

# **Rakennuksien julkisivuihin integroidut aurinkopaneelit**

Materiaalitekniikka

Kandidaatintutkielma

Eedla Parhiala

13.5.2026

Turku

Kandidaatintutkielma

**Tutkinto-ohjelma, oppiaine:** Materiaalitekniikka

**Tekijä(t):** Eedla Parhiala

**Otsikko:** Rakennuksiin integroidut aurinkopaneelit

**Ohjaaja(t):** Väitöskirjatutkija Julianna Varjopuro, TkT Aapo Poskela

**Sivumäärä:** 31 sivua

**Päivämäärä:** 13.5.2026

Aurinkoenergia on yksi tärkeimmistä tavoista tuottaa uusiutuvaa ja puhdasta energiaa, kun vähennetään fossiilisia energialähteitä ilmastomuutoksen estämiseksi. Aurinkopaneeleihin liittyviä tutkimuksia julkaistaan yhtä enemmän, mihin liittyy kasvava kiinnostus uusiutuvien energialähteiden käytöstä. Yksi sovellustapa on aurinkopaneelien integroiminen rakennuksiin. Niitä voidaan integroida rakennuksien eri osiin, kuten kattoihin ja julkisivuihin. Julkisivuihin integroitaville aurinkopaneeleille eduksi on, että ne eivät estä auringonvalon pääsyä sisätiloihin asuinrakennuksissa ja erityisesti korkeissa taloissa seinien pinta-ala on suurempi kuin katolle integroitaessa. Integrointi julkisivuun tarjoaa myös energiatehokkaan vaihtoehdon, sillä tuotetulla energialla voidaan kattaa rakennuksien energiakustannuksia. Lisäksi julkisivuun integroitavat paneelit sulautuvat paremmin arkkitehtuuriin kuin perinteiset telineisiin asennettavat aurinkopaneelit. Julkisivuihin asennettavat aurinkopaneelit ovat kuitenkin vain 20 % integroitavien aurinkopaneelien markkinoista.

Tutkielmassa tarkastellaan kirjallisuuskatsauksena rakennuksiin integroitavia aurinkopaneeleja ja pohditaan integroinnin vaikutusta paneelien käyttölämpötiloihin. Lisäksi tutkielmassa tarkastellaan markkinoilla olevia ja kehittyviä jäähdytysjärjestelmiä sekä pohditaan tulevaisuuden näkymiä.

Tehdyn kirjallisuuskatsauksen perusteella rakennuksiin integroitujen aurinkopaneelien lämpötila nousee verrattuna muihin asennusratkaisuihin, kuten telineasennukseen. Seurauksena paneelin hyötysuhde ja teho laskevat huomattavasti verrattuna STC-olosuhteisiin. Aurinkopaneelin hyötysuhde laskee 0,3–0,5 % jokaista optimaalisen käyttölämpötilan ylittävää celsiusastetta kohden. Jäähdyttämällä voidaan siten nostaa aurinkopaneelien tehoa ja hyötysuhdetta.

Jäähdytysjärjestelmään vaikuttaa käyttötarkoitus ja ilmasto, koska ne siirtävät lämpöä eri tavoin ja vaikutus tehokkuuteen ovat erilaiset. Rakennuksiin integroiduissa aurinkopaneeleissa on yleistä käyttää passiivista ilmajäähdytysjärjestelmää, koska suhteelliset kustannukset ovat alhaiset. Lisäksi vesijäähdytysjärjestelmät voivat yleistyä tulevaisuudessa, sillä ne osoittavat lupaavia tuloksia ja etuja ääriolosuhteissa. Tulevaisuudessa on myös mahdollista hybridijäähdytysjärjestelmien yleistymisen ilmaston ääriolosuhteiden yleistymisen vuoksi. Vain yksi jäähdytysjärjestelmäratkaisu ei riitä optimoimaan aurinkopaneelien käyttölämpötilaa, jos ilmankierto estyy olosuhteiden vuoksi. Jäähdytysjärjestelmiä käytetään, jotta aurinkopaneelin käyttölämpötila pysyy optimaalisena ja tehokkuus vakaampana.

**Avainsanat:** integroidut aurinkopaneelit, aurinkokenno, jäähdytysjärjestelmä

## **Sisällysluettelo**

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Aurinkopaneelit</b>	<b>6</b>
2.1	Aurinkopaneelien toimintaperiaate	6
2.2	Rakennuksiin integroidut aurinkopaneelit	8
<b>3</b>	<b>Aurinkopaneelien lämpökäyttäytyminen ja toimintalämpötilat</b>	<b>10</b>
3.1	Lämpökäyttäytyminen ja lämpötilan kohoamisen tekijät	10
3.2	Toimintalämpötilojen vaikutus hyötysuhteeseen ja tuotantoon	12
<b>4</b>	<b>Jäähdytysjärjestelmien kannattavuuksien arviointi</b>	<b>16</b>
4.1	<b>Ekologinen ja taloudellinen näkökulma</b>	<b>16</b>
4.1.1	Ilmajäähdytys	16
4.1.2	Aktiivinen ja passiivinen aurinkosähkö-lämpöjärjestelmän jäähdyttäminen	17
4.1.3	Vesijäähdytysjärjestelmä	19
4.1.4	Kaksoisjulkisivu jäähdytysjärjestelmä	20
4.1.5	Hybridijäähdytysratkaisut	21
4.2	<b>Tulevaisuuden näkökulma</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>Johtopäätökset</b>	<b>27</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>29</b>

## 1 Johdanto

Uusiutuvien energialähteiden käytön keskeinen tavoite on ilmastonmuutoksen hillitseminen, minkä vuoksi niiden käyttöönottoon liittyen on solmittu kansainvälisiä sopimuksia [1], [2]. Esimerkiksi vuonna 2016 solmittiin yhteensä yli 150 maan päättäjien johdolla Pariisin ilmastopöytäkirja, jossa sitouduttiin vähentämään kasvihuonepäästöjä merkittävästi vuoteen 2050 mennessä maapallon lämpötilan nousemisen estämiseksi [2]. Aurinkoenergia on yksi tärkeimmistä uusiutuvan energian lähteistä [1].

Aurinkoenergia on puhdas, uusiutuva sekä hajautettu energian muoto verrattuna fossiilisiin energialähteisiin. Teknologian kehittyessä aurinkoenergiasta on tullut aiempaa edullisempi tapa tuottaa sähköä ja sen tehokkuus on parantunut. Yksi tavoista hyödyntää aurinkoenergiateknologiaa ovat rakennuksiin integroitavat aurinkopaneelit, jotka tuottavat sähköä rakennuksille sekä edesauttavat kestävä kehityksen tavoitteiden saavuttamista. Integroitavat aurinkopaneelit mahdollistavat energiatehokkaat rakennukset ja vähentävät sähköverkkoihin kohdistuvaa kuormitusta. Sähköverkkojen kuormitus vähentyy, koska sähköä tuotetaan paikan päällä ja muualle siirrettävän energian määrä on pienempi. [1]

Rakennuksiin integroitaviin aurinkopaneelisiin liittyy kuitenkin myös haasteita, kuten niiden lämpökäyttämiseen. Keskeinen ongelma on riittävä ilmankierto, joka vaikuttaa aurinkopaneelien toimintalämpötilaan [3]. Aurinkopaneelin toimintalämpötila vaikuttaa suoraan paneelin hyötysuhteeseen. Tarpeellisen ilmanvaihdon puuttuessa tapahtuu huomattava aurinkopaneelin hyötysuhteen lasku [3], [4]. Ongelman ratkaisemiseksi on järjestelmään suunniteltava asianmukainen ilmankierto eli jäähdytysjärjestelmä, jotta aurinkopaneelijärjestelmä toimisi optimaalisesti [5].

Tämä tutkielma on kirjallisuuskatsaus, joka keskittyy rakennuksiin integroitaviin aurinkopaneelisiin ja niiden mahdollisiin jäähdyttämistapoihin. Tutkielma keskittyy erityisesti rakennuksen ulkokuoreen integroitaviin aurinkopaneelisiin eikä siinä tarkastella juurikaan muita integroitavia aurinkopaneelityyppejä. Tutkielman tavoite on luoda katsaus mahdollisiin jäähdytysjärjestelmiin sekä arvioida jäähdyttämisen tarpeellisuutta.

Tutkielman alussa toisessa luvussa käydään läpi aurinkopaneelien yleinen toimintaperiaate ja keskitytään yksikiteisiin piiaurinkokennoihin. Lisäksi luvussa esitellään integroitavien aurinkopaneelien tyyppejä ja yleistä paneelirakennetta. Kolmannessa luvussa tarkastellaan tarkemmin aurinkopaneelien lämpökäyttäytymistä ja pohditaan toimintalämpötilaan vaikuttavia tekijöitä.

Tutkielman neljännessä luvussa arvioidaan jäähdytysjärjestelmien kannattavuutta huomioimalla ekologinen ja taloudellinen näkökulma. Lisäksi neljännessä luvussa pohditaan myös jäähdytysjärjestelmien tulevaisuuden näkymiä. Tutkielman viimeisessä viidennessä luvussa esitetään tutkielman johtopäätökset sekä yhteenveto keskeisimmistä asioista.

## 2 Aurinkopaneelit

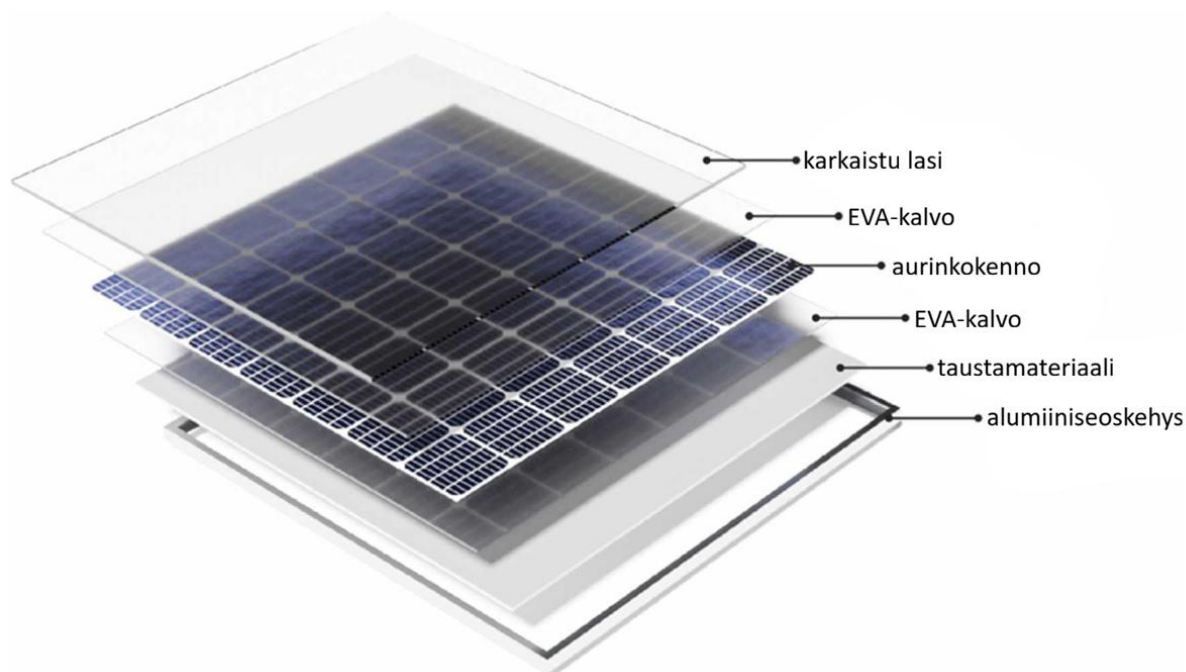
### 2.1 Aurinkopaneelien toimintaperiaate

Aurinkopaneelit ovat pääkomponentti aurinkoenergiajärjestelmissä, jossa aurinkokennot muuntavat auringonvaloa sähköksi [6]. Aurinkokennojen toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön, jossa auringon säteilyn avulla tuotetaan sähköenergiaa. Valosähköisessä ilmiössä puolijohdemateriaalin elektronit saavat energiaa auringon säteilystä fotonien muodossa. Fotonit virittävät elektroneja ja muodostuu elektroniaukkopareja. Aurinkokennoissa käytetään p- ja n-tyyppin puolijohteita. Kun puolijohteet ovat kosketuksessa, niin muodostuu p-n liitos. P-n liitoksen muodostumisessa elektronit ohjautuvat n-tyyppin puolijohteeseen, kun aukot ohjautuvat p-tyyppin puolijohteeseen. Positiivisella p-tyyppin puolella on ylimääräisiä aukkoja ja negatiivisen n-tyyppin puolella on elektroneja, mikä synnyttää kennoon jännitteen. Jännite tuottaa virtaa, kun elektronit ja aukot ohjautuvat kauemmaksi liitoksesta vastakkaisiin suuntiin ja palaavat takaisin virtapiirin kautta. [7]

Aurinkokennot voidaan jakaa kolmeen eri sukupolveen. Ensimmäiseen sukupolveen kuuluvat piipohjaiset kennot, joita ovat yksi ja monikiteiset piikennot. Toiseen sukupolveen kuuluvat ohutkalvokennot, joita voidaan valmistaa esimerkiksi amorfisesta piistä. Kolmannen sukupolven aurinkokennoja ovat muun muassa perovskiitti- ja väriherkistetyt aurinkokennot [8]. Pii on yleisimmin käytetty puolijohdemateriaali aurinkokennojen valmistuksessa runsaan raaka-aine saatavuuden vuoksi. Yksikiteinen pii on kalliimpi kuin monikiteinen pii, mutta yksikiteinen piiaurinkokenno on vähintään 5 % tehokkaampi [5]. Pii on myös parempi materiaali kuin seleeni tai kuparioksidimateriaalit valosähköilmiön hyödyntämisessä. Lisäksi piiaurinkokennot ovat tehokkaampia verrattuna esimerkiksi orgaanisiin kennoihin, joissa käytetään hiilipohjaisia materiaaleja [2]. Piiaurinkokennot ovat kuitenkin melko jäykkiä verrattuna orgaanisiin aurinkokennoihin, mikä on seurausta materiaalien rakenteista [5].

Rakennuksiin integroitujen aurinkopaneelien yleisimmät aurinkokennotyypit ovat yksikiteinen ja monikiteinen pii sekä ohutkalvokennot. Näistä materiaaleista yksikiteinen pii on tehokkain, mutta myös kallein [9]. Kuvassa 1 on esitetty yleinen

perusrakenne piiaurinkopaneeleille, jotka koostuvat päällekkäisistä levymäisistä kerroksista. Etyleenivinyyliaasetatti eli EVA-kalvojen väliin laminoidut aurinkokennot ovat tyypillisesti kytketty keskenään kuparilla. Rakenteen yläpuoli on peitetty karkaistulla lasilla ja alapuoli Tedlar-levyllä eli taustamateriaalilla. Koko rakenne on myös kapseloitu alumiiniseoksesta valmistetulla kehysrakenteella. [8]



Kuva 1. Aurinkopaneelin rakenteen komponentit. Kuva muokattu luvalla lähteestä [8]. Tekijänoikeus 2024 Journal of Environmental Chemical Engineering.

Aurinkopaneelien rakennetta voidaan suunnitella eri tavoin [2]. Integroitavia paneeleja on kehitetty eri väreissä, muodoissa sekä läpinäkyvyyksillä [10]. Lisäksi kennon kokoa ja sijaintia pystytään muuttamaan. Kennojen välisen etäisyyden muuttaminen on yleinen vaihtoehto sen yksinkertaisuuden vuoksi ja sillä saavutetaan myös mahdollisuus paneelin läpinäkyvyyden säätelyyn. Kennon kokoa tai muotoa on kuitenkin haasteellisempaa muuttaa ja se vaatii lisävaiheita tuotannossa, joten tämä tekninen suunnittelutapa ei ole yhtä yleistyneessä käytössä teollisuudessa. Myös kennon väriä on mahdollista vaihtaa, mutta se vaikuttaa aurinkopaneelijärjestelmän tehoon laskevasti. [2]

## 2.2 Rakennuksiin integroidut aurinkopaneelit

Rakennuksiin integroitavien aurinkopaneelien ja perinteisten katolle asennettavien aurinkopaneelien keskeinen ero on, että integroitavia paneeleja käytetään korvaamaan rakennusmateriaaleja tai ne ovat asennettu rakennuksen ulkokuoreen (engl. envelope) [6]. Rakennuksien eri osiin, kuten kattoihin, ulkoisiin laitteisiin ja julkisivuihin, voidaan integroida aurinkopaneeleja [5]. Aurinkopaneelijärjestelmä koostuu paneeleista, inverttereistä, kaapeleista sekä lisädiodeista paneelien välissä [2]. Integroiduissa aurinkopaneeleissa ei tarvitse perinteisten katolle asennettavien aurinkopaneelien tapaan investoida vaatimusten mukaiseen erilliseen tilaan ja asennusrakenteisiin. Integroidut aurinkopaneelit siis mahdollistavat materiaalien säästämisen. [10]

Integroitavien aurinkopaneelien markkinat koostuvat noin 80 % kattoihin ja 20 % julkisivuihin asennettavista paneeleista [5]. Lupaavimpia sovelluskohteita ovat integroitujen aurinkopaneelimoduulien käyttö julkisivuissa, sillä erityisesti korkeissa rakennuksissa auringon säteilylle altistuva pinta-ala on suuri [10]. Aurinkopaneeleja voidaan asentaa julkisivuun esimerkiksi pystysuoraan tai kaltevasti seinälasituksiksi, kattoikkunoiksi sekä aurinkosuojiksi ja sadesuojaverhouksiksi [9]. Kuvassa 2 on esitetty esimerkkiratkaisuja aurinkopaneelien hyödyntämisestä erilaisten rakennuksien, kuten toimisto- ja asuinrakennusten julkisivuissa. Kuvan 2 a-kohdassa on esitetty integroituja aurinkopaneeleja eri väreissä ja b- sekä d-kohdissa on nähtävissä julkisivuun integroitavia aurinkopaneeleja. Lisäksi kuvan 2 c-kohdassa aurinkopaneeleja on hyödynnetty parvekkeen julkisivussa. [10]



Kuva 2. Esimerkkitapoja käyttää aurinkopaneeleja rakennuksien julkisivuissa. Kuvan a-kohdassa on rakennukseen integroitu eri värisiä aurinkopaneeleja. B-kohdassa on aurinkopaneelit ovat integroitu julkisivuun ja c-kohdassa parvekkeiden kaiteisiin. Kuvan d-kohdassa aurinkopaneelit ovat integroitu osaksi julkisivun ulkokuorta. Kuva tekijöiltä Hamidi et al. [10]. Tekijänoikeus 2025 Hamidi, julkaisija Architecture.

Usein korkeat rakennukset ovat sopivimpia paikkoja integroida aurinkopaneeleja rakennusten julkisivuihin, koska seinäpinta-alaa on enemmän kuin matalammissa rakennuksissa. Erityisesti asuinrakennuksien pystysuoriin seiniin integroitaessa on hyödyksi, ettei paneelijärjestelmä estä auringonvalon pääsyä sisälle ikkunoista esimerkiksi asuinrakennuksissa. Asuinrakennuksissa sadeverhouksina käytetyt aurinkopaneelit tai muut paneelisäleiköt saattavat estää auringonvalon pääsyä rakennukseen [10]. Rakennuksiin integroitavissa aurinkopaneeleissa on joka tapauksessa haasteita, jotka vaikuttavat aurinkopaneelien suorituskyvyn tehoon ja paneelin hyötysuhteeseen heikentävästi [3], [4]. Keskeinen ongelma on asianmukainen ilmankierto järjestelmässä tehon takaamiseksi [3]. Aurinkopaneelien hyötysuhteeseen vaikuttaa suoraan käyttölämpötila. Tarpeellisen ilmankierron puuttuessa tapahtuu huomattava aurinkopaneelin energiatuotannon tehokkuuden heikkeneminen ja hyötysuhteen lasku [4], [11].

### 3 Aurinkopaneelien lämpökäyttäytyminen ja toimintalämpötilat

Integroitaville aurinkopaneelijärjestelmille on laadittu vaatimuksia, jotka vaikuttavat muun muassa aurinkopaneelien suorituskykyyn. Esimerkiksi kansainvälinen sähkötekninen toimikunta IEC (engl. International Electrotechnical Commission) on kehittänyt standardeja aurinkopaneeleille ja -järjestelmille arvioimaan ja kuvaamaan niiden suorituskykyä. Myös monet ISO standardit (engl. International Organization for Standardization) koskevat aurinkopaneelijärjestelmiä ja kun aurinkopaneelit ovat osa rakennusta. [12]

Integroitavissa aurinkopaneeleissa komponenttien lämpökäyttäytyminen on erilaista kuin rakennuksen komponenttien, jotka aurinkopaneeli korvaa asennuksessa. Integrointi vaikuttaa paneelin hyötysuhteeseen, joten on tärkeää tietää esimerkiksi hyötysuhteeseen vaikuttava aurinkopaneelin käyttölämpötila. Todelliset arvot voivat erota huomattavasti standarditestaolosuhteiden eli STC-olosuhteiden (engl. Standard Test Conditions) laskennallisista arvoista. On tärkeää määrittää aurinkopaneelin käyttölämpötilaan vaikuttavat tekijät sekä sen vaikutus hyötysuhteeseen, jotta aurinkopaneelit toimivat vaatimusten mukaisesti. [12]

#### 3.1 Lämpökäyttäytyminen ja lämpötilan kohoamisen tekijät

Aurinkopaneelin käyttölämpötila vaikuttaa paneelien lämpökäyttäytymisen lisäksi sähköiseen suorituskykyyn. On tärkeää tietää käyttölämpötila, koska sen avulla pystytään arvioimaan luotettavasti aurinkopaneelin tehokkuutta ja lämpökäyttäytymistä. Myös pystytään suunnittelemaan oikeanlaisia integroitavia aurinkopaneeleja, kun tiedetään lämpökäyttäytymiseen liittyvistä vaatimuksista. [12]

Yleisesti aurinkopaneelien käyttölämpötilaan vaikuttaa monet eri tekijät. Lämpötila on riippuvainen auringon säteilystä, ympäristön lämpötilasta ja tuulen nopeudesta. Käyttölämpötilaan vaikuttaa myös tuulen suunta, paneelin muoto sekä kallistuskulma. Erityisesti integroitavissa aurinkopaneeleissa käyttölämpötilaan vaikuttaa asennustapa [13]. Mallintamista varten on kehitetty yksinkertainen Sandia lämpötilamalli kuvaamaan aurinkopaneelin käyttölämpötilaa, jonka tarkkuus on  $\pm 5$  °C. Lämpötilamallista laskettu käyttölämpötilan epätarkkuus vaikuttaa aurinkopaneelin tehoon alle 3 %. Sandia

lämpötilamallin avulla voidaan määrittää telineiseen asennettavien ja rakennuksiin integroitavien aurinkopaneelien käyttölämpötilat. [14]

Sandia lämpötilamalli on esitetty kaavassa 1, jonka perusteella voidaan arvioida aurinkopaneelin lämpötila  $T_m$ :

$$T_m = E_{POA} \cdot (e^{a+b \cdot WS}) + T_a, \quad (1)$$

missä  $E_{POA}$  on paneeliin kohdistuva auringon säteily ( $\frac{W}{m^2}$ ),  $WS$  on tuulen nopeus ( $\frac{m}{s}$ ) ja  $T_a$  on ympäristön lämpötila ( $^{\circ}C$ ). Lisäksi  $a$  ja  $b$  ovat lämpömalliparametrejä, jotka ovat riippuvaisia paneelin rakenteesta ja materiaaleista. Parametri  $a$  on kerroin, joka määrittää aurinkopaneelin lämpötilan ylärajan alhaisella tuulen nopeudella, mutta suurella auringonsäteilyllä. Kaavan parametri  $b$  on kerroin, joka määrittää nopeuden, kun paneelin lämpötila laskee tuulen nopeuden kasvaessa. Parametrit  $a$  ja  $b$  muuttuvat aurinkopaneelin asennustavan mukaan, mitkä ovat esitetty taulukossa 1.

Asennustapoja ovat lähelle kattoa ja telineeseen asentaminen sekä integroiminen [14]. Sandia lämpötilamallin avulla tehdyissä esimerkkilaskuissa oletetaan aurinkopaneelin olosuhteiksi standarditestaolosuhteet, jossa ympäristön lämpötila on  $25^{\circ}C$ , tuulen nopeus on  $1,5 \frac{m}{s}$  ja paneeliin heijastuva auringon säteilyn voimakkuus on  $1000 \frac{W}{m^2}$  [15].

Alla on esitetty esimerkkilasku kaavan 1 mukaisesti paneelille, joka on asennettu lähelle kattoa:

$$\begin{aligned} T_m &= E_{POA} \cdot (e^{a+b \cdot WS}) + T_a \\ &= 1000 \frac{W}{m^2} \cdot \left( e^{-2,98 + (-0,0471 \cdot 1,5 \frac{m}{s})} \right) + 25^{\circ}C = 72,328^{\circ}C \approx 72,3^{\circ}C \end{aligned}$$

Taulukossa 1 on esitetty esimerkkilaskun mukaisesti lasketut toimintalämpötilat erilaisille aurinkopaneeleille ja parametrit asennustavan mukaan. Lasketuista lämpötiloista voidaan päätellä, että paneelin toimintalämpötila on korkeampi, kun paneeli on asennettu lähelle kattoa kuin telineeseen asennetulla paneeleilla. Lämpötilaero on  $18,9^{\circ}C$ , joten voidaan päätellä asennustavan vaikuttavan paneelin lämpötilaan, vaikka paneelin rakenne on sama. Taulukon 1 lasketuista lämpötila arvioista voidaan päätellä myös, että lämpötilaeroa on myös telineeseen asennetulla

paneelilla ja rakennukseen integroidulla paneelilla. Lämpötilaero on 30,8 °C, joka on suurempi kuin lähelle kattoa ja telineeseen asennettujen paneelien lämpötilaero.

Taulukko 1. Aurinkopaneelin lämpötila paneelin rakenteen ja asennustavan mukaan. Lisäksi asennustavasta riippuvaiset parametrit a ja b [14].

paneelirakenne	asennustapa	parametri a	parametri b	käyttölämpötila (°C)
lasitausta	lähellä kattoa	-2,98	-0,0471	72,3
lasitausta	teline	-3,47	-0,0594	53,5
polymeeritausta	integroitunut rakennukseen	-2,81	-0,0455	81,2
polymeeritausta	teline	-3,56	-0,0750	50,4

Lähelle kattoa asennetun ja rakennukseen integroidun aurinkopaneelin toimintalämpötiloja ei voi suoraan vertailla keskenään, koska paneelien rakenteet ovat erilaiset. Lähelle kattoa asennetun aurinkopaneelin rakenteessa aurinkokennon molemmilla puolilla on lasia. Taustaan asennetussa paneelissa toisen lasikerroksen tilalla on eristävä polymeeritausta, mikä on tyypillisesti integroitunut rakennukseen. Voidaan kuitenkin päätellä, että toimintalämpötilat nousevat asennustavan vuoksi. Lämpötila nousee, mitä lähemmäksi rakennusta aurinkopaneeli on asennettu. Tämä johtuu siitä, ettei ilma pääse viilentämään aurinkopaneelia yhtä laajalta pinta-alalta integroidussa aurinkopaneelissa kuin lähelle kattoa asennettavassa tai telineeseen asennettavassa aurinkopaneelissa. Lähelle kattoa asennettavan aurinkopaneelin ja katon väliin jää ilmarako, jolloin ilma pystyy kiertämään ilmaraossa. Integroitavassa aurinkopaneelissa ei ole ilmarakoa, jolloin ilma ei viilennä paneelia kuin vain ulkopuolelta.

### 3.2 Toimintalämpötilojen vaikutus hyötysuhteeseen ja tuotantoon

Aurinkopaneelin hyötysuhde laskee 0,3 - 0,5 % jokaista käyttölämpötilaa ylittävää celsiusastetta kohde, kun optimaalinen käyttölämpötila noin +25 °C on ylitetty [5], [16], [17]. Taulukon 1 lasketuista paneelien toimintalämpötiloista voidaan määrittää kaavan 2 perusteella aurinkopaneelin sähköinen hyötysuhde  $\eta_{PV,t}$ , koska hyötysuhteeseen vaikuttaa lineaarisesti lämpötila:

$$\eta_{PV,t} = \eta_{ref} \cdot (1 + \gamma \cdot (t_{PV} - t_{ref})), \quad (2)$$

missä  $\eta_{ref}$  on nimellishyötysuhde STC-olosuhteissa, joka on 20 % [13], [18].  $t_{PV}$  on aurinkokennon lämpötila, joka lasketaan kaavasta 1.  $t_{ref}$  on vertailulämpötila, joka on 25 °C.  $\gamma$  on teholämpötilakerroin, joka perustuu aurinkosähkötekniikkaan ja aurinkopaneelin rakenteeseen [13]. Kerroin on aina negatiivinen ja yksikiteisen aurinkopaneelikennon teholämpötilakerroin on -0,343 %/°C [13], [19].

Alla on esitetty esimerkkilasku sähköisen hyötysuhteen laskemisesta kaavan 2 mukaisesti lähelle kattoa asennettavalle aurinkopaneelille:

$$\begin{aligned} \eta_{PV,t} &= \eta_{ref} \cdot (1 + \gamma \cdot (t_{PV} - t_{ref})) \\ &= 20 \% \cdot (1 + (-0,343 \%/\text{°C}) \cdot (72,33 \text{ °C} - 20 \text{ °C})) = 16,753 \% \approx 16,8 \% \end{aligned}$$

Taulukossa 2 on esitetty kaavan 2 mukaan lasketut sähköiset hyötysuhteet erilaisille aurinkopaneelin asennusratkaisuille. Taulukon hyötysuhteiden arvoista voidaan päätellä, että verrattuna 20 %:n nimellishyötysuhteeseen kaikki lasketut hyötysuhdearvot ovat alhaisempia. Arvoihin vaikuttaa toimintalämpötilat, jotka ovat korkeampia kuin verrattava standarditestaustilämpötila 25 °C. Seurauksena hyötysuhde laskee. Lähelle rakennusta asennettavien aurinkopaneelien hyötysuhteet ovat huomattavasti matalampia kuin telineeseen asennettavien paneelien. Rakennuksiin integroitujen aurinkopaneelin hyötysuhde on matalin, sillä se on 3,9 % matalampi kuin nimellishyötysuhde kennon lämpötilan ollessa 20 %. Syynä on korkeampi toimintalämpötila, joka aiheutuu vähäisemmästä ilmankierrosta. Lähemmäs rakennusta asennettavat aurinkopaneelit eivät pääse viilentymään yhtä paljon kuin telineessä olevat.

Taulukko 2. Aurinkopaneelien asennustapojen vaikutus hyötysuhteeseen.

	lähellä kattoa	teline (lasitausta)	integroitu rakennukseen	teline (polymeeritausta)
<b>hyötysuhde:</b>	16,8 %	18,1 %	16,1 %	18,3 %

Kaavasta 2 lasketun hyötysuhteen avulla voidaan määrittää paneelin nimellissähköteho  $P_{PV}$  kaavan 3 mukaan:

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{P_i} = \frac{P_{PV}}{E_{POA} \cdot A} \Rightarrow P_{PV} = \eta_{PV} \cdot E_{POA} \cdot A, \quad (3)$$

missä  $\eta_{PV}$  on kaavan 2 mukaan laskettu aurinkopaneelin hyötysuhde [20].  $E_{POA}$  on auringonsäteily, joka on  $1000 \frac{W}{m^2}$  ja aurinkopaneelin pinta-ala  $A$  on  $2,0 m^2$  [13], [20]. Alla on esitetty esimerkkilasku sähkötehon laskemisesta, kun kyseessä on lähelle kattoa asennettava aurinkopaneeli:

$$P_{PV} = \eta_{PV} \cdot E_{POA} \cdot A = 16,8 \% \cdot 1000 \frac{W}{m^2} \cdot 2,0 m^2 = 335,066 W \approx 335 W$$

Kun aurinkopaneelin käyttölämpötila nousee  $65-75 \text{ }^\circ\text{C}$ , niin paneelin sähköteho laskee  $15-20 \%$  [16]. Laskuissa käytetään esimerkki aurinkopaneelia, jonka koko on  $2,0 m^2$  ja nimellisteho on  $400 W$ . Taulukossa 3 on esitetty aurinkopaneelien sähkötehot asennustavan mukaan sekä verrattava standardiolosuhteiden mukainen sähköteho. Lähimpänä standarditestaolosuhteiden mukaista sähkötehoa on telineeseen asennettavan polymeeritaustaisen aurinkopaneelin laskennallinen sähköteho, jonka ero on  $35 W$  eli  $16 \%$ :a alhaisempi STC-olosuhteisiin. Lähelle kattoa ja rakennukseen integroidulla aurinkopaneeleilla on huomattavasti alhaisemmat sähkötehot. Katon lähelle asentaminen laskee sähkötehoa  $65 W$ , joka laskee  $26 W$  eli  $6,5 \%$  enemmän kuin telineeseen asentaminen vastaavalla lasitaustaisella aurinkopaneelirakenteella. Rakennukseen integroiminen vaikuttaa sähkötehoon laskevasti  $77 W$  eli  $19,3 \%$  verrattuna STC-olosuhteisiin. Rakennukseen integrointi laskee sähkötehoa  $42 W$  eli  $10,5 \%$ :a enemmän kuin telineeseen asentaessa.

Tulosten perusteella voidaan päätellä rakennukseen integroinnin vaikuttavan huomattavasti aurinkopaneelin lämpökäyttäytymiseen, kun verrataan STC-olosuhteisiin. Lisäksi asennettavan aurinkopaneelin kulma vaikuttaa tehoon. Katolle asennettavaan aurinkopaneeliin osuu auringonvalo suurimman osan päivästä kohtisuoraan, kun aurinkopaneelin kallistuskulma on katon mukaisesti. Seinään integroidun aurinkopaneelin kulma on yleensä kohtisuorassa  $90^\circ$ , jolloin auringon valo heijastuu vain osan päivästä suoraan aurinkopaneeliin. Paneeliin heijastuu vähemmän

säteilyä, kun paneeliin kohdistuvan auringonvalon tulokulma on vino eikä kohtisuorassa. Tällöin aurinkopaneelin tuottama teho on myös pienempi kuin valon osuessa kohtisuoraan aurinkopaneeliin, jolloin säteilyä on enemmän pienemmällä pinta-alalla.

Taulukko 3. Aurinkopaneelien sähköteho watteina ja prosentteina asennustavan mukaan sekä standarditestausta -olosuhteissa.

<b>lähellä kattoa</b>	<b>teline (lasitausta)</b>	<b>integroitu rakennukseen</b>	<b>teline (polymeeritausta)</b>	<b>STC-olosuhteet</b>
335 W	361 W	323 W	365 W	400 W
83,6 %	90,3 %	80,8 %	91,3 %	100 %

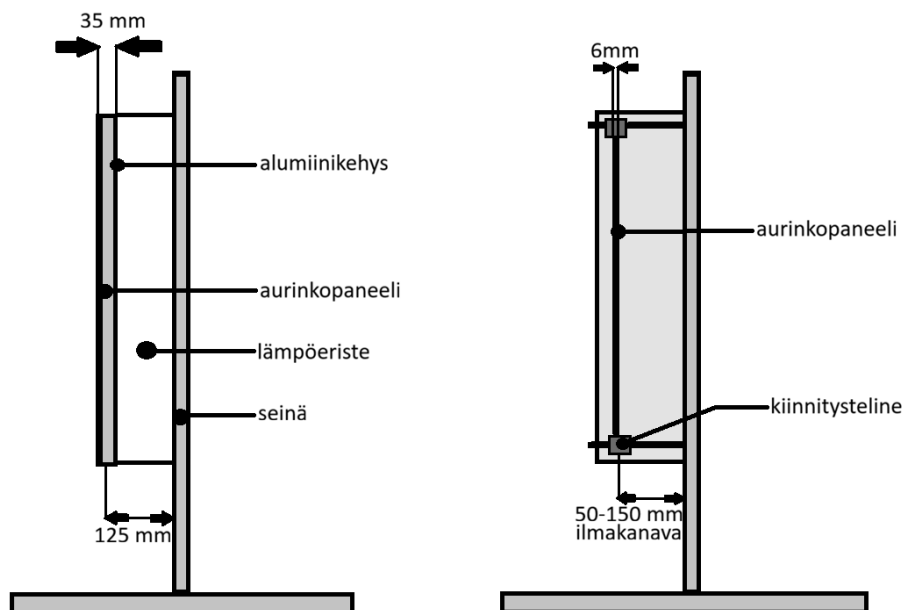
## 4 Jäähdytysjärjestelmien kannattavuuksien arviointi

### 4.1 Ekologinen ja taloudellinen näkökulma

Rakennukseen integroidun aurinkopaneelin käyttölämpötilan kohoamisella on vaikutusta aurinkopaneelin suorituskykyyn. Aurinkopaneelijärjestelmässä on välttämätöntä käyttää jäähdytysjärjestelmää optimaalisen käyttölämpötilan varmistamiseksi, koska rakennukseen integroitaessa aurinkopaneelin tausta on eristetty ulkoilmalta. Ratkaisuksi on kehitetty passiivisia ja aktiivisia jäähdytysjärjestelmiä rajoittamaan käyttölämpötilan liiallista nousua optimaalisesta käyttölämpötilasta [3]. Rakennuksiin integroitujen aurinkopaneelien jäähdytysjärjestelmiä ovat ilma- ja vesijäähdytys sekä aurinkosähkölämpö-järjestelmät (engl. BIPV/T). Lisäksi on hybridiratkaisuja, jotka hyödyntävät passiivista ja aktiivista jäähdytysmenetelmää. Hybridijäähdytysratkaisuihin liittyy faasimuutosmateriaalit (engl. PCM) ja säteilyjäähdytyspinnoitteet, mitä voidaan hyödyntää samanaikaisesti toisen jäähdytysjärjestelmän kanssa. [16]

#### 4.1.1 Ilmajäähdytys

Yleisin tapa viilentää rakennuksiin integroituja aurinkopaneeleja on ilmajäähdytys, jossa ylimääräistä hukkalämpöä ei hyödynnetä lämmitykseen. Kuvassa 3 on esitetty, miten aurinkopaneeli on integroitu rakennuksen julkisivuun ilmankierrolla ja ilman. Aurinkopaneelin ja julkisivun välillä ei ole ilmankiertoa, kun aurinkopaneeli on asennettu suoraan rakennuksen julkisivun ulkokuoreen. Jos aurinkopaneeli on integroitu rakennukseen ilmanjäähdytyksellä, niin paneelin ja seinän välissä on rako. Raon eli ilmanakanavan halkaisija vaihtelee 50–150 mm välillä. Kanavan läpi ilma pääsee virtaamaan alhaalta ylöspäin, koska lämmin ilma nousee ylöspäin ja viileä ulkoilma kulkeutuu paneelin alareunasta korvaamaan lämpimän ilman. Kiertävä ilma kuljettaa paneelin lämpöä ja alentaa paneelin käyttölämpötilaa yhtäaikaisesti. Ilmajäähdytys voi tapahtua luonnollisesti eli passiivisesti tai mekaanisesti. Mekaanisessa eli aktiivisessa jäähdytyksessä tuulettimesta tehostetaan esimerkiksi tuulettimella. [11]



Kuva 3. Vasemmalla puolella aurinkopaneeli on integroitu suoraan rakennuksen julkisivuun ja oikealla aurinkopaneeli integroitu ilmakanavalla rakennuksen julkisivuun. Kuvaan on otettu mallia lähteestä [11].

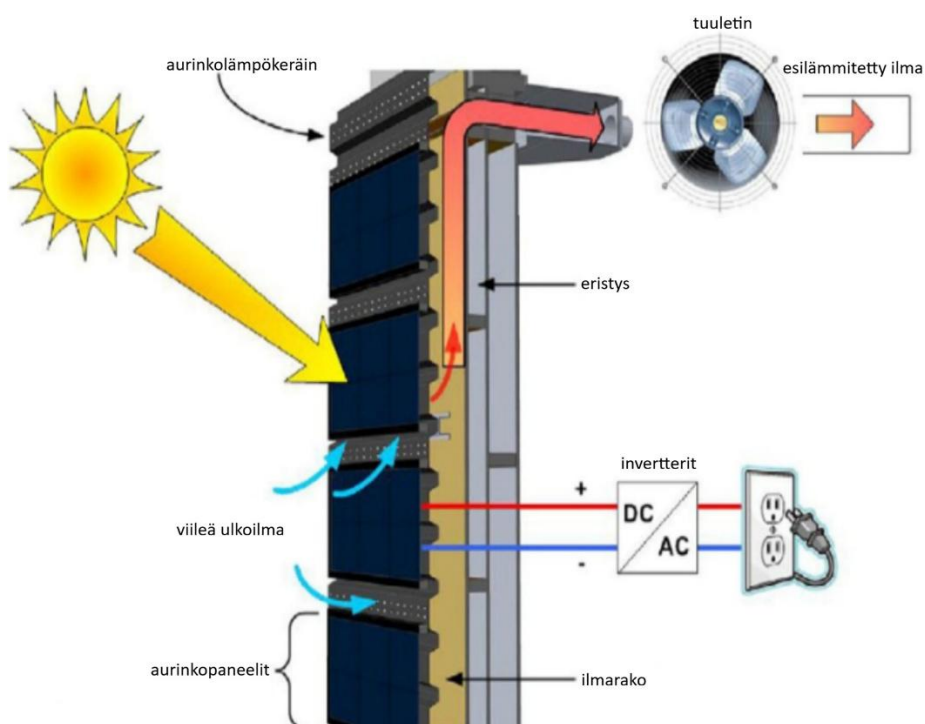
#### 4.1.2 Aktiivinen ja passiivinen aurinkosähkö-lämpöjärjestelmän jäähdyttäminen

Osassa jäähdytysjärjestelmissä hyödynnetään samalla paneelin korkeaa käyttölämpötilaa ottamalla ylimääräinen hukkalämpö talteen [14]. Kyseessä on silloin integroitu aurinkosähkö-lämpöjärjestelmä (engl. Building-Integrated Photovoltaic Thermal), jossa aurinkopaneelijärjestelmään on lisätty aurinkosähkö-lämpökeräimet [11], [17]. Yhteen kytketyt aurinkolämpökeräimet ja aurinkopaneelit muuntavat samanaikaisesti auringonsäteilyn sähkö- ja lämpöenergiaksi [17]. Aurinkosähkö-lämpöjärjestelmä tarjoaa suuremman energiatuotannon verrattuna integroituihin aurinkopaneelisiin ilman vastaavaa järjestelmää [11]. Jäähdytysjärjestelmässä samanaikaisesti tuotetaan sähköä ja talteen otettua hukkalämpöä hyödynnetään lämmittämään esimerkiksi vettä tai rakennusten sisätiloja. Järjestelmä voidaan myös yhdistää kaukolämpöverkkoihin, joka mahdollistaa lämmön hyödyntämisen muissa sovelluksissa. [16]

Integroituja aurinkosähkö-lämpö-järjestelmiä viilennetään aktiivisella sekä passiivisella tavalla hyödyntämällä ilmaa kuten aiemmin mainitussa ilmajäähdytyksessä. Erona on, että ylimääräinen lämpö otetaan talteen. Aurinkosähkö-lämpöjärjestelmän käyttöönottoa rajoittaa usein taloudelliset kustannukset, jotka ovat 20–40 % enemmän

kuin tavallisessa aurinkopaneelijärjestelmässä. [16] Aurinkosähkö-lämpöjärjestelmän passiivisessa ilmajäädytyksessä hyödynnetään ulkoilmaa ilmankiertona, jolloin ei tarvitse käyttää ulkoista energiaa. Passiivinen ilmajäädytys on yleisin jäädytysjärjestelmä, kun käytetään aurinkosähkö-lämpöjärjestelmää.

Kuvassa 4 on esitetty aurinkosähkö-lämpöjärjestelmän jäädyttäminen aktiivisesti. Jäädyttämisen vuoksi aurinkopaneelien takana on ilmakehää ja rakenteessa ilmarakoja, mitkä toimivat tuuletusaukkoina. Aurinkopaneelijärjestelmään kulkeutuu ulkoilmaa viilentämään aurinkopaneelin taustaa lämpötilaeron vuoksi. Ulkoilma pyrkii tasoittamaan lämpötilaeroa, jolloin lämmin ilma nousee ylöspäin ja viileä ulkoilma kulkeutuu paneelin alareunasta korvaa lämpimän ilman. Järjestelmästä ilma poistuu ilmapoistoaukosta. Lisäksi jäädyttämisen tehokkuutta voidaan lisätä käyttämällä puhaltimia. [6] Järjestelmässä paneelin ja rakennuksen julkisivun ulkokuoren välissä olevan ilmaraon suuruus on tyypillisesti 150 mm [5], [11].



Kuva 4. Julkisivuun integroidun aurinkosähkö-lämpöjärjestelmän aktiivinen jäädyttäminen. Kuva muokattu luvalla lähteestä [6]. Tekijänoikeus 2024 International Communications in Heat and Mass Transfer.

Passiivinen ilmajäädytysjärjestelmä on kustannuksien vuoksi edullinen, mutta järjestelmän tehokkuutta rajoittaa alhaisempi lämmönsiirtonopeus kuin aktiivisessa ilmajäädytysjärjestelmässä. Lisäksi järjestelmän tehokkuutta rajoittaa helleaallot ja

heikko tuuli, milloin passiivinen ilmankierto estyy ja se pysähtyy paneelinrakenteessa. Ratkaisuksi on kehitetty hybridiratkaisut, kuten mekaanisen ilmankierron ja toisen jäähdytysratkaisun, kuten säteilyjäähdytyspinnoitteen, hyödyntäminen samassa järjestelmässä. [16]

Aktiivisissa ilmajäähdytysjärjestelmissä käytetään tuulettimia ja puhaltimia, jotka vaativat vähän ulkoista energiaa [5], [16]. Aktiivinen ilmajäähdytys voi viilentää aurinkopaneelien käyttölämpötiloja jopa 15 °C alhaisemmaksi ja parantaa sähkötehoa 7–12 %:a [16]. Aktiivista jäähdytysjärjestelmää hyödynnetään pääasiassa suurissa hankkeissa, kuten aurinkopuistoissa, koska se on kalliimpi järjestelmä kuin passiivinen ilmanjäähdytysjärjestelmä [5]. Aktiivinen jäähdytys on kuitenkin ekologisesti kestävämpi huollon ja käytön kannalta verrattuna vesijäähdytysjärjestelmään [16].

#### 4.1.3 Vesijäähdytysjärjestelmä

Aurinkopaneeleja pystytään jäähdyttämään käyttämällä nestettä, kuten vettä. Vesijäähdytysjärjestelmissä käytetään lämmönvaihtimia, kuten putkia ja kanavia (engl. heat exchangers), lämmön siirtämiseen aurinkokennoista kiertävään nesteeseen. Vesi on tehokkaampi haihuttamaan lämpöä kuin ilma ja vesijäähdytysjärjestelmä jäähdyttää aurinkopaneelien käyttölämpötilaa 15–20 % alhaisemmaksi. [16]

Vesijäähdytysjärjestelmiä voidaan yhdistää aurinkopaneelijärjestelmään kolmella eri tavalla. Järjestelmiä voidaan kiinnittää suoraan seinään, korvaamalla osa seinästä ja asentamalla seinään jättämällä ilmarako. Suora vesikiertojärjestelmä on kiinni seinässä ilman ilmarakoa, jolloin lämpö siirtyy tehokkaasti. Huolto ja asennus on myös helppoa. Jäähdytys- ja lämmityskuorma pienenee verrattuna perinteiseen integroituun aurinkopaneeli julkisivuun ilman jäähdytysjärjestelmää. Jäähdytysjärjestelmä voidaan myös integroida osaksi seinää, jolloin se korvaa osan seinästä eikä ole seinän pinnalla. Jäähdytysjärjestelmä voidaan asentaa seinään jättämällä myös ilmarako, jolloin ilmarako parantaa jäähdytystä. Ilmaraon avulla pystytään joustavasti säätämään rakennukseen kohdistuvaa lämpövaihtelua. [11]

Vesijäähdytysjärjestelmät ovat kalliimpia kuin ilmajäähdytysjärjestelmät, koska ne vaativat enemmän huoltoa ja resursseja. Lisäksi järjestelmä on monimutkaisempi ja

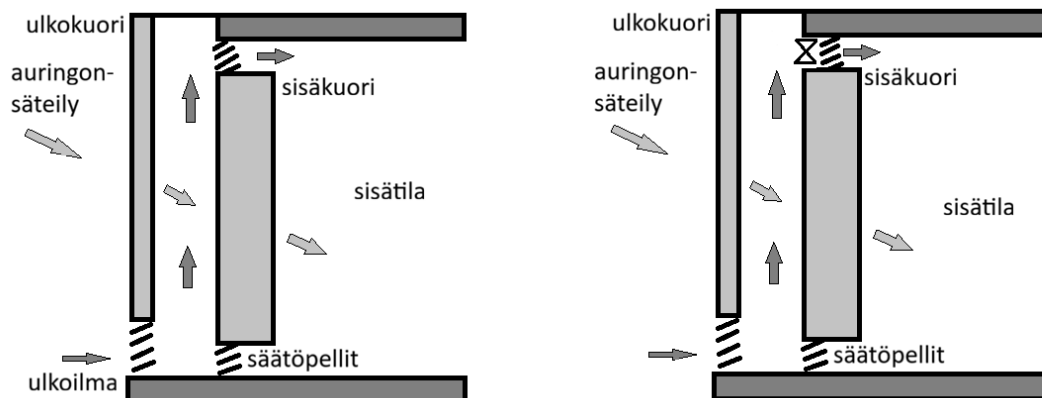
vaatii veden saatavuutta. Vesijäähdytysjärjestelmä vaatii myös lisäkustannuksia, riippuen ilmastosta. Kylmillä alueilla vesijäähdytysjärjestelmä voi jäätyä pakkasesta, jolloin tarvitaan jäänestoliuos. Vesijärjestelmän toimivuuteen liittyy myös riskejä, jos veden lämmönvaihtimet altistuvat liian suurille lämpötiloille, esimerkiksi helleaalloille. Lämpötilan noususta voi seurata komponenttien ylikuormitusta ja lämmönkierron pysähtymistä. Seurauksena paneelin käyttölämpötila nousee liian korkeaksi, jolloin jäähdytysjärjestelmän vesi voi vaurioittaa paneelin sisäisiä komponentteja. [16]

#### 4.1.4 Kaksoisjulkisivu jäähdytysjärjestelmä

Kaksoisjulkisivu (engl. double-skin facade) jäähdytysjärjestelmissä voidaan käyttää passiivista tai aktiivista jäähdytystä. Rakennukseen integroitavien aurinkopaneelien jäähdyttämiseen käytetään usein passiivisia menetelmiä, kuten aurinkopaneeliseinän rakenteessa pystysuoria säleitä. [16] Tyypillisesti aurinkopaneelin ja julkisivun välissä on ilmarako, jonka suuruus voi olla 0,15 m [6], [11]. Tutkimusten mukaan paneelin käyttölämpötilaa voi laskea 19 °C, kun ilmavirta on 400 kg/h verrattuna järjestelmään ilman jäähdytystä. Ilmavirran nopeus vaikuttaa aurinkopaneelin tuottamaan tehoon. [6]

Kaksoisjulkisivutuuletus on esitetty kuvassa 5, jossa vasemmalla puolella on esitetty luonnollinen tuuletus. Ulkoilma kulkeutuu ulkokuoressa olevasta aukosta ja vapautuu lopulta rakennuksen sisätiloihin. Kuvassa 5 oikealla on esitetty kaksoisjulkisivutuuletus, joka on tehostettu mekaanisella tuulettimella. Kaksoisjulkisivuratkaisua voidaan myös eri tavoin riippuen vuoden ajasta. Kesällä voidaan hyödyntää ilmanvaihtona, jolloin ilma kulkeutuu ilmanottoaukosta ilmarakoon. Ilmaraossa ilma lämpenee ja vapautuu ulos. Talvella ulkoilma kulkeutuu lämmiten ilmaraosta ilmanottoaukkoon ja vapautuu sisätiloihin seinän aukosta.

Tutkimuksessa yhdistettiin yksikiteinen piiaurinkopaneeli ilmanvaihtojärjestelmään, jolloin aurinkopaneelin kokonaishyötysuhde kasvoi 20 %:iin, joka oli 6 % enemmän kuin vertailukappaleessa. Tutkimusten mukaan ilmaraon suunnittelu, kuten koko ja virtausnopeus, vaikuttavat aurinkopaneelien tehokkuuteen. [11] Suurin haaste on ilmaraon sopiva suuruus, jotta varmistetaan riittävä jäähdytys. Jos ilmarako on liian leveä tai kapea, niin ilmavirtaus heikkenee. Oikeanlaisella suunnittelulla aurinkopaneelin käyttölämpötilaa voidaan jäähdyttää 10-20 °C. [6]



Kuva 5. Vasemmalla kaksoisjulkisivu luonnollisella tuuletuksella ja oikealla mekaanisella tuuletuksella. Kuvaan otettu mallia lähteestä [6].

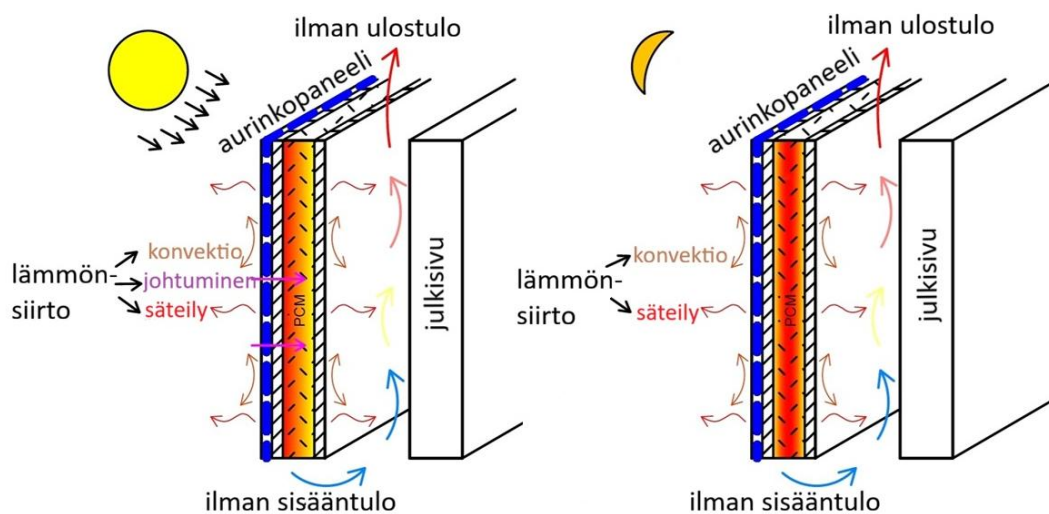
#### 4.1.5 Hybridijäähdytysratkaisut

Hybridijäähdytysratkaisut hyödyntävät passiivista ja aktiivista jäähdytysmenetelmää. Hybridijäähdytysratkaisuihin liittyy passiiviset faasimuutosmateriaalit (engl. PCM) ja säteilyjäähdytyspinnoitteet, mitä voidaan hyödyntää samanaikaisesti toisen jäähdytysjärjestelmän kanssa [16]. Hybridiratkaisuissa voidaan hyödyntää jäähdytysjärjestelmien etuja, jolloin voidaan alentaa merkittävästi enemmän aurinkopaneelien käyttölämpötiloja verrattuna vain käyttämällä passiivista järjestelmää. Lisäksi hybridiratkaisut säästävät enemmän energiaa kuin käyttämällä vain aktiivista jäähdytysjärjestelmää. [3]

Faasimuutosmateriaaleilla (engl. PCM) voidaan vaikuttaa passiivisesti aurinkopaneelijärjestelmän käyttölämpötilaan ja jäähdyttää niitä [3], [16]. PCM-materiaalien hyödyntäminen aurinkopaneeleissa on hybridiratkaisu, kun sitä hyödynnetään aktiivisen jäähdytysjärjestelmän kanssa. Faasimuutosmateriaalit ovat passiivinen menetelmä, kun niitä hyödynnetään ainoana tapana aurinkopaneelien jäähdyttämisessä. Niillä on ominaisuuksia, joilla pystytään varastoimaan suuria määriä lämpöä sekä vapauttamaan sitä. Faasimuutosmateriaaleja hyödynnetään aurinkopaneelien jäähdyttämisessä levittämällä materiaalikerros paneelin takasivulle, jossa se sulaa ja jähmettyy vuorokauden aikana lämpötilavaihteluiden mukaisesti. [17]

Faasimuutosmateriaalit säätelevät aurinkopaneelin lämpötilaa absorboimalla ylimääräisen lämmön, kun aurinkopaneeli lämpenee yli optimaalisen käyttölämpötilan huipputuntien aikana [16]. Materiaali vapauttaa ylimääräisen lämmön lopulta, kun

paneelin lämpötila laskee yöllä [16], [17] Faasimuutosmateriaalit siis pienentävät aurinkopaneelin lämpötilaerojen vaihteluväliä [11]. Kuvassa 6 on esitetty hybridiratkaisu rakennuksen julkisivussa, johon on yhdistetty passiivinen ilmajäähdytys sekä aurinkopaneelin takasivulle faasimuutosmateriaali. Kuvan vasemmalla on havainnollistettu lämmönsiirtoprosessia, jossa tapahtuu konvektion ja säteilyn lisäksi johtumista. Kuvan oikealla on tapahtuva lämmönsiirto, kun on yöaika. Tällöin tapahtuu vain konvektiota ja säteilyä, mutta ei johtumista. [17]



Kuva 6. Hybridiratkaisu, jossa on yhdistetty faasimuutosmateriaali ja passiivinen ilmajäähdytys. Vasemmalla hybridiratkaisu päivällä ja oikealla yöaikaan. Kuva muokattu luvalla lähteestä [17]. Tekijänoikeus 2020 Renewable Energy.

Faasimuutosmateriaalien käyttäminen laskee aurinkopaneelin käyttölämpötilaa ja energiantuotanto vakautuu sekä käyttöikä pitenee. Materiaaleja on epäorgaanisia, orgaanisia ja nanotehostettuja, joilla on erilaisia lämpöominaisuuksia, kuten lämmönjohtavuus ja -stabiilisuus. PCM-materiaalit vähentävät lämmönkertymistä, mikä on yleisimpiin jäähdytystekniikoihin verrattuna enemmän. [16]

Faasimuutosmateriaalit tarjoavat mahdollisuuden jäähdyttää piiaurinkopaneeleja jopa 20 °C, jolloin sähköntuotanto nousee 5 %. Kuitenkin materiaalivalinnoilla ja ilmasto-olosuhteilla on vaikutusta, kuinka paljon faasimuutosmateriaalit voivat jäähdyttää aurinkopaneeleja huipputuntien aikana [17]. Faasimuutosmateriaaleilla on kuitenkin suhteellisen alhainen lämmönjohtavuus, joka vaikuttaa rajoittavasti lämmönsiirtonopeuteen. Lämmönsiirtonopeus vaikuttaa PCM-materiaalien

tehokkuuteen lämmön säätelyssä [3]. PCM-materiaalien hyödyntäminen aurinkopaneelin jäähdytysmenetelmänä on myös kalliimpi ja monimutkaisempi järjestelmä. Lisäksi menetelmän kustannustehokkuus ja suorituskyky vaatisi tarkempaa tarkastelua ja tutkimuksia. [11], [16]

Faasimuutosmateriaalien suuri haaste on noin 25 °C faasimuutoslämpötilan ylläpitäminen, koska aurinkopaneelin käyttölämpötilan noustessa paneelin hyötysuhde laskee. Kuumassa ilmastossa on haasteellista ylläpitää sopivaa käyttölämpötilaa pitkiä aikoja, kun huipputuntien aikana auringonsäteilyn intensiteetti voi olla hyvin korkea. Ratkaisuksi on yritetty kasvattaa PCM-kerrosta aurinkopaneelilla, mutta haasteena on materiaalin epätäydellinen sulaminen aurinkopaneelin pinnalla.

Faasimuutosmateriaalien suurimmat hyödyt kuitenkin ovat mahdollisuudet käyttää niitä hybridiratkaisuna ja materiaalien vapauttavan lämpöenergian hyödyntäminen yöaikaan. [17]

Säteilyjäähdytys-pinnoite on passiivinen jäähdytysmenetelmä, jossa pinnoitteeseen varastoitunut lämpö säteilee infrapunasäteilynä avaruuteen Maan ilmakehän läpi. Jäähdytysmenetelmää on kehitetty käyttämällä pinnoitemateriaalina muun muassa metallioksideja, nanorakenteisia materiaaleja sekä spektriselektiivisiä- ja hybridipinnoitteita. Säteilyjäähdytys voidaan lisätä pinnoitteena aurinkopaneeliin, jolloin pinnoite voi jäähdyttää paneelin pintalämpötilaa 5–10 °C riippuen ympäristöolosuhteista ja paneelin ominaisuuksista. Erityisesti spektriselektiiviset pinnoitteet ovat edistyneitä, sillä ne pystyvät säteilemään infrapunasäteilyä Maasta avaruuteen samalla minimoiden aurinkopaneelin auringon lämmön absorptiota heijastamalla auringonvalosta suurimman osan. Lisäksi integroiduissa aurinkopaneeleissa säteilyjäähdytys-pinnoite rajoittaa lämmönsiirtoa rakennuksiin, joka voi olla eduksi kuumissa ilmastoissa. [16]

Keskeinen asia aurinkopaneelijärjestelmässä on, millä tavalla jäähdyttämällä aurinkopaneelia saadaan lisättyä hyötysuhdetta ja tehokkuutta. Rakennuksiin integroiduissa aurinkopaneeleissa on yleistä käyttää jäähdytysjärjestelmää. Jäähdytysjärjestelmien kustannukset ovat alhaiset, kun verrataan helppoon asennukseen ja huoltoon. Jos ylimääräistä lämpöä ei käytetä hyväksi, niin

kokonaishyötysuhde ei ole yhtä korkea kuin niissä järjestelmissä, joissa lämpö otetaan sähkötuotannon aikana talteen. Jäähdytettävän rakennukseen integroidun aurinkopaneelin käyttölämpötila on alhaisempi ja tehokkuus korkeampi kuin aurinkopaneelin, jossa ei ole jäähdytysjärjestelmää. Kuitenkin ilmaraon oikeanlaisella suunnittelulla on merkittävä vaikutus jäähdytysjärjestelmän toimivuuteen. Yleisimmässä käytössä olevat passiivisesti jäähdyttävät ratkaisut tarjoavat yleensä riittävän suorituskyvyn riippuen ilmastosta, kun huomioidaan myös kustannukset. [11]

#### **4.2 Tulevaisuuden näkökulma**

Aurinkopaneelisiin liittyviä tutkimusartikkeleita ja konferenssijulkaisuja julkaistaan yhä enemmän. Tutkimuksia on tehty 17 kertaisesti enemmän rakennuksiin integroiduista aurinkopaneelista vuosina 2015–2022 kuin verrattuna vuosiin 1995–2000. Kiinnostus aurinkoenergiaa kohtaan on kasvanut, joka on vaikuttanut tutkimuksien määrään. 29,4 % tutkimuksista on tehty laskennallisesti, jotka nykyään toteutetaan erilaisilla ohjelmistoilla. Järjestelmiä mallinnetaan simulointiohjelmistoilla, joilla pystytään ratkaisemaan ja tutkimaan keskeisiä ongelmia. Ongelmat voivat liittyä esimerkiksi mekaanisten ja sähköisten järjestelmien vaikutuksiin, joiden ratkaisemiseen tietokonemallinnus on edullinen ratkaisu. [6]

Rakennuksiin integroitavista aurinkopaneelista tehdyistä tutkimuksista 12,6 % keskittyvät parantamaan aurinkopaneelien lämpötilaa. Yli puolet tehdyistä tutkimuksista keskittyvät parantamaan energiatehokkuutta [6]. Suurempi määrä energiatehokkuuteen keskittyvien tutkimuksien määrää voi selittää kiinnostus, kuinka paljon sähkötuotantoa voidaan saada tuotettua aurinkopaneelilla. Lisäksi yhteiskunnassa pyritään estämään ilmastonmuutoksen etenemistä siirtymällä uusiutuviin energialähteisiin, kuten aurinkovoimaan. Aurinkopaneelien sähköntuottoa yleisesti mitataan ja arvioidaan energiatehokkuuden avulla, joten aihetta edistäviin tutkimuksiin on kiinnostusta ja kysyntää enemmän kuin aurinkopaneelien lämpötilaan liittyviin tutkimuksiin.

Myös aurinkopaneelijärjestelmien taloudelliseen suorituskykyyn keskittyviä tutkimuksia ei ole laajasti tarjolla, vaan niitä on toteutettu rajallisesti verrattuna muihin tutkittaviin parannuksiin [11]. Järjestelmien taloudellisia vaikutuksia on siis haastavampaa

arvioida. Kuitenkin tiedetään tutkimuksien mukaan, että taloudellisesti kalliimpaa on hyödyntää jäähdytettävää ja integroitavaa aurinkopaneelijärjestelmää kuin perinteisempää aurinkopaneelijärjestelmää, jonka asentamiseen käytetään telineitä. [5]

Tulevaisuudessa yksi parhaista tavoista tuottaa energiaa on hyödyntämällä aurinkoenergiaa, kun järjestelmä on suunniteltu huomioiden käyttötarkoitus ja ilmasto. Aurinkopaneelien järjestelmät ovat erilaisia, sillä ne siirtävät lämpöä eri tavoin ja niiden tehokkuus jäähdyttää kuumenevaa aurinkopaneelia ovat erilaiset. Ilmajäähdytys on edullisin ja yksinkertainen, koska se ei ole yhtä monimutkainen ja vaadi ylläpitoa kuin esimerkiksi vesijäähdytys [11]. Esimerkiksi asuinrakennuskäyttötarkoituksessa ilmajäähdytys voi olla soveltuvin edullisen hinnan puolesta. Muihin rakennuskohteisiin myös faasimuutosmateriaalit ja ilmajäähdytys ovat soveltuvia, koska ne ovat passiivisia ja vaivattomia ylläpitää. Energiatehokkaimmat ovat passiivisen ilmajäähdytyksen, faasimuutosmateriaalien ja säteilypinnoitteen hyödyntäminen, koska ne ovat passiivisia ja eivät kuluta juurikaan energiaa.

Ääriolosuhteisiin olosuhteisiin vesijäähdytys on soveltuvin jäähdytysjärjestelmä, sillä se ei ole yhtä altis kuumen lämpötilan vaikutukselle kuin passiivinen ilmajäähdytys tai faasimuutosmateriaalit. Lisäksi tulevaisuudessa vesijäähdytysjärjestelmät voivat yleistyä tulevaisuudessa, sillä ne osoittavat lupaavia tuloksia ja etuja kuumissa ääriolosuhteissa [11]. Aktiivinen ilmajäähdytys soveltuu kalliin hinnan ja tehokkuuden puolesta suuriin hankkeisiin, kuten aurinkopuistoihin [5].

Tulevaisuudessa on myös mahdollista, ettei vain yksi jäähdytysjärjestelmäratkaisu riitä optimoimaan aurinkopaneelien käyttölämpötilaa ilmaston ääriolosuhteiden yleistymisen vuoksi. Hyödyntämällä vain esimerkiksi passiivista ilmajäähdytysjärjestelmää, ilmankierto voi estyä helleaallon aikana. Tulevaisuudessa voi kehittyä tarve lisätä hybridiratkaisuja, jossa yhdistetään aktiivisia ja passiivisia jäähdytysjärjestelmiä. Tällöin voidaan varmistua, että aurinkopaneelin käyttölämpötila pysyy optimilämpötilassa ja tehokkuus vakaana. [16]

Yksi mielenkiintoinen tulevaisuuden mahdollisuus on tekoälyn hyödyntäminen, sillä tekoäly kehitty yhä. Esimerkiksi tekoälyä voidaan hyödyntää määrittämään sopiva

kallistuskulma aurinkopaneelille, että aurinko paistaisi mahdollisimman paljon ja pitkään suoraan aurinkopaneeliin. Lisäksi tutkimukset ovat lisääntyneet huomattavasti verrattuna vuosituhaten vaihteeseen, joten uusia ratkaisuja kehitetään jatkuvasti aurinkopaneelien tehokkuuden ja käyttölämpötilan parantamiseksi. [6]

## 5 Johtopäätökset

Aurinkoenergia on yksi tulevaisuuden merkittävimmistä tavoista tuottaa uusiutuvaa energiaa [1]. Aurinkopaneelisiin liittyviä tutkimuksia on julkaistu yhä enemmän vuosituhatien vaihteesta alkaen, mihin liittyy kasvanut kiinnostus uusiutuvien energialähteiden käytöstä [6]. Aurinkopaneelien voidaan hyödyntää integroimalla niitä rakennuksiin. Niitä voidaan integroida rakennuksien eri osiin, kuten kattoihin ja julkisivuihin. Julkisivuihin asennettavat aurinkopaneelit ovat kuitenkin vain 20 % integroitavien aurinkopaneelien markkinoista [5]. Julkisivuihin integroitavien aurinkopaneelien etu on, että ne eivät estä auringonvalon pääsyä sisätiloihin asuinrakennuksissa ja korkeissa taloissa hyödynnettävissä oleva seinien pinta-ala on suurempi kuin katolle integroitaessa [10].

Rakennuksien julkisivuihin integroitavien aurinkopaneelien lämpökäyttämismisessä on kuitenkin haasteita. Aurinkopaneelien käyttölämpötila nousee, kun integroidaan aurinkopaneeli julkisivun ulkokuoreen. Lämpötila nousee, koska ulkoilma ei pääse jäähtymään julkisivussa kiinni olevaa aurinkopaneelin takapintaa. Tällöin lämpö ei poistu paneelista yhtä tehokkaasti kuin ilmaraolisesta tai telineessä olevasta aurinkopaneelistä [4]. Käyttölämpötilan nousun seurauksena paneelin hyötysuhde ja tehokkuus laskevat huomattavasti verrattuna STC-olosuhteisiin. Kun käyttölämpötila nousee yli optimaalisen, niin hyötysuhde laskee 0,3–0,5 % jokaista optimaalisen käyttölämpötilan ylittävää celsiusastetta kohden. Rakennuksiin integroitavia aurinkopaneelien kannattaa siis jäähtyä, jotta tehokkuus ja hyötysuhde kasvavat [5], [16].

Jäähdytysjärjestelmään vaikuttaa käyttötarkoitus ja ilmasto, koska ne siirtävät lämpöä eri tavoin ja vaikutus tehokkuuteen eroavat. Rakennuksiin integroiduissa aurinkopaneelien on yleistä käyttää passiivista ilmajäähdytysjärjestelmää, koska suhteelliset kustannukset ovat alhaiset, kun verrataan helppoon asennukseen ja huoltoon. Lisäksi vesijäähdytysjärjestelmät voivat yleistyä tulevaisuudessa, sillä ne osoittavat lupaavia tuloksia ja etuja. Kuitenkin vesijäähdytysjärjestelmä vaatii lisätutkimuksia, sillä niitä on huomattavasti vähemmän tutkittu kuin ilmalla jäähdytettäviä järjestelmiä [11].

Myös faasimuutosmateriaalit voivat olla lupaava tapa jäähdyttää aurinkopaneeleja yhdistettynä toiseen jäähdytysjärjestelmään. Tulevaisuudessa on mahdollista, että täytyy käyttää hybridijäähdytysjärjestelmiä. Vain yksi jäähdytysjärjestelmäratkaisu ei riitä optimoimaan aurinkopaneelien käyttölämpötilaa ilmaston ääriolosuhteiden yleistymisen seurauksena. Ilmankierto voi estyä helleaallon vuoksi, jos käytetään vain passiivista jäähdytysjärjestelmää. Hybridiratkaisuissa yhdistetään aktiivisia ja passiivisia jäähdytysjärjestelmiä, että aurinkopaneelin käyttölämpötila pysyy optimaalisena ja tehokkuus vakaampana [16].

## Lähteet

- [1] J. Peng *ym.*, ”Solar energy integration in buildings”, *Applied Energy*, vol. 264, s. 1–3, huhti 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114740.
- [2] T. E. Kuhn, C. Erban, M. Heinrich, J. Eisenlohr, F. Ensslen, ja D. H. Neuhaus, ”Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV)”, *Energy and Buildings*, vol. 231, s. 2–12, tammi 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110381.
- [3] D. H. El-Nagar, M. Emam, A. A. El-Betar, ja S. A. Nada, ”Combining active and passive cooling techniques for maximizing power generation and thermal utilization of photovoltaic panels”, *Renewable Energy*, vol. 250, s. 1–2, syys 2025, doi: 10.1016/j.renene.2025.123310.
- [4] Z. Peng, M. R. Herfatmanesh, ja Y. Liu, ”Cooled solar PV panels for output energy efficiency optimisation”, *Energy Conversion and Management*, vol. 150, s. 1, loka 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.07.007.
- [5] M. R. Cibi ja S. Manikandan, ”Concise overview of BIPV systems and its future scope”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1130, nro 1, s. 1-4,10, huhti 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1130/1/012033.
- [6] L. Chen *ym.*, ”A comprehensive review of a building-integrated photovoltaic system (BIPV)”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 159, s. 1, 3–6, 9, 13, 34, 43–45, joulu 2024, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108056.
- [7] W. D. Callister ja D. G. Rethwisch, ”Materials Science and Engineering”, nro 10, s. 746–748, 2018.
- [8] R. Vinayagamoorthi *ym.*, ”Recycling of end of life photovoltaic solar panels and recovery of valuable components: A comprehensive review and experimental validation”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 12, nro 1, s. 1-4,7-8,10, helmi 2024, doi: 10.1016/j.jece.2023.111715.
- [9] H. Jhumka *ym.*, ”Assessing heat transfer characteristics of building envelope deployed BIPV and resultant building energy consumption in a tropical climate”, *Energy and Buildings*, vol. 298, s. 1,3-4, marras 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113540.

- [10] S. Hamidi ja O. S. Asfour, "Design Strategies for Building-Integrated Photovoltaics in High-Rise Buildings: A Systematic Review", *Architecture*, vol. 5, nro 4, s. 1-3,10,14-15,21, marras 2025, doi: 10.3390/architecture5040118.
- [11] G. Yu, H. Yang, Z. Yan, ja M. Kyeredey Ansah, "A review of designs and performance of façade-based building integrated photovoltaic-thermal (BIPVT) systems", *Applied Thermal Engineering*, vol. 182, s. 1-2,7-9,12,15-16, tammi 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116081.
- [12] N. Martín-Chivelet *ym.*, "Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) products and systems: A review of energy-related behavior", *Energy and Buildings*, vol. 262, s. 1-7,11-13, touko 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.111998.
- [13] V. Poulek, T. Matuška, M. Libra, E. Kachalouski, ja J. Sedláček, "Influence of increased temperature on energy production of roof integrated PV panels", *Energy and Buildings*, vol. 166, s. 419,423, touko 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.01.063.
- [14] J. Kratochvil, W. Boyson, ja D. King, "Photovoltaic array performance model.", SAND2004-3535, s. 17-18, 20, elo 2004. doi: 10.2172/919131.
- [15] R. Badran ja Y. Ismail, "Methodology to validate measured performance and warranty conditions of PV modules", *Solar Energy*, vol. 295, s. 1, heinä 2025, doi: 10.1016/j.solener.2025.113552.
- [16] T. Dimitriou *ym.*, "Cooling the city, powering the future: A critical assessment of nature-based and technological cooling strategies for urban BIPV systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 227, s. 3-4,6,8-16, helmi 2026, doi: 10.1016/j.rser.2025.116573.
- [17] J. Čurpek ja M. Čekon, "Climate response of a BiPV façade system enhanced with latent PCM-based thermal energy storage", *Renewable Energy*, vol. 152, s. 368–370, kesä 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.070.
- [18] T. Villemin, R. Claverie, J.-P. Sawicki, ja G. Parent, "Thermal characterization of a photovoltaic panel under controlled conditions", *Renewable Energy*, vol. 198, s. 29, loka 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.08.036.
- [19] C. Monokroussos *ym.*, "Energy performance of commercial c-Si PV modules in accordance with IEC 61853-1, -2 and impact on the annual specific yield", *EPJ Photovolt.*, vol. 14, s. 5, 2023, doi: 10.1051/epjpv/2022032.

- [20] L. D. Murillo-Soto ja C. Meza-Benavides, "Validation of an outdoor efficiency model for photovoltaic modules", *Rev.Fac.Ing.Univ.Antioquia*, s. 2, syys 2022, doi: 10.17533/udea.redin.20220991.