

Dan Telén

AURINKOVOIMALAN TUOTANTOPOTENTIALIAALI TAMPEREELLA

Kandidaatintutkielma
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Seppo Valkealahti
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Dan Telén: Aurinkovoimalan tuotantopotentiaali Tampereella
Kandidaatintutkielma
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2022

Aurinkosähkön suosio on kasvanut viime vuosikymmeninä kiihtyvällä tahdilla ja myös aurinkopaneelien tekniikka on kehittynyt merkittävästi. Aurinkovoimalan tuotantoon kuitenkin vaikuttaa vahvasti leveyspiiri, jolla voimala sijaitsee sekä vallitseva sää ja ilmasto. Tässä työssä tutkitaan vuosina 2019 ja 2020 Tampereen yliopiston tutkimusvoimalassa mitattuihin säteilyvoimakkuuksiin ja paneelilämpötiloihin perustuen nykyaikaisen aurinkovoimalan tuotantopotentiaalia Tampereella. Koska mallinnus pohjautuu alueella tehtyihin todellisiin mittauksiin, tulokset ovat todenmukaisempia kuin internetissä saatavilla olevien laskurien arviot.

Aluksi on käyty läpi aurinkokennon toimintaperiaate diodimallista alkaen ja esitelty kaavat, joilla voimalan energian tuotantoa mallinnetaan. Työssä käytettyyn malliin on tehty muutamia yksinkertaistuksia laskennan keventämiseksi, mutta niillä ei ole merkittävää vaikutusta tuotantoarvioihin. Tuotantolaskelmissa on käytetty kuvitteellista asuinkerrostalon katolle rakennettua voimalaa, jonka nimellisteho on 100,5 kW. Voimala koostuu 268:sta Salo Solarin Suomessa valmistamasta yksikideaurinkopaneelistä, joissa jokaisessa on 72 aurinkokennoa. Työn toisessa osassa käsitellään tuotantolukuja ja tarkastellaan tuotannon vaihtelua vuosi-, kuukausi- ja päivätasolla.

Tulosten mukaan voimala osui hyvin voimalatoimittajien antamiin 900–1 000 tunnin huippunkäyttöaika-arvioihin. Vuosi 2020 oli hieman parempi energiantuotantovuosi vuoteen 2019 verrattuna. Erot vuosien välillä olivat suurempia kuukausitasolla, jossa yksittäisen kuukauden tuotanto saattoi olla jopa moninkertainen toisen tarkasteluvuoden vastaavaan aikaan verrattuna. Valtaosa vuoden energiasta tuotettiin huhti-elokuussa ja alkuvuosi oli keskimäärin loppuvuotta tuottoisampaa, jolloin useana päivistä ei tuotettu lainkaan energiaa.

Työssä korostui energiavaraston tarve, sillä voimalan tuotanto huippukuukausina selvästi ylitti talotekniikan ja asuntojen oletetun kulutuksen. Lisäksi energian tuotannossa esiintyi päivien välillä yhden asunnon kuukausienergian suuruisia vaihteluja.

Avainsanat: Aurinkovoimala, tuotanto, asuinkerrostalo, energiavarasto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. AURINKOPANEELIN MALLINTAMINEN	3
2.1 Diodimalli	4
2.2 Oikosulkuvirta ja avoimen piirin jännite	5
2.3 Virta-jännitekäyrän täyttökerroin.....	5
2.4 Ideaalisuuskerroin.....	7
3. ESIMERKKIVOIMALA.....	8
4. TUTKIMUSAINEISTO	11
5. TUOTANTOLASKUT	14
5.1 Vuosituotanto	15
5.2 Kuukausituotanto	17
5.3 Päivävaihtelut.....	20
6. POHDINTA JA YHTEENVETO	23
LÄHTEET	24

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Merkintä	Selite
I_{SC}	Oikosulkuvirta
$I_{SC,STC}$	Oikosulkuvirta STC-olosuhteissa
V_{OC}	Avoimen piirin jännite
$V_{OC,STC}$	Avoimen piirin jännite STC-olosuhteissa
R_S	Sarjaresistanssi
R_{SH}	Shunttiresistanssi
T	Paneelin lämpötila
K_i	Oikosulkuvirran lämpötilariippuvuus
K_v	Avoimen piirin jännitteen lämpötilariippuvuus
G	Säteilyvoimakkuus
G_{STC}	Säteilyvoimakkuus STC-olosuhteissa
P_{MP}	Maksimitehopisteen teho
V_{MP}	Maksimitehopisteen jännite
I_{MP}	Maksimitehopisteen virta
k	Boltzmannin vakio
q	Alkeisvaraus
$P_{STC,voimala}$	Voimalan kokonaisteho STC-olosuhteissa
A	Ideaalisuuskerroin
FF	Täyttökerroin
N_S	Kennojen lukumäärä paneelissa
N_P	Paneelien lukumäärä voimalassa

Lyhenne	Selite
STC	Standardoidut testiolosuhteet
AM	Ilmamassaluku
Q1	Ensimmäinen vuosineljännes
Q2	Toinen vuosineljännes
Q3	Kolmas vuosineljännes
Q4	Neljäs vuosineljännes

1. JOHDANTO

Aurinkosähkö on kansainvälisen energijärjestö IEA:n mukaan maailman nopeimmin kasvava uusiutuvan energian tuotantomuoto, sen kattaessa 60 % vuosittaisista lisäyksistä uusiutuvan sähkön tuotantokapasiteettiin. IEA:n ennusteen mukaan uutta aurinkosähkökapasiteettia asennetaan vuosina 2021–2026 jopa 1 100 GW, mikä on kaksinkertainen määrä edelliseen viisivuotisjaksoon verrattuna. [1] Kasvuvauhti ei ole hiipumassa lähitulevaisuudessa, sillä aurinkovoimalla on merkittävä rooli energiasektorin pyrkimyksissä hiilineutraaliksi.

Aurinkosähkön rooli on siis kasvamassa merkittävästi tulevina vuosina, myös Suomessa, jossa on perinteisesti ajateltu aurinkosähkön tuotannon olevan pitkien talvien vuoksi kannattamatonta. [2] Näin ei kuitenkaan ole, sillä kesän pitkät päivät ja etelän maihin verrattuna viileämmät päivät takaavat kohtuullisen vuosittaisen tuotannon. Viimeaikaiset polttoaineiden ja päästöoikeuksien hintojen kasvun vaikutukset sähkön hintaan entisestään parantavat aurinkosähkön kannattavuutta.

Sen lisäksi, että aurinkovoimalat ovat taloudellisesti kannattavia ja tuotantonsa suhteen päästöttömiä, parantavat ne myös sähköverkon toimitusvarmuutta. Kun eri kokoisia aurinkovoimaloita on ripoteltuna ympäri verkkoa, ei yhden suuremmankaan voimalan putoaminen verkosta aiheuta merkittävää häiriötä. Myös verkkoalueiden saarekekäytön edellytykset paranevat tilanteissa, joissa kantaverkkoon kohdistuu laajoja häiriöitä, kun perinteisten, polttoaineisiin perustuvien voimaloiden tukena on paikallista tuotantoa. Tunti- ja päivävaihteluiden tasoittamiseksi voimalat tarvitsevat kuitenkin energiavaroja ja valtaosa talvikauden energiasta tulee tuottaa jollakin muulla tuotantomuodolla.

Työssä mallinnetaan laskennallisesti nykyaikaisen aurinkovoimalan tuotantomahdollisuuksia Tampereella, perustuen Tampereen yliopiston tutkimusvoimalassa mitattuihin säteilyvoimakkuus- ja paneelilämpötilamittauksiin. Työssä tarkastellaan kuukausittaista ja vuotuista vaihtelua energian tuotannossa sekä voimalan elinkaaren aikana tuotettua energiaa. Toisessa luvussa esitellään aurinkopaneelin toiminta aurinkokennosta ja diodista alkaen, sekä tuotannon laskemiseen käytettävät kaavat. Kolmannessa luvussa esitellään työssä käytettävä, asuinkerrostalon katolle mitoitettu voimala ja neljännessä työssä käytetty tutkimusaineisto. Viidennessä luvussa käsitellään voimalan tuotantoa ja

siihen vaikuttavia tekijöitä ja lopuksi kuudennessa luvussa kootaan yhteen työn havainnot.

2. AURINKOPANEELIN MALLINTAMINEN

Aurinkopaneelit koostuvat useista sarjaan kytketyistä aurinkokennoista, jotka voidaan mallintaa pn-puolijohdeliitoksina eli diodeina. Aurinkokennon toiminta perustuu fotosähköiseen ilmiöön, jossa auringosta kennolle saapuvat fotonit virittävät tyhjennysalueella elektroneja valenssivyöltä johtavuusvyölle luoden vapaita elektroneja ja aukkoja. Tyhjennysalueen sähkökenttä ajaa aukot ja elektronit pois tyhjennysalueelta vastakkaisille puolille pn-liitosta. Kun pn-liitoksen yli kytketään ulkoinen piiri, elektronit virtaavat sen kautta aukoilta ja rekompinoituvat takaisin valenssivyölle. Lopputuloksena on aurinkokenno, joka tuottaa auringon säteilystä tasavirtaa ulkoiseen virtapiiriin.

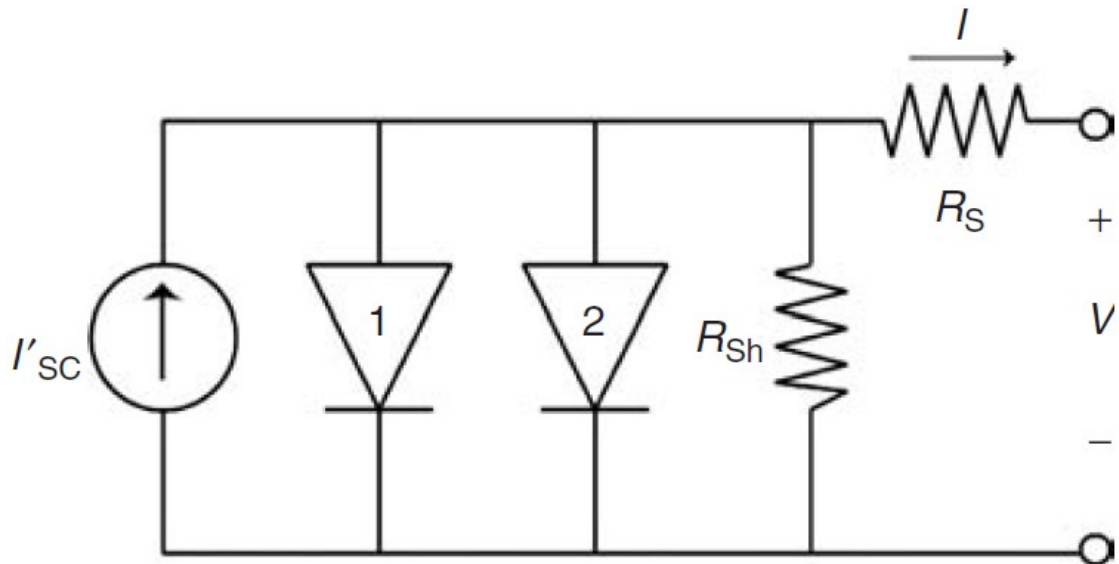
Kennon tuottamaan virtaan vaikuttaa pääasiassa auringosta kennolle saapuva säteilyvoimakkuus ja kennon kyky absorboida eri aallonpituuksia. Nykyaikaisen kennon hyötysuhde on noin 20 %. Kennon jännite on lähes vakio säteilyvoimakkuudesta riippumatta, mutta korkeampi kennon lämpötila pienentää kennon jännitettä.

Aurinkopaneelissa on tyypillisesti kymmeniä aurinkokennoja kytkettynä sarjaan, jolloin yksittäisten kennojen jännitteet summautuvat virran määräytyessä heikoimman kennon mukaan. Sarjaan kytkennällä paneelille saadaan yksittäistä kennoa suurempi teho samalla virralla, mikä pienentää virtalämpöhäviöitä aurinkovoimalan muissa järjestelmissä.

Aurinkopaneelia mallinnettaessa on käytettävä paneelin valmistajan ilmoittamia parametreja, jotka valmistaja on mitannut STC-olosuhteissa. Lyhenne STC tulee englannin kielen sanoista *Standard Test Conditions* ja tarkoittaa standardoituja testiolosuhteita. STC-olosuhteissa paneelille saapuva säteilyvoimakkuus on $1\,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, paneelin lämpötila on 25 °C ja ilmamassaluku on $1,5 \text{ AM}$ [3]. Ilmamassaluku kuvaa auringon säteilyn kulkemaa matkaa ilmakehässä suhteessa zenitissä olevan auringon säteilyn matkaan. [4]

2.1 Diodimalli

Aurinkokennoa mallinnetaan tyypillisesti kahden diodin rinnankytkennällä, kuten kuvasta 1 nähdään. Diodeilla mallinnetaan kennossa tapahtuvaa elektronien rekompinoitumista johtavuusvyöltä takaisin valenssivyölle ja resistansseilla kennon johtimissa syntyviä virtalämpöhäviöitä. Sekä rekompinoituminen että loisresistanssit aiheuttavat häviöitä, jotka heikentävät kennon kykyä tuottaa sähköenergiaa. [3]



Kuva 1. Aurinkokennon kaksiodimalli [3]

Kaksiodimallin käyttäminen aurinkovoimalan energian tuoton arvioimiseen on kuitenkin laskennallisesti tarpeettoman raskasta, joten toinen diodeista voidaan poistaa ja ottaa yksinkertaistus huomioon ideaalisuuskertoimella A [3]. Myös loisresistanssit R_S ja R_{SH} voidaan jättää huomioimatta samasta syystä. Oletuksista ja yksinkertaistuksista huolimatta myöhemmin esiteltäviä tuotantoarvioita voidaan pitää riittävän luotettavina, sillä ne perustuvat todellisiin sääolosuhdemittauksiin, eikä sääolosuhteiden keskiarvoistuksiin.

Aurinkopaneelin energian mallintaminen erilaisissa säteilyvoimakkuus- ja lämpötilaolosuhteissa onnistuu, kun tunnetaan paneelin oikosulkuvirta I_{SC} , avoimen piirin jännite V_{OC} , virta-jännitekäyrän täyttökerroin FF sekä paneelin ideaalisuuskerroin A .

2.2 Oikosulkuvirta ja avoimen piirin jännite

Paneelin oikosulkuvirta on virta, joka syntyy, kun paneeliin kytketty ulkoinen piiri oikosuljetaan, ja sen suuruus riippuu pääasiassa paneelille saapuvasta säteilyvoimakkuudesta sekä hieman paneelin lämpötilasta. Yksidiodimallin mukainen oikosulkuvirta, kun loisresistanssit jätetään huomiotta, saadaan laskettua kaavalla: [5]

$$I_{SC} = I_{SC,STC}(1 + K_i\Delta T) \frac{G}{G_{STC}}, \quad (2.2.1)$$

missä $I_{SC,STC}$ on oikosulkuvirta standarditestiolosuhteissa, K_i on paneelin oikosulkuvirran lämpötilariippuvuus, ΔT on paneelin lämpötilan poikkeama standarditestiolosuhteiden lämpötilasta, G on paneelille saapuva säteilyvoimakkuus ja G_{STC} on standarditestiolosuhteiden säteilyvoimakkuus.

Avoimen piirin jännite, eli paneelin jännite, kun ulkoinen piiri ei ole kytkettynä, saadaan yksinkertaisesti korjaamalla testiolosuhteiden avoimen piirin jännitettä sen lämpötilariippuvuudella, kaavan:

$$V_{OC} = V_{OC,STC}(1 + K_v\Delta T) \quad (2.2.2)$$

mukaan. Kaavassa (2.2.2) $V_{OC,STC}$ on paneelin avoimen piirin jännite testiolosuhteissa ja K_v on paneelin avoimen piirin jännitteen lämpötilariippuvuus.

2.3 Virta-jännitekäyrän täyttökerroin

Virta-jännitekäyrän täyttökerroin FF kuvaa kuinka lähellä suorakaidetta virta-jännitekäyrän muoto on. Toisin sanoen se kuvaa pinta-alojen suhdetta maksimitehopisteen virran ja jännitteen sekä oikosulkuvirran ja avoimen piirin jännitteen välillä. [3] Täyttökertoimen ihanteellinen arvo on 1, mutta koska lämpötila pyöristää virta-jännitekäyrää, sen voi saavuttaa teoreettisesti vain absoluuttisessa nollapisteessä.

Täyttökerroin voidaan laskea jakamalla paneelin maksimiteho avoimen piirin jännitteen ja oikosulkuvirran tulolla, kaavalla: [3]

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC}I_{SC}} = \frac{V_{MP}I_{MP}}{V_{OC}I_{SC}}. \quad (2.3.1)$$

Kaavassa (2.3.1) P_{MP} on paneelin maksimitehopisteen teho, V_{MP} maksimitehopisteen jännite ja I_{MP} maksimitehopisteen virta.

Kaavasta (2.3.1) voidaan ratkaista paneelin teho, kun avoimen piirin jännite, täyttökerroin ja oikosulkuvirta tunnetaan. Tällöin saadaan kaava:

$$P_{MP} = FF \cdot V_{OC}I_{SC}, \quad (2.3.2)$$

josta voidaan ratkaista paneelin teho vallitsevissa sääolosuhteissa. Koska täyttökerroin kuitenkin muuttuu lämpötilan vaikutuksesta, tarvitaan toinen yhtälö sen ratkaisemiseksi muissa kuin STC-olosuhteissa [3]:

$$FF = \frac{V_{OC} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{qV_{OC}}{kT} + 0.72\right)}{V_{OC} + \frac{kT}{q}}. \quad (2.3.3)$$

Kaavassa (2.3.3) k on Boltzmannin vakio, T vallitseva lämpötila kelvineissä ja q alkeisvaraus.

Yhtälö (2.3.3) on kuitenkin kirjoitettu yksittäiselle kennolle ja yksidiodimallilla, joten se on muokattava paneelille ja toisen diodin puuttuminen on huomioitava ideaalisuuskertoimella A . Yhtälö (2.3.3) saadaan muokattua oikeaksi, kun kaikkia kT -termejä kerrotaan paneelissa olevien kennojen lukumäärällä N_S ja ideaalisuuskertoimella A . Näin saadaan yhtälö:

$$FF = \frac{V_{OC} - \frac{N_S A k T}{q} \ln\left(\frac{q V_{OC}}{N_S A k T} + 0.72\right)}{V_{OC} + \frac{N_S A k T}{q}}. \quad (2.3.4)$$

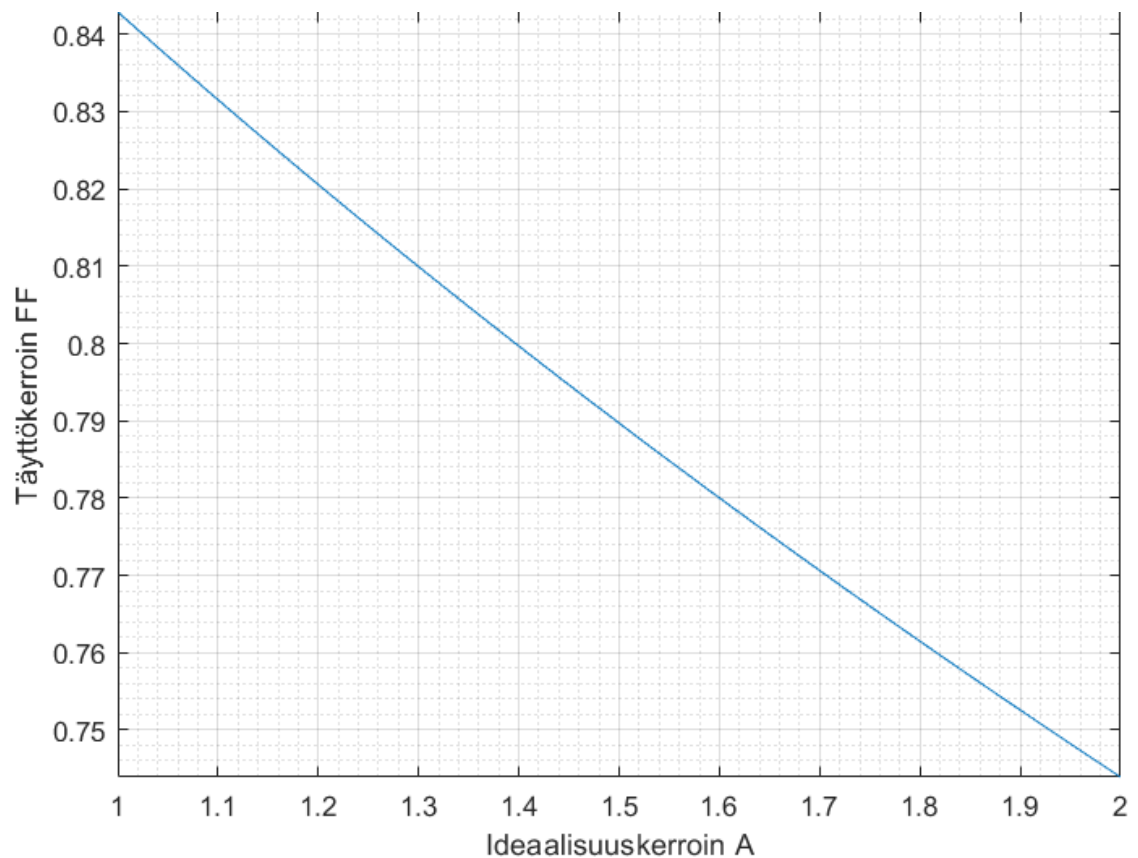
Koko voimalan teho saadaan laskettua, kun yhtälöä (2.3.2) kerrotaan voimalassa olevien paneelien lukumäärällä N_P :

$$P_{MP} = FF \cdot V_{OC} I_{SC} N_P. \quad (2.3.5)$$

2.4 Ideaalisuuskerroin

Ideaalisuuskerroinella A otetaan huomioon yksinkertaistus, joka tehdään, kun kaksidimensionaalinen muutetaan yksidimensionaaliseksi. A saa tyypillisesti arvoja 1:n ja 2:n väliltä. [3]

A voidaan ratkaista helpoiten testiolosuhteiden arvoilla, jotka esitellään tarkemmin seuraavassa luvussa. Ensimmäinen on ratkaistava STC-olosuhteiden täyttökerroin kaavalla (2.3.1), jonka jälkeen sitä voidaan käyttää A :n ratkaisemiseen kaavasta (2.3.4). Käyttämällä seuraavassa luvussa esiteltäviä esimerkkipaneelin teknisiä tietoja, voidaan yhtälö (2.3.4) esittää A :n funktiona, jolloin saadaan kuva 2.



Kuva 2. Yhtälön (2.3.4) kuvaaja

Kuten kuvasta 2 nähdään, A :n arvoksi saadaan 1,52, kun STC-olosuhteiden täyttökerroin FF on 0,7873. Ideaalisuuskerroin on kennosta riippuva vakio, eikä se muutu olosuhteiden mukana.

3. ESIMERKKIVOIMALA

Koska työn tarkoituksena on selvittää, kuinka paljon nykyaikainen aurinkovoimala tuottaisi sähköenergiaa Tampereen leveyspiirin tuntumassa, esimerkkipaneeliksi valittiin Salo Solar Oy:n Suomessa valmistama yksikideaurinkopaneeli SS375-M. Paneelin STC-olosuhteiden teho on 375 wattia ja sen hyötysuhde on 19,54 % [6]. Alla olevaan taulukoon 1 on kerätty paneelin keskeisimmät tekniset tiedot, joiden avulla niistä muodostettavan voimalan tuotantoa voidaan arvioida.

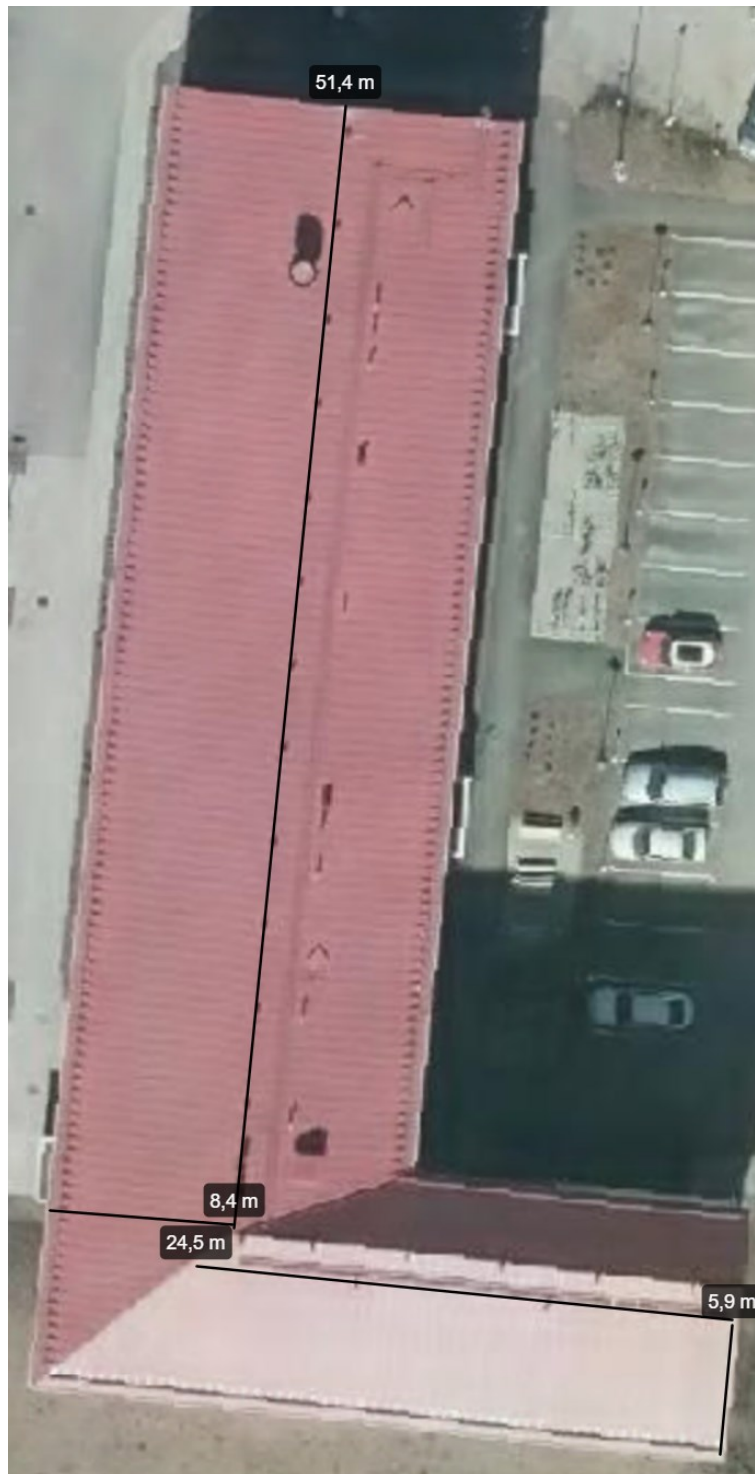
Taulukko 1. *Esimerkkipaneelin datalehdeltä poimitut tekniset tiedot [6].*

Maksimitehopisteen teho, P_{MP}	375 W
Maksimitehopisteen jännite, V_{MP}	40,07 V
Maksimitehopisteen virta, I_{MP}	9,359 A
Avoimen piirin jännite, V_{OC}	48,77 V
Oikosulkuvirta, I_{SC}	9,766 A
Jännitteen lämpötilariippuvuus, K_v	$-0,14090 \frac{V}{^{\circ}C}$
Virran lämpötilariippuvuus, K_i	$0,00391 \frac{A}{^{\circ}C}$
Kennojen lukumäärä paneelissa	72 kpl
Paneelin koko (pituus x leveys)	1952 x 992 mm

Taulukon arvot on ilmoitettu STC-olosuhteissa, ja lämpötilariippuvuuksien arvot on muutettu prosenteista kertoimiksi jäljempänä suoritettavan laskennan yksinkertaistamiseksi.

Koska invertterien hyötysuhteet putoavat merkittävästi paneelien tuottaman virran läheisyydessä nollaa, todellinen voimala ei tuota hyödynnettävää energiaa matalilla säteilyvoimakkuuksilla. Työssä oletetaan, että alle $80 \frac{W}{m^2}$ säteilyvoimakkuudella voimala ei tuota energiaa [7]. Näin estetään kuun ja valosaasteen sekä lumipeitteen läpi tulevan vähäisen säteilyn vaikutukset tuotantolaskelmiin.

Esimerkkivoimala voidaan mitoittaa alla olevassa kuvassa esitetylle asuinkerrostalon katon siten, että katosta käytetään etelä- ja länsilappeet.



Kuva 3. Ortoilmakuva asuinkerrostalosta pituusmittauksineen [8].

Kuvassa 3 pohjoinen osoittaa suoraan ylös, joten lyhyempi rajattu lape osoittaa lähes suoraan etelään ja pidempi rajattu lape länteen. Pohjoiseen ja itään osoittaville lappeille ei mitoiteta paneeleita, sillä ne jäävät ainakin osan päivästä varjoon eivätkä paneelit toimisi silloin tehokkaasti.

Käyttämällä kuvan 3 mittauksia ja taulukon 1 tietoja yksittäisen paneelin mitoista, voidaan laskea, että etelälappeelle mahtuu 5 paneelia vaakatasossa etelä-pohjoissuunnassa ja lappeen leveysuunnassa 12 paneelia kullekin viidelle riville. Vastaavasti länsilapelle mahtuu 8 paneelia päällekkäin ja kullekin riville 26 paneelia. Yhteensä paneeleja mahtuu katolle:

$$N_p = 5 * 12 + 8 * 26 = 268 \text{ kpl},$$

jolloin voimalan kokonaisteho STC-olosuhteissa on:

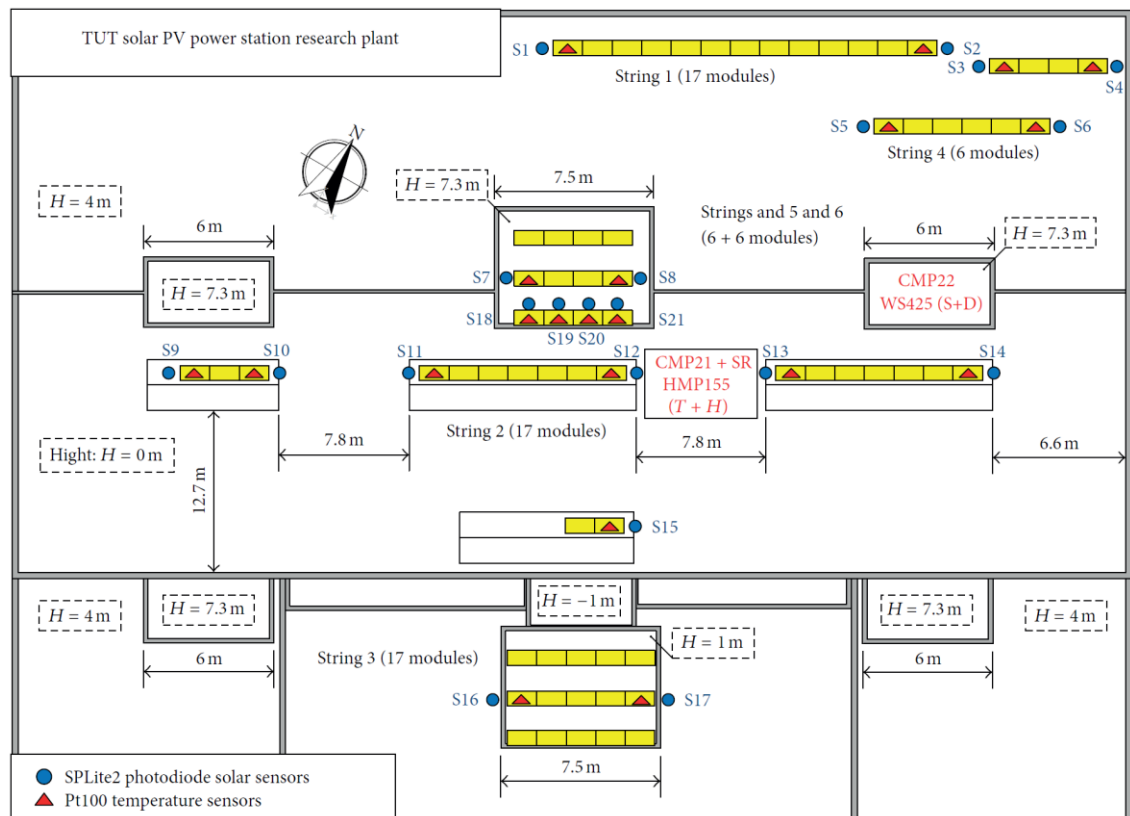
$$P_{STC,voimala} = 268 * 375 \text{ W} = 100\,500 \text{ W} = 100,5 \text{ kW}.$$

Länsilapella oleva ilmanvaihtokanava vie tilaa muutamalta paneelilta paitsi kokonsa, mutta myös varjonsa takia. Lisäksi paneelien asentaminen optimaaliseen kallistuskulmaan kohti etelää luo niiden taakse varjoja, joten paneeleja ei voi asentaa kiinni toisiinsa. Nämä tekijät vähentävät kyseiselle katolle mahtuvaa paneelimäärää, mutta 100,5 kilowatin voimala asunkerrostalon katolla on realistinen, katon ollessa sopiva. Voidaan siis olettaa, että voimala mahtuu kuvan 3 katolle ja paneelit asennetaan kuten seuraavassa luvussa esiteltävässä tutkimusvoimalassa.

4. TUTKIMUSAINEISTO

Mittausdata on kerätty vuosina 2019 ja 2020 Tampereen yliopiston, Hervannan kampuksella sijaitsevan Sähkötalon katolla olevasta tutkimusvoimalasta. Työssä käytetään yhdeltä paneelilta mitattuja paneelilämpötiloja sekä saman paneelin vieressä olevan säteilyvoimakkuusmittarin mittauksia. Säteilyvoimakkuusmittari on mallia *SPLite2* [9].

Alla olevassa kuvassa 4 on esitelty tutkimusvoimalan kokoonpano. Kuvassa paneelit on merkitty keltaisilla suorakaiteilla, säteilyvoimakkuusmittarit sinisillä palloilla ja lämpötilamittarit punaisilla kolmioilla. Työssä käytettävä data on kerätty paneelille S19 asennetuista mittareista.



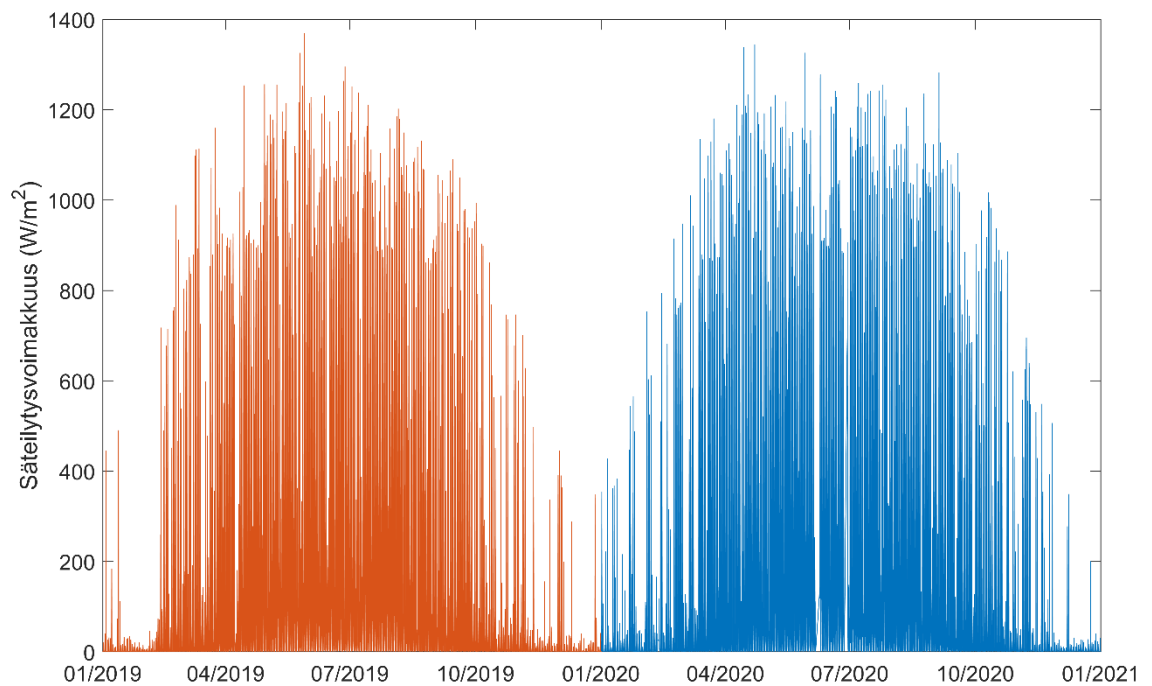
Kuva 4. Tutkimusvoimalan pohjapiirros. [9]

Paneelit osoittavat hieman kaakkoon, tarkalleen suuntaan 154° ja paneelien kallistuskulma horisonttiin nähden on 45° [9]. Jotta mittausdata olisi vertailukelpoista, työssä oletetaan, että esimerkkivoimalan paneelit asennetaan edellä mainitusti.

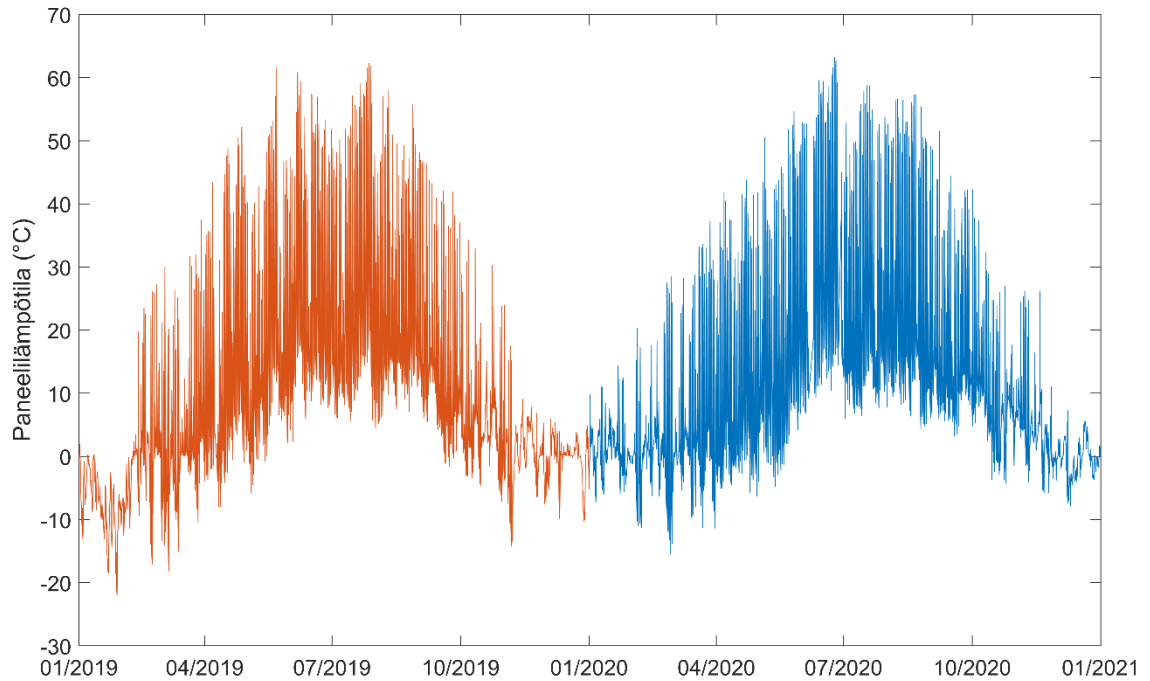
Työssä käytettävää dataa on harvennettu siten, että mittapisteitä on joka 10:s sekunti. Näin laskujen suorittaminen ei ole yhtä raskasta kuin kaikilla mittapisteillä laskettaessa,

eikä 10 sekunnin aikana ehdi tapahtua sellaisia muutoksia, joiden huomiomatta jättäminen olennaisesti vaikuttaisi energiatuoton mallintamiseen päivä-, kuukausi- tai vuositasolla.

Mittausdatassa on jonkin verran aukkoja, jotka ovat aiheutuneet muun muassa laiterikoista. Vuonna 2020 sattui useampia pitkiä katkoja, kesäkuussa yhteensä noin 5,5 vuorokautta. Vuoden 2019 data on lähes täydellinen, sisältäen yli 99,9 % mittapisteistä. Vuoden 2020 aukot on huomioitava energian tuottotarkasteluja tehdessä etenkin lyhyillä aikaväleillä ja kesäkuussa, mutta kelpaa sellaisenaan vuositarkasteluun. Vuoden 2020 data sisältää 98,4 % mittapisteistä. Tutkimusaineisto on esitetty kokonaisuudessaan alla.



Kuva 5. Vuosien 2019 ja 2020 säteilyvoimakkuus



Kuva 6. Vuosien 2019 ja 2020 paneelilämpötila

Kuvista 5 ja 6 voidaan nähdä aiemmin mainitut aukot kesäkuussa 2020. Silmämääräisesti arvioiden vuodet vaikuttavat pääpiirteittäin samankaltaisilta, joskin vuoden 2019 talvi näyttää selvästi viileämmältä ja säteilyvoimakkuus on pienempää.

Vuonna 2020 huhti-elokuussa neliömetrin alalle saapui auringon säteilyenergiaa keskimäärin 4 920 Wh vuorokaudessa, keskilämpötilan ollessa 18,8 °C. Vastaavaan aikaan vuonna 2019 säteilyenergiaa saapui keskimäärin 4 752 Wh vuorokaudessa, keskilämpötilan ollessa 19,3 °C. Tästä voi päätellä, että vuosi 2020 tulee näyttäytymään parempana tuotantovuotena seuraavaan luvun tuotantotarkasteluissa.

5. TUOTANTOLASKUT

Alla esiteltävät tuotantolaskelmat on laskettu siten, että jokaisen tarkasteluvälin mittapisteen kohdalla on selvitetty säteilyvoimakkuus ja paneelilämpötila tutkimusaineistosta. Tämän jälkeen on laskettu kyseisellä hetkellä paneelin tuottama oikosulkuvirta ja avoimen piirin jännite, näistä täyttökerroin ja lopulta voimalan hetkellinen teho. Hetkellisten tehojen keskiarvolla saadaan voimalan, tarkastelujakson aikana, tuottama energia, kun sitä kerrotaan tarkastelujakson tunneilla. Keskimääräisten tehojen laskemiseen käytetty Matlab-koodi on esitetty kuvassa 7. Tuotantolaskennassa ei huomioida voimalan muissa komponenteissa, kuten inverttereissä syntyviä häviöitä.

```

215 % Vuosi 2020
216 % yyyy-MM-dd HH:mm:ss.S
217 % Päivän alussa kellonaika on 00:00:0X ja lopussa 23:59:5X
218
219 % Tarkastelujakson aloitusaika
220 aika_alku = '2020-01-01 00:00:0';
221 % Aloitusaikaa vastaava indeksi
222 Indeks_alku = find(contains(data.time, aika_alku))
223
224
225 % Tarkastelujakson päättymisaika
226 aika_loppu = '2020-01-31 23:59:5';
227 % Päättymisaikaa vastaava indeksi
228 Indeks_loppu = find(contains(data.time, aika_loppu))
229
230
231 % Ideaalisuuskerroin
232 A = 1.52;
233 % Kennojen lukumäärä paneelissa
234 Ns = 72;
235 % Paneelien lukumäärä voimalassa
236 N_p = 268;
237
238 % Alustetaan muuttuja tehojen summalle
239 P_mp_sum = 0;
240 % Alustetaan indeksimuuttuja
241 i = Indeks_alku;
242
243 % Lasketaan tarkasteluvälin tehojen summa
244 while i <= Indeks_loppu
245     G = data.irradiance(i); % Indeksiiä vastaava säteilyvoimakkuus
246     T = data.temperature(i) + 273.15; % Indeksiiä vastaava paneelilämpötila
247
248     % Lasketaan teho vain jos säteilyvoimakkuus on enemmän kuin 80 W/m2
249     if G > 80
250         dT = T - T_STC; % Lämpötilaero STC-olosuhteisiin verrattuna
251         I_sc = I_sc_STC * (1 + K_i*dT) * (G/G_STC); % Oikosulkuvirta
252         Voc = Voc_STC + (K_v * dT); % Avoimen piirin jännite
253         FF = ((Voc - ((A.*Ns.*k.*T) ./ q) .* log((q .* Voc) ./ (A.*Ns.*k.*T) + 0.72)) ./ (Voc + ((A.*Ns.*k.*T) ./ q))); % Täyttökerroin
254         P_mp_sum = P_mp_sum + (FF * Voc * I_sc * N_p); % Tehojen summa
255     end
256
257     i = i + 1;
258 end
259
260 % Mittapisteiden lukumäärä
261 N_mittapiste_2020 = ((Indeks_loppu - Indeks_alku) + 1)
262 format long g
263
264 % Keskimääräinen teho kW
265 P_avg_2020 = P_mp_sum / N_mittapiste_2020 / 1000
266
267
268 % Energia kWh
269 E_2020 = ((P_avg_2020 * 10 * N_mittapiste_2020) / 3600)

```

Kuva 7. Keskimääräisten tehojen laskentakoodi

Kokonaisenergia on laskettava erikseen keskimääräisestä tehosta ja tarkastelujakson tunneista, sillä kuvan 7 rivillä 269 esitetty tapa laskea tarkastelujakson kokonaisenergia ei anna tarkkaa tulosta tutkimusaineiston aukkojen vuoksi. Se antaa kuitenkin osviittaa suuruusluokasta erillislaskun tarkistusta varten.

5.1 Vuosituotanto

Alla olevassa taulukossa 2 on esitetty voimalan laskennallinen jatkuva ympärivuorokautinen keskiteho, vuoden aikana tuotettu kokonaisenergia sekä keskimääräinen päiväenergia vuosilta 2019 ja 2020. Energialaskuissa on otettu tutkimusaineiston aukot huomioon laskemalla energia keskitehosta. Vuonna 2020 oli yksi päivä enemmän vuoteen 2019 verrattuna, mikä on huomioitu päiväenergiassa. Taulukkoon on myös laskettu kuinka monen kerrostaloasunnon vuotuisen sähkönkulutuksen voimala kattaa, jos vuosikulutukseksi oletetaan 2 000 kWh asuntoa kohden.

Taulukko 2. Voimalan vuosien 2019 ja 2020 keskitehot, vuotuiset kokonaisenergiat, keskimääräiset päiväenergiat sekä tuotannolla katettujen asuntojen lukumäärät

	Jatkuva keskiteho (kW)	Vuoden aikana tuotettu energia (MWh)	Keskimäärin päivässä tuotettu energia (kWh)	Asuntoja
2020	11,17	98,10	268,0	49,0
2019	10,37	90,86	248,9	45,4

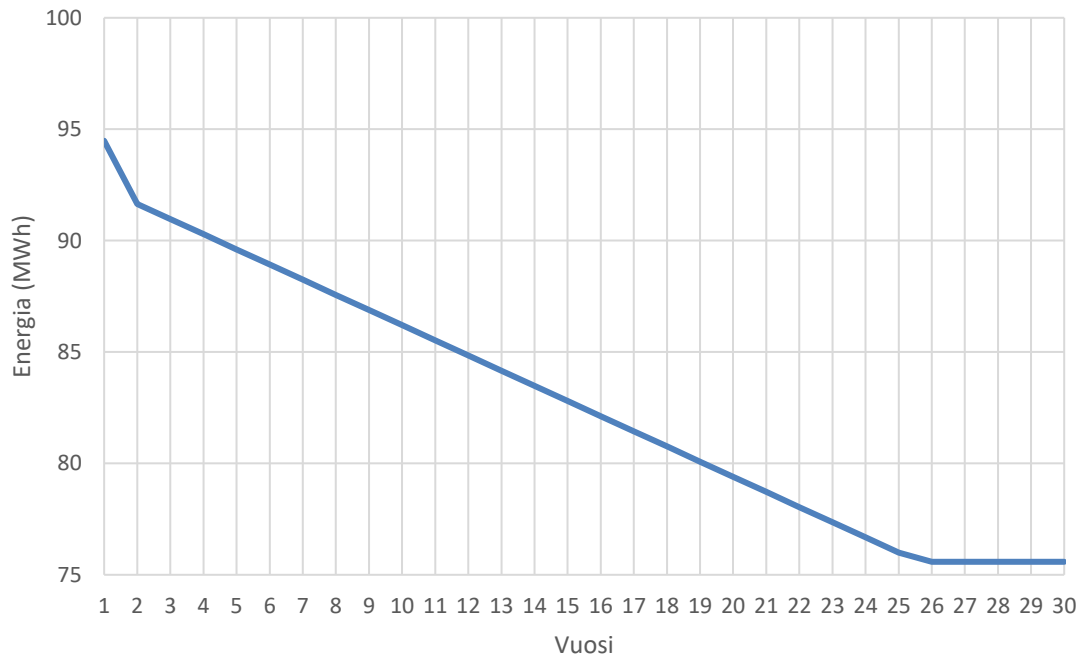
Kuten taulukosta 2 nähdään, tuotanto vuonna 2020 oli ylimääräinen päivä huomioiden vuotta 2019 suurempaa. Jos vuodet oletetaan yhtä pitkiksi, vuonna 2020 tuotettiin 7,67 % enemmän energiaa vuoteen 2019 verrattuna. Ero selittynee osin sillä, että Ilmatieteen laitoksen mukaan vuoden 2020 ”Talvi eli joului-helmikuu oli poikkeuksellisen tai ennätysellisen lauha lähes koko maassa –” [10]. Koska talvi on ollut lauha, lumipeite paneelien päällä on sulanut aiemmin, mahdollistaen suuremman energiantuotannon. Talvien erot ovat selkeästi nähtävissä, kun vertailee säteilyvoimakkuuksia kuvassa 5.

Rakennuksessa, johon voimala on mitoitettu, on noin 70 asuntoa, joten voimalalla kattaa noin 67 % asuntojen kuluttamasta sähköstä. Osa voimalan tuotannosta kuluu kuitenkin talotekniikkaan, joten todellisuudessa asuntojen kuluttaman sähkön kattavuus on hie-man pienempi. Ongelmana on myös se, että voimala tuottaa eniten sähköä kesällä, kesälomakauden aikoihin, jolloin sähkönkulutus on tavallista pienempää, eli sähköä jouduttaisiin myymään verkkoon kesäisin ja ostamaan verkosta talvisin.

Voimalan ikääntyessä sen tehokkuus heikkenee pikkuhiljaa, mistä seuraa se, että vanhempi voimala ei enää tuota yhtä paljon energiaa kuin uusi voimala samoissa olosuhteissa. Tyypillisesti paneelien tehokkuus putoaa ensimmäisten vuosien aikana muutama prosenttia. 10 vuoden aikana tehokkuus heikkenee alle 10 % ja 25 vuoden aikana alle 20 %. [3] Esimerkkivoimalassa käytettyjen paneelien valmistajan mukaan sen valmistamien paneelien tehokkuus heikkenee alle 3 % ensimmäisen vuoden aikana, alle

0,72 % vuosittain sitä seuraavien 24 vuoden aikana ja 25 vuoden jälkeen tehokkuus olisi vähintään 80 % [6].

Alla olevaan kuvaan 8 on mallinnettu voimalan tuottama vuosittainen energia 30 vuoden ajalta, kun ikääntymisestä aiheutuva tehokkuuden heikkeneminen huomioidaan. Ensimmäisen vuoden energiana on käytetty taulukosta 2 laskettua vuosien 2019 ja 2020 vuosien energioiden keskiarvoa, 94,48 MWh. Malli on paneelien takuun mukainen pahin mahdollinen tilanne.



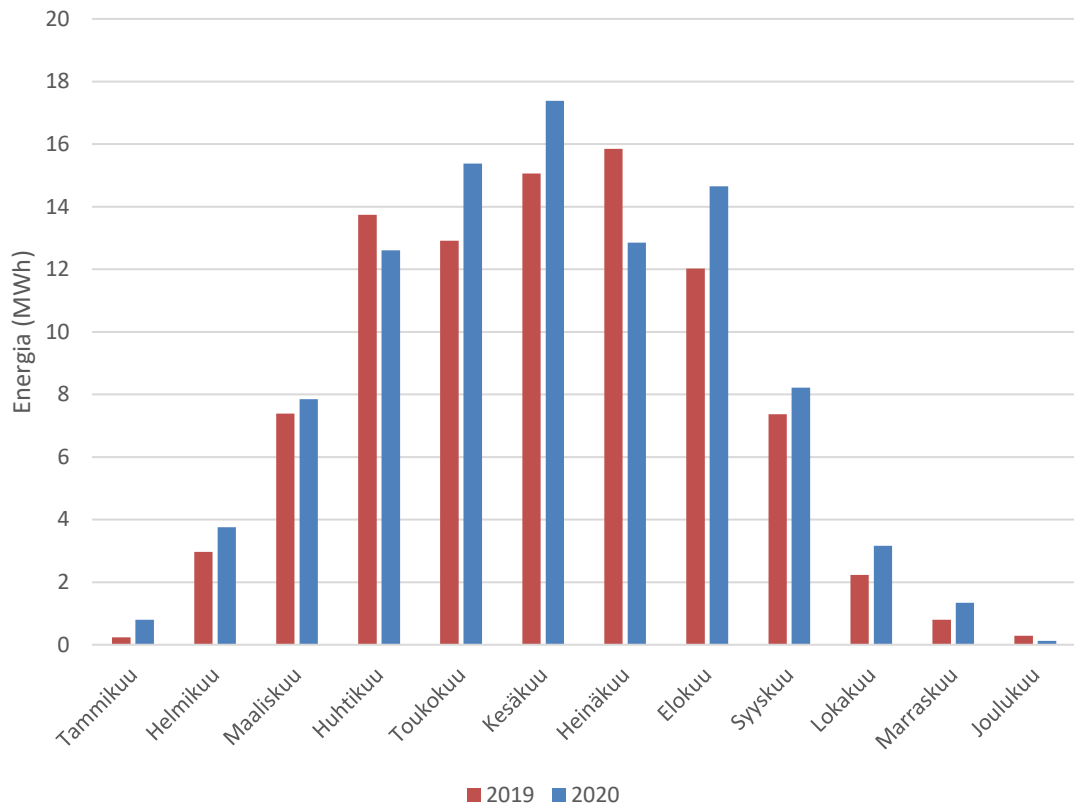
Kuva 8. Ikääntyvän voimalan vuosittainen energia 30 vuoden pitoajalla

30 vuoden pitoajan aikana heikkenevä voimala tuottaa energiaa yhteensä 2,484 GWh, kun tehokkuutensa säilyttävä ideaalinen voimala olisi tuottanut 2,834 GWh. Todellinen tuotanto pitoajan aikana jää siis noin 12,4 % ideaalista voimalaa pienemmäksi.

Voimalan huipunkäyttöaika vuonna 2020 oli 976 tuntia ja vuonna 2019 904 tuntia. Arvot ovat linjassa aurinkovoimalatoimittajien Suomeen rakennettaville voimaloille antamien huipunkäyttöaika-arvioiden kanssa. Useimmat toimittajat arvioivat huipunkäyttöajaksi 900–1 000 tuntia vuodessa. Vuodesta riippuen esimerkivoimalan tuotanto on joko arvioiden ylä- tai alapäässä, 940 tunnin keskiarvon sijoittuessa hieman arvioiden keskiarvoa alemmaksi.

5.2 Kuukausituotanto

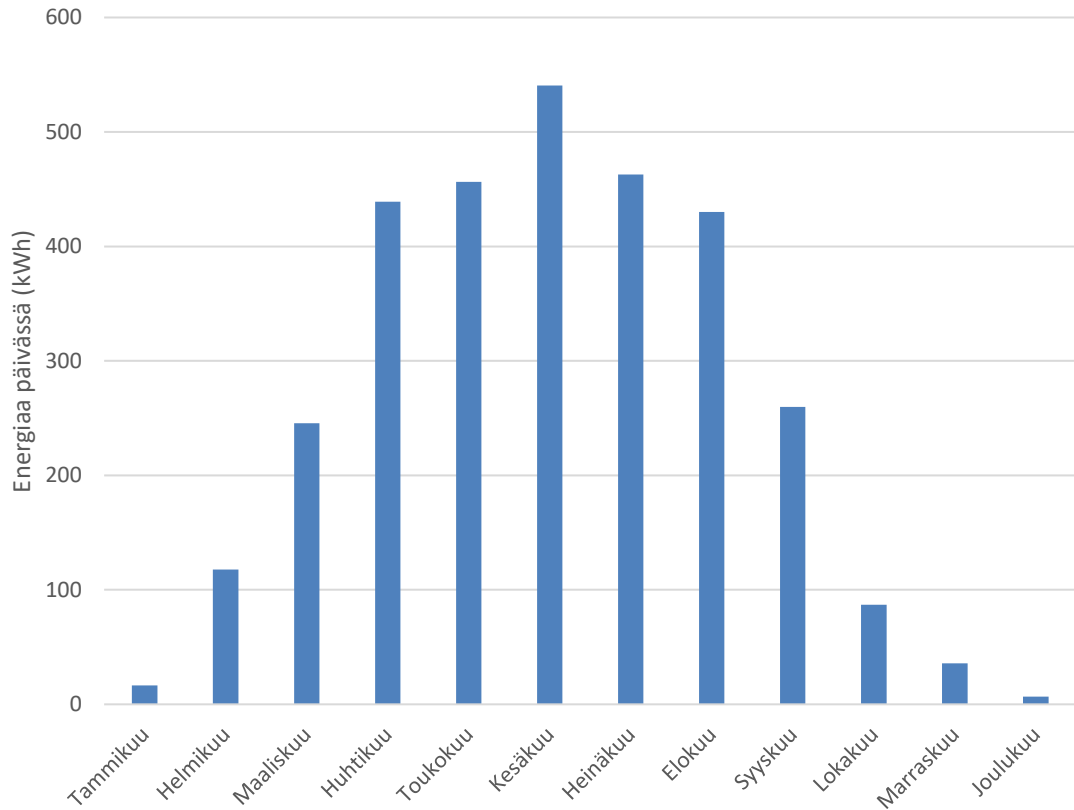
Kuten kuvasta 5 jo nähtiin, säteilyvoimakkuus vaihtelee rajusti vuodenajasta riippuen, mikä luonnollisesti näkyy suoraan kuukausien aikana tuotetussa energiassa. Alla olevassa kuvassa 9 on esitetty molempien tarkasteluvuosien kuukausittaiset energiantuotannot.



Kuva 9. Vuosien 2019 ja 2020 kuukausittainen kokonaisenergia

Kuvasta 9 nähdään, että huhti-elokuu on energiantuotannon kannalta otollisinta aikaa, sillä sen aikana voimala tuotti keskimäärin yli 75 % koko vuoden energiasta. Vuoden 2020 tammikuu sekä loka-marraskuu ovat selvästi edellistä vuotta tuottoisampia, mutta kesällä esiintyy suurempaa vaihtelua tuotannossa vuosien välillä. Vuonna 2020 17 MWh:n huipputuotanto saavutettiin kesäkuussa, kun edellisen vuoden huipputuotanto jäi noin 16 MWh:iin heinäkuussa.

Koska tuotanto on sääriippuvaista ja sää vaihtelee merkittävästi vuosien välillä, on energiantuotannon kuukausivaihteluja mielekkäämpää vertailla kahden tarkasteluvuoden keskiarvoina. Samalla voidaan huomioida erot kuukausien pituuksissa vertailemalla kokonaisenergioiden sijaan päiväkohtaista keskienergiaa. Alla olevassa kuvassa 10 on esitetty tarkasteluvuosien keskimääräinen päiväkohtainen energiantuotanto.



Kuva 10. Vuosien 2019 ja 2020 keskimääräinen kuukausittainen päiväenergia

Kuten kuvasta 10 nähdään, energian tuotanto kasvaa jyrkästi alkuvuodesta ja tasaantuu kesäksi. Tämä johtuu siitä, että paneelien tuotanto ei seuraa auringon liikettä paneelien päällä olevan lumipeitteen vuoksi. Kun lumipeite paneelien päällä sulaa tyypillisesti maaliskuun aikana, paneeleille saapuva säteilyn määrä kasvaa kerralla huomattavasti, mikä näkyy voimakkaana kasvuna tuotetussa energiassa maalisi-huhtikuun välillä.

Kesäkuu on vuoden tuottoisin kuukausi, päivittäisen tuoton ollessa 541 kWh. Kesäkuun tuotto on selvästi viereisiä kuukausia suurempaa, mikä on seurausta kuvassa 9 näkyvästä piikistä vuoden 2020 kesäkuun tuotannossa. Jos keskiarvo laskettaisiin useamman vuoden ajalta, eron voidaan olettaa tasoittuvan ja tuotannon olevan symmetristä kesäkuun molemmin puolin.

Loppuvuonna tuotanto laskee jyrkästi päivien lyhentyessä sekä pilvisyyden lisääntyessä ja lopulta lumen peittäessä paneelit. Viimeinen vuosineljännes on selvästi ensimmäistä heikkotuottoisempi. Ilmiö johtunee siitä, että vuoden 2020 alku oli poikkeuksellinen sekä siitä, että syksy on kevättä pimeämpää aikaa.

Alla olevaan taulukkoon 3 on koottu kuukausien ja vuosineljänneksien aikana keskimäärin tuotetut energiat, kun kaikkien kuukausien pituudeksi oletetaan 30,4 päivää, kuukausien ja vuosineljänneksien osuus vuoden kokonaisenergiasta sekä tuotetulla energialla

katettujen asuntojen lukumäärä. Yhden asunnon kuukausikulutuksena käytetään noin 166 kWh:a ja vuosineljänneskulutuksena 500 kWh:a. Laskennassa oletetaan tasakulutus kaikille vuoden kuukausille, mutta pitkät lomakaudet kesällä pienentänevät kulutusta hieman kesä-elokuussa. Koska kerrostaloasunnot ovat tyypillisesti kaukolämmitettyjä, ei niiden sähkökulutus ole talvella merkittävästi muuta vuotta suurempaa.

Taulukko 3. *Kuukausien ja vuosineljänneksien kokonaisenergiat ja osuudet vuoden tuotannosta, sekä energialla katettujen asuntojen lukumäärä*

	Kokonaisenergia (kWh)	Osuus vuoden energiasta (%)	Asuntoja
Tammikuu	505	0,54	3,0
Helmikuu	3 577	3,80	21,5
Maaliskuu	7 468	7,93	44,8
Huhtikuu	13 344	14,17	80,1
Toukokuu	13 872	14,73	83,2
Kesäkuu	16 436	17,45	98,6
Heinäkuu	14 070	14,94	84,4
Elokuu	13 077	13,88	78,5
Syyskuu	7 899	8,39	47,4
Lokakuu	2 647	2,81	15,9
Marraskuu	1 085	1,15	6,5
Joulukuu	204	0,22	1,2
Q1	11 551	12,26	23,1
Q2	43 651	46,35	87,3
Q3	35 046	37,21	70,1
Q4	3 937	4,18	7,9

Kuten taulukosta 3 nähdään, valtaosa vuoden energiasta tuotetaan vuoden keskivaiheilla, jolloin voimala kattaa selvästi asuntojen sähköntarpeen. Kesäkuussa voimala kattaa asuntojen kulutuksesta lähes 141 %, jolloin energiaa jää varastoitavaksi tai verkkoon myytäväksi häviöiden ja talotekniikan kulutuksen jälkeen, etenkin kun asuntojen sähkökulutuksen voidaan olettaa olevan vähäisempää kesälomien vuoksi.

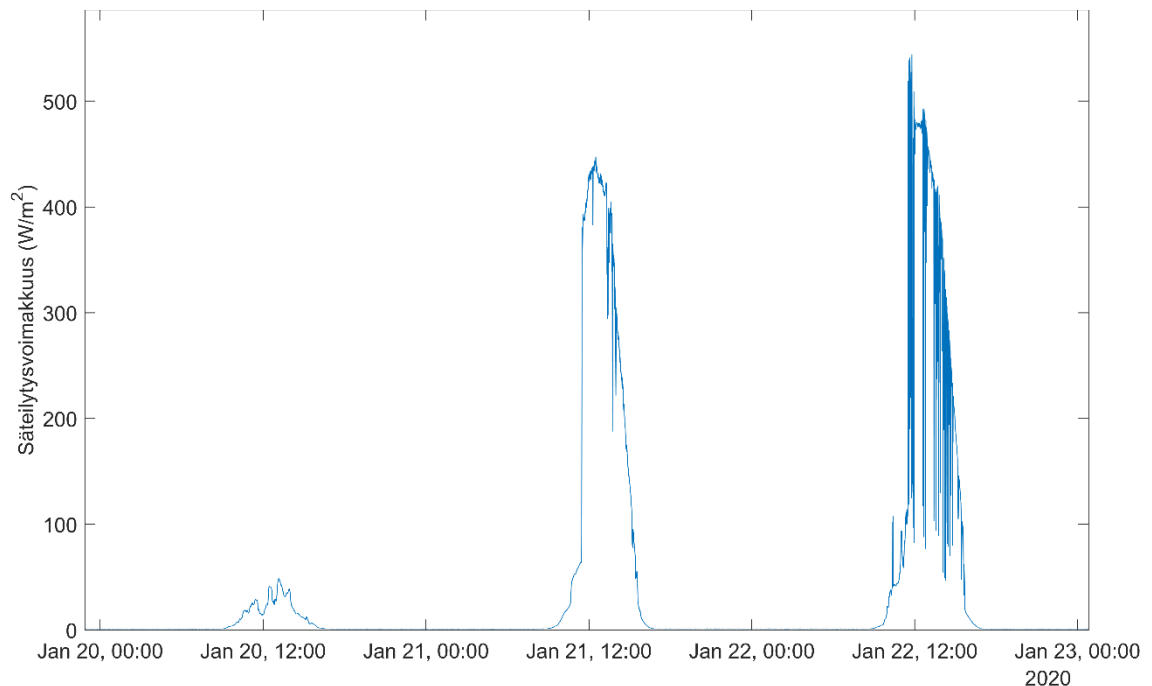
Alku- ja loppuvuoden tuotannot jäävät vaatimattomiksi. Ensimmäinen ja viimeinen vuosineljännes kattavat yhdessä vain 16,4 % vuoden tuotannosta, josta selvästi muita kuukausia tuottoisamman maaliskuun osuus on 8 prosenttiyksikköä. Talven heikoimpina kuukausina, tammi- ja joulukuussa voimala kattanee talotekniikan ja ulkovalaistuksen

tarpeet, mutta asunnoille energiaa ei jää liiemmin jaettavaksi. Ulkovaistuksen syöttäminen voimalan energialla edellyttää energiavarausta, joilla voidaan myös tasoittaa päivittäisiä vaihteluja energian tuotannossa ja näin kasvattaa itse hyödynnetyn energian osuutta.

5.3 Päivävaihtelut

Kun kuukausivaihteluiden pääsyy on maan asema suhteessa aurinkoon ja siitä johtuvat vuodenaikamuutokset säässä, päivävaihteluihin vaikuttaa pääasiassa lyhytaikaiset muutokset säässä. Pääsiallisena syynä on pilvipeitteen esiintyvyys ja paksuus, mutta myös lämpötilalla ja tuulisuudella on vaikutusta paneelilämpötilaan ja sitä kautta paneelin hyötysuhteeseen. Koska päivän tuotannon määrää kunkin päivän sää, esiintyy päivien välillä merkittäviä eroja tuotannossa.

Alla olevassa kuvassa 11 on esitetty tammikuun 2020 parhaan tuotantopäivän ja sitä edeltäneiden kahden päivän säteilyvoimakkuudet. Tammikuun 20. päivänä ei tuotettu lainkaan energiaa, sillä säteilyvoimakkuus ei ylittänyt aiemmin asetettua $80 \frac{W}{m^2}$ raja-arvoa. Seuraava päivä oli kuukauden kolmanneksi tuottoisin ja sitä seuraava tuottoisin.

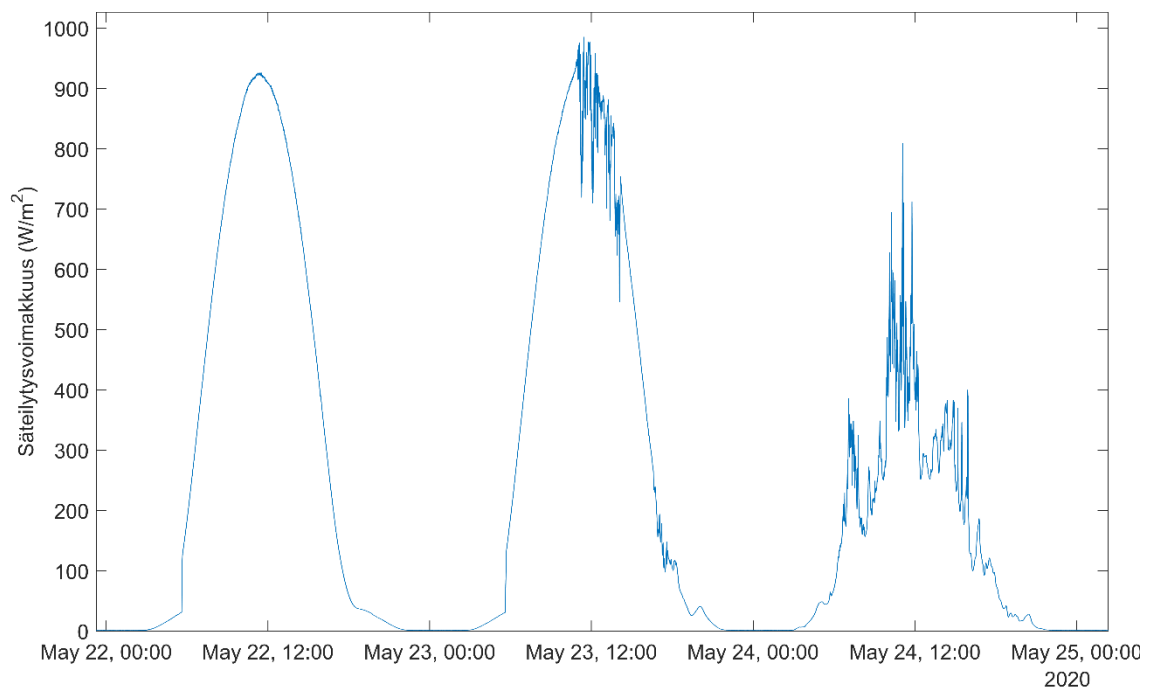


Kuva 11. Tammikuun 20., 21. ja 22. päivän säteilyvoimakkuus

Kuva 11 on erinomainen esimerkki siitä, kuinka merkittävää vaihtelu voi olla. Tammikuun 22. päivän tuotanto oli 134 kWh ja sitä edeltävänä päivänä hieman pienempi 126 kWh. Vaikka 22. päivänä esiintyi selvästi enemmän pilvisyyttä 21. päivään verrattuna, pilvet

keskittivät auringon säteilyä, jonka ansiosta paneelin kokema säteilyvoimakkuus oli suurempaa ja paneeli tuotti hieman enemmän energiaa. Toukokuun 20. päivän tuotanto on jäänyt nolnaan, koska pilvipeite on ollut niin paksu, ettei riittävä määrä säteilyä ole saavuttanut paneelia.

Kuvasta 12 nähdään vielä selkeämmin, että täysin selkeä päivä ei ole paras mahdollinen tilanne puhtaasti paneelien energian tuotantoa ajatellen. Sähköverkon jännitteen laadun ja voimalan invertterien toiminnan kannalta tasainen tuotanto on kuitenkin parempi, kuin hieman suurempi mutta vaihteleva tuotanto.



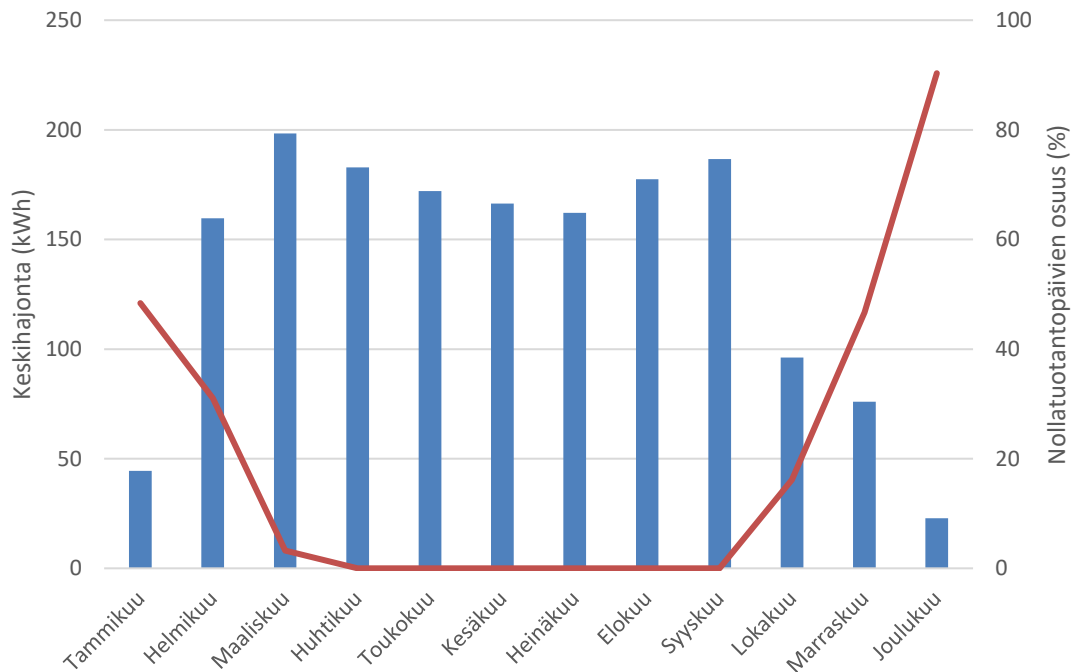
Kuva 12. Toukokuun 22., 23. ja 24. päivän säteilyvoimakkuus

Vuoden 2020 tuottoisin päivä oli toukokuun 23., jolloin tuotanto oli 740 kWh. Vaikka sitä edeltänyt päivä oli täysin pilvetön, eikä merkittävästi lämpimämpi, jäi edeltävän päivän tuotanto 14 kWh pienemmäksi. Toukokuun 24. päivänä tuotanto putosi alle puoleen edeltävästä päivästä ja tuotanto oli päivän aikana epävakaata.

Tuotannon epävakaas luo haasteita voimalalla tuotetun energian hyödyntämiseen omassa kulutuksessa, sillä yhtenä päivänä tuotantoa on yli oman kulutuksen ja seuraavana päivänä sitä ei ole riittävästi. Tällöin ylijäämäenergia joudutaan myymään verkkoon ja alijäämätilanteessa ostamaan energiaa verkosta, jolloin ostetusta energiasta täytyy maksaa myös sähkövero, arvonlisävero ja verkkopalvelumaksu. Koska osa aurinkovoimalan taloudellisesta kannattavuudesta perustuu edellä mainittujen maksujen välttämiseen, heikkenee voimalan kannattavuus kuvan 12 tilanteessa ilman energiavarastoa.

Energiavarastolla voidaan tasata tuotannon ja kulutuksen epäsuhtaa, jotta verkosta ostetulta energialta vältyttäisiin mahdollisimman usein. Varastojen ongelmana asuinkerrostaloissa on kuitenkin korkea investointikustannus sekä niiden vaatima tila.

Alla olevaan kuvaan 13 on koottu kuukausien energiantuotannon keskihajonnat sekä niiden päivien osuus, joiden aikana ei ole tuotettu lainkaan energiaa. Keskihajonta on esitetty pylväsdiagrammina ja nollatuotantopäivät viivadiagrammina.



Kuva 13. Kuukausittainen tuotannon keskihajonta ja nollatuotantopäivien osuus

Tammikuun sekä loppuvuoden keskihajonnat ovat selvästi kesäkuukausia pienempiä, mutta tämä on seurausta nollatuotantopäivien suuresta määrästä. Muina kuukausina keskihajonta asettuu 150–200 kWh:n välille, nollatuotantopäivien määrän painuessa nol- laan. Pahimmillaan tuotanto voi siis vaihdella päivien välillä yhden asunnon kuukausiku- lutuksen verran, mikä korostaa energiavaraston tarvetta.

6. POHDINTA JA YHTEENVETO

Aurinkovoimaloiden hintojen pienentyminen ja tehokkuuksien parantuminen yhdistettynä kohonneeseen sähkön hintaan saanee yhä useamman kiinteistön hankkimaan aurinkovoimalan katolleen. Työn tulosten perusteella kiinteistön katolle asennettava voimala voisi kattaa yli puolet kiinteistön vuoden aikana tarvitsemasta energiasta, joskin energia-varastolla varustettuna.

Voimalan tuotanto on sään vaihteluiden takia varsin epätasaista ja vaihtelee suuresti etenkin päivien välillä, mutta myös kuukausi- ja vuositasolla. Nopeat vaihtelut tuotannossa ovat haitallisia sähköverkon jännitteen laadulle. Nopeiden vaihteluiden ongelmaa voidaan lievittää energiavarastoilla ja samalla kiinteistö pystyy paremmin hyödyntämään tuottamaansa energiaa omaan käyttöön. Energiavarastoihin liittyy kuitenkin haasteita kuten varaston vaatiman tilan löytyminen kiinteistöstä, akkuvarastoihin liittyvä vakavan tulipalon riski sekä suuri investointi voimalaa hankittaessa.

Työn 2. luvussa esitelty malli energian tuotannolle sisältää muutamia yksinkertaistuksia, mikä vaikuttaa tuotantolaskelmiin korottavasti. Vaikutukset ovat kuitenkin niin pieniä, että niillä ei ole merkittävää vaikutusta työssä esitettyjen laskelmien suuntaa-antavuuteen. Yksittäisen voimalan tuotantoon vaikuttavia paikallisia tekijöitä on niin monia, että mallin yksinkertaistukset jäävät niiden varjoon.

Käytetty tutkimusaineisto ei ole täydellistä, mutta aukkojen vaikutusta on pyritty vähentämään käyttämällä laskennassa keskiarvoja ja tarvittaessa paikkaamaan puuttuvia arvoja. Etenkin vuosituotantoja tarkasteltaessa työssä olisi voinut käyttää useamman kuin kahden vuoden mittauksia, jotta vuosituotannosta olisi saanut voimalan elinikää paremmin kuvaavan arvion. Työn laajuuden kannalta useamman vuoden tarkastelu ei kuitenkaan ollut tarkoituksenmukaista.

Tulosten perusteella lähes ihanteellisesti asennetulta aurinkovoimalalta voi Tampereella odottaa 900–1 000 tunnin huipunkäyttöaika, jolloin 100 kW:n voimala tuottaisi sähköä parhaimmillaan 100 MWh:a vuodessa. Tuotantoa voi parantaa käyttämällä järjestelmää, joka pitää paneelien kallistuskulman ihanteellisena auringon liikkuessa taivaalla, mutta järjestelmä on altis vikaantumiselle etenkin pakkasen ja lumikuorman takia. Markkinoilla on myös aurinkopaneeleja, joilla voi sähkön lisäksi kerätä lämpöä esimerkiksi käyttöveden lämmitykseen. Paneelien takana kiertävä neste jäädyttää paneelia, mikä parantaa sähkön tuotannon tehokkuutta, mutta järjestelmän haasteena on jälleen pakkasen sekä matala nesteen lämpötila.

LÄHTEET

- [1] "Renewables 2021", IEA, Pariisi, joulukuu 2021. Viitattu: 17. maaliskuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/renewables-2021>
- [2] P. Vironen, "Aurinkopaneelien suosion hurja kasvu jatkuu - hinnat laskevat, mutta saako rahalle oikeasti katetta?", *YLE*, 10. marraskuuta 2020. Viitattu: 17. maaliskuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-11638006>
- [3] A. Luque ja S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering, second edition*, 2nd ed. Chichester, U.K: Wiley, 2010.
- [4] M. Piliouge, D. Elizondo, L. Mora-López, ja M. Sidrach-de-Cardona, "Modelling photovoltaic modules with neural networks using angle of incidence and clearness index: Modelling photovoltaic modules with neural networks", *Prog. Photovolt.*, vsk. 23, nro 4, ss. 513–523, 2015, doi: 10.1002/pip.2449.
- [5] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, ja E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays", *IEEE Trans. Power Electron.*, vsk. 24, nro 5, ss. 1198–1208, 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2013862.
- [6] "Salo - Solar Panels Esite", Salo, helmi 2022. Viitattu: 2. helmikuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: http://www.arevasolar.fi/sites/default/files/salo-solarpanels_pr.pdf
- [7] N. Mäkelä, "Aurinkopaneeliston hyötysuhteen käyttäytymisen määrittäminen havaintojen perusteella", Pro gradu -tutkielma, Jyväskylän yliopisto, 2018. Viitattu: 25. maaliskuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/60685/1/URN%3ANBN%3Afi%3Aju-201812195225.pdf>
- [8] "Ilmakuva kantakaupunki (2020) - Tampereen kaupunki", Tampereen kaupunki. Viitattu: 9. helmikuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: kartat.tampere.fi
- [9] D. Torres Lobera, A. Mäki, J. Huusari, K. Lappalainen, T. Suntio, ja S. Valkealahti, "Operation of TUT Solar PV Power Station Research Plant under Partial Shading Caused by Snow and Buildings", *Int. J. Photoenergy*, vsk. 2013, ss. 1–13, 2013, doi: 10.1155/2013/837310.
- [10] "Vuoden 2020 sää", Ilmatieteen laitos. Viitattu: 13. maaliskuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/vuosi-2020>