



TIETO- JA SÄHKÖTEKNIIKAN TIEDEKUNTA
ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

KANDIDAATINTYÖ

AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN TESTAUS

Tekijä

Kimmo Sirkka

Ohjaaja

Anssi Mäkynen

Syyskuu 2022

Sirkka K. (2022) Aurinkosähköjärjestelmän testaus. Oulun yliopisto, tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta, elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Kandidaatintyö, 19 s.

TIIVISTELMÄ

Tämän työn tarkoituksena oli koota yksinkertainen aurinkosähköjärjestelmä, mitata järjestelmän tuottaman sähköenergian määrä ja verrata tuotetun energian määrää BCDC Energian kehittämän Energiasäännusteen ennustamaan tuotantomäärään. Tarkoituksena oli selvittää ennusteen tarkkuutta ja luotettavuutta. Luotettavalla lyhyen aikavälin energiantuotantoennusteella olisi käyttöä sekä pienten ”mökkijärjestelmien” että suurten aurinkovoimaloiden energiantuotannon ennustamisessa.

Työssä käytettiin yksinkertaista aurinkosähköjärjestelmää, joka koostui aurinkopaneelista, akusta, lataussäätimestä ja näyttölaitteesta sekä kuormana käytetystä ledinauhasta. Tällaista järjestelmää kutsutaan yleisimmin off-grid-järjestelmäksi tai mökkijärjestelmäksi. Järjestelmällä suoritettiin mittauksia keväällä ja kesällä 2022 erilaisin asennuksin. Järjestelmän pienuuden takia tuotetun energian määrä jäi ennusteeseen nähden hyvin pieneksi, mutta skaalauksen avulla vertailua pystyttiin tekemään.

Avainsanat: aurinkoenergia, valosähköinen ilmiö, energiantuotanto.

Sirkka K. (2022) Testing of a photovoltaic system. University of Oulu, Degree Programme in Electronics and Communications Engineering. Bachelor's Thesis, 19 p.

ABSTRACT

The purpose of this thesis was to assemble a simple photovoltaic system, measure the electrical energy produced by the system and compare the amount of produced energy with the predicted amount that is generated by Energy weather forecast, which is produced by BCDC Energy. The idea was to evaluate the accuracy and reliability of the forecast. A reliable short-term energy production forecast would be useful for predicting the energy production of both small off-grid systems and big solar power plants.

A simple photovoltaic system was used in the thesis. The system consisted of a solar panel, a battery, a charge controller, a remote meter, and a led strip, which was used as a load. This kind of a system is usually called as an off-grid system. Measurements with the system were conducted in the spring and summer of 2022 with different installations. Due to small size of the system, the amount of produced energy was tiny relative to the amount forecast. By using scaling, comparison could be done.

Key words: solar power, photoelectric effect, energy production.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

1	JOHDANTO	7
2	TEORIA.....	8
	2.1 Aurinkokennon toiminta	8
	2.2 Aurinkopaneelien tyypit	9
	2.3 Aurinkosähköjärjestelmä.....	10
	2.3.1 Off-grid-järjestelmä	10
	2.3.2 On-grid-järjestelmä.....	11
	2.4 Aurinkoenergian tuotannon ennustaminen.....	12
3	TOTEUTUKSEN KUVAUS	13
4	MITTAUSTULOKSET	15
5	POHDINTA.....	17
6	YHTEENVETO	18
7	LÄHDELUETTELO	19

ALKULAUSE

Haluan kiittää työni ohjaajaa Anssi Mäkystä mielenkiintoisesta aiheesta sekä osaavasta ohjauksesta työn suhteen. Aihe herätti välittömästi mielenkiintoni, vaikka se tulikin vastaan yllättäen. On mielenkiintoista seurata aurinkopaneeliteknologian kehittymistä tulevaisuudessa. Pidin erityisesti työn teknisestä osuudesta eli järjestelmän kokoamisesta ja sen käyttämisestä. Teknistä osuutta enemmän aikaa kului kuitenkin työn kirjoittamiseen. Kirjoitustahtini oli melko rauhallinen, mutta olen tyytyväinen lopputulokseen. Iso kiitos vanhemmilleni tuesta ja motivoinnista työn kirjoittamiseen.

Oulussa 6.9.2022

Kimmo Sirkka

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

AC	alternating current, vaihtovirta
AGM	absorbent glass mat, eräs lyijyakun tyyppi
BIPV	building integrated photovoltaics, rakennukseen integroitu aurinkopaneelijärjestelmä
CIGS	kupari-indium-gallium-selenidi, eräs ohutkalvopaneeleissa käytetty materiaali
CIS	ks. CIGS
CPV	concentration photovoltaics, keskittävä aurinkopaneelijärjestelmä
DC	direct current, tasavirta
HIRLAM	high resolution limited area model, Ilmatieteen laitoksen sääennustusmalli
LED	light emitting diode, valodiode
MPPT	maximum power point tracking, lataussäätimissä käytetty tekniikka energiantuotannon maksimoimiseksi
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System, laskuriohjelma aurinkopaneelijärjestelmän energiantuotannon arvioimiseen
PWM	pulse width modulation, pulssinleveysmodulaatio
CdTe	kadmium-telluridi
Si	pii
°	aste
Ah	ampeeeritunti
kWh	kilowattitunti
kWp	”kilowattipiikki”, aurinkopaneelin huipputeho

1 JOHDANTO

Aurinkopaneelin sähköntuotannon edellytyksenä on auringon säteilemä valo. Kuten tiedetään, Maan pinnalle saapuvan auringonvalon määrä vaihtelee suuresti. Siihen vaikuttavat muun muassa vuodenaika ja säätila. Tuotetun aurinkosähköenergian määrä on kausittaista ja se voi vaihdella suuresti hetkittäin pilvisyyden muuttuessa.

Tässä työssä testataan yksinkertaista aurinkosähköjärjestelmää. Aurinkopaneelin tuottaman energian määrää verrataan BCDC Energian kehittämään aurinkoenergian tuotantoennusteeseen ja siten tutkitaan ennusteen paikkansapitävyyttä [5]. Luotettava ennuste tekisi mahdolliseksi, että tulevan päivän tuotantoennusteen perusteella voitaisiin määrittää etukäteen, onko aurinkosähköjärjestelmää kannattavaa pitää päällä. Kun aurinkopaneelilta ei tule tarpeeksi virtaa akun lataamiseen, aurinkosähköjärjestelmän laitteet kuluttavat akun varausta. Lisäksi ennustetta voitaisiin käyttää hyväksi aurinkosähköjärjestelmän mitoitukseen.

Sähkömarkkinoiden kannalta on tärkeää ennustaa mahdollisimman tarkasti aurinko- ja tuulisähkön tuotannon määrä, koska sähkön kulutuksen ja tuotannon tulee olla koko ajan tasapainossa, sillä suuren sähköenergiamäärän varastointi on vaikeaa. Nykyisessä maailmantilanteessa uusiutuvien luonnonvarojen käyttö energiantuotantoon on voimakkaassa kasvussa ja myös kiinnostus aurinkosähköjärjestelmiä kohtaan on nousussa.

Todennäköisesti aurinkopaneelin tuottama energia jää ennustetta pienemmäksi johtuen aurinkopaneelin epäoptimaalisesta sijoittumisesta auringon suhteen. Häviöitä aiheuttavat lähinnä esteet, kuten puut ja talot. Vertailu ennusteeseen onnistuu parhaiten sillä aikavälillä, jolloin aurinko pääsee paistamaan esteiden yli suoraan aurinkopaneeliin.

Hypoteesina on, että pitkällä aikavälillä aurinkopaneelin tuottaman energian määrä noudattaa ennusteen mukaista käyrää, mutta jää jonkin verran alhaisemmaksi. Vaihtelua esiintyy pääasiassa silloin, kun sää on ennustettua aurinkoisempaa tai pilvisempää.

Tutkielma koostuu teoriaosasta, aurinkosähköjärjestelmän kuvauksesta, mittauksista ja mittaustuloksista, pohdintaosasta sekä yhteenvedosta.

2 TEORIA

Tässä osassa käsitellään aurinkopaneelien toimintaperiaatetta, erilaisia aurinkosähköjärjestelmiä sekä aurinkosähköenergian tuotannon ennustamista.

2.1 Aurinkokennon toiminta

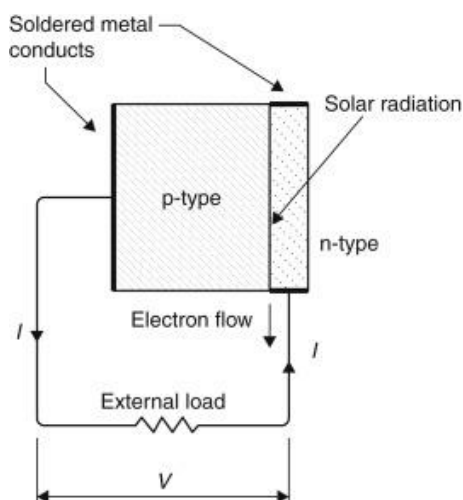
Aurinkopaneelien sähköntuotto perustuu valosähköiseen ilmiöön ja puolijohdeiden ominaisuuksiin. Aurinkopaneeli koostuu useista aurinkokennoista, jotka sisältävät puolijohdemateriaalia, useimmiten piitä. Puolijohdemateriaalia voidaan seostaa eli doupata eri alkuaineatomeilla. N-tyyppin puolijohdeella tarkoitetaan puolijohdetta, jossa on douppauksen seurauksena ylimääräisiä varauksenkuljettajia eli elektroneja. P-tyyppin puolijohde taas on doupattu siten, että siihen muodostuu aukkoja, jotka voidaan käsittää positiivisina osittaisvarauksina. [3]

Aurinkokennoissa p-tyyppin ja n-tyyppin puolijohdekerrokset ovat vierekkäin. Tällöin puhutaan p-n-liitoksesta. Liitospinnassa n-puolen vapaat elektronit yhdistyvät p-puolen aukkojen kanssa. Tästä varauksenkuljettajien liikkeestä syntyy sähkövirtaa, jota kutsutaan diffuusiovirraksi. Diffuusiovirran suunta on elektronien liikkeen vastainen, eli p-puolelta n-puolelle. P-puolen ja n-puolen väliin syntyy tyhjennysalue, jossa ei ole vapaita varauksenkuljettajia. Diffuusion seurauksena p-puolelle tyhjennysalueen läheisyyteen syntyy elektronien ylimäärä eli negatiivinen sähkövaraus. Vastaavasti n-puolella tyhjennysalueen reunalle muodostuu elektronivaje eli positiivinen varaus. Koska n-puoli on positiivisesti varautunut ja p-puoli negatiivisesti varautunut, tyhjennysalueelle muodostuu sähkökenttä. Tämän sähkökentän aiheuttamaa sähkövirtaa voidaan kutsua ajautumisvirraksi. Sen suunta on päinvastainen diffuusiovirtaan nähden, jolloin tasapainotilassa ne kumoavat toisensa. [1] [3] [4]

Kun fotoni absorboituu puolijohdeeseen, se voi synnyttää elektroni-aukko-pareja tyhjennysalueelle. Tyhjennysalueen yli olevan sähkökentän vaikutuksesta elektronit ajautuvat n-puolelle ja aukot p-puolelle. Tästä seuraa jännite-ero n- ja p-puolen välille. Kun n-tyyppin ja p-tyyppin puolet yhdistetään metallikontaktien kautta ulkoiseen kuormaan, saadaan sähkövirtaa, kun elektronit liikkuvat kuorman läpi p-tyyppin puolelle. Siellä ne rekombinoituvat aukkoihin. Kuvassa 1 on esitetty kaavio sähköntuotannosta valosähköisen ilmiön avulla [1 s.487]. [1] [4]

Mikäli elektroni-aukko-pari syntyy tyhjennysalueen ulkopuolella, missä ei ole sähkökenttää, elektroni todennäköisesti rekombinoituu atomiin. On siis toivottavaa, että varauksenkuljettajia syntyy lähellä tyhjennysalueen sähkökenttää. Tyhjennysalueen leveyttä voidaan kasvattaa suurentamalla douppauskonsentraatioiden eroa. Tyypillisesti n-tyyppi doupataan vahvemmin ja p-tyyppi heikommin. P-puoli on yleensä paksumpi kuin n-puoli. Myös pn-liitoksen välissä oleva saostamaton eli intrinsinen alue leventää tyhjennysaluetta. Tällöin kyseessä on p-i-n-liitos. [1] [2]

Vaikka fotonin energia olisi moninkertainen energiarakoon verrattuna, se voi muodostaa vain yhden elektroni-aukko-parin. Ylimääräinen energia muuttuu lämmöksi elektronien kineettisen energian kasvaessa. Myös ne fotonit, joiden energia on energiarakoa pienempi, nostavat lämpötilaa absorboituessaan puolijohdeeseen. Lämpötilan nousu aurinkokennon sisällä heikentää kennon hyötysuhdetta. On myös huomioitavaa, että osa fotoneista heijastuu pois kennosta tai kulkee kokonaan kennon läpi. [1]



Kuva 1. Periaatekuva valosähköisestä ilmiöstä.

2.2 Aurinkopaneelien tyypit

Aurinkopaneelit suunnitellaan siten, että auringonvalosta saataisiin mahdollisimman tehokkaasti sähköä. Keskeisin ominaisuus aurinkopaneelissa on siinä käytetty kennoteknologia. Kaupallisissa aurinkopaneeleissa käytetyt kennot ovat yleensä yksi- tai monikiteisiä piikkenoja (engl. crystalline silicon, c-Si) [3]. Koska pii heijastaa valoa voimakkaasti, kennot päällystetään heijastamattomalla aineella, esim. piimonoksidilla. [1] [4]

Ensimmäiset kaupalliset aurinkokennot valmistettiin yksikiteisestä piistä. Yksikiteisen piikennon etuna on hyvä hyötysuhde (tyypillisesti 15–20 %). Monikiteisten piikkenojen hyötysuhde on kidevirheistä johtuen pienempi (13–16 %), mutta niiden valmistaminen on halvempaa kuin yksikiteisten kennojen. [3] [4]

Myös amorfisesta piistä (a-Si) voidaan valmistaa kennoja. Amorfinen pii absorboi valoa tehokkaasti, jolloin sitä tarvitaan kennossa vähemmän kuin kiteistä piitä ja säästetään valmistuskustannuksissa. Lisäksi lämpötilan vaikutus a-Si-kennoihin on vähäinen verrattuna muihin kaupallisiin aurinkokennotyyppeihin. Toisaalta näiden kennojen hyötysuhde on pieni (5–10 %). Amorfisesta piistä valmistettuja kennoja käytetään ohutkalvopaneeleissa. Muita ohutkalvopaneeleissa tyypillisesti käytettyjä materiaaleja ovat kupari-indium-gallium-selenidi (CIGS/CIS) ja kadmium-telluridi (CdTe). Näistä materiaaleista tehtyjen kennojen hyötysuhde on noin 7–16 %. [1] [3] [4]

Voidaan sanoa, että yksi- ja monikiteiset kennot edustavat aurinkokennojen ensimmäistä sukupolvea ja ohutkalvokennot toista sukupolvea. Mahdollisia kolmannen sukupolven kennoja ovat mm. nanokidekennot, moniliitoskennot, orgaaniset/polymeeriset kennot, väriaineherkistetyt kennot, kaksipuoleiset kennot ja rakennuksiin integroidut kennot (engl. building integrated photovoltaics, BIPV). [1] [4]

Edellä käsiteltiin tavanomaisia aurinkopaneeleita. Uudempaa teknologiaa on keskittävä aurinkokenno (engl. concentration photovoltaics, CPV). Siinä Auringon säteet ohjataan peilien ja linssien avulla aurinkokennoihin. Kennoina voidaan käyttää korkeimman hyötysuhteen (jopa 46 %) omaavia moniliitoskennoja. CPV-tekniikka vaatii suoraa auringonvaloa, aurinkokennojen jäähtytystä ja tarkasti suunnattuja, Aurinkoa seuraavia peilejä ja/tai linssijä. [1] [3] [4]

2.3 Aurinkosähköjärjestelmä

Yhden aurinkokennon jännite on tyypillisesti n. 0,5 V, joten yleensä useampia kennoja kytketään sarjaan käyttökelpoisen jännitteen tuottamiseksi. Näitä kennoketjuja voidaan kytkeä useampia rinnan, jolloin saadaan suurempi virta. Aurinkopaneeli sisältää useita aurinkokennoketjuja, joita suojaavat tyypillisesti lasi ja alumiinikehys. [1]

Yksittäinen aurinkopaneeli on itsenäisesti toimiva moduuli. Yleensä aurinkosähköjärjestelmissä käytetään useita paneeleita (paneelisto), jotta järjestelmälle saadaan haluttu teho. Huomioitavaa on, että aurinkopaneelin tuottama virta on matalajännitteistä tasavirtaa (engl. direct current, DC). Monet laitteet kuitenkin tarvitsevat korkeamman jännitteen vaihtovirtaa (engl. alternating current, AC). Aurinkosähköjärjestelmään voidaan siis tarvita vaihtosuuntain, joka muuntaa tasavirran vaihtovirraksi. Vaihtosuuntaajaa kutsutaan myös invertteriksi englannin kielen termin ”inverter” mukaan. Nykypäivänä invertterillä tarkoitetaan yleisesti keskuslaitetta, jonka ominaisuuksia voivat olla vaihtosuuntauksen lisäksi esim. erilaiset järjestelmän säätimet. [1] [3]

Yksinkertaisimmassa aurinkosähköjärjestelmässä kuorma on kytketty suoraan aurinkopaneeliston. Tällöin kuorma saa virtaa ainoastaan auringon paistaessa, mikä rajoittaa mahdollisia käyttötarkoituksia. Kun järjestelmään lisätään akku ja lataussäädin, saadaan kuormalle virtaa myös yöllä ja pilvisellä säällä. Silloin, kun kuorma ei kuluta kaikkea paneeliston tuottamaa sähköä, ylimääräinen virta voidaan käyttää akun lataamiseen. Tällaista järjestelmää kutsutaan englanninkielisin termein stand-alone tai off-grid-järjestelmäksi ja suomeksi saareke- tai mökkijärjestelmäksi. Hybridijärjestelmässä puolestaan on edellä mainittujen lisäksi jokin muu sähköä tuottava laite, joka voi olla esim. dieselgeneraattori. [1]

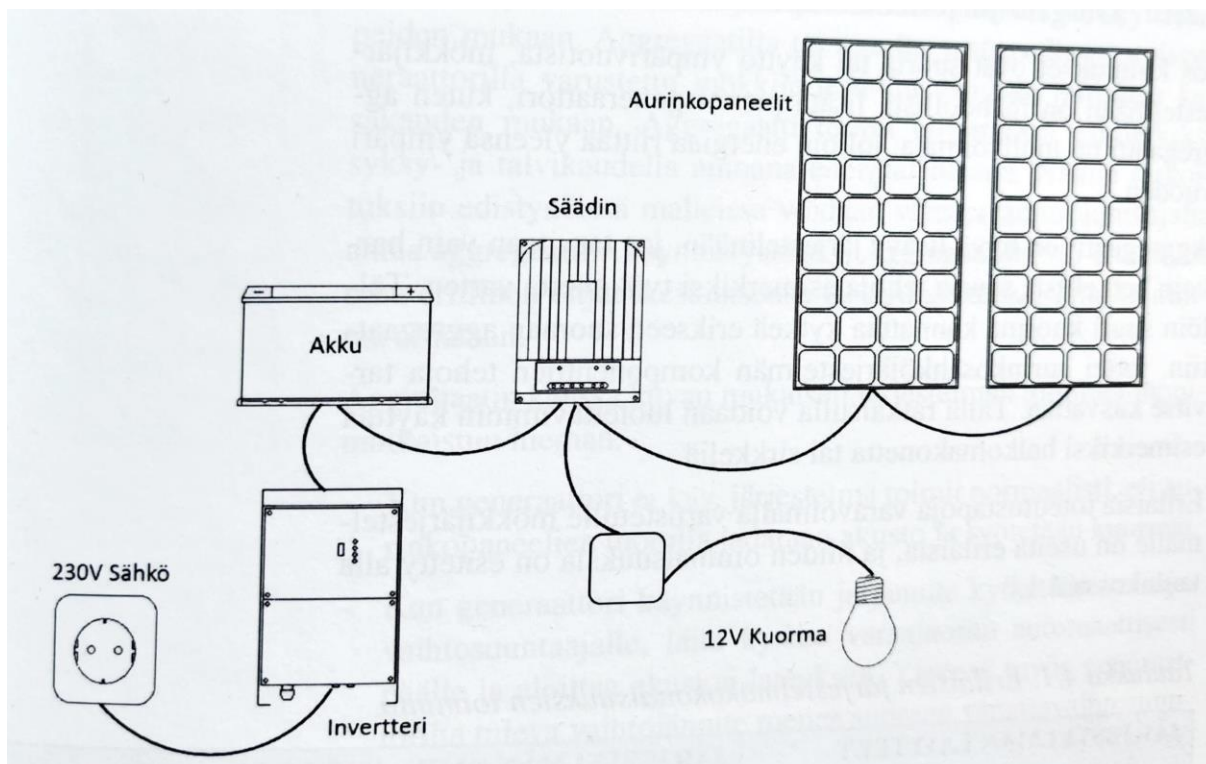
On myös mahdollista kytkeä aurinkopaneelisto suoraan sähköverkkoon, jolloin erillistä akkua ei tarvita. Tällaisessa on-grid-järjestelmässä paneeliston tuottama ylimääräinen sähköenergia myydään sähköyhtiölle. Kun taas paneelisto ei tuota tarpeeksi virtaa, voidaan tarvittava virta ostaa sähköverkosta. Sähköverkko toimii siis käytännössä sähköenergian varastona akun sijaan. [1]

2.3.1 Off-grid-järjestelmä

Off-grid-järjestelmä on nimensä mukaisesti irrallaan sähköverkosta. Se muodostaa oman verkkonsa eli ns. saarekkeen. Esimerkki tällaisesta järjestelmästä on esitetty kaaviona Kuvassa 2 [3 s.51]. Järjestelmän suurin etu on riippumattomuus sähköverkosta. Näin ollen off-grid-järjestelmä voi toimia missä päin maailmaa tahansa, kunhan auringonvalo on tarpeeksi. Myös avaruudessa aurinkosähköllä toimivat satelliitit ovat omanlaisiaan off-grid-järjestelmiä. Jos sähköverkkoa ei ole saatavilla tai sähkölinjan vetäminen tulisi kalliiksi, on off-grid-järjestelmä hyvä vaihtoehto. [3]

Sähköverkkoon kytkettyyn järjestelmään verrattuna off-grid-järjestelmät ovat yleensä kalliimpia. Hintaa nostavat erityisesti akusto ja lataussäädin. Yleensä off-grid-järjestelmän käyttäjä vastaa itse järjestelmän toiminnasta ja huoltotoimenpiteistä. Off-grid-järjestelmällä on rajoituksia etenkin suuren hetkellisen tehon tuotossa ja syötön jatkuvuudessa silloin, kun auringonvalo ei ole saatavilla. Näitä ominaisuuksia voidaan parantaa lisäämällä järjestelmään generaattori, kuten aggregaatti tai pientuulivoimala. Tällaisen lisätehonlähteen sisältävää järjestelmää kutsutaan hybridijärjestelmäksi. Lisätehonlähteen lisääminen nostaa kustannuksia ja monimutkaistaa järjestelmää. Erityisesti tuulivoimala tekee järjestelmän suunnittelusta ja tuotannon ennustamisesta monimutkaista. Toisaalta tuulivoima täydentää hyvin

aurinkosähköjärjestelmää, koska tyypillisesti talvella tuulee voimakkaammin kuin kesällä. [3] [4]

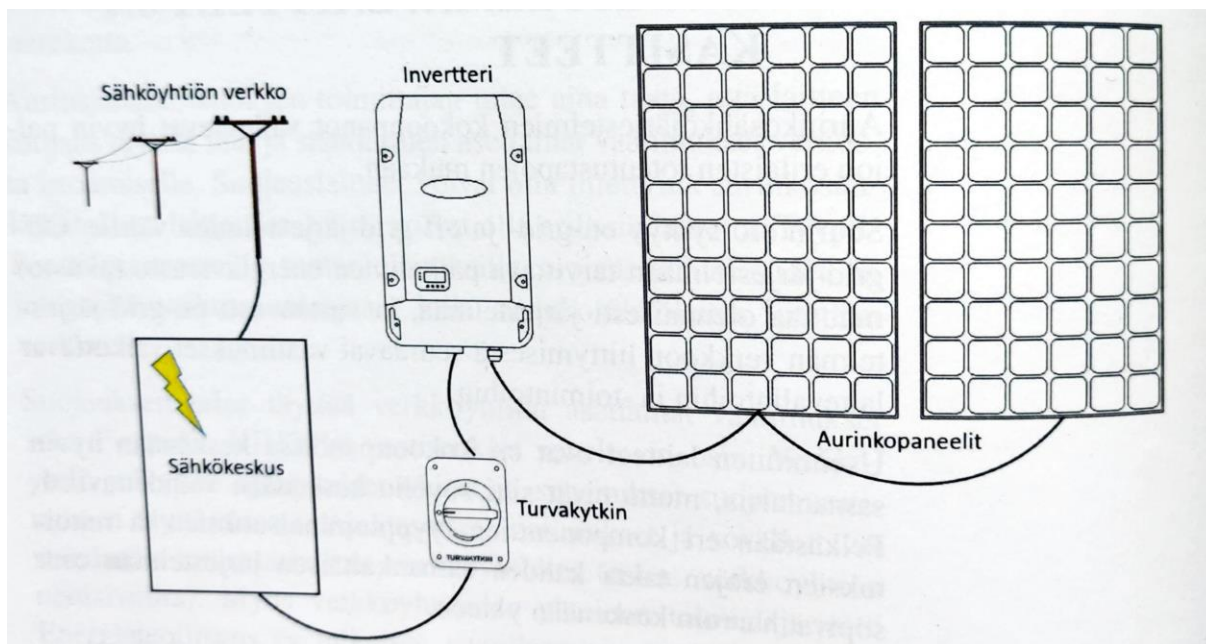


Kuva 2. Esimerkkikaavio off-grid-järjestelmästä eli mökkijärjestelmästä.

2.3.2 On-grid-järjestelmä

Sähköverkkoon kytketty järjestelmä eli on-grid-järjestelmä on useimmiten halvempi kuin edellä esitelty off-grid-järjestelmä, koska akustoa ja lataussäädintä ei tarvita. Merkittäviä kustannuksia syntyy lähinnä sähköjohtojen vetämisestä silloin, kun on-grid-järjestelmä rakennetaan kauas sähköverkosta. Kuvassa 3 on esitetty kaaviokuva on-grid-järjestelmästä [3 s.50]. [3] [4]

On-grid-järjestelmä takaa luotettavan sähkönsaannin lähes aina. Ainoastaan sähkökatkon aikana sähköä ei saada, vaikka aurinko paistaisikin. Aurinkosähköjärjestelmä ei nimittäin saa turvallisuussyistä syöttää virtaa sähköverkkoon sähkökatkon aikana. On-grid-järjestelmään on myös mahdollista liittää akusto varavirtalähteeksi, mutta se ei yleensä ole tarpeen. [3] [4]



Kuva 3. On-grid-järjestelmän periaatekuva.

2.4 Aurinkoenergian tuotannon ennustaminen

Ensimmäinen askel aurinkoenergian tuotantomäärän ennustamisessa on määrittää Auringon rata taivaalla. Auringon paikka taivaalla voidaan määrittää atsimuutti- eli suuntauskulman ja korkeuskulman avulla. Aurinkosähköjärjestelmien yhteydessä atsimuuttikulmalla tarkoitetaan astepoikkeamaa etelän suunnasta, jolloin 0° tarkoittaa etelään, -90° itään ja 90° länteen [3]. Korkeuskulma puolestaan tarkoittaa kulmaa Auringon ja horisontin välillä.

Auringon rata eri vuodenaikoina on suhteellisen helppo määrittää, ja sitä varten on olemassa työkaluja, kuten aurinkokaavio. Aurinkokaavion avulla voi arvioida myös varjostusten vaikutusta tuotantoon [3]. On myös olemassa kaupallisia mittareita, jotka määrittävät aurinkokaavion varjostuksineen koko vuodelle yhden mittauksen perusteella.

PVGIS (engl. Photovoltaic Geographical Information System) on laskuriohjelma, jonka avulla voi arvioida aurinkopaneelijärjestelmän energiantuotantoa. [6] Ohjelmaan on mahdollista syöttää aurinkosähköjärjestelmästä tietoa, jonka avulla laskuri laskee arvion järjestelmän energiantuotosta. Laskuri antaa arvion vuosituotosta, kuukausituotosta ja kuukausittaisesta keskimääräisestä päivätuotosta. PVGIS-ohjelmaa ylläpitää Euroopan komission alainen tutkimuskeskus. [3]

Aurinkosähkön tuotantoon vaikuttaa Auringon radan lisäksi pilvisyys. Lyhyen aikavälin ennusteissa on syytä keskittyä pilvisyyteen, koska se vaihtelee paljon enemmän kuin Auringon rata. Pilvien muodostuminen ja niiden liikkeet ovat kaottisia prosesseja, mikä tekee pilvisyyden ennustamisesta vaikeaa. [7]

On olemassa lukuisia menetelmiä lyhyen aikavälin sääennusteiden määrittämiseen. Tässä työssä käytetään BCDC Energian kehittämää Energiasääennustetta. Tämä ennuste perustuu Ilmatieteen laitoksen HIRLAM-säänennustusmalliin [5]. HIRLAM-säämalli (engl. High Resolution Limited Area Model) on numeerinen sääennustemalli, joka käynnistetään neljä kertaa vuorokaudessa. Jokaisen ennusteen pituus on 54 tuntia. Mallin laskenta-alue kattaa koko Euroopan ja Pohjois-Atlantin. HIRLAM on rajoitetun alueen malli, jonka hilaväli on n. 7,5 km ja pystysuunnassa malli on jaettu 65 tasoon. [8]

3 TOTEUTUKSEN KUVAUS

Työssä käytettävä aurinkosähköjärjestelmä koostuu aurinkopaneelistä, lataussäätimestä, 12 V akusta ja kuormana käytettävästä ledinauhasta. Laitteiden tarkemmat tiedot on esitetty Taulukossa 1. Mittaukset suoritettiin Oulussa maaliskuussa ja heinäkuussa 2022.

Työssä käytettiin monikiteisistä piikennoista koostuvaa aurinkopaneelia. Lataussäädin LS2024B on PWM-tyyppiä (engl. Pulse Width Modulation). Lisäksi tarvittiin näyttöyksikkö, jotta päivän aikana tuotetun energian määrä saadaan luettua.

Kevään mittauksissa järjestelmä sijoitettiin sisätiloihin, aurinkopaneeli mukaan lukien (Kuva 4.). Tällöin säätötilan vaikutus aurinkopaneelille saapuvaan säteilyyn pystyttiin minimoimaan ja olosuhteet pysyivät melko vakiona. Ulkona esimerkiksi aurinkopaneeliin kertyvä lumi olisi heikentänyt paneelin suorituskykyä. Aurinkopaneelin virittäminen ulos olisi vaatinut ainakin pidemmät johdot ja kiinnitystelineen.

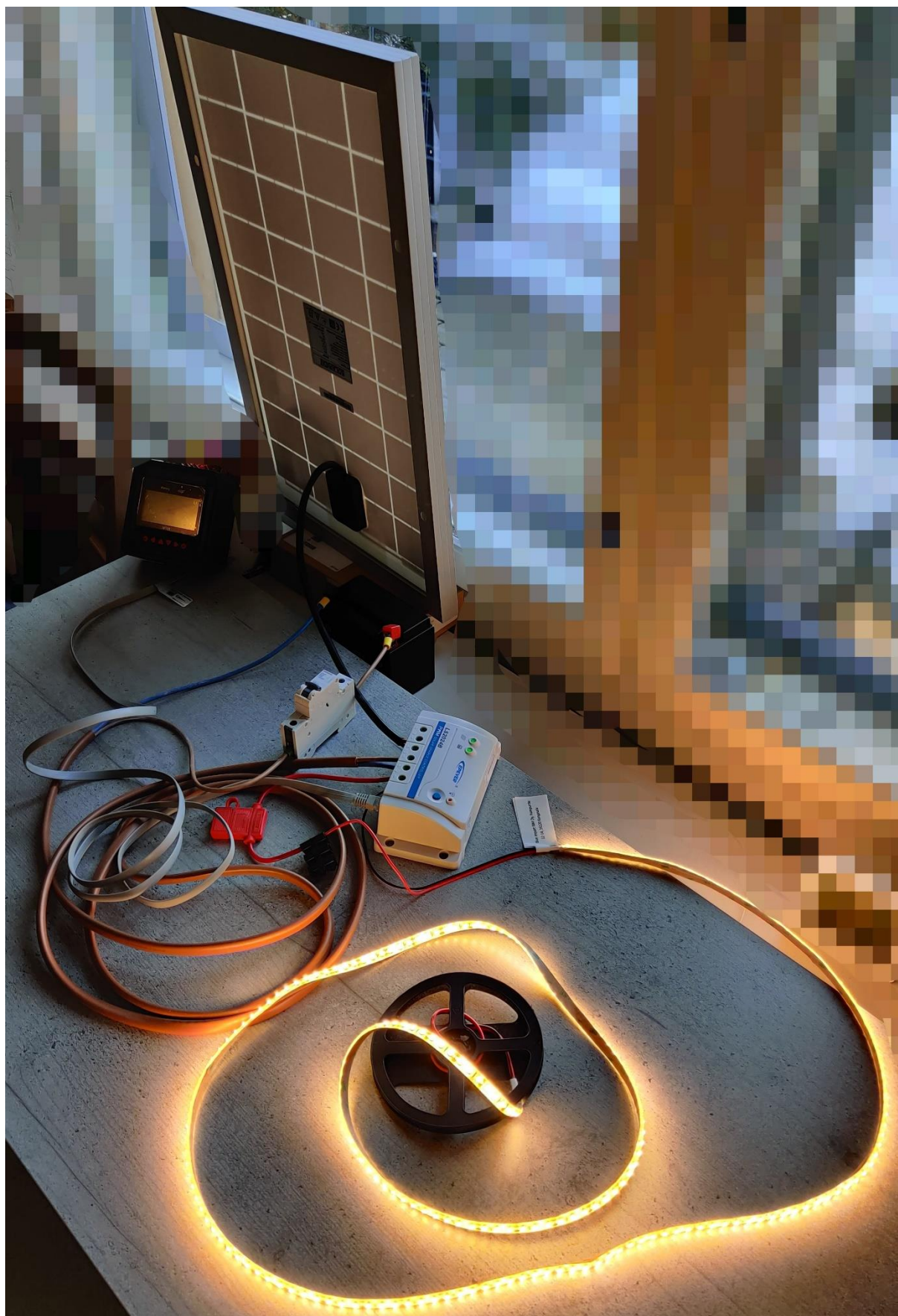
Ensimmäiset mittaukset toteutettiin maaliskuussa 2022 16 päivän ajan. Aurinkosähköjärjestelmän vuorokauden aikana tuottaman sähköenergian määrä luettiin MT-50 näyttöyksiköstä iltaisin n. kello 21 Auringon jo laskettua. Samaan aikaan luettiin BCDC:n Energiasääennuste Ouluun seuraavan 24 tunnin ajalle. Data kirjattiin Excel-tiedostoon.

BCDC:n Energiasääennusteessa oletetaan aurinkopaneelistolle 2,5 kWp huipputeho. Paneelisto on suunnattu etelään päin, ja se on asennettu 30° kulmaan vaakatasosta [5]. Työssä käytetyn aurinkopaneelin huipputeho on 30 Wp eli 0,03 kWp. Se suunnattiin etelään (suunta 180°) vajaan 90° kulmaan vaakatasosta, ks. Kuva 4.

Kesän mittauksissa aurinkopaneeli sijoitettiin ulkoseinään 4 metrin korkeudelle. Paneeli asetettiin 30° kulmaan vaakatasoon nähden ja sen suunta oli n. 165° eli hieman etelästä kaakon suuntaan. Tällä asennuksella Aurinko paistoi suoraan paneeliin n. klo 6.30–19.00 eli n. 12,5 tuntia. Tässä järjestelmässä 4 Ah akku vaihdettiin suuremman kapasiteetin 14 Ah akkuun, koska energiantuotannon kasvaessa pienempi akku täyttyi nopeasti.

Taulukko 1. Aurinkosähköjärjestelmän laitteet

Laite	Valmistaja	Malli	Muut tiedot
Aurinkopaneeli	SolarXon	ES-30P	30 W; 12 V
Lataussäädin	EPEVER	LS2024B	280 W; 12 V; 20 A
Näyttöyksikkö	EPEVER	MT-50	-
Akku	MTX ENERGY	Moottoripyöräakku AGM	12 V; 4 Ah; 36 Wh
Kuorma	LED Energie	LED-nauha	12 V; 9,6 W/m; 2 m



Kuva 4. Mittauksessa käytetty aurinkosähköjärjestelmä koottuna.

4 MITTAUSTULOKSET

Taulukossa 2 on esitetty Energiasääennusteesta kerätty data sekä kevään mittauksissa mitattu energiantuotanto. Vastaavasti kesän mittaustulokset on esitetty Taulukossa 3. Ennuste ja tuotetun energian määrä ovat eri suuruusluokassa, koska käytetyn paneelin huipputeho 0,03 kWp on vain murto-osa ennusteen olettamasta 2,5 kWp huipputehosta. Jotta datasta saataisiin vertailukelpoisempaa, tuotetun energian määrä on kerrottu arvolla $2500/30 = 83,3$.

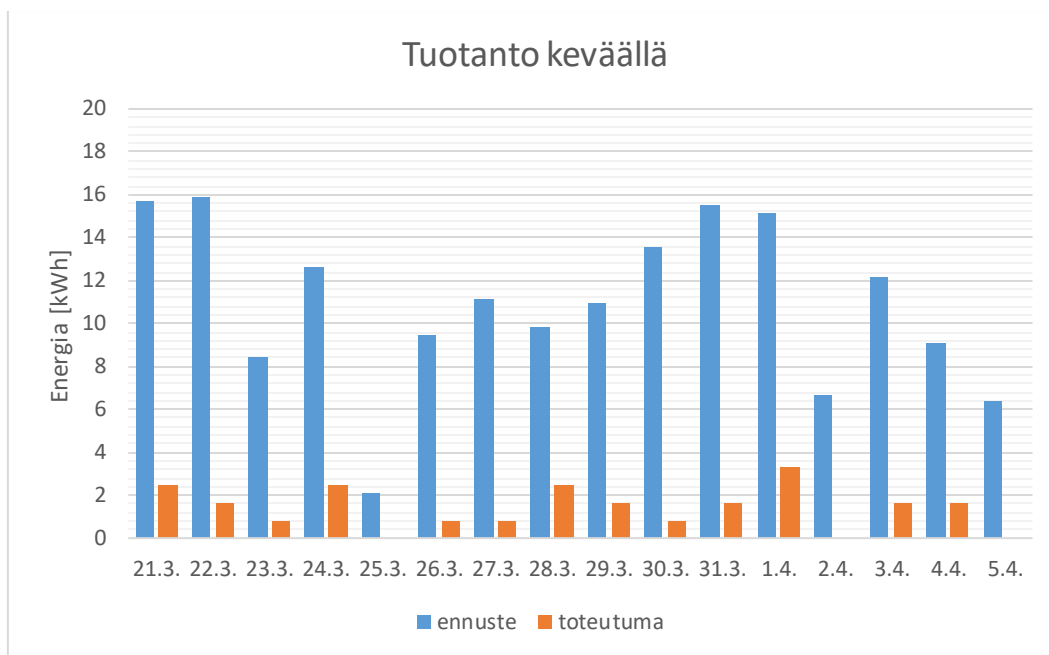
Taulukko 2. Kevään mittaustulokset

Päivämäärä	Ennuste [kWh]	Aurinkosähköjärjestelmän tuottama sähköenergia [kWh]	Skaalattu tuotto [kWh]
21.3.	15,68	0,03	2,50
22.3.	15,87	0,02	1,67
23.3.	8,40	0,01	0,83
24.3.	12,66	0,03	2,50
25.3.	2,14	0,00	0,00
26.3.	9,47	0,01	0,83
27.3.	11,18	0,01	0,83
28.3.	9,86	0,03	2,50
29.3.	10,96	0,02	1,67
30.3.	13,53	0,01	0,83
31.3.	15,55	0,02	1,67
1.4.	15,17	0,04	3,33
2.4.	6,66	0,00	0,00
3.4.	12,18	0,02	1,67
4.4.	9,13	0,02	1,67
5.4.	6,41	0,00	0,00

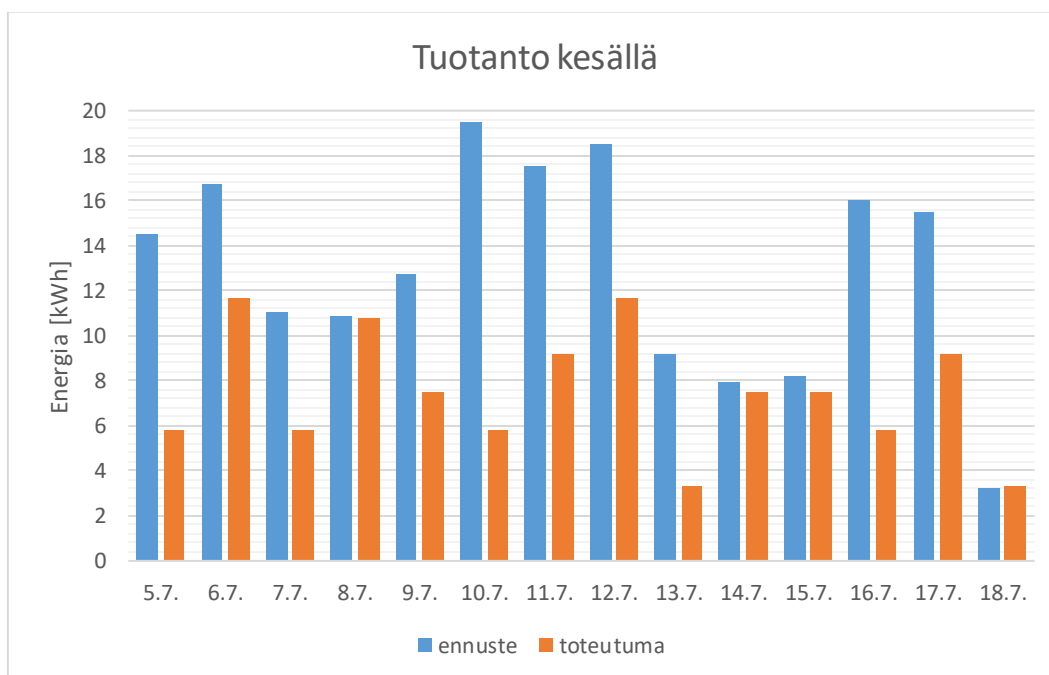
Taulukko 3. Kesän mittaustulokset

Päivämäärä	Ennuste [kWh]	Aurinkosähköjärjestelmän tuottama sähköenergia [kWh]	Skaalattu tuotto [kWh]
5.7.	14,55	0,07	5,83
6.7.	16,72	0,14	11,66
7.7.	11,06	0,07	5,83
8.7.	10,86	0,13	10,83
9.7.	12,73	0,09	7,50
10.7.	19,51	0,07	5,83
11.7.	17,56	0,11	9,16
12.7.	18,50	0,14	11,66
13.7.	9,16	0,04	3,33
14.7.	7,92	0,09	7,50
15.7.	8,18	0,09	7,50
16.7.	16,00	0,07	5,83
17.7.	15,47	0,11	9,16
18.7.	3,25	0,04	3,33

Kevään ja kesän mittaustulokset on esitetty kuvaajamuodossa kuvissa 5 ja 6 edellä mainitussa järjestyksessä.



Kuva 5. Kuvaaja kevään mittaustuloksista.



Kuva 6. Kuvaaja kesän mittaustuloksista.

5 POHDINTA

Työn tarkoituksena oli koota yksinkertainen aurinkosähköjärjestelmä ja verrata tuotetun energian määrää BCDC:n ennusteeseen. Järjestelmän kokoaminen ja mittaukset sujuivat suunnitellusti. Harmittavaa on, että erityisesti kevään mittauksissa tuotetun energian määrä jäi hyvin vähäiseksi, jolloin vertailu ennusteeseen on vaikeaa. Siitä huolimatta työstä saatiin hyödyllistä tietoa mahdollisia jatkotutkimuksia varten.

Hypoteesina oli, että tuotetun energian määrä jää jonkin verran ennustetta alemmaksi mutta seuraa ennusteen mukaista käyrää. Tuotettu energia ylitti ennusteen vain kerran (18.7.). Muulloin ero ennusteeseen vaihteli muutamista wattitunneista aina 14 kWh asti. Keväällä tuotto jäi hyvin pieneksi ja ero ennusteeseen oli vähimmilläänkin useita kilowattitunteja. Ennuste vaikuttaa optimistiselta, sillä kesällä ennusteen päiväkohtainen tuotto ylitti kahdeksana päivänä 14:stä (57 %) paneelin suurimman päiväkohtaisen tuoton koko mittausjaksolta (11,66 kWh skaalauksen jälkeen). Toki paneeli varjostui usean tunnin ajan kesälläkin, ja asennuskulma poikkesi noin 15° etelästä.

Kevään ja kesän mittaustuloksia verratessa huomataan, että kesän mittauksissa tuotetun energian määrä on lähempänä ennustetta kuin kevään mittauksissa. Ennusteessa ero kevään ja kesän välillä ei ole kovin suuri, joten paneelin asennuksella on suurempi vaikutus. Ikkunan sisäpuolelle asennetulla paneelilla tuotanto jää huomattavasti pienemmäksi kuin ulos asennetulla paneelilla. Lisäksi aurinkopaneeli tuottaa energiaa tehokkaimmin, kun auringonvalo pääsee paistamaan suoraan paneelille, joten paneelin ja auringon välissä tulisi olla mahdollisimman vähän esteitä. Paneeli tulisi sijoittaa mahdollisimman korkealle. Kesällä Aurinko paistoi suoraan paneelille päivän aikana yli kolme kertaa pidempään kuin keväällä.

Huomattavaa on, että skaalattu arvo kvantisoituu, koska tuotetun energian vaihteluväli on pieni. Tämä tarkoittaa, että skaalattu arvo on monikerta arvosta $83,3 * 0,01 \text{ kWh} = 0,833 \text{ kWh}$. Skaalattun arvon resoluutiota voitaisiin pienentää käyttämällä suurempitehoista paneelia.

Tuotetun energian määrä päivässä oli enimmillään noin 0,14 kWh eli 140 Wh. Tuotetun energian määrä on vähäinen, mutta se riittäisi esim. puhelimen lataamiseen. Tässä työssä tuotettua sähköenergiaa ei varsinaisesti hyödynnetty, vaan se kulutettiin ledinauhan avulla.

Olisi myös mielenkiintoista käyttää jonkinlaista ”älykästä” kuormaa, joka tyhjentäisi akun varauksen automaattisesti. Työssä käytetty lataussäädin pystyy irrottamaan kuorman jännitteen pudotessa tietyn rajan alle, joten kuormaa voisi pitää koko ajan päällä. Tällöin akku ei kuitenkaan pääse latautumaan.

Jatkotutkimuksissa on syytä suunnitella paneelin asennus huolellisesti, jotta tuotanto olisi mahdollisimman suuri. Työssä kesän mittauksissa käytetty paneelin 30° kulma vaakatasoon nähden vastaa BCDC:n ennusteen oletamaa kulmaa. Lisäksi se on lähellä yleisiä 26,6° ja 33,7° kattokulmia (yleisesti kattokulmat ilmoitetaan suhdelukuina, tässä tapauksessa 1:2 ja 1:1,5). Tuotantoa voisi parantaa myös MPPT-tyypin (engl. Maximum Power Point Tracking) lataussäädintä käyttämällä.

Akun varaustilan jatkuvan päivystämisen välttämiseksi akun kapasiteetin olisi hyvä olla vähintään 14 Ah. Tällöin yhden päivän aikana tuotettu energia mahtuu akkuun. Haittapuoleksi akun varauksen purkamisen kestää kauemmin. Purkamisen laskee järjestelmän jännitettä, jolloin paneeli toimii PWM-lataussäätimen vuoksi matalammalla jännitteellä ja siten vähemmän optimaalisella alueella. Purkamisen tulisi tehdä systemaattisesti samaan aikaan päivästä, mieluiten tuotannon ollessa vähäistä.

6 YHTEENVETO

Työssä tarkasteltiin erilaisia aurinkosähköjärjestelmiä ja erityisesti aurinkosähköenergian tuotannon ennustamista lyhyellä aikavälillä. Luotettavalla ja tarkalla ennusteella olisi käyttöä sekä pienen off-grid-järjestelmän että suuren aurinkovoimalan ylläpidossa. Tuotantoon vaikuttaa pääasiassa auringon paikka taivaalla sekä säätila. Auringon rata ei vaihtele merkittävästi ja se pystytään määrittämään hyvin tarkasti. Lyhyen aikavälin ennusteessa suurin haaste onkin säätilan ennustaminen. Etenkin aurinkopaneelin toimintaan merkittävästi vaikuttavat pilvet ovat ennusteen kannalta ongelmallisia, sillä pilvien muodostuminen ja niiden liikkeet ovat hyvin kaottisia prosesseja. Sääennusteet ovat toki kehittyneet vuosikymmenien aikana merkittävästi.

Mittaukset suoritettiin hyvin yksinkertaisella aurinkosähköjärjestelmällä. Aurinkopaneeliteknologian kehityksen ja aurinkopaneelien kasvaneen kysynnän myötä pienet tee-se-itse-aurinkosähköjärjestelmät ovat kenen tahansa saatavilla. Pieni ”mökkijärjestelmä” on helppo asentaa itse, kunhan noudattaa varovaisuutta akkua käsitellessä. Sähköverkkoon kytkettävän on-grid-järjestelmän asennus vaatii ammattiasentajan ja tarvittavat luvat mm. sähköntoimittajalta. Järjestelmän tyypistä riippumatta aurinkopaneelien käyttö energiantuotannossa tulee kasvamaan merkittävästi tulevaisuudessa, kun fossiilisten polttoaineiden käyttöä vähennetään. Aurinkoenergian potentiaali on valtava, sillä Aurinko on ihmisen näkökulmasta ehtymätön energianlähde.

Työn toteutuksessa eli järjestelmän kokoamisessa ja mittauksissa onnistuttiin mielestäni hyvin. Tuotetun energian määrää verrattiin BCDC:n ennusteeseen. Vertailussa haastavaa oli tuotetun energian vähyys ennusteeseen verrattuna. Ennusteen oletama 2,5 kWp huipputeho paneelistolle vastaa BCDC:n mukaan ”pienehköä omakotitalon aurinkovoimalaa”, kun taas tässä työssä käytettiin yhtä 30 Wp paneelia [5]. Keväällä myös järjestelmän asennus sisätiloihin vähensi järjestelmän tuotantoa, eikä kevään mittaustuloksilla ole juurikaan arvoa ennusteeseen vertaamisen suhteen.

Vertailun perusteella ennusteen luotettavuudesta ei voi antaa suoraa vastausta, koska ennusteen ja mittaustulosten välillä ei ole selkeää yhteyttä. Tulosten perusteella ennuste vaikuttaa optimistiselta. Toisaalta järjestelmän asennus ei ollut ideaalinen johtuen mm. varjostuksista ja asennuskulman 15° poikkeamasta etelään nähden.

7 LÄHDELUETTELO

- [1] Kalogirou S. A. (2013) Solar Energy Engineering: Processes and Systems. 2nd Edition. Elsevier Inc., 819 s.
- [2] Kalogirou S. (2017) McEvoy's Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications. 3rd Edition. Elsevier Inc., 1340 s.
- [3] Lehto, I., Orrberg, M., Ylinen, M. & Andersen, M. (2021) Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus. 2. painos. Sähköinfo Oy, 182 s.
- [4] Chiras, D. D., Aram, R. & Nelson, K. (2011) Power from the sun: achieving energy independence: A practical guide to solar electricity. New society publishers, 255 s.
- [5] Energiasääennuste: Aurinkoa ja tuulta kilowattitunteina. BCDC Energia. (luettu 6.9.2022) URL: <http://www.bcdcenergia.fi/energiasaa/>
- [6] Photovoltaic Geographical Information System. European Commission. (luettu 25.4.2022) URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
- [7] Laine, S. (2021) Aurinkoenergian ennustamismenetelmät. Opinnäytetyö. Vaasan ammattikorkeakoulu, Energiatekniikka, Vaasa.
- [8] Sääennustedata. Ilmatieteen laitos. (luettu 25.4.2022) URL: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/avo-in-data-saennustedata-hirlam>