonaissäteilyenergiaa on otettava huomioon myös pinnan takaisin avaruuteen heijastama pitkäaaltoinen säteily (I_U). Laskettaessa maanpinnalle hyväksi jäävää tehoa voidaan käyttää kaavaa 3.

$$I = I_A + I_D + I_V - I_U \quad (3)$$

jossa

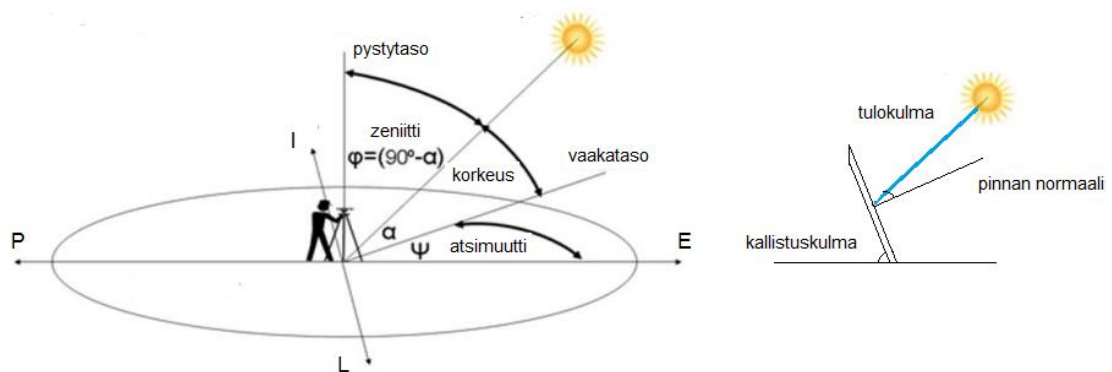
I_A	suora aurinkosäteily
I_D	hajasäteily
I_V	ilmakehän vastasäteily
I_U	pitkäaaltoinen säteily

Suomen oloissa keskimäärin noin 50 % kokonaissäteilystä on hajasäteilyä. Pilvisinä päivinä luku voi olla jopa 80 %, kun taas kirkkaana kesäpäivänä hajasäteilyn osuus jää noin 20 %:iin vaakasuoraa pintaa tarkasteltaessa. [3, s. 10–12.] Kuvassa 4 on havainnollistettuna hajasäteilyn keskimääräinen osuus kokonaissäteilystä eri kuukausina Helsingissä.



Kuva 4. Vaakasuoralle pinnalle tulevan kokonais- ja hajasäteilyn päiväsummien keskiarvot eri kuukausina Helsingissä [29].

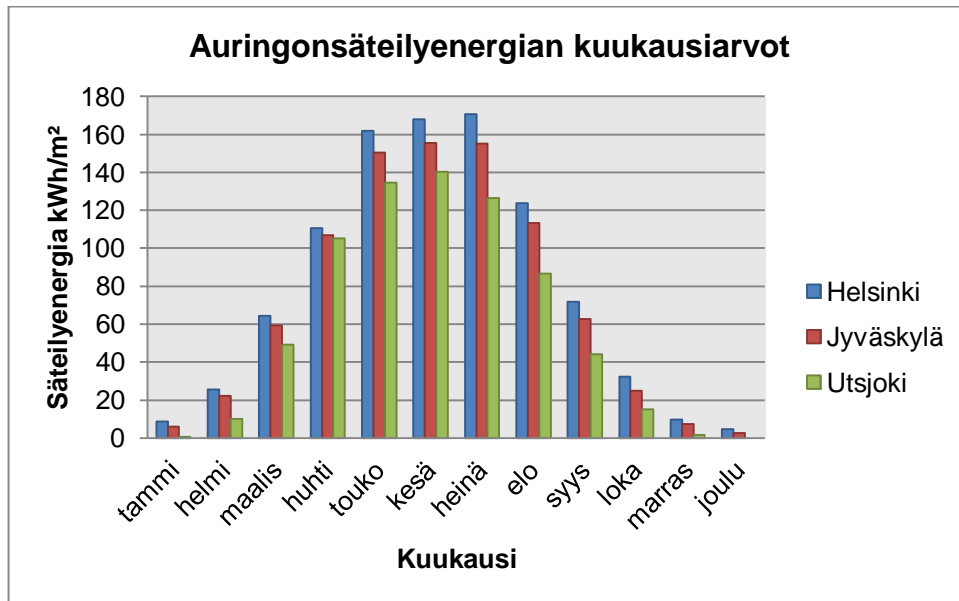
Auringonsäteilyn yhteydessä käytetään eri kulmia, joiden avulla ilmaistaan suuntaa. Nämä kulmat ovat havainnollistettu kuvassa 5. Atsimuuttikulmalla tarkoitetaan poikkeamaa etelän suunnasta. Suuntauksen ollessa suoraan etelään on atsimuuttikulman arvo 0° . Lännen suuntausarvo on $+90^\circ$ ja idän -90° . Auringon korkeuskulmalla tarkoitetaan vaakatason ja suoran säteilyn välistä kulmaa. Zeniittikulma puolestaan on pystytason ja suoran säteilyn välinen kulma tai 90° vähennettynä korkeuskulma. Kallistuskulmalla tarkoitetaan vaakatason ja laitetason välistä kulmaa. Tulokulmalla määritellään suoran säteilyn ja laitetason normaalin välistä kulmaa, eli kun säteily osuu kohtisuoraan laitetasolle on tulokulma 0° . [3.]



Kuva 5. Auringonsäteilyyn liittyvät kulmat [27, muokattu].

2.4 Auringon säteily Suomessa

Auringonsäteily vaakatasolle vaihtelee maassamme sijainnista riippuen Etelä-Suomen arvosta $1000 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ Pohjois-Suomen arvoon $800 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Keski-Suomessa saadaan noin $900 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ auringonsäteilyä. Luvut kuvastavat vuotuista neliömetrin alueelle saatavaa kokonaissäteilyn määrää. Kuvassa 6 on esitetty kuukausittaisia säteilyenergian arvoja eri puolella Suomea. Suurimmat arvot saavutetaan huhtikuun ja syyskuun välillä auringon paistaessa korkeammassa kulmassa. Talviaikaan auringon säteet tulevat maan pinnalle huomattavasti pienemmässä kulmassa kuin kesällä, joka vähentää säteilyn määrän murto-osaan kesän huippuajasta. Talviaikana marraskuulta helmikuulle kokonaissäteilyn osuus vuotuisesta on Etelä-Suomessa noin 5 %, Keski-Suomessa noin 4 % ja Pohjois-Suomessa noin 2 %. Lisäksi talvella aurinkotuntien, eli ajan jolloin maanpinnalle saadaan säteilyä auringosta, määrä pienenee huomattavasti. Keväällä maaliskuulta huhtikuulle auringon korkeuskulman kasvaessa vastaavat arvot ovat 18, 19 ja 21 %. [3.]



Kuva 6. Auringonsäteilyenergian kuukausittaiset keskiarvot vaakatasolle vuosilta 1981–2010 Helsingissä, Jyväskylässä ja Utsjoella [5].

Auringon säteilyn voimakkuutta voidaan tutkia myös laskennallisesti halutulla sijainnilla kaavalla 4.

$$S = S_0 \sin \alpha \quad (4)$$

jossa

- S auringonsäteilyn voimakkuus W/m^2
 S_0 välitön aurinkovakio $800 - 1000 W/m^2$
 α auringon korkeuskulma ($^\circ$)

Koska auringon korkeuskulma riippuu sijainnin leveyspiiristä, auringon deklinaatiosta sekä kellonajasta (tuntikulma) on korkeuskulma laskettava ennen säteilyn voimakkuuden laskentaa. Korkeuskulma saadaan kaavalla 5.

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h \quad (5)$$

jossa

α	auringon korkeuskulma ($^{\circ}$)
φ	leveyspiirin asteluku ($^{\circ}$)
δ	auringon deklinaatio ($^{\circ}$)
h	tuntikulma ($^{\circ}$)

Tuntikulman arvo saadaan maapallon pyörihdysnopeuden avulla. Kun tiedetään, että maapallo pyörihtää akselinsa ympäri vuorokaudessa saadaan tuntiarvoksi $360^{\circ}/24 = 15^{\circ}$. Tuntikulman suuruus saadaan kaavalla 6.

$$h = 15^{\circ}(t_{\text{aur}} - 12) \quad (6)$$

jossa

h	tuntikulma ($^{\circ}$)
t_{aur}	aurinkoaika

Kesäajan vallitessa aurinko paistaa etelästä kesäisin noin kello 13. Aurinkoaika on siis tuntia vähemmän kuin kellon aika.

Kaavoja 4–6 hyödyntäen lasketaan esimerkkilaskuna suora auringonsäteilyn voimakkuus Espoossa helmikuun viimeisenä päivänä kello 14.00. Aiemmasta esimerkkilaskusta saatiin kyseisen päivän deklinaatioksi $-6,9^{\circ}$. Tuntikulman arvo on

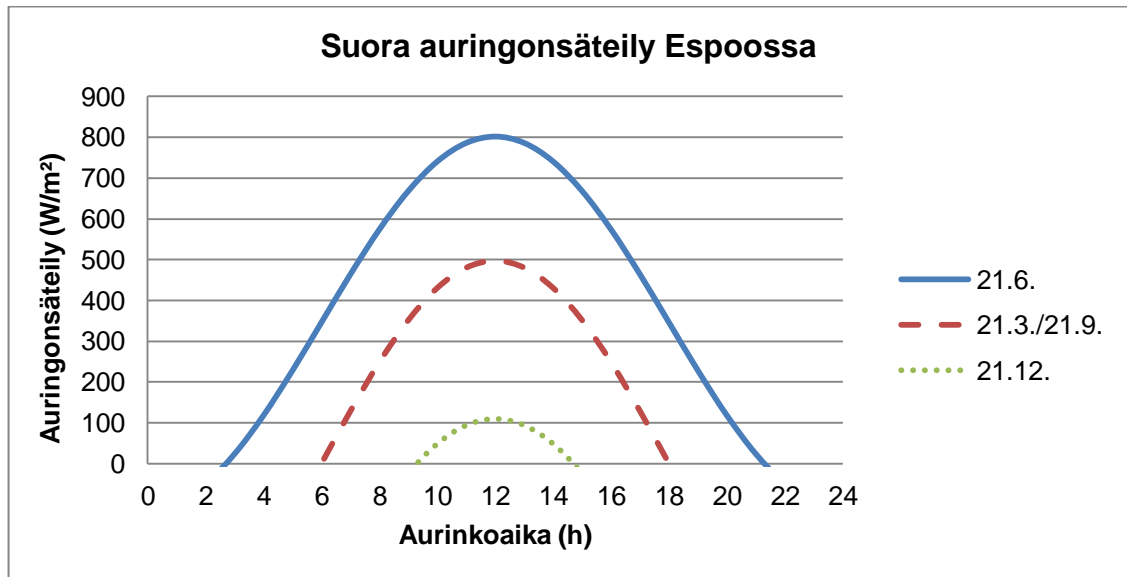
$$h = 15^{\circ} * (14 - 12) = 30^{\circ}$$

ja auringon korkeuskulma

$$\sin \alpha = \sin 60,2^{\circ} * \sin(-6,9^{\circ}) + \cos 60,2^{\circ} * \cos(-6,9^{\circ}) * \cos 30^{\circ} = 18,8^{\circ}$$

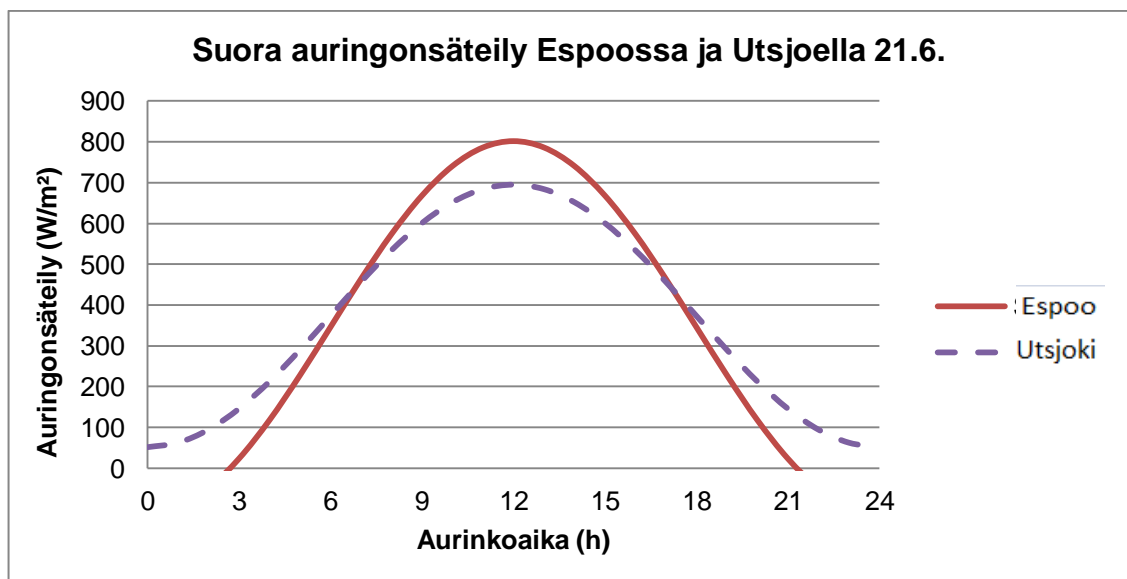
jolloin säteilyn voimakkuudeksi saadaan

$$S = 800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * \sin 18,8^{\circ} = 258,2 \text{ W/m}^2.$$



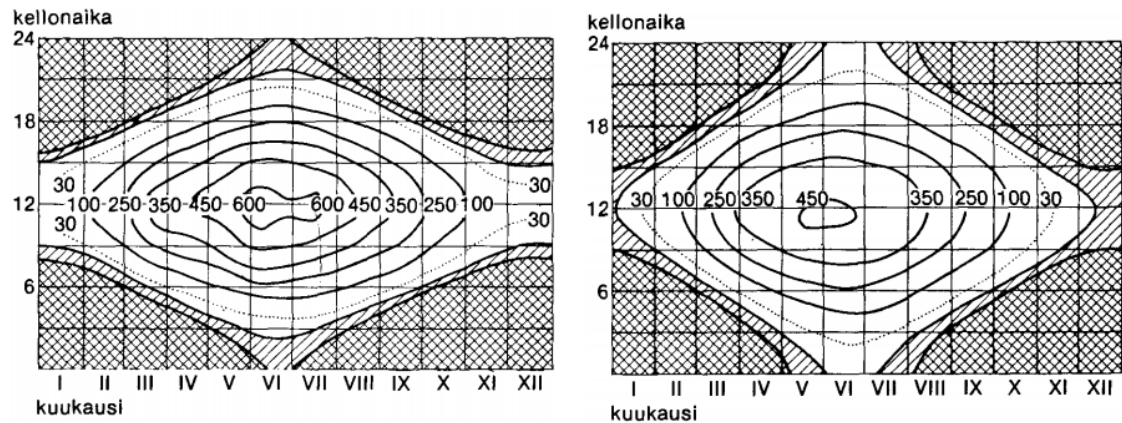
Kuva 7. Lasketut suoran auringonsäteilyn voimakkuudet vaakatasolle Espoossa tasa- ja seisauspäivien aikaan.

Kuvasta 7 nähdään suoran auringonsäteilyn voimakkuudet eri vuodenaikoina Espoossa, jotka on laskettu kaavoilla 4–6. Suurimmillaan suora säteily on kesäpäivän seisauksen aikaan hieman yli 800 W/m². Kyseisen päivän suoran säteilyn vuorokautiseksi energiaksi saadaan noin 8,8 kWh/m². Tasauspäivinä suora säteily on enimmillään noin 500 W/m² ja energia 3,7 kWh/m². Talvipäivän seisauksena suoran säteilyn määrä maksimissaan on hieman yli 100 W/m² energian jäädessä arvoon 0,4 kWh/m². [8.]



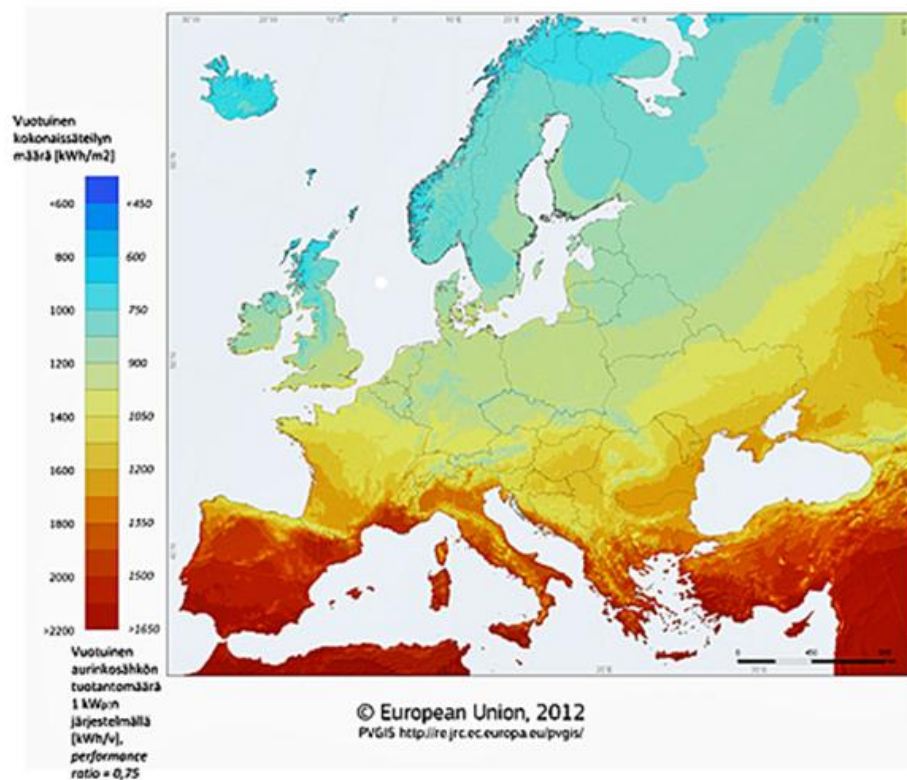
Kuva 8. Lasketut suoran auringonsäteilyn voimakkuudet vaakatasolle Espoossa ja Utsjokella 21.6.

Kuvasta 8 nähdään kesäpäivän seisauksen aikaiset suorat auringonsäteilymäärät Espoossa ja Utsjoella. Vaikka Espoossa saadaankin välillä 7:00–17:00 korkeammat hetkittäiset säteilymäärät kuin Utsjoella, on molempien paikkakuntien säteilyn kokonaisenergia kyseisenä päivänä lähes yhtä suuri. Tämä johtuu siitä, ettei Utsjoella aurinko laske keskikesällä lainkaan. Kuvasta 9 nähdään valoisan ja pimeän ajan vaihtelut sekä kokonaissäteilyn voimakkuudet eri päivän- ja vuodenaikoina. [7.]



Kuva 9. Kokonaissäteilyn vuorokautinen ja vuotuinen vaihtelu (W/m^2), sekä valoisa, hämärä ja pimeä aika. Vasemmalla Etelä-Suomi (leveyspiiri = 60°) ja oikealla Pohjois-Suomi (leveyspiiri = 70°) [29].

Verrattaessa Suomen oloja Keski-Eurooppaan voidaan kuvasta 10 todeta, ettei Suomen leveyspiirillä vuotuinen auringonsäteily määrä ole juurikaan pienempi.



Kuva 10. Auringonsäteilymäärät Euroopassa 2012 [6].

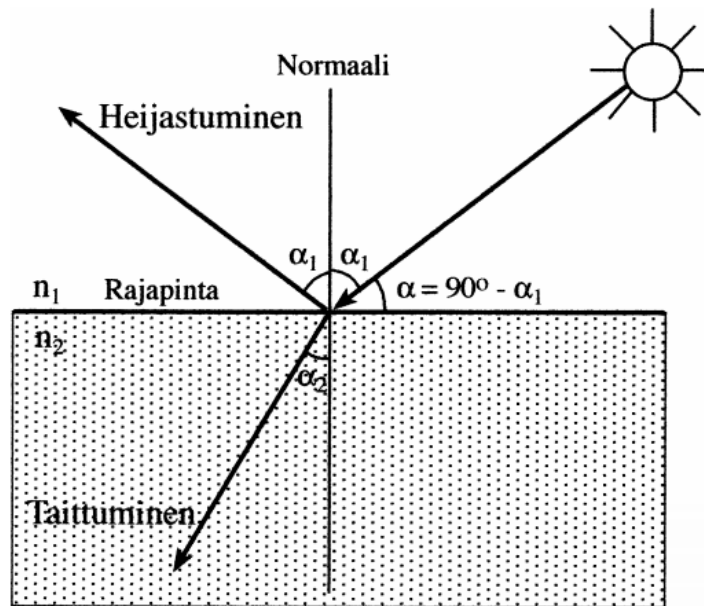
2.5 Auringonvalon heijastuminen, taittuminen ja absorptio

Valon kohdatessa kahden aineen rajapinnan osa valosta heijastuu ja osa jatkaa kulkuaan uuteen väliaineeseen muuttaen kulkusuuntaansa eli taittuen aineiden rajapinnalla. Tuleva ja heijastuva säde muodostavat yhtä suuren kulman rajapinnan normaalin kanssa. Vinosti pintaan tuleva säde muuttaa kulkusuuntaansa mikäli, aineilla on erilaiset taitekertoimet. Esimerkiksi ilmalle ja lasille taitekertoimet ovat 1 ja 1,5. Snellin lain mukaisesti tulevan ja taittuneen säteen suhdetta voi laskea kaavalla 7.

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \quad (7)$$

jossa

n_1	aineen 1 taitekerroin
α_1	valonsäteen tulokulma
n_2	aineen 2 taitekerroin
α_2	valonsäteen taitekulma



Kuva 11. Valon heijastuminen ja taittuminen kahden aineen rajapinnalla (Snellin laki) [8].

Kuvassa 11 on havainnollistettuna, kuinka valo heijastuu kohdatessaan rajapinnan ja miten valo taittuu rajapinnalla. Valon taitumisesta tuttu ilmiö on tilanne, jossa veteen katsottaessa asiat näyttävät olevan lähempänä kuin todellisuudessa ovat.

Valon tullessa kohtisuoraan pintaa kohden heijastumista voidaan laskennallisesti tutkia kaavalla 8.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{(1-p)^2}{(1+p)^2} \quad (8)$$

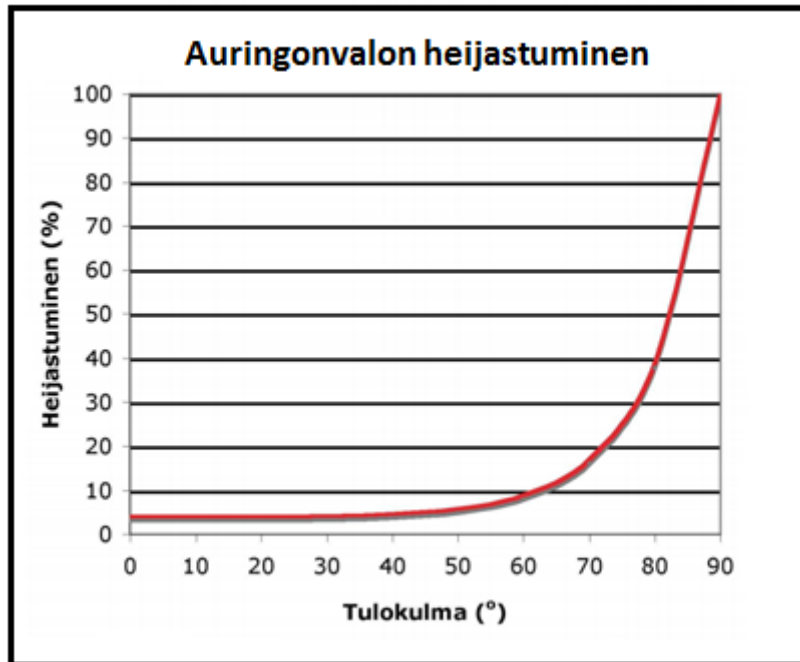
jossa

I pinnasta heijastuvan säteilyn intensiteetti (W/m^2)

I_0 tulevan säteilyn intensiteetti (W/m^2)

p taitekertoimien suhde (n_1/n_2)

Kaavalla saadaan ilman ja lasin välisen rajapinnan heijastumaksi 4 %. Arvo pätee myös aurinkopaneelien lasipinnalta heijastuvaan säteilyyn.



Kuva 12. Auringonvalon heijastuminen lasin pinnalta eri tulokulmilla [8].

Kuvasta 12 nähdään, kuinka ilman ja lasin välisen rajapinnan heijastuminen muuttuu valon tullessa pintaan eri kulmissa. Heijastuminen alkaa kasvaa rajusti tulokulman kasvaessa yli 60 asteeseen. Tulokulman ollessa 80° säteilystä heijastuu jo noin 40 %.

Taulukko 1. Auringonsäteilyn absorptio- ja heijastumisosuudet maan eri pinta-aineista [8].

Aine	Absorptio (%)	Heijastuminen (%)
Lumi	10–20	80–90
Vesi	90	10
Maa	80	20
Hiekka	80	20
Ruoho	70	30
Asfaltti	90	10
Betoni	60	40

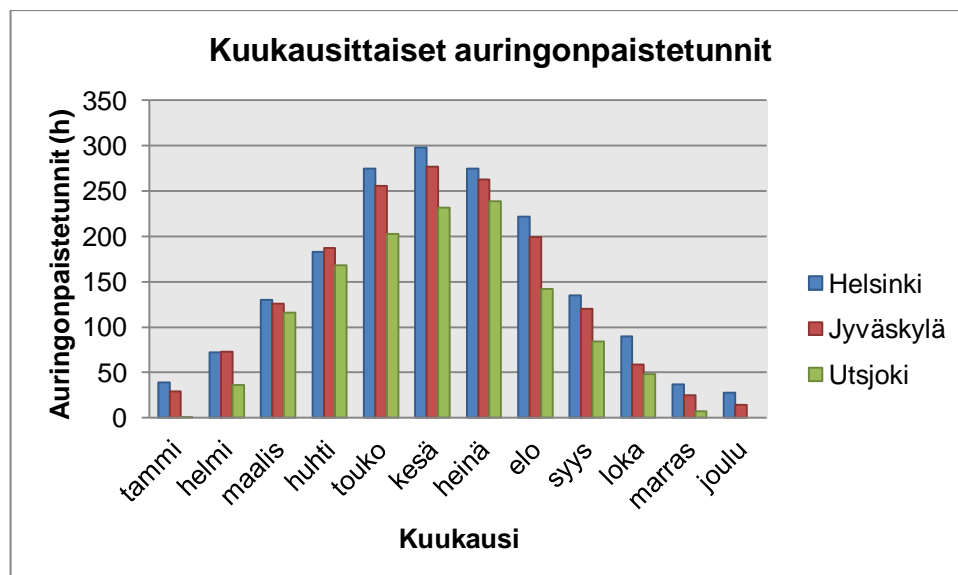
Taulukosta 1 nähdään yleisimmät materiaalit maan pinnalla ja niiden absorptio ja heijastussuhteet auringonsäteilylle. Perinteisesti vaaleat pinnat, kuten lumi ja vaaleat rakenteet heijastavat säteilyä hyvin, kun taas tummat pinnat imevät suurimman osan tulevasta säteilystä itseensä. Aurinkopaneeleiden sijaintien suunnittelussa onkin hyvä ottaa huomioon myös ympäristön vaikutukset heijastumien kannalta. [7.]

3 Sääolot Suomessa

Sääolojen vaihtelu Suomessa eri vuosien välillä on suurta. Tässä työssä käytetyt säädatat perustuvat pitkäaikaisiin tilastollisiin arvoihin, jotka on laatinut Ilmatieteen laitos.

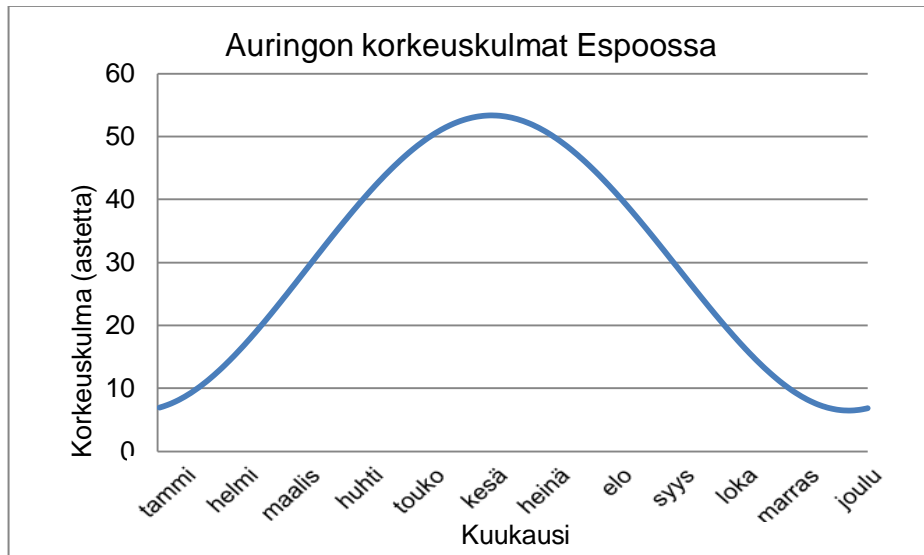
3.1 Auringonpaiste

Maapallon liikkumisen ja sääolosuhteiden vaihtelun johdosta auringonsäteilyn teho ja aurinkotunnit eivät ole täysin säännöllisiä. Maan vinosta pyörimisakselista johtuen auringonsaanti maapallolla vaihtelee jatkuvasti. Samasta ilmiöstä johtuvat vuodenaajat, jotka korostuvat sitä voimakkaammin, mitä kauempana päiväntasaajasta tutkittava alue sijaitsee. Suomi sijaitsee karkeasti katsottuna leveyspiirien välillä 60° ja 70° pohjoista leveyttä. Tästä johtuen sekä aurinkotuntien että auringonsäteilyn tulokulman vaihtelu vuodenaikaan nähden on erityisen suurta Suomessa. Talviaikana marraskuulta helmikuulle auringonpaistetunteja Helsingissä on 176, Jyväskylässä 141 ja Utsjoella vain 44. Keväällä päivien pidentyessä vastaavat arvot ovat Etelä- ja Keski-Suomessa 313 ja Pohjois-Suomessa 284 tuntia. Kuvassa 13 on havainnollistettu aurinkotuntien määrä kuukausittain eri puolella Suomea.



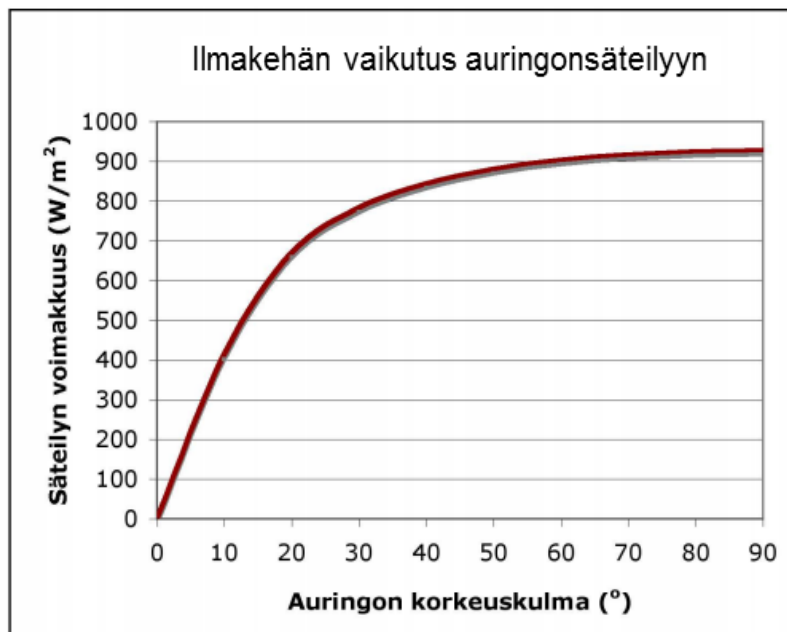
Kuva 13. Auringonpaistetunnit kuukausittain eri puolella Suomea. Keskiarvot vuosilta 1961–1990. [3, s. 25.]

Tässä insinööriyössä tarkastellaan myöhemmin Espoon Leppävaarassa sijaitsevan MetroSol-aurinkoenergiaboratorion mittaustuloksia, minkä vuoksi kuvassa 14 esitettyjen aurinkokulmien kohteena on juuri Espoon sijainti.



Kuva 14. Kaavalla 2 lasketut auringon korkeuskulmat Espoossa eri kuukausina [7].

Kuvasta 14 voidaan havaita että korkeimmillaan aurinko paistaa Espoossa (leveyspiirillä $60,2^\circ$) hieman yli 53° :n kulmassa kesäkuussa, kun taas joulukuussa auringon korkeuskulma on keskipäivällä alle 7° .



Kuva 15. Suoran auringonsäteilyn heikkeneminen ilmakehän vaikutuksesta [7].

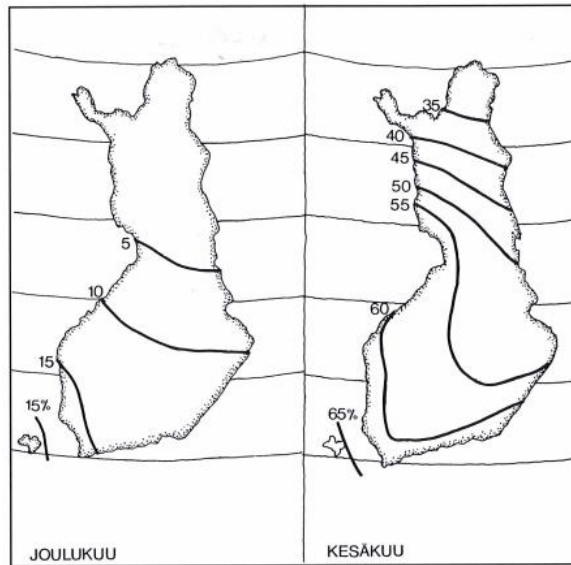
Kuvassa 15 on esitetty, kuinka vinosti ilmakehään saapuvan suoran säteilyn pääsy maanpinnalle vähenee auringon eri korkeuskulmissa. Säteilyn määrä pienenee huomattavasti korkeuskulman ollessa alle 30°. Korkeuskulman ollessa 15° on suoran säteilyn osuus vähentynyt jo puoleen alkuperäisestä. [7.]

3.2 Sään vaikutus auringonsäteilyyn

Kirkkaana päivänä auringonsäteilystä saadaan suorana säteilyä noin 70 % aurinkovakiosta. Hajasäteilyn vaikutuksesta kokonaissäteily nousee noin 80 %:iin. Loppu säteily katoaa ilmakehästä johtuvaan sirontaan ja absorptioon. Suomen oloissa on otettava huomioon myös ilman sameus kesän aikana, joka vähentää suoran säteilyn määrää 10–15 %.

Pilvien laatu, määrä ja paksuus vaikuttavat myös maanpinnalle saapuvaan suoraan säteilyyn. Suora säteily vähenee alkaen yläpilvikerroksesta, joka on 6–12 km:n korkeudella maanpinnasta. Keskipilvet (2–6 km:n korkeudella) päästävät vain osan auringonsäteilystä läpi, kun taas alapilvet (0–2 km:n korkeudella) estävät jo kokonaan auringonsäteilyn maanpinnalle. Pilvisyyden vaikutukset ovat riippuvaisia vahvasti vuodenajasta, säätyypistä sekä paikallisista tekijöistä. Talvisin pilvipeite on yleensä tasainen ja vähentää säteilyä voimakkaasti. Kesäisin pilvet ovat usein konvektiopilviä, jotka syntyvät puolenpäivän aikaan paikallisten nostevoimien kiihdyttäessä ilmaa pienellä alueella ja häviävät illalla. Tästä johtuen säteilyn määrä on suurempi aamupäivällä, ja itseinälle tuleva säteily on keskimäärin suurempaa kuin länsiseinän saama säteily.

Maantieteellinen sijainti vaikuttaa lisäksi säteilyn määrään. Esimerkiksi rannikoilla on kesäisin suuriakin eroja samalla leveyspiirillä sijaitsevaan sisämaan alueeseen. Vesialueet ovat suhteellisesti kylmempiä kuin maa-alueet, eikä niiden ylle synny konvektiopilviä kuten sisämaahan. Lisäksi tuulen rannikolle kuljettamat konvektiopilvet usein häviävät saapuessaan vesialueelle. Kuvassa 16 nähdään selvemmin rannikosta johtuvat säteilyerot.



Kuva 16. Suhteellisen auringonpaisteen jakaumat Suomessa [3].

Kuvassa 16 näkyvät suhteellisen auringonpaisteen erot Suomen alueella. Suhteellisella auringonpaisteella tarkoitetaan auringonpaisteen mitattua paisteaikaa jaettuna maksipaistejalla. Selvimmät erot muodostuvat saaristossa sekä rannikolla. Kesäisin erot maan eri osien välillä yltyvät jopa 30 prosenttiyksikköön, kun taas talvisin erot jäävät noin 10 prosenttiyksikköön. [3, s. 26–27.]

3.3 Lumen vaikutukset aurinkopaneeliin

Pohjois-Suomessa on pysyvä lumipeite keskimäärin marraskuusta toukokuun alkupuolelle. Etelä-Suomessa pysyvän lumipeitteen jakso vaihtelee vuosittain pohjoista enemmän. Pysyvä lumi sataa etelään keskimäärin joulukuun lopulla ja sulaa pois maaliskuun loppupuolella. Näin ollen Etelä-Suomessa on noin 100 päivää vuodessa, jolloin maa on lumen peitossa pohjoisessa vastaavan luvun ollessa lähes 200 päivää. [24.]

Talviaikaan aurinkopaneelien kallistuskulma vaikuttaa suuresti siihen, ovatko ne hautautuneet lumen alle vai onko lumi valunut pinnalta pois. Aurinkopaneelin pinnalla oleva lumi heijastaa auringonsäteilyä tehokkaasti ja estää näin sähköntuoton paneelissa. Lähellä vaakatasoa ja pienessä kulmassa olevat aurinkopaneelit voivat olla pahimmallaan koko lumisen ajan vuodesta tuottamatta sähköä lainkaan. Pystysuoraan ja yli 60°:n kulmaan asennettujen paneelien talvituotto on huomattavasti suurempaa,

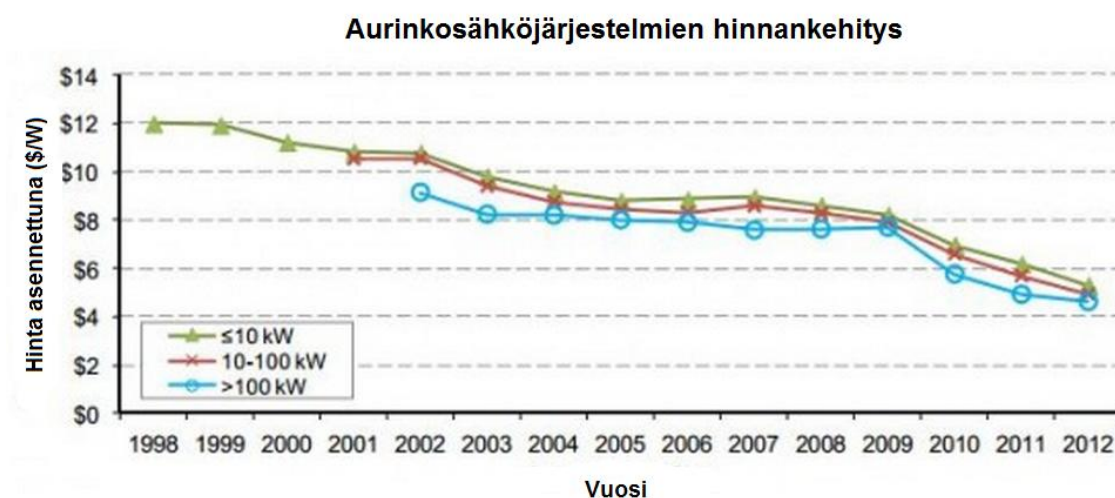
koska satanut lumi valuu helpommin ja nopeammin niiden pinnalta pois. Lumiseen aikaan asennuskulman suuruudella on siis suuri vaikutus paneelien sähköntuottoon, mikäli paneeleita ei puhdisteta lumesta säännöllisesti.

Lumesta johtuvat häviöt aurinkopaneelien energiantuotossa riippuvat voimakkaasti paikallisista sääoloista ja asennuskulmista. Häviöt saattavat olla 1–4 %:n suuruisia vuotuisesta energiamäärästä. Kuukausittaiset häviöt voivat nousta jopa yli 80 %:iin. [25.]

Lumen poistoon paneelien pinnalta on esitetty monia eri ratkaisuja. Osa ratkaisuista on toimivia, mutta vaatii manuaalista työtä tai energiaa kuluttavia laitteita. Optimaalinen tilanne olisi, ettei lumi tarttuisi lähtökohtaisesti lainkaan paneelin pinnalle tai että se valuisi mahdollisimman nopeasti pois. Erilaisia pinnoitemateriaaleja ja pinnoitustekniikoita on tutkittu käytettäväksi kohteissa, joissa lika, vesi tai lumi halutaan pitää poissa. Paras ratkaisu aurinkopaneeleissa lumenpoistoon saataneen tulevaisuudessa oikeanlaisen pinnoitteen avulla, mutta siihen asti kätevin keino lumen poistoon on asentaa paneelit tarpeeksi suureen kallistuskulmaan, jotta lumi ei tartu paneeleihin tai valuu nopeammin pois. [25; 30.]

4 Aurinkosähkö

Aurinkosähköllä on useita etuja perinteisiin tuotantomuotoihin nähden. Aurinkosähköllä ei ole polttoainekuluja, joten se on ympäristöystävällistä. Aurinkosähköjärjestelmät ovat yksinkertaisia, pitkäikäisiä ja vaativat vain vähän huoltoa. Järjestelmien asennus on nopeaa, ja ne ovat erittäin muuntokykyisiä sekä helposti laajennettavia. Huollon osalta aurinkosähköjärjestelmät on hyvä tarkastaa vuosittain. Tarkastuksessa käydään läpi telineet, paneelit, kaapelit ja liitokset sekä invertterin toiminta. Haittapuolena aurinkosähkölle erityisesti Suomessa on tuotannon vuodenaikavaihtelu. [3.]



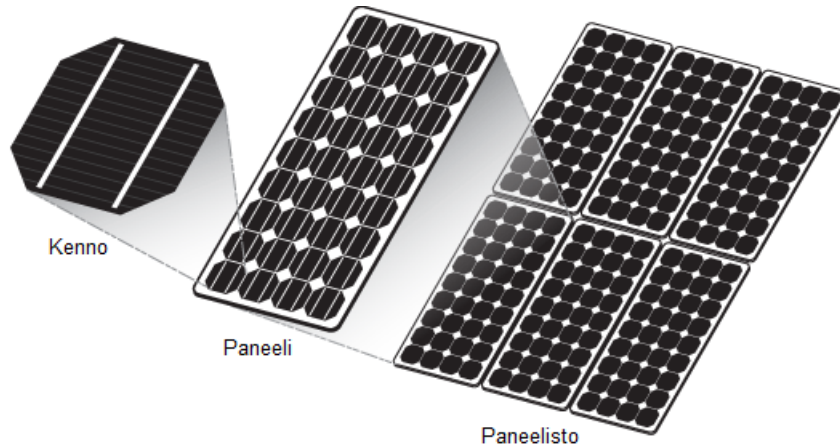
Kuva 17. Asennettujen aurinkosähköjärjestelmien hinnankehitys USA:ssa vuosina 1998–2012 [33, muokattu].

Kuvassa 17 on esitetty aurinkosähköjärjestelmien hinnankehitys viime vuosilta. Hinnat ovat USA:n dollareissa ja tarkoittavat, kuinka paljon asennettu järjestelmä maksaa wattia kohden. Esimerkiksi vuonna 1998 viiden kW:n suuruisen järjestelmän hinta asennettuna on ollut (12 \$/W x 5000 W) 60 000 \$. Vuonna 2012 samansuuruisen järjestelmä on maksanut enää (5,5 \$/W x 5000 W) 27 500 \$. Hinnan alentuminen ei johdu ainoastaan aurinkopaneelien hinnan laskusta, vaan siihen vaikuttavat myös järjestelmän muut laitteet, asennustyö ja lupamaksut ym. Hinnat eivät ole täysin verrannollisia Suomen hintojen kanssa johtuen paikallisista eroista kuten veroista ja työhinnasta. Kuvasta 17 voidaan tästä huolimatta todeta hinnan kehityssuunnan olleen laskeva yli kymmenen vuoden ajan. Esimerkkilaskelma aurinkosähköjärjestelmän takaisinmaksuajasta on osiossa 4.4. [33.]

Aurinkoenergian käyttö tulee lisääntymään tulevaisuudessa tiukentuvien energiasäädösten ja tavoitteiden myötä. Rakennuksissa tullaan hyödyntämään entistä enemmän uusiutuvaa energiaa tulevaisuudessa, jotta uudet energiatavoitteet voitaisiin saavuttaa. [3.]

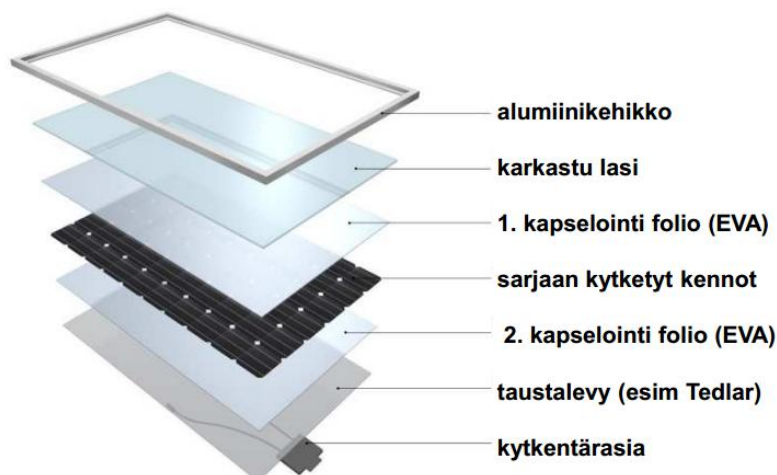
4.1 Aurinkopaneelit

Aurinkopaneelilla tarkoitetaan aurinkokennoista koostuvaa laitetta, jonka tarkoituksena on muuntaa auringonsäteily sähköenergiaksi hyödyntäen valosähköistä ilmiötä. Sarjaan kytkettyjä aurinkopaneeleita kutsutaan aurinkopaneelistoiksi. Kuvassa 18 on havainnollistettu aurinkopaneelitojen koostumista.

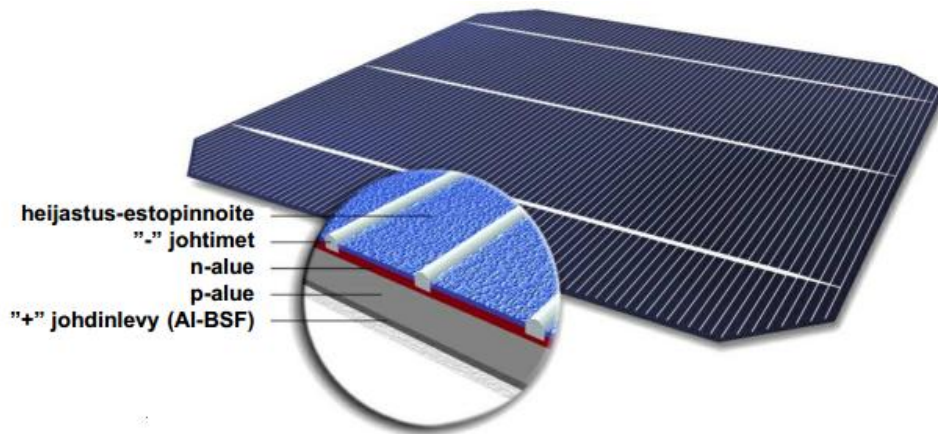


Kuva 18. Aurinkopaneeliston koostuminen [10, muokattu].

Perinteiset aurinkopaneelit ovat rakenteeltaan melko samanlaisia. Paneelin pinnalla on karkaistua lasia oleva suojapinta ja reunoilla alumiinikehikko. Sarjaan kytketyt pii-aurinkokennot ovat ohuiden suojakalvojen välissä. Taustalevyn takapuolella on paneelin kytkentärasia, josta se voidaan yhdistää toisiin aurinkopaneeleihin tai invertteriin. Kuvissa 19 ja 20 on esitetty aurinkopaneelin ja -kennon rakenteet kerroksittain.



Kuva 19. Aurinkopaneelin rakenne [15].



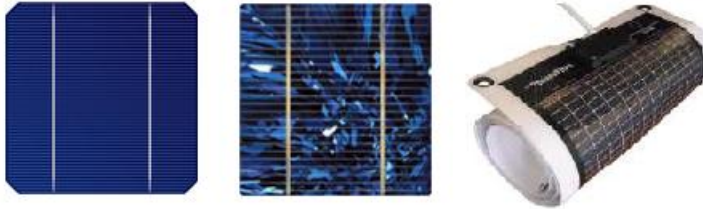
Kuva 20. Pii-aurinkokennon rakenne [15].

Piikentöjen hyötysuhdetta heikentävät metallijohtimien liitokset, resistanssi ja heijastukset paneelin päällä olevasta lasista. Monet valmistajat käyttävätkin lasin pinnalla heijastuksia vähentävää pinnoitetta, mikä nostaa paneelin hyötysuhdetta. Tummempi paneelin pinta heijastaa vähemmän valoa. Kentöjen pinnalle juotetut johtimet siirtävät syntynyttä sähkövirtaa ulkoiseen kuormaan, mutta samalla ne vievät pinta-alaa itse aurinkokennoilta, sillä johtimien kohdalla valo ei pääse kulkemaan puolijohdemateriaaliin tuottamaan sähköä.

Pii (Si) on yleisin aurinkokennojen valmistusmateriaali, koska sitä on paljon saatavilla ja se on suhteellisen edullista. Piin käyttötavan mukaan aurinkopaneeleita on kolmea perustyyppiä: yksi- ja monikiteisiä sekä amorfisia. Yksikiteisten piikentöjen (crystalline silicon, c-Si) etuna on korkea hyötysuhde, mutta valmistustavasta johtuen niiden hinta on myös muita korkeampi. Parhaimmillaan laboratorio-oloissa yksikidekentöillä on päästy jopa 25 %:n hyötysuhteisiin, mutta markkinoilla olevien kentöjen hyötysuhteet jäävät kuitenkin alle 20 %:iin.

Monikiteisestä piistä (multicrystalline silicon mc-Si) valmistetut aurinkokennot jäävät hyötysuhteeltaan hieman yksikiteisestä piistä valmistettujen kentöjen jälkeen, niiden hyötysuhteiden ollessa keskimäärin 11–15 % luokkaa. Monikiteiset aurinkokennot ovat hinnaltaan huomattavasti yksikiteisiä edullisempia.

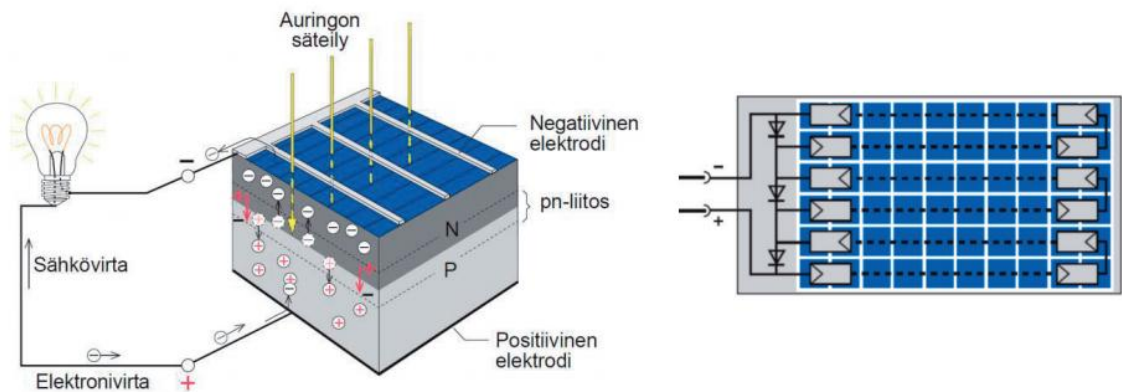
Amorfisesta piistä valmistetaan ohutkalvoisia paneeleita. Amorfisessa kiderakenteessa atomit ovat täydellisessä epäjärjestyksessä. Amorfisten kennojen etuna on kennojen ohuus ja niiden joustavuus. Kennojen hyötysuhde jää noin 10 %:iin, joten ne vaativat enemmän asennuspinta-alaa kuin kiderakenteiset kennot. Kuvassa 21 nähdään aurinkokennojen ja ohutkalvopaneelin rakenne-erot. [3; 20.]



Kuva 21. Yksi-, ja monikide aurinkokenno sekä ohutkalvoinen paneeli [18;19].

4.1.1 Aurinkopaneelien toiminta

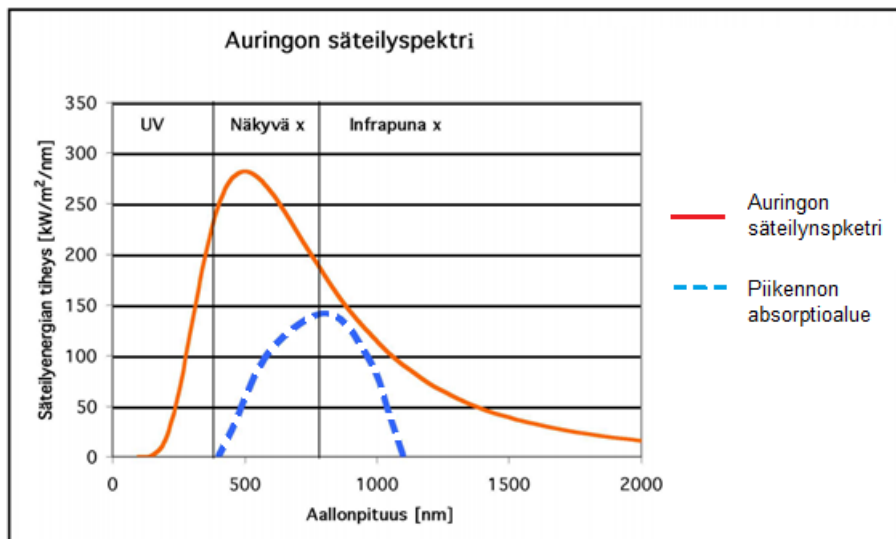
Aurinkopaneelin peruselementtejä ovat puolijohdemateriaaleista valmistetut aurinkosähkökennot, jotka tuottavat tasasähköä valosähköiseen ilmiöön perustuen. Puolijohdemateriaalien ominaisuutena on eristävyys normaaliolosuhteissa. Ne johtavat sähköä vasta kun auringonsäteily osuu niihin. Aurinkokennojen rakenne on kaksiosainen. Toinen puolijohdekerroksista on boorilla seostettu p-tyyppin kerros ja toinen fosforilla seostettu n-tyyppin kerros. Näiden puolijohdekerrosten välille syntyy pn-liitos, joka p-puolelle muodostuu positiivinen varaus ja n-puolelle negatiivinen varaus. Liitoksen väliin jäävälle rajapinnalle syntyy valosähköisestä ilmiöstä johtuen sähkökenttä. Sähkökenttä estää varausten kulkemisen rajapinnan yli n-puolelta p-puolelle, aiheuttaen aurinkokennon ylä- ja alapinnan välille jännite-eron. [3; 11.]



Kuva 22. Aurinkokennon toimintaperiaate ja sarjaan kytketty aurinkopaneeli [12].

Kuvassa 22 on havainnollistettu aurinkokennon toiminta, ja lisäksi siinä on periaatekuva sarjaan kytkettyjen kennojen muodostamasta aurinkopaneelistä. Kuvassa oikealla näkyvät myös sarjojen rinnalla uudemmissa paneeleissa olevat ohitusdiodit. Sarjaan kytkennässä paneelin osittainen varjostuminen vaikuttaa tehoon koko kennosarjassa. Ohitusdiodien vuoksi koko kennoston toiminta ei häiriinny, vaikka osa paneelista jäisi varjoon. [12.]

Valosähköisessä ilmiössä puolijohteen elektronit vastaanottavat niin paljon energiaa sähkömagneettisesta säteilystä, että ne irtautuvat atomiytimen vetovoimasta. Seurauksena fotoni absorboituu atomiin vapauttaen siitä elektrodin. Samalla fotoni katoaa antaen energiansa elektrodille. Auringonsäteilyn fotonit saavat siis puolijohteen elektronit värähtelemään säteilyn antamasta energiasta. Saavuttaessaan riittävän suuren energian siirtyvät elektrodit puolijohteen valenssivyöltä johtavuusvyölle. Tämä jättää valenssivyölle tyhjän paikan (aukon), joka on sähkövaraukseltaan positiivinen ja kykenee kuljettamaan sähkövirtaa. [11.]



Kuva 23. Auringon säteily spektri ja piikennon absorptioalue [20, muokattu].

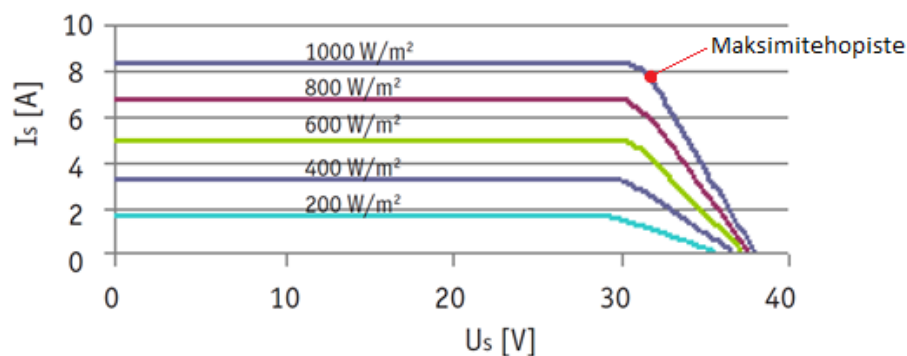
Kuvasta 23 nähdään, että maksimi aallonpituus, jolla fotoni saa elektroniaukon aikaan piikennossa, on 1150 nm eli 1,15 μm . Tyypiltään tämä valo on lyhytaaltoista infrapunasäteilyä, jonka aallonpituus on melko lähellä näkyvän valon rajaa (750 nm). Aallonpituudeltaan yli 1,15 μm suuruinen säteily ei siis enää tuota sähkövirtaa piikennossa, vaan ainoastaan kuumentaa sitä häitaten sähköntuottoa. Spektrin toisessa päässä oleva lyhytaaltainen ultraviolettivalo ei myöskään saa aikaan

sähkövirtaa piikennossa, vaan aiheuttaa kennon tuhoutumista hiljalleen pitkän ajan kuluessa.

Yhdestä aurinkokennosta saatava jännite on 0,5–0,6 V. Kennojen määrä vaihtelee paneelien kokojen mukaan. Esimerkkinä vaikkapa 36-kennoinen aurinkopaneeli, jolloin jännite riittää 12 V:n akkujen lataamiseen. Koska aurinkokennosta saatava sähkövirta on verrannollinen muodostuvien elektroniaukkoparien lukumäärään, riippuu sähkövirta näin ollen kennon pinta-alasta ja säteilyn voimakkuudesta. Kirkkaassa auringonpaisteessa kennoista saadaan noin 32 mA/cm² sähkövirtaa. Näin ollen 156 mm x 156 mm:n kokoinen kenno voi tuottaa maksimissaan 7,8 A. Kun kennot kytketään sarjaan, saadaan aurinkopaneelista yhtä suuri virta kuin yhdestä kennostakin. [20.]

4.1.2 Aurinkopaneelin ominaiskäyrä

Aurinkopaneelin ominaiskäyrältä nähdään, mitkä virran ja jännitteen arvot ovat sille mahdollisia. Oikosulkuvirralla tarkoitetaan paneelin tuottamaa enimmäisvirtaa, paneelin napojen ollessa kytkettynä oikosulkuun. Tyhjäkäyntijännite on puolestaan paneelin suurin mahdollinen jännite. Se saavutetaan, kun kuormaa ei ole kytkettynä paneeliin. Tärkeä piste aurinkopaneelin ominaiskäyrällä on maksimitehopiste eli toimintapiste. Tällä tarkoitetaan virran ja jännitteen arvoja, joilla saadaan suurin ulostuloteho kussakin käyttötilanteessa. Käytännössä maksimitehopiste on hankala saavuttaa valaistusolosuhteiden vaihtelun takia. Lisäksi kirkkaalla auringonpaisteella paneelin lämpötilan nousu heikentää paneelin tehoa vaikeuttaen samalla maksimitehopisteen tavoittelua.



Kuva 24. 255 W_p (ITS SolarWATT M250-60 AC) -aurinkopaneelin ominaiskäyrät eri säteilyvoimakkuuksilla [21].

Kuvasta 24 nähdään 255 W_p :n paneelin ominaiskäyrät eri auringonsäteilyn voimakkuuksilla. Käyristä voidaan todeta paneelin tuottaman virran pienentyvän lähes samassa suhteessa kuin säteily. Paneelin jännite laskee myös säteilyn pienentyessä. Maksimitehopiste on käyrällä hieman sen jälkeen kun virta alkaa laskea. [20.]

4.1.3 Aurinkopaneelien tuottama teho

Aurinkopaneelien teho voidaan laskea Joulen lain avulla, kaavalla 9.

$$P = UI \quad (9)$$

jossa

P	teho (W)
U	jännite (V)
I	virta (A)

Paneelin tuottama energia saadaan kaavalla 10.

$$E = Pt \quad (10)$$

jossa

E	energia (Wh)
P	teho (W)
t	aika (h)

Esimerkkinä kuvan 23 arvoilla napajännitteen ollessa 31 V ja virran 8 A viiden tunnin ajan saadaan paneelin tehoksi $P = 31 \text{ V} \times 8 \text{ A} = 248 \text{ W}$ ja energiaksi $E = 248 \text{ W} \times 5 \text{ h} = 1240 \text{ Wh}$. [20.]

Jotta aurinkopaneeleita voitaisiin paremmin vertailla keskenään, ilmoitetaan niiden tehot tiettyjen olosuhteiden mukaan. Standardiolosuhteita kuvaa STC-arvo (Standard Test Conditions), jossa auringonsäteilyn voimakkuus on 1000 W/m^2 , paneelin lämpötila $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ja auringon spektri on 1,5 (normitettu ilmamassalle, auringon ollessa $41,81^\circ$ kulmassa horisontin yläpuolella). Standardioloissa ilmoitetut paneelien nimellistehot

ovat yksikössä W_p (Watts peak). Jotkut valmistajat ilmoittavat tuotteensa arvot myös NOCT (Normal Operation Cell Temperature) arvoilla. Tällöin säteily on 800 W/m^2 , lämpötila $20 \text{ }^\circ\text{C}$, tuulennopeus 1 m/s ja auringon spektri 1,5. [20; 21.]

Aurinkopaneelin hyötysuhteella tarkoitetaan paneelin tuottaman sähkötehon ja paneelin saaman auringonsäteilytehon suhdetta. Aurinkopaneelin hyötysuhde STC-olosuhteissa voidaan laskea kaavalla 11.

$$\eta_{stc} = \frac{f V_{oc} I_{sc}}{G A} \quad (11)$$

jossa

η_{stc}	paneelin hyötysuhde, stc-olot
f	täyttökerroin, yleensä 0,71–0,74
V_{oc}	tyhjäkäyntijännite (V)
I_{sc}	oikosulkuvirta (A)
G	auringonsäteilyn voimakkuus (W/m^2)
A	paneelin pinta-ala (m^2)

Täyttökertoimella tarkoitetaan todellisen sähkötehon tuoton suhdetta teoreettiseen maksimiin tietyissä olosuhteissa. Se voidaan laskea kaavalla 12.

$$f = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (12)$$

jossa

f	täyttökerroin
I_m	todellinen maksimivirta (A)
V_m	todellinen maksimijännite (V)
I_{sc}	oikosulkuvirta (A)
V_{oc}	tyhjäkäyntijännite (V)

Aurinkopaneelien hyötysuhteeseen vaikuttavia asioita on monia, joista lämpötila on yksi merkittävimmistä.. Säteilyn mukana tulevien fotonien ylimääräinen energia muuttuu paneelissa lämmöksi. Osalla fotoneista ei puolestaan ole tarpeeksi energiaa sähkövirran aikaansaamiseksi. Resistiivisten häviöiden johdosta osa sähköenergiasta

muuttuu näin lämmöksi paneelissa sekä johtimissa. Myöskään kaikki sähkövarauksen kuljettajat eivät saavuta paneelin virtakontakteja. Ilmiötä kutsutaan keruuhäviöksi. Lisäksi otetaan huomioon myös heijastuminen ja kidevirheissä sekä puolijohde-metalliliitoksissa tapahtuva rekombinaatio. [22; 23.]

Aurinkopaneelien käyttöolosuhteiden hyötysuhde voidaan laskea kaavalla 13.

$$\eta = k_1 \times \eta_{stc} \times [1 + k_2 \times (\vartheta - 25^\circ\text{C})] \quad (13)$$

jossa

η	aurinkopaneelin hyötysuhde käyttöolosuhteissa
k_1	häviökerroin, yleensä 0,90–0,95
η_{stc}	paneelin hyötysuhde, stc-olot
k_2	maksimitehon lämpötilakerroin, esim. -0.0005 /°C
ϑ	ympäristön lämpötila (°C)

Kaavassa 13 huomioidaan vaihtuva ympäristön lämpötila, joka kesäisin heikentää ja talvisin parantaa aurinkopaneelin hyötysuhdetta. [22.]

Paneelin jännitteen määrää siihen kytketty kuorma tai akusto. Virta hakeutuu kyseistä jännitettä vastaavaan pisteeseen säteilyn ja lämpötilan mukaisella ominaiskäyrällä.

Kuorma voidaan laskea Ohmin lain kaavalla 14.

$$R = \frac{U}{I} \quad (14)$$

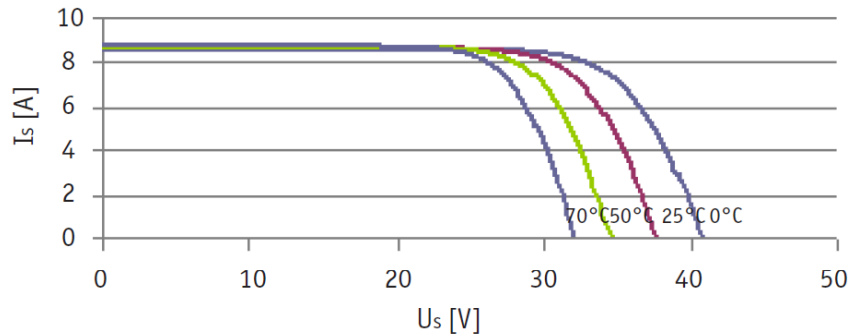
jossa

R	kuorman resistanssi (Ω)
U	paneelin napajännite (V)
I	virta (A)

Kuorman resistanssin ollessa pieni pienenevät myös jännite ja paneelin tuottama teho. Toisaalta myös liian iso resistanssi pienentää virtaa ja jättää tehon samalla pieneksi. Suurin teho saavutetaan aina kunkin ominaiskäyrän maksimitehopisteessä, mutta on

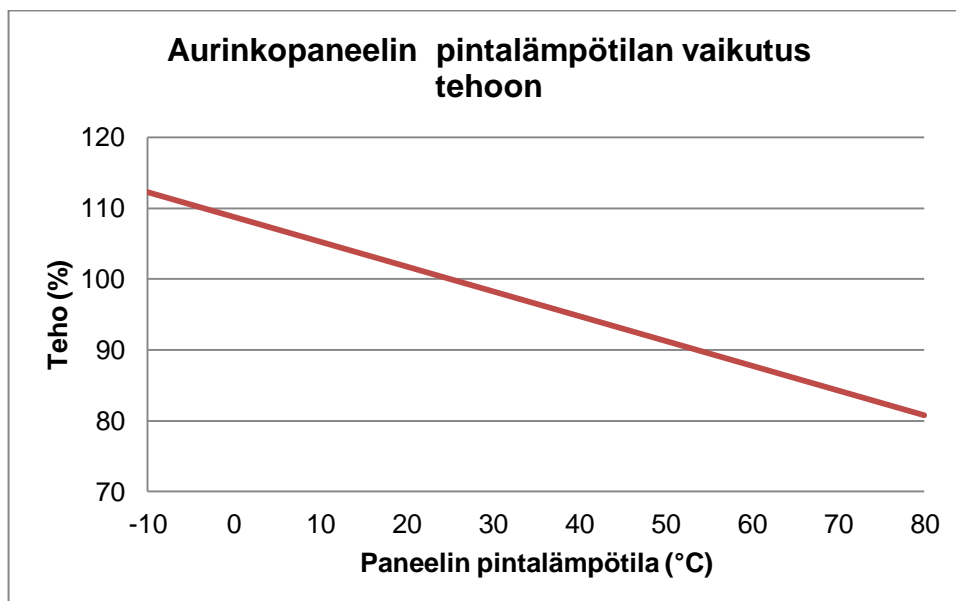
muistettava, että säteilyn tai lämpötilan muuttuessa myös toimintapisteen paikka muuttuu. Näin ollen tämä vaikuttaa myös resistanssin suuruuteen. [20.]

4.1.4 Lämpötilan vaikutus paneelien tehon tuottoon



Kuva 25. Aurinkopaneelin ITS SolarWATT M250-60 AC ominaiskäyrät eri paneelin pintalämpötiloilla [21].

Kuvassa 25 on havainnollistettu erään aurinkopaneelin ominaiskäyrien muutokset paneelin pintalämpötilan muuttuessa. Lämpötilan noustessa termisten varaustenkuljettajien määrä kasvaa paneelissa lisäten marginaalisesti paneelin virtaa. Vaikutus on suuruudeltaan kuitenkin vain noin $+0,065 \text{ \% /}^\circ\text{C}$. Sen sijaan merkittävästi suurempi vaikutus lämpötilalla on paneelin tyhjäkäyntijännitteeseen, joka putoaa voimakkaasti lämpötilan noustessa. Piikidekennoilla jännitteen lasku on noin $-0,35 \text{ \%:sta/}^\circ\text{C}$ jopa $-0,5 \text{ \%:iin/}^\circ\text{C}$. Jännitteen voimakkaampi pieneneminen verrattuna virran nousuun lämpötilan kasvaessa johtaa siihen, että tehon alentuminen on lähes samaa luokkaa jännitteen laskemisen kanssa paneelin pintalämpötilan noustessa.



Kuva 26. Laskettu aurinkopaneelin teho eri pintalämpötiloilla. Tehon lämpötilakerroin $-0,35 \text{ \%/}^\circ\text{C}$. Normaaliteho 100 %, STC-olot ($25 \text{ }^\circ\text{C}$).

Kuvasta 26 nähdään paneelista saatu suhteellinen teho paneelin eri pintalämpötiloilla. Lämpötilakertoimena kuvassa on käytetty arvoa $-0,35 \text{ \%/}^\circ\text{C}$. Tämä tarkoittaa karkeasti 10 %:n tehon muutosta, kun paneelin lämpötila muuttuu $29 \text{ }^\circ\text{C}$. Ulkolämpötilan ollessa $25 \text{ }^\circ\text{C}$ voi paneelin lämpötila nousta kirkaalla auringonpaisteella helposti yli $50 \text{ }^\circ\text{C}$:seen johtuen pitkäaaltoisesta infrapunasäteilystä, jota paneeli ei pysty hyödyntämään. Tämä tarkoittaa normaalioloissa laadukkaallakin paneelilla 10 %:n tehon menetystä. Huonommilla paneeleilla tehohäviö voi olla lähes kaksinkertainen. Tämä on tärkeää muistaa paneelien sijoituksessa. Suunniteltaessa paneelien sijaintia on hyvä ottaa huomioon, että tuuli ja ilmavirtaukset pääsisivät esteettä viilentämään paneeleita. Lisäksi tulisi välttää sijainteja, joissa lähellä olevat pinnat kuumenevat auringonpaisteella helposti, esim. mustat huopakatot. Kylmillä keleillä aurinkopaneelin toiminta puolestaan tehostuu lämpötilan laskiessa. [20.]

4.1.5 Aurinkopaneelin suuntauksen vaikutus tehontuottoon

Auringonsäteilyn tullessa kohtisuoraan paneelin pintaan sen kallistuskulma on samansuuruinen kuin auringon zenittikulma. Maapallon liikkeiden vuoksi auringon korkeus vaihtelee jatkuvasti, niin päivittäin kuin vuodenaikojenkin mukaan. Espoon leveysasteilla ($60,2^\circ$ pohjoista leveyttä) aurinko on korkeimmillaan keskipäivällä kesäkuussa $53,3^\circ$ ja matalimmillaan joulukuussa alle 7° horisontin yläpuolella

keskiarvon ollessa noin 30° (ks. kuva 14). Päivittäinen auringon korkeus vaihtelee nollassa kyseisen päivän maksimikorkeuteen. Matalilla korkeuksilla on hyvä muistaa myös ilmakehän vaikutus auringonsäteilyyn. Suora säteily heikkenee yli 50 %, kun auringon korkeus on alle 15° horisontista (ks. kuva 15).

Suomen oloissa kiinteästi sijoitetun paneelin optimaalinen kulma on näin ollen noin $30\text{--}40^\circ$, jos huomioidaan pelkästään suora säteily. Hajasäteilyn osuus vuotuisesta säteilymäärästä on kuitenkin noin 50 % (pilvisinä päivinä 100 %), joten tarvitaan tarkempaa tarkastelua kulmien määrittelyyn. [20.]

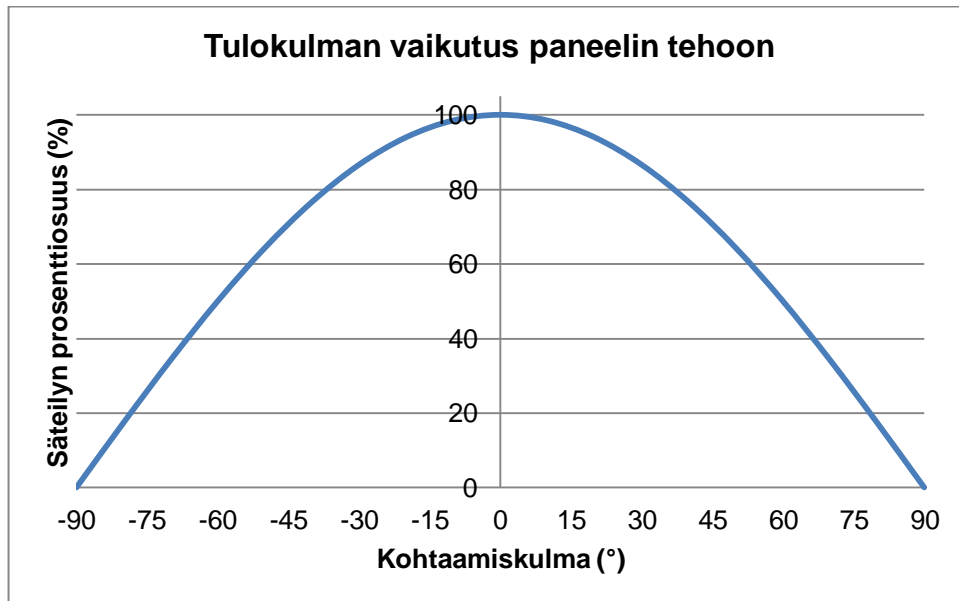
Eri kulmissa paneelin pinnalle tuleva suora säteily voidaan laskea kaavalla 15.

$$P_s = SA \cos \alpha \quad (15)$$

jossa

P_s	säteilyn teho (W)
S	suoran auringonsäteilyn voimakkuus (W/m^2)
A	paneelin pinta-ala (m^2)
α	paneelin normaalin ja auringonsäteiden välinen tulokulma ($^\circ$)

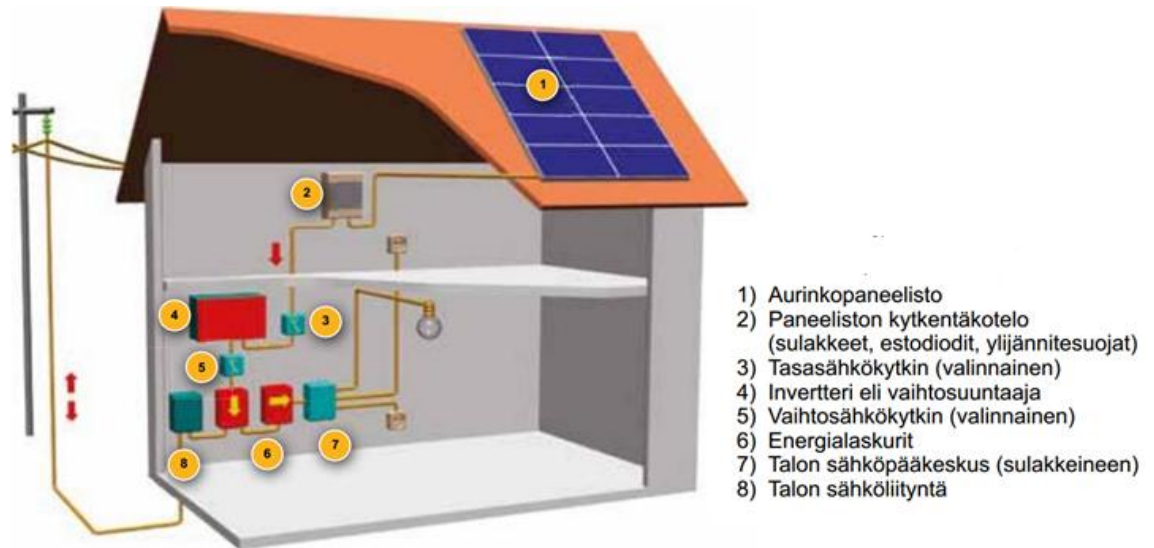
Säteilyteho on suurimmillaan, kun α on nolla. Tehon muuttumista on havainnollistettu kuvassa 27. Säteilyteho pienenee noin 13 % tulokulman ollessa 30° . Tämän jälkeen kulman suurettuna teho putoaa nopeammin. 60° :n kulmalla teho on enää 50 % verrattuna kohtisuoraan säteilyyn. Auringonsäteiden kohtaamiskulmaa on tutkittava aina kahdessa suunnassa (korkeus ja atsimuutti). Molempien kulmien ollessa 30° tulokset kerrotaan keskenään, jolloin saadaan tehon arvoksi 75 % ($\cos 30^\circ \times \cos 30^\circ = 0,75$). 60° :n tulokulmilla tämä tarkoittaa enää 25 %:n tehoa. Tulokulmaa tarkasteltaessa on huomioitava myös heijastukset paneelin pinnasta, varsinkin suurilla tulokulmilla (ks. kuva 12). [20.]



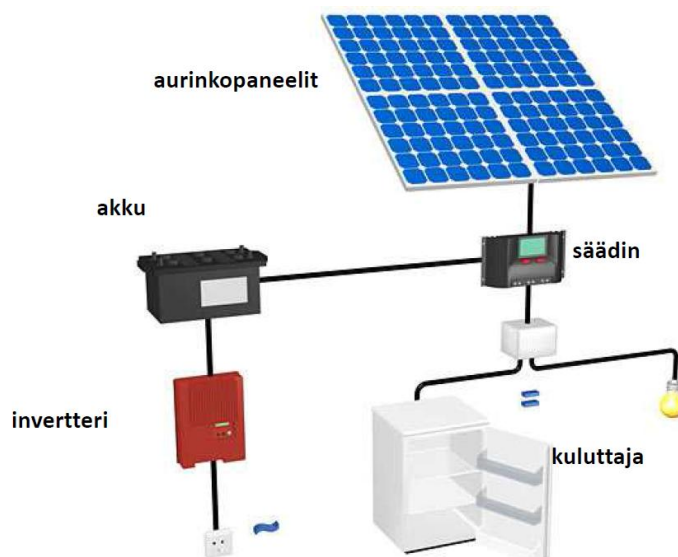
Kuva 27. Tulokulman vaikutus paneelin saamaan auringonsäteilyn tehoon [20].

4.2 Aurinkosähköjärjestelmät

Aurinkosähköjärjestelmiä on autonomisia (omavaraisia) sekä verkkoon kytkettyjä. Tehonlähteenä toimivat aurinkosähköpaneelistot, jotka tuottavat tasasähkökuormia suoraan, vaihtosähkökuormia invertterin (vaihtosuuntaajan) kautta tai kumpaakin. Omavaraisten järjestelmien käyttökohteita ovat esimerkiksi vapaa-ajan asunnot, veneet, asuntovaunut, akkujen latausjärjestelmät, syrjäseutujen sähköistys sekä radioyhteydet ym. Verkkoon kytkettyjä sovelluskohteita ovat rakennusten pienjärjestelmät sekä sähkölaitosten aurinkovoimalat. Lisäksi verkkoon voidaan kytkeä rakennusten katoille ja julkisivuihin asennettuja laitteistoja. Näiden ensisijaisena tarkoituksena on vähentää kiinteistön ostosähkön tarvetta. Kaikista verkkoon kytketyistä laitoksista voidaan syöttää oman kulutuksen ylittävä osa vaihtosuuntaajan kautta yleiseen sähköverkkoon. Vastaavasti kun auringosta ei saada riittävästi tehoa omaan tarpeeseen, se voidaan ostaa sähköverkosta. Kuvissa 28 ja 29 on havainnollistettu verkkoon kytketty- ja autonominen järjestelmä. [3.]



Kuva 28. Periaatekuva rakennuksen verkkoon kytketystä aurinkosähköjärjestelmästä [9].



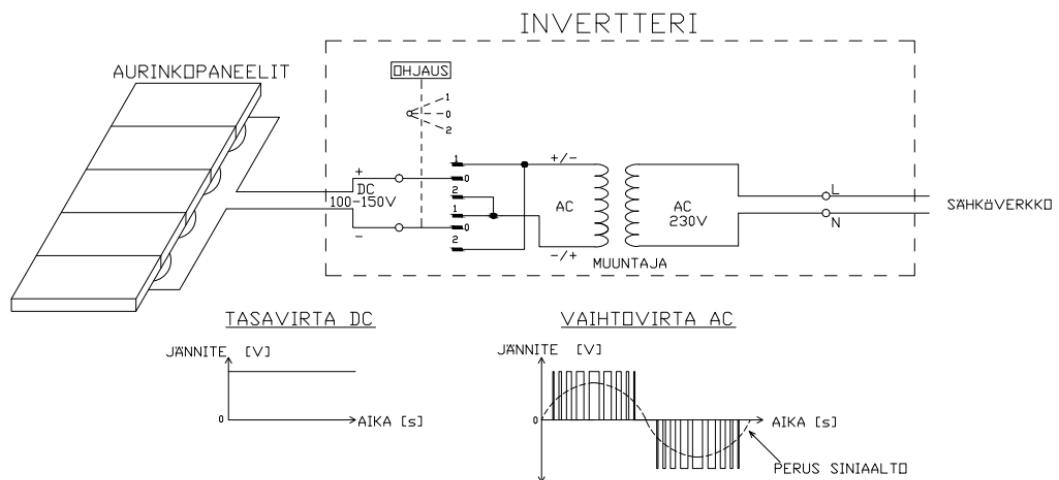
Kuva 29. Periaatekuva omavaraisesta aurinkosähköjärjestelmästä [15].

4.3 Aurinkosähköjärjestelmien muut laitteet

4.3.1 Invertteri

Suomessa yleisen sähköverkon sähkö on vaihtosähköä, jonka taajuus on 50 Hz. Aurinkopaneelien tuottama sähkö on puolestaan tasasähköä. Liitettäessä aurinkosähköjärjestelmää rakennuksen ja sitä kautta yleiseen sähköverkkoon tarvitaan invertteriä eli vaihtosuuntaajaa, jonka avulla tasasähkö voidaan muuntaa

vaihtosähköksi. Invertteri on elektroninen laite, joka kytkee saapuvaa tasajännitettä ohjaussignaalin mukaisesti, siten että lähtöjännitteeksi saadaan taajuudeltaan ja aallonmuodoltaan sopivaa vaihtosähköä. Kytkinelementteinä invertterissä toimivat tehopuolijohdekomponentit. Ohjaussignaali voidaan ottaa joko syötettävästä sähköverkosta tai se voidaan tuottaa invertterin sisäisellä oskillaattorilla. Invertteri on yleiseen sähköverkkoon kytketyssä järjestelmässä pakollinen laite. Invertteri muuntaa tulojännitteeltään 12 V, 24 V tai 48 V tasasähköä vaihtosähköön, jonka jännite on 110 V tai 240 V. [3.]



Kuva 30. Invertterin eli vaihtosuuntaajan toiminta [16].

Invertterin toimintaa on havainnollistettu kuvassa 30. Invertterin hyötysuhde on aurinkosähköjärjestelmissä noin 95 % optimaalisessa tilanteessa, kuorman ollessa 25–100 % vaihtosuuntaajan tehosta. Häviöt suurenevät jännitteen laskiessa alle invertterin optimaalisen alueen. Tästä johtuen aurinkopaneeliston sähköinen kytkentä on hyvä optimoida invertterin kanssa huomioiden auringonsäteilytehon voimakkuuden muutokset.

Aurinkosähköjärjestelmiin suunnitelluissa inverttereissä käytetään erityistä säätöyksikköä MPPT (Maximum Power Point Tracker), joka on maksimitehopisteen seurantalaitte. Tämän avulla aurinkosähköjärjestelmästä saadaan aina sen suurin mahdollinen teho. MPPT-laiteella pyritään asettamaan aurinkopaneeliston toimintapiste niin lähelle maksimitehon pistettä kuin mahdollista. MPPT toimii muuttamalla tasajännitettä ja sitä kautta tasavirtaa, jotta järjestelmä toimisi lähellä optimaalista toimintapistettä. Häviöiden kannalta on tärkeää, että laite toimii nopeasti ja tarkasti

olosuhteiden muuttuessa, esim. pilvisellä säällä, jotta voidaan hyödyntää mahdollisimman suuri osa säteilystä. [3; 17.]

4.3.2 Akusto

Akkuja käytetään ainoastaan omavaraisissa aurinkosähköjärjestelmissä, joissa sähköenergiaa tarvitaan ympäri vuorokauden. Akuston avulla voidaan tasata aurinkopaneelien jännitevaihteluja ja mahdollistaa suuret hetkelliset kuormatehot. Aurinkosähköjärjestelmissä on hyvä käyttää erityisesti käyttötarkoitukseltaan niihin suunniteltuja akkuja, sillä ne joutuvat todella kovalle rasitukselle. Akkujen on kestävä jatkuvia syväpurkauksia (varaustilan laskuja) vaurioitumatta. Lisäksi järjestelmät vaativat akustolta korkeaa lataushyötysuhdetta, hyviä sykliominaisuuksia (jatkuva lataus ja purku), alhaista itsepurkausta ja minimaalista huollon tarvetta. [3.]

4.3.3 Lataussäädin

Lataussäädintä tarvitaan aurinkosähköjärjestelmissä, joihin on liitetty akusto. Lataussäädin on aurinkopaneelien ja akuston välillä säätäen järjestelmän sähköä. Säädin optimoi akuston latautumista ja estää akkujen ylilatautumisen. Säätimissä on myös estodiodeja, jotka suojaavat akuston purkautumista yöaikaan paneelien kautta. Lataussäätimissä käytetty säädintekniikka perustuu yleensä pulssileveyden modulaatioon (PWM, Pulse-Width Modulation), jossa kuormaan menevää jännitettä säädetään muuntamalla pulssisuhdetta siten, että yhden värähtelyjakson ajalta laskettuna lähtösignaalin keskiarvo on sama kuin modulointisignaalin arvo. Tämän ansiosta voidaan akun varaustilaa pitää mahdollisimman korkealla. Akustoa ladataan päivän aikana, ja kun saavutetaan haluttu jännitetaso, kytkee PWM-piiri aurinkopaneelilta saatavan energian jatkuvasti päälle ja pois. Näin saadaan jännitetaso pysymään halutulla tasolla ja maksimoidaan aurinkoenergian saanti. [3; 26.]

4.3.4 Aurinkopaneelien kiinnikkeet

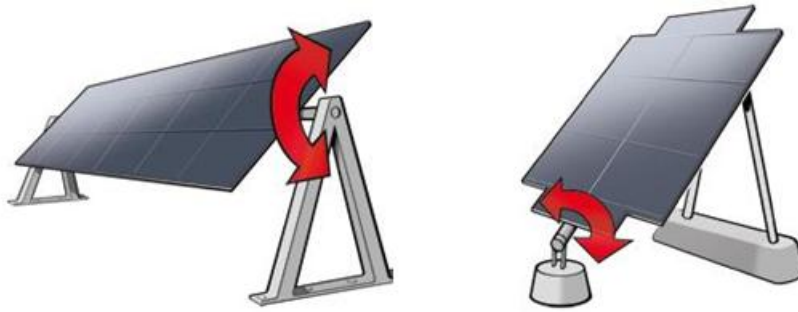
Aurinkopaneelit ja -paneelistot vaativat lujan ja kestävä kiinnityksen. Suomen oloissa puuskittaiset tuulet ja lumipeite talvisin pakottavat kiinnittämään erityistä huomiota kannakkeisiin. Kiinnitykseen on perinteisesti käytetty alumiinista, ruostumattomasta teräksestä tai galvaanisesta teräksestä valmistettuja telineitä. Telineiden valinnassa on syytä huomioida myös asennuskulmien muuntomahdollisuudet. Katolle asennettaessa tulee huomioida riittävä asennuskorkeus talvisin lumipeitteen ja kesäisin paneelien tuuletuksen vuoksi. [14.]

4.3.5 Automaattiset suuntausjärjestelmät

Automatisoiduilla suuntausjärjestelmillä pyritään parantamaan aurinkopaneelien päivittäisiä tuottoja, seuraamalla auringon liikerataa ja näin maksimoiden suoran säteilyn osuutta. Aurinkoa seuraavilla laitteilla saavutetaan noin 20–35 %:n lisäys energiansaannissa vuositason sijainnista riippuen. Suomessa tämä tarkoittaa keväällä ja syksyllä noin 5–10 %:n lisäystä, mutta talvella jäädään vain muutamien prosenttien lisäykseen vuotuisessa energiansaannissa.

Automatisoituja suuntausjärjestelmiä on kahta eri tyyppiä. Aktiivisessa järjestelmässä paneelia ohjataan elektronisesti, ja näin ollen ne kuluttavat pienen määrän sähköä. Passiiviset järjestelmät toimivat hydraulisesti. Niissä käytetään nestettä jolla on matala kiehumispiste. Auringonsäteilyn osuessa nesteeseen muodostuva kaasun paine liikuttaa mekanismia ja kääntää paneelit kohti aurinkoa. Aktiivista järjestelmää käytetään laajamittaisissa aurinkoenergian hyödyntämiskohteissa (aurinkovoimalat), kun taas hieman epätarkempi passiivinen järjestelmä sopii hyvin perustuotantoon. Järjestelmät ovat melko kalliita ja vaativat ylimääräistä huoltoa sekä varaosia mahdollisten rikkoutumisten vuoksi. Lisäksi laitteet vaativat erityiset telineet, joiden paino voi asettaa rajoitteita esim. kattoasennuksille. Suomen oloissa seurantalaitteiden käyttö on melko vähäistä. Tämä johtuu siitä, että laitteiden toiminta perustuu suoran säteilyn maksimointiin, kun taas Suomen oloissa noin 50 % säteilystä on hajasäteilyä. Näin ollen laitteella saatava hyöty jää pienemmäksi kuin alueilla, jossa suoran säteilyn määrä kokonaissäteilystä on suuri. Lisäksi Suomen talviolot aiheuttavat haasteita laitteiden toiminnalle. [13; 20.]

Yksiakselisilla järjestelmillä voidaan säätää joko auringon korkeussuuntaista tulokulmaa paneeliin, tai atsimuuttikulmaa. Kulma jota ei säädetä, asetetaan kiinteään optimaaliseen kulmaan auringon liikerataan nähden. Lähempänä päiväntasaajaa parempiin tuloksiin päästään auringon korkeussuuntaista tulokulmaa muuttamalla, kun taas suuremmilla leveyspiireillä isompi etu on atsimuuttikulman muutoksella.



Kuva 31. Yksiakseliset suuntausjärjestelmät. Vasemmalla auringon korkeussuuntaisen tulokulman säätö, oikealla atsimuuttikulman säätö [13].

Kaksiakselisia järjestelmiä käytetään vain suuremmissa tuotantojärjestelmissä, joissa on tärkeää maksimoida suora auringonsäteilyn määrä. Järjestelmät ovat todella kalliita ja vaativat ammattitaitoista henkilökuntaa. Tämän vuoksi järjestelmää käytetään lähinnä aurinkovoimaloissa. Kaksiakselisilla järjestelmillä voidaan seurata auringon liikerataa optimaalisessa kulmassa lähes kaikissa tilanteissa. Kuvista 31 ja 32 nähdään eri suuntausjärjestelmien toiminta. [14.]



Kuva 32. Kahdella akselilla varustettu suuntausjärjestelmä [13].

4.4 Aurinkosähköjärjestelmän takaisinmaksuaika

Keskimääräinen takaisinmaksuaika aurinkosähköjärjestelmille koosta riippuen on noin 15–25 vuotta. Moni valmistaja antaa takuun paneelien tehontuotolle. Yleisin tehotakuu on 80 % tuotosta 25 vuoden käytön jälkeen. Tämä tarkoittaa 0,8 prosenttiyksikön heikkenemistä tehontuotossa vuosittain. Toinen muuttava tekijä takaisinmaksuaikaa laskettaessa on sähkön hinta. Oletetaan laskuesimerkissä sähkön hinnan olevan hankinta hetkellä 0,12 €/kWh ja vuotuisen hinnan nousun 2 %. Keskimääräinen hinta aurinkosähköjärjestelmille on noin 2 €/W_p. Laskennassa huomioidaan myös invertterien uusiminen 13 vuoden välein. Aurinkosähköjärjestelmille on mahdollista saada energiatukea työ- ja elinkeinoministeriön (TEM) kautta 30 % järjestelmän hankintakustannuksista. Tämä huomioidaan myös laskennassa.

Esimerkilaskennassa tutkitaan paneelipinta-alaltaan 30 m²:n kokoisen järjestelmän takaisinmaksuaikaa. Taulukossa 2 näkyvät laskentaesimerkissä käytetyt lähtötiedot.

Taulukko 2. Takaisinmaksuajan esimerkilaskennan lähtötiedot.

Lähtötiedot		
TEM-investointituki	30	%
Paneelin tuoton lasku	0,8	%/a
Auringonsäteily	1000	kWh/m ² a
Sähkön hinta	0,12	€/kWh
Hinnan nousu	2	%/a
Inverterien uusinvestointi/13 v.	1500	€
Järjestelmä kustannus (alv. 0%, TEM 0%)	2	€/W _p
Nimellisteho	160	W _p /m ²
Paneelien pinta-ala	30	m ²
Alv	24	%

Järjestelmän tehoksi saadaan

$$30 \text{ m}^2 * 160 \text{ W}_p / \text{m}^2 = 4800 \text{ W}_p.$$

Järjestelmän hinnaksi ilman TEM-tukea tulee

$$4900 \text{ W}_p * 2 \frac{\text{€}}{\text{W}_p} * 1,24 = 11904\text{€ (sis. alv.)}.$$

TEM-tuen kanssa järjestelmän hinnaksi jää

$$11904\text{€} * (1 - 0,3) = 8332,80 \text{ € (sis. alv.)}.$$

Ensimmäisen vuoden sähköntuotto järjestelmällä on 4 800 kWh. Tästä eteenpäin paneelin tuotto heikkenee vuosittain, mutta samalla sähkön hinnan oletetaan nousevan. Taulukoissa 3 ja 4 on laskettu, milloin järjestelmä maksaa itsensä takaisin TEM-tuella ja ilman.

Taulukko 3. Esimerkki aurinkosähköjärjestelmän takaisinmaksuajan tarkastelu ilman TEM-tukea. Laskennan aikaväli 25 vuotta.

Vuosi	Sähkön hinta (€/kWh) (+2%/a)	Tuotto (kWh) (-0,8%/a)	Tuotto (€)	Kustannustilanne (€)
1	0,120	4800	576	11328
2	0,122	4761,60	582,82	10745,18
3	0,125	4723,51	589,72	10155,46
4	0,127	4685,72	596,70	9558,76
5	0,130	4648,23	603,77	8954,99
6	0,132	4611,05	610,92	8344,07
7	0,135	4574,16	618,15	7725,92
8	0,138	4537,57	625,47	7100,46
9	0,141	4501,27	632,87	6467,58
10	0,143	4465,26	640,37	5827,21
11	0,146	4429,53	647,95	5179,26
12	0,149	4394,10	655,62	4523,64
13	0,152	4358,94	-836,62	5360,26
14	0,155	4324,07	671,24	4689,02
15	0,158	4289,48	679,19	4009,84
16	0,162	4255,16	687,23	3322,61
17	0,165	4221,12	695,36	2627,25
18	0,168	4187,35	703,60	1923,65
19	0,171	4153,86	711,93	1211,72
20	0,175	4120,62	720,36	491,37
21	0,178	4087,66	728,89	-237,52
22	0,182	4054,96	737,52	-975,04
23	0,186	4022,52	746,25	-1721,28
24	0,189	3990,34	755,08	-2476,37
25	0,193	3958,42	764,02	-3240,39

← Invertterien uusinta

← Takaisinmaksuaika täyttyy

Taulukko 4. Esimerkki aurinkosähköjärjestelmän takaisinmaksuajan tarkastelu TEM-tuella. Laskennanaikaväli 25 vuotta.

Vuosi	Sähkön hinta (€) (+2%/a)	Tuotto (kWh) (-0,8%/a)	Tuotto (€)	Kustannustilanne (€)
1	0,120	4800	576	7756,8
2	0,122	4761,60	582,82	7173,98
3	0,125	4723,51	589,72	6584,26
4	0,127	4685,72	596,70	5987,56
5	0,130	4648,23	603,77	5383,79
6	0,132	4611,05	610,92	4772,87
7	0,135	4574,16	618,15	4154,72
8	0,138	4537,57	625,47	3529,26
9	0,141	4501,27	632,87	2896,38
10	0,143	4465,26	640,37	2256,01
11	0,146	4429,53	647,95	1608,06
12	0,149	4394,10	655,62	952,44
13	0,152	4358,94	-836,62	1789,06
14	0,155	4324,07	671,24	1117,82
15	0,158	4289,48	679,19	438,64
16	0,162	4255,16	687,23	-248,59
17	0,165	4221,12	695,36	-943,95
18	0,168	4187,35	703,60	-1647,55
19	0,171	4153,86	711,93	-2359,48
20	0,175	4120,62	720,36	-3079,83
21	0,178	4087,66	728,89	-3808,72
22	0,182	4054,96	737,52	-4546,24
23	0,186	4022,52	746,25	-5292,48
24	0,189	3990,34	755,08	-6047,57
25	0,193	3958,42	764,02	-6811,59

← Invertterien uusinta

← Takaisinmaksuaika täyttyy

Ilman TEM-tukirahaa takaisinmaksuajaksi muodostui noin 20,5 vuotta ja tuen kanssa 15,5 vuotta. Keskimääräinen takaisinmaksuaika aurinkosähköjärjestelmille koosta riippuen on noin 15–25 vuotta. [3; 34.]

5 Metrosol-aurinkoenergiaboratorio

Metropolia Ammattikorkeakoulu rakennutti vuonna 2013 Leppävaaran toimipisteeseensä aurinkoenergian tutkimus- ja mittaustutkimuslaboratorion. MetroSol-aurinkoenergiaboratoriota hyödynnetään RYM Oy:n sisäympäristötutkimusohjelman työpaketin Energy Efficient Control of Indoor Environment Metropolian osuudessa. MetroSol-aurinkoenergiaboratorion avulla Metropolian opiskelijat voivat tutustua aurinkolämmön ja -sähkön tuotantotapoihin, laitteisiin, järjestelmiin ja mittaustuloksiin. Laboratoriota on mahdollista seurata myös etäyhteydellä. Mittausdatat tallentuvat pilvipalvelimeen; näin ollen niitä voidaan käyttää kätevästi hyväksi analysointiin ja tutkimuksiin.

5.1 Aurinkosähköjärjestelmä

Vaikka laboratoriossa on myös aurinkolämpöjärjestelmä, kerrotaan tässä osuudessa työn aihealueeseen liittyen vain laboratorion aurinkosähköjärjestelmästä ja sen laitteista. Laboratorion aurinkosähköjärjestelmä on kytketty verkkoon, eli siitä on mahdollista syöttää saatu ylituotanto yleiseen verkkoon. Käytännössä kuitenkin kaikki aurinkopaneelilla tuotettu sähkö kulutetaan kiinteistössä.

MetroSol-aurinkoenergiaboratorion yhteydessä (rakennuksen B-osan katolla) on neljä erillistä aurinkopaneelistoa, joilla jokaisella on oma invertterinsä. Järjestelmän kokonaisteho on 4,9 kW_p. Paneelistot koostuvat viidestä sarjaan kytketystä aurinkopaneelistoista. Kaksi paneelistoista koostuu yksikidepaneeleista ja toiset kaksi monikidepaneeleista. Paneelit ovat suunnattu kiinteästi etelään (atsimuutti kulma = 0°), mutta niiden kallistuskulmia voidaan manuaalisesti säätää vaakatasosta aina pieneen ylikulmaan asti (0°–100°). Kuvassa 33 näkyvät paneelistojen asennukset. Tarkat tekniset tiedot paneeleista ovat opinnäytetyön liitteissä 1–2.



Kuva 33. MetroSol-aurinkoenergielaboratorion aurinkopaneelistot. Eturivissä monikidepaneelit (Innotech Solar - ITS EcoPlus 240W), takarivissä yksikidepaneelit (SolarWATT M250-60 AC 05).

Sääolosuhteiden seurantaan katolle on asennettu Vaisalan sääasema, jonka avulla voidaan seurata mm, ilman lämpötilaa, suhteellista kosteutta, ilmanpainetta, sadetta ja tuulta. Lisäksi katolla on auringonsäteilyn voimakkuuden mittaamiseksi kolme pyranometriä. Ne on asennettu eri kallistuskulmiin (0°, 30° ja 60°), jotta saadaan tarkempaa mittausdataa säteilyn osalta verrattaessa paneelien tuottoon.

5.2 Seurantaohjelmat

Aurinkopaneelien toimintaa ja tuottoa voi seurata kätevästi Sunny Portal -sivuston kautta. Sivusto laskee jokaisen paneeliston tuoton erikseen. Tuottoa voi seurata tunti-, päivä-, kuukausi- tai vuositasolla niin taulukkoarvoina, kuin graafisena esityksenäkin. Sivuston avulla on helppo vertailla eri paneelien mittaustuloksia halutulla aikavälillä. Invertterien toimintaa voi myös seurata ja ohjata netin välityksellä SunnyWebBox-sivuston kautta.

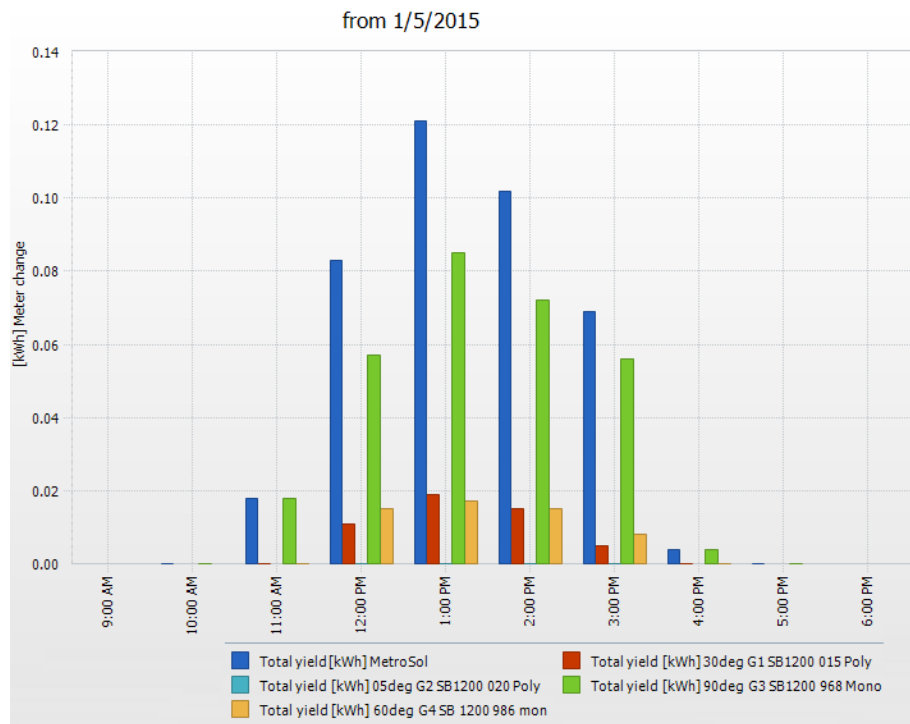
Aurinkopaneelien toimintaa voidaan seurata myös Schneider Electricin toimittaman StruxureWare-automaatiojärjestelmän kautta. Paneelien datan lisäksi järjestelmästä saadaan myös Vaisalan sääaseman ja pyranometriä mittaustulokset tarkempaa vertailua ja analyysejä varten.

Rakennuksen katolle on lisäksi asennettu 4 videokameraa, joiden kautta saadaan reaaliaikaista videokuvaa katolta. Tallentavien kameroiden avulla saadaan lisätietoa sääoloista ja talvisin voidaan tutkia esimerkiksi lumen vaikutuksia paneelien toimintaan.

5.3 Mittausdatan analysointi ja havainnot

Joulukuulta 2014 ja tammikuulta 2015 MetroSol-aurinkoenergiaboratoriosta saadun mittausdatan analysoinnin perusteella saatiin vertailtua paneelin pinnalle sataneen lumikerroksen vaikutusta paneelien toimintaan sekä lumen sulamista ja valumista pois paneelin pinnalta. Lisäksi pystyttiin havainnoimaan paneelin asennuskulman vaikutusta lumen valumiseen pois sen pinnalta.

Analysoinnissa selvisi, että jo hyvin ohut lumikerros (1–2 cm) vähentää paneelin tuottoa tuntuvasti. Kuvassa 34 on tilanne, jossa kolme laboratorion neljästä paneelistosta olivat ohuen lumikerroksen peittäminä koko päivän ajan. Sää oli erittäin pilvinen ja synkkä, minkä vuoksi myös ainoan lumesta puhtaan paneelin tuotto on erittäin pieni. Ulkolämpötila päivän aikana oli keskimäärin $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Kuva 34. Sunny Portal -ohjelmasta saadut aurinkopaneelistojen tuotot 5.1.2015.

Kuvassa 34 ainoa lumesta puhdas paneelisto on esitetty vihreinä pylväänä. Ohuesta lumikerroksesta muiden paneelistojen pinnalla johtuen niiden tuottama energia on alle 20 % puhtaana olevan tehosta.

Videotallennuksen avulla saadun datan perusteella pystyttiin tutkimaan lumikerroksen käyttäytymistä. On huomioitava että sääolosuhteet vaikuttavat todella paljon lumen sulamiseen ja sen valumiseen pois paneelin pinnalta. Tässä esimerkissä olosuhteet pysyivät kolmen päivän ajan hyvin samanlaisina. Päivät olivat erittäin pilvisiä keskilämpötilan ollessa noin $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ päivisin ja $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ öisin. Neljäntenä päivänä lämpötila nousi muutaman asteen plussan puolelle. Ensimmäisenä päivänä lumisateen loputtua 90° :n kallistuskulmaan asennettu paneelisto oli täysin puhdas lumesta, kun taas muut paneelistot olivat noin 2–3 cm:n paksuisen lumikerroksen peitossa. 60° :n kallistuskulmaan asennetut paneelit puhdistuivat lumesta hieman yli vuorokaudessa, kun taas 30° :n ja 5° :n asennetut paneelit puhdistuivat vasta kun lämpötila nousi plussan puolelle.

6 Energiantuoton mahdollisuudet vuoden epäedullisina aikoina

Tässä osiossa tarkastellaan, miten aurinkopaneelien tuottoa voisi parantaa Suomessa syys-, talvi- ja kevät aikaan. Marraskuusta helmikuulle aurinkopaneelien tuotto on noin 2–5 % vuoden kokonaistuotosta riippuen sääoloista ja asennuskulmista. Heikointa aurinkoenergian tuotto on marras- ja joulukuussa. Tammi- ja helmikuussa maa on useimmiten lumikerroksen peittämä, jolloin lumen aiheuttama hajasäteily nostaa selvästi tuottoa verrattuna marraskuuhun. Parempaan talvituottoon pyrittäessä täytyy suunnitteluun, laitteisiin, varjostuksiin ja sijaintiin kiinnittää erityistä huomiota. Talvella etuna muihin vuodenaikoihin nähden on paneelien matala pintalämpötila, mikä lisää paneelien tehollista tuottoa.

Loppusyksystä paneeleista saadaan vielä kohtuullisen hyvää tuottoa. Syys–lokakuun tuotto on vuotuisesta energiamäärästä noin 8–12 %. Keväällä voimistuvaa auringonsäteilyä tehostaa maassa oleva lumi, joka lisää hajasäteilyn määrää. Maalis–huhtikuun osuus vuotuisesta energiantuotosta on jo noin 18–22 %. [3; 5.]

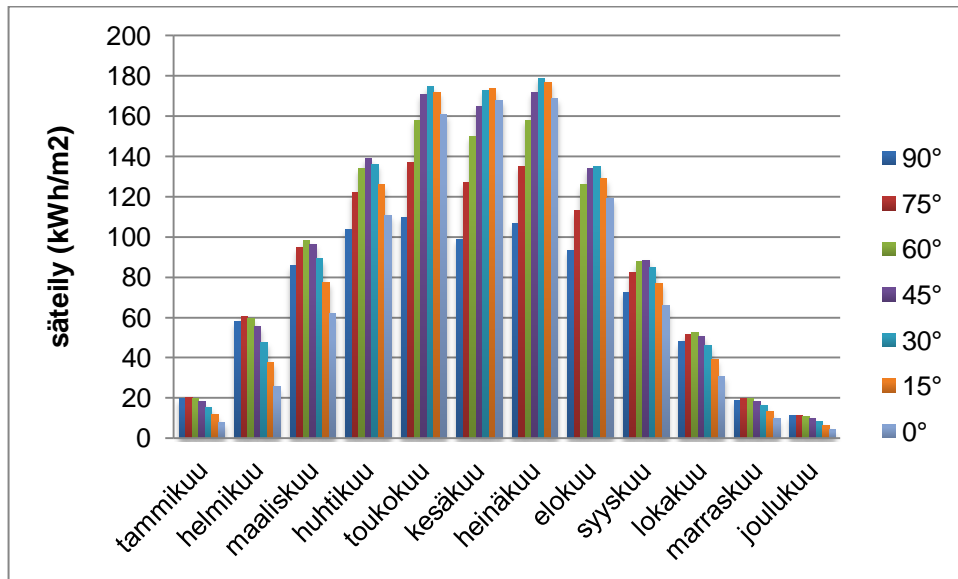
6.1 Energiantuotantoon vaikuttavat tekijät

Suurimmat aurinkopaneelien tuottoon vaikuttavat tekijät ovat säteilyn voimakkuus ja aurinkotunnit. Vaikka aurinkosähköjärjestelmä olisi optimaalisesti suunniteltu ja toteutettu, ei se tuota energiaa ilman riittävän voimakasta auringonsäteilyä. Talviaikaan Suomessa aurinkotunnit jäävät hyvin pieniksi. Tästä johtuen aurinkopaneelien tuoton lisääminen talvella ei vaikuta vuoden kokonaisenergiantuottoon kovin merkittävästi. Seuraavissa luvuissa on esitelty keinoja, joilla tuottoa epäedullisina aikoina voitaisiin kuitenkin lisätä.

6.1.1 Asennuskulmat

Käytettäessä kiinteää asennusta aurinkopaneeleille, eli kun suuntaus pidetään ympärivuoden samana, on optimaalisin kallistuskulma Etelä-Suomessa noin 45° atsimuuttikulman ollessa 0° . Tämä onkin yleisin valittu kulma, jos paneelien kiinnitys ja asennuspaikka sen sallivat. Rakennusten seinille ja julkisivuihin asennettujen paneelien kulmat ovat yleensä pystysuoria, mikä kesäaikaan heikentää niiden tuottoa optimaalisesta, mutta talvisin ne puolestaan toimivat paremmin. Yleisesti aurinkopaneeleita ei suositella asennettavaksi vaakasuoraan tai hyvin pieniin kallistuskulmiin. Tällöin heijastukset kasvavat suuriksi, ja suoran auringon säteilyn osuus vähenee tuntuvasti.

Asennuskulmien osalta talviaikana tuottoa voidaan parantaa kohteissa, joissa aurinkopaneeleja ei ole asennettu kiinteästi yhteen kulmaan. Osa aurinkopaneelien telineistä ja kiinnitystavoista mahdollistaa kulmien manuaalisen säädön. Tällöin asennuskulmia voidaan muuttaa eri vuodenaikoihin paremmin soveltuviksi. Kesäaikaan paneelit olisivat näin 45° :n kallistuskulmassa ja marras-helmikuun ajaksi paneelit voisi kääntää $70\text{--}90^\circ$:n kulmaan. Paneelien jyrkemmällä kulmalla talviaikaan vältytään paneelien tuoton katkeamiselta lumipeitteen vuoksi. Koska suurin osa auringonsäteilystä talvisin on hajasäteilyä, ei kallistuskulmalla ole niin suurta merkitystä suoran säteilyn osalta. Kuvassa 35 on esitetty kuukausittaiset keskiarvot suoralle auringonsäteilylle Etelä-Suomessa eri kallistuskulmilla.



Kuva 35. Lasketut suoran auringonsäteilyn kokonaismäärät Etelä-Suomessa eri kaltevuuskulmilla kuukausittain. Laskentaan on käytetty Euroopan komission tutkimuslaitoksen verkkosovellusta. [28.]

6.1.2 Sijainti

Aurinkopaneelit on erittäin tärkeää sijoittaa optimaaliselle paikalle rakennuksen katolla tai muualla kohteessa. Optimaalisen paikan määrittävät ympäristön varjostukset ja mahdolliset lisäheijastumiset. Mikäli mahdollista olisi paneelit asennettava niin, ettei niihin kohdistu lainkaan varjostumia mihinkään vuodenaikaan. Lisäheijastumisilla tarkoitetaan pintojen, kuten paneelien läheisyydessä olevien vaaleiden rakenteiden ja talviaikaan lumen aiheuttamia ylimääräisiä heijastuksia paneelisiin. Rannan läheisyyteen asennetut paneelit voivat tuottaa jopa 20 % enemmän sähköenergiaa heijastusten johdosta. Huomioitavaa varjostusten osalta ovat lisäksi suurien tehtaiden ilmaan aiheuttamat höyry- ja saastepilvet.

Myös maantieteellinen sijainti vaikuttaa energian tuottoon, vaikka säteily määrä olisikin sama. Erot aiheutuvat vesistöistä, joiden seurauksena kesäisin on hieman aurinkoisempaa ja vähemmän pilviä sekä talvisin lumipeite on ohuempi. [3.]

6.1.3 Aurinkopaneelien puhtaus ja pinta-ominaisuudet

Aurinkopaneelisiin kertynyt lika ja siitepöly puhdistuu pääsääntöisesti sateiden mukana pois. Tästä huolimatta aurinkopaneelit on hyvä pestä noin puolen vuoden

välein, varsinkin alueilla jossa siitepöly tai muu lika voi aiheuttaa hävikkiä aurinkopaneeleissa. Talvisin lumipeite tarttuu likaisen paneelin pintaan herkemmin kuin puhtaaseen ja kestää lisäksi kauemmin sulaa taikka valua pois. [3.]

6.2 Energiantuoton laskentavertailua talviaikana

Tässä luvussa esitellään MetroSol-aurinkoenergiaboratoriossa olevan aurinkosähköjärjestelmän laskennalliset talvikuukausien energiantuotot kahdessa eri tapauksessa. Tapauksessa 1 käytetään kiinteää 45°:n kallistuskulmaa aurinkopaneelille, eli kallistuskulmaa ei muuteta vuoden mittaan. Paneelistoista ei myöskään talviaikaan puhdisteta lumia pois, minkä aiheuttamat häviöt otetaan huomioon laskennassa. Tapauksessa 2 ovat aurinkopaneelistot 90°:n kallistuskulmassa. Laskennassa oletetaan, että talviaikaan satanut lumi ei tartu paneelitojen pinnalle.

Lähtötiedot

- Aurinkopaneelien tehollinen yhteispinta-ala on 29,2 m².
- Atsimuuttikulma 0°.
- Tapauksessa 1 kallistuskulmat 45°, tapauksessa 2 kallistuskulmat 90°.
- Aurinkokennojen yhteishyötysuhde 14 %.
- Tapauksessa 1 huomioidaan lumisateiden aiheuttamat häviöt paneeleissa.
- Säteilyarvot marraskuu–helmikuu taulukko 5

Taulukko 5. Kuukausittaisten säteilymäärien keskiarvot Espoossa kaltevuuskulmilla 90° ja 45° [28; 31; 32].

Kuukausi	JRC		NREL		Sitra & YM		Keskiarvot	
	Säteily 90° (kWh/m ²)	Säteily 45° (kWh/m ²)	Säteily 90° (kWh/m ²)	Säteily 45° (kWh/m ²)	Säteily 90° (kWh/m ²)	Säteily 45° (kWh/m ²)	Säteily 90° (kWh/m ²)	Säteily 45° (kWh/m ²)
marraskuu	19,00	18,50	12,6	13,5	11,52	12,48	14,37	14,83
joulukuu	11,20	10,10	4,65	4,96	4	4	6,62	6,35
tammikuu	20,10	18,30	18,29	16,43	11,28	10,5	16,56	15,08
helmikuu	58,00	55,40	59,92	54,88	40,26	39,16	52,73	49,81

Taulukossa 5 näkyvät eri tahojen antamat säteilyarvot kaltevuuskulmille 90° ja 45° Espoossa marraskuulta helmikuulle. Euroopan komission tutkimuskeskus (JRC – Joint Research Centre) antaa hieman suuremmat säteilyarvot Espoole kuin amerikkalainen

uusiutuvaan energiaan keskittynyt tutkimuslaitos NREL (National Renewable Energy Laboratory). Suomen ympäristöministeriön aurinkoenergian laskentaopas antaa puolestaan selvästi pienimmät säteilyarvot. Laskennassa on käytetty suuresta vaihtelusta johtuen näiden kolmen tahon antamien lukemien keskiarvoja.

Aurinkopaneeleista saatu sähköenergia voidaan laskea kaavalla 16.

$$E = G \times \eta \times A \quad (16)$$

jossa

E	tuotettu energia (kWh)
G	auringonsäteily (kWh/m ²)
η	aurinkopaneelien hyötysuhde
A	aurinkopaneelien tehollinen pinta-ala (m ²)

Sähköntuotto tapauksessa 1

$$E = (14,83 + 6,35 + 15,08 + 49,81) \text{ kWh/m}^2 \times 0,14 \times 29,2 \text{ m}^2 = 351,85 \text{ kWh}$$

Kun huomioidaan lumen aiheuttamat häviöt (paneelit lumen peitossa keskimäärin 20 % ajasta) saadaan tuotetun energian määräksi $351,85 \text{ kWh} \times 0,8 = 281,48 \text{ kWh}$.

Sähköntuotto tapauksessa 2

$$E = (14,37 + 6,62 + 15,08 + 52,73) \text{ kWh/m}^2 \times 0,14 \times 29,2 \text{ m}^2 = 369,04 \text{ kWh}$$

Tapauksessa 2 saatu energiamäärä on 88 kWh suurempi, mikä rahaksi muutettuna (sähkön ostohinnalla 12 c/kWh) tarkoittaa noin 11:tä euroa. Sääolot vaihtelet kuitenkin talvisin Etelä-Suomessa eri vuosien välillä suuresti. Runsaslumisena talvena pieneen kallistuskulmaan asennetut paneelit saattavat olla lumen peitossa suurimman osan talvesta, kun taas vähälumisena talvena paneelit saattavat pysyä puhtaana lumesta loivallakin kallistuskulmalla. Runsaslumisen talven tapauksessa MetroSol-aurinkoenergielaboratorion kokoisella järjestelmällä ylimääräinen tuotto tapauksessa 2 olisi noin 40–50 euroa marraskuusta helmikuulle, kun taas vähälumisena talvena rahallinen ero eri tapauksissa olisi vain muutama euro.

7 Yhteenveto

Aurinkoenergian tuotantoa on tutkittu ja kehitelty jo pitkään eri puolilla maailmaa. Useimmat tutkimukset keskittyvät kuitenkin vain tuotannon huippuaikoihin. Syys-, talvi- ja kevätajalle painottuvia tutkimuksia on suhteellisen vähän, joten katsottiin aiheelliseksi tehdä selvitys miten maassamme aurinkoenergiantuotantoa voisi kesäajan ulkopuolella tehostaa, sekä tutkia tuotantoon vaikuttavia tekijöitä. Insinööriytyö kuuluu RYM Oy:n sisäympäristötutkimusohjelman työpaketin Energy Efficient Control of Indoor Environment Metropolian osuuteen, johon osaltaan kuuluu myös työssä hyödynnetty Metropolia Ammattikorkeakoulun Leppävaaran toimipisteessä sijaitseva MetroSol-aurinkoenergiaboratorio.

Aurinkosähköenergian tuotto painottuu Suomessa kesäaikaan. Kesällä auringon säteily on voimakkaampaa ja aurinkotunteja on huomattavasti talvea enemmän, minkä vuoksi talviajan tuotantoon ei yleensä kiinnitetä suurta huomiota. Tässä opinnäytetyössä tehdyn kirjallisuusselvityksen avulla saatiin kerättyä tietoa syys-, talvi- ja kevätajan aurinkoenergian tuottoon vaikuttavista asioista. Kerätyn tiedon pohjalta hyödynnettiin erilaisia aurinkoenergian laskentaohjelmia ja MetroSol-aurinkoenergiaboratoriota analysointiin, jossa tarkoituksena oli tutkia, miten aurinkosähköenergiaa voitaisiin talviaikaan Suomessa hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti.

Työssä tutkittiin keskikokoisen aurinkosähköjärjestelmän (4,9 kW_p) energiantuottoa ja eri keinoja lisätä sitä talviaikaan. Analysoinnin ja laskennan tuloksena todettiin aurinkopaneelien talviajan tuottoon eniten vaikuttavan niiden kallistuskulmien sekä mahdollisten lumipeitteiden ja varjostuksien paneelien pinnalla. Selvitystyössä havaittiin myös, että aurinkoenergian tuoton vaihtelut talviaikoina vuosittain ovat melko suuria johtuen sääolojen vaihtelusta. Keskimäärin talviaikana saavutetut hyödyt aurinkopaneelien kallistuskulman optimoinnilla ja lumen puhdistuksella jäävät järjestelmien takaisinmaksuaikaan nähden hyvin pieniksi. Suomen leveysasteilla aurinkotuntien määrä on hyvin pieni talviaikaan ja säteilyn voimakkuus heikompaa kuin muina aikoina. Näistä syistä aurinkosähköenergian tuotot jäävät vääjäämättä erittäin pieniksi. Verratessa kesän huippuaikoihin koko marras-helmikuun välisen ajan tuotto saavutetaan kesäaikaan noin kahdessa viikossa. Vaikka talviajan tuotot ovatkin pieniä, voidaan 75–90°:n kallistuskulmalla talviaikana lisätä energiantuottoa noin 5–10 %. Korkeampaa kallistuskulmaa käytettäessä vähennetään myös paneelitojen pinnalle

kertyneen lumen aiheuttamia häviöitä. Talven lumisuudesta johtuen matalia kallistuskulmia käytettäessä häviöt talvikuukausina saattavat olla jopa 80 %.

Syys- ja kevätaikoina paneelistojen kallistuskulmat voisivat olla samassa 45°:n kulmassa kuin kesälläkin. Näin ollen kallistuskulmia tarvitsisi muuttaa säädettäviä telineitä käytettäessä vain kahdesti vuoden mittaan. Keväällä maassa olevan lumen heijastukset ja paneelien kesäaikaa alhaisempi pintalämpötila lisäävät tuntuvasti paneelien tehoa. Lisätehoa syys- ja kevätaikaan Suomen oloissa aurinkosähköjärjestelmiin saisi aurinkoa seuraavilla telineillä, mutta niiden kalliin hinnan, suuren tilantarpeen ja lisääntyvän huollontarpeen vuoksi niiden käyttö on jäänyt vähäiseksi. Talviaikaan seurantalaitteista ei ole merkittävää hyötyä, sillä valtaosa säteilystä talvisin on hajasäteilyä.

Tulevaisuudessa aurinkopaneelien pinnoitteiden kehittyessä lumisuus talviaikaan ei välttämättä ole enää ongelma. Järjestelmien ja laitteiden kehittyessä seurantalaitteiden käyttö saattaa yleistyä myös Suomessa. Syksyisin ja keväisin niiden avulla saatava lisäsäteily parantaisi vuotuista tuottoa noin 5–10 %. Kesällä lukema olisi vieläkin suurempi.

Työssä oli osatavoitteena kerätä mittaustuloksia Metrosol-aurinkoenergialaboratorion avulla energiantuotosta, auringonsäteilystä ja sääolosuhteista. Näitä olisi vertailtu laskennallisiin energiantuottoihin eri vuodenaikoina. Ongelmana oli kuitenkin automaatiojärjestelmän mittaustulosten tallentaminen. Olennaista dataa jäi saamatta, joten työssä päätettiin asettaa pääpaino kirjallisuusselvityksille. Tulevaisuudessa näkisin hyvänä opinnäytetyöaiheena tutkimuksen, jossa tehtäisiin kattava vertailu mittaustulosten ja laskennallisten arvojen välillä.

Lähteet

- 1 Aurinko. 2014. Verkkodokumentti. Ursa.
<<http://www.ursa.fi/extra/kosmos/a/aurinko.html>>. Luettu 6.1.2015.
- 2 Aurinkoenergia. 2015. Verkkodokumentti. Aurinkoenergia.fi.
<<http://www.aurinkoenergia.fi/Info/23/aurinkoenergia>>. Luettu 6.1.2015.
- 3 Erat, Bruno; Erkkilä, Vesa; Nyman, Christer; Peippo, Kimmo; Peltola, Seppo; Suokivi, Hannu. 2008. Aurinko-opas, aurinkoenergiaa rakennuksiin. Porvoo. Aurinkoteknillinen yhdistys ry.
- 4 Kiehl, J. T. and Trenberth, Kevin E. 1997. Earth's Annual Global Mean Energy Budget. Colorado. National Center for Atmospheric Research, Boulder.
- 5 Pirinen, Pentti; Simola, Henriikka; Aalto, Juha; Kaukoranta, Juho-Pekka; Karlsson, Pirkko; Ruuhela, Reija. 2012. Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010. Verkkodokumentti. Ilmatieteen laitos.
<https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/35880/Tilastoja_Suomen_ilmastosta_1981_2010.pdf?sequence=4>. Luettu 31.3.2014.
- 6 Solar radiation and photovoltaic electricity potential country and regional maps for Europe. 2012. Verkkodokumentti. Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport (IET). <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>>. Luettu 6.1.2015.
- 7 Sun Position. 2009. Verkkodokumentti. Sustainable by Design.
<<http://www.susdesign.com/sunposition/index.php>>. Luettu 6.1.2015.
- 8 Aurinkoenergia. 2014. Verkkodokumentti. Suntekno.
<<http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopankki/aurinkoenergia.pdf>>. Luettu 6.1.2015
- 9 Naps NSR - aurinkosähköjärjestelmä. 2014. Verkkodokumentti. Naps Solar Systems Oy. <http://www.napssystem.com/wordpress/wp-content/uploads/2013/11/NSR4_2013_FI_mail.pdf>. Luettu 6.1.2015.
- 10 Solar (PV) Cell Module, Array. 2012. Verkkodokumentti. Samlex Solar.
<<http://www.samlexsolar.com/learning-center/solar-cell-module-array.aspx>>. Luettu 6.1.2015.
- 11 Korpela, Aki. 2012. Aurinkosähkö. Verkkodokumentti. Luentomateriaali. Tampereen teknillinen yliopisto. <<http://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/SMG-4450/2012/luento2.pdf>>. Luettu 6.1.2015.
- 12 Aurinkosähköopas Tamperelaisille. Ekotehokas Tampere 2020. 2013. Verkkodokumentti. Tampereen kaupunki.
<http://www.tampere.fi/material/attachments/a/6Gkg9C2MG/Aurinkosahkoopas_36660_vedos.pdf>. Luettu 6.1.2015.

- 13 Solar trackers. 2010. Verkkodokumentti. Solar Choice.
<<http://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>>. Luettu 6.1.2015
- 14 Lynn, P. A. 2010. Electricity from Sunlight. An Introduction to Photovoltaics. IsoBritannia, West Sussex. John Wiley & Sons Ltd.
- 15 Jodat, Timo. 2015. Verkkodokumentti. Jodat Ympäristöenergia Oy.
<<http://www.energiakauppa.com/>>. Luettu 6.1.2015
- 16 Tapaninen, Lari. 2013. MetroSol-aurinkoenergiaprojekti.. Tutkimusaineisto. Julkaisematon.
- 17 Cullen, R. 2014. What is Maximum Power Point Tracking (MPPT)? Verkkodokumentti. Blue Sky Energy.
<http://www.blueskyenergyinc.com/uploads/pdf/BSE_What_is_MPPT.pdf>. Luettu 17.1.2015.
- 18 Types of PV cells. 2011. Verkkodokumentti. GH Solar.
<<http://www.ghsolar.be/EN/types-of-pv-cells.htm>>. Luettu 17.1.2015
- 19 How Are Solar Panels Made. 2015. Verkkodokumentti. The Renewable Energy Website. <<http://www.reuk.co.uk/How-are-Solar-Panels-Made.htm>>. Luettu 17.1.2015
- 20 Paneelit. 2014. Verkkodokumentti. Suntekno.
<<http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>>. Luettu 17.1.2015
- 21 SOLARWATT M250-60 AC Technical Data. 2012. Verkkodokumentti. Solarwatt.
<http://www.solarwatt.de/fileadmin/user_upload/pdf/datenblaetter/datenblaetter_englisch/SOLARWATT_M250-60_AC_eng.pdf>. Luettu 17.1.2015
- 22 Kakriainen, Timo. Aurinkoenergian kannattavuus kasarmin kampuksella. Opinnäytetyö 2011. Mikkelin ammattikorkeakoulu.
<https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/30884/Kakriainen_Timo.pdf?sequence=1>. Luettu 18.1.2015
- 23 Korpela, Aki. 2013. DEE-53010 Aurinkosähkön perusteet. Luentomateriaali. Verkkodokumentti. Tampereen teknillinen yliopisto.
<<http://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/DEE-53010/luennot2013/luento4.pdf>>. Luettu 18.1.2015
- 24 Talven lumista ja lumisuudesta. 2014. Verkkodokumentti. Ilmatieteenlaitos.
<<http://ilmatieteenlaitos.fi/lumitilastot>>. Luettu 20.1.2015
- 25 Andrews, Rob; Pollard, Andrew; Pearce, Joshua M. 2013. The effects of snowfall on solar photovoltaic performance. Solar Energy 92 (84-97).
- 26 Lataussäätimet. 2014. Verkkodokumentti. Suntekno.
<<http://www.suntekno.fi/latauss%C3%A4%C3%A4timet>>. Luettu 20.1.2015

- 27 Capturing solar energy. 2005. Verkkodokumentti. The Electropaedia. <http://www.mpoweruk.com/solar_power.htm>. Luettu 23.1.2015
- 28 Photovoltaic Geographical Information System. 2012. Verkkolaskentaohjelma. Joint Research Centre. <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>>. Luettu 24.1.2015
- 29 Ilmasto, Säteily. 1976. Verkkodokumentti. Rakennustietosäätiö. Saatavissa <http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/4_ilmasto_sateily_055-30.pdf>. Luettu 29.1.2015
- 30 Jelle, Bjorn Petter. 2013. Energy and Buildings 67 (334–351).
- 31 PVWatts Calculator. 2015. Verkkolaskentaohjelma. National Renewable Energy Laboratory. <<http://www.nrel.gov/>>. Luettu 29.1.2015
- 32 Heinonen, Ismo. 2011. Aurinko-opas. Helsinki. Ympäristöministeriö.
- 33 Barbose, Darghouth, Weaver, Wiser. 2013. Tracking the Sun VI. U.S. Department of Energy. Verkkodokumentti. Electricity Markets & Policy Group. <<http://emp.lbl.gov/sites/all/files/lbnl-6350e.pdf>>. Luettu 12.2.2015
- 34 Energiatuki. 2015. Verkkodokumentti. Työ- ja elinkeinoministeriö. <<https://www.tem.fi/energia/energiatuki>>. Luettu 13.2.2015

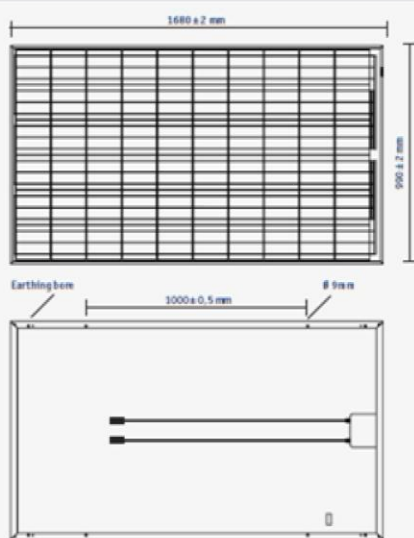
Aurinkopaneelin SolarWATT M250-60 AC 05 tekniset tiedot

GLASS-FOIL-SOLAR MODULE | SOLARWATT AG |

SOLARWATT M250-60 AC

Technical Data

DIMENSIONS



GENERAL DATA

Module technology	Glass-foil-laminate; aluminium frame
Cover material	High transparent solar glass (tempered), 4 mm
Encapsulation	EVA-solar cells-EVA
Back material	Multi-layer polymersheet, white
No. and type of cells	60 monocrystalline solar cells
Dimensions of cells	156 x 156 mm
Cables and connectors	Cables 2x1,00m/4 mm ² , Lumberg LC4 connectors
Bypass-diodes	3
Application class	Application class A (nach IEC 61730)
Dimensions (LxWxH)	1680 x 990 x 50 mm
Weight	24 kg
Max. system voltage	1000V (US 600VDC)
Mechanical Ratings	Suction pressure of 2400 Pa approved (Wind speed 130 km/h with safety factor 3) Load of 6000 Pa approved acc. to IEC 61215 Ed.2
Qualifications	IEC 61215 Ed.2, IEC 61730 (incl. Safetyclass II)

ELECTRICAL DATA (STC)

STC: Standard Test Conditions; measurement conditions: Radiation strength 1000 W/m², spectral distribution AM 1.5, temperature 2982 °C, in accordance with EN 60904-3

Nominal power P_n	230Wp	235Wp	240Wp	245Wp	250Wp	255Wp
Nominal voltage U_{MPP}	28,4V	28,5V	28,7V	29,0V	29,2V	29,4V
Nominal current I_{MPP}	8,10A	8,25A	8,37A	8,45A	8,57A	8,68A
Open circuit voltage U_{OC}	36,2V	36,4V	36,5V	36,7V	36,8V	36,9V
Short circuit current I_{SC}	8,89A	8,91A	8,93A	8,98A	9,00A	9,02A
IR*	20 A					

Measuring tolerances P_{MPP} ±5 %

* Reverse current power rating: Operation of the modules with an external power source is only permitted with a string fuse with a release current of < 20 A.

Reduction in the module efficiency with reduction in radiation strength of 1000 W/m² to 200 W/m² (25°C): -4.42% (relative) / -0,611% (absolute).

ELECTRICAL DATA (NOCT)

NOCT: Normal Operation Cell Temperature, measurement conditions: Radiation strength 800 W/m², AM 1.5, temperature 20 °C, wind speed 1m/s, electrical open-circuit operation

Nominal Power P_n	167 W	171 W	175 W	178 W	182 W	186 W
Nominal voltage U_{MPP}	25,7V	25,8V	26,0V	26,3V	26,5V	26,9V
Open circuit voltage U_{OC}	33,5V	33,7V	33,8V	34,0V	34,1V	34,4V
Short circuit current I_{SC}	7,17A	7,19A	7,20A	7,24A	7,26A	7,27A

CHARACTERISTIC LINES

Voltage charact. lines at different irradiances and temperatures



performance class 255 Wp

THERMAL FEATURES

Operating Temperature Range	-40 ... +80 °C
Ambiente Temperature Range	-40 ... +45 °C
Temperature Coefficient of P_n	-0,45%/K
Temperature Coefficient of U_{OC}	-0,36%/K
Temperature Coefficient of I_{SC}	0,03%/K
NOCT	45°C

[This data sheet conforms to DIN EN 50380:2003; 2012/05]

Aurinkopaneelin Innotech Solar - ITS EcoPlus 240W tekniset tiedot

EcoPlus – Poly
STC*

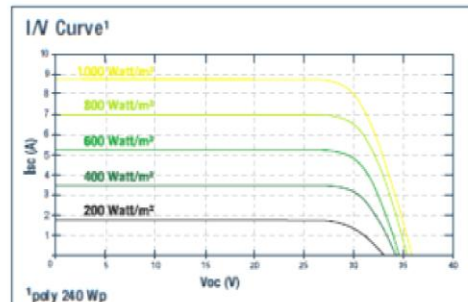
Pmax	Wp	230	240	250	260
Vmpp	V	29.6	30.2	31.0	31.2
Impp	A	7.95	8.11	8.22	8.49
Voc	V	36.7	37.1	37.6	37.8
Isc	A	8.50	8.66	8.79	8.98
IR****	A	20	20	20	20
η	%	13.9 – 14.5	14.6 – 15.2	15.2 – 15.8	15.8 – 16.4

NOCT**

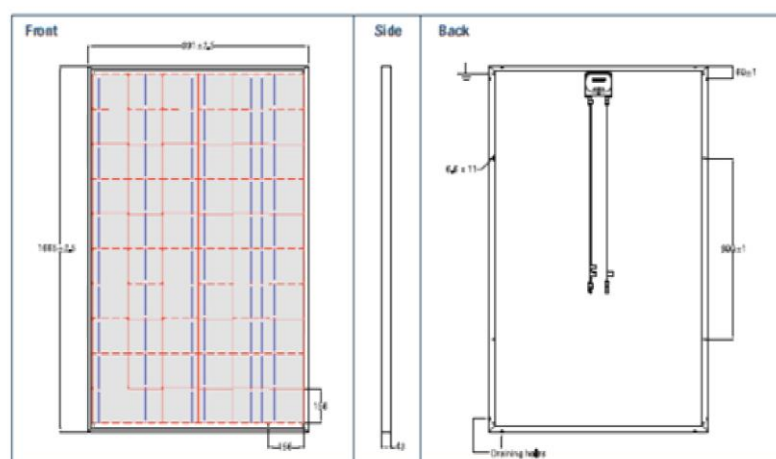
Pmax	W	170	176	182	186
Vmpp	V	26.8	27.3	27.8	28.3
Voc	V	33.6	33.9	34.2	34.5
Isc	A	6.80	6.90	7.00	7.10

Temperature Coefficients

Pn	-0.38 %/K
Voc	-0.32 %/K
Isc	0.077 %/K



NOCT**	47.5°C
Module efficiency reduction at 200 W/m ² ****	-0.6 (± 0.3)% abs.
Max. System Voltage	1000 V
IP protection level	IP 65
Module Design	Glass-foil (white)
Frame	Al black
Glass	Solar glass with anti-reflection surface treatment, 3.2 mm
No. and Type of Solar Cells	60 crystalline solar cells, 156 x 156 mm, 180 μm ± 30 μm
Cables	Junction box with MC4 (pluggable) connectors, cable: 2 x 1 m / 4 mm ²
Bypass-Diodes	3 pcs.
Dimensions (l x w x h)	1665 x 991 x 43 mm
Weight	19 kg
Operating Temperature Range	-40 ... +80°C
Ambient Temperature Range	-40 ... +45°C
Mechanical ratings	Suction pressure of 2400 Pa approved (Wind speed 130 km/h with safety factor 3), load of 5400 Pa approved
Certification	IEC 61215 : 2005 IEC 61730-1/-2 : 2004 IEC 61701 : 1995 (salt mist resistant) MCS DLG Focus Test (ammonia resistant) UL 1703 : 2002 R5.12 CEC/CSI listing
Positive sorting	-0 Wp / +10 Wp
Pallet dimensions	1720 x 1045 x 180 mm
Product warranty	12 years
Performance warranty	25 years linear performance warranty according to the Warranty Conditions of Innotech Solar

* STC – Standard Test Conditions, measurement conditions: intensity irradiation 1000 W/m², spectral distribution AM 1.5, temperature 25 ± 2°C, according to standard EN 60904-3** NOCT – Normal Operation Cell Temperature, measurement conditions: irradiation intensity 800 W/m², AM 1.5, temperature 20°C, wind speed 1 m/s.*** Reduced efficiency with the decrease in the intensity of irradiation of 1000 W/m² and 200 W/m², temperature 25°C according EN 60904-1

**** Reverse current power rating: operation of the modules with an external power source is only permitted with a string fuse with a release current of < 2 x Isc @ STC*

Measuring tolerances of Pmax @ STC ± 3%, of reference module ± 2%, all other electric parameters ± 10%.

This datasheet conforms to EN 50380. Innotech Solar reserves the right to change specifications without notice.