

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikka

2024

Noora Aittakari

3D-aurinkoenergiateknologia



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka

2024 | 46

Noora Aittakari

3D aurinkoenergiateknologia

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutustua erilaisten 3D-aurinkosähköteknologian toteutusten etuihin, rakenteisiin ja tehokkuuksiin.

Taistelussa ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi uusiutuvat vihreät energiantuotantovaihtoehdot ovat osoittautuneet keskeiseksi aiheeksi. Etenkin aurinkoenergialla on suuri merkitys tulevaisuuden energiantuotannossa, runsaana, puhtaana ja ehtymättömänä energianlähteenä. Tämä tekee aurinkoenergian tuotannon teknologisesta kehityksestä tärkeän aiheen.

Tämä opinnäytetyö on kirjallisuuskatsaus, joka hyödyntää olemassa olevia 3D-aurinkoteknologian ja uusiutuvan energian tutkimuksia. Näitä tutkimuksia käyttäen tämä opinnäytetyö pyrkii antamaan käsityksen merkittävimmistä saavutuksista 3D-aurinkoenergiateknologian toteutuksista.

Erilaiset innovatiiviset kehitykset ovat edistäneet aurinkoenergian tuotannon tehokkuutta tarjoamalla uusia materiaaleja ja rakenteellisia vaihtoehtoja. 3D-rakenteiden käyttö aurinkoenergian tuotannossa on noussut esille merkittävänä pelaajana. 3D-aurinkoteknologia kattaa monia malleja, kuten kaksipuoliset aurinkopaneelit, aurinkopuut, keskittävät aurinkosähköjärjestelmät ja nanorakenteet. Tällaisilla toteutuksilla pyritään optimoimaan tilankäyttöä ja tehostamaan aurinkokeräystä ja auringonvalon muuntamista sähköksi.

Asiasanat:

Energiateknologia, Aurinkopaneelit, Aurinkoenergia

Bachelor's thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

2024 | 46

Noora Aittakari

3D-solar energy technology

This thesis aims to explore the current state of different 3D-solar technologies, such as their unique advantages, basic structural ideas, and effectiveness. In the fight against climate change, renewable green energy alternatives have taken center stage. Solar energy especially will have an important part in energy production as a plentiful, clean, and inexhaustible source of energy. This makes technological innovation in solar energy production an important topic.

This thesis is a literature review encompassing existing research on 3D-solar technologies and renewable energy. By utilizing works and studies, this thesis seeks to provide an understanding of some of the most notable accomplishment in the development of 3D-solar technology.

Different developments have furthered the efficiency of solar energy production by offering new materials and structures. The use of 3D-structures in energy production have been brought forth as an important player in the future of energy. 3D-solar technologies include many designs with some of the most notable being bifacial solar panels, solar trees, concentrated solar systems, and nanostructures. These kinds of approaches to solar energy production aims to optimize space utilization and enhance the efficiency of solar collection and the conversion of sunlight into electricity. The widespread use of solar energy in combination with other renewable energy sources will become a central part in the transition towards a carbon neutral future for energy production.

Keywords: Energy technology, Solar panels, Solar energy

Sisältö

Käytetyt lyhenteet ja sanasto	6
1 Johdanto	7
2 Aurinkoenergiateknologia	9
2.1 Ohutkalvoiset aurinkokennot	10
2.1.1 Väriherkistetyt aurinkokennot	11
2.1.2 Perovskiitti-aurinkokennot	13
3 Kolmiulotteisia aurinkosähkörakenteita	15
3.1 Kaksipuoliset paneelit	15
3.2 Keskittävät aurinkopaneelit	18
3.3 Aurinkopuut	22
3.4 Nanorakenteiset aurinkokennot	26
3.5 Muita 3DPV-rakenteita	28
4 Tulevaisuuden trendejä	31
4.1 Aurinkoenergiateknologia	32
4.2 Kustannuksen ja markkinat	33
4.3 Ympäristöpolitiikka	34
5 Yhteenveto	36
Lähteet	37

Kuvat

Kuva 1. Väriherkistetyn aurinkokennon rakenne	12
Kuva 2. Perovskiitti aurinkokennon rakenne	14
Kuva 3. (a) yksipuolinen aurinkopaneeli (b) kaksipuolinen aurinkopaneeli, (c) yksipuolisen paneelin vastaanottama auringonvalo, (d) kaksipuolisen paneelin vastaanottama auringonvalo (Abdallah ym. 2023)	16
Kuva 4. Keskittävä PV -järjestelmä peilin avulla (Vasen) linssin avulla (oikea)	19
Kuva 5. Konsentraatio PV-järjestelmien rakenteita	21
Kuva 6. Spiraalinmuotoinen lehtiasetelmallinen aurinkopuu (Gangwar ym. 2019)	24
Kuva 7. Auringonkukan muotoinen aurinkopuu (Almadhhachi ym. 2024)	25
Kuva 8. Nanolankarakenne (vasen) ja Nanokartiorakenne (oikea)	27
Kuva 9. Aurinkokuutiorakenteita, a) avoin kuutio, b) korkeampi avoin särmiö ja c) torni (Bernardi ym. 2012)	29
Kuva 10. Fibboachi aurinkokenno (Benguar ym. 2018)	30
Kuva 11. Ennustettu edullisin sähköntuotanto teknologia vuosina a) 2020 b) 2023 c) 2027 d) 2023 (Nijssse ym. 2023)	33

Kuviot

Kuvio 1. Aurinkokennoteknologian sukupolvet	10
Kuvio 2. Keskittävien PV-järjestelmien luokittelu	22

Taulukot

Taulukko 1. Energian tuotanto simulaation tulokset yksipuolisella aurinkopaneelilla. (Juaidi ym. 2023)	18
Taulukko 2. Energian tuotanto simulaation tulokset yksipuolisella aurinkopaneelilla (Juaidi ym. 2023)	18

Käytetyt lyhenteet ja sanasto

3D	kolmiulotteinen
AES	Ilmoitettujen lupausten skenaario (The announced pledges scenario)
c-Si	Kiteinen pii
DSSC	Väriaineherkistetty aurinkokenno
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö (International Energy Agency)
kWh	kilowattitunti
kWp	aurinkosähköjärjestelmän huipputeho/tuotanto kapasiteetti
NZE	Nettonollapäästö skenaario (Net zero emission)
PSC	Perovskiitti-aurinkokenno
PV	Aurinkosähköteknologia (Photovoltaic)
PVsyst	aurinkoenergiajärjestelmien simulointiohjelma
STEPS	Ilmoitettujen käytäntöjen skenaario (The Stated Policies Scenarion)

1 Johdanto

Energiantarve on jatkuvassa kasvussa maailman ympäri ja teknologian on kehityttävä, jotta sähkön tuotanto pystyy vastaamaan kasvavaan tarpeeseen. Etenkin ympäristöystävällisten ja kestävien ratkaisujen tutkimus on ollut suuressa suosiossa. Ilmastonmuutos ja ympäristön saastuminen ovat tehneet tärkeäksi siirtyä perinteisistä fossiilisista polttoaineista uusiutuviin energialähteisiin. Vesi-, tuuli- ja aurinkosähkö tulevat olemaan tämän siirtymisen kulmakiviä. Näistä vaihtoehtoista aurinkoenergia on noussut erittäin lupaavaksi kehityksen alueeksi. Aurinko on puhdas halpa ja loppumaton energian lähde. Tehokas aurinkoenergian käyttö vaatii innovaatiota ja teknologian kehitystä sen potentiaalin maksimoimiseksi. Yksi lupaava keino on kolmiulotteisten (3D) rakenteiden hyödyntäminen.

Maailmanlaajuisesti vihreiden energialähteiden tarpeelle on kysyntää. Kasvava tarve hillitä ilmastonmuutosta on johtanut aloitteisiin, joiden tarkoituksena on vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista ja ottaa käyttöön puhtaampia vaihtoehtoja. Vihreät energialähteet ovat ympäristöystävällisiä, uusiutuvia ja lähes päästöttömiä energianlähteitä. Fossiilisia polttoaineita käyttävät energiantuotantomenetelmät tuottavat ympäristölle haitallisia aineita, jotka ovat ihmiselle vaarallisia ja aiheuttavat ilmastonmuutosta. Etenkin sähköntuotannosta syntyvät kasvihuonekaasupäästöt ovat lisääntyneet eksponentiaalisesti viime vuosikymmeninä. Tämän vuoksi uusiutuvaa energiaa, kuten aurinko-, tuuli-, vesi-, biomassa-, geoterminen- ja vetyenergiaa, on alettu hyödyntämään sähkön tuotannossa. (Ang ym. 2023.) Fossiilisten polttoaineiden käyttöä on myös rajoitettu ilmastonmuutoksen ja ympäristön pilaantumisen hillitsemiseksi, esimerkiksi Pariisin ilmastosopimuksessa vuonna 2015 ja vuonna 2021 YK:n ilmastokokouksessa (COP26). (UNFCCC 2016; Hunter 2021). Erityisesti aurinkoenergia on kasvanut merkittävästi tekniikan kehityksen, alenevien kustannusten ja kasvavan tietoisuuden myötä.

Aurinkosähköteknologia (PV) on uusiutuva ja puhdas energian tuotanto tapa, joka on runsas, halpa, vähän huoltoa vaativa ja ympäristöystävällinen. PV-

järjestelmät muuttavat auringon energiaa sähköksi aurinkopaneeleilla. Näistä aurinkosähkölaitteista on nopeasti tullut halvin vaihtoehto vihreälle sähköntuotannolle. Aurinkokennot, ovat elektronisia laitteita, jotka muuttavat auringonvalon sähkövoimaksi. Aurinkoenergia on nopeasti kasvava uusiutuvan energian teknologia ja sillä odotetaan olevan merkittävä rooli sähköntuotannon etenemisessä. Vuoteen 2050 mennessä aurinkosähkön kapasiteetin odotetaan kasvavan 18 kertaiseksi verrattuna siihen mitä se oli vuonna 2018. (Maka ja Alabid 2022.)

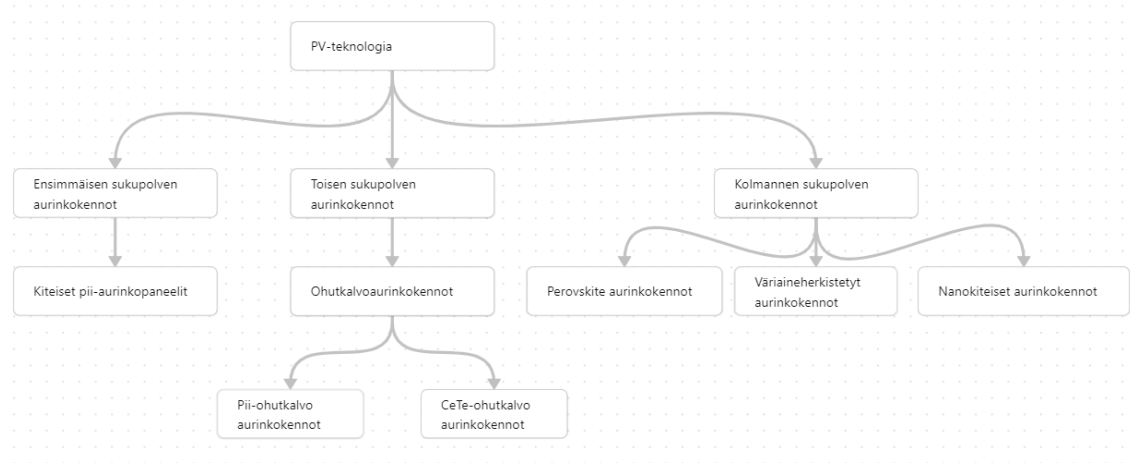
Perinteisillä litteillä aurinkopaneeleilla on ollut tärkeä rooli aurinkoenergian yleistymisessä, mutta niiden tehokkuus ja skaalautuvuus ovat rajoituksellisia. Perinteiset litteät aurinkosähköjärjestelmät vaativat huomattavan asennusalueen ja niiden tehokkuus kärsii, esimerkiksi varjosta ja niiden asettelusta johtuvasta rajoitetuista auringon valon kaappaamiskulmista. 3D-rakenteiden käyttö tarjoaa uuden lähestymistavan aurinkoenergian talteenottoon. Tällä tavalla voidaan parantaa valon absorbointia, lisätä energian tuotannon tehokkuutta ja ratkaista tilarajoitusten asettamat haasteet. 3DPV rakenteet kattavat useita erilaisia malleja kuten näyttäviä aurinkopuita ja nanometreissä mitattavia aurinkosolurakenteita (Cui ym. 2019, 1–5).

Tässä opinnäytetyössä tullaan perehtymään erilaisten 3D-järjestelmien käyttöön aurinkoenergian tuotannossa. Työ tulee käymään läpi erilaisten merkittävien 3DPV-toteutusten suunnitteluperiaatteita ja toimintakykyä

2 Aurinkoenergiateknologia

Piipohjaiset jäykät aurinkokennot ovat yksi eniten käytetyistä aurinkosähkön tuotantolaitteista jopa 80–90 % maailman aurinkosähköteollisuudesta käyttäen kiteisestä piistä (c-Si) valmistettuja aurinkokennoja. (Sui ym. 2021, 1–2). Tämä ei ole yllättävää sillä pii on runsaasti löytyvä materiaali, ja piikennot ovat tehokkaita ja kestäviä verrattuna ei-piipohjaisiin kennoihin. Piipohjaisilla aurinkokennoilla on kuitenkin rajallinen hyötysuhde, ja ne kärsivät useista rajoitteista kuten tehonmenetyksestä korkeissa lämpötiloissa, tilantarpeesta ja jäykästä rakenteestaan, joka rajoittaa niiden käyttöä joustavuutta vaativissa sovelluksissa. Piipohjaiset aurinkokennot kärsivät myös niiden kyvyttömyydestä hyödyntää korkeaenergisiiä fotoneja, jotka asettuvat valon violetille ja siniselle spektrille. (Imamzai ym. 2012, 1–2; Sui ym. 2021, 1–4.) Piistä valmistettujen aurinkokennojen hyötysuhde kärsii myös ei-halutusta heijastuksesta, resistiivisyydestä sekä elektronireikien rekombinaatiosta. Näistä häviöistä 30 % on optisten häviöiden osuutta (Isoe ym. 2023).

Aurinkokennojen rakenteen optimointi on keskeinen tutkimuksen aihe tehokkaan ja halvan aurinkoenergian tuotannon saavuttamiseksi. Aurinkokennot luokitellaan ensimmäisen, toisen ja kolmannen sukupolven aurinkokennoihin. Niiden luokittelu on esitetty kuviossa 1. Ensimmäiseen sukupolveen kuuluvat perinteiset jäykät piipohjaiset aurinkokennot. Toiseen sukupolveen kuuluvat, ohutkalvotyypiset aurinkokennot, jotka ovat halvempia kuin piipohjaiset kennot mutta useimmat niistä eivät saavuta samanlaista tehontuotannon tasoa. Kolmannen sukupolven aurinkokennoja ovat taas puolijohde ratkaisuja käyttäviä uudempia ohutkalvo kennoja. Etenkin kolmannen sukupolven aurinkokennoteknologioita tutkitaan ja kehitetään laajasti tällä hetkellä. (Shah ym. 2023, 1–2; Sivaraj ym. 2022.)



Kuvio 1. Aurinkokennoteknologian sukupolvet

Toisen ja kolmannen sukupolven aurinkokennoja on kehitetty vastauksena perinteisten piipohjaisten aurinkokennojen puuteisiin ja esteisiin. Uudet teknologiat ja kolmannen sukupolven aurinkokennot omaavat erinomaisia hyötysuhteita ja matalia kustannuksia. Ne ovat kevyitä perinteisiin ratkaisuihin verrattuna ja niiden valmistustekniikat ovat joustavia. Kaikista eduista huolimatta kolmannen sukupolven aurinkokennot eivät ole valmiita kaupalliseen tuotantoon, niiden stabiilisuus ongelmien, suunnittelun ja materiaaleista syntyvien rajoitusten vuoksi. (Shah ym. 2023, 2.)

2.1 Ohutkalvoiset aurinkokennot

Ohutkalvoiset aurinkokennot ovat halvempi vaihtoehto perinteisille piipohjaisille aurinkokennoille. Kehityksen kannalta huomattavimmat ohutkalvo aurinkokenno tyypit ovat moniliitos yksiköitä, joilla on kyky muuntaa valoa energiaksi laajemmalla spektrillä kuin muut aurinkoenergian tuotantorakenteet. Ohutkalvoiset aurinkokennot ovat joustavia ja keveitä, joten ne on helppo asentaa myös kaareville pinoille. Useat ohutkalvoiset aurinkokennot kuitenkin kärsivät stabiilisuus ongelmista etenkin korkeammassa lämpötiloissa. (Sivaraj ym. 2022.) On kuitenkin huomattava, että yksi ominaisuus, joka voidaan saavuttaa käyttämällä monikerroksisia ohutkalvokennoja, on niiden kyky

absorboida valoa tietyllä spektrillä ja hylkiä valoa, joka aiheuttaisi kennon lämpötila nousemista (Li ja Fujita 2008).

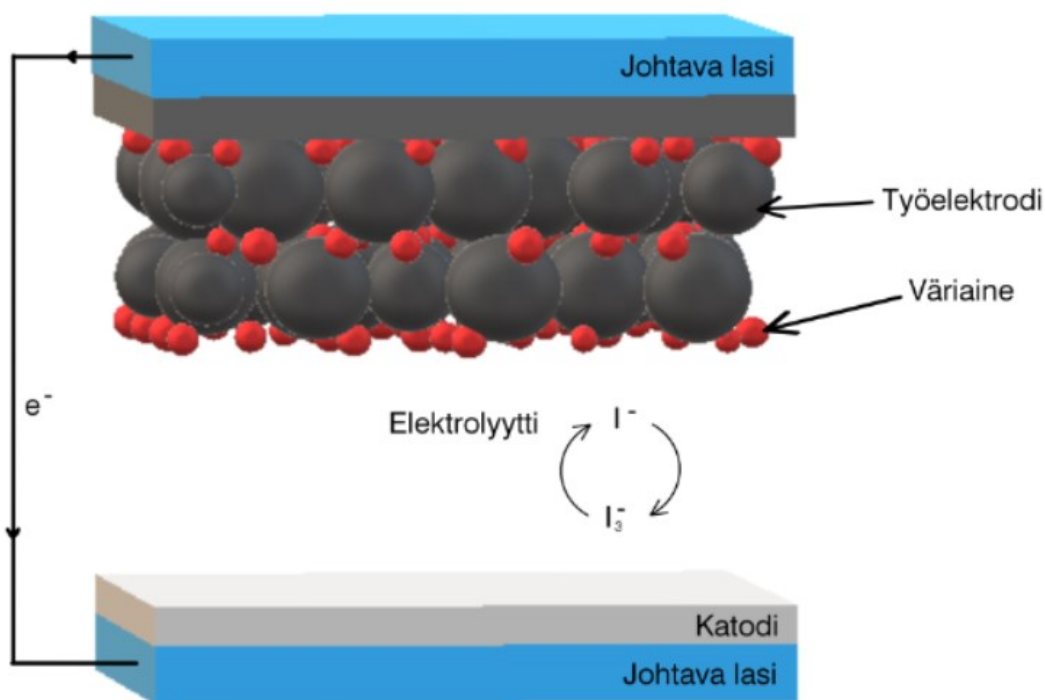
Ohutkalvo aurinkokennot ovat ohuita, joustavia aurinkokennoja, joita on mahdollista pinota päällekkäin sähköntuotannon parantamiseksi. Tätä varten on kehitetty läpinäkyviä kalvoja, jotka päästävät lävitseen valoa ja muuntavat sitä sähköenergiaksi samanaikaisesti. Jotta auringonvalo kykenee kulkemaan kalvojen läpi, niiden on omattava korkea läpinäkyvyys. Lisäksi kalvoilta vaaditaan tietyt optiset ominaisuudet parhaan mahdollisen energia tuotantotason saavuttamiseksi. (Lin ym. 2023.) Monikerroksisilla ohuilla kalvoilla on spektrisesti selektiivisiä läpäisy- ja heijastusominaisuuksia, eli ne sallivat vain tiettyjen valospektrin osien kulkemisen lävitseen samalla ja hylkivät osan, eli niiden läpäisy- ja heijastusominaisuudet ovat säädeltyjä tietyille valituille ja kontrolloiduille valonsäteilyvirroille. (Isoe ym. 2023.) Ohutkalvojen käytöllä voidaan tuottaa energiaa tehokkaammin kuin perinteisillä aurinkokennoilla. Niiden kyky tuottaa energiaa pienessä tilassa, on huomattava kehityksen alue aurinkosähköteknologiassa. Ohutkalvotyyppisiä aurinkokennoja on useita erilaisia, huomattavimmat ovat kuitenkin kolmannen sukupolven aurinkokennot kuten orgaaniset, väriainekäsittellyt, perovskiitti ja muut hybridimateriaaleista valmistetut ohutkalvokennot. (Lin ym. 2023.)

2.1.1 Väriherkistetyt aurinkokennot

Väriherkistetyt aurinkokennot (DSSC) ovat kolmannen sukupolven ohutfilmi aurinkokennoja, jotka käyttävät orgaanisia väriaineita tuottamaan sähkövirtaa. Niiden toiminta perustuu auringonvalon kyvystä virittää väriaineenmolekyylejä. (Grasso 2006, 20–21.)

DSSC koostuu viidestä pääkomponentista kuten esitetään kuvassa 1. Puolijohteinen työelektrodi, yleensä valmistettu titaanioksidista, jonka tehtävä on absorboida saapuvaa auringon valoa. Työelektrodi kuitenkin kykenee absorboimaan valoa vain pieneltä UV-alueelta. Tämän vuoksi käytetään herkistäjää eli väriainetta, jolla voidaan parantaa valon absorbointia. Yleensä

väriaineet on valittu niin, että niiden absorbointispektri kattaa näkyvän ultravioletin ja infrapunalueet. Elektrolyytin tehtävä on regeneroida hapettunut väriaine. Vastaelektrodi toimii katalysaattorina kennolle palaavien elektronien pelkistyksessä. Yleinen vastaelektrodin materiaali on ollut platina, mutta sitä on pyritty korvaamaan halvemmilla ja helpommin saatavalla materiaaleilla, kuten hiilellä. Tämä kaikki on rakennettu kahden johtavan ja läpinäkyvän, yleensä lasisen kerroksen väliin. (Sharma ym. 2018; Jaksik ym. 2017.)



Kuva 1. Väriherkistetyn aurinkokennon rakenne

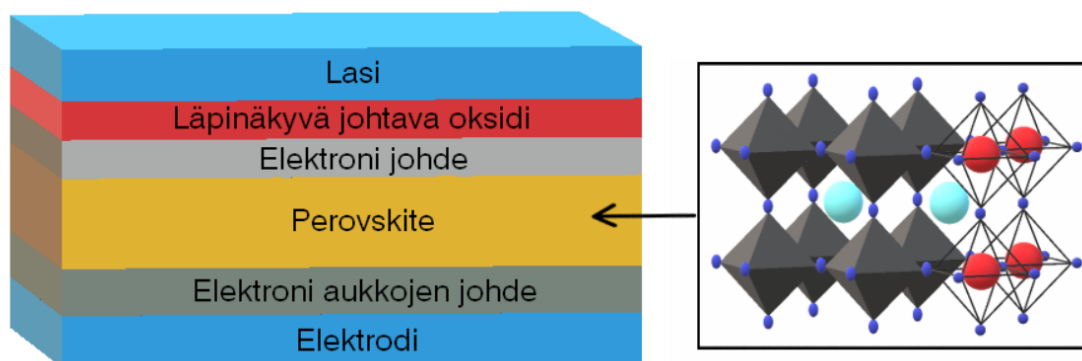
Väriherkistetyn aurinkokennot ovat halvempi vaihtoehto, kuin perinteiset piipohjaiset aurinkokennot. Niiden taipuisuuden ansiosta väriherkistettyjä kennoja voidaan käyttää tavoilla, joihin perinteiset aurinkokennot eivät kykene. Niiden tehokkuus ei myöskään laske läheskään yhtä paljon lämpötilan noustessa. Väriherkistetyn aurinkokennot eivät kuitenkaan yleensä saavuta samankaltaisia tehokkuuksia kuin perinteiset aurinkokennot (Perämäki 2016, 4–7.) Vasta muuttaman viimevuoden aikana on kehitetty väriherkistettyjä

aurinkokennoja, jolla on saavutettu ennätysellinen 15,2 %:n hyötysuhde (Yameng ym. 2022).

DSSC-teknologia kärsii ohutkalvo aurinkokennoille tyypillisistä stabiilisuus ongelmista, etenkin pitkällä aikavälillä. Tässä tapauksessa on ollut kyse kahdesta eri ongelmasta. Ensinnäkin nestemäisen elektrolyytin kyvystä haihtua korkeissa lämpötiloissa ja toiseksi on väriaineen ja elektrolyytin komponenttien peruuttamaton sähkökemiallinen ja lämpöhajoaminen, jota voi tapahtua aurinkokennon toiminnan aikana. (Grasso 2006, 20.) Yleensä elektrolyyttien haihtumista pyritään estämään rakentamalla kenno tiiviiksi, jotta elektrolyytti ei pääse karkaamaan. Tähän on käytetty kuumasulatekalvoja koska ne ovat halpa ja helppokäyttöinen ratkaisu. Kuumasulatekalvot ovat kalvomateriaaleja, jotka sulavat tarpeeksi korkeissa lämpötiloissa ja tarttuvat niiden kanssa kosketuksissa oleviin materiaaleihin. Ne eivät kuitenkaan ole täydellinen ratkaisu sillä niiden tiivistyskyky heikkenee, kun kennon sisäinen paine kasvaa ja ne altistuvat sykliselle tai säännölliselle lämpötilan vaihtelulle. (Sharma ym. 2018.) Komponenttien hajoaminen ei ole enää merkittävä ongelma, nykyään työelektrodina käytetty titaanioksidi ei kärsi edeltäjiensä ongelmista. (Grasso 2006, 20).

2.1.2 Perovskiitti-aurinkokennot

Perovskiitti-aurinkokennot (PSC) ovat aurinkokennoja, joka käyttävät perovskiitti-rakenteisia yhdisteitä valoa keräävänä kerroksena. Nämä aurinkokennot ovat kehittyneet väriherkistettyjen aurinkokennojen pohjalta, ja ovat täten hyvin samankaltaisia rakenteeltaan ja toiminnaltaan. Kuvassa 2 on esitetty perovskiitti-kennon rakenne. Alun perin perovskittia käytettiin herkistäjänä väriaineherkistetyissä kennoissa, joissa molekyyliväri korvattiin perovskitilla. PSC:t ovat huomattavasti uudempi keksintö kuin orgaaniset tai väriherkistetyt ohutkalvo aurinkokennot. (Park 2015; Correa-Baena ym. 2017.)



Kuva 2. Perovskiitti-aurinkokennon rakenne

Ensimmäiset PSC:t kehitettiin vuonna 2009, kun perovskiitti-materiaalia testattiin väriaineherkistetyissä aurinkokennoissa, jolloin saatiin, saavutettiin 3,81 %:n tehokkuus. Varhaiset solut olivat kuitenkin lyhytikäisiä syövyttävien elektrolyyttien vuoksi. Vuonna 2012 tapahtunut läpimurto korvasi nestemäiset elektrolyytit kiinteä olomuotoisilla kerroksilla, mikä nosti tehokkuuden 10,9 prosenttiin. Tämä herätti merkittävää kiinnostusta PSC-tekniologiasta. (Qiu ym. 2018, 1–2) Viime vuosina perovskiitti-aurinkokennojen tehokkuuden ja vakauden parantamisessa on edistytty merkittävästi ja niihin on saatu huomattavaa investointia ympäri maailman. Tehokkuuden ylläpitämisessä on haasteita etenkin moduulikoon kasvaessa, ja jatkuvaa tutkimusta tarvitaan tehokkuuden parantamiseksi. Lisäksi tutkimus keskittyy stabiilisuusongelmien ratkaisemiseen. Yksi näistä ratkaisuista on kapselointi tekniikoiden kehitys PSC:n käyttöä pidentämiseksi (Wu ym. 2021, 1–8.)

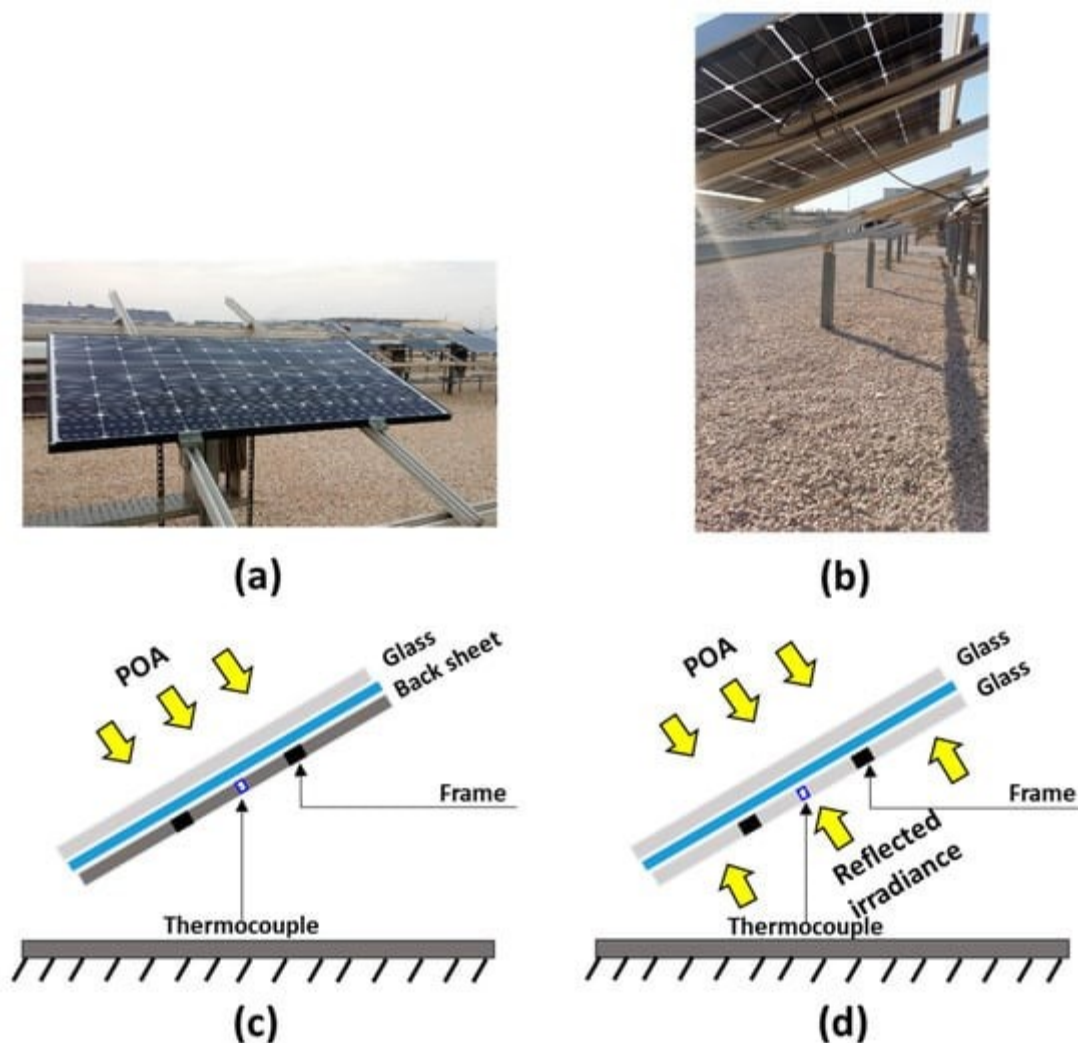
3 Kolmiulotteisia aurinkosähkörakenteita

Tällä hetkellä markkinoita dominoivat litteät piipohjaiset aurinkopaneelit, jotka ovat tehokkaita ja luotettavia, mutta ne kuitenkin kohtaavat useita rajoituksia. Litteät aurinkopaneelit asennetaan yleensä katoille, pelloille tai muille avoimille alueille, joka tapauksessa niiden asennus vaatii paljon maapinta-alaa. Näiden paneelien tehokkuuteen vaikuttaa myös auringon asento, kun valo ei loista paneelille kohtisuorasti, sen hyötysuhde heikkenee. Kaikkein suurimmat häviöt näille paneeleilla ovat optisia häviöitä, kuten valon heijastus, ja korkeasta lämpötilasta syntyvät häviöt. (Andreani ym. 2019; Heikkilä 2020, 32–38.) 3DPV-järjestelmät kykenevät ratkaisemaan nämä haasteet. Lisäksi tasaisia aurinkopaneeleja pidetään joskus esteettisesti epämiellyttävinä, etenkin asuinalueilla. Sitä vastoin 3DPV-järjestelmät voidaan suunnitella sulautumaan saumattomasti arkkitehtonisiin tai luonnonympäristöihin. Ne voidaan myös integroida erilaisiin rakenteisiin, kuten rakennusten julkisivuihin, melusteisiin tai jopa kaupunkikalusteisiin. Näin maksimoidaan tilankäyttöä erilaisissa ympäristöissä. (Bernardi ym. 2012)

3.1 Kaksipuoliset paneelit

Kaksipuoliset aurinkopaneelit kykenevät muuttamaan aurinkoenergiaa sähköksi kennon molemmilla puolilla. Ne ovat rajatapaus siihen suhteen lasketaan ne 3D-aurinkopaneeleiksi. Perinteiset aurinkopaneelit tuottavat sähköä pelkästään etupinnallaan, jossa auringonvalo osuu suoraan aurinkokennoihin. Kaksipuolisilla paneeleilla on läpinäkyvä taustalevy tai lasitausta, joka päästää valon läpi kennojen takapinnalle. Tämän rakenteen ansiosta kaksipuoliset aurinkopaneelit voivat tuottaa sähköä suorasta auringonvalosta ja maan kautta heijastuneesta valosta, joka saavuttaa paneelin takapinnan. Yksipuolista ja kaksipuolista aurinkopaneelia on vertailtu kuvassa 3. (Maniscalco ym. 2023; Mouhib ym. 2022.) Molempien yksi- ja kaksipuolisten PV-moduulien suorituskykyyn vaikuttaa moduulin kallistus- ja kääntökulma (aurinkopaneelin ja eteläisen kardinaalipisteen välinen vaakakulma). Kaksipuolisten PV-moduulien

toimintaan vaikuttavat kuitenkin huomattavasti enemmän hajasäteilykerroin, paneelin asennus korkeus ja kääntökulma kuin perinteisiin aurinkopaneelisiin. (Jang & Lee 2020)



Kuva 3. (a) yksipuolinen aurinkopaneeli (b) kaksipuolinen aurinkopaneeli, (c) yksipuolisen paneelin vastaanottama auringonvalo, (d) kaksipuolisen paneelin vastaanottama auringonvalo (Abdallah ym. 2023)

Kaksipuoliset aurinkopaneelit ovat erityisen tehokkaita ympäristöissä, joissa on erittäin heijastavia pintoja, eli pinnoilla on korkea albedo. Vaaleilla materiaaleilla, kuten esimerkiksi lumella, hiekalla, vesistöillä ja valkoisilla laatoilla on korkea albedo. Kaksipuolisen aurinkopaneelin takapuolen tehokkuus on vahvasti riippuvainen auringon loistamis- kulmasta. Kun aurinko paistaa

matalassa kulmassa paneelin takapuoli toimii tehokkaammin sillä valon suurempi tulokulma aiheuttaa enemmän heijastusta maan pinnasta. Kun aurinko sijaitsee korkeammalla taivaalla, valon tulokulma pienenee ja paneelin takapuolen tehokkuus laskee. (Alam ym. 2023.)

Kun kaksipuolinen aurinkopaneeli on pystysuorassa, sen molempien puolien nimellistehokkuuden suhde on korkeimmillaan ja tämä suhde kasvaa aina paneelin kallistuskulman kasvaessa. Paneelin kokonaisenergiantuotanto on kuitenkin suurimmillaan pienissä kallistuskulmissa, kun auringonvalo loistaa paneelin etupuolelle kohtisuorassa. Tyypillisesti käytetyillä kiinteillä asennuksilla, joissa paneeli on tietyssä kallistuskulmassa, on tutkimuksissa saavutettu jopa 30 % suurempi energiatuotto verrattuna perinteisiin yksipuolisiin aurinkopaneeleihin, kun asennusgeometria on optimaalinen. Kaksipuolisia paneeleja on myös käytetty asennuksissa, joissa ne ovat vaakasuorassa, jolloin ne ovat saavuttaneet 5–15 % tehokkuuden kasvun tai pystysuorassa, jolloin niiden tehokkuus voi kasvaa noin 12 %. (Kopecek & Libal 2021.) Lämpötila on merkittävä tekijä bifacial-aurinkopaneelien suorituskykyyn. Koska piipohjaiset aurinkopaneelit menettävät tehokkuutta lämpötilan noustessa, heijastunutta valoa hyödyntävä paneelin puoli voi olla tehokkaampi kuin suoraan valolle altistuva paneelin etupuoli kuumalla säällä. Paneelin takapuoli voi olla jopa 8°C viileämpi. (Salloom ym. 2018.)

Juaidi ym. 2023, vertailivat yksipuolisen ja kaksipuolisen aurinkopaneelin tehokkuutta käyttämällä PVsyst- simulaatio-ohjelmistoa. Tutkimuksessa vertailtiin aurinkopaneeleja eri olosuhteissa vaihtamalla paneelien alla käytettäviä materiaaleja, joilla oli erilaiset heijastuskyvyt, kuten hiekkaa, asfalttia ja tekonurmea. Simulaatiossa käytetyt sää ja testipaikan parametrit on valittu vastaamaan olosuhteita Palestiinassa sijaitsevan An-Najahin yliopistossa. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin paneelien energiantuotantoa vuoden aikana (kWh/vuosi) ja paneelin tuottoa kilowattitunteina suhteessa aurinkopaneelin tehoon (kWh/kWp/vuosi). Taulukoissa 1 ja 2 ovat tämän simulaation tulokset, joiden mukaan todettiin, että maa materiaalin heijastuskyvyn kasvaessa energiantuotanto ja ominaistuotantoarvo kasvavat molemmissa kaksipuolisissa-

ja yksipuolisissapaneeleissa, mutta energian tuotanto oli parempi kaksipuolisella paneelilla jokaisessa testissä. Tästä päädytään tulokseen, jonka mukaan paneelien energian tuotannossa oli keskimäärin 6,81 % ero.

Material Type	Albedo (%)	Produced Energy (kWh/year)	Specific Production (kWh/kWp/year)
Black Asphalt	12	132,877	1825
Artificial Green Grass	26	133,463	1833
Sand	35	133,839	1838
White Paint	90	136,122	1870

Taulukko 1. Energiantuotantosimulaation tulokset yksipuolisella aurinkopaneelilla. (Juaidi ym. 2023)

Material Type	Albedo (%)	Produced Energy (kWh/year)	Specific Production (kWh/kWp/year)
Black Asphalt	12	142,182	1870
Artificial Green Grass	26	142,820	1878
Sand	35	143,230	1883
White Paint	90	145,719	1916

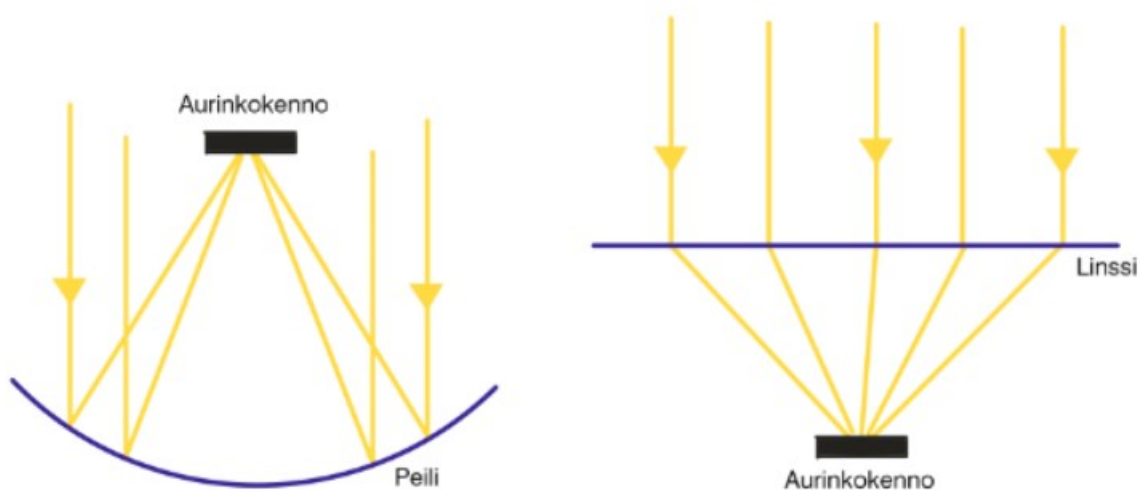
Taulukko 2. Energiantuotantosimulaation tulokset yksipuolisella aurinkopaneelilla (Juaidi ym. 2023)

3.2 Keskittävät aurinkopaneelit

Keskittävä aurinkoteknologia toimii kohdistamalla suuren alueen auringonvaloa aurinkokennoon. Ne koostuvat aurinkokohdistimesta, jossa käytetään linsejä tai peilejä, seurantamekanismista, aurinkokennoista ja jäähdytyslementistä. Tällaiset järjestelmät vaativat vähemmän kennopinta-alaa siepatakseen saman määrän auringonvaloa kuin litteät aurinkokennot, jotka eivät käytä konsentraatio teknologiaa. Auringonseuranta on tärkeää järjestelmän toiminnan kannalta, sillä valon keskittäminen vaatii suoraa auringonvaloa hajavalon sijaan, minkä vuoksi tämän tekniikan käyttö on rajoitettu kirkkaisiin ja aurinkoisiin paikkoihin. Sähkön

tuotanto laskee dramaattisesti, jos kenno ei ole kohdistettu aurinkoon tai jos pilvet peittävät auringon. (McConnell & Fthenakis 2012; El Himmer ym. 2020.)

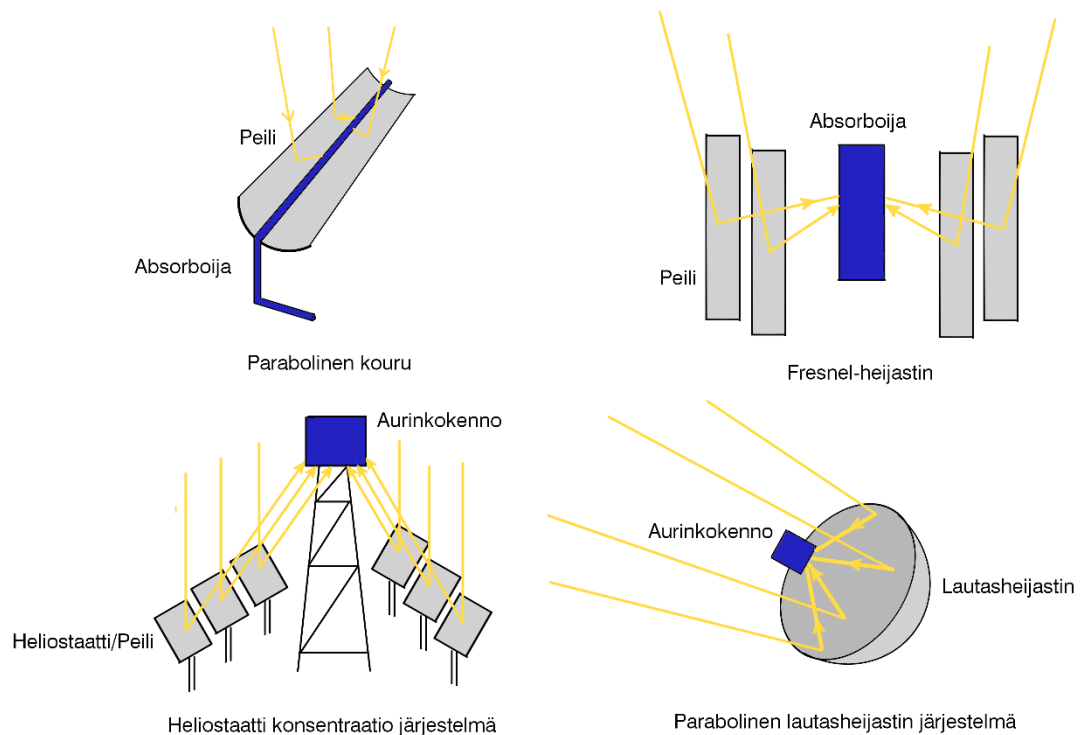
Toisin kuin perinteisissä aurinkokennoissa, jotka on suunniteltu normaaleille auringon intensiteeteille, auringonvalon intensiteetti lisääntyi monta kertaa peilien tai linssien avulla ja intensiivisyyden voimakkuus riippuu järjestelmän koosta ja rakenteesta. Koska suurinta osaa perinteisistä aurinkokennoista ei ole suunniteltu keskitetylle auringonvalolle, näihin toteutuksiin käytetään moniliitoskennoja. Moniliitoskennot koostuvat useista valoaktiivisista kerroksista, jotka on pinottu päällekkäin. Jokainen kerros reagoi auringonvalon spektrin eri taajuuskaistalle. (Felsberger ym. 2022.) Konsentraatio aurinkojärjestelmät voidaan konfiguroida usealla eri tavalla. Optisena kohdistajana käytettävillä linssillä ja peileillä on molemmilla omat etunsa ja ne ovat esitetty kuvassa 4. Peilit voidaan valmistaa halvoista materiaaleista kuten muoveista, ne eivät kärsi kromaattisesta poikkeamasta ja peilit voivat toimia optisenkomponentin lisäksi rakenteellisena komponenttina, jolla voidaan sulkea moduuli. Linssijä käyttäessä taas moduulin suunnittelu on yleensä helpompaa eivätkä ne muodosta varjoja. (Antonini 2013.)



Kuva 4. Keskittävä PV-järjestelmä peilin avulla (vasen) linssin avulla (oikea)

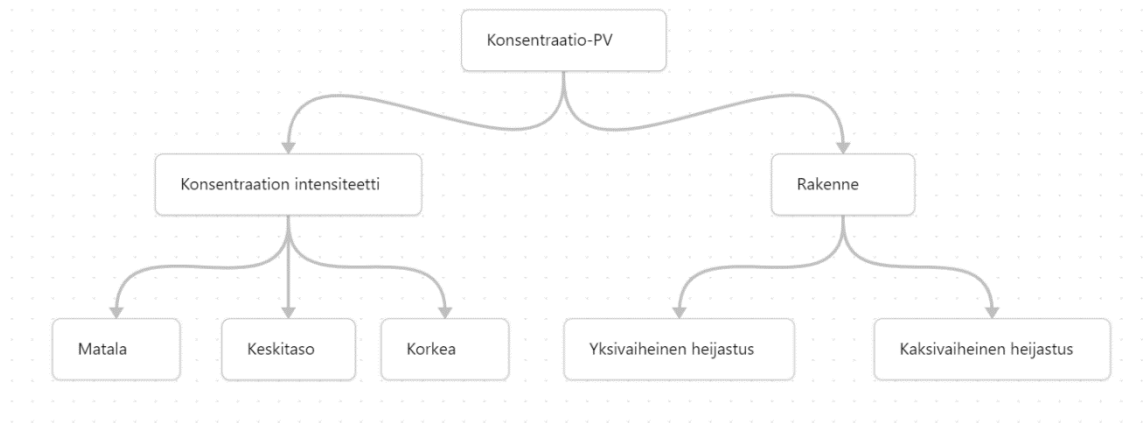
Aurinkoenergiaa pystytään hyödyntämään myös lämpönä. Tämä onnistuu käyttämällä samanlaisia järjestelmiä kuin keskittävässä-PV:ssä, mutta aurinkokennon sijasta käytetään lämmön vastaanottimia. Tätä kutsutaan aurinkolämpövoimamaksi ja se on kehittyvä teknologia, joka kilpailee aurinkosähkötuotannon kanssa. PV-järjestelmät ovat kustannuksiltaan edullisempia kuin aurinkolämpöjärjestelmät, mutta aurinkolämpöjärjestelmät tarjoava tehokkaamman energian varastointikyvyn. PV- ja aurinkolämpöjärjestelmien yhdistelmiä on tutkittu ja testattu, sillä se tarjoaa edullisen ja tehokkaan aurinkosähkö tuotannon keinon. (Vossier ym. 2018.)

Keskittävät PV-järjestelmät voidaan jakaa piste tarkennukseen, lineaariseen tarkennukseen ja heliostaattiseen tarkennukseen. Lineaarista tarkennus keskittämistä käytetään yleensä aurinkolämpösovelluksissa (Antonini 2013). Tällaisia lineaarisia järjestelmiä ovat paraboliset kourut ja Fresnel-heijastimet. Parabolinen kouru koostuu parabolisesta peilistä ja metallista mustasta putkesta, joka kulkee peilin polttolinjaa pitkin ja toimii absorboijana. Fresnel-heijastin koostuu pitkistä, peileistä, jotka kohdistavat auringonvalon peilien polttopisteessä olevaan absorboijaan. (Said ym. 2019; Tzivanidis ym. 2015.) Parabolinen lautasheijastin, eli hajautettu vastaanotinjärjestelmä, kuuluu pistetarkennus järjestelmiin. Lautasheijastin seuraa aurinkoa akseleilla päivän mittaan ja keskittää lautaselle osuneen auringonvalon pisteeseen, jossa kenno sijaitsee. (Saša ym. 2016.) Heliostaatti konsentraatio järjestelmä koostuu koverista seurantapeistä, eli heliostaateista, jotka ympäröivät tornia, jonka päässä on vastaanotin eli aurinkopaneeli. (Collado & Guallar, 2019).



Kuva 5. Konsentraatio PV-järjestelmien rakenteita

Konsentraatio-PV järjestelmät luokitellaan yleensä kahdella eri tavalla, esitetty kuviossa 2, joko valon intensiivisyyden mukaan tai rakenteen mukaan. Konsentraatio-PV järjestelmien konsentraation intensiteetillä tarkoitetaan auringonvalon voimakkuuden kasvua konsentraation avulla. Matala konsentraatio järjestelmät toimivat alle 10 kertaa auringon voimakkuudella. Tähän ryhmään kuuluu suuri määrä erilaisia järjestelmiä. Keskitasonkonsentraatiojärjestelmät saavuttavat konsentraatioita, jotka ovat 10–100 kertaa auringon valoa voimakkaampia. Tällaisia voimakkuuksia saavutetaan esimerkiksi parabolisten kourujen ja Fresnel-optiikkaa käyttäviin toteutusten avulla. Korkeakonsentraatiojärjestelmät saavuttavat yli 100 kertaisen auringon voimakkuuden. Tähän ryhmään kuuluvat pääasiassa pistekeskeiset Fresnel-järjestelmät. Rakenteellisesti aurinkokennot jaetaan sen mukaan, kulkeeko auringonvalo yhden vai useamman optisen keskittimen kanssa ennen kuin se saavuttaa absorboijan/kennon. (El Himmer ym. 2020; Ghodbane ym. 2020.)



Kuvio 2. Keskitävien PV-järjestelmien luokittelu

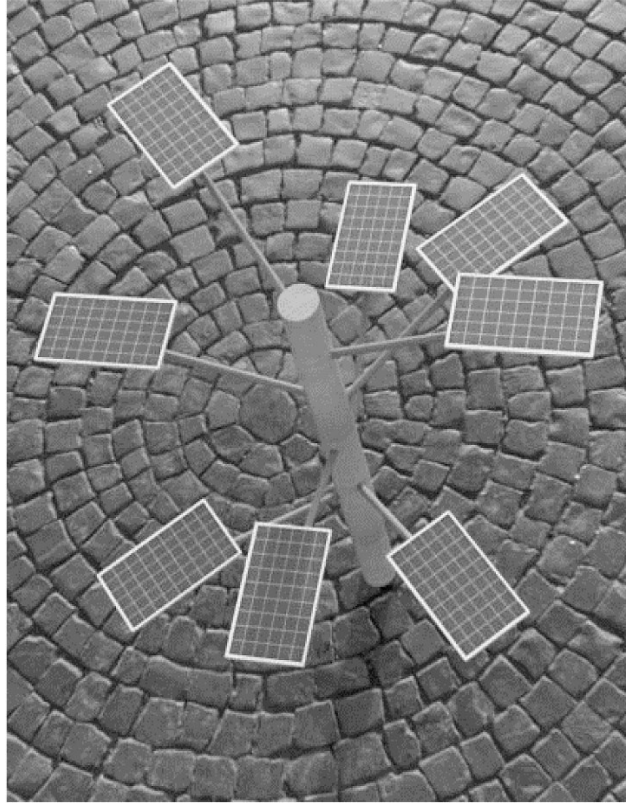
3.3 Aurinkopuut

Aurinkopuut ovat taiteellisen suunnittelun ja teknologian yhdistelmä, joiden ulkonäkö muistuttaa puita. Yksinkertaisemmillaan ne ovat esteettisesti miellyttävä tapa tuottaa aurinkosähköä. Aurinkopuut koostuvat teräsrakenteesta, joka toimii puun runkona ja oksina ja paneelit ovat aseteltu oksille muistuttamaan puun lehtiä. Riippuen lehtien asettelusta aurinkopuut kykenevät kaappaamaan auringon valoa useasta kulmasta, joka parantaa sen toimivaa pinta-alaa. Sen lisäksi että aurinkopuut ovat tehokkaista energian tuotossa ne myös parantavat ihmisten käsitystä aurinkosähköstä niiden näkyvyyden ja miellyttävän suunnittelun avulla. (Almadhhachi ym. 2022, 2–3.)

Aurinkopuita on useaa eri mallia ja niitä voidaan luokitella monella tavalla. Nämä aurinkopuutyypit vaihtelevat yksinkertaisista auringonkukkamalleista, Fibonacci lukujonoa käyttäviin rakenteisiin sekä auringon seurantajärjestelmiä käyttäviin malleihin (Almadhhachi ym. 2024; Srisai ja Harnsoongnoen 2019; Dharmik 2020). Lähes kaikki aurinkopuut kuitenkin koostuvat samoista pääkomponenteista. Aurinkokennot, jotka keräävät auringon valoa ja muuntavat sen sähköenergiaksi, akut, invertterit ja kaapelit, jolla sähkö voidaan siirtää, muuntaa ja varastoida sekä itse runkorakennelma, jonka päälle kaikki on rakennettu, ovat komponentteja, jotka kaikki aurinkopuut omaavat.

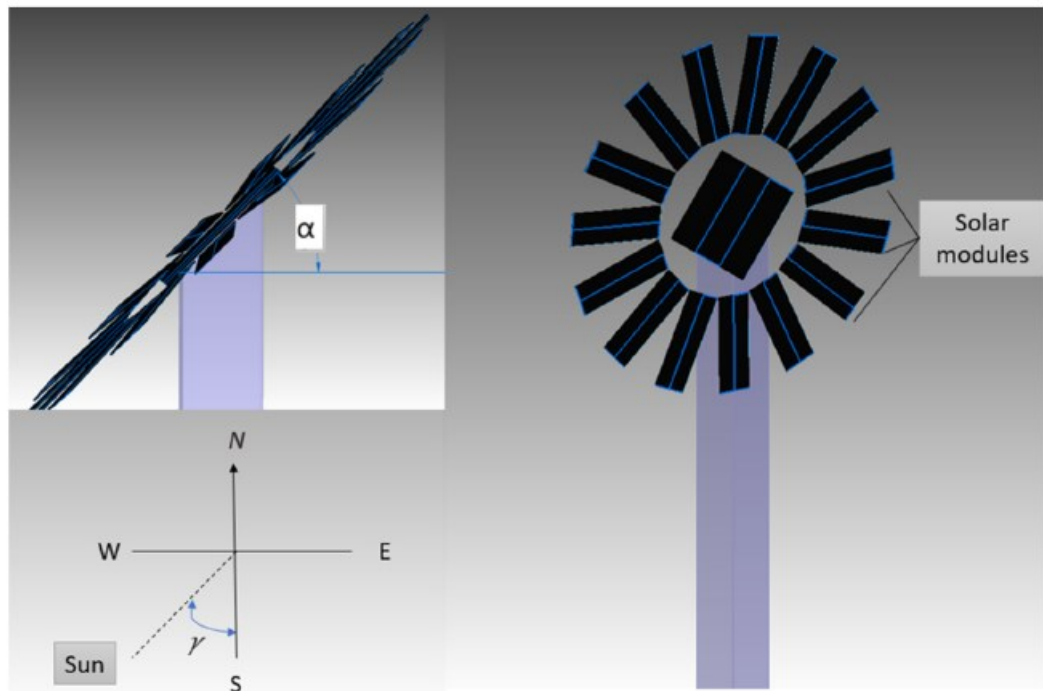
Käyttötarkoituksen mukaan aurinkopuissa voi olla myös latauspisteitä tai valoja. (Hyder ym. 2018, 2.)

Aurinkosähköpuiden käytön päätarkoitus on siepata auringonvaloa eri suunnista päivän aikana. Aurinkopaneelit toimivat tehokkaimmin, kun ne ovat kohtisuorassa auringonpaisteeseen ja tämä voidaan ottaa huomioon aurinkopuun konfiguraatiota suunnitellessa. Aurinkopuiden kehittämisessä tärkeimmät suunnitteluparametrit ovat pinta-alasuhde, paneelin/lehden suunta ja kallistuskulma, lehtien muoto, paneelien/lehtien teho ja puun rakenne (Cuce ym. 2022, 6–7). Useitten aurinkopuiden muoto on löytänyt inspiraationsa aitojen puiden lehtiasetelmista. Aurinkopuiden paneelit voidaan asetella tavalla, joka jäljittelee luonnossa esiintyvien kasvien lehtiasetelmia, jotka ovat kehittyneet kaappaamaan mahdollisimman suuren määrän valoa. Etenkin spiraaliasetelmat ovat aurinkopuiden kehityksessä laajasti tutkittu kuvio. Nämä spiraali asetelmat usein käyttävät fibonacci lukujonoon perustuvaa kuviota tai muita spiraalimaisia lehtikuviotakuvioita. (Srisai ja Harnsoongnoen 2019, 1–4; Gangwar ym. 2021, 1–3)



Kuva 6. Spiraalinmuotoinen lehtiasetelmallinen aurinkopuu (Gangwar ym. 2019)

Yksi yksinkertaisemmista aurinkopuurakenteista on litteämalli, jossa on yksi kerros paneeleita aurinkoa kohti. Tällainen mallin ei kärsi häviöistä, jotka aiheutuvat aurinkomoduulien useista kerroksista muodostuvasta varjosta toisin kuin jotkin muut mallit. (Almadhhachi ym. 2024)



Kuva 7. Auringonkukan muotoinen aurinkopuu (Almadhhachi ym. 2024)

Aurinkopuiden suorituskykyyn vaikuttavista tekijöistä yksi merkittävimmistä on pinta-ala suhde eli niiden vaatiman tilan ja tuotetun sähköenergian välinen suhde. Aurinkopuut ovat erittäin tehokas energiantuotantokeino, jotka vaativat hyvin vähän maapinta-alaa niiden asennukseen. Aurinkopuut vievät 1 % maapinta-alasta, jonka yhtä tehokas perinteisiä litteitä paneeleja käyttävä aurinkosähköjärjestelmä vaatii. (Cuce ym. 2022, 13–15.)

Aurinkopuiden käyttö ei ole kovin yleistä, mutta muutamia malleja on jo markkinoilla. Esimerkiksi Solar spotlight tarjoaa valikoimassaan aurinkopuita, joiden korkeudet vaihtelevat n. 4–6,7 m välillä ja omaavat 2,2–5,4kW kapasiteetin (Solar Spotlight 2024). Suurempia ja tehokkaampia aurinkopuita löytyy tutkimustarkoituksiin ja tutkimuslaitosten käytöstä. Maailman suurin aurinkopuu sijaitsee Intiassa ja kattaa 309,83 kuutiometrin paneeli pinta-alan. Saatavien tietojen mukaan se kykenee tuottamaan 160–200 kWh energiaa päivässä. (Guinness World Records 2022; Singh 2022).

Monissa aurinkopuissa on useita moduulikerroksia. Tällainen kerroksien käyttö aiheuttaa kuitenkin varjojen syntymistä, joka heikentää alempien kerrosten

moduulien tehokkuutta. Varjostuksen vähentämistä on tutkittu kehittämällä erilaisia aurinkopuu rakenteita. Etenkin Fibonacci kuvioon perustuvat aurinkopuut ovat osoittautuneet tehokkaiksi varjojen minimoimisessa. Muita ratkaisuja varjojen tuottamiin tehohäviöihin ovat aurinkopuut, joiden moduulit eivät ole kerroksittain. (Gangwar ym. 2019) Yksi tärkeimmistä eroista perinteisen aurinkosähköjärjestelmän ja aurinkosähköpuuteknologian välillä on säteilyn määrän vaihtelu yksittäisille moduuleille. Yksinkertaisimmillaan aurinkopuut voidaan suunnitella kahdella tavalla. Ensimmäinen tapa on aurinkopuun rakentaminen suorasta auringon säteilyn suunnan mukaan, niin että paneelit ovat kohdistettu saman suuntaisesti tavalla, joka tuottaa suurimman mahdollisen määrän energiaa päivän aikana. Toinen tapa suunnitella aurinkopuu on optimoida kunkin paneelin sijainti ja asento erikseen, jolloin voidaan tuottaa energiaa tehokkaasti ja tasaisesti kokopäivän ajan. (Almadhhachi ym. 2022.)

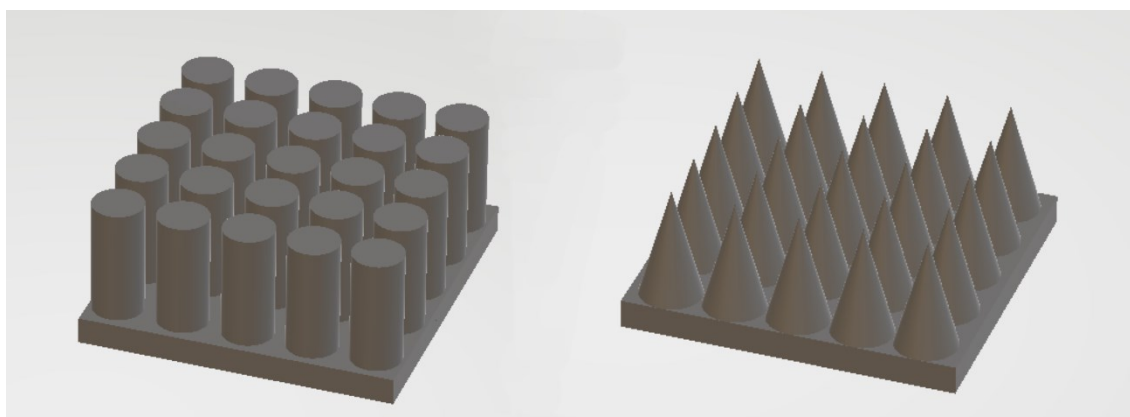
Aurinkopuut ovat tyypillisesti kalliimpia kuin perinteiset litteät aurinkopaneelit johtuen niiden monimutkaisemmasta rakenteesta, useista vaadittavista moduuleista, jotka ovat yleensä kalliimpia kuin perinteiset moduulit. Suurin osa tutkituista aurinkopuista käyttää piiaurinkokennoja, joiden tehokkuus heikkenee lämpötilan noustessa. Tehokkuuden laskemisen estämiseksi on käytetty ja suunniteltu käyttämään jäähdytysjärjestelmiä. Nämä kuitenkin tekevät aurinkopuista monimutkaisempia, nostavat kustannuksia ja huollon tarvetta. (Almadhhachi ym. 2022.)

3.4 Nanorakenteiset aurinkokennot

Nanorakenteiset materiaalit ovat materiaaleja, joiden rakenteet ovat nanometrien (1–100 nm) luokkaa, joilla on ainutlaatuisia ominaisuuksia. Nämä ominaisuudet riippuvat nanorakenteiden koosta, muodosta ja rakenteesta. Nanorakenteisilla materiaaleilla on sähköisiä, mekaanisia, optisia, lämpö-, dielektrisiä tai luminesenssia ominaisuuksia, joita voidaan hyödyntää erilaisten teknologioiden kehityksessä kuten nanoelektronikassa, nanolääketieteessä, nanokomposiittien kehityksessä ja tietenkin PV-teknologiassa. (Buzea ym.

2007, 21–27, 62–65.) Nanorakenteisia materiaaleja käytetään PV-teknologiassa usein lisäämään energian absorption tehokkuutta. Yksinkertaisimmillaan erilaiset nanorakenteet parantavat valon absorptiota, vähentävät heijastusta ja vangitsevat valoa. (Wibowo ym. 2020.)

Erilaisia aurinkopaneelissa käytettyjä nanorakenteita ovat nanolangat, jotka ovat erinomaisia elektronien kuljettajia, nanokartiot, joiden valon absorboi ja heijastuksen minimointi ovat erinomaisia, fluoresenssiset nanohiukkaset (nanopartikkelit), jotka kykenevät absorboimaan valoa eri aallonpituuksia ja vapauttaa absorboitunutta energiaa säteilyn muodossa joko samana tai eri aallonpituuksina kuin absorboidessa, nanoputket ja nanorakenteiset ohutkalvot. Jokainen nanomateriaalityyppi tarjoaa etuja valon absorption, varauksen kuljetuksen ja valmistettavuuden suhteen. Kuvassa 8 on esitetty nanolanka- ja nanokartiorakenteet. (Li ym. 2016; Tooghi ym. 2020; Majumder & Ravindran 2022.)



Kuva 8. Nanolankarakenne (vasen) ja nanokartiorakenne (oikea)

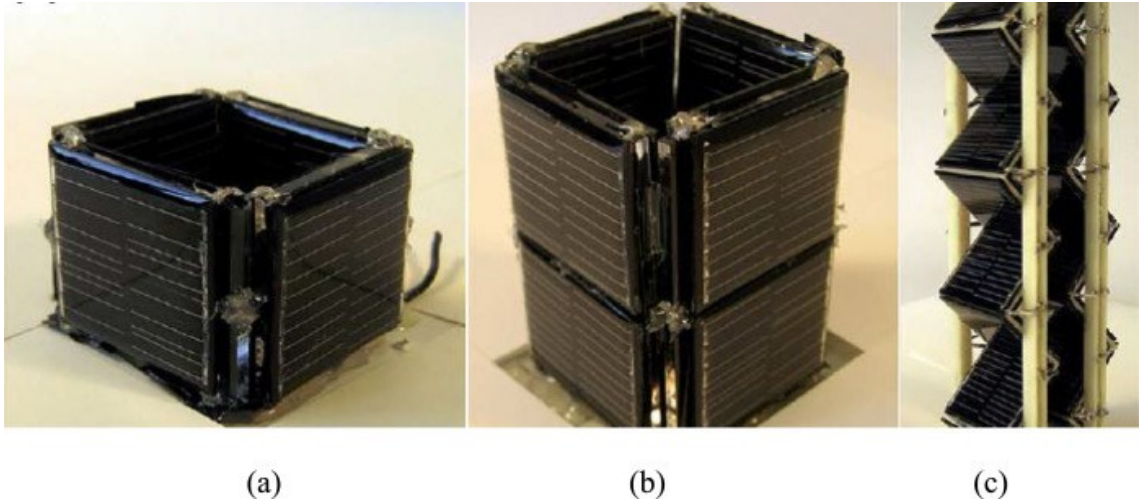
Nanorakenteisilla materiaaleilla on ainutlaatuiset optiset ominaisuudet sen rakenteiden pienen koon ja pintaominaisuuksien vuoksi. Nämä materiaalit voivat manipuloida valoa nanomittakaavassa, mikä mahdollistaa paremman valon absorption laajalla spektrillä. Tämä parannettu valon absorptio lisää aurinkokennojen tehokkuutta vangitsemalla enemmän fotoneja ja muuttamalla ne sähköenergiaksi. Lisäksi nanorakenteiset materiaalit parantavat varauksenkuljettajien (elektronien ja reikien) tehokasta liikkumista

aurinkokennon sisällä. Tämä saavutetaan erilaisilla mekanismeilla, kuten elektronien ja aukkojen rekombinaatiolla ja parantuneella johtavuudella. On myös huomioitavaa, että nanorakenteiset aurinkokennot ovat kevyitä ja joustavia mikä tekee niistä erinomaisia vaihtoehtoja sovelluksiin, joihin perinteisten aurinkopaneelien joustamattomuus estää niiden käytön. (Ghasemzadeh & Shayan 2020; Aly 2017.)

3.5 Muita 3DPV-rakenteita

On olemassa monia muita 3DPV-järjestelmiä ja -laitteita, jotka eivät ole läheskään yhtä laajasti tutkittuja, koska niitä ei pidetä kannattavana vaihtoehtona muihin toteutuksiin verrattuna, tai ne ovat yksinkertaisesti liian uusia vaikuttaakseen merkittävästi aurinkoenergian tuotantoon ja sen tutkimukseen.

Bernardi ym. 2012 kehittivät uudenlaisen kolmiulotteisen kuutioaurinkokennon, jonka tarkoituksena on tuottaa energiaa paremmalla energiatiheydellä, verrattuna perinteisiin litteisiin paneeleihin. Kuutiomaiset aurinkokennot koostuvat ylhäältä avoimesta kuutiosta, jossa on aurinkokennoja sekä sen ulko- että sisäpinnalla kuten näkyy kuvassa 9. Tätä mallia voidaan käyttää samanlaiseen avoimeen särmiöön, jolla on sama pohjapinta-ala, mutta joka on kaksi kertaa korkeampi, ja näillä kuutioilla voidaan rakentaa tornimainen aurinkojärjestelmä. Kuutiorakenteiset aurinkokennot ovat osoittaneet erinomaisen valonsieppauskyvyn, erityisesti sumuisissa, sateisissa ja pilvisissä olosuhteissa, verrattuna litteisiin paneeleihin.



Kuva 9. Aurinkokuutiorakenteita, a) avoin kuutio, b) korkeampi avoin särmiö ja c) torni (Bernardi ym. 2012)

Pallomaiset aurinkokennot koostuvat piistä, jonka pinnalla kulkevat p-n-liitokset. Tällainen rakenne vastaanottaa auringonvaloa kaikista suunnista ja sillä on hyvä pinta-alan ja tilavuuden välinen suhde. Pallomaiset aurinkokennot pystyvät hyödyntämään taustaheijastuvaa valoa tehokkaasti. Nämä rakenteet omaavat myös hyvän lämmön sietämiskyvyn ja hylkivät pölyn kertymistä perinteisiin kennoihin verrattuna. (El-Atab ym. 2020)

Toinen hyvin erilainen aurinkosähköjärjestelmä on Fibbonachi lukujonoon perustuva malli, joka on esitetty kuvassa 10. Tätä rakennetta testattiin vertaamalla sitä tavalliseen litteään PV-paneeliin. Tässä testissä havaittiin huomattava ero järjestelmien toiminnan välillä. Fibbonachi kierrepaneeli tuotti 10,74 % enemmän jännitettä, 14,85 % enemmän virtaa ja 26,13 % enemmän tehoa kuin vertailussa käytetty litteä paneeli. (Benguar ym. 2018)



Kuva 10. Fibboachi aurinkokenno (Benguar ym. 2018)

4 Tulevaisuuden trendejä

Tulevaisuuden energiantuotannossa uusiutuvilla energialähteillä odotetaan olevan merkittävä rooli. Tätä kasvua vauhdittavat alenevat kustannukset, ympäristöystävällinen politiikka, teknologian kehitys ja lisääntyvä tietoisuus uusiutuvan energian ympäristöhyödyistä. Etenkin aurinkoenergian tuotanto on kokenut merkittävän kasvun viimeisen vuosikymmenen aikana ja sen ennustetaan olevan yksi tärkeimmistä energiantuotantotavoista lähitulevaisuudessa. (Maka & Alabid, 2022)

Energiatuotannon tulevaisuutta on pyritty ennustamaan käyttämällä erilaisia skenaarioita. Kansainvälinen energiajärjestö (IEA) on luonut erilaisia skenaarioita tulevaisuuden energiantuotannon tilanteesta. Ilmoitettujen käytäntöjen skenaario (STEPS) ennuste perustuu uusimpiin olemassa oleviin politiikan asetuksiin, jotka koskevat energia-, ilmasto- ja niihin liittyviin teollisuuspolitiikkaan. Ilmoitettujen lupausten skenaario (APS) tekee ennusteensa sen perusteella, että kaikki asetetut kansalliset energia- ja ilmastotavoitteet saavutetaan ajallaan. Nettonollapäästö skenaario (NZE) on skenaario, joka rajoittaa ilmaston lämpenemisen 1,5 asteeseen vuoteen 2050 mennessä. (World energy outlook 2023.) Aurinkoenergian kehitykseen vaikuttavat pääasiassa teknologian kehittyminen, kustannukset ja ympäristöpolitiikka.

Aurinkoenergiateknologian käyttö on vaihtelevaa maailmalla. Esimerkiksi Saksassa uusiutuvat energialähteet ovat laajassa käytössä. Aurinkoenergian osuus Saksan kokonaisenergiatuotannosta oli noin 10 % vuonna 2021. Australiassa on myös tapahtunut nopea kasvu aurinkoenergian käytössä sen saaman runsaan auringonvalon ansiosta. Vuonna 2021 Australian kokonaissähköstä runsaat 20 % oli aurinkosähköä. Yhdysvalloissa laskevat aurinkopaneelien hinnat ovat vauhdittaneet aurinkoenergian käytön kasvua, ja vuonna 2021 aurinkoenergian osuus sähkön kokonaistuotannosta oli noin 3 %, tästä huomattava osuus oli Kalifornian ja Havaijin kaltaisissa osavaltioissa. Myös Alankomaissa aurinkoenergia on löytänyt käyttöä pienestä koostaan ja

rajallisesta auringonpaisteesta huolimatta. Aurinkoenergian käyttö siellä on saavuttanut noin 5 % sähköntuotannosta vuonna 2021. (Ukoba ym. 2024.)

4.1 Aurinkoenergiateknologia

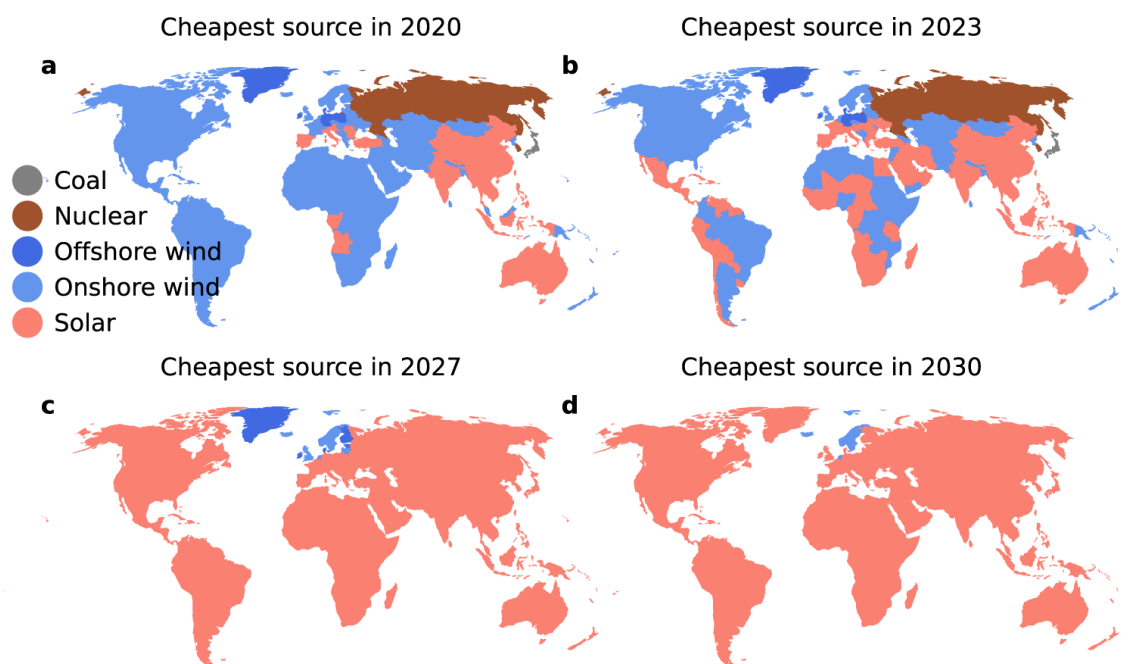
Yksi aurinkoteknologian kehittämisen tärkeimmistä alueista tulee olemaan aurinkokennojen tehokkuuden parantaminen. Tavoitteena tulee olemaan parantaa auringonvalon muunnostehokkuutta sähköksi, alentaa tuotantokustannuksia ja pidentää aurinkopaneelien käyttöikää. Myös parempi tilankäyttö tulee olemaan erityisen keskeinen aihe etenkin urbaaneissa ympäristöissä, joissa tilaa on rajallisesti. (Tabassum ym. 2021.)

Nykyään markkinoilta löytyy pääasiassa kolmea aurinkopaneelityyppiä: yksikiteiset, monikiteiset ja ohutkalvoiset aurinkopaneelit. Yksikiteiset Pii-aurinkopaneelit ovat kaikkein yleisimpiä näystä vaihtoehdoista, mikä johtuu niiden korkeasta 17–22 %:n hyötysuhteesta. Ne ovat kuitenkin kalliimpia verrattuna monikiteisiin tai ohutkalvopaneeleihin. Monikiteisten paneelien hyötysuhteet ovat hieman alhaisemmat, noin 15–17 %, ja niiden käyttöikä lyhyempi, mutta niiden valmistusprosessi on paljon nopeampi ja halvempi. (Tabassum ym. 2021.)

Ohutkalvoisilla paneeleilla on ominaisuuksia, joita muilta vaihtoehdoilta ei löydy, kuten niiden keveys ja joustavuus. Niitä on helpompi valmistaa kuin kiteisiä paneeleja ja ne maksavat paljon vähemmän. Niillä on pitkän aikaa ollut matala hyötysuhde, mutta kehitys viimeisen vuosikymmenen aikana on merkittävästi pienentänyt tehokkuuseroa kiteisten aurinkopaneelien ja ohutkalvopaneelien välillä. Tämän takia ohutkalvopaneelit ovat alkaneet yleistyä. Ohutkalvoisia aurinkokennoja kehitetään jatkuvasti, korkean hyötysuhteen suuren merkityksen vuoksi. Uusia lupaavia aurinkokennoja kehitetään, mutta ne eivät ole vielä soveltuvia massatuotantoon. Esimerkkejä tällaisista aurinkokennoista ovat orgaaninen aurinkokennot, perovskiitti-aurinkokennot, amorfiset piiaurinkokennot ja väriaineherkistetty aurinkokenno. (Tabassum ym. 2021; Obaideen ym. 2023.)

4.2 Kustannuksen ja markkinat

Aurinkokennojen hintojen muutoksia on seurattu pitkän aikaa. Swansonin laki on aurinkokennojen tuotantokustannuksia ja kennojen asennettua kokonaiskapasiteettia vertaileva havainto, joka voidaan esittää kaaviona. Sen mukaan aurinkosähkömoduulien hinta laskee 20 % aina kun tuotettujen aurinkokennojen määrä tuplaantuu. Tämä trendi tulee todennäköisesti jatkumaan tulevaisuudessakin. (Partain ym. 2016.) Ennusteiden mukaan aurinkoenergia tulee olemaan edullisin sähkötuotannonmuoto vuoteen 2030 suurimmassa osassa maailmaa. Kuvassa 11 on esitetty simuloimalla tehty ennuste sähköntuotannon edullisuudesta maailmanlaajuisesti. (Nijse ym. 2023.)



Kuva 11. Ennustettu edullisin sähköntuotanto teknologia vuosina a) 2020 b) 2023 c) 2027 d) 2030 (Nijse ym. 2023)

Aurinkoenergian asennettu kapasiteetti on maailmanlaajuisesti kasvanut nopeasti. Historiallisesti kennojen kumulatiivinen kapasiteetti kaksinkertaistuu noin kahden vuoden välein (Partain ym. 2016). Asennettu aurinkosähköteknologian kapasiteetti kasvoi vuosina 2010–2020 40 334:stä 709 674 MW:iin.

Aurinkosähkön tarjoamat monipuoliset käyttömahdollisuudet tekevät siitä houkuttelevan vaihtoehdon sähkön tuottamiseen kaupallisella ja yksityisellä tasolla. PV-järjestelmien käyttäminen on loistava tapa tarjota sähköä niille, jotka eivät asu voimansiirtolinjojen lähellä. (Maka & Alabid 2022.) IEA:n mukaan uusiutuvan sähkön tuotantokapasiteetin lisäys tulee jatkamaan kasvamistaan seuraavien viiden vuoden aikana. Tästä kasvusta aurinkoenergian ja tuulivoiman yhteinen osuus ennustetaan nousemaan 96 %. STEPS-skenaarion mukaan uusiutuvat energialähteet tuottaisivat 80 prosenttia uudesta sähköntuotanto-kapasiteetista vuoteen 2030 mennessä. Tästä pelkkä aurinkoenergian osuus olisi ennustetusti yli puolet. (Renewables 2023; World energy outlook 2023)

Kiina on tällä hetkellä maailman suurin kaupallisen PV-tekniikan tuottaja ja sillä on tulevaisuudessakin tarkoituksena jatkaa tuotantonsa laajentamista. Kiina valmistaa vuosittain noin 80 % aurinkopaneeleista maailmanlaajuisesti, kun taas seuraavaksi suurin tuottaja valmistaa noin 5 % kansainvälisillä markkinoilla myytävistä paneeleista. Aurinkoenergian tuotannon kasvaminen on riippuvainen Kiinasta ja kansainvälisestä kaupankäynnistä. (World energy outlook.)

4.3 Ympäristöpolitiikka

Aurinkoenergia on vahvasti yhteydessä ympäristöpolitiikkaan. Erilaiset ilmasto- ja ympäristöä koskevat sopimukset, tavoitteet ja säädökset ovat merkittävässä roolissa energiatulevaisuuden suhteen. Niiden takana ovat kansainväliset organisaatiot ja valtioiden tekemä yhteistyö. Euroopan komissio on ottanut tavoitteekseen hiilineutraalin Euroopan vuoteen 2050 mennessä. Tehokkaita säädöksiä ovat vihreään energiainfrastruktuuriin investoivat päätökset, erityisesti uusiutuvia energialähteitä kannattavat päätökset. (Cousse 2021.) Paikallisilla ja kansainvälisillä organisaatioilla on keskeinen rooli teknologisen osaamisen, rahoitusratkaisujen ja kapasiteetin kehittämisessä. Euroopan komission aurinkoenergiastrategiassa on tavoitteena aurinkosähkön

kapasiteetin kasvattaminen. Vuoteen 2030 mennessä on arvioitu aurinkosähkön tuottavan 12–14 % EU:n energiasta. (Kougias ym. 2021.)

Yksilöiden ja yritysten tasolla on koettu ja tullaan tulvaisuudessakin kokemaan vastustusta aurinkoenergiaa ja muita uusia ympäristöystävällisiä energianlähteitä tukevaa politiikkaa. On esimerkiksi olemassa huoli, että aurinkoenergian laaja käyttöönotto tulee saamaan vastustusta paikallisilla tasoilla, samalla tavalla kuin tuulivoima on saanut vastustusta. Suuret aurinkopuistot voivat kohdata vastustusta maankäytön ja paneelien ulkonäköseikkojen vuoksi. Ihmisten negatiivinen näkemys suurista aurinkoenergia asennuksista kohtaan on tärkeä vaikuttaja päätöksentekoon. (Cousse 2021.)

Toinen päätöksentekoon liittyvä este aurinkoenergian käytön kasvamiselle on lobbaaminen. Tämä näkyy erittäin vahvasti esimerkiksi Amerikan Yhdysvalloissa, jossa se on hyvin yleistä. Organisaatioilla ja yrityksillä, jotka hyötyvät fossiilisten polttoaineiden käytöstä, on paljon vaikutusvaltaa ja varoja, joita ne ovat käyttäneet uusiutuvien energialähteiden käyttöönoton hidastamiseksi. (Culhane ym. 2021.)

5 Yhteenveto

Aurinkosähköteknologia on kokenut paljon kiinnostusta sen runsauden ja puhtauden vuoksi. Pitkään jatkuneesta tutkimuksesta ja kehityksestä huolimatta perinteiset piipohjaiset aurinkokennot ovat olleet pitkään suosituin vaihtoehto niiden luotettavuuden ja tehokkuuden ansiosta. Viime aikoina ne ovat kuitenkin saanut kilpailijoita uudempien aurinkosähköteknologian sukupolvista. Etenkin ohutfilmi kennot, kuten väriherkistetyt ja perovskiittiset kennot, ovat osoittautuneet tehokkaaksi vaihtoehdoksi perinteisille aurinkokennoille.

Innovaatiot aurinkosähköjärjestelmien suunnittelussa ovat johtaneet uusiin 3D-rakenteita hyödyntäviin paneeleihin ja järjestelmiin. Näillä ratkaisuilla on usein etuna niiden parempi tehokkuus ja pienempi maapinta-alan tarve verrattuna perinteisiin litteisiin aurinkopaneeleihin. Merkittäviä toteutuksia on useita. Kaksipuoliset paneelit parantavat tehokkuuttaan huomattavasti käyttämällä paneelin molempia puolia valon kaappaamiseen. Aurinkopuilla on hyvä tilan ja tehokkuuden välinen suhde ja ne ovat esteettisesti miellyttäviä. Keskittävät aurinkosähkö järjestelmät parantavat energiatuotantoaan kohdistamalla valoa peilien ja linssien avulla ja toimivat myös hybridi toteutuksissa lämpöenergian keräämiseen. Nanorakenteiset kennot taas parantavat valonabsorbointia ja elektronikuljetusta optimoidulla rakenteellaan. On myös useita muita 3D-paneeli ratkaisuja, jotka eivät ole kokeneet yhtä suurta mielenkiintoa niiden vaikean toteutuksen tai pienen hyödyn vuoksi.

Aurinkoenergiateknologian kehitys tulevaisuudessa lupaa parantaa aurinkokennojen tehokkuutta ja pienentää kustannuksia. Poliittisilla vaikuttajilla tulee olemaan myös erittäin merkittävä rooli aurinkovoiman käyttöönoton nopeuttamisessa ja siirtymisessä kohti kestävää energian tulevaisuutta.

Lähteet

Abdallah, A.A.; Kivambe, M.M.; Aïssa, B. & Figgis, B. 2023, Performance of Monofacial and Bifacial Silicon Heterojunction Modules under Desert Conditions and the Impact of PV Soiling, Sustainability, Vol. 15, No. 10, Viitattu 14.3.2024

<https://doi.org/10.3390/su15108436>

Alam, M.; Gul, M.S. & Muneer, T. 2023, Performance analysis and comparison between bifacial and monofacial solar photovoltaic at various ground albedo conditions, Renewable Energy Focus Vol. 44, 295-316 Viitattu 14.3.2024

<https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.01.005>

Almadhhachi, M.; Seres, I. & Farkas, I. 2022, Significance of solar trees: Configuration, operation, types and technology commercialization, Energy Reports Vol. 8, 6729-6743. Viitattu 12.2.2024

Almadhhachi, M.; Seres, I. & Farkas, I. 2024, Sunflower solar tree vs. flat PV module: A comprehensive analysis of performance, efficiency, and land savings in urban solar integration, Results in Engineering Vol 21. Viitattu 12.2.2024

Aly A. M. 2017, Performance Evaluation of Nanostructured Solar Cells. Nanostructured Materials - Fabrication to Applications. InTechOpen Viitattu 6.3.2024 <http://dx.doi.org/10.5772/67405>

Andreani, L. C.; Bozzola, A.; Kowalczewski, P.; Liscidini M. & Redorici L. 2019, Silicon solar cells: toward the efficiency limits, Advances in Physics, Vol. 4, No. 1 Viitattu 5.3.2024 <https://doi.org/10.1080/23746149.2018.1548305>

Ang, T.Z.; Salem, M.; Kamarol, M.; Das, H.S; Nazari, M.A. & Prabakaran, N. 2022 A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions, Energy Strategy Reviews, Vol 43, Viitattu 15.4.2024. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100939>

Antonini P. 2013, Concentrated PhotoVoltaics (CPV): Is it a real opportunity, EPJ Web of Conferences, Vol. 54 Viitattu 15.3.2024 <https://doi.org/10.1051/epjconf/20135401015>

Benguar, A. N.; Casiano, P.; Valdehueza T. & Tan, D. 2018, GOLDEN RATIO APPLIED IN THE ORIENTATION OF SOLAR CELLS IN A GOLDEN SPIRAL SOLAR PANEL, International Journal of Development Research, Vol. 8, No. 5 Viitattu 23.4.2024.

Bernardi, M.; Ferralis, N.; Wan, J. H.; Villalon, R. & Grossman J.C. 2012, Solar energy generation in three dimensions. Energy & Environmental Science Vol. 5, No. 5, 6880-6884. Viitattu 5.3.2024 DOI:10.1039/c2ee21170j

Bernardi, M.; Ferralis, N.; Wan, JH.; Villalon, R. & Grossman, JC. 2012, Solar energy generation in three dimensions, Energy Environment Science Vol 5, 6880–6884, Viitattu 26.3.2024 DOI: 10.1039/c2ee21170j

Buzea, C.; Pacheco I. I. & Robbie K. 2007, Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity, Biointerphases, Vol. 2, No. 4 Viitattu 6.3.2024

Centro S. 2015, Concentrated Photo Voltaics (CPV): a case study, EPJ Web of Conferences Vol. 98 Viitattu 15.3.2024

<https://doi.org/10.1051/epjconf/20159804005>

Collado, F. J. & Guallar, J. 2019, Quick design of regular heliostat fields for commercial solar tower power plants, Energy, Vol. 178, 115-125, Viitattu 18.3.2024 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.117>

Cousse, J. 2021 Still in love with solar energy? Installation size, affect, and the social acceptance of renewable energy technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 145, Viitattu 23.4.2024.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111107>

Cuce, P. M.; Saxena, A.; Cuce, E.; & Riffat, S. 2022, Applications of solar PV tree systems with different design aspects and performance assessment, International Journal of Low-Carbon Technologies, Vol. 17, 266–278. Viitattu 12.2.2024

Cui, Y.; Zhu J.; Zoras S.; Chen, X.; Bi, H.; Qiao, Y. & Soleimani, Z. 2019, State-of-the-art review of 3DPV technology: Structures and models, Energy

Conversion and Management Vol. 200 Viitattu 25.2. 2024

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112130>

Culhane, T.; Hall, G.J. & Roberts, T. 2021, Who delays climate action? Interest groups and coalitions in state legislative struggles in the United States, Energy Research & Social Science, Vol. 79, Viitattu 26.4.2024.

Dharmik, V.; Dhande, G.; Buche, P.; Yeggevar, S.; Ramteke, S.; Ture, A. & Kamble, C. S. 2020, Advanced Solar Tree with Sun Tracking and Cleaning, International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering Vol. 9, No 5. Viitattu 14.2.2014

El Himer, S.; El Ayane, S.; El Yahyaoui, S.; Salvestrini, J.P.; Ahaitouf, A. 2020 Photovoltaic Concentration: Research and Development, Energies, Vol. 13, No. 21 Viitattu 15.3.2024 <https://doi.org/10.3390/en13215721>

El-Atab, N.; Qaiser, N.; Babatain, W.; Bahabry, R.; Shamsuddin, R. & Hussain, M. M. 2020, Nature-Inspired Spherical Silicon Solar Cell for Three-Dimensional Light Harvesting, Improved Dust and Thermal Management, MRS Communications, Vol. 10, No. 3, 391–397 Viitattu 25.3. 2024 <https://doi.org/10.1557/mrc.2020.44>

Felsberger, R; Buchroithner, A.; Gerl, B.; Schweighofer, B.; Preßmair, R.; Mitter, T. & Wegleiter, H. 2022, Optical performance and alignment characterization of a parabolic trough collector using a multi-junction CPV solar cell, Solar Energy, Vol. 239, 40-49 Viitattu 18.3.2024 <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.058>

Gangwar, P.; Kumar, N.M.; Singh, A.K.; Jayakumar, A. & Mathew, M. 2019, Solar photovoltaic tree and its end-of-life management using thermal and chemical treatments for material recovery, Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 14, Viitattu 20.2.2024.

Gangwar, P.; Tripathi R. P. & Singh, A. K. 2021, Design of Fibonacci Sequence-Based Solar Tree and Analysis the Performance Parameter of Different Phyllotaxy Pattern Based Solar Tree: An Experimental Approach, 62nd

International Scientific Conference on Information Technology and Management, Latvia, Riika: Riga Technical University Viitattu 15.2.2024.

Ghasemzadeh, F. & Shayan, M. E. 2020, Nanotechnology in the Service of Solar Energy Systems, Nanotechnology, and the Environment. IntechOpen, Viitattu 6.3.2024 doi: 10.5772/intechopen.93014.

Ghodbane, M.; Benmenine, D.; Khechekhouche, A. & Boumeddane, B. 2020, Brief on Solar Concentrators: Differences and Applications, Instrumentation Mesure Métrologie Vol. 19, No. 5, 371-378 Viitattu 19.3.2024 DOI: 10.18280/i2m.190507

Grasso C. 2006, Characterization and simulation of three-dimensional solid-state solar cells, PhD Thesis, Technology and Engineering, Gent: Ghent University Viitattu 7.2.2024

Guinness World Records, 2022, Largest solar tree, Viitattu 24.3.2024.
<https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/631898-largest-solar-tree>

Heikkilä H. 2020, Aurinkosähköjärjestelmän tuottavuuden parantaminen. Opinnäytetyö (AMK) Sähkö- ja automaatiotekniikka Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu. Viitattu 5.3.2024 <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202005026788>

Hunter, D. B.; Salzman J. E. & Zaelke, D. 2021, Glasgow Climate Summit: Cop26, UCLA School of Law, Public Law Research Paper No. 22-02, Viitattu 24.2. 2024

Hyder, F.; Sudhakar, K. & Mamat, R. 2018, Solar PV tree design: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 82, 1079–1096. Viitattu 14.2.2024

Imamzai M.; Aghaei M.; Hanum M; Thayoob Y. & Forouzanfar M. 2012, A Review on Comparison between Traditional Silicon Solar Cells and Thin-Film CdTe Solar Cells, Materials Sciences and Applications, Vol.6 No.12 Viitattu 24.1.2024

International energy agency 2023, Renewables 2023, Analysis and forecasts to 2028, Viitattu 17.4.2024. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>

International energy agency 2023, World Energy Outlook 2023, Viitattu 17.4.2024. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

Isoe, W. M.; Mageto M. J.; Maghanga, C. M.; Mwamburi, M. M. & Odari, B. V. 2023, Optical modelling of TCO based FTO/TiO₂ multilayer thin films and simulation in hydrogenated amorphous silicon solar cell, Scientific African, Vol. 20 Viitattu 21.1.2024 <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01678>

Jaksik, j. H.; Moore, J.; Trad, T.; Okoli, O. I. Uddin, M. J. 2017, Nanostructured functional materials for advanced three-dimensional (3D) solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 167, 121–132 Viitattu 10.2.2024

Jang, J. & Lee, K. 2020, Practical Performance Analysis of a Bifacial PV Module and System Energies, Vol. 13, No. 17, Viitattu 14.3.2024 <https://doi.org/10.3390/en13174389>

Jin Li, ja Shigetaka Fujita, 2008, Development of Optical Multilayer Thin Films and Their Application to Solar Cells, Transactions of the Materials Research Society of Japan, Vol. 33, No 4, 845-848 Viitattu 20.1.2024

Juaidi, A.; Kobari, M.; Mallak, A.; Titi, A.; Abdallah, R.; Nassar, M. & Albatayneh, A. 2023, A comparative simulation between monofacial and bifacial PV modules under Palestine conditions, Solar Compass, Vol. 8, Viitattu, 7.4.2024 <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2023.100059>

Kopecek, R. & Libal, J. 2021, Bifacial Photovoltaics 2021: Status, Opportunities and Challenges, Energies, Vol. 14, No. 8, Viitattu 13.3.2024 <https://doi.org/10.3390/en14082076>

Kougias, I.; Taylor, N.; Kakoulaki, G. & Jäger-Waldau, A. 2021, The role of photovoltaics for the European Green Deal and the recovery plan, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 144, Viitattu 23.4.2024. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111017>

Li, Y.; Yue, L.; Luo, Y.; Liu, W. & Li, M. 2016 Light harvesting of silicon nanostructure for solar cells application. Optics Express Vol. 24. No. 14 Viitattu 5.3.2024 <https://doi.org/10.1364/OE.24.0A1075>

Lin, J.; Lyu, M.; & Shi, D. 2023, 3D Solar Harvesting and Energy Generation via Multilayers of Transparent Porphyrin and Iron Oxide Thin Films, Energies, Vol 16, No 7. Viitattu 27.1.2024 <https://doi.org/10.3390/en16073173>

Liu, L.; He, G.; Wu, M.; Zhang, H.; Chen, Y.; Shen, J. & Li S. 2023, Climate change impacts on planned supply–demand match in global wind and solar energy systems. Nature Energy, Vol. 8, 870–880 Viitattu 16.4.2024.

Majumder S. & Ravindran S. 2022, Optical Simulation and Analysis of GaAs Nanocone, Inverted Nanocone, and Hourglass Shaped Nanoarray Solar Cells. Coronell University: physics.optics Viitattu. 5.6.2024

Maka, A. & Alabid, J.M. 2022, Solar energy technology and its roles in sustainable development, Clean Energy, Volume 6, Issue 3, 476–483, Viitattu 17.4.2024. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac023>

Maka, A. O. M. & Alabid J. M. 2022, Solar energy technology and its roles in sustainable development, Clean Energy, Vol. 6, No 3, 476–483. Viitattu 26.2.2024. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac023>

Maniscalco, M. P.; Longo, S.; Micciché, G.; Cellura M. & Ferraro, M. 2023, A Critical Review of the Environmental Performance of Bifacial Photovoltaic Panels Energies, Vol. 17, No. 1, Viitattu 13.3.2024 <https://doi.org/10.3390/en17010226>

McConnell, R. & Fthenakis V. 2012, Concentrated Photovoltaics, Third Generation Photovoltaics, IntechOpen Viitattu 15.3.2024 <https://www.intechopen.com/chapters/32594>

Mouhib, E; Micheli, L.; Almonacid, F. M. & Fernández E. F. 2022, Overview of the Fundamentals and Applications of Bifacial Photovoltaic Technology:

Agrivoltaics and Aquavoltaics, *Energies*, Vol. 15, No. 23 Viitattu 13.3.2024

<https://doi.org/10.3390/en15238777>

Myers, B.; Bernardi, M.; & Grossman, J. C. 2010, Three-dimensional photovoltaics, *Applied Physics Letters* Vol. 96, No. 7, Viitattu 21.2.2024

<https://doi.org/10.1063/1.3308490>

Nijssse, F.; Mercure, J.F.; Ameli, N.; Larosa, F.; Kothari, S.; Rickman, J.; Vercoulen, P. & Pollitt, H. 2023, The momentum of the solar energy transition, *Nature Communications*, Vol. 14, Viitattu 25.4.2024

Obaideen, K.; Olabi, A.G.; Al Swailmeen, Y.; Shehata, N.; Abdelkareem, M.A.; Alami, A.H.; Rodriguez, C. & Sayed, E.T. 2023, Solar Energy: Applications, Trends Analysis, Bibliometric Analysis and Research Contribution to Sustainable Development Goals (SDGs), *Sustainability*, Vol. 15, No. 2 Viitattu 16.4.2024. <https://doi.org/10.3390/su15021418>

Partain, L.; Hansen, R.; Hansen, S.; Bennett, D.; Newlands, A. & Fraas, L. 2016, 'Swanson's Law' plan to mitigate global climate change, *IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Viitattu 18.4.2024.

Perämäki, H. 2016, Väriherkistetyt aurinkokennot ja niissä käytettävät väriherkistimet, Kandidaatin tutkielma. Kemian tutkinto-ohjelma. Oulu: Oulun yliopisto Viitattu 3.2.2024 <https://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201610202937>

Qiu, L.; Ono, L. K. & Qi, Y. 2018, Advances and challenges to the commercialization of organic-inorganic halide perovskite solar cell technology, *Materials Today Energy* Vol. 7 169-189, Viitattu 20.2.2024.

Ren, Y.; Zhang, D.; Suo, J.; Cao, Y.; Eickemeyer, F. T.; Vlachopoulos, N.; Zakeeruddin, S. M.; Hagfeldt A. & Grätzel, M. 2022, Hydroxamic acid pre-adsorption raises the efficiency of cosensitized solar cells. *Nature*, Vol. 613, 60–65 Viitattu 10.2.2024 <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05460-z>

S Srisai & S Harnsoongnoen, 2019, Efficiency of solar tree based on golden ratio, *Journal of Physics: Conference Series* Vol. 1380, No.1 Viitattu 15.2.2024

Said, Z.; Ghodbane, M.; Hachicha, A. A. & Boumeddane, B. 2019, Optical performance assessment of a small experimental prototype of linear Fresnel reflector, Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 16, Viitattu 18.3.2024 <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100541>

Salloom, A. H.; Abdulrazzaq, O. A. & Ismail B. H. 2018, Assessment of the Performance of Bifacial Solar Panels, International Journal of Engineering and Technical Research Vol. 8, No. 7 Viitattu 13.3.2024

Saša P. R.; Darko V. M.; Velimir, S. P.; Zoran, S. M. & Evangelos, B. A. 2016, Optical analysis and performance evaluation of a solar parabolic dish concentrator, Thermal Science, Vol. 20, No 5, 1237-1249 Viitattu 18.3.2024

Shah N.: Shah A. A.: Leung P. K.; Khan S.; Sun K.; Zhu X. & Liao Q. 2023, A Review of Third Generation Solar Cells, Processes, Vol 11, No 6. Viitattu 22.1.2024

Sharma, K.; Sharma V. & Sharma, S. S. 2018, Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status, Nanoscale Research Letters Vol. 13, No.381 <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2760-6>

Singh, A.K. 2022, The world's largest solar tree has been shattered, BigWit Energy, Viitattu 24.3.2024. <https://www.bigwitenergy.com/post/the-world-s-largest-solar-tree-has-been-shattered>

Sivaraj S.; Rathanasamy R.; Kaliyannan G.V.; Panchal H.; Jawad Alrubaie A.; Musa Jaber M.; Said Z. & Memon S. 2022, A Comprehensive Review on Current Performance, Challenges and Progress in Thin-Film Solar Cells. Energies, Vol 15, No. 22 Viitattu 21.1.2024 <https://doi.org/10.3390/en15228688>

Solar Spotlight, 2024, Solar trees, product details, Viitattu 24.3.2024. <https://spotlightsolar.com/>

Sui M.; Chu Y. & Zhang, R. 2021, A review of technologies for high efficiency silicon solar cells, Journal of Physics: Conference Series Vol. 1907. No 1 Viitattu 23.1.2024

Tabassum, S.; Rahman, T.; Islam, A.U.; Rahman, S.; Dipta, D.R.; Roy, S.; Mohammad, N.; Nawar, N. & Hossain, E. 2021, Solar Energy in the United States: Development, Challenges and Future Prospects, *Energies*, Vol. 14, No. 23 Viitattu 17.4.2024. <https://doi.org/10.3390/en14238142>

Tooghi, A., Fathi, D. & Eskandari, M. 2020, High-performance perovskite solar cell using photonic–plasmonic nanostructure. *Scientific Reports*, Vol. 10 Viitattu 7.3

Tzivanidis, C.; Bellos, E.; Korres, D.; Antonopoulos, K. A. & Mitsopoulos, G. 2015, Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 6, 226-237, Viitattu 18.3.2024

Ukoba, K.; Yoro, K.; Eterigho-Ikelegbe, O.; Ibegbulam, C. & Jen T.C. 2024 Adaptation of solar energy in the Global South: Prospects, challenges and opportunities, *Heliyon*, Vol. 10, No 7. Viitattu 23.4.2024.

UNFCCC. 2016 Paris Agreement-Status of Ratification, United Nations Framework Convention on Climate, <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/status-of-ratification>

Vossier, A.; Zeitouny, J.; Katz, E. A.; Dollet, A.; Flamant, G. & Gordon, J. M. 2018, Performance bounds and perspective for hybrid solar photovoltaic/thermal electricity-generation strategies, *Sustainable Energy & Fuels*, Vol. 2, No. 9, 2060-2067 Viitattu 15.3.2024
<https://doi.org/10.1039/C8SE00046H>

Wibowo, A.; Marsudi, M. A.; Amal M. I.; Ananda, M. B.; Stephanie, R.; Ardy H. & Diguna L. J. 2020, ZnO nanostructured materials for emerging solar cell applications, *RSC Advances*, Vol. 10, No. 70, Viitattu 6.3.2024

Wu, T.; Qin, Z.; Wang, Y.; Wu, Y.; Chen, W.; Zhang, S.; Cai, M.; Dai, S.; Zhang, J.; Liu, J.; Zhou, Z.; Liu, X.; Segawa, H.; Tan, H.; Tang, Q.; Fang, J.; Li, Y.; Ding, L.; Ning, Z.; Qi, Y.; Zhang, Y. & Han, L. 2021, The Main Progress of Perovskite

Solar Cells in 2020–2021 Nano-Micro Letters Vol. 13, No. 152 Viitattu
13.2.2024 <https://doi.org/10.1007/s40820-021-00672-w>

Culhane, T.; Hall, G.J. & Roberts, T. 2021, Who delays climate action? Interest groups and coalitions in state legislative struggles in the United States, Energy Research & Social Science, Vol. 79, Viitattu 26.4.2024.