

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

Karelia-amk
Jaakko Parvinen

Auringon säteilyn ja aurinkoenergian tuoton mallinnus aurinkoseu-
raajapaneelille

Opinnäytetyö
Toukokuu 2019



OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2019
Energia- ja ympäristötekniikan koulu-
tusohjelma
Karjalankatu 3
80200 JOENSUU
+358 13 260 600 (vaihde)

Tekijä
Jaakko Parvinen

Nimeke
Auringon säteilyn ja tuoton mallinnus aurinkoseuraajapaneelille

Toimeksiantaja
Karelia-amk

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä selvitettiin Karelia-amk:lle seuraavan aurinkopaneelin eli aurinkoseuraimen tuotot kattavasti. Selvitys perustuu laskelmiin, joita verrattiin saataviin tietoihin Pvgis:n tietokannasta. Laskelmat on tehty tuntikohtaisella tarkkuudella, ja niistä on laskettu kuukausikohtaiset tiedot. Laskelmissa selvitettiin aurinkopaneelin asennot suhteessa aurinkoon ja tästä tuloksen perusteella on laskettu energian tuotot. Vertailussa on käytetty kaksiakselista aurinkoseurainta ja kiinteästi asennettua aurinkopaneelia.

Tuloksena vuosittaisessa aurinkosähkön tuotossa kaksiakselisella aurinkoseuraimella on mahdollista saada 27 prosenttia enemmän energiaa tuotettua kuin kiinteästi asennetulla aurinkopaneelilla. Kolmella aurinkoseurainpaneelilla pystyy tuottamaan yhtä paljon energiaa kuin neljällä kiinteästi asennetulla aurinkopaneelilla.

Kieli
suomi

Sivuja 23

Asiasanat
aurinkoenergia, aurinkokenno, aurinkopaneeli



THESIS
May 2019
**Degree Programme in Energy and
Environmental Technology**
Karjalankatu 3
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600 (switchboard)

Author
Jaakko Parvinen

Title
Modeling of solar radiation and production of solar energy for the tracker panel

Commissioned by
Karelia UAS

Abstract

The purpose of this thesis was to provide Karelia UAS with comprehensive information on solar tracker generation. The study is based on calculations that were compared to the available data from the Pvgis database. The calculations are made with hourly accuracy and are calculated on a monthly basis. In the calculations, the solar panel positions were studied in relation to the sun, and the generation of energy has been calculated from the result. The comparison is based on a dual-axis solar panel and a fixed solar panel.

The results show that a dual-axis solar tracker engine can produce 27% more energy than a fix-angle solar panel in annual solar photovoltaic production. Three solar tracker panels can generate as much energy as four fix-angle solar panels.

Language

Finnish

Pages 23

Keywords

solar energy, solar cell, solar panel, tracker

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Auringon energia	6
2.1	Keskeiset käsitteet	6
2.2	Aurinko	7
2.3	Auringonpaistetiedot	7
2.4	Aurinkosähkö	7
2.5	Kokonaissäteily	11
2.6	Hajasäteily	11
3	Aurinkopaneelijärjestelmä	11
3.1	Aurinkopaneeli ja -kenno	11
3.2	Aurinkoseurain	13
4	Laskelmien toteutus	15
5	Tuoton laskeminen aurinkoseuraimelle	15
5.1	Aurinkopaneelin suuntaus aurinkoseuraimelle	16
5.2	Paneelien tuotot	17
5.3	Vertailu paneelien välillä	20
6	Johtopäätökset tuloksista	21
7	Pohdinta	22
	Lähteet	23

1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää kuinka paljon aurinkoa seuraava aurinkopaneeli tuottaa sähköä ja vertailla saatua tulosta kiinteästi asennetun aurinkopaneelin tuottoon. Laskennallisesti on tarkoitus mallintaa aurinkopaneelien tuotot ja verrata tuloksia valmiina saataviin laskelmiin, joita erilliset laskurit antavat. Laskurina vertailussa on käytetty Photovoltaic Geographical Information Systemiä eli aurinkosähkön maantieteellistä tietojärjestelmää, jonka avulla saatuja tietoja on verrattu laskemallisiin tuloksiin. (European Commission 2018.) Näistä paistietiedoista saaduista tuloksista on laskettu kuinka paljon aurinkopaneelilla olisi mahdollista tuottaa sähköä ja tätä tulosta on verrattu aurinkopaneelin tuottolaskelmiin. Työn toimeksiantajana toimii Karelia-amk:n energia- ja ympäristötekniikan koulu. Tarkoitus on saada selville, kuinka paljon enemmän sähköä olisi mahdollista tuottaa aurinkoseuraimella verrattuna kiinteästi asennettuun aurinkopaneeliin. Tämä työ on tarkoitettu niille lukijoille, jotka ovat kiinnostuneet kuinka paljon enemmän aurinkoseuraimella pystytään tuottamaan energiaa verrattuna kiinteästi asennettuun aurinkopaneeliin.

2 Auringon energia

2.1 Keskeiset käsitteet

Aurinkokenno on puolijohdekomponentti, jotka tuottavat sähköä ns. valosähköisestä ilmiöstä (Erat ym. 2008, 120).

Aurinkopaneeli koostuu useasta aurinkokennosta, jotka tuottavat tasasähköä.

Auringonsäteily on auringosta tulevaa säteilyä, sekä suora säteilyä että hajasäteilyä (Erat, Erkkilä, Nyman, Peippo, Peltola & Suokivi 2008, 172).

Aurinkotrakkeri eli aurinkoseuraaja aurinkoa seuraava aurinkopaneelijärjestelmä, joka on aina kohtisuoraan aurinkoa kohden.

Aurinkovakio on auringonsäteilyn energiatiheys, joka kohdistuu maapallin ilmakehän uloimmalle rajalle olevaan kuviteltuun, auringonsäteilyä vastaan kohtisuoraan olevaan pintaan silloin, kun maapallo on keskietäisyydellä auringosta (Erat ym. 2008, 173).

Hajasäteily on kokonaissäteily, josta on vähennetty (kirkaalla ilmalla) suora auringonsäteily (Erat ym. 2008, 175)

2.2 Aurinko

Aurinko on maapalloa lähimpänä oleva tähti, jota maapallo kiertää hieman ellipsoisista rataa keskimäärin noin 150 miljoonan kilometrin etäisyydellä. Auringon ulkokuori koostuu pääsääntöisin vedystä (75 %) ja heliumista (23 %) ja loput ainesosat (2 %) koostuvat muista alkuaineista kuten raudasta, kalsiumista, magnesiumista, nikkelistä, bariumista, kuparista, typestä ja hiilestä. (Erat ym. 2008.)

Auringon energia syntyy ydinreaktiosta, jossa vetyatomit yhtyvät heliumatomeiksi ja tämän reaktion seurauksena vapautuu energiaa. Auringon ytimen lämpötila on noin 13,6 miljoonaa Kelviniä ja pinnan lämpötila on noin 5 900 Kelviniä.

2.3 Auringonpaistetiedot

Suomessa saatavat auringon asentotiedot suhteessa maan paikkakuntaan on mahdollista ladata <https://www.sunearthtools.com/> -sivustolta. Tunnin tarkkuudella olevasta tiedostosta on mahdollista laskea auringon paistekulmat, joiden avulla on mahdollista laskea, kuinka paljon aurinko teoriassa voi paistaa.

Tässä opinnäytetyössä on käytetty vaihtoehtoista tapaa, jossa auringon paistekulmien perusteella on laskettu, kuinka paljon auringon säteilyä aurinkoseuraimen pinnalle kertyy.

2.4 Aurinkosähkö

Aurinkosähköllä tarkoitetaan auringon säteilyenergian muuttamista sähköenergiaksi, joka on yksi varteenotettavimmista uusiutuvan energian muodoista. Energiatuotantoon hyödynnettävissä oleva säteily koostuu suorasta, maanpintaan kohdistuvasta säteilystä sekä hajasäteilystä, joka on esimerkiksi pilvistä, maanpinnasta, lumesta ja rakennuksista heijastunutta säteilyä. (Arevasolar).

Auringon säteilyenergia ilmoitetaan muodossa W/m^2 eli puhutaan säteilyn intensiteetistä. Keskimääräinen ilmakehän yläosiin saapuva intensiteetti on $1\,368\,W/m^2$ (Aurinkovakio). Johtuen Maan kiertoradan muodosta, on em. aurinkovakion suuruudessa vaihtelua Maan etäisyyden aurinkoon muuttuessa. Suurimmillaan säteilyintensiteetti on tammikuussa ($1\,410\,W/m^2$) ja pienimmillään kesäkuussa (1

320 W/m²). Maan ilmakehän säteilyabsorptio ja heijastavuus johtaa kuitenkin siihen, että em. intensiteeteistä hyödynnettävissä oleva osa on noin 60 %. ja n. 1000 W/m² (Suntekno. 2010).

Kun huomioidaan aurinkoseuraimen toiminnallisuus eli sen kyky suuntautua auringoa kohti tuoton maksimoimiseksi, on tietyissä sovelluksissa tarpeen selvittää myös auringon asema säädön aikana. Johtuen Maan kiertoradan elliptisyydestä ja sen pyörimisakselin kallistumisesta vaihtelee auringon korkeus eri vuodenaikoina (Suntekno. 2010).

Laskennallinen auringon deklinaation määrittäminen tietyllä leveyspiirillä alkaa määrittämällä auringon deklinaatio haluttuna päivänä. Auringon deklinaation laskentaan tuntikohtaisesti voidaan käyttää yhtälöä

$$\delta = -23,45 * \cos\left(2\pi * \frac{n+10}{365}\right), \quad (2.1)$$

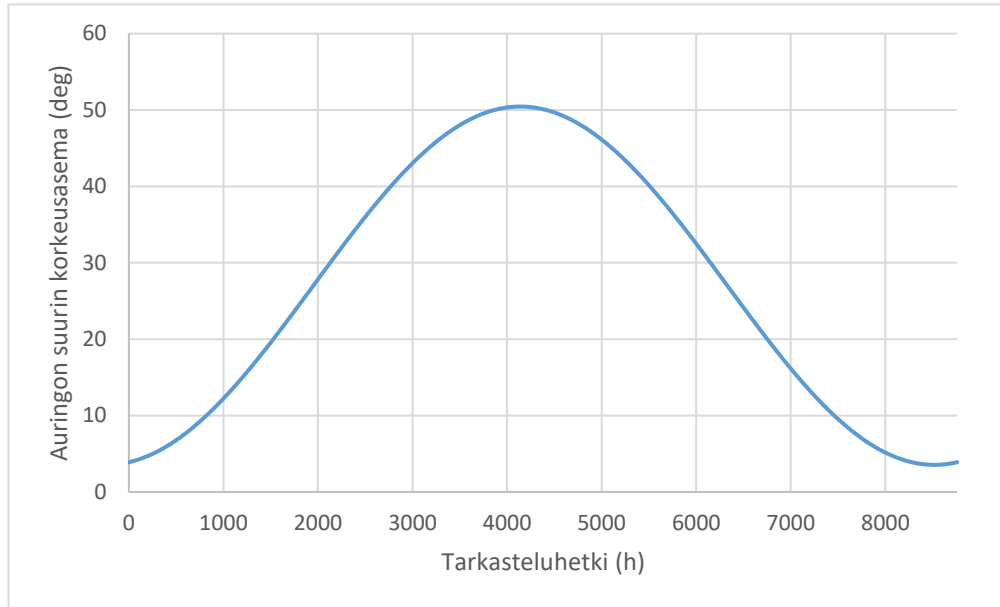
[1] missä δ on auringon deklinaatiokulma (°), n on aika laskettuna vuoden alusta (h). Tietyn leveyspiirin maksimideklinaation laskemiseksi on kaava 2.1 yhdistettävä kaavaan 2.2, joka on muotoa:

$$\alpha_{max} = 90^\circ + \delta - \phi, \quad (2.2)$$

[3] missä α_{max} ilmoittaa auringon maksimideklinaation (°) laskettuna päivänä ja ϕ on tarkasteltavan leveyspiirin asteluku (°). [3.] Joensuun leveysasteella 62,8° auringon ollessa korkeimmillaan kesäpäivän seisauksen, 21.6°, aikana saadaan kaavojen 2.1 ja 2.2 avulla laskettua maksimideklinaatio, kun n on kesäpäivän seisauksen (21.6) tuntimäärä 4140 h.

$$\alpha_{max} = 90^\circ + (-23,45) * \cos\left(2\pi * \frac{n+10}{365}\right) - 62,8^\circ = 50,65^\circ \quad (2.(2)3)$$

Tämä laskettu arvo on hyödyksi, kun määritetään aurinkosähköjärjestelmän teknisiä vaatimuksia. Kuviossa 1 nähdään edellä lasketulla tavalla auringon korkeusasema Joensuussa tuntikohtaisesti laskettuna.



Kuvio 1. Auringon suurimman korkeusaseman vaihtelu Joensuussa ajan (h) funktiona vuoden tuntien aikana.

Auringon tuntikulma h on määritettävissä, kun hyödynnetään tietoa, jonka mukaan aurinko kiertää vuorokauden aikana maan ympäri 360° vuorokaudessa. Tällöin aurinko liikkuu horisontin suuntaisesti $360^\circ/24\text{h}$ eli 15° :ta tunnissa. Auringon korkeusasema horisonttiin nähden voidaan tämän perusteella laskea mielivaltaiselle ajanhetkelle kaavalla 2.4.

$$\sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h, \quad (2.4)$$

jossa α on auringon korkeuskulma horisontin suhteen, ϕ tarkastelupaikan leveyspiiri, δ kaavalla 2.4 laskettu deklinaatio ja h edellä määritetty tuntikulma tarkasteluhetkellä.

ja säteilyn voimakkuus saadaan kaavalla 2.5

$$S = S_0 \sin \alpha \quad (2.5)$$

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

Aurinkopaneelin kulma on laskettu auringon korkeusaseman avulla.

$$= 180^\circ - \alpha + 90^\circ \quad (2.6)$$

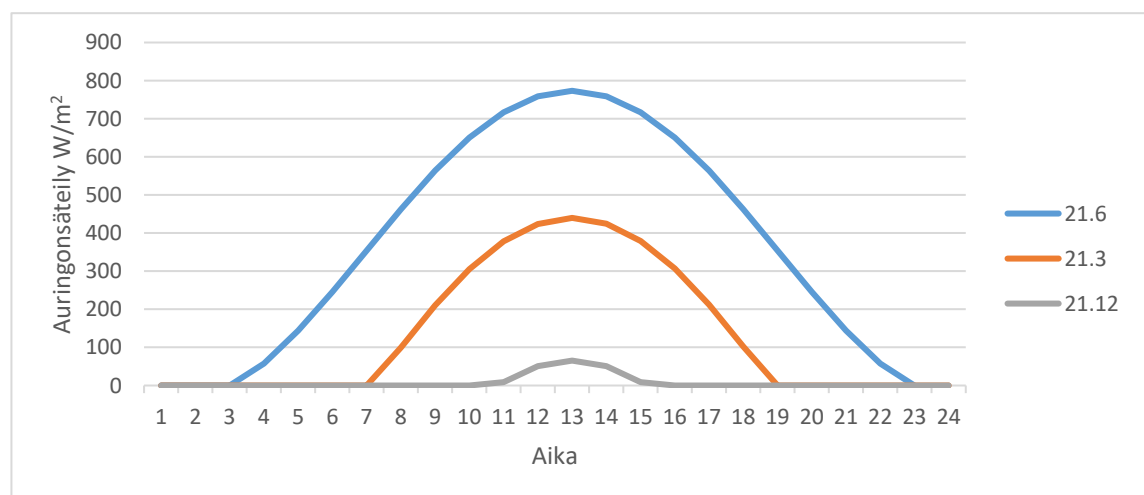
Esimerkkinä laskettuna ajankohtaan kesäpäivän seisauksen (21.6.) tuntimäärä 4140 h saadaan aurinkopaneelin kulmaksi $39,35^\circ$.

$$= 180^\circ - 50,65^\circ + 90^\circ = 39,35^\circ \quad (2.7)$$

Esimerkkilaskussa on käytetty Joensuun deklinaatiota $23,5^\circ$, jonka ajankohta on kesäpäivätasauksen aikana 21.6., jolloin aurinko on korkeimmillaan.

Ylempiä kaavoja käyttäen saadaan tuntikulma käyttäen ajankohtana jossa 4140 tunnin kohdalla auringon korkeus horisonttiin nähden on $50,65$ astetta. Säteilyin kyseisen tunnin aikana voimakkuudeksi saadaan

$$S = 1\ 000\ W/m^2 \times \sin 50,65 = 773,28\ W/m^2$$



Kuvio 2. Lasketut suorat auringonsäteilyt Joensuussa.

Kuvasta 2 nähdään lasketut auringonsäteilyt Joensuussa eri vuodenaikoina. Suurimmat säteilyarvot saadaan kesäkuun 21. päivänä eli kesäpäivän tasauk-

sen aikana säteilyvoimakkuus on enimmillään 773 W/m^2 . Maaliskuun 21. päivänä eli kevätpäiväntasauksen aikana auringonsäteily on enimmillään 440 W/m^2 . Joulukuun 21. päivä eli talvipäivän tasauksen aikana auringonsäteily on 65 W/m^2 enimmillään.

2.5 Kokonaissäteily

Auringon säteily jaetaan kolmeen ryhmään. Suoraan auringonsäteilyyn, joka tulee suoraan auringosta. Hajasäteily on osa säteilystä joka on muuttanut suuntaa ilmakehän ainehiukkasten takia, kuten pilvet, pöly ja jne. Ja kolmas säteilyn ryhmä on maanpinnasta heijastunut säteily. (Erat ym. 2008, 28).

2.6 Hajasäteily

Hajasäteilyn osuus kokonais-säteilystä on Suomen olosuhteissa suuri, pilvisinä päivinä se voi olla jopa 80 prosenttia kokonais-säteilystä ja pilvettöminä päivinäkin 20 prosenttia kokonais-säteilystä.

Hajasäteilyn laskemiseen on olemassa useampia laskentamalleja. Malleissa on pohja-aineina käytetty eri tausta-aineita. Useissa malleissa hajasäteilyn laskentaan on käytetty ainoastaan kirkkausasteen arvoa. On olemassa myös muihin parametreihin perustuvia laskentatapoja (Luostarinen, 2014).

Hajasäteilyn osuuden pystyy laskemaan todellisesta auringonsäteilystä vertaamalla teoreettisesti saatavaan säteilytietoihin.

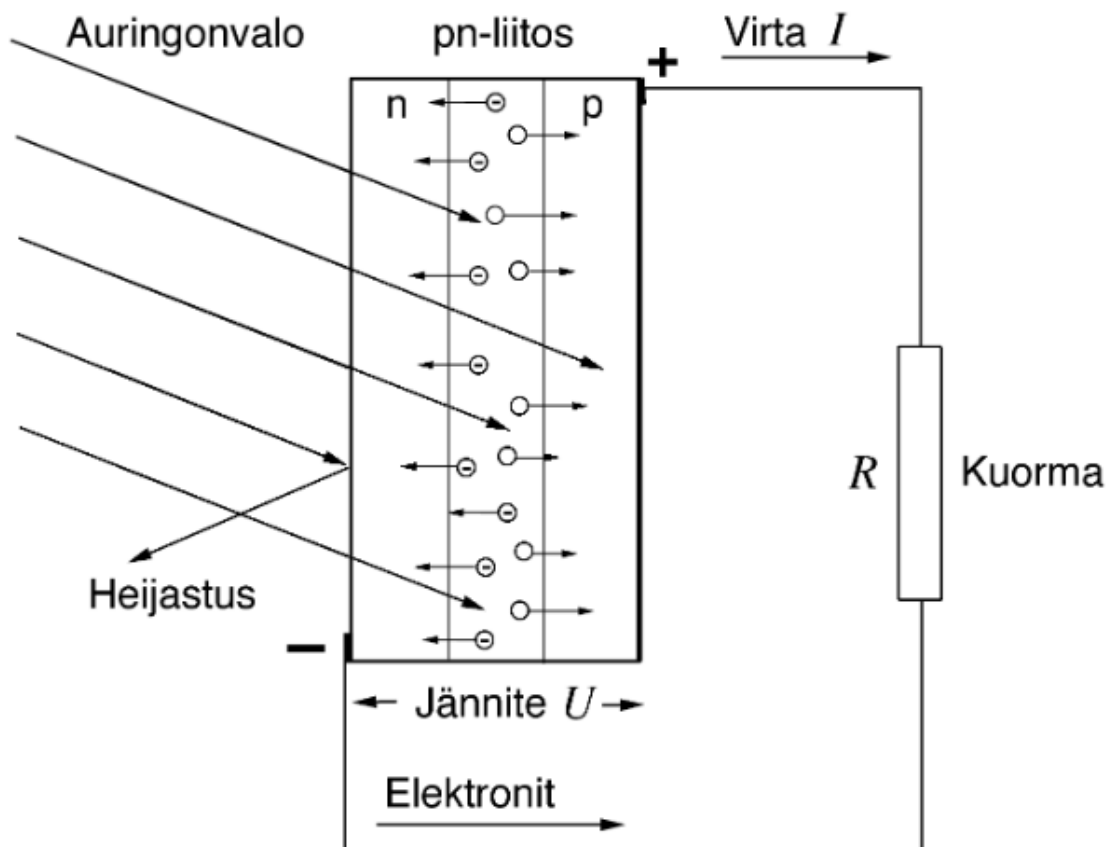
3 Aurinkopaneelijärjestelmä

3.1 Aurinkopaneeli ja -kenno

Aurinkopaneeleilla tarkoitetaan laitetta, joka koostuu aurinkokennoista, jonka avulla on tarkoitus muuttaa auringonsäteily sähköenergiaksi. Aurinkopaneelit koostuvat useasta aurinkokennosta, jotka ovat kytketty yhteen.

Aurinkokennon sähköntuotannon toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön. Tällä ilmiöllä tarkoitetaan auringon säteilyenergian hyödyntämistä jossa auringon säteilyn hiukkaset eli fotonit osuvat aurinkokennon elektronisiin materiaaleihin ja luovuttavat energiansa.

Aurinkokenno koostuu kahdesta tasaisesta puolijohdekerroksesta, joita erottaa ns. rajapinta. Rajapinnan toisella puolella on n-tyyppinen ja toisella puolella on p-tyyppinen puolijohde (Erat ym. 2008 ,121). Auringonvalon osuessa aurinkokennoon, osalla valohiukkasista on niin suuri energia, että se läpäisee aurinkokennon pintakerroksen ja pääsee pn-liitokseen saakka ja aiheuttaa elektroniaukkopareja. Tästä elektroniparista syntyvä sähkövirta voidaan kuljettaa sähköjohtimia pitkin sähköpiiriin. Aurinkokennot ovat pääsääntöisesti rakennettu yksikiteisestä tai monikiteisestä piistä. Muita mahdollisia tekniikoita voidaan mainita olevan ohutkalvokennot. (Erat. ym.2008. ,137.)

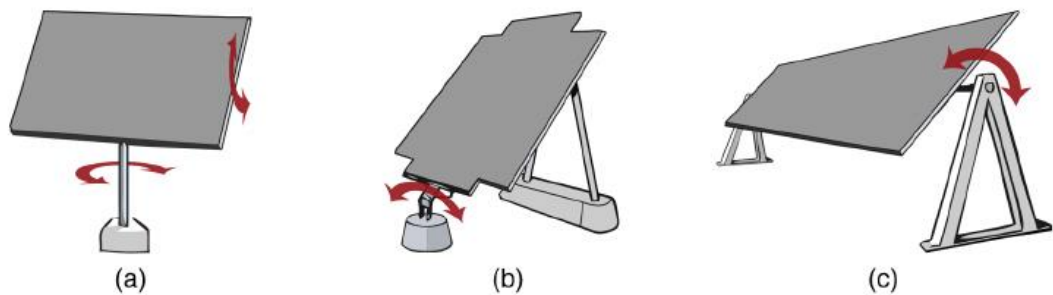


Kuva 3. Aurinkokennon toimintaperiaate.

Kennoissa auringonvalo muuttuu suoraksi sähkövirraksi. Kennojen tuottama sähkövirta on tasasähköä.

3.2 Aurinkoseurain

Aurinkoseuraimella tai -trakkerillä tarkoitetaan laitteistoa, joka kykenee suuntaamaan paneelin tai paneeliston aina suoraan aurinkoa kohden toisin kuin kiinteästi asennettu paneelisto. Kaupallisilla markkinoilla aurinkoa seuraavia paneelijärjestelmiä on tarjolla yksi- ja kaksiakselisina usealla erilaisella designvaihtoehdolla. Näistä jokaisella on hyvät ja huonot puolensa. Yksiakselisella designilla hyvänä puolena on auringon seuraaminen yhdensuuntaisella liikkeellä, mutta samalla se on myös huono puoli, koska silloin kulma tai suunta on kiinteä. Kaksiakselisen aurinkoseuraimen hyviä puolia ovat auringon jatkuva seuraaminen ja aurinkoseuraimen pysyminen jatkuvasti optimissa kulmassa. Huono puoli kaksiakselisessa on suurempi määrä liikkuvia osia ja moottoreita, jotka vaativat huoltoa.

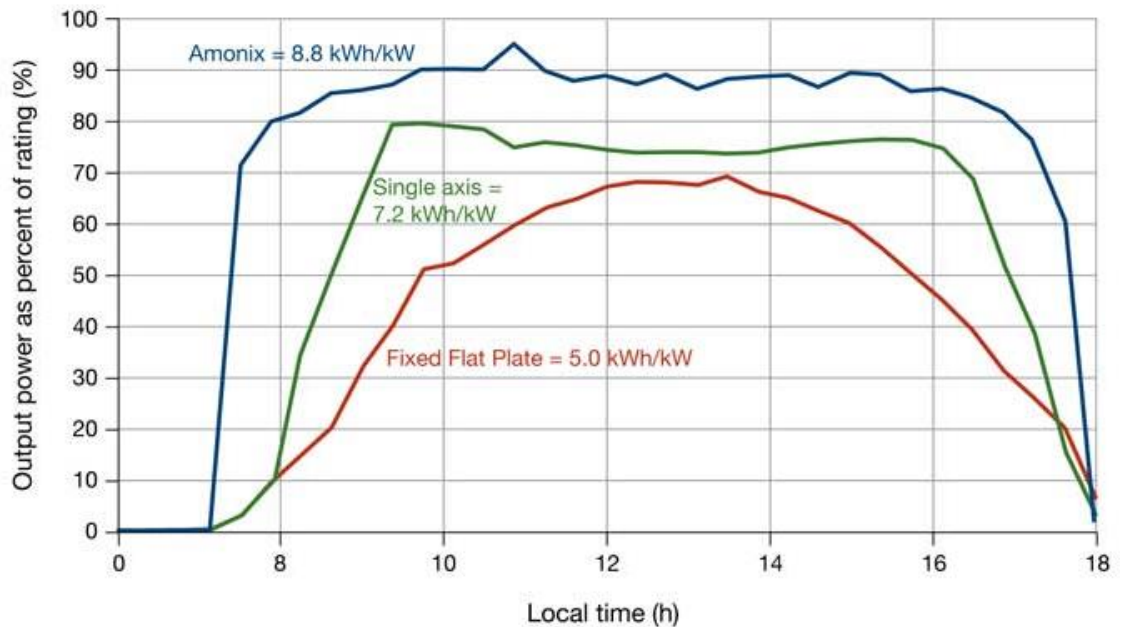


Kuva 4. Erilaisia seuraindesigneja. A) 2-akselinen, B) 1-akselinen polar ja C) 1-akselinen keinu. [6.]

Aurinkoseuraajia on olemassa useampia erilaisia teknisiä toteutuksia, joista yleisemmin kutsutaan 1-akselinen seuraaja ja 2-akselinen seuraaja. Yksiakselisella seuraajalla aurinkopaneeli seuraa aurinkoa joko horisontaalisesti eli vaakasuoraan seuraavana tai vertikaalisesti eli pystysuoraan seuraavana. Kaksi akselillä aurinkoseuraajalla aurinkopaneeli liikkuu auringon mukaisesti kahden akselin avulla vaaka- ja pystysuuntaisesti.

Verrattuna kiinteästi asennettuun paneeliin, on aurinkoa seuraavalla järjestelmällä valoisana aikana huomattavasti parempi tuotto. Kirkkaalla säällä seurai-

men tuotto kasvaa lähelle huippuarvoaan heti, kun aurinko on horisontin yläpuolella ja saavuttaa huippunsa useita tunteja kiinteää paneelia aikaisemmin ja myös pysyy siellä pidempään tuottokäyrän ollessa vakaalla säällä symmetrinen keskipäivän molemmin puolin, kuten kuviossa 3 näkyvän mittausvertailun perusteella on havaittavissa.



Kuvio 3. Paneelin tuotto prosentteina nimellistehosta eri kellonaikoina (Amonix = 2-akselinen seurain) suhteessa 1-akseliseen ja kiinteästi asennettuun vertailupaneeliin (Solarprofessional. 2011.)

Maailmalla on olemassa useita aurinkoseurain järjestelmiä. Järjestelmiä löytyy yksiakselisia ja kaksiakselisia järjestelmiä. Esimerkkinä voidaan pitää Intiassa olevaa 172 mwp yksiakselista aurinkoseuraajajärjestelmää, jossa aurinkoa seurataa horisontin suuntaisesti. (Arctech Solar. 2017).

Järjestelmän vaatimat perustukset pitävät olla huomattavasti isommat kuin kiinteästi asennetun aurinkopaneelijärjestelmän. Perustusten pitää kantaa aurinkoseurainjärjestelmän liikkeen muutosten aiheuttaman rasitus ja suurempi tuulikuorma. Kaupallisilla järjestelmillä on yleensä asetettu suurin mahdollinen tuulen nopeus, jonka järjestelmä kestää.

4 Laskelmien toteutus

Laskelmien tarkoituksena on laskea aurinkoseurainjärjestelmään tulevat auringonpaistetiedot. Näistä aurinkopaistetiedoista saadusta tiedoista on laskemalla saatu selville, kuinka paljon aurinkopaneeli pystyy tuottamaan sähköä. Näistä tuloksista saatavia tietoja verrattiin kiinteästi asennettavia aurinkopaneelien tuotoihin.

Työssä saatavia tuloksi verrattiin Pvgis:n tietokannasta saatuihin tietoihin. Näistä tiedoista on laskennallisesti laskettu aurinkopaneelin tuotot. Laskennallisesti laskettiin, kuinka paljon yhden neliömetrin kokoiselle alalle paistaa auringonsäteilyä teoreettisesti ja yksikkönä näissä laskelmissa on kW/m^2 . Saaduista paistetiedoista on laskettu, kuinka paljon yksi aurinkopaneeli tuottaa sähköä ja nämä tulokset ovat yksikkömuodossa kWh.

Työtä vaikeutti alkuperäisen suunnitelman mukaan tehtävästä vertaaminen todellisesta aurinkoseuraajasta saataviin tietoihin, joita ei tähän opinnäytetyön aikaan ollut saatavilla. Tästä syystä työn joutui rajaamaan vain teoreettiseksi, kun käytännöstä saatavia tietoja ei ollut saatavilla.

5 Tuoton laskeminen aurinkoseuraimelle

Laskennallisesti aiemmin esitettyjä kaavoja käyttäen saadaan auringon korkeimmaksi kulmaksi Joensuun korkeudella kesäpäiväntasauksen aikaan 50.65° .

Laskennallisesti käyttäen ilmakehän yläosiin saapuvan auringonsäteilyn määränä $1\,368\text{ W/m}^2$, olisi mahdollista saada energiaa neliömetriin kohden Joensuun korkeudella $1\,970\text{ kWh/m}^2$ vuodessa. Ilmakehän heijastumisen ja absorboivan vaikutuksesta johtuen suurin säteily maan pinnalla on kirkkaalla säällä korkeintaan $1\,000\text{ w/m}^2$ (Suntekno 2010).

Käyttämällä maanpinnalle saapuvaa auringonsäteilyä, jonka arvona on käytetty $1\,000\text{ W/m}^2$, saadaan laskennalliseksi tulokseksi $1\,440\text{ kWh/m}^2$ vuodessa. Tämä

tulos on saatu laskemalla auringon asennon perusteella yhden neliömetrin kokoiselle alalle. Tuloksessa on vain suora auringonpaiste, jossa ei ole otettu huomioon hajasäteilyä, joka on suomen olosuhteissa huomattava.

Käyttäen valmiita sovelluksia kuten PVgis, tämän laskelman avulla tulokseksi on saatu 1 500 kWh/m². Joka perustuu mittaustuloksiin ja ottaa huomioon myös hajasäteilyn osuuden, joita tässä ylemmässä laskelmassa ei ole otettu huomioon. Aurinkopaneelia tässä laskelmassa on käytetty kaksiakselista aurinkoseurainta, jonka nimellisteho on käytetty esimerkissä 1kWp, oletus tehonhäviönä 14% ja asennustapana vapaata asennusta, jolla tarkoitetaan, että aurinkopaneeli ei ole suoraan kiinni missään rakenteessa. Kaksi akselisella aurinkoseuraimella seurain seuraa auringon liikettä vaakatasossa ja pystysuunnassa.

5.1 Aurinkopaneelin suuntaus aurinkoseuraimelle

Tässä osuudessa tarkastellaan aurinkopaneelin suuntauksen muutokset kuukausittain ja kuinka kauan aurinko on horisontin yläpuolella, jolloin on mahdollista saada energiaa tuotettua. Suuntauksena 0 astetta tarkoitetaan pohjoista suuntaa ja 180 astetta etelää. Tämän suuntaus on tehty yhden tunnin jaksoissa, jolloin aurinko siirtyy 15 astetta.

Taulukko 1. Laskennalliset aurinkopaneelin kulmat muutokset kuukausittain.

Kuukausi	kulma(°)	Suunta(°)		Kesto(h)
		Alkukuu	Loppukuu	
Tammikuu	4,13 - 9,22	150 - 210	135 - 225	5 - 7
Helmikuu	9,48 - 18,25	135 - 225	120 - 240	7 - 9
Maaliskuu	18,64 - 30,52	120 - 240	90 - 270	9 - 13
Huhtikuu	30,91 - 41,55	90 - 270	75 - 300	13 - 16
Toukokuu	41,87 - 48,99	60 - 300	45 - 315	17 - 19
Kesäkuu	49,13 - 50,42	45 - 315	45 - 315	19 - 19
Heinäkuu	50,37 - 45,56	45 - 315	60 - 300	19 - 17
Elokuu	45,30 - 35,59	60 - 300	75 - 285	17 - 15
Syyskuu	35,2 - 23,68	75 - 285	105 - 255	15 - 11
Lokakuu	23,28 - 12,38	105 - 255	135 - 225	11 - 7
Marraskuu	12,07 - 5,34	135 - 225	150 - 210	7 - 5
Joulukuu	5,20 - 4,07	150 - 210	150 - 210	5 - 5

Taulukosta 1 nähdään kuinka paljon aurinko on horisontin yläpuolella, vuoden jokaiselle kuukaudelle ja kuukauden sisäinen muutos. Ensimmäisessä sarakkeessa eritetään, kuinka monta astetta aurinko on horisontin yläpuolella ja sen muutos alkukuusta loppukuulle. Toisen sarakkeen tiedot kertovat auringon suunnat, silloin kun aurinko on horisontin yläpuolella, ja sen muutoksen alkukuusta loppukuulle. Viimeisessä sarakkeessa kerrotaan, kuinka monta tuntia aurinko on horisontin yläpuolella ja sen muutos alkukuusta loppukuulle.

5.2 Paneelien tuotot

Tässä osuudessa kerrotaan, kuinka paljon auringonsäteilytuottoja erilaisilla järjestelmillä paistaa kuukausittaisella tarkkuudella. Säteilytuotoista saadulla tiedolla on laskettu, kuinka paljon aurinkopaneeli tuottaa sähköä kyseisellä ajalla (taulukko 2). Laskelmassa on käytetty kaksiakselista aurinkoseurainta.

Taulukko 2. Aurinkopaneelin laskennalliset säteily tuotot.

Säteilytiedot	kWh/m ²
Tammikuu	13
Helmikuu	36
Maaliskuu	94
Huhtikuu	160
Toukokuu	232
Kesäkuu	257
Heinäkuu	251
Elokuu	195
Syyskuu	118
Lokakuu	58
Marraskuu	19
Joulukuu	7
Vuoden kokonaissäteily	1 440

Laskennallisesti vuoden aikaiset säteilyn määrät neliömetrin kokoisella alalla kaksiakseliselle aurinkoseuraimelle.

Tuottojen mitoitukseen on käytetty apuna ympäristöministeriön julkaisemaan Aurinko-opas 2012-ohjeita. Laskelmissa käytettiin huipputehokertoimena (K_{max}) pii-pohjaisille kennoille arvoa 0,15. Käyttötilanteen toimivuuskertoimena $F_{käyttö}$ 0,75,

joka on hieman tuuletetun moduulin toimintavarmuuskerroin. Kallistuksen ja ilmansuunnan kertoimina tässä laskemassa arvoa 1, kun paneeli joka seuraa aurinkoa ei ole kiinteää suuntaa. Auringon kokonaissäteilyn määrää käytin laskennallisesti saatua tulosta 1440kWh/m²/a. Aurinkopaneelin kokona on käytetty 275W paneelia, jonka pinta-alaltaan kennojen alueena on 1,44m².

$$E_{s,pv,out} = \frac{E_{sol} * P_{maks} * F_{käyttö}}{I_{ref}} \quad (4)$$

Jossa E_{sol} on vuotuinen säteilyenergia, joka kohdistuu aurinkosähkökennoihin (kWh/m²,a). P_{maks} on aurinkokennon tuottama maksimi sähköteho, jonka kenno tuottaa referanssisäteilytilanteessa ($I_{ref} = 1 \text{ kWh/m}^2$, referenssilämpötilassa 25C (kW). $F_{käyttö}$ on käyttötilanteen toimivuuskerroin ja I_{ref} on referanssisäteilytilanne (1 kWh/m²).

$$P_{max} = K_{max} * A$$

Jossa K_{max} on huipputehokerroin Ja A on paneelin kennojen pinta-ala.

$$P_{max} = 0.15 * 1.44m^2 = 0.216$$

$$E_{s,pv,out} = \frac{1440 \text{ kWh/m}^2/\text{a} * 0.216 * 0.75}{1 \text{ kWh/m}^2} = 233.28 \text{ kWh/a}$$

Laskennallisesti aurinkoseuraajan tulos vuodessa oli 233 kWh/a.

Kuukausittaiset tuotot saadaan vuosittaisista säteilytiedoista laskettua jakamalla kuukausituotot, jolloin saadaan kuukausien prosenttitulokset. Prosenttiosuuden perusteella voidaan laskea kuukausittainen sähköenergian tuotto.

Taulukko 3. Kaksiakselisen aurinkoseuraimenin laskennalliset tuotot.

Kuukausi	Prosentit vuosituotosta	kWh
Tammikuu	1 %	2,0
Helmikuu	3 %	5,8
Maaliskuu	7 %	15,2
Huhtikuu	11 %	25,9
Toukokuu	16 %	37,5
Kesäkuu	18 %	41,6

Heinäkuu	17 %	40,7
Elokuu	14 %	31,5
Syyskuu	8 %	19,1
Lokakuu	4 %	9,4
Marraskuu	1 %	3,0
Joulukuu	0,5 %	1,1
Yhteensä	100 %	233

Taulukosta 3. nähdään kuinka paljon sähköenergiaa kaksiakselisella aurinkoseuraimella on mahdollista tuottaa ja kuukausittaiset prosenttiosuudet ja tuotot.

Kiinteään aurinkopaneelin sähköntuottoon vaikuttavat monet asiat, kuten aurinkopaneelin suuntaus, asennustapa ja asennuskulma. Ilmansuunta mihin suuntaan aurinkopaneeli on suunnattu, vaikuttaa milloin aurinkopaneeli tuottaa parhaiten sähköä.

Kiinteään asennettavan paneeliin saatavat teoreettiset tiedot on otettu PVGIS:n tietokannasta. Optimikulma, jonka Joensuun korkeudella laskuri antaa, on 42° ja paneelin suuntauksena etelä. Tietokannasta saadaan selville, kuinka paljon on säteilytietoa neliometriä kohden.

Taulukko 4. Valmiin laskurin antama tuotto.

Säteilytiedot	kWh/m ²
Tammikuu	20
Helmikuu	53
Maaliskuu	92
Huhtikuu	139
Toukokuu	164
Kesäkuu	159
Heinäkuu	166
Elokuu	123
Syyskuu	75,5
Lokakuu	40
Marraskuu	15
Joulukuu	10
Vuoden kokonaissäteily	1 060

Säteilyn määrä nelimetriin kohden kiinteästi asennettuna saadaan 1 060 kWh neliometriä kohden vuodessa. Laskelmissa käytettiin huipputehokertoimena (K_{\max}) piipohjaisille kennoille arvoa 0,15. Käyttötilanteen toimivuuskertoimena $F_{\text{käyttö}}$

0,75. Kallistuksen kertoimena taulukosta on käytetty arvoa 1, kun aurinkopaneelin kulmana on käytetty 42 ja ilmansuunnan etelä on kertoimena käytetty arvoa 1. Auringon kokonaissäteilyn määrää käytin pvGis:istä saatua tulosta 1 060 kWh/m²/a. Aurinkopaneelin kokona on käytetty 275W paneelia, joka on pinta-alaltaan kennojen alueelta 1,44m². Laskennallisesti aurinkopaneelin vuosituotto oli 171 kWh/a. Laskentakaavana on käytetty samaa kuin kaksiakselisen aurinkoseuraimen tuoton laskemiseen.

Taulukko 5. Pvgis:n kautta saatava aurinkopaneelin tuotot.

Kuukausi	Prosentit vuosituotosta	kWh
Tammikuu	2 %	3,2
Helmikuu	5 %	8,5
Maaliskuu	9 %	14,9
Huhtikuu	13 %	22,5
Toukokuu	16 %	26,6
Kesäkuu	15 %	25,8
Heinäkuu	16 %	26,9
Elokuu	12 %	19,9
Syyskuu	7 %	12,2
Lokakuu	4 %	6,5
Marraskuu	1 %	2,4
Joulukuu	1 %	1,6
		171

5.3 Vertailu paneeleiden välillä

Kuukausittain tietoja verrattuna lasketut auringonsäteilyt ovat Tammi-, Helmi- ja Joulukuussa pienemmät kuin pvGis:n kautta saatavat todellisiin auringonsäteilytietoihin verrattuna. Tämä johtuu hajasäteilyn määrästä, jota ei ole huomioitu laskennallisissa tuloksissa.

Seuraavan aurinkopaneelin vuotuinen säteilyn määrä on 1440 kWh/m² ja kiinteästi asennetun aurinkopaneelille säteilyn määrä on 1056 kWh/m² ja erotus 384, kWh/m² enemmän, seuraavalle aurinkopaneelijärjestelmälle paistaa vuodessa. Laskennallisesti yhden aurinkopaneelin tuotto seuraavalla järjestelmällä on 233 kWh vuodessa, kiinteästi asennetun aurinkopaneelin tuotto vastaavasti on 171 kWh vuodessa ja erotuksena järjestelmillä on 62 kWh seuraavan järjestelmän hyväksi. Prosentteina tulos on 27 prosenttia enemmän energiaa, on mahdollista

tuottaa seuraavalla järjestelmällä. Suurimmat erot tulevat näkyviin kesäkuukausina, Toukokuussa ero tekniikoiden välillä on 11 kWh, Kesäkuussa 16 kWh, Heinäkuussa 14 kWh ja Elokuussa 12 kWh enemmän energiaa seuraavalla järjestelmällä on mahdollista tuottaa. Rakenteellisten eroja eri järjestelmissä on, aurinkoseuraimella aurinkopaneeli siirtyy moottorien avustuksella yksiakselisella tai kaksiakselisella järjestelmällä. Kiinteästi asennetussa aurinkopaneelissa, aurinkopaneeli on jatkuvasti samassa asennossa.

6 Johtopäätökset tuloksista

Aurinkoa seuraavalla kaksiakselisella järjestelmällä on mahdollista saada samankokoisella aurinkopaneelilla tuotettua energiaa 27 prosenttia enemmän kuin kiinteään kulmaan asennetulle paneelilla. Tässä asiassa pitää ottaa huomioon, että aurinkoa seuraava järjestelmä kuluttaa seuraamiseen energiaa. Suurin hyöty seuraavalla järjestelmällä on mahdollista saada silloin, kun aurinko paistaa pitkään. Kesäkuukausina on mahdollista saada teoriassa kiinteään aurinkopaneelijärjestelmään verrattuna keskimäärin 35 % enemmän energiaa tuotettua, kesäkuussa jopa 38 % enemmän energiaa tuotettua. Myös kevään ja syksyn aikana on mahdollista seuraavalla järjestelmällä saada enemmän energiaa kuin kiinteästi asennettuun aurinkopaneeliin verrattuna.

Talvikuukausina Pvgis:n laskuri antaa parempia lukemia tuloksiin ja tämä erotus johtuu siitä, kun laskurissa on otettu huomioon myös hajasäteilyn osuus. Hajasäteilyn lisä laskurissa antaa suuremman tuloksen, mutta erotus ei ole kovin suuri. Toinen asia mikä pitää ottaa huomioon, on pilvien vaikutus, valmiissa laskureissa, ja niiden tulokset perustuvat todelliseen auringonpaisteeseen.

7 Pohdinta

Yhden paneelin tuoton perusteella voidaan laskea useamman aurinkopaneelijärjestelmän tuotot ja verrata saatua tulosta usean aurinkopaneelin järjestelmään. Kun lasketaan usean paneelin järjestelmän tuotot, saadaan selville, kuinka paljon eroavaisuutta on järjestelmien tuottojen välillä. Kolmen paneelin järjestelmällä seuraava järjestelmä tuottaa 699 kWh vuodessa ja kiinteästi asennettu järjestelmä tuottaa 513 kWh vuodessa ja näiden järjestelmien erotus on 183 kWh vuodessa. Seuraavalla järjestelmällä, kolmella paneelilla on mahdollista saada enemmän energiaa tuotettua kuin kiinteästi asennettuna neljällä paneelilla.

Käyttökohteita, joissa aurinkoseuraimen hyödyt tulevat paremmin esille ovat, aukeat paikat, joissa ei ole varjostavia kohteita, kuten puita ja muita rakennuksia. Muita hyviä kohteita ovat tasakattoisten rakennusten katot, joihin pääsee hyvin käsiksi myös talvella. Tällöin aurinkoseuraimen hyödyt tulevat esille myös talvella, jos aurinkopaneelit pidetään puhtaina lumesta. Tosin tuotto ei ole kovinkaan suurempi talvella.

Kiinteästi asennettujen aurinkopaneelien kohteiksi soveltuvat paikat, joihin ei ole mahdollista päästä niin nopeasti, kuten talojen ja rakennusten kaltevat katot. Näihin kohteisiin on yleensä mahdollista laittaa enemmän paneeleita, jolla korvataan pienempi tuotto verrattuna seuraavaan järjestelmään.

Kiinteästi asennettavat aurinkopaneelit ovat huoltovapaampia kuin aurinkoseurain, jonka paneelin liikkumisen hoitaa moottori. Myös mahdolliset mekanismit voivat aiheuttaa varsinkin talvella lisää huoltamista, mahdollisen jään kertymisen aiheuttamasta rasituksesta. Tosin hankintakustannukset ovat suuremmat aurinkoseurainjärjestelmässä ja syy on mekaniikasta johtuva. Huoltokustannukset ovat suuremmat aurinkoseurainjärjestelmässä, koska järjestelmässä on liikkuvia osia, jotka vaativat huoltoa.

Lähteet

- Ala-Myllymäki, E. Aurinkodemo. 2017. Saatavissa: https://www.merinoa.fi/wp-content/uploads/2016/09/aurinkodemo_loppuraportti.pdf. 21.2.2017
- Aureva Solar. Aurinkoenergia on nykyaikainen ratkaisu. Aureva Solar. 2018. Saatavissa: <http://www.areasolar.fi/fi/aurinkoenergia>. 17.9.2018.
- Erat, B., Erkkilä, V., Nyman, C., Peippo, K., Peltola, S. & Suokivi, H. 2008. Aurinko-opas, aurinkoenergiaa rakennuksiin. Porvoo. Aurinkoteknillinen yhdistys ry.
- Heimonen, I. Aurinko-opas 2012. Ympäristöministeriö. 2011. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7BF4F73E83-56AF-4112-AD7B-0E1F1804D38B%7D/30750>. 23.8.2011.
- Motiva. Auringonsäteilyn määrä Suomessa. 2018. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringsateilyn_maara_suomessa. 17.9.2018.
- Photovoltaic Geographical Information System. Joint Research Center. 2012. Saatavissa: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>. 13.9.2018.
- Prinsloo, G. & Dobson, R. Solar Tacking. 2015. Saatavissa: https://www.researchgate.net/profile/Gerro_Prinsloo/publication/263128579_Solar_Tracking_Sun_Tracking_Sun_Tracker_Solar_Tracker_Follow_Sun_Sun_Position/links/574d337508ae82d2c6bc8f98/Solar-Tracking-Sun-Tracking-Sun-Tracker-Solar-Tracker-Follow-Sun-Sun-Position.pdf. 20.10.2015.
- Role of photonics in energy. 2015. https://www.researchgate.net/publication/282817415_Roles_of_Photonics_in_Energy. 10.2015.
- Smith, S. PV Trackers. 2011 Saatavissa: http://solarprofessional.com/articles/products-equipment/racking/pv-trackers?v=disable_pagination&nopaging=1#.WtPtqohua7. 2.6.2011.
- Suntekno. Aurinkoenergia ABC-opas. Suntekno Oy. 2010. Saatavissa: <http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/aurinkoenergia.pdf>. 15.4.2010.
- Suntekno. Aurinkopaneelit. 2010. Saatavissa: <http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>. 15.4.2010.
- Tilastokeskus. Sähkön hinta kuluttajatyypettäin. 2018. Saatavissa: http://stat.fi/til/ehi/2018/02/ehi_2018_02_2018-09-12_kuv_005_fi.html. 12.9.2018.
- Wikipedia. Insolaatio. 2011. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Insolaatio>. 18.5.2016.