

Aurinkopaneeliston hyötysuhteen käyttäytymisen määrittäminen havaintojen perusteella

Pro gradu -tutkielma, 3.12.2018

Tekijä:

NIINA MÄKELÄ

Ohjaaja:

JUSSI MAUNUKSELA



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
FYSIKAN LAITOS

© 2018 Niina Mäkelä

Julkaisu on tekijänoikeussäännösten alainen. Teosta voi lukea ja tulostaa henkilökohtaista käyttöä varten. Käyttö kaupallisiin tarkoituksiin on kielletty. This publication is copyrighted. You may download, display and print it for Your own personal use. Commercial use is prohibited.

Tiivistelmä

Mäkelä, Niina

Aurinkopaneeliston hyötysuhteen käyttäytymisen määrittäminen havaintojen perusteella

Pro gradu -tutkielma

Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto, 2018, 58 sivua

Verkkoon kytketty 6 kW aurinkopaneelisto on sijoitettu Saarijärven koulukeskuksen katolle. Käytössä on SANYON HIT-sarjan aurinkokennoja. Paneeliston yhteyteen on sijoitettu mittauskeskus ja erilaisia antureita. Näiden avulla kerätään dataa paneeliston sähköntuotannosta ja sääolosuhteista, joissa paneelistot toimivat. Tätä tutkielmaa aloittaessa aineistoa on kerätty yli kymmenen vuoden ajalta.

Aineiston analysointia varten dataa on jouduttu siistimään, sillä aineisto on osittain puutteellista tai virheellistä. Lisäksi paneeliston hetkelliset hyötysuhteet ovat hajaantuneet laajalle alueelle, jolloin sovitusten tekeminen koko datapistejoukkoon ei ole järkevää. Aineistosta on poistettu analyysia varten kaikki selvästi virheellinen data sekä ajan, joina Auringon säteilyteho on ollut alle 80 W/m^2 . Analyysissä päädyttiin lopulta käyttämään vain aurinkoisia kesäpäiviä, sillä muina vuodenaikoina datapistejoukon hajonta oli huomattavaa. Oletettavasti tämä johtuu paneeliston peittymisestä esimerkiksi lumen alle.

Aineiston siistimisen jälkeen jokaiselle datapisteelle on laskettu hetkellinen hyötysuhde. Datapistejoukkoon voidaan tehdä lineaarinen sovitus, $\eta(T) = \alpha_\eta(T - T_{STC}) + \eta_{STC}$. Sovitukset tehdään sekä koko aineistolle että eri säteilytehoille, kuten $100 \text{ W/m}^2 \pm 50 \text{ W/m}^2$, $200 \text{ W/m}^2 \pm 50 \text{ W/m}^2$ jne. Koko aineistoille tehdystä sovituksesta saadaan parametreille arvoiksi $\alpha_\eta = -0,0603 \pm 0,0009$ ja $\eta_{STC} = 16,42 \pm 0,02$, eli paneeliston hyötysuhde laskee noin 0,06 prosenttiyksikköä paneeliston lämpötilan kasvaessa $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Muut sovitukset antavat samankaltaisia tuloksia.

Saadut tulokset vastaavat oletettua käytöstä, tosin teoreettisesti valmistajan ilmoittamien järjestelmän ominaisuuksien perusteella saadaan kulmakertoimelle hieman suurempi arvo. Sovituksesta saatava hyötysuhde STC-olosuhteissa, 16,0 %, on lähellä valmistajan ilmoittamaa hyötysuhdetta (16,5 %). Käytössä olevat

aurinkokennot voivat siten saavuttaa valmistajan ilmoittaman hyötysuhteen myös ilman laboratorio-olosuhteita.

Avainsanat: Aurinkopaneeli, hyötysuhde, ulkoilmamittaukset, pieni säteilyteho

Abstract

Mäkelä, Niina

Determining efficiency behaviour of PV system using collected data

Master's thesis

Department of Physics, University of Jyväskylä, 2018, 58 pages.

The grid connected PV system has been sited on the rooftop of the school of Saarijärvi. The PV system uses SANYO's HIT-series cells. The system also includes a measurement center and different kind of sensors. The measurement center collects data on electricity production and weather conditions. Data has been collected for more than a decade.

The collected data has been processed and cleaned up, because some parts of the data are imperfect or even inaccurate. Also solar panel efficiencies have a huge scattering without data cleaning, and therefore it's not reasonable to do a linear fit for the data set. In the cleaning process of the data, all data points with irradiance below 80 W/m^2 have been removed. In the end, only sunny summer days were used in analysis, because the scattering of the data was too high in other seasons. It's likely that the scattering is due to partial shading caused by snow.

The efficiency has been calculated for every tidied data point. A linear fit, $\eta(T) = \alpha_\eta(T - T_{STC}) + \eta_{STC}$, is made for the data set. The linear fit is done for all datapoints and also for specific irradiance values, like 100 W/m^2 , 200 W/m^2 etc. The linear fit including all datapoints gives parameter values $\alpha_\eta = -0,0603 \pm 0,0009$ and $\eta_{STC} = 16,42 \pm 0,02$. Fits including specific irradiance values give same kind of parameter values.

Results correspond to the assumptions, even though theoretical calculations give little higher value for the slope. The efficiency in STC has been determined to be 16.0 %, which is close to the efficiency stated by the manufacturer (16.5 %). According to the results, the PV system can achieve the efficiency stated by the manufacturer even in the outdoor measurements.

Keywords: Solar cell, efficiency, outdoor measurement, low irradiance

Kiitokset

Suuret kiitokset erityisesti ohjaajalleni, joka on jakanut omaa tietämystään ja tarjonnut runsaasti neuvoja ja apua tämän tutkielman valmiiksi saattamiseen. Kiitokset myös vanhemmilleni, jotka ovat olleet tukena ja turvana opiskelujeni aikana, vaikka eivät fysiikasta sen enempää ymmärräkään. Paljon kiitoksia myös ystäväilleni, jotka ovat jaksaneet kuunnella valituksiani ja tarjonneet sosiaalista elämää sekä fysiikan laitoksen sisäpuolella että ulkopuolella.

Kumpikaan kissoistani ei valitettavasti ansaitse kiitosta, sillä heidän lisäyksistään koodeihin ja gradupohjaan oli enemmän haittaa kuin hyötyä.

Jyväskylässä 31. lokakuuta 2018

Niina Mäkelä

Sisältö

Tiivistelmä	3
Abstract	5
Esipuhe	7
1 Johdanto	11
2 Taustaa työlle	13
2.1 Auringon säteilemä energia	13
2.2 Aurinkokenno	14
2.2.1 Puolijohde	14
2.2.2 Yksikiteinen-, monikiteinen- ja amorfinen pii	18
2.3 STC-olosuhteet	19
2.4 Aurinkokennon mallintaminen	19
3 Teoreettinen tausta	23
3.1 Sanyon HIT-kennon rakenne	23
3.2 Hyötysuhde	24
3.3 Hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä	25
4 Järjestelmän kuvaus	29
5 Aineisto	33
5.1 Aineiston kuvaus	33
5.2 Aineiston siistiminen	34
6 Aineiston analysointi	45
7 Tulokset	51
8 Päätäntö	55

1 Johdanto

Nykyään kuluttaja kiinnittää entistä enemmän huomiota omaan hiilijalanjälkeensä ja valintojensa ekologisuuteen. Tällöin myös uusiutumattomille energianlähteille täytyy pohtia korvaajaa. Auringon säteilemä energia on niin kutsuttua uusiutuvaa energiaa. Auringosta saatavan energian etuna on, että siitä saatavan energian määrä ylittää koko maailman tämän hetkisen energiatarpeen moninkertaisesti. Kaikkea Auringon säteilyä ei pystytä muuttamaan sähköksi, mutta edes osittainen uusiutumattomien energianlähteiden korvaaminen uusiutuvilla energian muodoilla, kuten aurinkosähköllä, auttaa ehkäisemään ilmastoon kohdistuvia haitallisia muutoksia ja on siten osa kestäväää energiaratkaisua.

Auringosta saatava energia voidaan muuttaa sähköksi esimerkiksi aurinkopaneelistojen avulla. Aurinkopaneeliston pystyttäminen ei kuitenkaan ole ilmaista ja potentiaalinen aurinkopaneeliston ostamisesta kiinnostunut kuluttaja joutuu pohtimaan sijoituksensa kannattavuutta. Kuluttajan kannalta kiinnostavia kysymyksiä voivat olla, onko laitteiston käyttö kannattavaa Suomessa, jossa talvisin Aurinko nousee vain muutamaksi tunniksi horisontin yläpuolelle ja kattavatko paneeliston avulla saadut säästöt sähkölaskussa aurinkopaneeliston pystyttämiseen vaadittavan sijoituksen. Aurinkopaneelistojen yleistymisen kannalta on oleellista pystyä esittämään tietoa siitä, miten paljon energiaa voidaan tuottaa keskimäärin vuoden aikana ja toimiiko laitteisto käytön aikana kuten sen pitäisi, eli vastaavatko sen ominaisuudet luvattuja ja onko se toiminut rikkoutumatta.

Tässä tutkielmassa tarkastellaan sitä, miten paneeliston hyötysuhde muuttuu paneeliston lämpötilan muuttuessa, sekä pohditaan miten paneeliston hyötysuhdetta olisi mahdollista parantaa Suomen sääolosuhteissa. Saarijärven keskuskoululla sijaitsevasta aurinkopaneelistosta on kerätty aineistoa vuoden 2005 lokakuusta alkaen. Aineistoa on kerätty sekä sähköntuotannosta että sääolosuhteista, joissa paneelisto on toiminut. Kerätyn aineiston avulla voidaan määrittää miten olosuhteet vaikuttavat paneeliston sähköntuotantoon ja etenkin paneeliston hyötysuhteeseen. Analyysin tekemistä hankaloittaa se, että aineiston kerääminen on välillä keskeytynyt. Aineistoa on kuitenkin kerätty hyvin pitkältä ajalta, jolloin nämä puuttuvat ajanjaksot eivät

hankaloita suuresti luotettavan analyysin tekemistä.

Tutkielman tavoitteena on määrittää Saarijärven keskuskoululla sijaitsevan aurinkopaneeliston ominaisuuksia kerätyn aineiston perusteella ja tutkia vastaavtko saatavat arvot valmistajan antamia tietoja. Tutkielmassa keskitytään erityisesti tarkastelemaan, miten paneeliston hyötysuhde muuttuu paneelilämpötilan muuttuessa. Saatuja tuloksia verrataan teoreettisesti määritettyihin hyötysuhteisiin sekä muihin vastaaviin tutkimuksiin. Analyysin tuloksien perusteella halutaan myös tarkastella ovatko paneelistot toimineet siten kuten niiden pitäisi ja miten paneeliston sähköntuottavuutta voisi parantaa.

Tekstin tarkoituksena on antaa lukijalleen tietoa aurinkopaneelin toiminnasta sekä siitä, toimiiko aurinkopaneelisto odotetusti Suomen olosuhteissa. Voidakseen ymmärtää aurinkopaneeliston toimintaa lukijalla tulee ensin olla jonkin asteinen käsitys siitä, miten aurinkokennot toimivat ja miten ne on rakennettu. Tähän perehdytään luvussa 2, jossa lukijalle esitellään Auringon säteilemä energia ja perehdytään aurinkokennojen rakenteeseen ja toimintaan. Pyrkimyksenä on, että lukija ymmärtää luvun lukemisen jälkeen, miten aurinkoenergia voidaan muuttaa aurinkopaneelien avulla sähköksi ja ymmärtää aurinkopaneeliston toimintaperiaatteen. Aurinkokennojen toiminnan jälkeen siirrytään käsittelemään tutkielman teoreettista taustaa (luku 3). Luvussa esitellään aurinkokennon sähköiset ominaisuudet ja miten ne voidaan määrittää. Tekstissä keskitytään erityisesti hyötysuhteeseen ja siihen vaikuttaviin tekijöihin.

Tämän jälkeen tutkielmassa siirrytään käsittelemään käytössä ollutta järjestelmää ja siitä kerättyä aineistoa. Ensin lukijalle esitellään käytössä ollut paneelisto sekä sen sijoituspaikka. Lukijalle kerrotaan käytössä olevasta paneelistosta, inverttereistä sekä järjestelmään kuuluvista sensoreista. Järjestelmän esittelyn jälkeen lukijalle kerrotaan, millaista aineistoa järjestelmästä on kerätty sekä miten kerättyä aineistoa on käsitelty analyysin tekemiseksi. Lukijalle kerrotaan myös, miten lopullisen siistityn aineiston analyysi on tehty sekä millaisia tuloksia aineistosta on saatu. Saatuja tuloksia verrataan teoreettisiin arvoihin ja muihin tutkimuksiin. Tekstin lukemisen jälkeen lukijalla pitäisi olla käsitys siitä, millaisia hyötysuhteita aurinkopaneelistoilla on mahdollista saada ja mitkä tekijät vaikuttavat hyötysuhteeseen. Lukijan toivotaan myös ymmärtävän, miten paneeliston hyötysuhdetta voidaan kasvattaa.

2 Taustaa työlle

Tämän luvun tarkoituksena on antaa lukijalle käsitys Auringon säteilemästä energiasta ja perustella miksi aurinkoenergiaa käytetään energian lähteenä sekä auttaa ymmärtämään miten aurinkoenergia voidaan muuttaa aurinkopaneelien avulla sähköksi. Luvun lukemisen jälkeen lukija ymmärtää myös aurinkokennon toimintaperiaatteen.

2.1 Auringon säteilemä energia

Aurinko on suuri energianlähde. Auringon säteilemästä energiasta noin 1575–49837 EJ on vuositasolla potentiaalisesti hyödynnettävissä Maan pinnalla [1]. Potentiaalisesti hyödynnettävissä olevan energian määrään vaikuttavat muun muassa maantieteellinen sijainti, vuoden- ja vuorokaudenaika, sääolosuhteet sekä mahdolliset sijoittamispaikat aurinkosähköjärjestelmille. Vuonna 2015 maailman primäärinen energian tarve oli hieman yli 13600 Mtoe \approx 577 EJ [2]. Auringon säteilemän energian määrä on siten moninkertainen maailman tämän hetkiseen energiantarpeeseen nähden.

Aurinkoenergia on uusiutuvaa ja niin kutsuttua ”puhdasta energiaa”, sillä aurinkoenergian keräämiseen käytettävät menetelmät tuottavat huomattavasti vähemmän kasvihuonepäästöjä kuin esimerkiksi öljyn käyttäminen energiantuotantoon. [3] Tästä syystä aurinkoenergian käyttäminen tukee kestävää kehitystä.

Vaikka Auringon säteilemän energian määrä ylittää maailman tämänhetkisen energian tarpeen, kaikkea Auringon säteilemää energiaa ei voida muuttaa sähköksi. Yksi syy tähän on käytettävien tekniikoiden heikko hyötysuhde. Kuitenkin, esimerkiksi aurinkopaneelien hyötysuhde on kasvanut huomattavasti viimeisten vuosikymmenien aikana [3]. Toinen nopeasti esille nouseva ongelma on Auringon säteilyn epätasainen jakautuminen maapallon pinnalle, sillä esimerkiksi napojen läheisyydessä Auringon säteilyteho on pienempää kuin päiväntasaajan läheisyydessä. Tästä huolimatta Auringon säteilystä syntynyttä energiaa voidaan hyödyntää jollain käyttöasteella kaikkialla Maan pinnalla. Tämä mahdollistaa sähköntuotannon alueilla, joille sähköverkon infrastruktuurin rakentaminen olisi kallista tai muuten haasteellista.

Auringosta saatava energia voidaan jakaa suoraan ja epäsuoraan energiaan [4].

Suoralla energialla tarkoitetaan energiaa, joka on mahdollista saada suoraan Auringon säteilystä (esim. aurinkosähkö tai lämpö). Esimerkiksi tuuli ja kasvien kasvaminen ovat esimerkkejä epäsuorasta energiasta. Molemmat vaativat Auringon säteilemää energiaa muodostuakseen, mutta niistä saatava energia ei ole enää suoraan peräisin aurinkoenergiasta.

Auringosta suoraan saatavaa energiaa voidaan hyödyntää useilla erilaisilla teknologioilla, joista yksi on aurinkosähkö (eng. photovoltaics). Aurinkosähkön tuottamiseen käytetään aurinkokennoja, jotka muuttavat Auringon säteilemän energian sähkövirraksi. Seuraavassa luvussa keskityn tähän teknologiaan ja sen ominaisuuksiin.

2.2 Aurinkokenno

Aurinkopaneelit koostuvat aurinkokennoista. Tämän osion tarkoituksena on selittää aurinkokennojen toimintaperiaate ja rakenne. Aurinkokennojen toiminnan ymmärtämiseksi esitellään ensin puolijohdeiden toiminta ja niiden ominaisuudet. [4]

2.2.1 Puolijohde

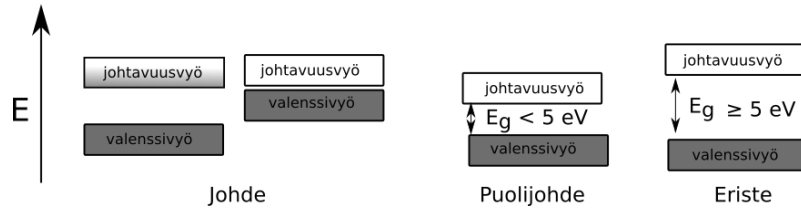
Aurinkokennot ja muut aurinkosähköiset systeemit tarvitsevat toimiakseen puolijohdeita. Puolijohdeet valmistetaan yleensä aineista, joilla on keskimäärin neljä elektronia uloimmalla elektronikuorella. Tällaisia atomeja ovat pii (Si), germanium (Ge), tina (Sn) tai yhdisteet, kuten galliumarsenidi (GaAs) tai kadmium-telluuri (CdTe) [4]. Piin käyttö on yleistä, sillä sitä löytyy luonnosta paljon.

Atomit, kuten pii, ja erilaiset yhdisteet, kuten GaAs, pyrkivät muodostamaan mahdollisimman stabiilin yhdisteen. Tämä onnistuu, kun atomin elektronit pariutuvat naapuriatomin elektronien kanssa muodostaen kovalenttisen sidoksen. Atomi, jossa on neljä elektronia uloimmalla elektronikuorella, tarvitsee neljä naapuria muodostaakseen täyden elektronikuoren.

Kun atomeista muodostuu kiteinen materiaali, diskreetit atomaariset tilat muodostavat jatkuvia elektronivöitä. Johtavuusominaisuuksien kannalta tärkeimmät vyöt ovat valenssivyö ja johtavuusvyö. Näiden väliin jäävää aluetta kutsutaan kielletyksi alueeksi, sillä elektronien energiaa ei ole mahdollista olla tällä alueella.

Eri materiaalit voidaan jakaa johteisiin, puolijohdeisiin ja eristeisiin niiden elektronivöiden täyttöasteen ja etäisyyden perusteella. Kuviossa 1 esitetään miten johteen, puolijohdeiden ja eristeen elektronivyöt eroavat toisistaan. Johteen tapauksessa on kaksi

erilaista mahdollisuutta: valenssivyö on täynnä ja johtavuusvyö on osittain täytetty, jolloin kielletyn alueen leveydellä ei ole merkitystä. Toinen mahdollinen tapaus on, että valenssivyö on täynnä ja johtavuusvyö on tyhjä, mutta väiden välinen kielletty alue on hyvin pieni, jolloin elektronit siirtyvät pienen energian turvin valenssivyöltä johtavuusvyölle. Eristeessä täyden valenssivyön ja johtavuusvyön välinen kielletty alue on puolestaan leveä, tyypillisesti yli 5 eV [4]. Eristeessä elektronit eivät pysty siirtymään helposti valenssivyöltä johtavuusvyölle kuten johteen tapauksessa. Tällöin aineessa ei ole vapaita varauksenkuljettajia ja tästä johtuen aineen kyky johtaa sähköä on heikkoa. Puolijohde taas on johteen ja eristeen välimuoto. Se johtaa sähköä eristettä paremmin, mutta kuitenkin huonommin kuin johde. Puolijohdeessa valenssivyö ja johtavuusvyö ovat lähempänä toisiaan kuin eristeissä, jolloin elektronien on helpompi siirtyä täydeltä valenssivyöltä johtavuusvyölle. Tällöin valenssivyölle syntyy aukko.



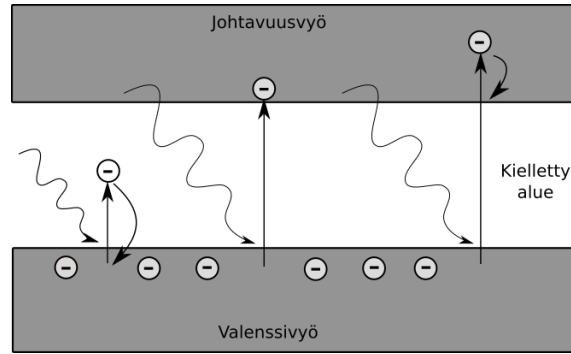
Kuvio 1. Johteen, puolijohde ja eristeen väliset erot elektronivyörakenteen suhteen.

Voidakseen siirtyä valenssivyöltä johtavuusvyölle elektronit tarvitsevat tietyn suuruisen energiapaketin. Valosähköisessä ilmiössä elektronit saavat tämän energian fotonilta. Fotonin energia määräytyy seuraavan yhtälön mukaisesti,

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

missä h on Planckin vakio, f on fotonin taajuus, c on valon nopeus tyhjiössä ja λ on fotonin aallonpituus. Fotonin energia riippuu siten fotonin aallonpituudesta. Jos fotonin energia on riittävä, elektroni siirtyy valenssivyöltä johtavuusvyölle. Mikäli fotonin energia on pienempi kuin kielletyn alueen suuruus, niin elektroni palaa takaisin valenssivyölle. Kuviossa 2 esitetään mahdolliset siirtymät puolijohdeissa.

Varauksenkuljettajina toimivat elektronit johtavuusvyölle ja aukot valenssivyölle syntyvät aina pareittain. Tämä voidaan kuvata elektronitiheyden n ja aukkotiheden



Kuvio 2. Valosähköisessä ilmiössä elektroni saa saapuvasta fotonista energiaa, joka voi siirtää elektronin valenssivyöltä johtavuusvyölle. Mikäli energian määrä ei ole riittävä, elektroni palaa takaisin valenssivyölle. Jos energiaa on enemmän kuin mitä kielletyn alueen ylittäminen vaatii, yli jäävä energia vapautuu ympäristöön esimerkiksi lämpönä.

p avulla siten, että

$$n = p. \quad (2)$$

Elektronitiheyden ja aukkotihedden tuloa kutsutaan luontaisten kuljettajien tiheydeksi (eng. intrinsic carrier density) n_i , joka voidaan laskea yhtälöllä

$$n \cdot p = n_i^2 = n_{i0}^2 T^3 \exp \left\{ -\frac{E_g}{kT} \right\}, \quad (3)$$

missä n_{i0} on aineelle ominainen luontaisten kuljettajien tiheys, T on lämpötila, E_g on elektronivöiden välisen kielletyn alueen leveys ja k on Boltzmannin vakio. Piille luonteisten varauksen kuljettajien tiheys $n_{i0} = 4,62 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$. Tarkastellessa yhtälöä 3 huomataan, että vapaita elektroneja ja aukkoja ei synny lainkaan absoluuttisessa nolapisteessä $T = 0 \text{ K} = -273,15 \text{ °C}$. Lämpötilan noustessa varausten kuljettajien määrä kasvaa rajusti.

Tähän asti on käsitelty niin kutsuttua i-tyypin puolijohdetta (intrinsic) eli itseispuolijohdetta, jossa varauksen kuljettajien määrä on peräisin materiaalin omista ominaisuuksista eikä epäpuhtauksista materiaaleissa. Tämän tyyppisissä puolijohdeissa aukkojen ja vapaiden elektronien määrät ovat yhtä suuret. Lisäämällä puolijohdeeseen materiaaliin epäpuhtauksia on mahdollista muuttaa puolijohde sähköisiä ominaisuuksia.

P-tyypin puolijohdeeseen materiaaliin on lisätty epäpuhtauksina atomeja, joilla on vain kolme elektronia uloimmalla elektronikuorella. Näin materiaaliin syntyy ylimääräisiä aukkoja, jotka toimivat varauksen kuljettajina. Vapaiden aukkojen

tiheys p-tyyppin puolijohhteessa voidaan ilmoittaa yhtälöllä

$$p = \sqrt{\frac{n_A \cdot N_V}{2}} \exp\left(-\frac{E_A}{2kT}\right), \quad (4)$$

missä n_A on vastaanottajien tiheys, N_V on efektiivisten tilojen tiheys valenssivyöllä ja E_A on ionisaatioenergia. [4]

Toinen mahdollinen tapa muuttaa puolijohhteeseen sähköisiä ominaisuuksia on lisätä materiaaliin atomeja, joilla on viisi elektronia uloimmalla elektronikuorella. Tällöin materiaaliin syntyy vapaita elektroneja. Tällaisia epäpuhtauksia sisältäviä puolijohhteita kutsutaan n-tyyppin puolijohhteiksi.

N-tyyppin puolijohhteessa vapaat elektronit toimivat varauksen kuljettajina, sillä niitä on määrällisesti huomattavasti enemmän kuin aukkoja. Niiden tiheys voidaan esittää yhtälöllä

$$n = \sqrt{\frac{n_D \cdot N_L}{2}} \exp\left(-\frac{E_D}{2kT}\right), \quad (5)$$

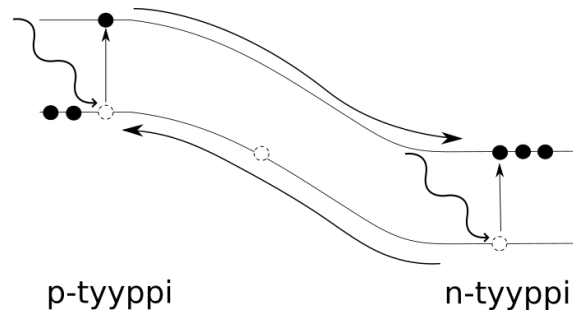
missä n_D on luovuttajien tiheys, N_L on efektiivisten tilojen tiheys johtavuusvyöllä ja E_D on ionisaatioenergia [4].

Yhdistämällä p- ja n-tyyppin puolijohhteet, saadaan muodostettua pn-liitos. Liitoksen eri puolet sisältävät eri varauksen kuljettajat, jolloin virta voi kulkea liitoksessa vain yhteen suuntaan. Aukot liikkuvat liitoksessa p-tyyppin alueelta n-tyyppin alueelle ja vapaat elektronit päinvastoin. P- ja n-tyyppin välille muodostuu alue, jolla on vain vähän varauksen kuljettajia. Koska kaikki vapaat elektronit siirtyvät p-alueelle ja vapaat aukot n-alueelle, kumpikin alue varautuu sähköisesti. N-alueen varaukseksi tulee positiivista ja p-alue varautuu negatiivisesti. Näin ollen puolten välille syntyy sähkökenttä, jossa on diffuusiojännite

$$V_d = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A \cdot n_D}{n_i^2}. \quad (6)$$

Elektronin virittyessä ja siirryessä valenssivyöltä johtavuusvyölle, se siirtyy sähkökentän vaikutuksesta puolijohhteeseen n-tyyppin puolelle. Syntyneet aukot puolestaan siirtyvät sähkökentän vaikutuksesta p-puolelle. Vapaat elektronit ja aukot liikkuvat siten vastakkaisiin suuntiin puolijohhteessa. Kuviossa 3 esitetään kyseinen ilmiö elektronivöiden rakenteen avulla.

Ilman ulkoista sähkökenttää pn-liitokseen syntyy saturaatiovirta, joka toimii diodin tavoin, jolloin voidaan käyttää Shockley yhtälöä esittämään pn-liitoksen



Kuvio 3. Johtavuusvyölle virittyneet elektronit siirtyvät diffuusio jännitteen vuoksi liitoksen n-puolelle. Vastaavasti aukot siirtyvät n-puolelta liitoksen p-puolelle.

virta-jännite käyttäytymistä:

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right], \quad (7)$$

missä I on diodivirta, V on diodijännite, I_0 on saturaatiovirta ja e on elektronin varaus.

2.2.2 Yksikiteinen-, monikiteinen- ja amorfinen pii

Yksikiteinen pii tarkoittaa piitä, jolla on jatkuva kiderakenne eikä juuri lainkaan epäpuhtauksia tai kidevirheitä. Yksikiteisellä piillä on korkea hyötysuhde, sillä se pystyy muuttamaan tehokkaasti Auringon säteilyä sähkövirraksi. Yksikiteisen piin valmistaminen on kuitenkin kallista. [3]

Monikiteinen pii muodostuu pienistä yksikiteisen piin rakenteista. Monikiteisen piin valmistaminen on edullisempaan ja helpompaa kuin yksikiteisen piin valmistaminen, mutta siitä valmistettut kennot eivät pysty muuttamaan niin paljoa Auringon säteilyä sähkövirraksi kuin mitä yksikiteisestä piistä valmistetut kennot pystyvät. Monikiteisestä piistä valmistetuilla kennoilla on siten huonompi hyötysuhde kuin yksikiteisestä piistä valmistetuilla kennoilla. Erilaisilla valmistusmenetelmillä voidaan kuitenkin parantaa monikiteisten pii-kennojen hyötysuhdetta. [3]

Amorfisen piin kiderakenne ei ole niin järjestäytynyt kuin kiteisen piin rakenne. Amorfisessa piissä saattaa olla atomeja, jotka eivät ole muodostaneet kaikkia neljää sidosta. Amorfisen kiteen hyöty kiteiseen piihin nähden on sen mahdollistama ohuempi rakenne. Ohuempi rakenne on mahdollista tuottaa, sillä amorfisen piin absorptiokerroin on huomattavasti kiteistä piitä suurempi. Amorfisilla pii-kennoilla

on kuitenkin huonoin hyötysuhde. [3, 4] Erilaisten kennotyyppeiden ja eri valmistajien kennojen vertailemiseksi mittaukset täytyy tehdä samoissa olosuhteissa. Seuraavaksi esitellään aurinkosähköjärjestelmiin liittyvät standardisoidut mittaolosuhteet.

2.3 STC-olosuhteet

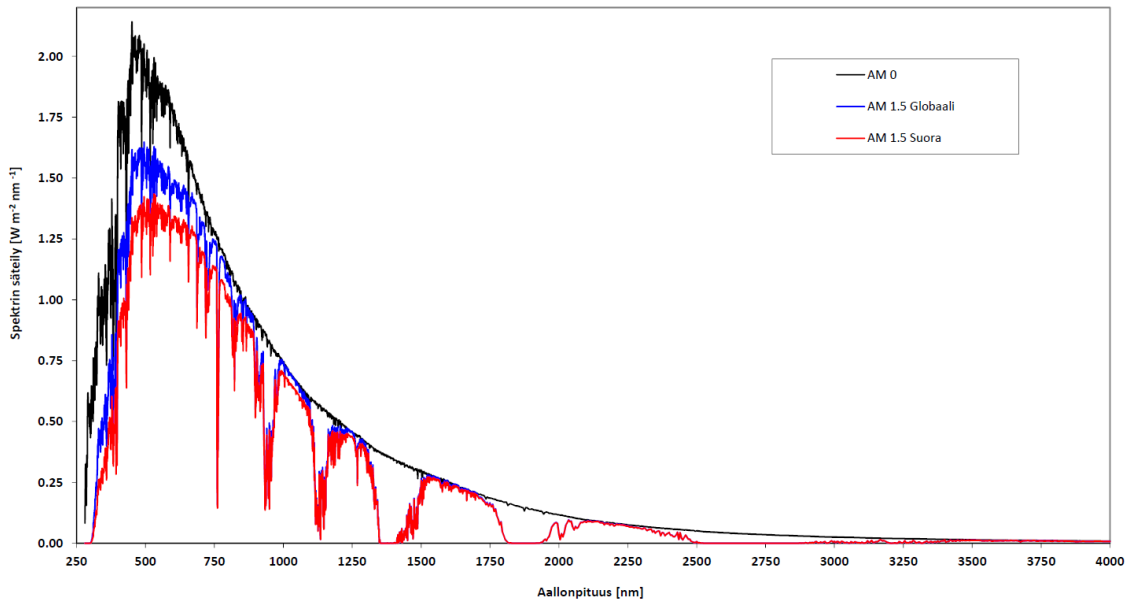
Aurinkokennojen toimintaa tarkasteltaessa käytetään yleisesti standarditestiolosuhteita eli STC-olosuhteita (eng. *Standard Test Conditions*), joissa kennolämpötila $T_{STC} = 25\text{ °C}$, säteilyteho $G_{STC} = 1000\text{ W/m}^2$ ja ilmassa on 1,5 AM. Tällaiset olosuhteet on helppo tuottaa laboratorio-olosuhteissa ja ne mahdollistavat erityyppisten ja -kokoisten aurinkokennojen luotettavan vertailun toisiinsa, sillä muuten eri kennojen vertaileminen toisiinsa on haasteellista.

Ilmassalla 1,5 AM tarkoitetaan Auringon säteilytehon spektriä, kun säteily on läpäissyt 1,5-kertaisen ilmakehän matkan. Mikäli Aurinko on zenitissä ilmassan arvo on 1 AM. Ilmassalla 0 AM viitataan Auringon säteilytehon spektriin juuri ilmakehän ulkopuolella. Kuviossa 4 esitetään Auringon 0 AM säteilyn spektri, sekä globaali ja suora 1,5 AM Auringon säteilyspektri. [3, 4] Matkatessaan ilmakehän läpi osa säteilystä absorboituu ilmakehän molekyyliin. Tästä johtuen 1,5 AM säteilyspektrissä ei esiinny kaikkia aallonpituuksia, joita on 0 AM säteilyspektrissä. [3]

Laboratoriossa suoritettavien kokeellisten mittausten lisäksi aurinkokennon *IV*- ja *PV*-käyrien käyttäytymistä voidaan tarkastella erilaisten tietokonesimulaatioiden avulla. Seuraavaksi perehdytään kahteen tietokonesimulaatio malliin, joiden avulla on mahdollista simuloida aurinkokennon toimintaa.

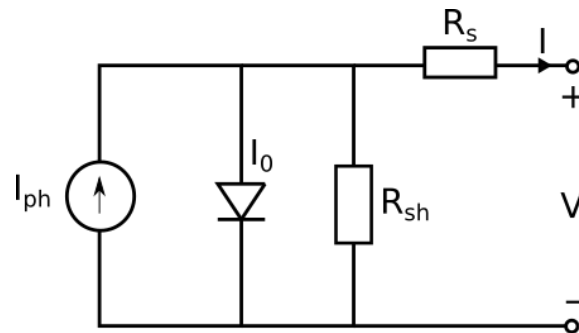
2.4 Aurinkokennon mallintaminen

Aurinkokennon toimintaa voidaan mallintaa diodimallien avulla. Diodimalleissa diodeista, vastuksista ja virtalähteestä voidaan muodostaa elektroninen piiri, jonka avulla voidaan tuottaa samankaltainen virta-jännite käyttäytyminen kuin aurinkokennolla. Kuviossa 5 esitetään 1-diodimallin mukainen kytkentäkaavio. Piirissä käytetään diodia, joka vastaa toiminnaltaan aurinkokennon pn-liitosta. Piirissä olevaa virtalähdettä käytetään aurinkokennon varauksen kuljettajien diffuusiovirran havainnollistamiseen. Piirissä käytetään kahta vastusta kuvaamaan aurinkokennon sarjaresistanssia ja shunttiresistanssia. Shunttiresistanssi on kytketty rinnan diodin



Kuvio 4. Auringon säteilyn spektrin jakauma, kun ilmassan arvot ovat 0 AM ja 1,5 AM [5].

kanssa ja sarjaresistanssi puolestaan sarjaan muiden komponenttien suhteen.



Kuvio 5. Elektroninen piiri, jonka avulla voidaan esittää aurinkokennon rakenne. Diodi esittää kennon pn-liitosta, virtalähde aurinkokennon valon synnyttämien kuljettajien diffuusiovirtaa, R_s sarjaresistanssia ja R_{sh} shunttiresistanssia.

Käyttämällä Kirchhoffin lakeja ja diodiyhtälöä, voidaan johtaa kuvion 5 kytkenälle 1-diodimallin mukainen yhtälö

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left\{ \frac{q(V + IR_s)}{nk_b T} \right\} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (8)$$

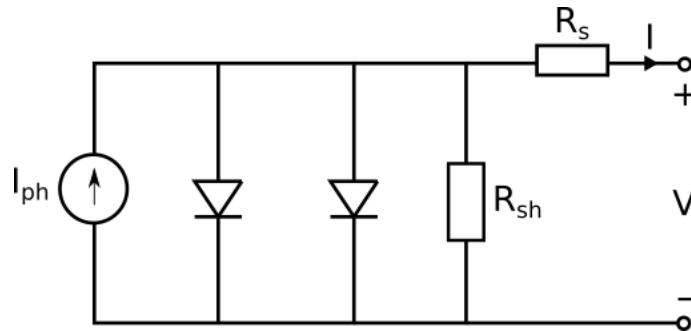
missä I_{ph} on fotonin tuottama virta, I_0 on käänteinen saturaatiovirta, n on diodin ideaalisuuskerroin ($n=1$ ideaaliselle diodille), k_B on Boltzmannin vakio, T on

lämpötila, q on alkeisvaraus, R_s on sarjavastus ja R_{sh} on shunttivastus.

Tarkempi aurinkokennon mallinnus saadaan lisäämällä kytkentään vielä toinen diodi rinnan ensimmäisen diodin kanssa. Kuviossa 6 esitetään tällaisen kaksi diodia sisältävän piirin kytkentäkaavio. Käyttämällä jälleen Kirchhoffin lakeja ja diodiyhtälöä, voidaan 2-diodimallin virralle johtaa yhtälö

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(\exp \left\{ \frac{q(V + IR_s)}{nk_bT} \right\} - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left\{ \frac{q(V + IR_s)}{2nk_bT} \right\} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (9)$$

missä I_{01} on ensimmäisen diodin käänteinen saturaatiovirta ja I_{02} on toisen diodin käänteinen saturaatiovirta.



Kuvio 6. Kaksi diodia sisältävä malli, jonka avulla voidaan mallintaa aurinkokennon toimintaa.

3 Teoreettinen tausta

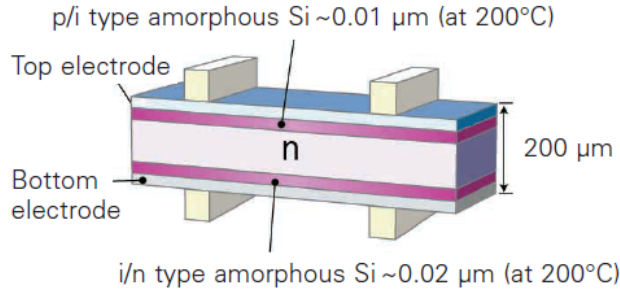
Aurinkokenno muuttaa Auringon säteilyä sähkövirraksi valosähköisen ilmiön avulla. Aurinkokennon toimintaperiaate on pohjimmiltaan hyvin yksinkertainen: auringosta saapuva fotoni absorboituu aurinkokennossa olevaan puolijohteeseen, jolloin puolijohteeseen syntyy varauksenkuljettajia. Kun tarpeeksi moni fotoni absorboituu puolijohteeseen, syntyy sähkövirta.

Aurinkokenno ei pysty muuttamaan kaikkea Auringon säteilyä sähkövirraksi, sillä aurinkokenno voi hyödyntää vain energia-aukon, eli kielletyn alueen leveyden E_g suuruisen energian. Mikäli fotonin energia on suuruudeltaan pienempi kuin mitä energia-aukon ylittämiseen tarvittaisiin, elektroni ei voi siirtyä johtavuusvyölle. Toisaalta, mikäli fotonin energia on suurempi kuin energia-aukon vaatima ylitys, yli jäävä energia vapautuu aurinkokennoon lämpönä, mistä johtuen kennon lämpötila kasvaa. Aurinkokennon energia-aukon suuruus riippuu kennon rakenteesta. Seuraavaksi perehdytään tutkielman aurinkosähköjärjestelmässä käytettyjen Sanyon HIT-aurinkokennojen rakenteeseen.

3.1 Sanyon HIT-kennon rakenne

HIT-kenno koostuu amorfisista n- ja p-tyyppin puolijohteista, jotka ympäröivät yksikiteistä pii -kerrosta, joka on n-tyyppin puolijohde. Amorfisen piin kerrokset ovat hyvin ohuita verrattuna yksikiteisen piin kerrokseen. Ylemmän amorfisen p-tyyppin puolijohdekerroksen paksuus on noin $0,01 \mu\text{m}$ ja alemman amorfisen n-tyyppin puolijohdekerroksen paksuus on noin $0,02 \mu\text{m}$. P-tyyppin amorfisen kerroksen yläpuolella ja n-tyyppisen amorfisen pii -kerroksen alapuolella on elektrodi. Amorfisten pii -kerrosten ja yksikiteisen pii -kerroksen välissä on ohut kerros i-tyyppin amorfista piitä, jonka tarkoituksena on parantaa rajapintojen ominaisuuksia. HIT-kennon kokonaispaksuus elektrodien kanssa on noin $200 \mu\text{m}$, jolloin keskellä olevan yksikiteisen n-tyyppin puolijohdekerroksen paksuus on huomattavasti suurempi kuin amorfisten kerrosten. Kuviossa 7 esitetään Sanyon HIT-aurinkokennon rakennekuva. Sanyon HIT-kennojen rakenteen avulla voidaan saavuttaa parempi hyötysuhde kuin useimmissa kaupalliseen käyttöön

HIT Solar Cell Structure



Kuvio 7. Sanyon HIT-kennon rakennekuva. HIT-kenno koostuu kahdesta amorfisesta Si -kerroksesta, joista toinen on p-tyypin puolijohde ja toinen n-tyypin puolijohde. Amorfisten pii -kerrosten välissä on yksikiteistä piitä sisältävä n-tyypin puolijohde. Kuva lähteestä [6].

valmistetuissa kennoissa.

3.2 Hyötysuhde

Aurinkopaneeliston sähköisiä ominaisuuksia voidaan kuvata IV -käyrän, PV -käyrän, hyötysuhteen η sekä täyttökertoimen FF (engl. fill factor) avulla. Sanyo lupaa valmistamilleen HIT-aurinkopaneeleille 16,5 % hyötysuhteen STC-olosuhteissa [6]. Paneeliston hetkellinen hyötysuhde voidaan määrittää yhtälöllä

$$\eta = \frac{P}{GA} \cdot 100\% = \frac{VI}{GA} \cdot 100\%, \quad (10)$$

missä P on paneelin teho, G on Auringon säteilyteho, A on paneelin pinta-ala, V on paneelin tuottama DC jännite ja I on paneelin tuottama DC virta.

Aurinkopaneelin teoreettinen maksimihyötysuhde voidaan esittää myös muodossa

$$\eta_{max} = \frac{P_{MPP}}{G \cdot A} = \frac{FF \cdot V_{OC} \cdot I_{SC}}{G \cdot A}, \quad (11)$$

missä P_{MPP} on maksimitehopiste, V_{OC} on avoimen piirin jännite, I_{SC} on oikosuljetun piirin virta ja FF on täyttökerroin, joka voidaan esittää muodossa

$$FF = \frac{P_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}}, \quad (12)$$

missä V_{MPP} on maksimitehopisteen jännite ja I_{MPP} on maksimitehopisteen virta.

3.3 Hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä

Tarkasteltaessa yhtälöä 11 huomataan, että hyötysuhde on riippuvainen oikosuljetun piirin virrasta ja avoimen piirin jännitteestä, jotka ovat edelleen riippuvaisia säteilytehosta ja kennolämpötilasta, kuten seuraavissa yhtälöissä esitetään:

$$V_{OC} = V_{OC0} \frac{\ln G}{\ln G_{STC}} (1 + \alpha_V(T - T_{STC})) \quad (13)$$

$$I_{SC} = I_{SC0} \frac{G}{G_{STC}} (1 + \alpha_I(T - T_{STC})), \quad (14)$$

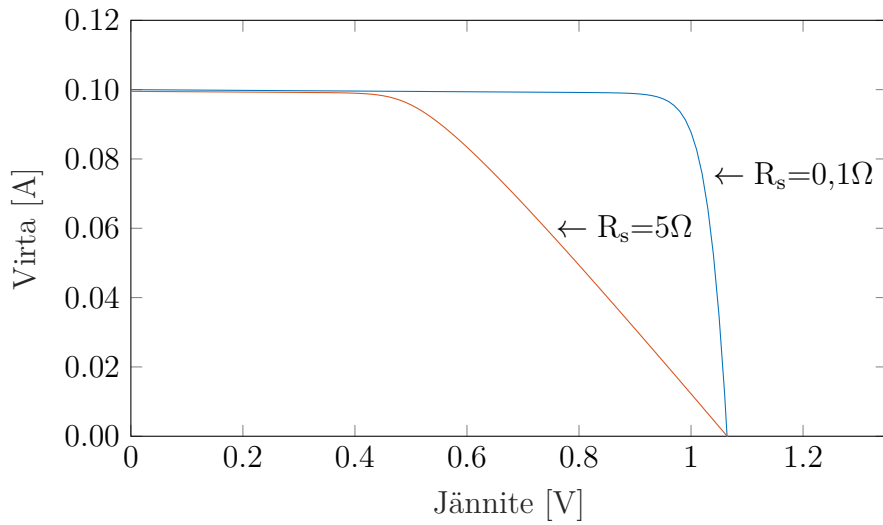
missä V_{OC0} ja I_{SC0} ovat valmistajan lupaamat avoimen piirin jännite ja oikosuljetun piirin virta Auringon säteilyteholla $G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$ kennolämpötilassa $T_{STC} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. α_V ja α_I ovat lämpötilakertoimia jännitteelle ja virralle. Lämpötilakertoimien arvot esitetään yleensä paneelin valmistajan antamissa teknisissä tiedoissa.

Tarkasteltaessa yhtälöitä 13 ja 14 huomataan, että avoimen piirin jännitteen arvo laskee lämpötilan kasvaessa ja oikosuljetun piirin virran arvo puolestaan kasvaa lämpötilan kasvaessa. Jännite kuitenkin laskee huomattavasti nopeammin kuin mitä virran arvo kasvaa, mistä johtuen paneeliston hyötysuhde laskee paneelilämpötilan kasvaessa.

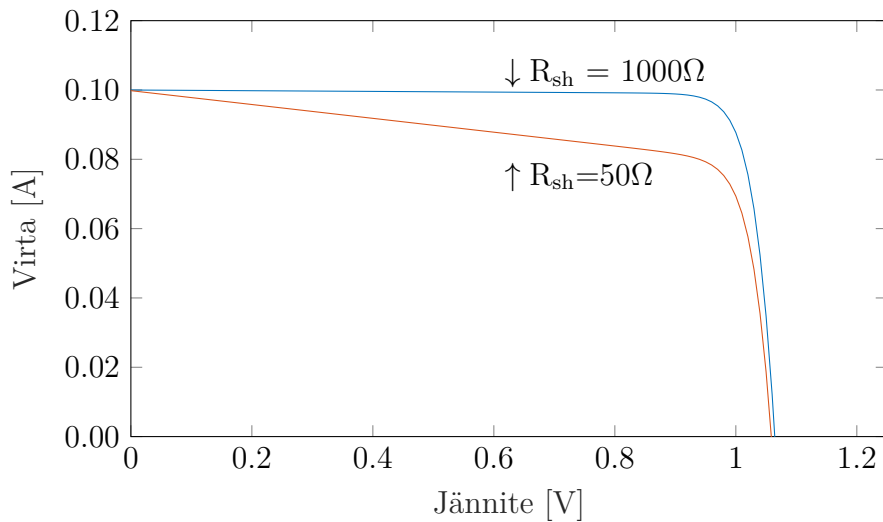
Kennolämpötila vaikuttaa paneeliston hyötysuhteeseen, mutta se ei riitä selittämään miksi käytännön mittauksista saadut tulokset eroavat teoreettisista hyötysuhteista. Erilaisia hyötysuhdetta alentavia tekijöitä on useita. Sarjassa olevat resistanssit ja shunttiresistanssi ovat parhaiten tunnetut tekijät, jotka alentavat aurinkokennon hyötysuhdetta [7]. Muita tekijöitä ovat tyhjennysalueen ja reunan rekombinaatio, resistanssin rajoittama tehostettu rekombinaatio, kelluvan alueen shuntti ja rekombinaatio nopeuden saturaatio [7].

Sarja- ja shunttiresistanssien vaikutusta paneeliston hyötysuhteeseen on tutkittu runsaasti ja niiden aiheuttamia sähköisiä häviötä aurinkokennoissa voidaan tarkastella diodimallien avulla. Sarja- ja shunttiresistanssien suuruus vaikuttaa IV -käyrän muotoon, jolloin maksimitehopisteen paikka muuttuu, joka aiheuttaa myös muutoksia hyötysuhteen arvoon. Kuvioissa 8 ja 9 havainnollistetaan graafisesti miten sarja- ja shunttivastuksen arvo vaikuttaa IV -käyrän muotoon.

Aurinkokenno voi hyödyntää fotoneista vain ne, joiden aallonpituus on sopiva,



Kuvio 8. Sarjavastuksella voidaan muuttaa IV -käyrän kulmakerrointa I_{SC} :n läheisyydessä. Käytännössä sarjavastuksen arvo pyritään pitämään mahdollisimman pienenä, jolloin kulmakerroin on mahdollisimman suuri.



Kuvio 9. Shunttiresistanssin suuruus vaikuttaa IV -käyrän kulmakertoimeen V_{OC} :n läheisyydessä. Shunttiresistanssina käytetään suuria vastuksia, sillä pienet vastukset kasvattavat kulmakertoimen arvoa ja laskevat siten maksimitehopisteen arvoa.

eli vain ne joiden elektronille antama energia riittää siirtämään elektronin kielletyn alueen yli (kuvio 2). Tästä johtuen koko Auringon säteilyjakaumaa ei voida hyödyntää. Aluetta saadaan laajennettua rakentamalla aurinkokenno useista eri materiaaleista, joilla on erikokoiset kielletyt alueet. Tällöin säteilyä voidaan hyödyntää suuremmalla aallonpituusvälillä.

Rekombinaatio voi alentaa aurinkokennon hyötysuhdetta. Rekombinaatiossa irronnut elektroni palautuu takaisin täyttämään synnyttämänsä aukon, jolloin vöille ei synny vapaita varauksen kuljettajia, ja siten ei synny sähkövirtaa. Rekombinaatiota voi esiintyä useilla eri aurinkokennon alueilla.

Aurinkokennon peittyminen aiheuttaa hyötysuhteen pientymisen, sillä tällöin fotonit eivät pääse puolijohteeseen saakka, jolloin ne eivät voi absorboitua puolijohteeseen. Aurinkokenno voi peittyä esimerkiksi pölyn tai lumen alle, mikäli aurinkokennon säännöllisestä puhdistuksesta ei pidetä huolta. Osa aurinkopaneelille tulevista fotoneista voi myös heijastua aurinkokennon pinnasta, jolloin ne eivät voi luovuttaa energiaansa puolijohteessa.

Aurinkokennon hyötysuhteeseen vaikuttavat luonnollisesti myös vallitsevat sääolosuhteet, kuten tuulen voimakkuus, pilvisuus sekä ulkolämpötila. Ulkolämpötila vaikuttaa paneelistojen lämpötilaan ja siten paneeliston hyötysuhteeseen, joka on riippuvainen paneeliston lämpötilasta. Mikäli ulkolämpötila on korkea, myös paneeliston lämpötila nousee, mikäli taas ulkolämpötila on alhainen, niin se voi vaikuttaa paneeliston lämpötilaan laskevasti. Samoin tuuli voi jäähdyttää aurinkopaneelia, jolloin paneeliston lämpötila saadaan alemmaksi ja hyötysuhdetta parannettua.

Pilvisyyden määrä vaikuttaa paneeliston sähkön tuotantoon, sillä pilvet saattavat varjostaa paneelistoa kokonaan tai osittain. Pilvisyyden määrää tunnin aikana voidaan arvioida määrittämällä kyseiselle aikavälille selkeysindeksi (eng. clearness index) k_t . Selkeysindeksin arvo voidaan määrittää käyttämällä yhtälöä [8]:

$$k_t = \frac{I}{I_0}, \quad (15)$$

missä I on mitattu Auringon säteily intensiteetti ja I_0 on teoreettinen Auringon säteily intensiteetti kyseisen tunnin ajalle. Teoreettinen Auringon säteilyn intensiteetti

voidaan laskea yhtälöllä

$$I_0 = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \times \left[\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi (\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right], \quad (16)$$

missä G_{sc} on aurinkovakio, jolle käytetään arvoa $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$, n on päivän numero (1–365/366), ϕ on leveyspiiri, $\delta = 23,45^\circ \sin \left(360^\circ \frac{284+n}{365} \right)$, ω_1 ja ω_2 ovat Auringon kulmia keskipäivään verrattuna [8]. Tässä tutkielmassa käytetään selkeysindeksiä osana kerätyn aineiston siistimistä, sillä kerätystä aineistosta halutaan löytää ajanjaksot, jolloin paneelisto ei ole jäänyt varjoon pilvisyyden takia.

4 Järjestelmän kuvaus

Tutkielmassa tarkastellaan Saarijärven koulukeskuksen katolle asennettua aurinkopaneelistoa (kuvio 10). Paneelistot on kytketty kahteen invertteriin, jotka muuttavat aurinkopaneelilta tulevan tasajännitteen ja -virran koulukeskuksen verkkoon soveltuvaksi vaihtovirraksi ja -jännitteeksi. Paneeliston yhteyteen on sijoitettu myös erilaisia sääantureita.

Aurinkosähköjärjestelmä on asennettu vuonna 2005 ja sen teho on noin 6 kW. Aurinkopaneelistossa käytetään Sanyon HIT-paneeliston HIP-190NE1 moduuleja. Käytettävien paneelien korkeus on 1443 mm, leveys 798 mm ja syvyys 35 mm [6]. Yksi paneeli muodostuu 66 moduulista ja koko järjestelmään kuuluu yhteensä 33 aurinkopaneelia. Järjestelmä on kytketty koulun verkkoon, jolloin koulu pystyy hyödyntämään järjestelmän tuottaman sähkön. Mikäli aurinkosähköjärjestelmän tuotanto ylittää kulutuksen, ylimääräinen sähkö syötetään jakeluverkkoon korvauksetta. [9].

Kuviossa 10 on Saarijärven keskuskoulu ja sen katolla olevat aurinkopaneelistot. Paneelisto on jaettu kolmeen riviin siten, että vasemman puoleisessa rivissä on 11, keskimmaisessä 12 ja oikean puoleisessa rivissä 10 paneelia. Paneelien kallistuskulma on asetettu kiinteästi 40° .



Kuvio 10. Saarijärven koulukeskuksen katolle on asennettu yhteensä 33 aurinkokennoa, jotka on jaettu kolmeen riviin. Paneelit on suunnattu etelään ja niiden kallistuskulma on 40° .

Järjestelmässä on käytössä kaksi invertteriä mittausteknisistä syistä. Näin paneelistojen ja inverttereiden kapasiteetit saatiin vastaamaan toisiaan mahdollisimman

tarkasti, eikä invertteri ole liiallisesti yli- tai alimitoitettu. Inverttereinä käytetään Froniuksen malleja IG60 ja IG15. Kahden invertterin käytön hyötynä on myös se, että tällöin voidaan halutessa tarkastella kahden erillisen järjestelmän toimintaa rinnakkain.

Molemmat invertterit hyödyntävät maksimitehopisteen seuranta (eng. maximum power point tracking, MPPT), jolloin sähköntuotanto voidaan maksimoida kaikissa olosuhteissa. Maksimitehopisteen seurannassa invertteri säätää sähköntuotannon parametreja siten, että virran ja jännitteen arvoilla saadaan tuotettua maksimaalinen teho. Froniuksen IG15 invertterin maksimihyötysuhde on 94,2 % ja IG60 invertterin puolestaan 94,3 %. [10] Molemmat invertterit on kytketty koulun sähköverkkoon. Froniuksen IG yksiköt tarkkailevat myös sähköverkkoa, johon ne on kytketty ja mikäli sähköverkon olosuhteet poikkeavat normaalista, IG yksiköt pysäyttävät kaikki toiminnot välittömästi ihmisten ja laitteiden suojaamiseksi [10]. Suuremman invertterin IG60 yhteyteen on sijoitettu mittauskeskus, joka tallentaa tietoja systeemin sähköntuotannosta ja sääolosuhteista.

Sääantureita käytetään keräämään tietoa olosuhteista, joissa paneelistot toimivat. Taulukossa 1 esitetään kaikki käytössä olevat sääanturit ja niiden mittaamat suureet. Sääanturit on kytketty keskimmäisen paneelistorivin yhteyteen.

Taulukko 1. Aurinkosähköjärjestelmään kuuluvat sääanturit

Sensori	Mitattava suure
PT1000	Ulkolämpötila [°C]
PT1000	Paneeliston lämpötila [°C]
Yksikiteinen Si-sensori	Auringon säteilyteho [W/m ²]
Kuppianometri	Tuulen nopeus [m s ⁻¹]

Lämpötilojen mittaamiseen käytetään kahta PT1000-sensoria. Toinen sensoreista mittaa ulkolämpötilaa ja toinen paneeliston lämpötilaa aurinkopaneeliston takapinnalta. Ulkolämpötilaa mittaavan PT1000-sensorin mitta-alue on noin -40 – 180 °C. Kyseisen sensorin tarkkuus on ±0,8 °C, kun lämpötila on alueella -40–100 °C. Paneeliston lämpötilaa mittaavan sensorin mitta-alue on pienempi kuin toisen PT1000-sensorin, sillä sen mitta-alue on -20 – 150 °C. Kyseisen sensorin tarkkuus on ±0,8 °C välillä -20 – 100 °C.

Auringon säteilytehon mittaamiseen käytetään yksikiteistä Si-sensoria, joka on kalibroitu siten, että sen jännite on 70 mV, kun Auringon säteilyteho on 1000 W/m². Sensorin tarkkuus on ±5 % (keskiarvo vuoden ajalta). Sensorin käyttölämpötilaksi

on annettu $-40 - 85$ °C ja sen dimensiot ovat $110 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$.

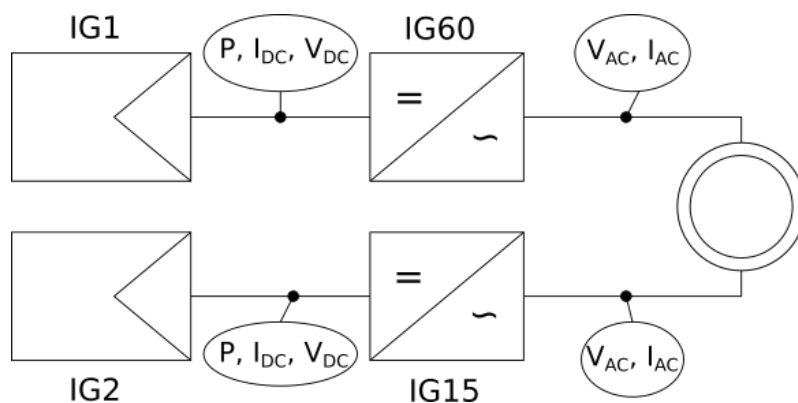
Tuulen nopeuden mittaamiseen käytetään kuppianometriä, jonka tuulen nopeus -kynnys on $2,5 \text{ m s}^{-1}$. Kuppianometrin kalibroimiseen käytetään arvoja $1,45 \text{ Hz} \leftrightarrow 1 \text{ km h}^{-1}$ ja $5,22 \text{ Hz} \leftrightarrow 1 \text{ m s}^{-1}$. Sensorin resoluutio on 1 m s^{-1} tai 1 km h^{-1} ja sen tarkkuus on $\pm 5\%$, kun tuulen nopeus on suurempaa tai yhtä suurta kuin 5 m s^{-1} .

5 Aineisto

Tässä luvussa esitellään työssä käytetty aineisto. Luvun lopussa kerrotaan, miten aineistoa on käsitelty ja perustellaan, miksi osa kerätystä datasta on poistettu analyysiä tehdessä.

5.1 Aineiston kuvaus

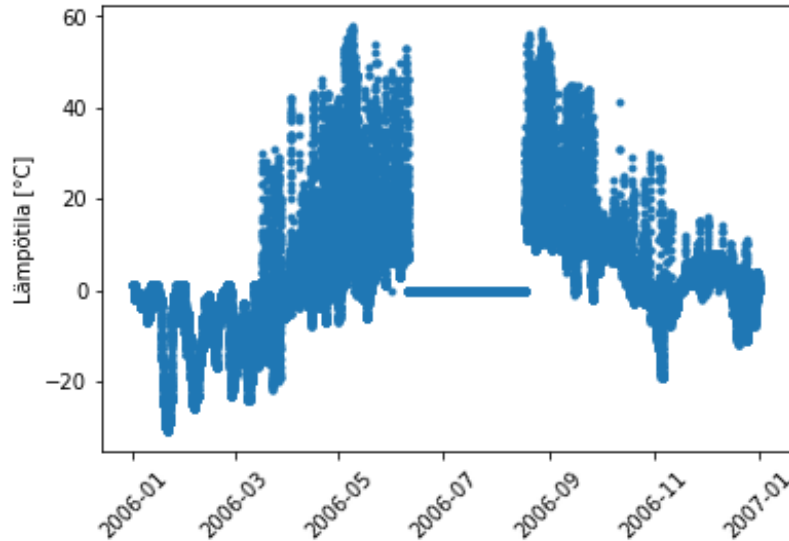
Sääolosuhteiden lisäksi myös sähköntuotannosta on kerätty dataa. Tallennetut parametrit perustuvat raportin [11] suosituksiin kerättävistä parametreista. Myös artikkeleissa [12] suositellaan kyseisten parametrien tarkkailua. Dataa kerätään inverttereille tulevien DC-virtojen ja -jännitteiden suuruudesta, niiltä lähtevien AC-muotoisten virtojen ja jännitteiden suuruudesta, AC-tehosta, verkkovirran suuruudesta ja energiasta. Sähköntuotannon aineisto kerätään invertterien yhteydessä. Kuviossa 11 esitetään yksinkertaistettu kaavio järjestelmästä ja mistä eri arvoja on kerätty.



Kuvio 11. Yksinkertaistettu kaaviokuva käytössä olevasta järjestelmästä, jossa esitetään mistä datan arvoja kerätään.

Aurinkosähköjärjestelmä on kerännyt dataa vuoden 2005 lokakuusta alkaen. Tätä tutkielmaa aloitettaessa dataa on ollut saatavilla vuoden 2017 lokakuun loppuun saakka. Sääolosuhteiden ja sähköntuotantoon liittyvien suureiden arvot on keskiarvoistettu kymmenen tai viidentoista minuutin välein ja tallennettu tietokoneelle. Osa datasta on puutteellista, sillä laitteiston ongelmia ei ole aina huomattu välittömästi.

Tästä johtuen datassa on ajanjaksoja, jolloin dataa ei ole kerätty lainkaan tai jonkin anturin virhetoimintaa ei ole korjattu. Esimerkiksi vuonna 2006 paneelilämpötilan arvo on $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ kesäkuusta elokuun loppuun (ks. kuvio 12). Tällaiset selvästi virheelliset datapisteet täytyy ottaa huomioon analyysiä tehtäessä siten, että niiden vaikutukset johtopäätöksiin jäävät mahdollisimman vähäisiksi.



Kuvio 12. Paneeliston lämpötilaa mittaava sääanturi on tallentanut selvästi virheellistä dataa kesäkuusta elokuun loppuun. Tällainen data täytyy huomioida analyysiä tehdessä siten, ettei se pääse vaikuttamaan johtopäätöksiin väärin tavalla.

5.2 Aineiston siistiminen

Kerättyä dataa täytyy suodattaa analysoinnin tekemistä varten. Kuviossa 13 olevassa vuokaaviossa esitetään, miten kerättyä dataa on käsitelty ja millä ehdoilla dataa on poistettu. Siistiminen on aloitettu poistamalla kaikki selvästi virheelliset datapisteet. Tällaisia ovat esimerkiksi aikaisemmin mainittu vuoden 2006 kesä, jolloin paneelilämpötilaa mittaava anturi on mitannut virheellisiä arvoja lämpötilalle. Tästä johtuen kerätyssä aineistossa paneelilämpötila on virheellisesti $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ koko kesän ajan, vaikka paneelilämpötila on todennäköisesti ollut $10\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ kesäkuukausien aikana. Tämän kaltaiset ajanhetket löydetään aineiston joukosta yksinkertaisesti piirtämällä kerätyistä suureista kuvaajia ajan funktiona. Kuvaajia käytettäessä on mahdollista havaita helposti pitkät aikavälit, jolloin jokin anturi ei ole toiminut kuten pitäisi.

Esimerkiksi kuvioista 12 huomataan nopeasti, että paneelilämpötilaa mittaava anturi on toiminut virheellisesti.

Kuviossa 14 esitetään suodattamattoman datan Auringon säteilytehon jakauma koko datan keräämisen ajalta. Pienet säteilytehon arvot, $G < 25 \text{ W/m}^2$ dominoivat selvästi, jolloin suuremman säteilytehon arvojen jakauman tarkasteleminen on hankalaa. Paneeliston sähköisten ominaisuuksien kannalta data, jossa Auringon säteilyteho on alle 80 W/m^2 ei ole hyödyllistä, sillä sähköntuottamisen aloittamiseksi tarvitaan riittävän suuri Auringon säteilyteho. Tästä johtuen ajan, jona säteilyteho on ollut alle 80 W/m^2 , voidaan suodattaa pois aineistosta. Suurin osa tästä poistetusta aineistosta on yöaika, jolloin Aurinko on ollut horisontin alapuolella ja tästä johtuen sähköntuotanto ei ole mahdollista. Päivän ja yön säteilyteho jakauman selvittämiseksi, täytyy määrittää auringonlaskun ja -nousun ajanhetket. Tätä varten täytyy määrittää Auringon säteilyn tulokulma ω_S , joka saadaan laskettua yhtälöllä

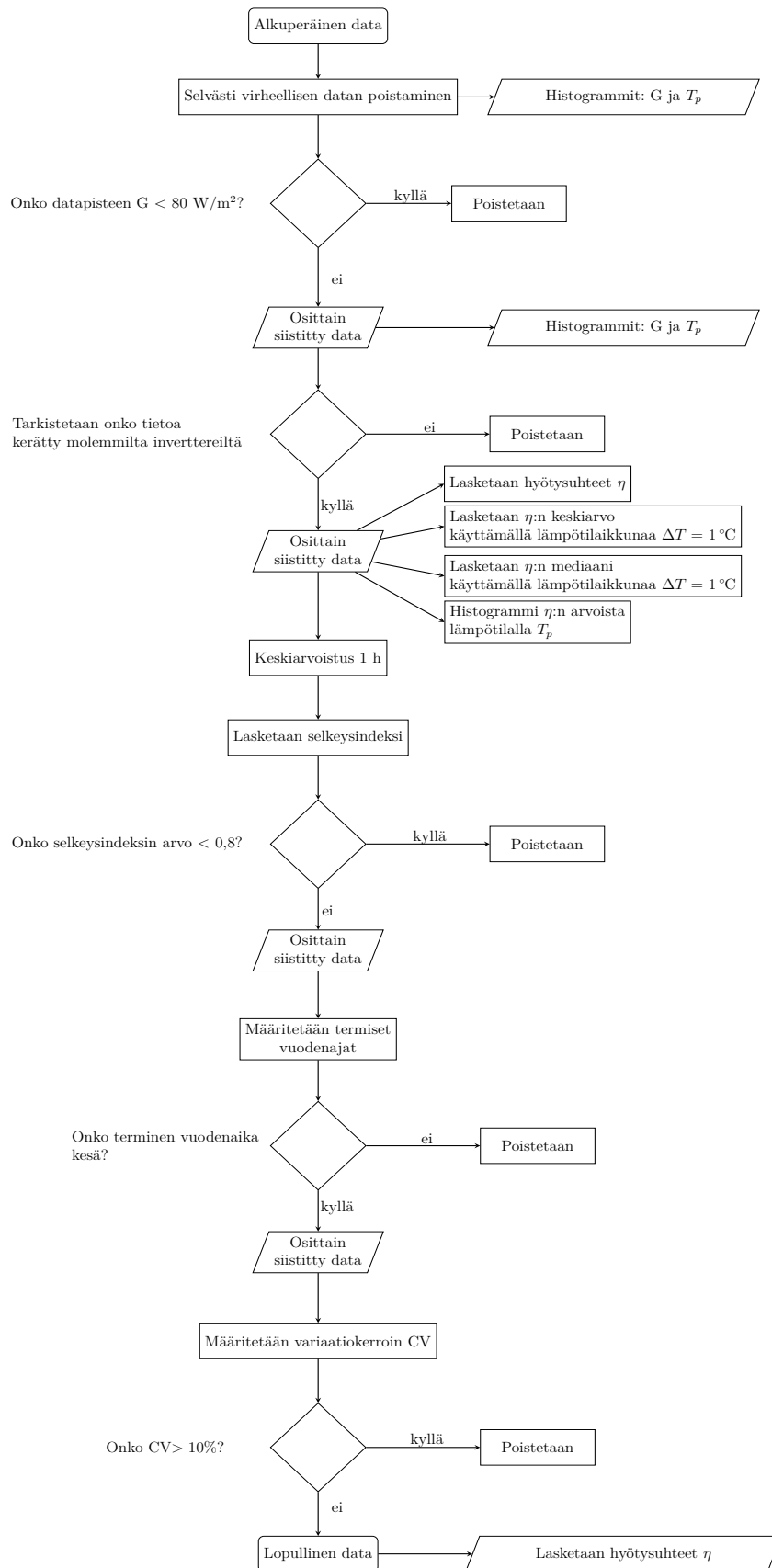
$$\cos \omega_S = \frac{-\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} = -\tan \phi \tan \delta, \quad (17)$$

missä ϕ on leveyspiiri ja $\delta = 23,45^\circ \sin\left(360^\circ \frac{284+n}{365}\right)$, missä n on päivän numero (1–365/366). Maapallo pyörii 15° tunnissa, jolloin Auringon lasku tapahtuu $\frac{\omega_S}{15^\circ}$ tunnin kuluttua keskipäivästä. Hetki, jolloin Aurinko nousee horisontin yläpuolelle saadaan selville käyttämällä samaa kulmaa, mutta Auringon nousu tapahtuu $\frac{\omega_S}{15^\circ}$ tuntia keskipäivää aikaisemmin. [8]

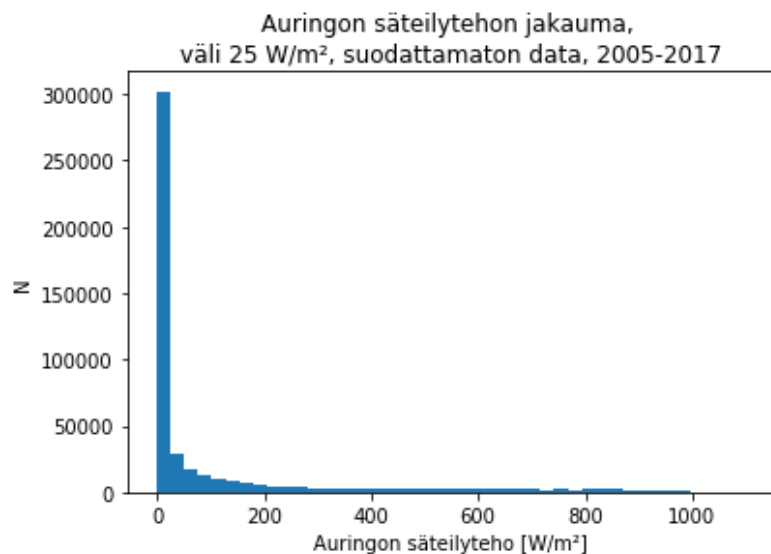
Kuviossa 15 esitetään Auringon säteilytehon jakauma, kun aineistosta on suodatettu pois ajan hetket, jolloin Aurinko on ollut horisontin yläpuolella eli on ollut yöaika. Kuviossa 16 esitetään puolestaan säteilytehon jakauma, kun Aurinko on ollut horisontin yläpuolella, eli on ollut päiväaika.

Tarkastelemalla sekä alkuperäisen aineiston säteilytehon jakaumaa että yö- ja päiväaikaisten jakaumia, huomataan, että Suomen olosuhteissa suurimman osan ajasta paneelisto ei voi tuottaa sähköä, sillä Auringon säteilytehon määrä on liian vähäinen. Noin puolet kerätystä aineistosta osuu yöajalle, jolloin säteilytehon määrä jää liian alhaiseksi sähköntuotannon aloittamiseksi. Paneelisto voi olla myös peittynyt esimerkiksi lumen alle, jolloin sähköä ei voida tuottaa vaikka Auringosta tuleva säteily olisi riittävä sähköntuotannon aloittamiseen.

Paneeliston toiminnan tarkasteluun on käytetty myös tähtidiagrammeja. Artikkeleissa [11] tähtidiagrammit on esitelty yhtenä tapana hahmottaa paneeliston toimintaa.



Kuvio 13. Datan käsittelyä kuvaava vuokaavio. Vuokaaviossa esitetään miten dataa on käsitelty ja millä perusteilla osa datasta on poistettu.



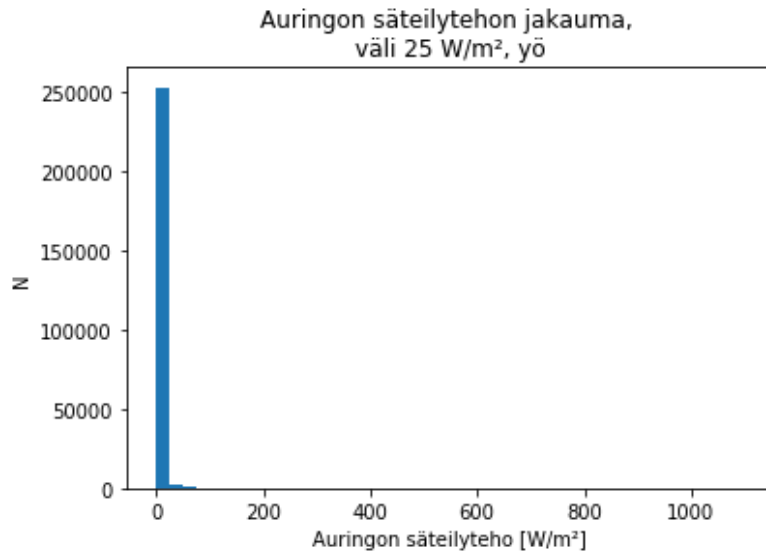
Kuvio 14. Auringon säteilytehon jakauma koko datan keräämisen ajalta. Histogrammin palkkien leveys on 25 W/m². Hyvin pienet säteilytehon arvot dominoivat niin paljon, että suurempien säteilytehojen käyttäytymistä on hankala havainnoida.

Tähtidiagrammissa tiedostoon merkitään tähti, kun Auringon säteilytehon tunnin keskiarvo ylittää 80 W/m². Kuvioissa 17 ja 18 esitetään tehdyt tähtidiagrammit vuosien 2007 ja 2012 kesäkuulta. Samankaltaiset diagrammit on tehty kaikilta mitauskuukausilta. Kesäkuun 2007 tähtidiagrammista huomataan, että laitteisto ei ole ollut toiminnassa kuukauden alussa. Kesäkuun 2012 tähtidiagrammi taas esittää tilannetta, jossa järjestelmä on toiminut kuten pitääkin.

Kun datasta suodatetaan alle 80 W/m² säteilytehon omaavat datapisteet, saadaan Auringon säteilytehon jakaumaksi koko datan keruun ajalta kuvion 19 mukainen jakauma. Jakaumasta huomataan, että Suomen olosuhteissa Auringon säteilyteho ylittää arvon 1000 W/m² vain hyvin harvoin. Tästä johtuen myös STC-olosuhteiden käyttäminen on lähes tulkoon mahdotonta. Koko aineistosta löytyy tasan kaksi datapistettä, jotka täyttävät STC-olosuhteiden ehdot, eli Auringon säteilyteho on 1000 W/m² ja paneeliston lämpötila on 25 °C.

Pienten säteilytehon arvojen ja selvästi viallisen datan siistimisen jälkeen havaittiin, että osa datasta sisältää tietoa vain toisen invertterin sähköntuotannosta. Nämä datapisteet on poistettu tarkasteltavasta aineistosta, sillä tällainen data vääristää tuloksia, kun tarkastellaan koko systeemin tuotantoa.

Analyysin tekemistä varten dataa on jouduttu siistimään erilaisilla menetelmil-



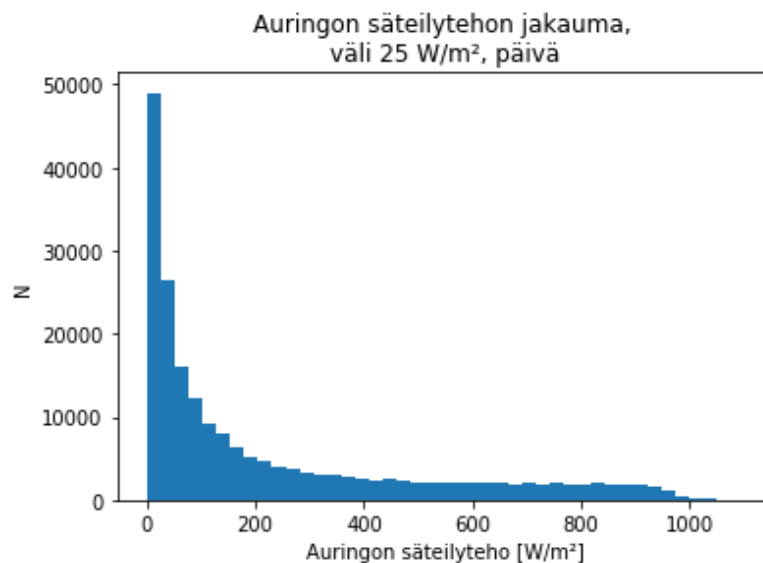
Kuvio 15. Auringon säteilytehon jakauma, kun aineistosta on poistettu ajanhetket, jolloin Aurinko on ollut horisontin yläpuolella.

lä, jotta halutut ilmiöt saadaan näkyviin. Hyötysuhteen määrittämiseksi tarvitaan mahdollisimman keskittynyt datapistejoukko, johon on mahdollista tehdä suoransovitus. Suurilla Auringon säteilytehon arvoilla suurin osa datapisteistä osuu yhteen joukkoon, mutta erityisesti pienillä säteilytehon arvoilla datapisteet jakaantuvat hyvin laajalle alueelle, kuten kuviossa 20 helposti huomataan. Mahdollisia syitä tälle käytökselle ovat pilvisyys ja se, että paneelisto on saattanut olla osittain peittynyt, jolloin paneeliston hyötysuhde heikkenee. Kuviossa 21 näkyy, että paneelisto on ollut talvella osittain peittyneenä lumen alle.

Pilvisten päivien poistamiseen datasta on käytetty selkeysindeksiä (yhtälö 15). Tätä varten kerätty aineisto on keskiarvoistettu tunnin välein, ja jokaiselle uudelle datapisteelle on määritetty pilvisyyden määrä käyttäen selkeysindeksiä. Laskuissa on käytetty Saarijärven leveyspiirille arvoa $\phi = 62^\circ$.

Selkeysindeksi määrittämisen jälkeen datasta suodatettiin pois kaikki pisteet, joiden selkeysindeksin arvo on alle 0,8. Tällä tavoin datasta saadaan poistettua ajanhetket, jolloin taivas on ollut pilvessä. Datasta ei kuitenkaan voida poistaa tällä tavoin hetkiä, jolloin paneelisto on ollut peittyneenä.

Selkeysindeksin käyttäminen siistii aineistoa hieman, mutta ei silti riittävästi lineaarisen sovituksen tekemiseen laskettuihin hyötysuhteisiin. Hyötysuhteiden kuvaajissa on edelleen selvästi yleisestä käytöksestä eroavia datapisteitä etenkin pienillä Auringon säteilytehon arvoilla. Kuviossa 22 havainnollistetaan miten runsasta hajonta on,



Kuvio 16. Auringon säteilytehon jakauma koko datan keräämisen ajalta, kun aineistosta on poistettu yön datapisteet. Histogrammin palkkien leveys on 25 W/m².

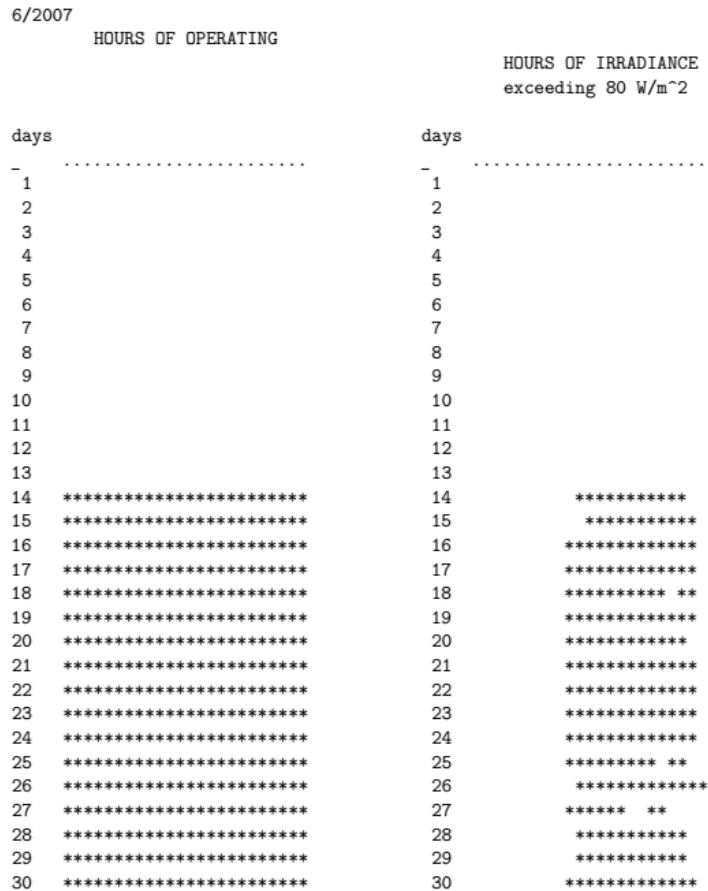
kun Auringon säteilytehon arvo on 100 W/m². Todennäköisesti nämä heikommät hyötysuhteet johtuvat paneeliston peittymisestä esimerkiksi lumen alle. Kerätyistä tiedoista ei kuitenkaan voi suoraa päätellä milloin paneelisto on ollut peittyneenä esimerkiksi lumen alle.

Ajanhetket, jolloin paneelisto on ollut joko kokonaan tai osittain peittyneenä lumen alle, voidaan poistaa suodattamalla aineistoa siten, että se huomioi vuodenaajoista vain termisen kesän. Termisen kesän aikana vuorokauden keskilämpötila on pysyvästi yli 10 °C. Termisen syksyn ja kevään aikana vuorokauden keskilämpötila on pysyvästi 0 °C ja 10 °C välillä. Termisen talven aikana vuorokauden keskilämpötila ei nouse yli 0 °C. [13]

Kuviossa 23 esitetään hyötysuhteiden arvot paneelilämpötilan funktiona, kun aineistossa on huomioitu vain termisen kesän aikainen data. Termisten vuodenaikojen suodattamisen jälkeen data on edelleen hajaantunutta. Tämän vuoksi dataa käsitellään variaatiokerroimen CV avulla. Variaatiokerroin on tilastollinen hajontaluku, joka kuvaa keskiarvoon suhteutetun hajonnan suuruutta:

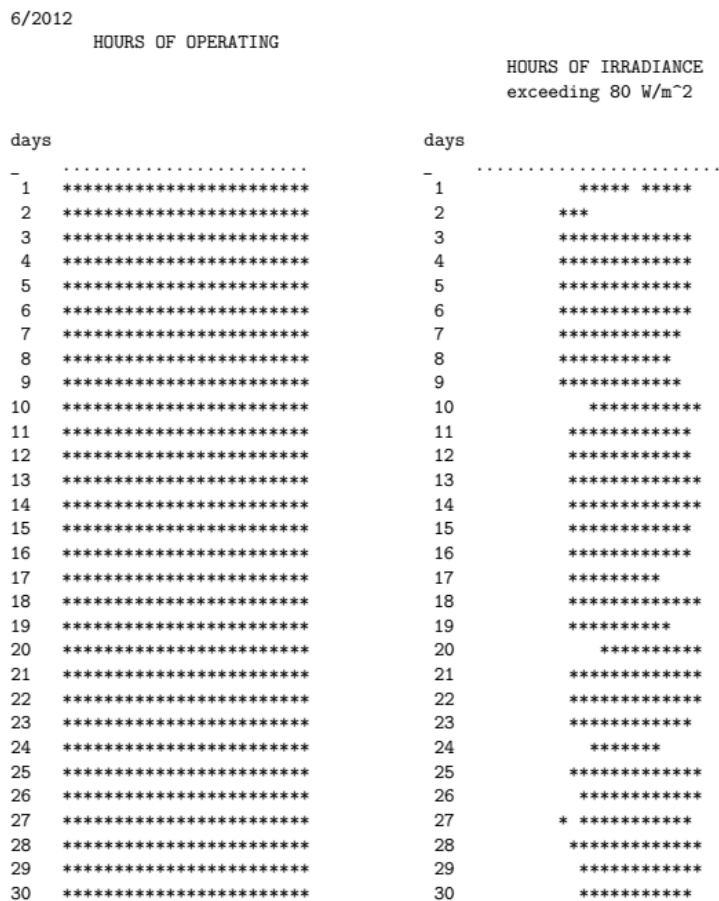
$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (18)$$

missä s on hajonta ja \bar{x} on keskiarvo.

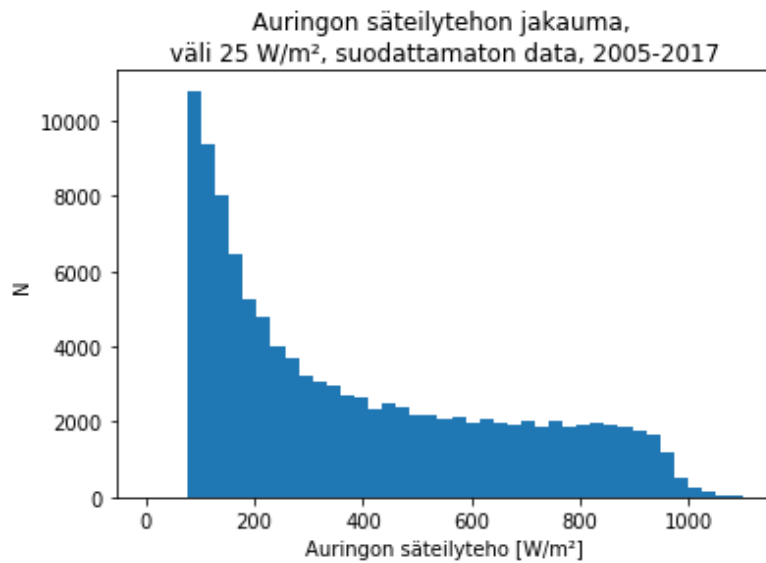


Kuvio 17. Kesäkuun 2007 tähtidiagrammi. Diagrammiin merkitään tähti tunnin kohdalle, mikäli laitteisto on ollut toiminnassa ja mikäli auringon säteilytehon arvo on ollut yli 80 W/m². Tähtidiagrammista huomataan selvästi, että laitteisto ei ole ollut toiminnassa kuukauden alussa.

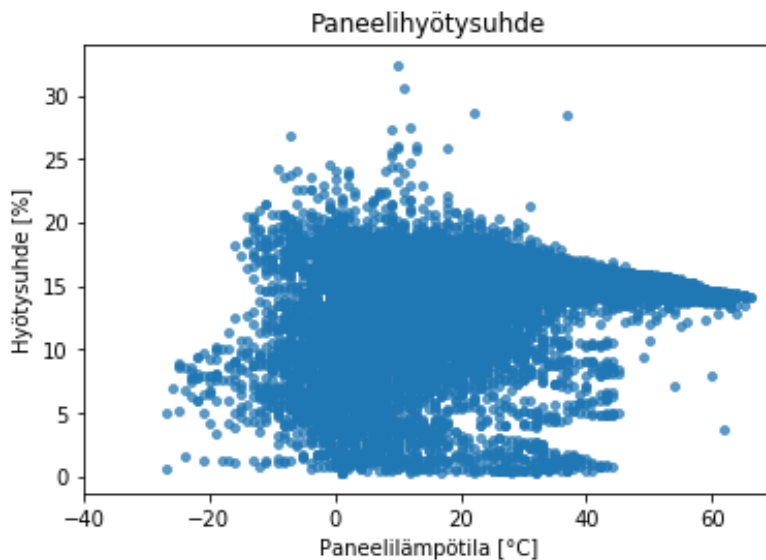
Variaatiokerroin lasketaan sekä hyötysuhteille että paneelilämpötilan arvoille. Sen avulla pyritään poistamaan aineistosta ne datapisteet, jolloin Auringon säteilytehon arvo tai paneeliston lämpötilan arvo on muuttunut runsaasti tunnin aikana. Saatujen tulosten perusteella karsitaan kaikki sellaiset datapisteet, joiden variaatiokertoimen arvo on yli 10%.



Kuvio 18. Kesäkuun 2012 tähtidiagrammi, johon on merkitty tähti, jos laitteisto on ollut toiminnassa ja säteilyteho on ollut yli 80 W/m². Tämä tähtidiagrammi on esimerkkinä kuukaudesta, jolloin laitteisto on ollut koko ajan toiminnassa.



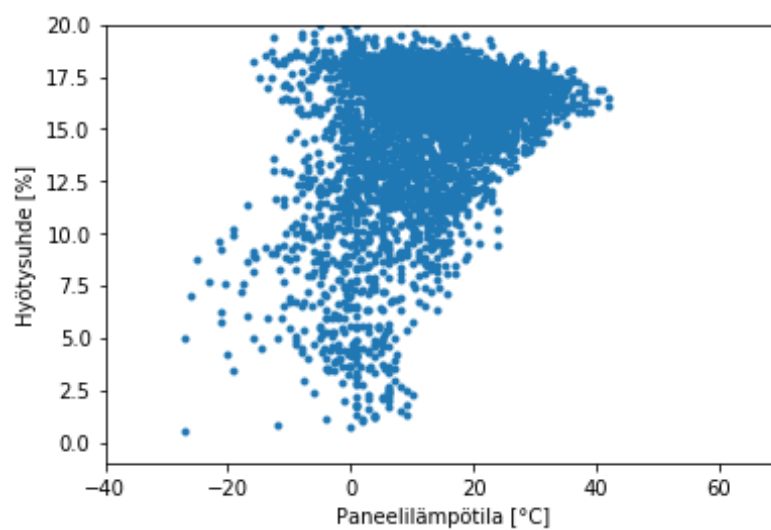
Kuvio 19. Auringon säteilytehon jakauma koko datan keräämisen ajalta, kun datasta on suodatettu pois datapisteet, jolloin säteilyteho on ollut alle 80 W/m².



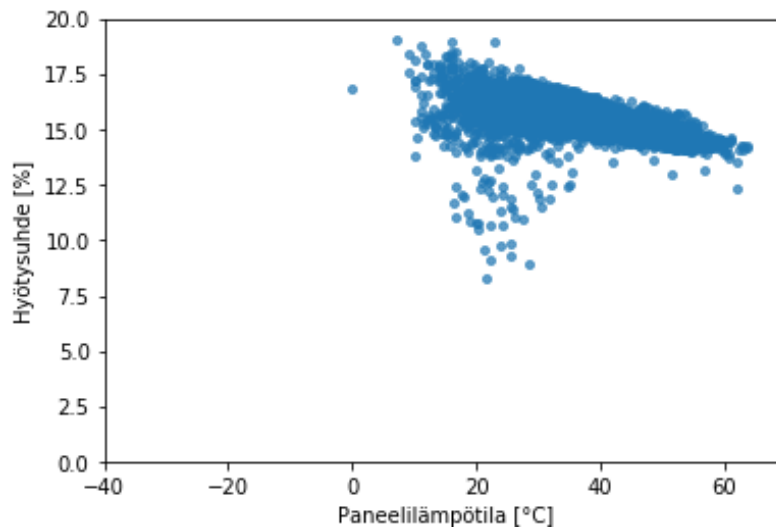
Kuvio 20. Lasketut paneelihuötysuhteet asettuvat laajalle alueelle, kun alkupe-
räisestä datasta on poistettu selvästi virheelliset datapisteet ja ajanhetket, jolloin
vain toiselta invertteriltä on kerätty dataa tai jolloin Auringon säteilyteho on
ollut alle 80 W/m². Sovituksen tekemistä varten aineistoa täytyy siistiä vielä
lisää.



Kuvio 21. Paneelisto on ollut talvella osittain peittyneenä lumen alle, jolloin paneelisto voi muuttaa Auringon säteilytehon vain osittain sähköksi.



Kuvio 22. Pienimmillä Auringon säteilytehon arvoilla hyötysuhteiden hajonta on edelleen suurta, vaikka aineistosta on jo poistettu pilviset päivät. Kuviossa esitetään paneeliston hyötysuhteiden arvoja paneelilämpötilan funktiona, kun säteilyteho on 100 W/m^2 ja parametrien arvoista on laskettu keskiarvo yhden tunnin ajalta.



Kuvio 23. Termisten vuodenaikojen huomioimisen jälkeen, paneeliston hyötysuhteet ovat edelleen hajaantuneita etenkin lämpötilan ollessa pienempi. Kuvaaajassa on esitetty kaikki lasketut hyötysuhteen arvot, kun säteilytehon arvo on $100 - 1000 \text{ W/m}^2$ ja kerättyjen parametrien arvot on keskiarvoistettu tunnin välein.

6 Aineiston analysointi

Hyötysuhteen käyttäytymisen määrittämiseen käytetään vain aurinkoisia kesäpäiviä, jolloin paneeliston peittymisestä aiheutuvat pienet hyötysuhteet saadaan jätettyä huomiotta lineaarisovitusta tehdessä. Sovitukset on tehty säteilytehoille 100, 200, 300, jne. aina 1000 W/m^2 saakka sekä aineistoon, joka sisältää kaikki säteilytehot. Hyötysuhteisiin sovitetaan funktio

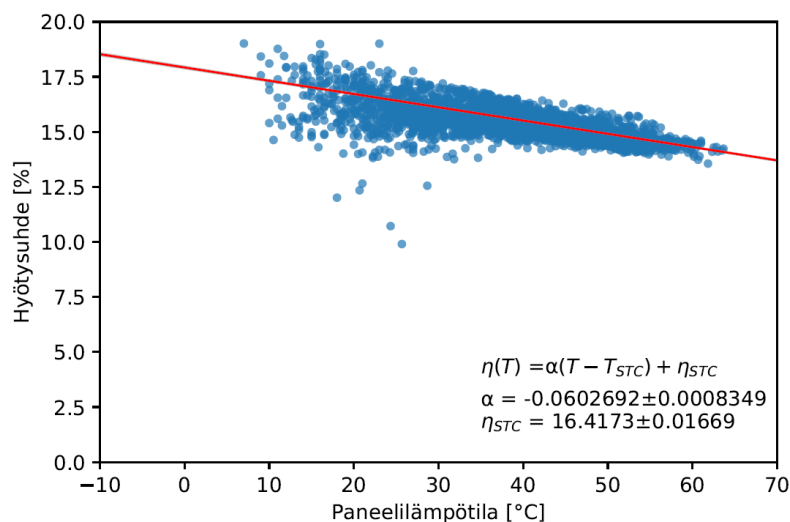
$$\eta(T) = \alpha_{\eta}(T - T_{STC}) + \eta_{STC}$$

. Koko aineistolle saadaan parametrien α_{η} ja η_{STC} arvoiksi vastaavasti

$$\alpha_{\eta} = (-0,0603 \pm 0,0009) \frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$$

$$\eta_{STC} = (16,42 \pm 0,02) \%$$

Kuviossa 24 esitetään näihin datapisteisiin sovitettu suora. Sovituksessa on otettu huomioon paneelilämpötilan ja hyötysuhteen virheet.



Kuvio 24. Kuvaajassa esitetään paneelihuötysuhteet paneelilämpötilan funktiona siistitystä aineistosta, kun aineiston parametreille on laskettu tunnin keskiarvo. Koko aineistoon on sovitettu suora hyötysuhteen käytöksen tarkastelemiseksi.

Taulukko 2. Datapistejoukkoon sovitetun lineaarisen suoran parametrit.

$G \pm 50 \text{ W/m}^2$	α_η	$\Delta\alpha_\eta$	η_{STC}	$\Delta\eta_{STC}$
100	-0,043	0,009	16,76	0,07
200	-0,04	0,02	16,01	0,08
300	-0,043	0,006	16,03	0,05
400	-0,046	0,008	16,19	0,08
500	-0,049	0,005	16,01	0,07
600	-0,049	0,005	16,13	0,07
700	-0,064	0,004	16,50	0,06
800	-0,059	0,003	16,49	0,06
900	-0,059	0,004	16,41	0,08
1000	-0,059	0,008	16,0	0,2
100–1000	-0,0603	0,0009	16,42	0,02

Taulukossa 2 esitetään eri säteilytehojen hyötysuhteisiin sovitetun lineaarisen suoran parametrit. Saaduissa tuloksissa esiintyy jonkin verran heilahtelua, suurimman ja pienimmän α_η -arvon välinen erotus on melkein 0,02, joka on noin puolet pienimmästä arvosta ja noin kolmasosa suurimmasta arvosta. Parametrin η_{STC} vaihtelut ovat suhteellisesti pienempiä kuin toisen parametrin, mutta kuitenkin huomattavia. Parametrien α_η ja η_{STC} arvojen heittälyä havainnollistetaan kuviossa 25.

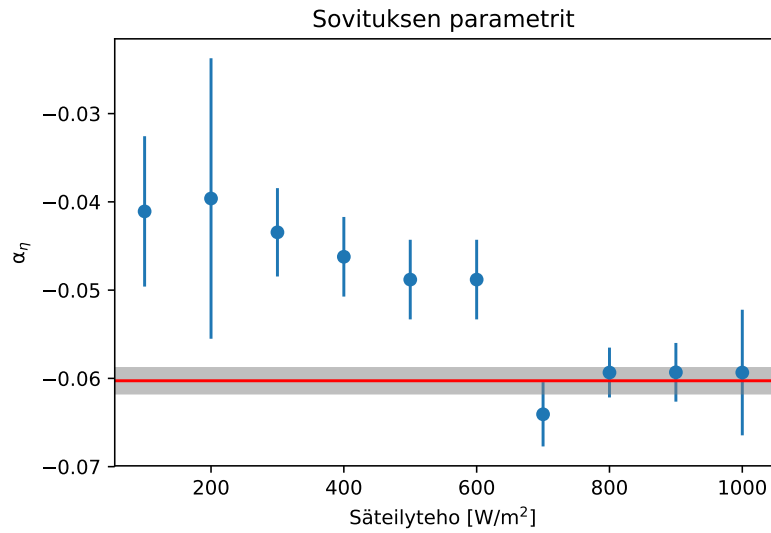
Lineaarisen sovituksen perusteella tiedetään, että hyötysuhde η laskee 0,0603 prosenttiyksikköä paneelilämpötilan kasvaessa STC-lämpötilasta 1°C , kun tarkastellaan kaikkia suodatuksen jälkeisiä pisteitä. Pienillä säteilytehon arvoilla hyötysuhde laskee hitaammin lämpötilan kasvaessa kuin suuremmilla säteilytehon arvoilla. Esimerkiksi säteilytehojen 100 W/m^2 ja 1000 W/m^2 kulmakertoimien välinen ero on noin 0,017 yksikköä. Pienempi kulmakerroin voidaan selittää siten, että pienemmillä säteilytehon arvoilla pienempi osa säteilystä heijastuu takaisin esimerkiksi paneelin pinnasta.

Lineaarista sovitusta tehdessä voitiin huomioida vain aurinkoiset kesäpäivät. Hyötysuhteen käyttäytymisen kannalta kiinnostavat paneelistolämpötilan 0°C läheisyydessä olevat datapisteet jouduttiin tällöin poistamaan, sillä termisen syksyn, talven ja kevään osilta ei pystytä varmuudella sanomaan milloin paneelisto on ollut kokonaan tai osittain lumen peitossa. Peittyminen on kuitenkin havaittavissa hyötysuhteiden arvoissa, sillä osa hyötysuhteista eroaa selvästi yleisestä käyttäytymisestä ja etenkin pienillä Auringon säteilytehon arvoilla hajonta on hyvin suurta. Kuviossa 26 esitetään hyötysuhteiden arvojen hajonnan suuruutta sekä pienellä että suurella Auringon säteilytehoilla. Kuviosta havaitaan, että hajonta on huomattavaa pienillä

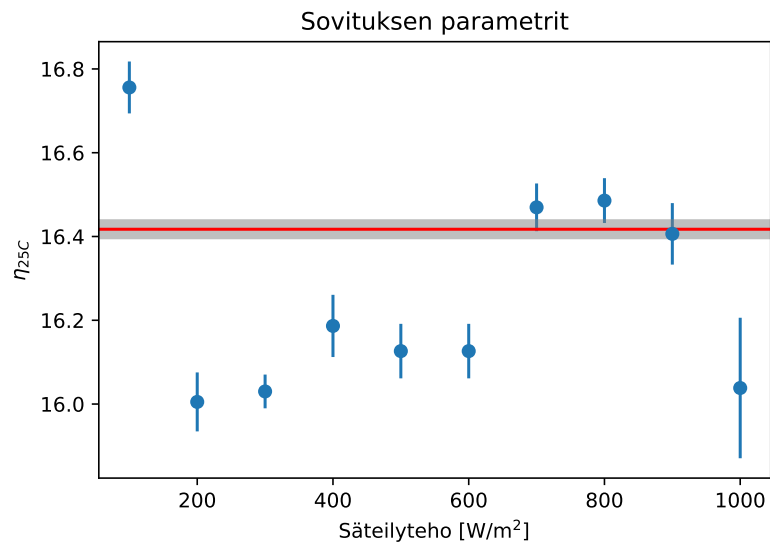
säteilytehon arvoilla.

Aineistoa tarkasteltiin myös siten, että datapisteille annettiin väri sen mukaan miltä kuukaudelta ne ovat. Kuviossa 27 esitetään säteilytehon 500 W/m^2 hyötysuhteiden jakauma, jossa jokainen datapiste on väritetty sen perusteella miltä kuukaudelta se on mitattu. Tämänkaltaisista kuvaajista havaitaan nopeasti, että varsinkin talvikuukausien aikana saavutetut hyötysuhteet erottuvat datapistejoukon yleisestä käyttäytymisestä. Suurin osa datapisteistä näyttää kuitenkin osuvan samalle suoralle, josta voidaan päätellä, että myös muina vuodenaikoina hyötysuhde noudattaa määritettyä lineaarista käytöstä, mikäli paneelisto ei ole peittyneenä.

Mikäli jatkossa haluttaisiin käyttää aineistoa myös muilta termisilta vuodenaajoilta kuin vain kesältä, on paneeliston puhdistuksesta huolehdittava. Tämä saattaisi parantaa paneeliston hyötysuhdetta yleisesti, sillä paneelistojen likaantuminen tai peittyminen vaikuttaa alentavasti paneeliston hyötysuhteeseen ja siten sähköntuotantoon. Vaihtoehtoisesti paneelistosta voitaisiin ottaa kuva vähintään kerran päivässä, jolloin aineistosta on mahdollista poimia sellaiset ajanhetket, jolloin paneelisto ei ole ollut peittyneenä esimerkiksi lumen alle.

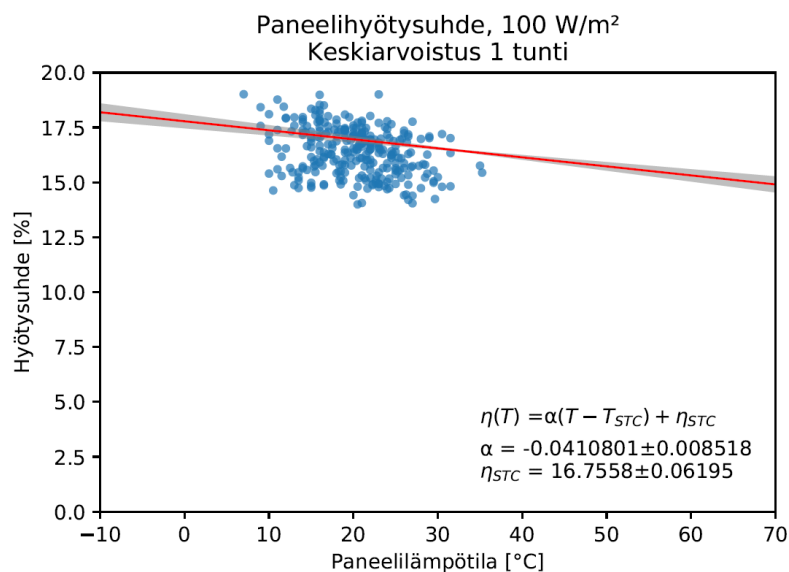


(a)

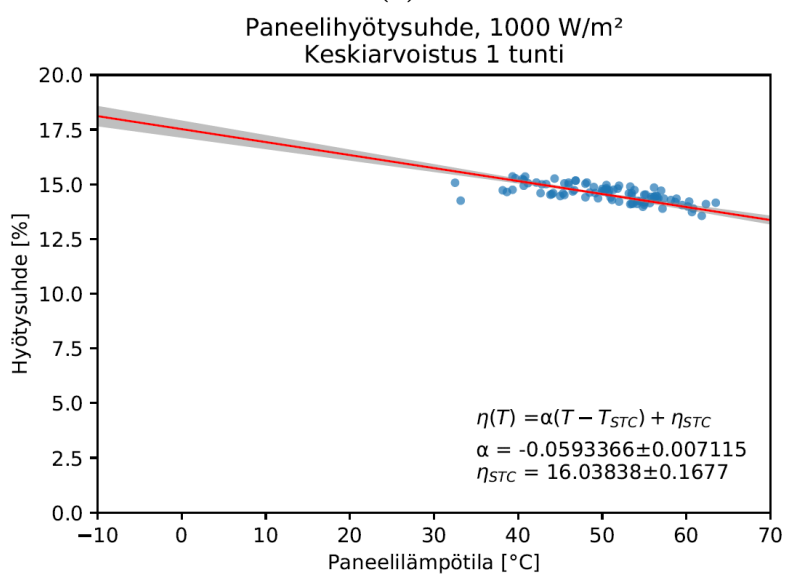


(b)

Kuvio 25. Eri Auringon säteilytehon arvojen sovituksesta saatujen parametrien arvot virheineen graafisesti esitettynä. Kuviossa punaisella viivalla esitetään parametrien arvo, joka on saatu sovituksesta jossa tarkastellaan kaikkia Auringon säteilytehon arvoja.

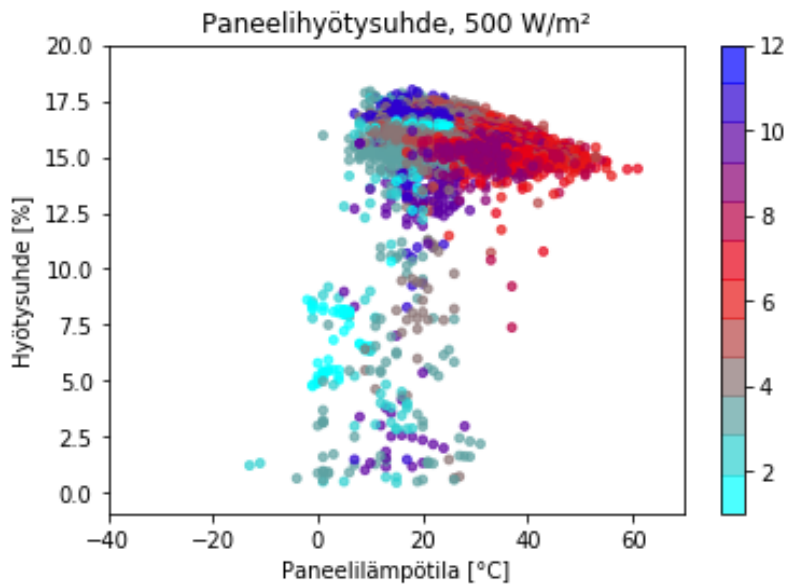


(a)



(b)

Kuvio 26. Aineiston siistimisen jälkeen datapistejoukon hajonta on edelleen suhteellisen suurta pienillä säteilytehon arvoilla, mutta suuremmilla säteilytehon arvoilla datapistejoukon hajonta pienenee huomattavasti. Siistimisen jälkeen aineistoon on kuitenkin mahdollista tehdä suoransovitus. Kuvioissa (a) ja (b) esitetään datapistejoukkoon sovitettu suora, kun Auringon säteilytehon arvo on $100 \text{ W/m}^2 \pm 50 \text{ W/m}^2$ ja $1000 \text{ W/m}^2 \pm 50 \text{ W/m}^2$.



Kuvio 27. Paneelihyötysuhteiden jakauma säteilytehon ollessa 500 W/m². Jokainen datapiste on väritetty sen perusteella, miltä kuukaudelta se on peräisin. Kuvaajasta huomataan, että suurin osa selvästi yleisestä käytöksestä poikkeavista datapisteistä on muilta kuin kesäkuukausilta.

7 Tulokset

Kerätyn aineiston perusteella Suomen olosuhteissa Auringon säteilyteho on valtaosan ajasta hyvin pientä, alle 100 W/m^2 . Kerätystä aineistosta noin 12 % on ajanjaksolta, jolloin Auringon säteilyteho on ollut alle 80 W/m^2 . Näin pienillä säteilytehon arvoilla sähköntuotanto on käytännössä olematonta.

Sanyo lupaa HIT-sarjan HIP-190NE1 moduuleilleen 16,5 % hyötysuhteen STC-olosuhteissa. Tehtyjen sovitusten perusteella Suomen olosuhteissa kyseisillä moduuleilla saadaan noin $(16,0 \pm 0,2) \%$ hyötysuhde, kun säteilyteho on $(1000 \pm 50) \text{ W/m}^2$ ja paneelilämpötila on $(25,0 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$. Tehtyjen sovitusten perusteella hyötysuhde jää hieman valmistajan lupaaman hyötysuhteen alle, mutta ero on vain 0,5 prosenttiyksikköä. Tämän perusteella valmistajan antamat tekniset tiedot pätevät melko hyvin myös todellisessa käytössä.

Teoreettisen hyötysuhteen kaavan 10 mukaisesti maksimihyötysuhde voidaan esittää muodossa

$$\eta_{max} = \frac{V_{OC} I_{SC}}{GA}.$$

Sijoittamalla yllä olevaan yhtälöön kaavat 13 ja 14, voidaan teoreettinen maksimihyötysuhde säteilyteholla G_0 ilmaista muodossa:

$$\begin{aligned} \eta_{max}(G_0) = & B(G_0) + B(G_0)(\alpha_I + \alpha_V)(T - T_{STC}) \\ & + B(G_0)\alpha_I\alpha_V(T - T_{STC})^2, \end{aligned} \quad (19)$$

missä

$$B(G_0) = \frac{V_{OC0} I_{SC0} \ln G_0}{AG_{STC} \ln G_{STC}}.$$

Mikäli toisen kertaluvun termi jätetään huomiotta, saatu yhtälö on samaa muotoa kuin mittauspisteisiin tehty suoransovitus. Koska toisen kertaluvun termin kerroin on noin kertaluokkaa 10^{-5} , on sen huomiotta jättäminen hyväksyttävää. Sijoittamalla yhtälöön aurinkopaneelin valmistajan ilmoittamat V_{OC0} , I_{SC0} , α_I ja α_V , saadaan ratkaistuksi eri säteilytehon arvoja G_0 vastaavat kertoimet $B(G_0)$ ja $B(G_0)(\alpha_I + \alpha_V)$,

Taulukko 3. Teoreettisesti määritetyt arvot parametreille $B(G) (\alpha_I + \alpha_V)$, joka vastaa sovituksen parametria α_η ja $B(G)$, joka vastaa sovituksen parametria η_{STC}

G [W/m ²]	$B(G) (\alpha_I + \alpha_V)$	$B(G)$
100	-0,0171	0,1496
200	-0,0197	0,1721
300	-0,0212	0,1853
400	-0,0223	0,1947
500	-0,0231	0,2019
600	-0,0238	0,2078
700	-0,0243	0,2129
800	-0,0248	0,2172
900	-0,0253	0,2210
1000	-0,0257	0,2244

joita voidaan verrata suoran sovituksesta saatuihin parametrien arvoihin.

Sanyo antaa HIT-sarjan HIP-190NE1 moduulien oikosulku virran I_{SC0} arvoksi 5,57 A, avoimen piirin jännitteeksi $V_{OC0} = 46,4$ V, virran lämpötilakertoimelle $\alpha_I = 1,67$ mA °C⁻¹ ja jännitteen lämpötilakertoimelle $\alpha_V = -0,116$ V °C⁻¹ [6]. Säteilyteholla $G_0 = 100$ W/m² saadaan tällöin yhtälön 19 kertoimiksi

$$B(100 \text{ W/m}^2) = 0,1496 \%$$

$$B(100 \text{ W/m}^2) (\alpha_I + \alpha_V) = -0,0171 \frac{\%}{\text{°C}}.$$

Taulukossa 3 esitetään eri säteilytehoja vastaavat teoreettiset parametrien arvot. Saadut teoreettiset arvot eroavat sovituksesta saaduista arvoista. Sovituksen kulmakertoimen α_η arvo on noin kaksinkertainen verrattuna laskennallisiin tuloksiin. Laskennalliset $B(G)$ -parametrin arvot kasvavat säteilytehon kasvaessa. Sovituksen vakioparametrin η_{STC} arvoissa ei ole huomattavasti samanlaista käytöstä ja sen arvo pysyttelee kaikilla säteilytehon arvoilla noin 16 % paikkeilla, kun taas laskennallisesti saadun parametrin arvo kasvaa noin 15 prosentista 22 prosenttiin säteilytehon kasvaessa.

Teoreettisesti määritettyjen arvojen lisäksi sovituksesta saatuja tuloksia voidaan verrata myös muiden tekemiin tutkimuksiin ja heidän saamiinsa tuloksiin. Mondol, Yohanis ja Norton [14] ovat tutkineet Pohjois-Irlantiin sijoitetun aurinkosähköjärjestelmän toimintaa. Paneelistossa käytetyt kennot on valmistettu yksikiteisestä piistä. Systemiä tarkkailtiin kolmen vuoden ajan, kun invertteri oli ylimitoitettu. Kysei-

sessä järjestelmässä paneeliston hyötysuhde on vaihdellut kesäisin välillä 9–10 %, kun paneeliston lämpötila on ollut välillä 10 – 60 °C. Heidän keräämänsä aineiston perusteella paneeliston hyötysuhde laski 0,4 % paneeliston lämpötilan kasvaessa 1 °C. Tutkimuksessa saadut tulokset eroavat hieman tämän tutkielman tuloksista. Tutkimuksessa saadut hyötysuhteet ovat noin kolmasosan pienempiä kuin tutkielmassa saadut tulokset ja muutosnopeus on noin kymmenkertainen. Kuitenkin paneelihyötysuhteen käytös paneelilämpötilan funktiona on yleisesti samankaltaista kuin tässä tutkielmassa. Tuloksien eroavaisuutta voidaan selittää mm. erilaisilla sääolosuhteilla sekä erityyppisellä paneelistolla.

Lämpötilan ja tuulennopeuden vaikutusta paneeliston hyötysuhteeseen on tutkittu myös Etelä-Kreikassa Kaldellisin, Kapsali ja Kavadias [15] puolesta. Tutkimuksessa on käytetty kahta paneelistoa, joista on kerätty aineistoa vuoden ajalta. Molempien paneelistojen kennot ovat valmistettu yksikiteisestä piistä. Toinen paneelista sijaitsee Chaniassa ja toinen Ligouriossa. Tutkimuksessa saadaan hyötysuhteisiin sovitettujen suorien yhtälöiksi $y = -0.00069x + 0.1565$ (Chania) ja $y = -0.00042x + 0.1378$ (Liguorio). Tämän tutkielman ja kyseisen tutkimuksen tulokset ovat samankaltaisia, mutta tuloksia vertaillaessa täytyy ottaa huomioon, että olosuhteet Etelä-Kreikassa poikkeavat huomattavasti Suomen olosuhteista. Tutkimuksessa todetaan paneeliston lämpötilan olevan suuri tekijä paneeliston sähköntuotannossa, mihin myös tämän tutkielman tulokset viittaavat.

Pietruszko ja Gradzki [16] ovat tarkastelleet pienen 1 kW kokoisen verkkoon kytketyn aurinkopaneeliston toimintaa Puolassa vuoden ajan alkaen joulukuusta 2000. Paneelista koostuu kahdestakymmenestä Millennia MST-50 MV moduulista. Nämä moduulit on valmistettu amorfisista ohutkalvopiikkeennoista. Heidän keräämänsä aineiston perusteella käytetty aurinkopaneelista saavutti 4,5 – 5,5 % hyötysuhteen, valmistajan ilmoittaman hyötysuhteen ollessa STC-olosuhteissa 6 %. Tässä tutkielmassa saatujen tulosten perusteella hyötysuhde jää myöskin noin puoli prosenttiyksikköä valmistajan ilmoittaman hyötysuhteen alle STC-olosuhteissa.

Tampereen teknillisessä yliopistossa on tehty tutkimusta siitä, miten lumen ja rakennusten aiheuttama varjostaminen vaikuttaa aurinkopaneelien PV-käyriin [17]. Tutkimuksen mukaan esimerkiksi lumen vaikutus PV-käyrään on huomattava. Hyötysuhteen ollessa riippuvainen paneeliston tehosta, PV-käyrän muuttuminen peittymisen seurauksena johtaa myös hyötysuhteen laskemiseen. Tässä tutkielmassa tehdyn analyysin tulokset ovat yhtenevät, sillä osa lasketuista hyötysuhteista jäi hyvin

heikoiksi, vaikka Auringon säteilyteho oli suuri. Tätä voidaan selittää paneeliston peittymisellä lumen ja jään alle.

Suurin osa tutkimuksista sijoittuu lähemmäksi päiväntasaajaa kuin napoja, mistä johtuen tutkimuksia, joissa olosuhteet vastaisivat paremmin Suomen olosuhteita on vähän. Vaikka sääolosuhteet poikkeavat näissä kohteissa Suomen olosuhteista, hyötysuhteen riippuvuus paneelilämpötilasta on silti samankaltainen, sillä paneeliston hyötysuhde laskee paneeliston lämpötilan kasvaessa. Päiväntasaajan lähellä paneeliston lämpötilat kohoavat yleensä korkeammiksi kuin mitä Suomen sääolosuhteissa. Pohjoisemmissa olosuhteissa tehdyissä tutkimuksissa on todettu lumen olevan suuri tekijä hyötysuhteeseen vaikuttavissa olosuhteissa. Etelämpänä lumen sijaan esimerkiksi hiekkapöly voi aiheuttaa samankaltaista käytöstä.

8 Päätäntö

Tässä tutkielmassa on tarkasteltu Sanyon HIT-sarjan HIP-190NE1-moduuleista koostuvan paneeliston hyötysuhteen käyttäytymistä kerätyn aineiston perusteella. Aineistoa sähköntuotannosta ja paneeliston olosuhteista on kerätty noin kymmenen vuoden ajalta. Aineiston siistimisen jälkeen jokaiselle datapisteelle on laskettu hyötysuhde. Saatuihin hyötysuhteiden arvoihin on tehty suoransovitus $\eta(T) = \alpha_{\eta}(T - T_{STC}) + \eta_{STC}$. Sovitus on tehty sekä koko aineistolle että yksittäisille säteilytehon arvoille, kuten esimerkiksi 100 W/m^2 tai 600 W/m^2 . Datapistejoukkoihin tehdyistä lineaarisista sovituksista saadaan samankaltaisia tuloksia, joiden perusteella paneeliston hyötysuhde laskee paneeliston lämpötilan kasvaessa. Sovituksesta saatu hyötysuhde STC-olosuhteissa on noin puolen prosenttiyksikön päässä valmistajan ilmoittamasta arvosta. Valmistajan ilmoittama hyötysuhde on siten suhteellisen todenmukainen myös todellisessa käytössä.

Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että hyötysuhteen käyttäytyminen paneelilämpötilan muuttuessa vastaa joiltain osin teoreettista ennustetta, jonka mukaan paneeliston hyötysuhde laskee paneeliston lämpötilan kasvaessa. Teoreettisen ennusteen mukaan hyötysuhteen tulisi laskea jyrkemmin kuin mitä kokeellisesti määritetty hyötysuhde laskee. Teoreettisesti määritetyn hyötysuhteen arvo paneelilämpötilalla $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ kasvaa noin 15 prosentista 22 prosenttiin kun säteilytehoa kasvatetaan arvosta 100 W/m^2 arvoon 1000 W/m^2 . Tutkielmassa saatujen tulosten perusteella hyötysuhde paneelilämpötilalla $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ on taas noin 16 % kaikilla vastaavilla Auringon säteilytehon arvoilla.

Yksi tutkimuksen kiinnostuksen kohteista olisi ollut, miten paneeliston hyötysuhde käyttäytyy talviolosuhteissa, kun ulkolämpötila on pysyvästi nollan alapuolella. Harmillisesti aineistoa käsiteltäessä aineistosta jouduttiin poistamaan termisen talven aikaiset datapisteet, sillä hajonta oli liian suurta analyysin tekemiseksi. Tarkasteltaessa termisen talven, kevään ja syksyn aineistoa huomataan, että suurin osa datapisteistä näyttää silti osuvan samalle suoralle termisen kesän kanssa, mutta koska hajonta on suurta näihin vuodenaikoihin, ei niihin ole järkevää lähteä tekemään suoransovitusta.

Samankaltaisten tutkimusten löytäminen Suomen kaltaisissa olosuhteissa, eli pienellä Auringon säteilyteholla sekä kylmillä ulkolämpötiloilla, osoittautui hankalaksi. Suurin osa samankaltaisista tutkimuksista on tehty etelämpänä, jossa auringon säteilyteho on suurempi ja ulkolämpötilat ovat korkeampia. Kuitenkin myös nämä tutkimukset osoittavat hyötysuhteen laskevan paneelilämpötilan kasvaessa ja että todellisessa käytössä aurinkopaneeliston hyötysuhde jää hieman valmistajan ilmoittaman hyötysuhteen alle STC-olosuhteissa. Useat tutkimukset ovat keskittyneet aurinkopaneeliston peittymisestä johtuvaan sähköntuotannon heikkenemisen tarkasteluun. Näissä tutkimuksissa päädytään samaan tulokseen kuin tässäkin tutkielmassa: aurinkokennon peittyminen saattaa laskea huomattavasti aurinkokennon sähköntuotantoa.

Saatujen tulosten ja havaintojen perusteella aurinkopaneelin tuotantoa voisi parantaa varmistamalla, ettei paneelisto jää peittyneeksi esimerkiksi lumen alle. Paneeliston tuotantoa voidaan parantaa myös laskemalla paneeliston lämpötilaa, esimerkiksi paneeliston yhteyteen sijoitettavalla jäähdytysjärjestelmällä. Jäähdytysjärjestelmän asentamisesta tulee kuitenkin lisäkuluja eikä tässä tutkielmassa ole tarkasteltu ylittävätkö jäähdytysjärjestelmän asennuttamisen kustannukset lisääntyneen sähköntuotannon taloudellisen vaikutuksen.

Lähteet

- [1] J. Goldemberg. *World energy assessment : energy and the challenge of sustainability*. New York, NY: United Nations Development Programme, 2000. ISBN: 92-1-126126-0. URL: <http://www.undp.org/> (viitattu 22.02.2018).
- [2] IEA. *World Energy Balances: Overview (2017 edition)*. International Energy Agency. 2017. URL: <http://www.iea.org/> (viitattu 22.02.2018).
- [3] G. Boyle, toim. *Renewable energy : power for a sustainable future*. Oxford, England: Oxford University Press, 1996. ISBN: 0-19-926178-4.
- [4] V. Quaschnig. *Understanding renewable energy systems*. London Sterling, VA: Earthscan, 2005. ISBN: 978-1-84407-128-9.
- [5] NREL. *Reference Air Mass 1.5 Spectra*. URL: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html> (viitattu 13.10.2018).
- [6] *HIT photovoltaic module: HIP-190NE1*. URL: http://www.posharp.com/Businesses/fb073528-9447-4391-88b2-6d363c88f4d0/Panel/NHE/Datenbl_190NE1_E_.pdf (viitattu 12.10.2017).
- [7] K. McIntosh. ”Lumps, Humps and Bumps: Three Detrimental Effects in the Current–Voltage Curve of Silicon Solar Cells”. Väitöskirja. Tammikuu 2001.
- [8] J. A. Duffie. *Solar engineering of thermal processes*. 4th ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 2013. ISBN: 9781118418123.
- [9] L. Rossi. ”Verkkoon kytketyn 6 kWp, HIT-teknologiaan perustuvan aurinkosähköjärjestelmän toteutus Saarijärven koulukeskuksessa”. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto sähkötekniikan osasto, 2006.
- [10] *FRONIUS IG 15 / 20 / 30 / 40 / 60 / 60 HV User manual*. URL: <https://www.manualslib.com/manual/1217030/Fronius-Ig-15.html> (viitattu 01.09.2018).

- [11] G. Blaesser ja D. Munro. *Guidelines for the Assessment of Photovoltaic Plants Document B Analysis and Presentation of Monitoring Data*. EUR 16339 E. EUROPEAN COMMISSION, Institute for Systems Engineering ja Informatics, 1995.
- [12] A. Woyte ym. *Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems: Good Practices for Monitoring and Performance Analysis*. Tekninen raportti. International Energy Agency, maaliskuu 2014.
- [13] *Termiset vuodenajat*. Ilmatieteen laitos. URL: <http://ilmatieteenlaitos.fi/termiset-vuodenajat> (viitattu 26.04.2018).
- [14] J. D. Mondol, Y. G. Yohanis ja B. Norton. "The effect of low insolation conditions and inverter oversizing on the long-term performance of a grid-connected photovoltaic system". *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 15.4 (2007), s. 353–368. DOI: 10.1002/pip.742.
- [15] J. K. Kaldellis, M. Kapsali ja K. A. Kavadias. "Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece". *Renewable Energy* 66 (2014), s. 612–624. ISSN: 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2013.12.041.
- [16] S. Poietruszko ja M. Gradzki. "Performance of a grid connected small PV system in Poland". 74 (helmikuu 2003), s. 177–184. DOI: 10.1016/s0306-2619(02)00144-7.
- [17] D. T. Lobera ym. "Operation of TUT Solar PV Power Station Research Plant under Partial Shading Caused by Snow and Buildings". *International Journal of Photoenergy* 2013 (2013), s. 1–13. DOI: 10.1155/2013/837310.