

Bifacial Aurinkopaneeli
Bifacial solar panels
Aleksi Oikkonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Aleksi Oikkonen

Bifacial aurinkopaneeli

2019

Kandidaatintyö.

26p.

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Antti Kosonen, Professori Jero Ahola

Ohjaaja: Tutkijaopettaja Antti Kosonen, Professori Jero Ahola, DI Vesa-Matti Puro

Hakusanat: Aurinkopaneelit, Bifacial Aurinkopaneelit, Simulointi,

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää bifacial aurinkopaneelien ominaisuudet, tutkia niiden toimintaa Suomen olosuhteissa ja löytää asiakkaan tarpeisiin oikeanlainen bifacial aurinkopaneeli. Työssä verrataan bifacial aurinkopaneelien tuotantoa normaaleihin aurinkopaneelisiin. Ensin kirjallisuuskatsauksen muodossa ja sitten simuloinnin avulla.

Bifacial -aurinkopaneeli on aurinkopaneeli, joka tuottaa sähköä molemmilta puolilta aurinkopaneelia, muuten se muistuttaa tavallista aurinkopaneelia. Työssä havaittiin, että bifacial aurinkopaneelit soveltuvat Suomen olosuhteisiin, mutta ne tulee asentaa jyrkempään kulmaan, kuin tavalliset aurinkopaneelit. Bifacial aurinkopaneelin tuotantoon voidaan vaikuttaa suuresti myös aurinkopaneelin taustalla olevan materiaalin albedokertoimella (materiaalin kyvyllä heijastaa auringon säteilyä).

Kirjallisuuskatsauksessa hankittiin tietoa bifacial -aurinkopaneeleista ja havainnoitiin minkälaisia ominaisuuksia bifacial aurinkopaneeleilla on. Kirjallisuuskatsauksessa vertailtiin myös bifacial ja tavallisten aurinkopaneelien eroja. Simulointiosassa simuloitiin bifacial ja tavallisia aurinkopaneeleita, simuloinnin jälkeen vertailtiin molempien aurinkopaneelityyppien ominaistuotantoja (Kuinka paljon laitteisto tuottaa vuodessa yhtä kilowattia kohden), minkä perusteella löydettiin paras hinnan ja tuotannon suhde aurinkopaneelijärjestelmällä.

Työn tuloksena saatiin tieto siitä, kuinka hyvin bifacial aurinkopaneelit soveltuvat Suomen olosuhteisiin ja millaisia ominaisuuksia bifacial aurinkopaneeleilla on ja miten ne eroavat tavallisten aurinkopaneelien ominaisuuksista. Työssä hankittujen tietojen avulla pystyttiin löytämään asiakkaan tarpeisiin sopiva aurinkopaneeli. Työn perusteella voidaan todeta bifacial aurinkopaneelien sopivan Suomen olosuhteisiin, sekä nähdä bifacial aurinkopaneelissa suurta potentiaalia tulevaisuudessa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Electrical Engineering

Aleksi Oikkonen

Bifacial solar panels

2019

Bachelor's Thesis.

26p.

Examiner: Associate professor Antti Kosonen, Professor Jero Ahola

Supervisor: Associate professor Antti Kosonen, Professor Jero Ahola, M.sc Vesa-Matti Puro

Keywords: solar panels, bifacial solar panels, simulation

The purpose of this thesis was to investigate the properties of the bifacial solar panel, to investigate their operation in Finnish conditions and to find the right bifacial solar panel for the customer's needs. This thesis compares bifacial solar panels with normal solar panels. First in the form of a literature review and then by simulation.

Bifacial Solar Panel is a solar panel that generates electricity on both sides of the solar panel, otherwise it resembles a regular solar panel. In the thesis it was found that bifacial solar panels are suitable for Finnish conditions, but they should be installed at a steeper angle than normal solar panels. Bifacial solar panel production can also be greatly influenced by the albedo of the material with is behind the solar panel (the ability of the material to reflect the sun's radiation).

The literature review provided information on bifacial solar panels and observed was the properties of bifacial solar panels. The literature review also compared the differences between bifacial and normal solar panels. The simulation section simulated bifacial and normal solar panels, and after the simulation the specific productions of both types of solar panels were compared, on the basis of which the best price / output ratio was found with the solar panel system.

The result of this thesis was to find out how well bifacial solar panels are suited to Finnish conditions and what characteristics bifacial solar panels have and how they differ from normal solar panels. The information obtained in the thesis was able to find a solar panel that suited the customer's needs. On the basis of the work, it can be concluded that bifacial solar panels are suitable for Finnish conditions, and that there is great potential for bifacial solar panels in the future.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
2.	BiFacial Aurinkopaneeli.....	7
2.1	Bifacial aurinkopaneelin kehitys ja historia	8
2.2	Bifacial aurinkopaneelien asennustavat.....	8
2.3	Bifacial aurinkokenno.....	10
2.4	Kennojen kytkennät.....	11
2.5	Bifacial factor	11
2.6	Bifacial aurinkopaneelien järjestelmien häviöt	12
3.	Bifacial paneelin ja normaalin aurinkopaneelin eroavaisuudet.....	13
4.	Bifacial aurinkopaneelit mailmalla.....	15
5.	Bifacial paneelin Simulointi	16
5.1	Vuotuinen tuotanto	16
5.2	Albedon vaikutus.....	19
5.3	Optimaalinen asennus.....	20
5.4	Simuloinnin tulokset.....	21
6.	Tulokset	23
6.1	Erot maailmalla ja Suomessa.....	23
6.2	Bifacial aurinkopaneelien kannattavuus.....	23
6.3	Optimaalinen järjestelmä asiakkaalle	23
7.	Johtopäätökset	26
	Lähteet	27

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

<i>I</i>	virta
<i>P</i>	teho
W	Watti
η	Hyötysuhde
Albedo	Materiaalin kyky heijastaa siihen saapuva säteily.
ARC	Anti-Reflective Coating, heijastuksia estävä pinnoite.
STC	Standard Test Conditions, Aurinkopaneelien testausolosuhteet.
kWp	Kilowattipiikki
Ominais- tuotanto	Aurinkopaneelien vuosituotanto yhtä asennettua kilowattia kohden.
clearness- indeksi	Ilmakehän selkeyttä kuvaava indeksi.
kWh/a	Kilowattituntia vuodessa
LCOE	Levelized Cost of Energy, Energian kustannukset
Alaindeksit	

etu	Aurinkopaneelin etupuoli
taka	Aurinkopaneelin takapuoli

1. JOHDANTO

Bifacial aurinkopaneeleissa perusidea on sama, kuin tavallisissa aurinkopaneeleissa, mutta ne tuottavat sähköä molemmilta puolilta aurinkopaneelia. Bifacial aurinkopaneeleita on toistaiseksi hyvin vähän, mutta niiden ennustetaan lisääntyvän huomattavasti. Vuonna 2028 aurinkopaneeleista melkein 40% pitäisi olla bifacial aurinkopaneeleita. Aiheesta on kuitenkin Suomessa vasta vähän tutkimustietoa. (ITRPV, 2018). Tässä työssä ei keskitytä siihen, kuinka aurinkopaneelit tuottavat sähkönsä. Bifacial aurinkopaneelit tuottavat sähkönsä samalla tavalla kuin tavalliset aurinkopaneelit, vaan työssä keskitytään bifacial aurinkopaneelisiin. Aurinkoenergiasta ja kuinka aurinkopaneelit tuottavat energiansa löytyy paljon tutkimustietoa, esimerkiksi LUT-yliopiston nettisivuilta (Aurinkoenergia ja aurinkosähkö Suomessa, 2019).

Bifacial aurinkopaneelitekniikka on yksi parhaista innovaatioista hintojen alentamiseksi. (Castillo-Aguilella, 2016) Vastaavanlaisia tutkimuksia bifacial aurinkopaneeleista on tehty muualla maailmassa, mutta Suomen olosuhteisiin ei ole optimoitu bifacial aurinkopaneelijärjestelmiä. Suomen pohjoinen sijainti aiheuttaa omat muuttujansa tutkimukseen. Suomessa on esimerkiksi pitkätalvi, jolloin auringon valoa on vähemmän ja tuotanto on heikompaa, kuin etelämmässä, mutta toisaalta kesällä Suomessa aurinko paistaa melkein kokopäivän.

Työn kannalta oleellinen tieto bifacial aurinkopaneeleista on, miten ne eroavat tavallisista aurinkopaneeleista ja miten taustapuoli vaikuttaa tuotantoon. Mielenkiintoista on myös millä tavalla bifacial aurinkopaneelien tuotannot eroavat tavallisista, kun asennusparametreinä ovat jotkin muut kuin optimaaliset asennusparametrit, esimerkiksi idän tai lännen suuntaan asennetut aurinkopaneelit.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on löytää optimaalinen bifacial aurinkopaneeliratkaisu asiakkaalle. Työssä tehdään ensin kirjallisuuskatsaus bifacial aurinkopaneeleista ja vertaillaan niitä normaaleihin yksipuolisiin aurinkopaneeleihin. Kirjallisuuskatsauksessa hankitaan tietoa, jotta asian ymmärretään paremmin ja aurinkopaneelien optimointi onnistuu. Lopuksi vielä simuloidaan aurinkopaneelijärjestelmä Pvsyst -ohjelmalla(PVsyst). Työ tehdään Purotokka Oy:lle ja sieltä on annettu vertailtavaksi kolme eri bifacial aurinkopaneelia ja yksi tavallinen aurinkopaneeli, joista valitaan paras kokonaisuus asiakkaan tarpeeseen. Työssä käytettävät hinnat ovat arvonlisäverottomia. Pvsyst -ohjelman avulla optimoidaan paneelille oikea asennuskorkeus, kulma ja suunta. Tässä tutkimuksessa tutkitaan myös paneelin kulman vaikutusta tuottoon, vaikka todellisuudessa aurinkopaneelit tullaan asentamaan 20 asteen kulmaan.

2. BIFACIAL AURINKOPANEELI

Bifacial aurinkopaneeli on molemmilta puolilta auringon säteitä absorboiva aurinkopaneeli. Aurinkopaneeli muuttaa auringonsäteilyn sähköksi valosähköisen ilmiön avulla. Aurinkopaneelien tärkein osa on aurinkokenno. Aurinkokenno on tärkein osa, koska juuri se muuttaa auringosta saapuvat säteet sähköksi. Bifacial aurinkopaneeleissa ylivoimaisesti suosituin puolijohdemateriaali on pii. Kennojen pintaa karhennetaan kuvioinneilla, jotta valo absorboituu paremmin kennoon. Varsinkin takapuolelle tuleva hajasäteily saadaan näin paremmin talteen.

Bifacial aurinkopaneelin tuotantoon vaikuttaa, aurinkopaneelin asennuskulma, laitteiston suuntakulma, aurinkopaneelin taustalla oleva taustamateriaali, asennuskorkeus ja auringon säteilyn tulosuunta. Jokaisella näistä on oma vaikutuksensa bifacial aurinkopaneelin tuotantoon, jonka vuoksi tuotannon tehoa ei voi sanoa suoraan. Työn simulointiosuudessa vertailaan kaikkien näiden ominaisuuksien vaikutusta tuotantoon.

Aurinkopaneelien teho määritellään testissä, joka tehdään aina vakio-olo-suhteissa, jotka ovat määrätty; lämpötila 25 °C, AM1.5, säteilyteho 1000W/m². Testin heikkous bifacial aurinkopaneelien kannalta on, että siinä mitataan vain etupuolen teho. Takapuolelle asetetaan albedo, jonka heijastuskerroin on nolla, jolloin takapuoli ei tuota mitään. (Castillo–Aguilella, 2016). Hyvin optimoidulla bifacial aurinkopaneelijärjestelmällä on mahdollisuus saavuttaa jopa 50 % hyöty (Xingshu Sun, 2017). Tämä vaatii kuitenkin sen, että takapuolelta saadaan hyvin talteen kaikki haja- ja heijastunut säteily. Hajasäteily on säteilyä, joka heijastuu ilmakehästä ja pilvistä ja heijastunut säteily on maasta heijastuvaa säteilyä. (Xingshu Sun, 2017).

Xingshu sun et.al havaitsivat heidän tutkimuksessaan, että heijastuneella säteilyllä on suuri merkitys bifacial aurinkopaneelin tuotantoon. Tutkimuksessa, jossa on huomioitu korkeus ja albedokerroin havaittiin, että 0,5 albedokertoimella voidaan päästä 30% parempaan tuotantoon, kuin tavallisella aurinkopaneelilla. Maasta irti nostetulla bifacial paneelilla voidaan taas päästä jopa 50% parempaan tuotantoon, kuin tavallisella aurinkopaneelilla. (Xingshu Sun, 2017)

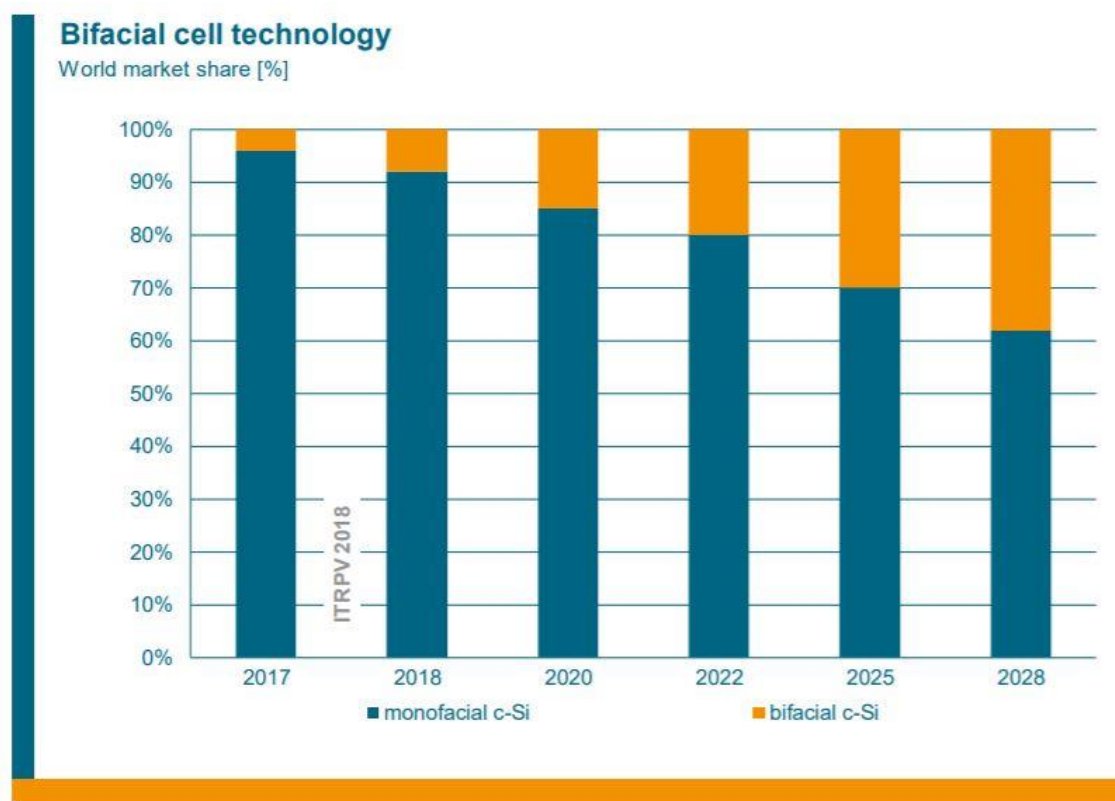
Aurinkopaneelijärjestelmä koostuu monista komponenteista, eikä vain pelkästä aurinkopaneelistä. Järjestelmässä on myös teline, johon aurinkopaneelit kiinnitetään, sekä invertteri eli vaihtosuuntaaja, joka muuttaa tasavirran vaihtovirraksi. Tarvitaan myös kaapeleita, joilla sähkö siirretään. Lisäksi tarvitaan turvallisuustarvikkeita, kuten vikavirtasuojia ja johdonsuojakatkaisijoja, mikäli aurinkopaneeli järjestelmä halutaan liittää sähköverkkoon ja siitä halutaan turvallinen.

Aurinkopaneelien hinnat ovat laskeneet roimasti viimevuosien aikana, hyötysuhteen kasvetua. Tekniikan kehittyttyä ja järjestelmien lisääntyttyä, itse aurinkopaneelien kulut ovat pienentyneet suhteessa paljon enemmän, kuin muiden tarvikkeiden. Tämän takia mitä suurempi hyöty saadaan yhdeltä aurinkopaneelilta sitä parempi. Järjestelmän fyysisen koon kasvaessa, joudutaan investoimaan enemmän telineisiin, kaapeleihin ja asennuspinta-alaan, jotka tuovat lisäkustannuksia järjestelmälle.

2.1 Bifacial aurinkopaneelin kehitys ja historia

Bifacial aurinkopaneeleita on tutkittu 1960 vuodesta asti. Vuoteen 2016 mennessä aiheesta oli tehty 400 tutkimusta (Kilkki, 2018). Vuoteen 2024 mennessä bifacial aurinkopaneelien markkinaosuuden arvellaan lisääntyvän noin 15% (Kilkki, 2018). Ensimmäiset bifacial laboratorioaurinkokennot luotiin 1977. Vuonna 1980 tapahtuivat ensimmäiset albedon hyödyntämiset. 2000 luvulla bifacial aurinkopaneelien kehitys on mennyt eteenpäin, suurin askelein. (Romijn, 2017)

Kuvassa 1 on esitetty bifacial aurinkopaneelien markkinaosuuden kehitys tulevaisuudessa. On arvioitu, että vuonna 2028 noin 40% aurinkopaneelien markkinoista olisi bifacial aurinkopaneeleita. Bifacial aurinkopaneelien yleistymistä edistää se, ettei bifacial aurinkopaneelin valmistaminen ole juurikaan tavallista aurinkopaneelia kalliimpaa.



Kuva 1. Bifacial aurinkokennojen markkina osuuden kehitys. (ITRPV 2018)

2.2 Bifacial aurinkopaneelien asennustavat

Bifacial aurinkopaneelille yksi mahdollinen tapa asentaa on pystysuoraan. Tästä on hyötyä esimerkiksi paneelien likaantumisen kannalta. Pystysuoralla asennuksella olisi mahdollista saada auringonsäteet aamulla ja illalla käyttöön. Pystysuorassa asennuksessa on ongelmana toisen aurinkopaneelin muodostama varjostuma, tällöin paneelien alaosat ovat varjossa ja

näin ollen paneelin tuotanto laskee. Tämä ongelma voidaan ratkaista optimoimalla paneelirivien välit. Toisaalta jos paneeleita on vain yhdessä rivissä, niin varjostumia ei synny. (Xingshu Sun, 2017).

Ilmasto-olosuhteilla on vaikutusta kokonaissäteilyn määrään ja diffuusin säteilyn määrään. Ilmasto-olosuhteita kuvataan clearness-indeksillä joka kuvaa ilman selkeyttä. Ilman pienthiukkasten määrän kasvaessa, myös hajasäteilyn osuus kasvaa ilmassa. Tämän takia esimerkiksi Shanghaissa rivivälit tulisi olla saman suuruiset kuin paneelien korkeus. Paikat, joissa clearness-indeksi on parempi, voivat aurinkopaneelirivien rivi välit olla pienempiä, esimerkiksi Kairossa suositeltava riviväli on vain 0,85 kertaa aurinkopaneelien korkeus. Päiväntasaajalla suositeltava riviväli olisi 0,8 kertaa aurinkopaneelien korkeus, kun taas esimerkiksi Suomessa aurinkopaneelirivien suositeltava riviväli olisi noin 1,1 kertaa aurinkopaneelin korkeus. Tyypillisesti ihanneriviväli oli noin 0,8 - 1 kertaa bifacial aurinkopaneelin korkeus, mutta esimerkiksi Pohjoismaissa sähköntuotanto toimii paremmin suuremmalla rivivälillä. Todellisuudessa kuitenkin aurinkopaneelirivien välit ovat suurempia käytännön asennuksen ja huollon käytännöllisyyden takia, tämän takia voidaan joutua käyttämään 2 metrin välejä jopa päiväntasaajalla (Xingshu Sun, 2017).

Bifacial aurinkopaneelit voidaan asentaa myös katolle. Kattoasennuksella saadaan paras teho, kun paneelit ovat asennettu katon myötäisesti. Alustan valonheijastavuuden parantaminen parantaa myös aurinkopaneelien tehoa, esimerkiksi valoa heijastava maalipintakatolla lisääisi tuotantoa. Jotta energian tuotanto olisi optimaalista, tulisi paneelien olla hieman ilmassa. (Kilkki, 2018). Bifacial aurinkopaneelit voidaan asentaa myös telineeseen, joka seuraa aurinkoa, niin että aurinkopaneeli saa paremmin auringon säteilyn talteen.

Bifacial aurinkopaneelit tulisivat Suomessa ja muualla Pohjoismaissa asentaa kohti etelää, sekä kallistaa sillä kallistettu aurinkopaneeli tuottaa paremmin kuin vaakatasossa oleva. Bifacial aurinkopaneelien alustamateriaaliksi valkoinen hiekka ja nurmikko ovat kohtuullisia vaihtoehtoja, mutta parhaat tulokset saadaan heijastavilla alustamateriaaleilla ja maaleilla. Optimaalisen tuotannon kannalta aurinkopaneelin etureunan tulisi olla nostettu irti alustasta. (Kilkki, 2018).

Taulukko 1(Md.sultan Mahmud, 2018)

Materiaali	albedokerroin
Nurmikko	23 %
Betoni	16 %
valkoinen betoni	60-80%
valkoinen sora	27 %
valkoiseksi maalattu metalli	56 %
vaaleanharmaa katto	62 %
valkoinen kattopinnoite	>80%

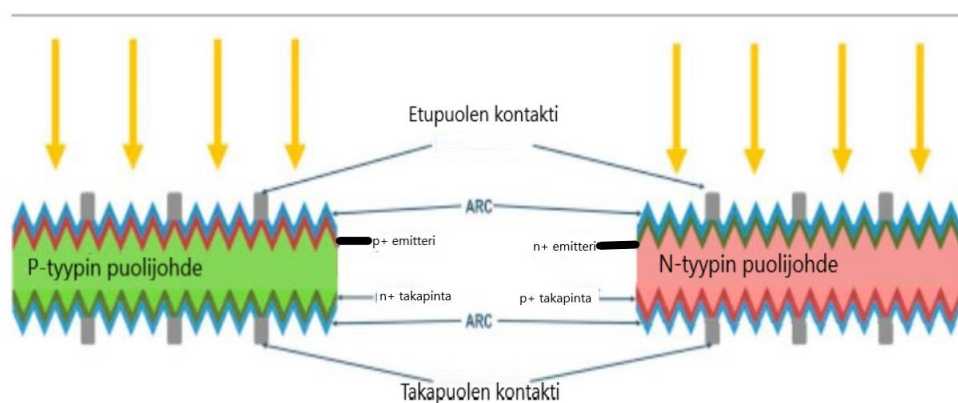
Taulukossa 1 on esitetty erilaisille materiaaleille albedokerroin. Albedokerroin kertoo, siitä kuinka hyvin säteily heijastuu materiaalista pois päin. Taulukosta 1 nähdään, että valkoinen kattopinnoite on kaikista parhain alustamateriaali. Maahan asennettavien bifacial aurinkopaneelien alustamateriaaliksi kannattaisi siis valita taulukosta valkoinen betoni. Kohteessa johon aurinkopaneelit asennetaan valittavana, on kaksi luonnollista albedo materiaalia, jotka ovat nurmikko ja hiekka.

2.3 Bifacial aurinkokenno

Bifacial aurinkokennot tuottavat sähköä etu- sekä takapuolelta. Tällä saavutetaan suurempi kennopinta-ala, kuin tavallisella aurinkopaneelilla. Suurempi kennopinta-ala ei ole ainoa etu, mikä saadaan bifacial aurinkokennolla. Bifacial aurinkokenno absorboi vähemmän infrapunasäteilyä kuin tavalliset aurinkopaneelit, mikä johtaa alhaisempaan kennolämpötilaan ja sen vuoksi parempaan hyötysuhteeseen, sillä aurinkokennon hyötysuhde laskee aurinkokennon lämpötilan noustessa. (Kilkki, 2018)

Aurinkokennojen molemmat pinnat karhennetaan. Karhennus tehdään sen vuoksi, että valo absorboituu paremmin kennoon. Taustapuolen karhennuksella on vielä suurempi merkitys, kuin etupuolella, sillä taustapuolen hajasäteily saadaan näin kaikista parhaiten absorboitumaan kennoon. Kennojen pinnalla sähkökontakteja on toteutettu hopeaverkolla, mutta se on hyvin arvokas materiaali, joten valmistuskustannusten laskemiseksi hopeaa on korvattu alumiinilla ja kuparilla. (R.Gurrero–lehmus, 2016)

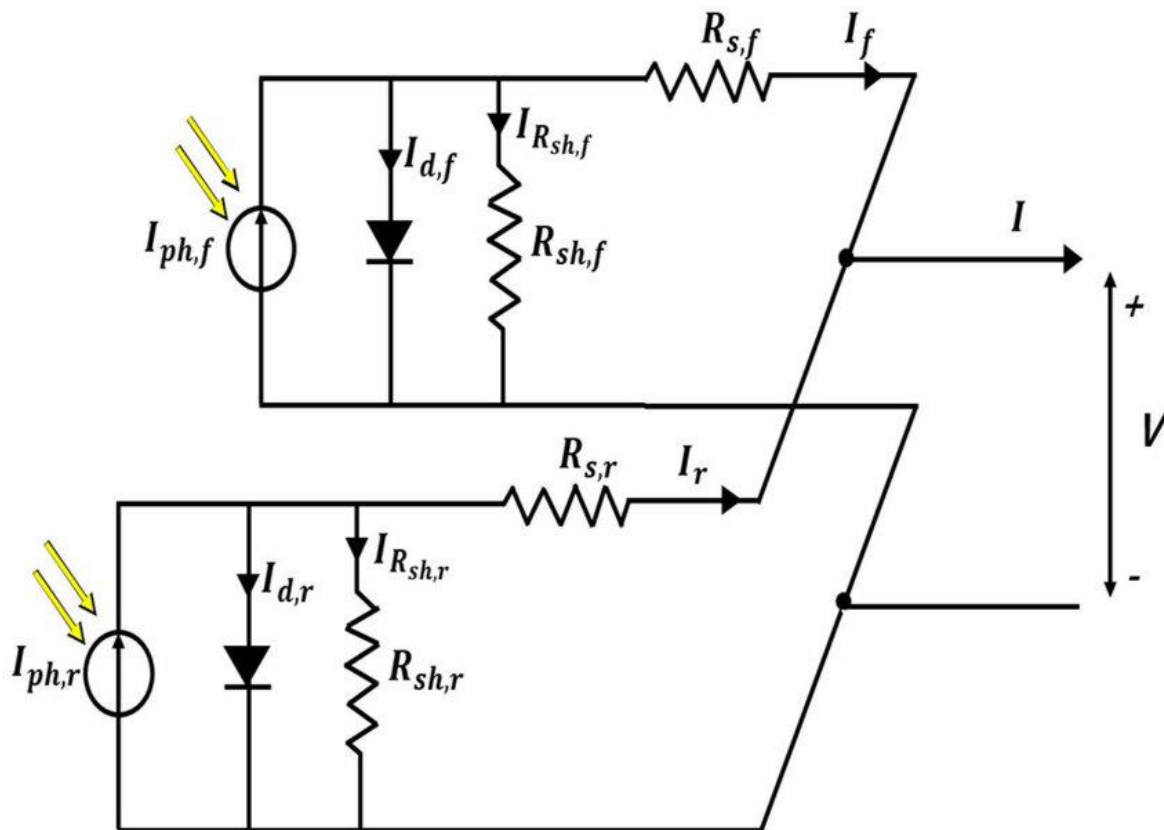
Huipputehon ja hinnan konsensus on löydetty bifacial-aurinkokennoissa sijoittamalla aurinkokennot aurinkopaneelissa 11 millimetrin etäisyydelle toisistaan. Tällöin valo pääsee kennoston läpi ja heijastuu lasipintojen avulla molemmille puolille aurinkokennoa. Mikäli kennojen välejä kasvattaa, se lisää kyllä takapuolelle menevää säteilyä, mutta kasvattaa samalla aurinkopaneelin kokoa, mikä lisää taas muita kustannuksia. Toisaalta jos välejä pienentää taustapuolen säteily pienenee, mikä pienentää tuotantoa samalla myös aurinkopaneelin koko pienenee. (Kilkki, 2018)



Kuva 2 Bifacial aurinkokennon poikkileikkaus (Guerrero-Lemus et al. 2016)

Kuvassa 2 on poikkileikkaus bifacial-aurinkokennon rakenteesta. Kuvassa nähdään poikkileikkaus sekä n- että p-tyypinpuolijohdeella toteutetusta bifacial aurinkokennosta. Kuvassa ARC osoittaa aurinkokennon pinnalla osoittavaa heijastusta vähentävää pinnoitetta. Kuvassa 2 nähdään myös hyvin bifacial aurinkokennon kaksipuoleisuus, sillä kennon molemmilla puolilla on kontaktit. (kilkki, 2018)

2.4 Kennojen kytkennät



Kuva 3. Bifacial aurinkokennon kytkentäkaavio. (Byeong, 2019).

Kuvassa 3 on esitetty Bifacial aurinkokennon kytkentäkaavio. Kuvasta 3 nähdään miten etu ja takapuoli bifacial aurinkokennosta on kytketty rinnan. Kuvassa 2 I tarkoittaa virtaa ja R resistanssia. Alaindeksi d on diodia, ph on aurinkokennoa, r tarkoittaa takapuolta ja f etupuolta. Kuvassa 3 on esitetty aurinkokennon sijaiskytkentä.

2.5 Bifacial factor

Bifacial factor on bifacial kennojen ominaisuuksia kuvaava parametri. Bifacial factor määritellään valaisemalla erikseen kennon etu- ja taustapintaa. Useimmissa tapauksissa Bifacial aurinkopaneelin etupuoleksi määritellään se puoli, jolla on paremmat sähköiset parametrit, eli parempi tehokkuusarvo. (Fatuochman, 2017). Bifacial factor lasketaan seuraavasti

$$\varphi = \frac{\eta_{\text{Taka}}}{\eta_{\text{Etu}}} \quad (2.1)$$

missä η_{taka} on aurinkopaneelin takapuolen hyötysuhde ja η_{etu} on aurinkopaneelin etupuolen hyötysuhde. Yleensä etu ja takapuolelta paneeli ei ole symmetrinen. Tyypillisesti bifacial factor on yleensä pienempi kuin yksi. Bifacial aurinkopaneelien etu- ja takapuoli eivät siis

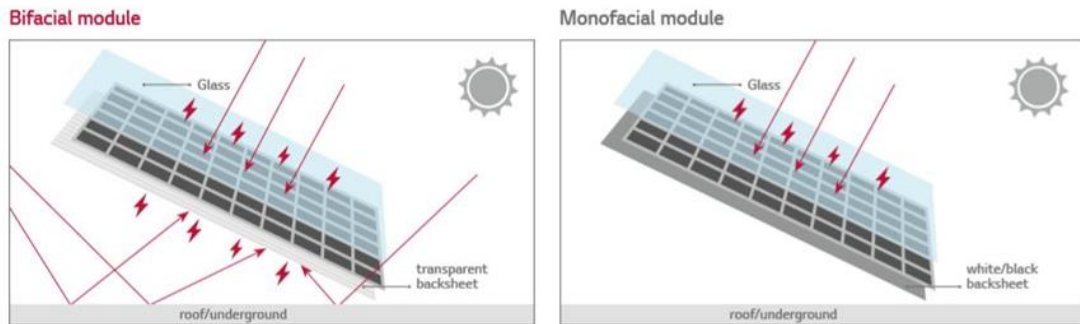
tyypillisesti ole identtisiä. Takapuoli ei tuota maksimaalisesti yhtä paljon kuin etupuoli, mutta se on tehty absorboimaan hajasäteily paremmin. (Fatuochman, 2017.)

2.6 Bifacial aurinkopaneelien järjestelmien häviöt

Bifacial aurinkopaneelijärjestelmien häviöt voidaan jakaa ympäristön häviöihin, moduulien häviöihin ja systeemin häviöihin. Ympäristön häviöitä ovat ympäristöstä aiheutuvat häviöt, kuten esimerkiksi paneelien pinnan likaantuminen ja varjostumat. Moduulien häviöt ovat häviöitä, joita syntyy, kun laitteisto ei tuota niin paljon, kuin valmistaja on luvannut. Esimerkki tällaisista häviöistä on, kun lämpötila kennossa nousee, niin kennon tehokkuus laskee. Lämpötilan aiheuttamiin häviöihin vaikuttaa tuuliolosuhteet, kennojen suunnittelu ja ympäristön lämpötila. Systeemin häviöitä ovat häviöt, jotka syntyvät järjestelmän sisällä, esimerkiksi invertterissä syntyvät häviöt ovat tällaisia.

3. BIFACIAL PANEELIN JA NORMAALIN AURINKOPANEELIN EROAVAISSUDET

Bifacial aurinkopaneelin ja normaalin aurinkopaneelin suurin eroavaisuus on se, että bifacial aurinkopaneeli vastaanottaa säteilyä molemmilta puolilta. Bifacial aurinkopaneeli saavuttaa näin siis suuremman kenno pinta-alan.



Kuva 4. Havainnollistava kuva kuinka bifacial aurinkopaneeli eroaa yksipuolisesta. (LG, 2018)

Kuvassa 4 havainnollistetaan sitä, kuinka bifacial aurinkopaneeli eroaa tavallisesta. Vasemmalla puolella on esitetty bifacial aurinkopaneelien tapa absorboida säteilyä. Oikeanpuoleinen kuva esittää kuinka tavallinen aurinkopaneeli absorboi säteilyä. Kuvasta havaitaan, että erona aurinkopaneelien tavoissa absorboida säteilyä on bifacial aurinkopaneelin takapuolen absorboiva säteily.

Taulukko 2 Aurinkopaneelien ominaisuudet

Merkki ja malli	Moduuli	Hinta [€/kpl]	Teho [kWp]	Hinta [€/Kwp]	Tehotakuu 25 Vuotta [%]	Mitat [mm]	Paino [kg]	Oikosulkuvirta [A]
LG Neon 2 Bifacial	Bifacial	257,47	400	0,64	86	2064x1024x40	22	10,2–13,3
Yingli 290CF	Bifacial	120,67	290	0,42	85,90	1664x998x32	24,5	9,4–11,7
Sonnenstromfabrik Excellent Glas/Glas 310M60 bifacial	Bifacial	163,89	310	0,53	89,20	1700x1000x35	22	9,9–12,5
Heckert NeMo 60M	Normaali	125,13	325	0,39	80	1670x1006x38	18,3	10,17

Taulukossa 2 on esitetty vertailu paneelien eri ominaisuuksista. Taulukossa esitetyt aurinkopaneelimallit ovat työn tilaajalta saatuja. Taulukon 2 arvoista voidaan todeta, että bifacial aurinkopaneelit ovat kalliimpia, kun katsotaan paljonko yksi kilowattiipikki aurinkopaneelin etupuolelta mitattuna maksaa. Taulukossa olevat tehoarvot ovat kuitenkin STC olosuhteissa

mitattuja, eikä siinä ole huomioitu bifacial aurinkopaneelien taustapuolen tehoa. Taulukkoon 2 on koottu olennaiset tiedot aurinkopaneeleista.

Taulukko 3 Telineisiin sopiva järjestelmä

Merkki ja malli	Järjestelmän mahdollinen koko	Paneelien hinta
LG Neon 2 Bifacial	7200	4 634,46 €
Yingli 290CF	6380	2 654,74 €
Sonnenstromfabrik Excellent Glas/Glas 310M60 bifacial	6820	3 605,58 €
Heckert NeMo 60M	7150	2 752,86 €

Taulukossa 3 on esitetty järjestelmän mahdollinen koko, sillä asiakkaalle on jo valikoitunut teline johon aurinkopaneelit tullaan asentamaan. Taulukon viimeisessä sarakkeessa on esitetty paneelien hintaolettaen, että niitä asennettaisiin telineeseen mahtuva määrä.

Asiakkaalle on valittu telineeksi Schletter PvMax Energy–kit. Telineen mitat asettavat rajoituksia paneelin kokoon. Teline on suunniteltu 22 paneelille, joiden koko on 1000 mm x 1700 mm. Tämä tarkoittaa, ettei tämän suurempia paneeleita mahdu niin montaa telineeseen. Vertailun aurinkopaneeleista koko ei muodostu ongelmaksi kuin LG Neon 2 Bifacial aurinkopaneelilla. Muiden vertailtavien aurinkopaneelien kanssa ei tällaista ongelmaa synny.

Taulukosta 2 huomataan että kaikki bifacial aurinkopaneelit ovat kalliimpia kuin tavalliset aurinkopaneelit, kun vertaillaan hintaa yhdelle kilowattiyksikölle. Mielenkiintoista on kuitenkin huomata miten pieni ero halvimman bifacial aurinkopaneelin ja tavallisen aurinkopaneelin välillä on. Paneelien hintaero on vain 0,03 €/kWp, se on alle 8%. Tämä tarkoittaa, että taustapuolelta on saatava vähintään 8% tuotanto, jotta bifacial aurinkopaneeli on kannattavampi. Muiden paneelien kohdalla on kilowattiyksikön hinta paljon korkeampi ja näin ollen pitäisi bifacial aurinkopaneelin tuottaa paljon enemmän, jotta se olisi kannattava investointi. Tärkeää on kuitenkin huomata, että työssä käsitellään vain aurinkopaneeleita, eikä koko järjestelmää.

4. BIFACIAL AURINKOPANEELIT MAILMALLA

Tässä kappaleessa tutkitaan bifacial aurinkopaneelien tutkimuksia, jotka on tehty erilaisissa olosuhteissa. Työn lopussa näitä tuloksia verrataan omiin simulointituloksiin, jolloin saadaan tieto, kuinka hyvin bifacial paneelit sopivat Suomen olosuhteisiin.

30°:n leveysasteen korkeudella yksittäiset aurinkopaneelit kannatta asentaa itä-länsisuuntaisesti, sillä se tuottaa paremmin, kuin tavallinen etelä-pohjoissuuntaan asennettu aurinkopaneeli. Laitostasolla kuitenkin tavallinen etelä-pohjoissuuntainen asennustapa on paras, sillä aurinkopaneelien aiheuttamat varjostukset saadaan näin pienemmiksi. Leveysasteen 60° korkeudella bifacial aurinkopaneelit tulee asentaa hieman jyrkempään kulmaan, kuin normaalit aurinkopaneelit. Bifacial aurinkopaneelit tulee asentaa noin 2° jyrkempään kulmaan, jotta taustapuolelle ei synny niin suurta varjostusta. (Xingshu Sun, 2017)

Päiväntasaajan korkeudella parhaimmat tuotannot saadaan asentamalla bifacial aurinkopaneelit pystysuoraan itä-länsisuuntaisesti. Tausta puolen hajasäteilyllä on suuri merkitys, joten bifacial aurinkopaneeleita ei suositella asennettaviksi vaakasuoraan edes päiväntasaajan korkeudella. Itä-länsisuuntaan pystysuoraan asennetuissa bifacial aurinkopaneeleissa on myös hyvänä puolena se, etteivät ne vaadi niin paljoa puhdistusta, joten puhdistuskustannukset jäävät pienemmiksi. Itä-länsisuuntainen asennus tuottaa sähköä vielä iltapäivälläkin, silloin sähkön tarve on suuri ja näin syntyy vielä suurempi hyöty aurinkopaneeleista. (Xingshu Sun, 2017)

5. BIFACIAL PANEELIN SIMULOINTI

Bifacial aurinkopaneelien simulointi suoritetaan Pvsyst -ohjelmalla. Pvsyst -ohjelma on Geneven yliopistossa kehitetty ohjelma, jonka tarkoituksena on olla aurinkosähköjärjestelmien mallinnusohjelma. Tässä työssä käytetään Pvsyst -ohjelmasta versiota 6.8.5. Pvsyst ohjelman voi ladata itsellensä 30 vuorokaudeksi ilmaiseksi koeversioksi. Pvsyst -ohjelma valikoitui simulointiohjelmaksi, koska sieltä löytyy myös bifacial aurinkopaneelien simulointiin käytettävät parametrit.

Pvsyst -ohjelmassa voidaan valita Googlen karttapalvelun avulla simuloitavan kohteen sijainti. Ohjelma hyödyntää oli 8000 sääasemaa ja 5 satelliittia varmistamaan paikalliset sääolosuhteet. Tässä työssä simuloinnit suoritetaan Jyväskylässä vallitsevien ilmasto-olosuhteiden perusteella. Simuloinnit suoritetaan Jyväskylässä, koska laitteisto on tulossa Jyväskylään.

Simuloinnissa tarkastellaan aurinkopaneelien vuosituotantoja erilaisilla parametreilla. Simuloinnissa tarkastellaan aurinkopaneelin suunnan vaikutusta tuotantoon. Aluksi simuloidaan itään suunnattu aurinkopaneeli 10–90° kulmassa 10° välein. Tämä sama toistetaan kaakon, etelän, lounaan ja lännen suuntaan. Vertailin mahdollisia asennuspaikkoja ja paras albedo kerroin oli nurmikolla, joten päädyin simuloimaan aurinkopaneeleita nurmikon albedokerroimelle, joka on lähteen mukaan 20–27% välissä.

Pvsyst -ohjelman avulla pystyy myös määrittämään optimaaliset asennusparametrit aurinkopaneeleille. Optimoidessa aurinkopaneelien asennusta otettiin huomioon aurinkopaneelin tyyppi, asennuskulma, asennussuunta ja albedon vaikutus.

5.1 Vuotuinen tuotanto

Tässä luvussa tutkitaan, minkä verran vuotuinen tuotanto vaihtelee eri aurinkopaneelityypeillä ja eriasennusparametreilla.

Taulukko 4 Heckert NeMo 60M Vuotuiset tuotannot

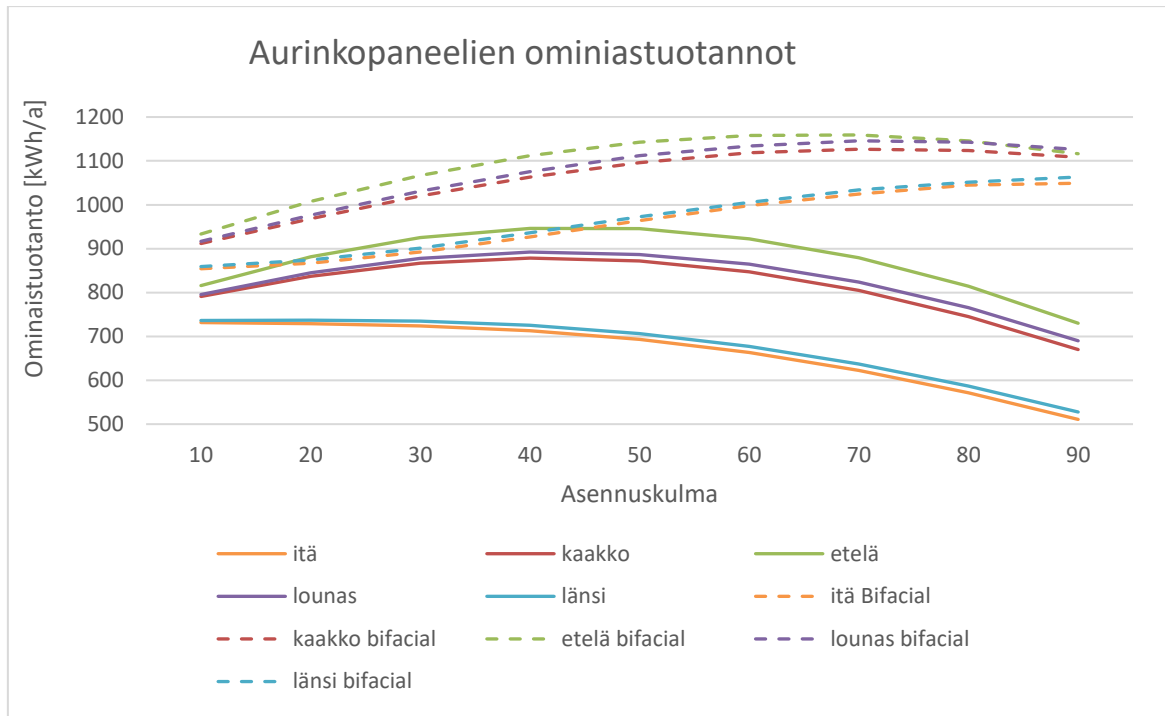
Suunta	itä [kWh/a]	kaakko [kWh/a]	etelä [kWh/a]	lounas [kWh/a]	länsi [kWh/a]
10°	731	790	816	795	736
20°	729	836	881	844	736
30°	723	866	925	877	734
40°	713	878	946	892	725
50°	693	872	945	886	706
60°	663	846	922	864	676
70°	622	804	879	823	636
80°	571	745	814	765	586
90°	510	670	730	690	527

Taulukossa 4 on esitetty Heckert NeMo 60M vuotuinen tuotanto[kWh] yhden kilowatin järjestelmällä erilaisilla asennusparametreillä albedokertoimen ollessa 0,2. Taulukossa on käyty läpi ilmansuunnat idästä -länteen, ja jokaisessa ilmansuunnassa katsottu paneelien tuotannot eri asennuskulmilla 10–90°. Taulukosta voidaan tulkita, että etelänsuuntainen asennus näyttää antavan parhaan tuotannon. Reaali-maailman ominaistuotantoihin verrattaessa, näyttää simuloinnin tulokset olevan oikeanlaisia.

Taulukko 5 Bifacial aurinkopaneelin ominaistuotannot

Suunta	itä [kWh/a]	kaakko [kWh/a]	etelä [kWh/a]	lounas [kWh/a]	länsi [kWh/a]
10°	854	911	933	916	859
20°	866	968	1007	976	874
30°	892	1020	1066	1030	900
40°	926	1063	1111	1075	935
50°	964	1095	1142	1111	972
60°	998	1118	1158	1134	1005
70°	1024	1126	1159	1145	1034
80°	1045	1123	1145	1142	1051
90°	1049	1108	1116	1125	1063

Taulukossa 5 on esitetty Bifacial aurinkopaneelien vuotuiset tuotannot erilaisilla asennusparametreillä. Taulukkoon on kasattu simuloinnissa saatuja vuotuisia tuotantoja kilowattitunteina yhtä kilowattia kohden eri asennuskulmilla ja asennussuunnilla. Taulukon arvot ovat simuloitu albedokertoimen ollessa 0,2. Taulukossa on esitetty ominaistuotannot itä-länsi suuntien välisillä asennussuunnilla ja 10–90° välisillä asennuskulmilla. Taulukosta voidaan havaita, että bifacial aurinkopaneelit tuottavat parhaiten etelään suunnattuina ja asennettuina jyrkemmässä kulmassa, kuin tavalliset aurinkopaneelit. Kuvassa 5 on esitetty taulukon 4 ja 5 arvot havainnollistavana kuvana.



Kuva 5 Aurinkopaneelien ominaistuotannot

Kuvassa 5 on esitetty Bifacial ja tavallisten aurinkopaneelien ominaistuotannot eri ilman-suuntiin albedokertoimen ollessa 0,2. Pystyakselilla on tuotannot yksikössä kWh/a ja vaakakselilla asennuskulma 10–90°. Vertailemalla bifacial ja tavallisen aurinkopaneelien kuvaajia huomataan hyvin, että tavalliseen aurinkopaneeliin vaikuttaa kulman muutokset paljon enemmän, kuin bifacial aurinkopaneeliin. Kuvasta nähdään myös hyvin, että bifacial aurinkopaneelit tuottavat enemmän energiaa kaikilla asennuskulmilla ja asennussuunnilla.

Taulukoiden 4 ja 5 perusteella voidaan tulkita, minkä verran bifacial aurinkopaneelit tuottavat tavallisiin aurinkopaneelisiin verrattuna. Taulukoita vertailemalla huomataan, että kaikilla asennuskulmilla ja suunnilla bifacial aurinkopaneeli tuottaa enemmän, kuin tavallinen aurinkopaneeli. Taulukoista nähdään myös, miten aurinkopaneelien tuotantoihin vaikuttaa erilainen auringon tulosuunta. Itään ja länteen suunnatuilla tavallisilla aurinkopaneeleilla paras tuotanto saadaan pienillä asennuskulmilla, kun taas bifacial aurinkopaneeleilla paras tuotanto saadaan pystysuoralla asennuksella. Taulukoista 4 ja 5 voidaan kuitenkin tulkita, että molemmilla aurinkopaneelityypeillä paras tuotanto saadaan etelään suunnatuilla aurinkopaneeleilla. Vaikka molemmat aurinkopaneelityypit tuottavat parhaiten etelään suunnattuna, niin optimaalinen tuotanto saadaan kuitenkin erikulmilla. Taulukoista nähdään, että tavallinen aurinkopaneeli tuottaa kaikista parhaiten, mikäli se on suunnattu etelään ja sen asennuskulma on noin 40° ja 50° välissä, kun taas Bifacial aurinkopaneeli tuottaa parhaiten silloin, kun sen asennuskulma on 60° ja 70° välissä.

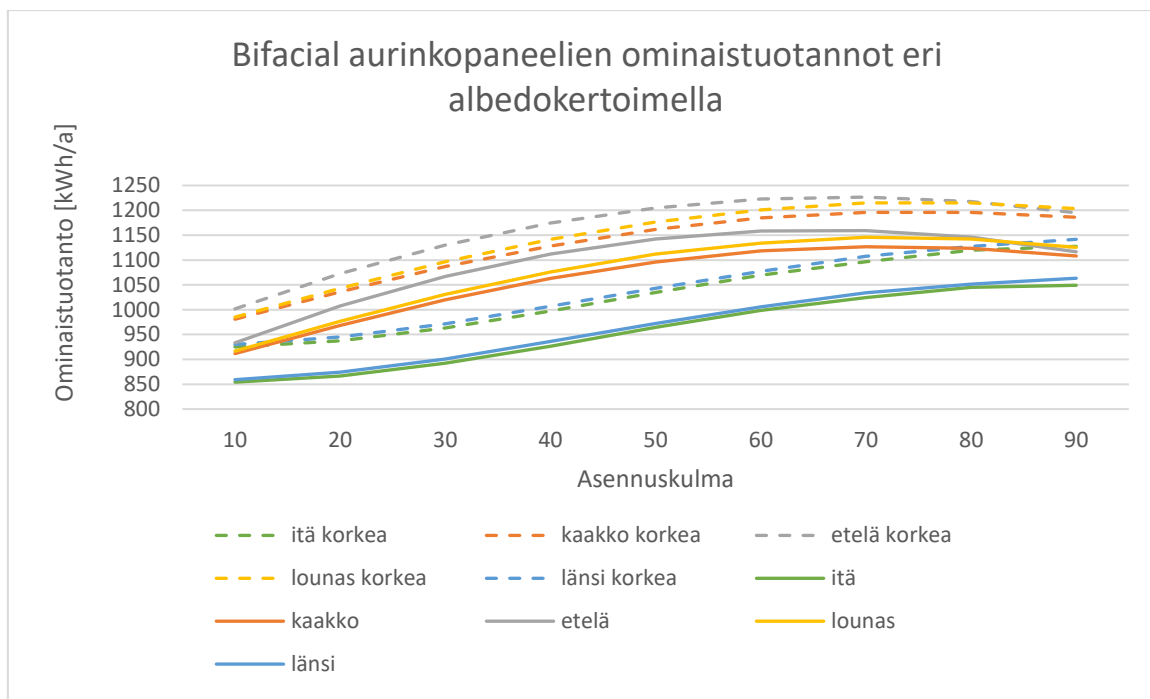
5.2 Albedon vaikutus

Albedokertoimella eli paneelin alapuolella olevan materiaalin heijastuskertoimella on vaikutusta aurinkopaneelin tuotantoon. Tässä kappaleessa tutkitaan hieman sen vaikutusta bifacial aurinkopaneeliin tuotantoon.

Taulukko 6 Bifacial aurinkopaneelin tuotanto korkeammalla albedokertoimella

Suunta	itä [kWh/a]	kaakko [kWh/a]	etelä [kWh/a]	lounas [kWh/a]	länsi [kWh/a]
10°	925	980	1001	985	930
20°	937	1036	1072	1043	945
30°	963	1087	1130	1096	971
40°	997	1128	1174	1141	1006
50°	1035	1162	1205	1176	1043
60°	1069	1185	1222	1200	1077
70°	1096	1195	1226	1215	1107
80°	1120	1195	1217	1215	1127
90°	1127	1185	1195	1203	1141

Taulukossa 6 on esitetty taulukkoa 5 vastaavat arvot, mutta taulukossa 6 albedokerroin on 0,2 sijaan 0,5. Vertailemalla taulukoita 5 ja 6 saadaan tietoa siitä, miten albedokertoimen nostaminen vaikuttaa aurinkopaneelien tuotantoon. Taulukon 6 arvot ovat taulukon 5 arvoja suurempia, mikä on luonnollinen tulos siitä, että takapuolelle heijastuu enemmän säteitä ja silloin tuotanto on suurempaa. Albedokertoimella ei ollut juurikaan vaikutusta siihen, mihin suuntaan ja mihin asennuskulmaan bifacial aurinkopaneelit kannattaisi asentaa. Tuotanto oli parempi myöskin optimaaliseen suuntaan asennettuna. Albedokertoimen kasvattaminen ei myöskään vaikuttanut muihin suuntiin asennettävien bifacial aurinkopaneelien parhaaseen asennuskulmaan. Taulukon 5 ja 6 arvot ovat esitelty havainnollistavana kaaviona kuvassa 6.



Kuva 6 Bifacial aurinkopaneelien ominaistuotannot eri albedokertoimella.

Kuvassa 6 on esitetty bifacial aurinkopaneelien ominaistuotannot eri albedokertoimella. Kuvassa on esitetty taulukoiden 5 ja 6 arvot. Pystyakselilla on tuotannot yksikössä kWh/a ja vaakaa-akselilla asennuskulma 10–90°. Kuvassa on esitetty bifacial aurinkopaneelien ominaisuuksia eri albedokertoimella. Kuvasta nähdään, että kaikilla asennusparametreilla paremmalla albedokertoimella saadaan parempi tuotanto.

5.3 Optimaalinen asennus

Pvsyst- ohjelmassa on ominaisuus, jonka avulla voi suoraan määrittää, mihin kulmaan aurinkopaneeli tulisi asentaa, jotta se tuottaisi parhaimman mahdollisen tuoton. Simuloin sekä yksipuoleisia aurinkopaneeleita, että bifacial aurinkopaneeleita. Pienemmällä albedokertoimella aurinkopaneelit on kannattavampaa asentaa pienempään asennuskulmaan, kun taas suuremmalla albedolla asennuskulman tulisi olla suurempi.

Taulukko 7 Optimaaliset asennusparametrit

	Albedo 0,2	Albedo 0,3	Albedo 0,5	Albedo 0,7
Yksipuoleinen aurinkopaneeli	Etelä 43°	Etelä 45°	Etelä 49°	Etelä 55°
Bifacial Aurinkopaneeli	Etelä 60°	Etelä 60°	Etelä 72°	Etelä 85°

Taulukosta 7 on esitetty optimaalisen asennuksen parametrit taulukoituna eri albedokertoimilla. Taulukossa kerrotaan optimaalinen suunta, joka oli kaikilla aurinkopaneeleilla etelää kohti. Suunnan jälkeen on esitetty kulma, johon aurinkopaneeli tulisi asentaa. Taulukosta nähdään, että bifacial aurinkopaneelit tulee asentaa jyrkempään kulmaan kuin yksipuoleiset paneelit. Taulukosta myös selviää, että mitä suurempi albedokerroin on, sitä jyrkempään kulmaan aurinkopaneelit tulee asentaa. Taulukosta 7 nähdään, että bifacial aurinkopanee-

leilla albedokertoimella on suurempi vaikutus optimaaliseen asennuskulmaan, kuin tavallisilla aurinkopaneeleilla. Albedokertoimen suuri vaikutus bifacial aurinkopaneelien optimaaliseen asennuskulmaan johtuu siitä, että maasta heijastuvan säteilyn vaikutus korostuu bifacial aurinkopaneeleissa ja niiden tuotanto kasvaa. Yksipuoleisen aurinkopaneelin takapuolelta ei saada energiaa talteen, niin niiden optimaalinen asennuskulma ei kasva niin jyrkästi albedokertoimen kasvaessa.

Bifacial aurinkopaneelin korkeudella oli hyvin pieni merkitys tuotantoon. Jotta tuotannossa olisi voitu havaita selkeä ero, olisi bifacial aurinkopaneelit pitänyt nostaa todella korkealle. Tätä varten tarvittaisiin hyvin jyrkät telineet, mikä lisäisi kustannuksia. Bifacial aurinkopaneeli tulisi kuitenkin nostaa hieman irti maasta, jotta auringon säteet heijastuvat paremmin takapuolelle.

5.4 Simuloinnin tulokset

Simuloinnin tuloksena syntyi selkeä käsitys siitä, kuinka erilaiset parametrit vaikuttavat bifacial aurinkopaneelien tuotantoon, sekä siitä miten bifacial ja tavallisten aurinkopaneelien tuotannot eroavat erilaisilla parametreilla. Bifacial aurinkopaneelit tuottavat enemmän energiaa, kuin tavalliset aurinkopaneelit yhtä kilowattia kohden. Bifacial aurinkopaneelien suurempi tuotanto johtuu siitä, että ne saavat säteilyä talteen myös takapuolelta ja niin ollen niihin absorboituu enemmän säteilyä.

Bifacial aurinkopaneelien ominaistuotanto on suurempi kuin yksipuoleisen riippumatta siitä, minkä kokoinen albedokerroin on, kunhan se ei ole täysin nolla. Hyvällä albedokertoimella bifacial aurinkopaneeleilla voidaan saavuttaa jopa yli 30% parempi tuotanto Suomen olosuhteissa eteläsuuntaisella asennuksella. Länsi tai itä suuntaan asennetuilla bifacial aurinkopaneeleilla voidaan saavuttaa jopa 50% suurempi tuotanto, kuin tavallisilla aurinkopaneeleilla. Bifacial aurinkopaneeleista saatava tuotanto on kuitenkin suurempi jo pienemmälläkin albedokertoimella. Esimerkiksi nurmikon albedokertoimella, joka on noin 0,27 saavutetaan yli 20% parempi tuotanto. 20% tuotannon kasvu on jo niin voimakas, että se alkaa vaikuttamaan selkeästi myös bifacial aurinkopaneelien hankinnan kannattavuuteen. Mikäli albedokerroin nostettaisiin keinotekoisesti esimerkiksi 0,5 tai 0,7 olisi bifacial aurinkopaneelien tuotanto vieläkin suurempaa ja näin ollen myös kannattavampaa.

Simulointi osoitti hyvin myös suunnan johon aurinkopaneelit tulisi asentaa. Molemmille aurinkopaneelityypeille oli optimaalista asentaa aurinkopaneelit etelän suuntaan. Tämä johtuu siitä, että silloin aurinkopaneelin etupinta on kaikista pisimmän ajan kohti aurinkoa ja näin ollen aurinkopaneeliin absorboituu kaikista eniten auringonsäteitä. Merkittävää oli myös huomata, että bifacial aurinkopaneelit on paljon taloudellisempia itään tai länteen asennettuina kuin tavalliset aurinkopaneelit. Länteen tai itään asennetut bifacial aurinkopaneelit tulisi asentaa mahdollisimman pystysuoraan, jotta saataisiin optimaalinen tuotanto. Tässä kohtaa aurinkopaneeli tyypeillä oli suuri ero, sillä tavalliset aurinkopaneelit tulisi asentaa matalaan asennuskulmaan. Mikäli eteläsuuntainen asennus ei siis olisi mahdollinen olisi kannattavaa miettiä länteen pystysuoraan asennettuja bifacial aurinkopaneeleita. Simuloinneista myös huomattiin, että länteen suunnatut aurinkopaneelit tuottavat enemmän energiaa kuin itään suunnatut, tämä johtuu auringon säteilyn voimakkuuden vaihtelusta.

Bifacial aurinkopaneelien optimaaliset asennuskulmat eroavat tavallisten aurinkopaneelien asennuskulmista merkittävästi suunnasta riippumatta. Mihin ilmansuuntaan vain asennettuna tulee bifacial asentaa jyrkempään asennuskulmaan kuin tavallinen aurinkopaneeli. Tämä on seurausta siitä, että bifacial aurinkopaneelin takapuoli saa näin ollen enemmän säteilyä, jolloin se synnyttää lisää tuotantoa. Asennuskulmaa nostaessa etupuolelle tuleva suora säteily vähenee, mutta koko aurinkopaneelin tuotanto kasvaa, koska takapuolelta saadaan suhteessa enemmän energiaa, mitä etupuolelta häviää. Merkittävin ero asennuskulmissa syntyy kuitenkin itä ja länsi suuntaisessa asennuksessa, sillä tavallinen aurinkopaneeli kannattaa asentaa mahdollisimman vaakatasoon, kun samaan suuntaan suunnattu bifacial aurinkopaneeli taas kannattaa asentaa mahdollisimman pystysuoraan.

Yhden kilowatin kokoinen bifacial aurinkopaneeli järjestelmä tuottaa optimaalisella asennuksella noin 1160 kWh vuodessa, albedokertoimen ollessa 0,2. Saman kokoinen ja Samalla albedokertoimella samaan paikkaan asennettu optimaalinen tavallinen aurinkopaneelijärjestelmä tuottaa 890 kWh. Bifacial aurinkopaneelilla saavutetaan siis optimaalisella asennuksella yli 20% parempi tuotanto yhtä kilowattia kohden.

Tämän työnkannalta kuitenkin tärkeä asennuskulma on 20°, koska aurinkopaneelit tullaan asentamaan asiakkaalle 20° kulmaan. Tavalliset aurinkopaneelit ovat lähempänä optimi asennuskulmaansa pienemmillä asennuskulmilla, mutta kuitenkin bifacial aurinkopaneelit tuottavat enemmän myös 20° asennuskulmalla. Bifacial aurinkopaneelilla saavutetaan noin 9% parempi tuotanto albedokertoimen ollessa 0,2. Näin pienillä kulmilla bifacial aurinkopaneelin tuotanto ei saavuta kovinkaan suurta etua tehon suhteen. Näin pienellä asennuskulmalla ei myöskään albedokerrointa kasvattamalla saada kovin suurta hyötyä. Simulointi osoitti kuitenkin selkeästi, ettei aurinkopaneelita kannata suunnata muualle, kuin etelään mikäli halutaan maksimoida aurinkopaneelien tuotannon.

Simuloinnin tulokset vastasivat hyvin sitä, mitä kirjallisuuskatsauksessa havaittiin. Simuloinnin perusteella voidaan siis todeta bifacial aurinkopaneelien sopivan myös Suomen olosuhteisiin. Joitakin eroja syntyi esimerkiksi siinä millaiseen asennuskulmaan bifacial aurinkopaneelit kannattaa asentaa. Pidän kuitenkin simuloinnin tuloksia luotettavina.

6. TULOKSET

Tulokset kappaleessa kootaan työssä tehdyt havainnot ja vertaillaan saatuja tuloksia ja niiden oikeudenmukaisuutta. Oleellista on koostaa kirjallisuuskatsauksesta ja simuloinnista eheä kokonaisuus. Simuloinnissa ei ole huomioitu invertteri häviöitä, ne olisivat noin 3%.

6.1 Erot maailmalla ja Suomessa

Suomessa bifacial aurinkopaneelit tulee asentaa eteläsuuntaisesti, niin kuin muuallakin pohjoisella pallonpuoliskolla, mutta 30° leveysasteella on kannattavaa asentaa yksittäinen bifacial aurinkopaneeli pystysuoraan itä-länsi suuntaan. 60° leveysasteella bifacial aurinkopaneelit tulee asentaa melkein samaan asennuskulmaan, kuin tavalliset aurinkopaneelit, mutta Jyväskylän korkeudella asennuskulma on optimaalisessa asennuksessa huomattavasti suurempi. Päiväntasaajan kohdalla itä-länsisuuntaan asennetuissa pystysuorissa bifacial aurinkopaneeleissa on myös positiivisena puolena tuotannon lisäksi se, etteivät ne likaannu samalla tavalla, eikä tällöin niiden puhdistusta tarvita. Samalla tavalla Suomeen asennetuissa pystysuorissa aurinkopaneeleissa on hyvänä puolena, ettei lumi varjosta aurinkopaneeleita, mutta Suomen korkeudella toiset aurinkopaneelit luovat toisillensa varjostumia, kun aurinko paistaa niin matalalta osan päivästä.

6.2 Bifacial aurinkopaneelien kannattavuus

Bifacial aurinkopaneelit ovat kalliimpia, kuin tavalliset aurinkopaneelit, mutta niillä voidaan saavuttaa huomattavasti suurempi tuotanto jopa Suomen pohjoisissa olosuhteissa. Kannattavuuden kannalta on siis tutkittava sekä aurinkopaneelien hintaa- että tuotantoa, eikä maksimaalista tehoa. Tutkimusten perusteella yhdellä tutkittavista bifacial aurinkopaneeleista on niin paljon suurempi tuotanto, että hieman kalliimpi hinta tulisi maksamaan itsensä takaisin, tämä huomataan simuloituista arvoista. Työssä tutkittiin kuitenkin vain 4 eri aurinkopaneelia, joten varman kuvan saisi lisäämällä vertailtavia aurinkopaneeleita.

Bifacial aurinkopaneelin kannattavuuteen vaikuttaa myös suunta ja asennuskulma johon aurinkopaneelit tullaan asentamaan. Esimerkiksi jos aurinkopaneelit asennettaisiin itään tai länteen saataisiin bifacial aurinkopaneelilta jopa 50% suurempi tuotanto suurilla asennuskulmilla, kuin tavallisilla aurinkopaneeleilla. Maailmalla on tutkittu moottoriteiden meluvalleihin asennettuja aurinkopaneeleita, joissa suunta määräytyy tien suunnan mukaan (Fatuochman, 2017). Suomessa on paljon moottoriteitä, jotka ovat etelä-pohjoissuunnassa, jolloin meluvallit tulisi suunnata itään tai länteen ja suurella asennuskulmalla. Tällaisissa ratkaisuissa bifacial aurinkopaneelista saataisiin suurihyöty. Meluvalleiksi asennetuista bifacial aurinkopaneeleista on tehnyt tutkimusta esimerkiksi Fatuochman (Fatuochman, 2017.).

6.3 Optimaalinen järjestelmä asiakkaalle

Tämän työn tärkein tavoite on ollut löytää oikeanlainen järjestelmä asiakkaalle ja verrata onko bifacial aurinkopaneeli järjestelmä kannattava Suomen olosuhteisiin. Tulokset on ka- sattu taulukoihin ja niiden perusteella voidaan todeta taloudellisesti paras aurinkopaneeli-

vaihtoehto. Asiakkaan reunaehdoissa oli määritelty aurinkopaneelien asennuskulma. Parhaan ratkaisun löytämiseksi tulee siis tutkia siinä asennuskulmassa aurinkopaneelien kustannusten ja tuotannon eroja 20° asteen asennuskulmassa. Bifacial sekä tavallinen aurinkopaneeli tuottaa parhaiten 20° asennuskulmassa, kun ne suunnataan etelään, joten riittää tarkastella tuotannon eroja ainoastaan etelän suuntaan asennettuina. Tässä työssä ei oteta huomioon muita järjestelmäkustannuksia, ne voisivat muuttaa kannattavuutta.

Taulukko 8 Aurinkopaneelien kannattavuus

Merkki ja malli	Järjestelmän koko [kWp]	Simuloitu tuotanto [kWh]	Hinta [€]	LCOE [€/kWh]
LG Neon 2 Bifacial	7200	7254,00	4 634,46	0,0212
Yingli 290CF	6380	6427,85	2 654,74	0,0138
Sonnenstromfabrik Excellent Glas/Glas 310M60 bifacial	6820	6871,15	3 605,58	0,0175
Heckert NeMo 60M	7150	6299,15	2 752,86	0,0146

Taulukossa 8 on esitetty vertailu aurinkopaneelien mahdollisista järjestelmän ko' oista, simuloituista vuosituotannoista 0,2 albedokertoimella, järjestelmän hinta ja järjestelmän hinnoista yhtä kilowattituntia kohden. Taulukon tuotannot on laskettu 20° asennuskulmassa. Taulukosta oleellisin sarake on viimeinen sarake, josta selviää kuinka paljon tuotettu energia maksaa, mutta laskelmissa ei ole huomioitu aurinkopaneelien ikääntymisen tuomaa tehon laskua. Edullisin vaihtoehto on Yingli 290CF, joka on bifacial aurinkopaneeli. Yinglin ja Heckert NeMo 60M Aurinkopaneelien LCOE ero on merkittävä, kun lasketaan se koko aurinkopaneelien käyttöiälle. Tämänkin kokoinen säästö aiheuttaa koko aurinkopaneelien käyttöiällä suuren säästön. LCOE laskemisessa käyttöiäksi on määritetty 30 Vuotta.

Taulukko 9 Aurinkopaneelien kannattavuus paremmalla albedokertoimella

Merkki ja malli	Järjestelmän koko [kWp]	Simuloitu tuotanto [kWh]	Hinta [€]	Hinta/tuotanto [€/kWh]
LG Neon 2 Bifacial	7200	7722,00	4 634,46	0,0200
Yingli 290CF	6380	6842,55	2 654,74	0,0129
Sonnenstromfabrik Excellent Glas/Glas 310M60 bifacial	6820	7314,45	3 605,58	0,0164
Heckert NeMo 60M	7150	6299,15	2 752,86	0,0146

Taulukko 9 muuten samanlainen kuin taulukko 8, mutta siinä simuloitut tuotannot ovat simuloitu suuremmalla albedokertoimella 0,5. Taulukolla 9 tarkoitus on näyttää, miten paljon albedokertoimen parantaminen muuttaa asetelmaa bifacial ja tavallisen aurinkopaneelin välillä. Taulukosta huomataan, että Yinglin ja Heckert välinen hinta ero on kasvanut. Tärkeää taulukosta on myös huomata muidenkin bifacial aurinkopaneelien LCOE lasku, vaikka ne eivät vielä saavuttaneetkaan yksipuolisen aurinkopaneelin suhteellista hintaa.

Parhaimman aurinkopaneelin valitsemisessa ainoana asiana ei voida katsoa vain yksin omaa investoinnin suuruutta, vaan täytyy ottaa huomioon myös sen käyttöikä ja muut ominaisuudet. Selvää on, että hinnalla kilpailtaessa neljästä aurinkopaneelivaihtoehdosta selkeästi esiin nousi kaksi aurinkopaneelia, jotka ovat Yingli ja Heckert. Takuu-aika on myös yksi hyvin tärkeä parametri, joka kertoo valmistajan luottamuksesta tuotetta kohtaan ja sen käyttöikä. Yinglin valmistaja myöntää paneeleilleen 85,9% tuotantotakuun 25 vuodelle, kun samalle ajan jaksolle Heckert myöntää omalle aurinkopaneelilleen vain 80% tuotantotakuun. Huomioiden aurinkopaneelien tekniset ominaisuudet ja kustannukset kannattaisi siis vertailla aurinkopaneeleista valita Yingli 290CF bifacial aurinkopaneeli.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tutkittiin bifacial aurinkopaneelien kannattavuutta ja optimaalista asennusta Jyväskylän ilmasto-olosuhteissa. Tutkimuksessa ensin tutkittiin kirjallisuuden perusteella bifacial aurinkopaneeleita ja sen jälkeen simuloitiin optimaalinen järjestelmä asiakkaan antamalla reunaehdoilla. Kirjallisuusosiossa kerättiin tietoa muun muassa bifacial aurinkopaneelien historiasta, kehityksestä, ominaisuuksista ja vertailtiin niitä tavallisiin aurinkopaneeleihin. Simulointiosassa simuloitiin 4 vertailupaneelien tuotantoja. Vertailun aurinkopaneeleista kolme on bifacial aurinkopaneeleita ja yksi normaali aurinkopaneeli. Aurinkopaneeleita on simuloitu erilaisilla asennussuunnilla erilaisissa asennuskulmissa. Lopuksi vielä simuloinnin ja kirjallisuuskatsauksen perusteella vertailtiin aurinkopaneelien ominaisuuksia ja pääteltiin paras mahdollinen aurinkopaneeli asiakkaalle.

Asennusparametrien ollessa oikeanlaiset voidaan bifacial aurinkopaneelilla päästä jopa 50% suurempaan tuotantoon kuin tavallisilla aurinkopaneeleilla. Fyysisiltä mitoiltaan bifacial aurinkopaneelit ovat hyvin samankokoisia kuin tavalliset aurinkopaneelit, mutta niiden kennossa on molemmilla puolilla kontaktorit ja niiden taustapuolellakin on lasipinta. Bifacial aurinkopaneeleita voidaan käyttää ja ne voidaan asentaa samalla tavalla kuin tavalliset aurinkopaneelit, mutta mikäli halutaan maksimoida tuotanto, tulisi bifacial aurinkopaneelit nostaa vähän ilmaan ja asentaa vähän jyrkempään asennuskulmaan kuin tavalliset aurinkopaneelit, jotta taustapuolelle pääsisi mahdollisimman paljon säteilyä. Kirjallisessa osiossa huomattiin myös maantieteellisten olosuhteiden vaikutus bifacial aurinkopaneelien optimaalisiin asennusparametreihin. Esimerkiksi päiväntasaajalla bifacial aurinkopaneelit kannattaa asentaa pystysuoraan itä-länsisuuntaan, jolloin tuotanto on suurta ja aurinkopaneelien pinta pysyy paljon puhtaampana, joten huoltokustannukset ovat pienemmät.

Simulointi suoritettiin aurinkopaneelien simulointiin tarkoitettulla ohjelmalla. Simuloinnissa huomioitiin asennussuunnan ja -kulman lisäksi myös albedokertoimen vaikutus eri aurinkopaneeleihin. Kaikilla eri asennusparametreillä vertailtiin aurinkopaneelien ominaistuotantoja, jolloin pystyttiin vertailemaan eri aurinkopaneelien ominaisuuksia. Simulointien perusteella parhaaksi aurinkopaneeliksi valikoitui Yingli 290CF bifacial aurinkopaneeli. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta bifacial aurinkopaneelin soveltuvan myös Suomen pohjoisiin olosuhteisiin.

Tutkimusta voitaisiin laajentaa kasvattamalla vertailtavien aurinkopaneelien määrää, jolloin saataisiin parempi tietoisuus siitä, mikä todellisuudessa on ero bifacial aurinkopaneelien ja tavallisten välillä. Tutkimus oli kohdennettu ainoastaan yhteen sijaintiin, joten tutkimuksessa olisi voitu simuloida aurinkopaneeleita muunlaisissa ilmasto-olosuhteissa, jolloin käsitys bifacial aurinkopaneelien ominaisuuksista olisi parantunut. Bifacial aurinkopaneelien kohdalla olisi voitu pohtia myös lumen vaikutusta tuotantoon, sillä lumella on suuri albedokerroin, jolloin kevään tuotantohuiput voisivat nousta vielä korkeammiksi.

LÄHTEET

Aurinkoenergia ja aurinkosähkö Suomessa, [verkkodokumentti]. [viitattu 12.9.2019]. Saatavissa. https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/aurinkoenergia-ja-aurinkosahko-suomessa.

Byeong Gan Bhang, Wonbin Lee, Gyugwang Kim, Jih Ho Choi, 2019 Power Performance of Bifacial c-Si PV Modules With Different Shading Ratios.

Ingrid Romijn, 2017 Bifacial solar cells - a brief overview

Faturrochman, Gerry Julian, 2017 Design Optimization of Bifacial Photovoltaic Noise Barriers Using a High Granularity Energy Yield Modelling Approach

Guerrero–Lemus, R., Vega, R., Taehyeon, K., Kimm, A. & Shephard, L. 2016. Bifacial solar photovoltaics – A technology review. Renewable and sustainable energy reviews 60 (2016), pp. 1533 – 1549.

International Technology Roadmap for PV. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.9.2019]. Saatavissa.

https://pv.vdma.org/documents/105945/26776337/ITRPV%20Ninth%20Edition%202018%20including%20maturity%20report%2020180904_1536055215523.pdf/a907157c-a241-eec0-310d-fd76f1685b2a

Jose E. Castillo–Aguilella, Paul S. Hauser 2016 Multi-Variable Bifacial Photovoltaic Module Test Results and Best-Fit Annual Bifacial Energy Yield Model

Kari Kilkki 2018 Aurinkopaneelien kuormituksen mallintaminen.

LG NEON 2Bifacial, 2018

Md. Sultan Mahmud 2018 Solar Highway in Bangladesh Using Bifacial PV (<https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.cc.lut.fi/document/8541253/authors>) [viitattu 19.11.2019]

Pvsyst, 2019 (<https://www.pvsyst.com/>) [viitattu 19.11.2019]

Xingshu Sun, Mohammad R. Khan, Amir Hanna, Muhammad M. Hussain, Muhammad A. Alam. The Potential of Bifacial Photovoltaics: A Global Perspective (<https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.cc.lut.fi/document/8366353>) [viitattu 20.9.2019]