



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

AURINKOSÄHKÖVOIMALAN TASAINEN TUOTANTO SUOMEN OLOSUHTEISSA

Eero Kinnunen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2018
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

KINNUNEN EERO

Aurinkosähkövoimalan tasainen tuotanto Suomen olosuhteissa

Opinnäytetyö 68 sivua
Toukokuu 2018

Opinnäytetyössä selvitettiin erään aurinkosähkövoimalan 125 watin aurinkopaneelin vuodelta 2007 olevan mittausdatan perusteella, minkälaista aurinkosähkövoimalan tasainen tuotanto voisi olla eri vuodenaikoina ja erilaisissa sääolosuhteissa. Tavoitteena oli saada selvitettyä erilaisia kertoimia, joiden avulla voidaan laskea, miten eri kokoiset voimalat tuottavat tasaista tehoa erilaisina päivinä eri vuodenaikoina. Tarve tasaisen tuotannon tuottokertoimien selvittämiseen tuli hankkeista, joissa kehitetään ja tutkitaan tasaisen tuotannon aurinkosähkövoimalan rakentamista aurinkopaneelien ja energiavaraston yhdistelmällä. Lisäksi työssä käytiin läpi aurinkopaneelin toimintaperiaatteita ja esiteltiin aurinkosähköjärjestelmän eri komponentteja.

Työssä saatiin selvitettyä tuottokertoimet eri vuodenaikoina eri olosuhteille. Tuottokerroimella voidaan kertoa aurinkopaneelin nimellisteho, jotta saadaan arvioitua paneelin tasainen tuotanto tietyssä vuodenaikana tietyissä olosuhteissa. Aurinkosähkövoimalan mittausdataa tutkittiin Matlab-ohjelman avulla. Jokaiselta vuodenaikalta valittiin kolme vuorokautta jokaista sääolosuhdetta kohden, eli jokaiselta vuodenaikalta valittiin yhteensä yhdeksän vuorokautta, joiden mittausdataan tuottokertoimen määrittäminen perustuu. Jotta jokaiselle vuodenaikalle ja olosuhteelle saatiin vain yksi kerroin, laskettiin vuodenaikalle ja olosuhteelle valittujen kolmen vuorokauden tuottokertoimesta aina keskiarvo, jonka perusteella sitten määritettiin jokaiselle vuodenaikalle ja olosuhteelle yksi kerroin.

Työssä selvitetty tuottokertoimet kertovat varmasti jo oikean suuruusluokan aurinkosähkövoimalan tasaisesta tehontuotannosta eri vuodenaikoina eri sääolosuhteissa ja kertoimia voidaan hyödyntää, kun haetaan melko karkeita suuntavia arvioita tehontuotosta vuoden aikana. Tarkempaa kertoimien määrittämistä varten voisi olla hyvä määrittää jokaiselle kuukaudelle oma tuottokerroin. Mittausdataa olisi hyvä olla myös useammalta vuodelta, jolloin sitäkin kautta saisi lisää luotettavuutta tuottokertoimiin.

Asiasanat: aurinkosähkövoimala, tuottokerroin, tasainen tuotanto

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Electrical Power Engineering

KINNUNEN EERO

Solar Power Plant's Steady Energy Production in Finland's Weather Conditions

Bachelor's thesis 68 pages
May 2018

The purpose of this thesis was to determine production factors to solar power plant's steady energy production for each season in different weather conditions. Production factors can be used to estimate how different solar power plants produce steady power on different days during different seasons. Determining the production factors were based on the measurement data 125 W solar panel of one solar power plant. The measurement data was from year 2007. The need to determine the production factors came from projects that are developing and studying how to build steady energy production solar power plant with a combination of solar panels and energy storage. In addition, the thesis introduced solar panel's operating principles and the main components of a solar power plant.

The measurement data of the solar power plant was studied using the Matlab program. For each season were chosen three days from each weather condition and determining the production factor was based on the measurement data of those days. To get only one production factor for each season and each weather condition the average production factors of the three selected days from each season and weather condition were then calculated.

The production factors presented in the thesis will surely tell the right magnitude of the solar power plant's steady power production in every season in different weather conditions. Production factors can be utilized looking for rough estimates of the steady power production during the year. For more accurate results it might have been better to determine production factor for each month instead of each season. Also having measurement data from multiple years would have been improving the reliability of the results.

Key words: solar power plant, production factor, steady energy production

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	AURINGOSTA ENERGIAA.....	8
2.1	Aurinko energianlähteenä	8
2.2	Auringon säteily Suomessa.....	8
3	AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT	10
3.1	Aurinkopaneelit	10
3.1.1	Aurinkopaneelien toimintaperiaate	11
3.1.2	Ilmiö aurinkopaneelin toimintaperiaatteen taustalla	12
3.1.3	Eri aurinkopaneelityypit.....	16
3.2	Invertteri.....	19
3.3	Aurinkosähköjärjestelmän suojaus	20
3.4	Kaapelit.....	21
3.5	Maadoitus.....	21
3.6	Akusto.....	22
3.7	Superkondensaattori.....	24
4	AURINKOSÄHKÖVOIMALAN MITTAUSDATAN TUTKIMINEN	26
4.1	Mittausdatan tutkimisen tavoite ja toteutus	26
4.2	Vuodenaikojen määrittäminen	27
5	TUOTTOKERTOIMEN MÄÄRITTÄMINEN KESÄLLÄ	29
5.1	Täysin aurinkoinen päivä.....	29
5.2	Puolipilvinen päivä	32
5.3	Täysin pilvinen päivä.....	35
6	TUOTTOKERTOIMEN MÄÄRITTÄMINEN SYKSYLLÄ	38
6.1	Täysin aurinkoinen päivä.....	38
6.2	Puolipilvinen päivä	40
6.3	Täysin pilvinen päivä.....	43
7	TUOTTOKERTOIMEN MÄÄRITTÄMINEN TALVELLA	46
7.1	Täysin aurinkoinen päivä.....	46
7.2	Puolipilvinen päivä	48
7.3	Täysin pilvinen päivä.....	51
8	TUOTTOKERTOIMEN MÄÄRITTÄMINEN KEVÄÄLLÄ	54
8.1	Täysin aurinkoinen päivä.....	54
8.2	Puolipilvinen päivä	56
8.3	Täysin pilvinen päivä.....	59
9	TUOTTOKERTOIMIEN YHTEENVETO	62
10	KUVITTEELLISEN VOIMALAN MITOITUS.....	64

11 POHDINTA.....	66
LÄHTEET.....	67

LYHENTEET JA TERMIT

E	Energia, Wh
E_a	Akkujärjestelmän kapasiteetti, Wh
k	Tuottokerroin
P	Teho, W
P_N	Aurinkopaneelin nimellisteho, W
W_g	Valenssivyön ja energiavyön välinen energia-aukko

1 JOHDANTO

Aurinkosähkön tuotanto on luonteeltaan todella vaihtelevaa ja aurinkosähkövoimalan tuottama sähköteho riippuu paljon vuodenajasta, vuorokaudenajasta ja myöskin siitä, kuinka pilvinen tai aurinkoinen päivä on. Aurinkosähkön tuotannon yleistyessä on herännyt ajatuksia siitä, miten tällaisesta luonteeltaan vaihtelevan tuotantotehon aurinkosähkövoimalasta saataisiin energiavarastojen avulla tasaisen tuotantotehon voimalaitos. Käytännössä tällainen tasaisen tuotannon aurinkosähköjärjestelmä voisi olla esimerkiksi sellainen, joka tuottaa vakioteholla sähköenergiaa koko vuorokauden ympäri. Yöajan sähköntuotanto voitaisiin hoitaa akkujärjestelmällä ja päivän aikana tapahtuvia hyvinkin nopeita tuotannon vaihteluita pilvisyyden seurauksena, voitaisiin tasoittaa superkondensattoreiden avulla.

Kotitalouksissa tasaisen tuotantotehon aurinkosähkövoimalan suurin hyöty olisi se, että kaikki tuotettu teho pystytään käyttämään omaan kotitalouteen, eikä sitä tarvitse myydä verkkoon. Ainakaan tällä hetkellä aurinkosähkön myyminen sähköverkkoon ei ole niin kannattavaa, kuin kaiken tuotetun aurinkosähkön käyttäminen itse. Vielä suurempi hyöty tasaisen tuotannon aurinkosähkövoimalasta saataisiin kuitenkin suuren kokoluokan aurinkosähkövoimaloissa, joissa on tarkoitus myydä kaikki tuotettu energia sähköverkkoon. Tasaisen tuotantotehon voimalaitos mahdollistaisi voimalan sähköntuotannon ennustamisen paljon tarkemmin tunti tunnilta, sillä tuntitason tuotantoennusteen tekeminen on haastavaa aurinkosähkön osalta etenkin puolipilvisinä päivinä. Aurinko- ja tuulisähkön tuotanto on perinteisesti hyvin riippuvainen sääolosuhteista ja niiden lisääntyminen on lisännyt myös säätövoiman tarvetta. Jos aurinkosähkövoimala saadaan muutettua luonteeltaan tasaisen tuotannon voimalaitokseksi, niin säätövoiman tarve pienenee.

Tässä työssä ei ole vielä tavoitteena tutkia, miten tasaisen tuotannon aurinkosähkövoimala voitaisiin teknisesti toteuttaa, vaan tässä työssä keskitytään tutkimaan erään aurinkosähkövoimalan mittausdatan perusteella, minkälaista aurinkosähkövoimalan tasainen tuotanto voisi olla eri vuodenaikoina ja erilaisissa sääolosuhteissa, eli täysin aurinkoisena päivänä, täysin pilvisenä päivänä ja puolipilvisenä päivänä. Tavoitteena on saada selvitettyä erilaisia kertoimia, joiden avulla voidaan laskea, miten eri kokoiset voimalat tuottavat tasaista tehoa erilaisina päivinä eri vuodenaikoina.

2 AURINGOSTA ENERGIAA

2.1 Aurinko energianlähteenä

Aurinko on lähimpänä maata oleva tähti, joka koostuu pääasiassa vedystä ja heliumista. Auringon ytimessä tapahtuu jatkuva fuusioreaktio, jossa vety muuttuu heliumiksi. Auringon fuusioreaktiossa noin 600 miljoonasta tonnista vetyä syntyy joka sekunti noin 596 miljoonaa tonnia heliumia. Puuttuva neljänmiljoonan tonnin massa m muuttuu energiaksi W_a , ja tämä ilmiö toistuu joka sekunti. (Korpela 2014, 5)

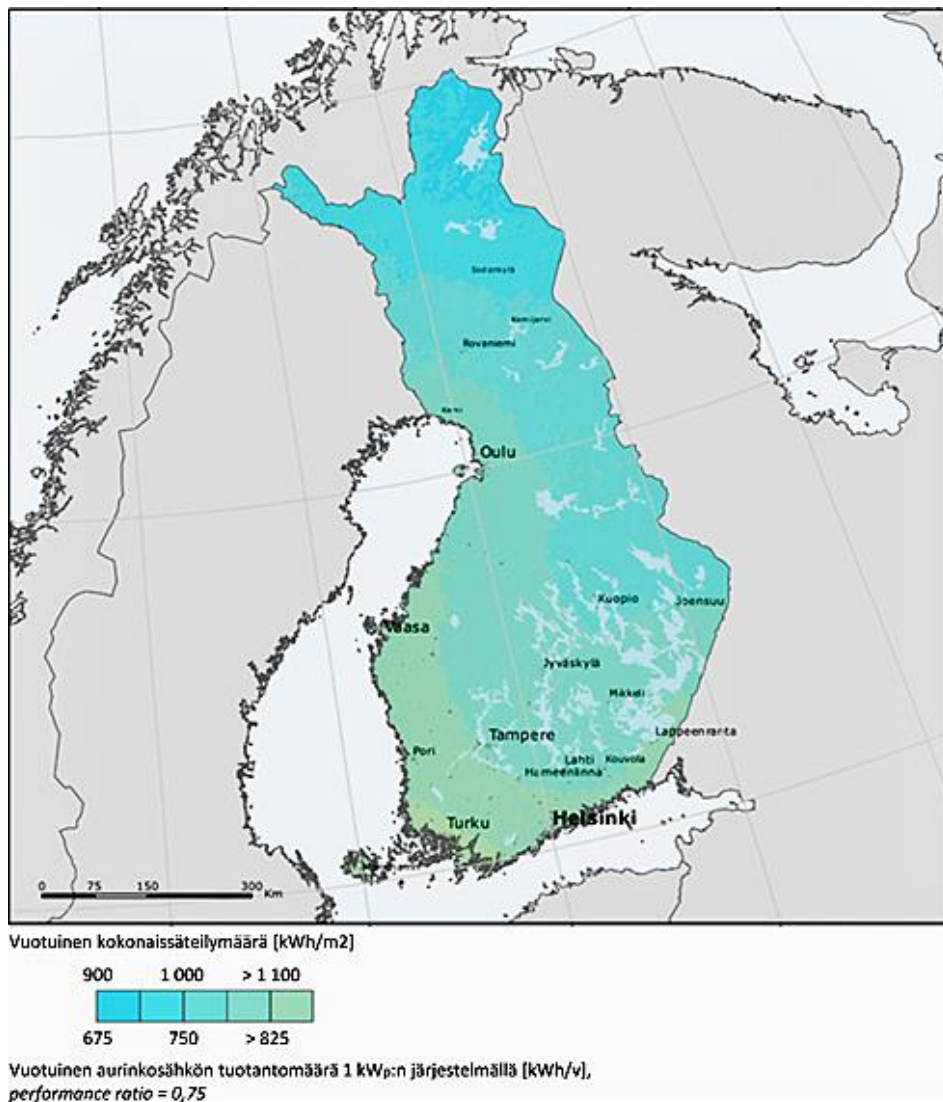
Auringon energia vapautuu suurienergisinä fotoneina. Jos fotonit vapautuisivat suoraan avaruuteen, se olisi tappavan vaarallista gammasäteilyä. Auringon sisäosien plasma kuitenkin jarruttaa fotonien etenemistä, sillä fotonit absorboituvat vähän väliä ympäröivän aineeseen ja emittoituvat sitten sattumanvaraisen suuntaan. Tämä absorboitumisesta ja emittoitumisesta johtuva poukkoilu tekee fotonien matkasta niin pitkän, että siihen kuluu miljoonia vuosia. Auringon tuottama energia vapautuu avaruuteen pääosin valona ja lämpö- eli infrapunasäteilynä. Auringon säteilyn teho maan etäisyydellä on noin 1366 W/m^2 . Tätä lukua kutsutaan aurinkovakioksi. (Ilmatieteen laitos n.d.)

2.2 Auringon säteily Suomessa

Auringon kokonaissäteily muodostuu hajasäteilystä ja auringosta suoraan tulevasta säteilystä. Hajasäteilyksi sanotaan ilmakehän ja pilvien heijastamaa säteilyä, sekä maasta heijastuvaa säteilyä. Hajasäteilyn osuus kokonaissäteilystä on Suomessa merkittävä. Noin puolet vuoden auringon säteilystä on hajasäteilyä. Aurinkosähkön tuotannon kannalta ei ole merkitystä, onko paneelille tuleva säteily suoraa- vai hajasäteilyä. (Motiva 2016)

Etelä-Suomen vuoden kokonaissäteily on samaa luokkaa kuin Pohjois-Saksassa, mutta säteilyn määrä on huomattavasti riippuvaisempi vuodenajasta. Suomessa auringon kokonaissäteily on kesäkuukausina selvästi suurempaa kuin talvikuukausina. Kesän pitkät valoisat päivät mahdollistavat suuret säteilymäärät kesäkuukausina, mutta vastaavasti talven pimeät kuukaudet laskevat säteilymäärät talvella todella pieniksi. Ilmatieteen laitoksen testivuoden mukaan auringon säteilymäärä vaakasuoralle pinnalle Helsingissä on

vuoden aikana noin 980 kWh/m^2 ja Sodankylässä vastaava säteily määrä on 790 kWh/m^2 . Jos aurinkopaneelit suunnataan 45 asteen kulmassa etelään päin, on mahdollista, että hyödynnettävän säteilyn määrä on vuositasolla jopa 20–30 prosenttia suurempi, kuin vaaka-suorassa asennuksessa. Alla olevassa kuvassa (1) näkyy säteily määrät Suomessa optimaalisesti kallistetuille, kiinteästi asennetuille pinoille. Säteilymääriä on mahdollista vielä huomattavasti kasvattaa, jos tehdään reaaliaikaisesti aurinkoa seuraava pinta. Samalla kuitenkin menetetään järjestelmän teknisen yksinkertaisuuden hyöty. (Motiva 2016)



KUVA 1. Vuotuinen auringon säteily määrä optimaalisesti kallistetulle pinnalle Suomessa (Motiva 2016)

3 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT

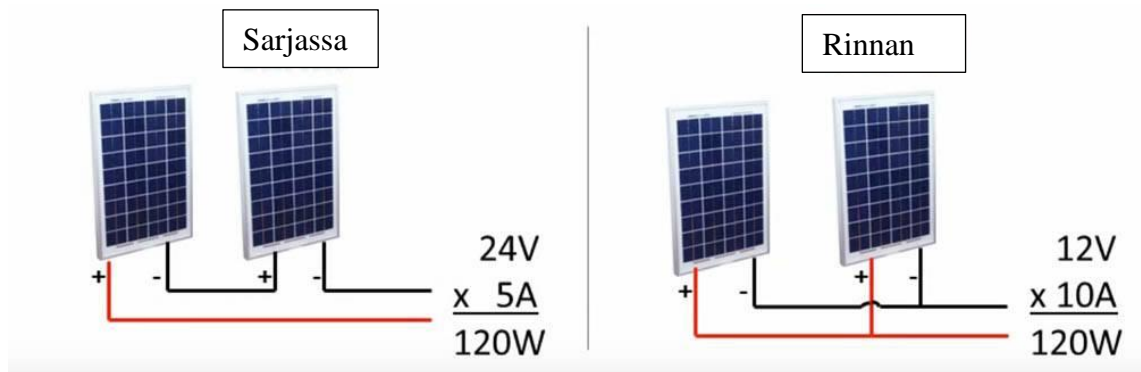
3.1 Aurinkopaneelit

Aurinkopaneeli on aurinkosähköjärjestelmän näkyvin ja merkittävin komponentti. Aurinkopaneelit tuottavat sähköä auringon säteilystä. Mitä suurempi on auringon säteilyintensiteetti, sitä enemmän aurinkopaneeli tuottaa sähköä. Aurinkopaneelit tuottavat kuitenkin vähän sähköä myös silloin, kun ne ovat varjossa tai sää on pilvinen. (Boxwell 2014, 25)

Useimmat aurinkopaneelit on tehty yksittäisistä aurinkokennoista, jotka on kytketty sarjaan. Yhden kennon jännite on tyypillisesti vain noin 0,5 voltin luokkaa, joten kennoja on kytkettävä sarjaan, jotta aurinkopaneelin jännite saadaan nousemaan suuremmaksi ja helpommin hyödynnettäväksi. Useimmat aurinkopaneelit ovat nimellisjännitteeltään 12 voltia ja tämä mahdollistaa sen, että yksittäinen paneeli voi ladata 12 voltin akkua. (Boxwell 2014, 25)

Aurinkopaneeleita voidaan kytkeä toisiinsa. Paneelit voidaan liittää toisiinsa joko sarjaan- tai rinnankytkennällä. Jos paneelit kytketään sarjaan, paneeliryhmän jännite kasvaa. Tyypillisesti jännite voidaan nostaa pienemmissä järjestelmissä joko 24 volttiin tai 48 volttiin. Verkkoon kytketyssä järjestelmissä jännite voidaan nostaa jopa aina 1000 volttiin asti. Paneelien kytkeminen rinnan mahdollistaa sen, että paneeliryhmän tehoa voidaan kasvattaa ilman, että paneeliryhmän jännite nousee, sillä rinnankytkennässä järjestelmän kokonaisvirta nousee ja jännite säilyy muuttumattomana. Kun paneeleita kytketään toisiinsa, niin järjestelmän kokonaisteho nousee aina, riippumatta siitä, kytketäänkö paneelit sarjaan vai rinnan. (Boxwell 2014, 25)

Kuvassa (2) on yksinkertaisen esimerkin avulla havainnollistettu, miten aurinkopaneelin sarjaan- ja rinnankytkentä vaikuttaa paneeliryhmän tehoon, jännitteeseen ja virtaan. Ohmin lain mukaisesti, kun paneelit ovat sarjassa, ryhmän jännite ja teho kasvaa, mutta virta pysyy vakiona. Rinnankytkennässä taas ryhmän virta ja teho kasvaa, mutta jännite pysyy vakiona.



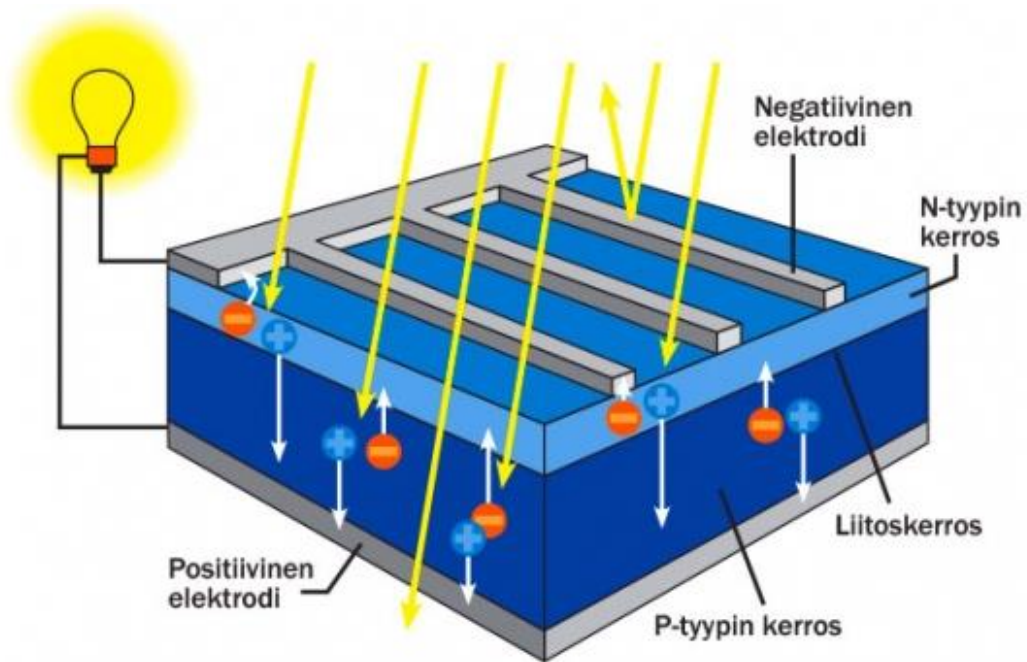
KUVA 1. Aurinkopaneelien kytkentä sarjaan ja rinnan (mozaw.com 2017)

Kuvan tekstit käännetty alkuperäisen kuvan englanninkielisistä teksteistä.

3.1.1 Aurinkopaneelien toimintaperiaate

Pn-liitokseen perustuvat puolijohdeaurinkopaneelit ovat tällä hetkellä yleisimpiä markkinoilla olevia aurinkopaneeleja, joten tässä luvussa keskitytään vain puolijohdeaurinkokennon toiminnan kuvaamiseen.

Aurinkokenno muuttaa auringon säteilyn suoraan sähköenergiaksi. Lyhyesti ja yksinkertaisesti esitettynä aurinkokenno toimii siten, että auringon säteilyn, joka koostuu fotonista, osuessa paneelin pintaan fotonien energia virittää aurinkokennon puolijohdemateriaalin elektroneja, jolloin muodostuu elektroni-aukkopareja. Aurinkokenno koostuu kahdesta melkein samanlaisesta puolijohdemateriaalista, näitä kutsutaan p- ja n-materiaaleiksi, jotka kuitenkin eroavat hieman toisistaan atomien varausjakauman suhteen. Tämän pienen eron ansiosta kennon sisälle syntyy sähkökenttä. Sähkökenttä kuljettaa fotonien energian irrottamat elektronit kennon negatiiviselle elektrodille ja aukot positiiviselle elektrodille. Kun kennon elektrodien välille kytketään kuorma, syntyy virtapiiri, jonka läpi elektronit kulkevat ja näin syntyy sähkövirtaa. Tämä yllä kuvailtu tapahtuma on pyritty havainnollistamaan alla olevassa kuvassa (3). (Aarnio n.d.; Ahjo energia n.d.)



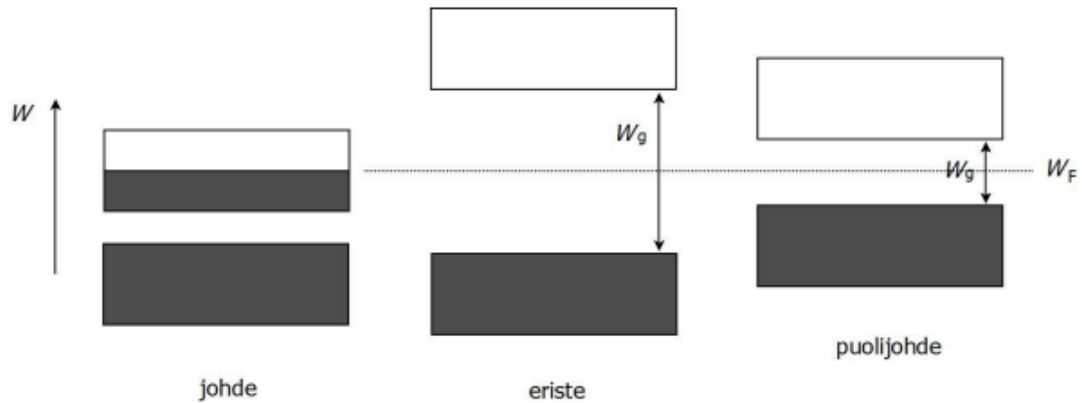
KUVA 3. Aurinkokennon toiminta (Ahjo energia n.d.)

3.1.2 Ilmiö aurinkopaneelin toimintaperiaatteen taustalla

Seuraavaksi pureudutaan vielä hieman syvemmin siihen, mitä aurinkokennon sisällä tapahtuu ja mihin aikaisemmassa luvussa kuvattu aurinkokennon toiminta tarkemmin perustuu. Kaikkien pn-liitokseen perustuvien aurinkokennojen toiminta on pääosin sama, joten vaikka tässä luvussa aurinkopaneelien toimintaa käsitellään jonkun verran kiteisestä piistä valmistetun aurinkokennon avulla, niin tässä luvussa voidaan saada käsitys puolijohdeaurinkokennojen toimintaperiaatteesta yleisesti.

Vapaassa tilassa olevan elektronin energia ei ole sidottu. Vapaassa tilassa olevan atomin elektroneilla on tietty määrä sallittuja energiatiloja. Materiaalin kiderakenteessa atomit taas ovat niin lähekkäin, että ne vuorovaikuttavat keskenään. Tällöin elektronin sallitut energiatilat levittäytyvät kiderakenteessa sallituiksi energiavöiksi. Energiavyö koostuu siis lähekkäisistä ja osittain päällekkäisistä elektronin sallituista energiatiloista. Eristeistä ja puolijohdeista löytyy alhaisissa lämpötiloissa vain täysiä ja tyhjiä energiavöitä. Hyvin sähköä johtavista kiinteistä aineista taas löytyy aina energiavyö, joka on osittain elektronien miehittämiä. Alla olevassa kuvassa (4) on esitetty sähkönjohtavuuden kannalta oleellimmat energiavyöt johteelle, eristeelle ja puolijohdeelle. Ylintä täysin miehitettyä ener-

giavyötä kutsutaan valenssivyöksi ja alinta tyhjää energiavyötä kutsutaan johtavuusvyöksi. Kuvassa (4) näkyvällä suureella W_g kuvataan valenssivyön ja energiavyön välistä energia-aukkoa. (Korpela 2016, 2-4)

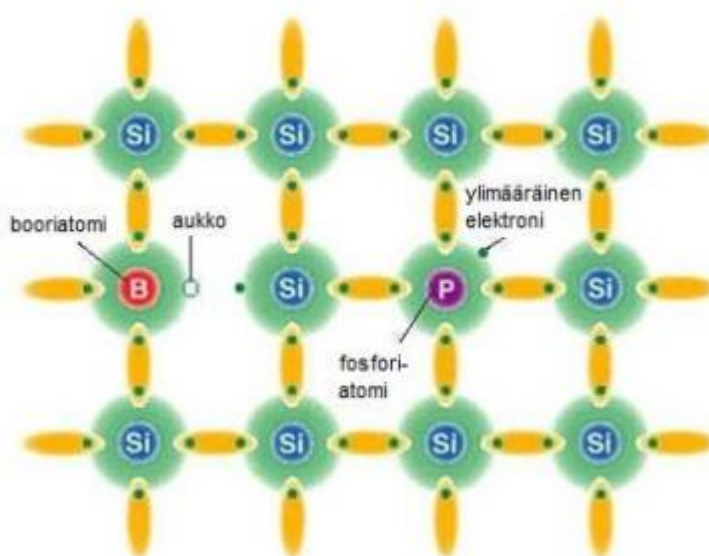


KUVA 4. Sähkönjohtavuuden kannalta oleelliset energiavyöt johteella, eristeellä ja puolijohteella (Korpela 2016, 3)

Eriste ja puolijohde käyttäytyvät absoluuttisessa nollassa sähköisesti samalla tavalla. Molempien valenssivyö on täynnä ja johtavuusvyö tyhjä. Kummassakaan ei ole vapaasti liikkuvia elektroneja ja näin ollen kumpikaan ei myöskään johda sähköä. Lämpötilan noustessa osalla puolijohteen elektroneista kuitenkin saattaa olla riittävästi energiaa siihen, että elektroni pystyy siirtymään johtavuusvyölle. Eli puolijohde johtaa sähköä jonkin verran huoneenlämmössä. Eristeellä kyseistä ilmiötä ei huoneenlämmössä tapahdu, sillä energia-aukko W_g on eristeellä selvästi suurempi kuin puolijohteella ja näin ollen myös elektronin siirtymiseen johtavuusvyölle tarvitaan eristeessä huomattavasti suurempi energia. Juuri tästä syystä eristeestä ei voida tehdä aurinkokennoa, sillä fotonin energia on aivan liian pieni elektronien siirtämiseen johtavuusvyölle. Tietyissä puolijohdeissa taas energia-aukko on suuruusluokaltaan sopiva, minkä ansiosta puolijohdeissa voi tapahtua fotonien aiheuttamaa elektronien siirtymistä johtavuusvyölle. Myös johteissa tapahtuu valosähköistä ilmiötä, jossa fotonit luovuttavat energiaansa aineen elektroneille, mutta tällä ei ole juurikaan merkitystä aineen sähköisen käyttäytymisen kannalta, sillä johteissa on jo ennestään suuria määriä vapaita varauksenkuljettajia. Puolijohdeissa auringon säteily saa aikaan merkittäviä muutoksia aineen sähköisen käyttäytymisen kannalta ja tämän vuoksi puolijohdeita käytetään yleisesti aurinkokennojen materiaalina. (Korpela 2014, 28-29)

Aurinkokennoa ei ole kuitenkaan järkevää valmistaa puhtaasta puolijohdeesta. Vaikka aurinkonsäteily kyllä synnyttäisi materiaaliin vapaita varauksenkuljettajia, atomien välisistä sidoksista irronnet elektronin palaisivat kuitenkin takaisin sidoksiin, sillä varauksiin ei kohdistu nettovoimaa. Tätä johtavuusvyölle nousseiden elektronien putoamista takaisin valenssivyölle kutsutaan rekombinaatioksi. Aurinkokennon rakenteen on siis oltava sellainen, että vapautuneisiin varauksiin kohdistuu rekombinaatiota ehkäisevä nettovoima. Puolijohdeaurinkokennoissa tällainen rekombinaatiota ehkäisevä nettovoima saadaan kohdistettua varaukseen sähkökentällä. Tämä sähkökenttä saadaan aikaiseksi tietyllä aurinkokennon rakenteella, joka perustuu puolijohdeiden seostamiseen. (Korpela 2016, 9-10)

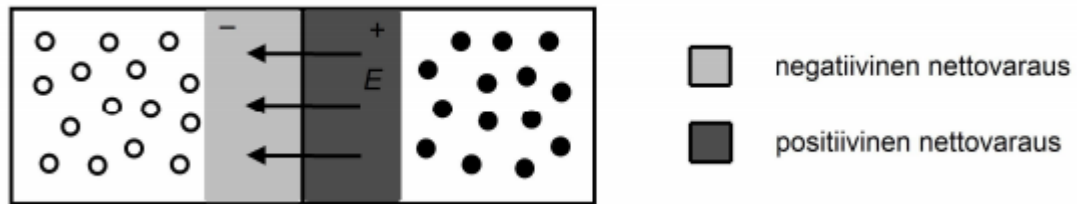
Kuvasta (5) nähdään, minkälainen on pn-liitoksen perustuva seostetusta piistä valmistetun aurinkokennon kiderakenne. N-tyyppin seostettu pii on fosforilla (P) seostettua piitä. Fosforin uloimman elektronikuoren neljä elektronia osallistuvat piin kiderakenteessa atomien välisiin sidoksiin. Kiderakenteeseen jää kuitenkin yksi ylimääräinen elektroni, joka on kiinni fosforiatomissa. P-tyyppin seostettu pii on taas boorilla seostettua piitä. Boorin uloimman elektronikuoren kaikki kolme elektronia osallistuvat piin kiderakenteessa atomien välisiin sidoksiin. Siihen sidokseen, johon booriatomi liittyy, jää kuitenkin yhden elektronin vaje, koska booriatomin uloimmalla elektronikuorella oli vain kolme elektronia. Tätä syntynyttä vajetta kutsutaan aukoksi. Toisin kuin kuvassa (5), jossa kiderakenteessa on sekaisin n- ja p-tyyppin seosatomia, niin käytännössä n-tyyppin seostettu pii on seostettu pelkällä fosforilla, eli pii-atomi on kiderakenteessa korvattu fosforilla. Vastavasti p-tyyppin seostettu pii on seostettu pelkällä boorilla. (Korpela 2016, 11)



KUVA 5. Periaatekuva seostetun piin kiderakenteesta (Korpela 2014, 31)

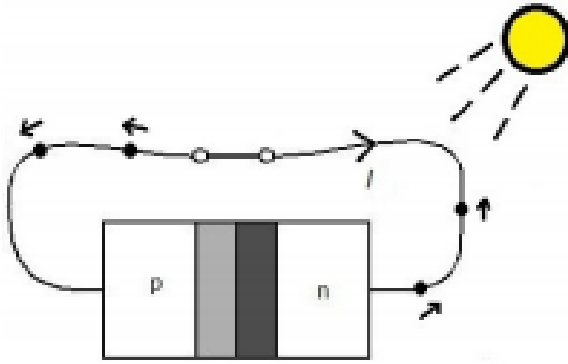
Huoneenlämpötilassa n-tyyppin puolijohteen kiderakenteessa on vapaasti liikkuvia elektroneja, joiden energia osuu johtavuusvyölle. P-tyyppin puolijohteen kiderakenteessa taas on vapaita elektronitiloja eli aukkoja, joihin viereiset valenssivyön elektronit voivat siirtyä. Eli n-tyyppin puolijohteessa on elektroneja johtavuusvyöllä ja p-tyyppin puolijohteessa on aukkoja valenssivyöllä. Tästä voidaan huomata, että puolijohteiden seostaminen tekee varausten liikkumisen kiderakenteessa mahdolliseksi. (Korpela 2016, 12)

Kun p- ja n-tyyppin puolijohdet viedään yhteen, syntyy pn-liitos. Pn-liitoksen väliin syntyy tyhjennysalue, jossa on sekä positiivinen, että negatiivinen nettovaraus. Tyhjennysalue syntyy siitä, kun varauksenkuljettajakonsentraatioerojen seurauksena n-puolen johtavuuselektronit täyttävät p-puolen aukkoja. Tästä syntyy aiemmin mainittu nettovarausero, kuten myös kuvassa (6) on esitetty. Alun perin n- ja p-tyyppin puolijohdet ovat nettovaraukseltaan neutraaleja. (Korpela 2016, 13-14)



KUVA 6. Sähkökentän muodostuminen pn-liitoksen tyhjennysalueeseen (Korpela 2014, 39)

Tyhjennysalue on siis siihen syntyvän sähkökentän ansiosta se rakenne, joka mahdollistaa sen, että fotonien vapauttamat varauksenkuljettajat saadaan hyödynnettyä ulkoisessa piirissä sähkötehona. Kuten kuvasta (7) näkyy, tyhjennysalueen sähkökenttä siirtää fotonien vapauttamat elektronit n-puolelle, josta ne siirtyvät ulkoisen piirin kautta p-puolelle, jossa ne edelleen rekombinoituvat aukkojen kanssa. Eli pn-liitoksen sisällä elektronit siirtyvät p-puolelta n-puolelle, mutta ulkoista piiriä pitkin elektronit siirtyvät n-puolelta p-puolelle. Sähkövirran suunta on historiallisen määritelmänsä vuoksi aina elektronien suunnalle vastainen. (Korpela 2016, 16-17)

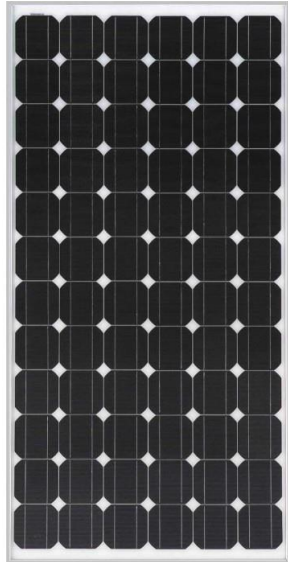


KUVA 7. Elektronien siirtyminen pn-liitoksessa (Korpela 2014, 39)

3.1.3 Eri aurinkopaneelityypit

Markkinoilla on nykyään saatavilla monenlaisia aurinkopaneelityyppejä. Jo pelkästään piipaneeleja on kolmea eri tyyppiä, jotka ovat yksikidepaneeli, monikidepaneeli ja amorfisesta piistä tehty paneeli. Lisäksi on vielä muita perinteiseen pn-liitokseen perustuvia kannemateriaaleja. Sitten on vielä muihin tekniikoihin perustuvia kennotyyppejä, kuten väriainekennot, orgaaniset kennot ja moniliitosohutkalvokennot. Tässä työssä esitellään ja vertaillaan kuitenkin vain kolmea eri tyyppistä piiaurinkopaneelia, ne ovat yksikide-, monikide-, ja ohutkalvopaneeli. Näistä paneelityypeistä yksi- ja monikidepaneelit ovat huomattavasti yleisempiä kuin ohutkalvopaneelit ja monikidepaneelit ovat taas vielä hieman yleisempiä kuin yksikidepaneelit. Yksikidepaneeli tehdään yksikiteisestä piistä ja monikidekenno tehdään yleensä minikiteisestä piistä.

Yksikidepaneeli on hyötysuhteeltaan paras piiaurinkopaneeli, kun tarkastellaan tehon tuottoa suhteessa paneelin pinta-alaan. Yksikidepaneelin valmistaminen on kuitenkin kalliimpaa kuin monikidepaneelin ja monikidepaneelinkin hyötysuhde saadaan melko lähelle yksikidepaneelin hyötysuhdetta. Yksikidekenno tehdään yksittäisestä piikiteestä. Nämä kiteet ovat yleensä soikion muotoisia ja tämä antaa yksikidepaneeleille tunnistettavan ulkonäön, jossa piikennojen kulmat on niin sanotusti pyöristetty. Alla oleva kuva (8) esittää tyypillistä yksikiteistä aurinkopaneelia. (Solar Power World 2015)



KUVA 8. Tyypillinen yksikiteinen aurinkopaneeli (homeof12volt.com n.d.)

Monikiteinen aurinkokenno tehdään valamalla sulasta piistä. Tämän valmistusmenetelmän ansiosta piin kiderakenne muodostuu epätäydelliseksi, mikä luo kiderakenteeseen rajoja. Tästä syntyy monikiteiselle piille tyypillinen rakeinen ulkonäkö, missä jalokivityyppinen kuvio korostaa kiteen rajoja. Tämä on nähtävissä hyvin myös kuvassa (9). Näiden kiderakenteen rajojen vuoksi monikiteinen piikkenno ei ole hyötysuhteeltaan niin hyvä kuin yksikiteinen piikkenno. Monikidepaneelin valmistusprosessi käyttää kuitenkin vähemmän energiaa ja materiaaleja kuin yksikidepaneelin valmistusprosessi. Tämän takia on usein kannattavampaa käyttää monikidepaneelia kuin yksikidepaneelia, vaikka yksikidepaneeli onkin hyötysuhteeltaan parempi. (Solar Power World 2015)



KUVA 9. Tyypillinen monikiteinen aurinkopaneeli (wattsun.in n.d.)

Ohutkalvopaneelit ovat hyötysuhteeltaan selvästi huonompia kuin yksikide- ja monikidepaneelit. Ohutkalvopaneelin keveyden ja ohuuden ansiosta se on kuitenkin hyvä vaihtoehto joissakin sovelluksissa, joissa tehontarve on pieni tai järjestelmän on oltava kevyt ja siirrettävä. Hyvä esimerkki tällaisesta ohutkalvopaneelin käyttökohteesta voisi olla vaikka asuntovaunu, jonka katolle ei ole mahdollista rakentaa telineitä perinteisille aurinkopaneeleille, mutta katolle voidaan hyvin liimata ohutkalvopaneelia. Jos pinta-alaa on käytettävissä paljon, myös ohutkalvopaneelijärjestelmästä on mahdollista tehdä melko isotehoinen. Hyvä esimerkki tällaisesta ratkaisusta on suoraan talon peltikattoon tehtaalla asennetut ohutkalvopaneelit. Ohutkalvopaneelin voi valmistaa monesta eri materiaalista. Yleisimmät vaihtoehdot ovat: amorfinen pii (a-Si), kadmiumtelluridi (CdTe) ja kupari-indium-gallium-selenidi (CIS / CIGS). Alla olevassa kuvassa (10) on esimerkki peltikattoon asennetusta ohutkalvopaneelistä. (Solar Power World 2015)



KUVA 10. Peltikattoon asennettua ohutkalvopaneelia (Rightway Roofing n.d.)

3.2 Invertteri

Invertterin, eli vaihtosuuntaajan tehtävä on muuttaa aurinkopaneelien tuottama tasa-sähkö vaihtosähköksi. Invertterin käyttö mahdollistaa sen, että aurinkopaneelien tuottama sähköä voidaan käyttää vaihtosähkölaitteissa. Invertterit mahdollistavat myös aurinkosähkövoimaloiden kytkemisen osaksi sähköverkkoa, mikä onkin ehdoton edellytys varsinkin isompien aurinkosähkövoimaloiden toiminnalle, sillä voimalan tuottama teho, joka ei mene suoraan kulutuslaitteille, voidaan syöttää valtakunnan sähköverkkoon. Sähköverkkoon kytkettyjen aurinkosähkövoimaloiden inverttereitä kutsutaan usein verkkoinverttereiksi. Inverttereissä myös on usein sisäänrakennettuna maksimitehopisteen seurantajärjestelmä. Aurinkopaneeli ei automaattisesti toimi maksimitehopisteessään, vaan sitä tulee muuttuvissa sääolosuhteissa ohjata niin, että toimintapiste on jatkuvasti mahdollisimman lähellä optimaalista.

Sähköverkkoon kytkettävien verkkoinverttereiden tulee täyttää Suomessa standardi SFS-EN-50160, sillä aurinkosähköjärjestelmän verkkoon syöttämän sähkön ja järjestelmän osien tulee olla tämän standardin mukaisia. Verkkoinvertterin täytyy toimia synkronissa

sähköverkon kanssa. Invertterin muodostaman vaihtojännitteen sinikäyrän on oltava laadukas ja täysin samanlainen sähköverkon jännitteen aaltomuodon kanssa. (ST-kortti 55.33, 2013, 4; Boxwell 2014, 78)

Inverttereitä on olemassa sekä yksivaiheisia, että kolmivaiheisia. Yksivaiheisia invertteireitä käytetään pääasiassa pienimmissä aurinkosähköjärjestelmissä. Yli $3,7\text{kW}_p$:n järjestelmät tulee aina kytkeä kolmivaiheisesti. Kolmivaiheinen järjestelmä voidaan toteuttaa myös kolmella yksivaiheisella invertterillä, mutta tämä on harvoin järkevää. Teholtaan 100kW_p sitä suuremman kokoluokan aurinkosähkövoimaloihin, on usein järkevämpää ja halvempaa hankkia useampi hieman pienempi kolmivaiheinen invertteri, kuin yksi iso kolmivaiheinen invertteri.

Pienissä aurinkosähköjärjestelmissä invertterin asennuspaikalla ei ole kovin suurta merkitystä. Invertteri voidaan asentaa aurinkopaneelien läheisyyteen ulkotiloihin, lähelle pääkeskusta tai näiden välille muihin tiloihin. Suurissa järjestelmissä on usein järkevää sijoittaa invertterit paneelien läheisyyteen, sillä näin saadaan pienennettyä järjestelmän kaapelikustannuksia. Invertteri on myös pystyttävä erottamaan luotettavasti vaihto- ja tasasähköosasta huolto- ja vikatilanteiden varalta. (ST-kortti 55.33, 2013, 3)

3.3 Aurinkosähköjärjestelmän suojaus

Suojausta suunniteltaessa aurinkosähköjärjestelmää pidetään kuormituksena ja sähköverkkoa teholähteenä. Aurinkopaneelit eivät pysty tuottamaan suurta vikavirtaa. Suuria vikavirtoja voi kuitenkin syntyä ulkoisista tekijöistä, kuten salamoista. (ST-kortti 55.33, 2013, 4)

Aurinkosähköjärjestelmän tasasähköosalla suositellaan käytettäväksi suojausta luokan II laitteilla. Paneeliketjukaapeleista ja paneelistokaapeleista voidaan jättää ylikuormitussuojaus pois, jos kaapelin jatkuva kuormitettavuus on vähintään 1,25 kertaa oikosulkuvirta standardisoiduissa testausolosuhteissa. Myös tasajännitepääkaapelista voidaan jättää ylikuormitussuojaus pois, jos kaapelin jatkuva kuormitettavuus on 1,25 kertaa oikosulkuvirta standardoiduissa testiolosuhteissa. Aurinkopaneelien suojaus määritellään valmistajien ohjeissa. (ST-kortti 55.33, 2013, 4)

Vaihtosähköosan suojausta suunniteltaessa noudatetaan rakennuksen jakeluverkon yleisiä, standardin SFS 6000 mukaisia määräyksiä. Vaihtosuuntaajan rakennuksen sähkökeskukseen kytkävä kaapeli on liitettävä kulutuslaitteita syötön automaattisella poiskytkennällä suojaavan laitteen syöttöpuolelle. Järjestelmässä on oltava poiskytkennän suorittava B-tyyppiä oleva vikavirtasuojaja standardin EN 62423 mukaisesti, jos järjestelmä sisältää aurinkosähkösyötön ilman ainakin yksinkertaista erotusta tasa- ja vaihtosähköosien välillä. B-tyyppin vikavirtasuojaa ei vaadita, jos vaihtosuuntaaja ei pysty syöttämään tasasähkövikavirtoja järjestelmään. Järjestelmän syöttökaapeli on suojattava oikosululta vaihtosähköosan alkupisteeseen sijoitetulla ylivirtasuojalla. (ST-kortti 55.33, 2013, 4)

3.4 Kaapelit

Aurinkosähköjärjestelmän tasasähköpuolen kaapelin koko valitaan paneeliketjun oikosulkuvirran perusteella. Kaapelin kuormitettavuuden eli virrankeston on oltava suurempi kuin paneeliketjun oikosulkuvirta. Jos kaapelin jatkuva kuormitettavuus on vähintään 1,25 kertaa paneeliketjun oikosulkuvirta, kaapeli ei tarvitse ylikuormitussuojausta. (ST-kortti 55.33, 2013, 3-4)

Tasasähköosan kaapelit on valittava siten, että maasulkujen ja oikosulkujen riskit ovat mahdollisimman pieniä. Tämä toteutetaan käyttämällä metallivaipattomia yksijohtimisia kaapeleita, tai eristettyjä johtimia asennettuna erikseen eristeaineisiin asennusputkiin tai johtokanaviin. Kaapeleita ei saa asentaa suoraan katon pintaan. (SFS 6000-7-712, 16)

Vaihtosähköosan kaapelointi voidaan toteuttaa tavallisella vaihtosähköasennuksiin tarkoitettulla asennuskaapelilla. Kaapelin tyyppi ja koko valitaan asennusolosuhteiden ja järjestelmän virran mukaan.

3.5 Maadoitus

Jos potentiaalintasaus on tarpeellinen, aurinkosähköpaneelien metalliset tukirakenteet ja metalliset johtotiet on liitettävä potentiaalintasaukseen. Potentiaalintasausjohdin on kytkettävä soveltuvaan maadoitusliittimeen tai -kiskoon. Jos nämä rakenteet ovat alumiinia,

kaikkien metalliosien liitokset on tehtävä käyttäen asianmukaisia kytkentätarvikkeita. Potentialintasaus ehkäisee myös staattisen sähkön purkauksia. (SFS 6000-7-712, 21)

Jotkut aurinkosähköpaneelitekniikat vaativat jännitteisten osien liittämistä maahan toiminnallisella potentialintasauksella. Jännitteisten osien liittäminen toiminnallisella potentialintasauksella maahan tehoyksikön tasasähköpuolella on sallittu, jos tasasähkö- ja vaihtosähköpuolen välillä on vähintään yksinkertainen erotus käyttäen muuntajaa, jossa on sähköisesti erilliset ensiö- ja toisiokäämit. Muuntaja voi olla vaihtosuuntaajan sisäinen tai ulkoinen. Vaihtosuuntaajaan kytkettyjä muuntajan käämejä ei saa maadoittaa ja vaihtosuuntaajan on sovellettava kyseiseen käyttöön. Toiminnallinen potentialintasaus on tehtävä vaihtosuuntaajan tasasähköosan yhdessä pisteessä. Potentialintasauskohta on sijoitettava erotuslaitteen ja vaihtosuuntaajan tasasähköosan liitännän välille. Toiminnallisten potentialintasausjohtimien (paljaiden tai eristettyjen) minimipoikkipinta on 4 mm² kuparia tai vastaavaa. (SFS 6000-7-712, 21-22)

Invertterin jälkeisessä vaihtosähköosassa pätee maadoituksen suhteen samat ohjeet ja vaatimukset kuin sähköasennuksissa yleisestikin.

3.6 Akusto

Aurinkosähköjärjestelmien yleistymisen suurimpana hidasteena on ollut akkujen hidas kehitys, sillä varsinkin isot akkujärjestelmät ovat kalliita ja tilaa vieviä. Tosin esimerkiksi Saksassa akut eivät hidastaneet aurinkosähkön yleistymistä lainkaan, sillä Saksassa oli käytössä energiatuki, joka takasi aurinkosähkötuottajalle hyvän hinnan verkkoon myydyistä sähköenergiasta. Akkujärjestelmät kehittyvät pikkuhiljaa ja uusia ratkaisuja etsitään koko ajan, mutta vielä akkuteknologiassa ei ole tehty mitään mullistavaa läpimurtoa, joka toisi akkujen hintoja huomattavasti alaspäin.

Aurinkosähköjärjestelmän akuston täytyy kestää useasti toistuva purkautuminen ja latautuminen, sekä epäsäännöllinen täyteen latautuminen. Akun purkautumisesta ja latautumisesta käytetään nimitystä sykli. Syklillä tarkoitetaan siis yhtä käyttökierrosta, jossa akku puretaan ja ladataan sitten täyteen. Akun tuottamien syklien määrä mitataan yleensä siitä, kun sen kokonaiskäyttöästä on käytetty 80%. Aurinkosähköjärjestelmän akuksi soveltuu

kuitenkin useampi erilaisella tekniikalla toimiva akkutyyppejä. Järjestelmissä käytettyjä akkutyyppejä ovat: lyijyhappoakku, litiumioniakku ja virtausakku. (Solar Power World 2017)

Lyijyhappoakkujen hinnat ovat huomattavasti alhaisemmat kuin litiumioniakkujen, joka on tällä hetkellä yleisin käytössä oleva akkutyyppejä. Lyijyhappoakkuja on aikaisemmin käytetty pääasiassa erilaisissa varasähköjärjestelmissä tai kaksoisjärjestelmissä, mutta ei syväpurkausakkuina. Uudet AGM-syväpurkausakut ovat parantaneet suorituskykyään ja kokonaistehoaan, joten ne ovat nykyään myös hyvä valinta aurinkosähköjärjestelmän akuksi. (Solar Power World 2017)

Litiumioniakut ovat tällä hetkellä yksi yleisimmistä sähkönvarastointitekniikoista soveluksesta riippumatta. Litiumioniakku on jonkun verran lyijyhappoakkua kalliimpi. Yksi litiumioniakun kustannuksia nostava tekijä on se, että akunhallintajärjestelmän täytyy seurata akun kunkin kennon jännitettä ja lämpötilaa liiallisen latautumisen ja purkautumisen estämiseksi. Litiumioniakku kestää tyypillisesti enemmän syklejä elinkaarensa aikana, kuin lyijyhappoakku. Tämä tekee siitä hyvän vaihtoehdon sellaisiin sovelluksiin, missä syklit toistuvat usein, kuten esimerkiksi taajuus- tai jännitesäätöön. Litiumioniakkujen suurin etu aurinkosähkökäytössä on kuitenkin niiden hyvä hyötysuhde lataus- ja purkaustilanteissa, sekä pienet häviöt tyhjäkäyntitilanteessa. Litiumioniakut ovat yleensä myös kevyempiä kuin lyijyhappoakut. (Solar Power World 2017)

Virtausakku on kehittyvä akkutyyppejä, joka on tällä hetkellä vielä melko kallis ja paljon tilaa vievä. Toisin kuin esimerkiksi litiumioniakut, jotka varastoivat energiaa kiinteässä elektrodimateriaalissa, virtausakut varastoivat energiaa elektrolyyttinesteisiin. Useimmat virtausakut käyttävät kahta elektrolyyttinestettä. Toinen neste on negatiivisesti varattu katodi ja toinen neste on positiivisesti varattu anodi. Katodi ja anodi erotetaan kalvolla toisistaan kahdeksi säiliöksi. Virtausakkujen monimutkaisuus vaatii usein lisälaitteita, kuten pumput, anturit, ja ohjauksyksiköt. Nämä lisälaitteet vievät tilaa ja maksavat. Virtausakun kehittäjät sanovat, että syklien määrällä ei ole vaikutusta akun elinkaareen. Kehittäjät sanovat myös, että virtausakku voidaan ladata ja purkaa kokonaan, eikä se vaikuta akun elinkaareen. Yksi virtausakkujen etu on myös se, että akun kapasiteettia voidaan lisätä helposti lisäämällä vain elektrolyytin määrää. (Solar Power World 2017)

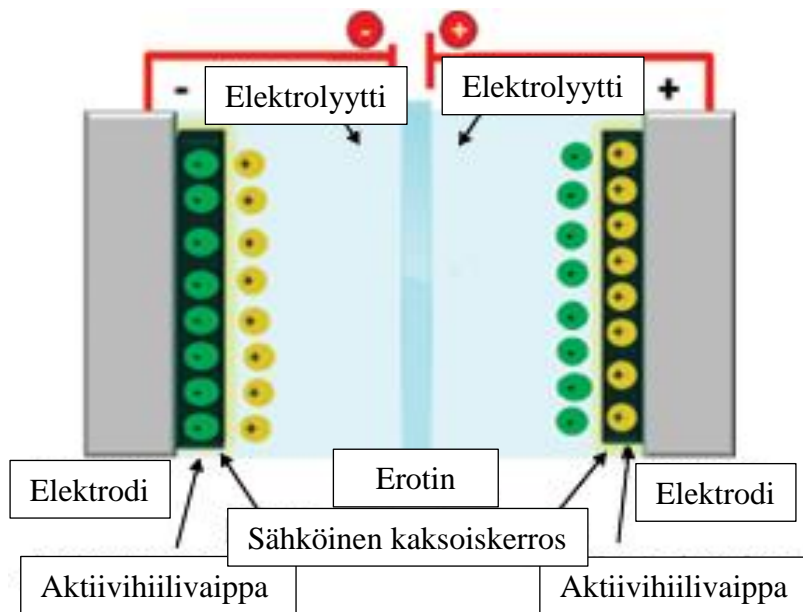
3.7 Superkondensaattori

Toisin kuin akuissa, joissa energia on varastoituneena kemiallisessa muodossa, kondensaattorissa energia on varastoituneena sähköenergiana sähkökenttään. Kondensaattorissa ei siis tarvita energian muunnosta toiseen muotoon, vaan sähköenergia varastoituu sähköenergiana. Tämän vuoksi kondensaattori on toiminnallisesti nopeampi kuin akku, jossa kemialliset reaktiot hidastavat akun toimintaa. Eli kondensaattori pystyy purkautumaan ja latautumaan akkua nopeammin. (Machine Design 2015)

Superkondensaattori on kondensaattori, jonka kapasitanssi on todella suuri verrattuna perinteisiin sähköstaattisiin kondensaattoreihin ja elektrolyyttikondensaattoreihin. Sähköstaattisilla kondensaattoreilla kapasitanssi voi olla jotain pikofaradien ja alhaisten mikrofaradien välillä ja elektrolyyttikondensaattoreissa kapasitanssin suuruusluokka on aina mikrofaradeja, kun taas superkondensaattorin kapasitanssin suuruusluokka on faradeja. Superkondensaattoria käytetään energian varastointiin sovelluksissa, joissa on tiheästi lyhytkestoisia lataus- ja purkausjaksoja suurella virralla. Virrat voivat olla suuria, koska kondensaattorissa ei tapahdu energiamuunnosta. (Battery University 2017)

General Electricin insinöörit tutkivat ensimmäistä kertaa superkondensaattorin varhaista versiota jo vuonna 1957, mutta siitä ei silloin vielä syntynyt mitään kaupallisia versioita. Ensimmäisen kaupallisen version superkondensaattoreista toi markkinoille vuonna 1978 NEC Corporation -niminen yhtiö. Yhtiö markkinoi tuotetta tietokoneen muistin varmistukseen. Lopullisesti tuote levisi yleisempään käyttöön vasta 1990-luvulla, kun materiaalien ja valmistusmenetelmien kehittyminen johti parempaan suorituskykyyn ja pienempiin kustannuksiin. (Battery University 2017)

Toisin kuin perinteisessä sähköstaattisessa kondensaattorissa ja elektrolyyttikondensaattorissa, superkondensaattorissa ei ole eristettä. Sen sijaan siinä on sähköinen kaksikerroksinen rakenne, joka muodostuu kiinteään aineen (elektrodi) ja nesteeseen (elektrolyytti) rajapinnassa. Kuvassa (11) on esitetty tyypillisen superkondensaattorin rakenne. Superkondensaattori koostuu elektrodeista, elektrolyyteistä ja erottimesta, joka estää positiivisten ja negatiivisten elektrodien välisen kosketuksen. Elektrodit on sijoitettu kollektoreille ja päällystetty aktiivihilivaipalla. (Murata Manufacturing 2015)



KUVA 11. Tyypillisen superkondensaattorin rakenne (Murata Manufacturing 2015)

Kuvan tekstit käännetty alkuperäisen kuvan englanninkielisistä teksteistä.

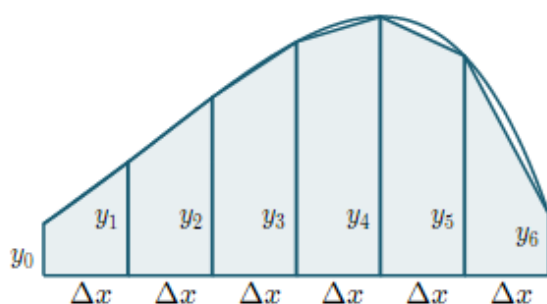
Rajapinnoille, joissa aktiivihiilivaippa on kosketuksessa elektrolyytin kanssa, muodostuu sähköinen kaksoiskerros. Kun superkondensaattoria ladataan, negatiiviset ionit ja tyhjät paikat positiivisen elektrodin puolella, sekä positiiviset ionit ja elektronit negatiivisen elektrodin puolella järjestäytyvät rajapinnan yli. Tätä ionien ja elektronien järjestäytymisen tilaa kutsutaan sähköiseksi kaksikerrokseksi. Varausten järjestäytyminen synnyttää sähkökentän, johon energia varastoituu. Koska tämä kerros muodostuu ionien fyysisestä liikkeestä, superkondensaattorissa ei ole kemiallista reaktiota, kuten akuissa. Tämä antaa superkondensaattoreille ylivoimaisen lataus-purkaussyklin keston akkuun verrattuna. Aktivoitua hiiltä käytetään elektrodeissa, koska sillä saadaan lisättyä elektrodien pinta-alaa. Mitä suurempi elektrodien pinta-ala on, sitä suurempi varaus voidaan varastoida. (Murata Manufacturing 2015)

4 AURINKOSÄHKÖVOIMALAN MITTAUSDATAN TUTKIMINEN

4.1 Mittausdatan tutkimisen tavoite ja toteutus

Työn tavoitteena on selvittää aurinkosähkövoimalan mittausdatan perusteella, tasaisen tuotannon aurinkosähkövoimalalle erilaisia tuottokertoimia eri vuodenaikoina täysin aurinkoisena päivänä, puolipilvisenä päivänä ja täysin pilvisenä päivänä. Mittausdata on peräisin erään voimalan 125 watin aurinkopaneelista, mittausdata on vuodelta 2007. Tutkimusta voidaan soveltaa eri kokoisiin voimaloihin ja paneeleihin, tuottokertoimella voidaan kertoa paneelin nimellisteho, jotta saadaan arvioitua paneelin tasainen tuotanto tietynä vuodenaikana tietyissä olosuhteissa.

Mittausdata on luettavissa Matlab-ohjelmalla. Ohjelman avulla mittausdatasta pystytään muodostamaan kuvaaja, josta nähdään kuinka paljon sähköä paneeli tuottaa minäkin vuorokauden hetkenä. Mittaus kestää aina vuorokauden ympäri ja mittausarvot on mitattu aina 20 sekunnin välein. Koska aurinkopaneeli tuottaa sähköä sen mukaan, kuinka paljon siihen kohdistuu auringon säteilyä, niin aurinkopaneelin tuottama teho on integroitava numeerisesti, jotta saadaan selville, kuinka paljon energiaa aurinkopaneeli tuottaa vuorokauden aikana. Integrointi suoritetaan myös Matlab-ohjelmalla käyttämällä `trapz` -komentoa. Komennon avulla ohjelma integroi aurinkopaneelin tehon kuvaajan käyttäen puolisuunnikas menetelmää, joka on yleisesti käytetty numeerisen integroinnin menetelmä matematiikassa. Alla olevassa kuvassa (12) on esitetty puolisuunnikasmenetelmän periaate. Kuvaajan integroitava ala jaetaan puolisuunnikkaisiin, joiden pinta-alat lasketaan. Kun puolisuunnikkaiden pinta-alat on laskettu, niin lasketaan vielä kaikkien puolisuunnikkaiden pinta-alat yhteen ja tästä saadaan kuvaajan integraali.



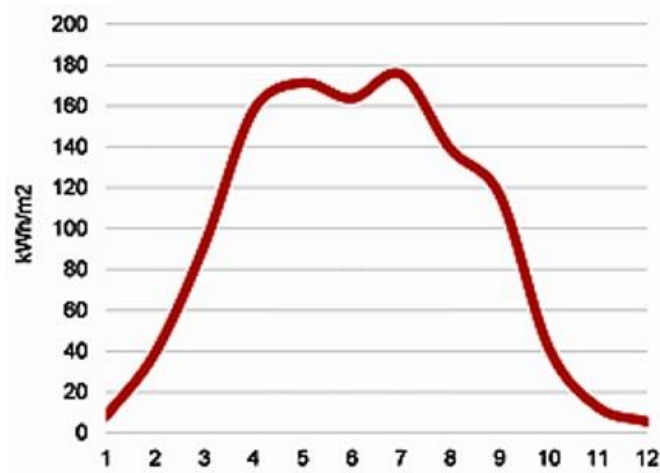
KUVA 13. Puolisuunnikasmenetelmän periaate (Interactive Mathematics 2017)

Kun on saatu selville paneelin energiantuotto vuorokauden aikana, täytyy vuorokaudessa tuotettu energia jakaa vuorokauden tunneilla, jotta saadaan selville, millä teholla paneeli tuottaisi sähköä, kun siitä olisi tehty tasaisen tuotannon voimalaitos. Kun tasaisen tuotannon teho on laskettu, lasketaan vielä, kuinka suuri osa tasaisen tuotannon teho on paneelin nimellistehosta ja näin saadaan kerroin, jonka avulla voidaan arvioida eri kokoisten aurinkosähkövoimaloiden tasaisen tuotannon tehoa.

Jokaiselta vuodenajalta on valittu kolme vuorokautta jokaista sääolosuhdetta kohden, eli jokaiselta vuodenajalta on valittu yhteensä yhdeksän vuorokautta, joiden mittausdataan tuottokertoimen määrittäminen perustuu. Jotta jokaiselle vuodenajalle ja olosuhteelle saadaan vain yksi kerroin, lasketaan vuodenajalle ja olosuhteelle valituista kolmesta vuorokaudesta aina keskiarvo, jonka perusteella sitten määritetään jokaiselle vuodenajalle ja olosuhteelle yksi kerroin.

4.2 Vuodenaikojen määrittäminen

Tässä työssä on määritelty perinteiset neljä vuodenaikaa, talvi, kevät, kesä ja syksy. Vuodenaajat eivät jakaudu täysin samalla tavalla, kuin ne perinteisesti jaetaan. Toukokuuta pidetään tässä työssä kesäkuukautena, koska aurinkosähkön kannalta toukokuu on jo täysin kesää. Marraskuuta taas pidetään tässä työssä talvikuukautena, sillä auringonsäteily marraskuussa lähes yhtä vähäistä kuin joulukuussa ja huomattavasti vähäisempää kuin muina syyskuukausina syys- ja lokakuussa. Vuodenaikajako on tehty kuvassa (12) olevan kuvaajan perusteella, jonka Motiva Oy on tehnyt ilmatieteen laitoksen tilastojen perusteella. Kuvaajassa on esitetty keskimääräiset kuukausittaiset säteilymäärät 45 asteen kulmassa etelään päin suunnatulle pinnalle Suomessa.



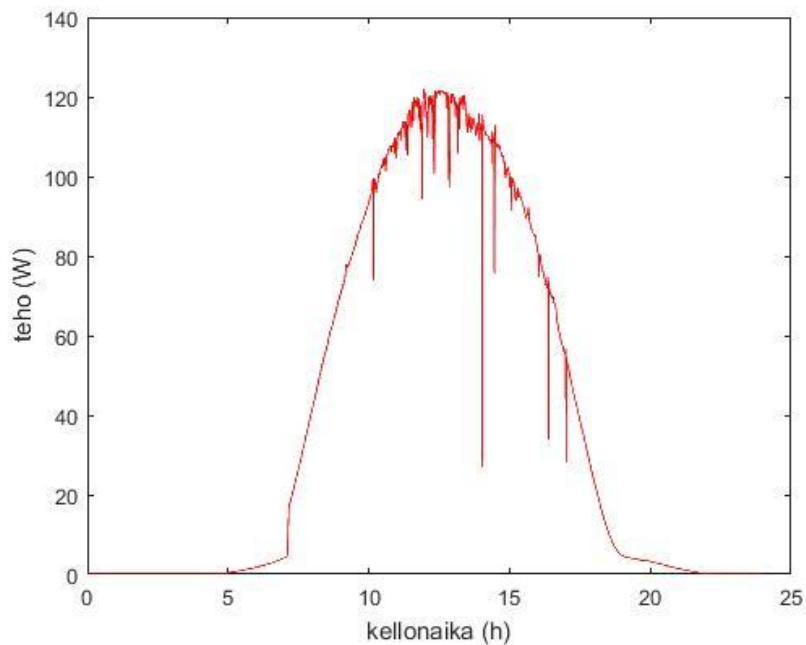
KUVIO 1. Auringon säteilyenergian summa 45 asteen kulmassa etelään päin suunnatulle pinnalle Suomessa (Motiva 2016)

Kuvion (1) mukaan auringon säteily määrä on jo huhtikuussa samaa luokkaa kuin touko-kuussa ja muina kesäkuukausina. Huhtikuu on kuitenkin tässä työssä määritelty kevät-kuukaudeksi, koska huhtikuussa on usein vielä ainakin jonkin verran lunta maassa ja tällä on heijastumisen kautta oma vaikutuksensa aurinkopaneelin tuotantoon. Kuvasta (12) näkyy myös, että elokuu on auringon säteilyn kannalta sellainen rajakuukausi, joka voisi periaatteessa olla myös syyskuukausi, mutta tässä työssä elokuuta pidetään kesäkuukau-tena, koska elokuussa päivät ovat usein kuitenkin aika paljon pidempiä, kuin syyskuussa ja varsinkin myöhemmin syksyllä.

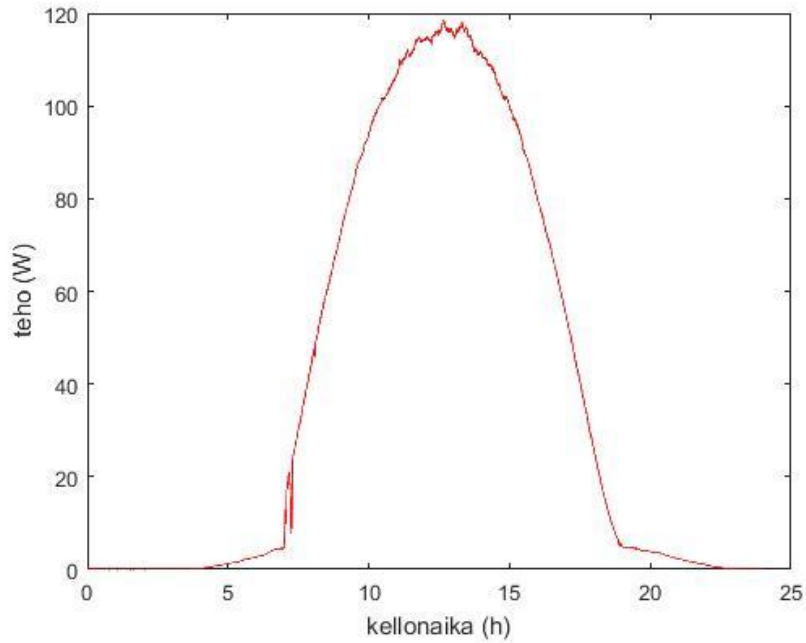
5 TUOTOKERTOIMEN MÄÄRITTÄMINEN KESÄLLÄ

5.1 Täysin aurinkoinen päivä

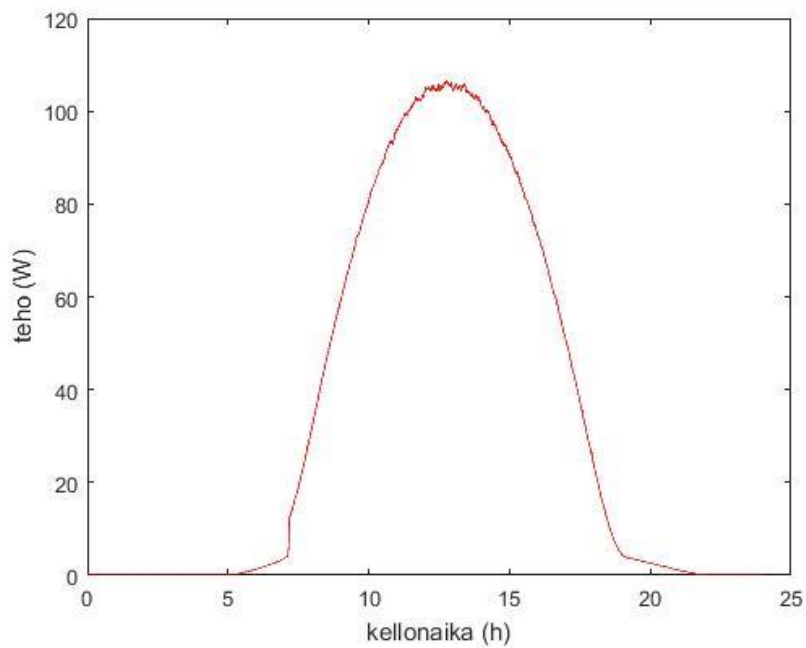
Alla olevissa kuvioissa (2-4) on esitetty aurinkopaneelin tuottama teho ajan funktiona kolmena täysin aurinkoisena päivänä kesällä. Kuvaajien muodosta näkee hyvin, että päivät ovat olleet täysin aurinkoisia, sillä kuvaajat ovat hyvin selkeitä, eikä niissä näy juurikaan värähtelyä, jota pilvet aiheuttavat. Mittausdatan tutkiminen aloitettiin kesästä, koska silloin kuvaajat ovat selkeimpiä ja tämä auttaa hahmottamaan, minkälaisia kuvaajien teoriassa pitäisi olla eri olosuhteissa.



KUVIO 2. Täysin aurinkoinen päivä 12.5.2007, tuotettu energia 940,98 Wh



KUVIO 3. Täysin aurinkoinen päivä 1.6.2007, tuotettu energia 950,47 Wh



KUVIO 4. Täysin aurinkoinen päivä 7.8.2007, tuotettu energia 833,85 Wh

Alla olevaan taulukkoon (1) on koottu valittujen täysin aurinkoisten kesäpäivien päivämäärät ja tuotetut energiat. Tuotetut energiat on laskettu integroimalla kuvaajat puoli-suunnikasmenetelmällä, Matlab-ohjelmalla.

TAULUKKO 1. Paneelin tuottama energia valittuina täysin aurinkoisina kesäpäivinä

Päivämäärä	Tuotettu energia	Tunnus
12.5.2007	940,98 Wh	E_1
1.6.2007	950,47 Wh	E_2
7.8.2007	833,85 Wh	E_3

Seuraavaksi lasketaan keskiarvo yhden aurinkopaneelin tuottamalle energialle täysin aurinkoisena kesäpäivänä. Keskiarvo lasketaan alla olevalla kaavalla (1)

$$E = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{3}, \quad (1)$$

jossa E_1 , E_2 , ja E_3 ovat aurinkopaneelin energiantuotannot esimerkkipäivinä. Nimellistehoaltaan 125 W:n aurinkopaneelin keskimääräiseksi energiantuotannoksi täysin aurinkoisena kesäpäivänä saatiin siis kaavan (1) mukaisesti

$$E = \frac{940,98 \text{ Wh} + 950,47 \text{ Wh} + 833,85 \text{ Wh}}{3} = 908,43 \text{ Wh}.$$

Jotta saadaan selville, millä teholla paneeli tuottaa energiaa, kun se olisi energiavaraston avulla tehty tasaisen tuotannon voimalaitos, täytyy paneelin vuorokaudessa tuottama energia jakaa vuorokauden tunneilla. Eli paneelin tasaisen tuotannon teho täysin aurinkoisena kesäpäivänä lasketaan kaavalla (2)

$$P = \frac{E}{24}, \quad (2)$$

jossa E on aurinkopaneelin energiantuotannon keskiarvo tietyssä vuodenaikana tietyissä olosuhteissa. Aurinkopaneelin tasaisen tuotannon tehoksi täysin aurinkoisena kesäpäivänä saatiin laskettua kaavan (2) avulla

$$P = \frac{908,43 \text{ Wh}}{24 \text{ h}} = 38,68 \text{ W}.$$

Lopuksi lasketaan vielä, kuinka monta suuri osa aurinkopaneelin tasaisen tuotannon teho on paneelin nimellistehosta. Tätä laskettua kerrointa voidaan käyttää niin sanottuna tuotokertoimena, jota voidaan soveltaa eri kokoiisiin aurinkopaneeleihin ja aurinkosähkövoimaloihin, kun halutaan arvioida niiden tasaisen tuotannon tehoa. Lasku suoritetaan kaavalla (3)

$$k = \frac{P_N}{P}, \quad (3)$$

jossa P_N on aurinkopaneelin nimellisteho ja P on paneelin tasaisen tuotannon teho. Tuotokertoimeksi täysin aurinkoisena kesäpäivänä saatiin kaavan (3) avulla

$$k = \frac{38,68 \text{ W}}{125 \text{ W}} = 0,309.$$

Lasketulla kertoimella saadaan nyt arvioitua tasaista tehon tuottoa eri kokoisilla aurinkopaneeleilla ja aurinkosähkövoimaloilla, kun muutetaan kaava (3) alla olevan kaavan (4) muotoon

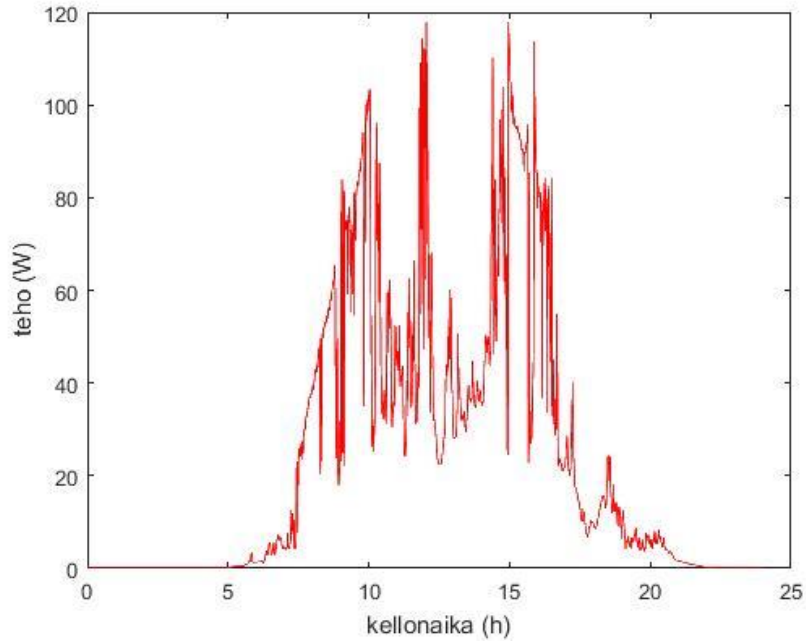
$$P = k \cdot P_N. \quad (4)$$

Yllä olevia kaavoja (1-3) käytetään tuotokertoimien määrittämiseen myös kaikissa muissa olosuhteissa ja muina vuodenaikoina, mutta niitä ei enää esitetä uudestaan jokaisessa luvussa.

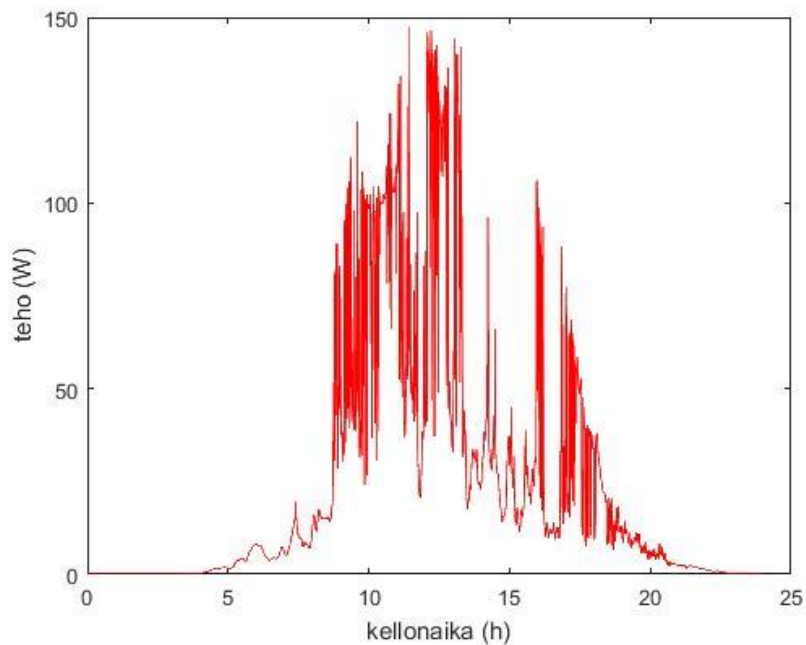
5.2 Puolipilvinen päivä

Alla olevissa kuvioissa (5-7) on esitetty aurinkopaneelin tuottama teho ajan funktiona kolmena puolipilvisenä päivänä kesällä. Kuvaajien muodosta näkee hyvin, että päivät ovat olleet puolipilvisiä, sillä kuvaajissa on paljon värähtelyä, jota muodostuu pilvien liikkua aurinko ja paneelin välissä. Puolipilvistien esimerkkipäivien valintaan oman haasteensa teki se, että puolipilvisiä päiviä oli energian tuotannon kannalta eri tasoisia päiviä. Vaikka kahtena eri päivänä kuvaaja näytti lähes samalta, paneelin energiantuo-

tanto saattoi kuitenkin vaihdella merkittävästi. Tässä työssä puolipilvisen päivän energiantuotannon tasoksi valittiin korkein mahdollinen taso, joka kuitenkin oli vielä tulkittavaksi puolipilviseksi.

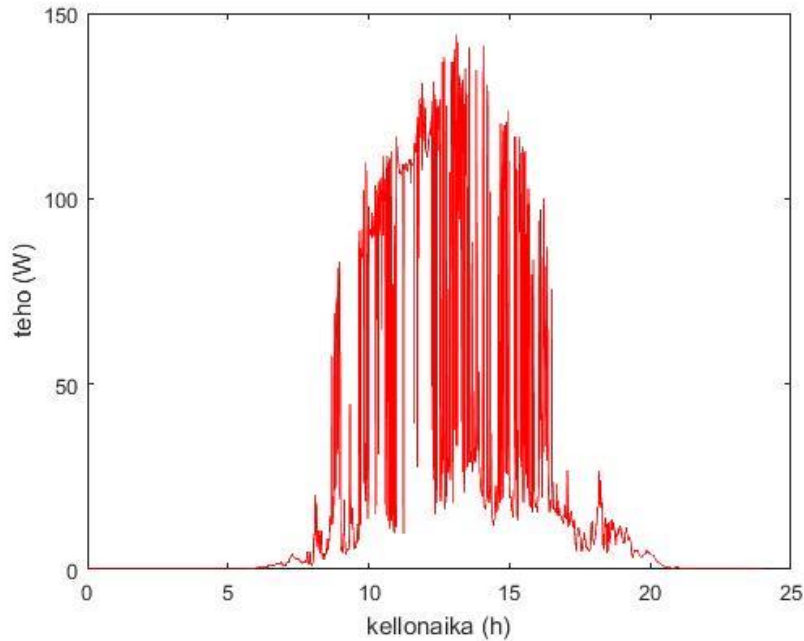


KUVIO 5. Puolipilvinen päivä 15.5.2007, tuotettu energia 567,05 Wh



54

KUVIO 6. Puolipilvinen päivä 13.6.2007, tuotettu energia 566,19 Wh



KUVIO 7. Puolipilvinen päivä 17.8.2007, tuotettu energia 543,22 Wh

Alla olevaan taulukkoon (2) on koottu valittujen puolipilvisten kesäpäivien päivämäärät ja tuotetut energiat.

TAULUKKO 2. Paneelin tuottama energia valittuina puolipilvisinä kesäpäivinä

Päivämäärä	Tuotettu energia	Tunnus
15.5.2007	567,05 Wh	E_1
13.6.2007	566,19 Wh	E_2
17.8.2007	543,22 Wh	E_3

Seuraavaksi lasketaan keskiarvo yhden 125 W:n aurinkopaneelin tuottamalle energialle puolipilvisenä kesäpäivänä. Keskiarvo lasketaan kaavalla (1)

$$E = \frac{567,05 \text{ Wh} + 566,19 \text{ Wh} + 543,22 \text{ Wh}}{3} = 558,82 \text{ Wh.}$$

Tämän jälkeen voidaan laskea aurinkopaneelin tasaisen tuotannon teho puolipilvisenä kesäpäivänä. Teho saadaan laskettua kaavan (2) avulla

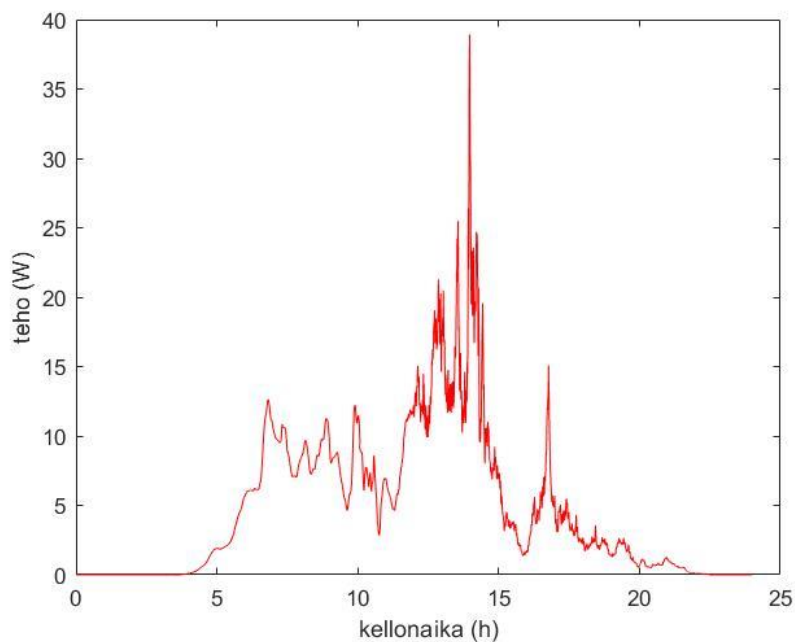
$$P = \frac{558,82 \text{ Wh}}{24 \text{ h}} = 23,28 \text{ W.}$$

Lopuksi lasketaan aurinkopaneelin tuottokerroin puolipilvisenä kesäpäivänä käyttäen kaavaa (3)

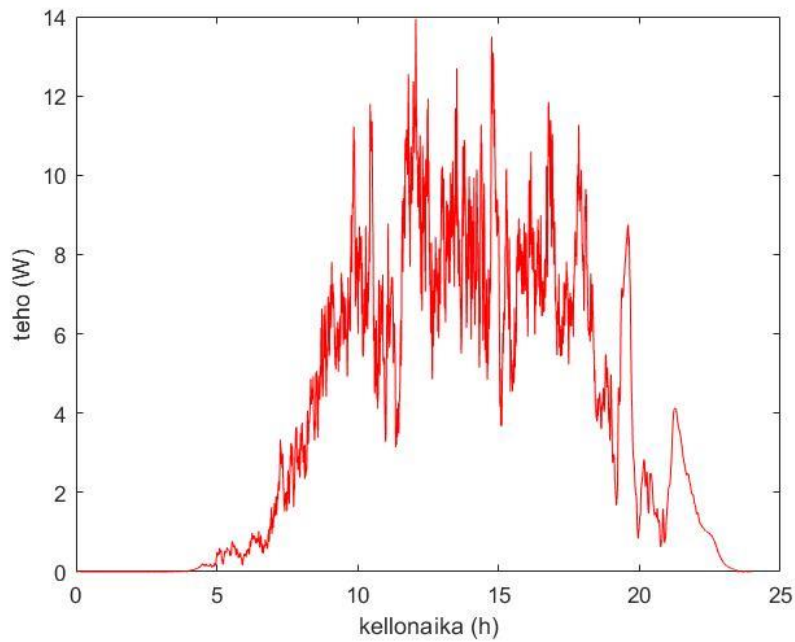
$$k = \frac{23,28 \text{ W}}{125 \text{ W}} = 0,186.$$

5.3 Täysin pilvinen päivä

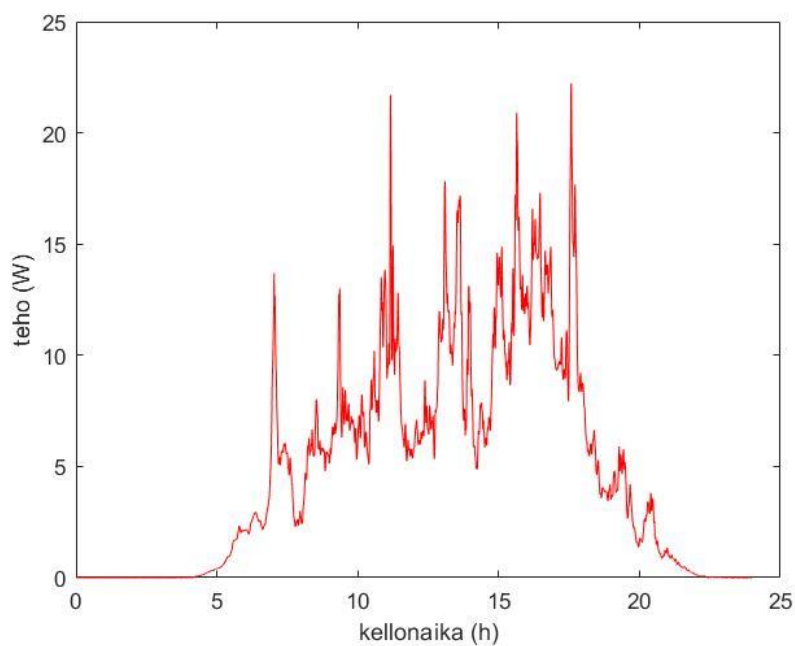
Alla olevissa kuvioissa (8-10) on esitetty aurinkopaneelin tuottama teho ajan funktiona kolmena täysin pilvisenä päivänä kesällä. Teoriassa kuvaajan muodon pitäisi olla täysin pilvisenä päivänä hyvin samanlainen kuin täysin aurinkoisena päivänä ja tuotetun energian määrän vain alhaisempi. Käytännössä sen muotoisia kuvaajia ei löytynyt pilvisiltä päiviltä ollenkaan, vaan jokaisena pilvisenä päivänä on tehon kuvaajassa jonkun verran värähtelyä. Käytännössä tutkimukseen valitut täysin pilviset päivät valittiin ainoastaan sen perusteella, että niinä aurinkopaneelin energiantuotto on pienin.



KUVIO 8. Täysin pilvinen päivä 28.5.2007, tuotettu energia 113,86 Wh



KUVIO 9. Täysin pilvinen päivä 28.6.2007, tuotettu energia 92,81 Wh



KUVIO 10. Täysin pilvinen päivä 6.7.2007, tuotettu energia 115,77 Wh

Alla olevaan taulukkoon (3) on koottu valittujen täysin pilvisten kesäpäivien päivämäärät ja tuotetut energiat.

TAULUKKO 3. Paneelin tuottama energia valittuina täysin pilvisinä kesäpäivinä

Päivämäärä	Tuotettu energia	Tunnus
28.5.2007	113,86 Wh	E_1
28.6.2007	92,81 Wh	E_2
6.7.2007	115,77 Wh	E_3

Seuraavaksi lasketaan keskiarvo yhden 125 W:n aurinkopaneelin tuottamalle energialle täysin pilvisenä kesäpäivänä. Keskiarvo lasketaan kaavalla (1)

$$E = \frac{113,86 \text{ Wh} + 92,81 \text{ Wh} + 115,77 \text{ Wh}}{3} = 107,48 \text{ Wh}.$$

Tämän jälkeen voidaan laskea aurinkopaneelin tasaisen tuotannon teho täysin pilvisenä kesäpäivänä. Teho saadaan laskettua kaavan (2) avulla

$$P = \frac{107,48 \text{ Wh}}{24 \text{ h}} = 4,48 \text{ W}.$$

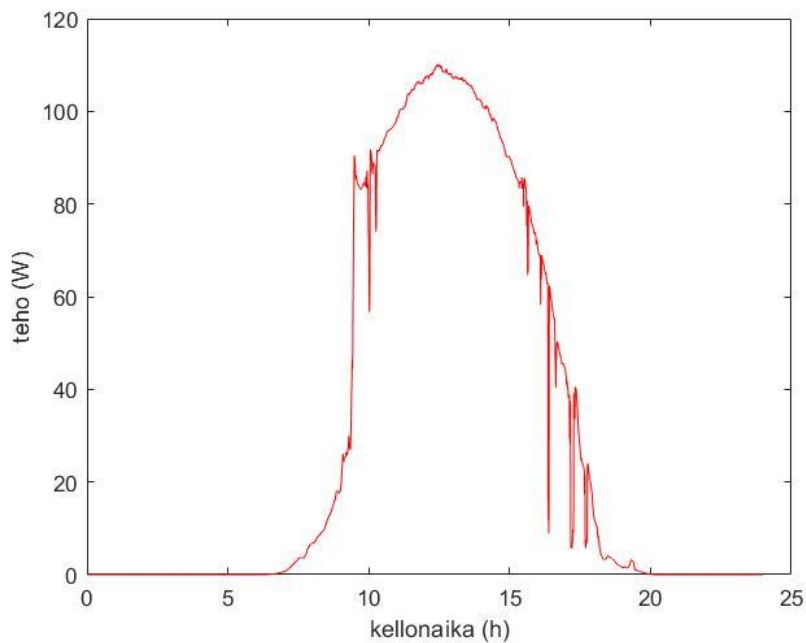
Lopuksi lasketaan aurinkopaneelin tuottokerroin täysin pilvisenä kesäpäivänä käyttäen kaavaa (3)

$$k = \frac{4,48 \text{ W}}{125 \text{ W}} = 0,036.$$

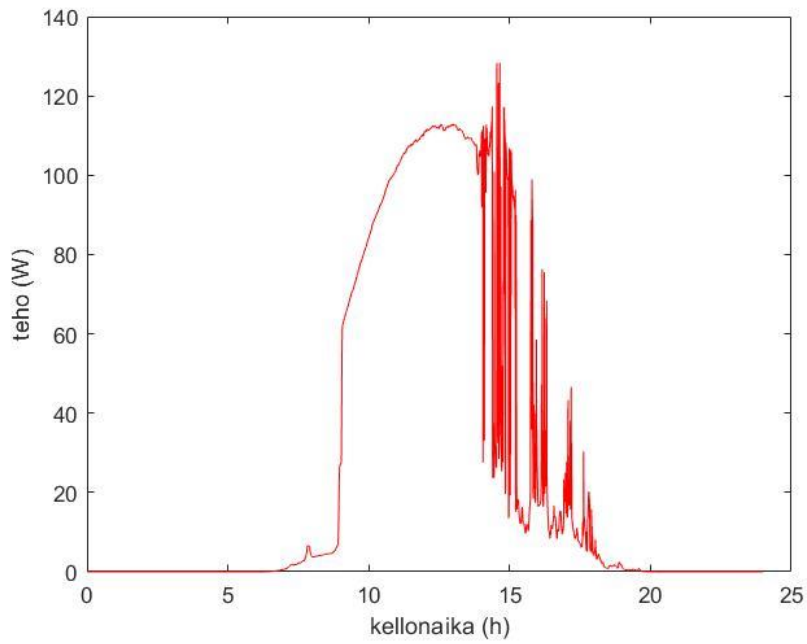
6 TUOTOKERTOIMEN MÄÄRITTÄMINEN SYKSYLLÄ

6.1 Täysin aurinkoinen päivä

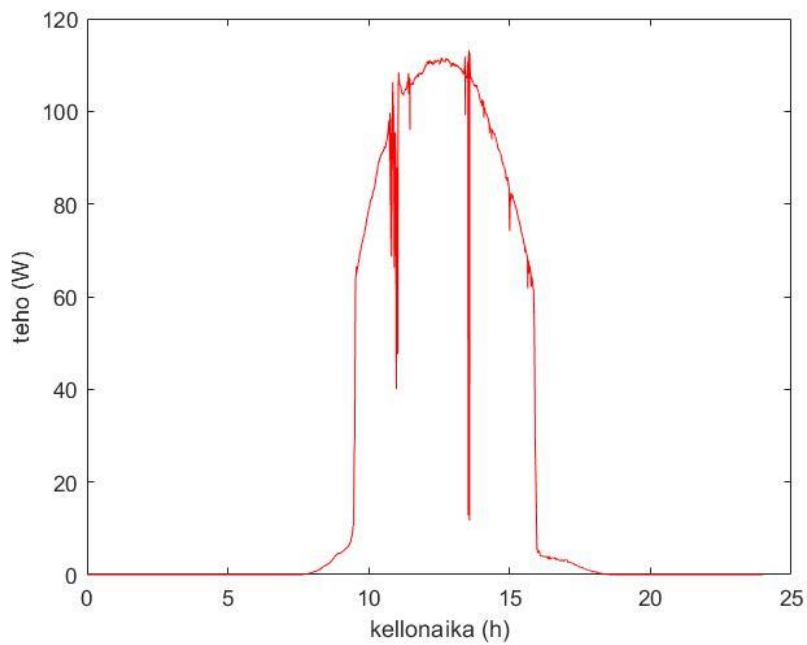
Alla olevissa kuvioissa (11-13) on esitetty aurinkopaneelin tuottama teho ajan funktiona kolmena täysin aurinkoisena päivänä syksyllä. Kuvaajien muodosta näkee hyvin, että päivät ovat olleet täysin aurinkoisia, sillä kuvaajat ovat hyvin selkeitä, eikä niissä näy juurikaan värähtelyä, jota pilvet aiheuttavat.



KUVIO 11. Täysin aurinkoinen päivä 11.9.2007, tuotettu energia 746,66 Wh



KUVIO 12. Täysin aurinkoinen päivä 14.9.2007, tuotettu energia 650,90 Wh



KUVIO 13. Täysin aurinkoinen päivä 13.10.2007, tuotettu energia 614,09 Wh

Alla olevaan taulukkoon (4) on koottu valittujen täysin aurinkoisten syyspäivien päivämäärät ja tuotetut energiat.

TAULUKKO 4. Paneelin tuottama energia valittuina täysin aurinkoisina syyspäivinä

Päivämäärä	Tuotettu energia	Tunnus
11.9.2007	746,66 Wh	E_1
14.9.2007	650,90 Wh	E_2
13.10.2007	614,09 Wh	E_3

Seuraavaksi lasketaan keskiarvo yhden 125 W:n aurinkopaneelin tuottamalle energialle täysin aurinkoisena syyspäivänä. Keskiarvo lasketaan kaavalla (1)

$$E = \frac{746,66 \text{ Wh} + 650,90 \text{ Wh} + 614,09 \text{ Wh}}{3} = 670,55 \text{ Wh}.$$

Tämän jälkeen voidaan laskea aurinkopaneelin tasaisen tuotannon teho täysin aurinkoisena syyspäivänä. Teho saadaan laskettua kaavan (2) avulla

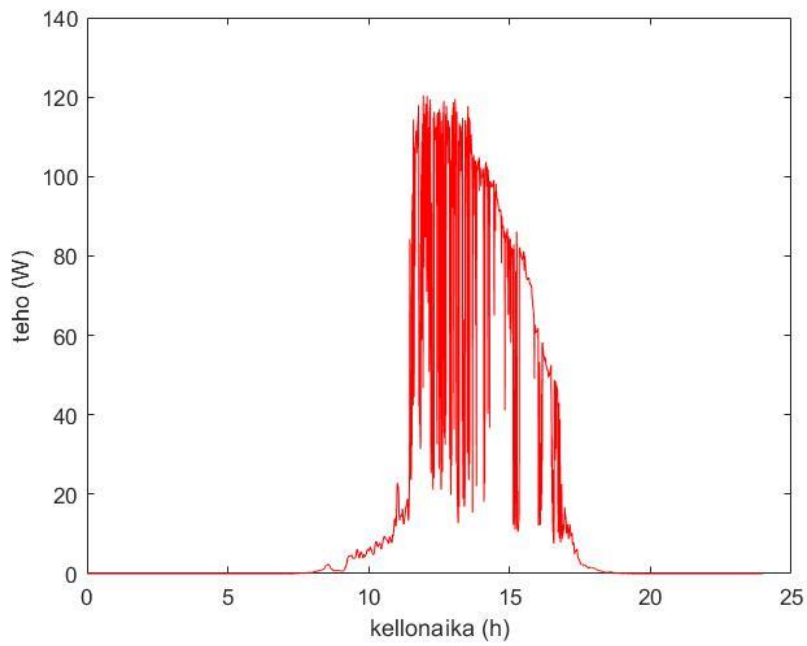
$$P = \frac{670,55 \text{ Wh}}{24 \text{ h}} = 27,94 \text{ W}.$$

Lopuksi lasketaan aurinkopaneelin tuottokerroin täysin aurinkoisena syyspäivänä käyttäen kaavaa (3)

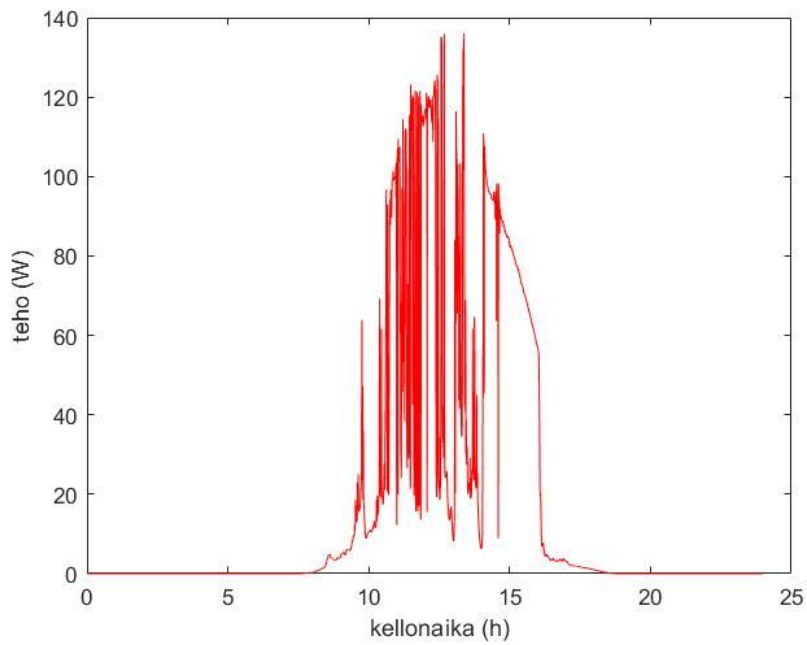
$$k = \frac{27,94 \text{ W}}{125 \text{ W}} = 0,224.$$

6.2 Puolipilvinen päivä

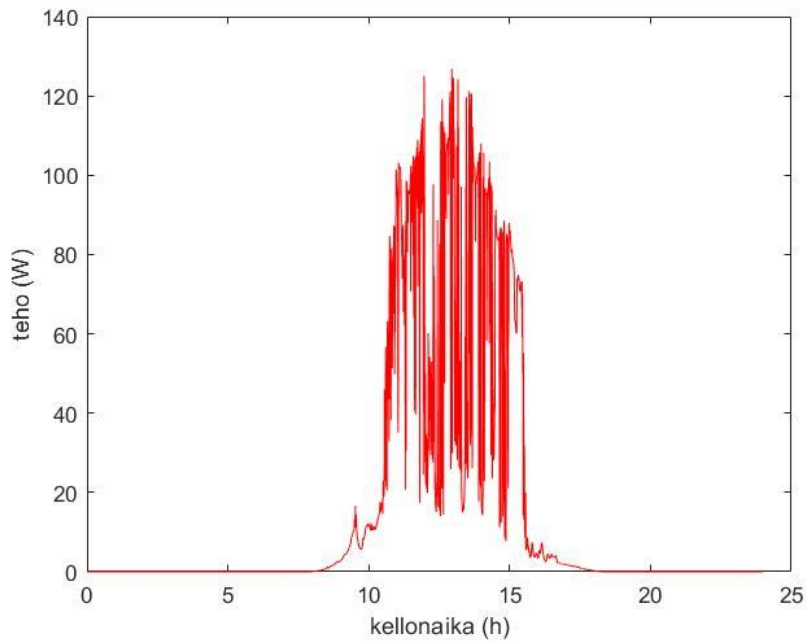
Alla olevissa kuvioissa (14-16) on esitetty aurinkopaneelin tuottama teho ajan funktiona kolmena puolipilvisenä päivänä syksyllä. Kuvaajien muodosta näkee hyvin, että päivät ovat olleet puolipilvisiä, sillä kuvaajissa on paljon värähtelyä, jota muodostuu pilvien liikkua aurion ja paneelin välissä. Samoin kuin kesällä, myös syksyllä puolipilvisien esimerkkipäivien valintaan oman haasteensa teki se, että puolipilvisiä päiviä oli energian tuotannon kannalta eri tasoisia päiviä. Vaikka kahtena eri päivänä kuvaaja näytti lähes samalta, paneelin energiantuotanto saattoi kuitenkin vaihdella merkittävästi. Tässä työssä puolipilvisen päivän energiantuotannon tasoksi valittiin korkein mahdollinen taso, joka kuitenkin oli vielä tulkittavaksi puolipilviseksi.



KUVIO 14. Puolipilvinen päivä 27.9.2007, tuotettu energia 430,27 Wh



KUVIO 15. Puolipilvinen päivä 10.10.2007, tuotettu energia 411,18 Wh



KUVIO 16. Puolipilvinen päivä 19.10.2007, tuotettu energia 371,82 Wh

Alla olevaan taulukkoon (5) on koottu valittujen puolipilvisten syyspäivien päivämäärät ja tuotetut energiat.

TAULUKKO 5. Paneelin tuottama energia valittuina puolipilvisinä syyspäivinä

Päivämäärä	Tuotettu energia	Tunnus
27.9.2007	430,27 Wh	E_1
10.10.2007	411,18 Wh	E_2
19.10.2007	371,82 Wh	E_3

Seuraavaksi lasketaan keskiarvo yhden 125 W:n aurinkopaneelin tuottamalle energialle puolipilvisenä syyspäivänä. Keskiarvo lasketaan kaavalla (1)

$$E = \frac{430,27 \text{ Wh} + 411,18 \text{ Wh} + 371,82 \text{ Wh}}{3} = 404,42 \text{ Wh.}$$

Tämän jälkeen voidaan laskea aurinkopaneelin tasaisen tuotannon teho puolipilvisenä syyspäivänä. Teho saadaan laskettua kaavan (2) avulla

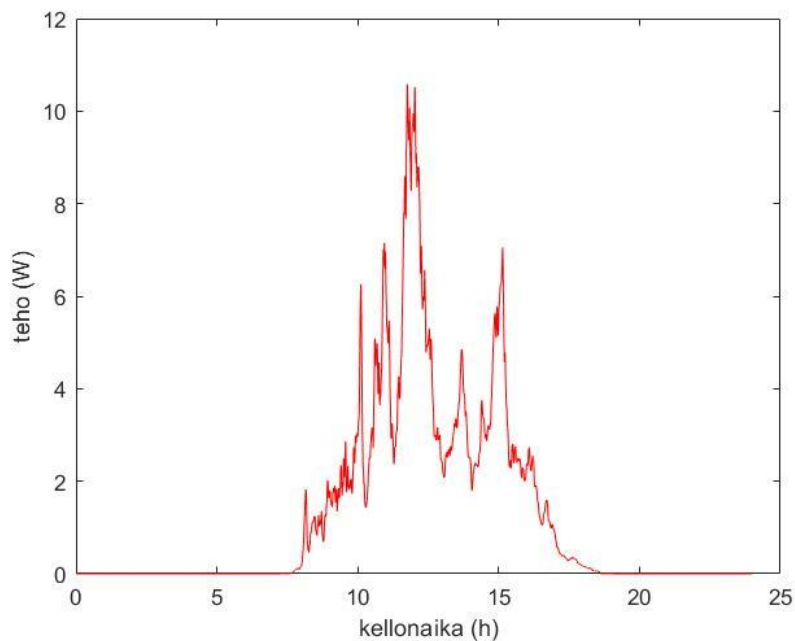
$$P = \frac{404,42 \text{ Wh}}{24 \text{ h}} = 16,85 \text{ W.}$$

Lopuksi lasketaan aurinkopaneelin tuottokerroin puolipilvisenä syyspäivänä käyttäen kaavaa (3)

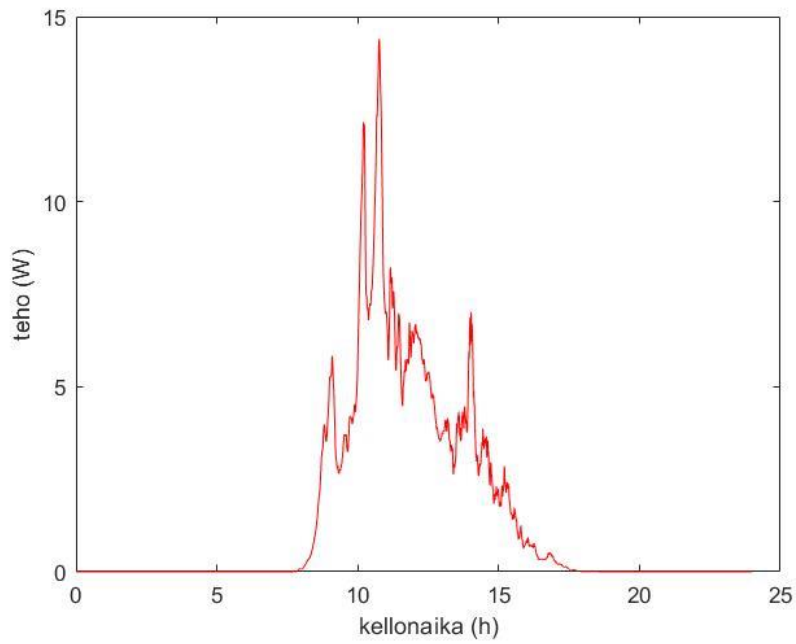
$$k = \frac{16,85 \text{ W}}{125 \text{ W}} = 0,135.$$

6.3 Täysin pilvinen päivä

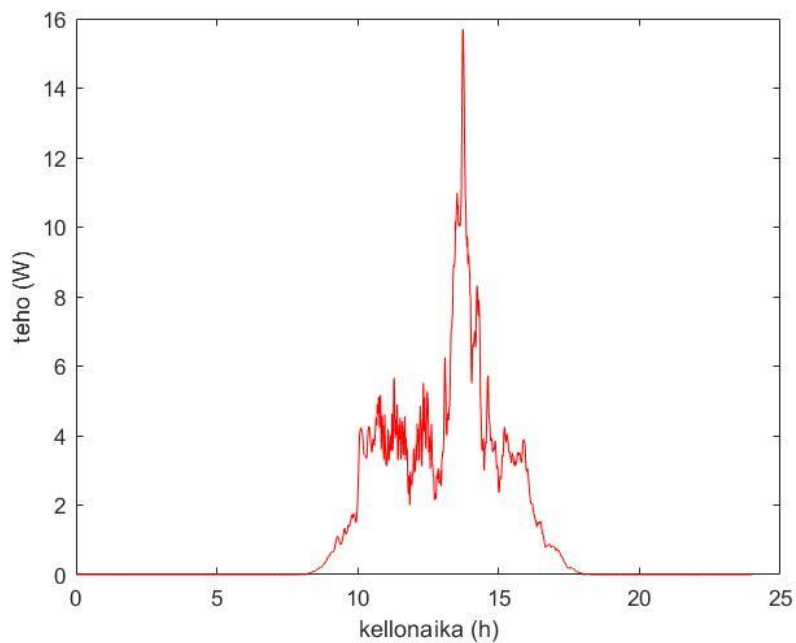
Alla olevissa kuvioissa (17-19) on esitetty aurinkopaneelin tuottama teho ajan funktiona kolmena täysin pilvisenä päivänä syksyllä. Kuvaajissa näkyy melko paljon värähtelyä, mutta kuvaajasta näkee hyvin, ettei tuotetun tehon suuruus ole minään vuorokauden hetkenä kovinkaan suuri. Tästä voidaan päätellä, että päivä on ollut käytännössä täysin pilvinen. Saman päätelmän voi myös tehdä siitä, että valittuina vuorokausina tuotetun energian määrä jää alhaiseksi. Täysin pilviset päivät tunnistettiin käytännössä vuorokaudessa tuotetun energian perusteella.



KUVIO 17. Täysin pilvinen päivä 4.10.2007, tuotettu energia 30,20 Wh



KUVIO 18. Täysin pilvinen päivä 14.10.2007, tuotettu energia 35,94 Wh



KUVIO 19. Täysin pilvinen päivä 22.10.2007, tuotettu energia 31,27 Wh

Alla olevaan taulukkoon (6) on koottu valittujen täysin pilvisten syyspäivien päivämäärät ja tuotetut energiat.

TAULUKKO 6. Paneelin tuottama energia valittuina täysin pilvisinä syyspäivinä

Päivämäärä	Tuotettu energia	Tunnus
4.10.2007	30,20 Wh	E_1
14.10.2007	35,94 Wh	E_2
22.10.2007	31,27 Wh	E_3

Seuraavaksi lasketaan keskiarvo yhden 125 W:n aurinkopaneelin tuottamalle energialle täysin pilvisenä syyspäivänä. Keskiarvo lasketaan kaavalla (1)

$$E = \frac{30,20 \text{ Wh} + 35,94 \text{ Wh} + 31,27 \text{ Wh}}{3} = 32,47 \text{ Wh}.$$

Tämän jälkeen voidaan laskea aurinkopaneelin tasaisen tuotannon teho täysin pilvisenä syyspäivänä. Teho saadaan laskettua kaavan (2) avulla

$$P = \frac{32,47 \text{ Wh}}{24 \text{ h}} = 1,35 \text{ W}.$$

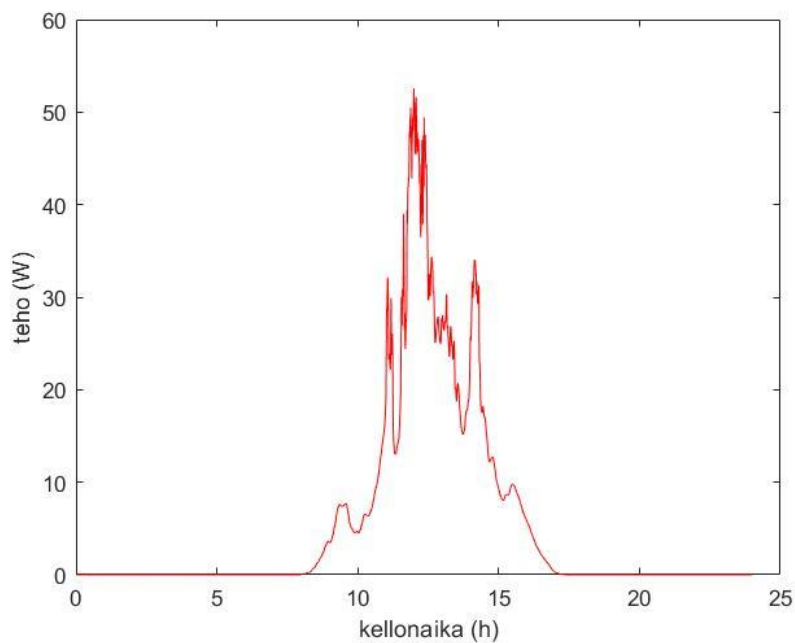
Lopuksi lasketaan aurinkopaneelin tuottokerroin täysin pilvisenä syyspäivänä käyttäen kaavaa (3)

$$k = \frac{1,35 \text{ W}}{125 \text{ W}} = 0,011.$$

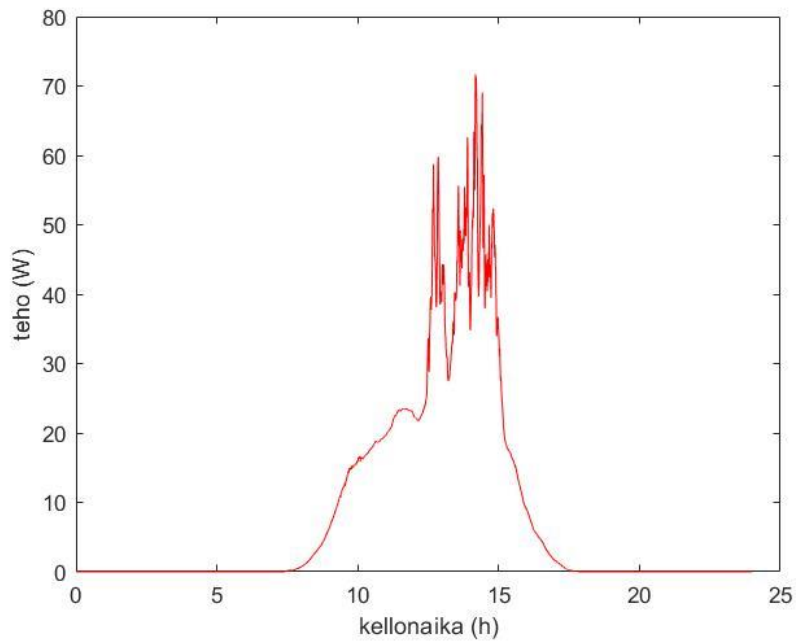
7 TUOTTOKERTOIMEN MÄÄRITTÄMINEN TALVELLA

7.1 Täysin aurinkoinen päivä

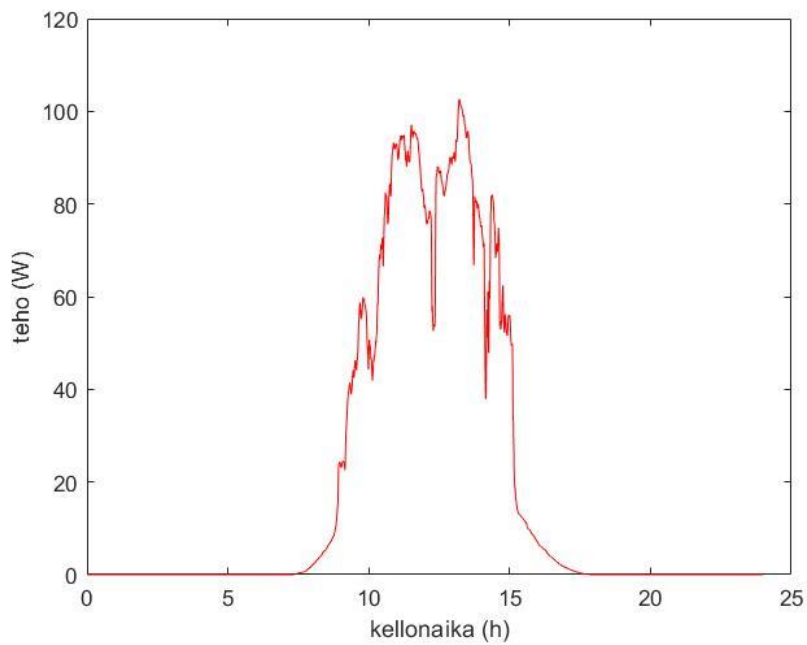
Alla olevissa kuvioissa (20-22) on esitetty aurinkopaneelin tuottama teho ajan funktiona kolmena täysin aurinkoisena päivänä talvella. Talvella kuvaajien muoto ei ollut aurinkoisina päivinä samalla tavalla selkeää kuin muina vuodenaikoina täysin aurinkoisina päivinä. Talven aurinkoisimmat päivät selvitettiin tämän takia vain vuorokaudessa tuotetun energian perusteella. Eli täysin aurinkoiksi talvipäiviksi valittiin ne kolme päivää, joina on ollut talvikuukausien suurin energiantuotto.



KUVIO 20. Täysin aurinkoinen päivä 17.2.2007, tuotettu energia 133,06 Wh



KUVIO 21. Täysin aurinkoinen päivä 24.2.2007, tuotettu energia 200,76 Wh



KUVIO 22. Täysin aurinkoinen päivä 25.2.2007, tuotettu energia 465,76 Wh

Alla olevaan taulukkoon (7) on koottu valittujen täysin aurinkoisten talvipäivien päivämäärät ja tuotetut energiat.

TAULUKKO 7. Paneelin tuottama energia valittuina täysin aurinkoisina talvipäivinä

Päivämäärä	Tuotettu energia	Tunnus
17.2.2007	133,06 Wh	E_1
24.2.2007	200,76 Wh	E_2
25.2.2007	465,76 Wh	E_3

Seuraavaksi lasketaan keskiarvo yhden 125 W:n aurinkopaneelin tuottamalle energialle täysin aurinkoisena talvipäivänä. Keskiarvo lasketaan kaavalla (1)

$$E = \frac{133,06 \text{ Wh} + 200,76 \text{ Wh} + 465,76 \text{ Wh}}{3} = 266,53 \text{ Wh.}$$

Tämän jälkeen voidaan laskea aurinkopaneelin tasaisen tuotannon teho täysin aurinkoisena talvipäivänä. Teho saadaan laskettua kaavan (2) avulla

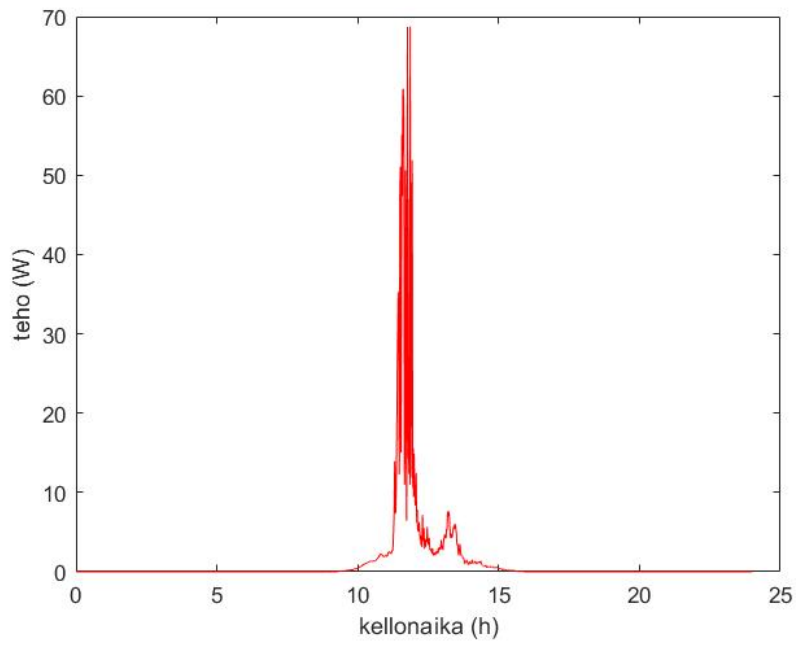
$$P = \frac{266,53 \text{ Wh}}{24 \text{ h}} = 11,11 \text{ W.}$$

Lopuksi lasketaan aurinkopaneelin tuottokerroin täysin aurinkoisena talvipäivänä käyttäen kaavaa (3)

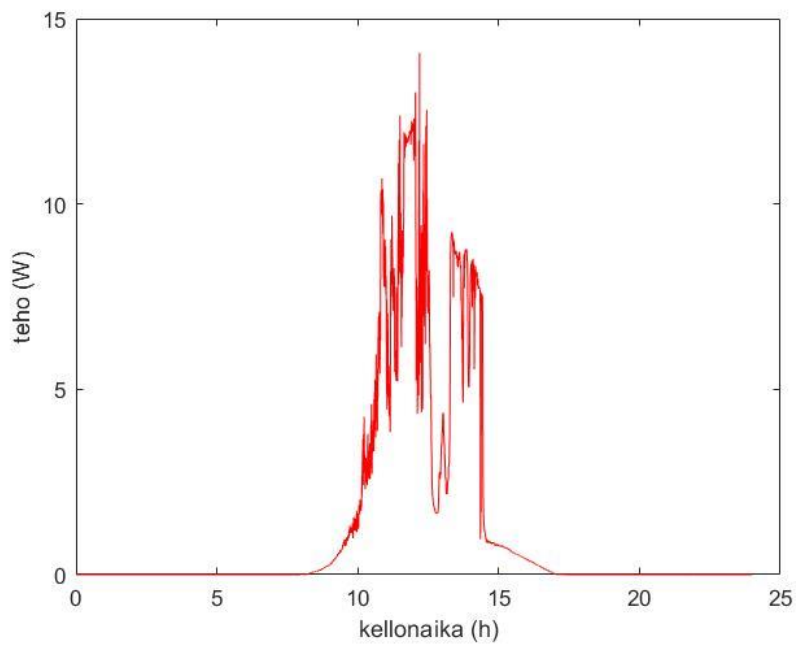
$$k = \frac{11,11 \text{ W}}{125 \text{ W}} = 0,089.$$

7.2 Puolipilvinen päivä

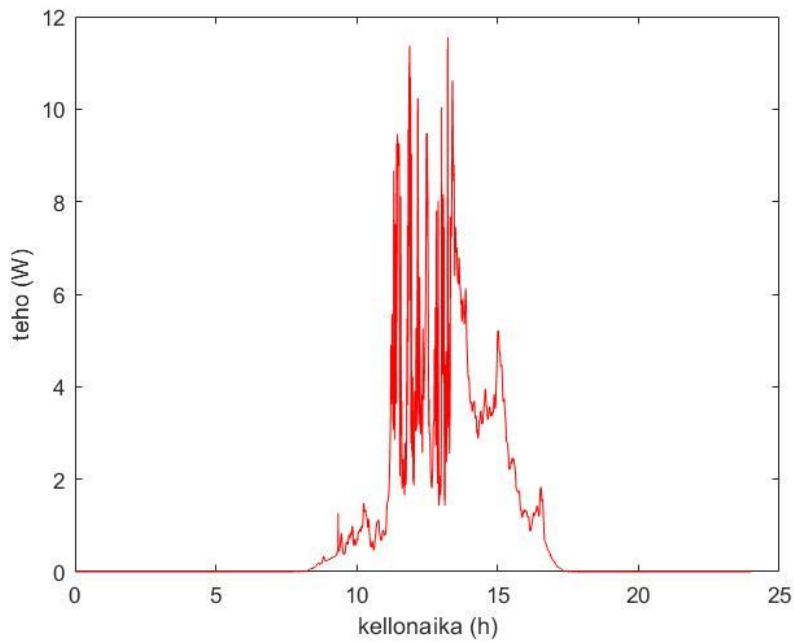
Alla olevissa kuvioissa (23-25) on esitetty aurinkopaneelin tuottama teho ajan funktiona kolmena puolipilvisenä päivänä talvella. Kuvaajien muodosta oli melko vaikea päätellä, mitkä päivät ovat talvella puolipilvisiä, sillä varsinkin täysin pilvisinä päivinä kuvaaja näytti usein hyvin samalta kuin puolipilvisenä päivänä. Puolipilvisten päivien tunnistamiseen käytettiin siis pääasiassa tuotettua energiaa. Mittaistuloksista vertailtiin, kuinka paljon aurinkopaneeli tuotti energiaa täysin aurinkoisina päivinä ja kuinka paljon täysin pilvisinä päivinä ja näiden perusteella pääteltiin energian tuotannon taso, jolloin sää voisi olla puolipilvinen.



KUVIO 23. Puolipilvinen päivä 11.1.2007, tuotettu energia 31,63 Wh



KUVIO 24. Puolipilvinen päivä 9.2.2007, tuotettu energia 31,50 Wh



KUVIO 25. Puolipilvinen päivä 12.2.2007, tuotettu energia 22,98 Wh

Alla olevaan taulukkoon (8) on koottu valittujen puolipilvisten talvipäivien päivämäärät ja tuotetut energiat.

TAULUKKO 8. Paneelin tuottama energia valittuina puolipilvisinä talvipäivinä

Päivämäärä	Tuotettu energia	Tunnus
11.1.2007	31,63 Wh	E_1
9.2.2007	31,50 Wh	E_2
12.2.2007	22,98 Wh	E_3

Seuraavaksi lasketaan keskiarvo yhden 125 W:n aurinkopaneelin tuottamalle energialle puolipilvisenä talvipäivänä. Keskiarvo lasketaan kaavalla (1)

$$E = \frac{31,63 \text{ Wh} + 31,50 \text{ Wh} + 22,98 \text{ Wh}}{3} = 28,70 \text{ Wh}.$$

Tämän jälkeen voidaan laskea aurinkopaneelin tasaisen tuotannon teho puolipilvisenä talvipäivänä. Teho saadaan laskettua kaavan (2) avulla

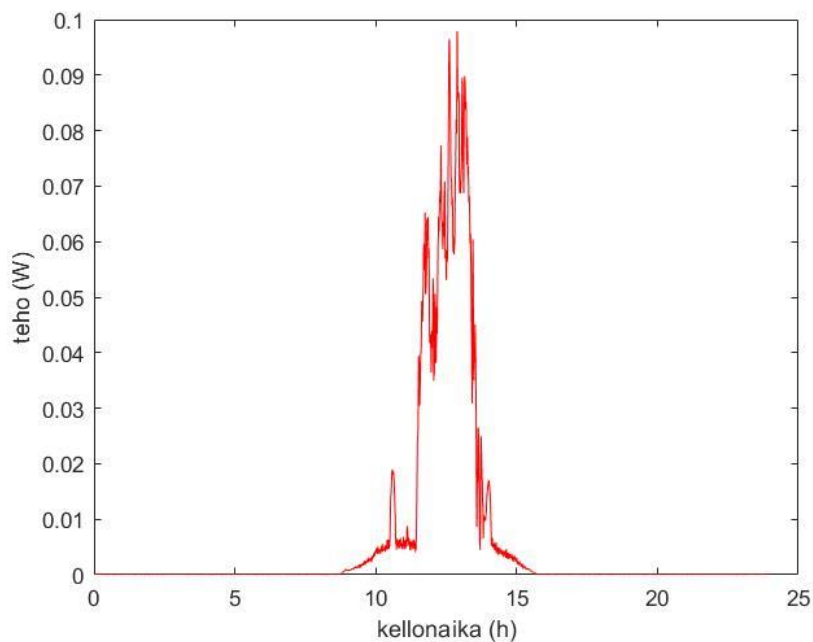
$$P = \frac{28,70 \text{ Wh}}{24 \text{ h}} = 1,20 \text{ W}.$$

Lopuksi lasketaan aurinkopaneelin tuottokerroin puolipilvisenä talvipäivänä käyttäen kaavaa (3)

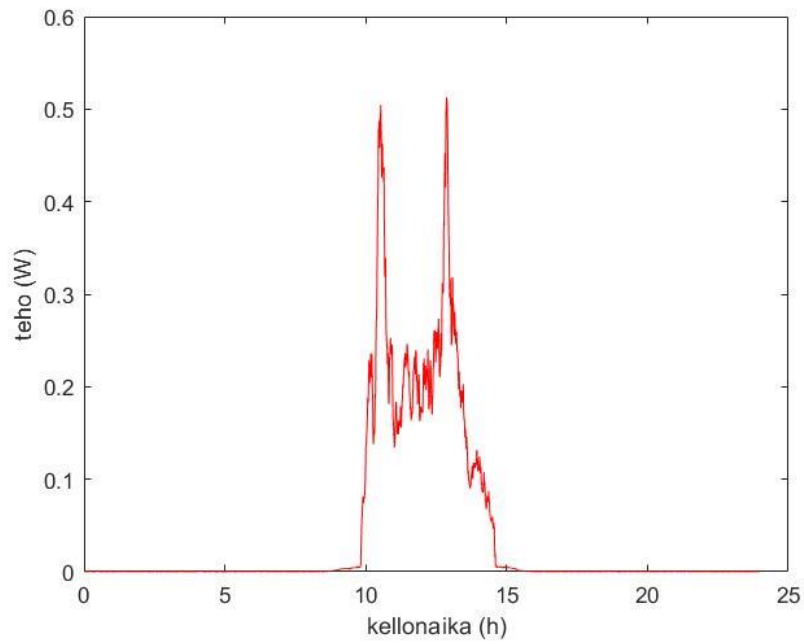
$$k = \frac{1,20 \text{ W}}{125 \text{ W}} = 0,0096.$$

7.3 Täysin pilvinen päivä

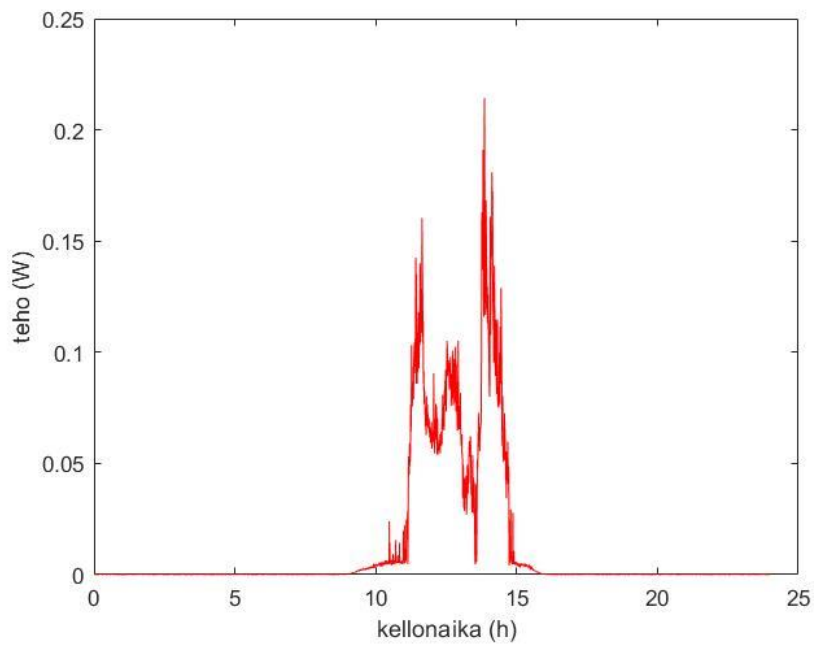
Alla olevissa kuvioissa (26-28) on esitetty aurinkopaneelin tuottama teho ajan funktiona kolmena täysin pilvisenä päivänä talvella. Kuvaajissa näkyy melko paljon värähtelyä, mutta kuvaajasta näkee hyvin, että paneelin tuottoteho on jokaisena vuorokauden hetkenä alle yhden watin. Tästä voidaan hyvin päätellä, että päivä on ollut käytännössä täysin pilvinen. Saman päätelmän voi myös tehdä siitä, että valittuina vuorokausina tuotetun energian määrä jää alhaiseksi. Täysin pilviset päivät tunnistettiin käytännössä vuorokaudessa tuotetun energian perusteella.



KUVIO 26. Täysin pilvinen päivä 5.12.2007, tuotettu energia 0,15 Wh



KUVIO 27. Täysin pilvinen päivä 10.12.2007, tuotettu energia 0,98 Wh



KUVIO 28. Täysin pilvinen päivä 26.12.2007, tuotettu energia 0,30 Wh

Alla olevaan taulukkoon (9) on koottu valittujen täysin pilvisten talvipäivien päivämäärät ja tuotetut energiat.

TAULUKKO 9. Paneelin tuottama energia valittuina täysin pilvisinä talvipäivinä

Päivämäärä	Tuotettu energia	Tunnus
5.12.2007	0,15 Wh	E_1
10.12.2007	0,98 Wh	E_2
26.12.2007	0,30 Wh	E_3

Seuraavaksi lasketaan keskiarvo yhden 125 W:n aurinkopaneelin tuottamalle energialle täysin pilvisenä talvipäivänä. Keskiarvo lasketaan kaavalla (1)

$$E = \frac{0,15 \text{ Wh} + 0,98 \text{ Wh} + 0,30 \text{ Wh}}{3} = 0,48 \text{ Wh.}$$

Tämän jälkeen voidaan laskea aurinkopaneelin tasaisen tuotannon teho täysin pilvisenä talvipäivänä. Teho saadaan laskettua kaavan (2) avulla

$$P = \frac{0,48 \text{ Wh}}{24 \text{ h}} = 0,020 \text{ W.}$$

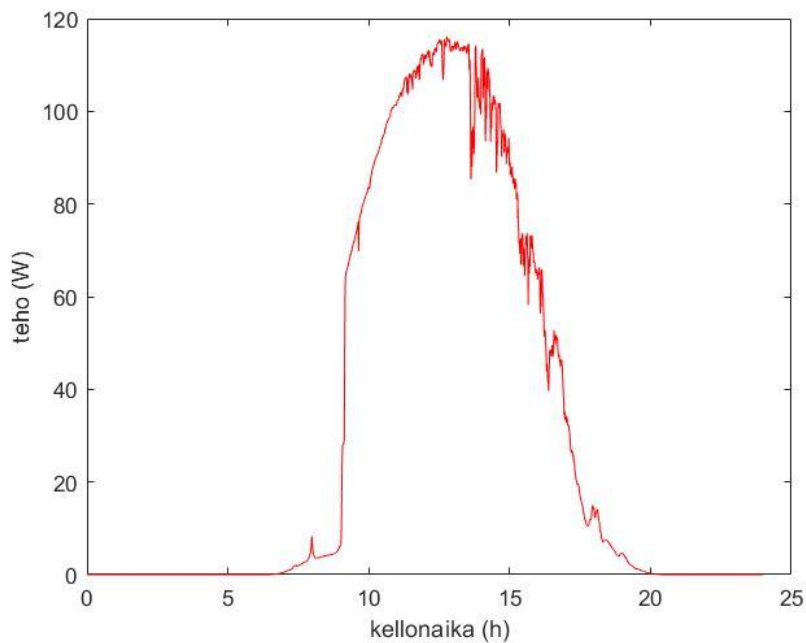
Lopuksi lasketaan aurinkopaneelin tuottokerroin täysin pilvisenä talvipäivänä käyttäen kaavaa (3)

$$k = \frac{0,020 \text{ W}}{125 \text{ W}} = 0,00016.$$

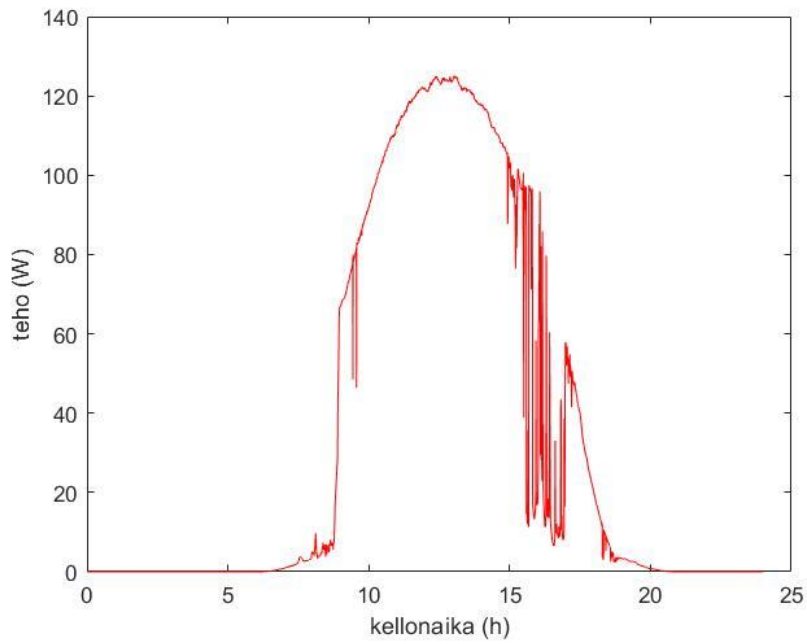
8 TUOTTOKERTOIMEN MÄÄRITTÄMINEN KEVÄÄLLÄ

8.1 Täysin aurinkoinen päivä

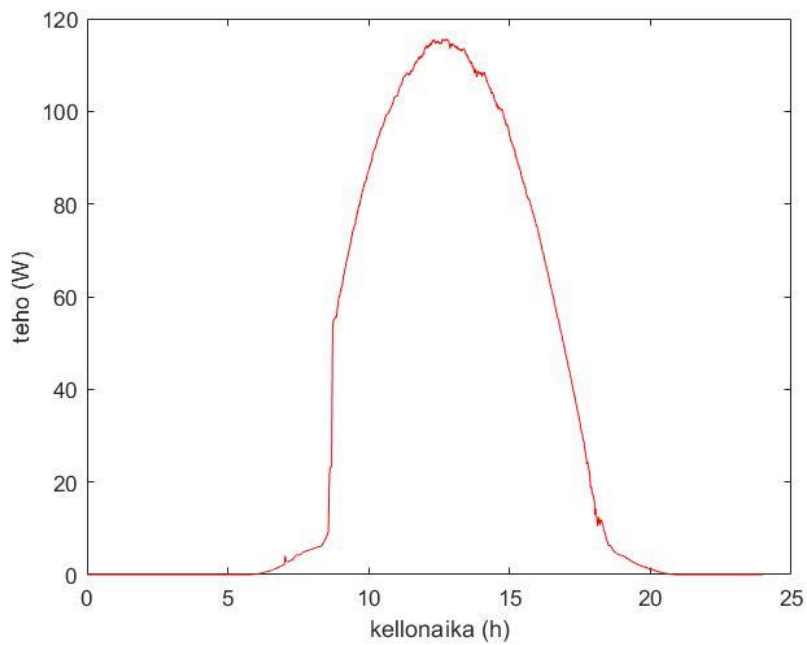
Alla olevissa kuvioissa (29-31) on esitetty aurinkopaneelin tuottama teho ajan funktiona kolmena täysin aurinkoisena päivänä keväällä. Kuten kesällä ja syksyllä, myös keväällä kuvaajien muodosta näkee hyvin, että päivät ovat olleet täysin aurinkoisia, sillä kuvaajat ovat hyvin selkeitä, eikä niissä näy juurikaan värähtelyä, jota pilvet aiheuttavat.



KUVIO 29. Täysin aurinkoinen päivä 31.3.2007, tuotettu energia 747,40 Wh



KUVIO 30. Täysin aurinkoinen päivä 8.4.2007, tuotettu energia 817,51 Wh



KUVIO 31. Täysin aurinkoinen päivä 14.4.2007, tuotettu energia 826,38 Wh

Alla olevaan taulukkoon (10) on koottu valittujen täysin aurinkoisten kevätpäivien päivämäärät ja tuotetut energiat.

TAULUKKO 10. Paneelin tuottama energia valittuina täysin aurinkoisina kevätpäivinä

Päivämäärä	Tuotettu energia	Tunnus
31.3.2007	747,40 Wh	E_1
8.4.2007	817,51 Wh	E_2
14.4.2007	826,38 Wh	E_3

Seuraavaksi lasketaan keskiarvo yhden 125 W:n aurinkopaneelin tuottamalle energialle täysin aurinkoisena kevätpäivänä. Keskiarvo lasketaan kaavalla (1)

$$E = \frac{747,40 \text{ Wh} + 817,51 \text{ Wh} + 826,38 \text{ Wh}}{3} = 797,10 \text{ Wh}.$$

Tämän jälkeen voidaan laskea aurinkopaneelin tasaisen tuotannon teho täysin aurinkoisena kevätpäivänä. Teho saadaan laskettua kaavan (2) avulla

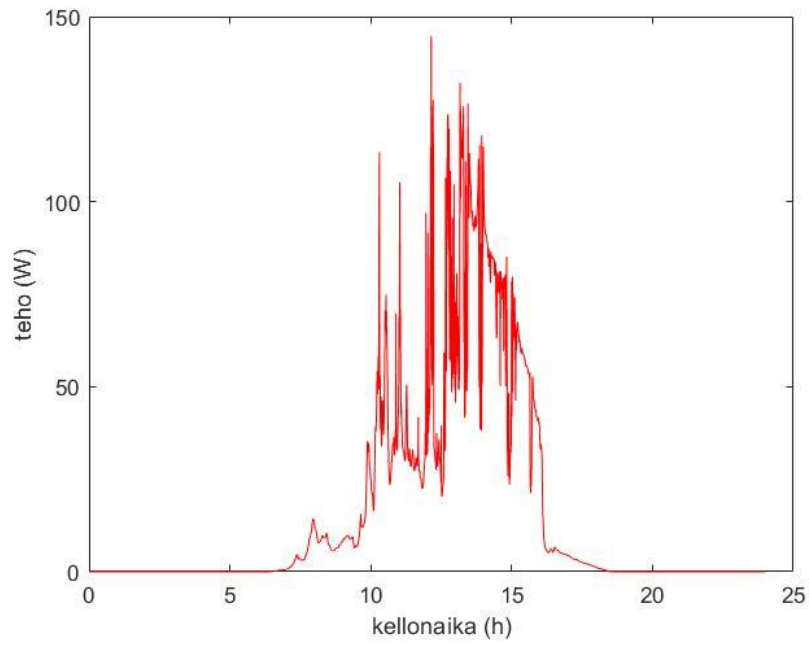
$$P = \frac{797,10 \text{ Wh}}{24 \text{ h}} = 33,21 \text{ W}.$$

Lopuksi lasketaan aurinkopaneelin tuottokerroin täysin aurinkoisena kevätpäivänä käyttäen kaavaa (3)

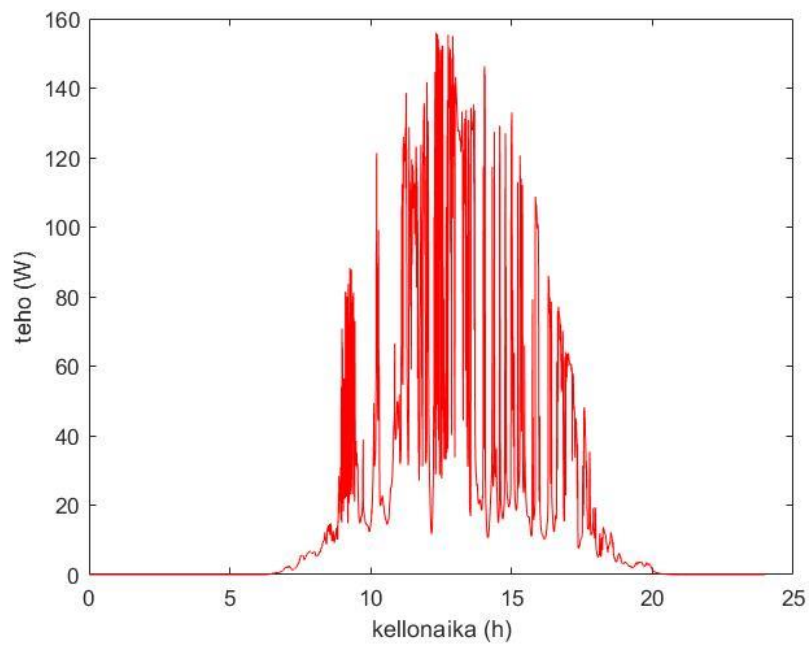
$$k = \frac{33,21 \text{ W}}{125 \text{ W}} = 0,266.$$

8.2 Puolipilvinen päivä

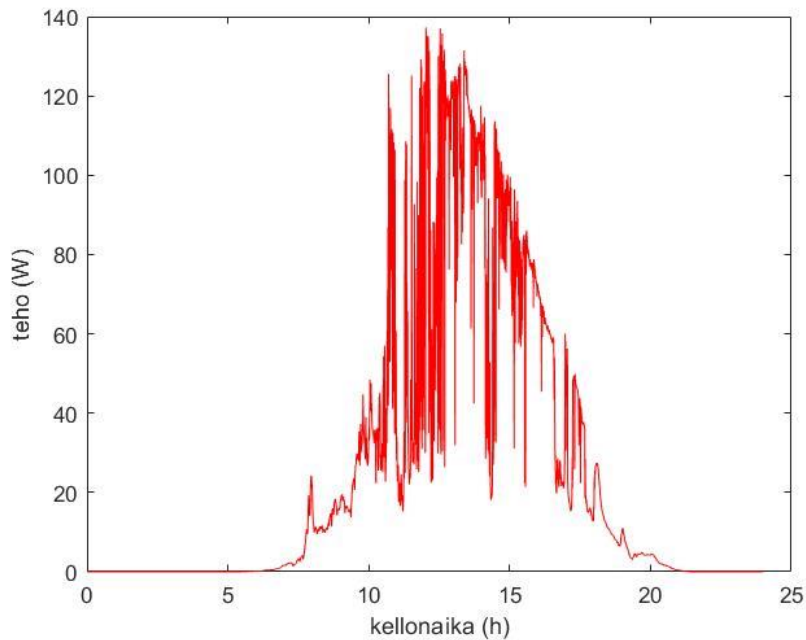
Alla olevissa kuvioissa (32-34) on esitetty aurinkopaneelin tuottama teho ajan funktiona kolmena puolipilvisenä päivänä keväällä. Kuvaajien muodosta näkee hyvin, että päivät ovat olleet puolipilvisiä, sillä kuvaajissa on paljon värähtelyä, jota muodostuu pilvien liikkua aurion ja paneelin välissä. Myös keväällä puolipilvisien esimerkkipäivien valintaan oman haasteensa teki se, että puolipilvisiä päiviä oli energian tuotannon kannalta eri tasoisia päiviä. Vaikka kahtena eri päivänä kuvaaja näytti lähes samalta, paneelin energiantuotanto saattoi kuitenkin vaihdella merkittävästi. Tässä työssä puolipilvisen päivän energiantuotannon tasoksi valittiin korkein mahdollinen taso, joka kuitenkin oli vielä tulkittavaksi puolipilviseksi.



KUVIO 32. Puolipilvinen päivä 15.3.2007, tuotettu energia 383,50 Wh



KUVIO 33. Puolipilvinen päivä 6.4.2007, tuotettu energia 498,75 Wh



KUVIO 34. Puolipilvinen päivä 26.4.2007, tuotettu energia 590,74 Wh

Alla olevaan taulukkoon (11) on koottu valittujen puolipilvisten kevätpäivien päivämäärät ja tuotetut energiat.

TAULUKKO 11. Paneelin tuottama energia valittuina puolipilvisinä kevätpäivinä

Päivämäärä	Tuotettu energia	Tunnus
15.3.2007	383,50 Wh	E_1
6.4.2007	498,75 Wh	E_2
26.4.2007	590,74 Wh	E_3

Seuraavaksi lasketaan keskiarvo yhden 125 W:n aurinkopaneelin tuottamalle energialle puolipilvisenä kevätpäivänä. Keskiarvo lasketaan kaavalla (1)

$$E = \frac{383,50 \text{ Wh} + 498,75 \text{ Wh} + 590,74 \text{ Wh}}{3} = 491,00 \text{ Wh.}$$

Tämän jälkeen voidaan laskea aurinkopaneelin tasaisen tuotannon teho puolipilvisenä talvipäivänä. Teho saadaan laskettua kaavan (2) avulla

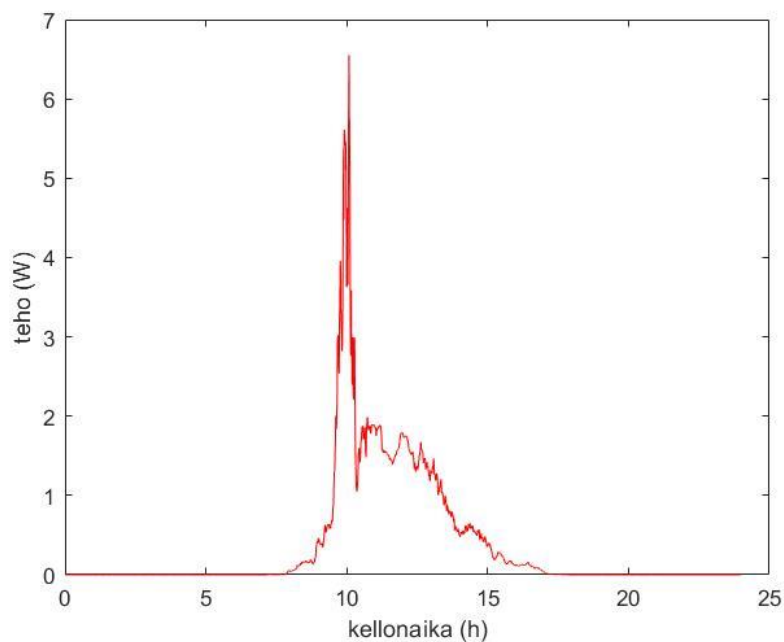
$$P = \frac{491,00 \text{ Wh}}{24 \text{ h}} = 20,46 \text{ W.}$$

Lopuksi lasketaan aurinkopaneelin tuottokerroin puolipilvisenä talvipäivänä käyttäen kaavaa (3)

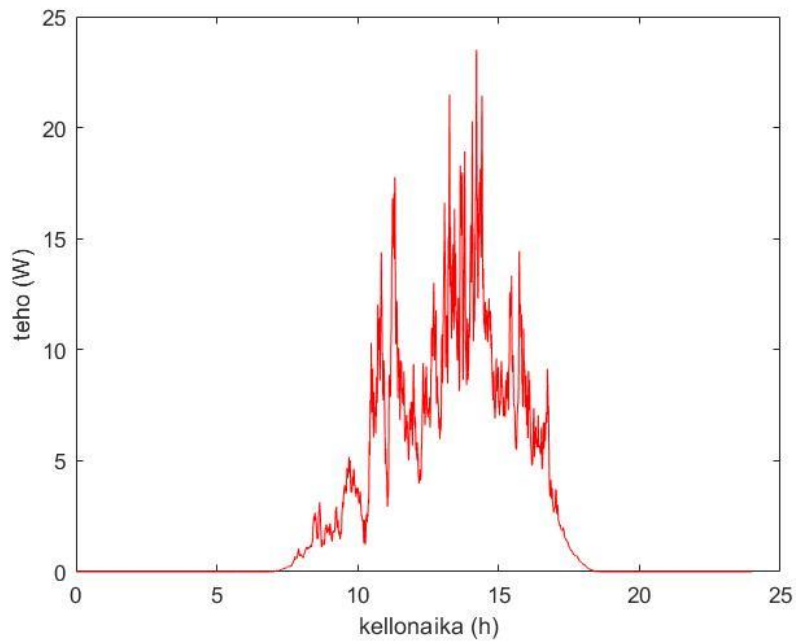
$$k = \frac{20,46 \text{ W}}{125 \text{ W}} = 0,164.$$

8.3 Täysin pilvinen päivä

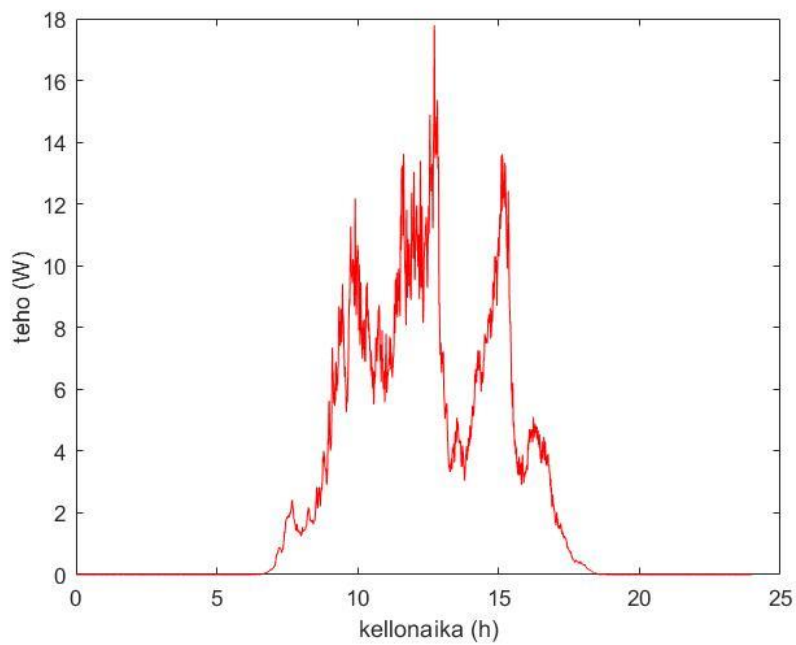
Alla olevissa kuvioissa (35-37) on esitetty aurinkopaneelin tuottama teho ajan funktiona kolmena täysin pilvisenä päivänä keväällä. Kuvaajissa näkyy jonkun verran värähtelyä, mutta kuvaajasta näkee hyvin, ettei tuotetun tehon suuruus ole minään vuorokauden hetkenä kovinkaan suuri. Tästä voidaan päätellä, että päivä on ollut käytännössä täysin pilvinen. Saman päätelmän voi myös tehdä siitä, että valittuina vuorokausina tuotetun energian määrä jää alhaiseksi. Täysin pilviset päivät tunnistettiin käytännössä vuorokaudessa tuotetun energian perusteella.



KUVIO 7. Täysin pilvinen päivä 1.3.2007, tuotettu energia 9,15 Wh



KUVIO 7. Täysin pilvinen päivä 10.3.2007, tuotettu energia 68,16 Wh



KUVIO 7. Täysin pilvinen pilvinen päivä 17.3.2007, tuotettu energia 63,38 Wh

Alla olevaan taulukkoon (12) on koottu valittujen täysin pilvisten kevätpäivien päivämäärät ja tuotetut energiat.

TAULUKKO 12. Paneelin tuottama energia valittuina täysin pilvisinä kevätpäivinä

Päivämäärä	Tuotettu energia	Tunnus
1.3.2007	9,15 Wh	E_1
10.3.2007	68,16 Wh	E_2
17.3.2007	63,38 Wh	E_3

Seuraavaksi lasketaan keskiarvo yhden 125 W:n aurinkopaneelin tuottamalle energialle täysin pilvisenä talvipäivänä. Keskiarvo lasketaan kaavalla (1)

$$E = \frac{9,15 \text{ Wh} + 68,16 \text{ Wh} + 63,38 \text{ Wh}}{3} = 48,90 \text{ Wh.}$$

Tämän jälkeen voidaan laskea aurinkopaneelin tasaisen tuotannon teho täysin pilvisenä talvipäivänä. Teho saadaan laskettua kaavan (2) avulla

$$P = \frac{48,90 \text{ Wh}}{24 \text{ h}} = 1,95 \text{ W.}$$

Lopuksi lasketaan aurinkopaneelin tuottokerroin täysin pilvisenä talvipäivänä käyttäen kaavaa (3)

$$k = \frac{0,020 \text{ W}}{125 \text{ W}} = 0,016.$$

9 TUOTTOKERTOIMIEN YHTEENVETO

Alla olevaan taulukkoon (13) on koottu yhteenveto mittausdatan perusteella määritetyistä tuottokertoimista eri vuodenaikoina, eri olosuhteissa. Tuottokertoimilla on tarkoitus arvioida energiavaraston avulla vakiotehoa syöttäväksi voimalaitokseksi tehdyn aurinkosähkövoimalan tehontuottoa eri vuodenaikoina eri olosuhteissa.

TAULUKKO 13. Tuottokertoimet eri vuodenaikoina, eri olosuhteissa

	Kesä	Syksy	Talvi	Kevät
Täysin aurinkoinen päivä	0,309	0,224	0,089	0,266
Puolipilvinen päivä	0,186	0,135	0,0096	0,164
Täysin pilvinen päivä	0,036	0,011	0,00016	0,016

Taulukossa (13) esitetyillä kertoimilla voidaan arvioida aurinkosähkövoimalan tasaista tuottotehoa, kun tiedetään paneelin tai voimalan nimellisteho.

Taulukosta (13) voidaan huomata, että paras tasainen tehontuotto aurinkopaneelilla on täysin aurinkoisena päivänä kesällä, jolloin tehontuotto on noin 30 prosenttia paneelin nimellistehosta. Syksyllä ja keväällä paneelin tehontuotto on täysin aurinkoisena päivänä yli 20 prosenttia paneelin nimellistehosta. Talvella paneelin tehontuotto on täysin aurinkoisena päivänä noin 9 prosenttia paneelin nimellistehosta. Talvella paneelin tehontuotto on siis huomattavasti pienempää kuin muina vuodenaikoina. Tähän kun vielä huomioidaan, että täysin aurinkoisia päiviä on talvella todella vähän, voidaan todeta, että aurinkopaneelin tehontuotto romahtaa talvella täysin.

Puolipilvisenä päivänä mennään tehontuotossa kaikkina vuodenaikoina alle 20 prosenttiin paneelin nimellistehosta. Tehontuotto on kuitenkin, kesällä, syksyllä ja keväällä selvästi yli 10 prosenttia paneelin nimellistehosta. Talvella puolipilvisen päivän tehontuotto on noin yhden prosentin paneelin nimellistehosta, eli paneelin tehontuotto on todella pieni.

Täysin pilvisenä päivänä tehontuotto taas romahtaa kaikkina vuodenaikoina alle neljään prosenttiin paneelin nimellistehosta. Kesällä tehontuotto on noin 3,5 prosenttia nimellis-

tehosta. Syksyllä ja keväällä tehontuotto on 1-2 prosenttia paneelin nimellistehosta. Täysin pilvisenä päivänä talvella voidaan jo sanoa, että aurinkopaneelin tehontuotto on käytännössä nolla, sillä kuten taulukosta (13) näkyy, paneelin tehontuotto on alle 0,02 prosenttia paneelin nimellistehosta.

10 KUVITTEELLISEN VOIMALAN MITOITUS

Havainnollistetaan vielä esimerkin avulla, kuinka selvitettyjä tuottokertoimia voidaan hyödyntää. Esimerkiksi otetaan kuvitteellinen nimellisteholtaan 1 MW:n aurinkosähkövoimala, josta tulee tasaisen tuotannon voimala. Aluksi lasketaan tuottokertoimien avulla voimalan tasainen tuotanto eri vuodenaikoina eri olosuhteissa ja sen jälkeen karkea mitoitus aurinkosähkövoimalan energiavarastosta. Energiavarasto voidaan teknisesti toteuttaa akuilla tai superkondensaattoreilla, mutta akku näyttää tällä hetkellä taloudellisesti järkevämmältä ratkaisulta. Superkondensaattori soveltuu tällä hetkellä paremmin ratkaisuihin, joissa on tavoitteena vaihtelevasta pilvisyydestä seuraavien nopeiden tuotantototehujen tasaaminen, eikä vakiotehoa tuottavan voimalan toteuttaminen.

Alla olevaan taulukkoon (14) on laskettu kaavan (4) avulla nimellisteholtaan 1 MW:n voimalan tasainen tuotanto eri vuodenaikoina eri olosuhteissa.

TAULUKKO 14. Tasainen tuotantoteho nimellisteholtaan 1MW:n voimalassa

	Kesä (kW)	Syksy (kW)	Talvi (kW)	Kevät (kW)
Täysin aurinkoinen päivä	309	224	89	266
Puolipilvinen päivä	186	135	9,6	164
Täysin pilvinen päivä	36	11	0,16	16

Päivän pituus Suomessa on eri sääpalvelujen mukaan huhtikuussa keskimäärin noin 15 tuntia, kesäkuussa keskimäärin noin 20 tuntia ja syyskuussa noin 13 tuntia. Näiden tilastojen avulla voidaan siis karkeasti arvioida, että tasaisen tuotannon aurinkosähkövoimalan akkujärjestelmältä tarvitaan suurinta kapasiteettia aurinkoisena syyspäivänä. Tällöin vuorokaudessa voi olla pimeitä tunteja arviolta 11 tuntia ja tämän 11 tunnin ajan akkujärjestelmän pitäisi pystyä tuottamaan tasaisesti 224 kW:n tehoa. Aurinkoisena kesäpäivänä akkujärjestelmän pitäisi pystyä tuottamaan tasaista 309 kW:n tehoa, mutta pimeitä tunteja on vuorokaudessa vain neljä tuntia. Tällöin akkujärjestelmältä vaadittu kapasiteetti ei ole niin suuri, kuin syksyllä, vaikka tuotettava tasainen teho on suurempi kuin syksyllä.

Aurinkosähkövoimalan akkujärjestelmältä vaadittu kapasiteetti voidaan siis karkeasti arvioida alla olevan kaavan (5) avulla

$$E_a = P \cdot t, \quad (5)$$

jossa P on teho, jota akkujärjestelmän pitää tuottaa t on aika, kuinka kauan akkujärjestelmän pitää tehoa tuottaa.

Seuraavaksi lasketaan 1 MW:n kuvitteellisen voimalan akkujärjestelmältä vaadittu kapasiteetti, kun oletetaan, että suurin kapasiteetti vaaditaan täysin aurinkoisena päivänä syksyllä, jolloin vuorokaudesta 11 tuntia ovat pimeitä tunteja. Akkujärjestelmän kapasiteetti lasketaan siis kaavan (5) avulla

$$E_a = 224 \text{ kW} \cdot 11 \text{ h} = 2464 \text{ kWh.}$$

1 MW:n aurinkosähköjärjestelmän akkujärjestelmältä vaadittu kapasiteetti on siis karkeasti arvioituna noin 2,5 MWh. Arvio on siis todella karkea ja tehdyssä akkujärjestelmän mitoituksessa tarkoituksena on ollut tarkoituksena vain havainnollistaa sitä, miten tuotto-kertoimia on mahdollista hyödyntää.

11 POHDINTA

Työn tavoitteena oli tutkia erään aurinkosähkövoimalan mittausdatan perusteella, minkälaista aurinkosähkövoimalan tasainen tuotanto voisi olla eri vuodenaikoina ja erilaisissa sääolosuhteissa, eli täysin aurinkoisena päivänä, täysin pilvisenä päivänä ja puolipilvisenä päivänä. Tavoitteena oli saada selvitettyä erilaisia kertoimia, joiden avulla voitaisiin laskea, miten eri kokoiset voimalat tuottavat tasaista tehoa erilaisina päivinä eri vuodenaikoina.

Työn alkupuolella on käyty läpi yleisesti aurinkopaneelin toimintaperiaatetta, aurinkosähkövoimalan eri komponentteja ja esitely lyhyesti erilaisia akkuja, sekä superkondensaattori. Työn jälkimmäisellä keskityttiin tutkimaan aurinkopaneelin mittausdataa ja selvitettiin mittausdatan perusteella tuottokertoimia. Lopuksi vielä tehtiin karkea kuvitteellisen aurinkosähkövoimalan mitoitus, jossa on tarkoitus havainnollistaa sitä, mihin tuottokertoimia voi käytännössä hyödyntää.

Taulukkoon (13) on koottu kertoimet, jotka mittausdatan perusteella saatiin määritettyä. Työn edetessä, mittausdataa tutkiessa huomattiin, että samana vuodenaikana auringon säteily saattoi olla hyvin eri tasoista eri kuukausina. Esimerkiksi kesällä auringon säteilyn määrä oli kesäkuussa melko paljon suurempi kuin elokuussa. Samoin syksyllä varsinkin syyskuun alkupuolella auringon säteilyn määrä on huomattavasti suurempi kuin lokakuun lopussa, jolloin päivät ovat jo melko pimeitä. Yllä mainituista syistä toteaisiin, että tuottokertoimet ovat todella suuntaa antavia. Tarkempaa kertoimien määrittämistä varten voisi olla hyvä määrittää jokaiselle kuukaudelle oma tuottokerroin. Mittausdataa olisi hyvä olla myös useammalta vuodelta, jolloin sitäkin kautta saisi lisää luotettavuutta tuottokertoimiin.

Vaikka tuottokertoimien tarkkuutta voitaisiin paljon vielä parantaa yllä mainituin keinoin, voidaan kuitenkin todeta, että tässä työssä selvitetty tuottokertoimet kertovat varmasti jo oikean suuruusluokan aurinkopaneelin tasaisesta tehontuotannosta eri vuodenaikoina eri sääolosuhteissa ja kertoimia voidaan hyödyntää, kun haetaan vain melko karkeita suuntaa antavia arvioita tehontuotosta vuoden aikana.

LÄHTEET

- Motiva. 2016. Auringon säteilyn määrä Suomessa. Luettu 28.9.2017.
https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa
- Boxwell, M. 2014. Solar Electricity Handbook 2014 Edition. Coventry: Greenstream Publishing
- Korpela, A. 2014. Aurinkosähkön perusteet. Tulostettu 28.9.2017
- Korpela, A. 2016. Hajautettu sähköenergian tuotanto, Aurinkosähkö osa 2. TAMK luentomateriaali. Tulostettu 5.10.2017
- Ilmatieteen laitos. N.d. Auringon rakenne ja elinkaari. Luettu 28.9.2017.
<http://ilmatieteenlaitos.fi/rakenne-ja-elinkaari>
- Ilmatieteen laitos. N.d. Auringon säteily ja kirkkausvaihtelut. Luettu 28.9.2017.
<http://ilmatieteenlaitos.fi/sateily-ja-kirkkausvaihtelut>
- Mozaw. 2017. Solar panel kits: Ultimate Guide for home Solar PV System. Luettu 29.9.2017.
<https://mozaw.com/solar-panel-kits/>
- Aarnio, P. N.d. Miten aurinkokenno toimii. Luettu 5.10.2017.
<http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/pv/pv-toiminta.html>
- Ahjo energia. N.d. Aurinkopaneelien toiminta. Luettu 5.10.2017.
<http://www.ahjoenergia.fi/index.php/periaatteet/aurinkopaneelien-toiminta>
- ST kortisto, ST 55.33. 2014. Aurinkoenergiaa hyödyntävät laitteet ja niiden liittäminen rakennuksen sähkönjakelujärjestelmään, Espoo Sähköinfo Oy. Tulostettu 11.10.2017.
- Suomen standardisoimisliitto SFS, SFS 6000-7-712. 2012 SESKO ry.
- Solar Power World. 2015. What are the different types of solar modules? Luettu 14.10.2017.
<https://www.solarpowerworldonline.com/2015/07/what-are-the-different-types-of-solar-modules/>
- Home of 12 volt. n.d. 200 watt monocrystalline solar panel. Luettu 19.10.2017.
<http://homeof12volt.com.au/product/flat-200-watt-monocrystalline-solar-panel/>
- WattSun Energy India. n.d. Monocrystalline vs Polycrystalline Solar panels-What are the differences? Luettu 19.1.2017.
<http://wattsun.in/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels-what-are-the-differences/>
- Rightway Roofing n.d. Warranty policy. Luettu 19.10.2017.
<http://www.rightwayroofing.co.nz/warranty-policy/4561354341>

Solar Power World. 2017. Batteries: Which is best for solar storage? Luettu 6.11.2017.
<https://www.solarpowerworldonline.com/2015/08/what-is-the-best-type-of-battery-for-solar-storage/>

Battery University. 2017. Hoe does a supercapasitor work? Luettu 10.11.2017.
http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor

Murata Manufacturing. 2015. Supercapacitor basics. Luettu 11.11.2017.
<https://www.murata.com/products/emiconfun/capacitor/2015/03/24/20150324-p1>

Interactive Mathematics. 2017. The Trapezoidal Rule. Luettu 14.12.2017
<https://www.intmath.com/integration/5-trapezoidal-rule.php>

Solar Power World. 2017. What is a flow battery? Luettu 9.5.2018
<https://www.solarpowerworldonline.com/2017/12/what-is-a-flow-battery/>

Machine Design. 2015. What's the Difference Between Batteries and Capacitors? Luettu 12.5.2018
<http://www.machinedesign.com/batteriespower-supplies/what-s-difference-between-batteries-and-capacitors>