

## **Aurinkopaneelien varjostuksen vaikutus rakennuksen jäähdytyksentarpeeseen**

Juho-Petteri Mäkelä

Opinnäytetyö

Elokuu 2020

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Mäkelä Juho-Petteri	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Elokuu 2020
	Sivumäärä 41	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Aurinkopaneelien varjostuksen vaikutus rakennuksen jäähdytysentarpeeseen</b>		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Nuutinen Marjukka, Flyktman Teppo		
Toimeksiantaja(t) Solarigo Systems Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Jäähdytysenergian kulutus Suomessa on kasvussa. Aurinkosuojauksella on todettu olevan suuri vaikutus jäähdytysenergiankulutuksen vähentämisessä. Yhdysvalloissa on todettu aurinkopaneelien kattopintaan aiheuttamalla varjostuksella olevan vaikutusta jäähdytysenergian kulutukseen. Toimeksiantaja halusi selvittää, että onko ilmiöllä samanlainen vaikutus Suomen olosuhteissa ja suomalaisen rakentamistavan mukaisissa rakennuksissa.</p> <p>Tutkimustavaksi valittiin kvantitatiivinen tutkimus. Ilmiötä tutkittiin vertailemalla rakennuksien energiankulutusta ennen ja jälkeen aurinkopaneeliasennuksen, sekä suorittamalla lämpötilamittauksia katolle rakennetun aurinkosähkövoimalan alueella. Mittaukset toteutettiin lämpötilatallentimia ja lämpökameraa käyttämällä. Tärkeimpänä mitattavana asiana oli lämpötilaero paneelikentän alla ja paneelikentän vieressä. Mittauksista saatuja lämpötilatietoja hyödynnettiin laskuissa, joilla laskettiin teoreettiset säästöt katon lämpökuormassa.</p> <p>Tutkimuksen tuloksina saatiin mitattua tietoa aurinkovoimalan alueella vallitsevista katon lämpötiloista, sekä lasketut teoreettiset säästömahdollisuudet jäähdytysenergiassa. Laskujen ja mittausten perusteella aurinkopaneelien varjostuksen vaikutuksella on pieni vähentävä vaikutus katon lämpökuormaan. Ilmiöllä ei Suomen olosuhteissa kuitenkaan ole merkittävää vaikutusta jäähdytysenergiensäästöissä.</p> <p>Tutkimus on kuitenkin mahdollista suorittaa eri tavoilla, joilla voidaan saada erilaisia tuloksia. Luotettavan tuloksen saamiseksi on suoritettava jatkotutkimuksia, esimerkiksi mittaamalla toteutunutta jäähdytysenergiankulutusta usealta vuodelta ennen ja jälkeen aurinkopaneeliasennuksen.</p>		
Avainsanat ( <a href="#">asiasanat</a> ) Aurinkopaneelit, Jäähdytysenergia,		
Muut tiedot		

Author(s) Mäkelä Juho-Petteri	Type of publication Bachelor's thesis	Date August 2020
	Number of pages 41	Language of publication: Finnish
		Permission for web publication: x
Title of publication <b>Effects to buildings cooling energy consumption from shading caused by solar panels</b>		
Degree programme Degree Programme in Energy and Environmental Technology		
Supervisor(s) Nuutinen Marjukka, Flyktman Teppo		
Assigned by Solarigo Systems Oy		
<p>Abstract</p> <p>Consumption of cooling energy in Finland is increasing. Use of shading can reduce cooling energy consumption greatly. Shading caused by solar panels has been found to reduce cooling energy consumption in United States conditions. Employer wanted to find out if solar panels shading has effect to cooling energy consumption in Finlands climate and Finnish building style.</p> <p>Method of the research was quantitative. Phenomenon was researched by comparing buildings energy consumption before and after solar panel installation. Another used research method was to measure rooftop temperatures in solar plant area. Temperatures were measured by using temperature loggers and thermal camera. Three different measures were made during spring and summer. Two measures by loggers and once by thermal camera. Most important thing to measure was temperature difference between under the solar panel field and next to panel field. Results of the temperature measures were used to calculate theoretical savings in roof heat load.</p> <p>Main results of the research were data from measured temperatures and results of the calculations. Results of the temperature measurements and calculations point out that shading caused by solar panels has a little effect on roofs heat load. Although phenomenon does not have a significant effect to cooling energy saving in Finlands climate and building style.</p> <p>Research is still possible to do differently with different results. More study is needed to get reliable results, for example, by measuring real cooling energy consumption many years before and after solar panel installation or comparing two different buildings, one with solar panels installed and other without solar panels.</p>		
Keywords ( <a href="#">subjects</a> ) Solar panels, Cooling energy		
Miscellaneous		

## Sisältö

<b>1 Johdanto</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Tutkimusasetelma</b> .....	<b>4</b>
<b>3 Aurinkoenergia</b> .....	<b>5</b>
3.1 Aurinkoenergian käyttö maailmalla .....	5
3.2 Aurinkoenergian käyttö Suomessa .....	6
3.2.1 Energiatuki.....	8
3.3 Auringon säteily.....	8
3.4 Aurinkosähkövoimala .....	10
<b>4 Lämmönsiirtyminen</b> .....	<b>12</b>
4.1 Johtuminen.....	13
4.2 Konvektio.....	15
4.3 Säteily .....	16
<b>5 Kiinteistön jäähdytys</b> .....	<b>20</b>
5.1 Sisäilmasto.....	20
5.2 Lämpötase .....	21
5.3 Jäähdytysjärjestelmät.....	22
5.3.1 Suora jäähdytys .....	22
5.3.2 Välillinen jäähdytys .....	23
5.3.3 Paikallinen jäähdytys.....	24
5.3.4 Keskitetty jäähdytys .....	24
5.4. Vapaajäähdytys .....	24
<b>6 Aurinkosuojaus</b> .....	<b>24</b>
<b>7 Kulutustietojen vertailu</b> .....	<b>25</b>
7.1 Energiankulutustiedot .....	25
7.2 Ilmatieteenlaitoksen aineistot .....	28
<b>8 Lämpötilat</b> .....	<b>28</b>
8.1 Lämpötilamittaukset .....	28
8.2 Lämpökamerakuvaukset .....	31
<b>9 Laskut</b> .....	<b>32</b>
<b>10 Tulokset</b> .....	<b>35</b>
<b>11 Pohdinta</b> .....	<b>36</b>
<b>Lähteet</b> .....	<b>38</b>
<b>Liitteet</b> .....	<b>41</b>
Liite 1 Laskujen tuloksia .....	41

## Kuviot

Kuvio 1 Aurinkosähkökapasiteetin kasvu kansainvälisesti (Masson & Kaizuka 2019)...	6
Kuvio 2 Aurinkosähkökapasiteetin kasvu Suomessa (Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti lisääntyi 82 % vuodessa 2019) .....	7
Kuvio 3 Auringon säteily Euroopassa (Country and regional maps, 2017) .....	9
Kuvio 4 Aurinkopaneeleja 20 asteen kulmaan asennettuna PVC-katolla .....	11
Kuvio 5 Soltop Duraclick Eco mounting system (Duraclick Eco Mounting System Assembly-Instructions N.d.) .....	12
Kuvio 6 Suora jäähdytys (Mattila 2015, 8) .....	22
Kuvio 7 Välillinen jäähdytys (Mattila 2015, 8).....	23
Kuvio 8 Sähköenergiankulutus .....	27
Kuvio 9 Vertailukohteen sähköenergiankulutus .....	27
Kuvio 10 Lämpötilamittaukset .....	29
Kuvio 11 Lämpötilamittaukset 24.4.-8.5 .....	30
Kuvio 12 Lämpötilamittaukset 28.7.–30.7. ....	31
Kuvio 13 Lämpökamerakuvaukset .....	32

## Taulukot

Taulukko 1 Aineiden lämmönjohtavuuksia .....	15
Taulukko 2 Aineiden emissiivisyyskertoimia .....	18
Taulukko 3 Kohde 3 lähtötiedot .....	33

# 1 Johdanto

Suomen jäähdytysenergiantarpeen on vuonna 2015 arvioitu olevan 850-2100 GWh. Arvioiden suuri vaihteluväli johtuu aurinkosuojausten osuuden arvioinnista jäähdytystarpeen vähentäjänä. Arvioiden alarajalla huomioon on otettu aurinkosuojaus osana suurinta osaa rakennuksista ja ylärajalla vain pienten asuinrakennusten käytössä. Talouskasvun ja aluekehityksen normaalisti jatkuessa viime vuosien tapaan, on jäähdytysenergiantarpeen arvioitu kasvavan keskiarvosta 1400 GWh 1700 GWh:een vuoteen 2030 mennessä. Arvioitu jäähdytystarpeen kasvu johtuisi rakennusmäärän kasvusta. (Airaksinen, Vainio, Vesanen & Ala-Kotila 2015, 45)

Aurinkopaneelien varjostuksen vaikutusta rakennuksen jäähdytysenergiatarpeeseen on tutkittu aiemmin Yhdysvaltain eteläosassa Kaliforniassa San Diegon yliopistossa. Dominguezin, Kleisslin ja Luvallin (2011) tutkimuksessa on havaittu aurinkoisena päivänä katon lämpötilan olevan aurinkopaneelien alla 2,5 Kelviniä viileämpi, kuin aurinkopaneelien alla. Tämä on heidän mukaansa johtanut jopa 38 %:n vähenemään vuotuisessa jäähdytysenergiatarpeessa.

Kaliforniassa ilmasto on hyvinkin erilainen kuin Suomessa, varsinkin lämpötilojen suhteen, joten aiheesta on syytä tutkia myös Suomen olosuhteissa. Suomessa rakennuksissa käytetään myös paksumpia eristeitä, mikä mahdollisesti aiheuttaa oman vaikutuksensa ilmiöön. Aurinkopaneelien varjostuksen vaikutusta rakennuksen jäähdytysenergiatarpeeseen ei ole Suomessa vielä tutkittu, joten tutkimus tuottaa alalle uutta tietoa.

Työn toimeksiantajana toimi Solarigo Systems Oy. Yritys on suomalainen aurinkosähkötoimittaja, jonka toiminnan pääalueena ovat teollisuuskokoluokan aurinkosähkövoimaloiden rakentaminen palvelukonseptilla. Solarigo omistaa rakennettavat voimalat itse ja myy niiden tuottaman sähkön kiinteistölle, jonka katolla voimala sijaitsee. Solarigo Systemsin pääomistaja on vuodesta 2019 lähtien ollut Lumme Energia Oy.

Aihetta haluttiin tutkia, koska suuri osa Solarigon asiakkaista jäähdyttää kiinteistöään koneellisesti. Tutkimus antaa täysin uuden näkökulman aurinkopaneelien vaikutuk-

sesta kiinteistön energiatehokkuuteen. Tätä tietoa Solarigo voi käyttää uusien aurinkosähkövoimalaprojektien suunnittelussa, myynnissä ja toteutuksessa. Opinnäytetyön tekijän motivaatio tutkimuksen tekemiseen oli uuden tutkimustiedon tuottaminen sekä oman osaamisen syventäminen jäähdytyksen energiatehokkuuden ja aurinkosähkön parissa.

## 2 Tutkimusasetelma

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää aurinkopaneelien varjostuksen vaikutusta kiinteistön jäähdytyksentarpeeseen Suomen olosuhteissa. Työn lähtökohtana oli ajatus siitä, että katolle asennetut aurinkopaneelit kattavat merkittävän osan kattopinta-alasta, jolloin ne varjostavat kattopintaa ja estävät auringonsäteilyn pääsyn katon pinnalle. Ilmiöstä johtuen kattoon kohdistuva lämpövaikutus olisi pienempi ja täten myös rakennuksen jäähdytyksen tarve vähenisi. Jäähdytysenergiankulutuksen vähentyessä voitaisiin saavuttaa taloudellisia säästöjä. Tästä ajatuksesta muodostuivat seuraavat tutkimuskysymykset:

- Onko aurinkopaneelien aiheuttamalla varjostuksella vaikutusta jäähdytyksentarpeeseen?
- Onko vaikutus niin suuri, että siitä on todellista hyötyä jäähdytysenergian säästössä?

Opinnäytetyön tutkimusmenetelmäksi valittiin näiden kysymysten perusteella kvantitatiivinen eli määrällinen tutkimus. Kvantitatiivisen tutkimuksen toteutus edellyttää, että ilmiöt tutkimuksen taustalla tunnetaan ja siitä on tehty teorioita. Määrällisen tutkimuksen suunta on teoriasta käytäntöä kohti eli teoriaa sovelletaan käytäntöön. Kvalitatiivisessa eli laadullisessa tutkimuksessa suunta on toisinpäin. Kvantitatiivisessa tutkimuksessa tutkimuskysymykset on johdettu ilmiöistä tutkimuksen taustalla, joten ne ovat tiedossa. Tutkimusmenetelmä valittiin työn luonteen vuoksi, koska tutkittavaa ilmiötä on käytännöllisin tutkia numeroarvoin ja laskutoimituksin. (Kananen 2010, 74–76)

Tarkoituksena oli tutkia jäähdytysenergiankulutustietoja, kuten kylmäkompressoreiden käyntiaikatietoja, kuudesta eri kiinteistöstä, joiden katolle on asennettu aurinkopaneelit. Energiankulutustietoja verrattiin toisiinsa ennen ja jälkeen aurinkopaneeli-asennuksen. Kulutustietoja vertailtaessa oli otettava huomioon erilämpöisten vuosien vaikutus kulutukseen. Tähän käytettiin ilmatieteenlaitokselta saatavia säätietoja. Säätietojen lisäksi vertailuun oli tarkoitus ottaa mukaan kaksi kiinteistöä, joihin ei ole asennettu paneeleja. Näitä kiinteistöjä käytettiin apuna erilämpöisten vuosien vaikutusten tulkinnassa. Mahdolliset rahalliset säästöt energiankulutuksessa laskettiin käyttämällä työn tekohetken keskimääräistä sähkönhintaa.

Kulutustietojen vertailun lisäksi suoritettiin lämpötilamittauksia katoilla. Tarkoituksena oli mitata katon lämpötilaa aurinkopaneelin alla varjossa ja paljaalla katon kohdalla auringonpaisteessa. Näitä mittaustietoja käytettiin lähtötietoina laskelmille. Laskelmat suoritettiin laskemalla lämmönjohtuminen kattorakenteiden läpi ja siitä aiheutuva lämpökuorma. Lähtötiedoiksi tarvittiin kattorakenteiden U-arvot eli lämmönläpäisykertoimet ja katolta mitatut lämpötilat.

Opinnäytetyön suunnitteluvaiheessa pääpainotuksena oli energiankulutustietojen vertailu lämpötilamittausten ja laskelmien toimiessa tukena vertailulle. Työn aikana painotusta jouduttiin kuitenkin muuttamaan enemmän lämpötilamittausten ja laskelmien suuntaan, sillä käyttökelpoisten jäähdytysenergiankulutustietojen saaminen osoittautui oletettua vaikeammaksi.

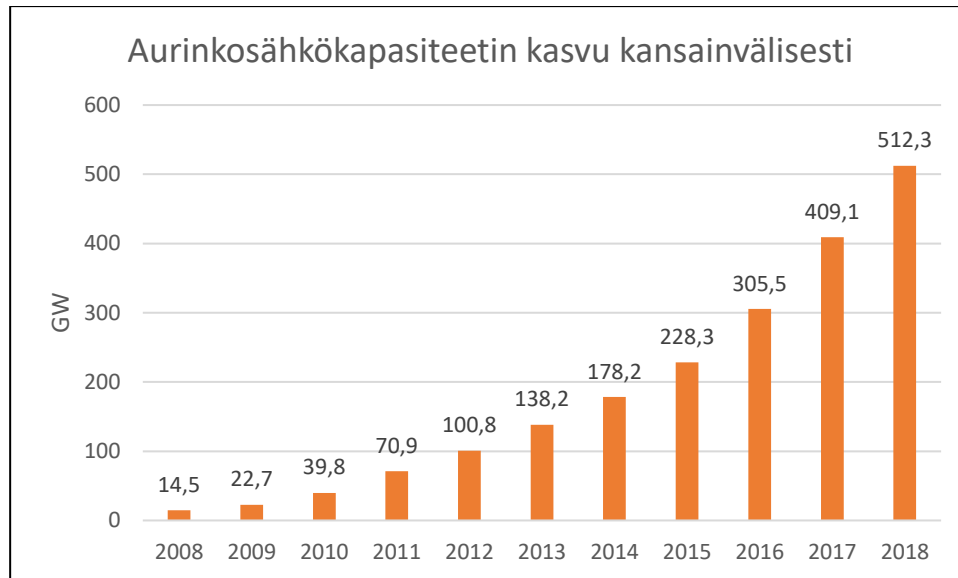
## 3 Aurinkoenergia

### 3.1 Aurinkoenergian käyttö maailmalla

Vuoden 2015 Pariisin ilmastosopimuksen tavoitteena on pysäyttää maapallon keskilämpötilan nousu kahteen, tai jos mahdollista, jopa puoleentoista celsius-asteeseen. Ratkaisu tämän tavoitteen saavuttamiseksi on saastuttavien energianlähteiden nopea korvaaminen uusiutuvilla energianlähteillä, kuten aurinkoenergialla. (Masson & Kaizuka 2019)



Vuoden 2018 lopussa maailman aurinkosähkökapasiteetti oli 512,3 GW. Vuoteen 2017 verrattuna kasvua oli n. 103 GW. Kuviossa 1 on esitetty aurinkosähkökapasiteetin kasvu kansainvälisesti vuosina 2008–2018. Suurin yksittäinen aurinkosähkön tuottajamaa oli Kiina 175,4 GW:n asennetulla aurinkosähkökapasiteetilla. Muita suuria aurinkosähkön tuottajamaita ovat Intia, Yhdysvallat ja Japani. (Masson & Kaizuka 2019)



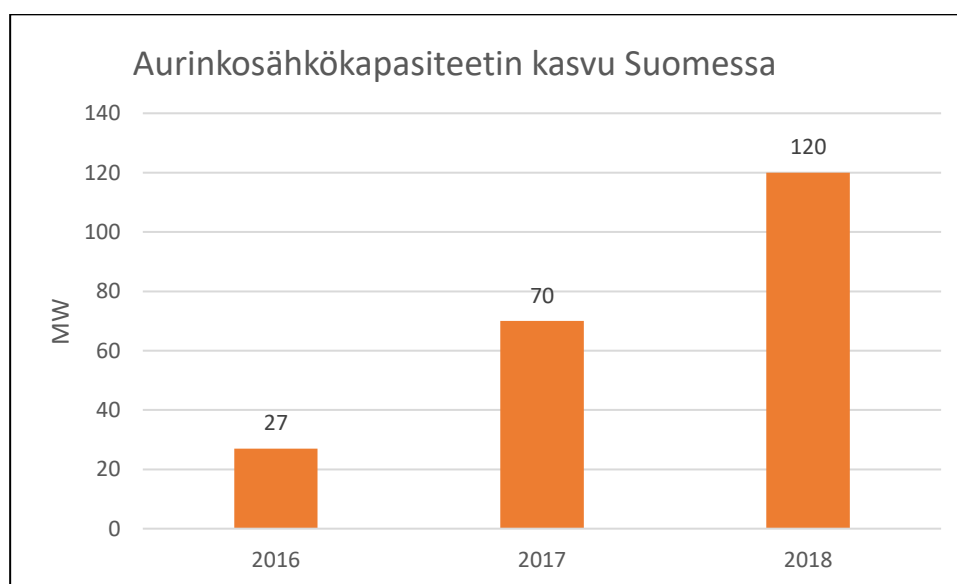
Kuvio 1 Aurinkosähkökapasiteetin kasvu kansainvälisesti (Masson & Kaizuka 2019)

### 3.2 Aurinkoenergian käyttö Suomessa

Aurinkosähkömarkkinoiden kovasta kehittymisestä johtuen aurinkosähköjärjestelmien hinnat ovat laskeneet voimakkaasti. Tämän takia aurinkosähköinvestoinnit ovat Suomessakin muuttuneet aina vain kannattavimmiksi viime vuosien aikana. Suomen olosuhteet ovat myös aurinkosähkölle suotuisat, pohjoisesta sijainnista huolimatta (Tahkokorpi 2016, 135.)

Aurinkoenergian käyttö Suomessa on kovassa kasvussa. Vuonna 2016 Suomen sähköverkkoon kytketty aurinkoenergian pientuotantokapasiteetti oli 27 MW. Vuoden 2017 loppuun mennessä kapasiteetti oli kasvanut noin 70 MW:iin. Kasvua on siis ollut n. 260 prosenttia. Vuoden 2018 lopussa kapasiteetti oli n. 120 MW eli vuoteen 2017

kasvua oli 82 prosenttia. Tilastoissa on otettu huomioon vain pientuotannon kapasiteetti eli alle 1 MW:n aurinkosähkövoimalat. Yli 1 MW:n voimaloita on tilastointihetkellä ollut yksi kappale. Aurinkosähkö vastaa Suomen sähkön pientuotannosta noin 60 prosenttia. Pientuotannon osuus Suomen kokonaissähköntuotannosta on hieman yli yksi prosentti. Kuviossa 2 on esitetty aurinkosähkökapasiteetin kasvu Suomessa vuosina 2016–2018. (Sähkönpienuotanto kovassa kasvussa - Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti 2,5-kertaistui vuodessa 2018; Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti lisääntyi 82 % vuodessa 2019)



Kuvio 2 Aurinkosähkökapasiteetin kasvu Suomessa (Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti lisääntyi 82 % vuodessa 2019)

Yli 1 MW:n aurinkosähkövoimalat eivät ole yleistyneet Suomessa yhtä nopeasti, kuin teholtaan pienemmät järjestelmät. Tähän on olemassa kaksi syytä, joista ensimmäisenä on lainsäädäntö. Aurinkosähköä tuetaan Suomessa verohelpotuksilla. Alle 800 MWh vuodessa tuottavat voimalat ovat sähköverosta vapaita. Tuotannon ylittäessä 800 MWh:n rajan, koko tuotanto muuttuu verolliseksi. Tämä aiheuttaa merkittävän muutoksen laitoksen takaisinmaksu-aikaan. Tästä johtuen Suomessa ei rakenneta juurikaan teholtaan yli 900 kW:n voimaloita, koska näiden voimaloiden vuosituotanto normaaliolosuhteissa ylittää tuon 800 MWh:n sähköverovapaan vuosituotannon rajan. Toisena syynä suurten voimaloiden puuttumiselle on voimalan tarvitsema pinta-

ala. Yhden MW:n aurinkosähkövoimala vaatii karkeasti arvioituna noin yhden hehtaarin pinta-alan. Voimala on sähkön siirtokustannuksien takia syytä rakentaa lähelle kulutuskohdetta. Suurten kulutuskohteiden läheisyydessä ei kuitenkaan yleensä ole voimalan vaatimaa tilaa, jos kattoasennus ei ole mahdollinen. (Vairinen 2020)

### 3.2.1 Energiatuki

Yritykset ja julkiset toimijat voivat Suomessa hakea energiataukea uusiutuville vähähiilisille energiaratkaisuille. Tuen piirissä ovat energiaratkaisut, jotka edistävät uusiutuvan energian tuotantoa ja käyttöä, edistävät energiansäästöä tai energian tuotannon tai käytön tehostamista sekä ratkaisut, jotka muutoin edistävät energijärjestelmän muuttumista vähähiiliseksi. Tukea ei myönnetä kohteille, joiden investointi perustuu pakolliseen ympäristöveloitteeseen tai jonka toteutus on aloitettu ennen tukipäättöstä, sillä tuen tarkoitus on edistää energiansäästöhankeiden toteuttamista.

Vuonna 2020 Aurinkosähköhankkeiden tuen osuus on 30.4.2020 asti 25 % investoinnista ja 1.5.2020 alkaen 20 % investoinnista. Energiatuen myöntää alle 5 miljoonan euron hankkeissa (uusi teknologia alle 1 miljoona euroa) Innovaatorahoituskeskus Business Finland. Suuremmissa hankkeissa energiatauen myöntää Työ- ja elinkeinoministeriö. (Energiatuki 2020)

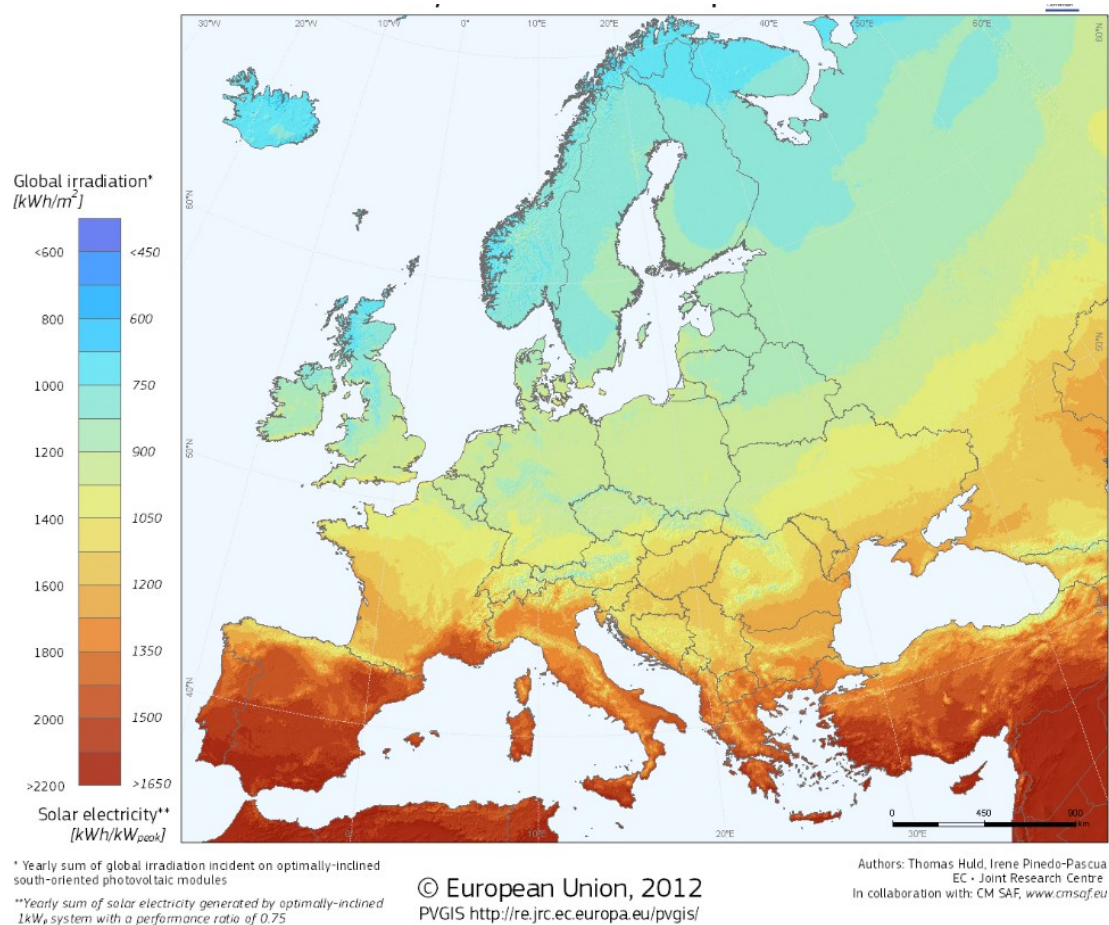
### 3.3 Auringon säteily

Aurinko on ihmiskunnan tärkein energianlähde. Aurinko on lähes pyöreä kappale, jonka halkaisija on noin  $1,39 \cdot 10^9$  m ja massa noin  $2 \cdot 10^{30}$  kg. Auringon etäisyys maasta on  $1,5 \cdot 10^{11}$  m. Se säteilee energiaa jatkuvalla noin  $3,8 \cdot 10^{26}$  watin teholla. Tästä tehosta vain alle miljardisosa, noin  $1,7 \cdot 10^{17}$  wattia, saapuu maapallolle. Tämä riittää pitämään maapallon lämpöisenä ja ylläpitämään elämää. Auringon energia on tuotosta sen ytimessä tapahtuvasta vetyatomien fuusioreaktiosta. Ytimen lämpötila on noin 10 miljoonaa kelviniä ja uloimman osan lämpötila noin 5800 kelviniä (Cengel & Ghajar 2016, 740–741).

Maapallon ilmakehään saapuvan auringon säteilyn teho on keskimäärin 1368 wattia neliometrille. Tätä tehoa kutsutaan aurinkovakioksi. Ilmakehä suodattaa ja heijastaa

noin 40 % tästä säteilystä, joten maahan asti saapuva teho on noin  $1000 \text{ W/m}^2$ . (Tahkokorpi 2016, 13)

Suomessa auringon säteily painottuu kesäaikaan, kun taas talvella aurinko ei juurikaan paista. Tämä johtaa myös aurinkosähkön tuotannon keskittymisen kesäkuukausille. Vuotuinen auringon kokonaissäteily Etelä-Suomessa on kuitenkin kutakuinkin samalla tasolla kuin Pohjois-Saksassa. Ilmatieteen laitoksen mukaan Helsingissä auringon vuotuinen säteily määrä vaakasuuralle pinnalle on noin  $980 \text{ kWh/m}^2$  ja Sodankylässä noin  $790 \text{ kWh/m}^2$ . Merkittävä osa auringon kokonaissäteilystä Suomessa on hajasäteilyä. Hajasäteily tarkoittaa muuta kuin suoraan auringosta tulevaa säteilyä, kuten maasta ja pilvistä heijastuva säteily. Kuviossa 3 on esitetty auringon säteilymäärät optimaaliseen kulmaan asennetulle pinnalle. Kuvioista käy ilmi, että vuositasolla Etelä-Suomen auringonsäteilymäärät vastaavat lähes Pohjois-Saksan säteilymääriä. (Auringonsäteilyn määrä Suomessa 2019)



Kuvio 3 Auringon säteily Euroopassa (Country and regional maps, 2017)

### 3.4 Aurinkosähkövoimala

Aurinkosähkövoimala on rakenteeltaan melko yksinkertainen. Sen pääosat ovat aurinkopaneelit, paneelien telineet, kaapelointi ja invertterit. Katolle merkittävimmin varjostusta aiheuttava voimalan osa ovat aurinkopaneelit. (Tahkokorpi 2016, 136)

Aurinkopaneeli koostuu useista sarjaan tai rinnan kytketyistä aurinkokennoista, jotka valmistetaan yleisimmin joko yksi- tai monikiteisestä piistä. Yksikiteiset kennot valmistetaan yhdestä piikiteestä, kun taas monikiteiset useammasta kiteestä. Yksikiteisestä piistä valmistettu aurinkokenno on hyötysuhteeltaan hieman parempi. Myös muita valmistusmateriaaleja on kehitetty, mutta ne eivät vielä ole yleistyneet. Kennojen edessä on suojalasi, joka päästää auringonsäteilyn lävitseen. Aurinkokennojen määrällä ja kytkentätavalla määritellään aurinkopaneelin jännite ja virta, sekä tätä kautta myös paneelin teho. (Aurinkosähköteknologiat, 2019; Auringosta sähköä, 2017)

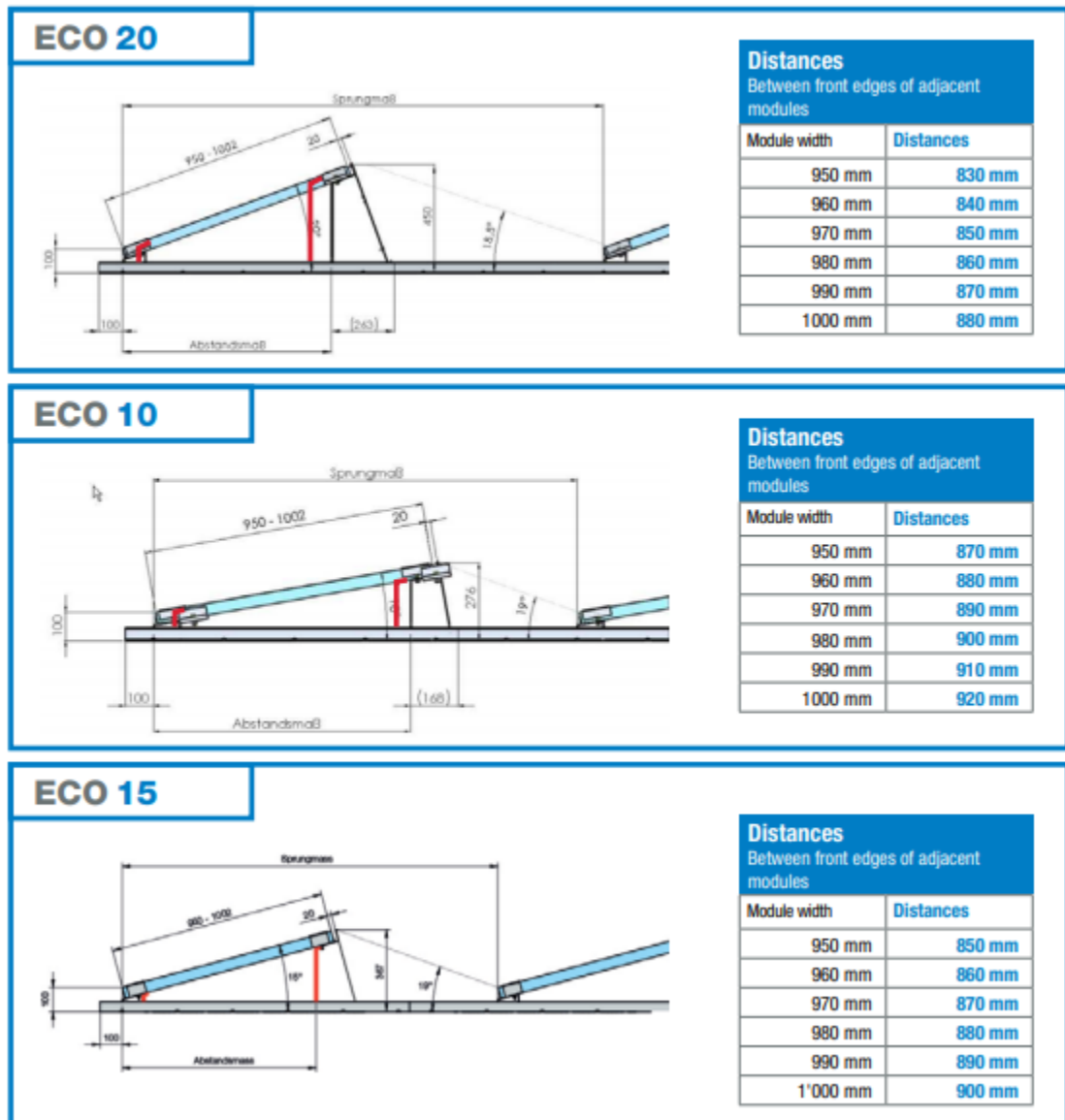
Tyypillinen yleisesti käytössä oleva monikiteisestä piistä valmistettu aurinkopaneeli on teholtaan 270–285 W. Tämän tehoisen Trinasolar-merkkisen paneelin pituus on 1650 mm ja leveys 992 mm, joten sen pinta-ala on n. 1,7 m<sup>2</sup>. Pinta-alaltaan samankokoisen saman valmistajan yksikiteisestä piistä valmistettu paneeli voi olla teholtaan 275–315 W. Myös muiden valmistajien saman tehoiset aurinkopaneelit ovat suuruusluokaltaan samankokoisia. Monikiteisestä piistä valmistetuilla 275 watin paneeleilla rakennetun 100 kW:n aurinkosähkövoimalan aurinkopaneelien pinta-ala on siis n. 620 m<sup>2</sup>. (Honey module TSM-PD05 2017; Allmax plus framed 60-cell module 2017)

Tasakatolle paneelit asennetaan 10° - 20° kulmaan kelluvana asennuksena. Aurinkopaneelien väliin jää tyypillisesti n. 0,8–1 m väli. Kuviossa 5 näkyy tasakatolle Soltop-telineellä 20 asteen kulmaan asennettuja aurinkopaneeleita ja niiden aiheuttamaa varjostusta katon pintaan. Teline koostuu alumiinikiskoista, niiden alle asennettavista kumimatoista ja alumiinisista paneelin etu- ja takajaloista. Telinettä ei kiinnitetä kattopintaan millään, vaan se pysyy katolla painokuorman ansiosta. (Duraclick Eco Mounting System Assembly-Instructions N.d.)



Kuvio 4 Aurinkopaneeleja 20 asteen kulmaan asennettuna PVC-katolla

Kuviossa 6 on esitetty Soltopin valmistaman aurinkosähkövoimalan telinejärjestelmän mittoja eri aurinkopaneelien asennuskulmilla. Työn toteutuksessa varjostuksien laskennassa käytetään Suomen olosuhteisiin parhaiten sopivan 20 asteen asennuskulman mittoja. Tässä kulmassa 990 mm leveän aurinkopaneelin etujalan etureunan ja takajalan väliin jää 870 mm väli. Väli seuraavaan aurinkopaneeliin määritetään edellisen paneelin aiheuttaman varjon pituuden mukaan. Jos väli jätetään liian lyhyeksi, paneelit varjostavat toisiaan auringon ollessa matalalla. Tämä aiheuttaa sähkön tuotannon heikentymisen. (Duraclick Eco Mounting System Assembly-Instructions N.d.)



Kuvio 5 Soltop Duraclick Eco mounting system (Duraclick Eco Mounting System Assembly-Instructions N.d.)

## 4 Lämmönsiirtyminen

Lämpö on aineen hiukkasten liikettä ja se on energianmuoto, joka voidaan siirtää systeemistä toiseen lämpötilaeron avulla. Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan energia säilyy, sitä ei voi tehdä lisää eikä hävittää, vaan se joko siirtyy tai muuttaa muotoaan. Tästä johtuen systeemin lämpöenergian kasvun täytyy olla yhtä suuri kuin lämmönsiirtymisen systeemiin. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämpö siirtyy aina lämpöisemmästä tilasta kylmempään tilaan. Lämmönsiirtymi-

nen loppuu, kun lämpötilaerot ovat tasaantuneet eli lämmönsiirtyminen vaatii lämpötilaeron. Lämpö siirtyy ilman ulkoista työtä kolmella eri tavalla: johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla eli kulkeutumalla. (Cengel & Ghajar 2015, 2.)

Lämpövirta voidaan laskea kaavoilla 1 tai 2:

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t} \quad (1)$$

Jossa:

$\Phi$  = Lämpöteho (W)

Q = Siirtyvä lämpöenergia (J)

$\Delta t$  = Siirtymäaika (s)

$$\Phi = q_m * c * \Delta T \quad (2)$$

Jossa:

$\Phi$  = Lämpöteho (W)

$q_m$  = Aineen massavirta (kg/s)

c = Aineen ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)

$\Delta T$  = Lämpötilan muutos (°C)

Lämpövirran tiheys eli lämpövirta pinta-alan yksikköä kohti voidaan laskea kaavalla 3:

$$q = \frac{\Phi}{A} \quad (3)$$

Jossa:

q = Lämpövirran tiheys (W/m<sup>2</sup>)

A = Pinta-ala (m<sup>2</sup>)

$\Phi$  = Lämpöteho (W)

#### 4.1 Johtuminen

Lämmönsiirtymistä johtumalla tapahtuu kiinteissä aineissa, nesteissä ja kaasuissa.

Nesteissä ja kaasuissa lämmönjohtuminen aiheutuu aineen molekyylien törmäyksistä



ja diffuusiosta. Kiinteissä aineissa molekyylien värinä ja vapaiden elektronien lämpöliike aiheuttaa lämmönjohtumisen. Lämmönjohtuminen vaatii lämpötilaeron ja lämmönjohtumisen suunta on lämpöisemmästä kylmempään päin. (Cengel & Ghajar 2015, 18.)

Lämmönjohtumista rakenteen läpi kuvataan suureella lämpövirta. Lämpövirran SI-yksikkö on watti (W). Lämpövirran suuruus rakenteen, esimerkiksi seinän, läpi on suoraan verrannollinen lämpötilaeroon, rakenteen pinta-alaan ja rakenteen lämmönjohtavuuteen. Lämpövirta on kääntäen verrannollinen rakenteen paksuuteen. (Hemilä & Utriainen 1991, 136)

Lämmönjohtuminen eristekerroksen läpi voidaan laskea kaavoilla 4, 5 tai 6:

$$\Phi = \lambda * A * \frac{\Delta T}{l} \quad (4)$$

Jossa:

$\Phi$  = Lämpövirta (W)

$\lambda$  = Lämmönjohtavuus (W/(m\*K))

A = Pinta-ala (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  = Pintalämpötilojen erotus (K)

l = Eristekerroksen paksuus (m)

$$\Phi = \frac{A}{R} * \Delta T \quad (5)$$

Jossa:

$\Phi$  = Lämpövirta (W)

R = Lämpöisolanssi (m<sup>2</sup>K/W) = l /  $\lambda$

$\Delta T$  = Pintalämpötilojen erotus (K)

Tai jos rakenteen U-arvo on tiedossa:

$$\Phi = U * A * \Delta T \quad (6)$$

Jossa:

U = U-arvo (W / (m<sup>2</sup> \* K)) = 1/R

$A$  = Pinta-ala ( $m^2$ )

$\Delta T$  = Pintalämpötilojen erotus (K)

Lämmönjohtavuus kuvaa aineen kykyä johtaa lämpöä. Lämmönjohtavuuden yksikkö on  $W/(m \cdot K)$ . Suuri lämmönjohtavuuden arvo tarkoittaa, että aineella on hyvä lämmönjohtavuus ja pieni arvo sitä, että aineella on huono lämmönjohtavuus. Pienen lämmönjohtavuuden omaavia aineita käytetään eristeinä. Eri aineiden lämmönjohtavuudet eroavat toisistaan suuresti. Kaasujen, kuten ilman lämmönjohtavuus on hyvin pientä, kun taas esimerkiksi metallien suurta. Aineet, joilla on hyvä sähkönjohtavuus ovat usein myös hyviä lämmönjohteita. U-arvo eli lämmönläpäisykerroin on lämmönjohtavuudesta lämpöisolanssin kautta johdettu kerroin. U-arvo ottaa huomioon rakenteen paksuuden. Taulukossa 1 on esitetty rakennusmateriaalien lämmönjohtavuuksia, verrokkiaineina vesi ja ilma. (Cengel & Ghajar 2015, 20).

Taulukko 1 Aineiden lämmönjohtavuuksia

Aineiden lämmönjohtavuuksia $\lambda$ ( $W/(m \cdot K)$ )			
Asbestilaatta	0,7	Kattoliuske	2
Asbestivilla	0,156	Polystyreeni	$\approx 0,16$
Betoni	$\approx 2$	Puu, kuiva	0,1...0,2
Bitumi	0,17	Teräs	$\approx 45$
Ilma	0,026	Tiili	$\approx 0,6$
Kipsi, seinälevy	0,3...0,6	Vanerilevy	0,15
Lasivilla	0,042	Vesi	0,598

## 4.2 Konvektio

Konvektio tarkoittaa lämmön siirtymistä kulkeutumalla virtaavan kaasun tai nesteen eli fluidin mukana. Kuten johtuminen, myös konvektio tarvitsee toimiakseen väliaineen. Konvektio eroaa johtumisesta siinä, että se tarvitsee toteutuakseen myös liikkuvan fluidin. Lämmönsiirtyminen kiinteässä aineessa on aina johtumista, kun taas nesteessä tai kaasussa kyse voi olla joko johtumisesta tai konvektiosta, riippuen niiden liikkeestä. Fluidin liikkeessä kyse on konvektiosta ja liikkeen puuttuessa kyse on johtumisesta. Konvektio sisältää sekä lämmönjohtumisen että fluidin liikkeen. Fluidin liike nopeuttaa lämmönsiirtymistä, sillä se kuljettaa lämpimiä partikkeleita pois lämmönsiirtopinnalta ja tuo kylmiä tilalle. Mitä nopeampaa fluidin liike on, sitä tehokkaampaa on myös lämmönsiirtyminen. (mts. 378)

Konvektion suuruus on riippuvainen fluidin ominaisuuksista, kuten dynaamisesta viskositeetista ( $\eta$ ), lämmönjohtavuudesta ( $\lambda$ ), tiheydestä ( $\rho$ ), ominaislämpökapasiteetista ( $c_p$ ) sekä fluidin nopeudesta ( $v$ ). Myös lämmönsiirtopinnan muoto ja pinnankarheus vaikuttavat konvektioon fluidin virtauksen turbulenssin kautta. Konvektion suuruus voidaan laskea Newtonin jäähtymislain mukaisesti kaavalla 7:

$$\Phi = h * A * (T - T_f) \quad (7)$$

Jossa:

$\Phi$ = Konvektion lämpöteho (W)

$h$ = konvektiivinen lämmönsiirtokerroin (W/(m<sup>2</sup>\*K))

$A$ = Lämmönsiirtopinnan pinta-ala (m<sup>2</sup>)

$T$ = Pinna lämpötila (°C)

$T_f$ = Fluidin lämpötila (°C)

Haasteena konvektion laskennassa on konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen ( $h$ ) määrittäminen. Konvektiokerroin on riippuvainen edellä mainituista useista tekijöistä eikä sitä voida määritellä materiaaliakohtaisesti, toisin kuin monet muut lämmönsiirtotekniikan kertoimet (mts. 25-26).

Konvektio voidaan jakaa pakotettuun konvektioon ja luonnolliseen konvektioon. Jos virtaavan aineen liike johtuu ulkoisesta voimasta, kuten pumpusta tai tuulesta, puhutaan pakotetusta konvektiosta. Luonnollinen konvektio aiheutuu lämpötilaerojen aiheuttamista tiheyseroista. Lämmin aine on harvempaa kuin kylmä, joten se aiheuttaa virtauksen ylöspäin. Pakotetun konvektion aiheuttama lämmönsiirtyminen on tehokkaampaa kuin luonnollisen konvektion (mts. 25-26).

### 4.3 Säteily

Säteily on energian siirtymistä sähkömagneettisina aaltoina. Säteily ei tarvitse väliainetta, toisin kuin johtuminen ja konvektio. Tämän ansiosta lämpöenergia siirtyy säteilemällä myös tyhjiössä, kuten auringon lämpöenergia siirtyessään maahan. Säteily on myös nopein lämmönsiirtymisen muoto, sillä sen nopeus vastaa valonnopeutta.

Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen säteilevät lämpöä. Lämpösäteilyä mitataan suurella säteilyteho ja sen yksikkönä on watti. Säteilyteho kuvaa pinnan säteilemää energiaa aikayksikössä (mts. 28).

Ideaalista kappaletta, joka säteilee täydellä voimakkuudella, kutsutaan mustaksi kappaleeksi. Mustan kappaleen suurin mahdollinen lämpösäteily voidaan laskea Stefanin-Boltzmannin lain mukaisesti kaavalla 8:

$$\Phi = \sigma * A * T^4 \quad (8)$$

Jossa:

$\Phi$  = Säteilevä lämpövirta (W)

$\sigma$  = Stefanin-Boltzmannin vakio ( $5,6704 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 * \text{K}^4$ )

A = Kappaleen pinta-ala (A)

T = Kappaleen lämpötila (K)

Täydellisen mustaa kappaletta ei kuitenkaan ole olemassa. Tämän takia tarvitaan kerroin Emissiivisyys ( $\epsilon$ ). Emissiivisyys ilmaisee kappaleen säteilytehon suhteen mustan kappaleen säteilytehoon ja se voidaan laskea jakamalla kappaleen säteilyteho mustan kappaleen säteilyteholla. Tosin sanoen emissiivisyys kertoo, kuinka lähellä kappale on mustaa kappaletta. Todellisen kappaleen emissiivisyyden alue on  $0 < \epsilon < 1$ , jossa täysin mustan kappaleen arvo on 1. Kappaleen emissiivisyyden arvo ei ole vakio, vaan se on riippuvainen kappaleen lämpötilasta, säteilyn aallonpituudesta sekä säteilyn suunnasta. Todellisen kappaleen lämpösäteilyn teho voidaan laskea kaavalla 9:

$$\Phi = \epsilon * \sigma * A * T^4 \quad (9)$$

Jossa:

$\Phi$  = Lämpösäteilyn teho (W)

$\epsilon$  = Emissiivisyys

$\sigma$  = Stefanin-Boltzmannin vakio ( $5,6704 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 * \text{K}^4$ )

A = Pinta-ala ( $\text{m}^2$ )

T = Lämpötila (K)

Kappale, joka on hyvä säteilemään lämpösäteilyä, on myös hyvä absorboimaan eli vastaanottamaan sitä. Kappaleen kykyä vastaanottaa säteilyä kuvataan absorptiosuhteella ( $\alpha$ ). Absorptiosuhde tarkoittaa kappaleen absorboimaa säteilyä jaettuna kappaleeseen saapuneella säteilyllä. Kun absorptiosuhde on tiedossa, voidaan kappaleen absorboima säteily laskea kertomalla kappaleeseen saapunut säteily absorptiosuhteella. Kuten emissiivisyydellä, myös absorptiosuhteella todellisen kappaleen arvon alue on  $0 < \alpha < 1$ , mustan kappaleen vastaanottaessa kaiken siihen tulleen säteilyn. Läpinäkymättömillä kappaleilla absorboimaton säteily heijastuu pois. Kirchoffin säteilylain mukaan kappaleen emissiivisyys ja absorptiosuhde tietyssä lämpötilassa ja tietyllä säteilyn aallonpituudella ovat yhtä suuria. Myös kappaleen absorptiosuhde, kuten emissiivisyys, on riippuvainen kappaleen lämpötilasta ja säteilyn aallonpituudesta. Taulukossa 2 on esitetty aineiden emissiivisyyskertoimia. (mts. 28)

Taulukko 2 Aineiden emissiivisyyskertoimia

Aineiden emissiivisyyskertoimia $\epsilon$			
Alumiini, anodisoitu	0,8	Ikkunalasi	0,9-0,95
Ruostumaton teräs, kiillotettu	0,17-0,3	Maali, musta	0,88
Teräs, kiillotettu	0,08-0,14	Maali, valkoinen	0,9
Asbesti	0,96	Kumi, kova	0,93
Tiili	0,93-0,96	Puu	0,94

Kun säteily osuu kappaleeseen, osa siitä absorboituu kappaleeseen, osa heijastuu pois ja osa mahdollisesti läpäisee kappaleen. Pois heijastunutta säteilyn osaa kuvataan kertoimella heijastussuhde ( $\rho$ ) ja kappaleen läpäissyttä osaa kertoimella läpäisysuhde ( $\tau$ ). Heijastussuhde lasketaan jakamalla kappaleesta heijastunut säteily siihen saapuneella säteilyllä, ja läpäisysuhde jakamalla kappaleen läpäissyt säteily siihen saapuneella säteilyllä. Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan energia ei häviä, joten näiden kolmen osan, eli absorptiosuhteen, heijastussuhteen ja läpäisysuhteen, summa on aina 1. Kaavana esitettynä kaava 10:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (10)$$

Jossa:

$\alpha$  = Absorptiosuhde

$\rho$  = Heijastussuhde

$\tau$  = Lämpösiirtosuhde

Mustalla kappaleella heijastussuhteen ja lämpösiirtosuhteen arvo on 0, eli se absorboi kaiken siihen saapuneen säteilyn. Läpinäkymättömillä kappaleilla, kuten useimmilla kiinteillä aineilla, lämpösiirtosuhteen arvo on 0, kun taas useimmilla kaasuilla heijastussuhteen arvo on 0. Tämä voidaan esittää seuraavilla kaavoilla 11 ja 12:

Läpinäkymättömille kappaleille:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (11)$$

Jossa:

$\alpha$  = Absorptiosuhde

$\rho$  = Heijastussuhde

Kaasuille:

$$\alpha + \tau = 1 \quad (12)$$

Jossa:

$\alpha$  = Absorptiosuhde

$\tau$  = Lämpösiirtosuhde

Nämä kaavat auttavat aineen ominaisuuksien määrittelyssä, sillä tiedettäessä toinen arvo, voidaan sen avulla laskea toinen. (mts. 734–735)

Kappaleiden säteilylämpövirran määrittäminen kahden pinnan välillä on monimutkaista, sillä se on riippuvainen kappaleiden pintojen ominaisuuksista, niiden sijoittumisesta toisiinsa nähden ja väliaineen vaikutuksesta säteilyyn. Jos kappale on kokonaan ympäröity paljon suuremmalla tilalla tai mustalla kappaleella, ja väliaine ei vaikuta säteilyyn, voidaan säteilyn lämmönsiirto laskea kaavalla 13:

$$\Phi = \varepsilon * \sigma * A * (T^4 - T_0^4) \quad (13)$$

Jossa:

$\Phi$  = Lämpösäteilyn teho (W)

$\varepsilon$  = Emissiivisyys

$\sigma$  = Stefanin-Boltzmannin vakio ( $5,6704 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 * \text{K}^4$ )

$A$  = Pinta-ala ( $\text{m}^2$ )

$T$  = Kappaleen lämpötila (K)

$T_0$  = Ympäristön lämpötila (K)

Jos  $T > T_0$  säteilyvirta on kappaleesta ympäristöön päin

Jos  $T < T_0$  säteilyvirta on kappaleeseen päin

Tässä ideaalisessa tilanteessa ympäristön emissiivisyydellä ja pinta-alalla ei ole merkitystä. (mts. 28–29)

## 5 Kiinteistön jäähdytys

### 5.1 Sisäilmasto

Ympäristöministeriön 1.1.2018 voimaan tullut asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta antaa puitteet uudisrakennuksien sisäilman laadulle. Nykyinen asetus kumosi vuonna 2011 voimaantulleen asetuksen rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Asetusta sovelletaan uudisrakennuksen ja rakennuksen laajennuksen ilmanvaihdon suunnitteluun ja rakentamiseen. Asetus ei koske maatalouden tuotantorakennuksia eikä uudisrakennuksia, joita on tarkoitus käyttää alle 4 kuukautta vuodessa. (A 1009/2017, 1 §)

Sisäilmastolla tarkoitetaan rakennuksessa vaikuttavien kemiallisten, fysikaalisten ja mikrobiologisten olosuhteiden muodostamaa kokonaisuutta. Asetuksen mukaan rakennuksen sisäilmaston tulee olla edellä mainituilta olosuhteiltaan viihtyisä sekä terveydelle ja rakenteille turvallinen. Rakennuksen sisäilman kosteus pitää pysyä riittävän alhaisena mikrobien kasvun ja kosteusvaurioiden välttämiseksi. Hiilidioksidin

osalta asetus määrää hetkellisen pitoisuuden suunnitteluarvon rajaksi rakennuksen käyttöaikana enintään 800ppm suuremmaksi kuin ulkoilman pitoisuus. Valaistuksen tiloissa on oltava näkötehtävien edellyttämällä tasolla. Lämmityskauden huonelämpötilan suunnittelulämpötilan tulee olla 21°C. Vaihteluväli huonelämpötilojen hallinnan suunnitteluarvoissa on lämmityskaudella 20–25°C ja muina aikoina 20-27°C. Jos tilojen toiminta erityistapauksissa niin edellyttää, voidaan näistä lämpötilojen arvoista poiketa. (A 1009/2017, 4 §; A 1009/2017, 5 §; A 1009/2017, 6 §)

Ilmanvaihdon tehtävänä on asetuksen mukaan toteuttaa terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilman laatu oleskelutiloissa. Ilmanvaihdon on poistettava sisäilmasta terveydelle haitalliset aineet, liiallinen kosteus, hajut ja epäpuhtaudet sekä tuotava tiloihin riittävä ulkoilmavirta. Ilmanvaihtojärjestelmän toimintoja on voitava mitata, ohjata ja seurata. Järjestelmän on oikeinkäytettynä kestettävä sen suunniteltu käyttöikä ja se on tarvittaessa voitava kokonaan pysäyttää. Järjestelmän pysäytyskatkasisijan on oltava selvästi merkitty ja sen tulee olla helposti saavutettavissa. (A 1009/2017, 8 §)

Opinnäytetyön kannalta merkittävin asia sisäilmastotavoitteissa on sisäilman lämpötilan mitoitusalue. Tiloissa, joissa lämpötila voi jäädytyskaudella ylittää yli 27 °C tarvitaan jäädytystä. Näissä kiinteistöissä jäädytyskuorman vähentäminen voi parantaa energiatehokkuutta ja antaa taloudellisia säästöjä.

## 5.2 Lämpötase

Johtuen energian häviämättömyydestä voidaan systeemille määrittää tase, jonka summa on aina nolla. Kaikki systeemiin tuleva energia joko poistuu systeemistä tai jää sinne. Rakennuksen kohdalla tämä tarkoittaa rakennuksen sisälle tulevien, rakennuksessa syntyvien, sieltä poistuvien ja sinne jäävien lämpövirtojen laskentaa. Huoneen lämpötaseeseen vaikuttaa monta eri tekijää. Jäädytystarpeen laskennan kannalta merkittävimpiä niistä ovat lämmön varastoituminen rakenteisiin, auringon säteily ja pintojen välinen lämpösäteily. Lämpötase muodostuu seuraavista tekijöistä: auringon säteily, sisäiset lämpökuormat, ulko- ja tuloilman lämpötila ja kosteus, ilmavirtaukset, rakenteiden lämmönläpäisy ja lämmönvarastointikyky sekä kosteuden va-

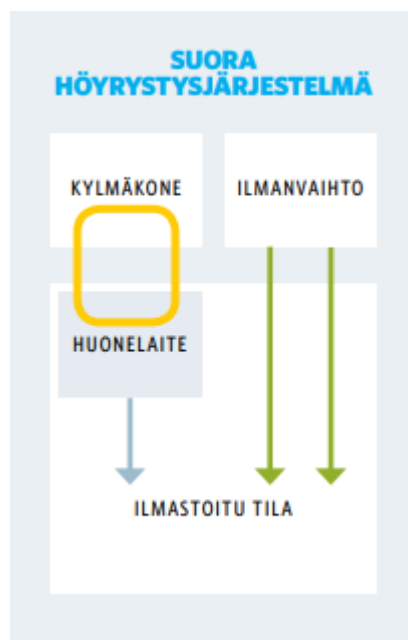


rastoituminen. Sisäisiin lämpökuormiin vaikuttavat ihmiset, koneet ja valaistus. Ilmavirtauksien tekijöitä ovat ilmanvaihto, vuotoilmavirta ja siirtoilmavirtaukset. (Sandberg 2016, 420)

## 5.3 Jäähdytysjärjestelmät

### 5.3.1 Suora jäähdytys

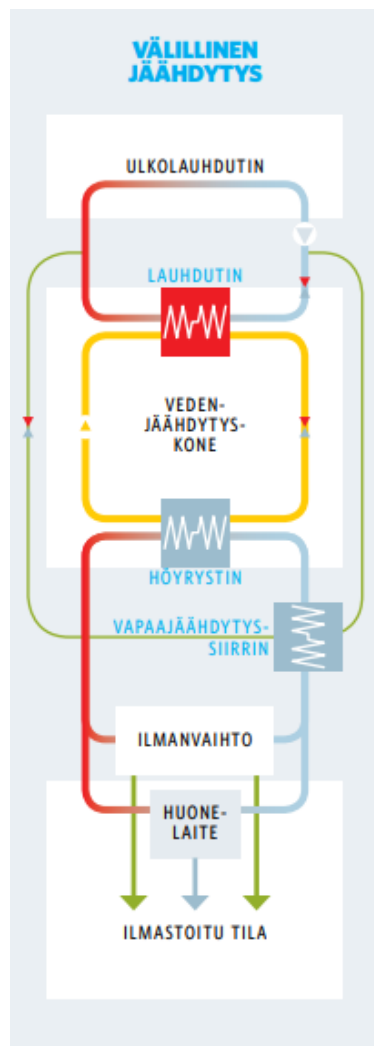
Suorassa jäähdytyksessä kylmäainekiertoinen höyrystin jäähdyttää jäähdytettävää ilmaa. Tällöin ei tarvita energiatehokkuutta heikentävää lämmönsiirintä. Yleinen esimerkki suorasta jäähdytyksestä on split-järjestelmä, joka koostuu sisä- ja ulkoyksiköstä. Sisäyksikkö sisältää ilmaa jäähdyttävän höyrystimen ja ulkoyksikkö kompressorin ja lauhduttimen. Muita suora höyrystysjärjestelmiä ovat mm kaappi- ja vakioilmastointikoneet (Mattila 2015, 8). Suoran jäähdytyksen etuja ovat edullinen hankintahinta ja pienempi energiankulutus. Rajoituksina taas ovat pienempi jäähdytysteho ja järjestelmän säädettävyys (Sandberg 2014, 243.) Kuviossa 7 on esitetty suoran jäähdytysjärjestelmän toimintaperiaate.



Kuvio 6 Suora jäähdytys (Mattila 2015, 8)

### 5.3.2 Välillinen jäähdytys

Välillisessä jäähdytyksessä kylmäainekiertoinen höyrystin tai kaukojäähdytyksen lämmönsiirrin jäähdyttää väliainetta, esimerkiksi vettä. Väliaine kiertää jäähdytyspatteissa, joka jäähdyttää jäähdytettävää ilmaa. Välilliseen jäähdytykseen käytetään useimmiten joko rakennuksen katolla sijaitsevia vedenjäähdyttimiä tai iv-konehuoneeseen asennettavia liuoslauhdutteisia jäähdytyskoneita. Katolle asennettavissa vedenjäähdyttimissä on koko kylmäainepiiri komponentteineen. (Mattila 2015, 8.) Välillisen jäähdytyksen etuja ovat tarkka huonekohtainen säätö, pieni kylmäainetäyttö, mahdollisuus järjestelmän laajennuksiin. Huonoina puolina taas ovat kalliimpi hankintahinta ja mahdollisesti suurempi energiankulutus (Sandberg 2014, 244.) Kuviossa 8 on esitetty välillisen jäähdytysjärjestelmän toimintaperiaate.



Kuvio 7 Välillinen jäähdytys (Mattila 2015, 8)

### 5.3.3 Paikallinen jäähdytys

Paikallinen jäähdytys tarkoittaa jäähdyttävän laitteen asentamista jäähdytettävään tilaan. Paikallinen jäähdytyslaite kierrättää ilmaa tilassa ja jäähdyttää sitä. Myös tuloilman tuominen tilaan tilassa sijaitsevan jäähdytyslaitteen läpi on mahdollista. Paikallinen jäähdytys voidaan toteuttaa sekä suoralla, että välillisellä jäähdytyksellä (mts, 243.)

### 5.3.4 Keskitetty jäähdytys

Keskitettyä jäähdytystä käytetään koko rakennuksen, tai rakennuksen tietyn osan, jäähdytykseen. Myös keskitetty jäähdytys voidaan toteuttaa suorana tai välillisenä. Suorassa keskitetyssä jäähdytyksessä jäähdytetään rakennuksen tuloilmaa tuloilmakanavassa tai ilmanvaihtokoneessa sijaitsevalla jäähdytyspatterilla, jossa kiertää kylmäaine. Välillisessä keskitetyssä jäähdytyksessä käytetään väliainetta, jota voidaan kierrättää puhallinkonvektoreissa ja jäähdytyspalkeissa tai käyttää tuloilman jäähdyttämiseen tuloilmakanavassa tai ilmanvaihtokoneella. (mts. 243)

## 5.4. Vapaa jäähdytys

Normaalisti rakennusta jäähdytetään, kun ulkoilman lämpötila sitä vaatii. Joissain kohteissa tilojen jäähdytyksentarve voi kuitenkin olla ympärivuotinen. Vapaa jäähdytyksellä tarkoitetaan rakennuksen jäähdyttämistä sisäilmaa kylmemmällä ulkoilmalla. Tätä voidaan käyttää kohteissa, joissa jäähdytyksentarve on ympärivuotinen. Vapaa jäähdytystä voidaan käyttää myös muissa kohteissa kesän jäähdytyskaudella yöllä ilman ollessa viileämpi. Vapaa jäähdytys voidaan toteuttaa kuviossa 8 esitetyn välillisen jäähdytysjärjestelmän yhteydessä vapaa jäähdytys siirtimellä. (mts. 282)

## 6 Aurinkosuojaus

Jo rakennusta suunniteltaessa voidaan jäähdytystarvetta pyrkiä vähentämään passiivisin keinoin. Tärkeimpänä huomioitavana asiana on auringon säteilyn aiheuttaman lämpökuorman vähentäminen. Rakennuksen auringonpuoleisella reunalla voi olla

huomattavasti suurempi jäähdytysentarve, kuin rakennuksen keskivyoähykkeellä. Jäähdytyskuormaa voidaan tästä johtuen vähentää rakenneteknisillä ratkaisuilla kuten rakennuksen suuntauksella, aurinkosuojauksilla ja heijastavilla rakenteilla. (Matti 2015, 12).

Auringonsäteilyllä on suuri lämmittävä vaikutus. Auringonsäteilyn rakennusta lämmittävää vaikutusta voidaan vähentää aurinkosuojauksella, jolla voidaan Airaksisen ja muiden (2015, 11) mukaan toimistorakennuksissa päästä jopa 85 %:n alenemaan jäähdytysentarpeessa. Vuonna 2012 rakennetun asuinkerrostalon jäähdytysentarve on voitu puolittaa aurinkosuojauksella käyttämällä.

Yleisimpiä tehokkaina pidettyjä keinoja ovat rakennuksen ikkunoiden ulkopuolelle asennettavat markiisit ja sisäpuolelle asennettavat kaihtimet. Käytössä on myös automatiikalla ohjattavia moottoroitua aurinkosuoja. Ikkunoiden ulkopuolelle asennettavat ratkaisut ovat tehokkaampia kuin sisäpuolelle asennettavat. Tehokas aurinkosuojaus estää kokonaan auringonsäteilyn pääsyn ikkunan pinnalle. Jo suunnitteluvaiheessa voidaan aurinkosuojaus ottaa huomioon mm räystäiden pituudessa ja ikkunoiden suuntauksessa ja koossa. Kun aurinkosuojaus otetaan huomioon jo suunnitteluvaiheessa, voidaan säästää myös jäähdytyksen mitoituksessa. Aurinkosuojauksen etuna on jäähdytystarpeen väheneminen, kun taas haittapuolena kiinteät ratkaisut estävät lämmittävän säteilyn pääsyn sisälle lämmityskautena. (Aurinkosuojaus 2020; Aurinkosuojaratkaisut 2020)

## 7 Kulutustietojen vertailu

### 7.1 Energiankulutustiedot

Opinnäytetyö oli tarkoitus toteuttaa käyttämällä myymäläkohteista saatuja sähköenergiankulutustietoja ja kylmäkompressoreiden käyntiaikatietoja. Vertailuun oli tarkoitus ottaa kuusi myymälää, joiden katolle on asennettu aurinkopaneelit, ja kaksi, joihin ei vielä ole asennettu paneeleja. Jäähdytysenergian kulutustietojen saaminen osoittautui kuitenkin haastavaksi, joten tutkimuksen lähestymissuuntaa ongelmaan muutettiin. Tutkimuksen painopistettä muutettiin enemmän teoreettisten laskelmien

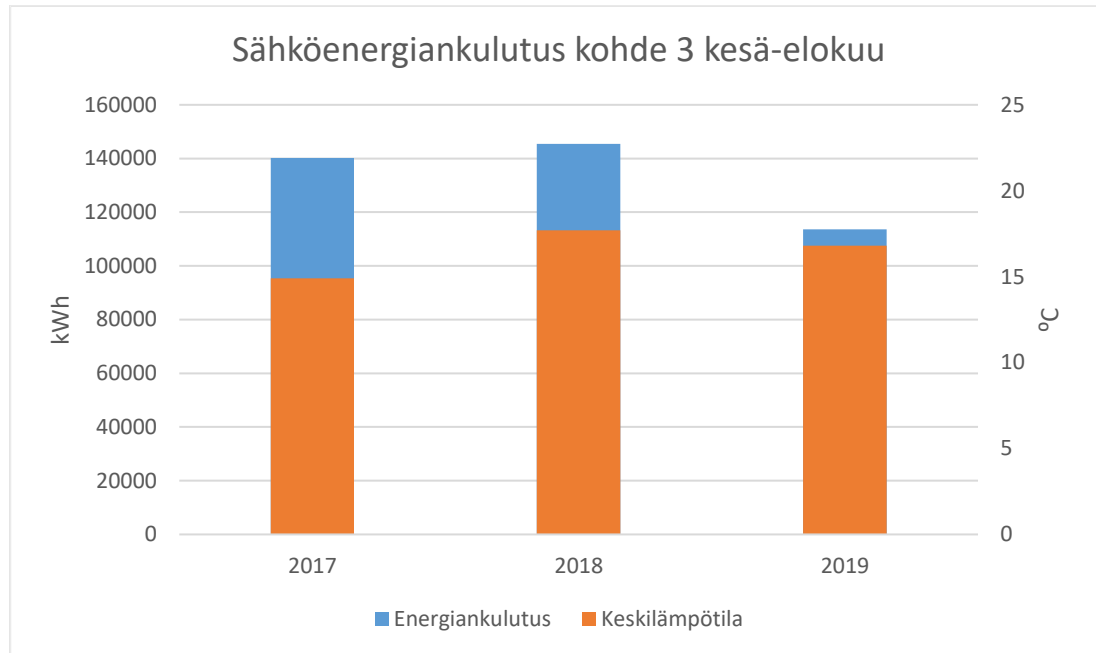
suuntaan ja sähköenergiankulutustietojen vertailun painoarvoa tutkimuksen toteutuksessa vähennettiin. Kulutustietojen vertailu toteutettiin kuitenkin pelkkiä rakennuksen kokonaissähkökulutustietoja käyttämällä.

Kokonaissähkökulutustiedot saatiin viidestä myymäläkohteesta, joiden katolle oli asennettu aurinkopaneelit ja yhdestä kohteesta, johon paneeleja ei ollut vielä asennettu. Ongelmaksi vertailun toteutuksessa muodostui tietojen vähäisyys. Kohteista, joista energiankulutustietoja saatiin, kaksi oli niin uusia kiinteistöjä, että niistä ei kulutustietoja ollut kertynyt ajalta ennen paneeliasennusta yhtään, joten ne täytyi jättää vertailusta pois. Kahdessa kohteesta aurinkosähkövoimala taas oli liian hiljattain asennettu, eli kulutustietoja paneeliasennuksen jälkeen ei ollut, joten sekin täytyi jättää vertailun ulkopuolelle. Vertailukelpoista tietoa oli saatavilla vain yhdestä kohteesta ja siitäkin vain yhdeltä kesältä aurinkopaneeliasennuksen jälkeen. Tämän kohteen katolle oli asennettu paneelit keväällä 2019. Vertailukesäksi paneeliasennuksen jälkeen jäi näin ollen vain kesä 2019. Vertailukohteeksi ilman aurinkopaneeleja saatiin yksi rakennus, josta saatiin energiankulutus tiedot samalta kuin tutkimukseen valitusta kohteesta.

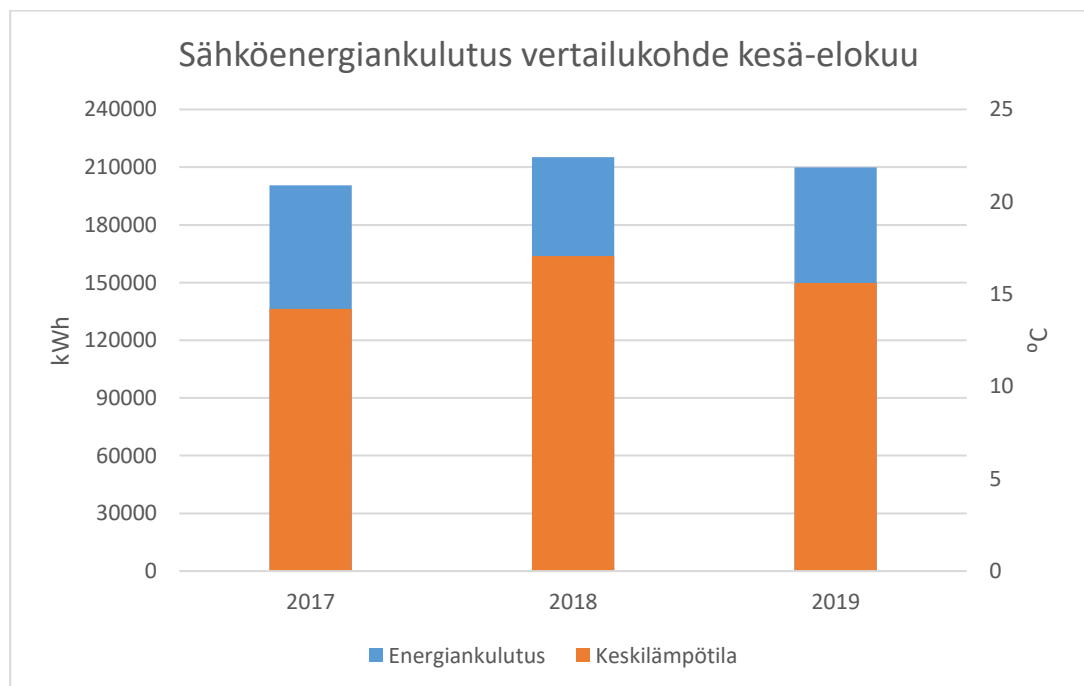
Kokonaisenergian kulutustiedot koostuivat kolmesta tekijästä: rakennukseen valtakunnanverkosta ostetusta energiasta, aurinkosähkövoimalan tuotannosta ja verkkoon myydystä aurinkosähköstä. Verkosta ostetun sähkön ja aurinkosähkövoimalan tuotannon tiedot olivat tuntitason tietoja, mutta verkkoon myydystä aurinkosähköstä tiedot olivat vain kuukausitasolla. Tämän takia tarkkaa tuntitason vertailua aurinkosähkövoimalan käyttöönoton jälkeiseltä ajalta ei saatu tehtyä, vaan vertailu jouduttiin tekemään vain kuukausitasolla. Rakennuksessa käytetty sähkön osuus saatiin laskettua lisäämällä valtakunnanverkosta ostettuun energiaan aurinkosähkövoimalan tuotto ja vähentämällä siitä verkkoon myyty aurinkosähkö.

Kulutustietojen vertailuajaksi valittiin kesä-elokuu. Valinta perustuu oletukseen ajasta, jolloin kiinteistöä joudutaan jäähdyttämään. Sähköenergiankulutuksen vertailun tueksi otettiin Ilmatieteenlaitokseen mittaamat ilman lämpötilatiedot lähimmiltä havaintoasemilta.

Sähköenergian kulutustietojen vertailussa on nähtävissä pudotus energiankulutuksessa aurinkopaneeliasennuksen jälkeen ilman samanlaista pudotusta keskilämpötilassa. Vertailukohteessa vastaavaa pudotusta ei ole havaittavissa. Kohteesta ei ole kuitenkaan tiedossa mahdolliset muut tehdyt energiansäästötoimenpiteet, jotka voivat aiheuttaa energiankulutuksen vähentymisen.



Kuvio 8 Sähköenergiankulutus



Kuvio 9 Vertailukohteen sähköenergiankulutus

## 7.2 Ilmatieteenlaitoksen aineistot

Työn toteutuksessa käytettiin tukena ilmatieteenlaitokselta saatavia säätietoja. Tärkeimpänä käytettynä tietona oli ilman lämpötila, josta oli saatavilla sekä tiedot tunnin ja 10 minuutin välein. Energiankulutustietojen vertailun apuna käytettiin tunnin välein saatavia tietoja, sillä myös suurin osa energiankulutustiedoista oli tuntitasolla. Ilman lämpötilatietoja käytettiin myös katoilla tehtyjen lämpötilamittauksien oikeellisuuden tarkistuksessa. Tässä tilanteessa käytettiin 10 minuutin välein mitattuja ilman lämpötiloja. Ilmatieteenlaitoksen lämpötilanmittaus suoritetaan kahden metrin korkeudelta maanpinnasta, suojasta suoralta auringonsäteilyltä ja vesisateelta. Ilmatieteenlaitos mittaa myös auringonsäteilyä. Säteilyä mittaavaa havaintoasemaa ei kuitenkaan ollut riittävän lähellä ensimmäistä lämpötilamittauskohdetta, joten auringon säteilytehoa käytettiin vertailuarvona vain toisen mittauskerran tuloksia analysoitaessa. Vertailuarvona käytettiin kokonaissäteilyä.

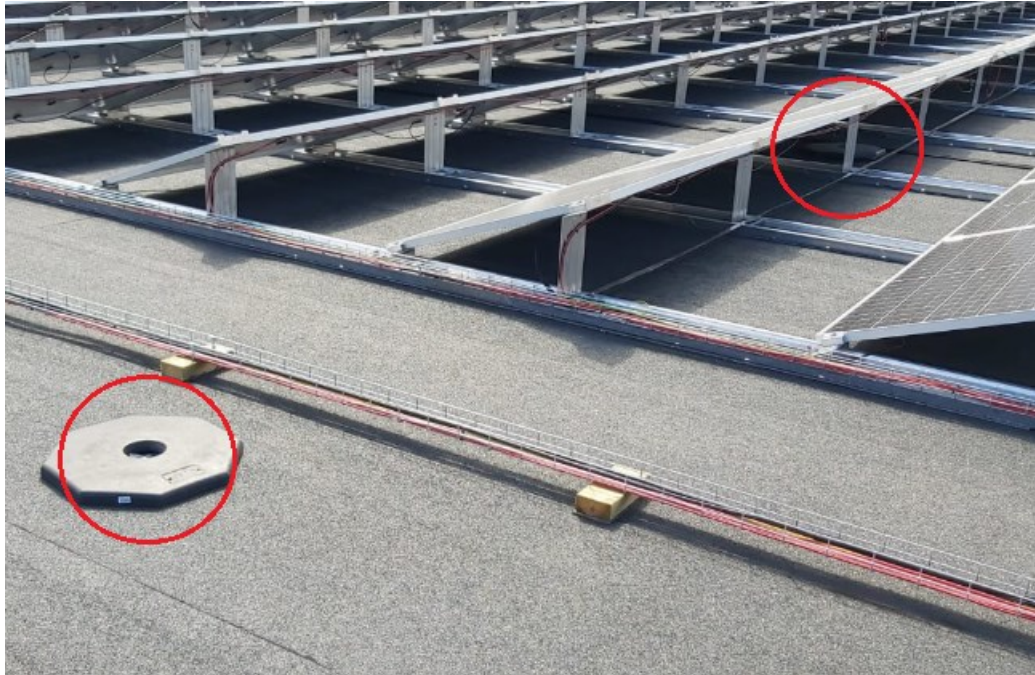
Lämpötilatiedot ladattiin lähimmältä saatavilla olevalta havaintoasemalta kesäkuun alusta elokuun loppuun jokaiselta vertailuvuodelta. Näistä tiedoista laskettiin joka vuodelle kesäajan lämpötilojen keskiarvo, jota käytettiin vertailuarvona energiankulutusten tarkastelussa.

# 8 Lämpötilat

## 8.1 Lämpötilamittaukset

Lämmönjohtumisen laskelmille lähtötiedoiksi tarvittiin tiedot lämpötiloista aurinkopaneelin alta varjosta ja auringonpaisteelle alttiista katon kohdasta (kuvio 10). Mittaukset suoritettiin käyttämällä kahta lämpötilatallenninta, joista toinen asetettiin paneelin alle varjoon ja toinen katon kohtaan, johon ei osu varjostuksia. Tallentimet olivat mittauksen ajan suojapussissa kastumisen ehkäisemiseksi. Ensimmäisten lämpötilan mittausväliksi asetettiin 5 minuuttia ja mittapisteiden määräksi 4000. Tällöin mittausajaksi muodostui 13 päivää ja 21 tuntia. Ensimmäiset mittaukset suoritettiin

Tampereella sijaitsevan rakennuksen katolla 24.4.- 8.5.2020 välisenä aikana. Rakennuksen kattopintamateriaalina oli musta bitumikermi.

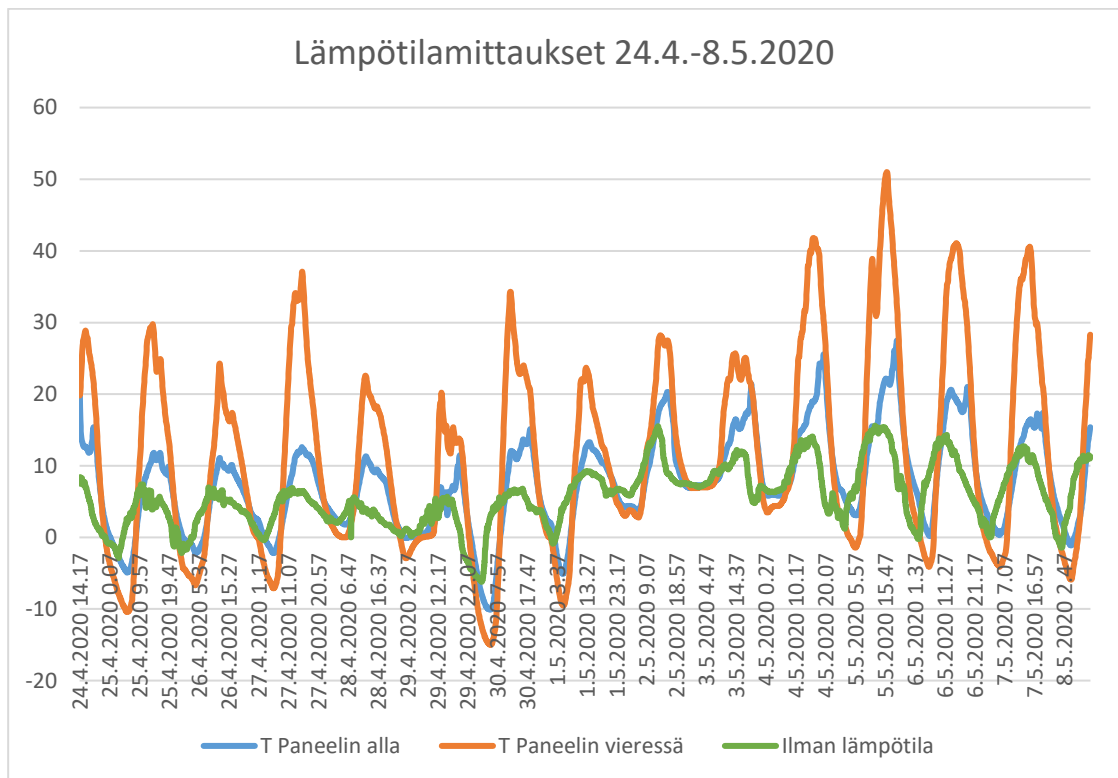


Kuvio 10 Lämpötilamittaukset

Ensimmäisten lämpötilamittausten suurin ja pienin arvo mitattiin paneelikentän vieressä sijainneella lämpötilatallentimella. Matalin mitattu lämpötila paneelien vieressä oli  $-15,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja suurin  $51,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Paneelin alla sijainneella lämpötilatallentimella matalin lämpötila oli  $-10,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja suurin  $27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Suurin mitattu lämpötilojen erotus oli  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Mitatuista lämpötiloista voidaan heti nähdä paneelin alla varjossa olevan selvästi matalampi lämpötila kuin suorassa auringonpaisteessa katolla. Samoin voidaan huomata paneelin alla olevan lämpötilanvaihtelun olevan pienempää ja hitaampaa kuin paneelin vieressä. Kuviossa 11 on esitetty lämpötilamittaukset viivakaaviona. Mitattujen lämpötilojen lisäksi kaavion on otettu vertailuarvoksi ilmatieteenlaitoksen lähimmän havaintoaseman mittaama ilman lämpötila. Sen avulla voidaan nähdä, että katon pintalämpötila nousee auringonpaisteessa huomattavasti korkeammaksi kuin ilman lämpötila.





Kuvio 11 Lämpötilamittaukset 24.4.-8.5

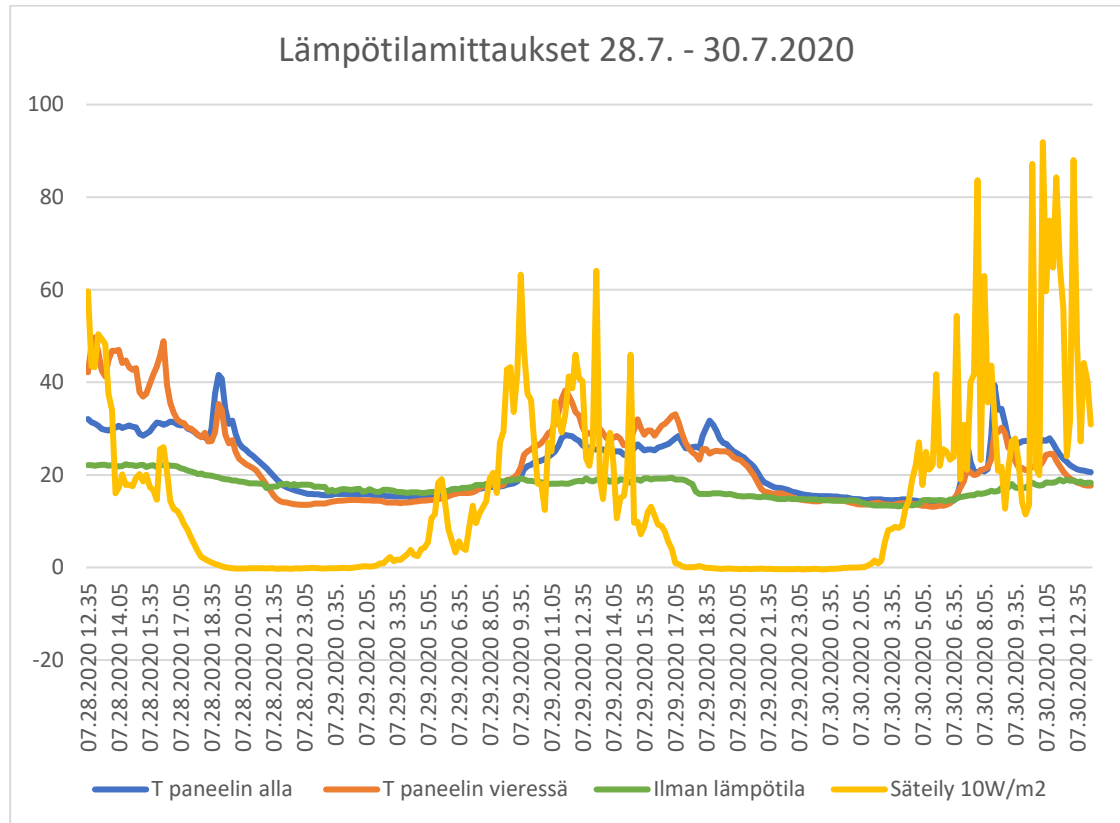
Toiset lämpötilamittaukset suoritettiin 28.7.–30.7. Pohjois-Savossa sijaitsevan myymäläkiinteistön katolla aurinkopaneeliasennusten aikana. Näihin mittauksiin saatiin vertailuarvoksi myös auringon kokonaissäteily lähellä sijaitsevalta mittausasemalta. Kokonaissäteilyn mittayksikkönä on graafissa  $10\text{W}/\text{m}^2$ . Normaalisti säteilyä mitataan yksiköllä  $\text{W}/\text{m}^2$ . Graafissa käytettiin kymmenkertaista yksikköä kuvion skaalauksen helpottamiseksi. (Kuvio 12)

Suurin mitattu lämpötilaero toisella mittauskerralla oli  $18.6\text{ }^\circ\text{C}$ . Päiväsaikaan klo. 10.00–18.00 toisella mittauskerralla mitatut lämpötilaerot olivat keskimäärin n.  $5\text{ }^\circ\text{C}$ .

Toisella mittauskerralla paneelin alla oleva lämpötilatallennin oli lähempänä paneelientän reunaa, vain n. 20 cm paneelin alla. Tämä selittää osaltaan toisella mittauskerralla mitattuja pienempiä lämpötilaeroja. Toinen selittävä tekijä on korkeampi ilman lämpötila. Näistä mittauksista nähdään myös auringonsäteilyn vaikutus katon lämpötiloihin. Erityisenä huomiona näissä mittauksissa on lämpötilojen käyttäytymisen auringonsäteilyn heikentyessä. Ilman lämpötilan laskiessa lämpötila paneelin alla

nousee hetkellisesti korkeammaksi kuin paneelikentän viereisen katon lämpötila.

Tämä ilmiö voi johtua paneelin alla olevan lämpötilatallentimen sijoittelusta.



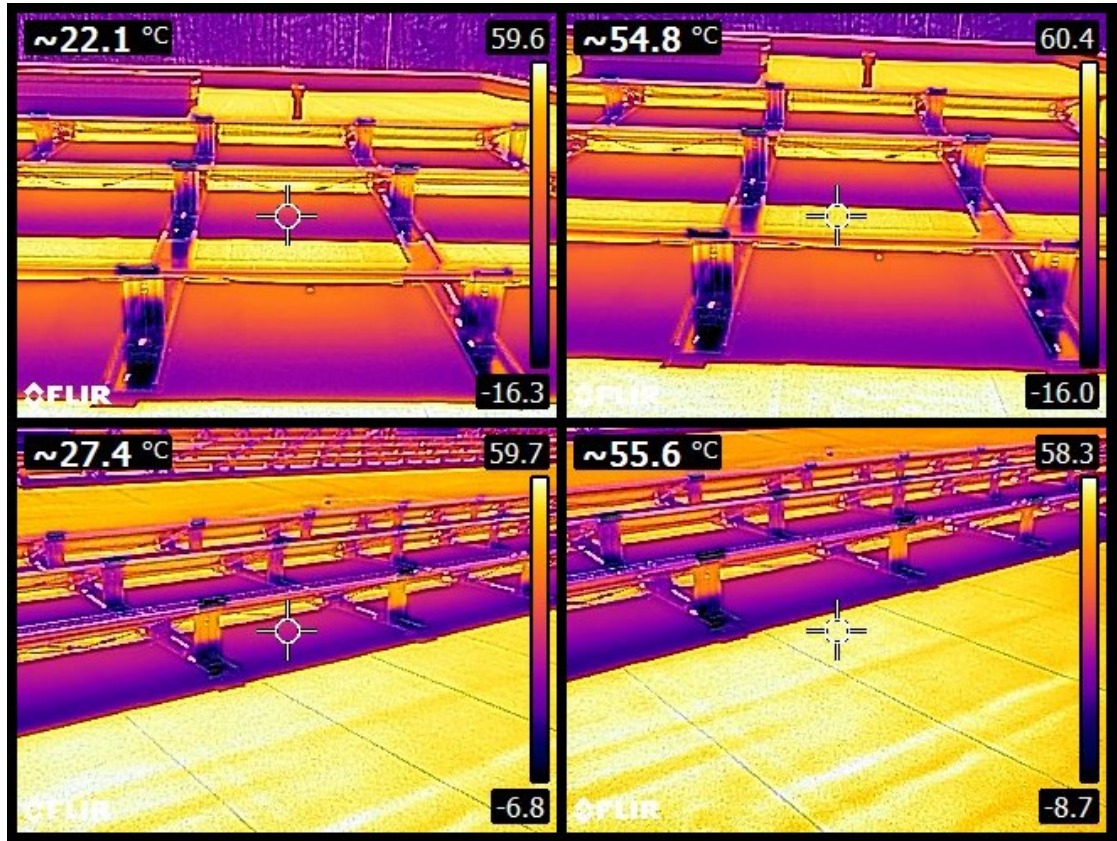
Kuvio 12 Lämpötilamittaukset 28.7.–30.7.

Työn laskuihin valittiin käytettäväksi ensimmäisten mittausten tulokset lämpötilatallentimien paremmasta sijoittelusta johtuen. Jälkimmäisten mittausten tulokset huomioitiin kuitenkin työn luotettavuuden arvioinnissa.

## 8.2 Lämpökamerakuvaukset

Lämpökamerakuvaukset suoritettiin 22.5.2020 Pirkanmaan pohjoisosassa sijaitsevan myymäläkiinteistön katolla. Kuvaushetkellä sää oli aurinkoinen ja ilman lämpötila noin 15 °C. Lämpökamerakuvissa näkyy selvästi paneelin alaisen varjoisen kattopin-  
nan ja paneelin viereisen auringonpaisteessa olevan kattopin-  
nan välillä vallitseva

lämpötilaero (Kuvio 13). Kuvauksia suoritettiin useasta katon kohdasta mitaten lämpötila paneelin alta varjosta ja paneelin vierestä noin 20 cm päästä varjon reunasta. Lämpökameralla mitatut lämpötilaerot olivat keskimäärin noin 30 °C.



Kuvio 13 Lämpökamerakuvaukset

## 9 Laskut

Työn toteutukseen kuului kulutustietojen vertailun lisäksi teoreettiset laskelmat lämmönsiirtymisestä kattorakenteissa. Laskelmissa käytettiin kulutustietojen vertailussa käytettyjen kohteiden rakennetiedoista saatuja valmiiksi laskettuja U-arvoja. U-arvojen lisäksi laskuissa käytettiin lähtötietoina Solarigon asentamien aurinkosähkövoimaloiden layout-kuvista saatuja katon ja paneelikentän pinta-aloja. Solarigon tasakattoasennuksissa aurinkopaneelit asennetaan tyypillisesti 20 asteen kulmaan. Käytössä olevalla Soltop-asennusjärjestelmällä 20 asteen kulmaan asennetun 992 mm leveän aurinkopaneelin telineen etu- ja takajalan väli on noin 87 cm. Varjoon jäävä

pinta-ala laskettiin kaavalla: paneelien lukumäärä \* paneelin pitkän sivun pituus \* paneelin etu- ja takajalan väli. Tällä kaavalla saatiin laskettua paneelien alla aina varjossa oleva alue auringon korkeudesta riippumatta. Varjossa oleva alue on oikeasti aina hieman suurempi johtuen auringon korkeuden muuttumisesta vuorokauden- ja vuodenajan mukaan. Tällainen laskentatapa yksinkertaistaa laskuja ja pienentää virheen mahdollisuutta, mutta myös pienentää laskennallisen saadun jäähdytysenergian määrää.

Katon lämpökuorman laskemiseen käytettiin aiemmin esitettyä kaavaa 6. Lämpökuorma laskettiin kuudelle kohteelle, joista kohde 3 oli myös energiankulutustietojen vertailun kohteena. Kohdetta 3 käytetään esimerkkinä esitetyissä laskuissa. Muiden kohteiden tiedot löytyvät liitteestä 1. Taulukossa 3 on esitetty kohteesta 3 saadut tärkeimmät lähtötiedot, joilla katon lämpökuormaa laskettiin.

Taulukko 3 Kohde 3 lähtötiedot

Kohde 3	
Katon pinta-ala	3514 m <sup>2</sup>
Katon U-arvo	0,15 W/m <sup>2</sup> K
Aurinkopaneelien lukumäärä	441 kpl

Lämpötilan arvoina käytettiin kohteen käyttäjältä saatua sisälämpötilan tavoitearvoa 23°C ja lämpötilamittauksista saatuja katon pintalämpötilan arvoja. Arvoina käytettiin ensimmäisten lämpötilamittausten ja lämpökamerakuvausten perusteella valittuja arvoja. Toisen lämpötilamittauksen arvot jätettiin pois tallentimen kokeellisen sijainnin takia. Käytetyt pintalämpötilojen arvot olivat:

Paneelin vieressä: 40°C

Paneelin alla: 25°C

Lämpökuormat laskettiin käyttämällä pelkkää johtumislämpöä. Laskut suoritettiin ideaalitalanteen näkökulmasta, jossa kaikki lämpö kattopinnasta siirtyy sisälle. Tuulen konvektion vaikutusta kattopintaan ei huomioitu.

Ensimmäisenä laskettiin koko katon lämpökuorma tilanteessa, jossa paneeleja ei ole asennettu. Tämä lämpökuorma laskettiin koko katon pinta-alaa ja paneelikentän vie-

restä mitattua lämpötilaa käyttäen. Sen jälkeen laskettiin varjossa olevan alueen lämpökuorma ja varjostumattoman alueen lämpökuorma tilanteessa, jossa paneelit on asennettu. Näiden summa vähennettiin paneelittoman katon lämpökuormasta. Tällä saatiin laskettua erotus paneelittoman katon ja katon, jolle on asennettu aurinkopaneelit välille.

Kohteen 3 lähtötiedoilla laskettuna koko katon lämpökuorma ilman paneeleja ideaalitulanteessa, jossa kaikki lämpö katosta siirtyy sisälle, 40 °C:n katon pintalämpötilalla olisi n. 8,9 kW. Lisäämällä katolle 441 aurinkopaneelia saadaan kattopinnasta varjostettua 633 m<sup>2</sup>. Tämä on 18 % katon pinta-alasta. Tällä varjostuksella lämpötilan ollessa paneelin alla 25°C koko katon lämpökuorma olisi n. 7,5 kW. Täten lämpökuorman alenema olisi 1,4 kW. Suhteessa tämä on n. 16 % vähemmän kuin ilman paneeleja.

Näin suurin lämpötilaero voi aurinkoisena päivänä olla mittausten mukaan kuuden tunnin ajan. Ilmatieteenlaitoksen helletilastojen mukaan Suomessa mitataan keskimäärin 37 hellepäivää kesässä. Jos laskettu 1,4 kW:n lämpöteho siirtyisi jokaisena hellepäivänä kuuden tunnin ajan tekisi se 310 kWh kesässä. Teoriassa tämän verran jäädytysenergiaa voitaisiin säästää vertailukohteessa aurinkopaneelien varjostuksesta johtuen. 0,14 snt/kWh sähkön kokonaishinnalla laskettuna tämä tekisi rahallista säästöä 43 €/a.

Muissa kohteissa saadut lämpökuorman alenemat olivat välillä 0,85 kW – 3,76 kW. Esimerkkinä käytettynä kohde osuu suunnilleen näiden tulosten puoleenväliin, joten siitä saatuja tuloksia voidaan pitää edustavina ja vertailukelpoisina. Suurimmalla lasketulla alenemalla laskettuna saadut taloudelliset säästöt olisivat 116 €/a.

Laskujen tuloksista voidaan huomioda, että lämpötilan ollessa paneelin alla suurempi kuin sisälämpötila, ei saatu lämpökuorman väheneminen ole ikinä suurempi kuin varjossa olevan katon ja koko katon pinta-alojen suhde. Eli jos lämpötila paneelin alla on sama kuin sisälämpötila ja katosta on paneelien peitossa 20 %, on suurin mahdollinen alenema lämpökuormassa 20 %. Tätä raja-arvoa aletaan lähestymään jo n. 15 °C:n lämpötilaerolla. Sitä suuremmilla lämpötilaeroilla suhteellisen säästön osuus on pienempi. Jos lämpötila pysyy paneelin alla matalampana kuin sisälämpö-

tila, päästään suurempiin suhteellisiin lämpökuorman alenemiin. Tämä huomio kertoo myös laskennassa käytettyjen kaavojen luotettavuudesta, sillä jos tulokseksi saatu lämpökuorman alenema olisi suhteessa suurempi kuin varjossa oleva pinta-ala, olisi laskentakaavojen oikeellisuutta tarkistettava.

## 10 Tulokset

Laskuista saatiin esimerkkikohteelle laskettua 310 kWh:n jäähdytysenergiansäästö aurinkopaneelien varjostuksesta johtuen. Rakennuksen kokonaiskulutukseen verrattuna se on melko vähän. Prosentuaalisesti se on kuitenkin melko paljon koko katon lämpökuormasta. Taloudelliset säästöt eivät näiden laskujen perusteella rakennuksen mittakaavassa kuitenkaan ole niin merkittäviä, että siitä olisi markkinointihyötyä toimeksiantajalle.

Energiankulutustietojen vertailussa huomattiin rakennuksen kesäaikaisen kokonais-sähkönkulutuksen vähentyneen 31849 kWh aurinkopaneeliasennuksen jälkeen. Tämä on 21 % pudotus edelliseen kesään verrattuna. Tämän energiamäärän säästö olisi jo taloudellisestikin merkittävä. Pudotus voi kuitenkin johtua muista tehdyistä energiansäästötoimenpiteistä, joista ei saatu tietoja, joten tämän vertailun perusteella ei todellista säästöä voida luotettavasti arvioida.

Saadut säästöt jäähdytysenergiassa suhteessa muuhun rakennukseen ovat riippuvaisia rakennuksen jäähdytyskuorman jakautumisesta yläpohjan ja muiden rakennosien välille. Erilaiset kiinteistöt eri käyttötarkoituksineen ovat kuitenkin yksilöitä jäähdytyskuorman jakautumisen suhteen. Jäähdytyskuorman jakautumisesta Suomen rakentamistavan mukaisista rakennuksista ei löytynyt riittävästi luotettavaa tietoa, jotta suhteelliset säästöt kokonaisjäähdytysenergiassa olisi saatu laskettua. Myös laskuista saadut hyvin pienet säästöt johtivat siihen, että suhteellisia säästöjä ei lähdetty tarkemmin selvittämään.

Työn tärkeimpinä tuloksina voidaan pitää saatuja mittaustuloksia. Mittaustuloksista käy selvästi ilmi, että lämpötilat aurinkopaneelien alla pysyvät huomattavasti muuta kattopintaa alhaisempina. Mittaukset suoritettiin kahdella eri tavalla ja useana eri ajankohtajana. Molemmilla mittaustavoilla saatiin samanlaisia tuloksia. Tämä lisää

mittaustulosten luotettavuutta. Mittaustuloksiin pientä ristiriitaa aiheutti jälkimmäisten mittausten parin tunnin mittaiset ajanjaksot, joina paneelin alla vallitseva lämpötila oli korkeampi kuin paneelin vieressä. Tämän aiheuttajaksi epäiltiin lämpötilalähtötilan sijaintia. Toisenlaisella laskentatavalla voitaisiin saada näillä mittaustuloksilla laskettua suuremmat teoreettiset säästöt, joten toimeksiantaja voi halutessaan hyödyntää niitä markkinoinnissaan. Esimerkiksi varjossa oleva pinta-ala laskettiin yksinkertaistetulla kaavalla, joka kertoo vain aina varmasti varjossa olevan alan. Todellisuudessa ala vaihtelee auringon kulman mukaan ja on suurempi, joten myös saadut säästöt ovat hieman suuremmat.

## 11 Pohdinta

Työn toteuttamista vaikeutti lähtötietojen saamisen vaikeus. Koko työn tutkimusasetelman lähtökohtana oli virheellinen tieto jäähdystysenergianmittausten saatavuudesta. Tämän takia lähestymistapaa työhön jouduttiin muuttamaan kesken tutkimuksen. Uusi tutkimustapa oli haastavampi toteuttaa ja epäluotettavampi. Tehdyissä laskuissa jouduttiin tekemään melko paljon oletuksia ja yksinkertaistuksia. Lämpökuorman laskemiseen käytettiin pelkästään johtumislämpöä, eikä laskuissa huomioitu esimerkiksi tuulen vaikutusta katon jäähtymiseen. Tämä aiheuttaa suuremman virhemarginaalin laskujen tuloksiin. Myös kulutustietojen vertailun luotettavuus joudutaan kyseenalaistamaan huonoista lähtötiedoista ja liian lyhyistä mittausjaksoista johtuen. Mahdolliset muut toteutetut energiansäästötoimenpiteet saattoivat myös vaikuttaa tuloksiin.

Työllä saatiin kuitenkin lupaavia tuloksia mahdollisesta jäähdystystarpeen vähenemisestä aurinkopaneelien varjostuksesta johtuen. Vaikka energiankulutustietojen vertailun tulokset jouduttiin puutteellisten lähtötietojen takia toteamaan epäluotettaviksi, jättivät ne auki mahdollisuuden tutkia asiaa lisää. Laskuista saadut tulokset voisivat muuttua toisenlaisella laskentatavalla.

Tulosten perusteella voidaan ehdottaa jatkotutkimusten tekemistä tarkempia energiankulutustietoja vertailemalla. Paras tapa tutkia ilmiötä olisi vertailla kahden saman-

laisen lähellä toisiaan sijaitsevan rakennuksen jäähdytysenergian kulutusta, joista toisen katolla on aurinkopaneelit ja toisen ei. Tällä voitaisiin poistaa sääolosuhteiden vaikutus mittaustuloksiin. Tällainen tilanne on kuitenkin hyvin vaikeasti toteutettavissa. Toinen tapa tutkia on mitata jäähdytysenergian kulutusta kohteesta, johon vasta suunnitellaan aurinkovoimalan asentamista. Voimalan asentamisen jälkeen voidaan jatkaa mittauksia ja korreloida mittaustuloksia kesäkuukausien lämpötilaan. Tämä tutkimustapa vaatii useamman vuoden mittaustulokset. Paras kohde tämän toteuttamiseen olisi rakennus, jossa jäähdytysenergiaa mitataan valmiiksi ja johon ei tehdä aurinkopaneelien lisäksi muita energiansäästötoimenpiteitä.

Toinen jatkotutkimusta vaativa asia on paneelien vaikutus lämmitystarpeeseen. Keväällä suoritetuissa mittauksissa havaittiin yöllä ilman lämpötilan ollessa pakkasella lämpötilan paneelien alla olevan lämpimämpi kuin paneelin vieressä. Tämä voi johtaa säästöihin lämmitysenergiassa. Toisaalta ilmiöllä voi olla myös negatiivinen vaikutus energiansäästöön, jos paneelit ehkäisevät auringonsäteilyn pääsyn kattopintaan kevään lämmityskaudella. Luotettavan tiedon saamiseksi olisi ilmiötä tutkittava ympäri- vuotisesti lämpötiloja mittaamalla ja lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutustietoja seuraamalla.



## Lähteet

A 1009/2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdesta. Annettu 20.12.2017. Viitattu 9.4.2020. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171009>

Airaksinen, M., Vainio, T., Vesanen, T., Ala-Kotila, P. 2015. Jäähdytysliiketoiminnan markkinat. Viitattu 20.4.2020. [https://energia.fi/files/399/Rakennusten\\_jaahdytys-markkinat\\_18-12-2015.pdf](https://energia.fi/files/399/Rakennusten_jaahdytys-markkinat_18-12-2015.pdf)

Allmax plus framed 60-cell module. 2017. Trinasolar-esite. Viitattu 17.4.2020. [https://static.trinasolar.com/sites/default/files/PS-M-0421%20Datasheet\\_Allmax%20M%20Plus\\_US\\_Apr2018\\_C.pdf](https://static.trinasolar.com/sites/default/files/PS-M-0421%20Datasheet_Allmax%20M%20Plus_US_Apr2018_C.pdf)

Auringonsäteilyn määrä Suomessa. 2019. Tiedot motivan sivuilla. Viitattu 30.3.2020. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon\\_perusteet/auringonsateilyn\\_maara\\_suomessa](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa)

Auringosta sähköä. 2017. Artikkelit Motivan sivuilla. Viitattu 21.4.2020. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon\\_perusteet/auringosta\\_sahkoa](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringosta_sahkoa)

Aurinkosuojaratkaisut. 2020. Tiedot energiatehokas koti -hankkeen sivuilla. Viitattu 30.3.2020. [https://www.energiatehokaskoti.fi/perustietoa/miten\\_tehdaan\\_energiatehokas\\_koti/aurinkosuojaratkaisut](https://www.energiatehokaskoti.fi/perustietoa/miten_tehdaan_energiatehokas_koti/aurinkosuojaratkaisut)

Aurinkosuojaus. 2020. Tiedot energiatehokas koti -hankkeen sivuilla. Viitattu 30.3.2020. [https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/rakennuksen\\_suunnittelu/aurinkosuojaus](https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/rakennuksen_suunnittelu/aurinkosuojaus)

Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti lisääntyi 82 % vuodessa. 2019. Tiedote energiaviraston www-sivuilla. Viitattu 16.3.2020. [https://energiavirasto.fi/tiedote/-/aset\\_publisher/aurinkosahkon-tuotantokapasiteetti-lisaantyi-82-vuodessa](https://energiavirasto.fi/tiedote/-/aset_publisher/aurinkosahkon-tuotantokapasiteetti-lisaantyi-82-vuodessa)

Aurinkosähköteknologiat. 2019. Artikkelin Motivan sivuilla. Viitattu 21.4.2020.

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat)

Cengel, Y., Ghajar, A. 2015. Heat and Mass Transfer, Fundamentals & Applications. New York: McGraw-Hill Education.

Country and regional maps. 2017. Viitattu 15.4.2020. [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_download/map\\_index\\_c.html#!](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index_c.html#!)

Dominguez, A., Kleissl, J., Luvall, J. 2011. Effects of Solar Photovoltaic Panels on Roof Heat Transfer. Viitattu 21.4.2020. [https://www.researchgate.net/publication/251496714\\_Effects\\_of\\_solar\\_photovoltaic\\_panels\\_on\\_roof\\_heat\\_transfer](https://www.researchgate.net/publication/251496714_Effects_of_solar_photovoltaic_panels_on_roof_heat_transfer)

Duraclick Eco Mounting System Assembly-Instructions. N.d. Soltopin duraclick-telineen asennusohje. Viitattu 29.4.2020.

Energiatuki. 2020. Ohjeet Business Finlandin sivuilla. Viitattu 30.3.2020.

<https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/energiatuki/>

Havaintojen lataus. N.d. Säätiiedot Ilmatieteenlaitoksen sivuilla. Viitattu 20.4.2020

<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>

Helletilastot. n.d. Tiedot ilmatieteenlaitoksen sivuilta. Viitattu 15.7.2020

<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/helletilastot>

Hemilä, S., Utriainen, J. 1991. Lämpöoppi, Suomen fyysikkoseuran julkaisuja 3. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino.

Honey module TSM-PD05. 2017. Trinasolar-esite. Viitattu 17.4.2020. [https://static.trinasolar.com/sites/default/files/EN\\_TSM\\_PD05\\_datasheet\\_B\\_2017\\_web.pdf](https://static.trinasolar.com/sites/default/files/EN_TSM_PD05_datasheet_B_2017_web.pdf)

Kananen, J. 2010. Opinnäytetyön kirjoittamisen käytännön opas. Tampereen yliopistopaino.

Masson, G., Kaizuka, I. 2019. Trends in photovoltaic applications 2019. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/02/5319-iea-pvps-report-2019-08-lr.pdf>

Mattila, V. 2015. Viihtyisä työympäristö, ilmastointi ja jäähdytys. Motiva Oy.

[https://www.motiva.fi/files/11023/Viihtyisa\\_tyoymparisto\\_Ilmastointi\\_ja\\_jaahdytys\\_2016.pdf](https://www.motiva.fi/files/11023/Viihtyisa_tyoymparisto_Ilmastointi_ja_jaahdytys_2016.pdf)

Sandberg, E. 2014. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Talotekniikka-Julkaisut Oy

Sandberg, E. 2016. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Talotekniikka-Julkaisut Oy

Sähkönpien tuotanto kovassa kasvussa - Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti 2,5 -kertaistui vuodessa. 2018. Tiedote energiaviraston www-sivuilla. Viitattu 16.3.2020.

[https://energiavirasto.fi/tiedote/-/asset\\_publisher/sahkonpien\\_tuotanto\\_kovassa\\_kasvussa\\_aurinkosahkon\\_tuotantokapasiteetti\\_2\\_5\\_kertaistui\\_vuodes-1](https://energiavirasto.fi/tiedote/-/asset_publisher/sahkonpien_tuotanto_kovassa_kasvussa_aurinkosahkon_tuotantokapasiteetti_2_5_kertaistui_vuodes-1)

Tahkokorpi, M. 2016. Aurinkoenergia Suomessa. Helsinki: Into kustannus.

Vairinen, V. Blogisarja osa 4: Suuret aurinkosähköpuistot, missä ne viipyvät? 2020.

Blogi-kirjoitus Solarigon www-sivuilla. Viitattu 16.3.2020. <https://www.solarigo.fi/post/blogisarja-osa-4-suuret-aurinkos%C3%A4hk%C3%B6puistot-miss%C3%A4-ne-viipyv%C3%A4t>

Valtanen, E. 2016. Tekniikan taulukkokirja. Genesis-kirjat Oy.

## Liitteet

## Liite 1 Laskujen tuloksia

Kohde	Yläpohjan U-arvo W/m <sup>2</sup> K	Yläpohjan pinta-ala m <sup>2</sup>	Paneelien lukumäärä	Paneelien alle varjoon jäävä alue m <sup>2</sup>	Varjossa olevan alueen osuus yläpohjan pinta-alaasta	Koko katon lämpökuorma ilman paneeleja kW	Koko katon lämpökuorma paneelien kanssa kW	Erotus kW	Erotus %
Kohde 1	0,09	2981	456	654,59	22 %	4,56	3,68	0,88	19,38 %
Kohde 2	0,09	2982	441	633,06	21 %	4,56	3,71	0,85	18,73 %
Kohde 3	0,15	3514	441	633,06	18 %	8,96	7,54	1,42	15,90 %
Kohde 4	0,15	4757	966	1386,69	29 %	12,13	9,01	3,12	25,72 %
Kohde 5	0,15	4172	882	1266,11	30 %	10,64	7,79	2,85	26,78 %
Kohde 6	0,16	6862	1092	1567,57	23 %	18,66	14,90	3,76	20,16 %